



Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

The Graduate School

College of Mechanical-Electrical Engineering

**Research on Auto-detected Device
Design of Surface Profile Error Measurement
for Railway Door**

A Thesis in

Mechanical-Electrical Engineering

by

Jiang GongQin

Advised by

Associate Professor Zhao ZhuanPing

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

December, 2009

承诺书

本人声明所呈交的硕士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。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京航空航天大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。

本人授权南京航空航天大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本承诺书)

作者签名: 蒋公芹

日 期: 2010.3.18

摘 要

随着我国城市化速度加快,城市交通便捷性和快速性已成为衡量一个城市发展的重要指标。城轨车辆的车门由于启闭频繁,利用率高,因此在安全性能和美观方面要求较高。在地铁列车门生产过程中,对面轮廓度的测量一直没有一种经济快速的简捷方法,本论文根据地铁列车门的特点和检测要求,从经济性、可行性角度出发,设计出一套基于相对坐标测量的面轮廓度自动检测装置。

论文讨论了面轮廓度的四种检测方法及其优缺点,在此基础上,分析地铁列车门检测需求,提出三维测量转化为一维测量的思路,完成面轮廓度自动检测装置的总体方案设计,进而分别完成机械系统设计、控制模块设计、测量模块设计和系统软件设计,并详细阐述了数据处理的方法和流程。

论文根据组成结构对系统传感器的选用、装调方式、各轴向驱动控制的原理分别进行了阐述和说明,根据轨道车门面轮廓度自动检测装置精度要求,进行精度制定和误差分配,并对测量结果进行不确定度分析。

最后搭建实验平台,完成实验和数据处理,通过实验验证了系统方案的可行性。

关键词: 面轮廓度检测, 结构设计, 数据采集卡, 伺服电机, 步进电机, 不确定度

Abstract

With the acceleration of urbanization developing in our country, urban traffic convenience and quickness has become an important criterion for urban development. Because of frequent start stop movement and high efficiency, city rail vehicle door has high request in safety and beauty. For a long time, there's no simple, rapid and economic method for surface profile measurement during the subway doors production process. According to subway door characteristic and detection requirement, the paper designed an automatic detection device based on relative coordinate from the economy and feasibility.

The paper discussed four methods of surface profile measurement, advantages and disadvantages, on the basis of this, it continued analyzing the subway door's detection request, proposed the idea of one-dimension measurement instead of three-dimensional measurement, and finished the overall scheme design of the surface profile detection device. Then, it completed mechanical system design, control module design, measurement modules design and software design, and explained detailedly the data processing method and procedure.

Based on the structure of the system, the paper detailedly discussed the selection of sensors, installation and adjustment way and the drive control principle of three axes. According to precision requirements of the subway door detection device, it formulated precision design and finished the error distribution, in the end, it did uncertainty evaluation on measurement results.

Finally, the paper made up the experimental platform, and finished the experiment and data processing. The experiment result showed that the detection system was feasible.

Key words: surface profile measurement, structure design, data acquisition card, servo motor, stepping motor, uncertainty

目录

第一章 绪论	1
1.1 课题背景及来源	1
1.2 面轮廓度误差的检测方法	1
1.2.1 面轮廓度误差定义	1
1.2.2 面轮廓度误差的检测方法	2
1.3 轨道车门轮廓度自动检测装置基本要求	5
1.4 本论文的研究方法及研究任务	5
1.4.1 研究方法	5
1.4.2 研究任务	6
1.5 论文内容安排	6
第二章 系统总体方案设计	7
2.1 轨道车门轮廓度自动检测装置检测总体方案设计	7
2.1.1 检测系统方案设计	7
2.1.2 机械系统方案设计	8
2.1.3 控制系统总体设计	8
2.2 精度设计与误差分配	9
2.2.1 误差的基本概念	9
2.2.2 精度的基本概念	10
2.2.3 精度制定与误差分配	11
2.3 小结	11
第三章 机械系统的设计	12
3.1 支承系统的设计	12
3.1.1 基座与支承件	12
3.1.2 龙门结构的设计	14
3.1.3 传感器架的设计	16
3.2 传动系统的设计	19
3.2.1 主轴传动系统设计	19
3.2.2 Z 轴传动系统的设计	30
3.3 小结	34
第四章 控制系统的设计	35

4.1 数据采集卡的选择与配置.....	35
4.1.1 数据采集卡的选择	35
4.1.2 工作原理	36
4.1.3 采集卡驱动程序	38
4.1.4 引脚及其各种信号接线说明	38
4.2 伺服系统的设计.....	40
4.2.1 伺服电机驱动器参数说明	40
4.2.2 伺服电机控制方式选择	42
4.2.3 与数据采集卡的配置与接线	42
4.3 步进系统的设计.....	44
4.3.1 步进电机驱动的参数说明	44
4.3.2 步进电机控制方式	44
4.3.3 与数据采集卡的配置与接线	45
4.4 数据采集系统的设计.....	46
4.4.1 传感器的选择	46
4.4.2 数据采集与接线方式	46
4.5 小结	47
第五章 系统软件设计	48
5.1 软件总体方案设计.....	48
5.1.1 控制系统软件平台的选择	48
5.1.2 系统软件平台各子模块功能	48
5.2 电机控制模块设计.....	50
5.2.1 伺服电机驱动程序的设计	50
5.2.2 步进电机驱动程序的设计	56
5.3 数据采集模块设计.....	56
5.3.1 传感器数据采集程序的设计	56
5.3.2 数据采集模块的实现	57
5.4 数据处理与误差分析.....	59
5.4.1 数据处理方法与流程	59
5.4.2 测量结果不确定度分析	61
5.5 小结	63
第六章 实验分析	64

6.1 实验目的	64
6.2 实验方案	64
6.3 实验设备	65
6.3.1 五自由度运动平台	65
6.3.2 实验用传感器及实验对象	67
6.4 实验流程	69
6.4.1 工件安装及固定	69
6.4.2 传感器位置标定	69
6.4.3 传感器线性标定	70
6.4.4 测量	71
6.5 数据分析	72
6.5.1 传感器标定	72
6.5.2 坐标统一	73
6.5.3 数据处理	73
6.6 结果分析	74
6.7 小结	75
第七章 结论	76
7.1 论文总结	76
7.2 问题与改进	76
参考文献	78
致 谢	81
攻读硕士期间发表学术论文	82

图、表清单

图 1.1 面轮廓度公差带.....	1
图 1.2 仿形测量法	2
图 1.3 光学跟踪法测量面轮廓度实例.....	2
图 1.4 截面样板测量法.....	3
图 1.5 结构光法测量原理.....	4
图 1.6 地铁列车车门示意图.....	5
图 2.1 系统机械结构示意图.....	7
图 2.2 系统总体结构框图.....	9
图 3.1 工件定位示意图.....	14
图 3.2 龙门结构示意图.....	15
图 3.3 龙门结构变形分析.....	15
图 3.4 工字钢截面	16
图 3.5 传感器架结构图.....	17
图 3.6 燕尾槽滑块定位基准面.....	17
图 3.7 传感器上下移动结构图.....	17
图 3.8 传感器架变形分析.....	18
图 3.9 传感器架变形分析简化图.....	18
图 3.10 滚珠丝杠精度选择	20
图 3.11 75BF006 电机接线图	34
图 4.1 控制系统结构图.....	35
图 4.2 NI CB-68LP 端子板外形	36
图 4.3 单点数据采集卡结构框图.....	36
图 4.4 单面数据采集卡结构框图.....	37
图 4.5 循环数据采集卡结构框图.....	38
图 4.6 PCI-6013 68 引脚定义.....	38
图 4.7 驱动器 TSTA30C 位置控制接线图.....	43
图 4.8 CP 的脉冲宽度及高低电平方式.....	45
图 4.9 换向信号 DIR 起作用的时刻.....	45
图 4.10 传感器变换器与数据采集卡接线图.....	47
图 5.1 系统功能控制模块组成框图.....	49

图 5.2 计算机控制界面.....	49
图 5.3 伺服电机控制原理.....	51
图 5.4 光电编码器原理示意图.....	51
图 5.5 编码器正转脉冲输出图.....	52
图 5.6 编码器反转脉冲输出图.....	52
图 5.7 码盘信号 4 倍频电路图	53
图 5.8 码盘信号 4 倍频波形图	53
图 5.9 编码器信号细分技术软件流程图.....	54
图 5.10 伺服电机控制结构图	54
图 5.11 伺服电机驱动程序流程图	55
图 5.12 X 回零程序流程图	55
图 5.13 步进电机控制结构图	56
图 5.14 传感器数据采集控制结构图	57
图 5.15 传感器数据采集程序流程图	57
图 5.16 总体程序流程图	58
图 5.17 建立测量坐标系	60
图 5.18 传感器标定界面	61
图 6.1 实验方案	64
图 6.2 实验方案用传感器架结构图.....	65
图 6.3 五自由度运动平台运动机构结构示意图.....	66
图 6.4 LMS-6 型位移光栅线位移传感器输出信号.....	67
图 6.5 数显表 Millitast1085 外形.....	67
图 6.6 DGC-6PG/B 外形	68
图 6.7 实验对象示意图.....	69
图 6.8 传感器分布示意图.....	69
图 6.9 传感器间距示意图.....	70
图 6.10 传感器标定使用程序界面	71
图 6.11 实验用程序界面	71
图 6.12 实验测量流程图	72
图 6.13 第一组数据的最小二乘拟合结果.....	72
图 6.14 第一组数据拟合成圆柱体	74

表 3.1 滚珠丝杠精度等级说明.....	21
表 3.2 滚珠丝杠精度与制造范围 (单位/mm).....	21
表 3.3 滚珠丝杠副预期工作寿命 L_h	23
表 3.4 载荷系数选择.....	23
表 3.5 安装系数选择.....	24
表 3.6 滚珠丝杠副 GD4005-3 参数.....	24
表 3.7 支承系数选择.....	25
表 3.8 TSB13102A 马达参数.....	29
表 3.9 滚珠丝杠副 GD2004-3 参数.....	31
表 3.10 75BF006 参数.....	33
表 4.1 伺服驱动器 TSTA30 参数.....	41
表 4.2 SMD-530F 主要技术指标.....	44
表 4.3 电涡流位移传感器 YG9202 参数.....	46
表 6.1 数显表 Millitast1085 参数.....	68
表 6.2 电感旁向测头 DGC-6PG/B 参数.....	68
表 6.3 数显电感测微仪 DGS-6 档位说明.....	68
表 6.4 传感器间距标定结果.....	70
表 6.5 第一次测量标定结果.....	72
表 6.6 工件摆正情况下的评定结果.....	74
表 6.7 工件存在定位误差时的评定结果.....	74

第一章 绪论

1.1 课题背景及来源

随着我国城市化速度加快,城市交通便捷性和快速性已成为衡量一个城市发展的重要指标。世界上大多数发达国家在便捷交通方面具有很大优势,尤其在城市轨道交通方面,各城市都很重视发展自己特色的交通体系。

城轨车辆的车门由于启闭频繁^[1],利用率高,因此在安全和美观性能方面要求较高,其各项性能指标必须保持在一个相对安全的取值范围内,以保证列车的运行安全。这就要求制造厂家在产品制造过程中测试这些参数(如车门的形状误差,尺寸误差,车门开门力,关门力,防挤压力,踏脚板的翻转压力,开门时间,关门时间,防冻装置与门板胶条的贴和面在加热三分钟后的温升值,车门的绝缘电阻等等)。对于高速列车车门,如地铁门,面轮廓度会影响车辆装配精度及密封性,本课题以地铁列车车门面轮廓度检测为研究内容,完成面轮廓度自动检测装置的设计。

1.2 面轮廓度误差的检测方法

1.2.1 面轮廓度误差定义

轮廓度是零件形位公差国家标准和国际标准中应用最广泛而又最难于测量和评定的项目。其中,面轮廓度^[47]是形位公差中既有形状公差特征又有位置公差特征的一个要素,是指被测实际表面形状对图样给定的理想表面形状的允许变动量,是针对任意曲面偏离设计给定的形状而提出的技术指标。面轮廓度的公差带^[2]是包络一系列直径为公差值的球的两包络面之间的区域,这些球的球心位于具有理论正确几何形状的曲面上。如图 1.1 所示:

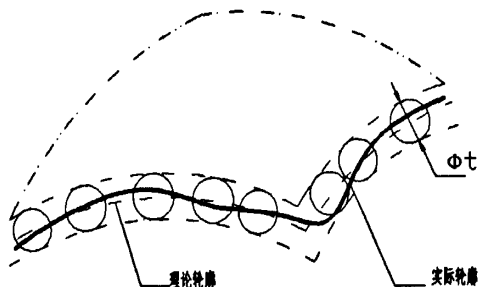


图 1.1 面轮廓度公差带

1.2.2 面轮廓度误差的检测方法

面轮廓度误差的检测方法^[3]根据被测零件的几何特性，可以分为两大类。一类零件的主要表面或被加工部位由标准体素，如立方体、矩形体、圆柱体、球体、锥体等构成，这类零件比较常见如轴类、箱类等，其形状比较规范，易于测量且测量精度高；另一类零件的主要表面或者加工部位由空间自由曲面构成，其表面形状比较复杂，测量比较困难，且测量精度低。

在现代工业领域中^[4]，面轮廓度误差的测量方法包括仿形装置测量，截面轮廓样板测量，光学跟踪轮廓测量仪测量以及三坐标测量装置测量等。

1) 仿形测量法

利用仿形测量装置将被测零件的实际轮廓面与轮廓样板的轮廓面进行比较，以确定该零件得面轮廓度误差值，其中仿形面轮廓度的误差值将直接影响测量结果。仿形测量装置能在空间直角坐标系的纵、横两个互相垂直的方向上移动，以测量整个实际曲面轮廓，所使用的样板的轮廓形状与被测零件的轮廓形状一致，该样板的轮廓按照被测轮廓的 CAD 模型设计。如图 1.2 所示：

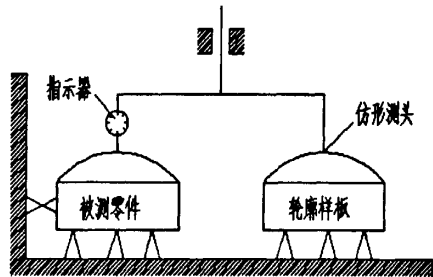
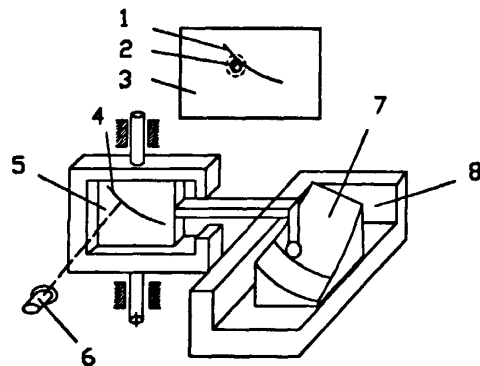


图 1.2 仿形测量法

2) 光学跟踪测量法



1 理想轮廓的影像 2 模拟测头 3 屏幕 4 理想轮廓
5 透明玻璃板 6 光源 7 被测零件 8 工作台

图 1.3 光学跟踪法测量面轮廓度实例

光学跟踪测量法是指使用光学跟踪轮廓仪分别测量实际被测曲面轮廓若干截面的线轮廓度误差,把各个截面的实际轮廓线与对应的理想轮廓线相比较,来判断面轮廓度误差是否合格。

如图 1.3 所示,光学跟踪轮廓测量仪主要由工件台 8、与测头连成一体且能上下移动和左右移动的透明玻璃板 5 和投影屏幕 3 组成。选取好被测曲面轮廓的若干测量截面后,在透明玻璃板 5 上制作这些被测截面的理想轮廓 4。测量时,将被测零件 7 放置在仪器工作台上,它在工作台上的位置按零件图样上标注的三基面体系正确定位。由光源 6 发出的光照明仪器的透明玻璃板 5,把其上的被测截面理想轮廓经仪器的放大系统显示在屏幕 3 上。当仪器的测头在选定的被测截面上移动时,透明玻璃板 5 就同步移动,从屏幕 3 上看到被测截面理想轮廓的影像 1 也同步移动。在屏幕中央有一个固定不动的模拟测头 2(仪器的测头为球形测头时,用一个圆来模拟,见图 1.3 中的实线画的圆)。如果实际被测截面轮廓与其理想轮廓相同,那么,在测量过程中,屏幕上显示的被测截面理想轮廓影像与模拟测头始终保持相切,前者沿后者运动。倘若实际被测截面轮廓有误差,则屏幕上显示的理想轮廓影像会相对于模拟测头“分离”或“进入”,它们不会始终相切。

在屏幕上可以用这样两个同心圆(见图中的双点划线画的两个圆)之间的区域来表示允许的分离量和进入量的范围,它们的圆心为模拟测头的中心,它们分别位于模拟测头的两侧,它们分别至模拟测头的距离皆为面轮廓度公差值的一半乘以仪器放大系统所选用的放大倍数。

在整个测量过程中,屏幕上显示出被测截面理想轮廓的影像相对于模拟测头的运动,该影像只要不超越上述两个同心圆之间的区域,则表示合格。

3) 截面样板测量法

根据被测零件上若干个截面的理想线轮廓,制作若干个截面轮廓样板。如图 1.4 所示,检测时,将若干个截面样板分别放到指定位置上。测得各截面上样板与被测面之间的最大间隙,取所有截面中最大间隙值就是该零件得面轮廓度误差。

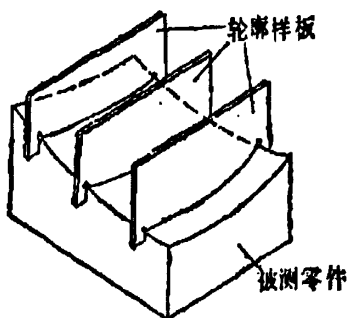


图 1.4 截面样板测量法

4) 坐标测量法

坐标法就是用具有空间坐标测量系统的仪器测得实际轮廓空间坐标值,用以与理想轮廓坐

标值进行比较,取其中最大差值的两倍作为该零件的面轮廓度误差。

采用三坐标测量装置进行测量时无需轮廓样板,只需要零件的 CAD 数学模型(零件的三维设计图形),因此该测量方法可应用于任何场合且测量数据可靠。

目前,用来采集物体表面三维坐标的测量设备和方法多种多样,其原理也各不相同。根据测头是否和零件表面接触可分为接触式与非接触式两类。

接触测量法以三坐标测量机测量为典型代表。三坐标测量机^[41,42]的测量精度高,对环境(如:温度、湿度、防振等)要求也高。由于测量时测头在工件上要逐点测量,所以测量速度较慢。另外还要求被测零件的材质不能太软,尺寸不宜过大且不易变形。

非接触测量法以结构光法为典型代表,该测量方法一次获取物体表面的数据(点坐标)多,测量范围大,对被测量物体的材质没有要求,特别适合于面积大且易变形的覆盖件类零件的测量。又由于结构光三维视觉对景物或物体三维信息提取方便、快捷,且大量的点云数据在计算机中处理快捷、准确,因此在测量中占有重要地位。

结构光法是将激光器发出的光束经过光学系统形成某种形式的光,包括点、单线、多线、单圆、同心多圆、网格、十字交叉、灰度编码图案、颜色编码图案和随机纹理投影等投向景物,在景物上形成图案并由摄像机摄取,而后由图像根据三角法和传感器结构参数进行计算、得到景物表面的深度图像,进一步计算出物面的三维坐标值。

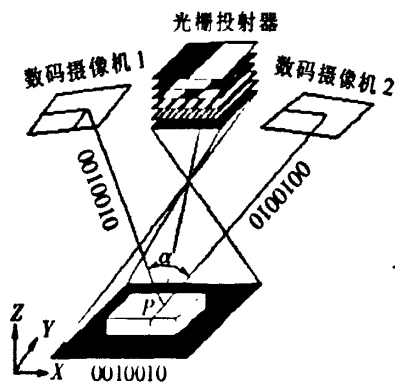


图 1.5 结构光法测量原理

如图 1.5 所示,结构光法以非接触式几何光学法测量微型元件的形貌轮廓作为理论基础,由光栅投射器将被调制过的编码条纹光栅投射至待测物表面,再以两台数码摄像机作取像动作,得到投射到物体表面的变形的条纹图像,条纹的变形程度取决于光栅投射器与摄像机之间的相对位置和物体表面形廓(高度)。直观上,条纹在法线方向的位移(或偏移)与物体表面高度变化成正比,条纹的扭结表示平面的变化,不连续表示表面的物理突变或间隙。当光栅投射器与数码摄像机之间的相对位置一定时,由摄像机摄得变形的条纹图像,通过工作站计算机来解调图像信息,最后利用合并 Gray 码与相位移法计算得到绝对相位,配合三角法测量原理,便可

重现物体表面形廓。

1.3 轨道车门轮廓度自动检测装置基本要求

轨道车门门板有两种类型，平门和单曲率弯门，其面轮廓度自动检测装置基本要求分为三部分：

- 测量范围的要求：焊接后的门框架($3000 \times 1500 \times 35$)mm，固化后的整体门板($3000 \times 1500 \times 35$)mm，测量深度 ≤ 500 mm。
- 测量速度的要求：以每日单产 100 扇门计，分两班检验，每班每日检 50 扇门，检验一扇门的时间不能超过 9 分钟，即 1 扇门/9 分钟。
- 测点分布的要求：测点数 >48 ，测点位置可调；X 向测点数 >4 ，Y 向测点数 >12 。
- 测量精度的要求：整个装置的综合误差 $\leq \pm 0.1$ mm。

地铁列车车门结构示意图如图 1.6 所示：

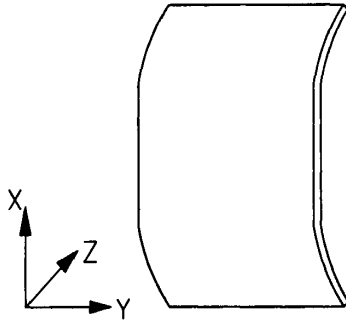


图 1.6 地铁列车车门示意图

1.4 本论文的研究方法及研究任务

1.4.1 研究方法

在 1.2.2 小节所述的四种方法中，仿形测量法和截面轮廓样板测量法精度较低；截面轮廓样板法和光学跟踪法都是用测量线轮廓度误差来评定面轮廓度误差，不符合面轮廓度误差的定义，会引起较大的测量误差，被测截面的数目也会影响测量精度，影响测量的效率和经济性，因此它们都只适用于成批生产中测量面轮廓度精度要求不高的零件，而对单件小批量生产的零件，特别是精度要求较高的零件，应采用坐标法测量。

坐标测量法以三坐标测量机为典型代表，根据轨道车门面轮廓度检测装置基本要求可知，地铁列车门尺寸较大，要求测量速度为 9 分钟 / 门，而三坐标测量机测量速度和测量尺寸都受限，测量效率不高，且价格昂贵成本相对较高。根据地铁列车门单曲度的特点，可以考虑将一个测头更换为多个测头，在一个方向扫描工件，从而将三维测量转化为一维测量，因此，从经

济性可行性角度出发, 本论文提出以三坐标测量法为基础, 自行设计一套专用的单曲面车门面轮廓度自动检测装置。

1.4.2 研究任务

根据轨道车门面轮廓度自动检测装置基本要求及预选用的研究方法, 本论文研究任务分为以下几部分: 根据地铁列车门特点及其检测要求, 完成系统总体方案设计; 完成检测系统机械系统设计和控制系统设计; 完成系统软件设计; 完成实验及面轮廓度的评定。

1.5 论文内容安排

本论文以单曲度地铁列车门为检测对象, 研究轨道车门面轮廓度自动检测装置的设计, 具体内容安排如下:

第一章论述全文的研究背景和意义, 介绍面轮廓度测量的几种方法和轨道车门轮廓度自动检测装置的基本要求, 从测量的经济性、可行性出发, 提出自行设计一套专用的单曲面车门面轮廓度自动检测装置。

