

# 结晶器多维坐标尺寸自动测量机的研制

## 摘 要

工字钢是截面为工字形的长条钢材，以其优越的性能广泛应用于民用建筑钢结构和工业构筑钢结构中。工字钢结晶器是连铸生产工字钢毛坯的模具，其内外尺寸的精度不但影响工字钢毛坯的精度，还对生产过程产生影响，严重的情况将造成钢水脱缸，造成严重的生产事故。为了测量结晶器的内外尺寸，我们受马钢公司委托研制了该测量机。

该测量机使用靠近工业现场，环境恶劣，要求测量机具有较强的抗干扰能力，必须采用可靠性好的传动及导向机构；测量工件内腔深宽比较大，形状特殊，故主机结构不能采用传统坐标测量机常用的移动桥式结构。

鉴于该测量机的使用环境和测量工件的特殊形状，主机采用 L 桥式结构，属于直角正交坐标测量机，各轴均采用伺服电机驱动滚珠丝杠副带动滑座沿滚珠导轨做直线运动，通过 X、Y、Z 三轴方向的直线运动实现测杆上的测头在测量空间的三维运动。测头采用 TESA 公司高精度触发式测头，三轴向位移由高精度光栅位移传感器进行检测。工控机通过伺服电机控制卡控制电机运转实现三轴的移动。在 VC++6.0 环境下对电机控制卡的函数库进行 2 次开发以实现对测头空间运动的复杂控制。

本文详细分析了测量机运行过程中的 21 项几何误差，运用齐次坐标及其变换矩阵这一简捷而有效的数学工具建立了测量机测头中心相对于底座参考坐标系的测量模型。对测量精度影响较大的 21 项几何误差进行了实验分离，采用误差分离与修正技术保证测量精度，实现在不增加制造成本，以及不增加编程复杂性的前提下，提高了测量机的精度。在 VC++6.0 环境下编写了自动测量示教、路径规划、数据处理等软件程序。该测量机测量对象特殊，对环境要求不高，成本低，能够满足企业提出的测量要求。

关键词：坐标测量机，测量模型，误差分析，误差分离与修正，伺服电机驱动，软件程序设计

# **Development of Multidimensional Auto Coordinate Measuring Machines Used for Crystallizer**

## **Abstract**

I iron is an I-shaped strip steel. It is abroad used in steel structure both in civil buildings and industry constructs as its excellent performance. I iron crystallizer is the mold in billet production. The precision of the inside and outside dimension affects not only the precision of I iron billet, but also the production process. What's the worse, molten steel may effuse out causing serious accident. So, in order to measure the inside and outside dimension of crystallizer, we design the measuring machine for Ma Steel company.

The coordinate measuring machine using close industry local and the working environment of it is very bad. It calls for that the CMM must have very strong capability of anti-jamming. So, the driving and guiding system which have very good performance are adopted. The lumen dimension of measuring object is very deep and the shape of it is especially. So, the mainframe also can't adopt the tradition movable bridge-type structure.

Because the working environment of CMM and the shape of measuring object is especially. Mainframe adopts L bridge type structure. The coordinate measuring machine is a rectangular Cartesian CMM. The rectilinear movement of every axis is achieved through Servo motor drives ball screw pair bringing with the slide carriage to move along the spherical guide. The three dimension movement of probe is realized by the rectilinear movement of three axes: X, Y, Z axis. High precision touch trigger probe of TESA is used and the three axial displacements are measured by high precision grating. Industry computer control the running of the motors with servo motor control cards. The functions of motor control card are secondary developed in Visual C++ 6.0 and the complex control of probe movement can be realized.

The 21 geometric errors in the moving processor of coordinate measuring machine are analyzed in detail in this paper. The model of probe center relative to reference coordinate in the base is built by transformation matrix of homogeneous coordinates. The 21 geometric errors, which have great impact on measurement accuracy, are separated through experiments. Measuring accuracy is improved by means of CAA. Manufacture cost doesn't increase and program design is also simple. The program of auto measurement, path layout and data processing are compiled in

Visual C++ 6.0. The measuring objects of this machine are special and with low requirement on environment, low cost. It can satisfy the measuring demands of corporation.

**Keywords:** coordinate measuring machine, measuring model, error analysis, error separation and correction, servo motor drive, software program design

## 插图清单

图 1-1	三坐标测量机的典型组成 .....	2
图 1-2	工字钢铸坯的生产工艺图 .....	3
图 1-3	结晶器铜管 .....	3
图 1-4	测量机的外观结构 .....	4
图 2-1	结晶器铜管截面 .....	6
图 2-2	测量机系统组成 .....	6
图 2-3	坐标测量原理 .....	8
图 2-4	点位测量示意图 .....	8
图 2-5	数据采集时序图 .....	8
图 2-6	测量机主体结构 .....	9
图 2-7	滚珠丝杠的结构 .....	10
图 2-8	滚珠丝杠的安装 .....	10
图 2-9	双螺母滚珠丝杠副轴向间隙的调整和预紧原理图 .....	11
图 2-10	一维运动平台安装示意图 .....	11
图 2-11	光栅位移传感器的结构原理 .....	12
图 2-12	莫尔条纹 .....	12
图 2-13	直线光栅位移传感器 .....	13
图 2-14	直线滚珠导轨结构 .....	13
图 2-15	直线滚珠导轨的配置及固定方式 .....	14
图 2-16	测量机平衡结构示意图 .....	15
图 2-17	测量机电气原理 .....	15
图 2-18	松下交流伺服电机和驱动器 .....	16
图 2-19	凌华 PCI-8164 运动控制卡 .....	17
图 2-20	PCI-8164 内部结构原理图 .....	17
图 2-21	研华 PCL-833 计数器卡 .....	18
图 2-22	PCL-833 内部结构及信号输入示意图 .....	18
图 2-23	计数卡输入信号示意图 .....	19
图 2-24	机械接触式测头 .....	19
图 2-25	电气式动态测头 .....	20
图 2-26	加力式三向电感测头 .....	21
图 2-27	激光非接触式测头工作原理 .....	22
图 2-28	测端、探针及星型测头 .....	22
图 2-29	测头内部结构图 .....	23
图 2-30	测头电气原理图 .....	23

图 2-31	测量机手动控制器 .....	24
图 2-32	手动控制器工作原理 .....	24
图 2-33	nRF401 芯片的典型应用 .....	25
图 2-34	接收机的电气原理图 .....	26
图 2-35	控制器的软件程序框图 .....	26
图 3-1	测量机误差源分析 .....	28
图 3-2	Y 轴导轨产生的 6 项几何误差 .....	28
图 3-3	触发测头受力情况 .....	29
图 3-4	触发测头测量力的各向异性 .....	30
图 3-5	测杆末端抖动 .....	30
图 3-6	齐次坐标变换的示意图 .....	31
图 3-7	测量机多级齐次坐标变换模型 .....	32
图 3-8	Y 轴基准示值误差重复测量曲线 .....	34
图 3-9	各轴误差修正的不确定度曲线 .....	36
图 4-1	激光干涉仪分离定位误差原理 .....	38
图 4-2	激光干涉仪分离水平轴定位误差安装示意 .....	38
图 4-3	激光干涉仪分离垂直轴定位误差安装示意 .....	38
图 4-4	各轴示值误差 5 次重复测量曲线 .....	39
图 4-5	激光干涉仪分离水平轴俯仰或偏摆误差原理 .....	39
图 4-6	激光干涉仪分离水平轴俯仰角误差安装示意图 .....	40
图 4-7	激光干涉仪分离垂直轴俯仰或偏摆角误差 .....	40
图 4-8	光电自准直仪分离俯仰或偏摆角误差 .....	40
图 4-9	X、Y、Z 各轴的俯仰、偏摆运动误差曲线 .....	42
图 4-10	垂直轴滚转角误差的检测方法 .....	43
图 4-11	平尺法测量直线度运动误差原理 .....	43
图 4-12	激光准直仪法测量直线度运动误差原理 .....	44
图 4-13	激光干涉仪分离直线度误差原理 .....	44
图 4-14	激光干涉仪分离水平轴直线度误差安装示意图 .....	44
图 4-15	激光干涉仪分离直线度误差原理 .....	45
图 4-16	激光干涉仪分离垂直轴直线度误差安装示意图 .....	45
图 4-17	方箱法测量两轴垂直度误差 .....	46
图 4-18	激光准直仪测量两轴垂直度误差 .....	47
图 4-19	激光干涉仪测量两轴垂直度误差 .....	47
图 4-20	对角线法测量两轴垂直度误差 .....	47
图 4-21	测端等效直径的标定 .....	48
图 5-1	测量机软件主界面 .....	49

图 5-2	软件程序总流程图 .....	50
图 5-3	标准球与方体 .....	51
图 5-4	标准球上触测点位置 .....	51
图 5-5	圆弧插补 .....	53
图 5-6	三轴联动线性插补 .....	53
图 5-7	梯形速度运动模式 .....	54
图 5-8	S-曲线运动模式 .....	54
图 5-9	运动控制工具栏 .....	55
图 5-10	速度参数设置对话框 .....	55
图 5-11	手柄控制菜单 .....	55
图 5-12	测量点云坐标数据存储数据库表 .....	56
图 5-13	分离误差存储数据库表 .....	57
图 5-14	坐标系的平移和旋转 .....	57
图 5-15	测量结果数据处理对话框 .....	58
图 5-16	测量数据参数设置对话框 .....	58
图 5-17	测量结果的显示 .....	59
图 5-18	测量结果存储数据库表 .....	59
图 5-19	两要素之间的距离 .....	62
图 5-20	两要素之间的角度 .....	63
图 5-21	测量路径的三要素 .....	63
图 5-22	直线测量路径 .....	64
图 5-23	外圆弧测量路径 .....	64
图 5-24	内圆弧测量路径 .....	65

## 表 格 清 单

表 2-1	nRF401 的工作模式和控制方式 .....	25
表 3-1	各项几何误差传递系数表 .....	34

# 独创性声明

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，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得合肥工业大学或其他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。

学位论文作者签名：陈宝刚 日期：2007 年12月 11日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解合肥工业大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权合肥工业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、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：陈宝刚 陈宝刚 导师签名：费业泰 费业泰

签字日期：2007年 12 月11日

签字日期：2007年 12 月11日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：中科院长春光学精密机械与物理研究所

电话：

通讯地址：长春经济技术开发区东南湖大路16号

邮编：130033



## 致 谢

本文是在导师费业泰教授的悉心指导下完成的,在此诚挚感谢费老师的亲切关怀和无限帮助。在过去近三年的研究生学习生活中,恩师费业泰教授不论是在学术科研上还是在生活做人方面,都给予了我巨大的帮助和无微不至的关怀,这将是我这一生享用不尽的财富。费老师表现出的严谨的治学态度、精湛的学术水平和高尚的个人情操,将是我终生学习的榜样。

感谢实验室周耀新高工、师兄章立军硕士在课题研究中给予我的关心和指导。感谢实验室王宏涛老师、王会生老师在课题实验中给予的鼎力相助。

硕士论文的最终完成,离不开实验室良好的科研环境和学习氛围。在此,感谢实验室同学汪平平、夏豪杰、罗哉、蒋敏兰、杨洪涛、汤辉、章立军、王春花、徐婷婷、程文涛、李光珂、徐刚、丁邦宙、盛立、范哲光、王晨晨和尚平。感谢我的好友们在硕士期间给予我的鼓励和支持,与他们的友谊不断激励着我前进!

感谢我最亲爱的父母二十多年来对我深切的关怀与无私的付出,论文的完成深深凝聚着父母对我的关爱,在此向他们表示我最衷心的感谢!

陈宝刚

2007年11月

# 第一章 绪 论

## 1.1 三坐标测量机概述

三坐标测量机 (Coordinate Measuring Machining, 简称 CMM) 是 20 世纪 60 年代发展起来的一种新型高效多功能精密测量仪器<sup>[1]</sup>。1960 年, 英国 FERRANTI 公司研制成功世界上第一台三坐标测量机, 到 20 世纪 60 年代末, 已有近十个国家的三十多家公司在生产 CMM, 不过这一时期的 CMM 尚处于初级阶段。进入 20 世纪 80 年代后, 以 ZEISS、LEITZ、DEA、LK、三丰、SIP、FERRANTI、MOORE 等为代表的众多公司不断推出新产品, 使得 CMM 的发展速度加快。我国三坐标测量机的研制开始于七十年代中期, 这些研制单位有北京 303 所、新天光学仪器厂、北京机床研究所、天津大学、上海机床厂等, 以仿制为主由于各种困难, 并没有形成产品; 到 80 年代许多公司转而引进国外的生产许可证生产, 初步形成国内测量机的生产能力; 90 年代在中国形成了两个主要的测量机生产基地: 前哨公司、303 所。目前还有北京立科, 西安爱德华、成都中测量仪等。目前, 我国已具备了生产从精密型测量机到生产型测量机多种型号规格的三坐标测量机生产能力。

三坐标测量机是基于坐标测量的通用化数字测量设备。它首先将各被测几何元素的测量转化为对这些几何元素上一些点集坐标位置的测量, 在测得这些点的坐标位置后, 再根据这些点的空间坐标值, 经过数学运算求出其尺寸和形位误差。

三坐标测量机是典型的机电一体化设备, 其结构形式多种多样, 有移动桥式、固定桥式、龙门式、悬臂式、立柱式等, 主要由机械系统、电气系统和软件系统三大部分组成 (如图 1-1 所示)。主机包括框架结构、标尺系统、导轨、驱动机构、平衡部件、转台与附件等。电气系统包括电气控制系统、计算机硬件部分、测头等, 电气控制系统包括单轴与多轴联动控制、外围设备控制、通信控制、逻辑控制和保护控制等。三坐标测量机的软件系统包括控制软件和数据处理软件。

目前, 三坐标测量机已被广泛应用于机械制造、仪器制造、电子工业、汽车制造和航空工业, 用以测量各种机械零件、模具等的形状尺寸、形位公差以及各种形状的轮廓。随着计算机技术及计算机网络的发展, 三坐标测量机还将成为 CAD/CAM 大型工作站中必不可少的组成部分, 对提高整个生产过程的自动化程度具有重要作用<sup>[2]</sup>。在今后一段时间内, 测量机的

主要发展趋势可以概括为：更高测量精度、更高测量效率、发展探测技术完善测量机配置、采用新材料、运用新技术、发展智能测量机、控制系统更开放、进入制造系统、发展非正交坐标系测量系统以及加强环境问题的研究<sup>[3]</sup>。

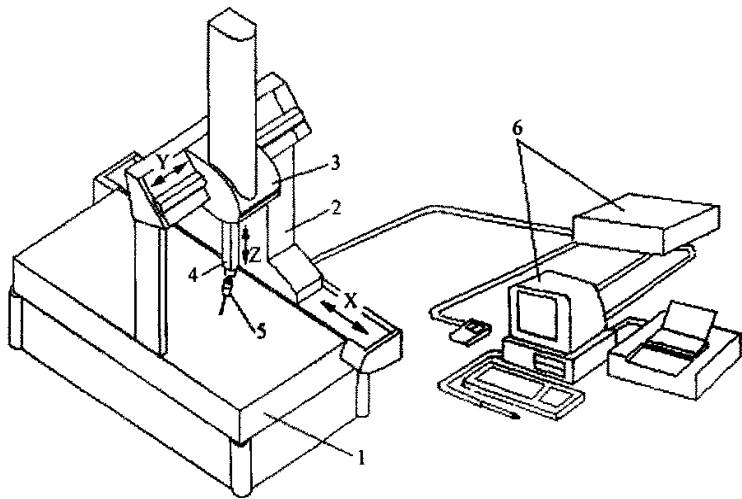


图 1-1 三坐标测量机的典型组成

1—工作台 2—移动桥架 3—中央滑架 4—Z 轴 5—测头 6—电子系统

## 1.2 工字钢结晶器多尺寸自动坐标测量机

### 1.2.1 工字钢铸坯的生产工艺

工字钢也称钢梁，型钢的一种，是截面为工字形的长条钢材。以其优越的性能广泛应用于民用建筑钢结构和工业构筑钢结构中，还在大跨度钢桥构件、机械设备制造、车辆及船舶制造、抗震防火等临时建筑、海上石油平台等上有大量应用。我国主要是马钢、包钢、莱钢、武钢等较少几家钢厂生产<sup>[4]</sup>。

工字钢铸坯的生产工艺如图 1-2 所示，结晶器铜管是炼钢连铸生产中的主要备件，也是磨损件。生产过程中往结晶器外表面和外套之间的空隙里冲入高速循环冷却水，钢包中的钢水浇入结晶器经循环水冷却，钢水温度从上到下，从里到外逐渐降低，在初生坯壳形成的同时，钢水体积冷缩，横向尺寸变小，若结晶器内腔上下尺寸相同，则铸坯与结晶器内壁之间出现气隙，由于气隙热阻大，降低了结晶器的传热效率，由于气隙大小的不均匀性引起导热的不均匀，进而影响到铸坯质量和形状，甚至诱发漏钢<sup>[5]</sup>。

为了降低气隙热阻提高结晶器传热强度主要有两个途径。第一是提高气隙导热系数，具体办法是采用保护渣浇注，使熔融状态下的保护渣液体充入气隙，由于保护渣的导热系数高于空气，相应提高了气隙导热系数。第二是，使气隙最小或等于零，具体办法是设计制造结晶器的内腔尺寸上部比下部大，以补偿钢水冷缩时形成的气隙。

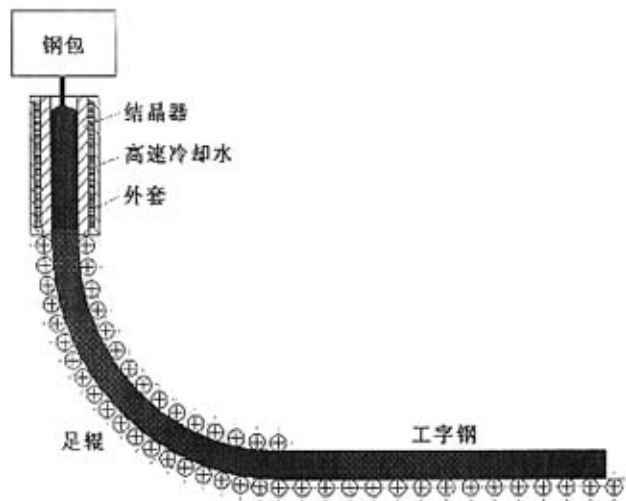


图 1-2 工字钢铸坯的生产工艺图

### 1.2.2 结晶器铜管

结晶器铜管的外观如图 1-3 (a) 所示，图 1-3 (b) 为横截面视图，图 1-3 (c) 为纵截面视图。结晶器是炼钢连铸生产中的主要备件，也是磨损件。为了补偿钢水冷缩时形成的气隙，降低气隙热阻提高结晶器传热强度，其内腔形状复杂<sup>[6]</sup>。理想内腔形状曲线难以用简单函数表示，更谈不上严格按照理想曲线设计制造铜管，但是可以采用工程数学方法求出以简单函数表出的逼近理想曲线的工程曲线解，采用一段一次曲线、两段一次曲线或多段一次曲线作为工程曲线<sup>[7]</sup>。

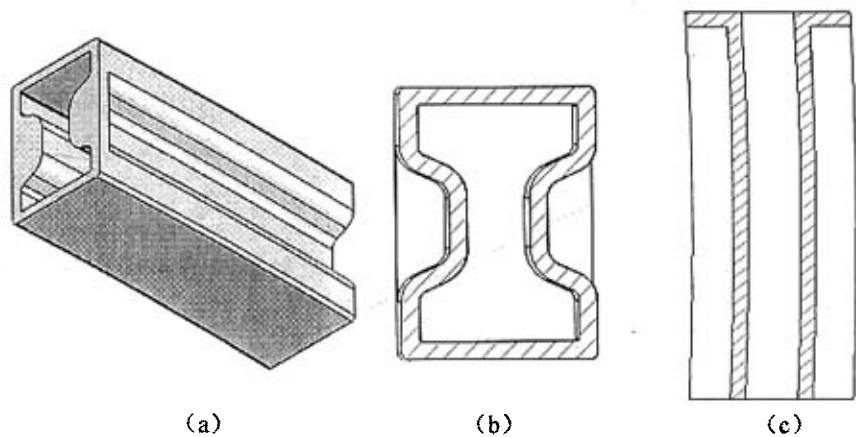


图 1-3 结晶器铜管

结晶器在连铸凝固生产过程中会产生永久变形、热膨胀变形和磨损,这将导致气隙变大和外部冷却水过隙变小,降低了结晶器的传热效率,进而影响到铸坯质量和形状,甚至诱发漏钢。

### 1.2.3 结晶器多尺寸自动坐标测量机

由于结晶器的内外尺寸变化会对炼钢连铸生产产生重大影响,不仅影响到铸坯的质量和形状,甚至还会诱发漏钢,造成重大安全事故,故需要对结晶器的内外尺寸进行高精度、高效率测量以便进行生产质量控制。

鉴于结晶器的不同型号规格和形状尺寸的特殊性,目前市场上现有的测量仪器不能满足测量要求,马钢公司第三钢轧总厂委托我校现代精度工程研究中心研制连铸结晶器内外尺寸自动坐标测量机(图 1-4 所示)。该测量机主机采用 L 桥式结构,能够满足对结晶器大深宽比内腔尺寸的检测;采用可靠性好的传动及导向机构,测量机具有较强的抗干扰能力,能够满足工厂现场恶劣环境下的使用要求。

根据结晶器的外形尺寸,该测量机设计测量范围:  $900 \times 600 \times 900$  (单位: mm)。企业要求设计测量精度: 各轴向测量误差  $\pm 50\mu\text{m}$ 。

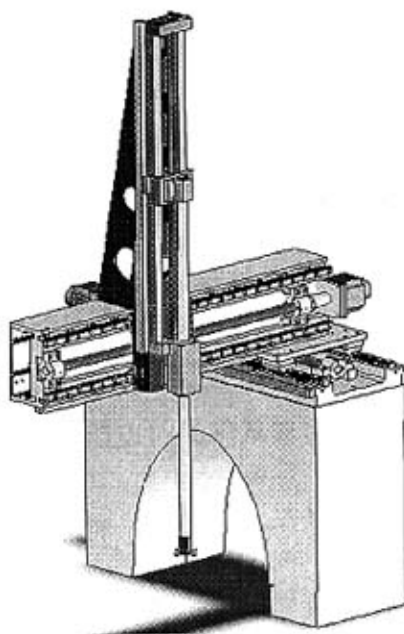


图 1-4 测量机外观结构

## 1.3 课题来源和研究意义

本课题项目名称: 可移动多维坐标结晶器内外尺寸自动测量机的研制。委托方为马鞍山钢铁股份有限公司第三钢轧总厂。

马鞍山钢铁有限公司是我国最大的型钢生产基地之一。工字钢是横截面为工字型的长条钢材,广泛应用于大跨度钢桥构件、机械设备制造、车辆及船舶制造、抗震防火等临时建筑、海上石油平台等民用建筑钢结构和工业构筑钢结构中。工字钢结晶器是工字钢连铸生产中的重要备件,也是

主要磨损件，其内外尺寸变化会对炼钢连铸生产产生重大影响，不仅影响到铸坯的质量和形状，甚至还会诱发漏钢，造成重大安全事故，因此，应对结晶器的内外尺寸进行检测，从而保证产品质量。而目前国内各钢铁公司大都采用标准量具如游标卡尺对结晶器进行手工测量，只能测得有限几个尺寸，不仅精度低，而且测量结果并不能完全描述结晶器内外尺寸变化情况；市场上的三坐标测量机价格昂贵，对环境的要求都比较高，而且不能满足结晶器内外特殊形状尺寸的测量要求，因此设计了该测量机，采用普通机械结构设计，普通加工精度，应用现代精度理论保证一般环境下使用的测量精度。本测量机配备相应的自动测量控制软件，实现对结晶器内外尺寸的自动检测，不仅减小人为因素误差的影响，保证了测量精度，也大大提高了测量效率和操作人员的劳动强度。

在国际化、自动化趋势的冲击下，加速推动工业自动化以促成产业升级，创造高附加价值并提高国际竞争力是国内各企业的当务之急。该测量机的设计采用普通结构和普通加工精度，满足一般环境下的精度要求，降低了企业成本。测量控制软件的友好人机界面和智能化提高了企业的生产效率。对提高企业的市场竞争力具有重要意义<sup>[8]</sup>。

## 1.4 本课题的主要研究内容

(1) 测量机的结构设计，包括测量机的主体结构及其主要组成部件的选型和设计。

(2) 设计手动测量控制器，实现对测头三维多级运动的平稳控制，方便测量采样，提高测量精度和效率。

(3) 分析影响测量机测量精度的各项误差，并应用齐次坐标转换理论建立 21 项几何误差修正的数学模型。对测量机的测量不确定度进行评定，找出影响测量精度的瓶颈因素。对影响精度较大的各项误差进行修正，通过软件的方法提高仪器的测量精度。

