

分类号： U461.91

密级： 公开

UDC 注1： 621

编号： 10299z1203045



江蘇大學

JIANGSU UNIVERSITY

专业硕士学位论文

PROFESSIONAL MASTER'S DISSERTATION



论文题目： 基于多目标稳健性优化方法的
SUV 车身结构轻量化设计

学科专业： 机械工程

作者姓名： 苏占龙

指导教师： 王霄

答辩日期： 2015年06月08日

独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已注明引用的内容以外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果，也不包含为获得江苏大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

学位论文版权使用授权书

江苏大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致,允许论文被查阅和借阅,同时授权中国科学技术信息研究所将本论文编入《中国学位论文全文数据库》并向社会提供查询,授权中国学术期刊(光盘版)电子杂志社将本论文编入《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》并向社会提供查询。论文的公布(包括刊登)授权江苏大学研究生处办理。

本学位论文属于不保密 。

学位论文作者签名:

年 月 日

指导教师签名:

年 月 日

基于多目标稳健性优化方法的 SUV 车身结构轻量化设计

**Design on SUV Body Structure Lightweight Based on
Multi-objective Robust Optimization Method**

专业名称 机 械 工 程

指导教师 王 霄

姓 名 苏 占 龙

江 苏 大 学

2015 年 06 日

摘 要

为实现车身轻量化,改善汽车安全性和提高稳健性,本文以某企业某新 SUV 车型为研究对象,开发了针对侧面碰撞前处理问题的流程自动化系统,对汽车车门刚度、车门模态、侧碰安全多方面的性能进行了有限元分析,确定了初始设计性能;针对侧面碰撞部分测量点侵入量、侵入速度过大的问题,结合车身结构轻量化的需要,提出了基于多目标稳健性优化方法的车身结构轻量化设计方案。

(1)为解决汽车侧面碰撞分析前处理过程的重复性工作多,工作繁琐,需要设置的参数过多的问题,结合 TCL/TK 语言与 Process Manager 工具开发了侧面碰撞流程自动化系统。

(2)利用流程自动化系统建立了整车有限元模型,进行了整车侧面碰撞、车门模态、车门刚度三个方面的有限元分析。分析结果表明侧碰安全性不符合设计要求,车门模态性能、刚度性能符合设计要求,存在较大的轻量化设计空间;并确定了通过提高 B 柱、前门、中门的强度改善碰撞安全性能的方案。

(3)提出了基于多目标稳健性优化方法的车身结构轻量化的方案。

首先对整车模型进行简化,初步选择 16 组设计变量,并采用参数实验设计方法筛选出 10 组灵敏度较高的变量,利用最优拉丁超立方试验设计方法抽取试验样本,建立了质量、刚度、模态、内能、B 柱与车门测量点的侵入量、侵入速度等响应的近似模型。

然后利用近似模型,分别采用 NSGA-II、NCGA 和 AMGA 三种多目标遗传算法,对整车进行了确定性优化,得到三组 Pareto 非劣解集;分别选取三组确定性优化解,利用蒙特卡洛抽样的方式对其进行了可靠性分析,结果三种算法的可靠度均不能达到质量水平的要求,需要进行稳健性优化。通过三种优化算法的 Pareto 解集与可靠度分析结果的对比,选择了 AMGA 算法作为稳健性优化的优化算法。

最终以 AMGA 确定性优化解作为初始值,结合蒙特卡洛抽样技术与 AMGA 算法以质量最小、内能最大及它们的标准差最小为目标进行了多目标稳健性优化。结果表明,稳健性优化后的侧面碰撞安全、车门模态、车门刚度三个方面的可靠度,与确定性优化相比由原来的 64.8%提升到了 100%,稳健性得到改善。

获得各目标函数的 Pareto 非劣解集, 选取一组代入到有限元模型中进行仿真验证, 结果发现车身结构设计变量总质量由原来的 60.845kg 下降到了 53.992kg, 质量减轻了 6.853kg, 降幅为 11.263%, 实现了车身的轻量化; 内能吸收增加了 0.229kJ, 略有提升; B 柱与车门关键点的侵入量和侵入速度整体下降, 侵入量最大降幅达到了 5.465%, 侵入速度最大降幅达到了 8.218%, 侧面碰撞安全性能得到改善。

关键词: 结构轻量化, 侧面碰撞, 多目标优化, 遗传算法, 稳健性设计

ABSTRACT

To achieve lightweight of vehicle body, improve vehicle safety, enhance the robustness, in this thesis an enterprise new SUV models is taken as the research object, the process automation system is developed to solve the problem of side impact pre-processing, the finite element analysis of multiple performance, door stiffness, door mode and side impact safety, is made, the initial design performance is determined, then, aimed at the problem that side impact intrusion and intrusion velocity of some measurement points are too large, combined with the need of body structure lightweight, a lightweight design project of body structure based on multi-objective robust optimization is proposed.

(1) In order to solve the difficulty that the pre-processing of vehicle side impact analysis is repetitive and tedious, parameters need to set is too much, the side impact process automation system is developed, combined with TCL/TK language and Process Manager.

(2) The vehicle finite element model is created based on the process automation system. The finite element analysis of three aspects, vehicle side impact, door mode and door stiffness, is done. Analysis results show that side crashworthiness does not meet design requirements; door mode and door stiffness properties conform to the design requirement, for a large lightweight space. Then identify the scheme that improved crash safety performance by raising the strength of the B-pillar, the front doors, and the middle doors' structure.

(3) The scheme of body structure lightweight design based on multi-objective robust optimization method is offered.

Firstly, the vehicle model is simplified, 16 sets of preliminary design variables are chosen; 10 high sensitivity variables are selected with parameter design of experiment(DOE) method. Then extract samples by the optimal Latin hypercube experiment design method. The approximation models of the responses of mass, stiffness, modal, internal energy, intrusion and intrusion velocity of measurement

points on B-pillars and doors, are established with the samples.

Secondly, with the approximate models, respectively the NSGA-II, NCGA and AMGA three genetic algorithm is used to do the deterministic optimization. Finally get three group Pareto optimal sets, and then select three deterministic optimization solutions of them, respectively; and use the Monte Carlo sampling method to analyze the reliability of them. The results prove that three kinds of algorithm reliability cannot reach the level of quality requirements, and require further robust optimization. Through comparisons of three kinds of optimization algorithm Pareto optimal set and the reliability analysis results, the AMGA is chosen as the optimization algorithm for the robustness optimization.

At last, taking AMGA deterministic optimization solution as the initial value, combined with the Monte Carlo sampling technique and AMGA genetic algorithm, aimed at minimum mass, maximum internal energy and minimum their standard deviation, multi-objective robust optimization is done. Results indicate that the reliability of the three aspects, as side impact safety, vehicle door model and vehicle door stiffness, compared with deterministic optimization, increase from 64.8% to 100%, improving the robustness. Select one available optimized value from the obtained Pareto optimal set, and validate it by the finite element model simulation. The results manifest that body structure total quality of design variables has reduced from 60.845kg to 60.845kg, reduced 6.853 kg, a 11.263% drop, which has realized the lightweight of vehicle body; Internal energy absorbed increased by 0.229 kJ, slightly ascending, the intrusion and intrusion velocity performances of B-pillar and the door keys have been reduced overall, the deepest decline of intrusion is 5.465%, while intrusion velocity is 8.218%, improving the side impact safety performance.

Keywords: Structure lightweight, Side impact, Multi-objective optimization, Genetic algorithm, Robustness design

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题的研究背景与意义	1
1.2 汽车车身轻量化设计研究现状	2
1.2.1 使用高新轻质材料实现轻量化的研究现状	2
1.2.2 应用先进加工制造工艺实现轻量化的研究现状	3
1.2.3 应用结构优化设计方法实现轻量化	4
1.3 多目标确定性优化与车身轻量化研究现状	5
1.4 稳健性优化与车身轻量化研究现状	7
1.5 本课题研究的主要内容	9
第 2 章 汽车侧面碰撞分析流程自动化系统的开发	12
2.1 开发的环境基础	12
2.2 侧面碰撞流程自动化系统的开发	14
2.2.1 定制侧面碰撞分析流程自动化系统流程树	14
2.2.2 通用前处理部分的二次开发	15
2.2.3 建立组件间的连接的开发	19
2.2.4 建立刚性墙与接触的开发	22
2.2.5 施加边界条件面板及子程序开发	24
2.2.6 定义控制卡片与输出卡片界面开发	26
2.2.7 导出 K 文件的开发	28
2.3 程序的调试	29
2.4 本章小结	29
第 3 章 SUV 整车有限元模型的建立与有限元分析	30
3.1 SUV 整车有限元模型的建立	30
3.1.1 CAD 模型归类与导入	31
3.1.2 抽取中面与几何清理	31

3.1.3	有限元网格划分与网格质量检查.....	32
3.1.4	MDB 模型的导入	33
3.1.5	单元和材料属性的定义.....	34
3.1.6	整车模型装配与连接的建立.....	34
3.1.7	刚性墙与接触的建立.....	35
3.1.8	初始条件的定义.....	36
3.1.9	控制卡片与输出卡片的设置.....	36
3.2	SUV 整车侧面碰撞性能分析.....	37
3.2.1	碰撞系统总能量分析.....	37
3.2.2	整车变形分析.....	38
3.2.3	前门与 B 柱测量点侵入量与侵入速度分析	39
3.2.4	侧面碰撞分析结果评价.....	41
3.3	SUV 车门模态性能分析.....	41
3.3.1	车门模态分析.....	41
3.3.2	车门模态分析结果评价.....	42
3.4	SUV 车门刚度性能分析.....	43
3.4.1	前门刚度分析.....	43
3.4.2	前门刚度结果评价.....	46
3.4.3	中门刚度分析.....	46
3.4.4	中门刚度分析结果评价.....	49
3.5	本章小结.....	50
第 4 章	基于多目标稳健性优化方法的车身结构轻量化设计	52
4.1	多目标稳健性优化方案的提出.....	52
4.2	侧面碰撞子模型的建立与验证.....	54
4.2.1	子模型建立方法.....	55
4.2.2	子模型的建立.....	55
4.2.3	子模型分析结果验证.....	57
4.3	初始设计变量的选择.....	59

4.4	设计样本采集.....	61
4.4.1	设计变量筛选试验.....	63
4.4.2	试验设计方法选择及样本点采集.....	67
4.5	近似模型方法及模型建立.....	69
4.5.1	近似模型方法.....	69
4.5.2	近似模型建立.....	75
4.5.3	近似模型误差分析与精度的验证.....	88
4.6	基于多目标确定性优化的车身结构轻量化.....	90
4.6.1	基于 NSGA-II 算法的确定性优化	92
4.6.2	基于 NCGA 算法的确定性优化	94
4.6.3	基于 AMGA 算法的确定性优化	96
4.6.4	基于三种优化算法的确定性优化结果的分析与总结.....	97
4.7	基于多目标稳健性优化的车身结构轻量化.....	99
4.7.1	6Sigma 稳健性设计概念的介绍	99
4.7.2	基于蒙特卡洛抽样的可靠性分析与质量水平检查.....	100
4.7.3	多目标稳健性优化方法的选取.....	101
4.7.4	基于多目标稳健性优化的车身结构轻量化设计.....	102
4.7.5	稳健性优化结果有限元分析与验证.....	104
4.8	本章小结.....	107
第 5 章	总结与展望	110
5.1	全文总结.....	110
5.2	前景与展望.....	112
	参考文献	113
	致谢	119
	攻读硕士学位期间发表的学术论文	120

第1章 绪论

1.1 课题的研究背景与意义

汽车节能、安全、环保是汽车工程研究领域的三大主题。随着我国汽车产量的不断增加,一方面汽车耗油总量逐年攀升,同时油价也不断上涨,怎样最大限度地减少材料用量与尾气排放,是汽车行业面临极为重要的挑战^[1];另一方面交通事故发生的总量也随之增加,汽车碰撞安全问题日益严峻^[2-4]。

据公安部交通管理局统计,截至2014年11月27日,我国汽车驾驶人2.44亿人,驾驶人数量位居世界第一,汽车数量仅次于美国居第二位^[5]。在汽车化浪潮不断推进的背景下,不少城市机动车“高增长,高拥有,高使用,高密度”特征显著,一些地方出现大范围交通拥堵,大面积、长时间重度雾霾,给环境和出行安全带来了重大的压力,汽车安全与汽车环保面临重大的挑战。美国机动车工程师学会(SAE)发布的一则名为“Environment leads SAE survey result”^[6]调查报告,其中有一项调查是:“你认为消费者最看重汽车的哪些特性?”调查结果如图1.1所示,54%的人认为汽车油耗效率最佳和汽车最环保最为重要,41%的人认为提高汽车安全性能最为重要。由此可见,汽车环保、降低油耗和提高汽车碰撞安全已成为汽车行业研究的核心内容。因为减轻汽车重量实现轻量化是降低油耗与排放污染的最为有效的途径^[1];而通过结构优化设计改善汽车的碰撞吸能特性是提高碰撞安全性的关键。所以汽车轻量化与提高碰撞安全性具有举足轻重的意义,可以有效减少尾气排放改善空气质量,降低汽车耗油量实现节能,改善碰撞安全,降低汽车对乘员生命财产安全的威胁。

在汽车轻量化方面,汽车车身主要由钣金件组成,其形状复杂多变且零部件众多,是汽车整车的核心部件。车身质量占到了整车质量的35%-40%左右,在空载状态下,有大约70%的油耗消耗在车身质量上,因此,车身轻量化是汽车轻量化的关键之一,也是当前研究院与企业研究的热点之一^[7-10]。

在碰撞安全方面,由于交通道路状况的不同,导致车辆发生碰撞事故的形式也多种多样,主要有正碰、侧碰、偏置碰、后碰及侧翻等。我国汽车道路的特点是交叉路口多,红绿灯设施还不够完善^[11],发生侧面碰撞事故的可能性大大增加,

根据安全部调查侧面碰撞事故占各类碰撞事故总数的 30%左右,在造成死亡等重大事故中,侧碰事故约占 35%,致死率仅次于正碰事故,其致伤率高达 64.5%,居第 1 位^[12-14]。因此在汽车碰撞安全性设计过程中对侧面碰撞安全性进行研究具有重要意义。

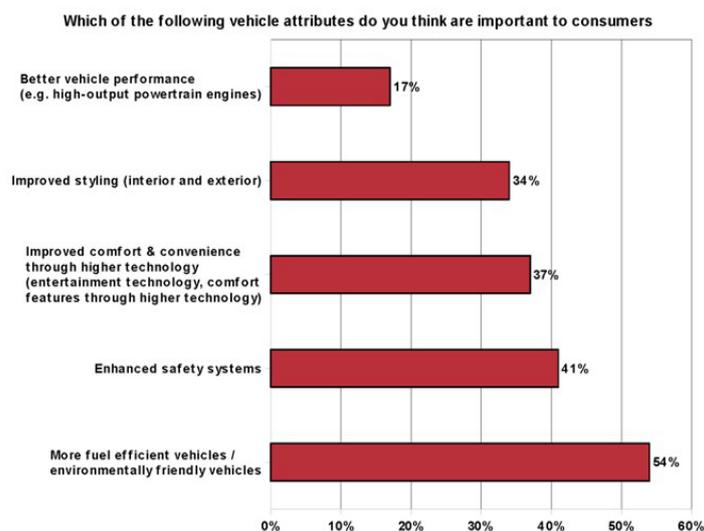


图 1.1 SAE 关于消费者最关心的汽车性能的调查报告

Fig. 1.1 The report about “which vehicle attribute are most important to consumes” from SAE

1.2 汽车车身轻量化设计研究现状

近年来,随着空气质量指数(如 PM2.5 浓度)日益受到社会的关注,汽车尾气排放被认为是 PM2.5 污染的主要来源之一,再加上石油资源枯竭和燃油价格不断上涨,汽车车身轻量化是降低尾气排放、节约燃油消耗的有效途径之一。

汽车车身轻量化目的是在保证汽车各项性能不超过法规与企业要求的前提下,尽可能的减轻车身的总质量,从而降低燃油消耗、减轻尾气排放污染,改善汽车行驶与制动特性,还要尽量控制汽车制造成本。实现车身轻量化主要有三种方式:应用高新轻质材料实现轻量化、应用先进的加工制造工艺实现轻量化和应用结构优化设计实现轻量化。

1.2.1 使用高新轻质材料实现轻量化的研究现状

近年来高新轻质材料在汽车中的应用越来越多,如高强度钢、铝合金、镁合金、高强度塑料及复合材料等^[15]。例如塑料件在车身上的使用逐年增加,一般车型已达到整车质量的 10%,如“奥迪 100”轿车车身采用的塑料件有 2000 之

多, 约占整车质量的 12%。国内外很多专家和组织对轻量化车身材料也做了很多研究。1994-1999 年, 国际钢铁多次组织全球开展高轻钢车身轻量化项目, 在车身制造中多采用高强度钢材, 采用新型的加工工艺。在 1994 年制造的车身平均制造质量下降了 25%, 同时提高了弯扭刚度, 一阶模态性能^[16]。1999 年奥迪公司开发奥迪 A8 车型时采用了全铝空间框架^[17], 紧接着捷豹 XJ8 采用了全铝制车身^[18]; 2010 年东风汽车、长安汽车等先后在汽车车身上使用了镁合金, 如制作车门框架等^[19-20]; 但由于镁合金价格高昂, 适用范围比较局限的原因, 镁合金暂时使用还比较少。2011 年奇瑞汽车在车身上使用了接近 50% 的高强度钢板, 在 B 柱等关键部位使用高强度的复合材料, 实现了车身减重 18%^[21]。

尽管高新轻质材料在汽车中的应用能够实现较好的轻量化要求, 在汽车中高档轿车、豪华车中应用越来越广, 尤其是铝合金和高强度钢的使用。但使得制造成本也成倍增加, 对于中低档轿车、SUV(Sports Utility Vehicle)、MPV (Multi-Purpose Vehicle)并不适用, 大部分中低端汽车车身仍以 DC 系列的低碳钢为主。

1.2.2 应用先进加工制造工艺实现轻量化的研究现状

使用新型材料和结构优化方法来实现车身的轻量化, 虽然效果很明显, 但是实现起来还是有一定的难度的。因为很多新型材料的可焊性、制造性都比较差, 结构优化之后的零件也会比较复杂或者是成型比较困难, 因此需要使用先进的加工工艺以来解决两者之间的矛盾, 使轻量化车身成为可能。先进的制造工艺, 如激光焊接技术、变截面成形技术以及液压成形技术在实现车身轻量化上得到了广泛的应用^[22-29]。

变截面成形板主要是借助于柔性轧制技术实现轧制, 控制轧制力不断的变化, 实现其形状连续变化, 比同等质量普通的拼接焊板的性能要好, 因此可以降低板料质量, 实现车身轻量化。一般液压成形技术加工的板件质量要比普通的冲压件小 7.3%^[15], 这种技术主要用于 A 柱、B 柱、顶盖横梁、门槛梁等部位。激光焊接最为重要的应用就是代替了传统的点焊连接, 实现了连续焊接, 避免了点焊焊接引起的应力集中, 载荷分布不均等问题, 从而为车身轻量化提供了空间。

可见激光焊接、变截面成形、液压成形技术的使用能显著减轻车身结构质量。结合高新轻质材料的使用, 这些先进加工制造技术逐步在汽车制造中投入使用。

1.2.3 应用结构优化设计方法实现轻量化

随着计算机辅助工程 (Computer Aided Engineering ,CAE) 技术的蓬勃发展,有限元法已经贯穿于整个汽车结构优化设计中。以有限元仿真指导汽车结构设计可以提前发现问题, 节约开发成本。

但在早期的车身结构设计中, 还主要是依靠工程师的经验来指导设计, 制定初始方案, 利用有限元方法验证, 然后再进行修改方案, 再分析, 如此反复直至得到较优的解; 此时的结构设计轻量化也只能是根据经验提出减重方案, 然后验证减重方案是否可行, 如此循环直到得到比较满意的方案。通过这种方式得到的设计方案一般而言, 并不是最优方案, 而且设计周期十分漫长。随着计算机辅助优化(Computer Aided Optimization, CAO)的发展, 如 SOFY、Hyperstudy、Optistruct 等商业软件的出现, CAE/CAO 的结合实现了分析与优化的集成, 从严格意义上而言, 这时才真正实现了仿真优化驱动设计的目的。这时车身轻量化设计迅速得到了广泛的发展, 国内外学者对车身及其零部件的轻量化也做了广泛的研究:

J.k.shin 等结合尺寸优化与拓扑优化技术实现了车门的轻量化^[30]。张代胜、张林涛与谭继锦对某国产全承载式客车车身, 利用灵敏度进行变量的筛选, 最后利用筛选后的变量进行轻量化结构优化设计, 在保证刚度变化最小, 满足规定强度的条件下, 达到了车身骨架质量减轻的目标^[31]。叶辉、胡平与申国哲^[32]结合灵敏度分析筛选变量, 以车身轻量化为目标, 汽车侧面碰撞安全性为约束条件, 最终车身质量减轻了 14.8kg。Marklund 与 Nilsson^[33]以近似模型代替汽车侧面碰撞有限元分析模型, 并基于该近似模型对 B 柱进行了轻量化设计, 使其质量减轻 25%。湖北汽车工业学院郝琪与杨林松^[34]对某轿车白车身扭转刚度进行了计算, 用全因子试验设计方法采集样本点, 采用响应面法对样本点进行优化设计和残差分析, 以质量最小为优化目标, 以扭转刚度满足标准为约束条件, 最终提高车门刚度。

汽车轻量化实际本质上是一个多目标优化设计的问题, 也就是说车身轻量化不是单纯的一味减轻质量, 车身在轻量化过程中需要同时考虑车身很多方面性能^[35], 例如在进行车身轻量化设计的同时, 必须考虑包括刚度、NVH(噪声、振动和不平顺性, Noise Vibration and Harshness)性能、强度、可靠性、碰撞安全性、疲劳等多方面的性能。在早期的轻量化中, 受到计算技术和实验条件的限制, 往

往只考虑轻量化对某一项或某几项的性能的影响,当完成轻量化以后再对其他性能进行验证。20世纪70年代,L.A.Schmit^[36]等在结构优化中首次提及近似模型的概念,近似模型就是利用数值拟合的方法构建的输出响应关于输入变量函数关系的数学模型。利用近似模型代替有限元模型参与优化大大加快了寻优速度,推动着轻量化设计由单目标优化逐渐向多目标优化发展。

综上所述,当前汽车车身轻量化的发展方向主要是:基于多目标的结构优化的轻量化、高新轻质材料的应用与先进加工制造技术结合的轻量化。

1.3 多目标确定性优化与车身轻量化研究现状

随着计算机硬件技术的不断发展,加上近似模型在结构优化中的广泛应用,在结构优化设计方面,汽车结构的尺寸优化、形状优化和连续体拓扑优化已逐步发展成熟,并逐步向汽车结构的多目标优化方向发展^[15]。

多目标优化的产生则比较早,公认的是在1896年由Pareto提出的,主要用于解决多目标之间矛盾如何协调提高各个目标的综合性能,以总体系统为研究对象,分析与综合各个子系统之间的耦合交叉问题,在各个子系统目标与系统目标之间加以折中与协调,实现各个目标都达到最优的问题。

针对多目标优化问题,近年来国内外学者进行了一定的研究。目前较多的应用在飞行器系统优化设计、车身结构系统优化设计、底盘系统优化设计等方面:

2001年R.J.Yang等^[37]指出以往由于缺乏计算机硬件的支持一个整车系统的多目标优化问题难以进行分析,随着计算机硬件的发展,加上近似模型的使用,这样的多目标优化问题完全能够在高性能的计算机上实现优化。

2003年K.P.lam^[38]等人利用有限元分析对VN127的仪表板支架结构进行了NVH性能与耐撞性的多目标性能研究,探讨了低碳钢、铝合金以及镁铝合金三种不同材料对仪表板支架强度的影响,为汽车车身轻量化进展提供了理论参考。

2005年朱平^[39]等以轿车的正面碰撞性能与车身覆盖件的质量为目标,分别采用高强度钢和铝合金材料进行了多目标优化研究,分别使得车身质量减轻9.31kg和53.1kg。

2006年Rain-Rohan^[40]等人在降低车身质量的同时,提升了某客车侧围组件的正面碰撞和偏置碰撞性能。

2007 年天津大学崔新涛, 以车门侧面挤压碰撞强度、刚度、固有频率以及结构质量为设计目标, 进行汽车车门的多元优化设计, 在仅增加 14.3\$(约 7%) 的材料成本的条件下达到了减重 30.9kg 的成果^[41]。

2008 年 Fabian Duddeck^[42]指出以 NVH 性能和碰撞安全性能为多目标的车身结构设计是当时的一个研究热点, 然后利用响应面近似模型, 采用模拟退火和遗传算法对车身结构进行了多元的轻量化研究。

2009 年张勇、李光耀等^[43]采用 D-最优试验设计方法采样构建了近似模型用于整车轻量化中, 以汽车前部结构的材料和厚度为变量, 以整车质量和 B 柱加速度为目标, 实现了整车的轻量化。

2010 年胡朝辉以将车长、车高、车宽及板料厚度为变量, 采用最优拉丁超立方试验设计方法采样, 以移动最小二乘响应面方法构建 NVH、刚度及质量的近似模型^[44], 以 NSGA-II 遗传算法进行了多元优化, 在满足各项性能目标要求的条件下, 实现了车身结构的轻量化。谭耀武等基于有限元分析发现 B 柱腰线等位置侵入量、侵入速度过大, 在考虑耐撞性与轻量化的多元优化下实现了 B 柱最大侵入量减小 10%, 腰线处侵入量和侵入速度分别减小了 18% 和 12%, 质量减小了 18%的结果^[45]。

2011 年湖南大学颜廷雷^[46]对白车身有限元模型进行静态性能仿真分析和疲劳强度分析, 最后通过遗传算法对采用响应面法建立的质量和模态的多元数学模型进行优化, 改善了车身的整体性能。任鹏飞^[47]对保险杠系统的 RCAR 正面 40%碰撞进行了分析, 以材料、板料厚度为变量, 碰撞性能和轻量化为目标进行了多元的轻量化设计, 最终实现了在保证碰撞性能的条件下, 保险杠质量下降了 1.61%。

2012 年 Jovan Obradovic^[48]等研究了正碰过程中复合材料结构的轻量化设计和耐撞性分析。在了解了复合材料特性后, 使用落锤试验机对实物进行了实验动态测试, 验证了分析结果的可靠性。泛亚汽车中心的史国宏与陈勇利用 SFE-Concept 软件建立了隐式全参数化的白车身模型, 以白车身形状、尺寸、位置及厚度参数为变量, 通过涉及刚度、模态、被动安全性能以及质量的多元优化过程, 最终实现了白车身减重 12 kg, 减重率达到 4.5%。

2013 年 Pablo luque^[49]等结合有限元法、多体动力学仿真及试验方法对底盘

进行了多学科优化,考虑了悬架、转向系统平顺性、车架扭转和弯曲刚度和车架总质量,优化后车架质量减轻,同时扭转刚度和弯曲刚度也得到了提高。

2014年,周会锋,王光耀等以上汽某A0级车型的白车身弯曲/扭转刚度、一、二阶模态、车身结构质量等七项性能指标作为车身结构优化的设计目标,进行多目标优化设计,在实现多目标优化的基础上,结合结构优化设计技术实现了车身结构的轻量化设计^[50]。

2015年吉林大学王登锋,卢放以某国产轿车为研究对象,依据侧碰法规及NVH性能要求对白车身结构进行了优化设计;根据侧碰及NVH仿真结果,选取白车身关键零件的板厚及材料为变量,以白车身质量和刚度为目标,以侧碰加速度及侵入量为约束条件,建立了白车身刚度径向基函数神经网络近似模型及侧碰二阶响应面模型,利用模拟退火算法进行了多目标优化,在保证车辆的安全及NVH性能的前提下使白车身质量下降了15.7kg^[51]。

综上所述,近年来国内外学者与企业研究机构对多目标优化进行了深入的研究,从只考虑刚度、强度或者碰撞安全性等单方面的作用到多个方面的耦合作用,从单一目标到多目标发展,从只考虑材料与厚度等一类变量到考虑板厚与材料以及几何形状等多种变量的共同作用,多目标优化正逐步向集成化、系统化、多材料一体化方向发展。但上述多目标优化过程中都忽略了如材料参数不确定性、加工精度引起的板料厚度不确定性、尺寸不确定性等不确定性因素的影响,有可能导致优化后的设计处在设计约束的边缘,导致稳健性较差,受不确定因素的影响很大,一点微小的参数变动可能导致设计性能急速下降,这不符合优化设计最终的目标。因此,为使得优化后的结果既要满足稳健性的要求,又要实现多目标优化要求,必须进行多目标稳健性的优化设计。

1.4 稳健性优化与车身轻量化研究现状

现实世界的工程问题必然受到不确定因素的影响,如负载条件、材料特性、制造加工精度、几何尺寸等,这些因素往往难以控制。在汽车设计中,一般采用安全系数的方式避免这些不确定因素对设计性能的影响,但是这种方式很有可能导致过度设计或者无法评估不确定因素的影响。在20世纪中期,田口玄一首次提出田口稳健性设计(以下称田口设计),设计的主要原则就是通过合理选择设

计变量, 尽可能降低设计变量对目标的影响。田口设计要求对初始设计空间有大致的了解, 田口设计是以信噪比来衡量稳健性的, 在多目标响应下用信噪比衡量稳健性的评价指标还存在较大的争议^[52]。20 世纪 90 年代摩托罗拉公司提出了 6Sigma(其中 Sigma 代表标准差 σ)稳健性设计方法(又叫 6Sigma 质量设计), 它是以 6Sigma 水平来评价稳健性的, 具体的评价方式在本文的第四章详细叙述。最初的 6Sigma 主要用于电子行业的质量管理上, 后来逐渐在机械、汽车、航空等制造行业流行。由于稳健性设计基于随机性理论, 需要多次随机抽样对产品质量进行检查, 在进行优化设计的同时, 还需要进行质量检查, 这种嵌套的迭代计算, 即使利用 CAE 技术进行模拟, 仍然需要十分巨大的计算量, 因此在近似模型技术出现之前, 受到计算量的限制很少在优化设计中使用。但是近年来, 计算机硬件设备的发展与数学近似模型的出现, 不仅带动着多目标确定性优化设计(不考虑不确定因素影响的优化设计)的发展, 稳健性设计也已逐步应用到了汽车结构设计中。

福特汽车 P.N.Koch^[53]详细介绍了稳健性设计的起源与发展, 并以整车的轻量化为目标, 汽车侧面碰撞性能要求为约束, 验证了稳健性设计在汽车结构轻量化中的应用。J.Hilman^[54]等结合 SFE-Concept、Hypermesh、Matlab、Radioss 等商业软件, 以全隐式参数化的保险杠系统为研究对象, 以几何与材料参数为变量, 轻量化为目标, 正面碰撞要求为约束条件, 用基因遗传算法(GA)、蒙特卡洛抽样分析为手段进行了稳健性优化, 在满足稳健性的基础上使得保险杠系统减重 30%, 文后指出未来的稳健性设计研究要向多目标优化方向发展。湖南大学黄石华等综合响应面法、试验设计、蒙特卡洛等技术, 以车门质量为目标, 车门一阶模态、下垂刚度和扭转刚度为约束条件, 对车门进行了 6Sigma 稳健性的轻量化设计, 在提高稳健性的同时车门质量减轻 1.39kg^[55]。高伟钊等^[56]对泡沫填充薄壁结构的耐撞性, 以比吸能(SEA, 内能与质量的比值)最大为目标, 进行了 6Sigma 稳健性优化, 使得比吸能上升的同时稳健性达到了 6σ 水平以上。Aspenberg D, Jergus J, Nilsson L^[57]等以车身轻量化为目标, 碰撞安全性的稳健性为约束条件, 进行了稳健性优化。吉利汽车张继游等^[58], 以车身轻量化为目标, 侧面碰撞的侵入量与侵入速度为约束条件对整车侧面碰撞进行了稳健性优化, 在保证碰撞性能达到 3σ 水平的条件下, 车身减重 10.37%, 减轻 4.6kg。

以上的文献中虽然都考虑了不确定性因素的影响,以轻量化为目标,但本质上而言,他们只解决了单目标稳健性优化在汽车轻量化中的应用,然而汽车轻量化本质上是一个多目标的优化问题,因此研究如何将多目标优化设计与稳健性优化思想同时应用到汽车轻量化中具有十分重要的意义。

本文顺应当前节能、安全、环保的时代背景,结合当前国内外学者在稳健性优化设计、多目标确定性优化设计和车身轻量化方面的研究成果,进行基于多目标稳健性优化方法的汽车轻量化设计与侧面碰撞安全性研究,力图实现汽车车身轻量化,同时提高侧面碰撞安全性能,保证车门模态性能、车门刚度性能,并提高它们的稳健性,为企业新车型的研发设计提供有益的指导。

1.5 本课题研究的主要内容

本文以某车辆研发公司的一款新 SUV 车型为研究对象,以实现车身轻量化与提高汽车侧面安全性能为最终目标,同时保证车门模态性能、车门刚度性能满足要求,结合有限元分析技术、灵敏度分析理论、试验设计技术、近似模型技术、多目标遗传算法理论、蒙特卡洛抽样分析技术、6sigma 稳健性优化设计技术对整车进行了多目标的稳健性优化研究,具体的研究内容如下:

第一章:绪论。概述了当前的汽车工业方面的研究背景及当前对车身轻量化与汽车侧面碰撞安全性能研究的意义,概述了车身轻量化、多目标确定性优化及稳健性优化的研究现状,并阐述了目前研究存在的问题及本课题研究的主要内容及意义。

第二章:汽车侧面碰撞流程自动化系统的开发。

针对汽车侧面碰撞有限元分析的前处理时间过长,重复性工作较多、建模缺乏规范问题,开发专门针对汽车侧面碰撞分析的流程自动化系统,并对开发的主要思路进行详细的介绍。

第三章:SUV 有限元模型的建立与有限元分析。

(1)结合汽车侧面碰撞分析流程自动化系统工具,建立整车侧面碰撞分析的有限元模型。

(2)整车侧面碰撞安全性能有限元分析。利用整车有限元模型对该 SUV 车型的安全性进行有限元分析,从系统能量、整车变形、车门与 B 柱关键位置测量

点的侵入量与侵入速度三个方面进行分析与评价。

(3)车门模态性能有限元分析。对前门前三阶模态、中门前三阶模态进行了详细的有限元分析与评价；对前门与中门的刚度进行了有限元分析与评价，为后续的优化设计提供模型基础。

第四章：基于多目标稳健性优化方法的车身轻量化设计。

(1)提出整车多目标稳健性优化的方案：针对整车侧面碰撞安全性分析的仿真时间过长，建立子模型系统以代替整车模型并在子模型的边界处施加边界位移条件，通过对子模型精度的验证保证子模型分析的精度。

(2)针对初始的设计变量过多将会增加后续优化计算的的时间的问题，利用灵敏度分析进行初始变量的筛选。对多个输出响应利用最优拉丁超立方试验设计方法进行样本的抽取。利用抽取的样本构建侧面碰撞安全性能、车门模态性能、车门模态性能等多个响应的近似模型，并验证近似模型的精度。

(3)利用近似模型代替有限元模型，以灵敏度分析筛选出的设计变量为优化设计变量，以设计变量的总质量与侧面碰撞过程中吸收的总能量为目标，车门模态性能、车门刚度性能、侵入量与侵入速度为约束条件，分别利用 NSGA-II、NCGA、AMGA 三种多目标遗传算法进行多目标确定性优化设计。

(4)从三种优化设计方法得到的 Pareto 非劣解集中分别选取一组数据进行蒙特卡洛抽样分析，检查优化解的 6Sigma 水平(稳健性指标)。比较三种优化设计方法得到的 Pareto 非劣解及可靠性分析情况，选取一种较优的优化设计方法用于稳健性设计。最后进行了针对侧面碰撞安全性与轻量化的多目标稳健性优化设计，选取一组适合企业要求稳健性达到 6Sigma 要求的解，并对该组解进行有限元模型仿真分析的验证。

第五章 总结与展望。对全文内容进行总结，对今后工作进行展望。

将本文主要研究内容的流程图如图 1.2 所示：

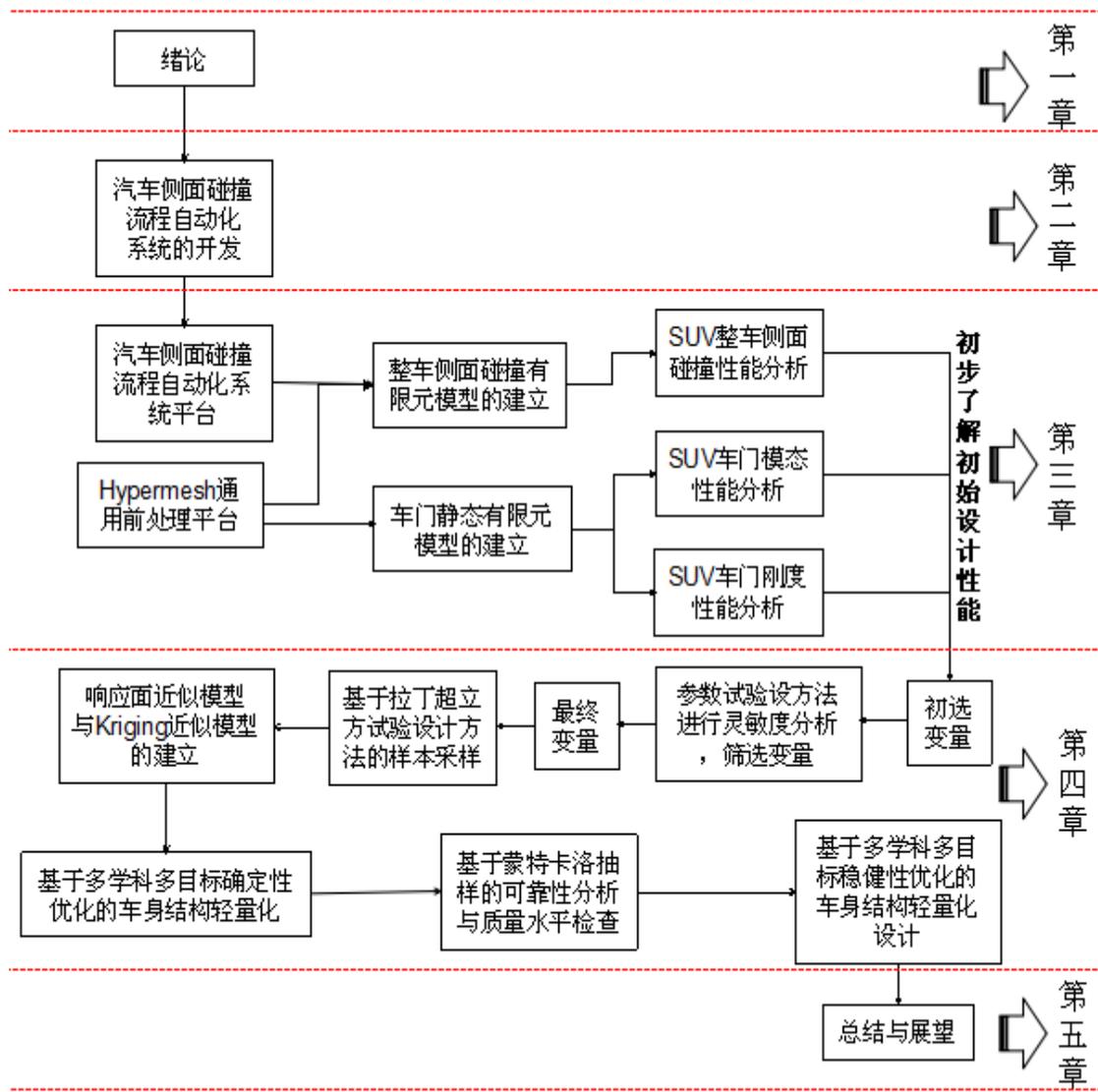


图 1.2 本文研究内容的流程图

Fig. 1.2 The research flow chart of this thesis

第2章汽车侧面碰撞分析流程自动化系统的开发

随着计算机仿真技术与数值计算方法的迅速发展，有限元分析技术日趋成熟，CAE 技术在新车型研发中的应用也越来越广，已成为产品研发过程中不可缺少的工具之一。

与传统的试验验证结合的设计研发相比，CAE 分析技术不需要实际生产出产品，在概念设计阶段就可以利用 CAE 分析技术指导设计，一定程度上提高了研发效率。然而，当前的常规 CAE 分析存在两个典型的问题：(1)过分依赖于工程师的实际工程经验，常见的 CAE 分析软件人机交互也不够友好，导致分析效率不高^[59]。(2)CAE 分析的稳健性不高，易受材料参数和偶然误差等不确定因素的影响。基于《GB20071-2006汽车侧面碰撞的乘员保护》强制性法规的 CAE分析流程就是一个典型的例子，工程师在前处理部分花费的时间几乎占到了整个有限元分析工作的70%-80%。这必将导致整个CAE分析过程大部分的时间耗费在模型前处理阶段,从而导致新车型的开发效率大大降低。

综上所述，汽车侧面碰撞分析过程具有重复性工作多，工作繁琐，需要设置的参数过多的特点。本章针对上述问题，综合运用 TCL/TK 语言和 HyperWorks 的内置 API(application programming interface 应用程序接口)函数，借助 HyperWorks 中专有的 Processing Manager 平台开发了侧面碰撞流程自动化系统。

2.1 开发的环境基础

本文 CAE 侧面碰撞分析流程自动化系统结构如图 2.1 所示：HyperWorks 为 CAE 分析提供一系列的前处理基础软件，包括 Hypermesh，Hyperview 等。Process Manager 为开发提供一个标准的流程执行软件。CAE 分析过程的控制与运行的脚本是结合 TCL/TK 语言和 HyperWorks 内置 API 函数进行编写的。

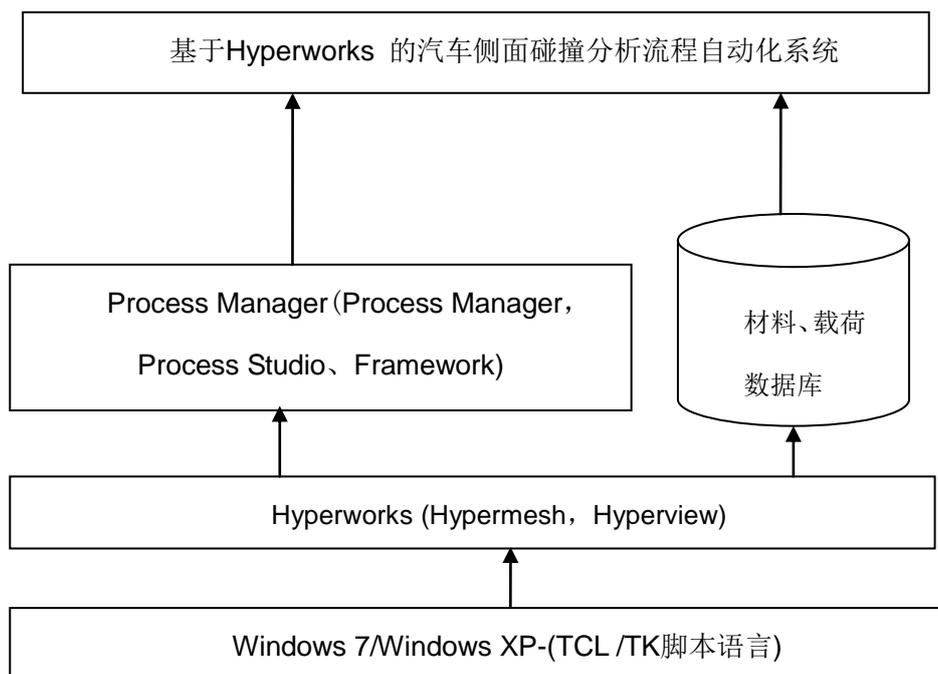


图 2.1 侧面碰撞分析流程自动化系统结构

Fig. 2.1 The structure of side impact analysis process automation system

TCL 语言，即 Tool command language，与 C++、Java、python 语言类似，是一种命令脚本语言。TK 是 TCL 的一个扩展，用于开发图形用户界面 (Graphical User Interface, GUI) 的应用程序工具集^[60-61]。与 C++、java 语言相比，TCL 是一种解释语言，它的解释器是一个 C 函数库，可以很容易的整合到应用程序中，选择为本文的开发语言。

HyperWorks 软件是一组开放的商业软件平台，为二次开发提供了核心的软件平台，包括 Hypermesh、Hyperview、Hypergraph 等。

任务管理器(Process Manager)是由 Altair 公司开发的任务管理软件，可根据开发目的，自身定制和运行流程化模板，引导开发者完成有限元前处理工作，该软件包括三个模块：Process Manager、Process Studio 和 Framework。

Process Manager 工具软件能够读取用户开发的工具程序，并提供程序接口与 HyperWorks 软件之间相互交换信息，以流程化的方式完成相应的有限元分析任务。如图 2.2 为 Hypermesh 中调用 Process Manager 程序的界面。

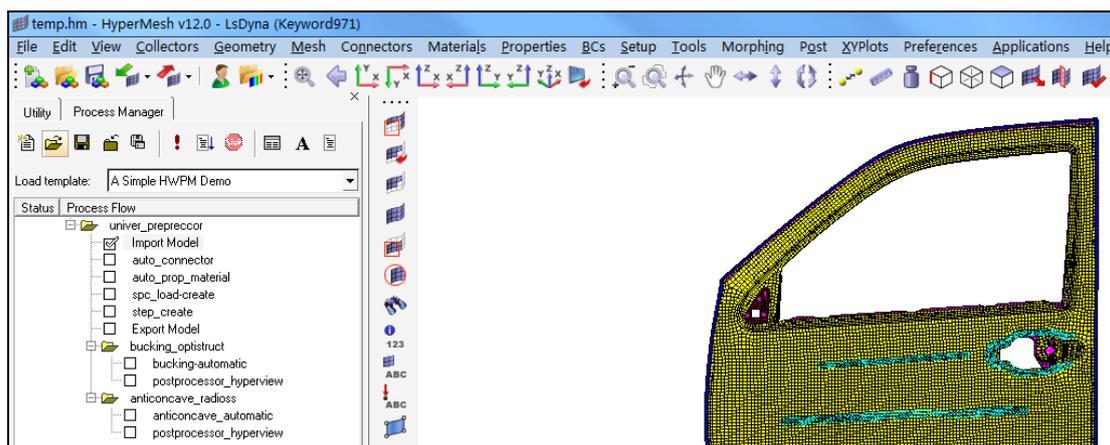


图 2.2 Hypermesh 中调用 Process Manager 应用程序界面

Fig. 2.2 The GUI when Hypermesh calls the Process Manager program

Process Studio 是为了 Process Manager 模板生成的集成开发环境。用户可以借助于软件提供的控件开发图形用户界面(GUI)进行二次开发。

Framework 是一套 API(Application Programming Interface, 应用程序编程接口)集合, 能够被 Process Studio 中开发的子程序进行访问和调用。为方便用户二次开发, HyperWorks 为用户提供了丰富的内置 API 函数。

2.2 侧面碰撞流程自动化系统的开发

由于侧面碰撞有限元分析的过程十分复杂, 对于系统的开发提出了挑战, 本文为实现该过程采取分步分块的开发策略, 首先纵观全局, 根据开发需求定制系统侧面碰撞分析流程自动化系统的流程树, 将整个侧面碰撞有限元分析过程分为: 通用前处理、建立组件间的连接、建立刚性墙与接触、施加边界条件、定义控制卡片、定义输出卡片、导出 K 文件七大部分, 然后一步一步的完成每一部分的流程子程序开发, 逐步实现整个流程自动化系统的开发。

2.2.1 定制侧面碰撞分析流程自动化系统流程树

首先在专用流程自动化工具 Process Manager 下, 定制出如图 2.3 所示的侧面碰撞分析流程自动化系统流程树。流程树中并未包含划分网格的步骤, 这主要是因为高度非线性的碰撞分析对于网格质量的要求非常高, 仅凭批处理式的网格自动划分功能划分的网格往往无法满足企业网格质量要求, 需要人工完成。因此, 在完成自动中面抽取后, 工程师手动完成网格的划分, 再进入下一个流程。