第二章介绍面轮廓度自动检测装置的总体方案设计。具体包括机械系统总体设计, 及控制系统总体设计, 并根据检测装置的设计要求进行误差分配。

第三章进行机械系统部分设计, 包括基座及工作台材料的选择, 龙门结构的设计, 传感器架的设计, 主传动系统的设计等。

第四章进行控制系统的设计, 根据控制要求选择多功能数据采集卡作为控制单元, 然后进行伺服系统, 步进系统及数据采集系统的详细设计。

第五章进行系统软件设计, 根据要完成的检测任务进行系统方案设计和计算机控制界面设计, 进而对各个子模块做详细设计, 并完成测量结果不确定度分析。

第六章进行实验验证, 搭建实验平台, 完成实验, 并进行面轮廓度评定。

第七章对全文研究工作进行总结, 指出本文工作的不足和需要改进之处。

第二章 系统总体方案设计

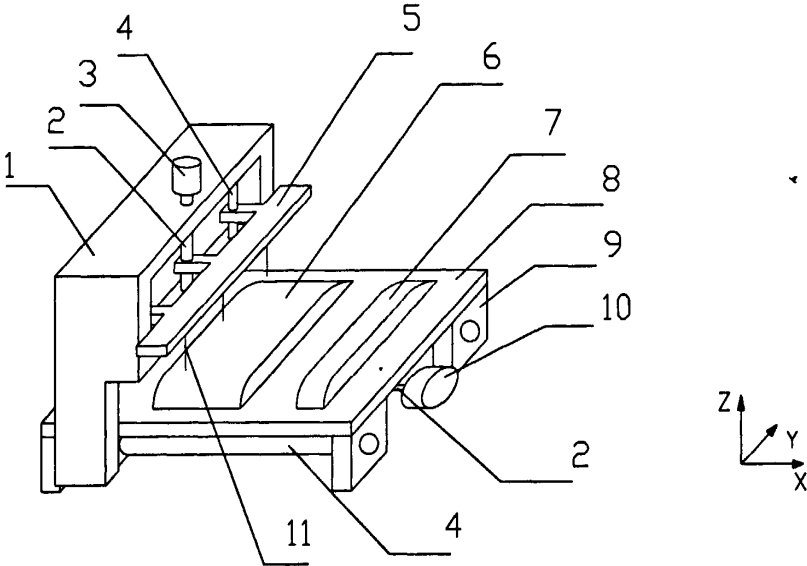
针对地铁列车门的单曲度特点并结合轨道车门轮廓度自动检测装置的基本要求,本文提出自主设计一套专用的单曲面车门面轮廓度自动检测装置,并进行测量系统总体方案的设计。同时,根据检测精度要求进行误差分配。

2.1 轨道车门轮廓度自动检测装置检测总体方案设计

2.1.1 检测系统方案设计

根据检测装置设计基本要求可知,要求检测速度为9分钟/门,测量点数大于 4×12 个点,且位置可调,考虑到工件形状特点:单曲率或者平门,可以简化测量方式,将三维测量转化为一维测量。思路如下:将一个测头变为多个测头(可安装12个测头),所有测头定间距直线分布,沿一个方向直线扫描工件,将三轴运动转化为一轴运动;在测量前使用工件模板对测头进行标定,将三维测量转化为一维测量。

根据上述思路设计检测装置,检测装置的机械结构示意图如图2.1所示。



1—龙门支架 2—丝杠 3—步进电机 4—圆柱导轨 5—传感器架 6—工件 7—标定模板 8—工作台 9—基座 10—伺服电机 11—传感器

图 2.1 系统机械结构示意图

平台采用龙门式机构带动测头扫描工件,可降低整个检测装置的系统误差,提高系统测量

精确度。在 X 方向上, 由伺服电机 10 带动龙门机构 1 直线扫描工件 6; 在 Y 方向上, 十二只传感器 11 并排安装在传感器架 5 上, 传感器可以沿传感器架移动, 左右调节测头间距, 上下调节测头伸出长度; 在 Z 方向上, 由步进电机 3 驱动, 传感器架可上下移动, 以适应不同批次、不同型号的车门测量以及标定过程。

2.1.2 机械系统方案设计

根据检测系统总体方案设计, 检测装置机械系统的设计主要包括以下几个部分: 基座及支承件的材料选择, 主传动系统和 Z 向传动系统的设计, 以及龙门结构和传感器架的结构设计及校核。

1) 主传动系统及 Z 向传动系统的设计

主传动系统指 X 轴传动系统, 负责带动龙门结构及传感器测头扫描工件, 要求定位精度高, 传动平稳, 因此对于电机的控制精度, 滚珠丝杠定位精度以及导轨的导向精度要求较高。Z 向传动系统带动传感器架上下移动, 以方便工件的安装及不同型号、不同批次的车门的测量, 对于定位精度, 运行速度要求不高。传动系统的设计具体包括滚珠丝杠副的设计、导轨的选用、电机的选择与计算等。

2) 龙门结构的设计

龙门结构负责承载 Z 向传动装置及传感器架和传感器, 要求设计简洁, 重量轻, 变形小, 龙门结构整体安装在 X 向运动导轨上。

3) 传感器架的设计

传感器架有承载定位传感器的功能, 要求传感器能沿传感器架左右移动调整传感器间距, 上下移动调节伸出长度。整体要求设计合理, 结构简单, 采用合理的定位、夹紧方案, 保证工件的测量精度要求。

2.1.3 控制系统总体设计

控制系统采用多功能数据采集卡作为控制单元, 使用 PC 机加多功能数据采集卡的控制方式, 主要实现以下功能: 电机控制功能, 包括伺服电机和步进电机的驱动控制; 信号采集功能, 包括伺服电机编码盘信号的采集和位移传感器信号的采集。控制系统总体框图如图 2.2 所示, 工作原理如下: 根据检测目的, 通过多功能数据采集卡输出运动控制信号, 控制步进电动机及伺服电机驱动器, 驱动步进电机及伺服电机完成需求运动, 同时采集编码盘反馈信号(实时反馈龙门机构位置)和位移传感器输出信号完成待测点数据采集。

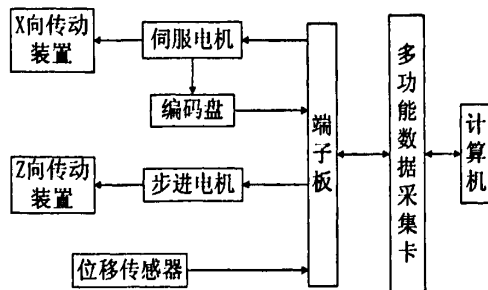


图 2.2 系统总体结构框图

2.2 精度设计与误差分配

为了保证最终检测装置的测量结果符合测量精度要求，在进行具体结构设计之前需要进行误差分配，同时也为具体的机械结构选型与设计提供依据。

2.2.1 误差的基本概念

1) 误差的定义

当对某物理量进行检测时，所得的数值与标称值（或真值）之间的差称为误差^[5]。即

$$\text{真误差值} = \text{测量值} - \text{标称值}$$

用符号表示为式 2-1:

$$\Delta_i = x_i - x_b \quad (i=1 \sim n) \quad (2-1)$$

式中： Δ_i ——真误差值；

x_i ——测量值；

x_b ——标称值；

i ——测量次数。

误差的大小反映了测量值对于标称值的偏离程度，它具有以下特点：

- 任何测量手段无论精度多高，总是有误差存在。即真误差是客观存在的，永远不会等于零。
- 多次重复测量某物理量时，各次的测量值并不相等，这是误差不确定性的反映。只有仪器的分辨率太低时才会出现相等的情况。
- 真误差是未知的，因为真值通常是未知的。

2) 误差的分类

按照误差来源分类可将误差分为以下几种^[30]：

(1) 设备误差，也称为器具误差。具体包括：

- 标准误差，表示出标准量值的标准器具与标准物质所引起的误差。如本文中使用的标准量块。

- 仪器误差, 用来直接或者间接地将被测量和已知量进行比较的设备所引起的误差, 通常称为仪器或者仪表。如温度计, 测量用传感器等。
- 附件误差, 为开展测量工作所需的一些必要的条件, 或者为使测量方便地进行而需要的各种辅助物件为测量的附件。

(2) 环境误差 各环境要素与要求的标准状态不一致, 或者在空间上的梯度及其随时间的变化, 引起测量设备的量值变化、机构失灵和相应位置改变等引起的误差。这些因素可以是温度、湿度、气压、空气扰动、大地微震、外界条件及测量人员引起的振动、照明、加速度、电磁场和空气污染等。

在规定的正常工作条件下, 仪器所具有的误差称为基本误差。超出此条件所增加的误差成为附加误差。

(3) 人员误差 测量者生理上的最小分辨力、感觉器官的生理变化、反应速度和固有习惯等引起的误差。

(4) 方法误差 测量方法不精确所引起的误差。如经验公式函数类型选择的近似性等。

(5) 被测量的误差 由被测量引起的误差。如被测量定义的不完整、被测量定义实现不理想等产生的误差。

按照误差的性质区分误差又可分为以下几种:

(1) 随机误差 随机误差是有一些独立因素的微量变化的综合影响造成的。其数值的大小和方向没有一定的规律, 但就其总体来说, 服从统计规律。大多数误差服从正态分布。

(2) 系统误差 系统误差的大小和方向在测量过程中恒定不变, 或者按照一定的规律变化。一般来说, 系统误差是可以利用理论计算或实验方法求得, 可预测它的出现, 并可以进行调解和修正。

(3) 粗大误差 一般是由于疏忽或错误, 在测得值中出现的误差, 应予以剔除。

2.2.2 精度的基本概念

精度(不确定度)^[5]是误差的反义词, 精度的高低是用误差来衡量的。误差大则精度低, 误差小则精度高。

通常把精度区分为:

准确度, 它反映了系统误差的大小;

精密度, 它反映了随机误差的大小;

精确度, 它反映了系统误差和随机误差二者的综合。

由此可见, 精密度高未必准确度高, 反之亦然。在以上两种情况下精确度都不一定高。只有在精确度高的情况下, 才表明准确度和精密度都高。

2.2.3 精度制定与误差分配

1) 精度制定

仪器的总精确度由使用要求和使用寿命来确定, 仪器设计准则规定, 如果一次测量数据作为测量结果, 应当用极限误差作为仪器总误差。在计量器具的精度中存在两种情况: 一种是已经对测量极限误差作了明确规定, 这就应使测量方法的极限误差小于或等于允许的测量极限误差; 另一种情况是仅规定计量器具的允许误差, 这时为了使测量误差不明显影响测量结果, 测量方法极限误差应取器具允许误差的 $1/3$ 至 $1/10$ 。根据面轮廓度公差要求可知整个装置的综合误差 $\leq \pm 0.1\text{mm}$, 所以取面轮廓度自动检测装置的总不确定度为 $\pm 0.1\text{mm}$ 。

2) 误差分配

仪器总误差由总系统误差和总随机误差构成。

系统误差的大小和方向在测量过程中恒定不变, 或者按照一定的规律变化。一般来说, 系统误差是可以用理论计算或实验方法求得, 可预测它的出现, 并可以进行调解和修正, 但是有些系统误差测量困难, 或者测量不经济, 从而无法消除, 这类未知系统误差可以作为随机误差进行分析和处理。

常见的误差分配原则有等准确度分配、等作用分配和抓住主要误差项进行分配, 在这里采用抓住主要误差项进行分配。

在该检测系统中, 有些系统误差可消除或者减小, 如滚珠丝杠定位误差不好测量, 可通过伺服电机码盘反馈的方式进行修正, 但不能消除; 传感器间距定位误差等于量块制造误差, 可以使用精度较高的标准器具, 如对量块的长度进行标定, 从而减小量块定位误差, 所以检测装置的主要的未知系统误差有滚珠丝杠定位误差, 码盘反馈误差, X 轴导轨的导向误差, 传感器采集误差和传感器间距定位误差的测量误差, 根据抓住主要误差项进行分配的原则, 取主传动系统定位误差 $e_1 = \pm 0.01\text{mm}$, 码盘反馈误差 $e_2 = \pm 0.001\text{mm}$, X 轴导向误差为 $e_3 = \pm 0.02\text{mm}$, 传感器采集误差为 $e_4 = \pm 0.001\text{mm}$, 传感器间距定位误差为 $e_5 = \pm 0.001\text{mm}$, 根据随机误差合成方法采用方和根法, 得系统的总误差为式(2-2):

$$\Delta_e = \pm \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + e_5^2} = 0.022\text{mm} \quad (2-2)$$

所分配的系统总误差小于检测装置允许误差 ($\pm 0.1\text{mm}$), 符合精度设计要求。

2.3 小结

本章节主要介绍了轨道车门面轮廓度自动检测装置的总体设计方案, 包括机械系统的总体设计和控制系统总体设计, 还完成了测量系统的精度制定和误差分配, 为下一章节的零部件设计及选择提供了依据。

第三章 机械系统的设计

轨道车门轮廓度自动检测装置整体采用龙门结构,并由龙门机构带动测头直线扫描工件,完成待测点数据采集。其机械系统的设计可分为支承系统的设计和传动系统的设计,各部分要求设计合理、选材适当、布局紧凑、动作协调。

3.1 支承系统的设计

作为机械系统的一个重要组成部分,支承系统通常是结构复杂、制造最费工、造价最昂贵的零部件,并在很大程度上影响着机械系统的安装精度、工作精度、抗振性和可靠性,在机械系统的总重量中占有相当大的比例。正确设计支承系统,对减轻重量、节约材料、降低成本、提高系统性能和寿命等至关重要。

面轮廓度自动检测装置的支承系统起到承载定位工件及承载并定位传感器的作用,同时保证各零部件之间的相对位置精度和运动部件的运动精度。主要设计包括以下几部分:基座及支承件的设计,龙门结构的设计和传感器架的设计。设计应满足如下特点^[6]:

- 结构布局合理、结构工艺性好;
- 动态性能好;
- 热变性小;
- 刚度和强度足够、刚度重量比高。

3.1.1 基座与支承件

3.1.1.1 基座与支承件结构特点及主要技术要求

基座和支承件不仅起着联结和支承各种零、部件相互位置的作用,而且还是保证整个系统工作精度的基础。基座与支承件的特点如下^[7]:尺寸较大,是整个系统装置的基础支撑件,不仅自身重量较大,而且承受主要的外载荷;结构较复杂,有很多加工面或加工孔,而且相互位置精度和本身精度都较高。

根据上述特点设计时要特别注意刚性、热变形、精度、抗振性、稳定性及结构工艺等问题。

1) 刚性。面轮廓度自动检测装置机身不仅本身重量较大,而且由于机身上有工作台,机身两侧固定圆柱导轨,导轨承受径向载荷(龙门结构重量),因而一些部件载荷都直接或间接地作用在机身和立柱上。随着运动部件的移动,受力情况将发生变化。在这种情况下,要保证基座受力后的弹性变形在允许的范围内,就必须有足够高的刚度。如果设计的部件刚度不足,由此造成的几何和位置偏差会大于制造误差。

2) 抗振性。基座的抗振性是其抵抗受迫振动的能力。当基座受到振源的影响产生振动时,除了使仪器整机振动、摇晃外,各主要部件、部件相互之间还可能产生弯曲或扭转振动。整体摇晃一般不影响工作,但部件或部件相互之间的振动可能对仪器精度产生影响。提高仪器抗振性可从以下几方面着手:提高静刚度,即合理设计构件截面形状和尺寸,合理布置筋板或隔板;增加阻尼;减轻重量;或者采取隔振措施以减小外界振源对仪器正常工作的影响。

3) 稳定性。基座与支承件的结构较复杂,在浇铸时由于各处冷却速度不均,很容易产生内应力。这种内应力是造成零件尺寸长期不稳定的主要原因,因此,对基座和支承件要进行时效处理以消除内应力,减小变形。时效处理方法有两种,自然时效处理和人工时效处理。

4) 热变形。对于测量仪器等精度要求较高的仪器来说,热变形已成为造成误差的一个重要因素。例如当导轨面与底面有温差时,在垂直平面内导轨面会产生中凹或者中凸,由于热变形造成的误差是不可忽略的。又由于整机及各个部件的尺寸、形状和结构不同,因此达到热平衡时间的长短也各异,各个部件就会发生不同程度的变形,热平衡不能达到稳定状态,势必影响仪器的精度,因此,有必要采取措施将温度控制在一定的范围之内。可以采取以下措施:①严格控制工作环境的温度。根据仪器的精度要求,对环境温度提出不同的要求。②控制仪器内部热源的传递。仪器自身的电机、照明灯等热源的热传递也需要采取措施加以控制:采用冷光源;隔开热源或将热源分离出去;对于不能隔开又不便分离出去的热源,如轴承、丝杠螺母等需采取措施,以减少热的生成;待仪器温度平衡后再开始工作。

3.1.1.2 基座材料的选择

根据检测系统特点,单件小批生产,选择铸铁作为基座材料。选用铸铁作为基座材料^[8],其工艺性能好,容易获得结构复杂的零件;铸铁的内摩擦大,阻尼作用大,动态刚性好,有良好的抗振性。

3.1.1.3 工作台材料的选择

工作台起支承工件,定位工件的作用,要求耐磨性好,精度稳定,平面光整,硬度高,有定位用T型槽(用来定位挡板,示意图如图3.1所示)。考虑以上要求,选用高强度铸铁HT200-300作为工作台材料,其工作面硬度为HB170-240,经过两次人工处理(人工退火600度-700度和自然时效2-3年),表面采用刮研工艺。由于地铁门重量大,测量时需要准确定位,因此需要在工作台上安装两个在XY平面内成90度的挡板,使工件两边紧靠挡板,从而达到精确定位,示意图如图3.1所示。

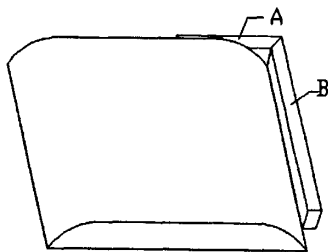


图 3.1 工件定位示意图

3.1.2 龙门结构的设计

龙门结构起到支承传感器架及传感器的作用，它安装在 X 向圆柱导轨的运动滑块上，在伺服电机的驱动下沿 X 向做直线运动。结构特点：重量大，Y 向跨度大。要求设计合理，选择合适的截面，并进行变形量校核。

3.1.2.1 设计基本要求

- 1) 满足承载要求，能够承载 Z 向传动系统和传感器架及传感器，并由电机驱动带动测头进行直线扫描；
- 2) 满足刚度要求，在保证特定的外形条件下，有较高的刚度，从而保证测量精度；
- 3) 满足稳定性要求，抗振性好，耐腐蚀。失稳对于结构会产生很大的破坏，设计时必须校核；
- 4) 满足结构性要求，外形美观，结构合理，工艺性好，便于制造，且结构应使其上的零部件安装、调整、修理和更换都方便；
- 5) 满足成本要求，重量轻，材料选择合适，成本低。

3.1.2.2 结构设计及校核

龙门结构在系统中起着承载 Z 向传动系统，传感器架及传感器的作用，运动过程中不承受动载荷。考虑到自身刚度，安装方式，结构工艺性等，选用 45#钢作为龙门结构材料，其机械结构示意图如图 3.2 所示。龙门尺寸 $1000 \times 3700 \times 400$ ，结构壁厚为 $d_1=10\text{mm}$ ，45#钢密度为 $\rho=7.85\text{g/cm}^3$ ，计算得空门重量约为 $W_1=4000\text{N}$ 。

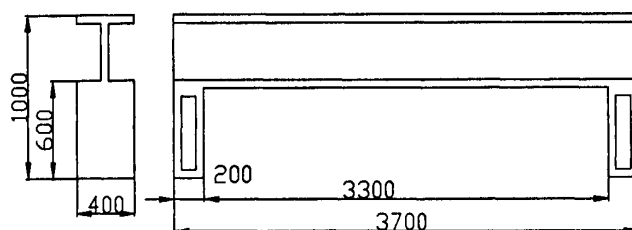


图 3.2 龙门结构示意图

龙门结构横向尺寸长，跨度大，需要对最大变形量进行校核。龙门结构的最大变形量发生在横梁对称中线处，下面进行具体校核计算。

龙门变形量由两部分引起，自身重量 W_1 和固定在龙门上的 Z 向传动系统的重量 W_2 ，二者重量总和约为 $W=W_1+W_2=4500\text{N}$ 。将龙门结构变形示意图简化为图 3.3:

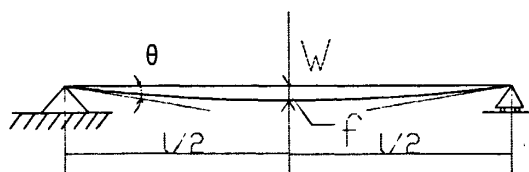


图 3.3 龙门结构变形分析

则最大挠度为(3-1):

$$f = -\frac{WL^3}{48EI} = -\frac{4500 \times 3.3^3}{48 \times 210 \times 10^9 \times 0.0005787} = 2.239 \times 10^{-5} \text{ m} = 22.3 \mu\text{m} \quad (3-1)$$

其中 W 为龙门结构总重量， L 为龙门跨度， E 为 45# 钢的弹性模量， I 为工字钢惯性矩，工字钢截面如图 3.4 所示，得工字钢惯性矩如下(式 3-2):

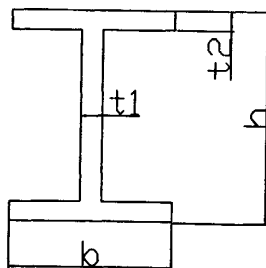


图 3.4 工字钢截面

$$I = \int_A (y^2 + z^2) d\sigma = \frac{2}{3} b^3 t + \frac{1}{24} [(b+t)^3 - (b-t)^3] (h-2t) = 5.787 \times 10^{-4} m^4 \quad (3-2)$$

其中 $t_1=t_2=t=0.01m$, $h=0.4m$, $b=0.4m$ 。

所以, 转角(式 3-3)

$$\theta = -\frac{Wl^2}{16EI} = -\frac{4500 \times 3.3^2}{16 \times 210 \times 10^9 \times 5.787 \times 10^{-4}} = 2.036 \times 10^{-5} \cdot \quad (3-3)$$

龙门结构最大变形量 $f=22.3 \mu m$, 相比较龙门横向跨度(3000mm)而言, 变形量可忽略, 所以变形量 $f=22.3 \mu m$ 可允许。

3.1.3 传感器架的设计

在本检测系统中, 传感器架起着支承并定位传感器的作用, 传感器能够沿传感器架上下左右移动, 并能固定在传感器架上, 因此传感器架上应设计有导轨以及定位装置。

3.1.3.1 设计基本要求

- 1) 保证测量精度 采用合理的定位、夹紧方案, 选择合适的定位、夹紧元件, 确定合适的尺寸, 保证工件的加工要求;
- 2) 提高测量效率 设计合理, 能尽量减少辅助测量时间, 提高生产效率;
- 3) 具备良好的使用性能 设计结构简单、合理, 便于加工、装配、检验、维修。使用简单、安全、可靠, 减少劳动强度;
- 4) 满足刚性要求 结构设计合理, 最大变形量不得大于 $1 \mu m$ 。

3.1.3.2 结构与校核

1) 定位方案及定位元件的选择与设计

机械结构简图如图 3.5 所示, 采用燕尾槽导轨形式, 导轨固定部分长 3000mm, 有 12 个移动滑块部分(燕尾槽副导轨), 分别安装 12 只传感器, 使传感器可沿传感器架左右移动; 在燕尾槽副导轨上安装一个可上下移动的装置, 移动部分采用圆柱体结构, 圆柱体尾部连接一块钢

板，可用于安装传感器，钢板与圆柱部分采用过盈配合。圆柱部分与燕尾槽滑块连接部分使用螺栓拧紧定位。燕尾槽结构紧凑，调整间隙方便，连接稳固。此外传感器间距即燕尾槽滑块的间距调整使用量块定位，定位基准面为 A 面，如图 3.6 示；上下移动部分三视图如图 3.7 所示。

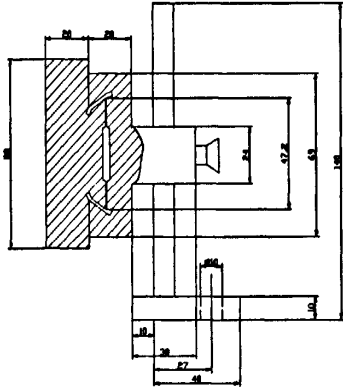


图 3.5 传感器架结构图

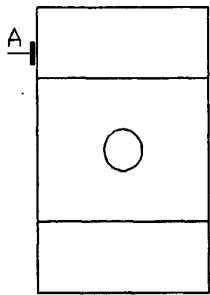


图 3.6 燕尾槽滑块定位基准面

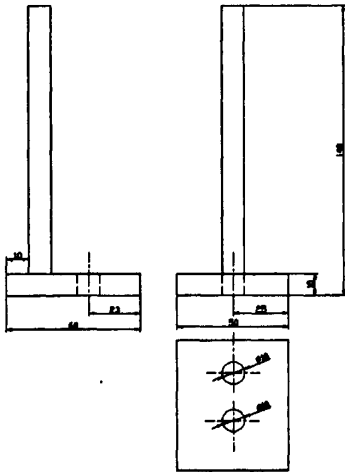


图 3.7 传感器上下移动结构图

2) 变形校核

传感器架 Y 向长度为 3000mm，跨度大，由于系统测量精度和传感器定位精度密切相关，

因此要进行传感器架的弯曲变形校核。

将传感器架简化成图 3.8, $l_1=l_4=500\text{mm}$, $l_2=l_3=1000\text{mm}$ 。 $q=W/l=90\text{N/m}$ 。此梁为超静定梁, 两端梁支座距离梁两端 $1/4$ (l 为梁总长, 且 $l=3000\text{mm}$) , 与两端梁支座在最两端相比, 其最大挠度可降低 91.25%; 此外, 采用三个支座和承受均布载荷也可显著降低梁的最大挠度^[18]。