(4) 应用双频激光干涉仪，自准直仪，激光跟踪仪等高精度仪器对三坐标的 21 项几何误差进行分离。

(5) 在 Visual C++6.0 环境下编写软件实现测头的三维运动控制，采样路径的规划设计，各轴移动坐标的数据采集，数据库的读写，采集数据的误差修正，坐标系的转换，测量数据的处理，结果的显示和输出等。

## 第二章 结晶器多维坐标尺寸自动测量机的总体设计

### 2.1 测量机的总体设计方案

工字钢结晶器是该测量机的测量对象，其内外尺寸形状特殊，图 2-1(a) 是其横截面视图，图 2-1(b) 是其纵截面视图。结晶器有大小不同的 4 种型号，为了满足测量要求，测量机的测量范围设计为  $900 \times 600 \times 900$  (单位: mm)。

该测量机采用三维正交直角坐标系，主要由测量机主机、测头、电气控制柜、手动控制器、计算机软件系统等几大部分组成 (如图 2-2 所示)。

测量机主机包括框架结构、驱动系统、测量系统、导轨、平衡结构等，框架结构是测量机的主体机械结构，由基座、X 滑座、Y 滑座、Z 立柱、测杆等组成。驱动系统采用交流伺服电机配合精密滚珠丝杠副传动。测量机的测量系统采用高精度光栅尺。X、Y 导轨采用四方向等载荷型滚动直线导轨副，摩擦阻力小，定位精度高，便于安装维护；为了减小 Z 立柱的重量和便于装配，Z 向导轨采用圆柱直线导轨。平衡结构包括两部分，一部分采用配重块通过滑轮给测杆配重，使测杆上下运动更加平稳灵活；另一部分配重为了减小 Y 轴悬臂对 X 向导轨产生的扭曲。

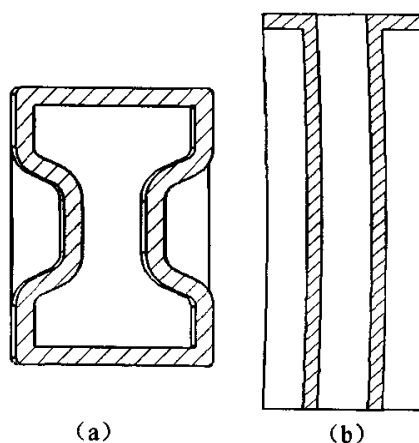


图 2-1 结晶器铜管截面

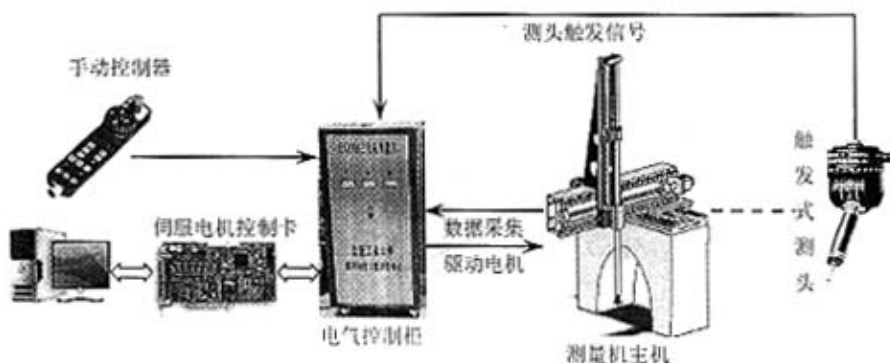


图 2-2 测量机系统组成

测头采用 TESA 公司生产的电触式触发测头 TESASTAR, 该测头配合星型连接座和不同的探针, 可检测多种不同元素。

电气控制柜里面包括变压稳压器、交流伺服电机驱动器、光栅数据采集系统和信号转接板等。交流伺服电机驱动器在计算机控制下驱动电机转动, 光栅数据采集系统在测头触发中断信号的激励下采集光栅尺的数据, 完成运动控制和 3 轴坐标的数据采集功能。

手动控制器实现对测头三维多级运动的平稳控制, 方便测量采样, 提高测量精度和效率。

测量机的软件包括运动控制部分、数据采集部分、测量数据处理部分、误差修正部分、坐标系的转换、数据库的读写、测量结果的显示和打印输出等。软件是在 Visual C++ 6.0 环境下编写, 结合伺服电机运动控制卡的 2 次函数库开发编写了运动控制软件部分。

## 2.2 测量机的测量原理

### 2.2.1 坐标测量原理

多维坐标结晶器内外尺寸自动测量机是基于坐标测量的通用化数字测量设备, 属于三维正交测量系统, 采用精密滚珠丝杠作传动系统, 高精度光栅尺作测量系统, 通过触发式测头对结晶器内外表面进行检测。它首先将各被测几何元素的测量转化为对这些几何元素上一些点集坐标位置的测量, 在测得这些点的坐标位置后, 再根据这些点的空间坐标值, 经过数学运算求出其尺寸和形位误差。如图 2-3 所示, 要测量工件上一圆柱孔的直径, 可以在垂直于孔轴线的截面 I 内, 触测内孔壁上三个点 (点 1、2、3), 则根据这三点的坐标值就可计算出孔的直径及圆心坐标 OI; 如果在该截面内触测更多的点 (点 1, 2, ..., n, n 为测点数), 则可根据最小二乘法或最小条件法计算出该截面圆的圆度误差; 如果对多个垂直于孔轴线的截面圆 (I, II, ..., m, m 为测量的截面圆数) 进行测量, 则根据测得点的坐标值可计算出孔的圆柱度误差以及各截面圆的圆心坐标, 再根据各圆心坐标值又可计算出孔轴线位置; 如果再在孔端面 A 上触测三点, 则可计算出孔轴线对端面的位置度误差。由此可见, CMM 的这一工作原理使得其具有很大的通用性与柔性<sup>[1]</sup>。从原理上说, 它可以测量任何工件的任何几何元素的任何参数。



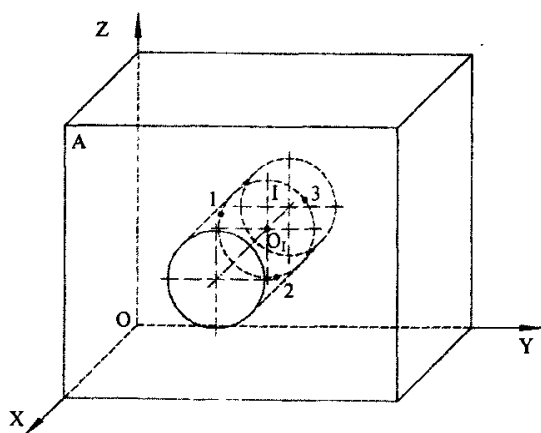


图 2-3 坐标测量原理

## 2.2.2 点位测量过程

测量机在测量过程中，首先以触测速度逼近被测工件表面，当接触工件表面，达到测头的触发条件测头产生触发信号，然后以后退速度离开被测工件表面，回退到安全距离完成一个测量点的测量，如图 2-4 所示。数据采集时序如图 2-5 所示，3 个光栅尺的数据采集系统接受到触发信号的瞬间，同时锁存 3 个光栅尺的计数信号，然后电机驱动器自动控制电机反转，使测头离开被测工件表面。数据采集系统再通知计算机，计算机接收到数据采集系统的中断请求后，马上进入相应的中断处理程序，读取 3 个光栅尺的计数信号，经过数据处理后转化成坐标值后存储到数据库。

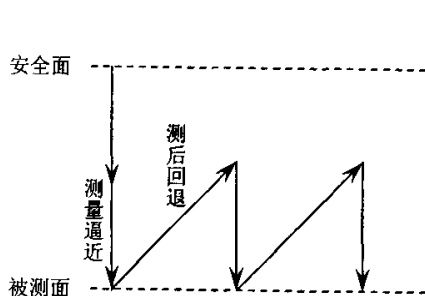


图 2-4 点位测量示意图

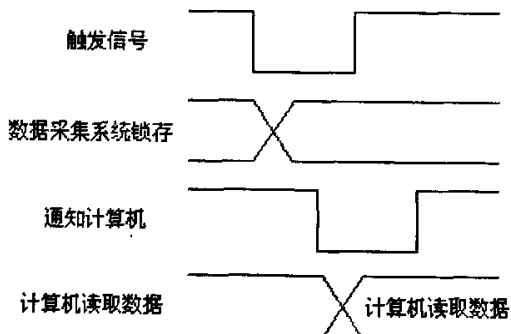


图 2-5 数据采集时序图

## 2.3 测量机主机结构

测量机的主机结构如图 2-6 所示，X 向工作台、Y 向工作台和 Z 轴立柱呈下、中、上三层分布。Y 向悬臂工作台和 X 轴滑座装配固定在一起，

在 X 轴交流伺服电机和 X 向滚珠丝杠组成的传动系统的驱动下,可以沿着 X 向工作台上的滚珠直线导轨移动,从而实现 X 向的进给运动;同理, Z 轴立柱和 Y 向滑块装配固定在一起,在 Y 轴交流伺服电机和 Y 向滚珠丝杠组成的传动系统的驱动下,可以沿着 Y 向工作台上的滚珠直线导轨移动,实现 Y 向的进给运动;测杆和 Z 向滑块装配固定在一起,在 Z 向交流伺服电机和 Z 向滚珠丝杠组成的传动系统的驱动下,可以实现 Z 向的进给运动;因此,测杆随 Z 向滑块实现 X、Y、Z 三轴的移动,最终实现测杆带动测头在空间作三维运动。由于该测量机采用悬臂式结构,Y 向工作台也就是悬臂,为了抵消悬臂梁在重力作用下产生对 X 向工作台的扭转力矩,同时也为了防止 X 向导轨受扭曲导向精度降低,根据力矩平衡原理,在悬臂的另一端配置相应的平衡重块,以产生相反的扭转力矩。

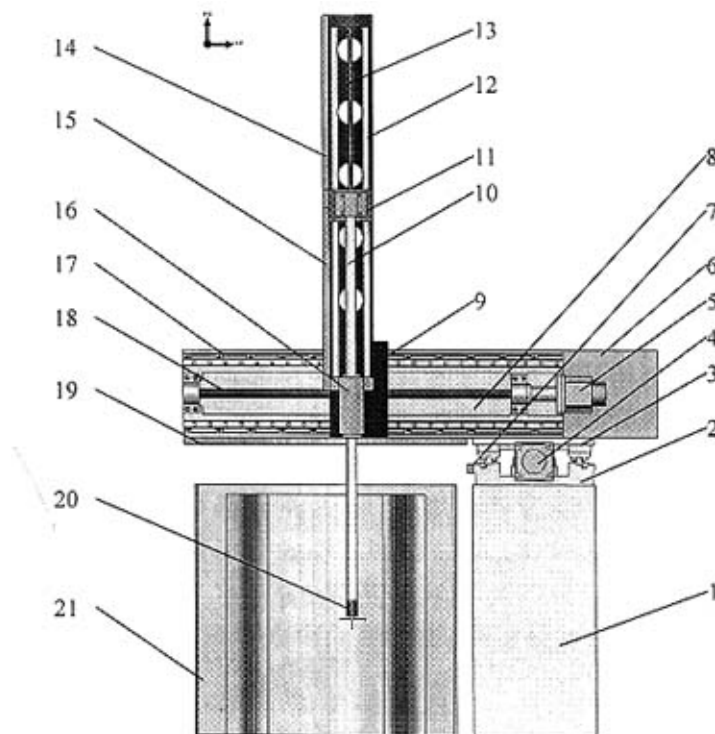


图 2-6 测量机主体结构

- 1、基座 2、X 向工作台 3、X 向滑块 4、X 向伺服电机 5、Y 向伺服电机 6、配重  
7、X 向光栅尺 8、Y 向悬臂工作台 9、Y 向滑块 10、测杆 11、Z 向滑块 12、圆柱直线导轨  
13、Z 轴滚珠丝杠 14、Z 向立柱 15、Z 向光栅尺 16、直线轴承 17、滚珠直线导轨  
18、Y 轴滚珠丝杠 19、Y 向光栅尺 20、测头 21、结晶器

### 2.3.1 驱动系统

本测量机用于一般现场环境中测量,要求传动系统和测量系统具有较

高精度的同时，也必须具备较强的抗干扰能力，以满足一般现场恶劣的环境条件，因此本测量机三轴传动系统均采用丝杠副进行传动，它是精密机械中常用的一种传动形式，其主要作用是将旋转运动变为直线运动。

滑动丝杠螺母传动结构简单、传动平稳、精确，适于微远东，且能够自锁，起到了定位作用，其缺点是摩擦阻力大，螺纹间有侧向间隙，反向时存在空回误差，使用中要有消除间隙装置。而滚珠螺旋传动和静压螺旋传动则克服了滑动螺旋传动的缺点，但是静压螺旋传动需一套供油系统，结构复杂。因此在本测量机的设计中 XYZ 三方向均采用滚珠丝杠螺旋传动（如图 2-7 所示），滚珠螺旋传动是在丝杠和螺母滚道之间放入适量的滚珠，使螺纹间产生滚动摩擦。丝杠转动时，带动滚珠沿螺纹滚道滚动。螺母上设有返向器，与螺纹滚道构成滚珠的循环通道。为了在滚珠与滚道之间形成无间隙甚至有预紧配合，可设置预紧装置。为延长工作寿命，可设置润滑件和密封件。

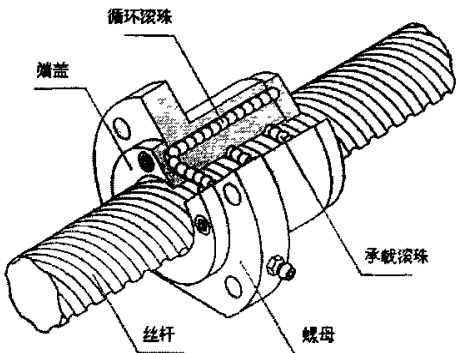


图 2-7 滚珠丝杠的结构

滚珠螺旋传动与滑动螺旋传动或其它直线运动副相比，具有传动效率高，运动平稳，工作寿命长，定位精度和重复定位精度高，同步性好，可靠性高，不能自锁，制造工艺复杂等特点<sup>[9]</sup>。

丝杠的轴承组合及轴承座、螺母座以及其它零件的连接刚性，对滚珠丝杠副传动系统的刚度和精度都有很大影响，本文滚珠丝杠的安装采用图 2-8 所示的方式，丝杠的一端为固定支承，另一端为游动支承。固定支承为一对角接触球轴承，承受双向轴向载荷；而游动支承选用深沟球轴承<sup>[10]</sup>。

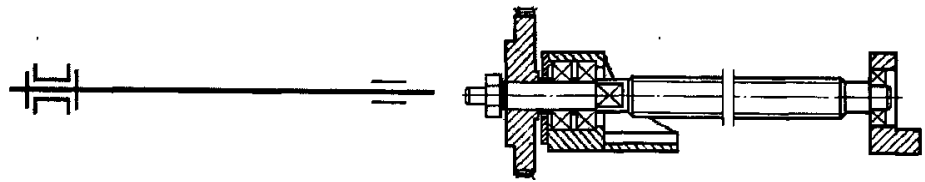


图 2-8 滚珠丝杠的安装

滚珠丝杠副除了对本身单一方向的传动精度有要求外，对其轴向间隙也有严格要求，以减小空回误差保证其反向传动精度。滚珠丝杠副的轴向间隙是承载时在滚珠与滚道型面接触点的弹性变形所引起的螺母位移量和螺母原有间隙的总和。通常采用双螺母预紧或单螺母（大滚珠、大导程）

的方法，把弹性变形控制在最小限度内，以减小或消除轴向间隙，并可以提高滚珠丝杠副的刚度。目前制造的单螺母式滚珠丝杠副的轴向间隙达0.05mm，而双螺母式的经加预紧力调整后基本上能消除轴向间隙<sup>[11-15]</sup>（原理如图 2-9 所示）。

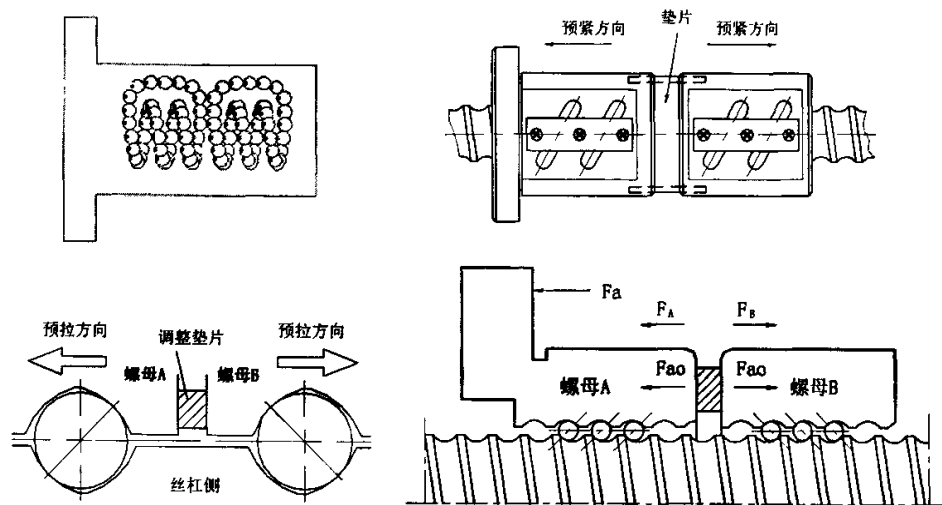


图 2-9 双螺母滚珠丝杠副轴向间隙的调整和预紧原理

在本测量机采用南京工艺装备厂生产的 FFZD 型内循环垫片预紧螺母式滚珠丝杠副，丝杠达到二级精度。以滚珠丝杠作为传动系统的一维运动平台如图 2-10 所示。

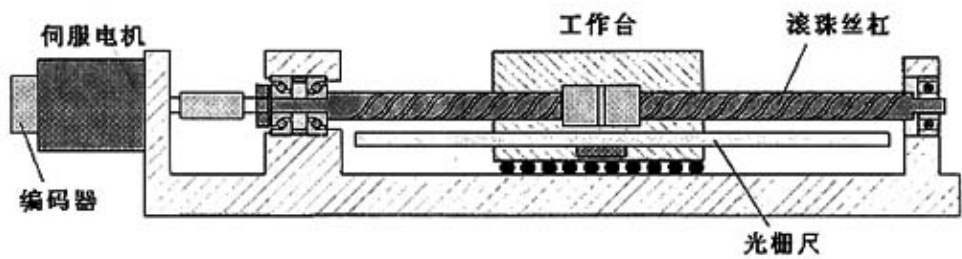


图 2-10 一维运动平台安装示意图

### 2.3.2 测量系统（标尺系统）

本文采用光栅尺作为测量机三轴的测量系统，光栅是一种新型的位移检测元件，是一种将机械位移或模拟量转变为数字脉冲的测量装置。它的特点是测量精确度高（可达 $\pm 1\mu\text{m}$ ）、响应速度快、量程范围大、可进行非接触测量等。其易于实现数字测量和自动控制，广泛用于数控机床和精密测量中。

光栅位移传感器<sup>[16]</sup>的结构如图 2-11 所示。它主要由标尺光栅、指示光栅、光电器件和光源等组成。通常，指示光栅和被测物体相连，随被测物体的直线运动而产生位移。一般标尺光栅和指示光栅的刻线密度是相同的，而刻线之间的距离  $W$  称为栅距。光栅条纹密度一般为每毫米 50、100、250 条等。

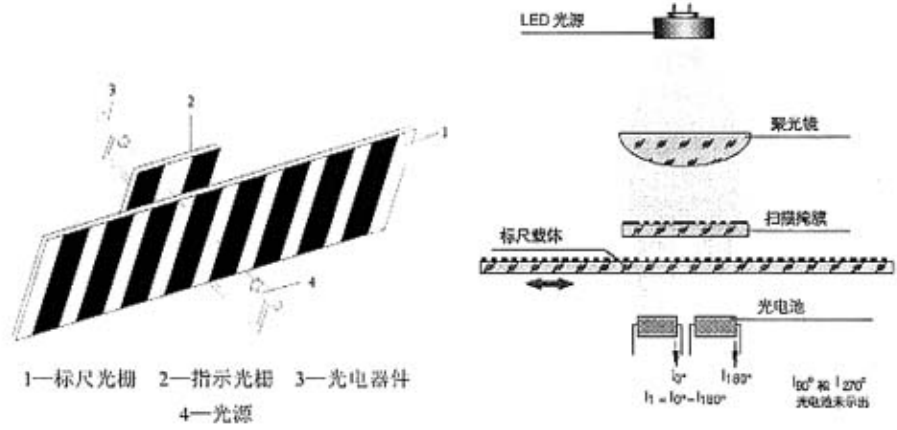


图 2-11 光栅位移传感器的结构原理

如果把两块栅距  $W$  相等的光栅平行安装，且让它们的刻痕之间有较小的夹角  $\theta$  时，这时光栅上会出现若干条明暗相间的条纹，这种条纹称莫尔条纹，它们沿着与光栅条纹几乎垂直的方向排列，如图 2-12 所示。莫尔条纹是光栅非重合部分光线透过而形成的亮带，它由一系列四棱形图案组成，如图中的  $d-d$  线区所示。 $f-f$  线区则是由于光栅的遮光效应形成的。

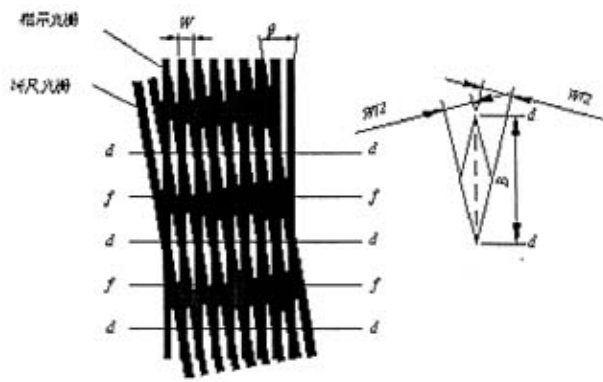


图 2-12 莫尔条纹

莫尔条纹具有如下特点<sup>[17]</sup>：

1. 莫尔条纹的位移与光栅的移动成比例。
2. 莫尔条纹具有位移放大作用。
3. 莫尔条纹具有平均光栅误差的作用。

通过光电元件，可将莫尔条纹移动时光强的变化转换为近似正弦变化

的电信号，将此电压信号放大、整形变换为方波，经微分转换为脉冲信号，再经辨向电路和可逆计数器计数，则可用数字形式显示出位移量，位移量等于脉冲与栅距乘积。测量分辨率等于栅距。

本文采用的直线光栅位移传感器内部结构及外形如图 2-13 所示。

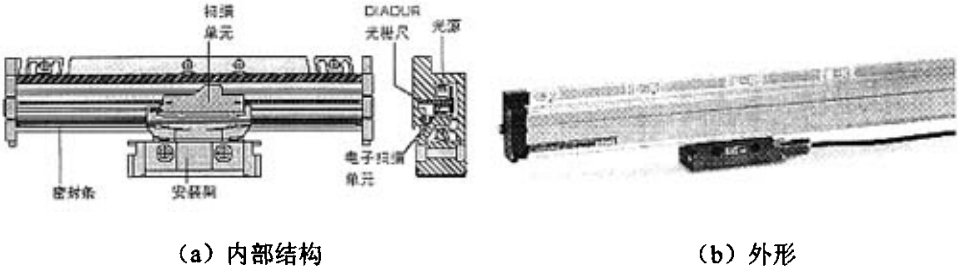


图 2-13 直线光栅位移传感器

### 2.3.3 导轨

在三坐标测量机的设计中，导轨部件是最重要的部件之一。导轨部件由运动件和承导件组成。导轨部件的功能是不仅能可靠地承受外加载荷，而更主要的是保证运动件的定位及运动精度，以及与有关部件的相互位置精度，这对于三坐标测量机非常重要，其性能好坏，将直接影响到测量机的精度、承载能力和使用寿命。导轨设计应满足：导向精度高、刚度大、耐磨性好、精度保持性好、运动轻便而平稳、低速时无爬行现象、结构简单、工艺性好、便于调整间隙、具有良好的润滑和防护等要求<sup>[14]</sup>。

直线滚动导轨副是在滑块与导轨之间放入适当的钢球，使滑块与导轨之间的滑动摩擦变为滚动摩擦，大大降低运动的摩擦阻力。

综合各方面的因素考虑，该设计中测量机的导轨选用南京工艺装配厂生产的 GGB25AA 四方向等载荷型直线滚珠导轨副。导轨结构如图 2-14 所示，各轴运动工作台导轨的配置如图 2-15 (a) 所示，导轨副的固定方式如图 2-15 (b) 所示。

