

产品人机形态设计研究

机械设计及理论 专业

研究生 马剑鸿

指导教师 杨随先

设计理论和设计对象是工业产品设计领域所研究的两个重要问题。目前，对技术系统和设计理论的研究已经比较广泛和成熟。但是，传统的“以功能为中心”的设计思想和方法依然存在广泛而深刻的影响；由于未能全面而系统的考虑人、作业环境对产品的作用和影响，“以人为中心”的设计仍然得不到充分地实现。

在此背景下，本文就产品的人机形态设计问题，以工业产品设计过程中产品形态与人机工程学的关系为出发点，在深入研究人机工程学的基础理论、人体测量数据的统计分析理论、国标人体尺寸理论、遗传算法理论和产品形态的设计方法等内容的基础上，对人机工程学在产品形态方面的应用进行了有益的探索，提出了产品人机形态设计的一种新思路和新方法。

本论文的主要内容和成果如下：

(1) 人体的人机学参数是建立产品人机形态设计所需要的基础数据来源，重点研究了以国标 GB10000—1988《中国成年人人体尺寸》和国标 GB/T 13547-1992《工作空间人体尺寸》为基础的人体测量尺寸等人机学参数，分析了人体的人体结构尺寸和功能尺寸，研究了国标人体测量数据的处理和应用情况。在应用国标人体尺寸数据和生物学部分相关理论的基础上，运用概率和数理统计的方法，建立了人体尺寸变量的正态分布函数和线性回归分析函数，提出了建立非国标项目的衍生人体尺寸的具体方法。

(2) 人机形态的设计是人机工程学研究领域的重要方向之一。以人体人机学参数的研究为基础，建立了人机接触面的人机交互形式、接触点的构成、人

体接触点的生理学性能、产品表面的物理特性和体压分布的内容，研究了人机接触点的特点、构建方法，以及人机接触曲面形态的约束条件等内容，并在这些工作的接触上建立了以 *NURBS* 为曲面形式的产品人机接触曲面形态。

(3) 作为一种鲁棒的随机搜索优化算法，遗传算法在离散变量运算方面具有突出的优势。在利用这些突出特点的基础上，建立了基于遗传算法的人机曲面形态的运算流程。分析了人机形态的基因编码方法；提出了目标函数和各种约束条件函数的构建方法，构建了适应度函数；在经过选择、交叉和变异等各步运算之后，建立了基于遗传算法的人机曲面形态设计方法。最后以座椅靠背曲面的人机形态建立为例，说明了基于遗传算法的产品人机形态的运算过程。该实例表明了基于遗传算法的产品人机形态设计方法是可行的。

(4) 基于遗传算法的产品人机形态设计可以在给定的解空间中产生多种设计方案，并通过预先确定的评估函数或与设计师的交互对话，选择合适的设计方案，在经过多轮循环之后而获得最优的方案。由于该算法可以通过对约束条件和适应度函数进行调整，因此它能够获得较好的寻优方向，这也是它优于传统优化方法的一个重要特点。

关键词：人机工程学 遗传算法 产品设计 形态设计 人体测量

Research of Product Ergonomics Form Design

Major: Mechanical Design and Theory

Postgraduate: Ma Jianhong **Supervisor:** Yang Suixian

Design theory and design objects are two important aspects of Engineering Product Design research. Studying on technical system and its design theory is relatively comprehensive and mature. However, the influence of traditional design method “Focus on function” is wide and deep. Because the factors of human and operational environment are not considered systematically, the design concept of “design focus on human” is not concerned fully When design technical system.

Product ergonomics form design has been discussed in this thesis. By concerning about the relationship between product and ergonomics, it has been studied that the basic theory of ergonomics, statistical analysis for anthropometry, and design method of product form. The method of product form design based on ergonomics has been studied, and an approach to fulfill product form design has been put forward.

The main contents and results of this thesis are listed as follows.

(1) To construct product ergonomics form need lots of essential data from the ergonomics parameter. Based upon the National Standard (NS) GB10000—1988 and GB/T 13547—1992, It have been analyzed that the ergonomics parameters. The body's structure and functional size, the application of the ergonomics parameters has been discussed. Based on organ correlation theory and NS dimension, the body's ergonomics parameters have been analyzed with linear regression and the normal distribution functions of body's ergonomics parameters has been established. A method to setup derivative body dimension has been given out.

(2) Product form design is an important branch of ergonomics research. On the basis of ergonomics parameters, it has been analyzed that a product ergonomics forms which includes man-machine interaction mode, constituent of contact points, physiological mechanics performance, physical characteristic of product surface, and body pressure. The characteristic of man-machine's contact point is analyzed, and the construction method is put forward. Various constrained functions of ergonomics forms have been set up.

(3) Because of its robustness, Genetic Algorithm, a random searching optimization method, has its prepotency on discrete variable's evolutionary operation. An operational flowchart of man-machine form design has been built based on Genetic Algorithm. By analyzing the genetic encoding method, it has been presented that a method to setup objective function and constraint condition function which is to build fitness function. The design method for ergonomics form design based on Genetic Algorithm is proposed. As an example, seat backrest has been selected to illustrate the approaches proposed in this thesis. The procedure of product ergonomics form design based on Genetic Algorithm is given out in detail.

(4) Man-machine form design method based on Genetic Algorithm can generate multiple design layouts within the preset solution space. After polycyclic circulation, the optimal layout can be acquired by the preset evaluation function and by the interactive conversation between project planners and procedure. By adjusting its constrained condition and fitness function, the optimal direction for evolution can be obtained, so it takes precedence over conventional optimization method.

Key words: Ergonomics, Genetic Algorithm, Product design, Form design, Anthropometry

第一章 绪论

当前，以信息技术为支柱的科学技术获得迅猛发展，世界经济格局和统一的一体化市场已经形成，经济循环的速度加快，市场需求的快速变化和全球经济竞争的日趋激烈，都致使产品设计的方法和手段发生了很大的变化。工业产品已由传统的机械产品模式向机电一体化产品、信息电子产品方向发展，“工业经济”向“知识经济”发展^[1]，社会的消费观念也不断发生变化，产品的功能已不再是消费者决定购买的最主要因素。产品的宜人性、创新性、外观造型、适用性等因素^[2]已愈来愈受到重视。因此进行人机设计（宜人性）的优化和研究已是产品设计领域中一个非常重要的趋势和方向。

1.1 论文的背景及意义

人机工程学^[3] (Ergonomics 或 Human Factor Engineering) 是人的生理、心理特征为依据，以提高人的工作、生活质量为目的，运用人体测量学、生理学、心理学、生物力学以及工程学等学科的研究方法和手段，综合地进行人体科学、工程技术、劳动科学、企业管理科学、心理以及力学等问题研究的一门新兴的边缘学科。它研究的是人在某种工作环境中的解剖学、生理学、心理学等方面的因素，研究人和环境的相互作用，研究在工作中、家庭生活中怎样考虑人和机具的协调关系，即在了解、掌握人的作业能力和极限的基础上，让机具、工作环境和起居条件等和人体相适应。我国著名科学家钱学森说：“人机工程是一门非常重要的应用人体科学技术，它专门研究人和机器的配合，考虑到人的功能能力，如何设计机器，求得人在使用机器时，整个人和机器的效果达到最佳状态”^[4]。

因此人机工程学的主要任务是对人—机—环境综合体进行系统的分析研究^[5]，用人类创造的科学技术为这一综合体建立合理且又可行的使用方案，其目的就是让机器及工作环境的设计，能更适合人的生理心理特点，让人在作业当中，操作简便省力、迅速准确，能够感受到舒适、融洽和满足，从而充分发挥人、机效能，达到提高工效的目的。

在当前的产业界，产品的人机形态设计已成为人机产品设计的一个重要方向^[6]。产品人机形态设计是一个非常庞杂的系统问题，它不仅涉及到产品的功

能、结构、生产技术，而且与设计师的意识、人们的审美观念都有着紧密的联系。产品形态发展至今，已不单纯满足于符合实用功能的基本要求，而且能够在此基础上发展审美功能和认知功能，力图以形态语言的形式传达象征和指示意义^[2]。产业界的这种趋势促使企业在着手进行新产品开发的同时，把面向产品的人机形态的设计的研究提到一个新的高度，摆上议事日程。从而间接地迫切要求对面向产品的人机工程学设计的研究能有进一步的突破，以提高产品的设计水平和市场竞争力。总体而言，产品的人机设计就是“运用系统工程的方法找出最优组合方案，使人—机—环境系统的总体性能达到最佳状态，即满足舒适、宜人、安全、高效、经济等指标”^[7]。

目前许多基于人体测量数据、人机实验或作业分析结果等人机原则的设计与决策行为仍然是依靠设计师的领悟与判断能力^[6]。这种设计方式会产生两个问题：一是对人机原则的应用缺少量化评价准则，许多情况下需要建造昂贵的实物模型来验证设计方案；二是对人机原则的使用带有很大的随意性和不确定性，不能充分有效利用事实的人机原则和经验的、历史的设计资源。这无形中导致了设计效率减少、误差范围扩大和设计成本上升等各种不利因素的出现，这些不利因素是人机设计进入设计/制造一体化过程的主要障碍。尤其在涉及到产品的人机形态设计方面，这些缺陷表现的更为突出，一方面它影响了产品机能的实现，更重要的是这样的产品无法满足或者影响了用户的舒适、融洽和快捷的要求，当然产品的市场竞争力自然就被削弱了。

对于以上出现的产品的人机形态设计问题，考虑到现在计算机辅助设计技术的迅速发展和各种产品设计方法的涌现，能否提出新的一种可描述的、定量的、参数化的设计方法，并用它来取代仅仅依靠设计师的领悟和判断力的设计方法呢？答案是肯定的。

遗传算法^[8]是近年来发展较快的一种寻优方法，在产品设计领域也逐渐找到越来越多的用武之地，特别是对于具有模糊性的设计方案的选择问题。遗传算法(GA)基于生物进化论中的适者生存的自然遗传机制，通过群体的杂交、突变等方式产生具有更高平均适应能力的下一代，优胜劣汰而获得最优解。遗传算法的自然遗传机制不依赖于问题的具体领域，与广义的优化内涵相吻合。与传统的优化方法相比，遗传算法在处理产品设计问题时在交互性、创新性、直观性等方面具有很大的优势。因此，可以采用遗传算法进行产品人机工程设

计,让遗传算法在设计区间内进行大规模的全局搜索,而得到产品设计参数的近似最优解^[9]。

本文就产品的人机产品形态设计问题,以“为人”设计为目标,深化产品形态设计的内涵,根据并应用人体测量的数据、生物力学数据和有关人机设计原则,提出一种基于基因遗传算法的人机形态优化设计方法,旨在把反映科学技术的人机工程学设计与体现人文思想的艺术设计有机的结合在一起,更新产品设计观念,促进产品的创新设计,创造科学与美学、技术与艺术、物质与文化相互融合的新产品。

1.2 产品人机形态研究的历史、现状和发展趋势

伴随着人机工程学 and 工业设计^[10]的发展,产品的形态设计^[20]也取得了巨大进步。从20世纪初的美国学者F.W.泰勒^[11]对机器、工具等形状的研究(他曾经研究过铲子的最佳形状),到现今的航天航空器的舱内布局和航天员用品的形态设计等,这些都关系到人和机器的接触关系和接触形态问题。

现实的常用产品设计方面很多也体现出了人机形态的思想,但这样的产品形态设计仍然存在着沿着传统的设计思维方法^[12]。传统设计思维方法存在着许多不足的方面,它出现了两种极端形式:一种是只重技术设计,把产品设计局限于工程技术范畴,保证产品的技术性能;另一种是只重完全的外表设计,片面夸大外在形态、色彩、材质等因素对产品设计的作用,忽视产品技术功能对产品整体设计的决定作用。这两种设计观念将本来统一于产品设计中的技术设计与艺术设计割裂开来并相互孤立,遏制了产品设计的创新,已不能适应人们对产品“人性化、个性化、情感化、多元化”^[13]的需求。因此产品设计的本质必须从以产品为中心的设计跨越到以人为中心的设计上来,兼顾产品的功能、造型和人机性能等要求,设计出“可识、可爱、可用”^[14]的产品来。

产品的形态设计不只是一般的对产品外观的美化和装饰设计,更主要的是为实现产品物理功能和人机功能时而采取的结构形式^[15],获得具备特定功能的产品实体形态。产品形态设计活动不仅涉及到产品内部构造、布局,而且涉及到产品的人体因素和环境因素,以及外表的色彩、肌理及装饰等,最终以产品的整体形态结构表现出来。经过从定性的物理功能和人机原理要求,到定量的材料选择和尺寸界定,从定形的细节构造,到定位的布局规划等各个造型活动

环节，最终确定产品的材料、构造、布局，以及结构、工艺等因素，形成产品总体形象，使功能和形态和谐统一于产品中。

1.3 以遗传算法为优化方法的产品人机形态设计

随着科学的发展和生产能量的提供，在工业工程中出现了许多非常复杂的优化问题，这些问题很难用传统的优化方法来求解。自上世纪 60 年代以来，人们开始使用一种仿生物自然进化的“进化算法”^[16]。遗传算法就是“进化算法”中一种。遗传算法提供了一种求解复杂系统优化问题的通用框架，它不依赖于问题的具体领域，对问题的种类有很强的鲁棒性，即它能适应不同的环境和问题，并在大多数情况下都能得到比较满意的解，同时由于其搜索最优解的过程是有指导性的，避免了一般优化算法的维数灾难问题，所以广泛应用于很多学科^[16, 17, 18]。随着计算机技术的高速发展，遗传算法的这些优点更能充分地发挥出来，所以其应用前景更加广阔。目前遗传算法主要应用于包括函数优化、结构优化、组合优化、生产调度问题、自动控制、机器学习、图形图像处理、神经网络和系统控制等多个领域。

由于产品的人机形态设计是一个非常庞杂的系统问题，它不仅涉及到产品的功能、结构、生产技术，而且与人机工程学紧密相关，而人机工程学又是一门新兴的边沿学科；此外，设计师的思想意识、消费者的审美观念等都是产品人机形态的重要影响因素。由于产品人机形态设计的这些复杂因素，所以在现阶段，应用遗传算法进行产品的人机形态设计这方面的工作刚刚处于起步阶段。对于产品的人机形态问题，传统上大多数设计是在参考人体测量数据的基础上，依靠设计师的经验、直觉、领悟和判断力来进行设计工作。这些的产品设计当然存在诸多的缺点，不适宜设计出符合人机原则要求的各类产品。

作为人机工程学发展的一个分支，现阶段我国对以遗传算法为优化方法的产品人机形态研究仍然处于摸索阶段。现在的主要研究成果集中在理论方法和思想框架等方面。这些研究的重点大多以产品的外观造型为中心，以人机工程学方法为辅助手段，而遗传算法在此方面的应用则比较鲜见。近来的一些相关研究^[6]是从产品设计的一个常规模式（从提出问题到概念设计，再到详细设计等）出发，提出了将产品形态的人机设计问题分为交互模式设计、关联形态设计和独立形态设计的设计思想；该思想认为产品的人机形态是以人机交互模式

为基础的,人机交互接触的多个曲面是相互关联的,并据此应用进化设计和遗传算法的基本原理,提出了一种基于设计、制造一体化的应用遗传算法的产品形态辅助设计方法,但这种方法的有效性还需要进一步的验证。还有一些研究^[19]从人机系统的角度,分析了产品创新和工程优化的问题,并根据遗传算法的广泛搜索特性,指出这些问题也可应用遗传算法进行优化分析。

1.4 论文的思想线索和主要内容

1.4.1 思想线索

本文基于人机工程学的研究方法和设计思想,以“宜人、可人、为人”为产品形态的设计目标,兼顾产品的功能、造型和人机性能等要求,综合了人机工程设计和人体测量学的手段和方法,运用概率和数理统计的理论方法、复杂自由曲面的成形理论和基因遗传算法的优化理论等,将人机形态设计看作由一系列混合离散的人体尺寸变量,在人体的形体结构因素、人体的生物力学因素、工作空间尺寸范围因素等各类物理的、几何的等限制因素的约束作用下,经过组合优化(基于遗传算法的优化)等过程,最终得到合理的、满足用户需求的产品形态——即产品的人机形态。这是本文各个研究内容的思想线索,它贯穿了本论文从开始到结束的各部分内容。

1.4.2 主要内容

(1) 人体的人机学参数的研究

人体的人机学参数是建立产品人机形态设计所需要的基础数据来源。在分析我国人体结构尺寸、功能尺寸、人体测量数据的处理等情况的基础上,根据GB10000—1988和GB/T 13547—1992对中国成年人人体尺寸和工作空间人体尺寸进行研究,用统计和数学分析的方法,将阐明非国标项目的衍生人体尺寸数据的产生方法,并为以后进行产品人机形态设计提供数据支持。

(2) 人机曲面形态的研究

人机曲面形态的研究是人机工程学研究的一个不可或缺的一个重要分支。此部分将以人体人机学参数的研究为基础,分析人机接触面的人机交互形式、接触点的构成、人体接触点的生理学性能、产品表面的物理特性和体压分布的内容,研究人机接触点的特点、构建方法,以及人机接触曲面形态的约束条件等内容,