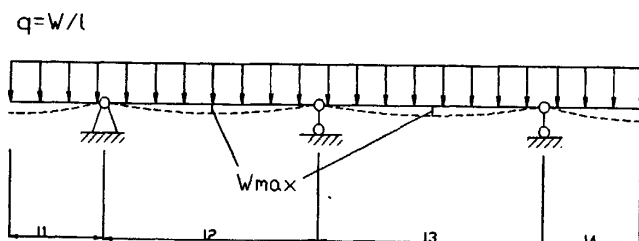


图 3.8 传感器架变形分析

为简化计算, 现将上图简化为图 3.9:

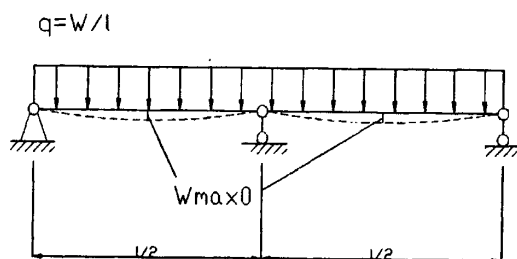


图 3.9 传感器架变形分析简化图

使用超静定梁变形计算积分法^[25], 静定基如图所示, F_B 为多余反力, 梁的截面弯矩为 (式 3-5) :

$$M = \begin{cases} \frac{1}{2}(ql - F_B) - qx & 0 \leq x \leq l \\ \frac{1}{2}(ql + F_B) - qx & l \leq x \leq 2l \end{cases} \quad (3-5)$$

将弯矩函数带入弯矩曲率关系, 积分两次, 得分段转角方程和挠曲线方程 (式 3-6, 3-7) :

$$Ely' = \begin{cases} \frac{1}{2}(ql - F_B)x - \frac{1}{2}qx^2 + C_1 & 0 \leq x \leq l \\ \frac{1}{2}(ql + F_B)x - \frac{1}{2}qx^2 + C_2 & l \leq x \leq 2l \end{cases} \quad (3-6)$$

$$EIy = \begin{cases} \frac{1}{4}(ql - F_B)x^2 - \frac{1}{6}qx^3 + C_1x + D_1 & 0 \leq x \leq l \\ \frac{1}{4}(ql + F_B)x - \frac{1}{6}qx^2 + C_2x + D_2 & l \leq x \leq 2l \end{cases} \quad (3-7)$$

利用边界条件和连续条件可以求出：

$$C_1 = -\frac{1}{24}q\left(\frac{l}{2}\right)^3, C_2 = -\frac{9}{8}q\left(\frac{l}{2}\right)^3, D_1 = 0, D_2 = \frac{11}{12}q\left(\frac{l}{2}\right)^3, F_B = \frac{1}{2}ql.$$

将求出参数带入式得，

$$w_{\max 0} = \frac{1}{384EI}q\left(\frac{l}{2}\right)^4 \quad (3-8)$$

其中 $E=210 \times 10^9 \text{Pa}$, $q=150 \text{N/m}$, $l=3 \text{m}$, 求出截面惯性矩 $I=7.745 \times 10^{-6} \text{m}^4$, 带入公式 3-8 得传感器架最大变形量 $w_{\max}=8.75\% \times w_{\max 0}=8.75\% \times 1.216 \mu \text{m}=0.106 \mu \text{m}$, 最大变形量小于 $1 \mu \text{m}$, 符合刚性要求。

3.2 传动系统的设计

传动系统设计包括主传动系统设计和 Z 向传动系统设计两部分，主传动系统（即 X 向传动系统）要求定位精度高，运行平稳，且具有回零功能；Z 向传动系统对于定位精度要求不高，要求满足小范围运动行程。

3.2.1 主轴传动系统设计

主轴传动采用伺服电机驱动，是一种半闭环的伺服驱动系统，传动机构采用滚珠丝杠副加圆柱导轨。

3.2.1.1 滚珠丝杠副的设计

作为传动滑动丝杠的进一步延伸发展，滚珠丝杠^[10]由于其高效率、温升少、高精度、高速度、高刚性、可逆性、长寿命、低能耗、同步性、高灵敏性、无间隙、维护简单等优点在当代进给伺服机构中得到广泛应用，为了系统的进给速度、高定位精度、高平稳性的要求，必须合理选择滚珠丝杠副，并进行必要的校核计算。

滚珠丝杠的选择包括其精度选择、尺寸规格（包括导程与公称直径）、支承方式等几个方面的内容。滚珠丝杠副的承载能力用额定动载荷或额定静载荷来确定滚珠丝杠副的尺寸规格，对细长而又承受压缩载荷的滚珠丝杠作压杆稳定性核算；对转速高，支承距离大的滚珠丝杠副作临界转速校核；对数控机床，需核算其转动惯量；对全闭环系统，需核算其谐振频率。

1) 计算条件

● 龙门重：龙门架自身重 W_1 ，传感器架和传感器架及其驱动装置中 W_2 ，总重量 $W=W_1+W_2<4500N$ 。

● 最大行程： $S_{max}=1500mm$ 。

● 丝杠两端支承距离： $L_s=L_1+L_2+L_3=1500mm+200mm+300mm=2000mm$ 。

其中 L_1 为驱动行程， L_2 为丝杠螺母长度， L_3 为余量。

● 螺纹全长： $S=1900mm$ 。

● 安装方法：固定-支持。

● 定位精度： $0.01mm/300mm$ 。

● 重复定位精度： $0.005mm$ 。

● 寿命： $20000h$ 。

● 滑动摩擦系数： $\mu=0.003$ 。

● 驱动电机转速： $N_{max}=1000r/min$ 。

● 一般工作状态：快速进给。

● 摩擦阻力： $F_f=(W_1+W_2)\times\mu=13.5N$ 。

2) 精度选择

(1) 选择原则^[11]

以主机精度确定滚珠丝杠精度，选择精度要适当，不要忽视精度愈高、制造周期愈长、成本也愈高这个事实，应设法采用其他措施解决；还要考虑制造滚珠丝杠副厂家的检测手段能否保证产品质量的要求。

(2) 精度等级选择

根据系统设计要求，确定滚珠丝杠副的精度等级。如图 3.10 所示。

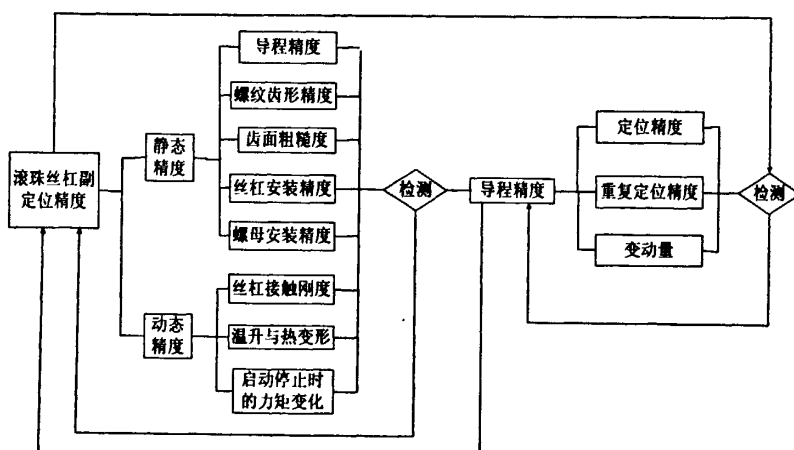


图 3.10 滚珠丝杠精度选择

根据使用范围及要求将滚珠丝杠副分为定位滚珠丝杠副(P)和传动滚珠丝杠副(T)，精度等级

分为七个等级，即 1、2、3、4、5、7、10 级。1 级精度最高，依次逐渐降低。滚珠丝杠的精度直接影响 X 向进给的定位精度，在滚珠丝杠精度参数中，其导程误差对定位精度的影响最明显。一般在初步设计时设定丝杠的任意 300mm 行程变动量 V_{300P} 应小于目标设定的定位精度值的 $1/3\sim 1/2$ ，在最后精度验算中确定。根据仪器设计计算指标，取丝杠定位精度为 0.01mm，所以 $V_{300P}\leq 0.01mm=10\mu m$ ，根据行程偏差和变动量的关系（如表 3.1 所示）和丝杠常规全长制造范围（如表 3.2 所示），选取滚珠丝杠副精度等级 2。

表 3.1 滚珠丝杠精度等级说明

检查内容	符号	有效行程	精度等级						
			1	2	3	4	5	7	10
任意 300 行程内行程变动量	$V_{300P}/\mu m$	-	6	8	12	16	23	52	210

表 3.2 滚珠丝杠精度与制造范围（单位/mm）

精度等级 公称直径	长度范围	<500	500~1000	1000~1500	1500~2000	2000~2500	2500~3000	3000~3500	3500~4000	4000~5000	5000~6000
12		3,4,5	7,10								
16		1,2	3,4,5	7,10							
20		1,2	3,4,5	7,10							
25		1,2	3,4,5	7,10							
32		1,2	3,4,5	7,10							
40		1,2	3,4,5						7,10		
50		1,2	3,4						5	7,10	
63		1,2	3,4						5	7,10	
80		1,2	3,4						5	7,10	
100		1,2	3,4						5	7,10	

3) 选择导程 P_h

丝杠导程的选择一般根据设计目标快速进给的最高速度为 V_{max} 、伺服电机的最高转速 N_{max} 及电机与丝杠的传动比 i 来确定，基本丝杠导程^[12]应满足下式(式 3-9)：

$$P_h \geq \frac{V_{max}}{i \times N_{max}} = \frac{5000}{1 \times 1000} = 5mm$$

(3-9)

所以取 $P_h=5mm$ 。

4) 循环装置和预紧方式的选择

滚珠循环返回装置是滚珠丝杠副的重要元件,它在很大程度上影响传动的平滑性和可靠性。在选择设计使用时,要根据系统的结构和性能要求去确定。

(1) 循环装置选择

循环方式分为内循环和外循环^[11]。内循环的特点是:循环滚珠链短,螺母外径比外循环小,结构紧凑,返回装置刚性好,寿命长,有较好的刚性、可靠性和耐用度。适用于各种高灵敏、高刚度的精密进给定位系统。多头螺纹,大导程不宜采用。外循环的特点是:滚珠循环链较长,轴向排列紧凑,承载能力较高,径向尺寸较大。结构简单,工艺性优良,适合成批生产。回珠管可设计、制造成理想的运动通道。适用于重载荷传动、高速驱动及精密定位系统。在大导程、小导程、多头螺纹中显示出独特优点。根据主动系统载荷小,使用寿命长等特点,又考虑外循环式丝杠副螺母回珠器在螺母外边,容易损坏和卡死,内循环式的回珠器在螺母副内部,不存在脱落和卡死现象,所以选取内循环方式。

(2) 预紧方式的选择

为防止造成丝杠传动系统的任何失位,保证传动精度,消除任何可能的轴向间隙并能增加刚性,要提高螺母的接触刚度,必须施加一定的预紧力,选择合适的预紧方式。

滚珠丝杠副的预紧方式可分为两种,单螺母预紧和双螺母预紧。由于双螺母不仅装配、预紧调整等比单螺母方便,而且其传动刚性比单螺母也好,所以本系统选择双螺母垫片预紧方式。

5) 初步确定滚珠丝杠规格

(1) 额定动载荷的计算

滚珠丝杠副设计时一般按额定动载荷来确定滚珠丝杠副的尺寸规格。额定动载荷^[13]是指一批相同规格的滚珠丝杠经过运转一百万次后,90%的丝杠副(螺纹表面或滚珠)不产生疲劳剥伤(点蚀)时的轴向载荷。在实际运用中额定动载荷的计算可由下列两式推导出(式 3-10,3-11):

$$L = (C_a / (F_m \times f_w))^3 \times 10^6 \quad (3-10)$$

$$L_f = L / (60 \times N_m) \quad (3-11)$$

式中, L 为疲劳寿命,用丝杠总回转数表示; L_f 为疲劳寿命,用丝杠总运转时间表示; C_a 为基本动额定负荷; F_m 表示轴向平均负荷; N_m 表示平均转速; f_w 表示负荷系数。

由 得(式 3-12):

$$C_a = (60 \times N_m \times L_f)^{1/3} \times F_m \times f_w \times 10^{-2} \quad (3-12)$$

计算式中各分量:

丝杠平均转速(式 3-13)

$$N_m = \frac{n_1 t_1 + n_2 t_2}{t_1 + t_2} = 181.82 \text{r/min} \tag{3-13}$$

平均负荷(式 3-14)

$$F_m = \left(\frac{F^3 \cdot n_1 \cdot t_1 + F^3 \cdot n_2 \cdot t_2}{t_1 + t_2} \right)^{1/3} = F = 13.5 \text{N} \tag{3-14}$$

其中取复位行程 1600mm，速度为 1000r/min，时间 0.32min，测量行程 1600mm，速度为 100r/min，时间 3.2min。

根据表 3.3 选择疲劳寿命 $L_f=20000\text{h}$ 。

表 3.3 滚珠丝杠副预期工作寿命 L_h

主机类别	$L_h(\text{h})$
一般机床、组合机床	10000
数控机床、精密机床	15000
工程机械	5000~10000
自动控制系统	15000
测量系统	15000

根据表 3.4 选取载荷系数 $f_w=1.3$ 。

表 3.4 载荷系数选择

使用条件	f_w
平稳无冲击运动	1.0~1.2
一般运动	1.3~1.5
伴随有冲击振动运动	1.5~1.2

所以额定动载荷(如式 3-15):

$$C_a = (60 \times N_m \times L_f)^{1/3} \times F_m \times f_w \times 10^{-2} = (60 \times 181.82 \times 20000)^{1/3} \times 13.5 \times 1.3 \times 10^{-2} = 105.65 \text{(N)} \tag{3-15}$$

因此，若要达到滚珠丝杠副 20000 小时的预期寿命，所选择的滚珠丝杠额定动载荷需大于 105.65N。

(2) 初步确定直径 d

根据临界转速得(式 3-16):

$$d \geq \frac{n_c \times L_s^2}{f} \times 10^{-7} = 18.3 \text{mm} \tag{3-16}$$

其中临界转速 $N_c=N_{max}=1000\text{r/min}$ ，丝杠两端支撑长度 $L_s=2000\text{mm}$ ，与安装有关的系数 f ，

根据表 3.5 选取 $f=15.1$ 。

表 3.5 安装系数选择

丝杠两端支撑方式	f
支持——支持	9.7
固定——支持	15.1
固定——固定	21.9
固定——自由	3.4

结合表 3.2 丝杠常规全长制造范围，选取滚珠丝杠直径 $d=40\text{mm}$ 。

(3) 选取丝杠规格

综合考虑，根据额定动载荷 C_d ，初步确定的直径 d ，导程 P_h 以及选定的循环和预紧方式选取滚珠丝杠的公称直径和型号。最终选定深圳市赛瑞德精工机械技术有限公司 GD 系列 GD4005-3 型号滚珠丝杠副。具体参数如表 3.6 所示。

表 3.6 滚珠丝杠副 GD4005-3 参数

丝杠代号	公称直径	基本导程	丝杠外经	丝杠底径	循环圈数	额定载荷 N		刚度 N/ μm
	d_0	P_h	d_1	d_3	n	动载荷 C_d	静载荷 C_{sa}	K_c
GD4005-3	40	5	39.2	36.76	3	11819	38818	691

6) 滚珠丝杠副的校核计算

(1) 刚度校核

丝杠的导程误差、伺服系统误差、各机械环节弹性变形引起的误差是影响加工中心定位精度的因素。一般情况下，以上各环节影响弹性变形自大到小排列顺序是：滚珠丝杠本身的抗压刚度 K_{mm} ，支承轴承的轴向刚度 K_{ba} ，滚珠丝杠副中滚珠与滚道的接触刚度 K_c ，折算到滚珠丝杠副上的伺服系统刚度 K_R ，折算到滚珠丝杠副上联轴节的刚度 K_l ，滚珠丝杠副的抗扭刚度 K_t ，螺母座、轴承座的刚度 K_h 。则传动系统综合刚度 K 为(式 3-17)^[4]：

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_{mm}} + \frac{1}{K_{ba}} + \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_R} + \frac{1}{K_l} + \frac{1}{K_t} + \frac{1}{K_h}} \tag{3-17}$$

一般校核计算中，伺服系统刚度 K_R ，折算到滚珠丝杠副上联轴节的刚度 K_l ，滚珠丝杠副的抗扭刚度 K_t ，螺母座、轴承座的刚度 K_h 可忽略不计，则上式可简化为(式 3-18)：

$$K=\frac{1}{\frac{1}{K_{tmin}}+\frac{1}{K_{ba}}+\frac{1}{K_c}} \tag{3-18}$$

丝杠抗压刚度 K_{tmin} 计算公式如下(式 3-19):

$$K_{tmin}=\frac{AE}{l_{max}}\times10^{-6}=\frac{\pi d_i^2E}{4l_{max}}\times10^{-6}=111.437\text{ N}/\mu\text{ m} \tag{3-19}$$

式中: A 为丝杠最小截面积; l_{max} 为最大承载距离, $l_{max}=2000\text{mm}$; d_i 为丝杠底径, $d_i=36.76\text{mm}$; E 为丝杠材料弹性模量, $E=2.1\times10^5\text{Mpa}$ 。

从轴承生产厂样本中查出支承轴承的轴向刚度 $K_{ba}=1020\text{N}/\mu\text{ m}$, 滚珠丝杠副中滚珠与滚道的接触刚度 $K_c=691\text{N}/\mu\text{ m}$ 。

得传动系统综合刚度 $K=87.77\text{N}/\mu\text{ m}$ 。

由于在测量过程与返程过程中不存在切削力, 故轴向载荷仅为导轨的摩擦力 $F_f=F_r=13.5\text{N}$, 故因摩擦力引起的弹性变形为(式 3-20):

$$\delta =F_f/K=0.154\text{ }\mu\text{ m}<V_{300p}=12\text{ }\mu\text{ m} \tag{3-20}$$

(2) 临界转速校核

滚珠丝杠转速提高到某一值时会发生共振, 此转速称之为丝杠的危险转速。丝杠共振可能会造成机构损坏, 所以要避免丝杠的私用转速与其固有频率发生共振。通常将危险转速的 80% 以下作为容许转速。

$$n=\alpha\times\frac{60\lambda^2}{2\pi L_s^2}\sqrt{\frac{EIg}{\gamma A}}=f\times d_i/L_s^2\times10^7\approx1387r/\text{min}>n_{max}=1000r/\text{min} \tag{3-21}$$

式 3-21 中, n 为容许转速, r/min ; α 为安全系数 (取 $\alpha=0.8$) ; E 为弹性模量 (钢的弹性模量 $E=2.1\times105\text{kgf}/\text{mm}^2$) ; I 为丝杠界面惯性矩 ($I=\pi d_i^4/64\text{mm}^4$) ; d_i 为丝杠螺纹底径; A 为丝杠轴界面面积 ($A=\pi d_i^2/4\text{mm}^2$) ; L_s 为丝杠两端安装支撑的距离 (临界长度), mm ; g 为重力加速度 ($g=9.8\times10^3\text{mm}/\text{s}^2$) ; γ 为材料的比重 ($\gamma=7.8\times10^{-6}\text{kgf}/\text{mm}^3$) ; f, λ 为支承系数, 如表 3.7 所示, 选择 $f=15.1$, $\lambda=3.927$ 。

表 3.7 支承系数选择

丝杠两端支承方式	f	λ
支持——支持	9.7	π
固定——支持	15.1	3.927
固定——固定	21.9	4.730
固定——自由	3.4	1.875

7) 轴承的选择

滚珠丝杠的载荷主要分为轴向载荷和径向载荷,在主传动系统中,轴向载荷主要是摩擦力,径向载荷除丝杠自重外,一般无外载荷。作为进给定位系统,传动丝杠对微小的位移要有高灵敏的响应,故要求支撑轴承的摩擦力矩要低。按照这样的要求,需要采用专门的丝杠支承轴承。目前使用最广泛的有两种^[15],接触角为 60° 的推力角接触球轴承和滚针—双向推力圆柱滚子组合轴承。其中推力角接触球轴承的摩擦力矩比组合轴承小,但刚度更低,适用于较高速的进给传动;组合轴承适用于重载、转速相对较低、需要丝杠预拉伸并且要求轴向高刚度的场合。

推力角接触球轴承可以同时承受径向载荷及轴向载荷,(也可以单独承受轴向载荷),能在较高转速下正常工作。由于一个轴承只能承受单向的轴向力,因此,一般成对使用。承受轴向的载荷能力和接触角 α 有关。接触角越大,承受轴向载荷的能力也越高。

由于本测量装置属于轻中载,主要承受轴向载荷,因此选用接触角为 60° 的推力角接触球轴承。

3.2.1.2 导轨的选用

1) 导轨的作用及性能要求

机械系统中使用的导轨^[6],其功能是导向和承载,即保证运动部件按照给定的运动要求和规定的运动方向运动。当运动件沿着承导件作直线运动时,承导件上的导轨起支承和导向作用,即支承运动件和保证运动件在外力(载荷及运动件本身的重量)作用下,沿给定的方向进行直线运动。对导轨性能的基本要求是导向精度高、刚度大、耐磨性好、精度保持性好、运动灵活而平稳、结构简单和工艺性好。

导轨的导向精度是指运动构件沿导轨承导面运动时其运动轨迹的准确程度。运动件的实际运动轨迹与给定方向之间的偏差越小,则导向精度越高。影响导向精度的主要因素有导轨承导面的几何精度、导轨的结构类型、导轨副的接触精度、表面粗糙度、导轨和支承件的刚度、导轨副的油膜厚度及油膜刚度,以及导轨和支承件的热变形等。直线运动导轨的几何精度一般包括:垂直平面和水平平面内的直线度;两条导轨面间的平行度。导轨几何精度可以用导轨全长上的误差或者单位长度上的误差表示。

2) 导轨的分类

(1) 按运动形式可分为直线运动导轨和回转运动导轨。

(2) 按受力结构可分为开式导轨和闭式导轨。开式导轨借助重力或弹力来保护两导轨面的接触,闭式导轨只靠导轨本身的结构来保证两导轨面的接触。

(3) 按摩擦性质可分为滑动导轨(如圆柱型、棱柱型等)、滚动导轨(如滚珠型、滚柱型和滚针型等)、流体介质摩擦导轨(如动压型、静压型等)和弹性摩擦导轨(如片簧型、膜片型、柔性铰链型)。

3) 导轨的设计内容

(1) 根据工作条件, 选择适当的导轨类型。

(2) 合理选择导轨的截面形状, 保证导向精度。

(3) 选择适当的导轨结构及尺寸, 使其在给定的载荷及工作温度范围内, 有足够的刚度、良好的耐磨性, 保证运动轻便、平稳。

(4) 选择导轨的补偿及调整装置, 经长期使用后, 通过调整能够保证需要的导向精度。

(5) 选择合理的润滑方法和防护装置, 使导轨由良好的工作条件, 以减少摩擦和磨损。

(6) 制定保证导轨所必需的技术条件, 如选择适当的材料、热处理、精加工和测量方法等。

4) 导轨的选用

根据导轨的工作条件, 即为龙门机构起承载和导向作用, 导轨主要承载轴向载荷, 因此检测装置可采用直线圆柱导轨或者静压导轨, 考虑经济性, 以及圆柱导轨的特点, 选用直线圆柱导轨。

圆柱导轨^[16], 配合面为圆柱形式, 用圆柱钢焊接在一 T 形钢上, 滑板采用镶衬套开豁口的办法与圆柱导轨配合, 制造方便, 外圆采用磨削, 内孔珩磨可达精密的配合, 但磨损后不能调整间隙。不能承受大的扭矩, 适用于承载轴向载荷的场合。为了克服圆柱形导轨副磨损后无法修复的不足^[17], 有时可在导轨面上加上一层特殊的耐磨材料作衬垫, 其材质多为巴氏合金、青铜、聚四氟乙烯等, 有的运动部件要求摩擦阻力很小, 以保证运动灵敏可靠, 此时可以用滚动圆导轨来代替滑动导轨, 滚动导轨还具有耐磨的优点。