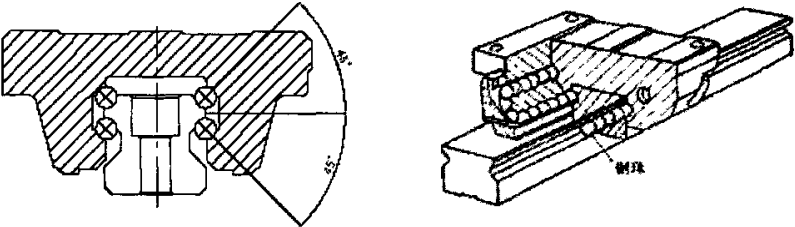


图 2-14 直线滚珠导轨结构

本测量机要求工作台具有较高的灵敏度，即驱动力或输入位移的微小

变化就能使工作台产生位移，对导轨的定位精度和重复定位精度要求较高。由于滚动直线导轨副的特殊结构，使其具有垂直向上、向下和左右水平四方向额定载荷相等，且额定载荷大，刚性好，刚度高，三个方向抗颠覆力矩能力大，而且定位精度较高，能满足测量机的使用要求。

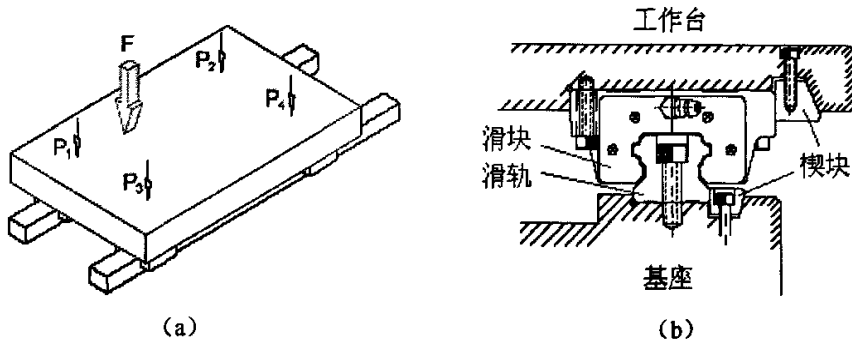


图 2-15 直线滚珠导轨的配置及固定方式

### 2.3.4 平衡机构

测量机在运动过程中，如果导轨受力不均匀或过大的扭矩，使得滚珠导轨部分滚珠受力过大，不但大大减小导轨的使用寿命，而且使得导轨传动不平稳，降低运动精度和灵敏度，产生震动<sup>[13]</sup>。如图 2-16 所示，X 向导轨受力明显不均匀，X 向导轨运动过程中受到顺时针方向的扭矩，而且 Z 向滑块在上下传动过程中对丝杠转矩要求大不一样，造成传动不平稳。

为了抵消悬臂梁对 X 向导轨的扭矩，本文设计中采用如图 2-16 (a) 所示的配重平衡结构，配重块和悬臂梁刚性连接，平衡悬臂梁对 X 向导轨造成的转矩，使 X 向导轨受力均匀；为了使测杆上下运动平稳，本文设计中采用如图 2-16 (b) 所示的配重平衡结构，配重块通过钢丝绳绕过滑轮与测杆连接，平衡 Z 向滑座和测杆的重力，减小 Z 向丝杠传动力矩，使 Z 向运动平稳、灵活、更加容易实现精确控制。采用重力平衡结构，可以起到很好的平衡效果，但是增加了机体的重量。

## 2.4 电气系统

测量机的电气系统包括交流伺服电机（带角度编码器）、伺服电机驱动器、伺服电机控制卡、光栅直线位移传感器、光栅信号计数器卡、测头及其它处理电路等。电气系统是测量机的“神经中枢”，在计算机软件程序的控制下实现运动控制、触发采样、光栅信号数据采集<sup>[18]</sup>。测量机的电

气原理图如图 2-17 所示。

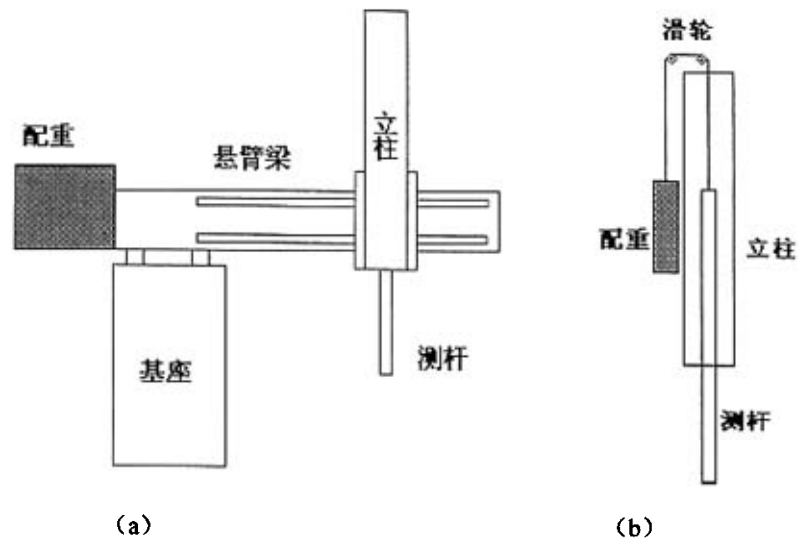


图 2-16 测量机平衡结构示意图

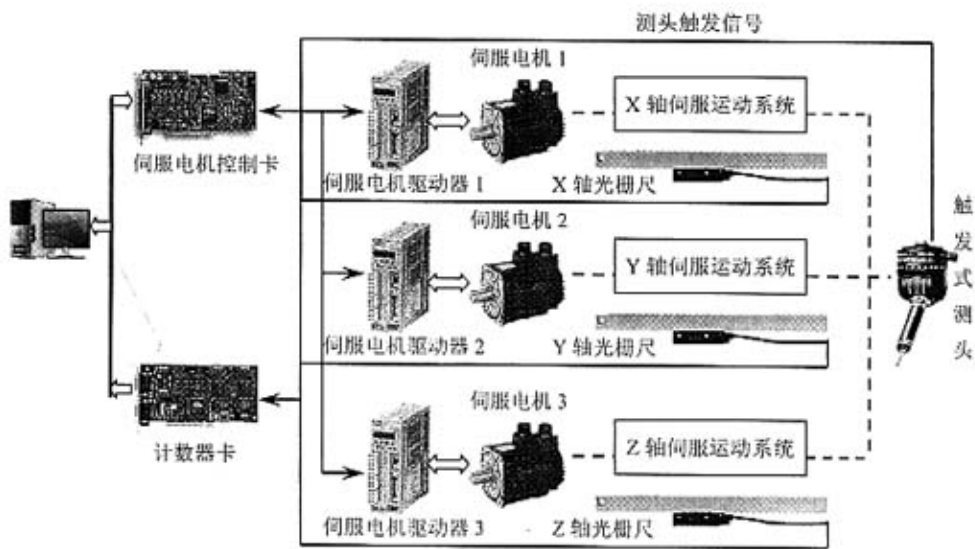


图 2-17 测量机电气原理图

测量过程中，用户通过工控机上的软件界面对运动控制卡进行设置，运动控制卡经过处理发出控制信号给电机驱动器，驱动器再控制伺服电机旋转，通过 3 轴的伺服运动系统带动测头运动，触发测头到达测量位置发出触发信号通过计数器卡传到计算机，同时计数器卡瞬间同步锁存光栅位移传感器的信号，然后计算机读取计数器卡锁存的计数器值，再通过变换把计数值转换为坐标值，存储到点云坐标数据库，完成一个点位测量过程。



### 2.4.1 交流伺服电机

在三坐标测量机中，需要对被控对象实现高精度的位置控制，而实现精确位置控制的一个基本条件是需要有高精度的执行机构。当脉冲当量和进给速度都要求太高时，传统的步进电机或直流伺服电机将面临一系列问题，且实现起来难度大，成本较高。而近些年兴起的交流伺服电机传动技术却能以较低的成本获取极高的位置控制精度。交流伺服电机本身结构简单，坚固耐用，体积小，重量轻，没有机械换向，易维护。在 AC 伺服电机轴上通常带有角度编码器，假如编码器每运动一周能产生  $N$  个输出脉冲，那么，电机转子的转角  $\theta$  和输出脉冲  $n$  之间的关系为：

$$n = \frac{N}{2\pi} \theta$$

式中， $\theta$  单位为弧度

因此，AC 伺服电机的角位移可由编码器的输出脉冲来表示，通过对脉冲个数做加减运算，即可以控制电机的转角位移。

该测量机采用松下 MINAS A 系列中惯量交流伺服电机（如图 2-18 所示），交流伺服电机驱动器与伺服电机配合使用，电机上配置了 2500 脉冲/转的增量式角度编码器，经过四细分电路，达到 10000 脉冲/转，为高精度的测量控制提供了保障。



图 2-18 松下交流伺服电机和驱动器

### 2.4.2 伺服电机运动控制卡

伺服电机运动控制卡是实现测量机运动控制的“枢纽”，它是一种基于 PC 机及工业 PC 机，用于各种运动控制场合（包括位移、速度、加速度等）的上位控制单元<sup>[19]</sup>。控制卡的使用充分发挥了 PC 机的强大功能。

运动控制卡通常采用专业运动控制芯片或高速 DSP 作为运动控制核心，大多用于控制步进电机或伺服电机。一般地，运动控制卡与 PC 机构成主从式控制结构：PC 机负责人机交互界面的管理和控制系统的实时监控等方面的工作（例如键盘和鼠标的管理、系统状态的显示、运动轨迹规划、控制指令的发送、外部信号的监控等等）；控制卡完成运动控制的所有细节（包括脉冲和方向信号的输出、自动升降速的处理、原点和限位等信号的检测等等）。运动控制卡都配有开放的函数库供用户在 DOS 或 Windows 系统平台下自行开发、构造所需的控制系统。因而这种结构开放

的运动控制卡能够广泛地应用于制造业中设备自动化的各个领域。

本文控制系统采用台湾凌华的 PCI-8164 运动控制卡<sup>[23]</sup>（如图 2-19 所示）。本卡为四轴运动控制卡，半长卡，具有圆弧插补、直线插补功能，可同时驱动步进与伺服系统。可实现单轴运行或四轴三联动、任意两轴联动插补控制，并由硬件实现机械装置的超限保护。只要把输出信号接至驱动器，现场限位信号接入插头，即可实现三轴/双轴/单轴系统联动插补控制及超限保护，为用户二次开发软件提供了极大方便，适于开发三坐标/两坐标钻铣床、雕刻机、小型实验台等精确定位控制系统。



图 2-19 凌华 PCI-8164 运动控制卡

PCI-8164 的内部电路原理框图如图 2-20 所示，运动控制卡自身是一个独立模块，它有自己的处理器、地址和数据总线，自己的存储和通信部件，不依赖于系统 CPU 工作。PCI-8164 通过一个双向 RAM 与计算机交换信息，保证了控制的实时性和数据传输与管理的可靠性。以 ASIC 芯片 PCL6045 为核心，经过 FPGA 再通过 PCI 总线控制器与 PCI 总线进行通信，同时 FPGZ 还与一个板载 FIFO 连接，实现自身精确的快速位置比较和触发功能。控制卡具有很强的运算能力，可以根据简单的位置或速度指令进行运动全过程各项指标的计算，从而实现精确的轨迹和位置控制要求。

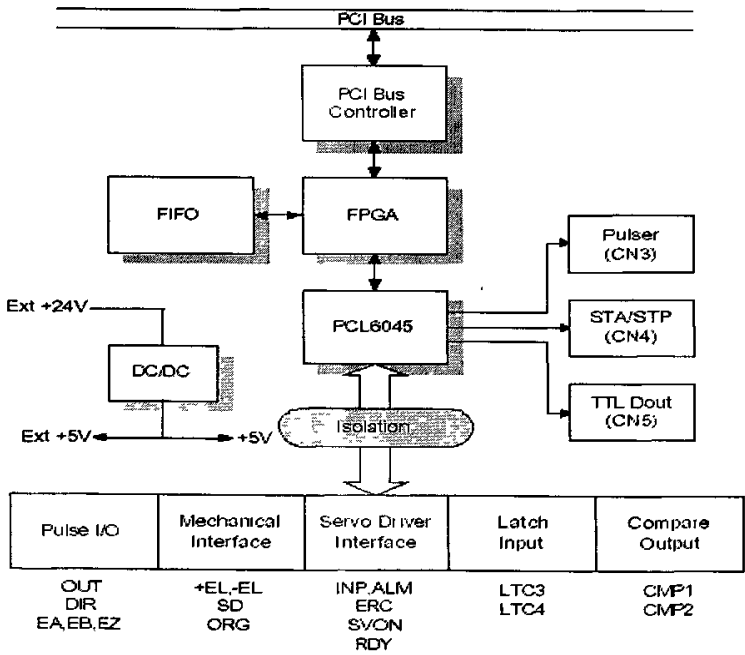


图 2-20 PCI-8164 内部结构原理图

### 2.4.3 光栅信号采集计数器卡

本文采用研华公司的 PCL-833 三轴正交编码计数器卡（如图 2-21 所示）实现光栅直线位移传感器的数据采集，PCL-833 三轴正交编码器主要由 24 位可逆计数器、8259A 中断控制器、地址译码器、可编程时基发生器、计数器模式控制器及采样频率可变的四阶数字滤波器构成。而且具有单端共地与差分输入两种信号接入方式，增强了对测量环境的适应能力，减少信号失真，提高被测信号质量。图 2-22 为 PCL-833 的内部结构及信号输入示意图。测量时，用户可根据数据量、实时性要求灵活选用软件查询、中断或 D M A 等测量数据传送方式。该模块具有很强的可编程性，它的大多数初始化参数及工作参数都可由软件编程进行设置，使用简单方便。

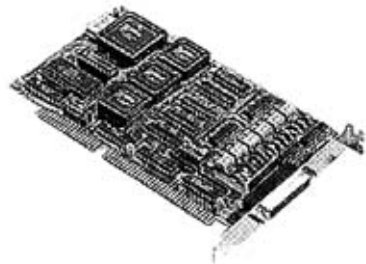


图 2-21 研华 PCL-833 计数器卡

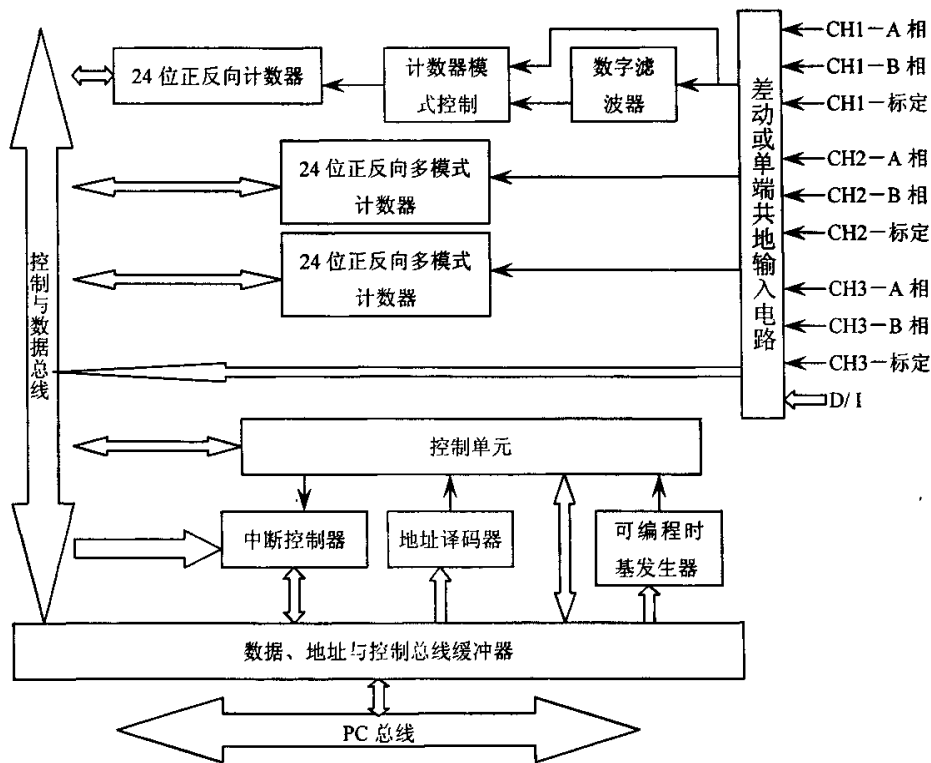


图 2-22 PCL-833 内部结构及信号输入示意图

PCL-833 三轴正交编码计数器卡最大正交输入频率为 1.0MHZ，最大

脉冲输入频率为 4.0MHZ，采用 4 级滤波器，高速光电隔离器，可以对高频率信号精确进行计数。计数器卡的输入信号如图 2-23 所示，A、B 相信号为光栅位移传感器输出信号，标定信号为连接角度编码器时用来对旋转圈数计数，该设计中此信号接各轴的零位传感器。

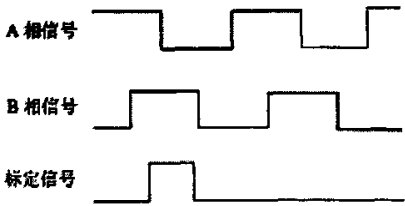


图 2-23 计数卡输入信号示意图

### 2.4.4 测头系统

测头是三坐标测量机的关键组成部分，测头触测精度的高低直接影响测量机的测量精度。它可以在三个方向上感受瞄准信号和微小位移，以实现瞄准与测微两种功能。测量机的测头主要有硬测头、电气测头、光学测头等。测头有接触式和非接触式之分。三坐标测头的两大基本功能是测微（即测出与给定的标准坐标值的偏差量）和触发瞄准并过零发讯。

#### 2.4.4.1 测头的分类

##### 1. 机械接触式测头

机械接触式测头为刚性测头，根据其触测部位的形状，可以分为圆锥形测头、圆柱形测头、球形测头、半圆形测头、点测头、V 型块测头等（如图 2-24 所示）。这类测头的形状简单，制造容易，但是测量力的大小取决于操作者的经验和技能，因此测量精度差、效率低。目前除少数手动测量机还采用此种测头外，绝大多数测量机已不再使用这类测头。

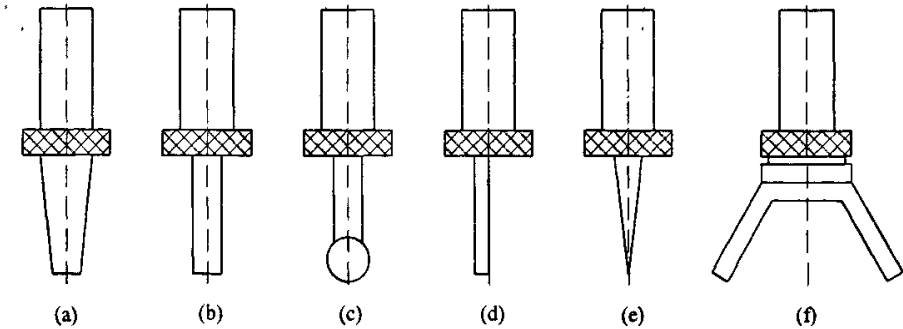


图 2-24 机械接触式测头

(a) 圆锥形测头 (b) 圆柱形测头 (c) 球形测头 (d) 半圆形测头 (e) 点测头 (f) V 型块测头

## 2. 电气接触式测头

电气接触式测头目前已为绝大部分坐标测量机所采用，按其工作原理可分为动态测头和静态测头。

### (1) 动态测头

常用动态测头的结构如图 2-25 所示。测杆安装在芯体上，而芯体则通过三个沿圆周  $120^\circ$  分布的钢球安放在三对触点上，当测杆没有受到测量力时，芯体上的钢球与三对触点均保持接触，当测杆的球状端部与工件接触时，不论受到 X、Y、Z 哪个方向的接触力，至少会引起一个钢球与触点脱离接触，从而引起电路的断开，产生阶跃信号，直接或通过计算机控制采样电路，将沿三个轴方向的坐标数据送至存储器，供数据处理用。

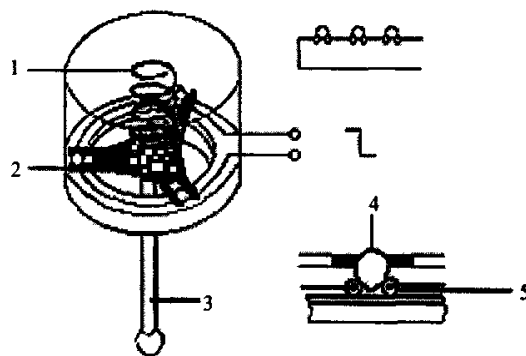


图 2-25 电气式动态测头

1、弹簧 2、芯体 3、测杆 4、钢球 5、触点

可见，测头是在触测工件表面的运动过程中，瞬间进行测量采样的，故称为动态测头，也称为触发式测头。动态测头结构简单、成本低，可用于高速测量，但精度稍低，而且动态测头不能以接触状态停留在工件表面，因而只能对工件表面作离散的逐点测量，不能作连续的扫描测量。

### (2) 静态测头

静态测头除具备触发式测头的触发采样功能外，还相当于一台超小型三坐标测量机。测头中有三维几何量传感器，在测头与工件表面接触时，在 X、Y、Z 三个方向均有相应的位移量输出，从而驱动伺服系统进行自动调整，使测头停在规定的位移量上，在测头接近静止的状态下采集三维坐标数据，故称为静态测头。静态测头沿工件表面移动时，可始终保持接触状态，进行扫描测量，因而也称为扫描测头。其主要特点是精度高，可以作连续扫描，但制造技术难度大，采样速度慢，价格昂贵，适合于高精度测量机使用。目前由 LEITZ、ZEISS 和 KERRY 等厂家生产的静态测头均采用电感式位移传感器，此时也将静态测头称为三向电感测头。图 2-26 为 ZEISS 公司生产的双片簧层叠式三维电感测头的结构。

测头采用三层片簧导轨形式，三个方向共有三层，每层由两个片簧悬吊。在每一层导轨中各设置有三个部件：①锁紧机构：如图 2-26b 所示。②位移传感器：用以测量位移量的大小，如图 2-26c 所示。③阻尼机构：用以减小高分辨率测量时外界振动的影响，如图 2-26d。

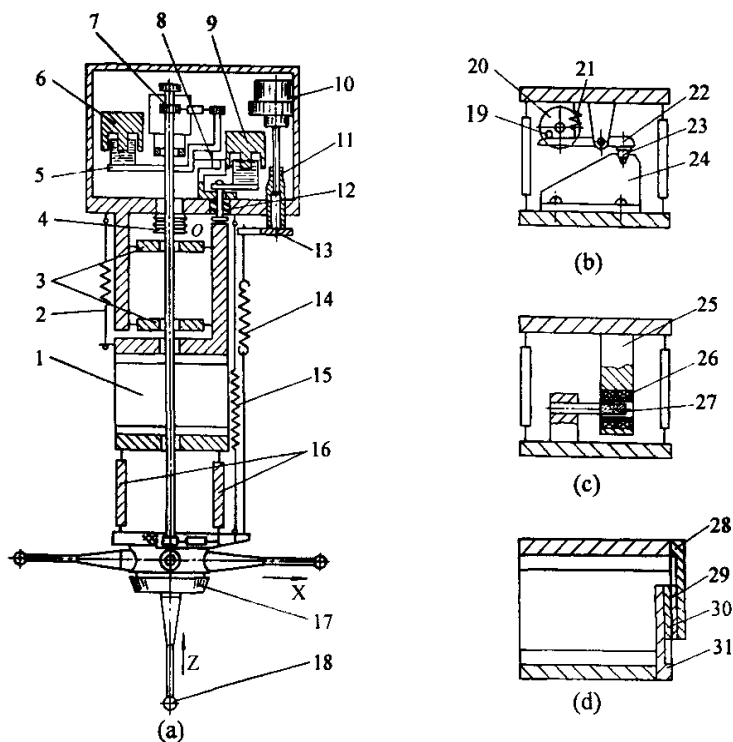


图 2-26 加力式三向电感测头

(a)总体结构 (b)锁紧机构 (c)位移传感器 (d)阻尼机构

1、Y 向片簧 2、平衡弹簧 3、Z 向片簧 4、波纹管 5、杠杆 6、电磁铁  
7、中间传力杆 8、十字片簧 9、电磁铁 10、平衡力调节微电机 11、平衡力调节  
螺杆 12、顶杆 13、平衡力调节螺母套 14、平衡弹簧 15、平衡弹簧 16、X 向片  
簧 17、转接座 18、测杆 19、拔销 20、电机 21、弹簧 22、杠杆 23、锁紧钢球  
24、定位块 25、线圈支架 26、线圈 27、磁芯 28、上阻尼支架 29、阻尼片  
30、阻尼片 31、下阻尼支架