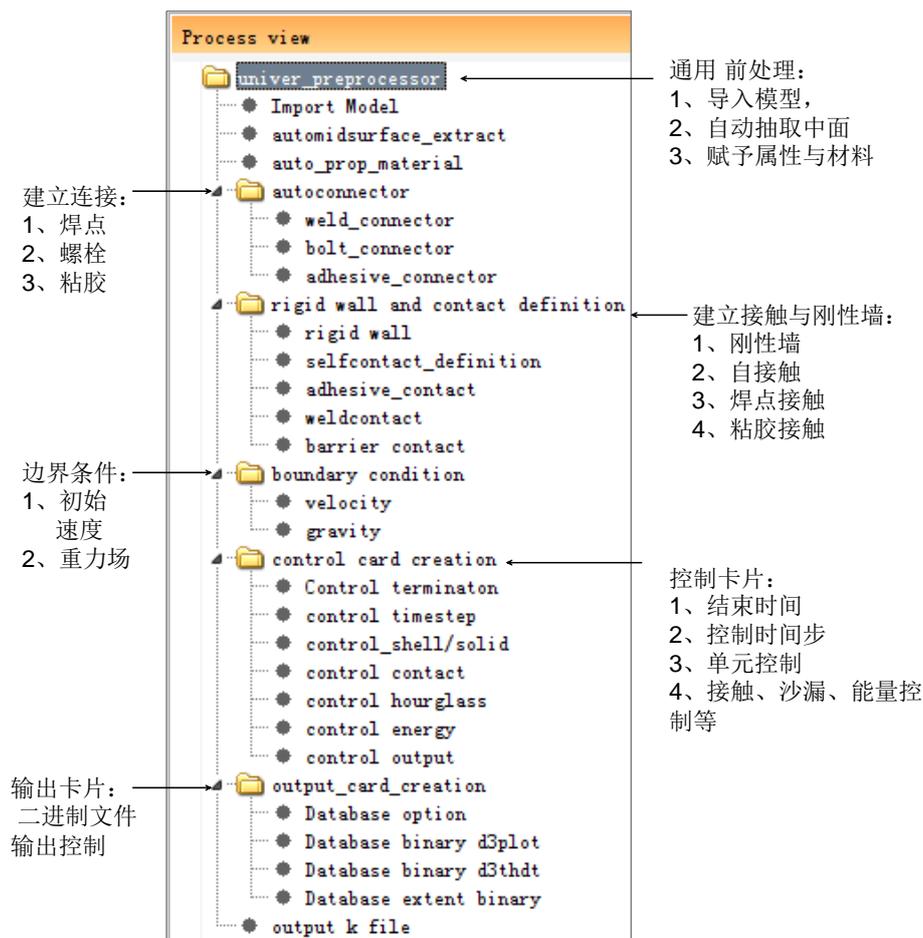


图 2.3 侧面碰撞分析流程自动化系统流程树

Fig. 2.3 The process tree of side impact analysis process automation system

2.2.2 通用前处理部分的二次开发

(1)模型导入工具的开发

utils 是 Process Studio 中控件的总称，以文本域、多选框、按钮、文本浏览器等都属于 utils 控件，它们可以通过 TCL 脚本实现数据通信。如让 TCL 脚本获得工况面板中 model_directory 文本框的值“F:/sideimpact.hm”。运用 Process Studio 的模板功能，可以通过语句：`set strValue [::hw::pmgr::PmgrGetData 0 “model_directory.value”]`来实现。以文本域、多选框、按钮、文本浏览器为组成元素，可以快速开发出如图 2.4 所示的适合模型导入的图形用户界面。GUI 各个控件与不同的后台函数相互关联实现各自的功能。利用 TCL 脚本调用 Hypermesh 提供的 stp、iges、catiaV5 等多种 CAD 数据转换主程序实现不同格式的数据接口技术。Browse 按钮是利用内置 GUI 命令函数 `TK_getOpenFile`，返回用户打开文件的全路径到图 2.4 中空白的文本域，然后 TCL 脚本读取该全路径并返回给

import 按钮，实现文件参数的传递。

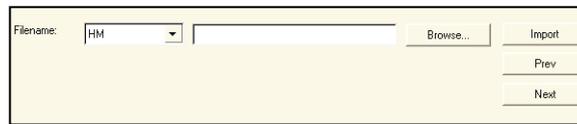


图 2.4 模型导入的 GUI

Fig. 2.4 The GUI of importing model

(2)自动抽取中面工具的开发

汽车车身主要由钣金件组成，在 CAE 分析中这些钣金件通常需要抽取中面，在中面上划分网格得到壳单元，并赋予壳单元厚度属性来模拟。而钣金件的数量巨大，Hypermesh 虽然有抽取中面的程序，但是需要人工干预的地方过多，一次只能抽取一个钣金件，且并未保存该钣金件的厚度信息，还需要人工建立厚度属性卡片，再赋给相应的钣金件。因此花费在抽取中面与赋予厚度属性的时间往往多达 3-5 个工作日的时间，而且工程师需要对着 BOM 表去查找钣金件的厚度信息，且伴随着繁琐的零件代号的命名，容易因工作疲劳引起失误。通过以上分析可知，上述过程只不过是一个多次重复性的工作，利用计算机程序远比人工快并且准确得多，关键的几个信息无非是：BOM 表信息、厚度信息、零件的命名规范。针对以上问题的程序开发主要涉及文件的读取与辨识、属性卡片的建立、材料卡片的建立、comp 组件(LS-DYNA 中称为 part 组件)引用厚度属性 ID 号和材料的 ID 号(Nastran、Optistruct 等软件中是 comp 组件卡片引用厚度属性 ID 号，属性卡片再引用材料卡片的 ID 号)。

文件读取与辨识的开发方法如下：

Step1: 打开文件，

```
set new_file [open [pwd]/file_$number_need.csv]
```

Step2: 设置一个行记录指针：

```
set m 1
```

Step3: 文件读取过程的开发：判断程序为文件的指针未读到末尾，(m 变量中存储的是指针的位置)，利用函数 proc_comparison 到 BOM 表中寻找板料厚度信息，或者到材料库中寻找材料参数，并判断是否匹配，匹配则返回相应的参数给相应的变量，下一步赋予相应的卡片。

```
while {$m & proc_comparison} {
```

```
set m [gets $point_file]
```

```

set n [gets $point_file]

set k [llength $m]

if {$k<1} {

    break

}

```

常规的定义单元属性和材料参数的过程，往往因个人习惯导致模型的 collector 的名字不同，缺乏规范，对于模型的修改极为不便。而利用开发的自动化工具则可以根据企业建模 collector 命名规范自动命名，如图 2.5 所示：

钣金件：N 零件号_项目代号_T 厚度*100;

实体件：S 零件号_项目代号。

Comp Name	Comp Id	Prop on Comp	Prop Id	Thickness	Mat Name	Mat Type
rigid	1331			0	0.0	
S6101100_adhesive	1330	PSOLID	56	0.0	glue	MAT1
N6101221-P102_10100	717	PSHELL	238	1.0	DC01	MAT1
N6101153-P102_10100	879	PSHELL	380	1.0	DC01	MAT1
N6101153-P102_4_10100	880	PSHELL	381	1.0	DC01	MAT1
N6101151-P102_10120	722	PSHELL	243	1.2	B210P1	MAT1
N6101147-P102_10120	718	PSHELL	239	0.8	DC01	MAT1
N6101145-P102_10100	721	PSHELL	242	1.0	DC01	MAT1
N6101143-P102_10100	720	PSHELL	241	1.0	DC01	MAT1
N6101141-P102_10120	719	PSHELL	240	1.2	DC01	MAT1
N6101135-P102_10200	726	PSHELL	247	2.0	STKM-34	MAT1
N6101133-P102_10120	725	PSHELL	246	1.2	B210P1	MAT1
N6101131-P102_10150	724	PSHELL	245	1.5	B210P1	MAT1
N6101127-P102_10200	716	PSHELL	237	2.0	B210P1	MAT1

图 2.5 符合企业规范的 component 表

Fig. 2.5 The component table conforming to the enterprise standard

(3)材料和载荷数据库的开发

为方便材料和载荷的标准化，本文建立了材料数据库和载荷数据库。材料库以材料名、弹性模量、密度等字段建立；载荷库以载荷类型，分析类型，载荷大小等字段建立。根据以往的开发经验，可以借助 Microsoft SQL Server 2008 开发材料和载荷数据库，利用TK扩展包Tclodbc实现数据访问；也可以借助Oracle RDBMS 开发，利用 TK 扩展包 oratcl 实现数据访问^[62]。但是考虑到假如借助以上的大型数据库进行开发，对于数据库的维护、使用会带来诸多不便，整个的设计成本也会剧增。为了方便编程，本文以本地文件的形式建立材料与载荷库，在本地 Hypermesh 安装目录下，创建 Database 文件夹，再创建子文件夹 material database 与 load database，然后在各自的目录下创建.csv 类型的文本文件，这种文件是常用办公软件 Excel 表的一种文件类型，一般的工程师都能非常熟练的建立与维护该类型的材料、载荷数据库。

为了保证开发的 TCL/TK 程序能严格的访问材料、载荷数据库，该数据库必

须有严格的格式限制。对于材料数据文件，要求第一行是材料参数名称或者代号，第一列为材料名字或者代号，如图 2.6 所示，材料除了基本参数外还需要该材料的应力应变曲线参数，有单独的 csv 文件应力应变曲线的存储，存储的形式如图 2.7 所示。

	A	B	C	D	E
1	材料名称	E	Nu	RHO	yield
2	DC01	202000	0.28	7.85E-09	195
3	DC03	194000	0.28	7.85E-09	180
4	DC04	202000	0.28	7.85E-09	165
5	DC06	193000	0.28	7.85E-09	140
6	20	204000	0.28	7.85E-09	245
7	B210P1	210000	0.3	7.85E-09	270
8	STKM	210000	0.3	7.85E-09	260
9	Q235B	210000	0.28	7.85E-09	235
10	SPHC	209000	0.28	7.85E-09	198
11	B170P1	210000	0.3	7.85E-09	215

图 2.6 材料库 csv 文件格式

Fig. 2.6 The format of material database csv files

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	材料名称	B170		B180		B210		DC01		DC03		DC05		DC06	
2	应力应变曲线	0	215	0	230	0	260	0	270	0	240	0	150	0	180
3		0.05	316	0.05	319	0.05	368	0.0151983	277.9303894	0.0100567	246.7111053	0.05	234	0.020061	193.7666626
4		0.1	360	0.1	362	0.1	417	0.0223595	281.9891663	0.0200567	257.4545898	0.1	271	0.030061	204.5315857
5		0.15	391	0.15	392	0.15	450	0.030061	284.0266113	0.0300567	268.2756346	0.15	297	0.0400609	214.9675446
6		0.2	415	0.2	415	0.2	476	0.0400609	287.3076477	0.0400567	279.7079773	0.2	317	0.050061	224.5385284
7		0.25	435	0.25	435	0.25	498	0.050061	289.0157471	0.0500567	291.8795471	0.25	334	0.060061	232.991394
8		0.3	452	0.3	452	0.3	517	0.060061	291.4093323	0.0600567	302.510376	0.3	348	0.070061	241.8162842
9		0.35	467	0.35	467	0.35	533	0.070061	294.8726501	0.0700567	313.6193374	0.35	361	0.080061	250.2044983
10		0.4	481	0.4	480	0.4	548	0.080061	297.4766541	0.0800567	322.9110413	0.4	372	0.0900609	256.9300537
11		0.45	493	0.45	492	0.45	561	0.0900609	300.2840576	0.0900567	330.4795532	0.45	383	0.1000609	264.3039896
12		0.5	505	0.5	504	0.5	573	0.1000609	304.3647766	0.1000567	338.9205933	0.5	392	0.110061	271.9057922
13		0.55	515	0.55	514	0.55	585	0.1104103	306.7249146	0.1100567	347.1997375	0.55	401	0.120061	278.494812
14		0.6	525	0.6	524	0.6	595	0.120061	310.4772949	0.1200567	353.2003479	0.6	410	0.130061	284.9596863
15		0.65	534	0.65	533	0.65	605	0.130061	313.6340637	0.1300567	359.2062378	0.65	417	0.1400609	290.8335266
16		0.7	543	0.7	541	0.7	615	0.1400609	316.3047791	0.1400567	366.8753357	0.7	425	0.150061	297.6965027
17		0.75	551	0.75	549	0.75	623	0.150061	320.9952698	0.1500567	372.8469849	0.75	432	0.160061	303.0911855
18		0.8	559	0.8	557	0.8	632	0.1584818	322.9748535	0.1600567	378.4139709	0.8	438	0.1700609	308.7609863
19		0.85	566	0.85	564	0.85	640	0.1700609	327.8724182	0.1700567	384.2793579	0.85	445	0.180061	314.5136719
20		0.9	573	0.9	571	0.9	647	0.180061	330.4640808	0.1800567	390.05896	0.9	451	0.1900609	320.2836304
21		0.95	580	0.95	578	0.95	655	0.1900609	333.0281067	0.1900567	394.46875	0.95	457	0.2000609	326.524231
22		1	586	1	585	1	662	0.2000609	335.7884216	0.2000567	399.9513342	1	462	0.210061	330.6973267
23								0.210061	338.6730042	0.2100567	404.9347229			0.2200609	336.632762
24								0.2200609	340.7749329	0.2200567	410.3059814			0.2300609	341.1393738
25								0.2308185	344.4172363	0.2300567	414.7550659			0.240061	346.1938477
26								0.240061	346.9160767	0.2400567	419.5390015			0.2500609	350.7624817
27								0.2500609	349.9877319	0.2500567	424.0244141			0.2600609	354.8095703

图 2.7 应力应变曲线 csv 文件格式

Fig. 2.7 The format of stress-strain curve csv files

对于载荷数据文件，其格式也类似，第一列为法规标准编号，第一行载荷类型或者名称，如图 2.8 所示。对于载荷曲线数据也采用单独的 csv 文件存储，与应力应变曲线数据类似，这里不再赘述。

	A	B	C
1	法规	velocity	gravity
2	GB20071-2006		50 gravity.csv
3	ECE R95		50 gravity.csv
4	FMVSS214		53 gravity.csv
5	Article18		50 gravity.csv
6	ADR72		50 gravity.csv

图 2.8 载荷库 csv 文件格式

Fig. 2.8 The format of material database csv files

2.2.3 建立组件间的连接的开发

(1) 自动创建焊点功能的开发

用户在运行 Hypermesh 软件过程中会产生记录文件 `command.cmf`, 利用该记录文件通过 word 等文本编辑器制作一个宏命令进行语法转换, 使得记录文件中的命令符合 TCL/TK 语法。例如焊点的建立过程的记录文件格式是:

“*CE_ConnectorCreate, points (1)”, 转换后为“*CE_ConnectorCreate points 1”。

通过提取记录文件的内容, 再将随机产生的 ID 编号参数化从而实现相应的功能, 可以提高开发效率。

开发程序运行前提条件是: 前处理网格划分阶段已经完成, 使用 catia 自动导入焊点的 product, 并且单独显示该 comp。

程序开发主要的难点是焊点焊接层数的判断, 本程序主要根据球形实体的颜色进行判断。具体的解决方案如下:

首先, 利用程序 `hm_getcentroidofsolids 1` 获得球体的球心, 并在循环的球形实体球心位置分别创建一个点, 放在实体球原来所在的 comp。

然后, 运用 HyperWorks 的内置 API 中的 Query 命令函数 `hm_getentityvalue comps $compweldid color 0 -byid` 进行焊点的颜色标识, 从而辨认焊点的层数(焊点几何文件中将通过焊点的颜色区分焊点层数), 并将不同的层数的焊点放在不同的 comp 里面。用 `modify` 命令函数 `*renamecollector comps "newname" "oldname"` 实现 comp 的重命名。

最后, 实现自动判别焊点的层数, 返回焊点的后缀名字及焊点层数的 list。

程序运行的流程是: 首先该程序可以自动捕捉焊点(在 CAD 软件中, 点焊位置是以半径为 5mm 的球表示的, 利用不同的颜色代表焊点层数)的球形实体, 创建球心, 把球心放到 `weld_number` 的 comp 里面, 并且在球心位置生成 connector,

根据需要设计打焊点的层数和搜索容差，自动完成焊点的实现。

该功能基本实现了一键打焊点的功能，与传统的过程相比，建模效率大大提高。另外不同层数的焊点，连接不同板件的焊点，都能实现自动归类，放置于不同的 collector 里面，便于模型的调整和局部焊点的修改。

(2)自动建立螺栓连接的开发

主要开发思路是：首先根据划分单元的边界 edge，查找圆形的螺栓孔，在螺栓孔位置利用该部位单元的法向量方向，进行搜索匹配，检测是否有同等大小的螺栓孔与之匹配，然后在孔的中心位置生成一个临时节点，并利用 washer 判断程序自动捕捉 2 层或者 3 层 washer 单元，最后生成 rigid 单元完成螺栓连接。

下面是查找螺纹孔的主函数程序：

```

proc findShellHole {compsIDlist} {
  variable hole
  set i 0
  set processedEdgePlot {}
  ...
  foreach edgePlotElement [hm_getmark elems 1] {
    if {[lsearch -integer $processedEdgePlot $edgePlotElement] != -1} {continue}
    set boltedFlag 0
    set hole($i) $i
    ...
    set temp [hm_getbestcirclecenter nodes 1 1 1 1]
    hm_getcrossreferencedentitiesmark nodes 1 7 2 0 0
    set washerElems {}
    foreach elemID [hm_getmark elems 2] {
      set elemConfig [hm_getentityvalue elems $elemID config 0]
      if {($elemConfig > 100) && ($elemConfig < 200)} {lappend washerElems
$elemID}
      if {$elemConfig == 55} {set boltedFlag 1}
    }
    set          axialVector          [::hwat::math::AverageVectorComponents
[getElementsNormalLists $washerElems]]
    if {[::hwat::math::VectorMagnitude $axialVector] < 0.5} {
      unset hole($i)
      continue
    }
    lappend hole($i) $axialVector
    lappend hole($i) [lrange $temp 0 2]
    lappend hole($i) [expr [lindex $temp 3]*2.0]
    set depth 0
    foreach elemID $washerElems {
      set depth [expr $depth + [hm_getthickness elems $elemID]]
    }
    set depth [expr $depth/[llength $washerElems]]
  }
}

```

```

lappend hole($i) $depth
lappend hole($i) 0
eval *createmark elems 2 $washerElems
hm_getcrossreferencedentitiesmark elems 2 7 1 0 0
set referencedComp [hm_getmark comps 1]
if {[llength $referencedComp] > 1} {lappend hole($i) 0} else {lappend hole($i)
$referencedComp}
lappend hole($i) 0
lappend hole($i) 0
eval *createmark nodes 1 {"by elements"} $washerElems
lappend hole($i) [hm_getmark nodes 1]
while {[info exist hole($i)] == 1} {incr i}
}
*createmark comps 1 "^edge_holes_shell"
*deletemark comps 1
}

```

其中，函数“hm_entityinfo exist comps "^edge_holes_shell" -byname”是判断 edge 特征是否是圆形孔的主函数；list 变量“washerElems”存储的是 washer 单元的 ID 号。

(3) 建立粘胶等其他连接的开发

汽车组件间的连接除了点焊、螺栓连接外，还有粘胶、缝焊、铆接等多种连接。此类连接一般需要基于导入的 CAD 模型的连接信息协助完成。以粘胶为例，实现连接的开发思路如下：粘胶连接的 CAD 模型如图 2.9 所示，导入 Hypermesh 后如图 2.10 所示。CAD 模型中以“粘胶槽”的形式定义粘胶的位置，以零件号定义粘胶要连接的部件信息。将 CAD 模型导入 Hypermesh，提取“粘胶槽”的 surface 以及要连接部位的零件号信息，并以 comp 名字的方式将信息传递给 Hypermesh 并保存下来。

如图 2.9 所示 CAD 模型中的“ADH_6006702/6006695”定义的是一个粘胶连接，被连接件是部件 6006702 与部件 6006695。如图 2.10 所示是 CAE 模型中的 comp 名字信息：红色背景下是焊接类型，分别是点焊(Spot Weld)、铆接(Rivet)缝焊(MIG)、螺栓(Bolt)与粘胶(ADH)；黄色部分是被连接件的零件号信息；绿色部分是连接属性。

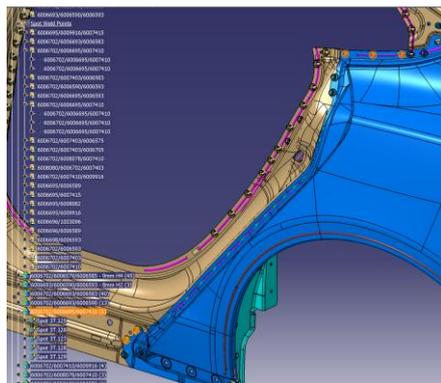


图 2.9 CAD 模型中的连接信息
Fig. 2.9 The connectors information in CAD model

Spot Weld	CNX-6009027-00-C	#-6009027/6009027	(3)
Spot Weld	CNX-6009026-00-C	#-6009026/6009026	(3)
Rivet	CNX-6008775-00-E	#-6008250/6006580	7mm H4 (1)
Rivet	CNX-6008769-00-E	#-6008250/6006482	7mm H4 (1)
Rivet	CNX-6007863-00-D	#-6006677/1015818/6006678	8mm H4 (10)
Rivet	CNX-6007863-00-D	#-6006677/1015818	5mm H4 (4)
Rivet	CNX-6008856-00-F	#-6006880/6008067	7.5mm H2 (20)
MIG CenterCurve	CNX-6006578-00-H	#-MIG_WELDESAB_ER70 S	(135mm)
MIG CenterCurve	CNX-6006480-00-H	#-MIG_WELDESAB_ER70 S	(135mm)
MIG CenterCurve	CNX-1022898-00-A	#-MIG_WeldsER4145	(209mm)
Bolt	2007206	#-BLT_HF M6-1.00x25 [8.8]	ZrAl
Bolt	2007116	#-BLT_HF M10x1.50x30 [10.9]	G720
Bolt	1014747-00-A	#-BLT_PANFLG TRX M8-1.25x20	
Bolt	1014330-00-A	#-BLT_SHCS FLG M10-1.50x25 [12.9]	ZrAl
Bolt	1009420-00-A	#-BLT_HF M6-1.00x20 [8.8]	ZrAl
Bolt	1006551-00-A	#-BLT_P_00067560	#-BLT_WSHR_FLAT M6-1.00x25 ZrAl
Bolt	1004537-00-A	#-BLT_WSHR_FLAT M6-1.00x16	ZrAl
ADH CenterCurve	CNX-1020514-00-A	#-MasticHenkelTerostat	4010.9 (1137mm)
ADH CenterCurve	CNX-1015637-00-B	#-StructuralAdhesiveDow - Betamate	4601 (1667mm)
ADH CenterCurve	CNX-1014648-00-D	#-Betamate	4601 (572mm)
ADH CenterCurve	CNX-1003099-00-F	#-AdhesiveDOW - BETAMATE	4601 (865mm)

图 2.10 CAE 模型中的连接信息
Fig. 2.10 The connectors information in CAE model

实现连接的主面板及主程序如图 2.11 所示：该面板能够让工程师及时发现连接错误，反馈给设计部门，并及时修改。

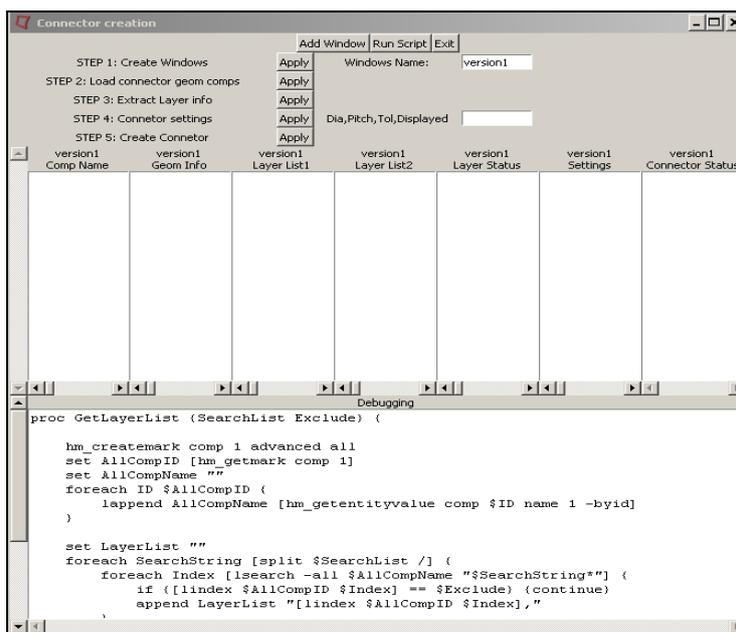


图 2.11 建立连接的用户主界面
Fig. 2.11 The main GUI to define the connectors

2.2.4 建立刚性墙与接触的开发

对于刚性墙而言，需要的外界输入参数包括：刚性墙的平面基点位置坐标和刚性墙表面的方向向量，这些参数在不同的侧面碰撞模型中也不尽相同。另外，还需要摩擦系数等参数的输入。对于接触而言，则需要主接触面(或 set)、从接触面(或 set)，摩擦参数、接触阻尼参数等多种输入参数。

以上参数主要以 GUI 组件的方式输入，这就涉及在 GUI 界面中返回值读写问题，一般有两种方式：一是以 TCL 语言写返回值，一种是以 HWPM(HyperWorks Process Manager)语言编写，根据需要来选择。本文采用后者，即 HWPM 语言写返回值(Write Callbacks)。以文本域(TextField)为例，格式如下，

读出：DataModel.SetValue("mytext", "ABC");

写入：var strValue = DataModel.GetValue("mytext")。

再者，调用关键字*RIGID_PLANAR 实现刚性墙的建立，调用*contact_option 实现接触的定义。建立刚性墙的界面如图 2.12 所示，建立接触的界面如图 2.13 所示。

其中建立刚性墙的主函数如下：

```
*interfacecreate "$sideimpact_rigidwall" 5 2 11
*createmark groups 1 "$sideimpact_rigidwall"
*dictionaryload groups 1 "$directory/templates/feoutput/ls-dyna971/dyna.key"
"RWPlanar"
...
*attributeupdateentity groups 2 31 9 0 0 sets $sl_ID
...
*attributeupdatedouble groups 2 59 9 1 0 $fric
*createnode $rw_textfiled_x $rw_textfiled_y $rw_textfiled_z 0 0 0 0
*createvector 1 0 0 $rigidwall_firstvector
*createvector 2 0 0 $ rigidwall_secondvector
*rigidwall_geometry "$sideimpact_rigidwall" 1 1 1 0 0 0 0 0
```

建立接触(以面面(*contact_surface_to_surface)自动接触为例)的主函数如下：

```
interfacecreate "$contactname" 1 2 11
*createmark groups 2 "contact"
*dictionaryload groups 2 ""$directory/templates/feoutput/ls-dyna971/dyna.key"
"SurfaceToSurface"
*attributeupdateint groups 2 4191 9 2 0 0
...
*attributeupdatedouble groups 2 9 9 1 0 $VDC
```

*attributeupdatedouble groups 2 5 9 1 0 \$FS

...

*attributeupdatedouble groups 2 6 9 1 0 \$FD

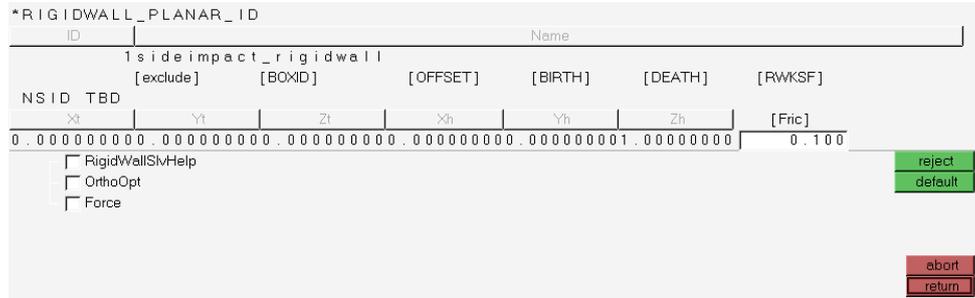


图 2.12 刚性墙卡片设置用户界面

Fig. 2.12 The GUI to define the rigidwall card

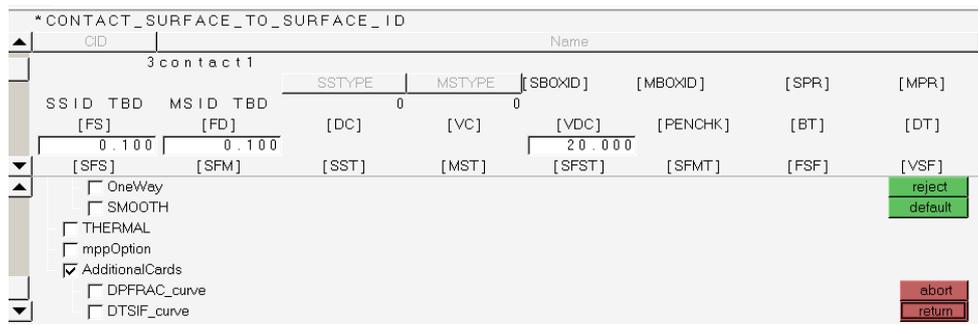


图 2.13 接触卡片设置用户界面

Fig. 2.13 The GUI to define the contact card

2.2.5 施加边界条件面板及子程序开发

(1) 施加初速度面板及子程序开发

初速度的施加面临两个问题：一是初速度的大小，二是初速度的方向。初速度的大小可以通过 GUI 面板输入，通过返回值返回给后台子程序。初速度的方向往往需要通过定义方向向量来实现，可以调用 Hypermesh 原有面板实现。首先调用载荷数据库(见第 2.2.2 (3)节)获得初速度的设计值，并赋值给变量 inial_x、inial_y 与 inial_z，利用 TCL 脚本获得返回值，并赋给 xcomp、ycomp 与 zcomp 后的文本域。通过以下 TCL 脚本完成：

```
::hw::pmgr::PmgrSetData 0 "Initial_velx.value" $inial_x;
::hw::pmgr::PmgrSetData 0 "Initial_vely.value" $inial_y;
::hw::pmgr::PmgrSetData 0 "Initial_velz.value" $inial_z;
```

施加对象可以是 set、part 组、也可以是 nodes 集，load types 选择 Init Vel. 施加载荷的主程序是：

```
*loadcreateonentity_curve sets $ID_set 8 1 $inial_x $inial_y $inial_z $xlocation
$ylocation $zlocation 0 1
```

其中 ID_set 变量为获得的 set 集的 ID, 可以是点 set, part set 也可以是单元 set, xlocation、ylocation 与 zlocation 等变量为施加初速度的方向向量; 开发面板如图 2.14 所示:

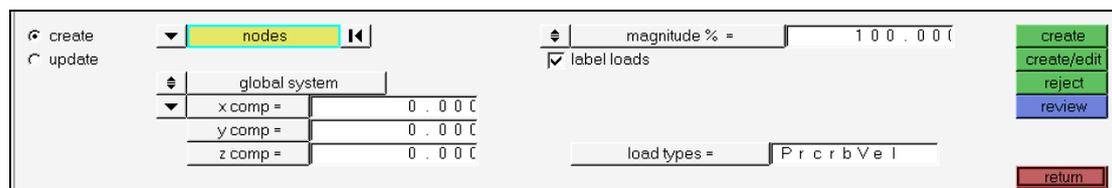


图 2.14 初速度卡片设置用户界面

Fig. 2.14 The GUI to define the initial velocity card

(2)重力加速度面板及子程序开发

开发的面板如图 2.15 所示。面板中参数的后台子程序通过调用重力加速度载荷库(gravity.csv, 见第 2.2.2(3)节), 可自动建立重力加速度曲线获得载荷的 ID, 存储于变量中(载荷大小一般取 $9810 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$)。方向一般是 z 轴方向, 为了避免每次都需要输入的麻烦, 设置默认值就是 z 轴方向, 同时为了避免一些单位不一致等特殊情况下分析的需要, 面板中也可以修改默认曲线、方向向量、放大系数等参数, 主函数如下:

```
*dictionaryload loadcols 2 "$directory /templates/feoutput/ls-dyna971/dyna.key"
"LoadBody"

*createmark loadcols 1 "$gravitynewname"

...

*attributeupdateentity loadcols 3 172 9 $gravity_curve_ID 0 curves 0
*attributeupdatedouble loadcols 3 738 9 0 0 9810
*attributeupdateentity loadcols 3 199 9 $gravity_curve_ID 0 curves 0
*attributeupdateentity loadcols 3 5455 9 $gravity_curve_ID 0 systems 0
```



图 2.15 重力加速度卡片设置用户界面

Fig. 2.15 The GUI to define the gravity card

2.2.6 定义控制卡片与输出卡片界面开发

对于控制卡片与输出卡片，包括控制时间步、结束时间、单元控制、接触控制等 7 个控制卡片与 d3plot 输出控制、d3thdt 输出控制等 4 个输出卡片，共 12 个卡片，对于不熟悉的人而言设置十分繁琐，且分散在 Hypermesh 的 card 面板下，不易寻找，且容易定义错误。为了解决这些问题，首先要开发一个流程化的面板，这种面板开发的语言非常简单。与上述重力加速度及初速度卡片的开发方式类似，不再一一说明，开发的面板如图 2.16-图 2.17 所示；

*CONTROL_SHELL							
[WRPANG]	[ESORT]	[IRNXX]	[ISTUPD]	[THEORY]	[BWC]	[MITER]	[PROJ]
20.000	1				1		1

a. 壳单元控制卡片

*CONTROL_SOLID				<input type="button" value="next"/> <input type="button" value="prev"/> <input type="button" value="return"/>
[ESORT]	[FMATRIX]	[NIPTETS]	[SWLOCL]	
0	1	4	1	

b. 实体单元控制卡片

*CONTROL_CONTACT							
[SLSFAC]	[RWPNAL]	[ISLCHK]	[SHLTHK]	[PENOPT]	[THKCHG]	[ORIEN]	[ENMASS]
0.100	1.000	1	2	1	0	1	0
[USRSTR]	[USRFRC]	[NSBCS]	[INTERM]	[XPENE]	[SSTHK]	[ECDT]	[TIEDPRJ]
0	0	10	0	4.000	0	0	0
[SFRIC]	[DFRIC]	[EDC]	[VFC]	[TH]	[TH_SF]	[PEN_SF]	

c. 接触控制卡片

*CONTROL_HOURLASS		*CONTROL_ENERGY			
[IHQ]	[QH]	[HGEN]	[RWEN]	[SLNTEN]	[RYLEN]
4	0.050	2	2	2	2

d. 沙漏与能量控制卡片

*CONTROL_TERMINATION				
[ENDTIM]	[ENDCYC]	[DTMIN]	[ENDENG]	[ENDMASS]
0.080				

e. 终止时间控制卡片

*CONTROL_TIMESTEP						
[DTINIT]	[TSSFAC]	[ISDO]	[TSLIMIT]	[DT2MS]	[LCTM]	[ERODE]
1.000	0.900			-9.000e-0		

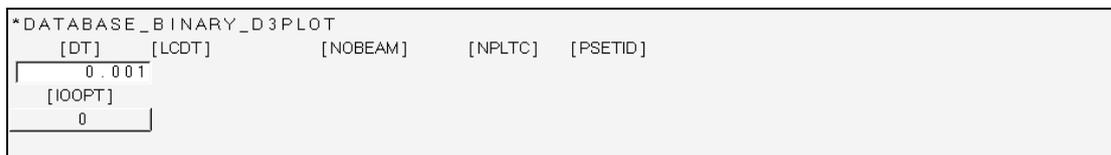
f. 时间步控制卡片

图 2.16 求解控制卡片设置用户界面

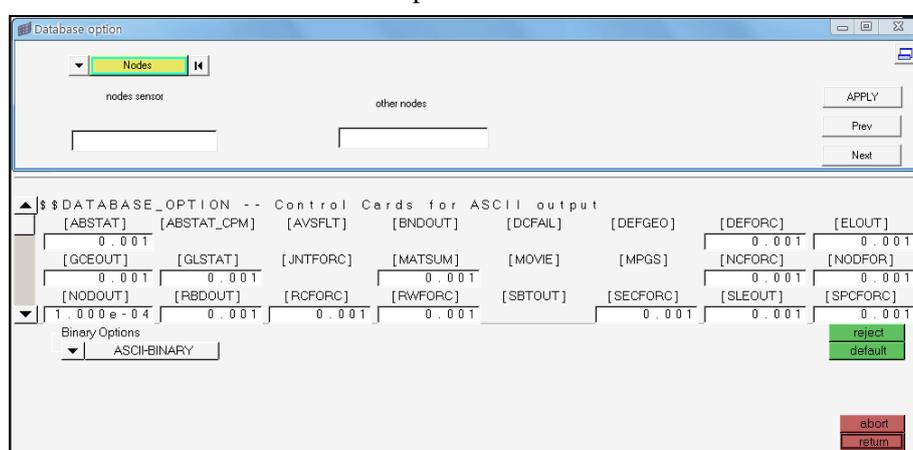
Fig. 2.16 The GUI to define the solution control card

为了提高参数的设置效率，本文根据企业分析经验，设定了参数的初始默认值。对于输出数据频率卡片(*Database_option)，首先需要设置的参数很多，分析效率低。对于碰撞分析而言，最关心的是通过 nodout 文件传感器捕获的速度或加速度曲线，因此其输出时间间隔会设置的较小，为计算时间的 0.1%-0.5%；而

其他曲线只需要大体趋势、最大值和最小值即可，其输出时间间隔会设置的较大，为计算时间的 2%-10%。为此，本文开发了能够实现统一定义上述输出频率的面板，如图 2.17 b 所示，选择 nodes 可以定义需要设置传感器的节点，图中第一个文本域(nodes sensor) 用于定义 nodout 文件的输出间隔，后一个(other nodes)用于定义其他文件的输出间隔。



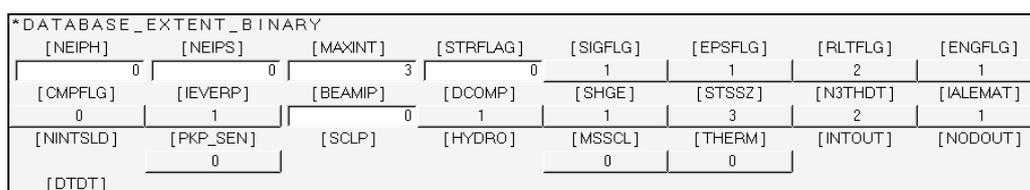
a. d3plot 输出卡片



b. 输出数据频率控制卡片



c. d3thdt 输出控制卡片



d. 其他二进制文件输出控制卡片

图 2.17 文件输出控制卡片设置用户界面

Fig. 2.17 The GUI to define the file output control card

面板的后台回调子程序如下:(以时间步控制卡片*control_shell 为例):

```

*cardcreate("BeamShll")

set WRPANG [::hw::pmgr::PmgrgetData 0 "WRPANG.value"]

set ESORT [::hw::pmgr::PmgrgetData 0 "ESORT.value"]

set BWC [::hw::pmgr::PmgrgetData 0 "BWC.value"]
    
```

```

set PROJ [::hw::pmgr::PmgrgetData 0 " PROJ.value"]
*attributeupdatedouble(cards,2,2088,9,1,0,$WRPANG)
*attributeupdateint(cards,2,2090,9,1,0,$ESORT)
...
*attributeupdateint(cards,2,2096,9,1,0,$BWC)
...
*attributeupdateint(cards,2,3219,9,1,0,$PROJ)
    
```

2.2.7 导出 K 文件的开发

根据需求选择输出文件的格式：k 文件，key 文件及 hm 文件。导出 K 文件的界面如图 2.18 所示。组件间的参数传递通过符合 java beans 规范的 HWPM 脚本编写如下：

```

var value = DataModel.GetValue('comboexportFiletypes');
var filters = new java.util.Hashtable();
if (value.equals("HM"))
    filters.put(".hm", "Hypermesh");
else if (value.equals("LS-Dyna"))
    filters.put(".key", "LS-Dyna");
{
    filters.put(".key", "LS-Dyna");
    filters.put(".key", "LS-Dyna");
}
DataModel.SetProperty('fbexportportFile', 'filter', filters);
    
```



图 2.18 k 文件导出的用户界面

Fig. 2.18 The GUI to define the k file output card

2.3 程序的调试

对于一个复杂的流程自动化系统，容易在程序编写过程中出现失误，或者考虑不周使程序偏离最初的设计目的，这些不足最终都需要通过程序调试阶段来解决。程序调试不仅仅是为了修正简单的代码错误，更重要的是合理评价整个流程自动化系统的合理性，对整个系统进行进一步的改善与简化。

本文侧面碰撞流程自动化系统的调试，主要借助于两个工具：一个是 Process Manager 软件，一个是 Hypermesh 的命令窗口。

利用 Process Manager 能够及时发现 GUI 界面的不足，进行合理的修正，并能够及时的保存，实现与调试程序的同步修改与验证。

调试过程中，应合理利用 Hypermesh 的命令窗口(command window)，它实际是内嵌了 Active Tcl/ Tk 开发软件包，并加入了 HyperWorks API 函数的 TCL 命令窗口(Tcl Command Window)。可以将程序复制到窗口，运行，同时根据生成的 command.cmf 记录文件查找错误的来源，并进行定位，为程序的调试带来了方便。

2.4 本章小结

本章针对汽车侧面碰撞分析过程的重复性工作多，工作繁琐，需要设置的参数过多的特点，结合 TCL/TK 语言、Process Manager 工具开发了侧面碰撞分析流程自动化系统；开发了标准化的材料库和载荷库，实现了通用前处理过程中导入 CAD 模型、抽取中面、建立连接、建立刚性墙与接触、施加边界条件、定义控制卡片与输出卡片整个流程的自动化，大幅度提高了侧面碰撞有限元建模的效率。

第3章 SUV 整车有限元模型的建立与有限元分析

本文以改善整车侧面安全性能，实现轻量化设计为最终目标，同时要保证车门的模态性能及刚度，是一个涉及碰撞安全性、模态及刚度分析的多目标优化问题。在进行优化之前，必须要了解该系统的初始设计状态，而了解初始设计空间最为高效快捷的方式便是有限元分析。首先，结合上一章开发的流程自动化工具，完成整车有限元模型的建立。然后，分别针对碰撞安全问题进行 SUV 的侧面碰撞安全性分析，针对模态问题进行前门与中门的模态分析，针对刚度问题进行前门与中门的刚度分析。最终，根据各子系统的分析结果作进一步的讨论，为后续的优化设计提供基础。

3.1 SUV 整车有限元模型的建立

整车有限元模型的建立是一个十分复杂与耗时的过程，首先要在 CATIA 等三维 CAD 软件中建立三维数据模型，将整车模型按车身、底盘、电器、附件、门盖开合件等进行归类。然后为了方便后续网格的划分，必须对整车 CAD 模型进行必要的简化，简化必须严格按照企业建模标准进行，同时避免因过度简化影响有限元模型的精确性或简化不足大幅度增加前处理过程的工作量。CAD 简化后，分别将各个子系统导入有限元前处理软件 Hypermesh 中，然后在 Hypermesh 中完成前处理工作：首先，必须要进行 CAD 模型的检查，避免因 CAD 软件与 CAE 软件的兼容性问题引起的几何数据缺失等问题；然后，加载上一章开发的流程自动化系统、自动完成中门的抽取；接着，进行几何特征清理、手动完成有限元网格划分与网格单元质量检查、自动实现各组件之间的连接、赋材料与单元属性、建立接触与刚性墙、施加边界条件、定义控制卡片、定义输出文件控制卡片等过程；最终，导出 K 文件，完成整车模型的建立。为后续分析提供模型基础。

结合第二章开发的流程自动化工具，得到基于流程自动化工具的 SUV 侧面碰撞有限元仿真分析建模流程如图 3.1 所示：

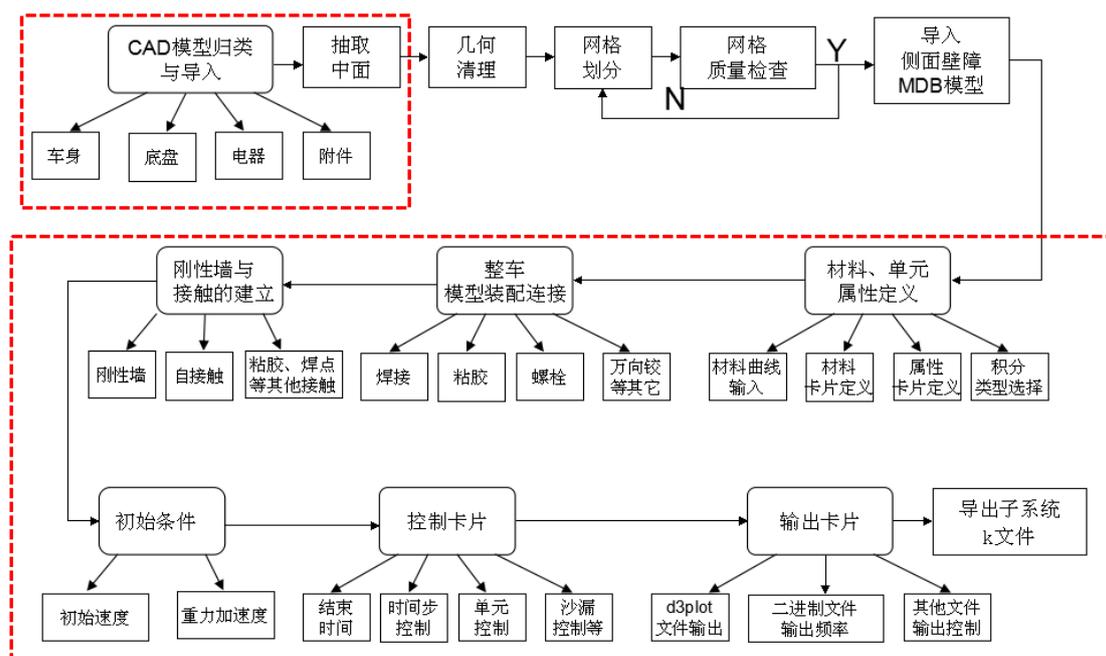


图 3.1 整车侧面碰撞有限元模型建立流程图

Fig. 3.1 The flow chart of whole vehicle side impact finite element model

注：图中红色虚线所包含的范围通过流程自动化系统工具完成。其他部分借助于 Hypermesh 手动完成。

软件只是辅助工具，真正的设计还是由工程师来完成，在借助于流程自动化工具的同时要注意时刻检查模型中的问题，及时进行修改，也可以根据需要随时在流程自动化面板与 Hypermesh 原面板之间进行切换。

3.1.1 CAD 模型归类与导入

将整车 CAD 模型按车身、电器、底盘、附件的方式进行归类。在导入 CAD 模型之前首先要进行 CAD 模型的检查。主要是检查模型是否符合设计标准，并对个别的电器线束与地毯等附件进行简化替代；检查各零部件模型之间是否有干涉，并进行合理的调节。CAE 模型是在 CAD 模型的基础上建立的，唯有准确无误的 CAD 模型才能建立起准确可靠的 CAE 模型。

然后，在 Hypermesh 中调用 Process Manager，启动第 2 章开发的流程自动化系统，根据图 2.3 列出的流程，选择 Import Model 步，选择类型为 catiaV5，点击 import 按钮就能准确无误的完成几何模型的导入。

3.1.2 抽取中面与几何清理

首先利用流程自动化系统完成中面的抽取工作，然后对抽取的中面进行几何

清理工作。进行几何清理的主要目的有两个，一是修正中面抽取过程中产生的缺陷，二是去掉一些细小的特征，防止这些细小特征导致有限元网格质量过差影响计算。中面抽取过程中难免因为倒角圆角等原因存在几何缺面、重复面、缝隙、错位等缺陷，几何清理工作主要是修复这些错误，同时去掉一些工艺孔、小的过渡圆角、小的定位孔、小凸台、过度特征线等细小特征。

3.1.3 有限元网格划分与网格质量检查

整车部件的 CAD 模型在完成几何清理工作与结构简化后，通过有限元网格划分实现几何模型有限元模型的转换。在划分过程中，既要保证结构特征，同时要在不影响计算精度的前提下，尽量简洁。对于高度非线性的碰撞分析而言，尽量采用壳单元，少量使用实体单元，且实体单元尽量使用六面体网格，避免使用四面体网格；对于几乎不发生变形的底盘件如动力总成系统、变速箱、油箱、传动轴等可用刚体单元模拟，以表面网格模拟其与其他部件发生的碰撞接触特性，并利用*part_inertia 赋予其质量及转动惯量特性，模拟真实的质心位置及惯性特性。

对于网格的划分，企业有着严格的划分标准。每个部件网格划分结束后，一定要进行质量的检查，避免因个别网格质量太差使得计算成本剧增，分析结果不可靠，甚至无法计算。质量检查的标准主要有雅克比、长宽比、最小尺寸、翘曲度、三角形比例等等。具体的 2D 单元质量要求如表 3.1 所示；3D 单元要求是最小尺寸不得小于 5mm，扭曲度要小于 60 度。网格质量检查结束后，通过不断地改进得到合格的有限元网格，如图 3.2 所示。