本论文选择浙江新亿特分公司生产的圆柱型滚动直线导轨, 圆柱型滚动直线导轨副由直线运动球轴承、导轨轴、直线运动球轴承支承座等部件组成。特点: 摩擦系数很小, 只有 0.001~0.004, 功率消耗低; 微量移动灵活、准确、低速时无蠕动爬行; 润滑简便, 维修、更换快速方便; 移动速度快, 精度高, 行程长; 导轨采用优质合金钢制造, 经中频感应淬硬 HRC58-63, 耐用, 性能稳定, 有良好的精度保持性。

导轨直径要根据动静载荷大小来选择, 因为在导轨受力方向不存在惯性力, 没有加速度, 所以动静载荷大小相等, $C_a = W/2 = 2250N$, 根据直线滑动单元滑块系列表及圆柱直线导轨光轴系列表, 选择直线滑动单元滑块 TBR25LUU, 直径 $d = 25mm$, 配合直线轴承 2×LM25UU-OP。直线光轴 ZNT25, 长度 $l = 2000mm$ 。

导轨轴各项参数如下: 硬度: HRC62+/-2(SUS440C>HRC58), 精度: g6-g5, 粗糙度: $<0.8 \mu m$, 硬带深度: 0.8~3mm, 直线度: $<5 \mu m/1000mm$, 圆度: $<0.003mm$ 。

所以检测装置在 X 方向的直线度误差 $\delta < 5 \mu m/1000mm \times 2000mm = 10 \mu m$ 。

根据 2.2.3 节中 X 向导向误差分配大小为 $\pm 0.02mm$ 可知导轨导向精度选择符合测量装置精度要求。

3.2.1.3 电机的选择与计算

1) 选取电机类型

伺服系统中的电气执行元件主要有^[8]步进电机（又可分为旋转式、平面型、直线型、混合型）、直流电机（又可分为小惯量、宽调速等类型）和交流伺服电机三大类。其中开环伺服系统的执行元件多采用步进电机，闭环和半闭环伺服系统的执行元件多采用直流和交流电机，也可采用步进电机和位置检测元件构成闭环系统。

论文选取交流伺服电机作为主传动系统的执行元件，交流伺服电机作为一种执行电动机，具有高精度、高效率、高可靠性等优点，它与步进电机相比在以下方面有优势^[19]：

(1) 控制精度高 步进电机的布局较一般为 1.8° （两相）或 0.72° （五相），而交流伺服电机的精度取决于电机编码器的精度。以日本富士 β 系列伺服电机为例，其编码器为 16 位，驱动器每接收 $2^{16}=65536$ 个脉冲，电机转一圈，其脉冲当量为 $360^\circ/65536=0.0055^\circ$ ；并实现了位置的闭环控制，从根本上克服了步进电机的失步问题。

(2) 转矩特性好 步进电机的输出力矩随转速的升高而下降，且在较高转速时会急剧下降，其工作转速一般在每分钟几十转到几百转。而交流伺服电机在其额定转速（一般为 2000r/min 或 3000r/min）以内为恒转矩输出，在额定转速以上为恒功率输出。

(3) 具有过载能力 步进电机一般不具有过载能力。交流伺服电机具有较强的过载能力。以松下交流伺服电机为例，它具有速度过载和转矩过载能力。其最大转矩为额定转矩的三倍，可用于克服惯性负载在启动瞬间的惯性力矩。

(4) 加速性能好 步进电机空载时从静止加速到每分钟几百转，需要 200~400ms；交流伺服电机的加速性能较好，以松下 MSMA400W 交流伺服电机为例，电机空载时从静止加速到额定转速 3000r/min 仅需几毫秒，可用于要求快速启停的场合。

初步选择台湾东元伺服马达 TSB13 系列中惯量马达型号 TSB13102A，驱动器选取与其配套的 TSTA30C，具体参数如表 3.8：

表 3.8 TSB13102A 马达参数

规格项目/马达种类	符号	单位	TSB13102A
额定输出	P_R	W	1000
搭配驱动器			TSTA30C
额定线间电压	V_T	V	188.7
额定扭矩	T_R	Nm	9.545
额定相电流	I_R	A	5.16
额定转速	N_R	rpm	1000
最大瞬间扭矩	$T_P(N)$	Nm	28.654
瞬间最大电流	I_P	A	15.5
转矩常数	K_T	Nm/A	2.039
转子惯量	J_M	kgcm ²	12.14
绝缘等级			B 级 (130℃)
马达使用时周围温度		℃	0~40

2) 电机的计算

选择伺服电机应满足以下几条^[20]:

- 根据负载转矩选择电机，最大负载转矩不得大于电机的额定转矩；
- 电机的转子惯量应与负载惯量相匹配；
- 快速移动时，转矩不得大于伺服电机的最大转矩。

下面分别进行计算：

(1) 最大负载转矩计算(式 3-22)

$$M = \left(\frac{F_{\max} P_h}{2\pi\eta} + M_{po} + M_{fo} \right) \times u = \left(\frac{13.5 \times 0.012}{2 \times 3.14 \times 0.9} + 0.000573 + 2.5 \right) \times 1$$
$$= 2.52923 Nm < 9.545 Nm$$
(3-22)

其中 $F_{\max}$ 为丝杠上最大轴向载荷，等于进给力加摩擦力（进给力为零）； P_h 是丝杠导程； η 为滚珠丝杠的机械效率； M_{fo} 为滚珠丝杠轴承的摩擦力矩， $M_{fo}=2.5Nm$ ； u 为伺服电机到丝杠的传动比； M_{po} 为因滚珠丝杠螺母预加载荷引起的附加摩擦力矩(式 3-23)。

$$M_{po} = \frac{F_{ao} \times P_h \times K_p}{2000 \times \pi} = \frac{13.5 \times 12 \times 0.2}{2000 \times 3.14} = 5.73 \times 10^{-4} Nm$$
(3-23)

(2) 电机的转子惯量与负载惯量的匹配计算

通常的匹配条件为： $1 < J_M/J_L < 4$ ，其中 J_M 为电机的转载惯量， J_L 为负载转子惯量。

负载惯量 J_L 按照动能守恒定理折算(式 3-24),

$$J_L = \sum_k J_k \left(\frac{\omega_k}{\omega} \right)^2 + \sum_i m_i \left(\frac{v_i}{\omega} \right)^2, (kgm^2) \quad (3-24)$$

其中 J_k 为各旋转件的转动惯量, ω_k 为各旋转件的角速度(rad/s), m_i 为各直线运动件的质量(kg), v_i 为各直线运动件的速度(m/s), ω 为伺服电机的角速度(rad/s)。

根据公式计算得(式 3-25,3-26):

$$J_R = \frac{1}{8} m D^2 = \frac{1}{32} \pi \rho l D^4 = 0.000598 kgm^2 \quad (3-25)$$

$$J_L = J_R + m \left(\frac{P_h}{2\pi} \right)^2 = 0.000598 + 450 \times \left(\frac{0.005}{2 \times 3.14} \right)^2 = 8.8325 \times 10^{-4} Kgm^2 \quad (3-26)$$

查电机参数表得电机的转子惯量 $J_M = 0.001214 kgm^2$, 所以 $1 < J_M/J_L = 1.37 < 4$, 符合匹配条件。

(3) 快速移动时, 转矩不得大于伺服电机的最大转矩的校核计算

当执行部件从静止以阶跃指令加速到最大移动速度时, 所需要的转矩最大。所需转矩计算公式如下(式 3-27):

$$M_a = J\theta = J \frac{2\pi n_{max}}{60 t_{ac}} = 4.44 Nm < M_{max} = 28.645 Nm \quad (3-27)$$

其中 n_{max} 为电机在执行部件最快时的转速(r/min), J 为折算到电机轴上的总惯量(kgm^2), t_{ac} 为加速时间(s) (取 $a_{max} = 10 m/s^2$, $t_{ac} = V_{max}/(60a_{max})$)。

3.2.2 Z 轴传动系统的设计

类似于主传动系统的设计, Z 轴传动系统的设计也分为滚珠丝杠副的设计, 导轨的选用, 电机的选择与计算。

3.2.2.1 滚珠丝杠副的设计

1) 计算条件

- 传感器架和传感器架及其驱动装置重: $W_2 \leq 200N$
- 最大行程: $S_{max} = 300mm$
- 丝杠两端支承距离: $L_s = L_1 + L_2 + L_3 = 300mm + 50mm + 50mm = 400mm$
- 其中 L_1 为驱动行程, L_2 为丝杠螺母长度, L_3 为余量
- 螺纹全长: $S = 350mm$
- 安装方法: 固定-支持
- 定位精度: $0.04mm/300mm$

- 重复定位精度: 0.02mm
- 寿命: 5000h
- 驱动电机转速: $N_{\max}=1000\text{r/min}$
- 一般工作状态: 快速进给
- 摩擦阻力: 摩擦阻力等于装置自重 $f=W_2=200\text{N}$

2) 精度选择

由于 Z 向传动装置只起简单的传动定位作用, 不要求较高的精度, 取 $V_{300p}=50\text{ }\mu\text{m}$, 根据表 3.1 选择精度等级 5。

3) 选择导程

丝杠导程的选择一般根据设计目标快速进给的最高速度为 $V_{\max}$ 、伺服电机的最高转速 $N_{\max}$ 及电机与丝杠的传动比 i 来确定, 基本丝杠导程应满足下式(3-28):

$$P_h \geq \frac{V_{\max}}{i \times N_{\max}} = \frac{1000}{1 \times 500} = 2\text{mm} \tag{3-28}$$

所以取 $P_h=4\text{mm}$ 。

4) 循环装置和预紧方式的选择

选择内循环方式, 双螺母垫片预紧方式。

5) 确定滚珠丝杠规格

(1) 额定动载荷的计算(如式 3-29)

$$C_s=(60 \times N_m \times L_f)^{1/3} \times F_m \times f_m \times 10^{-2} = (60 \times 500 \times 5000)^{1/3} \times 200 \times 1.3 \times 10^{-2} = 1381.46(\text{N}) \tag{3-29}$$

因此, 若要达到滚珠丝杠副 5000 小时的预期寿命, 所选择的滚珠丝杠额定动载荷需大于 1381.46N。

(2) 选取丝杠规格

根据额定动载荷 C_s , 导程 P_h 以及选定的循环和预紧方式选取深圳市赛瑞德精工机械技术有限公司 GD 系列滚珠丝杠副型号 GD2004-3, 具体参数见表 3.9。

表 3.9 滚珠丝杠副 GD2004-3 参数

丝杠代号	公称 直径 /mm	基本 导程 /mm	丝杠 外径 /mm	丝杠 底径 /mm	循环 圈数	额定载荷 N		刚度 N/ μm
	d_0	P_h	d_1	d_3	n	动载荷 C_o	静载荷 C_{oa}	K_c
GD2004-3	20	4	19.3	17.3	3	6836	16127	327

6) 轴承的选择

由于本测量装置属于轻中载，主要承受轴向载荷，因此选用接触角为 60° 的推力角接触球轴承。

3.2.2.2 导轨的选用

导轨依然选用圆柱导轨，由于在导轨受力方向不存在惯性力，没有加速度，所以动静载荷大小相等， $C_a=1384N$ ，根据直线滑动单元滑块系列表及圆柱直线导轨光轴系列表，选择直线滑动单元滑块 TBR20LUU，直径 $d=20mm$ ，配合直线轴承 $2 \times LM20UU-OP$ ，直线光轴 ZNT20，长度 $l=400mm$ 。

3.2.2.3 电机的选择与计算

考虑到 Z 轴传动系统对于精度要求不高，所以选用步进电机作为 Z 轴传动系统的控制电机。

1) 步进电机的特点^[21]

步进电机是一种能将电脉冲转换成旋转或者直线增量运动的电磁执行元件。当步进驱动器接收到一个脉冲信号，它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度，该角度成为“步距角”，它的旋转式以固定的角度一步一步运行的。可以通过控制脉冲的个数来控制角位移量，从而达到准确定位的目的；同时可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度，从而达到调速的目的。步进电机作为控制用的特种电机，利用其没有积累误差（精度为 100%）的特点，广泛应用于各种开环控制。归纳起来，步进电机具有以下特点：

(1) 定子绕组的通电状态每改变一次，其转子便转过一定的角度，转子转过的总角度（角位移）严格与输入脉冲的数量成正比。

(2) 定子绕组通电状态改变速度越快，其转子旋转的转速越高，即通电状态的变化频率越高，转子的转速越高。

(3) 改变定子绕组的通电顺序，将导致其转子旋转方向的改变。

(4) 若维持定子绕组的通电状态，步进电机便停留在某一位置固定不动，即步进电机具有自锁能力，不需要机械制动。

(5) 步距角 α 与定子绕组相数 m ，转子齿数 z ，通电方式 k (k =拍数/相数，“拍数”是指步进电机旋转一周，定子绕组的通电状态被切换的次数；“相数”是指步进电机每个通电状态下通电的相数) 有关，可以用下式来表示(式 3-30)：

$$\alpha = \frac{360^\circ}{mzk} \quad (3-30)$$

例如：三相三拍时， $m=3$ ， $k=1$ ，三相六拍时， $m=3$ ， $k=2$ 。

目前常用的有二相、三相、四相、五相步进电机。电机相数不同，步矩角也不同。电机在出厂时步矩角 α 的值就给定了。一般二相电机的步矩角为 $0.9^{\circ}/1.8^{\circ}$ 、三相的为 $0.75^{\circ}/1.5^{\circ}$ 、五相的为 $0.36^{\circ}/0.72^{\circ}$ 。在没有细分驱动器时，用户主要靠选择不同相数的步进电机来满足自己步矩角的要求。使用细分驱动器，则“相数”将变得没有意义，用户只需要在驱动器上改变细分数，就可以改变步矩角。

2) 步进电机的分类

步进电机的种类有很多，常见的分类方法有三种，其一是按产生的力矩原理分类，其二是按输出力矩的大小分类，其三是按定子和转子的数量分类。目前最常用的分类方法是按产生的力矩原理分类。根据该分类方法将步进电机分为三类：

- 反应式步进电机，步距角小，运行频率高，价格较低，但功耗大。
- 永磁式步进电机，功耗较小，断电后仍有制动力矩，但步距角较大，启动和运行频率较低。
- 混合式步进电机，它具备上述两种电机的有点，但价格较高。

3) 步进电机的选择

步进电机的角位移、线位移或其控制系统的精确度都与步进电动机的步距角有关。步进电机的输出力矩随速度的增大而不断衰减。步进电机具有空载启动频率，即步进电机在空载情况下能够正常启动的脉冲频率，如果脉冲频率高于该值，电机不能正常启动，可能发生丢步或堵转，有负载的情况下启动频率应该更低。综合考虑各种电机特点，本课题选用 75BF006 电机与配套的五相步进电机驱动器作为 Z 轴驱动电机。表 3.10 是 75BF 电机技术数据，图 3.11 为步进电机 75BF006 的接线方式。

表 3.10 75BF006 参数

型号	相数	步矩角	电压	电流	保持转矩	空载启动频率	接线图	配套驱动器
75BF006	5	Deg.	V	A	Nm(kg.cm)	Hz	Wdg	SMD-530F
		0.36	24	3	0.88(9)	3200	3	

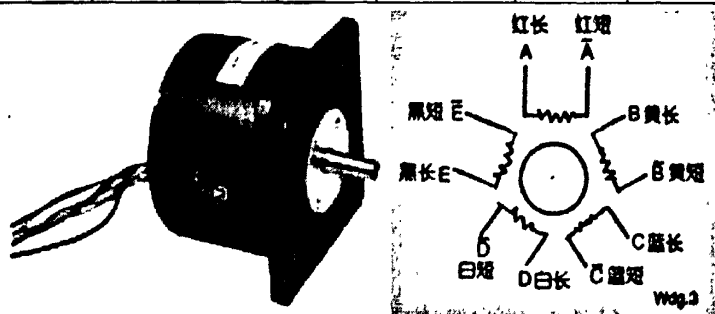


图 3.11 75BF006 电机接线图

3.3 小结

本章节根据检测系统任务需求和检测系统精度要求,完成了检测装置机械系统的详细设计,包括支承系统的设计和传动系统的设计。支承系统的设计主要完成了龙门结构的设计与校核和传感器架的设计与校核,各部分设计结构合理,满足功能需要和强度需求。传动系统的设计完成了主传动系统和 Z 轴传动系统的设计,各部分选型适当,满足精度要求和功能需求。

第四章 控制系统的设计

如图 4.1 所示, 检测系统采用多功能数据采集卡 PCI6013 加 PC 机作为基本控制单元, 使用端子板和各硬件连接, PC 机通过数据采集卡输出指令, 控制伺服电机和步进电机转动, 同时采集码盘反馈信号, 适时反馈龙门结构移动距离, 并采集传感器位移信号, 完成待测点数据采集。本章节主要完成以下工作: 数据采集卡的选择与配置说明, 伺服系统的设计, 步进系统的设计和数据采集系统的设计。

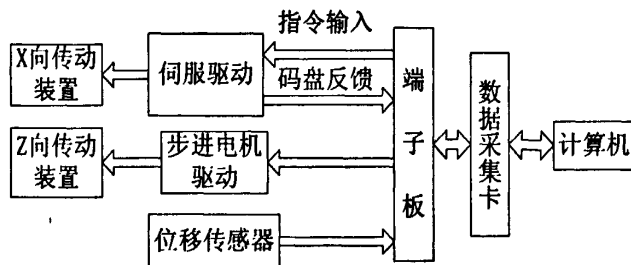


图 4.1 控制系统结构图

4.1 数据采集卡的选择与配置

在目前的测量系统应用中, PCI 数据采集卡^[22]以其低价格、高性能、易组态的特点深受广大用户的欢迎, 在过去的十多年中成为测控系统的主流产品, 尽管 VXI 测量系统的出现, 对数据采集卡有一定的冲击, 但是 VXI 出现多年以后在中低端测量系统设计中 PCI 数据采集卡仍是必选产品。各专业测控公司都生产各种基于 ISA、PCI 的数据采集卡供用户选用。

4.1.1 数据采集卡的选择

为了系统的稳定和高效, 选取一款性能稳定、功能强大的采集卡是十分重要的。本检测系统要求控制单元既能控制电机运行, 同时能采集编码盘和电涡流传感器模拟电压信号, 多功能数据采集卡可满足此要求, 考虑到 PCI 总线的通用性、高效性, PC 插槽的可扩展性, 本论文选用美国 NI 公司性价比较高的基于 PCI 总线的 PCI-6013 多功能 E 系列 DAQ 卡作为检测系统的适配卡。其主要特性如下:

- 200kS/s 采样率、16 位精度的 16 路模拟输入;
- 8 条数字 I/O 线, 该 I/O 线既能与 5VTTL 也能与 CMOS 信号兼容;
- 2 路 24 位 20MHz 的定时/计数器;
- 数字触发;
- 4 组不同的模拟输入范围;

● 68 引脚设计。

NI PCI-6013 数据采集卡^[26]有 $100\text{G}\Omega$ 的输入阻抗, 保证干扰电流不会影响流入的信号, 从而大大提高数据精确度。这一高输入阻抗性能还简化了许多问题, 而这些是设计外部电路时普遍存在的典型问题。此外, PCI-6013 采集卡还能检测到模拟输入信号 $4\mu\text{V}$ 范围的变化, 从而可提供高质量的测量精确度。为了更大程度减少数字化误差, 这款设备加入了许多技术, 如防止温度漂移电路, 以减少元部件升温而引起的误差。它们提供多种连接信号的方法, 包括 8 个模拟输入通道有不同的模式、最大程度的噪声消除以及 16 路模拟输入通道的非接地单端模式。

本 DAQ 卡是插在计算机总线插槽中, 为了能够方便其它外部设备(如驱动器, 传感器等)与 DAQ 卡的方便连接, 可采用 NI 公司推出的连接用端子板(NI CB-68LP)和线材。用 68 引脚的线材连接 DAQ 卡和端子板后, 端子板上的 68 个接点就直接连接到 DAQ 卡的 68 个引脚上。当测试系统确定后, 外接设备只需直接连接端子板上的对应引脚即可, 产品外形图如图 4.2 所示:

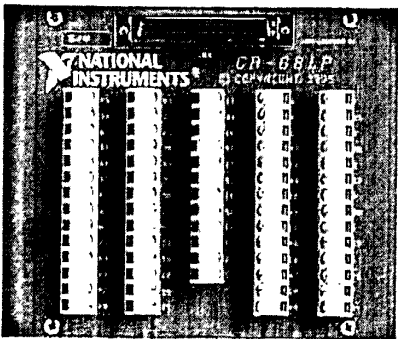


图 4.2 NI CB-68LP 端子板外形

4.1.2 工作原理

插卡式数据采集卡的工作原理是由计算机管理的模数转换系统, 采集卡依据数据存储和计算机数据处理的特点可以分为单点、单面、轮循方式^[22]。

1) 单点采集卡

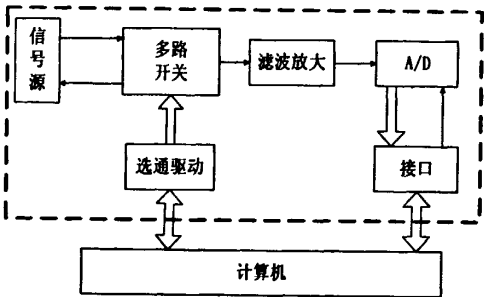


图 4.3 单点数据采集卡结构框图

数据采集卡设计中最为基本的思想是由计算机触发一次 A/D 转换，在 A/D 转换完成后，触发中断或由计算机查询取数，由计算机处理或存盘，完成一次单点转换过程，原理框图如图 4.3 所示。

2) 单面采集卡

一些较高速的数据采集卡中具有一定数量的高速 RAM，计算机只要触发一次 A/D 转换，则在控制逻辑处理下将地址计数器清零，在 A/D 转换完成后将数据存入 RAM，再次触发 A/D 转换，同时地址计数器加一，直到 RAM 存满后触发中断，计算机从 RAM 中将数据全部读出后再复位，然后进行下一次采集过程，其原理框图如图 4.4 所示。

另外，还有一些用 FIFO（先进先出寄存器）代替 RAM，减少了地址计数器，如本文使用的 PCI6013 数据采集卡有 512Byte 的 FIFO，可在半满、全满触发中断取数。

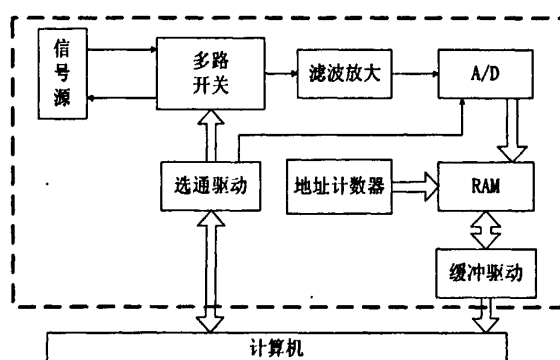


图 4.4 单面数据采集卡结构框图

3) 循环采集卡

一些数据采集过程要求有长时间、大流量的数据吞吐能力，用单面数据采集卡时所需 RAM 太大，实现起来不现实。在计算机带宽限制下，用双 RAM 技术实现低价格、高速度数据采集，原理框图如图 4.5 所示。

计算机对逻辑复位，RAM1 处于只写，RAM2 处于三态，地址计数器复位为零，触发 A/D 转换。完成后数据被存入 RAM1 中，同时触发下一次转换，直到 RAM1 存满后由控制逻辑实现 RAM1 只读，RAM2 只写，从 A/D 转换来的数据只能逐次写入 RAM2，在 RAM1 由只写到只读的转换过程中地址计数器复位为零，并发脉冲触发计算机取数，由于 ISA 总线在发出读周期时 RAM1 向总线送数，因此要求计算机读一个数据并存入硬盘的速度必须高于一次 A/D 转换时间才不会出现掉数现象。RAM2 存满后，地址复位为零，RAM1 转化为只写，RAM2 只读，……如此反复，写与读分别针对不同 RAM 进行，互不干扰，实现轮循采集数据过程。