### (3) 光学测头

在多数情况下，光学测头与被测物体没有机械接触，这种非接触式测量具有一些突出优点，主要体现在：1) 由于不存在测量力，因而适合于测量各种软的和薄的工件；2) 由于是非接触测量，可以对工件表面进行快速扫描测量；3) 多数光学测头具有比较大的量程，这是一般接触式测头难以达到的；4) 可以探测工件上一般机械测头难以探测到的部位。近年来，光学测头发展较快，目前在坐标测量机上应用的光学测头的种类也较多，如三角法测头、激光聚集测头、光纤测头、体视式三维测头、接触式光栅测头等。下面简要介绍一下三角法测头的工作原理。

如图 2-27 所示，由激光器 2 发出的光，经聚光镜 3 形成很细的平行光束，照射到被测工件 4 上（工件表面反射回来的光可能是镜面反射光，也

可能是漫反射光，三角法测头是利用漫反射光进行探测的)，其漫反射回来的光经成像镜 5 在光电检测器 1 上成像。照明光轴与成像光轴间有一夹角，称为三角成像角。当被测表面处于不同位置时，漫反射光斑按照一定三角关系成像于光电检测器件的不同位置，从而探测出被测表面的位置。这种测头的突出优点是工作距离大，在离工件表面很远的地方（如 40mm~100mm）也可对工件进行测量，且测头的测量范围也较大（如 $\pm 5\text{mm} \sim \pm 10\text{mm}$ ）。不过三角法测头的测量精度不是很高，其测量不确定度大致在几十至几百微米左右。

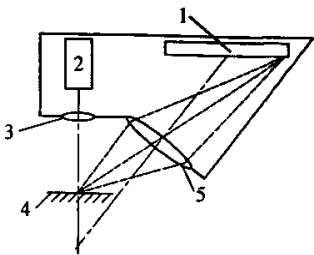


图 2-27 激光非接触式测头工作原理  
1、光电检测器 2、激光器 3、聚光镜  
4、工件 5、成像镜

### 2.4.4.2 测头附件

测头附件是指那些与测头相连接、扩大其功能、提高测量效率的零部件。包括测端与探针、连接器、加长杆、测头回转体等。

最常用的测端为球形测端，红宝石是最常见的测球材料，因为红宝石耐磨损，密度小，并具有优异的耐压强度和抗碰撞性。

探针通常指可更换的测杆。探针对测量能力、测量精度有很大影响，在选择探针时，应使探针在满足测量要求的前提下尽量短，探针直径必须比测端直径小，在不发生干涉的条件下，应尽量增大探针直径。当测量深孔时，需要使用加长杆以使探针达到要求的长度。如图 2-28 所示为探针和测端。

星型测头可用于检测多种不同的元素。使用多探针测头可以有效降低检测时间。减少在测量诸如边缘或凹槽等内部特征时移动测头到极限点的需要。可以使用星型测头在 Z 方向进行有效的检查，这是由于探针可以探测到探针体的直径范围外侧。星型探针上的每个探针都要求校准，和单探针校准方式一样。

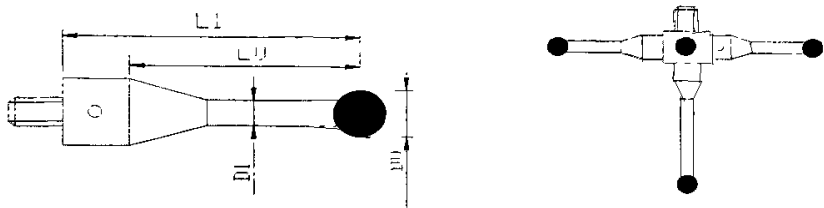


图 2-28 测端、探针及星型测头

### 2.4.4.3 TESASTAR 测头

根据工字钢内腔尺寸的测量要求, 本文采用瑞士 TESA 公司生产的触发式测头—TESASTAR 测头。其预紧力范围是 0.1—0.3N, 用直径 2.5mm 的六角形扳手进行调整, 在沿垂直方向向下测量时, 如果预紧力为 0.11N, 使用 21mm 的测杆, 测端速度为 480mm/min, 该测头可实现 0.32 $\mu$ m 的重复精度。

触发式测头内部相当于一个开关, 测头的内部结构如图 2-29 所示, 图 2-30 为测头的电气原理图。测头在未触发状态下, 该开关是闭合的, 因此与非门(DM74LS00N)输出为高电平。当测头发生触测时, 开关断开, 则与非门输出一个下降沿的信号给单片机的  $\overline{INT0}$  脚, 单片机立即执行中断处理程序, 从 P1.0 引脚输出一个低电平脉冲信号, 给计数器卡的数字输入接口, 为了消除测头抖动造成的重复采样, 单片机执行延时 2 秒的延时程序屏蔽抖动信号。计数器卡接收到这个信号后, 立即同步锁存 3 个计数器的计数值, 然后计算机程序转入测量的中断服务程序, 并同时停止测头的进给然后迅速回退至安全距离, 则测头预紧力消失, 脱离触发状态, 然后计算机调用计数器读取程序, 并把转换后的 3 轴坐标值存入点云坐标数据库。在中断服务程序中主要完成: 获取各坐标轴的坐标值并保存至数据库, 同时在软件界面中实时显示坐标值, 另外还要控制电机运动, 把测头退回到安全位置。

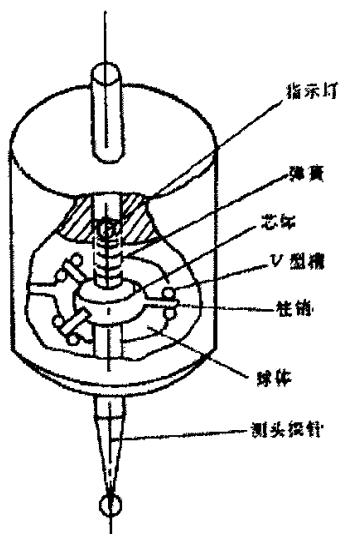


图 2-29 测头内部结构图

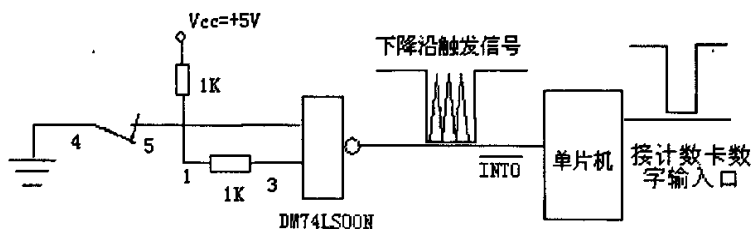


图 2-30 测头电气原理图

## 2.5 测量机手动控制器

测量机在执行自动测量程序对结晶器进行自动测量之前, 要对测量机



进行示教以规划测量路径，故测量机必须能够使用手动控制器进行三轴运动的控制。本文设计的控制器（如图 2-31 所示）能够对测量机三轴运动进行控制，而且运行速度和加速度都可调节，保证测量机的平稳运动。

### 2.5.1 手动控制器的硬件结构设计

该手动控制器的硬件结构原理如图 2-32 所示，控制器基于无线数据传输技术，通过单片机采集控制按钮的扫描码，由无线收发芯片 nRF401 发射出去，与电脑相连的无线收发芯片 nRF401 经过 MAX232 芯片的电平转换把接受到的数据通过串口传给电脑，电脑通过伺服电机的运动控制卡控制测量机三轴电机的运动，实现三轴运动的控制。

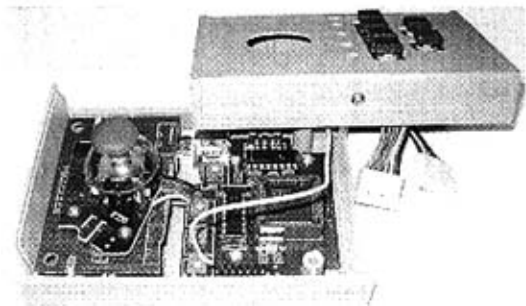


图 2-31 测量机手动控制器

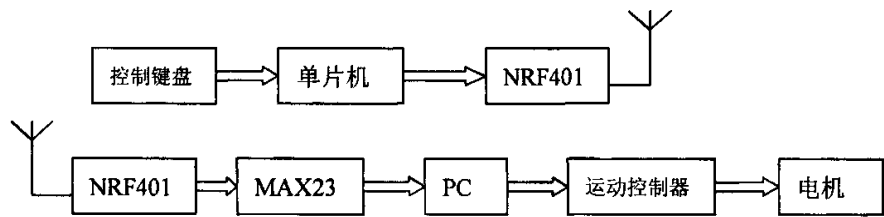


图 2-32 手动控制器工作原理

nRF401 是挪威 Nordic 公司新推出的一种集发射和接收为一体的无线数传芯片，它在一个 20 脚的芯片中包括了高频发射、高频接收、PLL 合成、FSK 调制、FSK 解调、多频道切换等功能，工作在 433 MHz 频率上，采用了移频键控进行调制解调，能够以 20 Kb / s 的比特率进行无线数据传输。nRF401 集成度高，工作频率稳定可靠，外围元件少，功耗极低，适合于便携式及手持产品的设计。由于采用了低发射功率和高接收灵敏度的设计，因而可满足无线电管制要求，无需申请许可证，是目前低功率无线数传的理想选择。

nRF401 的典型应用如图 2-33 所示。1 脚和 20 脚接一个 4MHz 的晶振；4 脚接一个单端二阶滤波器，5，6 脚外接一个 VCO 电感，共同保证 4 脚电压为  $1.1 \pm 0.2\text{V}$ ；电阻 R3 可以调节发射功率，其值为 22k $\Omega$  时，功率最大。电感的中心到 VCO1 与 VCO2 焊盘中心的距离应该是 5.4mm。

nRF401 作为发射端时，数字信号由 9 脚输入，经过 nRF401 内置锁相环的调制，送至功放放大后，经环形天线发射出去。作为接收端时，天线接收到信号，由 nRF401 的内置低噪声放大器放大，经锁相环解调后，从 10 脚输出。

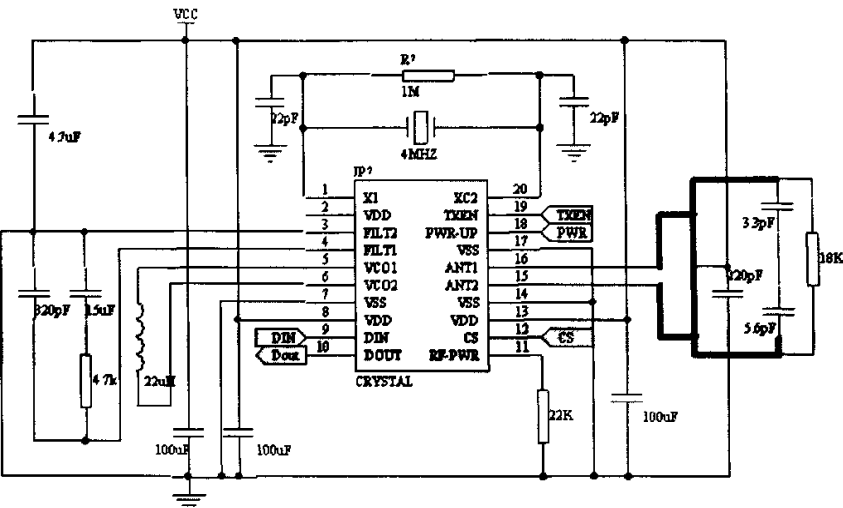


图 2-33 nRF401 芯片的典型应用

nRF401 有三种工作模式：收模式、发模式和等待模式。在等待模式下，系统的功耗可以达到很小的值。两个通信信道分别为 433. 92 MHz 和 434. 33 MHz. nRF401 的工作模式可由 3 个引脚设定，分别是 TXEN, CS 和 PWR UP. 因此可通过单片机控制 nRF401 的工作模式，使其处于接收、发射、等待任一种状态，实现双工通信。由于无线通信的外部条件较为恶劣，对系统的要求比较高，单片机以其可靠的稳定性能够满足要求。表 2-1 为 nRF401 的工作模式与控制方式。

表 2-1 nRF401 的工作模式和控制方式

输入			响应	
TXEN	CS	PWR	信道	模式
0	0	1	1	接收
0	1	1	2	接收
1	0	1	1	发送
1	1	1	2	发送
X	X	0	X	等待

NRF401 芯片配置成接收模式通过 RS232 芯片电平转换直接与 PC 机串口连接，PC 机接收到手柄发送的控制命令，然后通过伺服电机的运动控制器控制电机运动。图 2-34 为接收机的电气原理图。

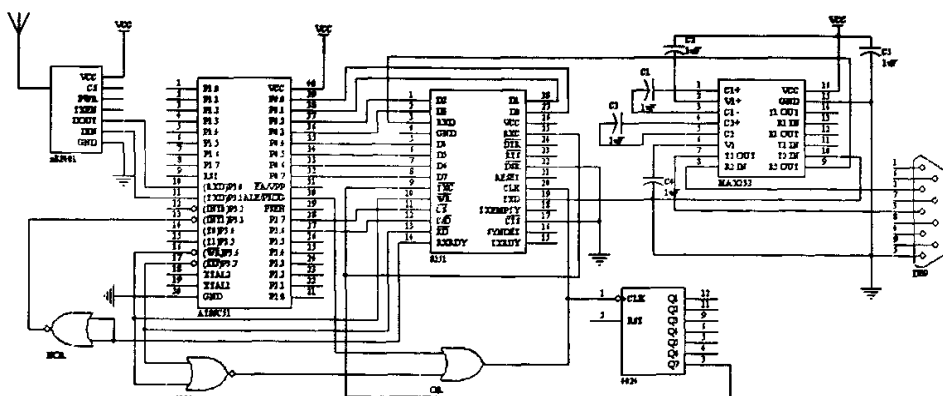


图 2-34 接收机的电气原理图

## 2.5.2 手动控制器的软件程序设计

手动控制器的软件程序框图如图 2-35 所示，单片机复位重启后要不断的向计算机发送联机码，计算机接收到联机码后向控制器发送验证码，单片机接受到正确的验证码后进入工作状态，首先循环扫描控制器按钮键盘的扫描码判断是否有键按下，扫描到有键按下则要进行软件去抖程序，确实有键按下则把键盘扫描码通过无线收发芯片把扫描码发射出去送给计算机。

计算机端的无线收发芯片接收到控制器发送的扫描码，经过电平转换把扫描码通过串口传送给计算机，计算机对扫描码经过处理判断，然后通过程序控制各轴伺服电机作出相应的运动。

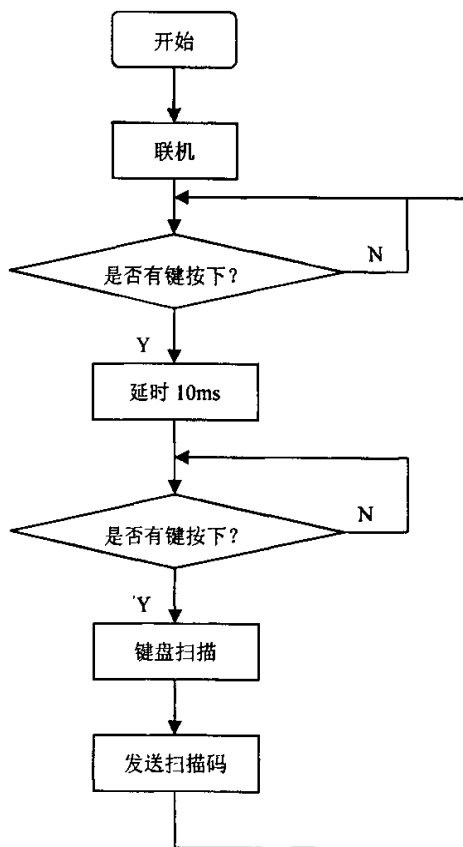


图 2-35 控制器的软件程序框图

### 第三章 测量机的误差修正模型

误差分离与修正技术是现代精度理论的重要组成部分，它通过预先检测出仪器的系统误差，然后采用软件程序修正这些误差对测量精度的影响，使仪器的精度明显提高<sup>[21-24]</sup>。但该技术要求仪器系统的结构稳定性好（即保证分离误差的重复性好），误差检测仪器精度高和正确建立误差修正的数学模型。误差分离与修正技术促进了传统设计观念的革新，从注重各零部件的加工制造精度转移到提高系统结构的稳定性，误差检测的高精度和误差修正数学模型的理论研究，即可以一般的加工精度，较低的成本来保证仪器的精度，具有重要的实用价值。

本设计即采用误差分离与修正技术来保证测量精度，首先对影响测量机测量精度的各项误差源进行了详细分析，结合本项目的精度要求，对影响精度较大的各项误差进行分离，应用齐次坐标理论建立测量机误差修正的数学模型。并对测量机的不确定度进行分析，从理论上验证了该方法的可行性。

#### 3.1 测量机误差源分析

结晶器多维尺寸自动测量机是光机电一体化的大型复杂测量系统，测量机的测量值与被测量的真值之差称为测量机的测量误差，影响测量机测量精度的因素很多，测量机产生测量误差的主要原因包括测量机本身的误差（如测量机机构误差、测头误差、软件误差等）和与测量条件相关联的各种因素（如测量方法、动态误差、力变形与环境条件）引起的误差。该测量机各误差源分析如图 3-1 所示。

##### 3.1.1 几何误差

该测量机属于正交坐标系，正交坐标系测量机有 3 根名义上互相垂直的轴线，有 3 个运动部件沿这 3 条轴线运动，实现测头的空间运动，其空间运动的位移量可以通过 3 根轴上的标尺读出。由于测量机存在机构的加工制造与装配误差，各个运动部件的实际位移偏离它的名义值，这一误差常称为几何误差。对于单一坐标轴，测头在空间运动中表现出定位、直线度和转角共 6 项误差，如图 3-2 所示，因此测头在沿 3 个坐标轴做空间运

动中共有 18 项误差，同时 3 个坐标轴相互之间还存在 3 项垂直度误差，所以该坐标测量机共存在 21 项几何误差。为了能具体表达各项几何误差源，我们把每种误差源都记做沿该轴轴向位移的函数。

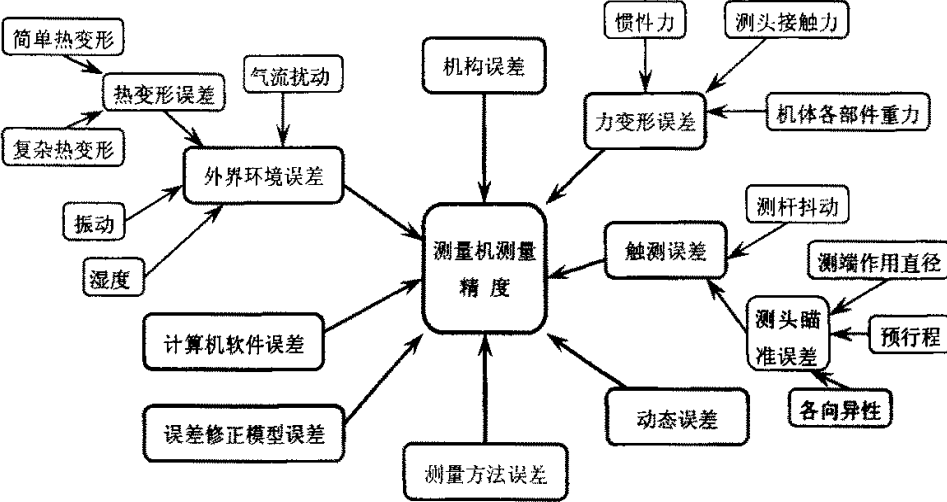


图 3-1 测量机误差源分析

$\Delta_x(x)$ 、 $\Delta_y(y)$ 、 $\Delta_z(z)$ ——分别为沿 X、Y、Z 轴运动的定位误差函数

$\delta_y(x)$ 、 $\delta_z(x)$ ——为沿 X 轴运动的 Y 向和 Z 向直线度误差函数

$\alpha(x)$ 、 $\beta(x)$ 、 $\gamma(x)$ ——分别为沿 X 轴运动的滚转、俯仰、偏摆误差函数

$\delta_x(y)$ 、 $\delta_z(y)$ ——为沿 Y 轴运动的 X 向和 Z 向直线度误差函数

$\alpha(y)$ 、 $\beta(y)$ 、 $\gamma(y)$ ——分别为沿 Y 轴运动的滚转、俯仰、偏摆误差函数

$\delta_x(z)$ 、 $\delta_y(z)$ ——为沿 Z 轴运动的 X 向和 Y 向直线度误差函数

$\alpha(z)$ 、 $\beta(z)$ 、 $\gamma(z)$ ——分别为沿 Z 轴运动的滚转、俯仰、偏摆误差函数

另外 3 轴相互之间还存在 3 个垂直度误差—— $\theta_{xy}$ 、 $\theta_{yz}$ 、 $\theta_{zx}$ 。

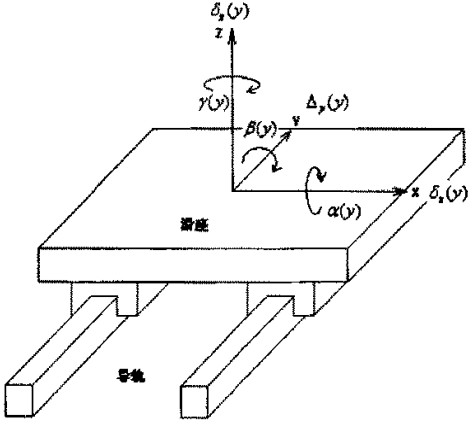


图 3-2 Y 轴导轨产生的 6 项几何误差

### 3.1.2 触测误差

触测误差是影响测量机测量精度的重要因素。

该测量机中采用的是触发式测头，触发式测头去探测工件时，当测端接触到被测工件时，测头内部至少有一个圆柱体与它相对应的钢球脱离接触，发出采样信号，这就是瞄准。触发式测头只起到瞄准的作用。

测头受力情况如图 3-3 所示，由于测头座的上方有压力弹簧，只有当测量力产生的力矩大于弹簧产生的力矩时，测杆与测头座才能绕钢球转动。在测量力的作用下，测杆产生一定变形，也就是说，当测端接触到被测工件，并继续走过一段行程后，才会发出采样信号。这一行程称为测头触发的预行程。由于内部存在种种摩擦力，弹簧的作用力与作用半径也可能发生一些变化，所有这些因素都会引起预行程的变化，从而引起瞄准误差。圆柱与钢球脱离过程中电阻的变化也有一个过程，形成一定时间滞后，而测头仍还运动，这也影响预行程，从而产生瞄准误差。

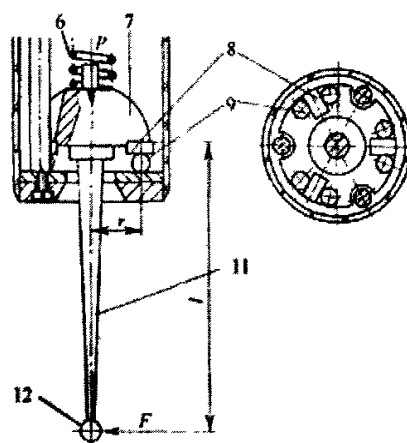


图 3-3 触发测头受力情况

测量工件时，测头从不同的方向对工件进行触测，测杆变形的影响是互相叠加的，在实践中，常利用尺寸已知的标准球或方体，通过标定的方法求得测端的作用直径  $d$ 。但是利用这种方法对测端直径补偿时，由于测力的变化仍然会引起测量误差。另外，测杆的变形是随着测杆长度而变化的。还需谈及的是测端的接触变形，它不仅与测量力有关，而且与被测表面的曲率半径和弹性模量有关，当被测工件与标定物的曲率半径和弹性模量不同时就会产生测量误差。这些都是由测端作用直径带来的触测误差。

测头从不同方向去探测同一工件参数时，所得测量结果不同，这就是测头的各向异性。它的形成原因只要是从不同方向探测工件，测端的作用半径不同。而作用半径的不同主要由于从不同方向去探测时测头发触发信号时的测量力不同，如图 3-4 所示，从而由它引起的测杆变形不同。

由于该设计中，连接测头的测杆的特殊结构，使得触测过程中测杆末端产生抖动（如图 3-5 所示），它直接导致测头产生瞄准误差。而且它是随机的，不能通过软件的方法修正，只能在结构设计上避免过大的抖动。