表 3.1 2D 单元质量检查标准值

Table. 3.1 The standard values of 2D element quality checking

判别标准	Ideal 值	Good 值	Warn 值	Fail 值	Worst 值
最小尺寸	10mm	8 mm	6 mm	5 mm	3 mm
最大尺寸	10 mm	15 mm	25 mm	30 mm	50 mm
长宽比	1	1.2	2	3	4
翘曲度	0°	5°	14°	15°	20°
最大四边形内角	90°	110°	130°	135°	145°
最小四边形内角	90°	70°	50°	45°	40°
最大三角形内角	60°	80°	110°	120°	130°
最小三角形内角	60°	50°	30°	25°	20°
扭曲度	0°	10°	55°	60°	90°
雅克比	1	0.9	0.7	0.6	0.5
最大弦差	0	0.3	0.8	1	2

三角形比例

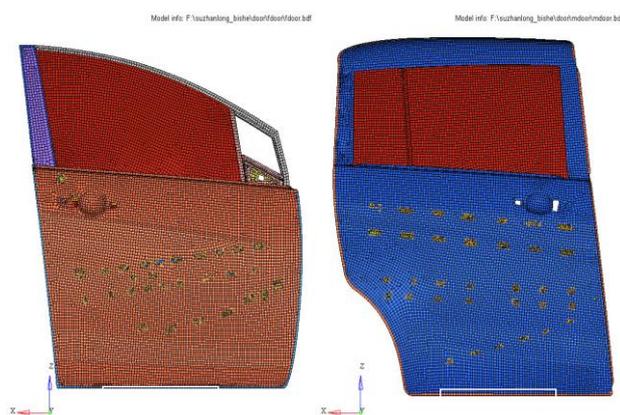
0

3

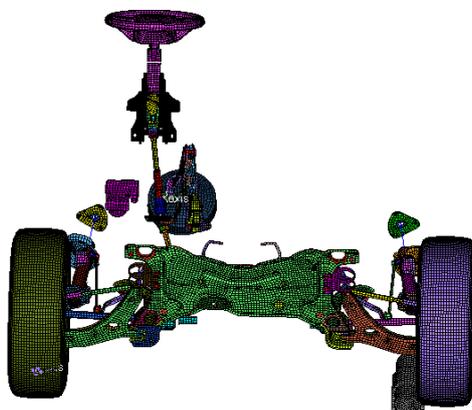
4

5

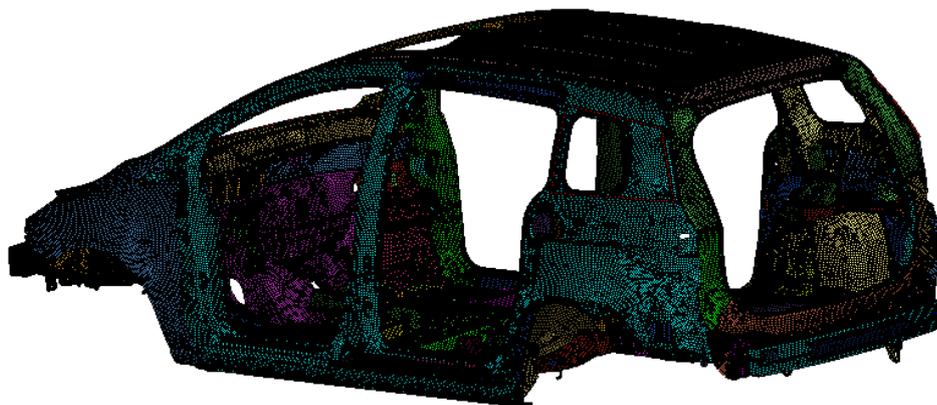
8



a. 白车身有限元网格



b. 前悬架有限元网格



c. 白车身有限元网格

图 3.2 不同子系统的有限元网格

Fig. 3.2 The finite element mesh of different subsystem

3.1.4 MDB 模型的导入

根据 GB20071-2006 侧面碰撞标准可知，移动可变形壁障由台车与碰撞器壁障组成，总质量为 950kg；其有限元模型及其尺寸数据如图 3.3 所示。台车模型

通过 20 号刚性材料建立的刚性体模拟，碰撞器壁障采用 26 号蜂窝铝材料模拟。

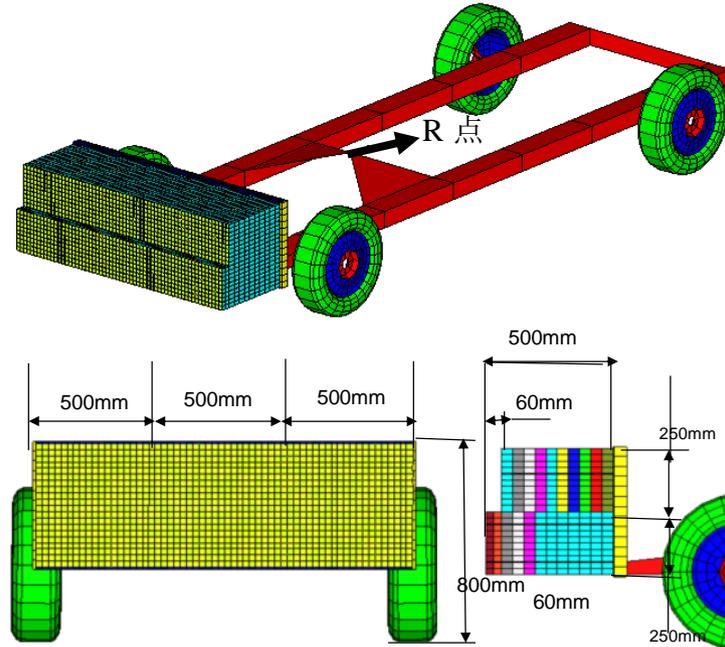


图 3.3 移动可变形壁障模型
Fig. 3.3 MDB model

3.1.5 单元和材料属性的定义

根据 BOM 表，利用流程自动化系统调用材料库，可以为组件自动定义单元属性与材料属性。对于侧面碰撞模型，车身钣金件的材料主要利用 24 号材料模拟，密度、弹性模量、泊松比、应力应变曲线、应变率等材料参数通过材料库直接调用，如图 3.4 所示是 DC04 材料在不同应变率下的应力应变曲线。基本不发生变形的底盘件主要用 20 号刚性材料模拟。

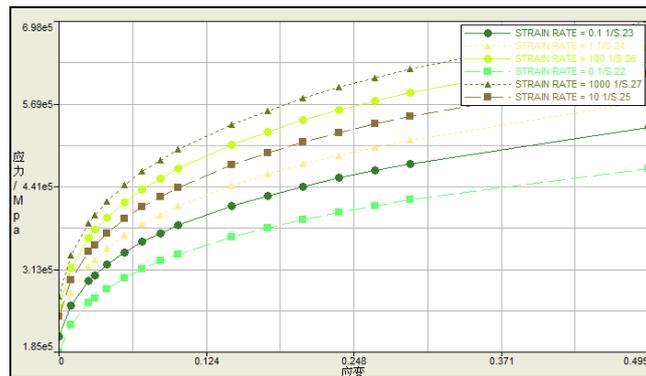


图 3.4 DC04 在不同应变率下的应力-应变曲线
Fig. 3.4 The stress - strain curve of DC04 with different strain rate

3.1.6 整车模型装配与连接的建立

对于焊点、螺栓、粘胶等大批量的连接，上一章已经开发了流程自动化的工

具,可以快速实现,得到焊点、粘胶的分布图如图 3.5 所示。焊点采用的能够同时较好的体现力与力矩传递的六面体实体单元模拟;粘胶连接采用的 Adhesive 单元(六面体与五面体)模拟^[63,64]。对于万向铰链、柱铰链、转动铰链等,分别采用万向铰单元、柱铰单元、转动铰单元模拟,整车中也就几处地方用到,只需借助于 Hypermesh 手动完成即可。柱铰单元与万向铰单元的示意图分别如图 3.6 和图 3.7 所示。

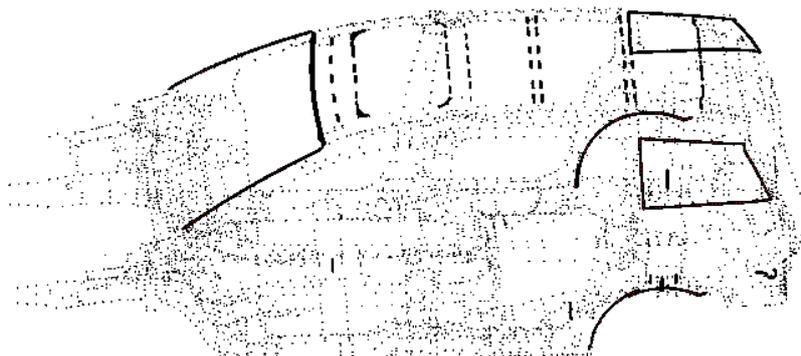


图 3.5 整车焊点、粘胶分布图

Fig. 3.5 The spotweld and adhesive distribution graph of whole car

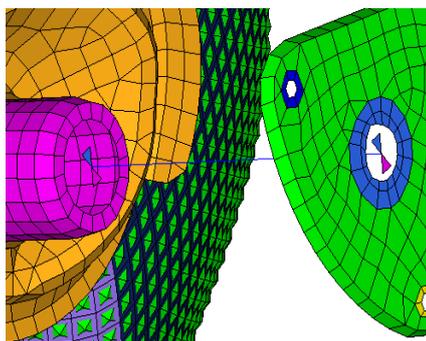


图 3.6 柱铰链示意图

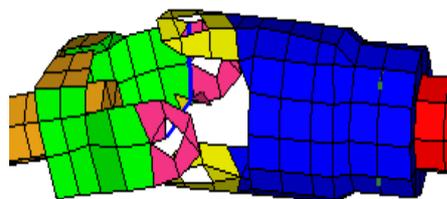


图 3.7 万向铰链示意图

Fig. 3.6 Cylindrical joints schematic diagram Fig. 3.7 Universal joints schematic diagram

3.1.7 刚性墙与接触的建立

LS-DYNA 的接触功能强大,提供了丰富的接触方式供用户选择^[65]。对于地面与车轮的接触,为简化地面建模过程,一般以刚性墙(*Rigid_Planar)的形式模拟。对于整车碰撞的复杂接触行为,LS-DYNA 中有一种高效的自动单面接触(*Contact_automatic_Single_Surface)方式模拟,该方法计算高效且稳定,具有良好的稳健性。此外,还需定义整车与移动可变形壁障的接触,焊点接触、粘胶接触、移动可变形壁障自接触等。以上接触可以通过流程自动化模板迅速准确无误地定义。其中,动态与静态摩擦系数取 0.1,接触阻尼系数取 20^[66]。

3.1.8 初始条件的定义

对于侧面碰撞而言，边界条件在定义地面刚性墙实际已经建立。现在只需施加初始条件即可。根据国家乘用车侧面碰撞法规要求，台车的初速度为 50km/h(13889mm/s)，此外为保证碰撞过程的真实性，碰撞过程中考虑重力加速度的影响，施加重力加速度 $g=9810\text{mm/s}^2$ (以上过程均通过调用载荷库自动完成)。

3.1.9 控制卡片与输出卡片的设置

控制卡片与输出卡片的参数很多，利用流程自动化模板可以很快的设置。计算终止时间设置为 100ms；沙漏控制参数基于类型 4 的刚度公式，沙漏系数 $HQ=0.05$ ；对于泡沫铝材料采用单独的沙漏控制，类型 2 的粘性公式，沙漏系数 $HQ=0.1$ ^[67]。质量缩放参数 $DT2MS=-6.0E-7$ 。D3plot、D3thdt、glstat 等文件的输出频率为 0.001s，nodout 文件输出频率为 $1E-4$ s。

上述参数设置完毕后，整个侧面碰撞建模过程基本结束了，得到整车侧面碰撞分析有限元模型如图 3.8 所示。

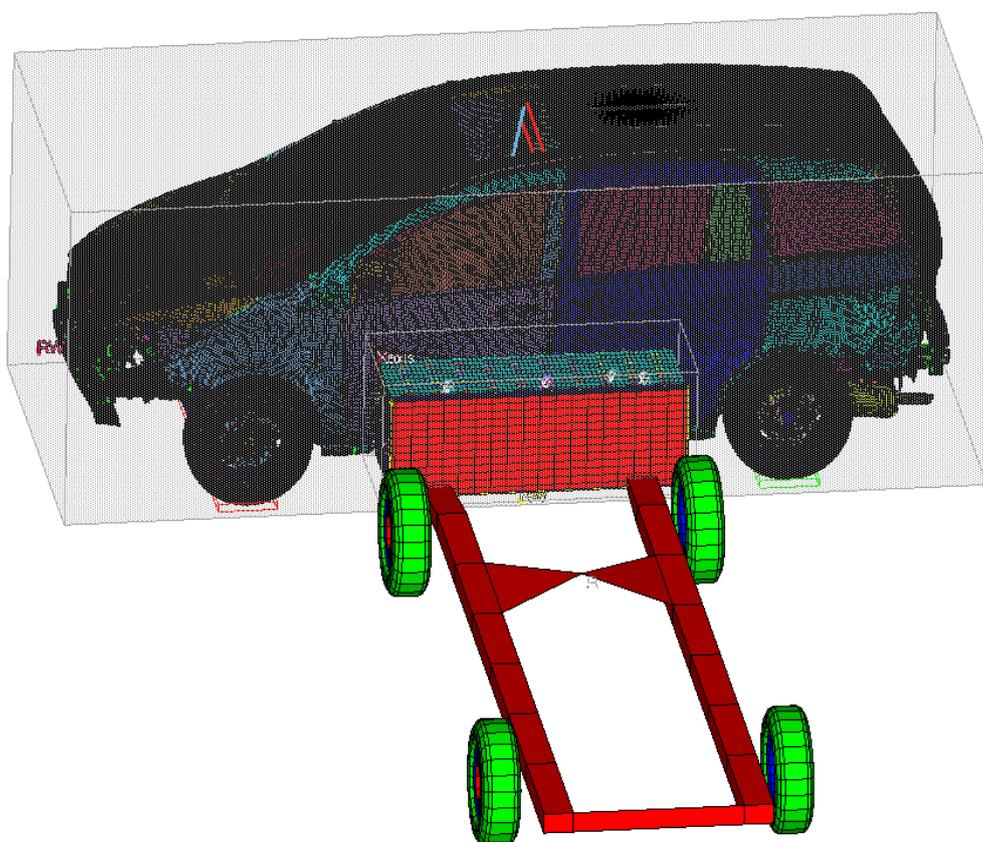


图 3.8 整车侧面碰撞分析有限元模型

Fig. 3.8 The whole car side impact analysis finite element model

面向侧面碰撞安全性分析的前处理工作除几何清理、有限元网格划分与检查

等工作能够控制在 20 分钟以内完成，显著提高了建模效率。将模型以 k 文件的形式导出，准备下一步的仿真分析计算。

3.2 SUV 整车侧面碰撞性能分析

利用导出的 k 文件，提交给 LS-DYNA 显式非线性求解器进行求解。整车的有限元单元多达 200 多万个，在配置为 Xeon(R) 6 核心 12 个 CPU，计算内存 25G 的大型服务器上求解大约需要 12 小时。最终得到分析结果，利用 Hyperview, Hypergraph 等后处理软件进行后处理，根据法规 GB20071-2006 和企业实际分析需要，主要从碰撞内能吸收、整车变形情况、测量点侵入量、测量点侵入速度、滑车加速度等方面^[68,69]做后处理分析，并利用分析结果进行侧面碰撞性能的评价。

3.2.1 碰撞系统总能量分析

汽车碰撞过程中各部件之间的相互作用力的关系极其复杂，难以判断整个过程的分析是否可靠，力的传递关系是否准确。一般通过能量的方式进行判断，汽车侧面碰撞的初始条件是 50km/h 的速度，只有动能，随着移动可变形壁障与整车发生碰撞，部分动能逐步转化为内能，也有少数动能转化为热能等其他形式的能量，整个过程系统的总能量应该是守恒的。通过 CAE 分析结果的能量曲线分析可以判断能量是否守恒，从而断定分析结果是否可靠。

另外在进行高度非线性的碰撞分析中，对于壳单元常采用单点积分的形式参与计算，从而大幅度提高计算效率。但是单点积分单元存在最大的问题就是有可能引起零能模式的沙漏问题，因此在能量检查过程中，还有一项极为关注的就是沙漏能占总能量的百分比。由图 3.9 可知，系统的总能量为 92.452KJ，这与其他文献中的能量相差不大^[70-72]，这是因为侧面碰撞的移动可变形壁障几乎是完全相同的，初速度也相等，也就是说初始动能是相等的，所以系统总能量相差不大。其中沙漏能为 3.725KJ，占总能量的 4.020%；滑移界面能为 2.102KJ，占总能量的 2.269%，两者均远小于 10% 的要求^[73]，因此可知沙漏能够有效控制在合理的范围内，滑移界面能没有明显的大幅度增大，只有少量的增加，是摩擦作用下能量的损耗，可知初始模型未发生明显的穿透，故建立的整车模型准确可靠，可以作为后期优化改进的基础模型。

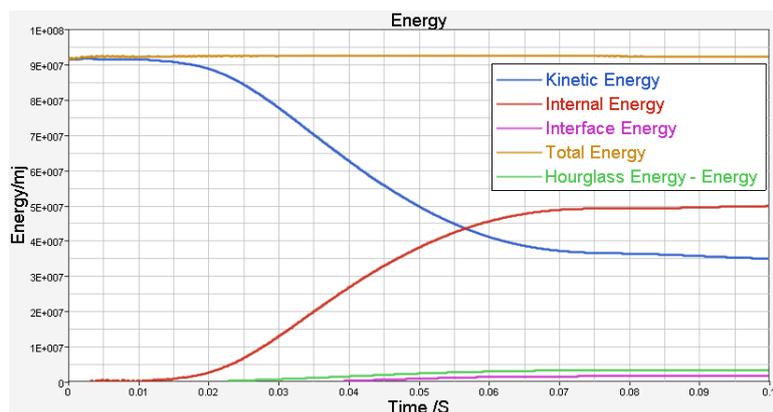


图 3.9 系统能量的转换曲线

Fig. 3.9 The exchange curve of the system energy

3.2.2 整车变形分析

如图 3.10 所示是整车侧面碰撞的变形图，可以明显看出 B 柱下部变形严重，前门与中门明显内折，上部横梁及下部门槛未发生明显变形；由此可知，B 柱、前门与中门位置的侧面碰撞变形最为严重，B 柱下部侵入量过大。

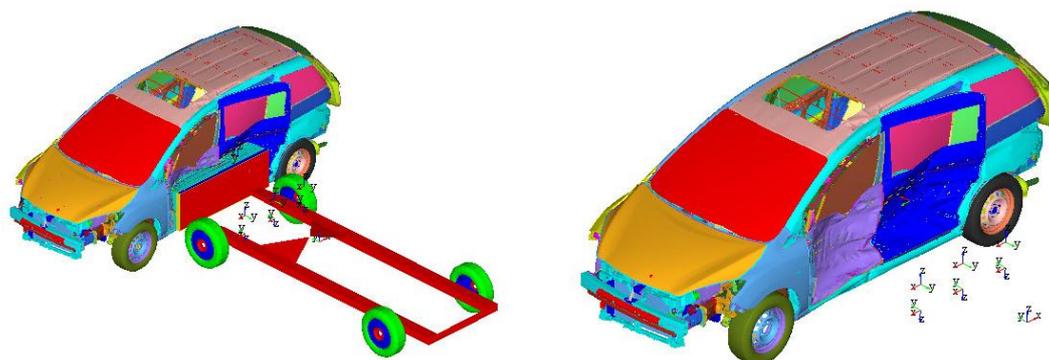


图 3.10 整车侧面碰撞变形图

Fig. 3.10 The side impact deformation of the whole car

由图 3.11 侧面碰撞的局部变形图可知，前门靠近 B 柱部分变形严重，几乎已经碰到了方向盘，对乘员威胁较大，需要重点关注该部位的侵入量与侵入速度。B 柱下部的变形、前门上防撞梁及中门靠近 B 柱位置的变形相当严重，这集中反映了 B 柱附近结构不够强，后续分析要注重 B 柱及车门附近测量点的侵入量及侵入速度的分析。考虑通过提高 B 柱、前门、中门的强度来提高碰撞安全性能。

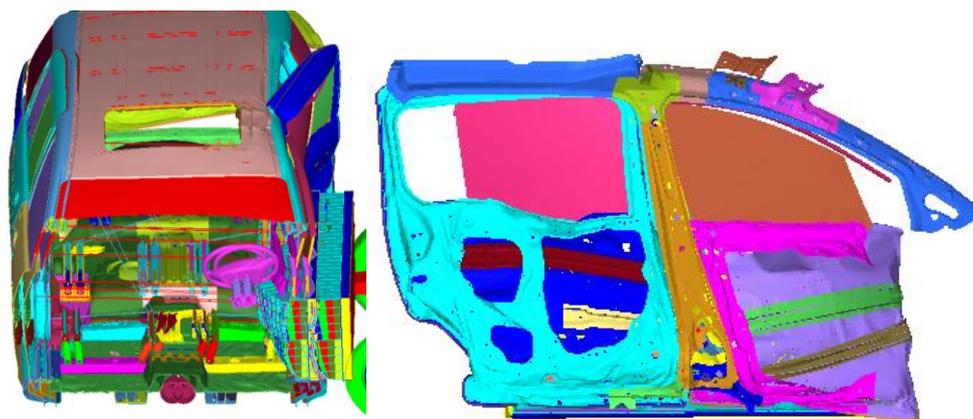


图 3.11 侧面碰撞局部变形图

Fig. 3.11 The side impact local deformation figure

3.2.3 前门与 B 柱测量点侵入量与侵入速度分析

在 GB20071 标准中，假人的重要的伤害评价指标主要包括：头部加速度(HPC)、胸部肋骨变形量(D)、腹部受力峰值、骨盆耻骨结合力点峰值(PSPF)和肋骨粘性指标(VC)五项，这些指标都与 B 柱及前门的侵入量、侵入速度有着密切的关系，而且 B 柱及前门的变形严重，需要重点关注这些部位的侵入量大小。因此本文根据企业要求，主要对这些部位的侵入量与侵入速度与企业标准做对标分析，并根据对标结果对该 SUV 车型的侧面碰撞性能做出合理的评价。

如图 3.12 所示，在 B 柱及车门上选取 11 个测量点，B 柱部位有 6 个，自上而下依次为，P₁、P₂、P₃、P₄、P₅、P₆；前门有 5 个，依次为：P₇、P₈、P₉、P₁₀、P₁₁。

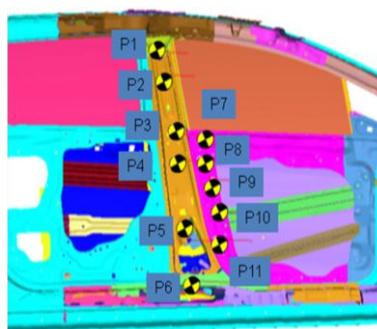


图 3.12 B 柱与前门测量点位置

Fig. 3.12 The measurement points' position of B pillar and the front door

B 柱及前门各测量点的侵入量与侵入速度曲线如图 3.13 所示，最大侵入量与最大侵入速度的数值及企业目标要求如表 3.2 所示。P₁ 和 P₂ 点位于 B 柱上端，靠近顶盖位置，而顶盖上横梁变形较小，所以这两点的侵入量、侵入速度较小，满足要求。P₆ 位于 B 柱下端，靠近门槛横梁位置，门槛承担了大部分的碰撞力，且门槛的强度相对较大，因此此处变形很小，侵入量与侵入速度远小于目标，满

足要求。P₅ 位于 B 柱变形最为严重的地带，侵入量已经超出目标要求，侵入速度满足要求。P₃、P₄、P₇、P₈、P₉、P₁₀ 点这六点对应乘员的胸部和腹部，这六点侵入量过大会对胸部和腹部造成较大的伤害。

表 3.2 最大侵入量与最大侵入速度

Table 3.2 Maximum intrusion displacement and intrusion velocity

测量点编号	代号	测量点最大侵入量/mm		代号	测量点最大侵入速度/m s-1	
		分析值	目标要求		分析值	目标要求
P1	Bd1	138.387	≤150	Bv1	8.153	≤8.5
P2	Bd2	154.249	≤160	Bv2	7.863	≤8.5
P3	Bd3	176.901	≤180	Bv3	7.715	≤9.5
P4	Bd4	184.464	≤190	Bv4	8.003	≤9.5
P5	Bd5	193.171	≤190	Bv5	9.762	≤10.5
P6	Dd6	49.364	≤100	Bv6	5.402	≤7.5
P7	Dd1	180.978	≤190	Dv1	8.851	≤9.5
P8	Dd2	189.070	≤200	Dv2	9.468	≤10.5
P9	Dd3	182.050	≤210	Dv3	10.246	≤10.5
P10	Dd4	195.853	≤210	Dv4	10.626	≤10.5
P11	Dd5	186.794	≤190	Dv5	10.044	≤10.5

由表 3.2 可知，P₃、P₄、P₇、P₈、P₉ 侵入量和侵入速度满足要求，而 P₁₀ 点侵入量未超过目标要求，但侵入速度过大，已超出目标要求；P₁₁ 位于前门两个防撞梁之间理论上应该侵入量较小，但是由于前门前防撞梁发生了严重变形，且下防撞梁也发生了扭曲，导致该点侵入量、侵入速度都较大，但满足要求。

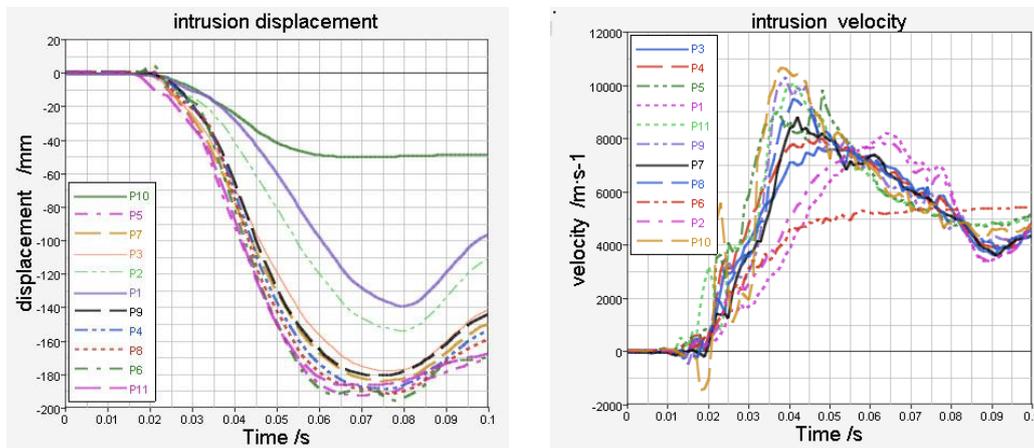


图 3.13 侵入量与侵入速度曲线

Fig. 3.13 The curves of intrusion displacement and intrusion velocity

由图 3.13 可知，在 0.03s 以后 P₁₀ 点的侵入速度迅速增加，在大约 0.35s 时超出了目标要求，通过观察变形动画发现上防撞梁刚好发生屈服，使得侵入速度迅速升高，因此后续优化中应考虑是否需要改进上防撞梁的强度；P₅ 点的侵入量过大，表明 P₅ 附近的结构强度有可能较弱，后续优化应考虑是否需要改进 B 柱内板的强度。

3.2.4 侧面碰撞分析结果评价

经过能量分析发现，系统总能量守恒，沙漏能与滑移界面能占总能量的百分比分别为 4.020% 和 2.269%，小于 10% 的要求，证实了仿真分析结果的可靠性。

经过整车变形分析发现，前门、B 柱、中门下部发生严重变形，要考虑通过提高 B 柱、前门、中门附件结构的强度改善碰撞安全性能。

经过侵入量侵入速度分析可知，测量点 P₅、P₁₀ 处的侵入量、侵入速度较大，尤其是 P₅ 已经超出目标要求，需要在后续优化中逐步改进；P₅、P₁₀ 侵入量过大可能是由 B 柱内板和前门上防撞梁的强度不够引起的，后续优化中要注意改善这两个部位的强度。

3.3 SUV 车门模态性能分析

本文最终是要改善整车侧面安全性能，同时实现轻量化设计的目标，这势必对整车的 NVH 性能造成影响，尤其是对车门的 NVH 性能，因此必须首先进行车门 NVH 性能分析。对于车门而言，影响其 NVH 性能主要来源是振动，研究振动最有效的有限元分析方法便是车门模态分析。因此在优化分析之前，首先要进行前门与中门的模态分析，了解车门的模态性能，为后续的优化提供基础。

3.3.1 车门模态分析

本文的评价指标是车门自由模态分析，而非约束模态。本文的车门自由模态分析是在自由状态下，利用有限元软件分析计算出车门的固有频率与阵型的分析，尽量避开各种振源的激励频率，防止发生共振。首先建立前门与中门的有限元模型，建模过程与整车有限元建模类似，这里不再具体叙述。与整车碰撞模型的不同之处在于：该模型是针对模态计算与下一节刚度计算的模型，无论刚度分析还是模态分析都属于线性小变形的范畴，因此建立的模型都是线性模型，无需考虑发生屈服后的材料性能。利用 Optistruct 求解器计算，求解出前门与中门的前三阶模态与振型图如图 3.14 所示，各阶模态值以及振型的描述如表 3.3 所示。

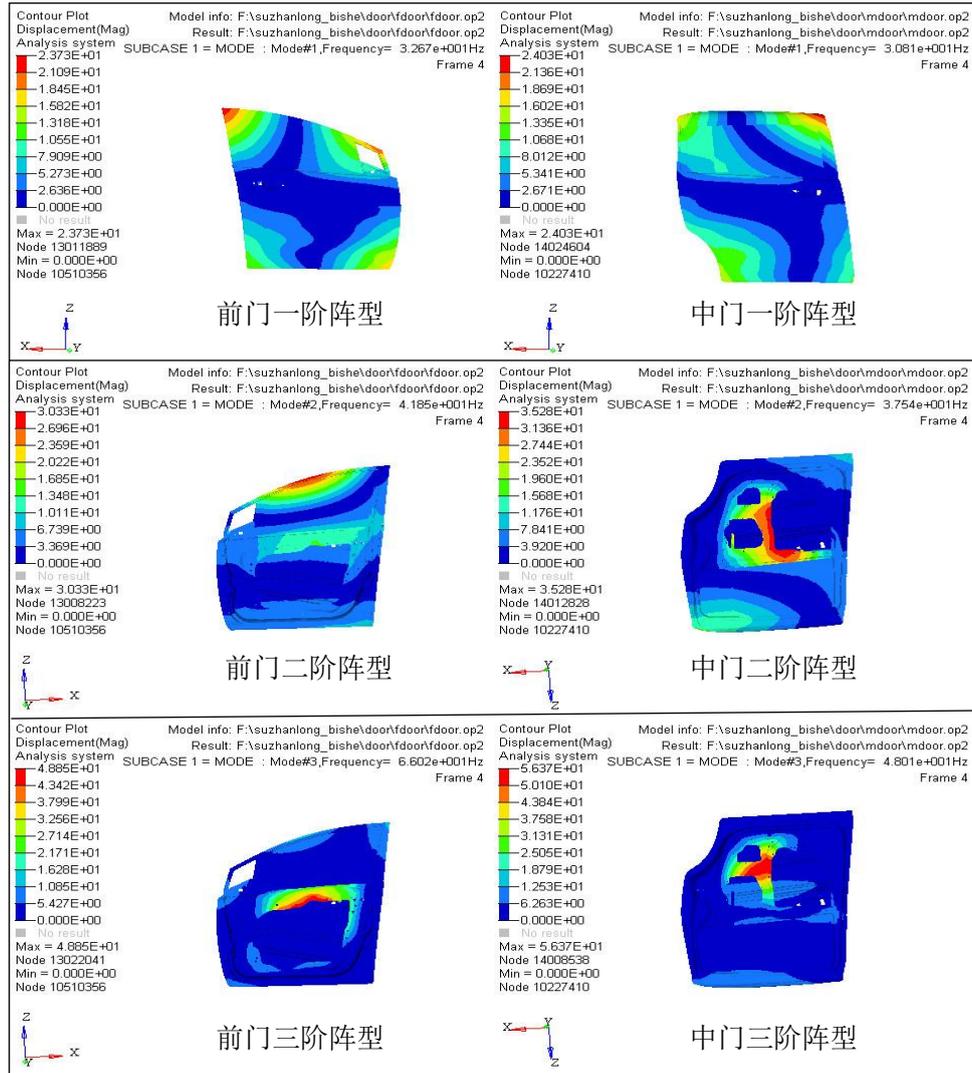


图 3.14 车门前三阶模态振型图

Fig. 3.14 The first three modes vibration types of vehicle doors

表 3.3 车门前三阶模态频率与振型描述

Table. 3.3 Vehicle doors first three order mode frequency and description of vibration types

车门	模态阶数	代号	分析值/Hz	目标要求/Hz	振型描述
前门	1	Fmode ₁	32.67	≥30	一阶扭转模态
	2	Fmode ₂	41.85	≥35	窗框+外板局部模态
	3	Fmode ₃	66.02	≥45	内板局部模态
中门	1	Rmode ₁	30.81	≥30	一阶扭转模态
	2	Rmode ₂	37.54	≥35	内板+外板局部模态
	3	Rmode ₃	48.01	≥45	内板局部模态

3.3.2 车门模态分析结果评价

表 3.3 中的目标要求是根据企业分析经验与对标车制定的。一般的路况条件下，路面凹凸不平引起汽车上下振动，这样的激励频率一般小于 20Hz，该车的发动机缸数为 4，发动机怠速大约为 720r/min，得到发动机激励频率为 24Hz，设

定车门一阶频率目标值大于等于 30Hz ，这是因为车门的一阶频率在加上整车与内外饰件会有所下降，在质量不变的条件下，频率越高车门的刚度越好。对车门第一阶固有频率的要求是既要避开发动机的怠速频率，又要远离白车身的整体一阶模态^[74]。此款车型的发动机的怠速频率为 24Hz 左右，根据计算知白车身一阶扭转频率为 27.5Hz ，前门与中门的第一阶固有频率分别为 32.67Hz 与 30.81Hz ，可见车门一阶固有频率能很好的避开发动机怠速频率与白车身一阶模态频率，而且有一定的富余量。因此，在以上几种激励下均不会发生共振现象，满足设计目标要求。

3.4 SUV 车门刚度性能分析

车门刚度分析是汽车开发中必不可少的一个环节，车门的刚度分析一般分为四个工况：窗框侧向弯曲工况(以下简称窗框侧弯工况)、下垂工况和扭转工况。窗框侧弯工况是研究车门窗框上角受到垂直于车门主平面方向的载荷时，车门产生的弯曲变形情况。扭转刚度工况是研究车门受到垂直扭转力的条件下产生的变形情况。下垂刚度工况是研究车门受到垂直于地面的力的作用下产生的变形状况。

针对本文用的 SUV 车型，其前门是旋转门，中门是滑动门，因此它们加载方式与评价标准也不相同，本章前门参考企业标准 LCBZ201301 旋转门的试验方法；中门参考 SQGM 滑动门标准的试验方法分别进行前门与中门的有限元分析与结果评价。

3.4.1 前门刚度分析

(1)约束方式与加载条件

前门窗框侧弯工况的约束方式与加载条件如图 3.15 所示：约束车门铰链处的六个自由度和门锁处的六个自由度，在车门右上角外板处施加 200N 由车门内向外(Y 向)的力。

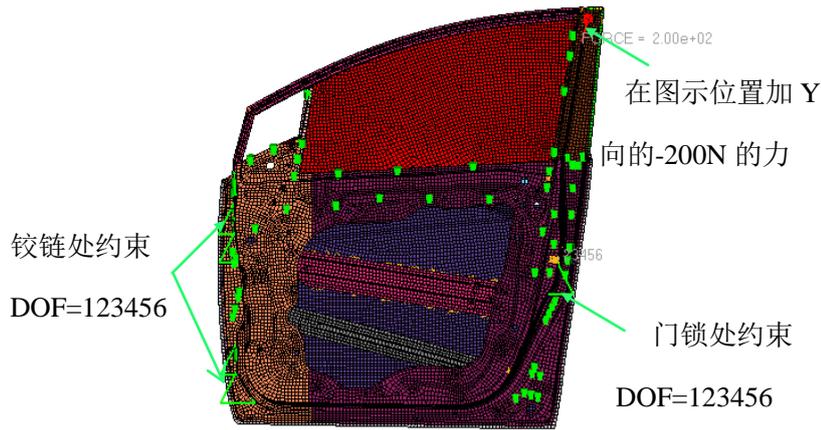


图 3.15 窗框侧弯工况的约束方式与加载条件

Fig. 3.15 Constrains and loads of window frame bending stiffness in side direction case

注：图中约束 DOF1、DOF2、DOF3 分别表示沿 X、Y、Z 向的平动自由度；
约束 DOF4、DOF5、DOF6 分别代表绕 X、Y、Z 向的转动自由度。

前门扭转工况按加载位置不同分为窗框后下角(上扭)与车门后下角(下扭)两种情况，其约束方式和加载条件如图 3.16 所示：约束条件相同，都是约束车门铰链处的六个自由度和门锁处的 X、Y、Z 向的平动自由度(DOF=123)；上扭工况在离下窗框 25mm 的右上角施加 900N 由车门内向外(Y 向)的力，下扭工况在底端平面成 45 度的平面与密封的交点处施加相同的力。

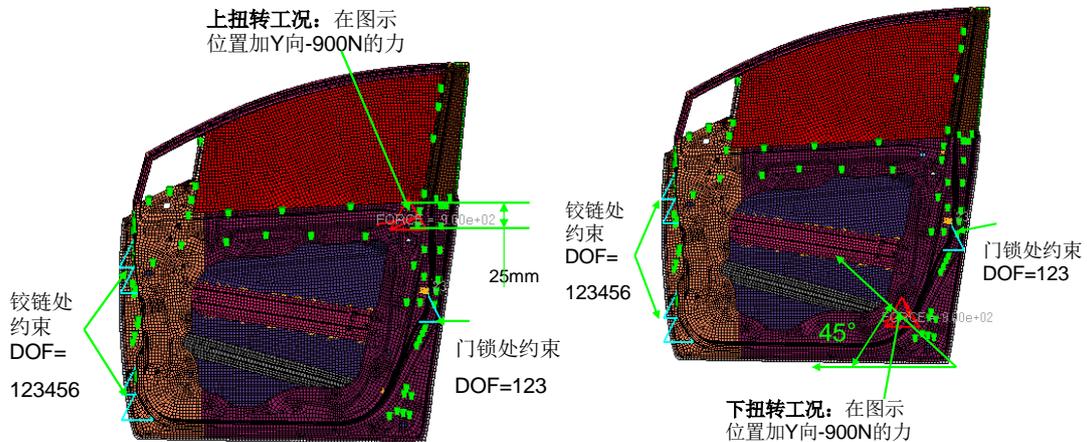


图 3.16 扭转工况的约束方式与加载条件

Fig. 3.16 Constrains and loads of torsional stiffness case

前门下垂工况的约束方式和加载条件如图 3.17 所示：约束车门铰链处的六个自由度；在门锁处施加 300N 竖直向下(Z 向)的力。

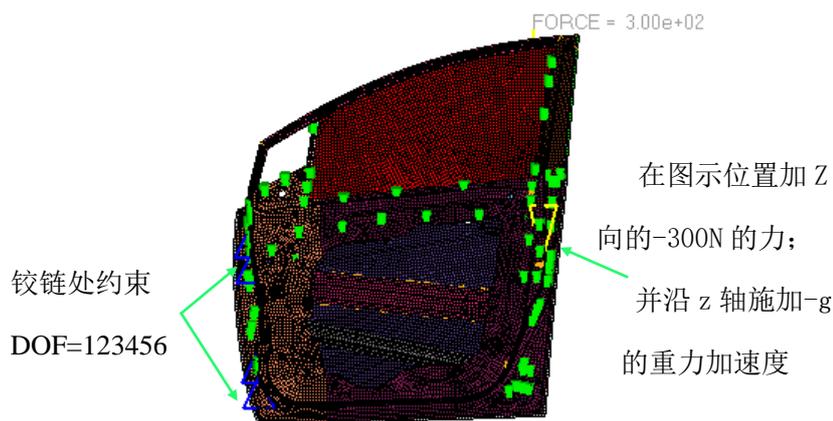


图 3.17 下垂工况的约束方式与加载条件

Fig. 3.17 Constrains and loads of torsional stiffness case

(2)结果分析

根据上述各工况进行约束和加载之后，导出 bdf 文件，利用 Nastran 求解器计算后，经过后处理得到前门各工况下加载点处的位移云图，如图 3.18-图 3.20 所示。

由图 3.18 可知，窗框侧弯工况下的加载点 Y 向位移为 4.320mm，企业要求最大位移量不能超过 10mm，前门窗框刚度满足设计要求。

由图 3.19 可知，下垂工况下的加载点处的 Z 向位移为 1.835mm，企业要求最大位移量不超过 5mm，前门下垂刚度满足设计要求。

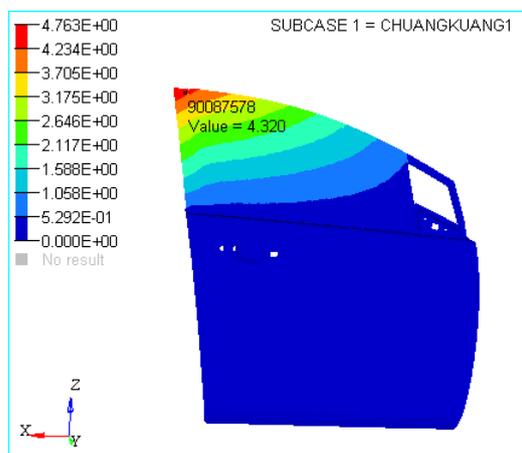


图 3.18 窗框侧弯工况 Y 向位移云图

Fig. 3.18 The Y direction displacement color nephogram of bending stiffness in side direction case

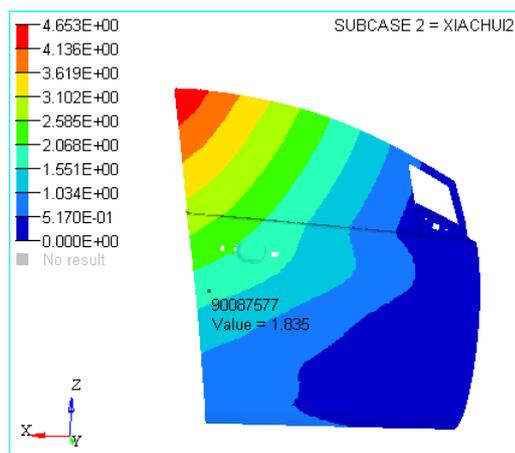


图 3.19 下垂工况 Z 向位移云图

Fig. 3.19 The Z direction displacement color nephogram of sagging stiffness case

由图 3.20 可知，扭转工况下的窗框后下角加载点的 Y 向位移为 3.564mm，车门后下角加载点的 Y 向位移为 3.738mm，企业要求最大位移量不超过 7mm，前门扭转刚度满足设计要求。

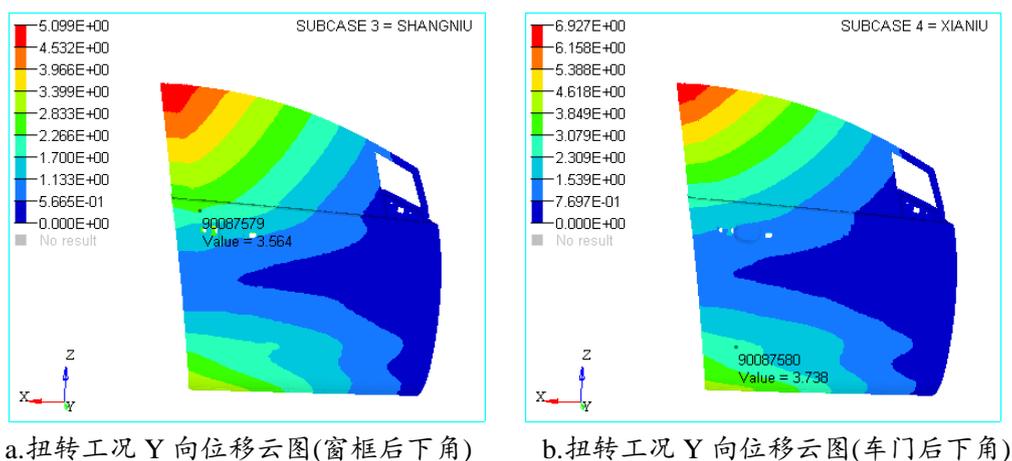


图 3.20 扭转工况 Y 向位移云图

Fig. 3.20 The Y direction displacement color nephogram of torsional stiffness case

3.4.2 前门刚度结果评价

为了合理描述分析值与目标要求之间的余量大小，定义余量系数的公式：

$$\text{余量系数} = \frac{(\text{目标位移值} - \text{分析位移值})}{\text{目标位移值}}$$

前门刚度分析结果及目标要求汇总如表 3.4 所示，前门各工况下的刚度均满足设计要求，且远离许用值。前门刚度各工况的余量系数均比较大，尤其是下垂刚度，也就是说对于后续的轻量化设计而言，还存在较大的轻量化设计空间。

表 3.4 前门刚度分析结果汇总表

Table. 3.4 The summary table of the front doors stiffness analysis

前门刚度各工况	加载位置	代号	分析位移值/mm	LCBZZ201301 目标位移值/mm	余量系数
窗框刚度	窗框后上角	Fstiffness ₁	4.320	≤8	0.85
扭转刚度	窗框后下角(上扭)	Fstiffness ₂	3.564	≤7	0.97
	车门后下角(下扭)	Fstiffness ₃	3.738	≤7	0.87
下垂刚度	锁芯处	Fstiffness ₄	1.835	≤5	1.72

3.4.3 中门刚度分析

(1)约束方式与加载条件

中门框侧向弯曲工况的约束方式与加载条件如图 3.21 所示，按加载位置不同分为前部上角与后部上角两种情况，都是约束定位孔、中滑轨、下滑轨、下部缓冲块、前锁芯、后锁芯等位置的所有自由度；并分别在窗框前上角与后上角处，沿施加 500N 由车门内向外(Y 向)的力。

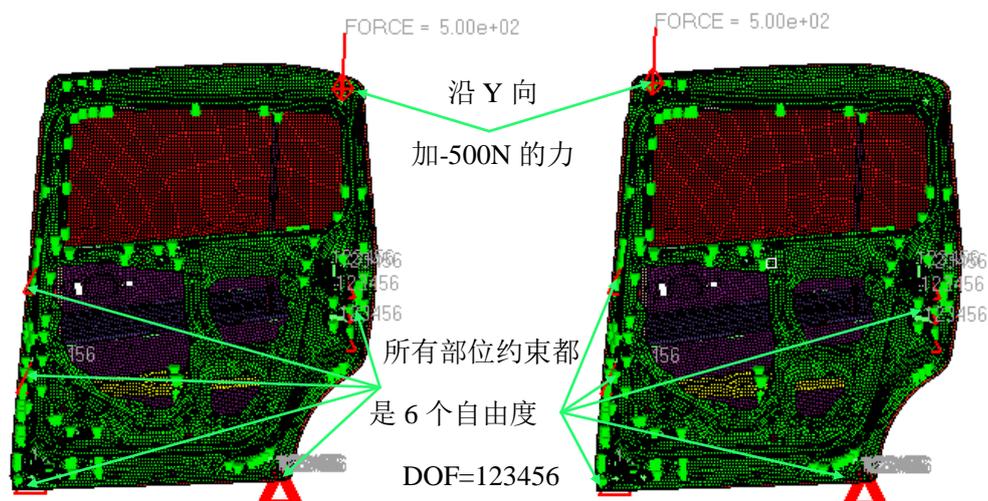


图 3.21 窗框侧弯工况的约束方式与加载条件

Fig. 3.21 Constrains and loads of window frame bending stiffness in side direction case

中门扭转工况按加载位置不同分为上扭与下扭两种情况，其约束方式和加载条件如图 3.22 所示：约束条件都是约束上滑轨、中滑轨和下滑轨处的 Y 向平动自由度，后门锁芯的 X、Z 向平动自由度，前门锁芯处的 Z 向的平动自由度；上扭是在窗上角施加 500N 由车门内向外(Y 向)的力，下扭是车门下角处施加相同的力。