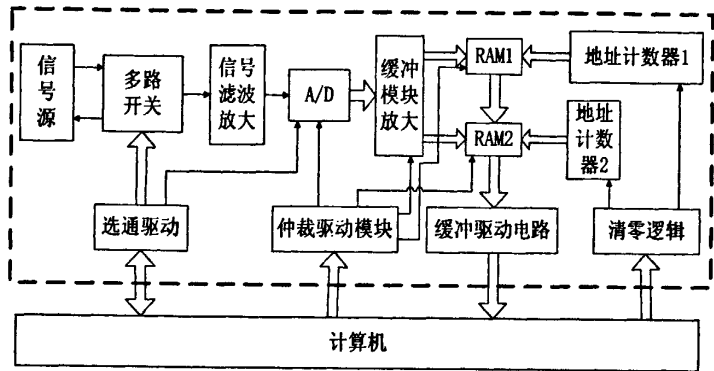


图 4.5 循环数据采集卡结构框图

4.1.3 采集卡驱动程序

数据采集卡的驱动程序通常采用动态链接库 DLL 的形式。DLL^[23]实际上是一个函数库，只有在应用程序运行期间，DLL 中的函数才被随时调用和连接。和静态连接库相比，动态链接库可以和其他的应用程序共享库中函数和资源，减少了因重复拷贝而造成的应用程序的冗长以及计算机资源的占用。使用动态链接库有以下优点^[24]：多个应用程序可以共享 DLL 代码，以节省程序执行时占用的内存空间；应用程序具有结构化特点，一般只需要改变 DLL，而应用程序保持不变，即可使软件升级。

4.1.4 引脚及其各种信号接线说明

PCI-6013 引脚图^[27]如图 4.6 所示。

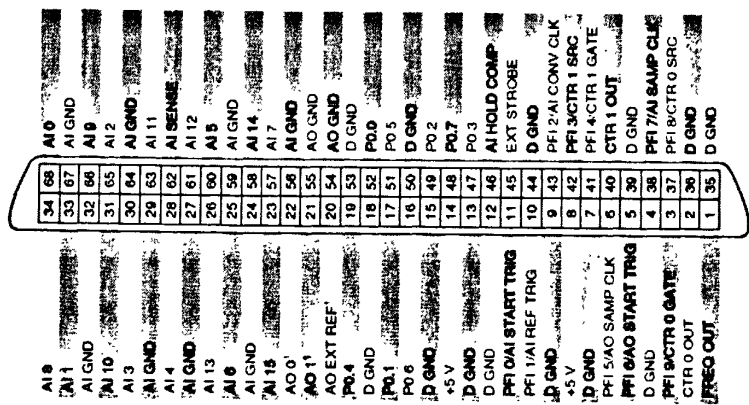


图 4.6 PCI-6013 68 引脚定义

PCI-6013 数据采集卡共有 68 个引脚，引脚类型可分为四类：模拟输入，模拟输出，数字 I/O 口和计数器。模拟输入有 16 路通道，可以采集模拟电压，如电涡流传感器、编码盘信号的采集；对于模拟输出，PCI6013 没有模拟输出功能，仅对于 PCI6014，有 2 路模拟输出通道；

PCI6013 有 8 个数字 I/O 口, 使用时可采用软件方式将端口配置为数字输入口或者数字输出口。数字输入口可用于接收开关信号, 如编码盘 Z 极开关信号, 数字输出口可用于使能信号, 如控制电机正反转等; PCI6013 有两个计数器, 可用于产生方波脉冲, 控制电机旋转。

4.1.4.1 模拟输入

1) 信号类型

根据信号的参考情况, 一个电压可以分为两类: 接地信号、浮地信号。

- 接地信号: 接地信号是信号的一端直接接地的电压信号。它的参考点是系统地(例如大地或者建筑物的地)。
- 浮地信号: 一个不与任何地(如大地或建筑物的地)连接的电压信号成为浮地信号。一些常见的浮地信号有电池、热电偶、变压器和隔离放大器。

2) 测量方式

按照信号的连接方式不同可分为三种测量方式: 差分(DIFF); 参考单端(RSE); 非参考单端(NRSE)。

按照测量方式可以分为一下两大类测试系统, 差分测试系统和单端测试系统。

(1) 差分测试系统(DIFF)

差分测试系统可避免接地回路干扰和因环境引起的共模干扰, 当输入信号有以下情况时可使用差分测试系统: 低电平信号(例如小于 1V); 信号电缆比较长或没有屏蔽, 环境噪音较大; 任何一个输入信号要求单独的参考点。

(2) 单端测试系统

相比较差分测试系统, 单端测试系统可以使用两倍的测试通道。单端测试系统所有信号都参考一个公共参考点, 即仪器放大器的负极。当输入信号符合以下条件时可以使用单端测试系统: 高电平信号(通常大于 1V); 距离比较短(通常小于 5m)或电缆的屏蔽性能较好, 环境无噪音; 所有信号可以共享一个公共参考点。

单端测试系统可分为参考单端测试系统和非参考单端测试系统。参考单端(RSE)测试系统用于测试浮地信号, 它把信号参考点与仪器模拟输入地连接起来; 非参考单端(NRSE)测试系统可避免接地回路干扰, 用于测试接地信号。与参考单端测试系统不同的是因为所有输入信号都已经接地了, 所以信号参考点不需要再接地。

3) 接线方法

(1) 差分(DIFF)测量方式 使用两根模拟输入接线, 信号一端连接在 PGIA 正端, 另一端连接在 PGIA 负端。板卡上正负端接线通道关系如下: 正端为 AI_i , 负端为 $AI_{(i+8)}$, ($i=0\dots7$), 依此类推。

(2) 参考单端 (RSE) 测量方式 使用一根模拟输入接线, 信号一端连接在 PGIA 正端, 另一端连接在非系统地的共同端(AIGND)。板卡上正端为 A_{Li}, 系统地端为 AIGND, 且所有的 AIGND 在板卡内部直接连通共地。

(3) 非参考单端 (NRSE) 测量方式 使用一根模拟输入接线, 信号一端连接在 PGIA 正端, 另一端连接在非系统地的共同端(AISENSE)。板卡上正端为 A_{Li}, 共同端为 AISENSE。

4.1.4.2 数字 I/O

PCI6013 有 8 个数字 I/O 口, 使用时可采用软件方式将端口配置为数字输入口或者数字输出口。接线方式为输出正端接 DIO_x($x=0\ldots7$), 负端接任意一个 DGND。例如: 如果使用数采卡 DIO 的 1 通道作为输出, 就将输出正端接 DIO1 (17 引脚), 负端接任意一个 DGND (如 18 引脚)。

4.1.4.3 计数器

计数器可用于测量和产生数字信号, 常用于测量信号频率或者信号周期。信号连接方式如下:

1) 测量常规时间(包括脉冲宽度, 周期, 频率): 直接将待测信号正端接入计数器的 SOURCE 端 (如计数器 1 的 42 引脚 PF3/CTR 1 SRC), 信号负端接板卡的任意数字地 DAND (如 35 引脚); GATE (41 引脚 PFI4/CTR 1 GATE) 可不接信号, 使用内部时基 (不用接线, 软件定义); OUT (40 引脚 CTR1 OUT) 可产生脉冲或脉冲序列。

2) 测高频: 可用两个计数器, 计数器 0 的 SOURCE (37 引脚 PFI8/CTR 0 SRC) 使用内部时基 (不用接线, 软件定义), 计数器 0 的 OUT (2 引脚 CRT 0 OUT) 接计数器 1 的 GATE (41 引脚 PFI4/CTR 1 GATE), 待测频率接计数器 1 的 SOURCE (42 引脚 PF3/CTR 1 SRC)。

4.2 伺服系统的设计

伺服系统的设计主要实现以下功能: 驱动龙门机构, 实现龙门机构精确定位, 完成龙门机构回零。伺服系统的驱动电机选用台湾东元伺服马达 TSB13102A, 搭配驱动器 TSTA30C。

4.2.1 伺服电机驱动器参数说明

TSTA 系列交流伺服驱动器功能强大, 具有刚性增益表和共振抑制功能, 可实现功能复杂的多段内部位置控制、自动增益及时调整、低速高平稳运行等, 电机采用国际标准 8192ppr 的编码器, 最大可配置 17bit 高端编码器, 处理精度更高。

如表 4.1 所示为伺服驱动器 TSTA30C 的参数表 (转矩性能和速度性能省略未给出)。其中, 电机匹配编码盘解析数可选, 本文选择 2500ppr/10000ppr, 即编码盘精度为 0.0036° , 此

外，编码器为 17 位，驱动器每接收 $2^{17}=131072$ 个脉冲，电机转一圈，其脉冲当量为 $360^{\circ}/131072=0.00275^{\circ}$ ，即编码盘分辨率为 0.00275° 。

表 4.1 伺服驱动器 TSTA30 参数

机 型			TSTA30C
输入电源	主电路 R、S、T 电源规格		三相或单相 200~230Vac+10~-15% 50/60Hz+/-5%
	控制电路 r、s 电源规格		单相 200~230Vac+10~-15% 50/60Hz+/-5%
控制方式			SVPWM 控制
控制模式			位置，速度，转矩，位置/速度，速度/转矩，位置/转矩，点对点定位
编码器解析数/回授解析数			2000ppr/8000ppr、2500ppr/10000ppr、8192ppr/32768ppr
动能刹车			内 建
数位输入输出	位置输出	输出型式	A、B、Z 相线驱动（Line driver）输出
		分周比	1~8192 分周比（可任意数值设定）
	顺序输入	任意规划输入（13 点）	伺服启动、异常警报清除、PI/P 切换、CCW 方向驱动禁止、CW 方向驱动禁止、外部转矩限制、脉冲误差量清除、伺服锁定、急定停止、内部速度命令选择、内部速度命令选择、控制模式切换、位置命令禁止、速度命令反向增益切换、电子齿轮比分子选择、内部位置命令暂停、开始回到原点、外部参考原点、内部位置命令选择、转矩命令反向、转矩模式正转启动、转矩模式反转启动
	顺序输出	固定输出（4 点）	伺服马达警报、伺服准备完成、伺服异常、零速度信号、机械刹车信号、速度到达信号、定位完成信号、原点归复完成信号、转矩到达输出信号
		任意规划输出（4 点）	
	类比监控输出		
保护机能			电源电压过高、马达过载、功率晶体异常、编码器 ABZ 相信号异常、编码器 UVW 相信号异常、记忆本异常、紧急停止动作、马达过电流、位置误差过大、马达过速度、CPU 异常、驱动器禁止异常、驱动器过热
通讯界面			RS232/RS485（可连接到个人电脑及通讯监控）

4.2.2 伺服电机控制方式选择

伺服电机有三种控制方式^[28,45,46]：转矩控制，速度控制和位置控制，对应着伺服电机的三环控制，即电流环，速度环和位置环。

1) 转矩控制 转矩控制方式是通过外部模拟量的输入或直接的地址赋值来设定电机轴对外的输出转矩的大小，具体表现为：例如 10V 对应 5Nm 的输出转矩，当外部模拟量设定为 5V 时电机轴输出转矩为 2.5Nm，如果电机轴负载低于 2.5Nm 时电机正转，等于 2.5Nm 则电机不转，大于 2.5Nm 电机反转（通常有重力负载情况下产生）。可以通过即时地改变模拟量的设定来改变设定的力矩大小，也可以通过通讯方式改变对应的地址的数值来实现。转矩控制方式主要应用于对材质的受力有严格要求的缠绕和放卷的装置中，如绕线装置或拉光纤装置设计，转矩的设定要根据缠绕的半径的变化随时更改以确保材质的受力不会随着缠绕半径的变化而改变。

2) 位置控制 位置控制模式一般是通过外部输入的脉冲频率来确定转动速度的大小，通过脉冲的个数来确定转动的角度，也有些伺服驱动可以通过通讯方式直接对速度和位置进行赋值。由于位置模式可以对速度和位置都有严格的控制，所以一般应用于定位装置。

3) 速度控制 通过模拟量的输入或者输入脉冲频率都可以进行转动速度的控制，在有上位控制装置的外环 PID 控制时速度模式也可以进行定位，但必须把电机的位置信号或直接负载的位置信号反馈给上位控制装置以做运算用。位置模式也支持直接的负载外环检测位置信号，此时的电机轴端的编码器只检测电机转速，位置信号就由直接的最终负载端的检测装置来提供，这种方式的优点在于可以减少中间传动过程中的误差，增加整个系统的定位精度。

本检测装置采用伺服电机的目的在于实现精确定位，所以选择位置控制模式。

4.2.3 与数据采集卡的配置与接线

1) 驱动器位置控制接线 驱动器位置控制接线图如图 4.7 所示，有两组差分信号输入，分别是正脉冲信号和负脉冲信号，正方向信号和反方向信号，有三组差分信号输出分别是编码盘 A、B 信号对应的差分信号输出，PA 和/PA，PB 和/PB，以及每周标记信号 Z 信号的差分输出 PZ 和/PZ。

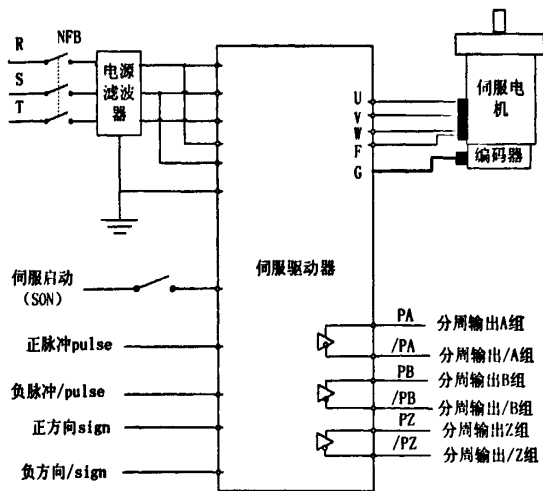


图 4.7 驱动器 TSTA30C 位置控制接线图

(1) 位置驱动的实现

数据采集卡输出脉冲信号和方向信号，通过差分芯片将一路脉冲信号和一路方向信号，转变成一组脉冲差分信号 pulse、/pulse 和一组方向差分信号 sign、/sign，伺服驱动器接收到信号，计算脉冲个数进行内部 PID 运算，驱动电机旋转，完成电机驱动的半闭环控制。

(2) 位置反馈的实现

如果想实时得到龙门机构运行位移，可采集编码盘反馈信号，计算电机转过角度，从而得到龙门机构运行位移。码盘反馈信号 PA、/PA 和 PB、/PB 是两组差分信号，通过差分接收芯片转换，再输入到数据采集卡中采集，通过软件计算的方式可得到龙门机构的实时位置。

(3) 龙门机构回零的实现

为了装卸工件和数据采集的方便，需要在 X 向设置一工作原点，因为编码盘为增量式编码盘，不能直接实现回零，可借助于码盘每周反馈信号 Z 信号来回零。具体实现过程如下：在零点位置之前安装一限位开关，当龙门机构运行至限位开关处开始采集 Z 信号，采集到 Z 相跳变信号则电机停转，此处即为原点。码盘每周反馈 Z 信号也是一组差分信号，需要使用差分芯片来转换。

2) 与数据采集卡的接线方法 伺服驱动器和数据采集卡的连线根据不同的控制方案有不同的连接方式，本论文主要研究位置控制，主要连接有 pulse 脉冲、/pulse 脉冲、sign 方向脉冲、/sign 方向脉冲、伺服反馈及伺服 ON 输出和伺服报警。在控制伺服电机的运动过程中，需要各种接近开关实现回原点（home）和限位（limit）。

具体接线方法如下：

(1) 计数器 0 的 OUT（40 引脚 CTR 1 OUT）接 26LS31 芯片，将脉冲信号转换为相应的差分信号，GATE（3 引脚 PF19/CTR 0 GATE）不接信号，使用内部时基（软件定义）；SOURCE

(37 引脚 PFI8/CTR 0 SRC) 不接信号, 使用内部时基 (软件定义);

(2) 数字口 P0.4 接 26LS31 芯片, 将数字信号转换为相应的差分信号;

(3) 编码盘输出三组差分信号, PA 和/PA, PB 和/PB, PZ 和/PZ, 分别接 26LS32 芯片, 输出 A, B, Z 三个信号, 然后分别接数据采集卡的模拟输入口 AI12, AI13, AI14。

4.3 步进系统的设计

步进系统主要实现功能: 驱动传感器架上下移动, 方便车门安装, 适应不同批次、不同型号的车门测量。数据采集卡输出脉冲和数字信号给步进电机驱动器, 控制步进电机正反转。

4.3.1 步进电机驱动的参数说明

步进电机选用常州华音电子有限公司 75BF006 型号电机, 搭配 SMD-530F 五相步进电机驱动器。表 4.2 所示为驱动器主要技术指标。

表 4.2 SMD-530F 主要技术指标

名称	最小值	标准值	最大值	单位
电机驱动电压	12	30	40	V
相位峰值电流	1.5	3	4	A

SMD-530F 五相步进电机驱动器是常州华音电子有限公司引进德国技术和器件生产的新一代五相反应式步进电机驱动器^[29], 具有非常好的性价比。另外, SMD-530F 还具有许多非同寻常的特性, 能充分控制电机系统的电机械性能, 以获得最大工作效率。功率输出级具有低传导以及转换损失小的特点, 提高了功效, 这样连同一整套保护措施, 即使在恶劣环境下也可使机械能正常工作。其特点如下:

- 15-30V 直流操作电压;
- 3A 相位峰值电流;
- 半步驱动;
- 锁相时自动减流;
- 采用德国五相步进电机驱动特制技术, 有效提高中高频时的力矩;
- 温度过热保护;
- 有源隔离三种输入信号 (脉冲, 方向, 脱机);
- 最高运行步进时钟频率 50KHz;
- 输入信号: TTL 或 CMOS (5V、12V、15V、30V)。

4.3.2 步进电机控制方式

该驱动器的输入信号共有三路, 它们是: 步进时钟信号 CP、方向电平信号 DIR、脱机信号

ZERO, 数据采集卡通过输出步进时钟信号 CP 的输入来控制速度和旋转角度, 输出方向电平信号 DIR 来改变电机旋转方向。

1) 步进时钟信号 CP

步进时钟信号 CP 用于控制步进电机的位置和速度, 驱动器每接收一个 CP 脉冲就驱动步进电机旋转一个步矩角, 改变 CP 脉冲的频率则可改变步进电机的转速。本驱动器的 CP 信号为下降沿触发, 低电平有效, 要求 CP 信号的驱动电流为 8~13mA, 对 CP 脉冲宽度要求不小于 5 μ S, 如图 4.8 所示。

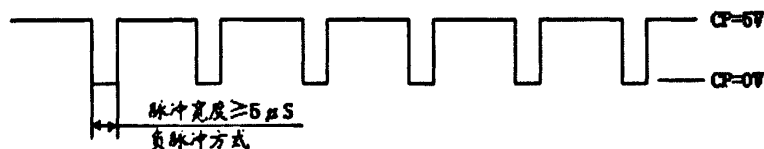


图 4.8 CP 的脉冲宽度及高低电平方式

2) 方向电平信号 DIR

方向电平信号 DIR 用于控制步进电机的旋转方向。此端为高电平时, 电机为一个转向; 此端为低电平时, 电机为另一个转向。电机换向必须在电机停止后再进行, 并且换向信号一定要在前一个方向的最后一个 CP 脉冲结束后以及下一个方向的第一个 CP 脉冲前发出, 如图 4.9 所示。

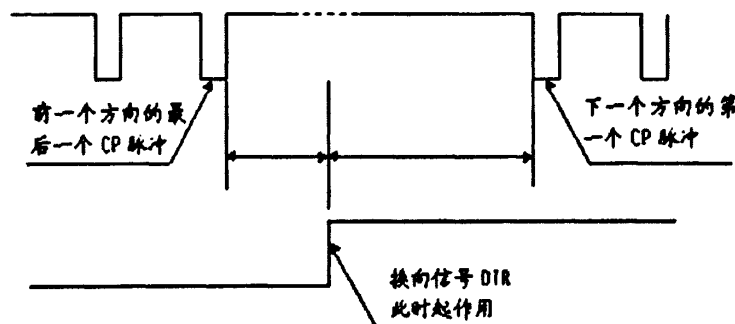


图 4.9 换向信号 DIR 起作用的时刻

3) 脱机电平信号 ZERO

当驱动器上电后, 步进电机处于锁定状态 (未施加 CP 脉冲时) 或运行状态 (施加 CP 脉冲) 时, 若用户想手动调整电机而又不想关闭驱动器电源, 此时可以用此信号。当此信号起作用时 (低电平有效), 电机处于无力矩状态; 当此信号为高电平或悬空不接时, 取消截止状态。此信号用户可选用, 如果不需要此功能, 此端可不接。

4.3.3 与数据采集卡的配置与接线

步进电机驱动器 SMD-530F 与数据采集卡的接线方式如下:

- 1) 步进时钟信号 CP 接计数器 1 的 OUT (40 引脚 CTR 1 OUT), GATE (41 引脚 PFI4/CTR

1 GATE) 不接信号, 使用内部时基 (软件定义); SOURCE (42 引脚 PFI3/CTR 1 SRC) 不接信号, 使用内部时基 (软件定义);

- 2) 方向电平信号 DIR 接数字输出 P0.5;
- 3) 脱机电平信号, 悬空不接。

4.4 数据采集系统的设计

数据采集系统主要完成待测点位移的数据采集, 要求传感器响应快、采集速度高。本论文选择电涡流位移传感器作为数据采集系统用传感器。电涡流位移传感器是基于电涡流效应, 将非电量转换为线圈阻抗的变化进行测量的, 它具有体积小、灵敏度高、动态相应快和非接触测量等优点, 目前广泛应用于电力、石化、机械、冶金等行业。

4.4.1 传感器的选择

考虑到测量精度和量程需求, 本文选取由四川高新技术研究院测控工程研究所生产的 YG9202 电涡流位移振幅传感器, 该产品体积小、精度高、抗干扰能力强, 独特的设计保证了大量程线性度、宽温度适应范围、不受介质污染还可长期在水中使用等。产品应用于机械位移、振动振幅、厚度尺寸、表面粗糙度、转速测量、无损探伤等。其主要技术指标如表 4.3。

表 4.3 电涡流位移传感器 YG9202 参数

型号	量程 mm	探头直径 mm	供电电源 V	分辨率 μm	精度 μm	灵敏度 V/mm	线性度 %·FS	输出 V
YG9202	±1	Φ8	±15	0.2	1	5	0.5	-5~+5

YG9202 电涡流位移振幅传感器由探头、变换器、电缆三部分组成, 输出信号为-5V~+5V 电压。

变换器上四个接线端分别为:

- VCC, 接电源+15V 端
- -VCC, 接电源-15V 端
- COM, 公共端, 接电源地
- OUT, 输出, 接数据采集卡模拟输入口

4.4.2 数据采集与接线方式

电涡流传感器输出信号为-5V~+5V 模拟电压, 本文采用多功能数据采集卡作为测控接口卡, 其 16 位精度的模拟输入口采集传感器信号进行数字化, 量化误差符合精度要求。

1) 测量方式

PCI-6013 卡只支持差分测量方式和非参考单端测量方式, 且 YG9202 电涡流传感器输出电

压为-5V~+5V(>1V)，信号电缆<5m 且有屏蔽，所有信号可共享一个公共参考点，所以选择非参考单端(NRSE)测量方式。

2) 接线方式

PCI-6013 引脚图如图 4.6 所示，所有传感器的 OUT 接数据采集卡的模拟输入口，COM 端连接在非系统地的共同端(AISENSE62 号引脚)。系统共有 12 只传感器，接数据采集卡模拟输入 AI0~AI11。传感器变换器与数据采集卡接线如图 4.10 所示。

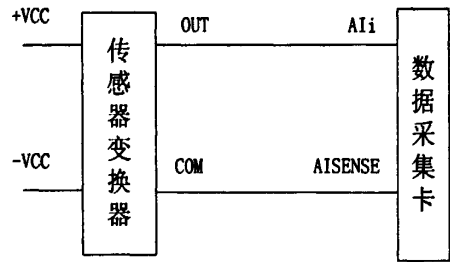


图 4.10 传感器变换器与数据采集卡接线图

4.5 小结

本章节主要完成了测控控制系统的各部分设计，首先介绍了数据采集卡的选取、数据采集卡的工作原理及使用引脚说明，然后对伺服系统的设计，步进系统的设计和数据采集系统的设计进行了详细论述，包括控制方法以及与数据采集卡的配置与接线等。

第五章 系统软件设计

系统软件设计主要包括计算机端控制程序及界面的设计和最终数据处理流程设计, 本章节主要分为以下几部分: 软件总体方案设计, 各个模块设计, 最终数据处理方法及流程和测量结果不确定度分析。