### 3.1.3 力变形误差

在实际测量机中，力变形是不可避免的，主要影响因素有：

测量机各个部件相对运动时，它们的重力作用的变化使构件变形发生变化；

测头及其附件的变更引起的变形的变化；

测量力引起的变形；

测量机构件热变形引起的热应力而产生的力变形；

加速度产生的惯性力引起的变形。

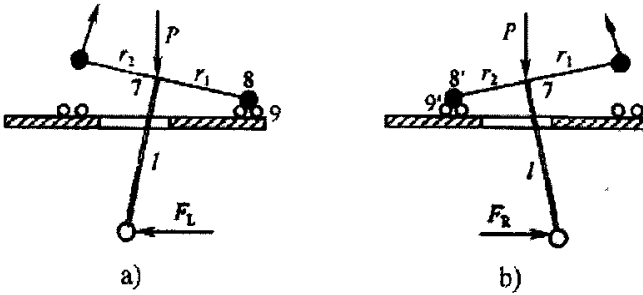


图 3-4 触发测头测量力的各向异性

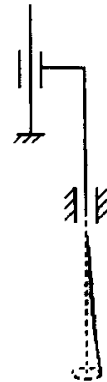


图 3-5 测杆末端抖动

### 3.1.4 动态误差

测量机在不同速度下对同一被测参数进行触测，所得的结果是不一样的，这就是测量机的动态误差。对测量机动态误差的研究远不如静态误差那么深入，原因是长期以来，人们一直认为测量机工作在准静态状况下，动态误差较小，可忽略不计。现代制造业的发展对测量机提出了更高的速度和精度要求，高速测量已经成为坐标测量机的一个发展趋势。但是随着测量速度的提高测量精度也随之降低，因为动态误差所产生的影响已不容忽视，原来的静态模型不再适用<sup>[38]</sup>。

动变形与动位移误差的影响与由几何原因形成的运动误差影响相同。

## 3.2 误差修正的数学模型

误差修正技术促进了坐标测量机设计思想的革新，可使仪器设计的更合理、制造更方便、造价更低、精度更高。但只有在一定条件下使用，才能充分发挥其作用。这些条件概括如下：

1) 具有合适的数学模型。没有合适的数学模型，或数学模型建立的不准确，误差不能得到有效的修正，难以得到理想的修正结果。目前，测量机中最广泛应用的是几何误差的修正。

- 2) 预修正误差必须是系统误差，并且在总误差源中占主要成分。
- 3) 要具有较好的长期稳定性，如果误差数据经常变化也使得误差修正没有意义。
- 4) 误差检测费用少，必须经济合算。

### 3.2.1 齐次坐标变化矩阵

我们把测量模型看作是多杆件串连的小角度转动的多级关节结构，应用齐次坐标理论建立测量机的测量模型<sup>[25]</sup>。

刚体上某一点的总位移可以看作是刚体的角位移和刚体上参考点的线位移这两个基本位移的矢量和，在研究空间机构的姿态中利用齐次坐标变换矩阵这一数学工具非常简单方便<sup>[26]</sup>。如图 3-6 所示，固定坐标系  $oxyz$  经过平移旋转变换后得到一新的坐标系  $o'x'y'z'$ ，新坐标系的原点在原坐标系中的坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ ，新坐标系绕原坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴旋转的角度分别为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 。

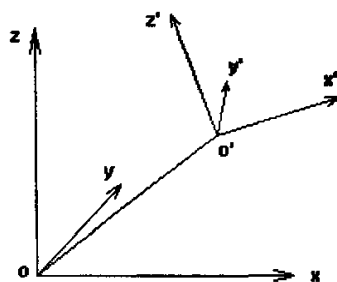


图 3-6 齐次坐标变换的示意图

三维空间的齐次变换矩阵（包括平移和旋转）是一个  $4 \times 4$  矩阵，基本形式为  $T$ ：

$$T = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & x' \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & y' \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & z' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

其中  $C_{3 \times 3}$  矩阵为  $o'x'y'z'$  坐标系相对于  $oxyz$  坐标系的方向余旋矩阵， $(x_0, y_0, z_0)$  即为  $\overrightarrow{oo'}$  的位移矢量。

坐标系相对于原坐标系平移  $x_0, y_0, z_0$  的平移齐次变换矩阵为  $H$ ：

$$H = \text{Trans}(x_0, y_0, z_0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

坐标系分别绕三轴旋转  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  角度的旋转齐次变换矩阵为  $R$ ：



$$R = Rot(x, \alpha) \cdot Rot(y, \beta) \cdot Rot(z, \gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

为了书写方便把  $\cos \alpha$  简写为  $c\alpha$ ， $\sin \alpha$  简写为  $s\alpha$ ，其它同理。如果旋转的角度非常小，那么  $\cos \alpha$  可近似为 1， $\sin \alpha$  可近似为  $\alpha$ ，两项以上的正弦值乘积近似为 0。所以上述旋转变换矩阵  $R$  可写作：

$$Rot(x, \alpha) \cdot Rot(y, \beta) \cdot Rot(z, \gamma) = \begin{pmatrix} c\beta \cdot c\gamma & -c\beta \cdot s\gamma & s\beta & 0 \\ s\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma + c\alpha \cdot s\gamma & -s\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma + c\alpha \cdot c\gamma & -s\alpha \cdot c\beta & 0 \\ -c\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma + s\alpha \cdot s\gamma & c\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma + s\alpha \cdot c\gamma & c\alpha \cdot c\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\gamma & \beta & 0 \\ \gamma & 1 & -\alpha & 0 \\ -\beta & \alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

### 3.2.2 测量机的测量模型

首先假设测量机各部件为刚体，部件之间的角度误差相对很小，并且为了简化计算，只考虑误差的一次项。

我们把测量模型看作

是多杆件串连的小角度转动的多级关节结构<sup>[25]</sup>，如图 3-7 所示：其中  $o_0$  为  $y$  轴的零位， $o_1$  为  $x$  轴的零位， $o_2$  为  $z$  轴的零位， $(x_1, y_1, z_1)$  为  $x$  轴的零位在底座参考坐标系  $o_0 x_0 y_0 z_0$  中的坐标， $(x_2, y_2, z_2)$  为  $z$  轴的零位在坐标系  $o_1 x_1 y_1 z_1$  中的坐标， $(x_3, y_3, z_3)$  为测头中心在坐标系  $o_2 x_2 y_2 z_2$  中的坐标， $(x_p, y_p, z_p)$  为测头中心在底座参考坐标系  $o_0 x_0 y_0 z_0$  中的坐标。为了

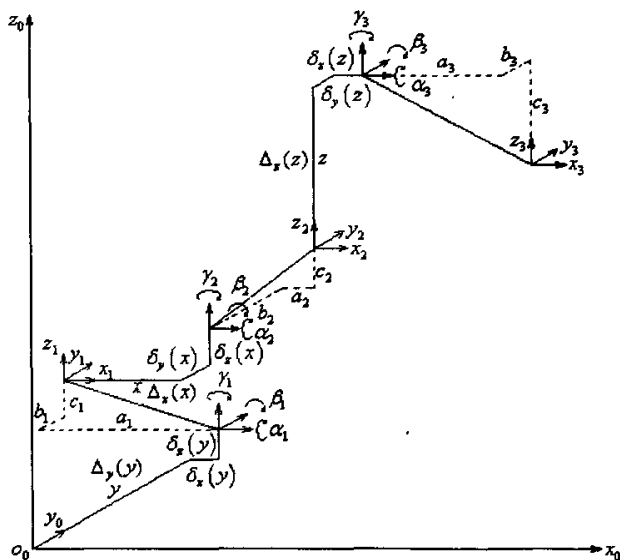


图 3-7 测量机多级齐次坐标变换模型

得到  $(x_p, y_p, z_p)$  必须进行多级平移和旋转坐标变换，坐标系  $o_1 x_1 y_1 z_1$  到  $o_0 x_0 y_0 z_0$  的转换矩阵为  $T_1$ ，坐标系  $o_2 x_2 y_2 z_2$  到  $o_1 x_1 y_1 z_1$  的转换矩阵为  $T_2$ ，坐标系  $o_3 x_3 y_3 z_3$  到  $o_2 x_2 y_2 z_2$  的转换矩阵为  $T_3$ 。则坐标系  $o_3 x_3 y_3 z_3$  到  $o_0 x_0 y_0 z_0$  的转换矩阵为  $T = T_1 \times T_2 \times T_3$ 。

$$T_1 = \text{Trans}(\delta_x(y), y + \Delta_y(y), \delta_z(y)) \times \text{Rot}(x, \alpha_1) \times \text{Rot}(y, \beta_1) \times \text{Rot}(z, \gamma_1) \times \text{Trans}(a_1, b_1, c_1)$$

$$T_2 = \text{Trans}(x + \Delta_x(x), \delta_y(x) + x \cdot \theta_{xy}, \delta_z(x)) \times \text{Rot}(x, \alpha_2) \times \text{Rot}(y, \beta_2) \times \text{Rot}(z, \gamma_2) \times \text{Trans}(a_2, b_2, c_2)$$

$$T_3 = \text{Trans}(\delta_x(z) + z \cdot \theta_{xz}, \delta_y(z) + z \cdot \theta_{yz}, z + \Delta_z(z)) \times \text{Rot}(x, \alpha_3) \times \text{Rot}(y, \beta_3) \times \text{Rot}(z, \gamma_3) \times \text{Trans}(a_3, b_3, c_3)$$

其中,  $(a_1, b_1, c_1)$  为坐标系  $o_1 x_1 y_1 z_1$  原点在 Y 轴滑座旋转中心所确定坐标系中的坐标,

$(a_2, b_2, c_2)$  为坐标系  $o_2 x_2 y_2 z_2$  原点在 X 轴滑座旋转中心所确定坐标系中的坐标,

$(a_3, b_3, c_3)$  为坐标系  $o_3 x_3 y_3 z_3$  原点在 Z 轴滑座旋转中心所确定坐标系中的坐标。

$$T = T_1 \times T_2 \times T_3 = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & x_p \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & y_p \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_x(y) \\ 0 & 1 & 0 & y + \Delta_y(y) \\ 0 & 0 & 1 & \delta_z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\gamma_1 & \beta_1 & 0 \\ \gamma_1 & 1 & -\alpha_1 & 0 \\ -\beta_1 & \alpha_1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & b_1 \\ 0 & 0 & 1 & c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x + \Delta_x(x) \\ 0 & 1 & 0 & \delta_y(x) + x \cdot \theta_{xy} \\ 0 & 0 & 1 & \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\gamma_2 & \beta_2 & 0 \\ \gamma_2 & 1 & -\alpha_2 & 0 \\ -\beta_2 & \alpha_2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_x(z) + z \cdot \theta_{xz} \\ 0 & 1 & 0 & \delta_y(z) + z \cdot \theta_{yz} \\ 0 & 0 & 1 & z + \Delta_z(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\gamma_3 & \beta_3 & 0 \\ \gamma_3 & 1 & -\alpha_3 & 0 \\ -\beta_3 & \alpha_3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & b_3 \\ 0 & 0 & 1 & c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

最后计算得出测头中心相对于底座参考坐标系的坐标值表达式分别为:

$$x_p = x + \Delta_x(x) + \delta_x(y) + \delta_x(z) + z \cdot \theta_{xz} + a_1 + a_2 + a_3 - b_1 \gamma_1 - b_2 \gamma_2 - b_3 \gamma_3 + c_1 \beta_1 + c_2 \beta_2 +$$

$$c_3 \beta_3 + (\beta_1 + \beta_2)(c_3 + z) - (\gamma_1 + \gamma_2)(b_3 + \delta_y(z) + z \cdot \theta_{yz}) - (b_2 + \delta_y(x) + x \cdot \theta_{xy}) \gamma_1$$

$$y_p = y + \Delta_y(y) + \delta_y(x) + x \cdot \theta_{xy} + \delta_y(z) + z \cdot \theta_{yz} + b_1 + b_2 + b_3 - c_1 \alpha_1 - c_2 \alpha_2 - c_3 \alpha_3 + a_1 \gamma_1 + a_2 \gamma_2 +$$

$$a_3 \gamma_3 - (\alpha_1 + \alpha_2)(c_3 + z) + (\gamma_1 + \gamma_2)(a_3 + \delta_x(z) + z \cdot \theta_{xz}) - (c_2 + \delta_z(x)) \alpha_1 + (a_2 + x) \gamma_1$$

$$z_p = z + \Delta_z(z) + \delta_z(x) + \delta_z(y) + c_1 + c_2 + c_3 - a_1 \beta_1 - a_2 \beta_2 - a_3 \beta_3 + b_1 \alpha_1 + b_2 \alpha_2 + b_3 \alpha_3 +$$

$$(\alpha_1 + \alpha_2)(b_3 + \delta_y(z) + z \cdot \theta_{yz}) - (\beta_1 + \beta_2)(a_3 + \delta_x(z) + z \cdot \theta_{xz}) + (b_2 + \delta_y(x) + x \cdot \theta_{xy}) \alpha_1 -$$

$$(a_2 + x) \beta_1$$

3.3 测量机的不确定度分析

本文首先在前面分析的误差源中找出影响测量机精度较大的误差项，确定不确定度分量，根据误差检测的数据确定各不确定度分量的大小，然后在此基础上求出测量机的不确定度，为实现测量机的精度要求提供理论依据<sup>[35-37]</sup>。

1) 误差修正的测量不确定度

由于各项几何误差是各轴坐标的函数，根据实验测量数据（如图 3-8 为拟和 Y 轴基准示值误差重复性曲线）及经验得到各项误差引起的不确定分量，采用 B 类评定方法，各轴基准示值误差的分离不确定度为 5 $\mu\text{m}$ ，直线度误差分离不确定度为 1 $\mu\text{m}$ ，各转角误差的分离不确定度为 5 角秒。垂直度误差的分离不确定度为 10 角秒。

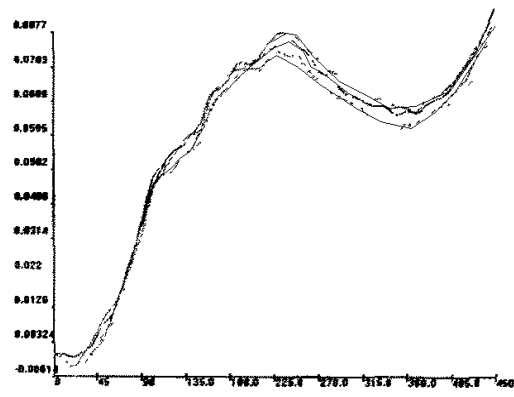


图 3-8 Y 轴基准示值误差重复测量曲线

各轴的合成不确定度分别为  $u_x$ 、 $u_y$ 、 $u_z$ 。

表 3-1 各项几何误差传递系数表:

$\frac{\partial}{\partial e_i}$		x	y	z
X 轴基准示值误差	$\Delta_x(x)$	1	0	0
X 轴 Y 向直线度误差	$\delta_y(x)$	0	1	0
X 轴 Z 向直线度误差	$\delta_z(x)$	0	0	1
X 轴滚转误差	$\alpha(x)$	0	$-z - c_1 - c_2 - c_3$	$y + b_1 + b_2$
X 轴俯仰误差	$\beta(x)$	$z + c_1 + c_2 + c_3$	0	0
X 轴偏摆误差	$\gamma(x)$	$-y - b_1 - b_2 - b_3$	0	0
Y 轴基准示值误差	$\Delta_y(y)$	0	1	0
Y 轴 X 向直线度误差	$\delta_x(y)$	1	0	0
Y 轴 Z 向直线度误差	$\delta_z(y)$	0	0	1
Y 轴俯仰误差	$\alpha(y)$	0	$z - c_2 - c_3$	$b_2$
Y 轴滚转误差	$\beta(y)$	$z + c_2 + c_3$	0	0
Y 轴偏摆误差	$\gamma(y)$	$-b_2 - b_3$	0	0

Z 轴基准示值误差	$\Delta_z(z)$	0	0	1
Z 轴 X 向直线度误差	$\delta_x(z)$	1	0	0
Z 轴 Y 向直线度误差	$\delta_y(z)$	0	1	0
Z 轴俯仰误差	$\alpha(z)$	0	$-c_3$	$b_3$
Z 轴偏摆误差	$\beta(z)$	$c_3$	0	0
Z 轴滚转误差	$\gamma(z)$	$-b_3$	0	0
XY 轴垂直度误差	$\theta_{xy}$	$-y-b_2-b_3$	0	0
YZ 轴垂直度误差	$\theta_{yz}$	0	$-z-c_3$	0
XZ 轴垂直度误差	$\theta_{xz}$	$z+c_3$	0	0
X 向测头抖动误差	$d_x$	1	0	0
Y 向测头抖动误差	$d_y$	0	1	0
Z 向测头抖动误差	$d_z$	0	0	1

$$\begin{aligned}
u_{x1} &= \sqrt{\sum_{i=1}^{21} \left| \frac{\partial x}{\partial e_i} \right|^2} u_i^2 = \sqrt{u_1^2 + (z+c1+c2+c3)^2 u_5^2 + (y+b1+b2+b3)^2 u_6^2 + u_8^2 + (z+c2+c3)^2 u_{11}^2 +} \\
&\quad \sqrt{(b2+b3)^2 u_{12}^2 + u_{14}^2 + c3^2 u_{17}^2 + b3^2 u_{18}^2 + (y+b2+b3)^2 u_{19}^2 + (z+c3)^2 u_{21}^2} \\
&= \sqrt{0.005^2 + ((z-260)^2 + (y+1820)^2 + (z-430)^2 + 2110^2 + 800^2 + 2040^2) \times 5/3600 \times (\pi/180)} \\
&\quad \sqrt{+((y+2110)^2 + (z-800)^2) \times 10/3600 \times (\pi/180) + 0.001^2 + 0.001^2} \\
u_{y1} &= \sqrt{\sum_{i=1}^{21} \left| \frac{\partial y}{\partial e_i} \right|^2} u_i^2 = \sqrt{u_2^2 + (z+c1+c2+c3)^2 u_4^2 + u_7^2 + (z-c2-c3)^2 u_{10}^2 + u_{15}^2 +} \\
&\quad \sqrt{c3^2 u_{16}^2 + (z+c3)^2 u_{20}^2} \\
&= \sqrt{0.005^2 + ((z-260)^2 + (z-1170)^2 + 800^2) \times 5/3600 \times (\pi/180) + (z+800)^2} \\
&\quad \sqrt{\times 10/3600 \times (\pi/180) + 0.001^2 + 0.001^2} \\
u_{z1} &= \sqrt{\sum_{i=1}^{21} \left| \frac{\partial z}{\partial e_i} \right|^2} u_i^2 = \sqrt{u_3^2 + (y+b1+b2)^2 u_4^2 + u_9^2 + b2^2 u_{10}^2 + u_{13}^2 + b3^2 u_{16}^2} \\
&= \sqrt{0.005^2 + (y-230)^2 + 70^2 + 2040^2) \times (5/3600) \times \pi/180 + 0.001^2 + 0.001^2}
\end{aligned}$$

图 3-9 为误差修正引起的各坐标轴的不确定度分量图，从图中可以看出 X 轴的不确定度为 YZ 坐标值的函数，最大为 27um；Y 轴的不确定度为 Z 坐标轴的函数，最大为 12um；Y 轴的不确定度为 Z 坐标轴的函数，最大为 11um。

## 2) 各轴抖动引起的测量不确定度

各轴向抖动误差是其他两轴不动，只沿某一轴向测头重复采样得到的，所以采用 A 类评定方法，由各轴抖动引起的测量不确定度分量为：

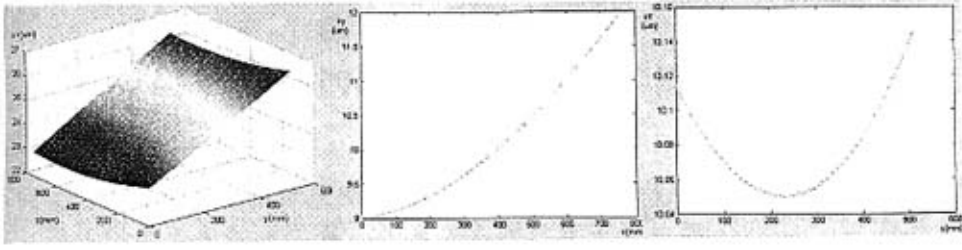


图 3-9 各轴误差修正的不确定度曲线

$$u_{x2} = \sigma_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 40 \mu m$$

$$u_{y2} = \sigma_{\bar{y}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{(n-1)}} = 22 \mu m$$

$$u_{z2} = \sigma_{\bar{z}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{(n-1)}} = 11 \mu m$$

3) 其他各项误差引起的测量不确定度:

$$u_{x3} = 5 \mu m$$

$$u_{y3} = 3 \mu m$$

$$u_{z3} = 1 \mu m$$

各项误差引起的不确定度分量  $u_i$  ( $i=1, 2, 3, 4, \dots, 24$ ) 相互独立, 则相关系数为零, 合成不确定度:

$$u_x = \sqrt{u_{x1}^2 + u_{x2}^2 + u_{x3}^2} = \sqrt{27^2 + 40^2 + 5^2} = 48 \mu m$$

$$u_y = \sqrt{u_{y1}^2 + u_{y2}^2 + u_{y3}^2} = \sqrt{12^2 + 22^2 + 3^2} = 25 \mu m$$

$$u_z = \sqrt{u_{z1}^2 + u_{z2}^2 + u_{z3}^2} = \sqrt{11^2 + 11^2 + 1^2} = 15 \mu m$$

取包含因子  $k=2$  则各轴展伸不确定度:

$$U_x = ku_x = 96 \mu m$$

$$U_y = ku_y = 50 \mu m$$

$$U_z = ku_z = 30 \mu m$$

现有情况下的精度还不能很好的满足要求设计精度, 主要原因: 角度误差的传递系数都比较大, 而且由于机体结构刚度非理想, 角度误差分离的重复性不好, 导致角度误差引起的不确定度过大; 由于滚珠导轨低速下容易产生爬行和蠕变, 造成滑座的加速度变化产生振动, 并且由于测杆的弱刚性对振动产生放大作用, 造成测头抖动。

针对以上问题, 采取以下措施来保证测量精度: 1、优化机体结构设计, 改进刚度较弱部件结构, 提高机体刚度, 从而提高系统稳定性和误差分离的重复性。2、减小测头各向抖动, 增强测杆刚性, 减小测头抖动。

## 第四章 测量机误差的检测

各误差因素对测量精度的影响程度不一样，对本测量机影响较大的是 21 项几何误差和触测误差，故本文主要对此进行检测。

### 4.1 几何误差的检测方法

三坐标测量机的 21 项几何误差的分离方法有单项测量法和综合测量法<sup>[1]</sup>。

单项测量法是使用各种测试方法和检测仪器对测量机的单项几何误差进行检测分离，具有直观的优点，能直接了解误差源，可达到较高的测量精度，在检测完全部 21 项几何误差后，可根据数学模型合成，求得整个测量空间各点的误差，并按此进行误差修正。

综合测量法是根据测量误差通过数学模型与各项原始误差相互联系，那么测得测量机一些点集的测量误差即可求得它的各项原始误差。从理论上讲，只要测得的点足够多，总可以通过解联立方程的方法求得各项原始误差。从工程使用的角度讲，只有变量（即误差）能较方便的分离出来，这种方法才有意义，才具有误差的溯源性。根据综合误差的测量方法分为：线位移法、一维球列法、球板法。

本文采用单项误差分离法。根据性质将几何误差分为 4 类：定位误差、直线度运动误差、角度运动误差和垂直度误差。

#### 4.1.1 定位误差的分离

定位误差的分离方法可分为两种，一种是激光干涉的原理将定位误差直接与光波波长比较；另一种是与量块等实物基准进行比较。

本文采用第一种方法分离定位误差。为了表达方便，把运动部件称为滑座，固定部件称为底座。测量时分光干涉镜 4 通过磁性表座和测量机底座固定在一起，测量角隅棱镜固定在滑座上并随之一起运动。双频激光干涉仪分离 X、Y 轴定位误差的原理如图 4-14-1 (a) 所示，分离 Z 轴定位误差的原理如图 4-1 (b) 所示。分离定位误差的安装示意图如图 4-2、4-3 所示。