并在这些工作的接触上建立以 *NURBS* 为曲面形式的产品人机接触曲面形态。

(3) 遗传算法及其在人机曲面形态上的应用研究

此部分将运用人体测量所得到的国标人体尺寸和运用衍生尺寸方法得到的人体尺寸，并将其看作是混合离散的人体尺寸变量，运用遗传算法在混合离散变量寻优方面的优势，建立基于遗传算法的产品人机形态设计流程；并通过基因编码的分析和选取、目标函数和约束条件的分析和描述、适应度函数的构建、选择/交叉/变异等各个步骤，最终建立了基于遗传算法的人机曲面形态设计方法。最后以座椅靠背人机形态的构建为例，阐述了基于遗传算法的产品人机形态的建立方法。该实例表明：基于遗传算法的产品人机形态设计的方法是可行的。

第二章 产品形态的人机学参数

为设计出操作(使用)方便、舒适、美观、大方、实用的各类产品,使各种与人体尺度有关的设计对象符合人的生理特点,让人在使用时处于舒适的状态和适宜的环境之中,并能保证安全和高效工作,就必须对人机系统的主导因素——人进行充分的研究,分析人的特点,建立人体的人机学参数。

考虑到产品的形态应符合正常人体的结构尺寸和在不同工作姿态下的人体工作空间尺寸,产品设计人员需要掌握并能运用人体生理学^[21,22]和心理学^[23]的知识。如果产品的技术参数及结构与人的生理、心理的可能性相互协调,则可以认为产品是最佳的^[24]。

因此对人体的人机学参数^[7,25,27]进行研究,使人所操作的工具、装置和作业空间等适合于人体形态的设计要求;而且人体的人机学参数还是建立产品人机形态设计所需要的基础数据来源。本章主要根据 GB10000—1988^[28]和 GB/T 13547—1992^[29]对中国成年人人体尺寸和工作空间人体尺寸进行研究,用统计和数学分析的方法,建立非国标项目的衍生人体尺寸数据,为以后进行产品人机形态设计提供数据支持。

2.1 人体尺度概述

人体尺度^[26]是指人体所占有的三维空间,其中包括人体的高度、宽度、胸廓前后径,以及各部分肢体的大小等。随着国家、地区、种族、性别、年龄和生活状况等因素的不同,人体尺度等也会有所差异。此处主要研究我国人体尺度,暂不考虑其它人群的人体尺度的情况。人体测量数据主要有两类,即人体构造尺寸和功能尺寸。

2.1.1 人体构造尺寸

人体构造尺寸是静态尺寸。人体测量学通过固定身体部位,以及标准姿势(站着或坐着)来获得并提供基本的静态人体尺寸;静态测量是以检查人体形态的方式来进行测量的,它可以得到人体的基本尺寸、体形和其它数据,主要内容有:人体长度(廓径)测定;人体体形测定;人体面积、体积和重量测定等。我国发布的国家标准 GB10000—1988《中国成年人人体尺寸》^[28]所列的尺寸项

目属于人体构造尺寸的范畴。

2.1.2 人体功能尺寸

人体功能尺寸是动态尺寸。在人的任何一种身体活动中，身体各部位的动作并不是独立无关的，而是协调一致的，具有连贯性和活动性。动态人体测量重点是测量人在执行某种动作时的形态特征，通常对人体各部分所及的范围及运动角度进行测量。在人体测量学中所得到的动态人体尺寸是人体功能尺寸，它是指人在工作姿势下或某种操作活动下，四肢挥动所占有的空间体积与极限尺寸。我国发布的国家标准 GB/T 13547—1992《工作空间人体尺寸》^[20]所列的尺寸项目属于人体功能尺寸的范畴。

2.2 人体尺寸参数

随着我国人机工程学的发展，在 20 世纪 80 年代中前期，就已经制定了人机工程学的有关测量内容、方法和标准^[61]。这些主要有：GB3975—1983、GB5703—1985 和 GB5704—1985。在国标 GB3975—1983《人体测量术语》^[30]中，规定了人机工程学使用的有关人体测量参数的测点及测量项目，其中包括头部侧点 16 个和测量项目 12 项；躯干和四肢部位的测量点共 22 个，测量项目共 69 个，其中分为立姿 40 项、坐姿 22 项、手和足部 6 项以及体重 1 项。GB5703—1985《人体测量方法》^[31]规定了人机工程学使用的人体参数的测量方法，这些方法适合于成年人和青少年的人体参数测量。针对人体各部分尺寸、活动能力和力量等收集数据，要求这些数据处理好人机关系并满足其它设计需求，这样一个过程就需要大量测量仪器、设备和工具。国标 GB5704—1985《人体测量仪器》^[32]则主要对此方面进行了规定。该标准规定了我国进行人体测量的基本仪器、设备和工具，主要包括人体测高仪、人体测量用直角规、人体测量用三脚平行规和人体测量用弯角规、坐高椅、量足仪、角度计等。

到 80 年代末和 90 年代初，我国又陆续发布了 GB10000—1988《中国成年人人体尺寸》、GB/T12985—1991^[33]《在产品设计中应用人体尺寸百分位数的通则》和 GB/T13547—1992《工作空间人体尺寸》等三项有关人体参数的人机学标准；这三项标准为人机工程设计提供了基础数据和应用人体尺寸百分位数的基本原则。国标 GB10000—1988 提供的人体构造尺寸是静态的测量尺寸，国标

GB/T13547—1992 提供的人体功能尺寸是动态的测量尺寸，这两项标准可以解决产品的工业造型设计（即产品的人机形态设计）中所需要的一部分人体尺寸。

下面对 GB10000—1988 和 GB/T12985—1991 进行简要的分析和说明。

2.2.1 中国成年人人体尺寸

我国于 1988 年 7 月 1 日实施的 GB10000—1988《中国成年人人体尺寸》标准为人机工程设计提供了基础的人体数据，它提供了 7 个类别共 47 项人体结构尺寸数据，主要包括：人体主要尺寸、立姿人体尺寸、坐姿人体尺寸、人体水平尺寸、人体头部、手部和足部的尺寸，并分别按性别、年龄段、百分位数列表；主要的人体尺寸测量项目如表 2-1 所示。

表 2-1 中国成年人人体尺寸测量项目

测量项目分类	主要测量项目
人体主要尺寸	身高、体重、上臂长、前臂长、大腿长、小腿长
立姿人体尺寸	眼高、肩高、肘高、手功能高、会阴高、胫骨点高
坐姿人体尺寸	坐高、坐姿颈椎点高、坐姿眼高、坐姿肩高、坐姿肘高、坐姿大腿厚、坐姿膝高、小腿加足高、坐深、臀膝距、坐姿下肢长
人体水平尺寸	胸宽、肩宽、臀围、最大肩宽、臀宽、坐姿臀宽、坐姿两肘间宽、胸厚、胸围、臀围
人体头部尺寸	头全高、头矢状弧、头冠状弧、头最大宽、头最大长、头围、形态面长
人体手部尺寸	手长、手宽、食指长、食指近位指关节宽、食指远位指关节宽
人体足部尺寸	足宽、足长

2.2.2 工作空间人体尺寸

我国于 1992 年发布实施的 GB/T13547—1992《工作空间人体尺寸》提供了 5 个类别共 17 项工作空间人体尺寸，主要包括：立姿人体尺寸、坐姿人体尺寸、跪姿、俯卧姿和爬姿等空间人体尺寸。并分别按性别、年龄段、百分位数列表；主要的人体尺寸测量项目如表 2-2 所示。

表 2-2 工作空间人体尺寸测量项目及其分类

测量项目分类	主要测量项目
立姿人体尺寸	中指指尖点上举高、双臂功能上举高、两臂展开宽、两臂功能展开宽、两肘展开宽、立姿腹厚
坐姿人体尺寸	前臂加手前伸长、前臂加手功能前伸长、上肢前伸长、上肢功能前伸长、坐姿中指指尖点上举高
跪姿、俯卧姿、爬姿人体尺寸	跪姿体长、跪姿体高、俯卧姿体长、俯卧姿体高、爬姿体长、爬姿体高

从上面的分析可以看出，由于各种客观条件的限制，GB10000—1988《中国成年人人体尺寸》标准和 GB/T13547—1992《工作空间人体尺寸》标准仅仅提供了有限的身体尺寸^[47]，并且也只列出了 7 个百分位数的测量数据。这些尺寸仅能满足产品人机形态设计所需要的部分数据；在实际应用中，更多更完整的人体尺寸则是设计中所必须要求的。在大多数情况下，传统上很多人体尺寸数据或者百分位数据就只能通过一定估算方法得出，其实这样的数据在很多情况下是不满足设计要求的。因此很有必要对在实际应用中需要但是缺乏的人体测量尺寸和相应的人体测量尺寸之间的关系，进行更深入一步的分析讨论。

此处主要根据国标 GB10000—1988 的中国成年人人体尺寸数据和 GB/T13547—1992 的工作空间人体尺寸数据进行数据的分析和研究。将国标 GB10000—1988 的人体结构尺寸和 GB/T13547—1992 的人体功能尺寸总称为国标人体尺寸。对于国标范围外的且利用国标进行计算推导出的其它未知人体尺寸，称之为衍生人体尺寸。

2.3 人体测量尺寸关系的分析

人体尺寸是人体工程设计的主要依据之一。分析国标人体尺寸可知，人体的尺寸数据是离散的和不连续的。这是由于被测量的群体中存在着个体之间的差异；因此其中某一个体的测量尺寸不能作为设计的依据。

为使产品适合于一个群体的使用，设计中需要的是一个群体的测量尺寸。

但是,全面地测量群体中每个个体的尺寸又是不现实的。通常是通过测量群体中的样本群体的尺寸,经数据处理后而获得较为近似的所需群体尺寸。在样本群体的人体测量中所得到的测量值,都是离散的、随机的数据,因此可根据数学上概率与数理统计的方法,对测量数据进行分析统计,来得到群体尺寸的统计规律和特征参数。

传统上,常采用的人体尺寸统计方法^[34,35,36]主要有:均值法、方差法、标准差法、抽样误差法和百分位数法等各类统计方法。但随着产品设计的不断进步和产品人机工程学要求的进一步强化,传统的统计分析方法已经不能满足要求了。

在实际应用中,比如在产品的人机形态设计中,有时我们需要的人体测量数据是国标人体尺寸中所没有列入的或没有测量的,而这个人体测量尺寸又和其它的某个或多个身体尺寸之间存在着某种相互关系。此前有人提出一种以身高 H 为自变量的一系列人体尺寸的计算方法^[37](这些人体各尺寸与身高 H 之间是一种线性关系),但是该方法忽略了某些人体尺寸和身高不成线性关系的情况,并且不能提供除国标人体尺寸外的其它可能需要的衍生人体尺寸计算方法。

2.4 应用统计学方法建立衍生人体尺寸

2.4.1 人体尺寸的部分相关原则

法国生物学家屈维尔认为有机体的各个部分是相互依存的,“正是由于各种功能的这种相互依存性以及功能之间的彼此协调补充,才得以建立决定各种部分相互关系的法则”,这就是屈维尔的部分相关性定律^[38]。根据这个定律可以推知在人体测量中人体不同部位的尺寸之间也存在着一定的数学相关性,也就是说一种尺寸变量和另一种尺寸变量之间存在着相关关系。

由于人体尺寸的分布状况是服从统计学上的正态分布规律的^[17,39],根据相关性分析理论和线性模型理论^[40]可知,相关正态各随机变量之间则存在一个线性回归关系,也就是说某项衍生人体尺寸和其它多项相关人体尺寸之间存在一个线性回归关系。

结合国标所提供的人体尺寸和分析方法,以及其它研究所提出的人体尺寸的线性计算方法(该类计算方法仅仅适用于国标所提供的人体测量项目),此处提出一种国标测量项目没有提供的、可在实际产品设计中又需要的衍生人体尺

寸的计算方法。

2.4.2 人体尺寸的正态分布分析

设有 k 个人体尺寸随机变量 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_k)'$ ，且 X_k 满足 $X_k \sim N(\mu_k, \sigma_k^2)$ ，(即随机变量 X_k 具有密度函数： $f(X_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma_k^2}(X_k - \mu_k)^2}$ ， $-\infty < x < +\infty$ ，) 则称人体尺寸的 k 维随机变量 $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_k]'$ 服从 k 元正态分布^[41]，即：

$$\mathbf{X} \sim N(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}) \quad (2-1)$$

式中： $\boldsymbol{\mu}$ ——正态分布的数学期望，描述了随机变量取值的平均状态；

σ^2 ——方差，反映了随机变量的取值与数学期望的平均偏离程度；

σ ——为随机变量的标准差（均方差）；

$\boldsymbol{\mu} = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k]'$ ；

协方差矩阵^[42]：

$$\mathbf{C} = \text{cov}(\mathbf{X}) = \mathbf{E}[(\mathbf{X} - \mathbf{E}\mathbf{X})(\mathbf{X} - \mathbf{E}\mathbf{X})'] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1k} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{k1} & \sigma_{k2} & \dots & \sigma_{kk} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

2.4.3 人体尺寸的线性回归分析

若衍生人体尺寸的随机变量 Y 是其它国标人体尺寸随机变量 X 的线性函数，则存在这样一个函数关系：

$$Y = f(X) + \varepsilon \quad (2-3)$$

式中： $f(X) = E(Y|X)$ ， $E(Y|X)$ 为给定条件 X 下 Y 的条件均值；

ε 为随机变量，是 Y 对 $f(X)$ 的偏差。

则式 (2-3) 又可表示为：

$$Y = E(Y|X) + \varepsilon \quad (2-4)$$

这就是随机变量的线性回归关系^[43, 44]。

由于我们分析的是一个衍生人体尺寸变量和一组国标人体尺寸变量之间关联紧密程度的多元线性回归^[46]，所以就有：

$$E(Y|X) = E(Y|X_1, X_2, \dots, X_k) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k$$

其中 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 是与 X_1, X_2, \dots, X_k 无关的未知参数, 称为回归系数向量。

因此对于随机变量的多元线性回归来说, 式 (2-4) 又可表示为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2-5)$$

ε 为多元线性回归的随机误差。

当对 Y, X_1, \dots, X_k 进行 n 次独立观测时, 得到样本 $(Y_i, X_{i1}, \dots, X_{ik})$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

此时设:

观测向量: $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]$;

设计矩阵: $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}$;

未知参数向量: $\boldsymbol{\beta} = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k]$, 其中 β_0 为常数项, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 为回归系数;

随机误差向量: $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n]$ 。

根据 Gauss-Markov 假设^[46]有:

- (1) 误差项均值为零, 即 $E(\boldsymbol{\varepsilon}) = 0$;
- (2) 误差项具有等方差, 即 $\text{Cov}(\boldsymbol{\varepsilon}) = \sigma^2 \mathbf{I}_n$;
- (3) 误差是彼此不相关的, 即 $\text{Cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$, $i \neq j$, $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

则式 (2-5) 可以表示为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2-6)$$

根据式 (2-1) 和式 (2-6) 则有如下的正态分布:

$$\mathbf{Y} \sim N(\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\beta}\mathbf{C}\boldsymbol{\beta}') \quad (2-7)$$

若已知协方差矩阵 \mathbf{C} 时, 则因变量 \mathbf{Y} 的分位点 \mathbf{Y}_q 可由下式确定:

$$\mathbf{Y}_q = \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\mu}_q \sqrt{\boldsymbol{\beta}\mathbf{C}\boldsymbol{\beta}'} \quad (2-8)$$

上式中, $\boldsymbol{\mu}_q$ 为标准正态分布的 q 分位点, $Q = \int_{-\infty}^{\boldsymbol{\mu}_q} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\mu^2}{2}} d\mu$ 。

由上述分析可知, 在给定 n 次独立观测得到的自变量 \mathbf{X} 后, 即可求得因变量 \mathbf{Y} 的分位点 \mathbf{Y}_q , 式 (2-8) 这就是我们所要求的衍生人体尺寸百分位的求解方程。

2.4.4 线性回归系数的估计

在利用式(2-8)进行衍生人体尺寸求解时,由于回归系数 β 是未知的,因此采用最大似然估计法^[42]来求解回归系数 β 的值。

即若存在一个 $\hat{\beta} = [\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k]^T$ 使得当 $\beta_0 = \hat{\beta}_0, \beta_1 = \hat{\beta}_1, \beta_2 = \hat{\beta}_2, \dots, \beta_k = \hat{\beta}_k$ 时,使得:

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{i1} - \dots - \beta_k x_{ik})^2 \quad (2-9)$$

达到最小值,即使误差 ε 的均值取最小值。

由式(2-6)和式(2-9)可进行如下推理:

$$\begin{aligned} Y &= X\beta + \varepsilon \approx X\hat{\beta} && \Rightarrow \\ X'Y &= X'X\hat{\beta} && \Rightarrow \end{aligned} \quad (2-10)$$

$$\hat{\beta} = [\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_k]^T = (X'X)^{-1} X'Y$$