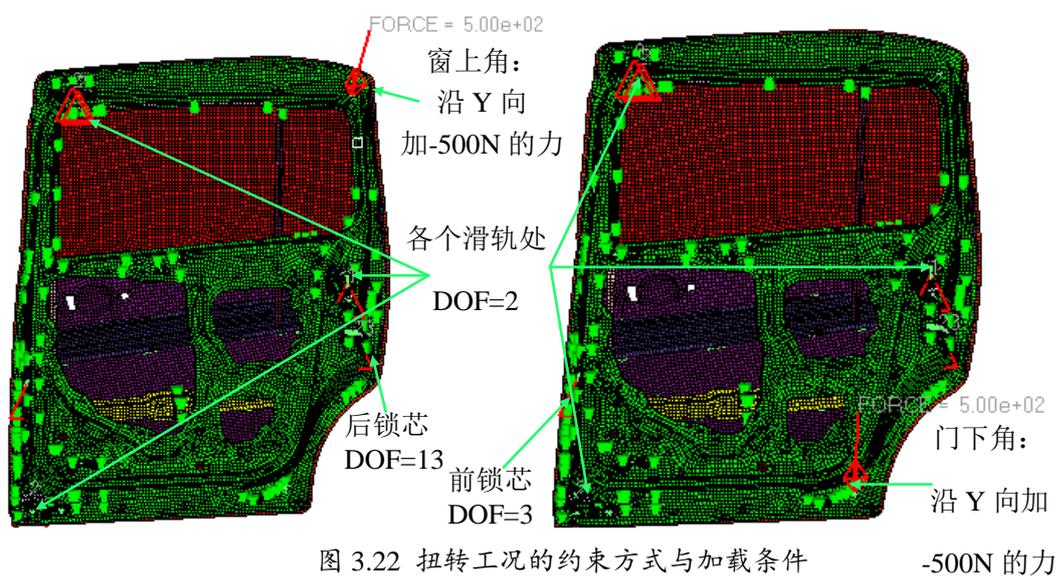


图 3.22 扭转工况的约束方式与加载条件

Fig. 3.22 Constrains and loads of torsional stiffness case

中门下垂工况按加载位置不同分为前锁芯与后锁芯部位两种情况，约束方式和加载条件如图 3.23 所示：约束都是约束中滑轨与下滑轨的X、Y、Z向平动自由度和上滑轨的X、Y向自由度(中滑轨不承重)；分别在前锁芯与后锁芯处施加 900N 竖直向下(Z 向)的力。

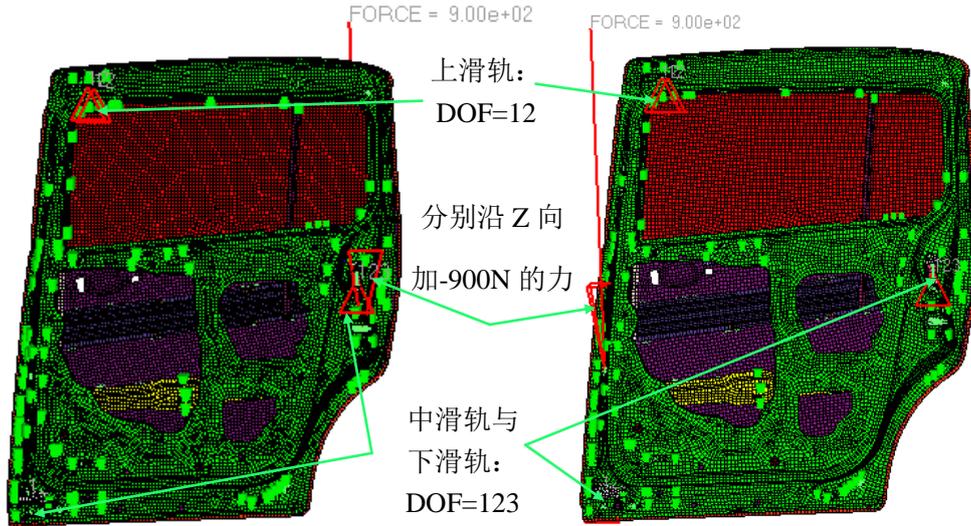
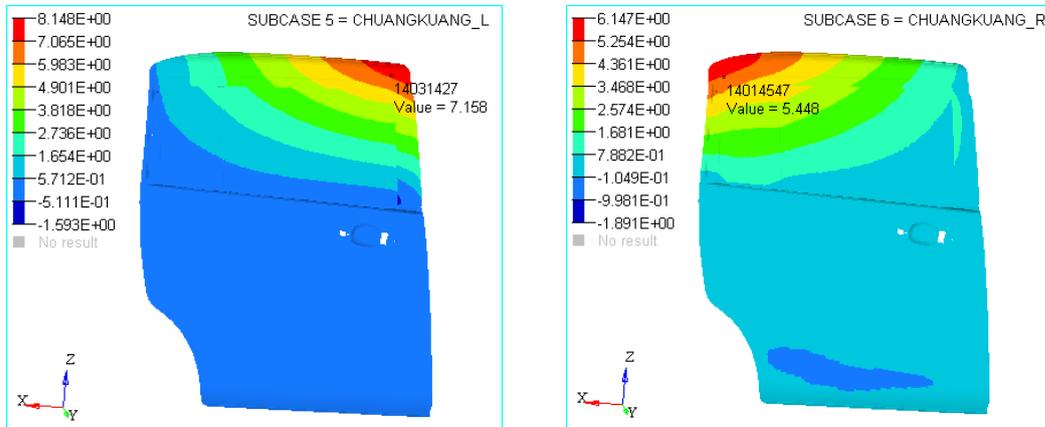


图 3.23 下垂工况的约束方式与加载条件

Fig. 3.23 Constrains and loads of sagging stiffness case

(2)结果分析

经过求解与后处理得到中门各工况下的位移云图如图 3.24 所示。由图 3.24 可知，中门窗框侧弯工况下窗框前上角加载点的 Y 向位移为 7.158mm，企业要求最大位移量不能超过 10mm；窗框后上角加载点的 Y 向位移为 5.448mm，企业要求最大位移量不能超过 8mm，因此中门窗框刚度满足设计要求。

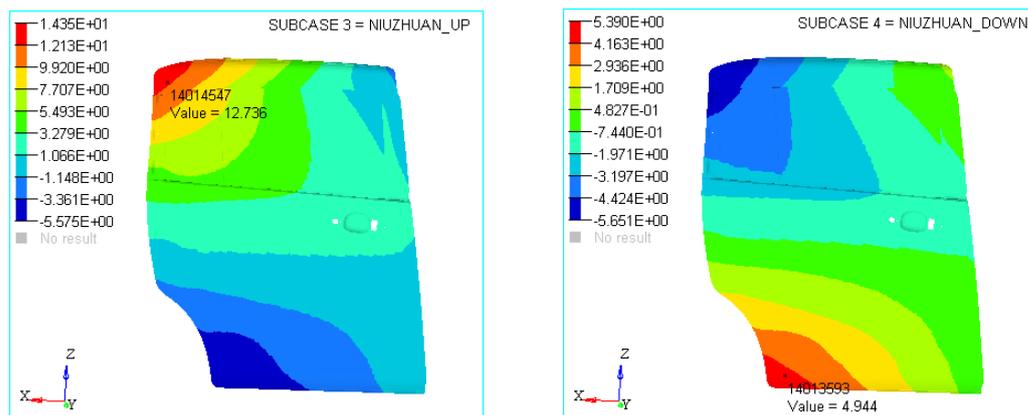


a.窗框侧弯工况 Y 向位移云图(窗框前上角) b.窗框侧弯工况 Y 向位移云图(窗框后上角)

图 3.24 窗框侧弯工况 Y 向位移云图

Fig. 3.24 The Y direction displacement color nephogram of bending stiffness in side direction case

由图 3.25 可知，中门扭转工况车窗上角加载点处的 Y 向位移为 12.736mm，企业要求最大位移量为 16mm；车门下角加载点处的 Y 向位移为 4.944mm，企业要求最大位移量为 6.5mm，因此中门扭转刚度满足设计要求。



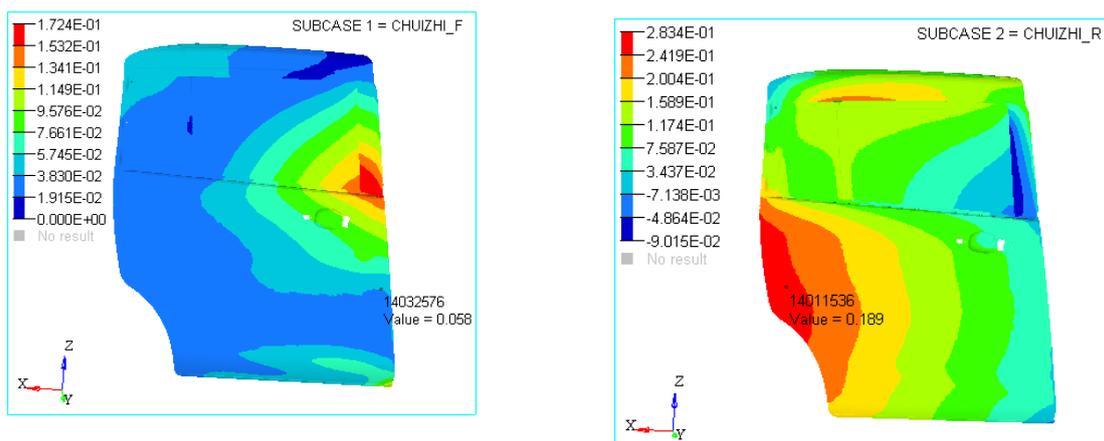
a. 扭转工况 Y 向位移云图(窗框前上角)

b. 扭转工况 Y 向位移云图(窗框后上角)

图 3.25 扭转工况 Y 向位移云图

Fig. 3.25 The Y direction displacement color nephogram of torsional stiffness case

由图 3.26 可知, 中门下垂工况前锁芯加载点的 Z 向位移为 0.058mm, 企业要求最大位移量不超过 1.5mm, 后锁芯加载点的 Z 向位移为 0.189mm, 企业要求最大位移量不超过 3mm, 因此中门下垂刚度满足设计要求。



a. 下垂工况 Z 向位移云图(窗框前上角)

b. 下垂工况 Z 向位移云图(窗框后上角)

图 3.26 下垂工况 Z 向位移云图

Fig. 3.26 The Z direction displacement color nephogram of sagging stiffness case

3.4.4 中门刚度分析结果评价

中门刚度分析结果及目标要求汇总如表 3.5 所示, 由表可知: 中门各工况下的刚度均满足 SQGM 滑动门标准的设计要求。车窗上角与车门下角的扭转刚度相对而言较差, 变形比较大, 余量系数相对较小。但最小的余量系数也达到了 26%, 仍存在一定的轻量化设计空间。

表 3.5 中门刚度分析结果汇总表
Table. 3.5 The summary table of the middle door stiffness analysis

中门刚度	加载位置	代号	位移值 /mm	SQGM 目标值 /mm	余量系数
窗框刚度	窗框前上角	chuangkuang_L	7.158	≤10	0.40
	窗框后上角	chuangkuang_R	5.448	≤8	0.47
扭转刚度	车窗上角(上扭)	niuzhuan_up	12.736	≤16	0.26
	车门下角(下扭)	niuzhuan_down	4.944	≤6.5	0.32
下垂刚度	前锁芯处	chuizhi_F	0.058	≤1.5	24.00
	后锁芯处	chuizhi_R	0.189	≤3	14.79

3.5 本章小结

本章主要从汽车侧面碰撞安全、车门模态、车门刚度三个方面进行了有限元分析，并从不同方面进行了详细的评价，研究成果如下：

(1)结合流程自动化系统与 Hypermesh 的通用前处理功能，建立了整车有限元模型。面向侧面碰撞安全性分析的前处理工作除几何清理、有限元网格划分与检查等工作能够控制在 20 分钟以内完成，显著提高了建模效率。同时建立的整车有限元模型组件名称能够自动地按照企业规定命名，为后续工作的开展提供了方便。

(2)在侧面碰撞安全性方面，从系统总能量、整车变形、车门与 B 柱测量点处的侵入量和侵入速度四个方面对侧面碰撞分析结果进行了评价。系统总能量守恒，沙漏能与滑移界面能占总能量的百分比远小于 10%的要求，证实了仿真分析结果的可靠性。整车变形方面，研究发现前门、中门、B 柱附近的强度不够，使得整车在侧面碰撞过程中，B 柱、前门上防撞梁、中门附近发生了严重的变形，要考虑通过提高 B 柱、前门、中门的结构强度改善碰撞安全性能。在侵入量与侵入速度方面，发现 B 柱上的测量点 P₅ 处的侵入量超出了目标要求，前门上的测量点 P₁₀ 侵入速度超出了目标要求，因此优化中要重点提高这些位置的强度，这为后续优化变量的选取提供了基础。

(3)在车门模态性能方面，通过车门的自由模态分析发现，前门与中门的第一阶固有频率能很好的避开发动机怠速频率与白车身一阶模态，而且有一定富

余量，不会发生共振现象。

(4)在车门刚度性能方面，通过前门与中门刚度分析发现，前门刚度各工况的余量系数均比较大，对于后续的轻量化设计而言，还存在较大的轻量化设计空间。中门各工况下的刚度均满足 SQGM 滑动门标准的设计要求。车窗上角与车门下角的扭转刚度相对而言较差，变形比较大，余量系数相对较小；其他刚度余量系数较大，仍存在一定的轻量化设计空间，为后续的轻量化设计提供了理论基础。

第4章基于多目标稳健性优化方法的车身结构轻量化设计

4.1 多目标稳健性优化方案的提出

针对汽车的节能减排的主要措施之一就是汽车的轻量化,而汽车侧面碰撞研究又是保证安全的重大研究课题之一。因此,如何在提高汽车安全性能,保证模态性能与刚度性能的同时,实现汽车的轻量化设计的多目标优化问题已成为汽车行业中的研究热点。当前,确定性优化技术已经成功的应用到了产品设计中,然而实际汽车设计过程中,由于加工精度、随机误差的影响,发现确定性优化结果往往与现实有较大的差距,会有很大的潜在的性能损失与波动^[56,75-88],因此在进行确定性优化的基础上进行稳健性优化分析很有必要。

但是,对于汽车这个复杂的工程系统而言,存在以下难题:①各项性能之间存在一定的交叉,而且涉及整车性能评价的有限元分析单次计算时间过长,而优化需要循环的调用有限元分析寻求最优解,这样的工作量巨大,难以实现。②每项性能的 CAE 分析软件不统一,针对碰撞安全分析的一般是 LS-DYNA 应用较广,针对模态性能分析以 Nastran、LMS Virtual.Lab 较广,难以集成到一起实现优化。③设计空间不规则,存在数值噪声和试验误差,这些随机误差会对计算造成干扰,导致优化目标和约束响应的形态往往不光滑或不连续。因此响应对设计变量的敏感度也十分敏感,波动很大,会产生间断性跳跃现象,导致寻优结果不可靠。

Isight 平台的出现给以上困难的顺利解决提供了契机。Isight 平台具备广泛的 CAD/CAE 接口,能够实现各类 CAE 分析软件的集成。同时,为用户提供了构建多种试验设计方法,为构建各类近似模型提供了基础,拥有多种优化算法库,为优化的进行提供了基础;配备齐全的蒙特卡洛抽样算法,6Sigma 稳健性设计算法,为可靠性分析与稳健性优化提供了算法基础。

因此针对以上三项困难,三项解决方案是:

①对侧面碰撞的整车模型进行了简化,建立了子模型;在子模型的基础上进行了变量的筛选降低计算量,然后利用试验设计抽样构建车门模态、车门刚度及侧面碰撞分析各响应的近似模型,利用近似模型进行多目标的优化,这样就大幅

度降低了仿真计算量，同时减少了变量也使得抽样次数减少，使得后续优化切实可行。②Isight 商业软件能够实现各类有限元软件的集成，能够为面向试验设计采样的顺利进行提供基础。③采用近似模型代替有限元模型：而近似模型的构建是基于响应函数的，响应函数大都在进行拟合时都进行了平滑处理，降低了“计算噪声”，避免了干扰，改善了优化过程的收敛特性。

汽车轻量化的优化过程通常按两个步骤完成，首先通过优化使性能达标，第二步是研究设计余量，在满足设计性能的条件下减重，实现轻量化^[89]。根据上一章的分析结果可知，车门的模态性能，刚度性能基本满足目标要求，侧面碰撞过程中部分关键测量位置的侵入量、侵入速度过大，需要进一步进行优化，而且整车质量较大，这必将导致整车的耗油量提高和尾气排放增加，导致能源浪费和环境污染。不符合当前节能环保的主题。因此有必要在满足各项性能的前提下，降低整车质量，提高碰撞过程中吸收的内能。

为此本章提出如图 4.1 所示的稳健性优化方案，该方案结合了试验设计、CAE 分析、响应面法、蒙特卡洛分析、6Sigma 稳健性设计等技术，在保证碰撞安全性、模态性能、刚度要求的前提条件下，结合 6Sigma 稳健性设计与多目标遗传算法对整车质量及碰撞吸能性进行优化。整个优化主要分为以下几个流程：

- (1) 建立侧面碰撞分析子模型代替整车模型分析，降低单次抽样计算时间。
- (2) 根据有限元分析的结果初步确定的初始设计变量。
- (3) 通过灵敏度分析，筛选出灵敏度较大的变量作为最终变量，从而降低后续的抽样次数。
- (4) 拉丁超立方试验设计抽样，采集足够多的样本点。
- (5) 构建响应值的近似模型，并保证近似模型的精度满足要求。
- (6) 基于 NSGA-II、NCGA、AMGA 三种优化算法的多目标确定性优化。
- (7) 基于蒙特卡洛抽样的可靠性分析与质量检查。
- (8) 对比三种确定性优化的优化结果与可靠性分析结果，为稳健性优化算法选择提供参考。
- (9) 若质量不满足要求，进行 6Sigma 稳健性优化。
- (10) 得到最终的稳健性优化解集，对稳健性优化结果进行分析与有限元验证。

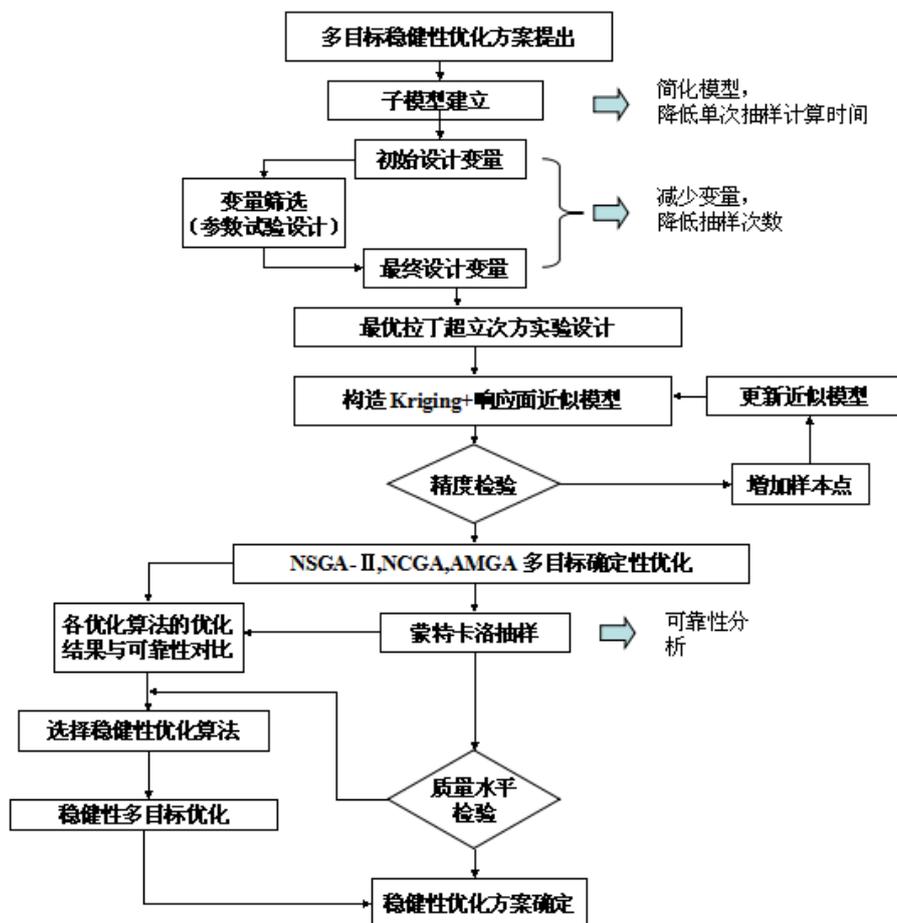


图 4.1 稳健性多目标优化流程图

Fig. 4.1 The flowchart of multi-objectives optimization

4.2 侧面碰撞子模型的建立与验证

由于整车侧面碰撞仿真分析过程十分耗时，以 12 个 CPU，25G 的内存的计算机为例需要计算大约 20 小时，每次计算就需要耗费近一天的时间。若直接利用有限元模型做优化，需进行上百次甚至上千次的迭代计算，显然超出了新车型的开发周期，这是不现实的。考虑到企业实际问题，可以采取构建近似模型的方式降低计算量。然而构建近似模型的前提必须需要足够的样本点，样本点是通过试验设计获得的，那也需要上百次循环计算，这样总的计算量要 3 个月之久，仍然是无法接受的。因此必须首先设法简化整车模型，降低有限元模型的单次仿真计算时间。

以往的一些文献^[3,90]中，往往考虑去除部分不重要的部件，用质量点代替的方法。然而对于高速碰撞模型而言，强烈的惯性效应、接触关系的变化、连接关系的变化导致简化模型与原模型之间存在较大的误差，这样的简化代替往往是不

可靠。鉴于以上原因,本文采用从整车模型中抽取子模型的方法(即有限元法中的子结构法)对侧面碰撞模型进行简化。

4.2.1 子模型建立方法

设计者往往希望在保证分析精度的前提下,提高仿真分析效率。子模型方法就是为了解决这类问题而提出的,该方法又被称为切割边界位移法。子模型方法的主要有两个目的:(1)研究复杂整体模型中某局部子模型的详细性能^[91-94],如局部详细子系统的应力分析。(2)从整体复杂模型中提取子模型,缩小模型大小^[95-99],从而为后续的优化设计分析做准备,节省计算时间。本文建立子模型的目的就是第二个。

4.2.2 子模型的建立

子模型的建立主要分为三大步骤:首先,选择边界位置,提取子模型;其次,确定边界条件,并给子模型加载;最后进行子模型的验证,若不满足要求则重新提取子模型,若满足则确定子模型结构。具体流程如图 4.2 所示:

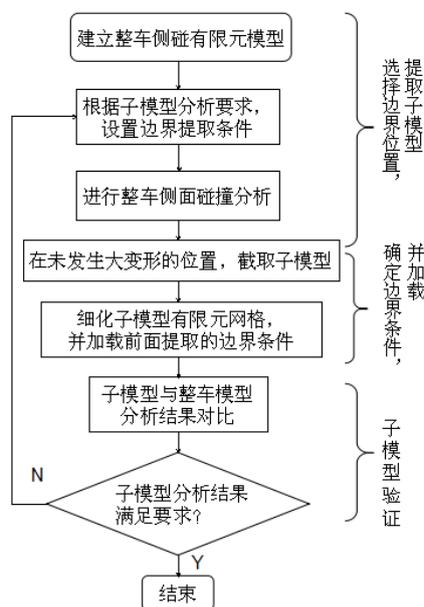


图 4.2 子模型建立的流程图

Fig. 4.2 Flow chart of establishing sub-model

(1) 选择边界位置, 提取子模型

图 4.3 所示的是整车侧面碰撞过程中,不同碰撞时刻的车身变形图,由图可知车身变形主要集中在上部顶盖,左侧前门,中门局部区域,其他区域没有发生明显的塑性变形;尽管后背门翘起,但未发生明显的塑性变形。

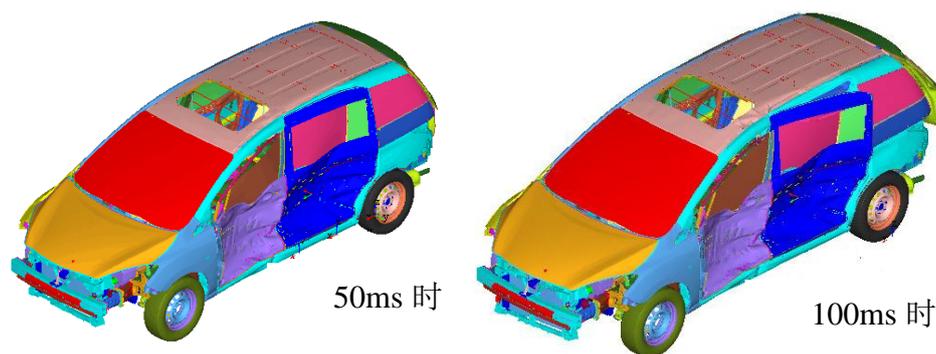


图 4.3 不同时刻的车身变形

Fig. 4.3 Vehicle body deformation at different time

因此，可以从整车模型中，截取左半部分发生明显塑性变形的区域用于子模型的分析，注意截取子模型的边界，要求尽量避开容易发生应力集中的区域，避开发生明显塑性变形的区域，尽量去除网格数量多但对侧面碰撞贡献量很小的部件。同时由于侧面碰撞的壁障对于能量的吸收有很大的影响，而且属于侧面碰撞的关键区域，因此整个壁障全部保留在子模型中，最终得到的子模型如图 4.4 所示：

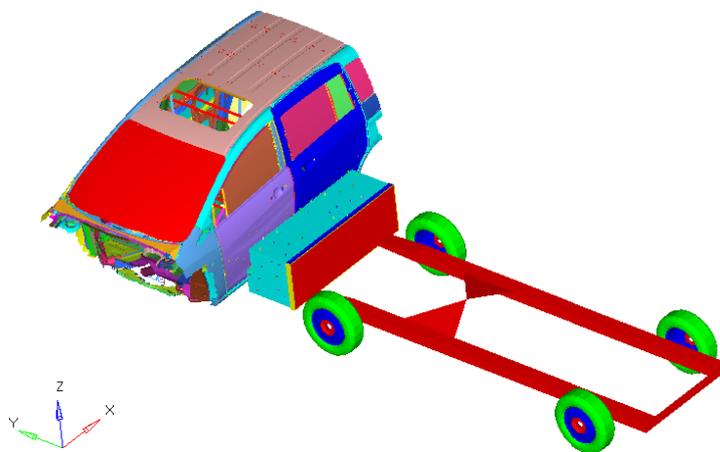


图 4.4 子模型结构

Fig. 4.4 The structure of sub-model

(2) 确定边界条件并给子模型加载

在整车模型侧面分析之前，必须设置好预截取边界处所有节点。首先，在 LS-DYNA 中，将这些节点定义为一个 set(节点集)。然后，定义边界条件关键字 *INTERFACR_COMPONENT_NODE 引用前面定义的 set 的 ID 号，这样就可以将 set 中所有的边界节点的位移、速度和加速度时间曲线记录下来，并保存成二进制文件，可称为边界结果文件，本文的边界条件如图 4.5 所示。接着，定义控制关键字 *CONTROL_OUTPUT_OPIFS 控制边界提取的输出频率。最后，在提

交计算前, 设置求解关键字 $Z=isf1$, 便可以将边界结果保存为一个名为 $isf1$, 的文件中。计算结束后, 细化子模型的中门、前门、防撞梁以及 B 柱结构的网格, 基本尺寸为 5mm , 在边界处施加关键字 $*INTERFACE_LINKING_EDGE$, 设定子模型的边界节点的运动状态从整车模型边界结果文件中提取(通过设置求解控制关键字 $L=isf1$ 设定)。即使边界处的网格进行了细化, 仍然可以通过坐标位置插值算法的方式从边界结果中获取。本文为了保证边界结果更加准确, 子模型的边界节点 set 完全与整车模型中的边界节点 set 需保持一致。

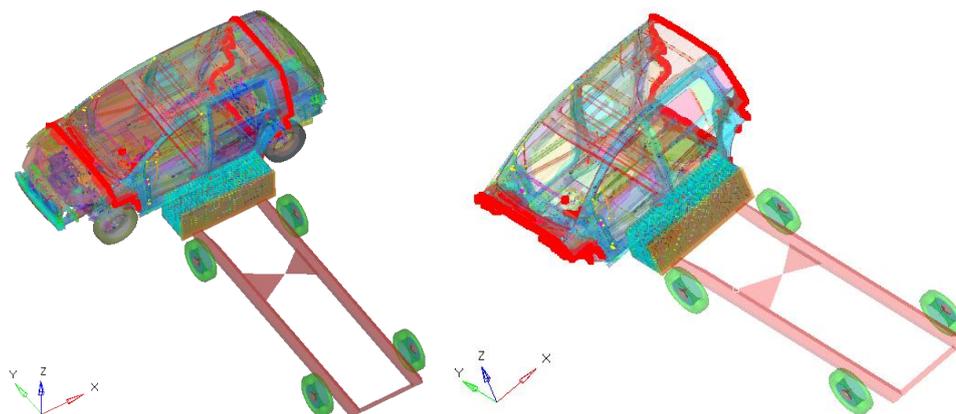


图 4.5 边界条件

Fig. 4.5 Boundary condition

4.2.3 子模型分析结果验证

为保证子模型代替整车模型进行后续的试验设计, 下面进行子模型与整车模型 B 柱、车门的侵入量, 侵入速度、吸收内能以及变形情况进行对比分析。

(1) 变形情况对比

从图 4.6 和图 4.7 可以看出: 子模型 B 柱内外板、车门的变形模式与整车的基本一致。

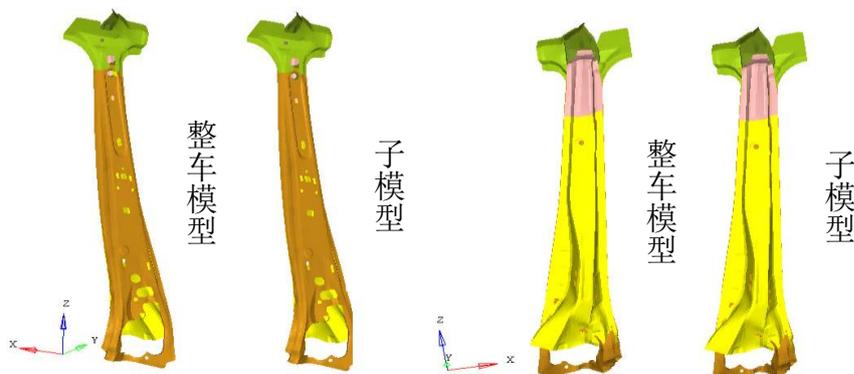


图 4.6 B 柱变形

Fig. 4.6 The deformation of B pillar

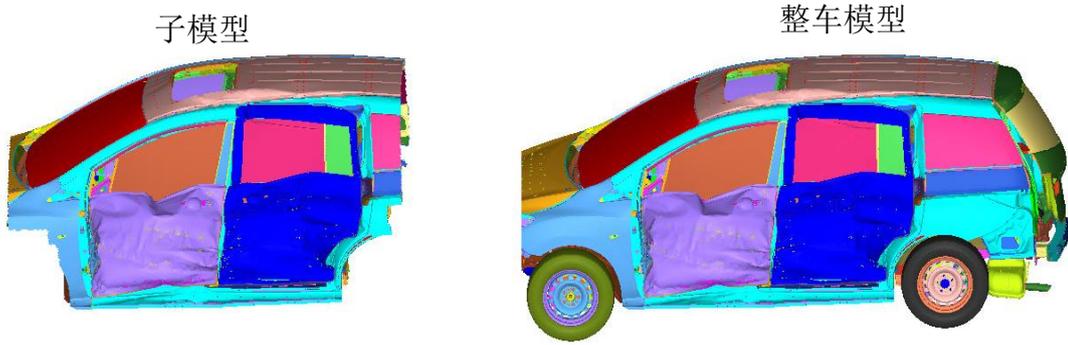


图 4.7 车门变形

Fig. 4.7 The deformation of vehicle doors

(2) 侵入量、侵入速度对比

为了更加准确地对比整车模型与子模型的碰撞变形情况，对 B 柱上，车门的测量点的侵入量和侵入速度进行定量分析。图 4.8 和图 4.9 所示为 11 个测量点的侵入量和侵入速度曲线，子模型与整车模型的侵入量曲线基本吻合，可见子模型与整车模型的 B 柱、车门的变形模式与变形程度均基本一致。

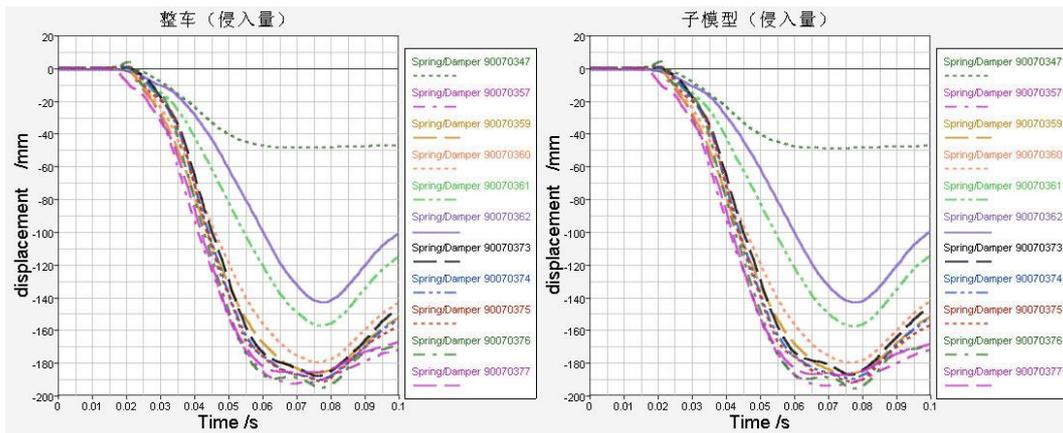


图 4.8 B 柱与车门侵入量曲线

Fig. 4.8 B-pillar intrusion and front door intrusion displacement curve

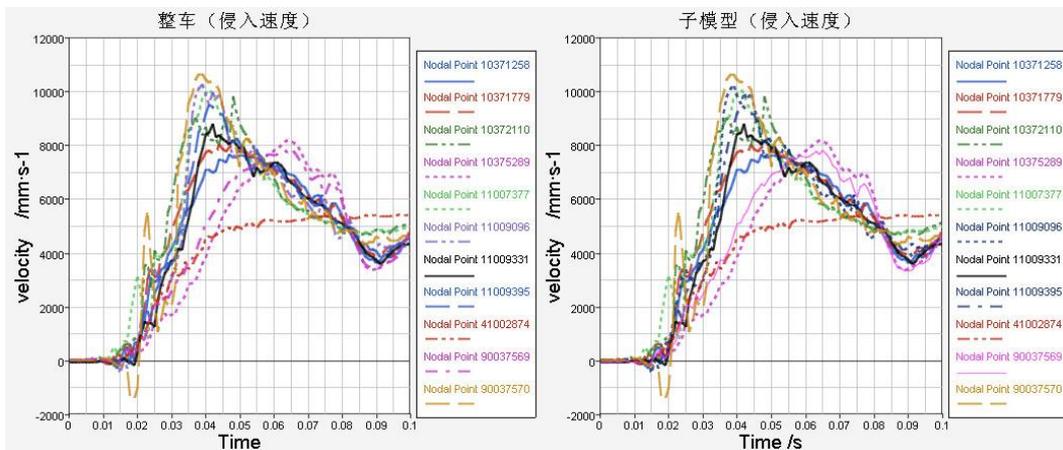


图 4.9 B 柱与车门侵入速度曲线

Fig. 4.9 B-pillar intrusion and front door intrusion velocity curve

(3) 吸收内能对比

碰撞过程中系统吸收的内能是否相同,是衡量整车模型与子模型能否相互替代的另一项重要指标。通过图 4.10 中内能曲线的对比发现,两者变化趋势基本一致,总的吸收量子模型略高,误差小于 0.001%。

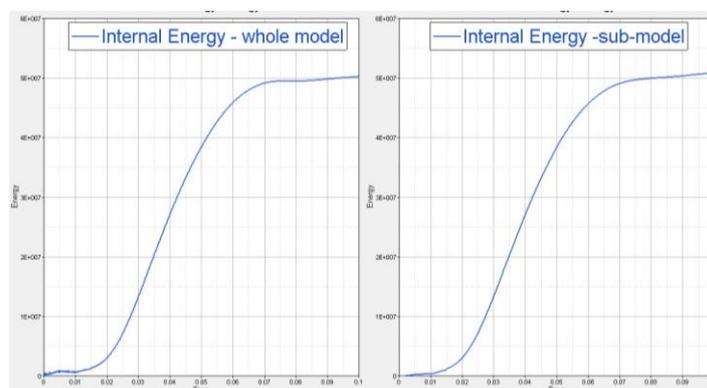


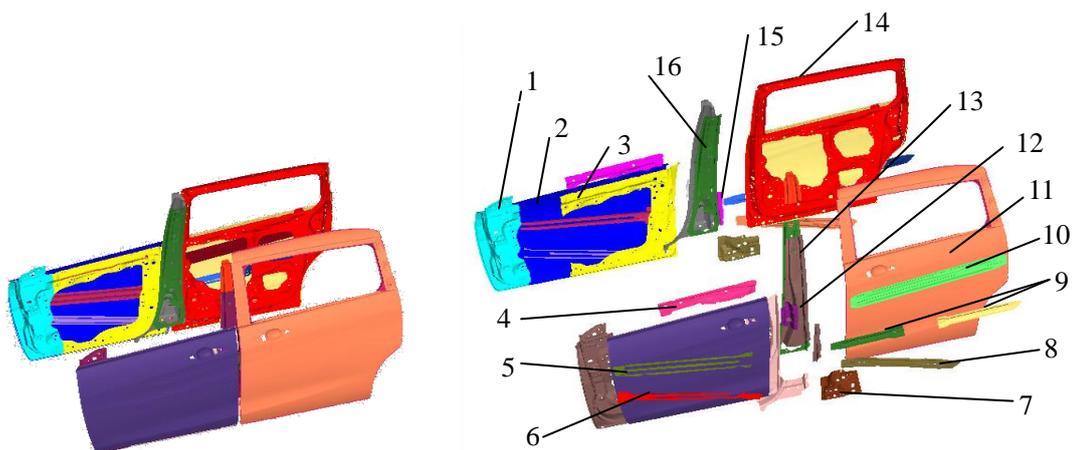
图 4.10 内能曲线

Fig. 4.10 The internal energy curve

综合以上各项指标的对比分析,可以证明子模型与整车模型之间边界条件的稳健性良好,能够保证将正确的边界条件可靠地加载到子模型上,使得子模型系统方案能够有效代替整车模型进行研究,接下来将直接应用子模型进行后续的分析。

4.3 初始设计变量的选择

设计变量主要分为两种:连续变量与离散变量。在汽车设计中,连续变量主要是指结构参数的位置、尺寸、安装角度等;离散变量主要指零件的材料参数、厚度参数等。对于复杂的多目标优化,受计算量的限制,设计变量的数目通常不能太多。对于本文的侧面碰撞分析而言,与碰撞相关的板料厚度参数多达上百个,显然不可能同时考虑所有的变量,必须先明确设计目标,分清主次,找出对设计目标影响较大的设计变量。本文的主要设计目标是改善碰撞安全性能、车门刚度和车门模态性能,同时尽可能的实现轻量化设计。基于工程经验及前面章节的有限元分析可知,影响各项性能的厚度变量主要是:车门内外板厚度、B 柱内外板厚度、门槛梁厚度、防撞梁厚度以及门锁加强件厚度等。因此将上述主要部件的厚度参数作为本文的设计变量,考虑左右对称的原因,完全对称的两个部件的厚度设为同一变量。设计变量的分布情况如图 4.11 所示:



1-前门内板(前) 2-前门外板 3-前门内板(后) 4-前门腰线加强件
 5-前门防撞梁(上) 6-前门防撞梁(下) 7-中门铰链加强件 8-中门防撞梁(下)
 9-中门防撞梁(中) 10-中门防撞梁(上) 11-中门外板 12-前门锁加强件
 13-B柱外加强板 14-中门内板 15-中门锁加强件 16-B柱内加强板

图 4.11 设计变量分布图

Fig. 4.11 Design variables distribution

根据企业要求可知 B 柱、车门防撞梁等重要部件的板厚公差要求小于 $30\mu\text{m}$ 。根据制造部供应商提供的统计数据,该要求下生产的板料的标准差一般小于 1 丝(丝是国内机械行业常用的单位, $1\text{丝}=10\mu\text{m}$),故本文取标准差为 $10\mu\text{m}$ 。设计变量的取值范围及标准差如表 4.1 所示。

表 4.1 设计变量相关参数

Table. 4.1 The parameters related to design variables

变量名称	变量代号	初始值/mm	取值范围/mm	标准差/mm
B 柱内加强板	B ₁	1.2	0.8 1.0 1.2 1.4 1.5 1.6	0.01
B 柱外加强板	B ₂	1.4	0.8 1.0 1.2 1.4 1.5 1.6	0.01
前门内板(后)	D ₁	0.7	0.5 0.6 0.7 0.8 1.0 1.2	0.01
前门内板(前)	D ₂	1.2	0.8 1.0 1.2 1.4 1.5 1.6	0.01
前门外板	D ₃	0.8	0.6 0.7 0.8 1.0 1.2 1.4	0.01
中门外板	D ₄	0.8	0.6 0.7 0.8 1.0 1.2 1.4	0.01
中门内板	D ₅	0.7	0.5 0.6 0.7 0.8 1.0 1.2	0.01
前门防撞梁(上)	F ₁	0.8	0.6 0.7 0.8 1.0 1.2 1.4	0.01
前门防撞梁(下)	F ₂	1.6	1.2 1.4 1.5 1.6 1.8 2.0	0.01
中门防撞梁(上)	F ₃	1.6	1.2 1.4 1.5 1.6 1.8 2.0	0.01
中门防撞梁(中)	F ₄	0.7	0.5 0.6 0.7 0.8 1.0 1.2	0.01
中门防撞梁(下)	F ₅	1.6	1.2 1.4 1.5 1.6 1.8 2.0	0.01
前门腰线加强板	R ₁	0.8	0.6 0.7 0.8 1.0 1.2 1.4	0.01
前门锁加强件	S ₁	1.4	0.8 1.0 1.2 1.4 1.5 1.6	0.01
中门锁加强件	S ₂	1.2	0.8 1.0 1.2 1.4 1.5 1.6	0.01
中门铰链加强件	H ₁	1.5	1.0 1.2 1.4 1.5 1.6 1.8	0.01

4.4 设计样本采集

随着计算机技术的高速发展，试验设计技术在结构优化中得到了广泛的应用。试验设计(DOE)是进行优化设计工作的基础，主要起到探索设计空间的作用：一方面通过分析设计变量的灵敏度，筛选设计变量提高优化效率，另一方面可以获取足够多的样本数据，利用这些样本数据可以构建经验公式或者近似模型，为后期的优化设计做准备。试验设计方法非常多，设计者需要根据自身设计目的及试验设计方法的特点进行合理的选择。常用的试验设计有 8 种：全因子试验设计、参数试验设计、正交数组试验设计、中心组合试验设计、Box-Behnken 试验设计、随机拉丁超立方试验设计、最优拉丁超立方试验设计等。下面对本文用到的参数试验设计和最优拉丁超立方试验设计做详细的介绍：

(1) 参数试验设计

参数试验设计是在独立于其他因子情况下研究每个因子对响应的敏感性，如图 4.12 所示就是一个三因子的参数试验样本点。尽管这种方法无法得到交互作用的结果，但它的试验次数极少。在设计之初，往往可以忽略交互作用的影响，此时参数试验设计方法是很好的灵敏度分析方法。在做近似模型之前，常用来筛选设计变量，提高优化的效率。参数试验分析次数为：

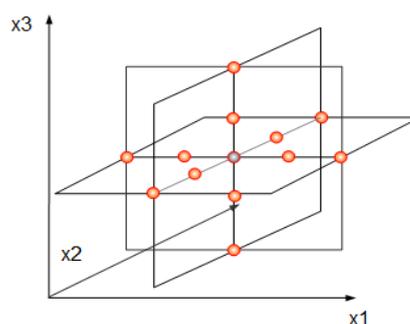


图 4.12 参数试验示意图

Fig. 4.12 Parameter study schematic plot

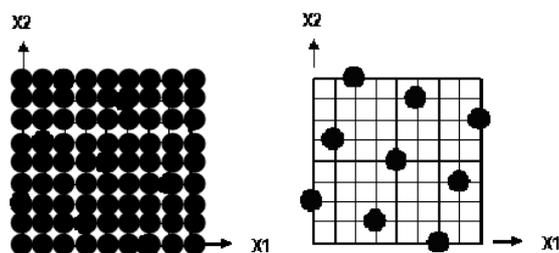
$1 + \sum_{i=1}^m n_i$ ，其中， m 代表因子数， n_i 代表水平数。

(2) 最优拉丁超立方试验设计

最优拉丁超立方试验设计是对拉丁超立方试验设计的改进，拉丁超立方试验设计(Latin hypercube design)由 M.D.McKay, R.J.Beckman, and W.J.Conover^[69]首先提出的。本文中的最优拉丁超立方试验设计采用的是由美国西北大学 Wei Chen 教授和福特汽车的 Dr. Ruichen Jin、Dr. Agus Sudjianto 联合研究开发的算法改进而来的，该算法改进了随机拉丁超立方试验设计的均匀性，使因子和响应的拟合更加精确真实。

最优拉丁超立方试验设计的优点是：

①有效的空间填充能力。最优拉丁超立方试验设计试验次数=水平数 \geq 因子数+1。例如一个二因子 9 水平研究，图 4.13 中 a 图中的全因子需要 81(=9 \times 9)个点，而图 4.13 中 b 图中的最优拉丁超立方试验设计只需要研究 9 个点。

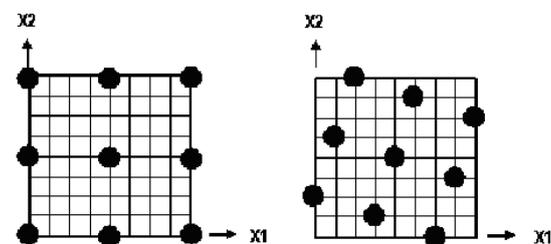


a. 全因子试验设计 b. 最优拉丁超立方试验设计

图 4.13 全因子试验设计与最优拉丁超立方试验设计

Fig. 4.13 Full factorial design and optimal latin hypercube design

②拟合非线性响应。以相同的试验点进行研究，最优拉丁超立方试验设计比正交试验设计拟合非线性关系的能力要强。以抽取 9 个试验点的二因子试验设计为例，由图 4.14 a 可以看出正交试验法对每个因子只能取 3 水平，拟合的非线性关系不能超过 2 阶。如图 4.14 b 可以看出拉丁超立方试验法对每个因子可以取到 9 水平，完全可以拟合 2 阶非线性关系甚至更高阶。而且最优拉丁超立方试验设计，不像正交试验，它的试验次数可以根据需要人为的控制。



a. 三水平正交试验设计 b. 最优拉丁超立方试验设计

图 4.14 正交试验与最优拉丁超立方试验设计

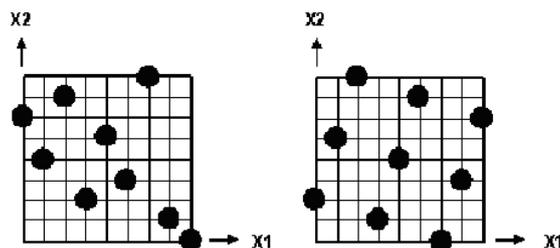
Fig. 4.14 Orthogonal arrays design and optimal latin hypercube design

③使试验点尽可能的均匀的布满设计空间，具有优良的空间填充能力和均匀分布能力。由图 4.15 的图 a 与图 b 可以看出随机拉丁超立方试验设计的试验点分布远没有最优拉丁超立方试验设计得到的试验点分布均匀。这种分布不均将导致，当水平数增高时，丢失空间特性的可能性增大。