测量时，各轴均每隔 5mm 同步采集光栅尺和双频激光干涉仪的数据，各轴均往返重复测量 5 次，X、Y、Z 各轴测量的定位误差数据曲线及重复性如图 4-4 所示。

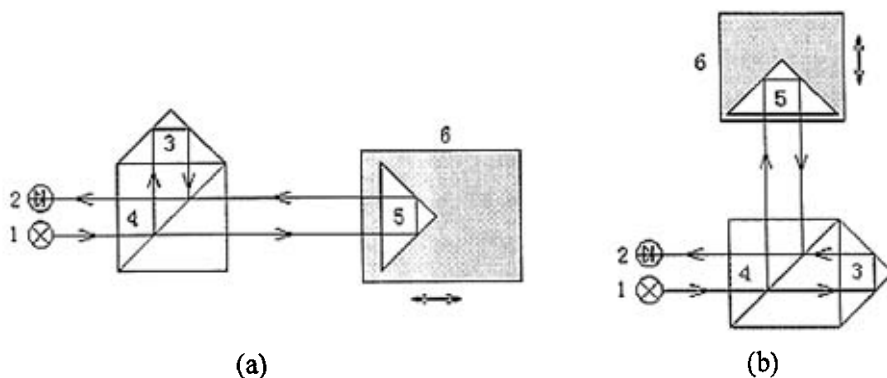


图 4-1 激光干涉仪分离定位误差原理

1、激光 2、光电接收器 3、参考角隅棱镜 4、分光镜 5、测量角隅棱镜 6、滑座工作台

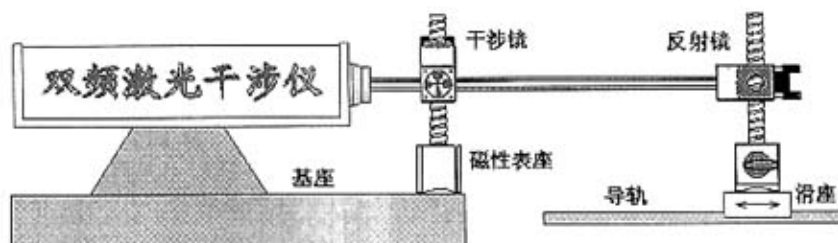


图 4-2 激光干涉仪分离水平轴定位误差安装示意

#### 4.1.2 角度运动误差的分离

在直角坐标系坐标测量机中,角度运动误差是由于零部件的加工装配误差和刚度的非理想性造成的,所以误差值一般较小。角运动误差根据测量方法可分为 2 类,一类是偏摆和俯仰,另一类是滚转。

偏摆和俯仰角误差的分离

分离偏摆和俯仰的常用仪器有配有角度棱镜的激光干涉仪、自准直仪。

用激光干涉仪测量 X、Y 轴的偏摆或俯仰时,将由分光镜与反射镜组成的角度干涉镜固定在测量机基座上(原理如图 4-5 所示),装有 2 个角隅棱镜的测角反射镜通过磁性表座固定在测量机运动轴滑座上。测量俯仰时,图中 U 向为 Z 向,测量偏摆时 U 向为 X 或 Y 向。当滑座绕与纸

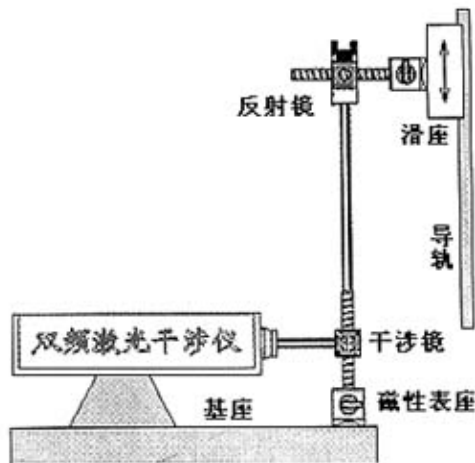


图 4-3 激光干涉仪分离垂直轴定位误差安装示意

面垂直的轴转动时，上下两路光程差发生变化，干涉仪据此得出角度值。这种测量方法可有 0.1 角秒的分辨率与精度。另外，测量时对绕光轴的转动不敏感，因此不能测滚转误差。分离俯仰误差的安装示意如图 4-6 所示。

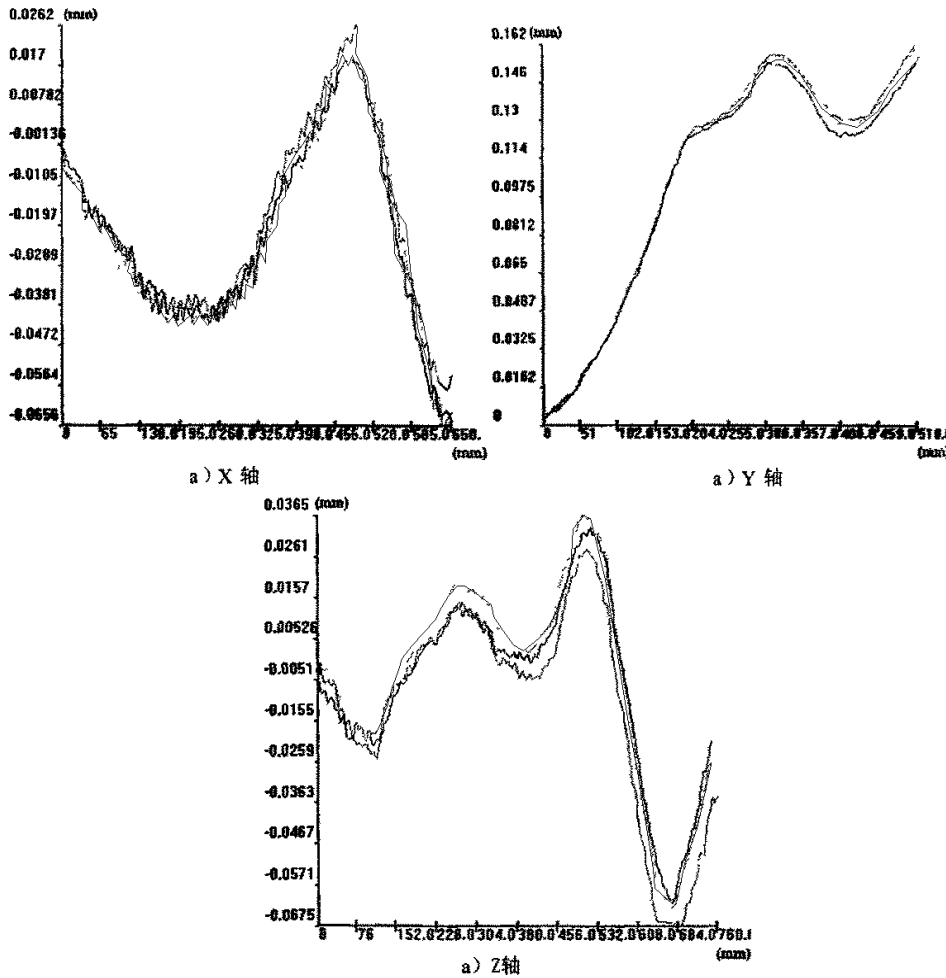


图 4-4 各轴示值误差 5 次重复测量曲线

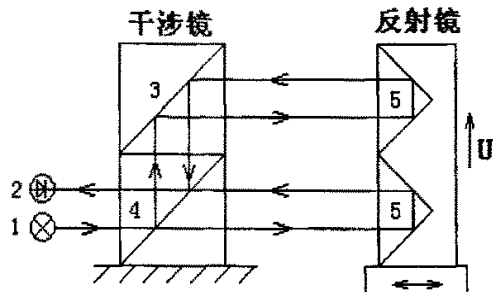


图 4-5 激光干涉仪分离水平轴俯仰或偏摆误差原理  
1、激光 2、光电接收器 3、干涉镜 4、分光镜 5、角隅棱镜



用激光干涉仪测量 Z 轴的偏摆或俯仰时，将由分光镜与反射镜组成的角度干涉镜固定在测量机基座上（原理如图 4-7（a）所示），装有 2 个角隅棱镜的测角反射镜通过磁性表座固定在测量机 Z 轴滑座上。测量俯仰时，图中 U 向为 Y 向，测量偏摆时 U 向为 X 向。分离 Z 向运动的俯仰误差安装示意图如图 4-7（b）所示。

用光电自准直仪测量偏摆或俯仰时，将自准直光管固定在测量机基座上（如图 4-8 所示），将平面反射镜固定在滑座上。滑座沿导轨运动出现偏摆或俯仰时，由平面反射镜反射回来的光束方向发生变化，自准直仪测出这一角运动误差值。当滑座有滚转运动时，反射光束方向不变，所有不能测量滚转角误差。

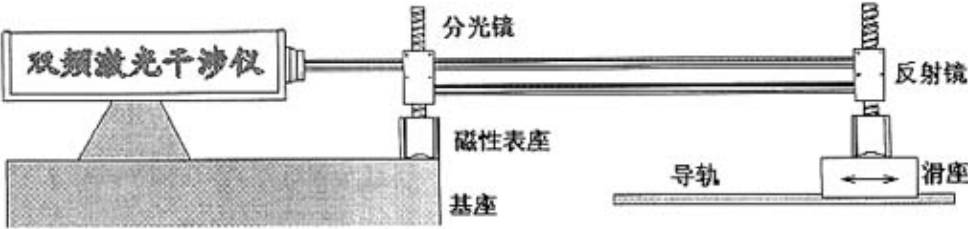


图 4-6 激光干涉仪分离水平轴俯仰角误差安装示意图

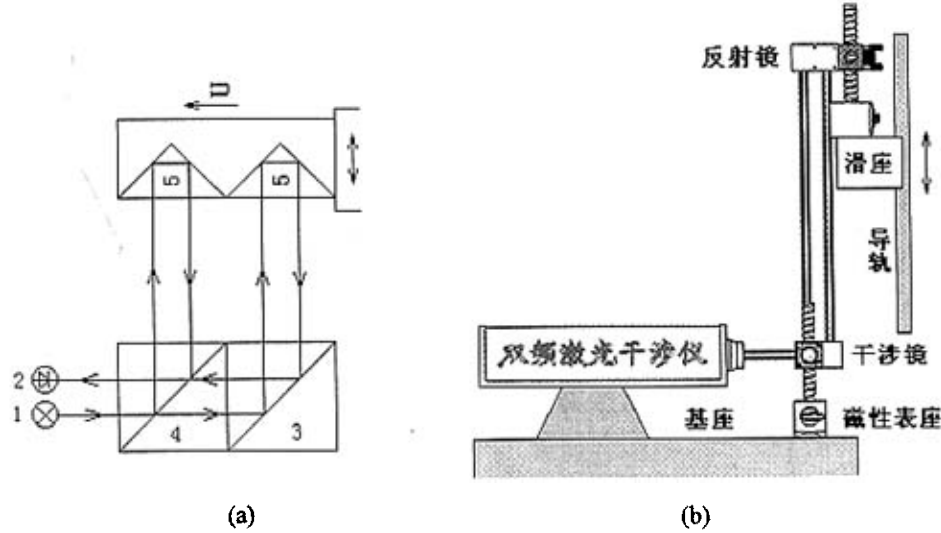


图 4-7 激光干涉仪分离垂直轴俯仰或偏摆角误差

1、激光 2、光电接收器 3、反射镜 4、分光镜 5、角隅棱镜

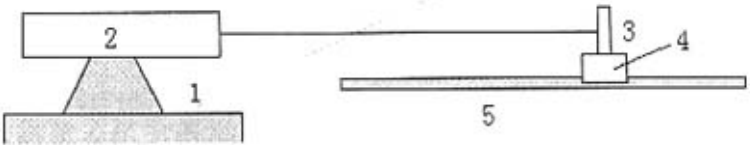


图 4-8 光电自准直仪分离俯仰或偏摆角误差

1、基座 2、光电自准直仪 3、平面反射镜 4、滑座 5、导轨

测量各轴的俯仰、偏摆角度误差时均以 5mm 为间隔均匀采集离散数据, 往返测量 5 次, 而且工作台移动速度和测量时移动速度相同, 以减小动态误差对测量精度的影响。X、Y、Z 各轴的俯仰及偏摆误差曲线如图 4-9 所示。

## 2) 滚转角误差的分离

水平轴 X 和 Y 轴的滚转角误差可以采用水平仪来测量, 比较难测的垂直轴 Z 轴的滚转角误差<sup>[33]</sup>。本文采用间接测量的方法 (如图 4-10 所示), 把一直尺放在平板上, Z 轴水平悬臂的末端装一电感测微仪, 使 Z 轴滑板从下向上运动, 记录测微仪的一组值  $R_1(z)$ , 并标记直尺上的测量线, 然后把电感测头和直尺都进行转位, 并调整直尺在平板上的位置, 使测头能够测量上次标记的测量线, 记录测微仪的一组值  $R_2(z)$ 。转位前后两次测量电感测头的读数分别是:

$$R_1(z) = \alpha(z) \times l + \delta_x(z) + \delta_{\text{直尺}}$$

$$R_2(z) = -\alpha(z) \times l - \delta_x(z) + \delta_{\text{直尺}}$$

上面两式相减得到 Z 轴的滚转角误差:

$$\alpha(z) = \frac{R_1(z) - R_2(z) - 2\delta_x(z)}{2l}$$

$\delta_x(z)$  为 Z 轴在 X 方向的直线度误差,  $\delta_{\text{直尺}}$  为直尺上标记的测量线的直线度误差。

## 4.1.3 直线度运动误差的分离

直线度运动误差的分离就是测量某一轴运动过程中相对于理论轴线 (拟合而成) 的横向位移变化情况。为了测量坐标测量机滑座的直线度运动误差, 需要有直线基准, 一般用平尺、激光束等作为直线基准。直线度运动误差分离的常用方法根据使用的直线基准分为以下几种。

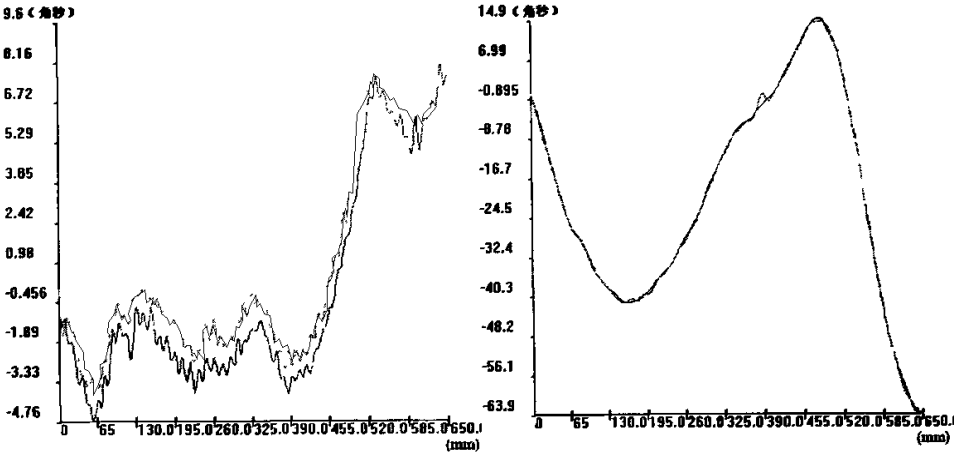
### 1) 平尺法

平尺法测量直线度运动误差的工作原理如图 4-11 所示, 平尺固定在测量机基座上, 提供直线基准, 在滑座上装一测微测头, 滑座沿导轨运动时, 测头示值即为直线度误差。这种方法的精度主要由平尺的精度决定, 但由于高精度平尺加工制作困难, 因此难以用于大行程的直线度运动误差测量。

### 3) 激光准直仪法

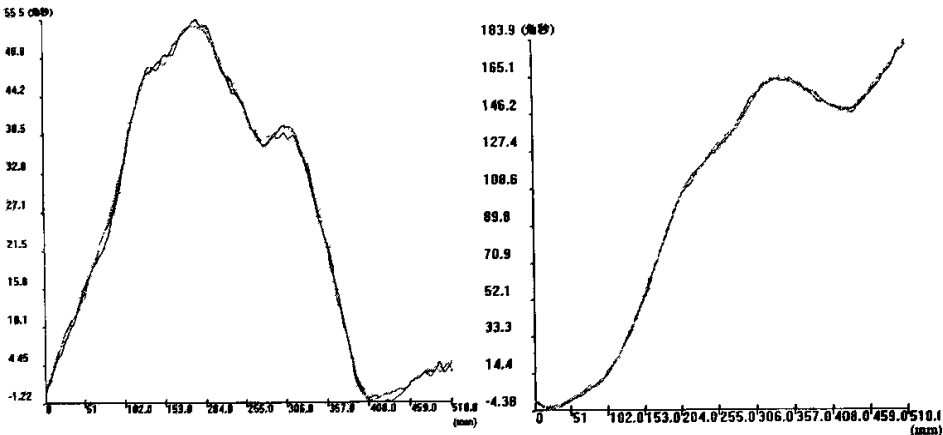
这种测量方法中激光器发出的光束提供直线基准, 所有把激光器固定在测量机基座上 (如图 4-12 所示), 在滑座上装一四象限光电池, 当滑座有直线度运动误差时, 激光光斑在光电池上的位置将发生变化, 根据光电

池四个象限接受到的光强差就可以测量出滑座的直线度运动误差。



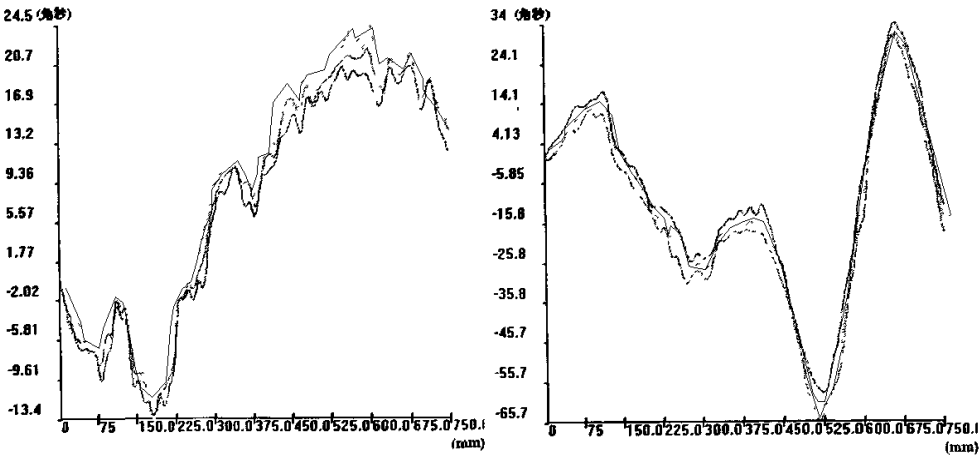
a) X 轴的俯仰误差

b) X 轴的偏摆误差



c) Y 轴的俯仰误差

d) Y 轴的偏摆误差



e) Z 轴的俯仰误差

f) Z 轴的偏摆误差

图 4-9 X、Y、Z 各轴的俯仰、偏摆运动误差曲线

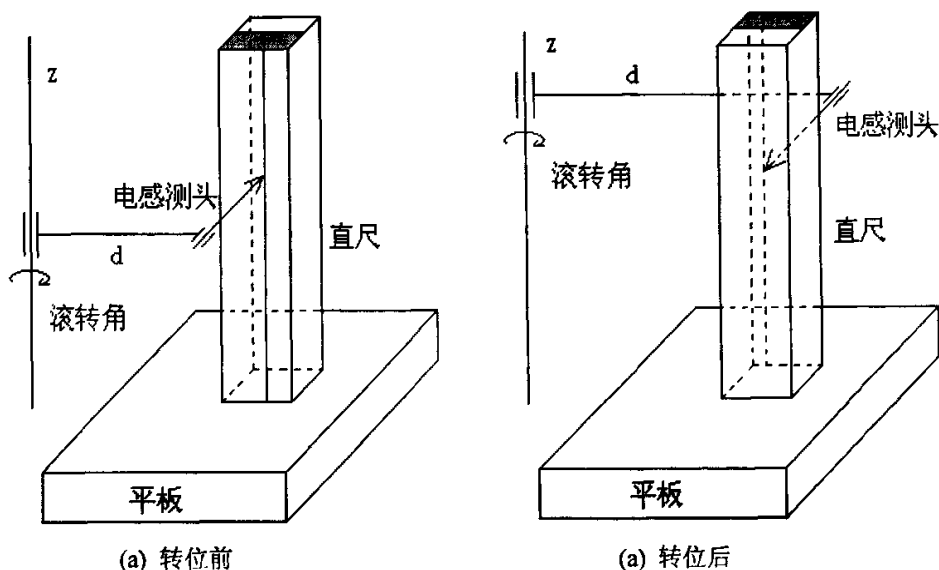


图 4-10 垂直轴滚转角误差的检测方法

### 3) 翼形反射镜法

使用双频激光干涉仪配合直线度测量附件分离直线度误差的原理如图 4-13 所示，由激光器 1 发出的光束经半透反射镜 2 后，进入装在滑座 4 上的渥拉斯顿棱镜 3，被分成夹角为  $\theta$  的两束光，投向翼形反射镜 5。翼形反射镜的两个面法线之间的夹角等于渥拉斯顿分光棱镜的夹角。调整光路，使激光束、翼形反射镜 5 的角平分线均于滑座的运动方向平行。两束光经翼形反射镜 5 反射沿原路返回，在渥拉斯顿棱镜上汇合形成干涉。当滑座 4 沿直线方向运动时，虽然由渥拉斯顿棱镜 3 分出的两束光的光程都在变化，但他们之间的光程差不变，因此干涉信号不变。当滑座 4 具有直线度运动误差、向上移动  $\delta$  时，上面的那束光的光程减小  $2\delta \sin(\theta/2)$ ，下面的那束光增大  $2\delta \sin(\theta/2)$ ，光程差改变  $4\delta \sin(\theta/2)$ 。这种方法中翼形反射镜的角平分线是直线基准，由于两束光的气象条件基本相同，测量精度比较高，行程为 3 米的情况下精度可达到  $0.4\mu\text{m}/\text{m}$ 。在水平方向测量时的安装如图 4-14 所示。

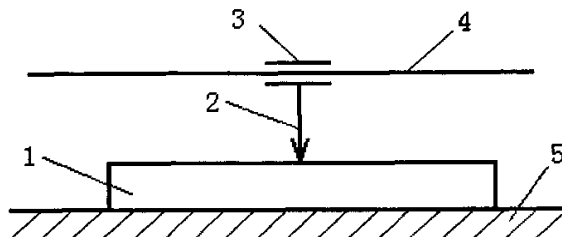


图 4-11 平尺法测量直线度运动误差原理

1、平尺 2、测微头 3、滑座 4、导轨 5、基座

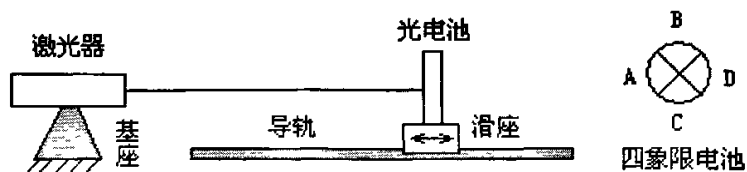


图 4-12 激光准直仪法测量直线度运动误差原理

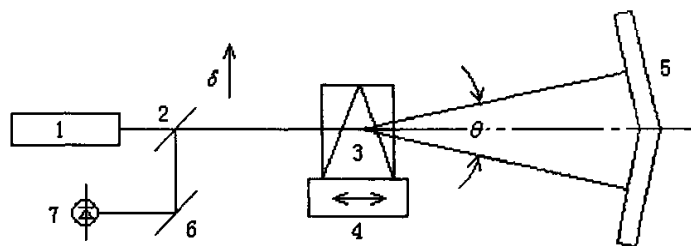
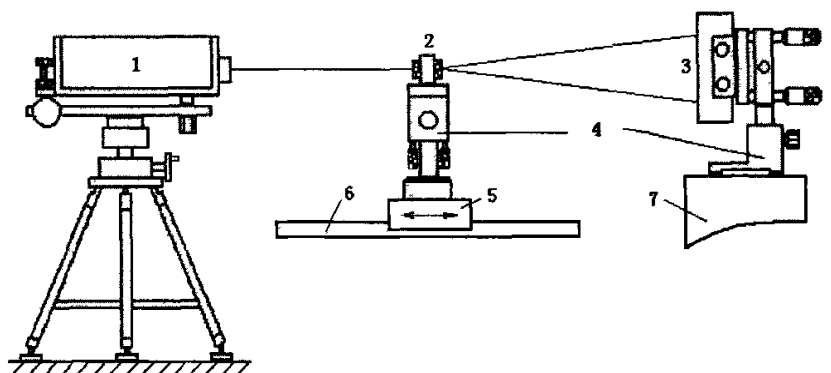
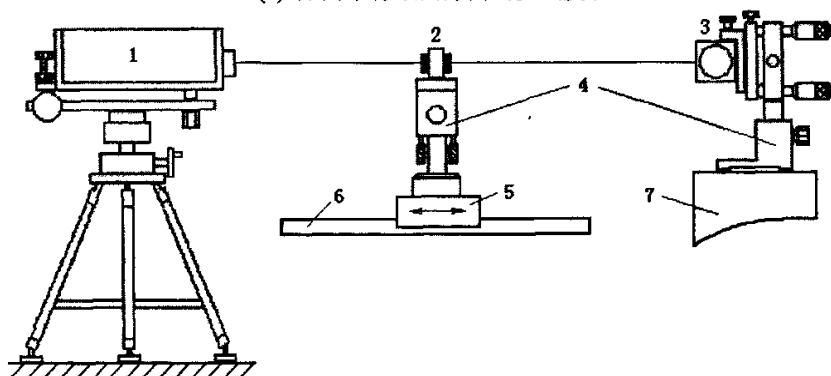