这就是所求的 $\beta = [\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k]$ 的最大似然估计 $\hat{\beta} = [\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_k]$ 。

根据前述各式的推导,因此则有:

$$\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_k X_k \stackrel{\text{或}}{=} \hat{Y} \quad (2-11)$$

上式中,我们一般把 $\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_k X_k$ 作为 $Y = \mu(X_1, X_2, \dots, X_k) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k$ 的近似估计;

则我们就可以得到方程(2-12):

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_k X_k \quad (2-12)$$

式(2-12)就是 k 元经验线性回归方程。

2.5 座椅靠背的衍生尺寸求解

在进行座椅靠背^[46]曲面的人机形态设计时,除了将使用到国标人体尺寸,还需要一些其它国标中未提供的或者未测量的衍生人体尺寸。现以座椅靠背曲面的人机形态设计为例,说明衍生人体尺寸的求解方法和过程。

在进行座椅靠背人机曲面设计时,按靠背高度的不同则有全靠背、高靠背、中靠背和低靠背等4种形态。高靠背有腰椎点和肩胛点两个支撑点,对于全靠背而言除了腰椎点和肩胛点两个支撑点,还有枕骨点。但是只有这些支撑点对于设计符合要求的人机形态曲面是不够的,还需要其它相关特征点;这里用衍生人体尺寸的方法来求解这些特征点。

进行高靠背的人机形态设计选取的特征点主要有：肩胛点、腰椎点、肩胛下点和腰椎下点。肩胛点和腰椎点可以由国标人体尺寸通过换算得出，而肩胛下点和腰椎下点属于衍生人体尺寸，通过衍生人体尺寸的计算方法得到，具体的运算过程如下。

2.5.1 直接采用国标尺寸的接触点坐标值

若图(5-2)的人机形态坐标系为基准，则：

(1) 肩胛点 p_{11} 和 p_{13}

$$-x_{p_{11}} = x_{p_{13}} = \text{肩宽(或最大肩宽)}/2 + \text{裕量}; y_{p_{11}} = y_{p_{13}} = \text{坐姿肩高} + \text{裕量}; \\ z_{p_{11}} = z_{p_{13}} = \text{裕量}$$

(2) 腰椎点 p_{31} 、 p_{32} 和 p_{33}

$$-x_{p_{31}} = x_{p_{33}} = \text{坐宽}/2 + \text{裕量}; x_{p_{32}} = \text{裕量}; y_{p_{31}} = y_{p_{32}} = y_{p_{33}} = \text{坐姿腰高} + \text{裕量}; \\ z_{p_{31}} = z_{p_{33}} = \text{脊椎弯距} + \text{裕量}; \text{脊椎弯距可由人体解剖学得到。}$$

裕量是这样确定的：为了保证实现产品的某些功能而对作为产品尺寸设计依据的人体尺寸百分为数所作的尺寸修正量，它包括心理修正量以及功能修正量^[33]。心理修正量是指为了消除空间压抑感、恐惧感或者是为了追求美观等心理需要而作的修正量，功能修正量是指为了保证实现产品的某些功能而设定的尺寸修正量。

2.5.2 由衍生人体尺寸得到的接触点坐标值

此处仅以肩胛下点 p_{21} 、 p_{22} 和 p_{23} 的求解为例，说明衍生人体尺寸的运算过程如下。

与点 p_{23} 有相关关系的接触点有肩胛点 p_{13} 、腰椎点 p_{33} 和胸宽，因此建立的多元线性回归方程如下：

$$\text{在 } x \text{ 轴方向: } x_{p_{23}} = \beta_0^x + \beta_1^x x_{p_{13}} + \beta_2^x x_{p_{33}};$$

$$\text{在 } y \text{ 轴方向: } y_{p_{23}} = \beta_0^y + \beta_1^y y_{p_{13}} + \beta_2^y y_{p_{33}};$$

$$\text{在 } z \text{ 轴方向: } z_{p_{23}} = \beta_0^z + \beta_1^z z_{p_{13}} + \beta_2^z z_{p_{33}}。$$

通过查询国标人体尺寸(男性)，并以满足90%(即百分位5%—95%共5个百分位)的人群为设计目标，即可确定：

$$x \text{ 方向的 } \hat{\beta}_x \text{ 以胸宽来近似, 当 } \mathbf{X}_x = \begin{bmatrix} 1 & 199 & 181 \\ 1 & 202 & 190 \\ 1 & 215 & 211 \\ 1 & 230 & 236 \\ 1 & 235 & 245 \end{bmatrix}, \mathbf{Y}_x = \begin{bmatrix} 128 \\ 131 \\ 144 \\ 157 \\ 160 \end{bmatrix} \text{ 时, 由式 (2}$$

-10) 即可得到 $\hat{\beta}_x = [-32.42, 0.7, 0.12]$;

$$y \text{ 方向的 } \hat{\beta}_y \text{ 以坐姿脐点高来近似, 当 } \mathbf{X}_y = \begin{bmatrix} 1 & 557 & 219 \\ 1 & 566 & 230 \\ 1 & 598 & 237 \\ 1 & 631 & 267 \\ 1 & 641 & 296 \end{bmatrix}, \mathbf{Y}_y = \begin{bmatrix} 219 \\ 230 \\ 237 \\ 267 \\ 303 \end{bmatrix} \text{ 时,}$$

由式 (2-1) 即可得 $\hat{\beta}_y = [5.25, -0.08, 1.18]$;

$$\text{同理, 当 } \mathbf{X}_z = \begin{bmatrix} 1 & 1.0 & 18 \\ 1 & 0.5 & 24 \\ 1 & 0.5 & 30 \\ 1 & 1.0 & 36 \\ 1 & 0.5 & 44 \end{bmatrix}, \mathbf{Y}_z = \begin{bmatrix} 9 \\ 12 \\ 15 \\ 18 \\ 22 \end{bmatrix} \text{ 时, 也可得到 } \hat{\beta}_z = [0, 0, 0.5]$$

将 $\hat{\beta}_x$ 、 $\hat{\beta}_y$ 和 $\hat{\beta}_z$ 代入式 (2-9) 即可得到当参人体考尺寸取某一分位点时, 衍生人体尺寸 p_{23} 的分位点, 从而可以确定当参考人体尺寸取 (5%—95%) 时, p_{23} 的尺寸范围为: $x_{p_{23}} \in (115, 190)$, $y_{p_{23}} \in (406, 508)$, $z_{p_{23}} \in (-7, 21)$ 。

同理亦可求得衍生人体尺寸点 p_{21} 、 p_{22} 、 p_{23} 、 p_{41} 、 p_{42} 、 p_{43} 处的坐标范围, 如表 2-3 所示。

表 2-3 衍生人体尺寸点的坐标值范围

	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{41}	p_{42}	p_{43}
x	(-190, -115)	(-5, 5)	(115, 190)	(-230, -165)	(-5, 5)	(165, 230)
y	(406, 508)	(406, 508)	(406, 508)	(114, 156)	(114, 156)	(114, 156)
z	(-7, 21)	(3, 30)	(-7, 21)	(-10, 16)	(3, 30)	(-10, 16)

2.6 小结

本章主要讨论了以人体尺寸测量项目为主的人体的人机学参数。

首先，简单地介绍了人机学参数的一些内容，包括人体尺度、人体构造尺寸、人体功能尺寸等基本概念；阐述了传统上对人体测量数据处理和应用方法；并对我国人体尺寸数据测量背景情况进行分析和介绍。

然后，根据 GB10000—1988 和 GB/T 13547—1992 对中国成年人人体尺寸和工作空间人体尺寸进行分析、研究，应用概率和数理统计的方法，对衍生人体尺寸和国标人体尺寸之间的关系进行了分析，建立了以统计学为基础的衍生人体尺寸的求解方法；并以座椅靠背的人机曲面为例，详述了衍生人体尺寸的求解过程。

第三章 产品的人机曲面形态

形态是产品设计的载体，造型是有机能的形态，是创造附加价值的有机体形态。产品的内涵是由展现在外的产品的形态来表达的^[48]，在造型设计的过程中，会涉及到心理学、人机工程学、材料、色彩等方面的内容。一个优秀的产品除了具有完善的技术性能和实用功能外，还需具有一个美的外观；外观能够外延产品的审美功能和认知功能，并以形态语言的形式传达象征和指示意义。只有将这些内容有机的融合起来，才能恰如其分的将产品的内涵传达给顾客。因此进行产品的人机曲面形态研究，使之符合人体工程学的原则和方法，已经成为产品设计和开发的重要方向。

3.1 产品形态的概念

首先，产品的形态是指由内部开始的并以外部形态所最终呈现或表达出来的产品的形状和功能表象^[49]。

从技术方面来看，形态反映了产品的技术性能所引起的构成形式、操作形式、材料、工艺、结构等语义信息；从经济方面来看，产品形态要反映产品的市场要求，如产品的流行性、企业风格、企业策略等形态语义信息；从文化内涵方面来看，产品形态反映了消费者的社会属性、文化背景、生活方式、审美心理等形态信息。作为产品设计师必须注意以上各方面要求，从系统论的角度对这些内容进行综合协调，用产品形态的语义方式进行表达。

此外，形态是一种与人们心理符合有关的东西^[49]，设计时要研究人们对产品的认知习惯。产品形态表达必须准确反映产品功能的观点，就是要建立在人们对人们心理习惯符合研究的基础上。

人们对任何事物的认知过程中，在大多数情况下，都会不知不觉地动用了头脑中许多记忆的场景或符号。一般，人们对某一事物的认识是从事物的外部开始，是一个由表及里的实践认知过程。针对某一具体的产品，我们总是先对其形状、色彩、质地、纹理、体积、尺度有个直观的认识，随后开始了解其功能、原理、内部结构、操作方式，进而全面地认识这一产品，取得一定的感官经验，并把它作为一种产品的初步形态功能而记在头脑中。因此，产品的工业设计师的主要工作就是研究如何表象产品的形态，以及如何将产品的功能附

加至产品的形态上面，并以形态的形式表达、反映和引导出来。

最后，以功效学为基础的产品人机形态设计仍然是产品开发设计中必不可少的重要因素。产品的人机形态设计就是应用人机工程的原理和方法，以设计出更符合人体特征的安全、健康、高效和舒适，使用性能等方面更优越的产品为目标，进行产品的形态创新设计^[50,51]。

目前产品的人机性能已成为国外产品设计的首要考虑，美国 and 欧洲的一些国家都有完备的产品形态人机设计标准，甚至以法律的形式来保证产品的人机性能^[52]。而在国内，目前的人机工程设计与决策行为，在很多方面依旧依靠设计师的领悟和判断能力。这样的设计方式就存在着诸多的缺点：设计的不确定性、人机原则的随意性应用（大多数情况下，很少能在设计中兼顾或者根本没考虑到人机原则的应用）和昂贵的实物验证模型等。这些都导致了诸如：设计效率减少、误差范围扩大、设计成本上升、人机因素的缺失和不足等各种不利因素的出现。因此研究科学、可靠的产品人机形态设计方法已经成为人机设计的重要方向。

3.2 产品人机接触面的特性分析

3.2.1 人机交互形式

分析各类产品的人机工程特性可以发现，人机交互行为可以存在着三类交互形式^[6]，它们分别是：

（1）直接接触形式

该形式是指以产品形态曲面与使用者的身体部位直接接触为主要表现形式的人机交互行为。

（2）力学交互形式

该形式是指以产品形态曲面和使用者发生生物力学相互作用为主要表现形式的人机交互行为。

（3）相对运动形式

该形式是指以产品(或产品的某些部件)与使用者，在使用过程中，发生的位置变化(或位移运动)为主要表现形式的人机交互行为。

在大多数的情况下，直接接触形式和力学交互形式是同时出现的、相互融合的，这两种形式构成了人机交互的主要形式，成为人机交互的基本表现形式。

考察人机的相对运动形式可以发现，这中人机交互形式也是以直接接触模式和力学交互形式为基础的。也就是说：人机交互是指人体部位对产品功能的参与以及产品形态的交流方式，这些都是以人体部位形态与产品的接触和发生力的作用为基础的。

3.2.2 人机接触点的构成状况

人机形态设计是以人体的身体部位与产品的表面相接触和发生力的作用为基础构建的，因此首先要研究人机接触点的构成状况。

在人机交互的过程中，人和机器之间将会产生一系列的接触点；根据接触点的弹性系数的差异，可以把人机接触点分为：刚性接触点和柔性接触点。

(1) 刚性接触点的定义：对于刚性结构形态的人体部位对应与产品曲面上相对位置固定的刚性接触点（简称刚性点）；

(2) 柔性接触点的定义：对于弹性结构形态的人体部位则对应于产品曲面上相对位置可变的柔性接触点（简称柔性点）；

这样就可以把人机交互的接触点按照物理弹性系数的不同分为了刚性点和柔性点两大类，人机曲面形态设计就是对这两类接触点的力学性能和分布状况进行分析、归纳和优化，从而可以得出满意的人机接触曲面形态。

3.2.3 人体接触点的力学特性分析

首先要研究人体接触点的生理力学性能。考察人机接触点的构成状况（由刚性点和柔性点构成），可以发现：比如在和类似脊柱、肩胛骨、肘骨点等处发生交互的人机接触点是刚性点，而比如在和臀部、大腿处、背部等处（肌肉较厚和较多的地方）发生交互的人机接触点是柔性点。现在就分析与刚性接触点密切相关的骨骼生理力学性能，以及与柔性接触点密切相关的肌肉生理力学性能。

3.2.3.1 骨骼的生理力学特性

从运动生物力学来看，骨骼的机能主要表现为传递力和抵抗重力的作用等。根据骨骼的构成状况（由有机质——骨胶和无机质——钙盐构成）和它的结构方式（两端粗大，中间稍细而中空）^[11]来看，骨骼是具有较高的硬度和一定弹

性的生物体，因此，骨骼在一定的范围内服从虎克定律。在受到一定范围内的机械应力的情况下，骨组织的量与应力值成正比。

根据沃尔夫定律^[50]：骨的形态和功能上的每一个变化，必然引起骨的内部组织结构的某种确定变化。由此可见，压应力必然引起骨组织的变化。考虑到骨骼相对于肌肉而言较大的弹性系数和较强的刚性，因此确定人机接触点时不得不考虑骨骼的刚性因素。

3.2.3.2 肌肉的生理力学特性

肌肉的主要机能^[26]是将化学能转变为机械功或力。在人机交互时，肌肉将发生多种变化方式：

首先是肌肉的收缩情况，肌肉的力学效应表现为在起止点施加的拉力，使人体环节产生运动或者维持某种姿势。

再次是静息肌肉的弹性情况，当人体的肌肉受压时，肌肉将会发生弹性形变，同时使得受力的接触面积增大，使得局部压强减少，在压力消失时，肌肉将恢复原状。但肌肉的受压弹性系数较小，因此变形较大，使得接触面增大。

所以在进行产品的人机形态设计时，肌肉的生理力学性能也是确定人机接触点时需要考虑的另一个因素。

3.2.4 产品形态表面的物理特性分析

在人机交互过程中，产品的表面形态在接触点处将会发生变形，变形的情况与接触面的表层物理特性和内层物理特性有关。因此进行产品的人机形态设计还要充分考虑产品表层材质和内层材质的物理特性。

3.2.4.1 表层材质的物理特性

表层材质的物理特性与覆盖面的材质有关，不同的材质有不同的弹性变形系数，比如一般布料的弹性系数很小，而弹性材料做成的覆盖面的弹性系数就比较大，硬质塑胶和钢材的弹性系数则更大。在进行产品的人机形态设计时，表层材质的物理特性状况关系到人机曲面的形变和相应曲率的选取等。

3.2.4.2 内层材质的物理特性

位于覆盖面内部，且支撑覆盖面荷重的材质的物理特性则称为内层材质的物理特性，比如床垫、座椅座垫、座椅靠背内部的弹簧等其他填充物的弹性特性。保证内层材质的弹性处于合理的区间范围内是非常重要的。比如车用座椅的椅垫必须既要具有较好的弹性，而且还应具有一定的阻尼特点，以减少震动，缓和冲击。但过于柔软的座垫就可能会使人失去平稳，处于摇摆不定的状态。因此相对于表层材质的物理特性，内层材质的物理特性在某些情况下起着重要的作用。

3.2.5 产品形态表面的体压分布分析

在人机接触时，产品曲面上将会发生以直接接触形式和力学交互形式为主的人机交互行为，从而在产品曲面上产生一定规律的体压分布。

由于人的身体表面全部是曲面，比如经常发生人机接触的臀部和背部的体表形态都是相当复杂的；人体需要支撑的每个部位都是在形状极为复杂的骨骼外面覆盖着一层薄薄的肌肉和皮肤而构成的复杂曲面^[11]。如果直接使用硬平面支撑，那么每一处的压力将集中在凸出的骨点上；长时间的集中压力，将会使人产生疲劳感觉，这种受力状况是进行产品形态设计时所要避免的。

为此在进行产品的人机形态设计时，除了在关键的接触点处设置较大的体压外，还要在次要的接触点处设置一定的体压分布，目的在于减轻集中受压的程度，使压力得到恰当分散。另外就是使产品的表面与人体体表形态尽可能吻合，吻合程度的增加也会改善体压的分布状况。