同时，最优拉丁超立方试验设计的缺点是：

①不可重复性。因为它用随机组合的方式来生成设计矩阵的，所以每次运行抽取的数据都会不同。然后对于 Isight 软件，可以通过编程实现以给定与上次

相同随机种子(random seed)的方式避免试验不可重复的缺点。



a. 随机拉丁超立方设计 b. 最优拉丁超立方设计

图 4.15 随机拉丁超立方设计和最优拉丁超立方设计

Fig. 4.15 latin hypercube design and optimal latin hypercube design

4.4.1 设计变量筛选试验

根据 4.3 节初步选择了 16 个设计变量, 该 16 个变量对于侧面碰撞安全性都起着一定的作用, 对于不同的汽车结构, 每个部件的影响也不尽相同, 因此仅凭工程经验难以判断, 而 16 个变量, 倘若建立四阶响应面近似模型就至少需要 185 次(计算公式参考表 4.8: $n = (16+1) \times (16+2) / 2 + 2 \times 16 = 185$), 这样的试验代价是十分昂贵的, 因此在进行试验设计之前需要对其进行筛选试验。而经过第二章的分析可知: 汽车安全性至关重要, 也是本文的主要设计目标之一, 应尽量提高侧面碰撞吸能量; 汽车车门刚度满足基本要求, 且设计余量较大, 仅作为约束即可; 汽车车门的模态性能, 主要是为了避开发动机怠速频率, 避免发生耦合共振, 影响整车的模态性能, 并非模态频率越高越好或者越低越好, 因此也作为约束条件考虑。由于汽车碰撞安全性与整车质量与设计变量之间的关系至关重要, 因此接下来需要找出与侧面碰撞吸能量、侧面碰撞侵入量、侧面碰撞侵入速度和总体设计质量影响较大的变量作为分析对象。这需要通过筛选试验来完成。通过上文介绍的试验设计方法的优缺点可以看出, 作为筛选试验应用比较广泛的当属参数试验设计, 因此本文首先选取参数试验设计对设计变量进行筛选。

参数试验 (Parameter Study, 以下简称 PS) 设计对每个因素取 2 水平, 分别是低水平与高水平。因为对本文而言, 板料的厚度变量是相互独立的, 互不影响, 不必考虑交互作用的影响, 所以采用的采样技术是: 使每个设计变量分别取低水平与高水平, 同时保持其他变量取初始值, 共 16 个设计变量, 因此总共需要 33 次采样, 其采样矩阵如表 4.2 所示。响应函数为侧面碰撞吸能量、侧面碰撞侵入量、侧面碰撞侵入速度以及整车总体质量。

表 4.2 PS 设计样本点采样矩阵
Table. 4.2 Sample point matrix of PS experiment design

试验序号	设计变量/mm															
	B ₁	B ₂	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	R ₁	S ₁	S ₂	H ₁
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2

注：“0”表示对应设计变量的初始值，“1”表示对应设计变量的低水平，“2”表示对应设计变量的高水平。

(2) 试验结果分析

经过 33 次有限元采样求解，可以得出每组样本点的响应结果。然后求解各变量的主效应。各变量对响应的主效应实际就是变量在某个水平时所有试验中响应的平均值，具体求解方法如下：

以两个设计变量为例，根据采集的样本点可以构建多元二次回归模型，多项式构成如下：

$$y = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_1^2 + c_4x_2^2 + c_5x_1x_2 \tag{4.1}$$

对式(4.1)求导得：

$$dy = c_1dx_1 + c_2dx_2 + 2c_3dx_1 + 2c_4dx_2 + c_5dx_1x_2 \tag{4.2}$$

则，x₁,x₂ 的线性主效应为： $M_{x_1} = c_1dx_1, M_{x_2} = c_2dx_2$

此时，可以做出各个设计变量对不同响应函数的线性主效应图，如图 4.16-图 4.19 所示。

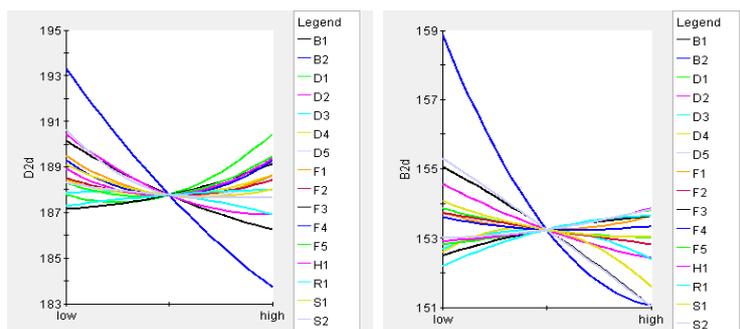


图 4.16 设计变量对侵入量的主效应图

Fig. 4.16 Main effects graph of design variables to intrusion displacement

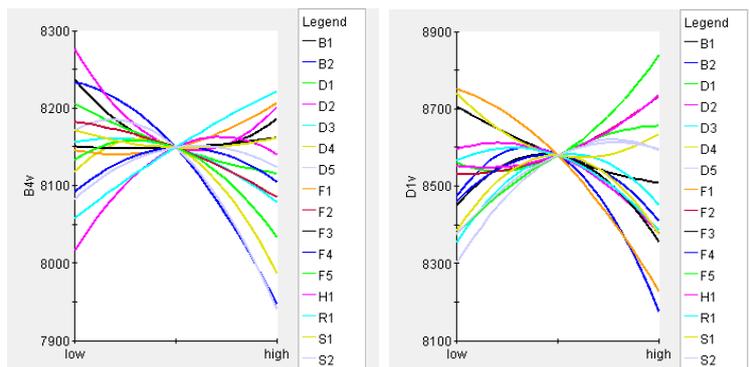


图 4.17 设计变量对侵入速度的主效应图

Fig. 4.17 Main effects graph of design variables to intrusion velocity

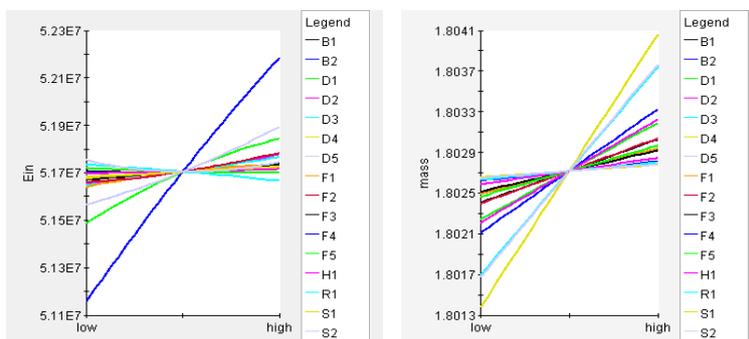


图 4.18 设计变量对内能的主效应图

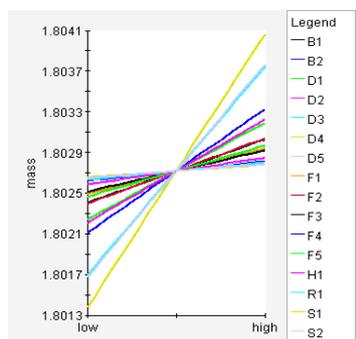


图 4.19 设计变量对质量的主效应图

Fig. 4.18 Main effects graph of design variables to internal energy

Fig. 4.19 Main effects graph of design variables to mass

主效应图的斜率越大则说明对于响应的影响越大,由以上主效应图可以看出对侵入量、侵入速度影响较大的是 B_1 、 B_2 、 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 、 F_1 等;对内能、质量影响较大的是 B_1 、 B_2 、 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 、 F_2 、 F_5 等。

为了更清楚的观察各个变量对每个效应的贡献量,将式(4.2)各项系数归一化到 $[-1,+1]$,利用最小二乘法拟合后得到归一化后的模型系数 S_{x_i} ,代入式(4.3)转换为贡献率百分比 N_{x_i} ,此时可做出各个设计变量的 Pareto 图,如图 4.20-图 4.23 所示。

$$N_{x_i} = \frac{100S_{x_i}}{\sum |S_{x_i}|}; S_{x_i} \text{ 指第 } i \text{ 项的归一化系数} \quad (4.3)$$

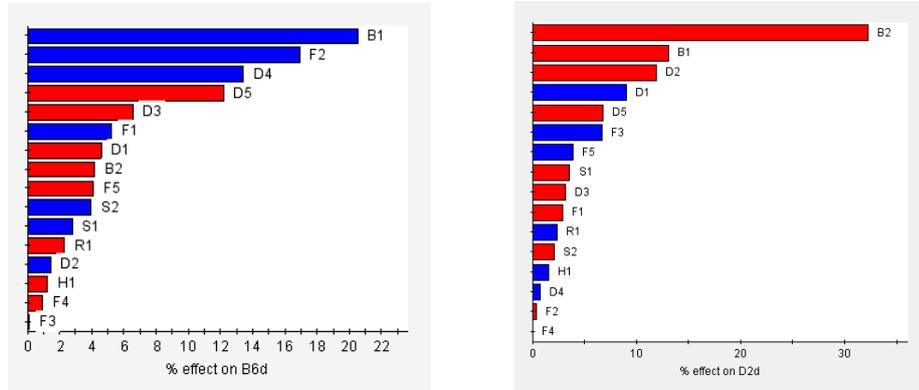


图 4.20 设计变量对侵入量的 Pareto 图

Fig. 4.20 Pareto graph of design variables to intrusion displacement

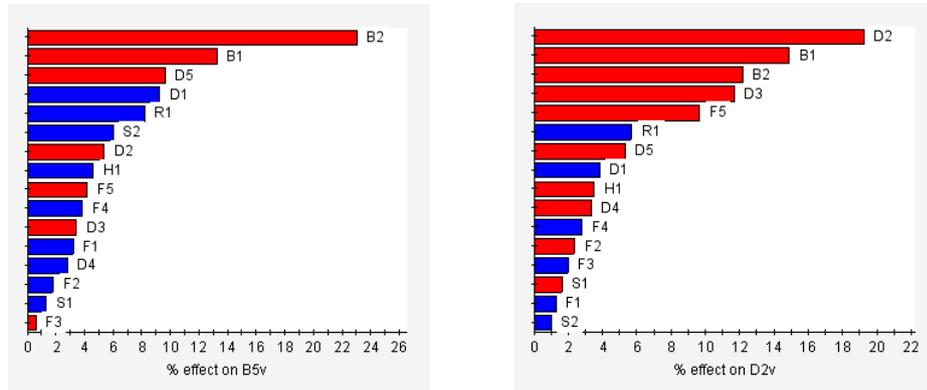


图 4.21 设计变量对侵入速度的 Pareto 图

Fig. 4.21 Pareto graph of design variables to intrusion velocity

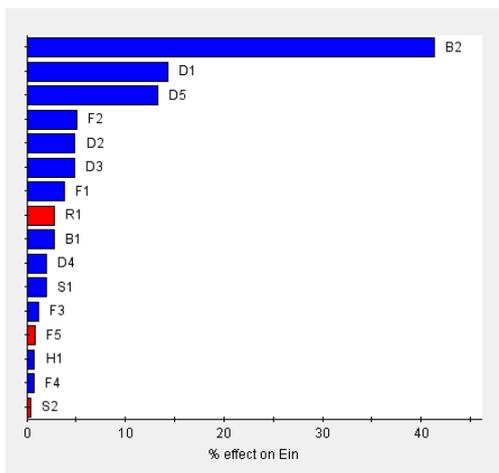


图 4.22 设计变量对吸收内能的 Pareto 图
Fig. 4.22 Pareto graph of design variables to internal energy

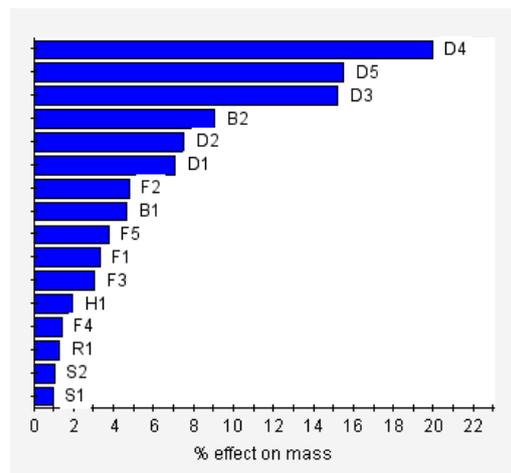


图 4.23 设计变量对整车质量的 Pareto 图
Fig. 4.23 Pareto graph of design variables to mass

综合各个 Pareto 图的结果可知, F_3 、 F_4 、 H_1 、 R_1 、 S_1 、 S_2 这 6 个设计变量相

对于其他的 10 个而言, 对各响应的贡献量相对较小。因此去除这 6 个设计变量, 以剩余的 10 个设计变量进行下一轮的试验设计分析, 以提高优化效率。

4.4.2 试验设计方法选择及样本点采集

经过筛选试验, 现在有 10 个设计变量, 为了后续的优化设计顺利进行, 要寻求一种试验设计方法采集设计变量与车门刚度、车门模态、侧面碰撞侵入量、侧面碰撞侵入速度、侧面碰撞内能、整车设计质量的样本值。全因子试验设计精确度最高, 但是同样的计算量也比较大, 效率比较低, 比较适合于处理水平数不太多的模型。正交试验设计的样本点均匀分散、整齐可比, 但是矩阵的生成存在很多限制。拉丁超立方试验设计虽说在设计变量多、采样空间较广泛时, 能以较少的样本点反应整个设计空间的特性, 但是采样点并不能保证均匀的分布整个设计空间。因此, 本文选择具有综合均匀性良好, 采样次数较少, 空间填充能力强等优点的最优拉丁超立方试验设计方法采集样本点。它能够将较少的样本均匀的布满整个设计空间, 提高采样效率的同时减小近似模型的误差。

在进行样本采集之前, 必须对后续要建立的近似模型所需的样本点进行评估。对于侧面碰撞分析而言, 与侵入量、侵入速度、内能吸收量、质量等响应相关的变量为: B 柱内外板厚度、车门厚度、防撞梁厚度等 10 个变量, 且这些响应都具有高度非线性特点。为了提高近似模型的精度, 需要采集较多的样本, 以四阶响应面模型进行评估, 则至少需要 $n=(M+1)(M+2)/2+2M$ 次试验, 其中 M 为设计变量的个数, 这样至少需要 86 次试验。为了后期建立近似模型有充足的样本点, 本文采集了 90 个样本点。提取的响应有: 整车设计质量 $Mass_design$, 侧面碰撞过程中车辆吸收的最大内能 E , 侧面碰撞 B 柱位置的侵入量: Bd_1-Bd_5 , 侵入速度 Bv_1-Bv_5 , 侧面碰撞的车门位置的侵入量 Dd_1-Dd_5 , 侵入速度 Dv_1-Dv_5 。

抽取样本点的最终目的是建立近似模型, 且建立的近似模型需要用于优化与稳健性分析中, 稳健性分析中需要考虑噪声因素的影响, 因此为了提高近似模型的精度, 设计变量为离散设计变量(6 水平, 如表 4.1 所示), 噪声因素取值为 $\pm 30\mu m$, 采用最优拉丁超立方试验设计采样, 经过 90 次的有限元求解得到的样本数据如表 4.3-表 4.5 所示(由于侵入量与侵入速度的数据量过大, 单独列在表 4.4 和表 4.5 上, 其采样点的设计变量数据表 4.3 一致)。

表 4.3 试验设计的采样点及质量与内能响应值(节选)

Table. 4.3 DOE samples and the response value of mass and internal energy(partially)

试验 序号	设计变量/mm										质量/kg	内能/J
	B ₁	B ₂	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	F ₁	F ₂	F ₅	Mass_design	E
1	1.20	1.40	0.73	1.47	0.70	1.17	0.97	1.03	1.60	1.63	71.79	52904
2	1.37	1.00	1.03	1.43	1.17	0.67	0.57	0.83	2.03	1.83	64.66	50874
3	1.20	1.00	1.20	0.77	0.83	0.67	0.97	0.80	1.83	1.17	62.70	51164
4	1.20	0.97	0.70	1.50	0.80	0.83	0.80	1.43	1.53	1.37	63.47	50766
5	0.97	1.00	0.83	1.20	0.70	1.17	0.80	1.03	1.20	1.63	65.68	50852
6	1.17	1.17	1.03	1.17	1.17	1.37	1.20	1.00	1.77	1.43	84.20	53091
7	0.97	1.03	0.63	1.00	1.37	1.00	1.17	0.97	1.77	1.37	69.59	51530
8	1.43	1.57	1.17	1.03	0.67	1.43	0.70	1.23	1.40	1.23	73.73	53222
9	0.97	1.60	0.63	1.37	1.43	1.23	0.73	1.43	1.60	1.80	79.08	53412
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
90	0.97	1.37	0.63	1.23	1.03	1.20	0.97	1.17	1.17	1.53	73.47	52545

表 4.4 试验设计侵入速度响应值(节选)

Table. 4.4 The response value of intrusion velocity with DOE(partially)

试验 序号	侵入速度/mm · s ⁻¹										
	Bv ₁	Bv ₂	Bv ₃	Bv ₄	Bv ₅	Bv ₆	Dv ₁	Dv ₂	Dv ₃	Dv ₄	Dv ₅
1	8059	7885	7814	7860	9246	5469	7946	8507	8971	9655	9455
2	8354	8380	8225	8639	10292	5428	9211	9423	10913	13328	11471
3	8401	8435	8404	8946	9748	5430	9450	10111	10682	13361	10858
4	8329	8257	8432	8551	11692	5449	8873	9356	10603	13286	11819
5	8472	8549	8582	8628	10905	5417	9164	9559	9977	10925	11109
6	8147	8298	8933	8920	9440	5487	9641	9453	10958	13489	11232
7	8660	8651	9071	9410	9856	5451	10719	10158	10640	11845	9644
8	8394	8127	7778	7926	8356	5478	8164	8905	9229	10916	9302
9	7982	8083	8003	8198	9173	5501	9174	9313	10278	12131	10161
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
90	7816	7980	8372	8353	9336	5489	8992	9251	9522	10030	10555

表 4.5 侵入量响应值(节选)

Table. 4.5 The response value of intrusion displacement with DOE(partially)

试验 序号	侵入量/mm										
	Bd ₁	Bd ₂	Bd ₃	Bd ₄	Bd ₅	Bd ₆	Dd ₁	Dd ₂	Dd ₃	Dd ₄	Dd ₅
1	149.25	131.48	172.01	178.38	183.46	48.25	176.08	183.35	183.78	180.09	177.02
2	169.78	148.39	201.31	209.56	197.72	48.51	206.73	210.53	212.02	205.52	199.40
3	169.93	145.77	202.26	209.66	191.44	45.62	215.26	216.57	214.38	207.09	196.47
4	169.71	143.97	205.68	214.00	198.83	46.66	207.82	212.53	212.19	203.12	203.09
5	174.80	145.10	211.48	218.50	202.59	47.83	221.44	221.28	218.16	208.09	202.19
6	163.04	135.86	197.14	203.42	183.80	46.68	208.91	209.51	206.72	197.15	186.49
7	178.17	146.99	216.36	222.89	202.27	46.78	223.71	223.17	222.76	212.39	189.05
8	145.07	130.36	164.16	169.37	164.47	48.37	175.46	178.03	180.07	180.05	172.80
9	156.88	134.47	182.83	188.41	182.00	49.68	193.00	191.10	185.65	178.63	179.65
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
90	160.83	134.39	191.86	197.83	184.97	47.98	198.61	199.36	193.98	181.38	184.39

对于前门模态及前门刚度而言，中门板厚、B 柱板厚、中门防撞梁板厚变量的贡献量很小，因此只需要考虑前门内外板厚度与前门防撞梁厚度等 5 个设计变量，并进行单独的最优拉丁超立方试验设计。为了后期建立近似模型有充足的样本点，本文采集了 64 个样本点，如表 4.6 所示。

表 4.6 试验设计采样点及前门刚度与模态响应值(节选)

Table. 4.6 DOE samples and the response value of front door stiffness and mode(partially)

试验 序号	设计变量/mm					前门模态频率/Hz			前门刚度位移/mm			
	D ₁	D ₂	D ₃	F ₁	F ₂	fmod e ₁	fmod e ₂	fmod e ₃	fstiffn ess ₁	fstiff ness ₂	fstiffn ess ₃	fstiffn ess ₄
1	1	1.17	0.77	1	1.97	37.24	41.61	69.62	3.88	2.67	2.70	1.77
2	1.03	0.77	0.67	0.7	1.4	35.26	40.76	67.04	3.90	3.36	3.83	3.86
3	0.63	1.5	1.2	0.8	1.8	33.84	41.79	68.05	4.16	2.91	2.77	1.24
4	1	1.2	0.7	1.37	1.63	37.37	41.70	69.56	3.89	2.66	2.69	1.70
5	0.8	0.97	1.37	1.37	2	35.53	41.00	67.17	3.99	3.04	3.25	2.37
6	0.97	0.97	1.37	1	2	36.74	41.00	68.53	3.83	2.76	2.92	2.37
7	0.6	1.37	1.37	0.67	1.37	33.08	41.58	67.21	4.18	3.09	3.06	1.41
8	0.7	1.37	0.67	1.03	1.43	34.38	42.09	67.91	4.20	3.09	3.05	1.47
9	0.67	1	0.73	0.77	1.23	33.21	41.56	65.89	4.24	3.67	4.00	2.44
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
64	1.17	0.8	0.83	1.23	1.2	36.94	40.70	68.23	3.75	2.92	3.31	3.49

对于中门模态及中门刚度而言,前门板厚、B柱板厚、前门防撞梁板厚等变量的贡献量很小,因此只需要考虑中门内外板厚度与中门防撞梁厚度等3个设计变量,并进行单独的最优拉丁超立方试验设计。为了后期建立近似模型有充足的样本点,本文采集了32个样本点,如表4.7所示。

表 4.7 试验设计采样点及中门刚度与模态响应值(节选)

Table. 4.7 DOE samples and the response value of middle door stiffness and mode(partially)

试验 序号	设计变量/mm			中门模态频率/Hz			中门刚度位移/mm					
	D ₄	D ₅	F ₅	Rmo de ₁	Rmod e ₂	Rmo de ₃	chuan gkuan g_L	chuan gkua ng_R	chui zhi_F	chui zhi_R	niu zhuan_d own	niu zhuan_u p
1	0.83	0.63	1.63	31.35	38.02	48.74	7.81	5.90	-0.05	0.21	5.42	13.98
2	0.73	0.8	1.6	33.94	40.47	52.57	6.47	4.97	-0.04	0.17	4.34	11.42
3	0.7	1.2	1.77	38.06	44.64	57.81	4.48	3.61	-0.03	0.13	2.83	7.88
4	1.37	1	1.2	36.63	42.56	55.42	4.47	3.61	-0.03	0.13	2.99	8.14
5	1.17	0.57	1.37	29.98	36.97	46.70	7.77	5.97	-0.06	0.21	5.68	14.47
6	0.97	0.77	1.97	33.52	40.01	51.87	6.24	4.84	-0.04	0.17	4.19	11.20
7	0.8	0.6	1.47	30.85	37.54	47.95	8.24	6.19	-0.06	0.22	5.80	14.76
8	1.43	0.97	1.5	36.18	42.24	54.91	4.54	3.65	-0.03	0.13	3.03	8.29
9	1.4	0.97	1.8	36.15	42.25	54.96	4.57	3.67	-0.03	0.13	3.02	8.32
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
32	0.67	0.83	1.57	34.28	40.84	53.06	6.38	4.90	-0.04	0.17	4.25	11.21

4.5 近似模型方法及模型建立

4.5.1 近似模型方法

上世纪七十年代, LA. Schmit^[36]及其合作作者在结构优化设计中首次引入了近似模型的概念,大大加快了优化分析的寻优效率。近似模型方法是对试验设计、数理统计、逼近技术以及优化技术等理论知识的一种综合应用^[100],通过利用试验设计等技术获得足够的设计点响应信息,通过逼近技术利用已知的响应信息构

造预测未知响应的数学近似模型。近似模型的主要优势在于：降低了独立设计变量的维数；提高了计算代价高昂的仿真分析优化问题的可行性；在处理敏感性问题时，经常会产生噪声干扰，在近似模型中响应函数都对此进行了平滑处理，降低了“计算噪声”，改善了优化过程的收敛特性。

创建近似模型的流程包括：

1. 样本数据采集。样本点采集的方式主要有：试验设计(DOE)、随机性试验设计、物理试验设计、经验设计等。

2. 选择近似模型类型。目前常用近似模型方法有：径向基/椭圆基(RBF/EBF)神经网络近似模型、切比雪夫正交多项式(Orthogonal)近似模型、响应面(RSM)近似模型、克里格(Kriging)近似模型，其中后两种应用更为广泛^[101]。

3. 近似模型初始化。针对每种近似模型的初始化方式也不同，其中常用的响应面近似模型的初始化是在指定范围内抽取一系列的样本点，然后对每个样本点求出该点处的实际值，利用最小二乘法计算多项式系数，确定出响应面模型。

4. 近似模型误差分析与精度验证。近似模型的预测精度会影响优化得到的最优解的可靠性与合理性。为此需要进行近似模型误差分析与精度验证，近似模型的总体误差常用响应适应度图(Response Fit Graph)来表示。响应值的适应度图是反应真实值与近似值之间的对比情况，是关于分析值与近似模型响应值之间的残差分析。图 4.24 中对角线代表了最优的适应度，其残差为零(真实值=近似值)，假如所有的检测点都落在对角线上，或者非常接近对角线，则背景颜色为白色，表明响应值的预测可信，相反则背景为红色，响应值预测不可信；蓝色水平线代表了平均响应值的大小。

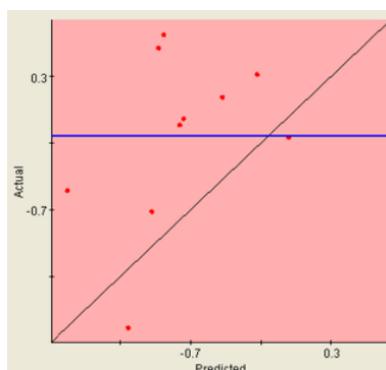


图 4.24 响应适应度图

Fig. 4.24 Response fit graph

常用的近似模型误差分析评价参数有决定系数 (Coefficient of Determination, R^2)、最大绝对值误差(Maximum Absolute Error, MAE)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)以及平均绝对值误差(Average Absolute Error, AMAE), 其数学表达式如公式(4.4):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_{test}} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n_{test}} (y_i - \bar{y}_i)^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{test}} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n_{test}} (y_i - \bar{y}_i)^2}; \quad MAE = \text{Max} |y_i - \hat{y}_i|;$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_{test}} \sum_{i=1}^{n_{test}} (y_i - \hat{y}_i)^2}; \quad AMAE = \frac{1}{n_{test}} \left| \sum_{i=1}^{n_{test}} y_i - \hat{y}_i \right|;$$
(4.4)

式中, n_{test} 为试验样本的数量, y_i 为试验实际响应值, \bar{y}_i 为实际响应值的均值, \hat{y}_i 为近似模型的预测值^[102]。近似模型验证精度后, 若预测精度不满足要求, 则要求更新近似模型。一般通过增加样本、改变模型参数或更换近似模型类型等方式提高精度, 直到精度达到要求为止。

(1) 神经网络近似模型

20 世纪 40 年代, McCulloch 和 Pitts^[103]首次建立了人工神经网络模型, 1982 年, Hopfield^[104]将神经网络成功地应用在组合优化问题。如今神经网络已经被广泛地应用到人工智能以及优化、专家系统、数值逼近等各个方面。

神经网络近似模型的优点包括: 能够拟合任意非线性问题, 对于强非线性、向量维数高的仿真实验也能很好的拟合, 能够不受噪声的影响, 预测能力强。当然, 神经网络也有不足之处, 其缺点表现为构造模型所需的时间要比建立响应面法的时间长得多, 在线性问题或者一般低阶非线性问题上拟合效果不如响应面法好。

(2) 响应面近似模型

响应面近似模型是利用多项式函数拟合设计空间, 多项式的系数一般通过最小二乘回归求得, 构建响应面模型需要的最少样本点数取决于变量个数(M)和多项式阶数。如表 4.8 所示的是一到四阶响应面近似模型的公式, 其中, \tilde{y} 代表模型的近似响应值, M 代表设计变量的个数。

响应面方法的优点包括: 近似理论简单, 计算量小, 需要的样本数较少; 可

选用多种回归模型，因此可拟合多种响应，稳健性良好；拥有成熟的理论支持，实用性强，利用最小二乘法进行拟合，对响应函数都进行了平滑处理，避免了噪声因素的影响。它的缺点是：响应面近似模型并非通过所有的样本点，存在一定的误差；不适合于拟合高度非线性的复杂问题。

表 4.8 响应面近似模型公式及样本数要求

Table. 4.8 approximate model formula and sample request

阶次	初始化所需的最少样本点数	公式
1 阶	M+1	$\tilde{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_M x_M$
2 阶	(M+1)(M+2)/2	$\tilde{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_M x_M$ $+ \beta_{M+1} x_1^2 + \beta_{M+2} x_2^2 + \dots + \beta_{2M} x_{2M}^2$ $+ \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j$
3 阶	(M+1)(M+2)/2 + M	$\tilde{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_M x_M$ $+ \beta_{M+1} x_1^2 + \beta_{M+2} x_2^2 + \dots + \beta_{2M} x_{2M}^2$ $+ \beta_{2M+1} x_1^3 + \beta_{2M+2} x_2^3 + \dots + \beta_{3M} x_{3M}^3$ $+ \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j$
4 阶	(M+1)(M+2)/2 + 2M	$\tilde{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_M x_M$ $+ \beta_{M+1} x_1^2 + \beta_{M+2} x_2^2 + \dots + \beta_{2M} x_{2M}^2$ $+ \beta_{2M+1} x_1^3 + \beta_{2M+2} x_2^3 + \dots + \beta_{3M} x_{3M}^3$ $+ \beta_{3M+1} x_1^4 + \beta_{3M+2} x_2^4 + \dots + \beta_{4M} x_{4M}^4$ $+ \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j$

响应面建立过程中，并不是多项式的每一项对输出响应都是必须的，根据需要进行多项式关键项的选择(Polynomial Term selection method)，删除不必要的项，从而提高模型的精度和质量。关键项的取舍，一般通过对响应面系数进行显著性检验来决定。Isight 软件提供了四种常见的关键项选择的方法，它们的关键性选择方法的计算量、近似模型拟合的质量及关键项取舍描述如表 4.9 所示。进行关键项的取舍一般以残差平方和(以 RSS 表示)最小为目标，其中残差平方和(RSS)的表达式如式(4.5)：

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2 \quad (4.5)$$

式中， y_i 是响应实际值； \tilde{y}_i 是响应近似值； n 是构造响应面模型的样本点数。

表 4.9 多项式关键项选择方法

Table. 4.9 Polynomial Term selection method

方法名	计算量	拟合质量	关键项取舍描述
顺序替换 Sequential Replacement	低	低	从常数项开始，每增加一项，通过判断残差平方和（RSS）是否最小，考虑是否去掉已存在的项。即，若去掉已存在的项后 RSS 最小，则去除该项；否则保留该项。 这是一种“前向选择”： 从常数项开始，对拟合多项式进行检查； 每增加一项后，若满足等式： $\frac{RSS_p - RSS_{p+1}}{RSS_{p+1} / (n - p - 2)} > F_{enter}$ ，则增加该项；
逐次替换 (Stepwise)	高	一般	每增加一项后，将满足以下等式： $\frac{RSS_{p-1} - RSS_p}{RSS_p / (n - p - 1)} < F_{delete}$ ，则删除该项。 式中， F_{enter} 代表增加项的 F 比率(F-ratio to add term)， F_{delete} 代表删除项的 F 比率； n 代表样本点数，p 代表多项式项数。
每次替换两项 (Two-at-a-time Replacement)	高	非常好	从常数项开始，每增加一项，通过判断残差平方和（RSS）是否最小； 考虑是否去掉已存在的项。 增加一个项后，将此项与所有已有项进行比较， 检查能否替代已有项； 直到找到能使 RSS 更小的组合； 并重复以上步骤，直到达到最大的项数。
完全搜索 (Exhaustive Search)	非常高	最好	它采用自由组合的方式， 对所有项所有可能的组合都进行判断， 选择 RSS 最小的组合。

(3) 切比雪夫(Chebyshev)正交多项式模型

对于试验因素较多的优化模型，若采用最小二乘法响应面模型，拟合过程的计算相当复杂，而且得到的系数有可能出现统计相关，系数矩阵奇异，导致求解出的近似模型不可靠，倘若经过显著性检验得到某一回归系数与零无显著差异，统计学上意味着它们之间不存在线性关系。此时也不能简单地从拟合模型中删去响应的项，否则将使响应面模型失去意义^[105]。采用切比雪夫正交多项式拟合响应面模型时^[106,107]，则不仅可简化计算过程(已规范化)，而且可以克服用最小二乘法求系数过程中产生的系数矩阵病态的弊病。但它的缺点是初始化正交多项式模型需要 $2d+1$ 个样本点(d 是多项式自由度),且要保证样本点是等间隔的，否则的话，尽管可以进行拟合，但是无法进行方差分析。

(4) Kriging 近似模型

Kriging 近似模型的近似方法是一种半参数化的插值方法，它以已知样本为基础，考虑变量在空间上的相关特征，根据统计特性推测新样本的响应。因此，它具有良好的适应性，既可以拟合低阶线性问题也可以拟合高阶非线性问题。

Kriging 近似模型由两部分组成，分别是回归部分 $f(x)$ 与非参数部分 $z(x)$ ，即由全局回归多项式与局部随机偏差两部分叠加组成：

$$y(x) = f(x)\beta + z(x) \quad (4.6)$$

式中， $y(x)$ 为未知函数， $f(x)$ 为事先确定的回归基函数(一般可取常数项、一阶多项式或二阶多项式)。多数情况下， $f(x)$ 取固定的常数，这不会影响参数估计的模拟精度，即参数估计的精度不受 $f(x)$ 的形式的影响^[108-110]。Isight 软件中的 Kriging 近似模型的回归基函数 $f(x)$ 就是取的常数^[2]。 $z(x)$ 是服从随机分布 $Z(x)$ 的随机项， $Z(x)$ 服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$ ，均值为零，协方差不为零，方差为 σ^2 ，也就是说 $Z(x)$ 不独立，但是同分布。

$f(x)$ 与响应面近似模型中的回归多项式类似，为设计空间提供“全局”模型，而 $z(x)$ 则描述设计空间的“局部”随机偏差。Kriging 模型与响应面模型最大的区别就是因为随机分布 Z 的存在。

$z(x)$ 的协方差为：

$$Cov[z(x_i), z(x_j)] = \sigma^2 \mathbf{R}([R(x_i, x_j)]) \quad (4.7)$$

式中， \mathbf{R} 表示一个相关系数矩阵，是一个 $n_s \times n_s$ 阶的，主对角元为 1 的对称正定矩阵。 $\mathbf{R}(x_i, x_j)$ 代表 n 个样本点中的任意两个 x_i 与 x_j 的相关函数(也称为半变异函数或半方差)，它对 Kriging 模型的近似精度起决定性作用^[1]。

相关函数 $\mathbf{R}(x_i, x_j)$ 的形式有多种，应用较广的主要有以下四种，如表 4.10 所示：

表 4.10 相关函数
Table. 4.10 correlation function

函数名称	相关函数
指数相关函数 (Exponential)	$R(x_i, x_j) = \prod_{k=1}^{n_{dv}} e^{-\theta_k X_{ik} - X_{jk} }; (i, j = 1, 2 \dots n_s; k = 1, 2 \dots, n_{dv})$
高斯相关函数 (Gaussian)	$R(x_i, x_j) = \prod_{k=1}^{n_{dv}} e^{-\theta_k X_{ik} - X_{jk} ^2}; (i, j = 1, 2 \dots n_s; k = 1, 2 \dots, n_{dv})$
线性相关函数 (Matern Linear)	$R(x_i, x_j) = \prod_{k=1}^{n_{dv}} \theta_k X_{ik} - X_{jk} e^{-\theta_k X_{ik} - X_{jk} };$ (i, j = 1, 2 \dots n_s; k = 1, 2 \dots, n_{dv})
立方相关函数 (Matern Cubic)	$R(x_i, x_j) = \prod_{k=1}^{n_{dv}} \left(\frac{1 + \theta_k X_{ik} - X_{jk} + \frac{1}{2} \theta_k^2 X_{ik} - X_{jk} ^2}{3} \right) e^{-\theta_k X_{ik} - X_{jk} };$ (i, j = 1, 2 \dots n_s; k = 1, 2 \dots, n_{dv})

注： θ_k 代表近似模型的未知相关参数， n_{dv} 代表设计变量的个数。

表 4.10 中，高斯相关函数的应用最为广泛，是一种平滑近似模型，但是当样本点过于紧密时效果不好。相反，指数相关函数适用于样本点比较紧密的情况。

4.5.2 近似模型建立

首先，根据近似模型的特点，结合前文得出的试验设计结果，判断响应与设计变量之间的非线性线性关系。然后，分别为设计质量 Mass_design，碰撞整车吸收的最大内能 E 以及 B 柱及中门，前门侵入量、侵入速度等响应构建不同的近似模型。

(1) 设计质量响应的近似模型

根据工程经验及弹性力学理论知识可知，设计变量的总质量与设计变量板料的厚度之间是完全的线性关系。故对设计质量(Mass_design)的响应函数构建一阶响应面近似模型，响应面图如图 4.25 所示，利用最小二乘法求出各项系数，得到设计质量的近似模型如式(4.8)：

$$\begin{aligned} \text{Mass_design} = & 2.5917 B1 + 4.3314 B2 + 6.7643 D1 + 4.2022 D2 + 12.7530 D3 \\ & + 16.7232 D4 + 14.8824 D5 + 2.7593 F1 + 1.9957 F2 + 1.5588 F5 \end{aligned} \quad (4.8)$$

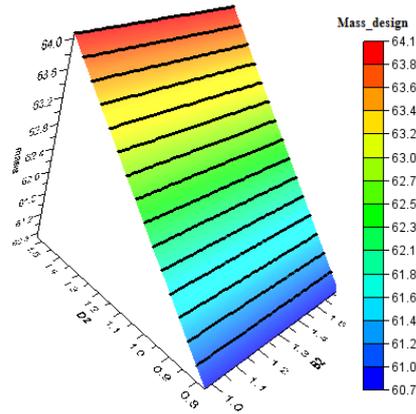


图 4.25 质量响应面图

Fig. 4.25 The mass response surface

(2)内能响应的近似模型

根据试验设计得到的结果,并结合工程分析的经验可知内能响应值与设计变量之间非线性关系阶次不是很高,考虑采用二阶响应面近似模型,关键项的选择方式采用效率最高的逐项替代法,经过验证二阶响应面近似模型精度满足要求。

图 4.26 所示的是内能的响应面图,得到内能的近似模型如式(4.9):

$$\begin{aligned}
 E = & 40143.4047 + 2471.1808 B_1 + 6585.7432 B_2 + 993.6359 D_1 \\
 & + 930.3195 D_2 + 1643.2633 D_5 + 506.1880 F_1 - 1170.9400 F_5 \\
 & - 851.2859 B_1^2 - 687.8401 B_2^2 - 180.7282 D_2^2 - 306.3525 D_3^2 \\
 & + 571.6744 D_4^2 - 880.8645 D_5^2 - 403.1484 F_1^2 + 187.6005 B_1 D_2 \\
 & - 431.7532 B_1 D_4 - 394.5191 B_2 D_4 - 411.6596 B_2 D_5 - 456.0224 B_2 F_5 \quad (4.9) \\
 & - 286.6316 D_1 D_4 + 261.8918 D_1 F_2 + 233.2777 D_2 D_3 + 143.7962 D_2 D_4 \\
 & - 313.1392 D_2 F_2 + 613.7989 D_3 D_5 + 226.1842 D_3 F_5 + 506.4484 D_4 F_5 \\
 & + 456.0984 D_5 F_1 + 184.1678 D_5 F_2 + 512.0006 D_5 F_5 + 329.2916 F_1 F_5 \\
 & + 260.9979 F_2 F_5
 \end{aligned}$$

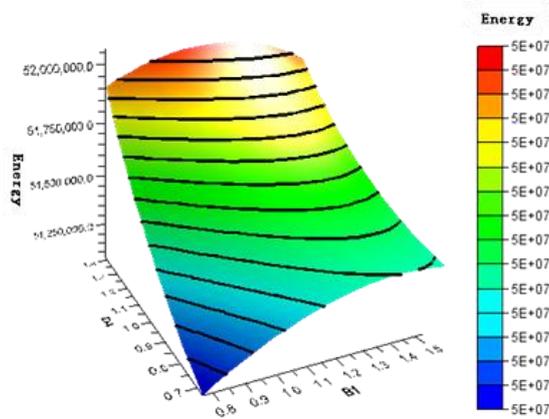
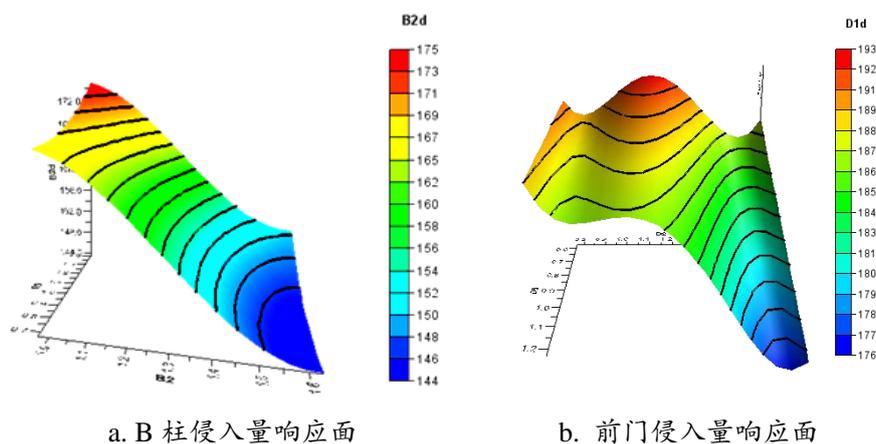


图 4.26 内能响应面

Fig. 4.26 The internal energy response surface

(3)侵入量的近似模型

通过观察侵入量响应的散点图发现，B柱与前门的侵入量多为单峰问题，阶次也较高，因此采用四阶响应面模型拟合。为了提高精度和质量，关键项的取舍采用“每次替换两项”(Two-at-a-time Replacement)的方式，得到B柱与前门的侵入量响应面如图4.27所示，得到近似模型如式(4.10)-(4.20)所示。



a. The response surface of B-pillar intrusion b. The response surface of front door intrusion

图 4.27 侵入量响应面(节选)

Fig. 4.27 The intrusion displacement response surface(partially)

$$\begin{aligned}
 Bd_1 = & 357.2336 + 302.0030 B_1 - 1318.2446 D_4 + 116.7881 F_1 - 251.8167 B_1^2 \\
 & + 2011.5116 D_4^2 - 280.1358 D_5^2 - 92.5265 F_1^2 + 7.5354 B_1 B^2 - 25.1589 B_1 D_1 \\
 & + 14.8247 B_1 D_5 - 3.0440 B_1 F_5 + 13.4837 B_2 D_1 - 3.9528 B_2 D_2 - 14.7956 B_2 D_3 \\
 & + 8.7033 B_2 D_5 - 11.3013 B_2 F_2 + 6.2088 B_2 F_5 - 16.0556 D_1 D_5 + 12.2941 D_1 F_1 \\
 & + 11.6586 D_1 F_2 + 4.2693 D_2 D_3 + 7.6230 D_2 D_4 - 6.4032 D_2 D_5 + 6.5397 D_2 F_1 \\
 & - 9.5956 D_2 F_5 + 6.7880 D_3 D_5 - 13.0953 D_4 F_1 + 5.6170 D_4 F_2 - 8.2959 D_5 F_2 \\
 & + 22.3761 D_5 F_5 + 63.4385 B_1^3 - 13.9608 B_2^3 - 7.1247 D_3^3 - 1328.4213 D_4^3 \\
 & + 353.2908 D_5^3 - 1.5246 F_5^3 + 8.0758 B_2^4 + 7.1555 D_3^4 + 320.2671 D_4^4 \\
 & - 134.7646 D_5^4 + 14.4683 F_1^4 + 0.3023 F_2^4
 \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned}
 Bd_2 = & 448.3049 + 629.4648 B_1 - 98.1139 B_2 + 56.9748 D_1 - 1756.9883 D_4 \\
 & - 552.1181 B_1^2 + 22.7241 B_2^2 + 15.0418 D_3^2 + 2640.4827 D_4^2 \\
 & - 287.3209 D_5^2 + 25.5234 B_1 B_2 - 25.6152 B_1 D_1 - 12.6088 B_1 D_2 \\
 & + 9.5467 B_1 D_4 + 9.5111 B_1 F_2 + 8.8122 B_2 D_1 + 11.5675 B_2 D_2 \\
 & - 15.0847 B_2 D_3 - 5.2128 B_2 D_4 + 13.7303 B_2 D_5 - 13.4006 B_2 F_1 \\
 & - 11.0000 B_2 F_2 + 8.4768 B_2 F_5 - 5.9280 D_1 D_2 - 6.7127 D_1 D_3 - 5.5825 D_1 D_4 \\
 & - 21.5233 D_1 D_5 + 4.8064 D_1 F_1 + 15.1147 D_2 D_4 - 8.3023 D_2 F_5 + 17.2115 D_4 D_5 \\
 & - 6.6294 D_4 F_1 - 7.3896 D_5 F_2 + 16.4988 D_5 F_5 + 7.9070 F_1 F_2 - 2.8793 F_2 F_5 \\
 & + 144.1055 B_1^3 - 1744.5754 D_4^3 + 388.2150 D_5^3 + 422.5463 D_4^4 \\
 & - 154.4168 D_5^4 + 1.5219 F_1^4 - 0.5002 F_5^4
 \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned}
 Bd_3 = & 1098.3036 + 264.4403 B_1 - 1858.1182 B_2 + 50.2223 D_1 - 1908.7385 D_2 \\
 & + 2400.2398 B_2^2 + 2518.1652 D_2^2 + 8.9323 F_1^2 + 3.5934 F_2^2 + 97.8767 F_5^2 \\
 & + 27.0693 B_1 B_2 - 21.7685 B_1 D_1 - 19.0394 B_1 D_2 - 22.6220 B_1 D_3 + 10.5318 B_1 F_5 \\
 & + 10.8883 B_2 D_2 + 7.3206 B_2 D_5 - 14.6703 B_2 F_1 - 5.8876 B_2 F_2 - 10.8163 D_1 D_3 \\
 & - 13.4039 D_1 D_4 - 13.3461 D_1 D_5 + 8.9489 D_2 D_4 - 4.1052 D_2 F_1 - 6.8930 D_2 F_5 \quad (4.12) \\
 & - 7.2955 D_3 D_5 + 14.1748 D_3 F_1 + 10.0534 D_4 D_5 + 11.8388 D_5 F_1 - 9.3937 D_5 F_2 \\
 & - 11.4913 F_1 F_5 - 203.2800 B_1^3 - 1414.5504 B_2^3 + 5.8925 D_1^3 - 1434.1262 D_2^3 \\
 & + 30.5048 D_3^3 - 83.4190 F_5^3 + 79.4276 B_1^4 + 310.4055 B_2^4 + 300.3761 D_2^4 \\
 & - 12.3232 D_3^4 - 2.0186 D_5^4 + 20.0880 F_5^4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Bd_4 = & 336.1445 + 1028.2578 B_1 - 59.9537 B_2 + 53.2200 D_1 - 2001.0900 D_2 \\
 & - 863.7177 B_1^2 + 2746.7211 D_2^2 + 49.3567 D_3^2 + 11.2448 F_1^2 + 148.2673 F_5^2 \\
 & + 15.0929 B_1 B_2 - 14.6552 B_1 D_1 - 21.6411 B_1 D_2 - 28.6375 B_1 D_3 + 6.8407 B_1 F_2 \\
 & + 14.1304 B_1 F_5 + 10.7210 B_2 D_2 + 4.3903 B_2 D_5 - 16.5984 B_2 F_1 - 5.2640 B_2 F_5 \\
 & - 19.9353 D_1 D_3 - 15.2047 D_1 D_4 - 7.2938 D_1 F_1 - 13.3556 D_2 D_3 - 12.0812 D_2 F_1 \quad (4.13) \\
 & - 4.6227 D_2 F_5 - 16.5336 D_3 D_5 + 19.8647 D_3 F_1 + 12.6494 D_4 D_5 + 9.1198 D_5 F_1 \\
 & - 7.4948 D_5 F_2 - 6.2123 F_1 F_5 - 4.1318 F_2 F_5 + 226.0286 B_1^3 - 1603.8584 D_2^3 \\
 & + 2.1208 D_4^3 - 127.3123 F_5^3 + 2.9146 B_2^4 + 2.9217 D_1^4 + 344.5042 D_2^4 \\
 & - 5.9056 D_3^4 - 2.5058 D_5^4 + 30.6651 F_5^4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Bd_5 = & 904.4604 + 34.7857 D_2 - 14.2608 D_5 + 286.4086 F_1 + 2435.6953 F_2 \\
 & - 19.3309 B_2^2 + 10.6122 D_3^2 - 251.3498 F_1^2 - 2154.0902 F_2^2 - 4.2579 B_1 D_1 \\
 & - 9.1943 B_1 D_5 - 6.6730 B_1 F_1 + 3.4657 B_1 F_5 + 4.7074 B_2 D_1 - 6.8235 B_2 D_2 \\
 & - 5.3782 B_2 D_3 + 15.2930 B_2 D_5 + 3.4955 B_2 F_1 + 3.6896 B_2 F_2 - 4.2083 B_2 F_5 \\
 & + 6.8084 D_1 D_2 - 7.9221 D_1 D_5 - 8.3164 D_1 F_2 - 10.6703 D_2 F_1 - 14.2080 D_2 F_2 \quad (4.14) \\
 & + 4.5484 D_3 D_4 - 5.3425 D_3 D_5 - 8.2701 D_3 F_2 - 7.8533 D_4 F_2 - 11.4361 D_4 F_5 \\
 & + 6.8551 D_5 F_1 + 3.1935 F_1 F_2 - 8.2378 F_1 F_5 - 7.1145 F_2 F_5 + 30.2689 D_4^3 \\
 & + 76.3909 F_1^3 + 850.4752 F_2^3 + 15.6549 F_5^3 - 3.3059 B_1^4 + 3.0820 B_2^4 \\
 & - 16.2517 D_4^4 - 124.2693 F_2^4 - 5.1119 F_5^4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Bd_6 = & -264.7791 + 60.4875 B_2 - 75.3095 D_2 + 4.3622 D_3 + 7.1271 D_4 \\
 & + 11.0775 F_1 + 2.0519 F_2 + 827.2999 F_5 + 9.1553 B_1^2 - 49.3471 B_2^2 \\
 & + 65.7562 D_2^2 - 2.3949 F_1^2 - 845.9922 F_5^2 - 2.7289 B_1 B_2 + 1.0141 B_1 D_1 \\
 & + 1.2425 B_1 D_3 - 3.0075 B_1 D_4 + 0.9552 B_2 D_2 + 0.9078 B_2 D_3 - 1.0893 B_2 D_4 \\
 & - 0.7077 B_2 D_5 - 1.5898 B_2 F_1 + 1.2997 B_2 F_2 + 2.0731 B_2 F_5 - 1.4697 D_1 D_3 \quad (4.15) \\
 & + 3.1516 D_1 D_4 - 1.8490 D_1 F_1 - 2.1559 D_1 F_2 + 0.8668 D_2 F_2 - 1.2986 D_3 D_4 \\
 & - 1.2328 D_3 F_1 - 1.8901 D_3 F_2 - 1.7912 D_4 F_1 - 1.6930 D_4 F_2 + 0.9144 D_4 F_5 \\
 & + 1.2447 D_5 F_2 - 3.2673 B_1^3 + 13.3949 B_2^3 - 19.2581 D_2^3 - 5.8687 D_5^3 \\
 & + 377.5571 F_5^3 + 3.5221 D_5^4 - 62.2748 F_5^4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Dd_1 = & 2477.7751 - 5092.0761B_2 - 3011.8949D_2 - 20.9886F_1 + 26.1503F_3 \\
& + 175.5446B_1^2 + 6560.5535B_2^2 + 30.6773D_1^2 + 4141.8360D_2^2 \\
& + 19.6582D_3^2 + 64.4436B_1B_2 - 43.4222B_1D_1 - 16.1148B_1D_2 \\
& - 19.9301B_1D_3 + 15.1000B_2D_2 + 6.4253B_2D_4 + 14.1306B_2D_5 \\
& - 19.1969B_2F_1 - 14.4017B_2F_5 - 8.0663D_1D_3 + 9.2853D_1F_2 \\
& + 14.5565D_2D_4 - 19.6399D_2D_5 + 11.8852D_2F_1 - 11.4644D_3D_4 \\
& - 27.5660D_3D_5 + 22.7947D_3F_1 + 13.9487D_3F_2 + 14.0408D_4D_5 \\
& + 12.1082D_4F_1 + 9.7972D_4F_2 + 7.7344D_5F_1 - 7.8886F_1F_5 - 228.9168B_1^3 \\
& - 3796.122B_2^3 - 2477.3845D_2^3 - 46.4151D_4^3 - 18.542F_2^3 + 71.212B_1^4 \\
& + 814.6343B_2^4 + 542.6764D_2^4 + 21.9998D_4^4 + 6.0861F_2^4
\end{aligned} \tag{4.16}$$

$$\begin{aligned}
Dd_2 = & 1118.3397 - 103.3330B_2 - 79.6827D_2 - 1976.3852F_2 + 100.0044B_1^2 \\
& + 34.6753B_2^2 + 16.7517D_1^2 + 1843.3434F_2^2 - 40.1377B_1D_1 - 4.2455D_4F_2 \\
& + 18.5867B_1D_2 - 20.4231B_1D_3 + 5.5501B_2D_2 + 6.7036B_2D_5 - 5.7746B_2F_1 \\
& - 7.5754B_2F_5 + 9.6700D_1F_2 + 8.4936D_1F_5 + 12.4165D_2D_4 - 1.2272D_2D_5 \\
& - 7.410D_3D_5 + 11.6496D_3F_1 + 20.4279D_3F_2 - 9.0722D_4D_5 - 4.9360D_4F_1 \\
& + 0.0740D_5F_1 + 0.7120D_5F_2 - 110.3967B_1^3 + 66.1776D_2^3 - 0.0373D_3^3 \\
& - 767.4679F_2^3 + 0.6100F_5^3 + 34.6176B_1^4 - 29.0135D_2^4 + 118.1990F_2^4
\end{aligned} \tag{4.17}$$