5.1 软件总体方案设计

5.1.1 控制系统软件平台的选择

鉴于日前计算机的应用情况, Windows 操作系统几乎占据了全部的个人电脑领域, 因此采用性能比较稳定的 Windows XP 操作系统作为最基本的系统平台。在此系统上易于进行交互式 and 可视化编程, 并且界面友好, 易于操作使用。

Microsoft Visual C++ 是 Windows 下功能最为强大的一种高效可视化软件开发平台^[31,32]。它以其所见即所得的可视化界面设计风格和 32 位面向对象程序设计的特点, 被广泛应用于各个领域, 成为众多软件开发人员采用的工具, 通用性强、通讯快速、实时性好、编程容易、用于控制的函数非常丰富。此外, Visual C++ 向用户提供了一个庞大的 MFC(Microsoft Fundamental Class)类库。该类库封装了大部分的 Windows 的底层 API 调用, 使得开发 Windows 程序条理清晰, 快捷方便。它同时也是一个集成开发环境, 提供了软件框架自动生成和可视化的资源编辑功能, 大大节省了开发人员的时间和精力, 对网络和数据库也提供了很好的支持。现在 MFC 正逐渐成为 Windows 下的类库开发标准, 正被越来越多的其他 C/C++ 编译工具所支持。使用 MFC 类库并同时配合 Visual C++ 提供的 AppWizard、Class Wizard 和 App Studio 可以大幅度提高开发效率。

本论文选择 Visual C++ 作为系统控制软件的开发工具, 使用 MFC 类库, 采用基于对话框的编程方式, 完成系统控制界面、控制程序的开发。

5.1.2 系统软件平台各子模块功能

根据检测系统要完成的任务及功能需求, 设计测试系统各组成功能模块, 如图 5.1 所示。具体包括运动控制模块, 数据采集模块, 传感器标定模块和实时反馈位移模块。

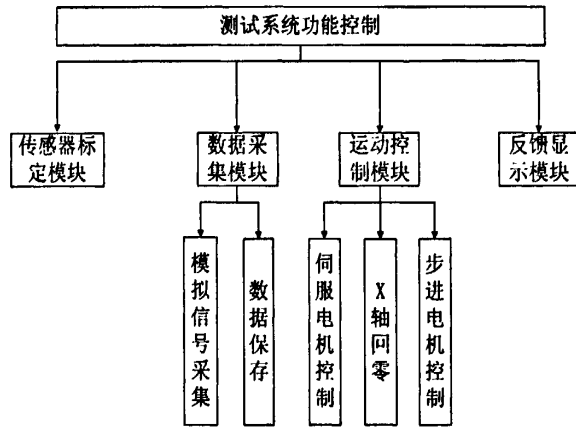


图 5.1 系统功能控制模块组成框图

根据组成功能模块进行计算机控制界面设计，如图 5.2 所示，主要功能模块有基本参数设置模块，传感器标定模块，X 轴回零模块，Z 轴增量驱动模块，反馈位移显示模块和数据采集模块。

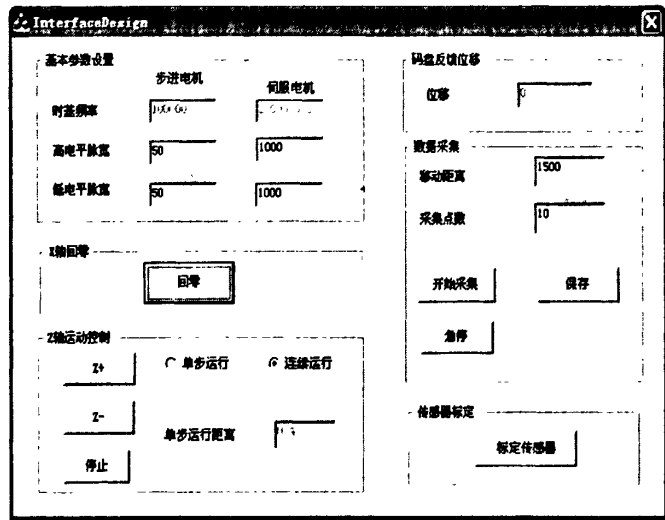


图 5.2 计算机控制界面

1) 基础参数设置

基础参数设置模块可分别对步进电机和伺服电机进行基础参数设置，主要参数有时基频率，高电平占脉宽数和低电平占脉宽数。通过改变时基频率和高电平占脉宽数可以改变电机旋转的速度，在时基频率不改变的情况下，高低电平占脉宽数越小，电机旋转速度越高。多功能数据采集卡 PCI-6013 提供两种频率的脉冲输出：100KHz 和 20MHz，而 SMD-530F 五相步进电机驱动器最高运行步进时钟频率 50KHz，TSTA30C 伺服驱动器最高脉冲频率为 500KHz，所以根据它们频率不同选择不同的时基频率，SMD-530F 选择时基频率为 100KHz，高低电平脉宽都取 50（则步进时钟频率为 2KHz，根据步距角 0.036°，丝杠导程为 2mm 可知，转速为 0.4mm/s），且最低输入值为 2；TSTA30C 驱动器选择时基频率为 20MHz，高低电平脉宽均取 1000（则伺

服驱动频率为 20KHz, 根据编码盘刻线数 2500, 丝杠导程 5mm 可知转速为 10mm/s), 且最低输入值为 40。

2) 传感器标定模块

传感器标定模块用于对测量传感器进行灵敏度和线性度标定, 具体设计内容在 5.4 小节再详细讨论。

3) X 轴回零

X 回零可根据码盘反馈信号 Z 和限位开关来实现, 当龙门机构在回零过程中检测到限位开关有信号输出, 则开始检测 Z 信号, 检测到 Z 信号有跳变, 则电机停转, 当前位置即为 X 轴零点。限位开关使用西普电气 FJ12E-D10NK 型号霍尔接近开关, 工作电源 3~20V, 输出电压降 <1.5V, 输出电流 100mA, 反应频率 5KHz, 检测距离 10mm±20%, 输出电压 22.5~23.5V。

4) Z 轴增量驱动模块

Z 轴传动装置驱动行程视情况而定, 一般为 100~300mm, 可以连续运动, 也可以增量移动的方式运动(单步运行)。由于没有反馈环节, 存在电机失步或过冲, 会有一定的误差, 但对于测量结果没有影响。

5) X 向位移显示模块

可以实时反馈龙门机构的行程(显示的是相对距离)。

6) 采集模块

采集模块中将驱动伺服电机、采集编码盘反馈信号和实时采集传感器数据看成三个不同的任务, 使用多线程技术来实现编程, 具体设计内容在 5.3 小节中会进行详细讨论。

5.2 电机控制模块设计

电机控制程序设计包括伺服电机控制程序和步进电机控制程序设计。伺服电机控制程序设计包括伺服电机定距离运行程序设计和 X 回零程序设计。

5.2.1 伺服电机驱动程序的设计

图 5.3 所示为伺服电机控制原理图, 虚线框内为驱动器内部控制, 本论文选用位置控制模式, 即脉冲控制法。数据采集卡输出脉冲给驱动器, 驱动器内部采集编码盘位置反馈信号, 进行 PID 运算, 完成伺服电机的半闭环控制; 数据采集卡可采集编码盘反馈 Z 信号, 完成系统回零。

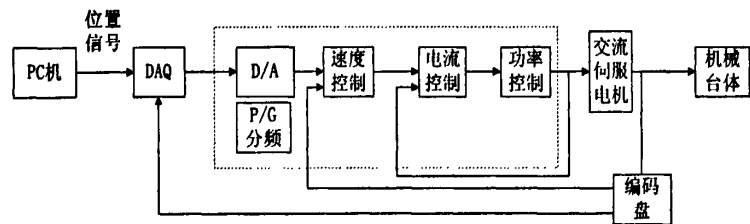


图 5.3 伺服电机控制原理

实现伺服电机定距离运行有两种方法：一是发送定脉冲数给伺服驱动器，伺服驱动器控制电机旋转完成指定角度旋转，二是发送连续脉冲给伺服驱动器（不计算脉冲个数），同时采集编码盘反馈信号，并计算电机运行当前位置，与指定位移比较，完成位移则停止发送脉冲。

此外，为了能够实时知道龙门机构运行距离，确定传感器是否达到采集信号位置，也需要采集编码盘反馈的位置信号 A 和 B，计算龙门机构运行距离，因此本论文选择发送连续脉冲的方式控制伺服电机运行。

5.2.1.1 光电编码盘原理

光电编码器又称光电角位置传感器^[33]，是一种集光、机、电为一体的数字式角度/速度传感器，它采用光电技术将轴角信息转换成数字信号，与计算机和显示装置连接后可实现动态测量和实时控制。它包括光学技术、精密加工技术、电子处理技术等，其技术环节直接影响编码器的综合性能。与其他同类用途的传感器相比，具有精度高、测量范围广、体积小、重量轻、使用可靠、易于维护等优点，广泛应用于交流伺服电动机的速度和位置检测。

典型的光电编码器结构^[28]由轴系、光栅副、光源及光电接收元件组成。当主轴旋转时，与主轴相连的主光栅和指示光栅相重叠形成莫尔条纹，通过光电转换后输出与转角相对应的光电位移信号，经过电子学处理，并与计算机和显示装置连接后，便可实现角位置的实时控制与测量。光电编码器从测角原理可分为几何光学式、激光干涉式及光纤式等；从结构形式可分为直线式和旋转式两种类型；按照代码形成方式不同可分为增量式、绝对式、准绝对式和混合式。

TSB13102A 伺服电机采用的码盘是增量旋转式编码器，增量式光电编码器主要由安装在旋转轴上的编码圆盘（码盘）、狭缝以及安装在圆盘两边的光源和光敏接收元件等组成。原理示意图如图 5.4 所示。

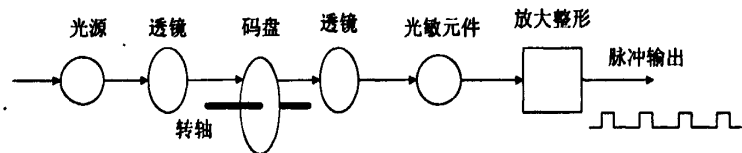


图 5.4 光电编码器原理示意图

增量式编码器是直接利用光电转换原理输出三组方波脉冲 A、B 和 Z 相；A、B 两组脉冲相位差 90 度，将 A 信号方向输出信号/A 叠加到 A 相上可增强信号的稳定性，另没转输出一个

Z 相脉冲, 用于基准点定位。可根据 A、B 两输出信号的相位关系 (超前或滞后) 来判断旋转的方向, 原理如图 5.5, 5.6 所示。

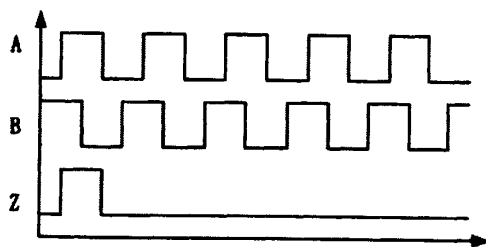


图 5.5 编码器正转脉冲输出图

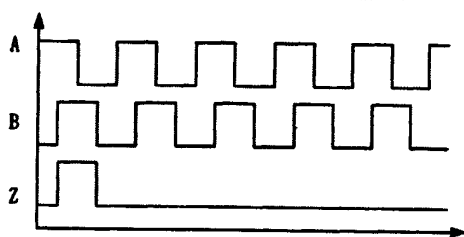


图 5.6 编码器反转脉冲输出图

光电增量式旋转编码器的优点是原理构造简单, 机械平均寿命可在几万小时以上, 抗干扰能力强, 可靠性高, 适合于长距离传输。其缺点是无法输出轴转动的绝对位置信息。

5.2.1.2 编码盘四倍频细分及辨向技术的软件实现

为了提高码盘检测系统的分辨率, 将两路光电输出信号脉冲 A、B 相做四倍频, 可使分辨率提高四倍。

编码盘检测系统四倍频鉴向电路如图 5.7 所示, 驱动器输出四路信号 PA, PB, /PA, /B, 将 PA、/PA 和 PB、/PB 分别送入两个差动放大器, 输出经放大整形后, 得到两路相差 90° 的方波信号 A 和 B。A 和 B 两路方波一方面直接进微分电路微分后, 得到前沿的两路尖脉冲 A' 和 B' ; 另一方面经反向器, 得到分别与 A 和 B 相差 180° 的两路等宽脉冲 C 和 D; C 和 D 再经微分电路微分后, 得到两路尖脉冲 C' 和 D' 。四位脉冲相位关系经与门和 A、B、C、D 信号相与, 再输出给或门, 输出正反向信号, 其中 A' B, AD', C' D, B' C 分别通过 Y₁, Y₂, Y₃, Y₄ 输出给或门 H₁, 而 BC', AB', A' D, CD' 通过 Y₅, Y₆, Y₇, Y₈ 输出给或门 H₂, 得到反向脉冲。当正向运动时, H₁ 有脉冲信号输出, H₂ 保持低电平; 当反向运动时, H₂ 有脉冲信号输出, H₁ 则保持低电平。从上面的分析可知, 原本编码盘输出一个脉冲信号, 经倍频后在 0° , 90° , 180° , 270° 都有脉冲输出, 即在一个周期内送出了 4 个脉冲。这样分辨率提高了四倍。这样, 如果 2048ppr, 经倍频技术后相当于 8192ppr, 使码盘的分辨率提高 4 倍。码盘信号 4 倍频波形图如图 5.8。

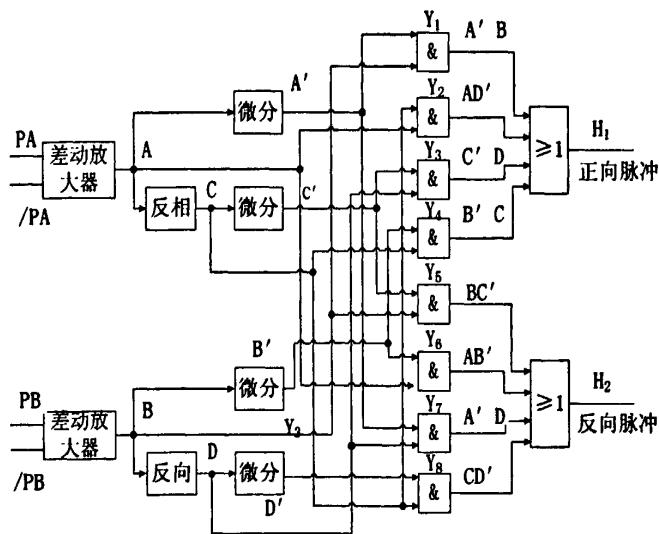


图 5.7 码盘信号 4 倍频电路图

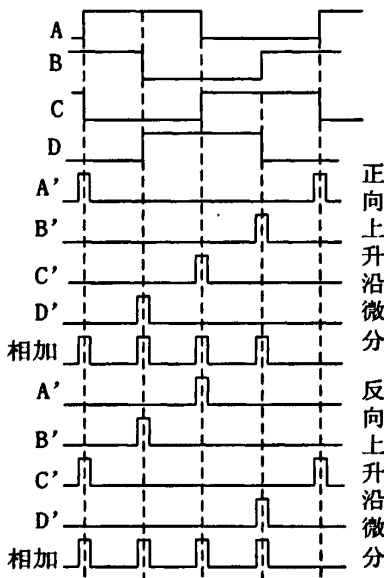


图 5.8 码盘信号 4 倍频波形图

本论文选择软件编程来实现倍频鉴相^[34]，根据光栅信号四倍频电路设计程序，其软件流程图见图 5.9。

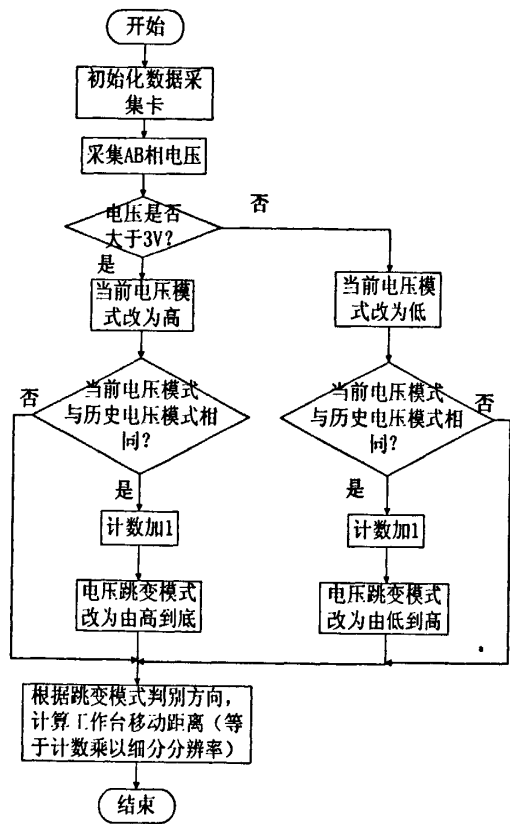


图 5.9 编码器信号细分技术软件流程图

5.3.1.3 伺服电机控制模块的实现

伺服电机控制结构图如图 5.10 所示：

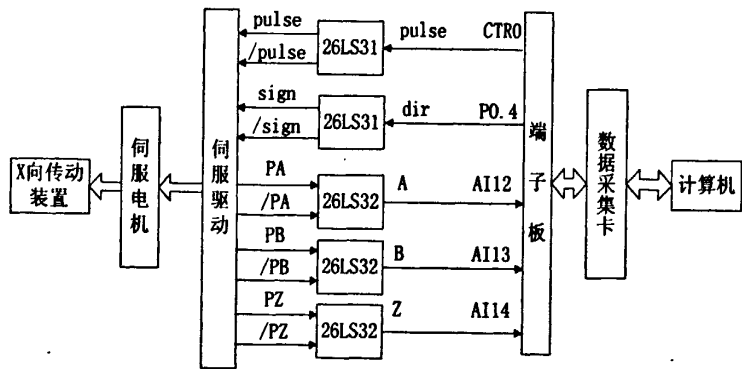


图 5.10 伺服电机控制结构图

1) 电机定距离运行

运行原理如下：数据采集卡发送脉冲给伺服驱动器，驱动电机带动 X 向传动装置，同时数据采集卡采集码盘反馈信号 A，B（Z 信号用于基准点定位），使用软件编程实现细分辨向，得

到工作台的位置，比较给定位置和当前位置，给定位置和当前位置相等则停止发脉冲。程序流程图如图 5.11 所示^[37,38,39,40]：

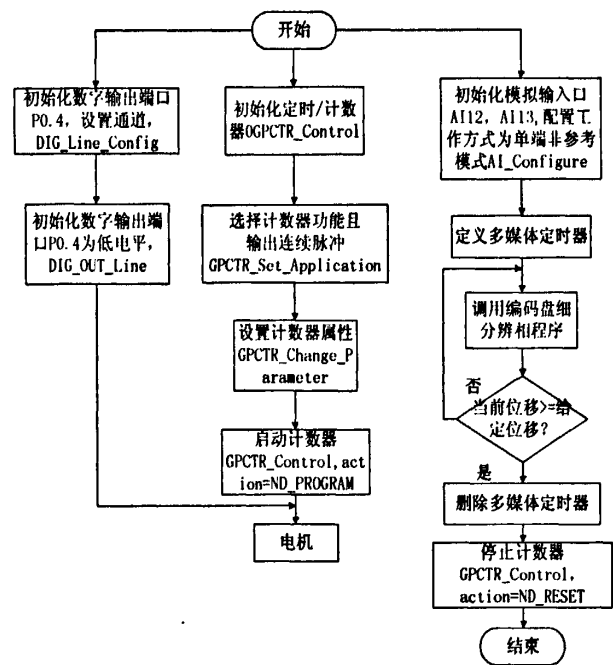


图 5.11 伺服电机驱动程序流程图

此流程图表示的是 X 向龙门机构完成给定位移的控制图，其中转速的控制通过设置计数器属性来完成。

2) X 回零的实现

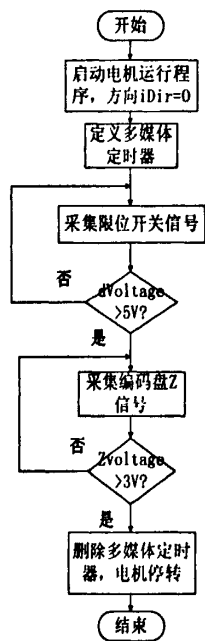


图 5.12 X 回零程序流程图

X 回零的实现需要借助于限位开关信号和编码盘每周反馈信号 Z 信号，程序流程图如图 5.12 所示。点击 X 回零按钮，启动电机运行程序（运行方向 iDir=0，表示运行沿 X 负向，即回程方向），同时定义多媒体定时器，每隔 1ms 采集一次限位开关信号，并判断信号采集到的信号 dVoltage 是否大于 5V，如果否则继续采集信号并判断，如果是，则开始采集编码盘每周反馈 Z 信号，并判断 ZVoltage 是否大于 3V，如果否则继续采集 Z 信号，如果是则删除定时器和控制电机的计数器，电机停转，程序退出，完成龙门机构回零任务。

5.2.2 步进电机驱动程序的设计

步进电机驱动模块主要完成增量移动，可单步运行，也可连续运行。

控制步进电机的转动需要三个要素^[43,44]：方向、转角和转速。方向取决于控制器送出的方向电平的高或低。转角取决于控制器送出的步进脉冲的个数。而转速则取决于控制器发出的步进脉冲之间的时间间隔，即脉冲频率。在步进电机的控制中，方向和转角控制简单，而转速控制则比较复杂。步进电机工作时，失步或者过冲直接影响其定位精度。控制结构图如图 5.13 所示：

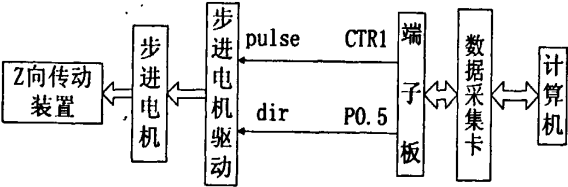


图 5.13 步进电机控制结构图

步进电机开环驱动模块的设计和伺服电机控制模块的设计类似，都是使用脉冲控制电机旋转，只不过步进电机驱动没有反馈环节。

5.3 数据采集模块设计

数据采集模块是检测系统需要完成的重要任务，采集数据为待测点与标定模板间的相对距离，待测点个数等于 $12 \times n$ （n 可自行输入），且沿工件表面均匀分布，本节给出传感器数据采集程序的设计和数据采集模块的整体设计。

5.3.1 传感器数据采集程序的设计

传感器数据采集模块主要负责采集工件相对于模板的位移信号，用于最终测量点的坐标转换。

电涡流位移传感器输出信号为 -5V~+5V 模拟电压，其数据采集原理结构图如图 5.14 所示：

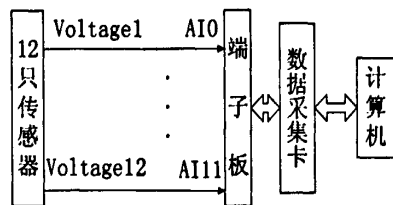


图 5.14 传感器数据采集控制结构图

其控制软件流程图如图 5.15 所示：

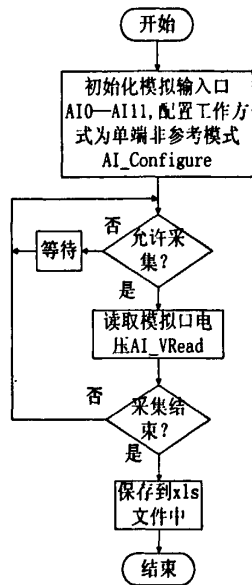


图 5.15 传感器数据采集程序流程图

5.3.2 数据采集模块的实现

如图 5.2 所示，在数据采集模块，开始数据采集前，需要输入运行距离和采集点数。采集数据点方式为等间隔采集。具体采集过程如下：点击开始采集按钮，伺服电机开始运行，龙门机构带动测头扫描工件，同时程序采集编码盘反馈信号，判断当前运行距离，当龙门机构运行到待测点位置时，程序通知传感器采集信号，执行 AI_VRead()函数读取传感器输出电压，所有点采集完毕后，电机停转，点击保存数据按钮保存数据到 xls 文件中。

因为数据采集过程涉及伺服电机控制，伺服电机编码盘反馈信号采集和传感器数据采集三个任务，所以考虑使用多线程技术来实现。

MFC 中有两类线程^[35]，分别称之为工作者线程和用户界面线程。二者的主要区别在于工作者线程没有消息循环，而用户界面线程有自己的消息队列和消息循环。工作者线程没有消息机制，通常用来执行后台计算和维护任务，如冗长的计算过程，打印机的后台打印等。用户界面线程一般用于处理独立于其他线程执行之外的用户输入，响应用户及系统所产生的事件和消息