因此按照人机接触点设计要求的理想形态，来绘制体压分布状况图；根据该体压分布图，应用人体的尺寸参数等数据，确立产品曲面的体压分布函数；在把这个函数作为产品人机形态设计的一个约束条件，应用到人机曲面形态的设计流程中去。考虑到人机接触曲面设计的复杂性，因此还可以选择在工业造型中控制性和调节性比较好的自由曲面的形态（比如 *NURBS* 曲面等），根据人体体表的特性，精确地调整曲面的控制点或通过点参数，进而实现合理的体压分布。

3.3 产品人机接触面的建立

3.3.1 人机接触点的分析

人体部位对产品功能的参与以及与产品形态的交流方式构成了人机交互的基本内容，而这些人机交互的内容基本上都是以人体部位形态与产品的直接接触形式和力学交互形式为基础的。因此，采用人体特征的部位点作为人机直接接触模式上的接触点。接触点是人体体表特征位上的点，根据产品设计问题的需要和求解精度来确定人机接触点的数目与分布。

对刚体结构的人体部位（如朝外凸的骨骼等）可以采用相对位置固定的刚性接触点对主接触点进行细化；对于弹性结构的人体部位（如肌肉肥厚的地方）可采用相对位置可变的柔性接触点对主接触点进行细化；对于有刚体运动关系的人体部位则在不同的运动部位上设置不同的离散接触点^[6]。人机交互设计的主要内容就是对接触点的参与状态值进行优化。

人机是以两种途径发生相互作用的：① 静态作业交互，② 动态作业交互。

（1）静态作业交互

静态作业交互是指人与机器的静态工位接触^[7]，接触点是一种固定的静态点。这些静态点与人体体表部位的特征点相吻合，分布在人体体表与机器接触的形态表面上。

静态点数目的选取则按照设计问题的具体情况和求解精度来确定。“人体测量学”通过固定身体部位，以及标准姿势来获得并提供基本的静态人体尺寸，也即是静态点的尺寸；它主要包括身高、眼高、臂长、腿高和坐高等数据，这些数据确立了静态点之间的位置尺寸关系；

（2）动态作业交互

在人的任何一种身体活动中，身体各部位的动作并不是独立无关的，而是协调一致的，具有连贯性和活动性^[7]，人与机器的接触点是一种运动的动态点。对于有刚体运动关系的人体部位则在不同的运动位置对应于不同的运动形态接触点（简称动点）。

动态人体测量通常对人体各部分所及的范围及运动角度进行测量。在人体测量学中动态的人体尺寸是指人在工作姿势下或某种操作活动下，四肢挥动所占有的空间体积与极限尺寸。某些动态人体尺寸则需要根据基本人体尺寸通过换算成间接尺寸。因此动态作业交互，需要根据人与机器的运行作业空间和作业路线进行计算。此外还需考虑人体尺寸与周围（室内、室外）空间环境^[64, 65]

的匹配情况，按照人体尺寸和空间环境尺寸来确定产品的尺寸形状等。

从对人体与产品交互运动的两种形式：多工位的静态作业交互和使用过程中的动态作业交互的分析可以看出：静态作业交互是对每一个工位单独进行力学平衡性与稳定性计算；而动态作业交互要进行复杂的动态计算，相较静态点的计算，动态点求解更复杂困难；因此，可以将动态点离散为运动路线上若干个关键点，将离散的关键点视为静态点，运用静态交互点的计算方法进行求解。

由于静态点集和动态点集都属于人机交互作用的接触点集 P 的子集，因此一旦静态点集和动态点集被确立，人机发生交互作用的接触点集 P 也就随之而确立了。

3.3.2 人机接触点的构建

人机交互模式的设计的主要工作就是对接触点的参与状态进行优化。采用人体部位与产品的接触点（包括刚性点、柔性点和动点）的概念，来进行产品人机形态设计，则可以构造人机设计问题的问题空间和解空间，并通过此后的各种运算而得到满意的设计方案。

设接触面上第 $i \times j$ 个接触点 p_y ， p_y 的构成要素包括：

(1) 点 p_y 的空间位置 (x_y, y_y, z_y) ，即：点 p_y 的坐标值；

(2) 点 p_y 在接触面上的权重 w_y ，也是接触点的权因子；

则接触面上第 $i \times j$ 个接触点 p_y 可以表示为： $p_y = (x_y, y_y, z_y, w_y)$ ，且 $i \in (1, \dots, m)$ ， $j \in (1, \dots, n)$ ， $m, n \in N$ （自然数）。

若给定接触面上 $m \times n$ 空间点集，则人机交互模式问题空间的点集表达式为：

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & p_y & \dots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

3.3.3 NURBS 曲面简介

近年来在CAD领域出现了一种更具一般性和已广泛应用的曲线、曲面的表示方式，即NURBS曲线和曲面^[56-61]。NURBS（Non Uniform Rational

B-Splines) 曲线 (曲面), 它已经被公认为是一种最好的设计参数表达方式。大多数曲面设计系统均采用这种数据结构。

NURBS 曲面是最复杂的曲面形式, 也是控制精度最高的曲面, 可以对所需的曲面局部部位进行精确的修改。一般 NURBS 曲面常用于结构复杂无规律且对局部形态细节要求比较高的设计场合, 对有人机要求的产品曲面设计是目前比较合适的。

3.3.3.1 NURBS 曲线

曲面的生成以曲线参数化为基础的, 而在 B 样条方法中, NURBS 曲线又最具一般性, NURBS 曲线不仅涵盖了多项式的 B 样条方法, 而且涵盖了非均匀的和有理的 B 样条方法。NURBS 曲线是分段有理 B 样条多项式基函数定义的^[66], 其形式为:

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n W_i V_i B_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n W_i B_{i,k}(u)} = \sum_{i=1}^n V_i R_{i,k}(u) \quad (3-2)$$

式中: $R_{i,k}(u) = \frac{W_i B_{i,k}(u)}{\sum_{j=0}^n W_j B_{j,k}(u)}$, $R_{i,k}(u)$ 称为有理基函数。V_i 是特征多边形

控制顶点, W_i 是相应控制点 V_i 的权因子, n 为控制点数, B_{i,k}(u) 为 B 样条基函数, k 为 B_{i,k}(u) 的次数。

B_{i,k}(u) 基函数由递推公式定义:

$$\begin{cases} B_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i < u < u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ B_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} B_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} B_{i+1,k-1}(u), & k \geq 1 \end{cases}$$

式中 k 为幂次; u(i = 0, 1, 2, ..., m) 为节点, 由其形成节点矢量 U:

$$U = [u_0, u_1, u_2, \dots, u_m]$$

当节点数为 (m+1), 幂次为 k, 控制顶点数为 (n+1) 时, m, k 和 n 三者之间的关系为 m = n + k + 1。

3.3.3.2 NURBS 曲面

NURBS 曲面由下式定义^[50]：

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{i,k}(u) B_{j,l}(v) W_{i,j} \mathbf{V}_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{i,k}(u) B_{j,l}(v) W_{i,j}} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j}(u, v) \mathbf{V}_{i,j} \quad (3-3)$$

$$\text{式中： } R_{i,j}(u, v) = \frac{W_{i,j} B_{i,k}(u) B_{j,l}(v)}{\sum_{x=0}^m \sum_{y=0}^n W_{x,y} B_{x,k}(u) B_{y,l}(v)}, R_{i,j}(u, v) \text{ 是 } NURBS \text{ 曲面的分段}$$

有理基函数。 $\mathbf{V}_{i,j}$ 为矩形域上特征网格控制点列， $W_{i,j}$ 为相应控制点的权因子， $B_{i,k}(u)$ 和 $B_{j,l}(v)$ 分别为沿 u 向的 k 次和沿 v 向的 l 次 B 样条基函数， u 向和 v 向的节点矢量分别为：

$$\mathbf{U} = [0 = u_0 = u_1 = \dots = u_k, u_{k+1}, \dots, u_{r-k-1}, u_{r-k} = u_{r-k+1} = \dots = u_r = 1];$$

$$\mathbf{V} = [0 = v_0 = v_1 = \dots = v_l, v_{l+1}, \dots, v_{s-l-1}, v_{s-l} = v_{s-l+1} = \dots = v_s = 1].$$

上式中，沿 u 向和 v 向节点矢量的节点数分别为 $(r+1)$ 和 $(s+1)$ ，其中， $r = n + k + 1$ ， $s = m + l + 1$ 。

3.3.4 人机接触曲面形态的建立

由于NURBS曲面一般能够满足产品的曲面设计要求，本文依据人机接触点的情况，拟采用NURBS曲面进行人机曲面设计。

给定了接触面上 $(m \times n)$ 空间接触点集 $p_{ij} (i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n)$ ，接触点为曲面的节点；则就有了 $k \times l$ 次NURBS曲面： $S(u, v) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{i,j}(u, v) \mathbf{V}_{i,j}$ 。

式中 $R_{i,j}(u, v)$ 是NURBS曲面的分段有理基函数； $u, v \in [0, 1]$ ，当 u, v 在0到1的区间上遍历时，即可构成整张NURBS曲面。

通过确定人机接触的点集 P 和NURBS曲面 $S(u, v)$ ，构建了人机设计的问题空间。产品的人机设计就是对人机接触点的位置空间和参与状况进行优化和合理布置，从而获得产品形态结构设计的相对最优解。

实际上，根据人机性能确定人机参数并进行产品的人机形态设计是一项复杂的工作。在使用传统优化方法解决此类问题时，就存在着各种各样的困难，比如：需要建立确切的函数关系、并能可微或可导、必须的连续性要求等；那么采取一种对优化问题限制较少的优化方法就可以方便地解决此类问题。遗传

算法就属于这种比较灵活的优化设计计算方法，把产品的人机形态设计计算建立在此算法的基础上，则能设计出比较适合人机性能的曲面形态。根据曲面设计问题的具体情况，在遗传算法设计过程中，产品形态设计的人机工程学要求主要体现在约束条件等方面。

3.4 人机曲面的约束条件

在人机曲面设计的过程中将会遇到各种各样的曲面约束条件，这些约束条件或者满足一定的功能要求或者满足一定的形态要求，下面简要的说明一些常用的约束条件。

3.4.1 曲面的控制点约束条件

在人机曲面求解中，有时因为设计的需要，需要制定曲面上某一控制点的值，或者要求某些控制点重合或满足一定的关系而给出的约束条件。

为了确保所设计的曲面形态符合人机性能的要求和提高遗传运算的寻优效率，而对控制顶点的坐标值定义域进行约束限制。相应的坐标值范围由产品形态设计师根据所要设计的产品曲面形状和人机尺寸测量数据来确定。如果给定控制顶点的坐标值定义域^[60]，控制点 $V_{i,j}$ 坐标值的变化范围可由式(3-4)来确定：

$$\begin{aligned} x_{i,j} \in [x_{\min i,j}, x_{\max i,j}] ; \quad y_{i,j} \in [y_{\min i,j}, y_{\max i,j}] ; \quad z_{i,j} \in [z_{\min i,j}, z_{\max i,j}] ; \\ (i = 1, 2, \dots, n ; \quad j = 1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (3-4)$$

3.4.2 曲面的接触点约束

要求曲面通过给定的接触点，也是人机曲面设计中重要的约束之一。对于曲面，设有一接触点 p_i ，曲面在该点的参数值为 (u^*, v^*) ，则使曲面 $s(u, v)$ 通过该点的约束表达式为：

$$s(u, v) = p_i \quad (3-5)$$

3.4.3 曲面的(偏)导矢约束

在产品的人机形态设计过程中，有时要求控制在某一点处的(偏)导矢，因此要增加(偏)导矢约束条件^[59]。

设已知曲面在参数 (u^*, v^*) 处的 u 向切矢为 \mathbf{T} ，则该约束表达式为：

$$s_u(u, v) = \mathbf{T} \quad (3-6)$$

同理 v 向切矢的约束表达式为：

$$s_v(u, v) = \mathbf{T} \quad (3-7)$$

如果已知曲面在参数 (u^*, v^*) 处有 u 向和 v 向两个切矢约束，则混合偏导矢约束可以表示为：

$$s_{uv}(u, v) = \mathbf{T} \quad (3-8)$$

3.4.4 曲面的参数曲线约束

在产品的人机形态设计中，为了控制曲面的形状，有时要求曲面通过某一给定的参数曲线^[59]。

由式 (3-2)，设曲面 $s(u, v)$ 在 v^* 处的 u 向等参数线为 $c(u) = \sum_{i=1}^n \mathbf{V}_i R_{i,k}(u)$ ，

则该约束可以表达为：

$$s(u, v^*) = c(u) \quad (3-9)$$

3.4.5 体压分布约束函数

设第 i 个接触点区域的压强为 $P(A_i)$ ， A_i 是第 i 个接触点区域的面积，压强 P 为 A_i 的函数， $Press$ 是人体的承重压力；则存在这样一个函数关系：

$$\sum_{i=1}^n \int_{A_i} P(A_i) dA = Press \quad (3-10)$$

3.5 小结

本章从产品形态介绍入手，细致分析了产品人机接触面的人机交互形式、接触点的构成、人体接触点的生理力学性能、产品表面的物理特性和体压分布等内容，研究了人机接触点的特点、构建方法，以及人机接触曲面形态的约束条件等内容，并在这些工作的基础上建立了 *NURBS* 曲面形式的产品人机接触曲面形态。

第四章 基于遗传算法的产品人机形态设计

从前述各章可以看出, 人机曲面形态的目标函数和约束条件都为典型的非线性规划问题, 不能直接对其求一、二阶导数, 故需要对目标函数求导的一般优化方法不适用。复合形法不需要对函数求导, 但此法收敛速度慢, 特别是对高度非线性函数, 会影响算法稳定性, 出现局部最优现象。

考虑到传统优化算法的局限性, 根据产品的人机曲面形态优化设计时数学模型比较复杂的这一特点, 并考虑到在计算机上求解的时间和空间复杂度以及程序的简捷性, 本文引入了一种模拟生命进化机制的智能随机优化算法—遗传算法。该算法把自然遗传机制和计算科学结合起来, 按照其对环境的适应程度进行概率搜索, 因其搜索最优解的过程具有指导性, 因此不易陷入局部最优解, 即使在所定义的适应函数是不连续的、非规则的或有噪声的情况下, 它也能以很大的概率找到全局最优解。

4.1 遗传算法概述

4.1.1 遗传算法的思想基础和发展历史

遗传算法^[62, 69]是生物学、计算机科学、人工智能以及系统科学等学科相结合而产生的一种全局性概率搜索方法。遗传算法的主要思想来源于达尔文(C. Darwin)的生物进化论, 其中的“自然选择, 适者生存”是遗传算法的主要指导原则之一。自然选择(natural selection)学说包括以下三个方面: 遗传(heredity)、变异(variation)、生存斗争和适者生存。

按照孟德尔和摩根(G. Mendel, T. Morgan)^[18, 63, 64]的遗传学理论, 遗传物质是作为一种指令密码封装在每个细胞中, 并以基因的形式排列在染色体上, 每个基因有特殊的位置并控制生物的某些特性, 生物体所表现出来的外在特征是对其染色体构成的一种体现。生物进化的本质体现在染色体的改变和改进上, 生物体自身形态的变化是染色体结构变化的表现形式, 不同的基因组合产生的个体对环境的适应性不一样, 通过基因杂交和突变可以产生对环境适应性强的后代。经过优胜劣汰的自然选择, 适应值高的基因结构就得以保存下来, 从而逐渐形成了经典的遗传学染色体理论, 揭示了遗传和变异的基本规律。在一定的环境影响下, 生物物种通过自然选择、基因交换和变异等过程进行繁殖生长,

构成了生物的整体进化过程。

自然界的生物进化是一个不断循环的过程。在这一过程中，生物群体也就不断完善和发展。当今，生物进化过程不仅可以在计算机上模拟实现，而且还可以模拟进化过程，创立新的优化计算方法，并应用到复杂工程领域之中，这就是遗传算法等一类模拟自然进化的计算方法的思想源泉。以生物进化过程为基础，计算科学学者提出了各种模拟形式的计算方法。

早在1962年，John Holland在发表的论文《Outline for a logic theory of adaptive systems》^[63]中提出了利用群体进化的思想。他指出新的群体应当基于当前群体的有效性来产生。他同时并引进了群体、适应值、复制、变异、交叉等基本概念。1975年，Holland出版了专著《Adaptation in natural and artificial systems》^[64]，该书系统地阐述了遗传算法的基本理论和方法，提出了对遗传算法的理论发展极为重要的模式理论，其中首次确认了选择、交叉和变异等遗传算子，以及遗传算法的隐含并行性，并将遗传算法应用于适应性系统模拟、函数优化、机器学习、自动控制等领域。

目前，遗传算法已成为一个多学科、多领域的重要研究和应用方向。

4.1.2 传统优化算法的发展和缺陷

工程优化的目的是以尽可能高的效率求得技术系统中尽可能优的设计方案及尽可能优的解。传统的优化设计仍然以数学规划方法为主，在解决工程混合离散寻优问题时，存在的主要问题如下：