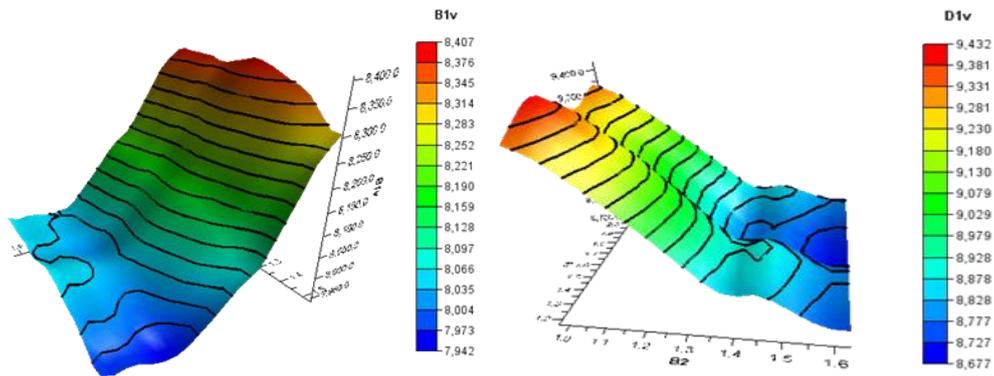
$$\begin{aligned}
Dd_3 = & 1728.0382 + 909.5667B_1 - 3665.9147B_2 - 47.2968D_1 - 1310.1105D_3 \\
& + 1978.2884F_1 - 2565.0311F_5 - 796.5477B_1^2 + 4833.8572B_2^2 \\
& + 24.7251D_1^2 + 1765.1054D_3^2 - 2942.6394F_1^2 + 2688.2040F_5^2 \\
& + 19.4574B_1B_2 + 12.6654B_1D_1 - 20.9451B_1D_3 - 9.8378B_1D_4 \\
& + 6.9236B_1D_5 - 14.9117B_1F_1 + 12.9948B_1F_5 + 15.5811B_2D_3 \\
& + 14.7591B_2D_4 - 5.2930B_2D_5 - 8.9281B_2F_1 + 22.2284D_1D_2 \\
& - 7.2602D_1D_3 - 25.8552D_1D_4 - 10.9357D_2D_3 - 12.7458D_2F_1 \\
& + 9.4061D_3D_4 - 15.8782D_3D_5 + 21.4346D_3F_1 + 13.5945D_4F_1 \\
& - 7.6993F_1F_5 + 210.7542B_1^3 - 2842.9018B_2^3 - 1016.8816D_3^3 \\
& + 1908.6517F_1^3 - 1237.4605F_5^3 + 618.2883B_2^4 + 214.5357D_3^4 \\
& - 451.2874F_1^4 + 210.2607F_5^4
\end{aligned} \tag{4.18}$$

$$\begin{aligned}
Dd_4 = & -3117.1188 + 15113.5554B_1 - 2945.2983B_2 - 2277.0634D_1 \\
& - 66.3686F_1 - 17865.8900B_1^2 + 3911.1070B_2^2 + 3677.1805D_1^2 \\
& - 7.5564D_2^2 + 27.8707F_1^2 + 37.9697B_1D_1 - 11.1457B_1D_3 \\
& + 7.8049B_1F_2 + 10.9704B_1F_5 + 13.5302B_2D_1 + 6.4957B_2D_3 \\
& - 9.2359B_2F_1 + 6.1378B_2F_2 + 9.6258D_1F_1 + 34.4340D_1F_5 \\
& + 15.1576D_2D_4 - 7.8974D_2F_2 + 8.0131D_2F_5 + 16.5218D_3D_4 \\
& - 15.4917D_3D_5 + 16.7686D_3F_1 - 16.9968D_3F_5 - 10.7600D_4F_2 \\
& - 14.2321D_4F_5 + 4.5008D_5F_5 + 9.1887F_1F_2 - 16.1495F_1F_5 \\
& - 11.3099F_2F_5 + 9213.4275B_1^3 - 2302.7206B_2^3 - 2745.1409D_1^3 \\
& + 2.2256D_4^3 - 1761.4184B_1^4 + 502.5268B_2^4 + 757.0089D_1^4 \\
& + 2.7076D_3^4 + 0.9042F_2^4 + 0.4437F_5^4
\end{aligned} \tag{4.19}$$

$$\begin{aligned}
 Dd_5 = & 814.0083 + 38.7959D_2 + 79.9107D_3 - 2613.7859F_1 + 52.0684D_1^2 \\
 & -12.3505D_3^2 + 15.6653D_5^2 + 3845.7342F_1^2 - 4.3998F_2^2 - 14.0068B_1D_1 \\
 & -13.9621B_1D_2 + 6.1271B_1D_3 - 20.7176B_1D_4 - 14.7464B_1F_1 \\
 & + 6.7737B_2D_1 + 7.8508B_2D_2 - 4.4622B_2D_5 - 17.0208B_2F_1 \\
 & + 6.9147B_2F_2 - 6.0873B_2F_5 - 22.5421D_1D_2 - 13.9254D_1D_3 \\
 & -17.1487D_1F_1 - 15.6883D_2D_4 - 3.6525D_2F_1 + 5.2606D_2F_2 \\
 & -11.2157D_3D_4 - 19.3535D_3D_5 + 5.8863D_3F_1 - 13.7210D_3F_2 \\
 & -4.6004D_3F_5 + 9.2160D_4F_2 + 8.0962D_4F_5 + 5.1675D_5F_1 - \\
 & 11.4636D_5F_5 - 6.3899F_1F_5 + 22.1090D_4^3 - 2406.6000F_1^3 + 2.7544F_5^3 \\
 & + 2.2709B_1^4 - 7.7042D_1^4 - 8.9558D_4^4 + 553.3511F_1^4
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

(4)侵入速度的近似模型

通过侵入速度响应的散点图发现，侵入速度的响应面更为复杂，非线性程度更高，初步采用四阶响应面模型，经过拟合发现近似模型精度不够， $R^2 < 0.9$ ，精度不满足要求。最终采用适用性更好的克里格近似模型构造，得到侵入速度的响应面图如图 4.28 所示。



a. B 柱侵入速度响应面

b. 前门侵入速度响应面

a. The response surface of B-pillar velocity

b. The response surface of front door velocity

图 4.28 侵入速度响应面(节选)

Fig. 4.28 The intrusion velocity response surface (partially)

下面给出 Kriging 近似模型的详细建模过程：

考虑本文中碰撞模型的设计变量取值比较紧密，选用表 4.10 所示的指数相关函数(Exponential)能够得到较高的近似精度；当选定了指数相关函数后，下面讨论相关函数中参数 θ_k 的确定方法。

Kriging 一般是根据已知样本响应值的线性组合，来估计新的样本的响应。

已知样本为试验设计得到的样本，响应值的列向量表示为 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 。则

新样本估计值:

$$\hat{y} = \mathbf{C}^T \mathbf{Y} \quad (4.21)$$

则估测值的误差为,

$$\begin{aligned} \hat{y} - y &= \mathbf{C}^T \mathbf{Y} - y \\ &= \mathbf{C}^T (\mathbf{F}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{Z}) - (f^T \boldsymbol{\beta} + z) \\ &= \mathbf{C}^T \mathbf{Z} - z + (\mathbf{F}^T \mathbf{C} - f)^T \boldsymbol{\beta} \end{aligned} \quad (4.22)$$

根据 Kriging 模型估计值的无偏性, 可知其均值 $E(\hat{y} - y) = 0$ 。且已知 $E\mathbf{Z}(\mathbf{x}) = 0$, 因此必须满足等式 (4.23)

$$\mathbf{F}^T \mathbf{C} - f = 0 \quad (4.23)$$

估计值的均方误差:

$$\begin{aligned} RMSE(x) &= E[(\hat{y} - y)^2] \\ &= E[(\mathbf{C}^T \mathbf{Z} - z)^2] \\ &= E[\mathbf{z}^2 + \mathbf{C}^T \mathbf{Z} \mathbf{Z}^T \mathbf{C} - 2\mathbf{C}^T \mathbf{Z} \mathbf{z}] \\ &= \sigma^2 (1 + \mathbf{C}^T \mathbf{R} \mathbf{C} - 2\mathbf{C}^T \mathbf{Z} \mathbf{r}) \end{aligned} \quad (4.24)$$

式中, $\mathbf{R} = [\mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_1), \mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_2), \dots, \mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_n)]$ 是待估点与已知样本点之间的相关向量。目标是均方误差最小, 确定待估系数矩阵 \mathbf{C} 的问题, 转化为以下线性约束最优化问题:

$$\begin{cases} \text{Find } \mathbf{C} \\ \min RMSE(x) \\ \text{s.t. } \mathbf{F}^T \mathbf{C} = f \end{cases}$$

引入约束问题的拉格朗日函数:

$$L(\mathbf{C}, \lambda) = \sigma^2 (1 + \mathbf{C}^T \mathbf{r}) - \lambda (\mathbf{F}^T \mathbf{C} - f) \quad (4.25)$$

式中, λ 是拉格朗日乘子。则该拉格朗日函数关于 \mathbf{C} 的梯度函数为,

$$\nabla L_c(\mathbf{C}, \lambda) = 2\sigma^2 (\mathbf{R} \mathbf{C} - \mathbf{r}) - \mathbf{F} \lambda \quad (4.26)$$

根据线性约束最优化问题的一阶必要性条件知, 存在向量 $\tilde{\lambda}$ 使得,

$$\begin{cases} \mathbf{R} \mathbf{C} + \tilde{\lambda} = \mathbf{r} \\ \mathbf{F}^T \mathbf{C} = f \end{cases} \quad (4.27)$$

则,

$$\begin{cases} \tilde{\lambda} = -\frac{\lambda}{2\sigma^2} = (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F})^{-1} (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} - f) \\ \mathbf{C} = \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{F} \tilde{\lambda}) \end{cases} \quad (4.28)$$

综上所述, 可以得到:

$$\begin{aligned} \hat{y} &= \mathbf{C}^T \mathbf{Y} = \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y} - (\mathbf{F} \tilde{\lambda})^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y} \\ &= \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y} - (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} - f)^T (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y} \end{aligned} \quad (4.29)$$

上式可以写成以下形式:

$$\begin{aligned} \hat{y} &= \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y} - (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} - f)^T \hat{\boldsymbol{\beta}} \\ &= f^T \hat{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{r}^T (\mathbf{x}) \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{Y} - \mathbf{F} \hat{\boldsymbol{\beta}}) \end{aligned} \quad (4.30)$$

式(4.30)为 Kriging 模型估计响应值的公式; 式中, $\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y}$, 为广义最小二乘估计值。

类似的方法可得随机项 $z(x)$ 的方差估计为:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n_s} (\mathbf{Y} - \mathbf{F}^T \hat{\boldsymbol{\beta}})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{Y} - \mathbf{F}^T \hat{\boldsymbol{\beta}}) \quad (4.31)$$

未知参数 θ_k 可以通过极大似然估计(MLE)方法进行估计, 即

$$\max_{\theta_k > 0} -\frac{n_s \ln(\sigma^2) + \ln |\mathbf{R}|}{2}; \quad |\mathbf{R}| = \det \mathbf{R} \quad (4.32)$$

可见, 极大似然估计值的求解等同于求解非线性无约束优化问题; 即如图 4.29 所示, 即为相关参数的拟合过程。

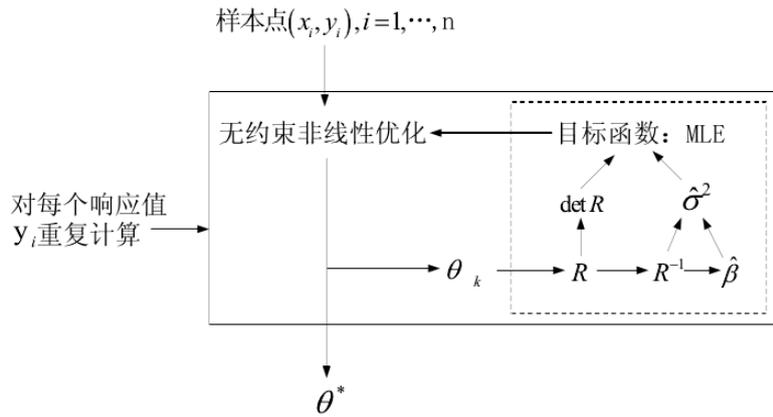


图 4.29 相关参数 θ 拟合流程

Fig. 4.29 The fitting process of related parameters θ

求出参数 θ_k 后，对于新的样本 x_i ， $\mathbf{r}^T(x)$ 可求，根据公式(4.30)就可以求出新的响应值 \hat{y}_i 。

具体估计新样本响应值 \hat{y}_i 的流程如图 4.30 所示：

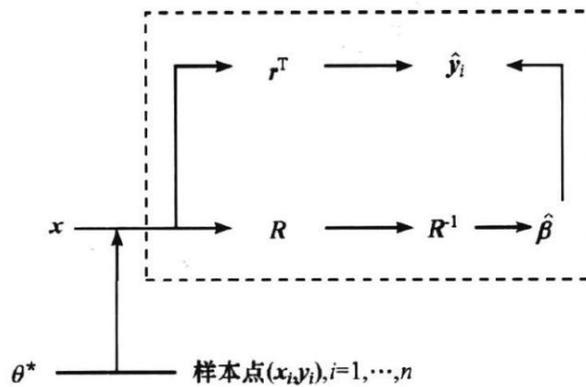


图 4.30 Kriging 模型拟合流程

Fig. 4.30 The fitting process of Kriging models

由式(4.30)，选定回归基函数 $f(x)$ 为常数，得到 Kriging 模型：

$$\mathbf{v} = \hat{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{r}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \mathbf{d})\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{Y} - \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\beta}}) \quad (4.33)$$

式中， $\mathbf{v} = [Bv_1 \ Bv_2 \ Bv_3 \ Bv_4 \ Bv_5 \ Bv_6 \ Dv_1 \ Dv_2 \ Dv_3 \ Dv_4 \ Dv_5]^T$ ；

$\mathbf{d} = [B_1 \ B_2 \ D_1 \ D_2 \ D_3 \ D_4 \ D_5 \ F_1 \ F_2 \ F_5]^T$ ；

$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \frac{1}{10} \times [4.178 \ 4.314 \ 3.031 \ 3.337 \ 1.087 \ 0.172 \ 0.641 \ 0.182 \ 1.331 \ 0.465 \ 0.579]^T$ ；

$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \frac{1}{10} \times [\boldsymbol{\theta}_{Bv_1} \ \boldsymbol{\theta}_{Bv_2} \ \boldsymbol{\theta}_{Bv_3} \ \boldsymbol{\theta}_{Bv_4} \ \boldsymbol{\theta}_{Bv_5} \ \boldsymbol{\theta}_{Bv_6} \ \boldsymbol{\theta}_{Dv_1} \ \boldsymbol{\theta}_{Dv_2} \ \boldsymbol{\theta}_{Dv_3} \ \boldsymbol{\theta}_{Dv_4} \ \boldsymbol{\theta}_{Dv_5}]_{10 \times 11}^T$ ；

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta}_{Bv_1} &= \begin{bmatrix} 1.457 \\ \vdots \\ 1.457 \end{bmatrix}; \boldsymbol{\theta}_{Bv_2} = \begin{bmatrix} 1.395 \\ \vdots \\ 1.395 \end{bmatrix}; \boldsymbol{\theta}_{Bv_3} = \begin{bmatrix} 1.395 \\ \vdots \\ 1.395 \end{bmatrix}; \boldsymbol{\theta}_{Bv_4} = \begin{bmatrix} 1.399 \\ \vdots \\ 1.399 \end{bmatrix}; \boldsymbol{\theta}_{Bv_5} = \begin{bmatrix} 1.395 \\ \vdots \\ 1.395 \end{bmatrix}; \boldsymbol{\theta}_{Bv_6} = \begin{bmatrix} 1.396 \\ \vdots \\ 1.396 \end{bmatrix}; \\ \boldsymbol{\theta}_{Dv_1} &= \begin{bmatrix} 1.395 \\ \vdots \\ 1.395 \end{bmatrix}; \boldsymbol{\theta}_{Dv_2} = \begin{bmatrix} 1.394 \\ \vdots \\ 1.394 \end{bmatrix}; \boldsymbol{\theta}_{Dv_3} = \begin{bmatrix} 1.394 \\ \vdots \\ 1.394 \end{bmatrix}; \boldsymbol{\theta}_{Dv_4} = \begin{bmatrix} 1.487 \\ \vdots \\ 1.487 \end{bmatrix}; \boldsymbol{\theta}_{Dv_5} = \begin{bmatrix} 1.396 \\ \vdots \\ 1.396 \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

$\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{Y} - \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\beta}})$ 是 90×11 的矩阵，其值如表 4.11 所示：

表 4.11 矩阵 $\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{Y} - \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\beta}})$ 的取值

Table. 4.11 The value of array $\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{Y} - \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\beta}})$

行 序号	列序号										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.0697	0.2983	-0.4512	-0.5071	-0.2144	0.4540	-1.0930	-1.4939	-1.1705	-0.7456	-0.6739
2	0.5882	0.5193	-0.2980	0.1139	-0.2256	-0.8373	-0.2591	-0.2964	0.7413	0.2541	0.9546
3	-0.4370	0.1659	-0.3810	0.6969	-0.9934	-0.4820	0.5630	1.6974	0.9566	1.3336	0.5850
4	-0.1848	-0.1790	0.7103	0.3741	2.4045	0.6629	-0.5602	-0.6791	0.3274	1.7317	2.9910
5	-0.0830	0.1168	-0.0985	-0.4662	0.6951	-0.0653	0.1743	-0.0109	-0.7650	-0.0132	1.1573
6	-1.5070	-0.6076	1.3625	0.6544	-0.3627	2.0636	0.2468	0.1051	2.0988	1.7972	1.1321
7	1.4042	0.6757	1.7566	1.6823	-0.9231	0.0445	1.7932	1.4464	0.7086	0.3218	-1.4658
8	0.3691	-0.0011	-0.5628	-0.3028	-0.7404	1.5098	-0.7218	-0.4271	-1.3324	0.2029	-1.1359
9	-0.7612	-0.2004	0.0165	0.2357	-0.2414	0.5359	-0.2589	-0.0739	1.2211	1.4792	0.3879
10	-0.1113	-0.5791	-1.8799	-1.4214	0.8860	0.4115	-0.2257	0.2536	0.6398	-0.2175	-2.4510
11	-0.8983	-0.6531	-1.1247	-1.3398	-0.9358	2.1776	-1.2000	-1.0897	2.2607	1.7075	-0.3175
12	1.7498	0.8303	-0.3562	-0.5778	-1.0047	0.4436	-1.2194	-0.9005	-2.0422	-0.9635	-1.4495
13	-0.8911	-1.3547	-0.5869	-0.9032	0.2379	-2.1657	0.4033	-1.0504	-0.0248	0.1074	-0.7119
14	-1.6084	-1.3780	-0.0138	-0.0217	-0.2700	-0.1535	-1.0825	0.2625	1.3633	1.2018	-1.0573
15	-1.3800	-0.9887	-0.4263	-0.0471	1.0645	-1.3319	1.4740	-0.0060	-0.7035	0.3976	-0.1773
16	-0.2348	-0.2804	-0.0794	0.2811	-0.4193	1.6595	-0.1005	-0.2338	-0.5486	-0.1042	-0.9794
17	-0.9762	-1.2736	0.5235	0.3294	-0.9970	-0.8371	0.6623	3.0791	1.4048	0.3115	0.8506
18	-0.3797	-0.1919	-1.1624	-0.9870	-0.8101	1.5102	-0.8278	-2.1822	-1.2265	-0.4120	-1.2859
19	-0.4329	-0.3512	-1.6193	-1.1198	-0.1106	1.3884	-0.7242	-1.9322	0.0171	-1.2553	-1.4469
20	0.2769	0.4275	1.2039	0.5527	-0.7400	-0.3985	0.9196	1.5336	0.6273	1.0712	1.2360
21	-0.7592	-0.6179	0.6891	-0.2064	-0.1016	0.1534	2.9990	3.7028	-0.6387	-1.0326	0.7756
22	-0.2320	-0.7489	-0.4595	-0.1667	-0.2593	-0.4918	-0.8839	-0.2652	0.7765	1.2620	0.5807
23	-2.1804	-1.5805	0.3169	0.3884	0.3619	0.6594	-0.3420	-0.6396	-1.2861	-0.5183	-1.6168
24	0.8455	0.9092	-0.1985	-0.0607	0.7636	0.9106	0.0504	0.6043	3.3241	2.9513	1.7000
25	1.0217	1.3550	1.2999	0.8908	1.5302	-2.0217	0.2544	0.0521	-0.4189	-0.7314	2.1896
26	1.5342	1.3559	0.8249	1.3567	0.5457	-0.7133	-0.0810	-0.6857	-0.4198	-0.4306	-1.1166
27	0.1770	0.6712	0.6375	0.3544	0.0677	1.6338	0.4992	-0.5120	-0.4084	-0.9096	-0.7912
28	-1.1888	-0.8819	0.5734	1.0139	0.6605	-2.0277	0.5298	0.6987	0.7729	-0.6580	1.1653
29	0.8468	0.7423	0.2060	-0.2639	-0.5274	-0.1467	1.1003	-0.5048	-0.0361	-0.8278	-0.5873
30	0.6099	0.6290	1.1546	1.3357	0.1149	0.4829	-0.8954	-1.3514	-0.6727	-1.0271	-1.1727
31	3.7688	3.8844	1.4146	1.3362	0.1749	-0.4323	2.2493	1.1753	0.8673	1.1255	0.2478
32	0.8353	1.3413	-0.0463	0.5888	2.3783	3.9655	1.0276	0.1203	1.0911	-1.0588	-2.2288
33	0.1900	0.0148	0.9805	0.2189	-0.2141	1.0705	0.4206	-0.0227	0.6146	0.7522	-1.4922
34	0.8560	0.5677	-0.0115	-0.2127	-0.1661	-2.3313	-0.3322	0.8329	2.4019	1.5261	0.2186
35	-1.6759	-1.7489	-1.7350	-0.9042	0.2122	1.6551	-1.0994	-0.3037	0.4862	-0.0277	-0.9123
36	-1.9679	-1.9725	0.3899	0.5228	-0.1097	-1.0355	-0.1174	1.0535	-0.8044	0.1656	0.0793
37	-0.3957	-0.6717	-0.8082	0.4515	-0.5105	1.4032	0.6992	0.4009	-1.3207	-0.8374	-0.7429
38	0.4617	-0.4883	-0.8995	-0.0216	-0.0439	0.1915	-0.5520	-0.4717	-0.9877	-1.3022	-0.1276
39	2.1543	2.6142	0.8036	1.0735	1.3066	-1.9623	0.8964	-0.0004	-0.6445	-0.7720	0.7643

续表 4.11

40	0.0032	-0.0950	-0.3598	0.0642	-0.0044	-1.7311	-1.1882	0.9451	1.1440	0.9359	0.6769
41	-0.4415	-0.8508	-0.3574	-0.4315	-0.9624	-1.0049	0.2670	1.0706	-1.2532	-1.5178	1.5509
42	1.7399	0.9576	-1.0683	-0.2445	-0.4769	0.9872	1.0878	1.5997	-1.3367	-0.2969	-1.0051
43	-0.8064	0.1623	-0.1395	0.4479	0.9645	-2.6264	0.5973	0.8720	2.9339	3.9620	3.2191
44	-0.6785	-0.4320	0.0696	-0.1085	-0.0356	2.6491	-0.7092	-1.2440	-0.4205	-0.3544	1.7688
45	0.1923	-0.1591	-1.7351	-1.5511	-0.7172	1.4962	-1.9623	-2.8017	-1.6929	-1.8558	-0.8837
46	-0.8987	-0.6945	-0.6282	-0.4600	0.4348	0.4856	-0.1444	0.9542	-0.8299	-0.0493	0.3340
47	-2.0239	-1.0332	-0.6622	-0.6393	-1.0910	3.0648	0.2023	0.5129	-1.5373	-1.6361	-0.5158
48	-0.7210	-0.4200	-0.3971	-1.0472	-0.6402	0.4920	0.4695	1.8991	-0.2628	-1.1405	-0.0706
49	-0.2336	-0.1894	0.2557	0.1677	-0.0172	-0.9947	-0.8810	-0.8804	-0.5038	-0.5943	2.4522
50	0.7932	0.6822	-0.7186	-0.0909	1.2397	-1.3523	-0.4768	-0.6282	-1.8118	-1.3688	-0.9199
51	0.1756	-0.0206	0.0970	0.1767	-0.1058	1.9900	-1.4699	-1.2512	-0.2031	0.4767	-0.2531
52	-2.7641	-0.5622	-0.2431	-0.1514	0.2255	0.3839	0.7265	-1.6567	-0.2172	-0.1676	0.4633
53	1.3495	0.2403	-0.5047	-0.5588	0.4305	0.5561	-0.5246	0.1524	0.6706	0.3015	0.2146
54	1.1069	0.2033	-0.3436	-0.4050	-0.1694	0.1047	-0.7889	-0.8894	-1.8667	-0.9297	1.3347
55	0.3829	0.3714	0.3462	-0.7282	-0.9735	-1.9327	-0.7958	0.7401	0.5378	-1.0061	-2.5955
56	0.9536	0.5197	-0.4694	-0.8807	1.1654	0.8415	-0.7833	-0.8261	-1.0345	-0.5571	-0.4660
57	-0.3462	-1.2583	-0.7413	-0.5132	-1.2387	-0.7639	-1.0357	-0.4749	0.7350	0.0200	-0.8461
58	-0.4247	-0.2538	0.2158	-0.1789	-0.4906	-0.7293	0.8386	0.1830	0.8759	0.6012	0.2786
59	0.2871	0.6110	2.1639	1.2937	0.0241	0.9173	0.2218	1.9311	1.2141	1.4016	0.2071
60	2.4537	1.2466	0.3124	0.6972	-0.9531	-1.6717	-0.3903	0.0453	-0.1362	-0.6251	1.4669
61	0.3870	0.1770	-0.0889	-0.3931	0.1845	-1.9761	-0.4253	1.1159	1.2872	-0.8911	-1.3588
62	2.0166	1.2627	-0.3476	-0.4476	0.8940	-1.7518	1.4489	0.4886	-1.9692	-1.8596	-1.9598
63	-0.5686	0.1254	-0.1714	-0.1235	-0.7797	0.6373	0.1756	-1.0298	0.8717	0.1485	-0.8961
64	-4.1687	-2.2887	-0.6304	-0.7607	1.1160	-1.9414	0.2558	-0.3129	-1.0179	-0.0964	1.1466
65	-0.3494	-0.1492	0.5883	0.5695	-0.5133	-0.2386	1.2342	-0.9450	-1.7991	1.0232	0.2610
66	-1.0028	-0.6493	-0.5853	-0.0231	-0.7458	0.2656	-0.7870	-0.7132	1.3981	0.0283	-0.1777
67	-1.1534	-1.0998	-0.8571	-1.0767	-0.7859	0.2667	-2.0949	-1.7953	0.2849	-1.0815	-0.4171
68	-1.1754	-1.0948	0.3369	0.4601	-0.5098	0.0206	0.2446	-0.3807	0.6188	0.4501	-0.3579
69	0.8098	0.6782	0.3433	-0.0230	-0.1083	-0.7327	0.2553	-1.6279	0.1170	-0.2569	-0.1865
70	1.2029	1.2088	-0.6554	-0.2040	1.6516	-0.7951	0.4985	0.3629	-1.2980	-0.9993	0.4045
71	0.8870	1.2509	-0.5809	-0.7267	-0.9203	1.3508	0.0416	-0.1677	-1.9806	-0.7380	-0.6704
72	-0.0893	-0.1084	-0.3521	-0.4183	-0.2128	0.0283	1.2253	0.5521	-1.4532	-0.1878	-0.1423
73	1.2557	-0.0294	0.0055	-0.3844	-0.1957	0.4637	0.9408	0.7790	0.8207	0.1611	-0.9988
74	-0.5421	-0.3793	-0.2642	-0.7936	-0.3596	0.9259	-1.5217	-0.0689	0.7256	-0.0907	-0.8824
75	2.6324	1.6103	2.4577	1.5305	0.1616	-1.1144	2.3199	1.9525	0.0952	0.5367	0.7279
76	-0.2474	-0.5301	-0.1074	0.2364	-0.4714	-0.1170	-1.1108	-1.2847	-0.2237	-0.1455	-0.6771
77	1.7642	1.9646	1.9046	2.4396	1.2564	-0.2219	0.0336	1.7401	0.1684	-0.0721	2.1195
78	0.4922	0.2049	0.5537	0.2970	-0.7406	-0.5442	0.1889	0.2065	0.9875	0.6120	0.5497
79	-1.2985	-1.0178	-0.7383	-0.5614	0.0987	-1.0359	-0.0029	0.4019	0.2441	-0.6457	1.2767
80	0.7194	1.4137	1.7087	1.8387	2.3668	0.4557	1.3161	2.2097	0.6732	1.1606	1.1520
81	0.7946	-0.0028	0.5046	0.0305	0.9767	-0.5672	0.1135	-1.1752	-1.6098	0.1715	0.1309
82	-1.1367	-0.4328	-0.4770	-0.5479	-0.4623	-0.0209	-0.2156	-0.1899	0.0288	0.1493	0.0998
83	0.3966	0.4892	1.0994	0.9697	1.8095	-0.7550	0.8283	-0.7977	0.0954	1.3998	-0.1007
84	-0.6468	-1.0553	-0.6595	-0.4507	-0.4500	0.4472	-0.6179	0.1453	-0.6802	-0.5840	-0.1760
85	-0.6648	-0.5551	0.0830	0.0299	-0.5577	-1.8561	-0.6900	-0.5467	0.2311	0.4346	0.9283
86	-1.6417	-1.2199	0.3546	0.2593	0.4464	0.1003	0.6551	-0.1835	0.5422	1.8766	1.0797
87	1.1244	0.8273	0.2654	-0.2323	-0.6186	1.8029	-0.8157	-1.3635	0.2035	-0.3250	-0.8296
88	0.3709	0.5086	-0.2644	-0.6805	-0.7963	-1.1871	-0.4472	-0.6238	-0.2425	-1.0210	-0.8761
89	0.9809	0.2128	-0.6816	-0.6586	-0.3632	-1.9296	-0.3111	0.9123	0.8831	-0.2523	-0.2331
90	-1.7219	-0.7169	0.4980	0.0648	-0.4630	1.3047	-0.3828	0.2010	-0.2568	-0.3605	1.5777

(5)车门模态的近似模型

根据振动力学理论，机械系统振动的基本要素是质量、刚度及阻尼，而车门模态分析通常无需考虑阻尼的影响，因此车门模态频率只与质量和刚度有关。因

此车门模态响应值与设计变量之间的非线性关系阶次不高,采用二阶响应面模型近似,所有关键项不做舍去处理。车门模态的响应面图如图 4.31 所示,得到车门近似模型如式(4.34)-(4.39):

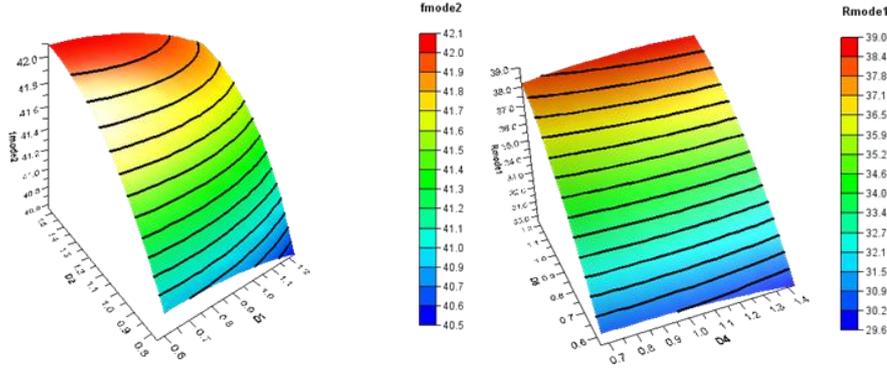


图 4.31 车门模态响应面图(节选)

Fig. 4.31 The response surface of vehicle doors' modes(partially)

$$\begin{aligned}
 F_{mode_1} = & 16.6762 + 15.9880D_1 + 7.6386D_2 + 0.3812D_3 + 2.1709F_1 + 0.1574F_2 \\
 & - 5.7196D_1^2 - 3.268D_2^2 - 0.8645D_3^2 - 0.3808F_1^2 - 0.0433F_2^2 + 2.919D_1D_2 \\
 & + 0.7163D_1D_3 - 0.2671D_1F_1 - 0.0072D_1F_2 + 0.4637D_2D_3 \\
 & - 0.3305D_2F_1 - 0.0438D_2F_2 + 0.3396D_3F_1 + 0.4003D_3F_2 - 0.1795F_1F_2
 \end{aligned} \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned}
 F_{mode_2} = & 38.5377 + 0.0777D_1 + 5.5518D_2 - 1.3791D_3 + 0.1560F_1 - 0.1445F_2 \\
 & - 0.8131D_1^2 - 1.6843D_2^2 - 0.0607D_3^2 - 0.0930F_1^2 + 0.1911D_1D_2 \\
 & + 0.7276D_1D_3 + 0.0627D_1F_1 + 0.0810D_1F_2 + 0.0869D_2D_3 \\
 & - 0.0345D_2F_1 - 0.1271D_2F_2 + 0.0393D_3F_1 + 0.1380D_3F_2 - 0.0224F_1F_2
 \end{aligned} \quad (4.35)$$

$$\begin{aligned}
 F_{mode_3} = & 45.4071 + 19.7535D_1 + 11.1401D_2 + 1.6436D_3 + 0.6902F_1 \\
 & + 0.3133F_2 - 7.3487D_1^2 - 2.8026D_2^2 - 1.403D_3^2 - 0.4797F_1^2 \\
 & - 0.0875F_2^2 + 0.4689D_1D_2 + 0.5955D_1D_3 + 0.1034D_1F_1 \\
 & + 0.0654D_1F_2 + 0.7522D_2D_3 + 0.1031D_2F_1 - 0.3247D_2F_2 \\
 & + 0.1212D_3F_1 + 0.2677D_3F_2 - 0.0596F_1F_2 + 0.2677D_3F_2 - 0.0596F_1F_2
 \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned}
 R_{mode_1} = & 18.0186 - 0.0221D_4 + 25.5648D_5 + 0.2255F_5 - 1.3831D_4^2 \\
 & - 8.554D_5^2 - 0.1843F_5^2 + 2.981D_4D_5 + 0.192D_4F_5 - 0.1142D_5F_5
 \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned}
 R_{mode_2} = & 25.4111 + 0.3582D_4 + 23.4628D_5 + 0.4893F_5 - 0.2782D_4^2 - 6.3882D_5^2 \\
 & - 0.1656F_5^2 - 0.0840D_4D_5 + 0.0130D_4F_5 - 0.0626D_5F_5
 \end{aligned} \quad (4.38)$$

$$\begin{aligned}
 R_{mode_3} = & 27.7730 + 0.7707D_4 + 39.1452D_5 + 1.263F_5 - 1.715D_4^2 - 13.9357D_5^2 \\
 & - 0.3661F_5^2 + 2.9704D_4D_5 - 0.2368D_4F_5 + 0.0953D_5F_5
 \end{aligned} \quad (4.39)$$

(6)车门刚度的近似模型

刚度分析属于线性分析范畴,响应值与设计变量之间的非线性关系阶次不

高，也采用二阶响应面模型近似。得到车门刚度的响应面图如图 4.32 所示，车门刚度近似模型如式(4.40)-(4.49)所示：

$$\begin{aligned} Fstiffness_1 = & 4.4632 - 1.4730D_1 - 0.3131D_2 + 1.0332F_2 + 0.3784D_1^2 \\ & - 0.2126F_2^2 + 0.1520D_1D_2 - 0.1972D_1F_2 + 0.0907D_2D_3 \\ & + 0.0189D_2F_1 - 0.1494D_3F_2 \end{aligned} \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned} Fstiffness_2 = & 13.7221 - 13.0719D_2 - 1.2205D_3 + 1.9718F_2 + 4.5009D_2^2 \\ & + 0.4602D_3^2 + 0.4184F_2^2 - 0.5875D_1D_2 - 0.2933D_1F_1 \\ & + 0.4538D_1F_2 + 0.1041F_1F_2 \end{aligned} \quad (4.41)$$

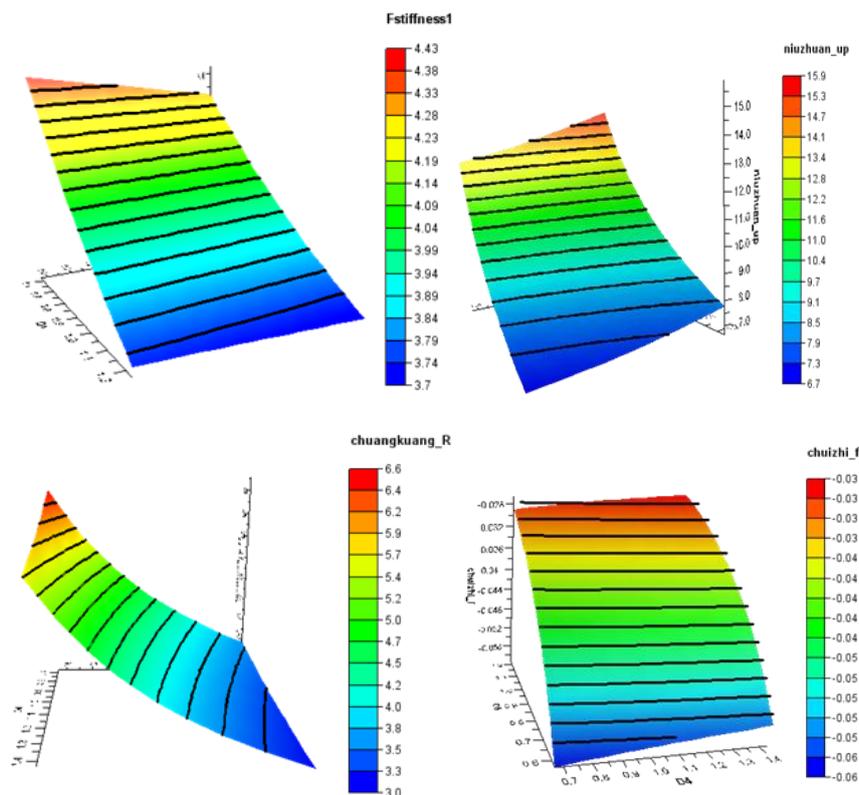


图 4.32 车门刚度响应面图(节选)

Fig. 4.32 The response surface of vehicle doors' stiffness(partially)

$$\begin{aligned} Fstiffness_3 = & 9.8109 - 5.1199D_1 - 5.1744D_2 + 1.2497D_1^2 + 1.0289D_2^2 \\ & + 0.9210D_1D_2 + 0.0756D_2D_3 + 0.0974D_2F_1 + 0.3458D_2F_2 \\ & - 0.2649D_3F_2 - 0.1223F_1F_2 \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned} Fstiffness_4 = & 13.3865 - 7.7814D_1 - 7.5502D_2 - 0.4680D_3 + 2.2637D_1^2 \\ & + 1.6259D_2^2 + 0.2141D_3^2 + 1.3905D_1D_2 + 0.2521D_2F_2 \\ & - 0.2740D_3F_2 - 0.0531F_1F_2 \end{aligned} \quad (4.43)$$

$$\begin{aligned} \text{chuangkuang_L} = & 16.756 + 2.8941D_4 - 32.605D_5 + 13.2675F_5 - 10.2029D_4^2 \\ & + 18.8136D_5^2 - 12.4326F_5^2 + 1.9113D_4D_5 + 0.0633D_4F_5 \\ & - 0.0116D_5F_5 + 6.7255D_4^3 - 1.5528D_5^3 + 5.1034F_5^3 \\ & - 1.5166D_4^4 - 1.6458D_5^4 - 0.7781F_5^4 \end{aligned} \quad (4.44)$$

$$\begin{aligned} \text{chuangkuang_R} = & 17.2671 - 0.1833D_4 - 35.9554D_5 + 4.1138F_5 - 3.0052D_4^2 \\ & + 36.5309D_5^2 - 3.8231F_5^2 + 0.8644D_4D_5 + 0.0331D_4F_5 \\ & + 2.0963D_4^3 - 18.5446D_5^3 + 1.5457F_5^3 - 0.4808D_4^4 \\ & + 3.6382D_5^4 - 0.2323F_5^4 \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$\begin{aligned} \text{chuzhi_F} = & 0.1724 - 0.0163D_4 - 0.3285D_5 - 0.0015F_5 + 0.0096D_4^2 \\ & + 0.3452D_5^2 + 0.0009F_5^2 + 0.0026D_4D_5 + 0.0003D_4F_5 \\ & + 0.0005D_5F_5 - 0.0043D_4^3 - 0.1880D_5^3 - 0.0006F_5^3 + \\ & 0.0008D_4^4 + 0.0411D_5^4 + 0.0001F_5^4 \end{aligned} \quad (4.46)$$

$$\begin{aligned} \text{chuzhi_R} = & 0.7960 - 0.1104D_4 - 1.6179D_5 - 0.0799F_5 + 0.0516D_4^2 \\ & + 1.8617D_5^2 + 0.0791F_5^2 + 0.0183D_4D_5 + 0.0007D_4F_5 \\ & + 0.0007D_5F_5 - 0.0141D_4^3 - 1.0547D_5^3 - 0.0349F_5^3 + 0.0013D_4^4 \\ & + 0.2333D_5^4 + 0.0057F_5^4 \end{aligned} \quad (4.47)$$

$$\begin{aligned} \text{niuzhuan_up} = & 50.9058 - 2.8838D_4 - 106.6987D_5 + 1.5031F_5 - 3.4457D_4^2 \\ & + 114.3278D_5^2 - 1.2598F_5^2 + 1.7567D_4D_5 + 0.0507D_4F_5 \\ & + 0.0995D_5F_5 + 2.9608D_4^3 - 60.9534D_5^3 + 0.3803F_5^3 \\ & - 0.7173D_4^4 + 12.7049D_5^4 - 0.0367F_5^4 \end{aligned} \quad (4.48)$$

$$\begin{aligned} \text{niuzhuan_down} = & 25.8655 - 2.0523D_4 - 52.7720D_5 - 5.9533F_5 \\ & - 0.3829D_4^2 + 59.9715D_5^2 + 5.6233F_5^2 + 0.8643D_4D_5 \\ & + 0.0503D_4F_5 + 0.2819D_5F_5 + 0.4543D_4^3 - 34.1591D_5^3 \\ & - 2.5194F_5^3 - 0.0755D_4^4 + 7.6395D_5^4 + 0.4183F_5^4 \end{aligned} \quad (4.49)$$

4.5.3 近似模型误差分析与精度的验证

本文真实值与近似值之间的对比情况，可以通过响应适应度图进行分析。由于响应值过多，本文只给出个别的响应适应图，如图 4.33 所示。由各个响应的响应适应图可知，预测点大都分布在对角线周围，可见响应适应度较高，也就是说近似模型的拟合精度较高。