图 4-13 激光干涉仪分离直线度误差原理

- 1、激光器 2、分光镜 3、渥拉斯顿棱镜 4、滑座 5、翼形反射镜  
6、反射镜 7、光电接收器



(a) 分离平行纸面方向的直线度误差



(b) 分离垂直纸面方向的直线度误差

图 4-14 激光干涉仪分离水平轴直线度误差安装示意图

- 1、双频激光干涉仪 2、渥拉斯顿棱镜 3、翼形反射镜 4、棱镜安装调整架  
5、滑座 6、导轨 7、基座

分离 z 轴直线度运动误差时，还需配合转向反射镜和回转反射镜等附件使用，如图 4-15 所示。由激光器 1 发出的光束经分光镜 2 后，进入装在滑座 6 上的回转反射镜 4，使光束反向，射入渥拉斯顿棱镜 3，被分成夹角为  $\theta$  的两束光，投向翼形反射镜 5。回转反射镜 4 和渥拉斯顿棱镜 3 都固定在 Z 轴滑座上随之一起运动。垂直方向测量时的安装示意如图 4-16 所示，其中图 4-16 (a) 为分离平行纸面方向的直线度误差，图 4-16 (b) 为分离垂直纸面方向的直线度误差。

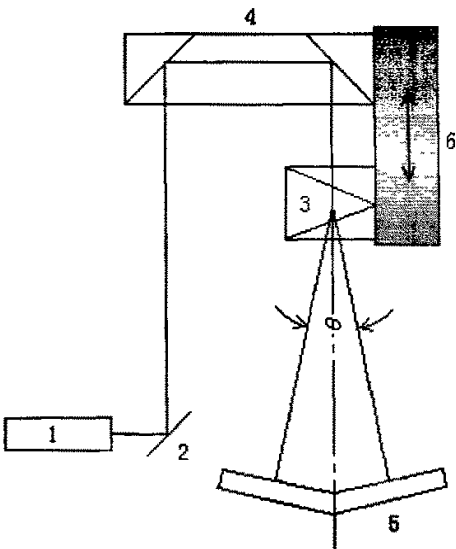
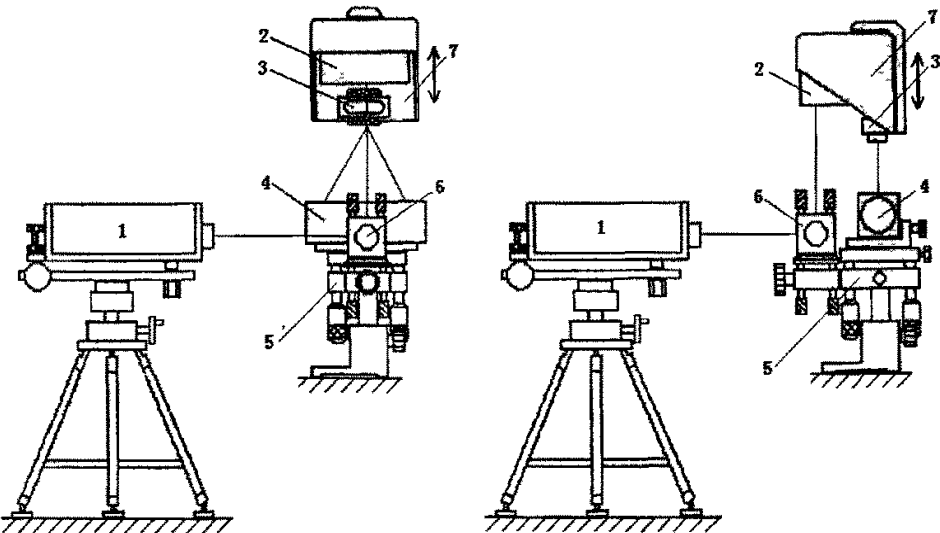


图 4-15 激光干涉仪分离直线度误差原理  
1、激光器 2、分光镜 3、渥拉斯顿棱镜  
4、回转反射镜 5、翼形反射镜 6、滑座

#### 4) 间接运算法

在测量俯仰和偏摆中激光光线的方向也要调整，使之和滑座的运动方向一致，它实际上也是一个直线基准，故可以通过理论计算间接得到直线度运动误差。该方法不需测量，简单。



(a) 分离平行纸面方向的直线度误差

(b) 分离垂直纸面方向的直线度误差

图 4-16 激光干涉仪分离垂直轴直线度误差安装示意图

1、双频激光干涉仪 2、回转反射镜 3、渥拉斯顿棱镜 4、翼形反射镜  
5、安装调整架 6、反射镜 7、安装架

#### 4.1.4 垂直度误差的分离

所谓垂直度误差的分离就是测量两相关运动轴在运动过程中互相垂直的程度。它是通过测量两运动轴的直线度后，利用直线拟合的方法得出两轴的理论轴线，两理论轴线的夹角加上光学直角尺实际角度值即为两轴的实际夹角，减去 90 度即为两轴之间的垂直度误差。为了测量两运动轴之间的垂直度误差，需要有一个垂直基准。通常采用方箱、直角尺、光学直角器等作为直角基准。

##### 1) 方箱测量法

利用方箱作为垂直基准测量两运动轴的垂直度误差原理如图 4-17 (a) 所示。把方箱 2 固定在测量机基座上，在两轴滑座上各装一个检测头，当滑座 5 沿 X 向运动时，检测头 1 测出它在 Y 方向的直线度运动误差，当滑座 3 沿 Y 向运动时，检测头 4 测出它在 X 向的直线度运动误差。根据两轴的直线度运动误差曲线，如图 4-17 (b)，求出直线位置后，即可求出垂直度误差。

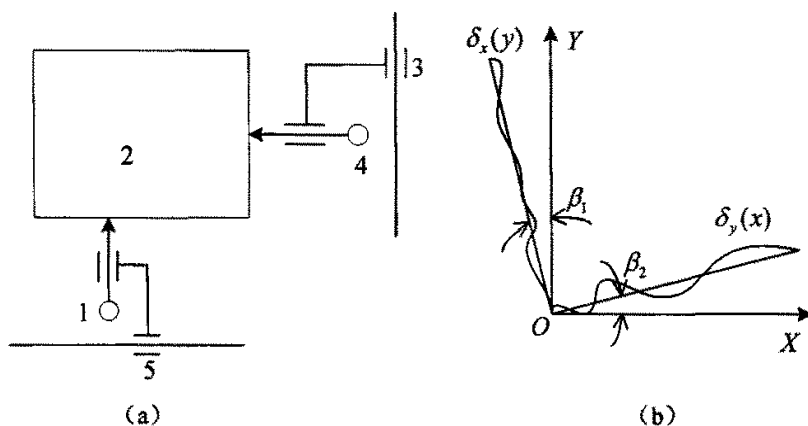


图 4-17 方箱法测量两轴垂直度误差

##### 2) 激光准直仪测量法

激光准直仪配合光学直角器测量垂直度误差的原理如图 4-18 所示。图中 1 为激光器，首先把四象限光电测量靶 2 按装在 Y 向滑座 3 上，测出沿 X 方向的直线度运动误差。然后再把四象限光电测量靶 2 按装在 X 向滑座 5 上，靠光学直角器 4 把激光束转过 90 度，形成与 Y 向基准直线垂直的另一直线基准。测出沿 X 轴运动 Y 向的直线度运动误差。再根据两条直线度运动偏差曲线算出垂直度误差。

##### 3) 激光干涉仪测量法

激光干涉仪配合光学直角器测量垂直度误差的原理如图 4-19 所示。把光学直角器 4 和翼形反射镜 6 固定在测量机基座上，首先在 Y 向滑座 3 上

安装渥拉斯顿棱镜 2，由激光器 1 发出的光经渥拉斯顿棱镜 2 分成 2 束，经光学直角器 4 照射到翼形反射镜 6 上，滑座沿 Y 向运动测出在 X 方向的直线度运动偏差。然后再将渥拉斯顿棱镜 2 安装到 X 向滑座 5 上，激光器发出的光束经光学直角器 4 照射到渥拉斯顿棱镜，被分成两束投射到翼形反射镜 6 上，移动 X 向滑座 5 测出沿 Y 向的直线度运动偏差。再根据两条直线度运动偏差曲线算出垂直度误差。

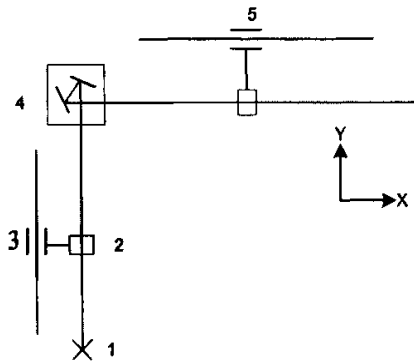


图 4-18 激光准直仪测量两轴垂直度误差  
1、激光器 2、四象限光电测量靶 3、Y 轴滑座 4、光学直角器 5、X 轴滑座

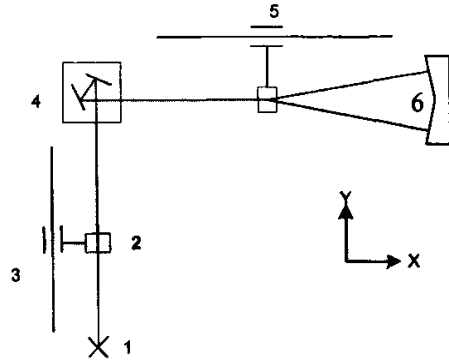


图 4-19 激光干涉仪测量两轴垂直度误差  
1、激光器 2、渥拉斯顿棱镜 3、Y 轴滑座 4、光学直角器 5、X 轴滑座 6、翼形反射镜

#### 4) 对角线法

用对角线法测量垂直度的原理如图 4-20 所示。图中 1 为激光器，2 为干涉镜，固定在测量机基座上，角隅棱镜 3 固定在滑座上，它在计算机的控制下沿对角线 AC 运动，测量对角线 AC 的位移，然后再沿对角线 BD 运动，测量对角线 BD 的位移。若滑座在测量两条对角线时，X 和 Y 向位移分别为 a 和 b，AB 与 AD 之间夹角为  $90^\circ + \alpha_{xy}$ ，则沿两条对角线运动的位移差

$$\Delta l = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(90^\circ + \alpha_{xy})} - \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(90^\circ - \alpha_{xy})} = \frac{2ab}{\sqrt{a^2 + b^2}} \alpha_{xy}$$

根据上式就可以求出垂直度误差  $\alpha_{xy}$ 。

从原理上讲，只测一条对角线就可以求出垂直度误差，但同时测量两条对角线，不仅灵敏度能提高一倍，而且可以补偿许多由于环境因素所带来的误差。

方法一采用实物基准，不易获得较高精度，而且对于大量程的测

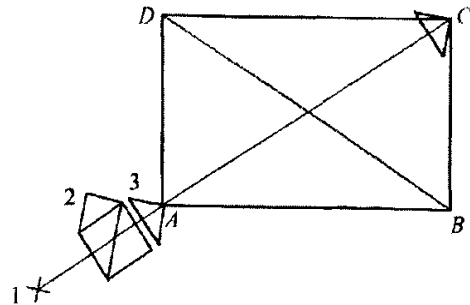


图 4-20 对角线法测量两轴垂直度误差  
1、激光器 2、干涉镜 3、角隅棱镜



量机显然不方便，方箱太重。第二、三种方法都是采用光学直角器作为垂直基准，都是建立在直线度运动误差测量的基础上，所以直线度运动误差测量的不确定度会影响垂直度测量误差。方法四最为简单，测量精度最高。

4.2 触测误差的检测方法

4.2.1 测端等效直径的标定

在尺寸测量中，由于测头端部不是无限小和测杆刚度非理想性，所以被测尺寸是坐标测量机的位移量与测端等效直径的和（内尺寸）或差（外尺寸），因此测头在使用前都要进行测端等效直径的标定。标定方法如图 4-21 所示，用量块作基准，用测头从量块两侧对它进行探测，坐标测量机移动位移与量块尺寸之差即为测端等效直径。

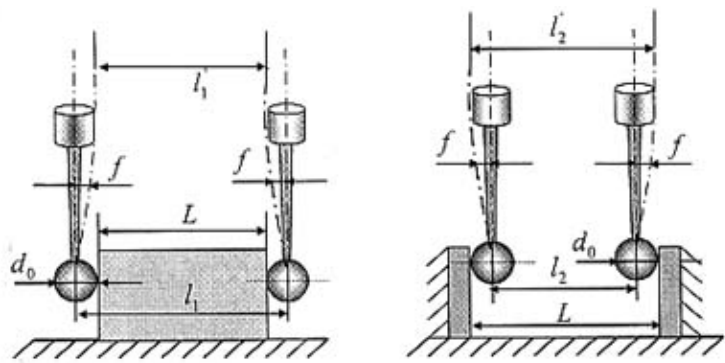


图 4-21 测端等效直径的标定

4.2.2 测头重复性误差的测定

由于连接测头的测杆的非理想刚性，测量机在触测过程中测杆会产生抖动，这将直接影响测头瞄准的重复性精度，并且这是随机的误差，不能进行误差修正，只能为测量机的不确定度评定提供理论依据。因此应优化测杆的结构设计，避免测端抖动位移过大。

测定测头的重复性误差，本文采用单轴重复性误差，实际上也包括了测量机的重复性误差，但相对较小，本文不仔细区分。测量单轴的重复性误差时，测量机带动测头沿某一轴向触测一固定工件，当测头触发读取坐标测量机示值，示值的分散性即为该轴向的测头重复性误差。

# 第五章 测量机软件程序设计

测量机的软件是测量机的“大脑”，其功能的实现和操作方便与否主要取决于测量机的软件。随着计算机技术和计算科学的迅猛发展，三坐标测量软件也和整个软件行业一样有了长足的进步。本文在 Visual C++6.0 环境下编写了测量机的软件<sup>[44-47]</sup>。实现测量机的运动控制、测量数据的采集与存储、误差修正、数据处理、测头的标定、坐标转换、测量结果的显示和存储等功能。

## 5.1 软件主体结构

该测量软件属于菜单驱动式软件系统，具有良好的人机界面，用户通过菜单的方式实现测量软件预先设定的各种不同测量任务，如图 5-1 所示。该测量软件图文并茂，操作者易于学习和理解。

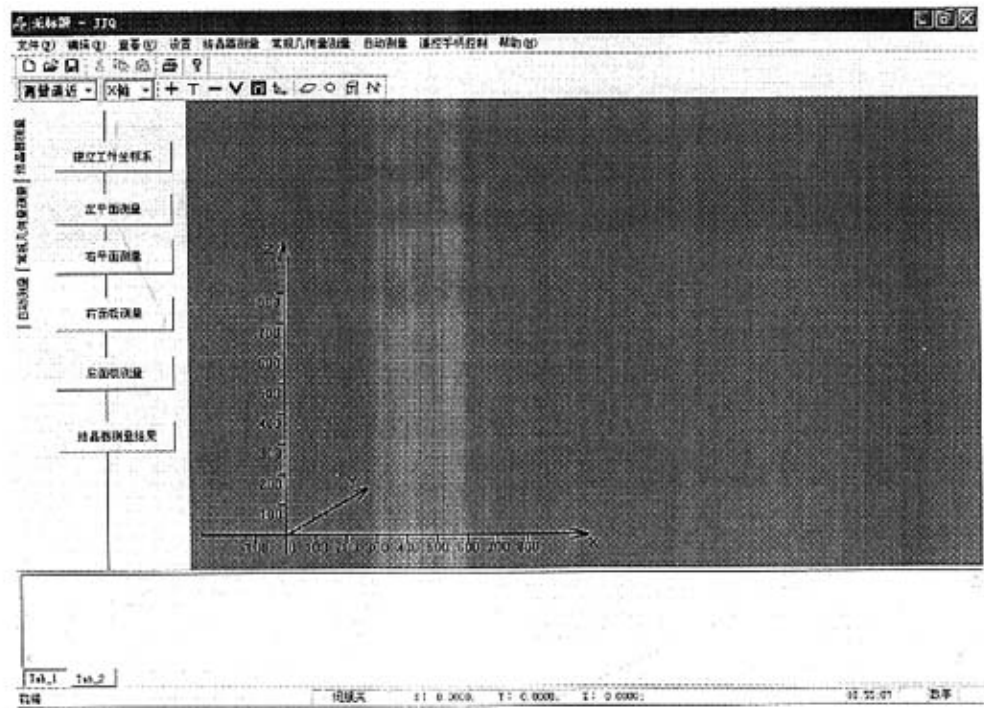


图 5-1 测量机软件主界面

使用该软件对工件进行测量之前要进行一系列的设置，操作步骤：首先双击软件快捷方式图标进入测量软件主界面，下一步就要找到三轴的零位以建立机器坐标系，为了使用手动控制器对测量机进行控制还要把控制

器联机，然后对测头用标准球进行标定，再完成运动控制参数、测头参数、测量参数的设置就可以进入对工件的采样测量阶段了。该软件的总体流程图如图 5-2 所示。

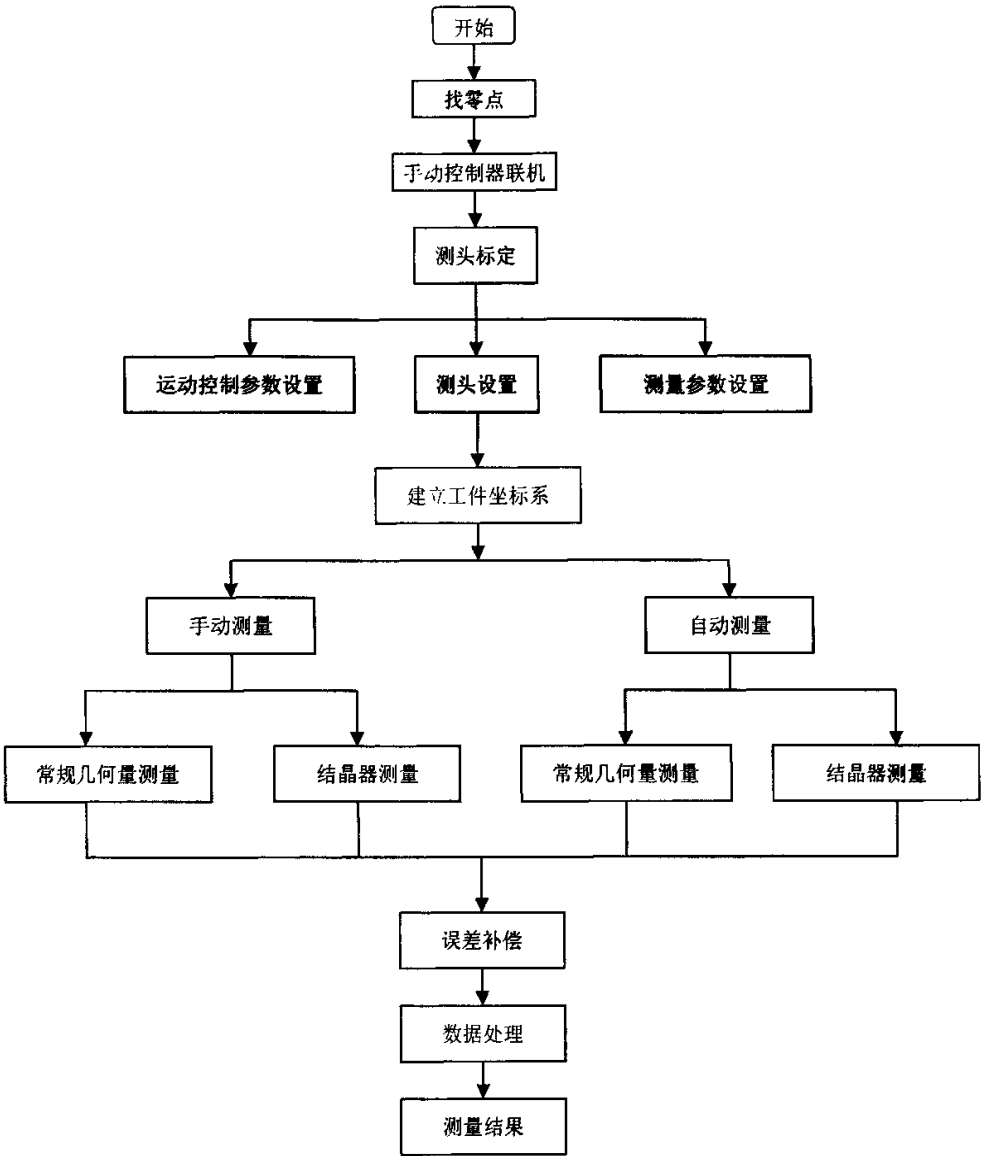


图 5-2 软件程序总流程图

## 5.2 测头的标定

针对不同的测量任务，在测量过程中常须改换探针，或采用不同的加长杆，或把测头转过一定角度等，总之每次改变测头都要重新对测头进行标定，以保证测量精度，消除测端作用直径改变对测量结果的影响。最长用的标准球与标准方体，如图 5-3 所示。

该文采用标准球对测头进行标定，标准球是一个直径经过精确标定、球度误差很小的钢球或陶瓷球。一般在开机调整测头后，开始对工件检测前都重新对测头进行一次标定。把标准球固定在测量空间不常使用的一角的测量机基座上，程序中测头的标定方式有两种：自动和手动。

标准球在测量空间位置没有改变时可以使用自动标定，测量机将自动在直径为  $d_0$  标准球的外表面触测 9 点（图 5-4 所示），经拟合处理计算出测头中心所在球直径  $D$ ，即可求得测头的测端作用直径  $d = D - d_0$ 。当标准球在空间的位置发生改变时就只能使用手动方式对测头进行标定，操作方式为：首先使用手动控制器移动测头在标准球表面采样 4 点，然后测量机软件会自动粗略拟合计算得出球心位置和标准球直径，然后自动生成测量路径，对球表面采样 9 点，再经过拟合处理计算出测头中心所在球直径  $D$ ，即可求得测头的测端作用直径  $d = D - d_0$ 。

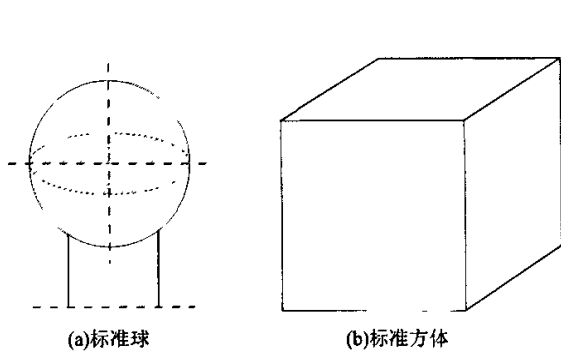


图 5-3 标准球与方体

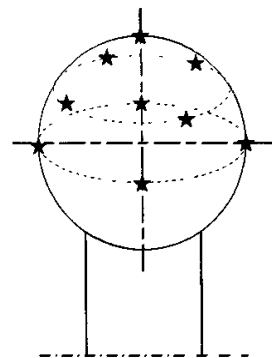


图 5-4 标准球上触测点位置

### 5.3 运动控制

对测量机的运动控制本软件是通过对伺服电机控制卡的函数库进行二次开发实现的。运动控制卡采用台湾凌华的 PCI-8164，本卡为四轴运动控制卡，具有圆弧插补、直线插补功能，可同时驱动步进与伺服系统。可实现单轴运行或四轴、三轴联动、任意两轴联动插补控制，并由硬件实现机械装置的超限保护。只要把输出信号接至驱动器，现场限位信号接入插头，即可实现三轴/双轴/单轴系统联动插补控制及超限保护，为二次开发软件提供了极大方便。

#### 5.3.1 PCI-8164 的多轴联动控制

通过调用运动控制卡自带的函数库可以实现单轴运动、两轴联动、三轴联动和四轴联动控制功能。

#### a) 单轴运动

`_8164_start_tr_move(AxisNo,Dist,StrVel,MaxVel,Tacc,Tdcc);`

`_8164_start_ta_move(AxisNo,Pos,StrVel,MaxVel,Tacc,Tdcc);`

其中 tr 表示相对运动，ta 为绝对运动；

AxisNo 表示轴号，如 0 为 X 轴，1 为 Y 轴，2 为 Z 轴，3 为 U 轴；

Dist 表示位移量，为矢量值，以脉冲值表示；

Pos 表示坐标值，它表示该轴运动的目标坐标值；

StrVel 表示电机启动速度；

MaxVel 表示最大运动速度，亦即平稳运行时的速度；

Tacc 表示从启动速度加速到最大速度所用的时间；

Tdcc 表示从最大速度减速到启动速度所用的时间；

各个参数表明，运动轴的位移量、最大速度、最小速度以及加减时间都可以通过调用该函数来设定，使运动控制更能符合要求。

#### b) 两轴联动

`_8164_start_tr_move_xy(CardNo,DistX,DistY,StrVel,MaxVel,Tacc,Tdcc);`

`_8164_start_ta_move_xy(CardNo,DistX,DistY,StrVel,MaxVel,Tacc,Tdcc);`

其中 tr, ta, StrVel, MaxVel, Tacc, Tdcc 的含义同上；

CardNo 为运动控制卡的卡号，一般默认为 0；

DistX 为 X 轴的位移量，以脉冲值表示；

DistY 为 Y 轴的位移量，以脉冲值表示；

PosX 表示坐标值，它表示 X 轴运动的目标坐标值；

PosY 表示坐标值，它表示 Y 轴运动的目标坐标值；

此处也可以是 xz,yz 表示 X 轴和 Z 轴联动，Y 轴和 Z 轴联动。

两轴联动的另一种形式能实现四轴中的任意两轴都可以实现平面内的圆弧插补运动。圆弧插补运动就是从初始点开始，按照顺时针或逆时针方向运动至终点，初始点和终点之间的轨迹为圆或圆弧。当然还必须设定圆弧的圆心，在绝对运动模式下给出圆心的坐标，在相对运动模式下给出起点相当于圆心的距离。函数如下：