(1) 基于确定性规则的计算方法：主要用于处理能用数学式表达的参数优化，通过求目标函数导数的零点或一系列迭代计算过程来求最优解。这类方法要求目标函数有较好的连续性或可微性。

(2) 枚举法：在有限的或被离散化的搜索空间中逐一比较每一点的目标函数值，找出最优解。当搜索空间比较大时，计算量的迅速增加将使这类算法失效。

(3) 随机算法：这类算法主要有Monte Carlo法和模拟退火法。前者盲目性大；后者从一点到另一点的迭代过程易陷入局部最优解。

4.1.3 遗传算法的特点

遗传算法作为一种启发式搜索寻优技术^[62]，之所以受到越来越多人的青睐，在于它是一种弱方法，具有很强的鲁棒性，即它能适应不同的环境、不同的问题，并在大多数情况下都能得到比较满意的解。

和传统的优化方法(主要有枚举法、启发式算法和搜索算法等)相比，遗传算法具有以下一些特点：

(1) 遗传算法是对变量的编码进行操作，而不是对变量本身。传统的优化算法往往直接利用变量的实际值本身来进行优化计算，但遗传算法不是直接以变量的值，而是以变量某种形式的编码为运算对象。

(2) 遗传算法直接以目标函数值作为搜索信息，对优化问题的限制极少，既无可微性要求，也无连续性要求，仅仅需要影响搜索方向的目标函数和适应度函数。传统的优化算法不仅需要利用目标函数值，而且往往需要目标函数的导数值等其它辅助信息才能确定搜索方向。

(3) 遗传算法同时使用多个搜索点的搜索信息。传统的优化算法往往是从解空间中的一个初始点开始最优解的迭代搜索过程，单个搜索点提供的搜索信息少，效率不高，有时甚至使搜索过程陷于局部最优解而停滞不前。而遗传算法同时搜索解空间内的许多点，因而可以有效地防止搜索过程过早地收敛于局部最优解，有较大把握求得全局最优解。

(4) 遗传算法使用概率搜索技术。很多传统的优化算法往往使用确定性的搜索方法，有确定的转移方法和转移关系，初始点的选择对最后搜索结果起决定性的作用。而遗传算法属于一种自适应概率搜索技术，其运算过程是以概率的方式来进行的，增加了搜索过程的灵活性。尽管这种概率特性也会使群体中产生一些适应度不高的个体，但随着进化过程的进行，新的群体中总会产生出很多优良的个体，实践和理论都已证明在一定条件下遗传算法总是以概率 1 收敛于问题的最优解。

(5) 遗传算法具有显著的隐并行性(implicit parallelism)。遗传算法虽然在每一代只对有限解个体进行操作，但处理的信息量为群体规模的高次方。

(6) 遗传算法具有很强的鲁棒性，即在存在噪声的情况下，对同一问题的遗传算法的多次求解中得到的结果是相似的。遗传算法的鲁棒性在大量的应用实例中得到了充分的验证。

遗传算法的这些特点决定了它是解决离散变量优化问题的有效手段之一。

在具有大量离散点的产品人机形态设计方面，遗传算法也可以作为一种新的计算方法而引入进来。

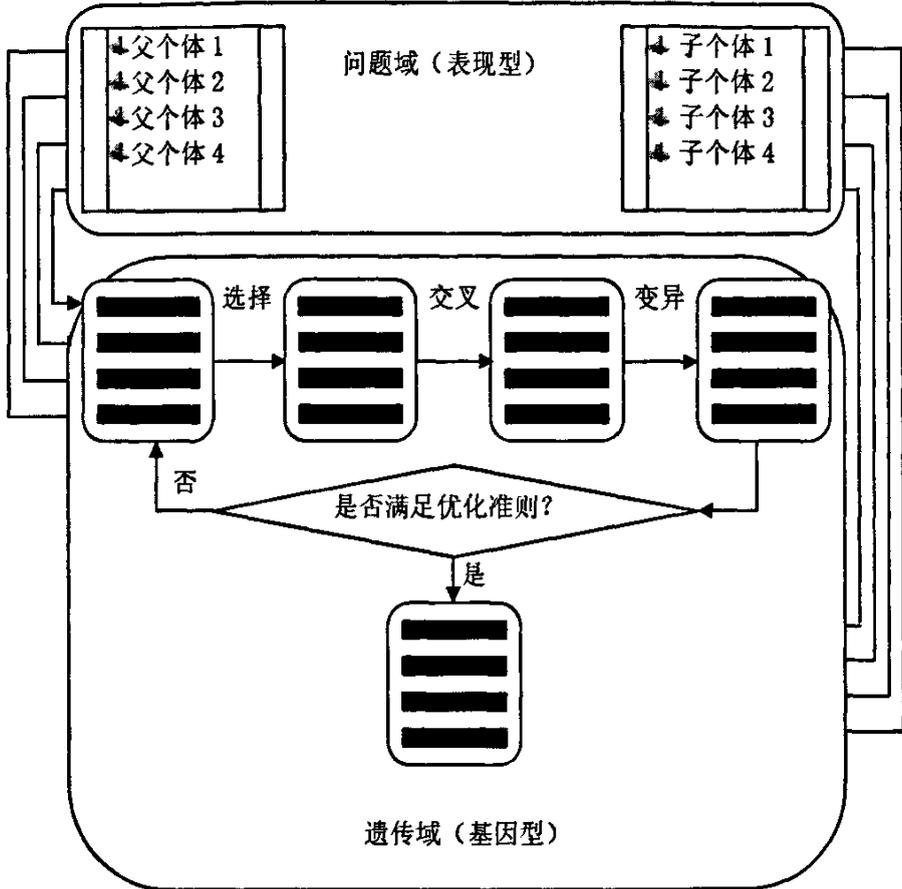


图 4-1 遗传算法的运算过程图

4.1.4 遗传算法的运算过程

遗传算法是从代表问题可能潜在解集的一个种群开始的，而一个种群则由经过基因编码的一定数目的个体组成。每个个体实际上是染色体带有特征的实体。染色体作为遗传物质的主要载体，即多个基因的集合，其内部表现（即基因型）是某种基因组合，它决定了个体形状的外部表现。因此在一开始就需要实现从表现型到基因型的映射即编码工作。初代种群产生之后，按照适者生存和优胜劣汰的原理，逐步演化产生出越来越好的近似解。在每一代，根据问题

域中个体的适应度大小挑选个体，并借助于自然遗传学的遗传算子进行组合交叉和变异，产生出代表新的解集的种群。这个过程将导致种群像自然进化一样的后世代种群比前代更加适应于环境，末代种群中的最优个体经过解码，可以作为问题近似最优解。遗传算法的过程如图 4-1 所示。

4.1.5 基于遗传算法的产品人机形态设计的优点

本文将基因遗传算法的优势特点和产品的形态设计的特点结合起来，提出了应用基因遗传算法进行产品人机形态设计的优化设计方法。该设计方法相较传统的产品形态设计方法具有以下优点：

- (1) 该方法是一种科学的优化搜索算法，能够极大的提高设计效率；
- (2) 该方法给出人体参数变化规律，提供完整参考系列，为产品的人机形态设计及研究等工作创造条件。
- (3) 该方法避免设计师的主观领悟力和判断能力对设计结果的不利影响；
- (4) 该方法使设计规范化，简化设计工作，缩短设计周期。
- (5) 该方法简化生产工艺过程，提高系统的质量和可靠性，降低生产成本。
- (6) 该方法有利于技术工人的培训，既可以减少培训时间，又可以提高培训质量。
- (7) 该方法为产品形态创新和形态自动化设计提供了一种新的方法和途径。

4.2 产品人机形态设计遗传算法流程

遗传算法实施步骤包括基因编码、初始群体生成、适应度评估、选择、交叉和变异。本章主要讨论与人机工程设计相关的几个关键问题，即基因编码、初始群体生成、适应度评估和选择。

应用遗传算法的产品人机形态设计，除具有遗传的一般特点之外，还具有它本身的特点。NURBS 曲面的节点是由一系列混合离散的人体尺寸变量^[65]来表示的，而该曲面的基因型是由一系列节点参数组成的二进制编码向量。遗传算法设计程序通过对基因型的操作来实现对表现型(即曲面形状)的控制，所有约束条件和用户输入选项最终也都转换为对基因型的操作规则。从基因型到表现型的方程式，再从表现型方程式到表现型视觉形态这两个的过程则由程序来完成。

成。

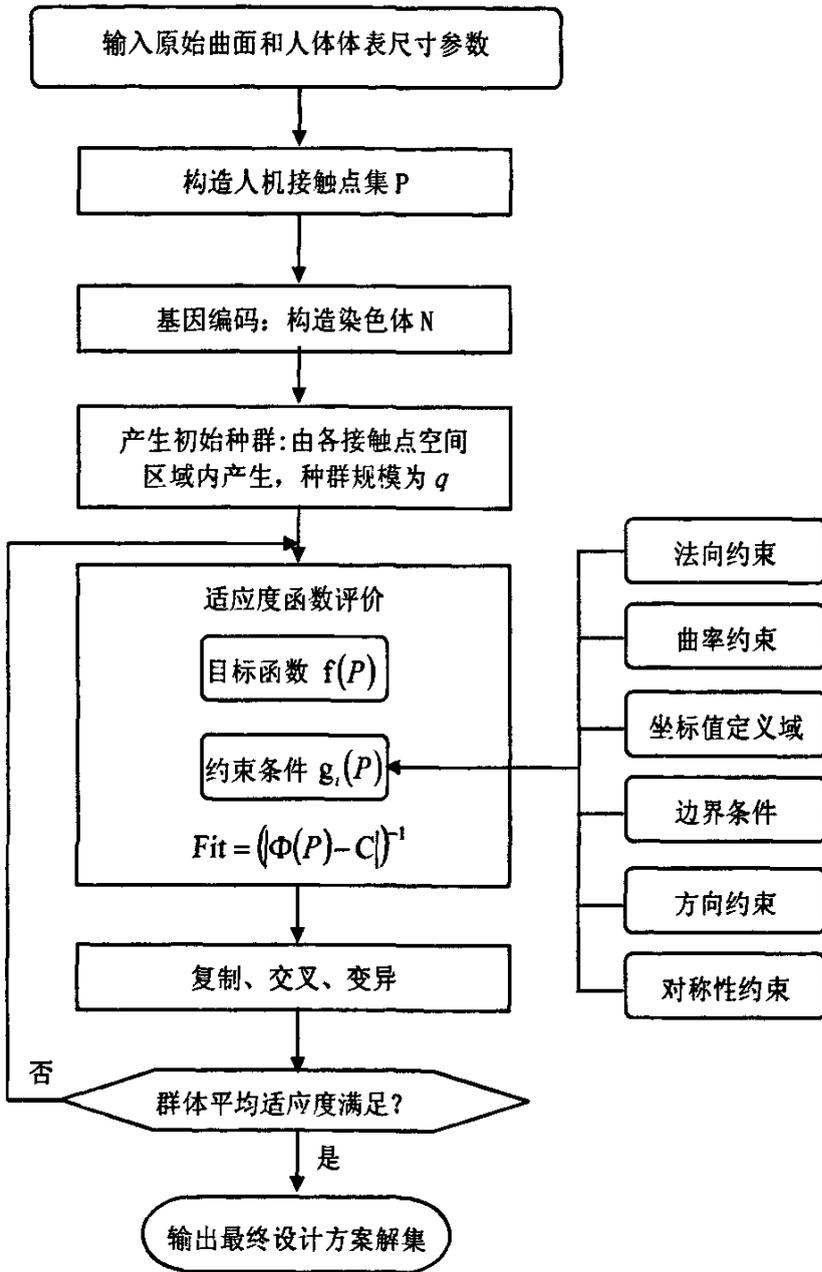


图 4-2 产品人机曲面形态的遗传算法流程

在对人机曲面形态的设计问题参数依次进行初始化、基因编码、产生初始种群、适应度计算、选择等操作后，还将要进行交叉、变异运算，以便产生新一代的种群进行下一轮的计算。在进行若干代计算后，若运算结果满足设计要求，则解码并输出最终的设计方案。交叉运算和变异运算采用通常的运算方法（交叉采用一点交叉、两点交叉或多点交叉的方式，变异采用单点变异、二点变异或多点变异的方式）即可满足问题要求。产品的人机形态设计遗传算法流程如图 4-2 所示。

4.3 人机形态设计问题的基因编码

遗传算法中进化过程是建立在编码机制基础上的，虽然二进制编码的个体稳定性比浮点数码稍差，变异的最小量不能任意小，它受到编码长度的限制，但是二进制编码比浮点数码搜索能力强，而且随着种群大小的增加这种差别越明显，所以更适合于空间点集的搜索特性，综合考虑上述情况和人机接触点问题的特点，本文采用二进制编码作为人机设计问题的编码方式。

4.3.1 二进制基因编码

进行基因编码，首先要处理的是染色体位串表示与设计变量的映射问题。

如果用一个长度为 l 的二进制位串表示一个十进制离散变量 X ，则可表示 2^l 个十进制数。假定变量 X 的上、下界约束为： $X^L \leq X \leq X^U$ ，则十进制参数值向二进制的映射方程为：

$$X = X^L + \frac{(X^U - X^L)y}{2^l - 1} \quad (4-1)$$

式中， y 由二进制位串解码的整十进制数，且 $0 \leq y \leq 2^l - 1$ 。该式也定义了二进制数 y 向十进制数 X 的映射，即： $B^n : f \rightarrow R^n$ 。这里 B 为二进制数空间， R ，为十进制数空间。

由上式定义的映射 f 即可看作一个近似的连续映射，也可看作一个离散映射。 f 映射的离散间隔为： $\Delta = \frac{(X^U - X^L)}{2^l - 1}$ 。 l 越大，离散间隔越小。显然当 $l \rightarrow \infty$ 时，有 $\lim_{l \rightarrow \infty} \Delta = 0$ ；这时映射 f 成为一个连续映射。当然 l 太大将会导致计算量剧增，以及内存需求的剧增。

采用上面的映射方程，将使得GA算法处理离散变量优化问题、连续变量优化问题和连续混合变量优化问题都可按照统一的方式来处理。当一个设计点有 n 个设计变量时，可将这 n 个 l 位串连接成一个完整的串，即称之为染色体。

对于均匀离散设计变量的优化问题：设 N_i 为第 i 个均匀离散设计变量 x_i 的自然数，则第 i 个均匀离散设计变量 x_i 的值可由下式确定：

$$x_i = x_i^l + (N_i - 1) \text{dsp}_i, \quad i = 1 \sim n \quad (4-2)$$

由此可知，对每类设计变量 x_i 与自然数 N_i 均形成了一一对应的关系，即当所有自然数 $N_i (i = 1 \sim n)$ 确定后，所有设计变量的值即可随之确定。这样，问题的关键就由原来寻找合适的设计变量 $x_i (i = 1 \sim n)$ 的值转化为用遗传算法确定合适的自然数 $N_i (i = 1 \sim n)$ 的值。

4.3.2 曲面设计变量的二进制基因编码

应用遗传算法的人机设计就是将人机接触点的位置空间 (x_y, y_y, z_y) 和参与状况(在接触面上的权重 w_y)进行合理编码，从表现型转换为基因型，使之能反映出人机设计方案的要求，并具备算法操作的可行性。

根据5.3.1节中的基因编码方式即可构建适合遗传运算解的形式。

分析NURBS曲面 $S(u, v)$ 的构成可知：当 u, v 给定的情况下，曲面的形状取决于空间点集 P 的组成情况和相应的接触点的约束情况。因此对空间点集 P 进行优化，优化的目标是“人机交互NURBS曲面更吻合人体的部位形态和工位形态”，优化的方法是根据目标函数 $f(P)$ 和约束限制条件 $g_y(P)$ 进行遗传运算。

空间点列 P 的二进制编码：

变量 x 作为实数，可以视为遗传算法的表现形式，从表现型到基因型的映射称为编码；就二进制编码而言，就是将某个变量值代表的个体表示为一个 $\{0,1\}$ 二进制串。考虑到空间点列 P 由 $m \times n$ 个点构成，且每个点都由4个基因位 (x_y, y_y, z_y, w_y) 组成；若设每个基因位的长度为 l ，这样每个点的基因位数目(串长)为 $4l$ 。将 $m \times n$ 个位串连接成一个完整的串(染色体)，则空间点列 P 的染色体长度为 $m \times n \times (4l)$ 。当 m 和 n 取较大值时，空间点列 P 的染色体长度将相当可观，将会使计算量大大增加；为此将人机交互接触面按使用功能等进行面的分

割，以降低 m 和 n 的大小，减少计算量；分割的子面各自应用遗传算法进行计算。

分割的子面由面上各接触点构成，各接触点彼此相对独立，属于离散设计变量。因此可采用离散变量优化算法。设分割子曲面的点集为：

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n'} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n'} \\ \cdots & \cdots & p_y & \cdots \\ p_{m'1} & p_{m'2} & \cdots & p_{m'n'} \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