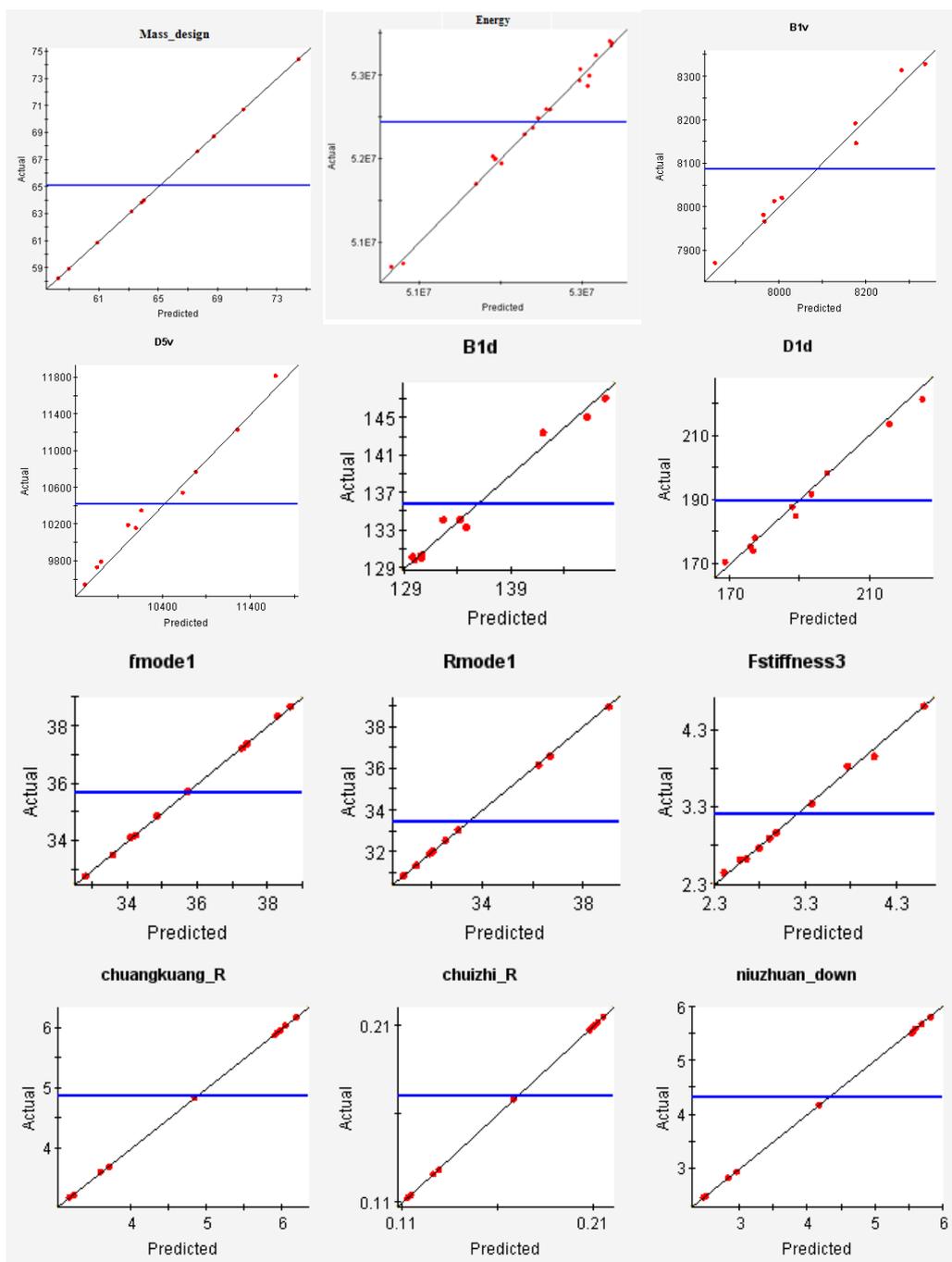


图 4.33 响应适应度图(节选)

Fig. 4.33 Response fit graphs (partially)

本文采用决定系数 R^2 、最大绝对值误差 MAE、均方根误差 RMSE 以及平均绝对值误差 AMAE 来评价近似模型的精度，它们的计算公式见式(4.4)。如果 MAE、RMSE 和 AMAE 越接近于 0， R^2 越接近 1；则表明近似模型拟合精度越高。各个近似模型响应的误差分析情况如表 4.12 所示，可知近似模型的误差都在可接收范围内，精度满足要求。

表 4.12 近似模型误差分析评价参数

Table. 4.12 The approximate model error analysis evaluation parameters

输出响应	评价参数			
	R ²	MAE	RMSE	AMAE
Mass_design	1.00000	0.00000	0.0000	0.00000
E	0.99113	0.07062	0.02673	0.02079
Bd ₁ (P ₁)	0.97920	0.08936	0.05366	0.04250
Bd ₂ (P ₂)	0.99524	0.05247	0.02171	0.01613
Bd ₃ (P ₃)	0.99417	0.05668	0.02341	0.01739
Bd ₄ (P ₄)	0.99764	0.03068	0.01505	0.01320
Bd ₅ (P ₅)	0.99451	0.03876	0.02298	0.01951
Dd ₆ (P ₆)	0.95863	0.13604	0.05493	0.04122
Dd ₁ (P ₇)	0.98286	0.07324	0.04179	0.03420
Dd ₂ (P ₈)	0.93011	0.17812	0.08584	0.06719
Dd ₃ (P ₉)	0.97342	0.10471	0.05413	0.04388
Dd ₄ (P ₁₀)	0.97878	0.09603	0.04281	0.03202
Dd ₅ (P ₁₁)	0.98110	0.09727	0.04323	0.03542
Bv ₁ (P ₁)	0.98013	0.07314	0.04476	0.03961
Bv ₂ (P ₂)	0.94811	0.14884	0.07933	0.06847
Bv ₃ (P ₃)	0.98579	0.05153	0.03506	0.03219
Bv ₄ (P ₄)	0.97891	0.06295	0.04219	0.03709
Bv ₅ (P ₅)	0.99330	0.05094	0.02249	0.01748
Bv ₆ (P ₆)	0.96944	0.08072	0.04784	0.04174
Dv ₁ (P ₇)	0.98497	0.09190	0.04042	0.03058
Dv ₂ (P ₈)	0.97402	0.06816	0.04760	0.04107
Dv ₃ (P ₉)	0.98803	0.05163	0.03174	0.02680
Dv ₄ (P ₁₀)	0.99550	0.04308	0.02452	0.02062
Dv ₅ (P ₁₁)	0.97458	0.08485	0.04708	0.03797
Fmode ₁	0.99948	0.01582	0.00767	0.00582
Fmode ₂	0.99192	0.04803	0.02662	0.02171
Fmode ₃	0.99870	0.02430	0.01169	0.00915
Rmode ₁	0.99987	0.00559	0.00369	0.00334
Rmode ₂	0.999975	0.00878	0.00507	0.00452
Rmode ₃	0.999921	0.01734	0.00906	0.00726
Fstiffness ₁	0.98290	0.06558	0.04002	0.03655
Fstiffness ₂	0.99414	0.04599	0.02285	0.01981
Fstiffness ₃	0.99584	0.04217	0.02013	0.01558
Fstiffness ₄	0.99687	0.04073	0.02015	0.01684
chuanguang_L	0.99967	0.01664	0.00729	0.00588
chuanguang_R	0.99993	0.00723	0.00335	0.00286
chuzhi_F	1.00000	0.00166	0.00083	0.00065
chuzhi_R	0.99998	0.00370	0.00196	0.00166
niuzhuan_up	0.99996	0.00479	0.00268	0.00245
niuzhuan_down	0.99992	0.00697	0.00382	0.00339

注：R²的可接受水平最小为 0.9；MAE 的可接受水平最大为 0.3；RMSE 的可接受水平最大为 0.2；AMAE 的可接受水平最大为 0.2。

4.6 基于多目标确定性优化的车身结构轻量化

本文的优化的最终目标是实现轻量化与碰撞安全性能最优化，这是一个涉及多目标优化问题。解决这类问题的方法有两种，一种是将多目标问题以加权等方

式转化为单目标问题，也称为归一化方法；一种是采用 Pareto 机制选取非劣解集的方式进行多目标优化，称为非归一化方法。

归一化方法有加权法、 ε -约束法、全局准则法、目标规划法等，其中加权法是代表算法之一^[111]。这类算法最大的缺陷就是难以判断多目标转化为单目标的过程是否合理。以权重法为例，首先，在优化时难以判断什么样的权重因子才是合理的；其次，该算法无法取到内部凹陷部分的非劣解。

非归一化算法包括以下几种：VEGA、MOGA、NSGA、NSGA-II、NCGA、AMGA 等。这类算法具有以下优点：不是依次求解单独的 Pareto 解，而是一次性的获得 Pareto 前沿；具有启发式方法，易于操作简单通用；能够解决内部凹陷问题的前沿解的求解问题。归一化算法中的加权法与一般非加权算法处理凹陷问题时的前沿解对比情况如图 4.34 所示，由图可知加权法处理凹陷问题，由于切线无法接近凹陷部分，无法取到凹陷部分的前沿解，而非归一化方法很好的解决了这一问题；加权法每次只得到一个前沿解，而非加权方法一次性可以得到所有的前沿解。自 1985 年至今，非归一化的多目标遗传算法在不断改进，优化性能也在不断的提升，尤其是 2000 年由 K.deb 和 S.Agrawa 提出的 NSGA-II (第二代非劣排序遗传算法)^[112]和 2002 年由同志社大学的三本·广安研究室发布的 NCGA (邻域培植多目标遗传算法)^[113]以优异的寻优特性在汽车设计多目标优化问题中得到了广泛的应用^[114-118]。另外在 2008 年 Tiwari 和 Koch 等提出的 AMGA (基于存档的微遗传算法)^[119]，作为一种较新的多目标遗传算法也逐步得到众多学者以及企业工程师的关注与应用^[120-123]。

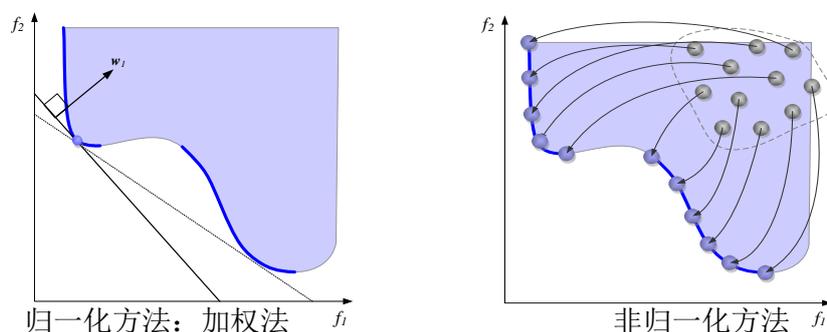


图 4.34 凹陷问题的 Pareto 前沿

Fig. 4.34 The Pareto frontier of sag problem

本节的不确定性最优化问题以设计变量的总质量 $Mass_design$ 、碰撞过程吸收的最大内能 E 等 2 个响应为目标函数，以侧面碰撞性能中的 B 柱与车门测量点处的侵入量与侵入速度、前门与中门模态性能、前门与中门刚度性能等 38 个响

应作为约束条件。具体的确定性优化数学模型如下：

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{Obj: } \text{Min} (Mass_design); \quad \text{Max} (E) \\
 \\
 \text{S.t. } \text{Side impact:} \quad Dd_j \leq Dd_j^U; \quad Bd_k \leq Bd_k^U, \\
 \quad \quad \quad Dv_j \leq Dv_j^U; \quad Bv_k \leq Bv_k^U, \\
 \quad \quad \quad j = 1, 2, \dots; \quad k = 1, 2, \\
 \quad \quad \quad Mode_front_door_f \geq Mode_front_door_f^L, \\
 \text{Mode:} \quad Mode_middle_door_f \geq Mode_middle_door_f^L, \\
 \quad \quad \quad f = 1, 2, 3. \\
 \\
 \text{Stiffness:} \quad Stiffness_front_door_m \leq Stiffness_front_door_m^U, \\
 \quad \quad \quad Stiffness_middle_door_n \leq Stiffness_middle_door_n^U, \\
 \quad \quad \quad m = 1, 2, 3, 4; \quad n = 1, 2, 3, \dots, 6. \\
 \\
 x_i^L \leq x_i \leq x_i^U; \quad i = 1, 2, \dots, 10.
 \end{array} \right.$$

式中， $Mass_design$ 和 E 分别代表设计变量的总质量和碰撞过程中吸收的最大内能； Dd_j 和 Bd_k 分别为车门的第 j 个测量点的侵入量、B 柱上第 k 个测量点的侵入量， Dd_j^U 和 Bd_k^U 为对应的设计上限(常数)； Dv_j 和 Bv_k 分别为车门上第 j 个测量点的侵入速度和 B 柱上第 k 个测量点的侵入速度， Dd_k^U 和 Bd_k^U 为对应的设计上限； $Mode_front_door_f$ 和 $Mode_middle_door_f$ 分别为前门与中门的第 f 阶模态频率， $Mode_front_door_f^L$ 和 $Mode_middle_door_f^L$ 为对应的设计下限； $Stiffness_front_door_m$ 和 $Stiffness_middle_door_n$ 分别为前门的第 m 个刚度位移值与中门的第 n 个刚度位移值， $Stiffness_front_door_m^U$ 和 $Stiffness_middle_door_n^U$ 为对应的设计上限； x_i 为第 i 个设计变量值， x_i^L 和 x_i^U 分别为设计变量的下限与上限。

本节将利用 NSGA-II、NCGA、AMGA 这三种优化算法进行多目标的优化，得到的三组不同的最优非劣解集，根据企业需求从每组最优解集中选取一个合适的最优解。并根据三种优化算法的求解迭代历程与得到的优化解集，对三种优化算法的求解效率与结果进行综合的对比。

4.6.1 基于 NSGA-II 算法的确定性优化

遗传算法中参数交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的选择是影响遗传算法行为和性能的关键所在，直接影响算法的收敛速度， P_c 越大，新个体产生的速度就越快。

然而 P_c 过大时, 遗传模型容易被破坏, 具有高适应度的个体结构随着进化迅速被破坏; 但 P_c 过小也不可以, 过小则整个全局搜获过程缓慢, 以致停止不前; 对于变异概率 P_m , 如果过小不易产生新的个体, 但过大遗传算法就又失去了它的优势, 成了完全的随机搜索算法^[124]。以往的算法要确定 P_c 、 P_m 只能通过反复的试验来确定, 这将十分麻烦, 对于 NSGA-II 算法而言, 使用带有精英策略的非劣排序, 使用 SBX(Simulated Binary Crossover)自适应算子^[112], 控制 P_c 、 P_m 随着优化的进行自动的调整, 保持种群多样性的同时, 提高遗传算法的收敛性。

NSGA-II 算法参数设置: 交叉分配指数为交叉概率为 0.9, 父种群大小为 32, 进化的代数为 100, 变异分配指数为 20, 最大评价次数为 10000 次。经过 3200 次迭代寻优, 最终得到各个目标函数的 Pareto 非劣解集, 如图 4.35 所示, Pareto 解在散点图中的分布情况如图 4.36 所示, 质量与内能的优化历程如图 4.37 和图 4.38 所示。图中蓝色点代表 Pareto 解, 红色点代表违反约束条件的解, 黑色点代表未违反约束的非 Pareto 解。

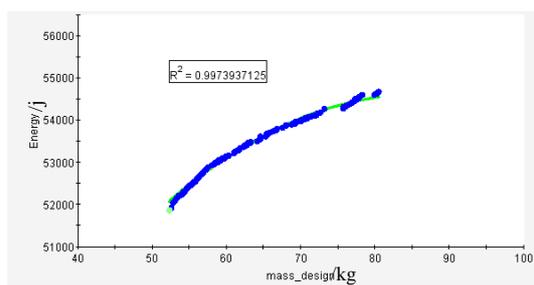


图 4.35 质量与内能的 Pareto 非劣解集(NSGA-II)
Fig. 4.35 The Pareto optimal set of mass and internal energy(NSGA-II)

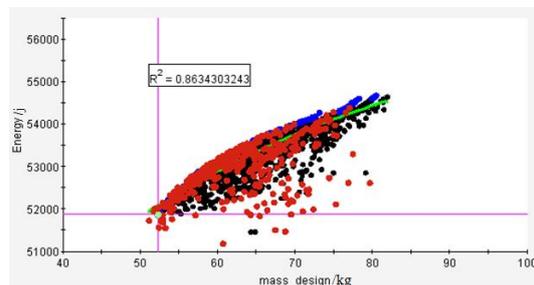


图 4.36 质量与内能的散点图(NSGA-II)
Fig. 4.36 The scatter diagram of mass and internal energy(NSGA-II)

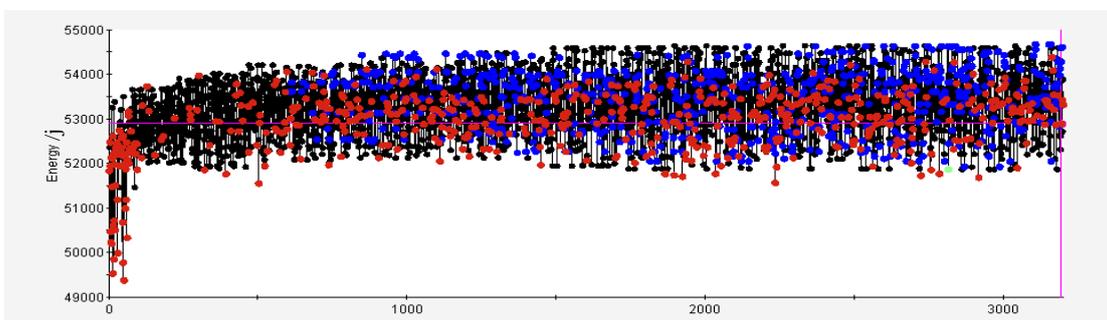


图 4.37 内能的确定性优化历程(NSGA-II)

Fig. 4.37 The deterministic optimization history of internal energy(NSGA-II)

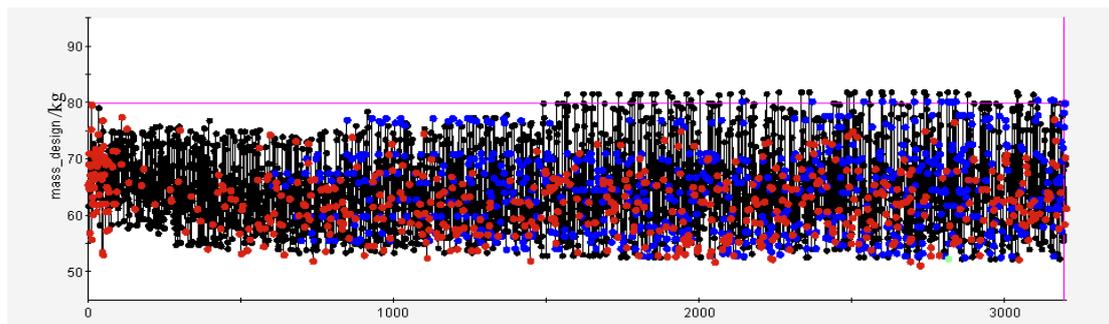


图 4.38 质量的不确定性优化历程(NSGA-II)

Fig. 4.38 The deterministic optimization history of mass(NSGA-II)

由图 4.35 和图 4.36 可以看出，整个非劣解集分布范围大都处于边界位置，Pareto 解在质量函数值接近 52kg 时开始出现，在质量函数小于 70kg 时 Pareto 前沿(Pareto 前沿是指 Pareto 非劣解集在目标函数空间中的像)的连续性与均匀性都非常好，超过 70kg 时 Pareto 前沿出现了间断，大约接近 80kg 时 Pareto 解消失。由图 4.37 和图 4.38 可以看出，基于 NSGA-II 算法的寻优在 650 多次的时候才得到第一个 Pareto 解。

4.6.2 基于 NCGA 算法的不确定性优化

NCGA 算法主要做了以下改进：提高了并行计算效率，引入“邻域交叉培育”提高了探索能力，在交叉算法与选择方法上做了改进。在研究提高并行计算效率时候发现，并行和分割父种群时，将父种群的个体中具有相似性的分在一起比较好。因此“邻域交叉培育”是指在交叉时不是在具有完全不同的基因的个体间进行，而是在具有一定相似性的个体之间进行，这种方式也叫“近傍杂交”。

NCGA 算法参数配置：交叉概率为 0.9，变异概率 0.01，父种群大小为 32，进化的代数为 100，基因大小为 20，最大评价次数为 10000 次。经过 3200 次迭代寻优，最终得到各个目标函数的 Pareto 非劣解集，如图 4.39 所示，Pareto 解在散点图中的分布情况如图 4.40 所示，质量与内能的优化历程如图 4.41 和图 4.42 所示。

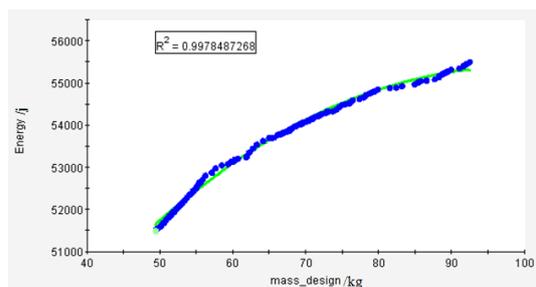


图 4.39 质量与内能的 Pareto 非劣解集(NCGA)

Fig. 4.39 The Pareto optimal set of mass and internal energy(NCGA)

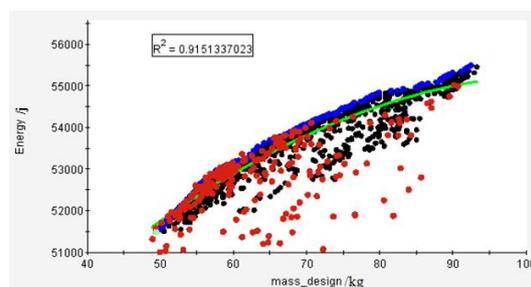


图 4.40 质量与内能的散点图(NCGA)

Fig. 4.40 The scatter diagram of mass and internal energy (NCGA)

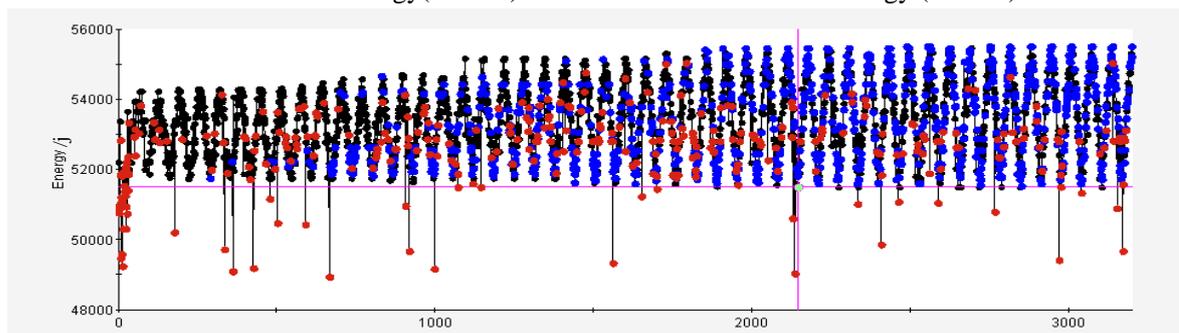


图 4.41 内能的确定性优化历程(NCGA)

Fig. 4.41 The deterministic optimization history of internal energy(NCGA)

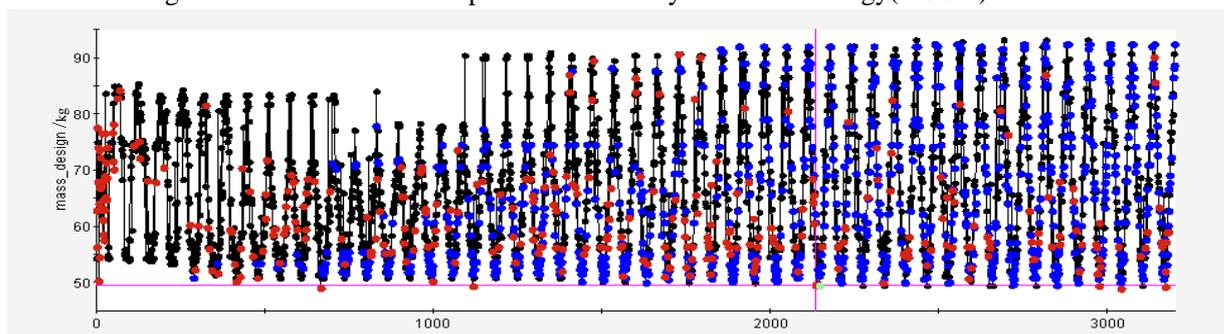


图 4.42 质量的确定性优化历程(NCGA)

Fig. 4.42 The deterministic optimization history of mass(NCGA)

由图 4.39 和图 4.40 可以看出, 整个非劣解集分布范围大都处于边界位置, 且比 NSGA-II 算法的 Pareto 解的分布更加集中, 说明 NCGA 的探索性比 NSGA-II 也有所提高; Pareto 解在质量函数值接近 50kg 时开始出现, 整个过程 Pareto 前沿的连续性与均匀性都相对较差, 在大约接近 95kg 时 Pareto 解消失。

由图 4.41 和图 4.42 可以看出, 基于 NCGA 算法的寻优在 350 多次的时候得到第一个 Pareto 解, 比 NSGA-II 要早了许多, 可见 NCGA 寻优效率较高, 但是得到第一个解后寻优过程中点的跳动幅度仍然很大, 这与 NCGA 算法的特点密切相关, NCGA 算法不会向适应度高的个体施加选择压, 这样的优点是能够比 NSGA-II 算法更加容易生成多样的解的倾向, 缺点就是前沿(Frontier)的发展比较

落后。

综合而言，NCGA 算法的 Pareto 解集分布范围广，能够生成多样性的解，但 Pareto 前沿的光滑性与连续性较差。

4.6.3 基于 AMGA 算法的确定性优化

AMGA 算法出现较晚，应用相对还比较少。AMGA 算法继承了 NSGA-II 的 SBX 算子、快速非支配排序算法，改进是在进化过程之外设立一个存档(Archive)，用于保存进化过程中的非支配个体及相应的多目标函数值。

AMGA 算法参数配置：交叉概率为 0.9，变异概率 0.05，初始种群大小 40，父种群大小 40，档案种群大小为 3200，最大评价次数为 3200。经过 3200 次迭代寻优，最终得到各个目标函数的 Pareto 非劣解集，如图 4.43 所示，Pareto 解在散点图中的分布情况如图 4.44 所示，AMGA 算法的计算流程如图 4.45 所示。

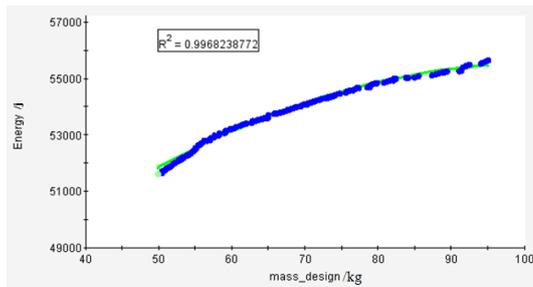


图 4.43 质量与内能的 Pareto 非劣解集(AMGA)
Fig. 4.43 The Pareto optimal set of mass and internal energy(AMGA)

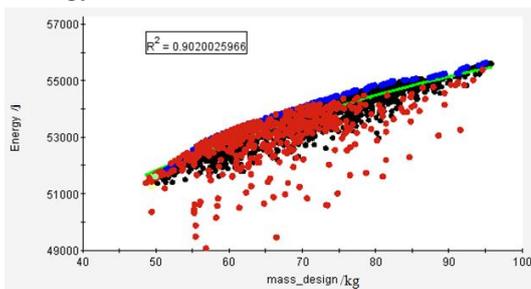


图 4.44 质量与内能的散点图(AMGA)

Fig. 4.44 The scatter diagram of mass and internal energy(AMGA)

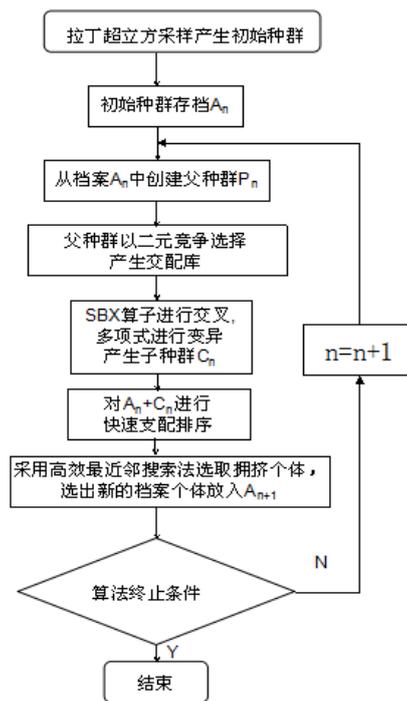


图 4.45 AMGA 算法流程图

Fig. 4.45 The flow chart of AMGA

由图 4.43 和图 4.44 可以看出，整个非劣解集分布范围大都处于边界位置，所有的散点的分布都比较集中，离散的违反约束的点较少，说明 AMGA 的探索性相比前两种方法都要好。Pareto 解在质量函数值接近 50kg 时开始出现，整个过程 Pareto 前沿的连续性与均匀性都非常好，在大约接近 95kg 时 Pareto 解消失。

由图 4.46 和图 4.47 所示的质量与内能的优化历程可以看出,基于 AMGA 算法的寻优在 400 多次的时候得到第一个 Pareto 解,比 NSGA-II 要早,比 NCGA 要晚一些,搜索效率较高。

综合而言,AMGA 对 Pareto 解的探索效率比 NCGA 略低,但 Pareto 解集的分布均匀性、Pareto 前沿的光滑性比前两种算法都要好,而且解的分布范围更广,能够生成多样性的解,探索性良好。

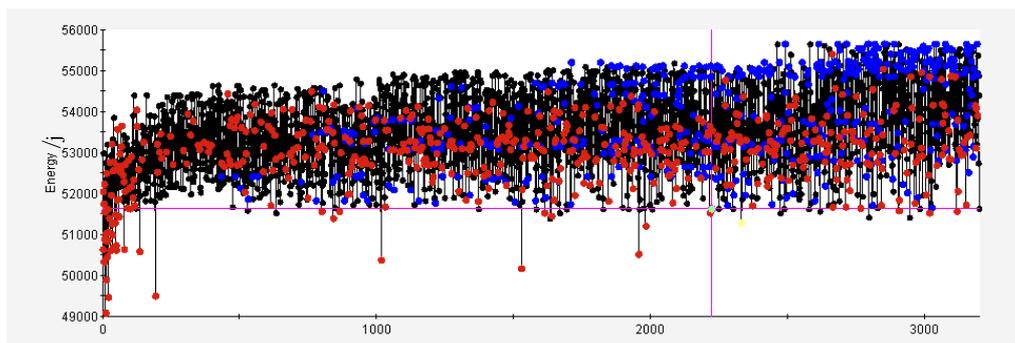


图 4.46 内能的确定性优化历程(AMGA)

Fig. 4.46 The deterministic optimization history of internal energy(AMGA)

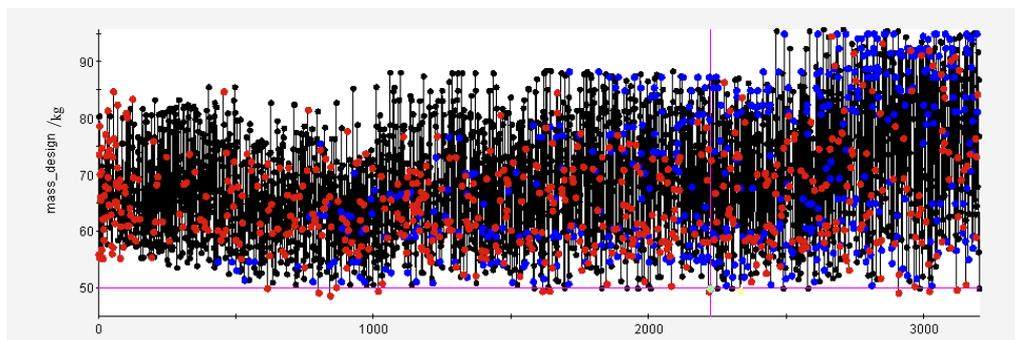


图 4.47 质量的确定性优化历程(AMGA)

Fig. 4.47 The deterministic optimization history of mass(AMGA)

4.6.4 基于三种优化算法的确定性优化结果的分析与总结

根据图 4.35、图 4.39 和图 4.43 质量与内能的 Pareto 非劣解集图可以看出:随着质量的增加内能吸收基本呈现上升的趋势,可见内能吸收最大与质量最轻两个目标函数之间存在相互制约的关系。工程师需要根据车型的实际定位标准来选择相应的一组最优解。本文结合企业要求,从降低 B 柱与车门关键测量点的侵入速度与侵入量,实现车身轻量化,同时考虑车门模态性能与车门刚度性能,分别从三组 Pareto 非劣解集中选择一组,作为本次确定性优化的结果。确定性优化前后的设计变量值如表 4.13 所示,侵入量与侵入速度值如表 4.14 所示,目标函

数质量与内能值如表 4.15 所示。

表 4.13 确定性优化前后设计变量值对比

Table. 4.13 Design variables values contrast before and after deterministic optimization

变量名称	变量代号	初始值/mm	NSGA-II 优化值/mm	NCGA 优化值/mm	AMGA 优化值/mm
B 柱内加强板	B1	1.2	0.8	1.0	1.2
B 柱外加强板	B2	1.4	1.6	1.6	1.6
前门内板(后)	D1	0.7	0.8	0.5	0.5
前门内板(前)	D2	1.2	1.2	0.8	0.8
前门外板	D3	0.8	0.6	0.6	0.6
中门外板	D4	0.8	0.6	0.6	0.6
中门内板	D5	0.7	0.6	0.6	0.6
前门防撞梁(上)	F1	0.8	0.7	0.6	0.8
前门防撞梁(下)	F2	1.6	1.2	1.5	1.2
中门防撞梁(下)	F5	1.6	1.2	1.2	1.2

表 4.14 确定性优化前后测量点的侵入量与侵入速度对比

Table. 4.14 Contrast of intrusion and intrusion velocity before and after deterministic optimization

测量 点编 号	测量点最大侵入量/mm					测量点最大侵入速度/m s ⁻¹				
	初始值	NSGA-II 优化值	NCGA 优化值	AMGA 优化值	目标要 求	初始值	NSGA-II 优化值	NCGA 优化值	AMGA 优化值	目标要 求
P ₁	138.387	134.796	138.777	141.884	≤150	8.153	8.254	8.263	8.274	≤8.5
P ₂	154.249	152.305	155.407	152.151	≤160	7.863	8.068	8.108	8.138	≤8.5
P ₃	176.901	177.519	174.577	169.860	≤180	7.715	8.136	8.086	8.059	≤9.5
P ₄	184.464	186.337	177.768	170.766	≤190	8.003	8.243	8.215	8.186	≤9.5
P ₅	193.171	178.242	176.493	171.524	≤190	9.762	9.276	9.348	9.344	≤10.5
P ₆	49.364	48.059	49.384	49.458	≤100	5.402	5.446	5.445	5.443	≤7.5
P ₇	180.978	189.892	187.003	188.990	≤190	8.851	8.970	9.080	8.955	≤9.5
P ₈	189.07	192.626	192.464	190.187	≤200	9.468	9.563	9.378	9.286	≤10.5
P ₉	182.05	207.696	193.861	193.619	≤210	10.246	10.168	10.088	9.923	≤10.5
P ₁₀	195.853	186.681	201.315	190.349	≤210	10.626	10.395	10.288	10.168	≤10.5
P ₁₁	186.794	179.256	188.037	173.951	≤190	10.044	9.500	9.613	9.490	≤10.5

表 4.15 确定性优化前后的质量与内能对比

Table. 4.15 Contrast of mass and internal energy before and after deterministic optimization

目标函数 名称	目标函数 代号	初始值	NSGA-II 优化值	NCGA 优化值	AMGA 优化值
质量	Mass_design	60.844	52.27kg	49.40kg	49.87kg
内能	E	51.757kJ	51.870kJ	51.494kJ	51.623kJ

通过表 4.14 与表 4.15 可知，通过确定性优化能够实现车身轻量化以及提高碰撞安全性的目标，B 柱与车门关键点处的侵入量与侵入速度有所降低，P₅ 测量点的侵入量与 P₁₀ 点的侵入速度都下降到了目标要求以下，但是这些确定性优化结果是否会受到不确定性因素的影响，还有待验证，若不经可靠性的验证直接指导生产，则可能存在很大的质量风险，因此在确定性优化的基础上进行稳健性优化设计很有必要。

本节利用三种优化算法进行了三组确定性优化设计,得到了三组确定性优化解,为下一节的蒙特卡洛抽样质量检查做好准备,为稳健性设计的进行提供了初始设计点,同时也为稳健性优化算法的选取提供了理论依据。

4.7 基于多目标稳健性优化的车身结构轻量化

基于以上确定性优化分析,本节首先对 4.6 节的三组确定性优化解进行可靠性分析,检查结果的 6Sigma 质量;然后根据质量检查结果,结合三种优化算法在针对轻量化与侧面碰撞安全性的多目标优化设计上的特点,选择一个合理的优化算法用于稳健性优化设计方案;最后进行基于稳健性多目标优化的车身结构轻量化设计。

4.7.1 6Sigma 稳健性设计概念的介绍

6Sigma 稳健性设计是指借助于概率分析的方法来控制随机变量对输出响应稳健性与可靠度的影响;可靠度是指产品在规定条件下,规定时间内,完成规定功能的能力^[120]。Sigma 是指衡量性能波动水平的统计量标准差 σ ; Sigma 水平是衡量产品质量优劣的综合指标^[125]。由图 4.48 与表 4.16 可知,可靠度可以由 Sigma 水平表示,如 $\pm 3\sigma$ 的 sigma 水平相当于 99.73%的可靠度。同时,也注意到 3σ 稳健性设计的百万不良率从短期来看为 2700,但是系统产生 1.5σ 漂移(如制造过程刀具磨损带来的),则百万不良率会大幅度上升为 66803。因此,从制造角度考虑, 3σ 质量水平越来越被认为是不可接受的水平,现在越来越倾向于接受 6σ 水平的质量设计。

表 4.16 Sigma 水平与百万不良品率的关系

Table. 4.16 The relation between Sigma level and PPM

Sigma 水平($\pm\sigma$)	可靠度	百万不良品率/PPM	
		短期	长期(1.5σ 漂移)
1	68.26	317400	697700
2	95.46	45400	308733
3	99.73	2700	66803
4	99.9937	63	6200
5	99.999943	0.57	233
6	99.9999998	0.002	3.4

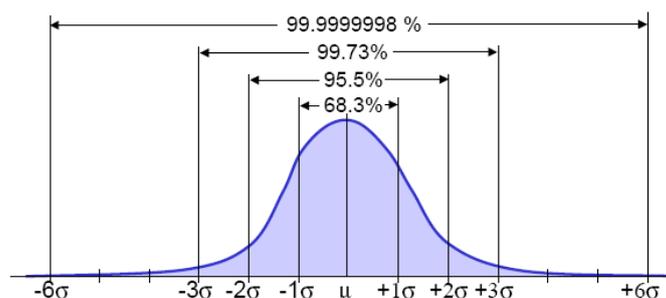


图 4.48 6 Sigma 正态分布

Fig. 4.48 6 Sigma normal distribution

4.7.2 基于蒙特卡洛抽样的可靠性分析与质量水平检查

可靠性分析的目的是评价确定性优化方案的 Sigma 水平，是稳健性优化的基础，其基本思想是对当前设计点进行随机扰动，在其平均值周围生成一组样本点，然后通过统计分析估计单一设计点上的输出响应指标的质量水平、可靠度、失效概率和百万不良品率等，同时统计各输出响应指标的均值和标准差。常用的可靠性分析方法有：基于可靠性评价、基于蒙特卡洛抽样和基于试验设计等。本文采用最精确的蒙特卡洛抽样法检验确定性优化方案的质量水平。蒙特卡洛抽样的方法又分为：描述性抽样与随机抽样两种，其中描述性抽样的抽样次数较少，但是精度低于简单随机抽样，由于本文的质量检查是建立在近似模型的基础上的，可靠性评价的效率很高，因此选择简单随机抽样方式更加准确。

利用 4.6 节得到的三组优化解选取确定性优化方案中的 10 个板料厚度设计变量作为不确定因素，其标准差统一定义为 0.01mm，在前面建立的确定性优化模型基础上，采用简单随机抽样方法采集样本点，抽样次数为 1000 次，获得确定性优化方案的质量水平和可靠度，如表 4.17 所示。

Sigma 默认的水平值介于 0~8 之间，Sigma 水平越高说明可靠性越好。由表 4.17 可知，确定性优化解的可靠度都不能满足 6σ 质量水平的要求，连 3σ 质量水平都不满足，存在很大的质量风险，由于加工制造的微小变动就很有可能导致，碰撞安全性、模态性能、刚度性能不满足要求，因此在确定性优化的基础上进行稳健性优化很有必要。另外通过对比三种确定性优化解的可靠度与 Sigma 水平可知，NSGA-II 算法优化得到的最优解的可靠度最低，多达 10 项约束响应不能满足 6σ 质量水平要求，存在很大的风险；NCGA 与 AMGA 的可靠性相对而言较高，NCGA 有 8 项不满足质量要求，AMGA 有 7 项。

表 4.17 可靠性分析结果汇总

Table. 4.17 The summary of reliability analysis

约束响应	NSGA-II 确定性优化解的可靠性分析		NCGA 确定性优化解的可靠性分析		AMGA 确定性优化解的可靠性分析		AMGA 稳健性优化解的可靠性分析	
	Sigma 水平	可靠度	Sigma 水平	Sigma 水平	Sigma 水平	可靠度	Sigma 水平	可靠度
Bd ₁	8	1	8	8	8	1	8	1
Bd ₂	2.968	0.997	8	8	8	1	8	1
Bd ₃	1.126	0.740	3.291	3.291	3.291	0.999	8	1
Bd ₄	1.881	0.940	8	8	8	1	8	1
Bd ₅	8	1	8	8	8	1	8	1
Bd ₆	8	1	8	8	8	1	8	1
Dd ₁	0.617	0.617	0.931	0.931	0.931	0.648	8	1
Dd ₂	2.308	2.307	3.291	3.291	3.291	0.999	8	1
Dd ₃	0.908	0.636	8	8	8	1	8	1
Dd ₄	8	1	8	8	8	1	8	1
Dd ₅	2.612	0.991	8	8	8	1	8	1
Bv ₁ -Dv ₅	8	1	8	8	8	1	8	1
Fstiffness ₁ -Fstiffness ₄	8	1	8	8	8	1	8	1
Fmode ₁	8	1	1.701	1.701	1.701	0.911	8	1
Fmode ₂ , Fmode ₃	8	1	8	8	8	1	8	1
Rmode ₁	3.090	0.998	2.968	2.968	2.968	0.997	8	1
Rmode ₂ , Rmode ₃	8	1	8	8	8	1	8	1
chuanguang_L	8	1	8	8	8	1	8	1
chuanguang_R	8	1	8	8	8	1	8	1
chuzhi_F, chuzhi_R	8	1	8	8	8	1	8	1
niuzhuan_up	1.793	0.927	1.717	1.717	1.717	0.914	8	1
niuzhuan_down	2.273	0.977	2.170	2.170	2.170	0.970	8	1

注：表中质量水平为 8σ ，代表可靠度为 100%。也就是说在设定的设计变量变动范围内，发

生分析结果超出约束边界的事件为小概率事件。

4.7.3 多目标稳健性优化方法的选取

选择一个适合于针对本文的 SUV 轻量化与碰撞安全性的多目标优化问题的优化算法，用于下一节的稳健性优化。

(1)经过对确定性优化解集及其优化历程的分析可知：NCGA 与 NSGA-II 算法相比，NCGA 算法的 Pareto 解集分布范围广，能够生成多样性的解，但 Pareto 前沿的光滑性与连续性较差。而 AMGA 算法兼具了两种算法的优点，Pareto 解集的分布均匀性、Pareto 前沿的光滑性比前两种算法都要好，而且解的分布范围更广，能够生成多样性的解，探索性良好。针对本文的轻量化与碰撞安全性优化问题上，AMGA 算法的优化效果要优于 NCGA 算法与 NSGA-II 算法。

(2)经过可靠性分析可知：以 AMGA 算法得到的最优解要比 NCGA、NSGA-

II 算法得到的最优解可靠性略好。

综合以上三种优化算法的 Pareto 解集与可靠度的对比可知：选择 AMGA 作为稳健性优化的优化算法理论上能够较快的得到可靠性较高的最优解。

4.7.4 基于多目标稳健性优化的车身结构轻量化设计

上文已经为稳健性优化选择好了优化算法，以及设计初始点。下面进行以质量 $Mass_design$ 均值最小，内能 E 的均值最大以及它们的标准差最小为目标，以碰撞安全性能、车门模态性能、车门刚度性能的可靠性达到 6σ 质量水平的要求为约束，以确定性优化的设计变量为随机变量(各随机变量服从正态分布，标准差为 0.01mm)，进行对本文的 SUV 车型进行稳健性多目标的优化。具体的稳健性优化数学模型如下：

$$\begin{aligned}
 \left. \begin{aligned}
 \text{Obj:} \quad & \text{Minimize } [Mass_design] \quad [Mass_design] \\
 & \text{Maximize } [E] \\
 \text{S.t.} \quad & \text{Side impact:} \\
 & \mu[Dd_j] + 6\sigma[Dd_j] \leq Dd_j^U; \quad \mu[Bd_k] + 6\sigma[Bd_k] \leq Bd_k^U, \\
 & \mu[Dv_j] + 6\sigma[Dv_j] \leq Dv_j^U; \quad \mu[Bv_k] + 6\sigma[Bv_k] \leq Bv_k^U, \\
 & j = 1, 2, \dots, 5; \quad k = 1, 2, \dots, 6. \\
 & \text{Mode:} \\
 & \mu[Mode_front_door_f] - 6\sigma[Mode_front_door_f] \geq Mode_front_door_f^L, \\
 & \mu[Mode_middle_door_f] - 6\sigma[Mode_middle_door_f] \geq Mode_middle_door_f^L, \\
 & f = 1, 2, 3. \\
 & \text{Stiffness:} \\
 & \mu[Stiffness_front_door_m] + 6\sigma[Stiffness_front_door_m] \leq Stiffness_front_door_m^U, \\
 & \mu[Stiffness_middle_door_n] + 6\sigma[Stiffness_middle_door_n] \leq Stiffness_middle_door_n^U, \\
 & m = 1, 2, 3, 4; \quad n = 1, 2, 3, \dots, 6. \\
 & x_i^L + \Delta x \leq x_i \leq x_i^U - \Delta x; \quad i = 1, 2, \dots, 10;
 \end{aligned}
 \right\}
 \end{aligned}$$

式中， Δx 表示随机变量 X 的变化区间， μ 表示均值， σ 表示标准差。

优化算法为 AMGA，优化的初始点为 AMGA 确定性优化的最优解，可靠性分析方法仍然为蒙特卡洛抽样。AMGA 优化算法的参数配置与确定性优化相同，经过 3200 次优化迭代，每次迭代需要 1000 次蒙特卡洛抽样进行质量检查，总的评价次数达到了 3200000 次。如此大的计算量通过近似模型进行优化，在 12 核

心，25G 内存的计算机上，只需要 24 小时左右就能完成计算，可见近似模型大大提升了优化效率。最终得到各目标函数的 Pareto 非劣解集，如图 4.49 所示。