等。但对于 Win32 的 API 编程而言,这两种线程是没有区别的,它们都只需线程的启动地址即可启动线程来执行任务。

在编程中没有用到消息队列和消息循环,因此本文选择创建工作线程来完成任务。因为其中有线程间的通信,程序采用了两个 CEvent 对象来实现线程间的同步。

CEvent 类提供了对事件的支持。事件是一个允许一个线程在某种情况发生时,唤醒另外一个线程的同步对象。每一个 CEvent 对象可以有两种状态:有信号状态和无信号状态。线程监视位于其中的 CEvent 类对象的状态,并在相应的时候采取相应的操作。在 MFC 中,CEvent 类对象有两种类型:人工事件和自动事件。一个自动 CEvent 对象在被至少一个线程释放后会自动返回到无信号状态;而人工事件对象获得信号后,释放可利用线程,但直到调用成员函数 ReSetEvent()才将其设置为无信号状态。在创建 CEvent 类的对象时,默认创建的是自动事件。

程序流程图如图 5.6 所示,图中参数 l 表示要运行的距离, n 表示要采集的点数,程序会在龙门机构每运行间隔 l/n 处通知传感器采集一次数据。

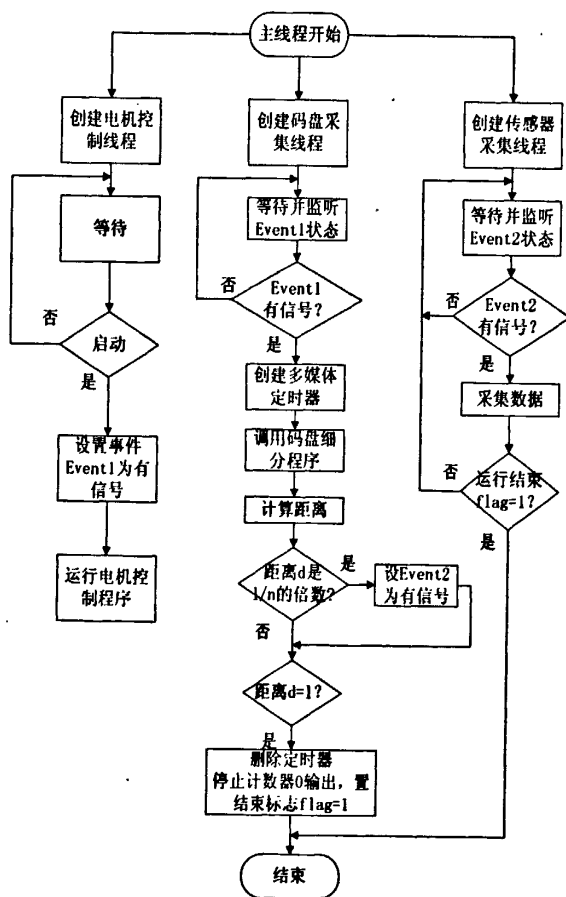


图 5.16 总体程序流程图

点击开始按钮,主线程运行,并创建三个工作线程:电机控制线程、码盘采集线程和传感

器采集线程,电机控制线程首先运行,同时设置事件 Event1 为有信号状态,此时码盘采集线程监测到 Event1 信号,开始运行,当运行距离 d 是 $1/n$ 的整数倍时,通过事件 Event2 触发传感器采集线程运行,采集数据,如果 $d=1$,则采集结束,删除定时器,停止计数器,然后点击保存数据按钮保存采集数据。

5.4 数据处理与误差分析

传感器采集得到的数据是一系列电压值,不能直接用来拟合曲面和面轮廓度误差的评定,必须首先转换成位移量,然后结合传感器测头标定结果进行坐标统一,转换成三维坐标,进而完成曲面拟合和面轮廓度的评定。

5.4.1 数据处理方法与流程

5.4.1.1 测量与数据处理流程

轨道车门轮廓度自动检测装置测量步骤如下:

- 安装工件和标准模板;
- 采用量块定位,合理调整传感器 Y 向分布间距和伸出长度,使各传感器输出电压等于零伏;
- 标定各个传感器的灵敏度(基于模板);
- 调整使得传感器输出电压等于零伏,开始测量。

数据处理流程如下:

- 处理传感器标定数据,得到各个传感器的灵敏度, $K_1, K_2, \dots, K_{12}$;
- 建立测量坐标系,并进行坐标统一。如图 5.17 所示,以工件模板顶角为坐标原点,以工件模板直边建立 X 轴,垂直于工件模板轴线建立 Y 轴,垂直于 XOY 平面向上建立 Z 轴,根据测量前所标定的传感器间距 $Y_1, Y_2, \dots, Y_{11}$, 工件模板 CAD 模型数据和传感器测得数据,完成测量点的坐标统一;

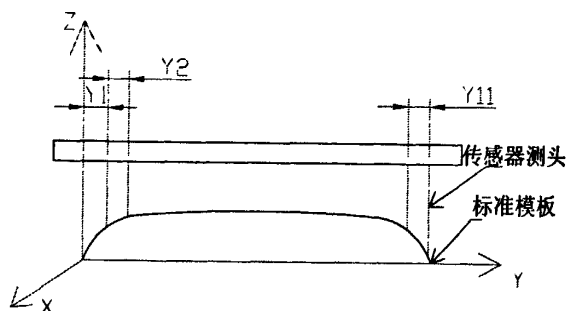


图 5.17 建立测量坐标系

- 确定算法，将所测数据点拟合成曲面，评定面轮廓度误差。

由于定位存在误差，工件可能放偏，结果其轴线不沿 X 轴向，采集过程中传感器灵敏度会发生变化，则采集点转换坐标会存在误差，由于灵敏度变化引起的误差不好补偿，所以应尽量减少定位误差，当轴线偏差很小则可忽略灵敏度变化引起的误差。

5.4.2.2 传感器的标定

传感器标定是指利用较高等级的标准器具（或仪器、仪表）对传感器的特性进行刻度，或者说通过实验建立传感器输入量与输出量之间的关系。同时，也确定出不同使用条件下的误差关系。

由于测量工件为单曲面，在曲率不同的地方，传感器轴线与曲面法线方向可能不同向，传感器的灵敏度、线性度也会不一样，因此需要对十二只传感器进行标定。标定步骤如下：

- 首先调整传感器和模板相对位置，使各个传感器输出电压等于零；
- 安装标定用标准器具（其不确定度应小于 $\pm 1 \mu\text{m}$ ），调用标定用程序，完成标定数据采集；
- 重复上述步骤三次，测量结果取平均值。

标定用程序界面如图 5.18 所示。上面一栏可实时显示传感器输出电压，方便传感器输出 0 伏时的位置调整，下面一栏是标定使用模块，可输入采集数据位移间隔，初始输入为 0.1mm，还可显示已采集点数，确认采集结束点保存按钮保存数据。采集数据时应在距离工件表面越 0~2mm 范围内采集数据，以保证传感器工作在线性工作区。

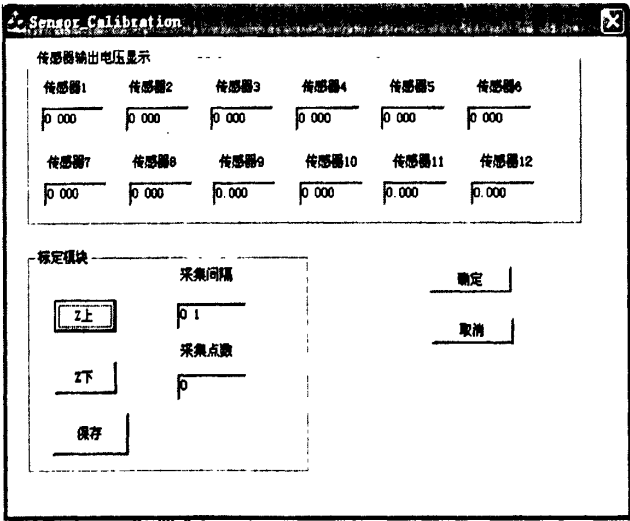


图 5.18 传感器标定界面

采集完毕后，使用最小二乘法拟合数据，得各传感器灵敏度 $k_1, k_2, \dots, k_{12}$ 。

5.4.2.3 坐标统一

建立测量坐标系如图 5.17 所示，已知各传感器灵敏度 ($k_1, k_2, \dots, k_{12}$)，工件模板 CAD 模型，传感器 Y 向间距 ($d_1, d_2, \dots, d_{11}$)，设待测点坐标 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ，对应点的传感器输出数据为 s_i ，由模板 CAD 模型和传感器 Y 向间距得各传感器测头对应的模板上的点坐标为 $P_{j0}(x_{j0}, y_{j0}, z_{j0})$ ，从而得各测点坐标：

$$x_i = x_{j0}, \quad y_i = y_{j0}, \quad z_i = z_{j0} + s_i/k_j$$

其中，根据各测点数据是由哪个传感器测得取 $j=1, 2, \dots, 12$ 。

5.4.2.4 曲面拟合

Imageware^[48]是著名的逆向工程软件，广泛应用于汽车制造、航空航天及消费家电、模具和计算机零部件设计等领域。它作为 UG 软件中专门为逆向工程设计的模块，具有强大的测试数据处理、曲面造型和误差检测的功能；可以处理几万至几百万的点云数据，可使用该软件将待测点坐标拟合成曲面。

因为待测曲面为单曲度曲面，可使用 Imageware12.1 中的均匀曲面拟合功能将待测点拟合成均匀曲面，并使用点云到曲面的距离命令进行曲面分析，得到面轮廓度误差。

5.4.2 测量结果不确定度分析

影响测量结果的误差来源可分为以下几部分：

1) 机构误差

对于三维运动平台来说，有 21 项几何误差^[30]，每个轴有六项（包括一项定位误差，两项

直线度误差, 三项沿三个轴的转动误差即滚动误差、俯仰误差和偏转误差), 还有三个三轴相互垂直度误差, 因为轨道车门面轮廓度自动检测装置是基于模板测量, 将三维运动转化为一维运动, 所以 Y 向和 Z 向的初始定位系统误差和标定误差很小, 可忽略不计, 检测系统只存在 X 方向上的六项几何运动误差和两项垂直度误差。

在 X 轴方向上, 存在定位误差 δ_{xx} 、Y 向直线度误差 δ_{xy} 、Z 向直线度误差 δ_{xz} 、滚动误差 α_x 、沿 Y 轴的俯仰误差 α_y 和沿 Z 轴的偏转误差 α_z ; X 轴与 Y 轴之间, X 轴与 Z 轴之间存在垂直度误差 η_{xy} , η_{xz} 。

其中定位误差可由编码盘反馈进行控制, 而其他误差如直线度等在机械结构设计时已进行精度控制, 误差 $\Delta_1 \leq \pm 0.01\text{mm}$ 。

2) 传感器误差

电涡流传感器引起的测量误差 $\Delta_2 \leq \pm 0.001\text{mm}$, 码盘分辨率引起的误差 $\Delta_3 \leq \pm 0.001\text{mm}$ 。

3) 标准件误差

量块制造误差引起的定位误差 $\Delta_4 \leq \pm 0.0008\text{mm}$ (选用 2 级量块, 标称长度 $25 < l_n \leq 50\text{mm}$), 可选择标准仪器对量块进行标定, 从而减小定位误差。

4) 模板制造误差

检测系统是基于模板测量的, 模板的制造精度直接影响测量结果的精度, 为减小因模板制造误差引起的测量误差, 应尽量提高模板制造精度并使用坐标机进行检验标定, 标定后模板的极限误差可达到 $\Delta_5 \leq \pm 0.01\text{mm}$ 。

5) 环境误差

温度, 光线等对传感器性能影响产生的误差 Δ_6 , 因为每次测量前都要对传感器进行标定, 再加上对温度和光线进行适当控制, 此项误差也可忽略不计。

6) 原理方法误差

本文采用的测量方法是三维测量转化为一维测量, 并选用电涡流传感器来测量测头与工件表面的距离, 由于传感器测头方向与测量表面法线方向可能不同向, 会引起测量误差 Δ_7 , 所以在每次测量前需要对传感器进行灵敏度和线性度标定, 此项误差可忽略不计; 还有由于工件定位不准确, 即工件摆放时轴线没有沿 X 向, 使得测量过程中传感器灵敏度和线性度变化引起的测量误差 Δ_8 , 该误差可通过减小定位误差和以旋转拟合曲面的最小条件评定方法来消除。

综合以上各误差来源, 得测量结果总不确定度为:

$$\Delta \leq \pm \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2 + \Delta_7^2 + \Delta_8^2} = \pm 0.014\text{mm}$$

由轨道车门面轮廓度自动检测装置设计要求可知, 测量误差不确定度小于检测装置允许总误差 ($\pm 0.1\text{mm}$), 所以测量结果符合精度要求。

5.5 小结

本章节主要完成了系统软件设计，根据检测系统要完成的任务，进行软件总体方案设计和计算机界面设计，进而完成各个子模块的设计，包括 X 回零程序设计，伺服电机驱动程序设计，Z 向传动系统单步、连续驱动程序设计和数据采集模块的设计，最后进行数据处理和误差分析，包括数据处理流程的介绍，传感器的标定，坐标的统一，曲面拟合及误差的不确定度分析等。

第六章 实验分析

本文以五自由度运动平台作为实验平台，以外径为 $\Phi 110\text{mm}$ 的圆柱筒模拟被测量工件，采用德国 Mahr 数显表 Millitast1085、中原量仪厂的 DGC-6PG/B 电感旁向测量头和 DGS-6 数显电感测微仪进行传感器技术指标标定和位置标定；使用 YG9202 电涡流位移传感器作为实验用传感器，采集待测点位移信号。实验以 PC 机+多功能数据采集卡(PCI-6013)作为控制单元，使用 Visual C++ 作为人机界面的开发工具，完成驱动和采集模块的设计。最后处理数据，将数据转换成三维坐标，并使用逆向工程软件 Imageware 来拟合曲面，完成面轮廓度评定和误差分析。

6.1 实验目的

按照测量系统方案完成单曲度工件面轮廓度的测量和评定，验证将三维测量转化为一维测量的方案可行性。

6.2 实验方案

实验以五自由度平台作为实验平台，测量方案如图 6.1 所示，工件置于 Y 工作台上，使用 V 形块定位，工件轴线平行于 X 轴；L 形传感器架固定于 Z 工作台上，其上安装固定 3 个传感器，传感器沿 Y 向分布，轴线平行于 Z 轴。测量时，Y 工作台带动工件沿 X 向直线运动，同时读取传感器输出电压，完成待测点数据采集。

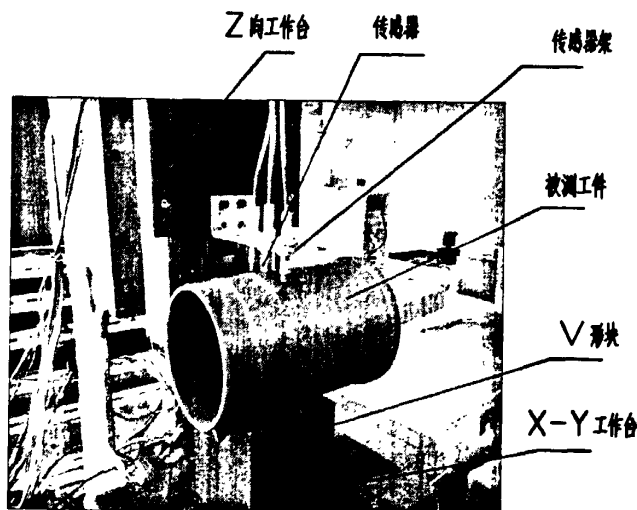


图 6.1 实验方案

L 形传感器架是使用一块 L 型钢沿长边的上加工出一个槽制成，传感器可沿槽上下左右移动，以调节传感器测头伸出长度，结构图如图 6.2 所示：

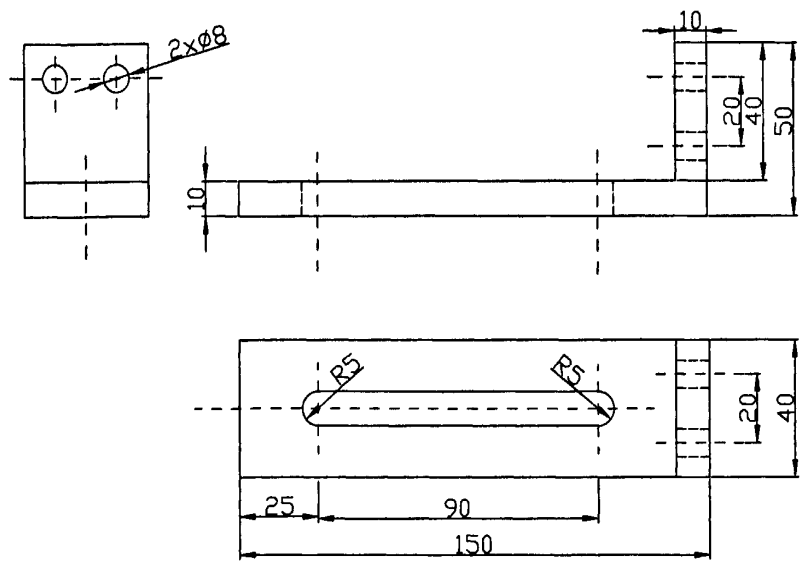


图 6.2 实验方案用传感器架结构图

测量分两次进行，第一次将工件摆正，即工件的轴线沿 X 轴方向，在该位置下起始端采得数据作为测量模板数据，采集三组数据，并对测量结果进行重复性误差评定；第二次稍微增大工件轴线与 X 轴的夹角，模拟被测工件具有位置误差的情况，采集三组数据，通过最小条件法或者旋转拟合曲面的方法求得最小轮廓度误差，并与第一次测量结果进行比较。

6.3 实验设备

6.3.1 五自由度运动平台

五自由度运动平台^[36]可实现多自由度运动，可有效模拟坐标机床的工作过程，同时由于设置了多功能装夹方式，可方便地进行测量传感器的装夹，提高了测试效率。主要技术指标如下：

- X 向机构的行程为 300mm；
- Y 向机构的行程为 200mm；
- Z 向平动机构的行程为 150mm；
- 分度头步距角<0.36 度；
- 直线运动步距为 4 μ m；
- 各轴直线度和轴间垂直度<20 μ m；

五自由度运动平台在水平方向上具备两个方向的平动自由度（X 方向、Y 方向）和一个转动自由度（分度台旋转运动）；在竖直方向上设置一个平动自由度和一个转动自由度。五自由度即为 X、Y、Z、 θ 、 γ ，三个平动和两个转动自由度。运动机构结构示意图如图 6.3 所示。

在底座上安放的是 X 方向运动机构，通过滚珠丝杠副和直线滚动导轨构成该方向的平动自

由度；在该机构的导向台上固定了 Y 向平动机构。X 向机构和 Y 向机构皆为水平放置且二者相互之间垂直，X 向机构行程为 300mm，Y 向机构行程为 200mm；在 Y 机构的工作台上可安放水平分度头，控制水平面的旋转角位移 θ ，分度头步距角 $< 0.36^\circ$ 。以上三部分构成水平面运动机构，负责工件在水平面内的定位。

在竖直方向为 Z 向运动机构，Z 向平动机构的导向块上安放一个电机座，用以安装可更换电机，用于带动刀具或测头旋转，产生另一个旋转自由度 γ ，可用于加工或测量设备仿真。Z 向平动机构的行程为 150mm，XYZ 向运动最小步距为 $4\mu\text{m}$ 。五个自由度的运动皆为步进电机驱动，各位移方向上都可控制速度和行程。

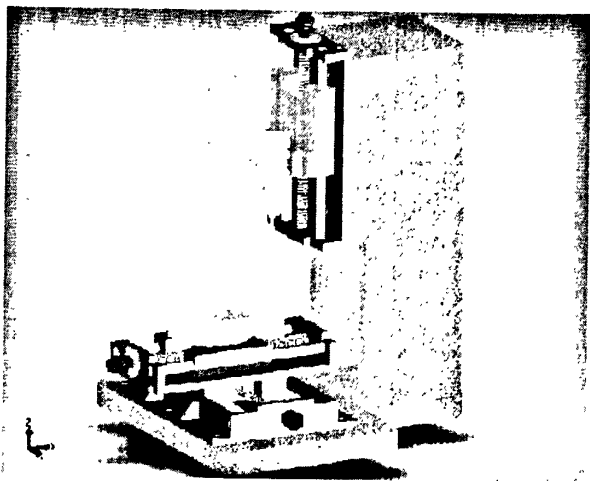


图 6.3 五自由度运动平台运动机构结构示意图

五自由度运动平台各自由度方向均采用 75BF006 电机与配套的 SMD-530F 物象步进电机驱动器作为驱动力，其各项指标及接线方式均在 4.1.3 小结中有详细论述。

由于步进电机驱动属于开环控制，为提高控制稳定性和精度，在各轴上均装有 LMS-6 型光栅线位移传感器来控制位移精度。LMS 系列光栅线位移传感器是高精度的线位移传感器，主要技术参数如下：

- 栅距：0.01 毫米(100 线对/毫米)
- 参考标记：间隔 50 毫米
- 量程：300 毫米
- 工作温度： $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$
- 输出信号：幅值 4~5V，相位角差 90° 的两路方波信号

其输出信号如图 6.4 所示。

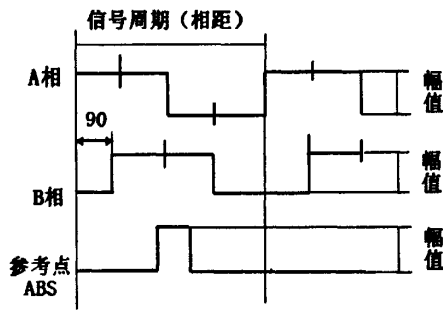


图 6.4 LMS-6 型位移光栅线位移传感器输出信号

6.3.2 实验用传感器及实验对象

- 1) 测量用传感器为 YG9202 电涡流位移传感器 3 个，已在 4.1.4.2 小节中介绍。
- 2) 标定用传感器

(1) 德国 Mahr 的数显千分尺 Millitast1085，功能有：ON/OFF 开/关；RESET 置零；PRESET 预置（可以输入任何数字）；Mm/inch 公/英制转换；DATA 数据输出（通过数据输出线进行数据输出，RS232C 接口（马尔双工传输线））；数据保存（保存最后的测量值），且可储存三个预置数字；计数方向转换；模拟显示转换功能，MAX/MIN 记忆，便于拐点寻找，MAX-MIN 记忆，便于查询圆度和平面度；ABS 绝对值，零位设置不丢失最后起始数；HOLD 锁定，按钮可以被锁定，以避免意外的动作；最大测量速度 1.5m/s，测量速度为每秒 7 个测量值。

外形如图 6.5 所示，技术参数如表 6.1 所示。

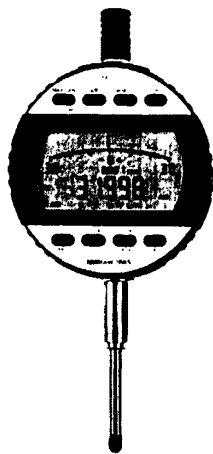


图 6.5 数显表 Millitast1085 外形

表 6.1 数显表 Millitast1085 参数

型号	测量范围 mm	分辨率 mm	允许误差 ϵ_c mm	测力 N	重量 g
Millitast1085	25	0.001	0.001	0.6~1.1	160

(2) DGC-6PG/B 电感旁向测量头，外形如图 6.6 所示，技术参数如表 6.2。

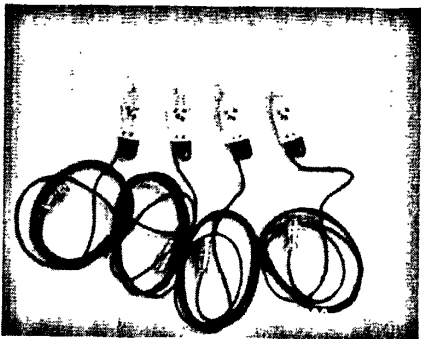


图 6.6 DGC-6PG/B 外形

表 6.2 电感旁向测头 DGC-6PG/B 参数

型号	测量范围 mm	线性误差	测量力 N	总行程 mm	装卡尺 寸 mm	外形尺 寸 mm	测量方 式
DGC-6PG/B	± 0.3	$\pm 0.5\%$	0.12~0.18	1.5	$\Phi 6.5 \pm 0.1$	104× 15.2×26	旁向式

(3) 数显电感测微仪 DGS-6 和 DGC-6PG/B 电感传感器配套使用，用于机械加工中的精密测量，可用单传感器测量，也可用两个传感器进行和差演算测量。本实验使用单传感器测量。