式中： $m' < m$ ， $n' < n$ 。若 N_y 为一对应于第 $i \times j$ 个设计变量 p_y 的自然数，则第 $i \times j$ 个设计变量 p_y 的值为：

$$p_y = p_y^L + (N_y - 1) \text{dsp}_y \quad (4-4)$$

式中： $p_{i,j} = [x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j}, w_{i,j}]$ ， $p_{i,j}^L = [x_{i,j}^L, y_{i,j}^L, z_{i,j}^L, w_{i,j}^L]$ ， $N_{i,j} = [N_{i,j}^x, N_{i,j}^y, N_{i,j}^z, N_{i,j}^w]$ ， $\text{dsp}_{i,j} = [\text{dsp}_{i,j}^x, \text{dsp}_{i,j}^y, \text{dsp}_{i,j}^z, \text{dsp}_{i,j}^w]$ ， $i < m'$ ， $j < n'$ ， p_y^L 为第 $i \times j$ 个设计变量 $p_{i,j}$ 取值范围的下限， $\text{dsp}_{i,j}$ 为第 $i \times j$ 个均匀离散设计变量的离散间隔。

由上式可知，设计变量 p_y 与 N_y 形成一一对应的关系。这样，问题就由原来的寻求合适的设计变量 p_y 的值转化为用遗传算法确定合适的自然数 N_y 的值。

4.4 初始种群的产生

将每个接触点处的子空间均匀等分，由此产生许多小区域，从这些众多的小区域中随机地选取 q 个原始解，每个原始解可视为一个祖先，这 q 个原始解就构成了最原始的群体，即初始种群。对于人机交互的接触点集而言，其周围空间可以产生 $(N_y)^4$ ($N_y = 1, 2, 3, \dots, n$ ，为了控制运算规模，一般 N_y 取较小的自然数) 个小区域，从 $(N_y)^4$ 个小区域中随机地选取 q 个原始解构成初始种群。 q 的取值范围一般在 (100-200) 之间。

由于将变量等分而产生的初始种群遍及整个解空间，因而能很好地适应问题求解空间的性态，更能体现人机设计问题所描述的生态环境。

4.5 适应度函数的建立

遗传算法在进化搜索中基本不利用外部信息，仅以适应度函数为依据，利用种群中每个个体的适应度值来进行搜索。因此适应度函数的选取至关重要，直接影响到遗传算法的收敛速度以及能否找到最优解。通常情况下，适应度函数是由目标函数变换而成的。

适应度函数 Fit 是个体好坏的评价标准， Fit 愈大，表示该个体的质量愈好。影响产品人机形态的评价尺度的因素主要存在下列几种情况：

- (1) 人体的生理特点：静态的人体部位尺寸(百分位)，动态的人体测量数据，人体生物力学因素(质量、重心、人身体的惯性、肌肉力)等；
- (2) 制造或技术上的实现情况；
- (3) 设计师的形态创新、影响形态的功能创新，顾客的喜爱要求、功能结构的限制等；
- (4) 形态的确定性要求，比如匀称、对称等。

由于第一个因素对于产品的人机形态影响更为显著，在构造适应度函数时以第一个因素作为主要的考虑对象，其它因素可以通过增加适当的罚因子(罚函数)形式来进行修正和弥补。

理想的人机形态是所有接触点尺寸都位于最优区间的中心。但是由于这些接触点之间还存在一定的相互牵制情况，所有在大多数情况下，很难同时达到最优，因此以关联尺寸距离最优区间中心的标准差来作为适应度函数的构造手段。

4.5.1 目标函数 $f(P)$ 的构建

目标函数是按所有接触点尺寸都位于最优区间的中心为方向来构建的。设 $P_{i,j}^* = [x_{i,j}^*, y_{i,j}^*, z_{i,j}^*]$ 是第 i, j ($i \in 1 \sim m, j \in 1 \sim n$) 个接触区间内的最优接触点，也即为自变量；在该区间内随机地给出若干个初始点 $P_{i,j}^t = [x_{i,j}^t, y_{i,j}^t, z_{i,j}^t]$ ($t \in 1 \sim \tau, \tau$ 为比较小的自然数)， $w_{i,j}^*$ 为该最优接触点的权值。则就有目标函数 $f(P)$ ：

$$f(P) = \sum_{i,j=0}^{i=m,j=n} w_{i,j}^* \sum_{t=1}^{\tau} \sqrt{(x_{i,j}^* - x_{i,j}^t)^2 + (y_{i,j}^* - y_{i,j}^t)^2 + (z_{i,j}^* - z_{i,j}^t)^2} \quad (4-5)$$

根据离散变量变换关系表达式 (4-4)，则有 $f(N)$ ：

$$f(N) = \sum_{i,j=0}^{i=m, j=n} N_{i,j}^{w*} \sum_{i=1}^{i=i'} \sqrt{(N_{i,j}^{x*} - N_{i,j}^{x0})^2 + (N_{i,j}^{y*} - N_{i,j}^{y0})^2 + (N_{i,j}^{z*} - N_{i,j}^{z0})^2} \quad (4-6)$$

式中： $N_{i,j}^{x*}$ ， $N_{i,j}^{y*}$ ， $N_{i,j}^{z*}$ ， $N_{i,j}^{w*}$ 为自变量，表示第*i*×*j*点的目标解(即最优解)； $N_{i,j}^{x0}$ ， $N_{i,j}^{y0}$ ， $N_{i,j}^{z0}$ ， $N_{i,j}^{w0}$ 为第*i*×*j*区间内所随机给定的初始值。为了控制运算规模，一般 $N_{i,j}$ 取较小的自然数。

4.5.2 约束条件的建立

确定合理约束条件是遗传算法中非常重要的一个环节，它是保证计算结果满足要求的重要方面。遗传算法本身不具有约束函数的处理能力，但是对于一个具体的产品优化设计问题，无论是在概念设计阶段，还是在详细设计阶段，都存在着相应的约束条件。因此在应用遗传算法时，必须将一个约束条件下的优化问题转化为无约束的优化问题。本文采用基于罚函数的罚函数类方法来处理约束条件问题。

由于遗传算法只能求函数的极小值问题，因而本节将所有的约束条件都归结为 $g_j(p) \leq 0$ 的形式。其它不符合这种形式的约束条件表达式(方程)等，则通过一定的数学方法转化为这种约束表达式形式。

根据第3.4节中的“人机接触曲面形态的约束条件”和本节开始提到的“影响产品人机形态的评价尺度的因素”等内容，可以确定目标函数 $f(p)$ 自变量的约束条件。

人机接触曲面形态的约束方式主要有：曲率约束、法向约束、边界条件、方向约束和对称性约束等；产品人机形态的评价尺度的因素主要有：人体的生理特点因素、形态创新因素、功能结构因素、形态的确定性要求因素等。这些约束条件分别适应于各种不同的人机曲面形态，约束情形各不相同，形式复杂，变化多端，在此不能一一列举出来。此处仅仅就一些常用的约束条件进行说明如下。

4.5.2.1 接触顶点坐标值定义域

对接触顶点的坐标值定义域由产品形态设计师根据曲面的最终形状和人机尺寸测量数据给定的。

设人机形态面上第*i*×*j*个接触点 $p_{i,j}$ 的各参数的区间分别为：

- ①. 坐标值: $x_{i,j} \in (x_{i,j}^L, x_{i,j}^U)$, $y_{i,j} \in (y_{i,j}^L, y_{i,j}^U)$, $z_{i,j} \in (z_{i,j}^L, z_{i,j}^U)$;
 ②. 接触点的权重: $w_{i,j} \in (w_{i,j}^L, w_{i,j}^U)$;

由式 (3-4), 则定义的约束条件如下:

$$\begin{cases} g_{i,j}^x(x) = x_{i,j}^L + (N_{i,j}^x - 1) \text{dsp}_{i,j}^x - x_{i,j}^U \leq 0; & g_{i,j}^y(y) = y_{i,j}^L + (N_{i,j}^y - 1) \text{dsp}_{i,j}^y - y_{i,j}^U \leq 0 \\ g_{i,j}^z(z) = z_{i,j}^L + (N_{i,j}^z - 1) \text{dsp}_{i,j}^z - z_{i,j}^U \leq 0; & g_{i,j}^w(w) = w_{i,j}^L + (N_{i,j}^w - 1) \text{dsp}_{i,j}^w - w_{i,j}^U \leq 0 \end{cases} \quad (4-7)$$

4.5.2.2 曲面的接触点约束条件

根据第 3.4.2 节的内容, 当曲面需要通过给定的接触点时, 或者在某个比较小的误差内通过型值点时, 则会有如下的约束条件。

由式 (3-5) 可得:

$$\begin{cases} |s_u(u, v) - p_u| - \varepsilon \leq 0 \\ |s_v(u, v) - p_v| - \varepsilon \leq 0 \end{cases} \quad (4-8)$$

式中: ε 为给定的一足够小的正数。

4.5.2.3 曲面的 (偏) 导矢约束条件

由式 (3-6), 则定义的曲面在参数 (u^*, v^*) 处的 u 向切矢 \mathbf{T} 的约束条件为:

$$|s_u(u, v) - \bar{T}| - \varepsilon \leq 0 \quad (4-9)$$

式中: ε 为给定的一足够小的正数。

由式 (3-7) 和式 (3-8), 同理可得已知 v 向切矢和已知 u 向和 v 向两个方向的切矢约束条件为:

$$\begin{cases} |s_v(u', v) - \bar{T}| - \varepsilon \leq 0 \\ |s_{uv}(u', v') - \bar{T}| - \varepsilon \leq 0 \end{cases} \quad (4-10)$$

4.5.2.4 曲面的参数曲线约束条件

由式 (3-9) 所示, 当曲面需通过指定的参数曲线时则会由如下的约束条件:

$$|s(u, v^*) - c(u)| - \varepsilon \leq 0 \quad (4-11)$$

4.5.2.5 体压分布的约束条件

根据体压在人机接触点区域的分布函数关系,由式(3-10)则定义的约束条件如下:

$$\left| \sum_{i=1}^n \int_{A_i} P(A_i) dA - \text{Press} \right| \leq \varepsilon \quad (4-12)$$

4.5.3 适应度函数的建立

由于遗传算法只能求函数的极大(小)值,因而适应度函数按如下方法处理:

根据式(4-5)的目标函数和式(4-7, 8, 9, 10, 11)的约束条件(设约束条件用 $g_{i,j}(P) \leq 0$ 表示),则离散类型的人机曲面形态的优化问题可以表示如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(P); \\ \text{s.t.} \quad & g_{i,j}(P) \leq 0, \quad (i=1 \sim m, j=1 \sim n) \end{aligned}$$

则适应度函数为:

$$\text{Fit}_t(P) = \frac{1}{|\Phi_t(P) - C|}, \quad t=1 \sim q \quad (4-13)$$

$$\text{其中 } \Phi_t(P) = f_t(P) + r \sum_{i,j=0}^{i < m', j < n'} \max\{0, g_i(P)\}, \quad t=1 \sim q。$$

式中: r ——罚因子,为一足够大的正数;

C ——给定的系数(足够小的负数);

q ——种群中的个体数。

Fit_t 愈大,表示该个体的质量愈好。

为了充分考虑目标函数 $f(P)$ 和约束条件 $g_{i,j}(P) \leq 0$ 对适应度函数的影响而

引入罚因子 r 和常数 C 。罚因子 r 和系数 C 是这样给定的: $r \times \sum_{i,j=0}^{i < m', j < n'} \max\{0, g_i(P)\}$ 的值与 C 的值相比较时,它们位于同一个数量级的范围内。

4.6 选择

选择是用来确定重组或交叉的个体,以及被选个体将产生多少个子代个体。常用的有“按比例适应度分配的选择法”和“基于排序的适应度分配选择法”。

4.6.1 按比例适应度分配选择法

按比例适应度分配的选择方法就是把当前群体中的个体按照与适应度大小成比例的概率复制到新群体中，利用比例于各个个体适应度的概率决定其子孙的遗留可能性，即适应度大的个体，将被赋予更大的选种概率。但是按比例选择方法在选择操作时会出现以下问题：

(1) 在遗传进化的初期，通常会产生一些超常的个体，若按照比例选择法，这些异常个体因竞争力太突出而控制了选择过程，影响算法的全局优化性能。

(2) 在遗传进化的后期，即算法接近收敛时，由于种群中个体适应度差异较小，继续优化的潜能降低，可能获得某个局部最优解。

4.6.2 基于排序的适应度分配选择法

基于排序的适应度分配是按照种群目标值进行排序。适应度仅仅取决于个体在种群中的序位，而不是实际的目标值。排序方法克服了比例适应度计算的尺度问题，当选择压力太小的情况下，以及选择导致搜索带迅速变窄而产生的过早收敛。因此再生范围被局限。排序方法引入种群均匀尺度，提供了控制选择压力的简单有效的方法。此外排序方法比比例方法表现出更好的鲁棒性。

设 q 为种群大小， Pos 为个体在种群中的序位， SP 为选择压力，个体的适应度可以计算如下^[8]：

$$Fit(Pos) = 2 - SP + \frac{2(SP-1)(Pos-1)}{q-1}, \quad SP \in [1.0, 2.0].$$

$$\text{选择强度: } SelInt_{Rank} = \frac{SP-1}{\sqrt{\pi}}.$$

$$\text{选择方差: } SelVar_{Rank}(SP) = 1 - ((SP-1)^2 / \pi) = 1 - SelInt_{Rank}^2 SP^2.$$

选择概率: $p_i = c(1-c)^{i-1}$; i 为个体排序序号， c 为排序第 1 的个体的选择概率。

为了避免按比例选择出现的问题，该遗传算法采用基于排序的适应度分配法，同时将适应度采用线性变换，将“贫富”差距拉开。设变换后的适应度函数为 Fit' ，则线性变换可用下式表示：

$$Fit' = \alpha \times Fit + \beta \tag{4-14}$$

其中 $\alpha = \frac{Fit_{avg}}{Fit_{avg} - Fit_{min}}$ ， $\beta = \frac{-Fit_{min} \times Fit_{avg}}{Fit_{avg} - Fit_{min}}$ ； Fit_{avg} ， Fit_{min} 分别为每一代染色体群体的平均适应度和最小适应度。

4.7 交叉/基因重组和变异

4.7.1 基因交叉/重组

基因重组是把两个父个体的部分结构,按照选定的交叉方式及确定的交叉概率 P_c ,加以替换重组而生成新个体的操作,重组的目的是为了能够在下一代产生新的个体。交叉重组操作使遗传算法的搜索能力得以极大地提高。

交叉方式有一点交叉、多点交叉和一致交叉。如随机选择两个父辈染色体:

$$\begin{cases} S = S_1 S_2 \dots S_{h-1} | S_h \dots S_w \\ T = T_1 T_2 \dots T_{h-1} | T_h \dots T_w \end{cases} \xrightarrow{\text{交叉运算}} \begin{cases} S = S_1 S_2 \dots S_{h-1} | T_h \dots T_w \\ T = T_1 T_2 \dots T_{h-1} | S_h \dots S_w \end{cases}$$

4.7.2 基因变异

重组之后是子代的变异,子个体变量以很小的概率或步长产生转变,变量转变的概率或步长与维数(即变量的个数)成反比与种群的大小无关。变异本身是一种局部随机搜索,与选择/重组算子结合在一起,保证了遗传算法的有效性,使遗传算法具有局部的随机搜索能力;同时使得遗传算法保持种群的多样性,以防止出现非成熟收敛。

对于字符集 $\{0,1\}$ 的二值码串来书,变异操作就是把某些基因位上的基因值取反。一个个体中可能有 $P_m \cdot l$ 个基因位被变异操作翻转, P_m 是变异概率, l 是基因串长。

例如:变异前1010101,进行变异操作后,则为1010111,串中的第6位发生了变异。

交叉运算和变异运算采用通常的运算方法(交叉采用一点交叉、两点交叉或多点交叉的方式,变异采用单点变异、二点变异或多点变异的方式)即可满足问题要求。

4.8 小结

本章从遗传算法的思想基础和发展历史入手,阐述了遗传算法的特点及其运算过程,建立了产品人机形态设计的遗传算法流程。在此基础上,分析了曲面设计变量的二进制基因编码,产生了初始种群;详考察了目标函数和约束条件的建立方法,进而建立了曲面形态设计的适应度函数;然后通过选择、交叉/基因重组和变异等步骤,最终完成了以遗传算法为应用工具的产品人机形态

设计流程。

相较传统上只依靠设计师的人机设计方法来说，应用遗传算法的产品人机形态设计方法则是将遗传算法的优化技术应用于产品形态设计过程之中，经过运算最终获得较为理想的设计参数。这种思想方法其实也是优化设计的思维基点，它不仅明显地提高设计质量及效率，也为进一步改进设计方法提供了可行的手段。

第五章 座椅人机形态的应用实例

随着科技的发展和人们生活水平的日益提高，人们对座椅舒适性的要求越来越高，但是，现阶段我国产品设计师对座椅的设计手段相对落后，往往采用比照的方法，座椅的舒适性考虑的相对较少，因此采用人机工程学的原理和方法指导座椅的设计，已经成为座椅设计发展的必然趋势。