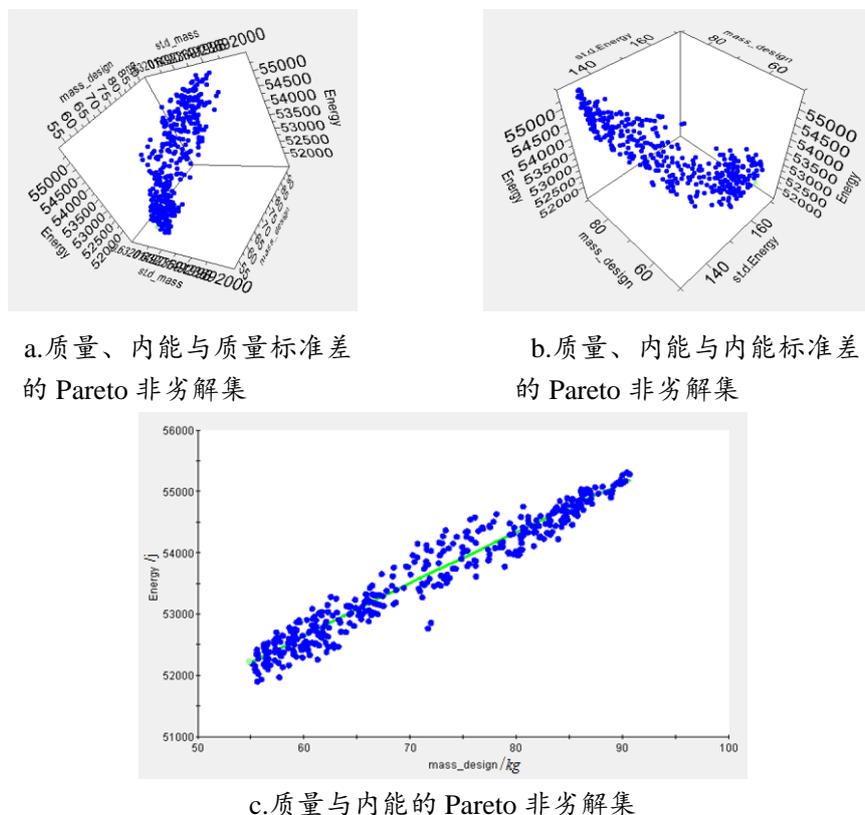


图 4.49 各目标函数的 Pareto 非劣解集

Fig. 4.49 The Pareto optimal set of all object functions

根据企业实际要求，从降低 B 柱与车门关键测量点的侵入速度与侵入量，实现车身轻量化，改善车门模态性能与车门刚度性能，提高各项性能的可靠度等诸多方面的要求角度出发，选取的优化后的设计变量值如表 4.18 所示，得到优化后的可靠性分析结果如表 4.17 所示。

表 4.18 稳健性优化后与最初的设计变量值对比

Table. 4.18 Design variables values after robust optimization contrast with initial ones

变量名称	变量代号	初始值/mm	稳健性优化值/mm
B 柱内加强板	B1	1.2	1.2
B 柱外加强板	B2	1.4	1.6
前门内板(后)	D1	0.7	0.5
前门内板(前)	D2	1.2	1.2
前门外板	D3	0.8	0.6
中门外板	D4	0.8	0.6
中门内板	D5	0.7	0.7
前门防撞梁(上)	F1	0.8	1.0
前门防撞梁(下)	F2	1.6	1.4
中门防撞梁(下)	F5	1.6	1.2

由表 4.17 可以看出经过优化稳健性明显提高，尤其是 P7 点的可靠度由原来

的 64.8% 提升到了 100%；各响应均达到了 6σ 质量要求以上，质量水平达到了 8σ ，也就是说在设定的设计变量变动范围内，可靠度能够达到 100%，发生分析结果超出约束边界的事件为小概率事件。

由表 4.18 可以看出，稳健性优化后提高了前门上前门防撞梁与 B 柱外加强板的厚度，保持 B 柱内加强板、中门内板和前部的前门内板厚度不变，降低了其他板料的厚度。

4.7.5 稳健性优化结果有限元分析与验证

为验证稳健性优化结果的有效性，需将选取的稳健性优化设计变量值代入到有限元模型进行求解计算。得到稳健性优化分析后多项性能的结果如表 4.19 所示。

一方面，比较优化后的近似模型值与优化后的有限元分析值之间的误差，检验用近似模型代替有限元模型进行优化是否具有实际的参考价值；表 4.19 的第 3 列是优化后的有限元分析值，第 4 列是优化后的近似模型值，第 5 列是两者之间的误差，从表中可以看出质量的误差为 0，原因是质量与设计变量存在严格的线性关系；侵入量和侵入速度误差稍大，说明侵入量和侵入速度与设计变量之间的非线性程度较高，最大误差为 4.048%，远小于 10%；因此近似模型值与有限元分析值相差不大，因此优化结果具有重要的参考价值。

另一方面将优化后有限元分析结果与最初的分析结果进行对比，比较优化前后各项性能的改进情况。稳健性优化前后的整车侧面碰撞变形的对比如图 4.50 所示。从变形来看，B 柱下部局部变形减小，前门外板发生整体变形，避免了局部变形过大，侵入量超出目标要求的情况。

由图 4.51 可以更加清晰的观察前门与 B 柱关键位置的侵入量变化情况：从整体来看，曲线整体的峰值明显降低；其中 P_{10} 点的侵入量在优化前有两个峰值，而且第二峰值很大，优化后只剩下第一个峰值，侵入量明显降低；由表 4.19 可以看出，除了 P_6 点以外，所有的侵入量均降低了，尤其是 P_5 、 P_8 点的侵入量明显降低，降幅超过了 5%，提高了乘员的安全性能。

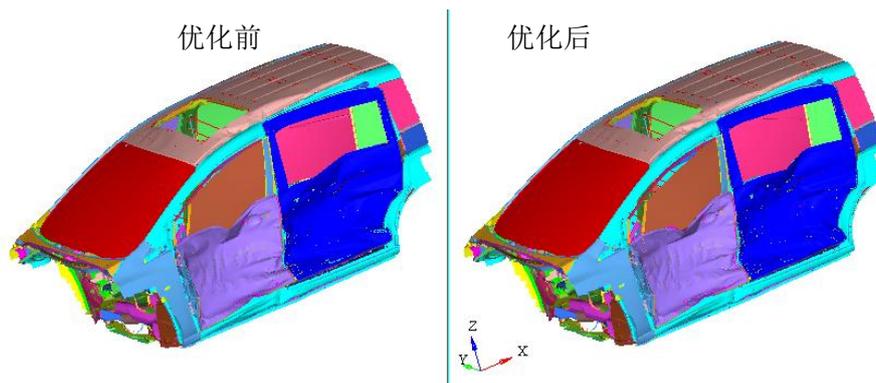


图 4.50 稳健性优化前后碰撞变形对比

Fig. 4.50 The impact deformation contrast before and after robust optimization

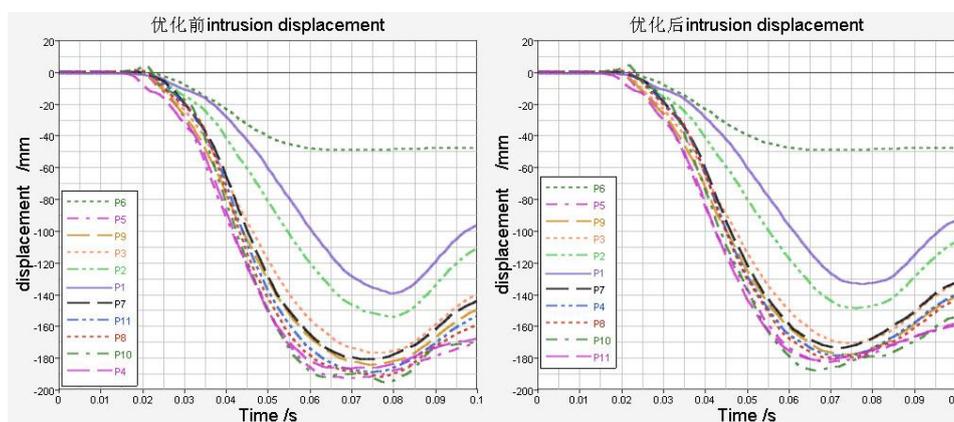


图 4.51 稳健性优化前后侵入量曲线对比

Fig. 4.51 The intrusion displacement curves contrast before and after roubst optimization

由图 4.52 稳健性优化前后侵入速度的对比图，可以清晰的看出整体的侵入速度峰值都降低到了 10m/s 以下，结合表 4.19 可以看出除了 P6 点，所有的侵入速度均降低了，最大降幅达到了 8.218%，明显提高了乘员的被动安全性。综合以上分析可知，提高 B 柱内加强板与前门上防撞梁的厚度对提高 B 柱与车门关键位置的侵入量起了重大作用。

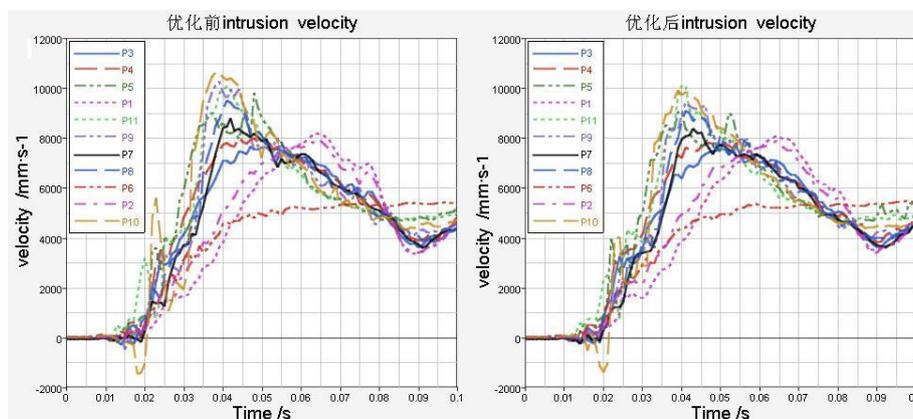


图 4.52 稳健性优化前后侵入速度对比

Fig. 4.52 The intrusion velocitycurves contrast before and after roubst optimization

表 4.19 稳健性优化前后的各项性能的对比

Table. 4.19 Various performance comparison before and after optimization

各项性能	优化前		稳健性优化后		目标要求	优化改进
	分析值	分析值	近似模型值	近似误差		
Mass_design	60.845 kg	53.992 kg	53.992 kg	0%	-	+11.263%
E	51.757 kJ	51.986 kJ	52.160 kJ	0.333%	-	+0.442%
Bd ₁ (P ₁)	138.387 mm	132.400 mm	134.609 mm	1.668%	≤150 mm	+4.326%
Bd ₂ (P ₂)	154.249 mm	148.863 mm	145.201 mm	2.460%	≤160 mm	+3.492%
Bd ₃ (P ₃)	176.901 mm	171.123 mm	165.816 mm	3.102%	≤180 mm	+3.266%
Bd ₄ (P ₄)	184.464 mm	177.958 mm	171.276 mm	3.755%	≤190 mm	+3.527%
Bd ₅ (P ₅)	193.171 mm	182.750 mm	177.054 mm	3.117%	≤190 mm	+5.395%
Dd ₆ (P ₆)	49.364 mm	49.391 mm	49.987 mm	1.207%	≤100 mm	-0.055%
Dd ₁ (P ₇)	180.978 mm	173.771 mm	180.004 mm	3.587%	≤190 mm	+3.982%
Dd ₂ (P ₈)	189.070 mm	178.738 mm	179.669 mm	0.521%	≤200 mm	+5.465%
Dd ₃ (P ₉)	182.050 mm	180.130 mm	184.553 mm	2.455%	≤210 mm	+1.055%
Dd ₄ (P ₁₀)	195.853 mm	188.076 mm	184.961 mm	1.656%	≤210 mm	+3.971%
Dd ₅ (P ₁₁)	186.794 mm	181.824 mm	179.342 mm	1.365%	≤190 mm	+2.661%
Bv ₁ (P ₁)	8.153 m/s	8.052 m/s	8.201 m/s	1.845%	≤ 8.5 mm	+1.239%
Bv ₂ (P ₂)	7.863 m/s	7.853 m/s	7.986 m/s	1.698%	≤ 8.5 mm	+0.127%
Bv ₃ (P ₃)	7.715 m/s	7.713 m/s	7.919 m/s	2.669%	≤ 9.5 mm	+0.026%
Bv ₄ (P ₄)	8.003 m/s	7.836 m/s	7.999 m/s	2.079%	≤ 9.5 mm	+2.087%
Bv ₅ (P ₅)	9.762 m/s	9.022 m/s	9.130 m/s	1.199%	≤10.5 mm	+7.580%
Bv ₆ (P ₆)	5.402 m/s	5.451 m/s	5.446 m/s	0.089%	≤ 7.5 mm	-0.907%
Dv ₁ (P ₇)	8.851 m/s	8.439 m/s	8.675 m/s	2.799%	≤ 9.5 mm	+4.655%
Dv ₂ (P ₈)	9.468 m/s	9.052 m/s	9.223 m/s	1.888%	≤10.5mm	+4.394%
Dv ₃ (P ₉)	10.246 m/s	9.404 m/s	9.785 m/s	4.048%	≤10.5 mm	+8.218%
Dv ₄ (P ₁₀)	10.626 m/s	9.892 m/s	9.870 m/s	0.220%	≤10.5 mm	+6.908%
Dv ₅ (P ₁₁)	10.044 m/s	9.498 m/s	9.292 m/s	2.170%	≤10.5 mm	+5.436%
Fmode ₁	32.67 Hz	31.28 Hz	31.53 Hz	0.770%	≥30 Hz	-4.255%
Fmode ₂	41.85 Hz	41.90 Hz	41.96 Hz	0.129%	≥35 Hz	+0.119%
Fmode ₃	66.02 Hz	64.28 Hz	64.63 Hz	0.541%	≥45 Hz	-2.636%
Rmode ₁	30.81 Hz	32.51 Hz	32.51 Hz	0.008%	≥30 Hz	+5.518%
Rmode ₂	37.54 Hz	39.11 Hz	39.09 Hz	0.061%	≥35 Hz	+4.182%
Rmode ₃	48.01 Hz	50.40 Hz	50.34 Hz	0.135%	≥45 Hz	+4.978%
Fstiffness ₁	4.320 mm	4.401 mm	4.391 mm	0.230%	≤8 mm	-1.875%
Fstiffness ₂	3.564 mm	3.8007 mm	3.747 mm	1.421%	≤7 mm	-6.641%
Fstiffness ₃	3.738 mm	4.105 mm	4.093 mm	0.293%	≤7 mm	-9.818%
Fstiffness ₄	1.835 mm	1.983 mm	1.974 mm	0.452%	≤5 mm	-8.065%
chuangkuang_L	7.158 mm	7.674 mm	7.605 mm	0.905%	≤10 mm	-7.209%
chuangkuang_R	5.448 mm	5.747 mm	5.721 mm	0.452%	≤8 mm	-5.488%
chuizhi_F	0.058 mm	0.0503 mm	0.0502 mm	0.230%	≤16 mm	+13.276%
chuizhi_R	0.189 mm	0.1983 mm	0.1976 mm	0.355%	≤6.5 mm	-4.921%
niuzhuan_up	12.736 mm	13.446 mm	13.385 mm	0.449%	≤1.5 mm	-5.575%
niuzhuan_down	4.944 mm	5.289 mm	5.251 mm	0.714%	≤3 mm	-6.978%

注：表中第 7 列表示优化改进的百分比，其中符号“+”与“-”不表示大小，负号“-”表示性能下降，正号“+”表示性能提高。

图 4.53 为稳健性优化前后内能曲线对比情况，由图可以看出，碰撞过程吸收的内能也有所提升。

综合以上分析，结合表 4.19 可以得出以下结论：

(1) 经过稳健性优化后，与确定性优化相比，各约束响应对设计变量的稳健性提高，尤其是 P7 点的可靠度由原来的 64.8% 提升到了 100%，质量水平满足了

6 σ 质量要求，可靠度达到了 100%。

(2) 近似模型值与有限元分析值相差不大，最大误差为 4.048%，远小于 10%，优化结果具有重要的参考价值。

(3) 优化后，车身结构设计变量总质量由原来的 60.845kg 下降到了 53.992kg，质量减轻了 6.853kg，降幅为 11.263%；实现了车身轻量化的目标，同时内能吸收增加了 0.229kJ，略有提升；B 柱与车门关键点的侵入量和侵入速度整体下降，侵入量最大降幅为 5.465%，侵入速度最大降幅达到了 8.218%，可见侧面碰撞安全性能得到改善；同时，中门一阶模态由以前的 30.81Hz 增加到 32.51 Hz，远离了 30Hz 的约束边界，改善了中门模态性能的稳健性；部分性能有所下降，如车门扭转刚度、垂直刚度等，但都远离约束边界；同时保证侧面碰撞安全性、车门模态性能、车门刚度性能等多项性能都满足设计要求。

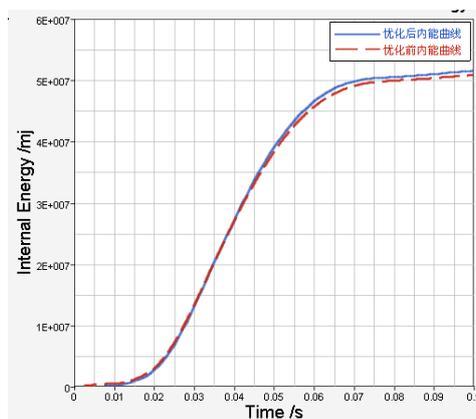


图 4.53 稳健性优化前后内能曲线对比

Fig. 4.53 The internal energy curves contrast before and after robust optimization

4.8 本章小结

本章首先对进行多目标稳健性优化的困难及解决方案进行了简单的叙述，提出了适合本文要求的多目标稳健性优化方案。该方案结合了试验设计、CAE 分析、响应面法、蒙特卡洛分析、6Sigma 稳健性设计等技术，在保证碰撞安全性、模态性能、刚度多方面要求的前提条件下，结合 6Sigma 稳健性设计方法与多目标遗传算法对设计质量及碰撞吸能性进行优化。主要的研究内容与成果如下：

(1) 为了缩短单次有限元仿真时间，在采集样本点之前，对整车模型进行了简化，并对简化模型的碰撞变形、B 柱变形、B 柱关键测量点的侵入速度与侵入量与整车模型进行详细的对比，保证了简化模型的有效性。

(2) 根据第三章侧面碰撞、车门模态、车门刚度有限元分析的特点，初步选择了 16 组设计变量，并采用参数实验设计的方式对这 16 组变量进行灵敏度分析，根据灵敏度分析结果筛选出对各项性能影响都较大的 10 组变量作为采样的最终输入变量；然后利用最优拉丁超立方试验设计方法分别对设计变量总质量 Mass_design、最大吸收内能 E、前门与中门模态频率、前门与中门刚度、B 柱与前门的 11 个测量点的侵入量和侵入速度等 40 个输出响应进行了抽样。

(3) 利用抽取的样本值，结合各响应的特点，分别建立了设计变量总质量的一阶响应面近似模型，刚度、模态及内能响应的二阶响应面近似模型，B 柱与车门测量点的侵入量响应的四阶响应面近似模型，侵入速度响应的 Kriging 近似模型，并通过适应度图及决定系数 R^2 、最大绝对值误差 MAE、均方根误差 RMSE 以及平均绝对值误差 AMAE 值检验了各近似模型的精度，结果表明近似模型具有较高的精度，可以代替有限元模型用于后续的优化中。

(4) 根据多目标优化算法的特点，利用前面建立的近似模型，分别采用 NSGA-II、NCGA 和 AMGA 三种多目标遗传算法，对整车进行了多目标的确定性优化，得到了三组 Pareto 非劣解集，根据企业要求选取了三组最优。通过对比三种优化算法得到的 Pareto 解集、散点图与迭代历程图发现，AMGA 算法得到的 Pareto 解集的分布均匀性、Pareto 前沿的光滑性与连续性优于其他两种算法。

(5) 然后利用蒙特卡洛模拟的方式对确定性优化的三组最优解的可靠性进行了详细的分析与对比。对比发现，三种算法得到的结果的可靠度均不能达到 3σ 质量水平的要求，存在很大的质量风险，由于加工制造的微小变动就很有可能导致碰撞安全性、模态性能、刚度性能超出目标要求，因此在确定性优化的基础上进行稳健性优化很有必要。对三种优化算法得到的结果进行对比分析发现，AMGA 算法结果的稳健性比其他两种算法的要高，而且能够得到分布均匀的 Pareto 非劣解集，光滑性与连续性较高的 Pareto 前沿，因此选择了 AMGA 算法作为稳健性优化的优化算法。

(6) 最后以 AMGA 优化后的设计变量值作为优化的初始值，结合近似模型、蒙特卡洛抽样可靠性分析与 AMGA 多目标遗传算法对整车进行了多目标的稳健性优化分析。得到了与侧面碰撞安全性能、车门模态性能、车门刚度性能等的可

靠度分析结果，与确定性优化的可靠度进行了对比，可靠度由原来的 64.8% 提升到了 100%，满足了 6σ 质量要求；同时得到了质量与内能以及它们的标准差间的 Pareto 非劣解集，根据企业实际要求，选取了一组作为最终的优化结果；将稳健性优化后的设计变量代入到有限元模型中进行仿真分析，将仿真结果与近似值进行了对比，验证了利用近似模型进行优化分析的可靠性；同时对优化后的有限元分析结果与最初的进行了对比，发现车身结构设计变量总质量由原来的 60.845kg 下降到了 53.992kg，质量减轻了 6.853kg，降幅为 11.263%；实现了车身轻量化的目标，同时内能吸收增加了 0.229kJ，略有提升；B 柱与车门关键点的侵入量和侵入速度整体下降，侵入量最大降幅为 5.465%，侵入速度最大降幅达到了 8.218%，侧面碰撞安全性能得到大幅度的改善；同时，中门一阶模态由以前的 30.81Hz 增加到 32.51 Hz，远离了 30Hz 的约束边界，改善了中门模态性能的稳健性；同时保证侧面碰撞安全性、车门模态性能、车门刚度性能等都满足设计要求，从而证实了多目标稳健性优化的车身结构轻量化方法可行，对汽车设计具有重大的指导意义。

第5章总结与展望

5.1 全文总结

针对汽车的节能环保的主要措施之一就是汽车的轻量化,而汽车侧面碰撞研究又是保证安全的重大研究课题之一。由于加工精度、随机误差的影响,确定性优化会有很大的潜在的性能损失与波动,因此进行稳健性优化分析很有必要。因此,如何在提高汽车安全性能,保证模态性能与刚度性能的同时,提高稳健性,实现汽车的轻量化设计已成为目前汽车行业中的研究热点。本文结合汽车碰撞安全性、模态性能、刚度性能三个学科对汽车结构轻量化开展研究。以企业的 SUV 车型为研究对象,建立了车门刚度、车门模态、整车侧面碰撞分析的有限元的模型,并对各项性能进行了有限元分析,初步确定了初始设计;针对侧面碰撞部分测量点侵入量、侵入速度过大的问题,结合车身结构轻量化的需要,提出了基于多目标稳健性优化的车身结构轻量化设计方案,具体的研究成果如下:

(1) 针对汽车侧面碰撞 CAE 分析前处理过程的重复性工作多,且工作繁琐,需要设置的参数过多的特点,结合 TCL/TK 语言、Process Manager 工具开发了侧面碰撞分析流程自动化系统,大幅度提高了侧面碰撞有限元建模的效率。

(2) 进行了侧面碰撞安全性有限元分析:结合流程自动化系统与 Hypermesh 的通用前处理功能,建立了整车侧面碰撞有限元模型;根据分析运算结果,从系统总能量、整车变形、车门与 B 柱测量点处的侵入量和侵入速度四个方面对侧面碰撞分析结果进行了评价。系统总能量守恒,证实了仿真分析结果的可靠性;B 柱、前门上防撞梁、中门附近发生了严重的变形, B 柱上的测量点 P5 处的侵入量超出了目标要求,前门上的测量点 P10 侵入速度超出了目标要求。

进行了车门模态有限元分析:利用 Hypermesh 建立了车门的有限元模型,通过车门的自由模态分析发现,前门与中门前三阶模态满足设计要求。

进行了车门刚度有限元分析:通过前门与中门刚度分析发现,前门与中门刚度均满足了设计要求,且存在较大的轻量化设计空间。

(3) 根据有限元分析结果,初步选择了 16 组设计变量,并采用参数实验设计的方式对这 16 组变量进行灵敏度分析,根据灵敏度分析结果筛选出对各项性

能影响都较大的 10 组变量作为采样的最终输入变量；然后利用最优拉丁超立方试验设计方法分别对设计变量总质量 $Mass_design$ 、最大吸收内能 E 、前门与中门模态频率、前门与中门刚度、 B 柱与前门的 11 个测量点的侵入量和侵入速度等 40 个输出响应进行了抽样。

(4) 利用抽取的样本值，结合各响应的特点，分别建立了设计变量总质量的一阶响应面近似模型，刚度、模态及内能响应的二阶响应面近似模型， B 柱与车门测量点的侵入量响应的四阶响应面近似模型，侵入速度响应的 $Kriging$ 近似模型，并检验了各近似模型的精度，结果表明近似模型具有较高的精度，可以代替有限元模型用于后续的优化。

(5) 利用建立的近似模型，分别采用 $NSGA-II$ 、 $NCGA$ 和 $AMGA$ 三种多目标遗传算法，对整车进行了多目标的确定性优化，得到了三组 $Pareto$ 非劣解集，根据企业要求选取三组最优解。利用蒙特卡洛模拟的方式对确定性优化的三组最优解的可靠性进行了分析；三种算法得到的优化结果的可靠度均不能达到 3σ 质量水平的要求，存在很大的质量风险，加工制造的微小变动就很有可能导致碰撞安全性、模态性能、刚度性能不满足要求，经过对比选择了 $AMGA$ 作为稳健性优化的优化算法。

(6) 以 $AMGA$ 优化后的设计变量值作为优化的初始值，结合近似模型、蒙特卡洛抽样可靠性分析与 $AMGA$ 多目标遗传算法对整车进行了多目标的稳健性优化分析。得到了侧面碰撞安全性能、车门模态性能、车门刚度性能的稳健性优化后的可靠度分析结果，与确定性优化的可靠度进行了对比，可靠度由原来的 64.8% 提升到了 100%，满足了 6σ 质量要求；同时得到了质量与内能以及它们的标准差间的 $Pareto$ 非劣解集，根据企业实际要求，选取了一组作为最终的优化结果；将稳健性优化后的设计变量代入到有限元模型中进行仿真分析，将仿真结果与近似值进行了对比，验证了利用近似模型进行优化分析的可靠性；同时对优化后的有限元分析结果与最初的进行了对比，发现车身结构设计变量总质量由原来的 60.845kg 下降到了 53.992kg，质量减轻了 6.853kg，降幅为 11.263%；实现了车身轻量化的目标，同时内能吸收增加了 0.229kJ，略有提升； B 柱与车门关键点的侵入量和侵入速度整体下降，侵入量最大降幅为 5.465%，侵入速度最大降幅达到了 8.218%，侧面碰撞安全性能得到大幅度的改善；同时，中门一阶模态

由以前的 30.81Hz 增加到 32.51 Hz ，远离了 30Hz 的约束边界，改善了中门模态性能的稳健性；同时保证侧面碰撞安全性、车门模态性能、车门刚度性能都满足设计要求，从而证实了多目标稳健性优化的车身结构轻量化方法可行，对汽车设计具有重大的指导意义。

5.2 前景与展望

本文针对 SUV 车型的多目标稳健性优化的车身结构轻量化研究中虽然取得了一定的成果，但由于研究时间与条件限制，需进一步完善。未来可以进一步开展的研究工作有：

(1) 将约束系统置身于整车侧面碰撞安全中进行研究，这样可以直接通过假人各个部位的伤害值来评价优化结果的优劣，从而更方便、更快捷地进行多目标稳健性优化。

(2) 在多目标稳健性车身结构轻量化中，可以同时考虑侧面碰撞、正面碰撞多方面的安全性能，以及白车身刚度、整车模态性能等多项性能，使得多目标优化更加全面。

(3) 本文没能实现车身形状与结构的参数化，在优化过程中仅考虑了板料的厚度作为设计变量，在以后的分析中可以借助于 SFE-CONCEPT 商业软件实现车身结构的隐式参数化，这样就能够把实现形状变量、结构尺寸变量与厚度变量同时考虑进来。

(4) 在稳健性方面，只考虑了厚度加工精度的不确定因素，以后的分析中还可以把试验条件，材料等因素的不确定性因素考虑进来。

(5) 因为汽车开发周期长、汽车碰撞实验需要的资金及实验周期较长与硕士论文周期时间短的矛盾，导致本文未能及时进行实验验证，希望在后续的研究工作中能继续实验方面的研究。

参考文献

- [1] 张勇. 基于近似模型的汽车轻量化优化设计方法[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [2] 史吏. 汽车碰撞理论阐述及碰撞事故再现[J]. 中国机械, 2014, 1(3): 120-121.
- [3] 曾繁林. 中低档轿车正面碰撞结构安全性仿真研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [4] 卢放. 基于多学科优化设计方法的白车身轻量化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [5] 公安部交通管理局. 交通安全面临挑战 汽车文明亟待加强[EB/OL]. 中国: 公安部网站. 2014-11-27(2015-4-15) [2015-3-23].
<http://www.mps.gov.cn/n16/n983040/n2580624/n2580639/4287647.html>.
- [6] Dupont. Sae Survey White Paper 2008 -environment Leads Sae Survey Result[R]. 2008.
- [7] 黄宜松,陈吉清,龙江启. 车身轻量化材料的应用进展[J]. 中国制造业信息化: 学术版, 2009, 38(11): 74-78.
- [8] 唐靖林,曾大本. 面向汽车轻量化材料加工技术的现状及发展[J]. 金属加工: 热加工, 2009, (11): 11-16.
- [9] 田浩彬,林建平,刘瑞同,等. 汽车车身轻量化及其相关成形技术综述[J]. 汽车工程, 2005, 27(3): 381-384.
- [10] 季枫. 白车身参数化建模与多目标轻量化优化设计方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [11] 王铨登. 基于综合的交通冲突技术的城市道路交叉口安全评价方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [12] 沈宇明. 侧面碰撞事故中的乘员伤害分析[J]. 中国公共安全: 智能交通, 2007, (5): 98-102.
- [13] 周斯加,符兴锋,刘海洋,等. HEV 侧面碰撞安全性仿真和试验[J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2014, 6(6): 25.
- [14] 孙晶. 汽车侧面碰撞中集成式气囊系统的优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [15] 范子杰,桂良进,苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5(1): 1-16.
- [16] Body USA. Ulsab Final Report[R]. Bietigheim-bissingen: Porsche Engineering Services, 1998.
- [17] Schretzenmayr H. Technical Report: the Aluminium Body of the Audi A8[J]. International Journal of Vehicle Design, 1999, 21(2): 303-312.
- [18] Koganti R,Weishaar J. Aluminum Vehicle Body Construction and Enabling Manufacturing Technologies[R]. Sae Technical Paper, 2008.
- [19] 陈军. 镁合金在汽车工业中的应用分析[J]. 材料研究与应用, 2010, 4(2): 81-84.
- [20] 龙思远,徐绍勇,曹韩学,等. 长安汽车轻量化与镁合金应用[J]. 现代零部件, 2010, (11): 32-36.
- [21] 高新华,王昱昕,李中兵,等. 汽车轻量化技术在奇瑞轿车上的集成应用[J]. 汽车工艺与材料, 2011, (1): 11-17, 23.
- [22] 施志刚,王宏雁. 变截面薄板技术在车身轻量化上的应用[J]. 上海汽车, 2008, (8): 36-39, 45.
- [23] 李淑慧,蒋浩民. 拼焊板在车身覆盖件冲压成形中的研究进展[J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 1-7.
- [24] Alaswad A,Benyounis K,Olabi A. Employment of Finite Element Analysis and Response Surface Methodology to Investigate the Geometrical Factors in T-type Bi-layered Tube

- Hydroforming[J]. *Advances in Engineering Software*, 2011, 42(11): 917-926.
- [25] 杜继涛,齐从谦. 变截面薄板在车身制造中的应用研究[J]. *锻压技术*, 2008, (z1): 39-43.
- [26] Schubert E,Klassen M,Zerner I, et al. Light-weight Structures Produced By Laser Beam Joining for Future Applications in Automobile and Aerospace Industry[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 115(1): 2-8.
- [27] Zhang S,Wang Z,Xu Y, et al. Recent Developments in Sheet Hydroforming Technology[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 151(1): 237-241.
- [28] Wu Q,Gong J,Chen G, et al. Research on Laser Welding of Vehicle Body[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(2): 420-426.
- [29] Mathieu A,Shabadi R,Deschamps A, et al. Dissimilar Material Joining Using Laser (aluminum to Steel Using Zinc-based Filler Wire)[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(3): 652-661.
- [30] Shin J,Lee K,Song S, et al. Automotive Door Design with the Ulsab Concept. Using Structural Optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2002, 23(4): 320-327.
- [31] 张代胜,张林涛,谭继锦,等. 基于刚度灵敏度分析的客车车身轻量化研究[J]. *汽车工程*, 2008, 30(8): 718-720.
- [32] 叶辉,胡平,申国哲,等. 基于灵敏度和碰撞仿真的汽车车身轻量化优化设计[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(10): 18-22.
- [33] Marklund P,Nilsson L. Optimization of a Car Body Component Subjected to Side Impact[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2001, 21(5): 383-392.
- [34] 郝琪,杨林松,曹立波. 基于响应面法的车身刚度特性的优化设计[J]. *机械科学与技术*, 2010, 29(11): 1569-1573.
- [35] 冀杰. 新能源汽车轻量化技术途径探讨[C]//2012 重庆汽车工程学会年会论文集, 重庆: 重庆汽车工程学会, 2012: 168-173.
- [36] Schmit LA,Farshi B. Some Approximation Concepts for Structural Synthesis[J]. *Aiaa Journal*, 1974, 12(5): 692-699.
- [37] Rj Y,Lei G,Cheng-ho T, et al. Multidisciplinary Design Optimization of a Full Vehicle with High Performance Computing[J]. *Aiaa Paper*, 2001, 1273(727): 2001.
- [38] Lam K,Behdinin K,Cleghom W. A Material and Gauge Thickness Sensitivity Analysis on the Nvh and Crashworthiness of Automotive Instrument Panel Support[J]. *Thin-walled Structures*, 2003, 41(11): 1005-1018.
- [39] 朱平,张宇,葛龙,等. 基于正面耐撞性仿真的轿车车身材料轻量化研究[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(9): 207-211.
- [40] Rais-rohani M,Solanki K,Eamon C. Reliability-based Optimization of Lightweight Automotive Structures for Crashworthiness[C]//Proceedings of the 11th Aiaa/issmo Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Portsmouth, Va, 2006: 1093-1108.
- [41] 崔新涛. 多材料结构汽车车身轻量化设计方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [42] Duddeck F. Multidisciplinary Optimization of Car Bodies[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2008, 35(4): 375-389.
- [43] 张勇,李光耀,王建华. 多目标遗传算法在整车轻量化优化设计中的应用研究[J]. *中国机械工程*, 2009, 10(4): 500-503.
- [44] 胡朝辉. 面向汽车轻量化设计的关键技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [45] 谭耀武. 轿车侧面碰撞中 B 柱的耐撞性优化设计研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [46] 颜廷雷. 白车身结构分析及多目标优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.

- [47] 任鹏飞. 基于多目标优化的汽车保险杠轻量化设计[D]. 长春: 长春工业大学, 2014.
- [48] Obradovic J, Boria S, Belingardi G. Lightweight Design and Crash Analysis of Composite Frontal Impact Energy Absorbing Structures[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(2): 423-430.
- [49] Luque P, Mántaras DA, Pello A. Racing Car Chassis Optimization Using the Finite Element Method, Multi-body Dynamic Simulation and Data Acquisition[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 2013, 227(1): 3-11.
- [50] 周会锋, 王光耀, 李碧浩, 等. 多目标优化设计方法在车身轻量化设计中的应用[J]. *机械设计与研究*, 2014, 4(4): 48.
- [51] 王登峰, 卢放. 基于多学科优化设计方法的白车身轻量化[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2015, 1(1): 5.
- [52] No VOL32. 多目标稳健优化设计方法在车身设计制造中的应用研究[J]. *固体力学学报*, 2011, 32(2): 186-196.
- [53] Youn BD, Choi K, Yang R, et al. Reliability-based Design Optimization for Crashworthiness of Vehicle Side Impact[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2004, 26(3): 272-283.
- [54] Hilmann J, Paas M, Haenschke A, et al. Automatic Concept Model Generation for Optimisation and Robust Design of Passenger Cars[J]. *Advances in Engineering Software*, 2007, 38(11): 795-801.
- [55] 黄石华, 成艾国, 胡朝辉, 等. 基于 6σ 稳健性的拼焊板车门轻量化研究[J]. *汽车工程*, 2011, 33(3): 262-266.
- [56] 高伟钊, 莫旭辉, 付锐, 等. 基于 Kriging 的泡沫填充锥形薄壁结构耐撞性 6σ 稳健性优化设计 [J]. *固体力学学报*, 2012, 33(4): 370-378.
- [57] Aspenberg D, Jergeus J, Nilsson L. Robust Optimization of Front Members in a Full Frontal Car Impact[J]. *Engineering Optimization*, 2013, 45(3): 245-264.
- [58] 张继游. 稳健性和轻量化在整车侧面碰撞性能优化中的应用[J]. *汽车安全与节能学报*, 2013, 4(4): 339-347.
- [59] 郑国君, 门永新, 胡平, 等. 基于知识的 CAE 后处理流程化平台关键技术[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(17): 112-118.
- [60] Brent B. Welch. TCL/TK 组合教程—双语教材+ 多媒体教室[M]. 王道义, 乔陶鹏. 北京: 电子工业出版社, 2001: 1-3.
- [61] Welch BB. *Practical Programming in Tcl and Tk*[M]. Prentice Hall Ptr, 1995: 8-14.
- [62] Toby BH. Expgui, a Graphical User Interface for Gsas[J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2001, 34(2): 210-213.
- [63] 杨济匡, 叶映台, 彭倩, 等. 实体单元焊点模型在前纵梁碰撞仿真中的应用[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2011, 41(6): 542-548.
- [64] 蒋小晴, 杨济匡, 肖志, 等. 前纵梁碰撞模拟中的焊点建模方法比较[J]. *汽车安全与节能学报*, 2010, 1(4): 327-331.
- [65] 王泽鹏, 胡仁喜, 康士廷. ANSYS 13.0/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 106-111.
- [66] 雷雨成, 严斌, 程昆. 车辆典型薄壁梁碰撞仿真中接触摩擦问题的研究[J]. *机械设计与制造*, 2004, (3): 109-111.
- [67] 高晖, 李光耀. 汽车碰撞仿真中沙漏控制算法研究[J]. *汽车工程*, 2008, 30(8): 671-675.
- [68] Gu L, Yang R, Tho C, et al. Optimisation and Robustness for Crashworthiness of Side Impact[J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2001, 26(4): 348-360.

- [69] McKay MD, Beckman RJ, Conover WJ. Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output From a Computer Code[J]. *Technometrics*, 1979, 21(2): 239-245.
- [70] 陈晓东, 尹同耀, 朱西产, 等. 汽车侧面碰撞计算机仿真方法[J]. *汽车工程*, 2004, 26(1): 65-69.
- [71] 商恩义, 高劲松, 师玉涛. 侧面碰撞试验中前排假人背板力的应用研究[J]. *汽车技术*, 2014, (2): 8-12.
- [72] 钟阳. SUV 侧面碰撞仿真分析及 B 柱优化设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [73] Bae J, Yim J. Cae Modeling for Correlating the High Speed Front Crash Test[C]//Fall Conference Proceedings, 2007: 1372-1377.
- [74] 郝琪. 基于计算机模拟的车门下沉刚度改进设计及模态分析[J]. *湖北汽车工业学院学报*, 2006, 20(2): 7-10.
- [75] 吴杰. 基于 6σ 的动力总成悬置系统鲁棒优化设计[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(8): 64-67.
- [76] 雷飞, 陈新, 陈国栋, 等. 考虑顶压与侧碰安全性的轿车车身 B 柱结构优化设计[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(11): 1510-1516.
- [77] 郭峰. 6σ 设计在汽车设计中的应用[J]. *汽车工程*, 2006, 28(10): 891-896.
- [78] 钱立军, 丁玲, 祝安定. 基于 iSIGHT 的薄壁直梁件抗撞性多目标优化[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2014, 37(2): 145-149.
- [79] 王丰超. 基于 6σ 的民机制造工艺稳健优化设计研究[J]. *工业工程与管理*, 2014, 19(3): 127-134.
- [80] 张伟. 基于 6σ 鲁棒性分析的薄壁结构弯曲吸能特性优化设计[J]. *湖北汽车工业学院学报*, 2014, 28(1): 25-29.
- [81] 程妍雪, 庞永杰, 杨卓懿, 等. 基于径向基神经网络模型的耐压壳 6σ 设计[J]. *上海交通大学学报*, 2014, 48(4): 493-497.
- [82] 周峰. 6σ 稳健设计在单目标优化问题中的仿真应用[J]. *太原科技大学学报*, 2011, 32(4): 300-304.
- [83] 祖津玮. 基于设计 6σ 的拖拉机排气系统泄漏失效改进方法及应用[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [84] 刘小锐. 基于六西格玛方法的思迪车后挡风玻璃下滑改进研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- [85] 谢晖, 刘行, 洪健程. 基于 Taguchi 方法的车门结构稳健性优化[J]. *中国机械工程*, 2013, 1(12): 1676-1681.
- [86] 张蕾, 董恩国, 申焱华. 基于蒙特卡罗法的气门弹簧稳健设计研究[J]. *机械科学与技术*, 2008, 27(8): 1066-1069.
- [87] 张佳洪, 李光耀, 高晖, 等. 鲁棒性概率优化在乘员约束系统设计中的应用[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(5): 505-509.
- [88] 聂祚兴. 基于 6σ 的车身噪声传递函数稳健优化设计[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(14): 155-159.
- [89] 姜欣. 汽车设计中的多目标优化过程研究[C]//第七届中国 CAE 工程分析技术年会暨 2011 全国计算机辅助工程 (CAE) 技术与应用高级研讨会论文集, 昆明: 6, 2011: 48-53.
- [90] 陈斌. 基于减速度评价及部件影响系数的汽车正碰耐撞性优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [91] 王艳辉, 伍建国, 朱壮瑞, 等. 子模型法在车身静态分析中的应用[J]. *沙洲职业工学院学报*, 2002, 5(1): 11-14.

- [92] 邹文胜,左正兴,冯慧华,等. 子模型法在发动机强度分析中的应用研究[J]. 北京理工大学学报:英文版, 2001, 10(3): 260-265.
- [93] 冯伟林,倪富健,邓强民. 子模型法在大跨钢桥面铺装有限元模型优化中的应用[J]. 公路交通科技 ISTIC PKU, 2008, 25(7): 90-94.
- [94] 吴浩珪,王继承,许季. 子模型法在客车车身结构改进中的应用[J]. 华南理工大学学报(自然科学版) ISTIC EI PKU, 2003, 31(2): 52-55.
- [95] 刘德岐. 商用车驾驶室抗撞性简化模型建立及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [96] 漆维. 基于简化模型的车身侧面耐撞性分析与优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [97] Bosma F, Van oorschot E, Unger M, et al. Side Impact Systems Integration Using Basis Sled Testing and Madymo Psm Simulation[C]//Infats Proceedings of the 4th International Forum of Automotive Traffic Safety, 2005: 212-217.
- [98] 胡侃. 车身碰撞安全的若干关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [99] 钟阳. SUV 侧面碰撞仿真分析及 B 柱优化设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [100] 王永菲,王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民族大学学报: 自然科学版, 2005, 14(3): 236-240.
- [101] 张如刚. 基于稳健性方法的汽车覆盖件冲压成形优化设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [102] 潘锋. 组合近似模型方法研究及其在轿车车身轻量化设计的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [103] McCulloch WS, Pitts W. A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity[J]. The Bulletin of Mathematical Biophysics, 1943, 5(4): 115-133.
- [104] Hopfield JJ. Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1982, 79(8): 2554-2558.
- [105] 赖宇阳,姜欣,方立桥. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 156-157.
- [106] Narula SC. Orthogonal Polynomial Regression[J]. International Statistical Review/revue Internationale De Statistique, 1979, 47(1): 31-36.
- [107] Dette H, Melas V. Optimal Designs for Estimating Individual Coefficients in Fourier Regression Models[J]. Annals of Statistics, 2003, 31(5): 1669-1692.
- [108] Simpson TW, Mauery TM, Korte JJ, et al. Comparison of Response Surface and Kriging Models for Multidisciplinary Design Optimization[C]//In Aiaa Paper 98-4758. 7 Th Aiaa/usaf/nasa/issmo Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, 1998: 1-11.
- [109] Sacks J, Welch WJ, Mitchell TJ, et al. Design and Analysis of Computer Experiments[J]. Statistical Science, 1989, 4(4): 409-423.
- [110] Koehler J, Owen A. Computer Experiments[J]. Handbook of Statistics, 1996, 13(13): 261-308.
- [111] 王小平,曹立明. 遗传算法: 理论, 应用及软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 115-119.
- [112] Deb K, Agrawal S, Pratap A, et al. A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: Nsga-ii[C]//Lecture Notes in Computer Science, Springer, 2000: 849-858.
- [113] Watanabe S, Hiroyasu T, Miki M. Ncga: Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization Problems.[C]//Gecco Late Breaking Papers, 2002: 458-465.
- [114] 廖兴涛. 基于代理模型的汽车碰撞安全性仿真优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.

- [115] 饶阳,刘平,母洋文,等. 基于 NSGA-II 和 Cruise 的混合动力汽车参数优化[J]. 汽车科技, 2013, (3): 19-23.
- [116] 奉铜明,钟志华,闫晓磊,等. 基于 NSGA-II 算法的多连杆悬架多目标优化[J]. 汽车工程, 2010,(12): 1063-1066.
- [117] 魏璐璐,左正兴,向建华. 基于 ISIGHT 的曲柄连杆机构多学科优化[J]. 机电工程, 2011, 28(12): 1436-1439.
- [118] 郭晓光,宋雪丽,崔亚辉. 基于 Isight 的电动汽车动力性燃油经济性优化[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(A02): 211-214.
- [119] Tiwari S,Koch P,Fadel G, et al. Amga: an Archive-based Micro Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization[C]//Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference (gecco-2008), Atlanta, Usa, 2008: 729-736.
- [120] 卢云. 结构稳健综合优化设计方法研究及其在交通路锥收放车中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [121] 刘元宁,王刚,朱晓冬,等. 基于自适应多种群遗传算法的特征选择[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(6): 690-693.
- [122] 赵韩,吴振华,张冰战. 基于有限元法的梯度材料零件多目标优化设计[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(1): 169-172.
- [123] Tiwari S,Fadel G,Koch P, et al. Performance Assessment of the Hybrid Archive-based Micro Genetic Algorithm (amga) on the Cec09 Test Problems[C]//Evolutionary Computation, 2009. Cec'09. Ieee Congress on, Ieee, 2009: 1935-1942.
- [124] 玄光男,程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社有限公司, 2004: 1-4.
- [125] 徐大升. σ 在汽车部件质量改进中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.

致谢

三年的研究生生涯即将结束，时光匆匆而逝，不禁令我想起了刚刚踏入校园的那一刻，非常感谢我的老师、我的同学以及随我一起走过这段光阴的所有的人。

首先，请允许我对我的导师王霄教授，刘会霞教授，说一声谢谢，感谢你们三年来给我的帮助，对我的关怀。在我与本科大学校园轻轻道别的时候，感谢你们与我相约江苏大学，让我接触了汽车结构有限元分析，在研一研二的生活里，在你们的监督下我生活的更加充实，学习了丰富的知识，同时给了我汽车企业实习的机会，为论文的展开奠定了坚实的基础。感谢数字化制造研究所每一个成员对我无微不至的关怀，就像一个温馨的家庭不断地给予我拼搏的动力。

感谢实习企业项目经理刘志辉工程师、以及我的师兄娄万里、李腾飞在企业实习过程中给我技术上的指导与帮助，为论文的开展提供了良好的基础。感谢CAE部门王雪峰部长，是你给了我接触软件二次开发的机会，并在学习中不断地给予我指导，为侧面碰撞安全性二次开发的顺利进展做好了铺垫。

感谢我的家人，在我困惑与不知所措时给我于温暖，让我坚持下来；感谢我的母亲，是你让我燃起奋力拼搏的火焰，永远的向前看，在面对压力的时候给我无限的动力。

最后，最需要感谢的是各位专家教授在百忙之中对本论文的评阅，我的论文还存在很多的不足，专家教授的宝贵意见将使我受益匪浅。

攻读硕士学位期间发表的学术论文

已发表论文:

[1] 苏占龙,王霄,刘会霞,等.汽车覆盖件 CAE 抗凹分析流程自动化系统研究[J]. 机电工程, 2015, 32(2). (第一作者, 已发表)

已收录论文:

[1] 傅珂,王霄,苏占龙等.性能仿真驱动的皮卡车空调出风口优化设计[J].机电一体化, 2015.5, (已录用)

[2] 周定智,王霄,刘会霞,苏占龙, 高传玉.基于稳健性和多目标优化的车顶结构轻量化设计[J]. 机电工程, 2015. (已录用)