主要技术性能如表 6.3 所示。

表 6.3 数显电感测微仪 DGS-6 档位说明

档位	测量范围 μm	分辨率 μm	示值误差 μm
第一档	± 10	0.01	$\leq \pm 0.05$
第二档	± 100	0.1	$\leq \pm 0.5$
第三档	± 1000	1	$\leq \pm 10$

3) 测量工件为外径为 120mm 的圆柱筒，壁厚 5mm，筒高 120mm。示意图如图 6.7 所示。

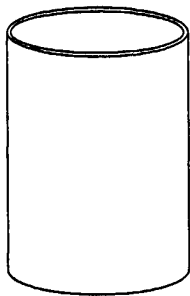


图 6.7 实验对象示意图

6.4 实验流程

实验分为以下几个步骤进行：工件安装及固定、传感器位置标定、传感器线性标定、测量。

6.4.1 工件安装及固定

- 1) 首先安装传感器。传感器探头头部有锁紧螺母，可将传感器固定在传感器架上；
- 2) 将工件安放到工作台上，调整传感器测头与工件位置，使各传感器输出电压值为零伏。
 - 首先要保证中间传感器检测点是工件在 Z 方向上的最高点，如图 6.8 所示，方法是将工作台沿 Y 向前后移动，并同时观察中间传感器电压输出值，当电压输出值取最大时，传感器测量点为最高点。
 - 模拟方向基准，进行工件定位。要确保工件的轴线平行于 X 轴，这样才能保证传感器采集数据是沿工件母线方向采集。

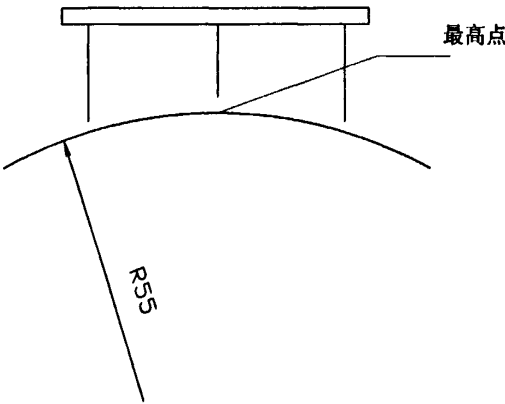


图 6.8 传感器分布示意图

6.4.2 传感器位置标定

工件安装完成后进行传感器 Y 向间距测量，模拟 Y 向定位，以方便在最后的数据处理中统

一坐标。本论文使用 DGC-6PG/B 电感旁向测量头配合数显电感测微仪 DGS-6 以及数显千分尺 Millitast1085 测量传感器的 Y 向间距，完成传感器位置标定。

如图 6.9 所示，三个传感器并排放放，标定目的是得到 a, b 的值，标定结果如表 6.4 所示。

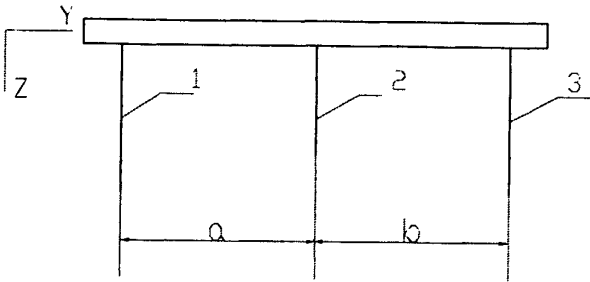


图 6.9 传感器间距示意图

表 6.4 传感器间距标定结果

测量参数	a/mm	b/mm
1	20.542	20.918
2	20.823	20.946
3	20.880	20.944
平均值	20.748	20.936

即 $y_1=a=20.748\text{mm}$, $y_2=b=20.936\text{mm}$ 。

6.4.3 传感器线性标定

传感器的标定主要确定传感器输入量与输出量之间的关系，以确定传感器在不同材料和不同曲率处的灵敏度。

传感器标定使用的标准器具为数显表 Millitast1085，精度为 $1\mu\text{m}$ ，传感器标定使用的程序界面如图 6.10 所示：

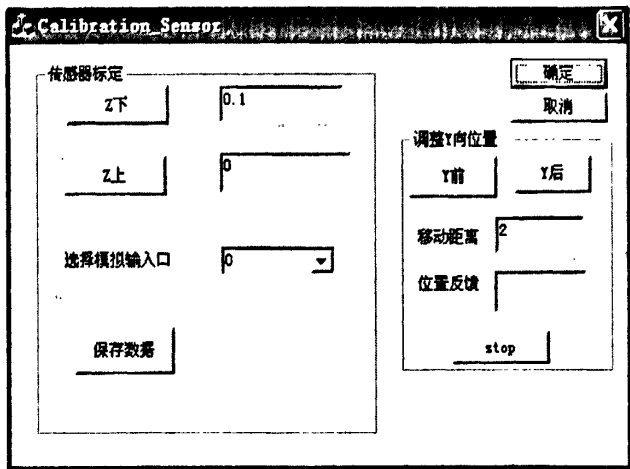


图 6.10 传感器标定使用程序界面

初始设置间隔每 0.1mm 采集一次传感器输出电压，每次标定采集 15 个数据，重复标定三次，标定结果取三次标定的平均值。

6.4.4 测量

测量采用程序界面如图 6.11 所示。

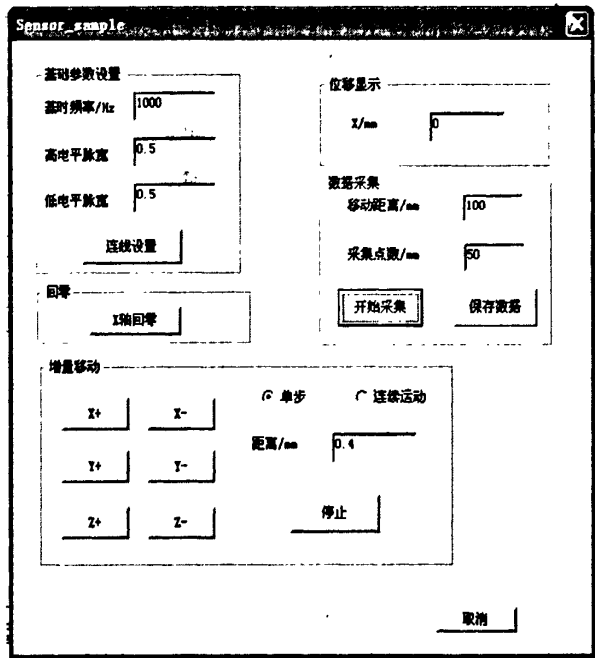


图 6.11 实验用程序界面

测量步骤如下图 6.12 所示：



图 6.12 实验测量流程图

至此，一次数据采集结束，为减小测量误差，上述过程再进行两次，测量结果取三次测量的平均值。

6.5 数据分析

6.5.1 传感器标定

传感器的标定在第一次测量的起始端处，模拟检测系统基于模版的标定。

对于传感器 1 共采集三组数据，每组数据采得 15 个点。传感器测头沿 Z 向移动，且每隔约 0.1mm 采集一个数据，标定结果取三组数据拟合结果的平均值。

实验使用 matlab 工具，对标定数据采用最小二乘法拟合，对第一组数据，拟合结果如图 6.13 所示。

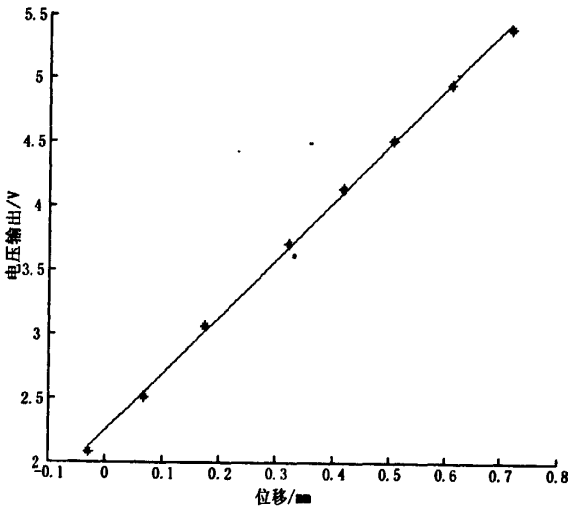


图 6.13 第一组数据的最小二乘拟合结果

根据 matlab 拟合结果可知，拟合直线方程为： $y = 4.5754x + 2.2199$

得传感器 1 灵敏度 $k_1 = 4.7574 \text{ V/mm}$ 。

同样可得后两组拟合结果， $k_2 = 4.553 \text{ V/mm}$ ， $k_3 = 4.6408 \text{ V/mm}$ ，取三次测量平均值得传感器 1 灵敏度(式 5-3)：

$$k = \frac{k_1 + k_2 + k_3}{3} = \frac{4.5754 + 4.553 + 4.6408}{3} = 4.5897 \text{ V/mm} \tag{5-3}$$

使用同样的方法，可得传感器 2 和传感器 3 的灵敏度，最终标定结果如表 6.5 所示。

表 6.5 第一次测量标定结果

灵敏度 \ 传感器	传感器 1	传感器 2	传感器 3
K(V/mm)	5.0951	5.1228	4.7784

6.5.2 坐标统一

以标定时中间传感器测头对应的测点为测量坐标系的坐标原点, 工作台坐标系 X 轴作为测量坐标系 X 轴, 工作台坐标系 Y 轴作为测量坐标系 Y 轴, 工作台坐标系 Z 轴作为测量坐标系 Z 轴, 建立测量坐标系。根据传感器位置标定数据, 传感器标定灵敏度数据, 以及传感器采集数据, 将所有数据点统一于统一测量坐标系下。

传感器采集数据坐标转换方法如下:

由圆柱体在新坐标系中的方程可得, 测量开始前三个传感器测头对应的测点坐标为:

$$P_1(0, -20.748, 4.064), P_2(0, 0, 0), P_3(0, 20.936, 4.141)$$

所以对于各传感器测得点坐标可表示为:

$$\text{传感器 1 } x_{1j} = 0, 2, 4, \dots, 98; y_{1j} = -20.748; z_1 = z_{1j}/k_1 + 4.064;$$

$$\text{传感器 2 } x_{2j} = 0, 2, 4, \dots, 98; y_{2j} = 0; z_2 = z_{2j}/k_2;$$

$$\text{传感器 3 } x_{3j} = 0, 2, 4, \dots, 98; y_{3j} = 20.936; z_3 = z_{3j}/k_3 + 4.141。$$

其中, x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} ——第 i 个传感器测得的第 j 个点的 x, y, z 坐标值, $i=1, 2, 3, j=1, 2, 3, \dots, 50$;

z_{1j}, z_{2j}, z_{3j} ——分别是传感器 1, 2, 3 对应的第 j 个点的数据电压值;

k_i ——第 i 个传感器的灵敏度。

6.5.3 数据处理

坐标统一后, 得到 150 个基本分布在圆柱体三条母线上的点坐标值, 调用逆向工程软件 Imageware 拟合所需要的曲面。

1) 第一次测量数据处理

将第一次测量数据导入到 Imageware 中, 对测量数据进行处理, 并得到面轮廓度误差。处理方法有两种:

- 将点云拟合成圆柱体, 使用“曲面与点云的差异”命令进行曲面分析, 得面轮廓度误差;

- 使用“点云特性分析”命令, 计算点云同轴度, 即要求的面轮廓度误差值。点云特性分析命令可计算和显示点云的同轴度, 自动拟合出点云的最佳圆柱。使用点云特性分析命令求得面轮廓度误差值是基于最小区域法的误差分析方法, 但是对于非圆柱体工件如地铁列车门, 须要建立工件的具体 3D 数字模型。

使用点云拟合成圆柱体命令, 拟合结果如图 6.14 所示, 然后使用“曲面与点云的差异”命令, 可得面轮廓度误差。

第一次测量共采得三组数据, 测量结果取三组数据拟合结果的平均值。三组数据拟合结果如表 6.6 所示。

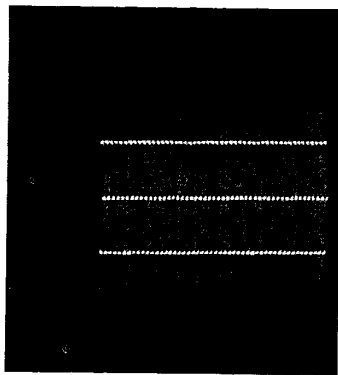


图 6.14 第一组数据拟合成圆柱体

表 6.6 工件摆正情况下的评定结果

参数 序号	面轮廓度值 /mm
1	0.0076
2	0.0079
3	0.0071
平均值	0.0075

分析拟合结果可知，面轮廓度误差为 0.0075mm，测量重复性误差 $<\pm 0.0004\text{mm}$ 。

2) 第二次测量数据处理

第二次测量是在第一次基础上，在 XY 平面内，调整了圆柱体工件的轴线方向，模拟工件存在位置误差的情况，点云拟合成圆柱体，评定结果如表 6.7 所示。

表 6.7 工件存在定位误差时的评定结果

参数 序号	面轮廓度值 /mm
1	0.0083
2	0.0086
3	0.0115
平均值	0.0095

分析测量结果可知，面轮廓度误差值为 0.0095mm，较不存在位置误差的情况大了 0.002mm，测量重复性误差 $<\pm 0.002\text{mm}$ 。

6.6 结果分析

1) 测量结果表明，在实验条件下，该测量方案可行，测量重复性满足设计要求。

2) 根据第二组测量数据分析,当工件本身存在位置误差时,反映出面轮廓度误差增大,该误差可以通过进一步设计算法来进行分离,作为工序质量分析的依据。

3) 对于逆向分析软件中不同的数据处理方法,“点云拟合成圆柱体”命令加“点云与曲面分析”命令和使用“点云特性分析”命令所得结果相差不多,主要是因为测量对象是圆柱体,计算测量点相对于拟合曲面的面轮廓度误差结果,或者计算测量点相对于理想曲面的面轮廓度误差结果,二者是相同的。

6.7 小结

本章节主要进行实验验证。介绍了实验进行的环境、实验步骤以及最终实验数据处理方法和实验结果分析,最终实验结果表明了三维测量转化为一维测量方案的可行性。

第七章 结论

7.1 论文总结

在地铁列车门生产过程中,面轮廓度是否合格直接影响车辆美观性、车辆装配精度及密封性,而现阶段对于面轮廓度的检测还没有一种既经济又实用且能保证检测精度的检测装置,本课题根据地铁列车门检测装置的设计要求,从经济性可行性出发,设计了一套基于坐标测量法的电传感器式自动检测装置,完成了检测装置总体方案设计,机械系统和控制系统的设计,软件设计以及实验分析。论文主要完成工作如下:

1) 在了解面轮廓度定义的基础上,分析现阶段国内外面轮廓度检测方法,包括仿形测量法,光学跟踪测量法,截面样板测量法,三坐标测量法。分析各种测量方法的优缺点,地铁列车门的特点,检测要求等,从可行性,经济性角度出发,最终决定自行设计一套单曲度专用的基于相对坐标测量法的面轮廓度自动检测装置。

2) 根据地铁列车门自身特点,检测要求,进行面轮廓度自动检测装置的总体方案设计,提出了将三维测量转化为一维测量的思路,并设计出龙门结构式的测量方案;论文采用 PC 机加多功能数据采集卡的控制方式,完成系统总体结构框图的设计,并完成精度制定和误差分配。

3) 完成了检测装置机械系统的设计,包括龙门结构的设计,传感器架的设计,以及传动系统的设计,具体包括滚珠丝杠选型校核,电机选型计算以及导轨的选用等。

4) 完成了检测装置控制系统的设计,包括伺服电机驱动模块的设计,步进电机驱动模块的设计,传感器标定模块的设计和传感器采集模块的设计等。采用多线程技术,完成计算机控制界面的设计。

5) 完成了数据处理与误差分析,包括数据处理的方法,处理流程,以及测量结果的不确定度分析。

6) 搭建实验平台,完成实验和数据处理,从实验结果分析,测量效果的理想性除了取决于工件表面形状外,还取决于测量点的多少,由于工件是圆柱体,形状特殊,评定结果理想。此次实验主要是受工作台尺寸限制,工件尺寸小,使得最终实验采集点分布较少。

7.2 问题与改进

由于本人能力有限,加之时间和其他因素的影响,对于面轮廓度自动检测装置的设计只做了相当有限的工作,还存在许多不足之处,有待深入讨论和完善。

1) 机械系统设计部分不够完善,只做了总体方案设计,各部分的选型设计和主要零部件的结构设计,对于各个部分的结构设计和总体装配图需要完善;

2) 检测装置的控制单元为 PC 机加多功能数据采集卡, 可考虑采用单片机作为控制单元, 单片机成本低, 控制也较方便;

3) 对于传感器架的设计需要进一步完善, 在固定部分采用的是螺栓拧紧固定, 因此在传感器输出值调零时很不方便, 可以考虑将旋转运动转化为上下移动的机构进行传感器的上下调节与固定;

4) 本论文选用逆向工程软件 Imageware12.1 对测量数据进行拟合, 有一定的局限性, 如不能对拟合曲面进行合理旋转, 寻找拟合曲面与理论曲面之间最佳位置, 得到最小面轮廓度; 可以考虑其他软件或者自己编写算法进行曲面拟合;

5) 实验具有特殊性。由于受实验平台的限制, 实验对象尺寸较小, 测量点分布不均, 但是由于实验对象为圆柱体, 所以能得到理想的评定结果。如果可以选取较大的实验平台, 选择普通的单曲率工件, 可重新设计测量方案, 使得测点均匀分布, 从而对结果进行重新验证。

参考文献

- [1] 黄阳, 轨道车辆门系统综合性能检测仪的研制, 中国测试技术, 2004 年 7 月第 30 卷第 4 期
- [2] 姜瑞, 三坐标机三维自由曲面轮廓度自适应评定方法的研究及软件开发, [硕士学位论文], 陕西, 西安理工大学, 2001.3
- [3] D.J.Moreland, C.A.Hobson, M.J.Lalor, D.B.Clegg, Real-time high accuracy measurements utilizing line-scan image sensors PIE Vol654 Automatic Optical Inspection,1986:26~34
- [4] 傅成昌, 形位误差检测技术讲座 第五讲 形状误差及其检测方法(三), 机械工人.冷加工, 2006.9
- [5] 李庆祥, 王东生, 李玉和, 现代精密仪器设计, 北京: 清华大学出版社, 2003.3
- [6] 丁继斌, 封士彩, 机械系统设计及其控制技术, 化学工业出版社, 2007.3:135, 142~145
- [7] 李蕾, 崔建国, 精密机械设计, 化学工业出版社, 2005.3:221~230
- [8] 机械设计手册单行本: 机电一体化系统设计, 机械设计手册编委, 机械工业出版社, 2007.6:33~49
- [9] 胡宇秋, 大跨度预应力工字钢梁的变形与弹塑性研究, [硕士学位论文], 兰州理工大学, 2005.5
- [10] 杨祖孝, 数控机床进给滚珠丝杠的选择与设计, 机床与液压, 1999 年 03 期
- [11] 田地银, 田云, 关于滚珠丝杠副的选择, 电子工艺技术, 1997 年 10 月第 18 卷 01 期
- [12] 王健, 高明月, 董学哲, 滚珠丝杠设计计算, 2002 年黑龙江省机械工程学学会年会论文集
- [13] 濮良贵, 纪名刚, 机械设计, 高等教育出版社, 2000.12
- [14] 周燕, 数控机床滚珠丝杠副的选择与计算, 机床与液压, 2005.No.1
- [15] 刘泽九, 滚动轴承应用手册, 农业机械出版社, 1996
- [16] 杨家德, 圆柱导轨, 机械工人冷加工, 1978 年 02 期
- [17] NSK. PRECISION MACHINE PARTS LINEAR MOTION PRODUCTS
- [18] 邱棣华, 胡性侃, 陈忠安等, 材料力学, 高等教育出版社, 2004.1
- [19] 解光胜, 可重组测控实验系统运动控制平台的设计与实现, [硕士学位论文], 南京航空航天大学, 2008.1
- [20] 刘文化, HMC63A 卧式加工中心结构总体设计, [硕士学位论文], 西安交通大学, 2007.3
- [21] 范超毅, 范巍, 步进电机的选型与计算, 机床与液压, 2008 年 5 月第 36 卷第 5 期
- [22] 汪术文, 光纤 Bragg 光栅振动传感器数据高速采集和处理系统设计, [硕士学位论文], 武

汉理工大学, 2003.5

[23] 周金萍, 徐丙立, 姜小光, Windows 系统编程, 人民邮电大学出版社, 2002.7

[24] 铁勇, 罗忠, 白凤山, 用动态链接库(DLL)实现并口告诉数据采集, 内蒙古大学学报(自然科学版), 2001.06

[25] 王秀华, 张春秋, 门玉涛等, 超静定梁变形计算的积分法, 力学与实践, 2009 年第 31 卷第 4 期

[26] NI Corporation, PCI E Series User Manual, 1999.3

[27] NI 数据采集卡使用入门, 泛华测控, 2003.6

[28] 寇宝泉, 程树康, 交流伺服电机及其控制, 机械工业出版社, 2008.10

[29] SMD-530F 五相步进电机驱动说明书, 常州华音电子有限公司。

[30] 王中字, 刘智敏, 夏新涛等, 测量误差与不确定度评定, 科学出版社, 2008.2:8~10

[31] 扬振中, 解耦型液压伺服肩关节的设计及其控制系统的研究, [硕士学位论文], 扬州大学, 2007.4

[32] Robert D.Thompson, 前导工作室译, MFC 开发人员参考手册, 机械工业出版社, 1998.8

[33] 厉虹, 杨黎明, 艾红编著, 伺服技术, 国防工业出版社, 2008.2

[34] 陈薇芳, 王宏涛, 机床数控技术及应用, 北京: 科学出版社, 2005.1

[35] 石婷婷, 刘广, 谢道新, 嵌入式系统多线程设计与实现[J]. 可编程控制器与工厂自动化, 2006 年第 3 期

[36] 梁桂平, VC++环境下快速可重组测控实验系统的开发, [硕士学位论文], 南京航空航天大学, 2008.1

[37] National Instruments. Traditional NI-DAQ User Manual.2003.4

[38] NI Corporation. PCI E Series User Manual.1999.3

[39] NI Corporation. NI-DAQ™ Function Reference Manual for PC Compatibles.1999.6

[40] NI Corporation. Traditional NI-DAQ™ User Manual-Data Acquisition Software for the PC.2001.1

[41] K. Kim, S. Lee, Y. Choi and J. Jeong. Determining a Pair of Concentric Spheres for Assessing Sphericity Errors Using Discrete Voronoi Diagrams. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000.8:728-732

[42] Wang Yuhua; Ye Shenghua; Duan Fajie. A Method for the Error Evaluating of Cone-type Profile, The Second International Symposium on Instrumentation Science and Technology, 2002

[43] Ueng W D, Lai J Y, Dong J J. Sweep-surface reconstruction from three dimensional measured data[J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(10):791-805

- [44] MOTION & CONTROL NSK.SUPER PRECISION BEARINGS,2003
- [45] T.W.Liepmann. Vehicle axle detector for roadways, U.S.pat.5821879,1998
- [46] AH.Taner, NM.White, Virtual Instrumentation: A solution to the problem of design complexity in intelligent instruments, Measurement & Control, 1996, 29(4): 165~171.
- [47] 王成璞, 面轮廓度的特征及应用, 金属加工 (测量版), 2008 年第 15 期
- [48] 单岩, 谢斌飞编著, Imageware 逆向造型技术基础, 清华大学出版社, 2006.2

致 谢

本论文是在我的导师赵转萍副教授的亲切关怀和指导下完成的，从论文开题到成文的全部过程中，赵老师言传身教，她的严谨的科学态度和广博的科学知识使我受益匪浅。这次毕业设计能够顺利完成，离不开赵老师的精心指导和大力帮助，并为我创造了良好的科研环境和试验条件。借此论文完成之际，向赵老师表示衷心的感谢。

同时也很感谢实验室的各位师兄师姐的大力鼓励和帮助，感谢和我一起学习的同学和朋友，感谢师弟师妹，他们也都给了我很多帮助和支持。

我还要感谢我的父母和弟弟，我的每一分进步都凝聚着他们的心血和期望，他们的支持是我前进的动力和源泉。

最后，向在百忙中抽出时间评审论文的各位专家、教授表示衷心的感谢。

攻读硕士期间发表学术论文

- [1]蒋公芹, 赵转萍, 大型球面模胎质量评定方法的研究, 工具技术, 2009