5.1 座椅人机工程分析

座椅的人机工程设计离不开坐姿，当座椅的形态曲线正好符合人的后背（特别是脊椎）的自然形态时，乘坐的人将感到最舒适^[66]。最早使用人体解剖学的观点研究舒适性的是瑞典的整形外科医生本·阿盖布罗姆（Beng Akerblom）^[11]。他在1948年发表的《站与坐的姿势》中，系统地论述了人体不同姿势对肌肉和关节的影响，并与1954年完成了著名的阿盖布罗姆座椅靠背曲线，如图5-1所示。

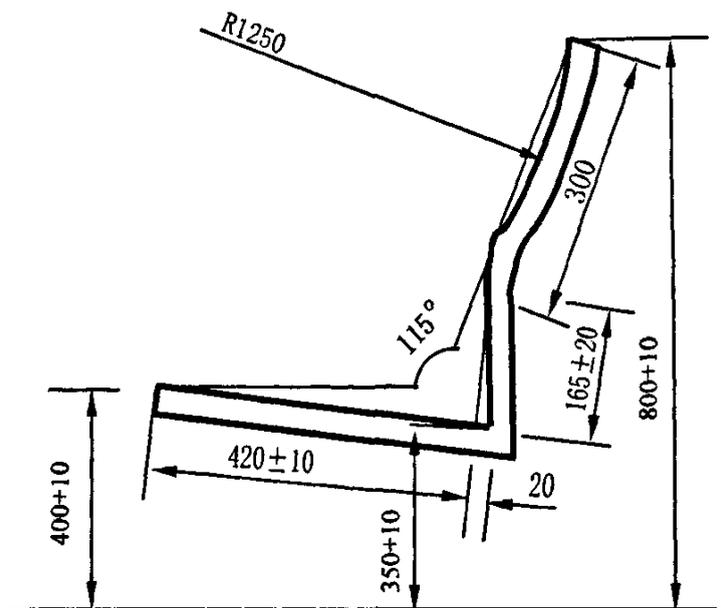


图 5-1 Akerblom 椅背曲线

符合人体形态尺寸的座椅，有利于发挥其支撑人体的功能。本文依据人体尺寸测量数据，以座椅设计为例，对座椅靠背的人机形态进行细致的分析，并应用遗传算法进行靠背的人机形态设计，最终得到了理想的效果。

靠背的人机形态应满足的人机工程设计要求如下：

(1) 良好的静态特性

座椅的尺寸和形状应使人坐姿合适，体压分布合理，触感良好，并能调整尺寸与位置，以保证坐时稳定舒适，操作方便，视野良好。

(2) 良好的动态特性

目的是缓和座椅运动过程中的冲击和振动，保证座椅用户可以长时间使用而不感到疲劳。由于坐姿是将人体直接竖直接触在座椅椅面上，而椅面高于地面，因此当座椅椅面有强烈的摇动时，人体的摇摆幅度也将很大。不过人体可以通过臀部肌肉和脊椎的关节减轻振动对上肢的影响，可是座椅靠背的摆动则是直接打在人的脊背上，且靠背的振幅大于椅面的振幅，因此当振动时，靠背对人体上肢的影响还要大一些。

(3) 结构紧凑，形态美观大方。紧凑的结构也是保证座椅强度的一个重要方面。

5.2 人体坐姿的结构分析

坐姿时人体的支撑结构主要有：脊柱、骨盆、腿和脚^[11]。从座椅的设计观点而言，这其中最为关键的部位是脊椎和骶椎，该部分承受着坐姿时人体的大部分体重负荷，所以良好的坐姿的必要条件是体重产生的压力能分布于各脊椎骨之间的椎间盘上，以及最适当、最均匀的静态负荷于所附着的肌肉组织上。

分析人体的脊椎结构可以看到，脊柱由 33 块脊椎骨组成，相邻两个脊椎骨依靠复合韧带和介与其中且富有弹性的椎间盘而连接起来。从侧面看，脊柱有四个生理弯曲：颈弯、胸弯、腰弯以及骶弯。因此脊柱也被分为四个区段，从上到下依次是：颈椎、胸椎、腰椎和骶尾骨。相邻两节椎骨之间的活动量较小，但作为一个整体的脊柱则具有较大的活动范围。脊柱可绕额状轴作前后屈伸运动，绕矢状轴作左右侧屈运动，绕垂直轴作回转运动和环转运动。

座椅对人体的姿态的影响主要是前后的屈伸运动。人体屈伸的过程中，胸椎的变形量很小，头和骶部没有变形，变形量最大的是颈椎和腰椎；因此可以

将上体简化成三段式的模型。将头、胸和骨盆看作三个不变的部分，颈椎及腰椎为连接三个区段的挠性关节。在坐姿中支撑上体的脊柱的侧面支点为：坐骨点、腰椎点、肩胛点和枕骨点。由于每个人的身高不同，脊椎长度也就不同，因此每个人的脊柱弯曲度和脊柱支点也就存在着一定的差异。这使得靠背的形态设计变得较为复杂。

座椅靠背的设计应该提供合适的腰部曲度，使脊柱能与靠背较好的吻合，从而处于自然均衡状态。处于坐姿时，人体上身是由腰椎来支撑的，而腰椎的变化曲度对于合理而舒适的坐姿起着重要的作用。此外，人体臀部处还有向后突出的骶骨和臀部部位，如果能让腰部能坚实地配合在靠背上，在座垫正上方的靠背就要有一各开口区域或向后倾斜退缩的曲面。

座椅靠背按照支撑部位的不同，可以分为低靠背、中靠背、高靠背和全靠背。相对于低靠背和中靠背而言，座椅靠背则是一种高靠背或全靠背的曲面形态。高靠背有坐骨点、腰椎点和肩胛点三个支撑点，全靠背除三个支撑点，还有枕骨点。座椅靠背的形状应与脊柱自然的弯曲形态相吻合，才能保证脊柱具有一种轻松的姿态。对于靠背而言，腰椎点和肩胛点是两个重要的支撑点，特别是腰椎支撑点，因为坐姿的主要疲劳形式是腰肌疲劳。

5.3 人体坐姿的力学分析

人体重量作用与座椅座垫和靠背上的压力分布称为体压分布，它和乘坐的姿势密切相关^[67]。从人体工程学的观点来说，最舒适的乘坐姿势时，人体的体压分布应该是：

(1) 人体的大部分重量应该有较大的承压面积，使较小的压力合理地分布在座垫和靠背上。

(2) 压力分布应该逐渐地平滑过渡，避免突然的压力变化等。

人体重量作用于座椅上的压力并非均匀分布的，在座垫上的体压分布应使坐骨部分承受的压力最高，由坐骨周围逐渐扩散到整个臀部，直到与座垫前缘相接触的大腿下平面趋于最低值。人体上半身的支撑以及所处的坐姿都是由肩胛和腰椎的变化曲度造成的，对于合理而且舒适的坐姿来说，肩胛和腰椎的支撑非常重要，具体来说，靠背上的体压分布是以肩胛骨和腰椎骨这两个部位的压力最高。这就是所谓的靠背设计中的“两点支撑”的概念。

座椅靠背形态设计就是根据人体坐姿情况下的受力情况，将人体各节脊椎定义为一系列的主接触点，而在每节脊椎对应的身体部位上定义一系列子接触点，则靠背的形状设计就可转化为脊椎接触点参与状态值的求解问题。

5.4 人机接触点集的建立

建立人机接触点集 P 主要考虑构成曲面的关键点的选择。座椅靠的背曲面形状是按人处于坐姿状态时的形态来确立的，此处以脊柱上的肩胛点 p_{12} 和腰椎点 p_{32} 作为主要接触点，为了保证靠背人机曲面的完整性，选择脊椎上的肩胛下点 p_{22} 和腰椎下点 p_{42} 为次要接触点。在这四个脊柱接触点所对应的身体部位上，选择左右两边共 8 个子接触点；即总共选择了肩、背、腰和臀共 12 个接触点，并建立如图 5-2 所示的局部坐标系。

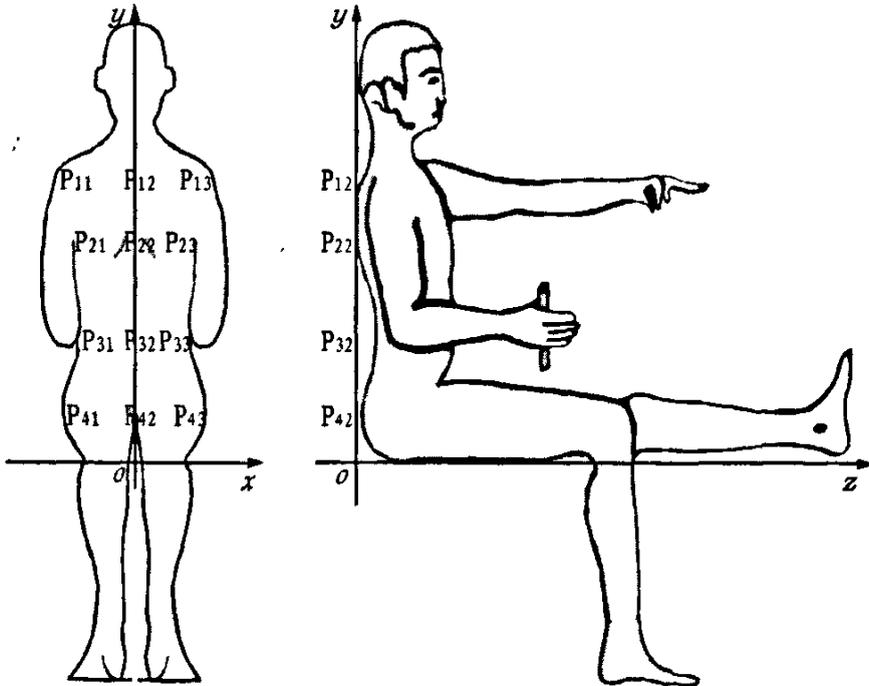


图 5-2 人机形态坐标系

$$\text{由式 (3-1) 可知, 人机接触点集 } \mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} \end{bmatrix}.$$

直接尺寸可以引用GB/T10000—1988(中国成年人人体尺寸)和GB/T 13547—1992(工作空间人体尺寸)中的尺寸或者经过换算得到,间接的人体尺寸则根据第三章的衍生人体尺寸计算方法,从第2.5节中可以得到座椅靠背的衍生人体尺寸,如表2-1所示。这样就可以确定各接触点 $p_{i,j}$ 的区间范围;各接触点处的权值则根据设计要求和受力状况给出。为了保证肩胛区域和腰椎区域为整个靠背的受力集中区,使其承担靠背部分的大部分压力,对肩胛区域的接触点(p_{11} 和 p_{13})以及腰椎区域的接触点(p_{41} 、 p_{42} 和 p_{43})的权重值进行约束,给出较大的权重值,使最后成形的靠背曲面必须尽可能地通过这些接触点。各接触点的坐标值区间和相应的权重如表5-1所示。

表5-1 座椅靠背接触点的坐标值区间和权重

	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{21}	P_{22}	P_{23}
x	(-235, -181)	(-5, 5)	(181, 235)	(-190, -115)	(-5, 5)	(115, 190)
y	(518, 641)	(518, 641)	(518, 641)	(406, 508)	(406, 508)	(406, 508)
z	(-12, 14)	(-3, 29)	(-12, 14)	(-7, 20)	(3, 30)	(-7, 21)
w	(0.9, 1)	(0.8, 1)	(0.9, 1)	(0.6, 1)	(0.5, 1)	(0.6, 1)
	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{41}	P_{42}	P_{43}
x	(-169, -121)	(-5, 5)	(121, 169)	(-230, -165)	(-5, 5)	(165, 230)
y	(251, 310)	(251, 310)	(251, 310)	(114, 156)	(114, 156)	(114, 156)
z	(18, 44)	(28, 54)	(18, 44)	(-10, 16)	(3, 30)	(-10, 16)
w	(0.5, 1)	(0.5, 0.8)	(0.5, 1)	(0.9, 1)	(0.8, 1)	(0.9, 1)

在各接触点区间内,任选一组 $p'_{11} \sim p'_{43}$ 各点的坐标值作为初始值的一组,并将所选择点的坐标区间端点值也作为另外两组初始值参与运算。 $p'_{11} \sim p'_{43}$ 各点的坐标值如表5-2所示。

表 5-2 座椅靠背任取一接触点的坐标值

	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{41}	P_{42}	P_{43}
x	-201	2	185	-196	2	120	-168	5	168	-189	4	229
y	542	530	520	420	410	430	260	270	300	126	146	134
z	5	21	6	10	11	5	20	49	40	-5	4	-2

5.5 确定遗传操作对象和产生初始种群

由于第 $i \times j$ 个接触点 p_{ij} 由 4 个变量构成, 为降低计算量, 在每个接触点的 x 、 y 、 z 和 w 分量上都按 10 等分; 当每个变量各自独立变化时, 根据式 (4-4), 则有 N_x , N_y , N_z , N_w 等 4 个自然数子集, 即遗传操作的对象为自然数集 N , 且 $N = \begin{bmatrix} N_x & N_y \\ N_z & N_w \end{bmatrix}$, 元素 $N_y \in N$ 且 $N_y = 1, 2, \dots, 10$ 。

初始种群 N 的个体 N_y ($N_y \in N$) 由随机函数等概率产生, 初始种群规模 q 的值取 $q = 100$ 。

5.6 建立适应度函数

根据中国成年人人体尺寸标准范围和相应的百分位表示设计的适用域 (即在某一身体尺寸范围内, 用户中有百分之几的大于或小于给定值, 在人体工程设计中常用的是第 1, 第 5, 第 50, 第 95, 第 99 百分位^{[33][68]}), 就可以给出各接触点的约束条件 (即尺寸范围), 现仅列出在肩胛区域中点 P_{11} 处的约束条件, 其它各点以此类推。

因此有点 P_{11} 在 x 、 y 、 z 和 w 等 4 个分量上的范围分别为: $p_{11(x)} \in (181, 235)$, $p_{11(y)} \in (518, 641)$, $p_{11(z)} \in (-12, 14)$, $p_{11(w)} \in (0.9, 1)$; 根据式 (4-7) 则定义边界约束条件为:

$$\begin{cases} g_{11}(N_{x11}) = 5.4N_{x11} - 37.4 \leq 0; & g_{11}(N_{y11}) = 12.3N_{y11} - 135.3 \leq 0 \\ g_{11}(N_{z11}) = 2.6N_{z11} - 28.6 \leq 0; & g_{11}(N_{w11}) = 2.6N_{w11} - 28.6 \leq 0 \end{cases}$$

左右对称约束条件为:

$$\begin{cases} g_{11,13}(N_x) = |N_{x11} - N_{x13}| - \varepsilon \leq 0; & g_{11,13}(N_y) = |N_{y11} - N_{y13}| - \varepsilon \leq 0 \\ g_{11,13}(N_z) = |N_{z11} - N_{z13}| - \varepsilon \leq 0; & g_{11,13}(N_w) = |N_{w11} - N_{w13}| - \varepsilon \leq 0 \end{cases}$$

根据式 (4-5) 有目标函数 $f(N)$:

$$f(N) = \sum_{i,j=0}^{i=m, j=n} N_{i,j}^* \sum_{t=1}^{t=r} \sqrt{(N_{i,j}^* - N_{i,j}^x)^2 + (N_{i,j}^* - N_{i,j}^y)^2 + (N_{i,j}^* - N_{i,j}^z)^2}$$

从而适应度函数为:

$$\text{Fit}_t = \frac{1}{|\Phi_t(N) - C|}$$

式中: $\Phi_t[P] = f_t(P) + r \sum_{i,j=0}^{i=m', j=n'} \max\{0, g_t(P)\}$, $t = 1 \sim q$, $\Phi_t[P]$ 是罚函数, r 是罚因子。

为了充分考虑某些因素对形态曲面的影响, 比如: 不易测量的动态的人体空间尺寸、人体一些生物力学因素(质量、重心、人身体的惯性、肌肉力)等; 设计师的形态创新、顾客的喜爱要求、功能结构的限制等; 可以通过增加(改变)适当的罚因子(罚函数)形式来进行修正和弥补。

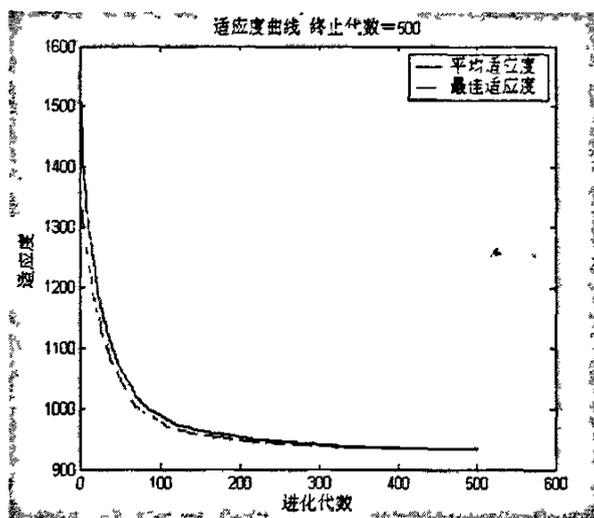


图 5-3 种群进化历程图

5.7 运算结果

在前述各步的基础上, 再进行选择、交叉、变异运算, 交叉概率取为: 0.8, 变异概率取为: 0.05, 并以 Matlab 为平台进行运算; 当种群进化到第 450 代时首次取得最优解, 种群进化历程如图 5-3 所示。

最后运算的结果为 N^* :

$$N^* = \begin{bmatrix} N_x^* & N_y^* \\ N_z^* & N_w^* \end{bmatrix}; \text{ 式中:}$$

$$N_x^* = [8 \ 5 \ 8 \ 3 \ 5 \ 3 \ 6 \ 5 \ 6 \ 4 \ 5 \ 4], \quad N_y^* = [7 \ 7 \ 7 \ 4 \ 4 \ 4 \ 6 \ 6 \ 6 \ 2 \ 2 \ 2],$$

$$N_z^* = [5 \ 6 \ 5 \ 9 \ 5 \ 9 \ 8 \ 6 \ 8 \ 1 \ 6 \ 1], \quad N_w^* = [9 \ 8 \ 9 \ 6 \ 8 \ 6 \ 7 \ 6 \ 7 \ 9 \ 7 \ 9].$$

根据第 4.3 节的离散变量变换关系式 (4-4), 可得 P^* , P^* 各点的坐标值和相应的权值如表 5-3 所示:

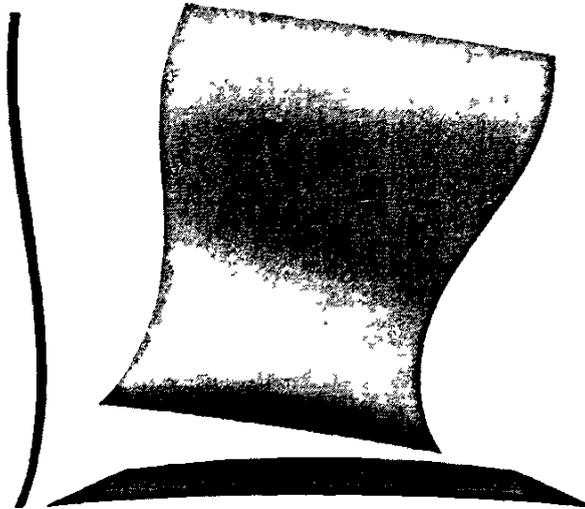


图 5-4 轮椅靠背曲面形态

表 5-3 优化后的接触点坐标值和相应的权值

	P_{11}^*	P_{12}^*	P_{13}^*	P_{21}^*	P_{22}^*	P_{23}^*	P_{31}^*	P_{32}^*	P_{33}^*	P_{41}^*	P_{42}^*	P_{43}^*
x	-219	0	219	-211	0	211	-160	0	160	-203	0	203
y	594	594	594	442	442	442	271	271	271	131	131	131
z	0	9	0	4.5	15	4.5	26	36	26	4	13	4
w	0.9	0.8	0.9	0.6	0.8	0.6	0.7	0.6	0.7	0.9	0.7	0.9

在计算结果的基础上,根据 *NUBRS* 曲面成型原理,运用混合建模软件 *UG* 进行曲面绘制,最终得到的座椅靠背 *NUBRS* 曲面形态如图 5-4 所示。

5.8 小结

在本章以座椅的靠背形态设计为例,说明了遗传算法在产品人机形态设计中的应用过程。应用人机工程原理和遗传算法设计出的座椅靠背曲面,更符合人体的生态曲面形态,使舒适度和美观性都有很大程度的提高。该实例证明了:以人机工程学设计原则为基础的、以遗传算法为计算手段的产品人机形态设计方法是可行的;该方法扩大了遗传算法的应用范围,提高了人机形态建立的准确性;它为产品人机形态创新和形态自动化设计提供了一种新的途径。

第六章 结束语

本论文结合人机工程设计国内外的研究现状和实际情况，以产品的人机曲面形态为研究方向，结合人体的人机学参数研究成果和工业产品形态设计的思想，与实际应用相挂钩，最后以座椅靠背的曲面形态设计为应用实例，对基于遗传算法的人机曲面形态设计技术进行了深入的研究。

6.1 论文的主要工作

(1) 重点分析研究了以国标 GB10000—1988《中国成年人人体尺寸》和国标 GB/T 13547—1992《工作空间人体尺寸》为基础的人体测量尺寸等人机学参数，分析了人体的人体结构尺寸、功能尺寸以及相应的人体尺寸项目，以及对人体测量数据的处理和应用情况；在依据人体结构的部分相关理论的基础上，运用概率和数理统计的方法，建立了人体尺寸变量的正态分布函数，并对人体尺寸变量进行线性回归分析，阐明了非国标项目的衍生人体尺寸的建立方法。

(2) 以人体人机学参数的研究为基础，本章从产品形态介绍入手，细致分析了产品人机接触面的人机交互形式、接触点的构成、人体接触点的生理力学性能、产品表面的物理特性和体压分布等内容，研究了人机接触点的特点、构建方法，以及人机接触曲面形态的约束条件等内容，并在这些工作的基础上建立了 *NURBS* 曲面形式的产品人机接触曲面形态。

(3) 基于遗传算法在离散变量运算方面的突出优势，运用遗传算法研究了人机曲面形态的运算方法和过程。研究了基因编码的分析和选取、分析了目标函数和约束条件的建立方法，并构建了适应度函数；在经过选择、交叉和变异等各步运算之后，建立了基于遗传算法的人机曲面形态设计方法。最后并以座椅靠背曲面的人机形态建立为例，说明了基于遗传算法的产品人机形态的运算过程。

6.2 论文的主要成果

本文在对产品复杂曲面形态人机设计的分析研究等各项工作的基础上，得到以下主要成果和结论：

(1) 通过对以国标 GB10000—1988 和国标 GB/T 13547—1992 为基础的人

体人机学参数的研究,提出了运用概率统计和数理分析的方法,对人体测量项目数据进行变量之间的相互关系进行研究,建立了非国标项目的衍生人体尺寸的求解方法。

(2) 根据产品人机形态理论的分析和研究方法,对产品的人机接触曲面进行了分析和研究,建立了人机接触曲面形态的数学表达方法。

(3) 作为一种鲁棒的随机搜索优化算法,遗传算法在进行人机形态设计时,对评估标准和约束条件都比较复杂的自由曲面求解是一种很好的工具。它为曲面的设计提供了最大限度的可控性,并且可以通过对约束条件和适应度函数的调整,取得较好的寻优方向,这是传统优化方法无法实现的。这就是遗传算法在产品人机形态设计中的应用。

论文在取得了一定成果的同时,也存在很多不足和值得进一步研究的地方。

首先,尽管本论文提出的应用遗传算法进行产品的人机形态设计的方法是可行的,但曲面人机性能的优化设计仍是一项复杂的工作,还需要设计师输入大量的信息来保证优化结果的可靠性。

再次,本论文的研究仅限于提供了一种产品人机形态设计的思路和方法,还需要做深入一步的发展和完善。进一步的研究应集中于设计过程的简化与自动化,这需要把人机工程学原则以及详细的人体形态和物理参数等数据集成在程序内部,以供程序根据具体问题适时判断所要采取的计算与选择策略。

参考文献

- [1] 朱上上, 潘云禾, 罗仕鉴 等. 基于知识的产品创新设计技术研究[J]. 中国机械工程, 2002, 4: 337-340
- [2] 张莉立, 危韧勇. 产品形态设计的分析[J]. 制造业自动化, 2000, 7: 26-28.
- [3] 刘春荣, 人机工程学应用[M], 上海人民美术出版社, 2004.
- [4] 钱学森. 科学的艺术与艺术的科学[M]. 人民文学出版社, 1994.
- [5] 徐军, 陶开山. 人体工程学概论[M]. 中国纺织出版社, 2002.
- [6] 刘肖健, 李桂琴 等. 基于遗传算法的产品人机 CAD 研究[J]. 计算机工程与应用, 2003, 33: 35-38.
- [7] 丁玉兰. 人机工程学[M], 北京理工大学出版社, 1999.
- [8] 王小平, 曹立明著. 遗传算法: 理论、应用及软件实现[M]. 西安交通大学出版社, 西安, 2002.
- [9] 马剑鸿, 杨随先, 李彦. 基于遗传算法的产品人机形态设计研究[J]. 现代制造工程, 2006, 03: 10-13.
- [10] 曹一华. 工业设计概论[M]. 中国轻工业出版社, 2003.
- [11] 曹琦. 人机工程设计[M]. 西南交通大学出版社, 1988.
- [12] 李莉敏, 吴冬青, 唐文献. 基于知识的产品创新设计系统研究[J]. 中国制造业信息化, 2004, 7: 94-96
- [13] 杨大松. 感性设计[J]. 设计新潮, 1998, 3: 13-15.
- [14] 李亦文. 产品设计原理. 北京: 化学工业出版社[M], 2003.
- [15] 刘国余, 沈杰. 产品基础形态设计[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.
- [16] 云庆夏 等 著. 遗传算法和遗传规划: 一种搜索寻优技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.
- [17] 余俊编 著. 现代设计方法及应用[M]. 中国标准出版社, 2002.
- [18] 遗传学编写组. 遗传学[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1983.
- [19] 刘进, 刘希玉. 一种基于遗传算法的创新进化系统实现方法[J]. 计算机应用, 2003, 9: 72-74.
- [20] 许喜华. 从物化到文化——论中国企业产品设计观念的革命[J]. 中国机械工程, 2002, 12: 23-25.

- [21] 刘新丽. 基于尺寸驱动的人机工程设计技术研究. 西北工业大学博士论文, 2005 年.
- [22] 孙柏枫, 董琼 编著. 发现你的潜能-人体功效学[M]. 吉林教育出版社, 1990.
- [23] [美]诺曼 著, 梅琼 译. The Design Of Everyday Things 设计心理学[M]. 中信出版社, 2003.
- [24] 严 杨, 王国胜 著. 产品设计中的人机工程学[M]. 黑龙江科学技术出版社, 1997.
- [25] 马江彬. 人机工程学及其应用[M]. 机械工业出版社, 1993.
- [26] 朱序璋. 人机工程学[M]. 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [27] 刘东明, 孙桂林 著. 安全人机工程学[M]. 中国劳动出版社, 1993.
- [28] GB/T 10000—1988. 中国成年人人体尺寸. 中国标准出版社, 2005.
- [29] GB/T 13547—1992. 工作空间人体尺寸. 中国标准出版社, 2005.
- [30] GB3975-1983. 人体测量术语. 中国标准出版社, 2005. 05.
- [31] GB5703-1985. 人体测量方法. 中国标准出版社, 2005. 05.
- [32] GB5704-1985. 人体测量仪器. 中国标准出版社, 2005. 05.
- [33] BG/T 12985-91. 在产品设计中应用人体尺寸百分位数的通则. 中国标准出版社, 1991.
- [34] 陶本藻 编著. 测量数据统计分析[M]. 机械工业出版社, 1992.
- [35] 成大先 著. 机械设计手册. 单行本. 常用设计资料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [36] 日本人类工效学会人体测量编委会编. 奚振华译. 人体测量手册[M], 1983.
- [37] 李伟, 张宝光 应用于工业设计的人体尺寸数据的分析处理. 工业管理[J], 2001, 9.
- [38] 周脉廉. 比较解剖学的诞生和同源器官[J]. 生物学通报, 1997, (12)
- [39] 朱有庭. 人体功效学参数. 化学工业出版社[M], 1988.
- [40] [日]浅居喜代治 编著. 现代人机工程学概论[M]. 科学出版社, 1992, 3: 5-8.
- [41] 梁小筠. 正态性检验[M]. 北京: 中国统计出版社, 1996.
- [42] 盛骤, 谢式千, 潘承依, 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [43] 周复恭, 黄运成. 应用线性回归分析[M]. 北京中国人民大学出版社, 1989.
- [44] (美)S. 韦斯伯格 著; 王静龙 等 译. 应用线性回归[M]. 北京: 中国统计出版社, 1998.
- [45] 王松桂. 线性统计模型: 线性回归与方差分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [46] 刘新丽 等. 基于人机尺寸驱动的座椅设计系统[J]. 计算机工程与应用, 2005, 13, 111-112, 200.

- [47] 洗力文.《中国成年人人体尺寸》标准及其应用[J]. 中国标准导报, 1994, 6: 33-35.
- [48] 吴永健, 王秉鉴 著. 工业产品形态设计[M]. 北京理工大学出版社, 1996.
- [49] 陈慎任, 马海波 著. 产品形态语义设计实例[M]. 北京机械工业出版社, 2002.
- [50] 余雪松 等. 论产品形态设计的适应性及创新策略[J]. 科技进步与对策, 2004, 8: 134-136
- [51] 穆荣兵, 覃 俭, 葛俊杰. 产品形态设计的一种有效方法[J]. 桂林电子工业学院学报, 2001, 6: 38-41
- [52] 郭青山, 汪元辉 等. 人机工程设计[M]. 天津大学出版社, 1994.
- [53] 吴文周. 生物固体力学进展. 太原理工大学学报, 1993, s1: 19-21.
- [54] Julius Panero and Martin Zelnik. 人体尺度与室内空间[M]. 天津科学技术出版社, 1999.
- [55] S. A. 康兹, 魏润柏 著. 人与室内环境[M]. 中国建筑出版社, 1995.
- [56] (法) 德芒热 著, 王向东 译. 曲线与曲面的数学[M]. 商务印书馆, 2000.
- [57] Terzopoulos D. Elastically Deformable Models [J]. ACM . Computer Graphics , 1987 , 24 (4) : 91-108.
- [58] Terzopoulos D. Dynamic NURBS with Geometric Constraints for Interactive Sculpting[J]. ACM , Transactions on Graphics, 1994, 13(2): 111-117.
- [59] 朱心雄 等 著. 自由曲线曲面造型技术[M]. 科学出版社, 2000, 1.
- [60] 阮长江, 刘肖建, 余隋怀. 产品人机接触曲面形状的 CAD 研究. 计算机工程与应用, 2004, 35: 222-225.
- [61] 董光昌 等. 船体数学放样——回弹法[M]. 科学技术出版社, 1978.
- [62] 陆金桂, 李谦 等. 遗传算法原理及工程运用[M]. 中国矿业大学出版社. 1997.
- [63] Holland, J. H. Outline for a logical theory of adaptive systems. Journal of the Association for Computing Machinery, 1962, 9(3): 297-314.
- [64] Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial System. Ann Arbor: The University of Michigan, 1975.
- [65] 钱治航, 混合离散优化算法及其工程应用研究[J], 华中理工大学博士学位论文, 1993年.
- [66] 陆剑雄, 张福昌, 申利民. 坐姿与座椅设计的人机工程学探讨[J]. 人类功效学, 2005, 12, 44-49.

- [67] 蔡娜, 马金杆, 贾俊卿. 面向轮椅使用者的产品设计人因分析[J]. 人类功效学, 2004. 03: 61-62.
- [68] 童时中. 人体尺寸百分位数在工程中的应用方法[J]. 水利电力劳动保护, 1994, 3: 33-35.
- [69] Back T, Evolutionary Algorithms in Theory and Handbook of Evolutionary Computation[M], Oxford University Press, Oxford, 1997.

作者在攻读硕士学位期间发表的学术论文

1. 马剑鸿, 杨随先, 李彦. 基于遗传算法的产品人机形态设计研究. 现代制造工程. 2006年第3期, p.10-13.
2. 马剑鸿, 杨随先, 李彦. 遗传算法在产品人机形态设计中的应用. 机械设计与研究, 2006年第4期.

申明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其它人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得四川大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

本学位论文成果是本人在四川大学读书期间在导师指导下取得的，论文成果归四川大学所有，特此声明。

指导老师: 杨进光
日期: 2006年5月24

学 生: 马剑鸿
日 期: 2006年6月1

致谢

本文是在导师杨随先教授的悉心指导下完成的，论文的字里行间无不凝聚着导师的心血和对我的期望，所以我首先要向我的导师杨随先教授致以最诚挚的感谢！

“师者，所以传道、授业、解惑也”。杨老师严谨的治学态度、孜孜不倦的敬业精神、谦虚的为人、坦荡的胸怀和对事业执著的追求堪称师者的典范。三年来不管是在学习上还是在生活上，杨老师都给予我无微不至的关怀；他在百忙中抽出时间关心我的生活，指导我的学习，给我压力，资我以学习动力，指我以前进方向，令我收益非浅，并顺利地完成学业。在此，我向杨老师表示最崇高的敬意！

此外，我还得到了易伟、高亮、李婷、孙志国、冯进文、杨志刚等同学的大力支持和帮助，在此，我向他们表示深深的谢意。

我衷心感谢我的父母和女友，正是他们在精神和物质上的无私奉献和支持，使我顺利完成学业。他们的鼓励和殷切希望一直是我不断奋发向上的动力。

最后，向在百忙中抽出时间对本文进行评审的各位专家表示衷心的感谢！