`_8164_start_r_arc_xy(CardNo,OffsetCx,OffsetCY,OffsetEx,OffsetEy,DIR,MaxVel)`

`_8164_start_a_arc_xy (CardNo,Cx,Cy,Ex,Ey,DIR,MaxVel);`

其中 OffsetCx 表示圆心在 X 轴方向的偏移量；

OffsetCy 表示圆心在 Y 轴方向的偏移量；

OffsetEx 表示圆弧终点在 X 轴方向的偏移量；

OffsetEx 表示圆弧终点在 Y 轴方向的偏移量；

Cx 表示圆心的 X 向的绝对坐标值；

Cy 表示圆心的 Y 向的绝对坐标值；

r 表示相对运动，a 表示绝对运动；

DIR 表示圆弧插补的方向，0 表示顺时针，1 表示逆时针；

此处的 xy 也可以是 xz 或 yz 表示 X 轴和 Z 轴圆弧插补或 Y 轴和 Z 轴的圆弧插补。圆弧插补如图 5-5 所示：

```
_8164_start_a_arc_xy(0, 1000, 0, 0, 1800.0, 600.0, 1000.0)
```

该函数表示圆心在(1000, 0)，圆弧起点在原点，终点在(1800,600)的顺时针的圆弧插补，且为绝对运动。

c) 三轴联动

```
_8164_start_tr_line3(CardNo,*AxisArray,DistX,DistY,DistZ,StrVel,  
MaxVel,Tacc,Tdcc);
```

```
_8164_start_ta_line3(CardNo,*AxisArray,PosX,PosY,PosZ,StrVel,  
MaxVel,Tacc,Tdcc);
```

其中 tr, ta, CardNo, StrVel, MaxVel, Tacc, Tdcc, Distx, DistY, PosX, PosY 的含义同上；

line3 表示 X 轴,Y 轴,Z 轴三轴联动；

AxisArray 表示四个坐标轴的数组 AxisArray[4]的数据名；

DistZ 为 Z 轴的位移量，以脉冲值表示；

PosZ 表示坐标值，它表示 Z 轴运动的目标坐标值；

基于三轴运动的函数，就可以实现三个坐标轴在空间的线性插补，从而实现量程范围内的空间任意两点之间线性运动。

如图 5-6 所示，为从 P0 点到 P1 点的线性插补运动。显然 X 轴，Y 轴，Z 轴运动速度比为：Δ X: Δ Y: Δ Z，且满足下式：

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \sqrt{\left(\frac{\Delta X}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Z}{\Delta t}\right)^2}$$

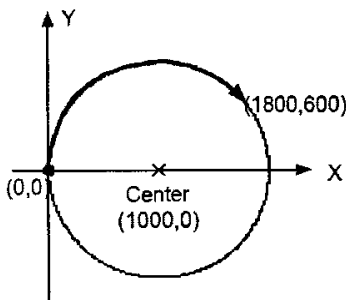


图 5-5 圆弧插补

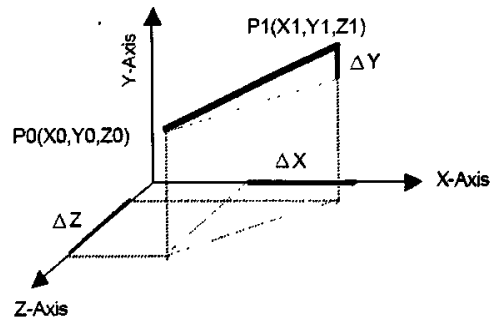


图 5-6 三轴联动线性插补

d) 四轴联动

```
_8164_start_tr_line4(CardNo,*AxisArray,DistX,DistY,DistZ,DistU,
```

StrVel,MaxVel,Tacc,Tdcc)

\_8164\_start\_ta\_line4(CardNo,\*AxisArray,PosX,PosY,PosZ,PosZ,StrVel,MaxVel,Tacc,Tdcc)

其中 line4 表示四轴联动;

DistU 为 U 轴的位移量, 以脉冲值表示;

PosU 表示坐标值, 它表示 U 轴运动的目标坐标值;

其它参数的含义同上。

### 5.3.2 PCI-8164 的速度运动模式

速度运动模式可以分为梯形速度运动模式和 S 曲线运动模式;

#### a) 梯形速度运动模式

梯形速度运动模式 (图 5-7) 即一个轴运动到指定的位置的整个过程中速度与时间的关系曲线为梯形如右图所示。在这种模式下, 输出脉冲从启动速度加速到最大速度运动, 并以最大速度平稳运动, 最后减速至开始速度停止。其中加速时间和减速时间可以在运动控制函数中设置, 亦即加速和减速的加速度可以不同, 该梯形速度曲线可以为非对称梯形形状。

#### b) S-曲线运动模式

S-曲线运动模式 (图 5-8) 即一个轴运动到指定的位置的整个过程中速度与时间的关系曲线为 S-曲线如右图所示。S-曲线运动在加减速时具有平滑的跃迁, 相对于梯形速度运动模式, 可以有效改善加减速时的振动, 减少损耗, 延长电机和机械结构的寿命。

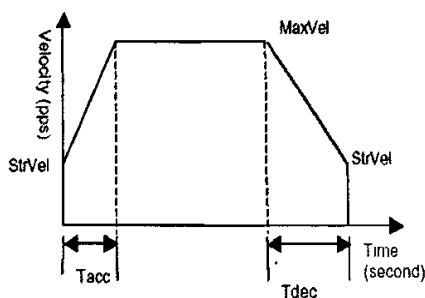


图 5-7 梯形速度运动模式

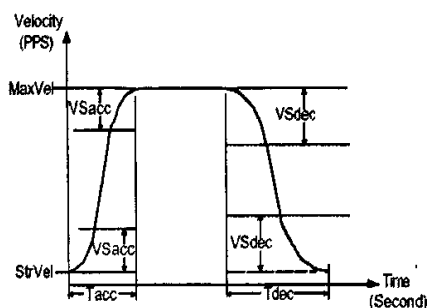


图 5-8 S-曲线运动模式

### 5.3.3 连续运动模式

PCI-8164 具有连续运动模式, 在该模式下, 可以实现单轴的连续运动和多轴的连续插补运动, 按既定轨迹平滑运动。

在 8164 卡上包含三个寄存器, 一个为当前运行的工作寄存器, 另外两个为备用寄存器。首先, 这三个寄存器都清零。然后执行第一个动作,

CPU 往第二备用寄存器里写入相应的值，此时第一备用寄存器和工作寄存器都是空的，所以第二备用寄存器的数据自动移动工作寄存器中，ASIC 会立即执行它。当调用第二个命令时，CPU 将它写入第二个备用寄存器中。此时第一备用寄存器是空的，数据会自动由第二备用寄存器移到第一备用寄存器中等待执行。再有新的命令，同样也是先写入到第二备用寄存器中。当第一个动作执行完毕后，工作寄存器状态为空，第一寄存器的数据才可以进入到工作寄存器中，并由 ASIC 立即执行。第二备用寄存器的数据随即进入到第一备用寄存器中。每当一个动作执行完，ASIC 都会给 CPU 一个中断脉冲，实际上就是备用寄存器状态为空的中断脉冲，以启动数据在寄存器间的流动。通过调用如下函数就可使能连续运动：

`_8164_set_continuous_move(AxisNo,conti_flag);`

其中 AxisNo 表示轴号，0 为 X 轴，1 为 Y 轴，2 为 Z 轴，3 为 U 轴；conti\_flag 为标志连续运动使能的逻辑变量，1 表示使能，0 则反之。

5.3.4 运动控制人机界面

该软件对测量机的运动控制方式有软件控制和手柄控制两种。软件的运动控制通过运动控制工具栏操作，如图 5-9 所示，人机界面简单、易学。可以实现各轴的正反向运动，单击 ▼ 按钮弹出速度参数设置对话框，如图 5-10 所示。手柄控制方式使为了测量工件时近距离操作移动测头，测量前要打开联机遥控手柄，下拉菜单如图 5-11 所示。

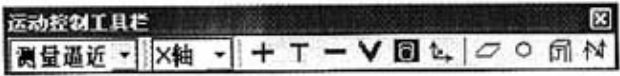


图 5-9 运动控制工具栏

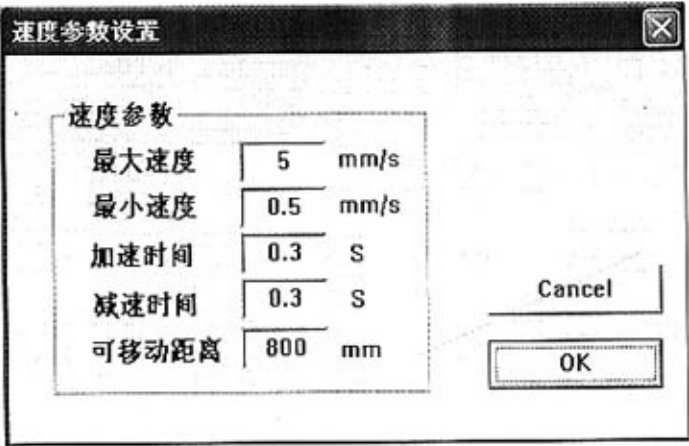


图 5-10 速度参数设置对话框



图 5-11 手柄控制菜单



5.4 测量数据的处理

三坐标测量机发明之初，由于当时计算机技术的限制，并不能自动对数据进行处理，而时通过脚踏板采集数据，然后用计算器计算测量结果。随着计算机技术的迅猛发展，如今测量机都具有强大的数据处理功能，并逐步朝着智能化方向发展。

5.4.1 数据采集与存储

数据的采集就是记录采样点的坐标值，伺服电机驱动器在接收到测头的触测信号后，自动保存角度编码器信号，软机通过调用伺服电机控制卡 PCI-8164 函数库实现对采样点坐标的数据采集。

`_8164_get_position(I16 AxisNo,F64*pos);`

其中：AxisNo: 轴号；\*pos: 角度编码器值，范围（-134217728~134217727）

本设计采用微软 Access 数据库<sup>[53]</sup>对测量数据进行保存，以便后续的数据处理操作，如图 5-12 所示，表中的 X、Y、Z 坐标值都是未经过误差修正的原始测量数据。



日期	时间	项目	X	Y	Z
2006-10-30	16:32:29	内/外径基准点坐标	-113.123	0	119.7615
2006-10-30	16:33:25	内/外径基准点坐标	-92.5355	-48.932	119.0715
2006-10-30	16:34:04	内/外径基准点坐标	-92.5355	14.97	119.3925
2006-10-30	16:34:43	内/外径基准点坐标	-47.4145	-9.6265	118.536
2006-10-30	16:36:05	内/外径基准点坐标	-57.5695	-33.828	118.5975
2006-10-30	16:38:02	内/外径测量点坐标	-64.241	-21.8325	112.332
2006-10-30	16:38:38	内/外径测量点坐标	-108.508	-21.8325	112.332
2006-10-30	16:39:17	内/外径测量点坐标	-89.5465	-38.1345	112.332
2006-10-30	16:39:41	内/外径测量点坐标	-89.5465	7.359	112.332
2006-10-30	22:35:52	平面点坐标	0	0	-57.0825
2006-10-30	22:36:48	平面点坐标	78.67	0	-59.2975
2006-10-30	22:37:23	平面点坐标	78.67	-15.8285	-58.4545
2006-10-30	22:37:23	平面点坐标	78.67	-15.8285	-58.4845
2007-03-06	15:25:05	两平面/端面间距F	233.056	330.0185	294.142
2007-03-06	15:25:36	两平面/端面间距F	211.698	352.9505	294.142
2007-03-06	15:25:57	两平面/端面间距F	225.7345	338.074	284.955
2007-03-06	15:31:11	两平面/端面间距S	98.169	191.143	287.278
2007-03-06	15:30:52	两平面/端面间距S	98.2015	191.1265	287.278
2007-03-06	15:31:11	两平面/端面间距S	98.169	191.143	287.278
2007-03-06	15:35:01	两平面/端面间距S	98.3755	191.3205	287.278
2007-03-06	15:36:23	两平面/端面间距F	214.5605	349.8645	295.9685
2007-03-06	15:36:37	两平面/端面间距F	229.755	333.7125	295.9685

图 5-12 测量点云坐标数据存储数据库表

5.4.2 误差修正

本设计采用误差分离与修正技术来提高测量精度，主要修正 21 项几何误差对测量精度的影响。测量机装配完毕经磨合稳定后，首先预先对各

项误差进行分离,保存在如图 5-13 所示的数据表内,程序在计算测量结果时,调用该误差数据对采集的原始数据进行修正。若测量机误差数据发生改变,只需修改该误差数据表格,而不必修改程序,给日后使用带来很大方便。

图 5-13 分离误差存储数据库表

### 5.4.3 坐标变换

三坐标测量机测量效率高,主要得益于工件安装定位不需要象传统测量仪器那样物理调整找正,而是通过测量软件系统对任意放置的待测工件建立工件坐标系,计算时软件系统自动进行坐标变换,实现软件找正。

基准坐标系又称绝对坐标系,它以三轴零位时测头中心的坐标为原点,三轴导轨运动方向为坐标轴建立的坐标系。

工件坐标系是为了修正被测工件摆放误差而在工件上建立的坐标系

建立工件坐标系之后,工件被测部位的采样点的位置就可用工件坐标系坐标值表示,而测头的运动控制,都是基于基准坐标系的坐标值的,所以就必须将工件坐标系的坐标值通过坐标变换,变换成基准坐标系的坐标值。要实现坐标变换,必须建立变换矩阵<sup>[51]</sup>。

设工件坐标系原点  $O'$  在基准坐标系的坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 如图 5-14 所示, 设  $XYZ'$  和  $XYZ$  分别为新、旧直角坐标系,  $O'X', O'Y', O'Z'$  三轴矢量在旧坐标系中的方向余弦为:

$$\begin{aligned} O'X' &= \{l_1, m_1, n_1\} \\ O'Y' &= \{l_2, m_2, n_2\} \\ O'Z' &= \{l_3, m_3, n_3\} \end{aligned}$$

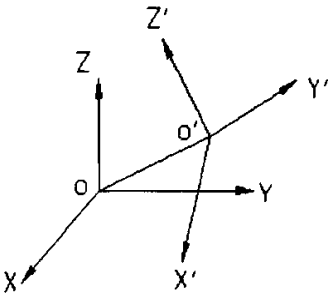


图 5-14 坐标系的平移和旋转

得到坐标旋转矩阵  $M$ ,

$$\text{且 } M = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix}, \text{ 其中 } M^{-1} = M^T, M \text{ 为单位正交矩阵。令 } S = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix},$$

$S$  为平移矢量, 若工件坐标系中任一点  $P$  的坐标为  $(x, y, z)$ , 由空间解析几何可知  $P$  在基准坐标系中的坐标值  $P'(x', y', z')$ , 则  $P' = M^{-1}P + S$ 。

#### 5.4.4 结果显示

测量数据点云保存在数据库内, 对点云中不同几何元素的数据进行处理的对话框如图 5-15 所示, 选择测量项目, 然后单击数据处理按钮弹出相应测量项目的参数设置对话框, 如图 5-16 所示, 设置好测量参数, 软件自动完成对相应点云数据的处理, 得出结果, 如图 5-17 所示。每次得出测量结果都将保存在如图 5-18 所示的结果数据库<sup>[47]</sup>中, 以备查询。

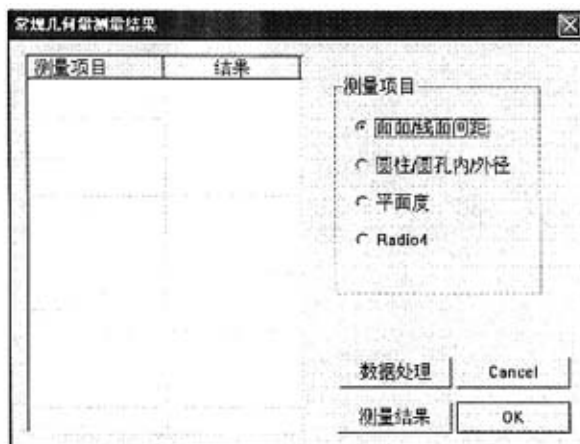


图 5-15 测量结果数据处理对话框



图 5-16 测量数据参数设置对话框

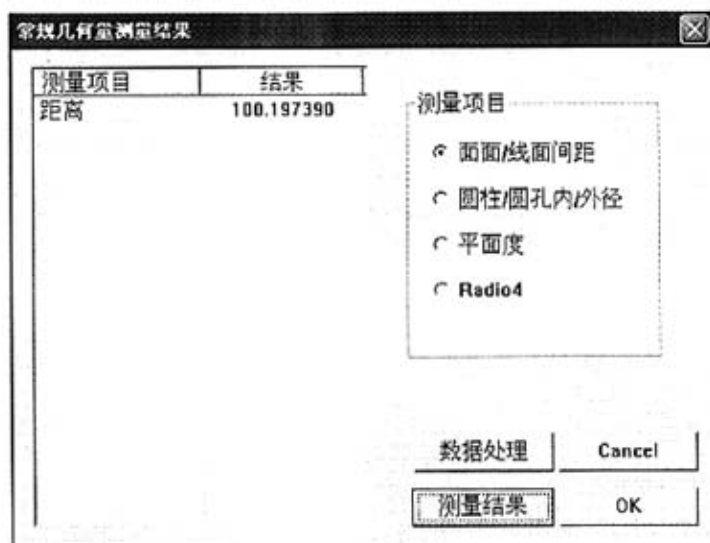


图 5-17 测量结果的显示

Microsoft Access - [常规几何量测量结果 : 表]					
文件(F) 编辑(E) 视图(V) 插入(I) 格式(O) 记录(R) 工具(T) 窗口(W) 帮助(H)					
时间	日期	项目1	实测值	项目2	数值
2006-05-21	16:38:28	圆度	16.69333709084		
2006-05-21	16:39:42	圆度	16.69333709084		
2006-05-22	15:51:46	直径	67.55941479427	圆度	16.69333709084
2006-05-22	15:52:30	直径	67.55941479427	圆度	16.69333709084
2006-05-23	20:23:02	距离	400.4823359192		0
2006-05-23	21:51:29	距离	402.0168370763		0
2006-05-23	21:52:15	距离	400.4823359192		0
2006-05-23	22:52:33	距离	400.4823359192		0
2006-10-31	15:07:22	平面度	.041738557477		0
2006-10-31	15:14:51	平面度	.041738557477		0
2006-10-31	15:15:28	平面度	.041738557477		0
2006-10-31	15:16:32	平面度	.083455162194		0
2006-10-31	15:16:59	平面度	.083455162194		0
2006-10-31	15:17:40	平面度	.008346322768		0

图 5-18 测量结果存储数据库表

## 5.5 常规几何量测量

任何一个工件的测量，可以分解为基本几何要素的测量和由这些测量得到的基本几何要素之间的相互关系的运算<sup>[49]</sup>。

### 5.5.1 基本几何要素的数据处理

#### a) 直线的最小二乘拟合

若工作平面为 XY,  $P_i(x_i, y_i) (i=1 \sim N)$  为测点的集合，其中  $N > 2$ ，设理想拟合的直线方程为： $y = ax + b$ ；

$$\text{则有: } a = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} \quad b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N x_i y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2}$$

则该直线的单位方向向量  $(l, m, n)$  为:

$$l = 1/\sqrt{1+a^2} \quad m = a/\sqrt{1+a^2} \quad n = 0$$

b) 平面的最小二乘拟合

设在平面上有  $N$  个测量点  $P_i(x_i, y_i, z_i) (i=1, 2, \dots, N)$ , 理想平面的方程为

$$z = Ax + By + C$$

$$S_{11} = \sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N} \quad S_{12} = \sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad S_{13} = \sum_{i=1}^N x_i z_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N z_i}{N}$$

$$S_{22} = \sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N y_i)^2}{N} \quad S_{23} = \sum_{i=1}^N y_i z_i - \frac{\sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N z_i}{N}$$

$$\text{则 } A = \frac{S_{12}S_{23} - S_{13}S_{22}}{S_{12}^2 - S_{11}S_{22}}, \quad B = \frac{S_{12}S_{13} - S_{11}S_{23}}{S_{12}^2 - S_{11}S_{22}}, \quad C = \frac{\sum_{i=1}^N z_i - A \sum_{i=1}^N x_i - B \sum_{i=1}^N y_i}{N}$$

那么, 该平面的单位法矢  $(l, m, n)$  为:

$$l = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + 1}}, \quad m = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + 1}}, \quad n = \frac{-1}{\sqrt{A^2 + B^2 + 1}}$$

c) 圆的最小二乘拟合

设有  $N$  个测量点  $P_i(x_i, y_i, z_i) (i=1 \sim N)$ , 理想圆方程为

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$$

进行圆的最小二乘拟合之前, 必须保证圆心  $(x_0, y_0)$  在坐标原点附近, 即当  $(x_0, y_0)$  足够小时, 才能做线性变换:  $C = x_0^2 + y_0^2 - R^2$ , 运用最小二乘原理则有:

$$S_{11} = 2[\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N}] \quad S_{12} = 2[\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}]$$

$$S_{13} = \sum_{i=1}^N (x_i^3 + x_i y_i^2) - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N} \quad S_{22} = \sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N y_i)^2}{N}$$

$$S_{23} = \sum_{i=1}^N (x_i^2 y_i + y_i^3) - \frac{\sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}, \quad x_0 = \frac{S_{12}S_{23} - S_{13}S_{22}}{S_{12}^2 - S_{11}S_{22}}$$

$$y_0 = \frac{S_{12}S_{13} - S_{11}S_{23}}{S_{12}^2 - S_{11}S_{22}}, \quad C = \frac{2x_0 \sum_{i=1}^N x_i + 2y_0 \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}, \quad R = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 - C}$$

当  $(x_0, y_0)$  不是足够小, 线性变换的误差不可忽略, 应该以求得的圆心坐标  $(x_0, y_0)$  为新坐标系的原点, 对测量点进行坐标平移后再进行最小二乘拟合, 直至  $(x_0, y_0)$  足够小。

d) 球体的最小二乘拟合

设在球面上有  $N$  个测量点  $P_i(x_i, y_i, z_i) (i=1 \sim N)$ , 理想球面方程为:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2$$

$(x_0, y_0, z_0)$  为球心,  $R$  为球半径, 类似于圆, 只有当  $(x_0, y_0, z_0)$  足够小时,

才可做变换:  $C = x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - R^2$

$$x_0 = \frac{SS_{12}SS_{23} - SS_{13}SS_{22}}{SS_{12}^2 - SS_{11}SS_{22}}, \quad y_0 = \frac{SS_{12}SS_{13} - SS_{11}SS_{23}}{SS_{12}^2 - SS_{11}SS_{22}}$$

$$z_0 = \frac{S_{24} - S_{13}x_0 - S_{23}y_0}{S_{33}}, \quad C = \frac{1}{N} [2x_0 \sum_{i=1}^N x_i + 2y_0 \sum_{i=1}^N y_i + 2z_0 \sum_{i=1}^N z_i - \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)]$$

$$R = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - C}$$

其中

$$SS_{11} = S_{11}S_{33} - S_{13}^2, \quad SS_{12} = S_{12}S_{33} - S_{13}S_{23}, \quad SS_{13} = S_{14}S_{33} - S_{13}S_{34}$$

$$SS_{22} = S_{22}S_{33} - S_{23}^2, \quad SS_{23} = S_{24}S_{33} - S_{23}S_{34}$$

$$S_{11} = 2[N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2], \quad S_{12} = 2[N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i]$$

$$S_{13} = 2(N \sum_{i=1}^N x_i z_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N z_i), \quad S_{14} = N \sum_{i=1}^N x_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)$$

$$S_{22} = 2[N \sum_{i=1}^N y_i^2 - (\sum_{i=1}^N y_i)^2], \quad S_{23} = 2(N \sum_{i=1}^N y_i z_i - \sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N z_i)$$

$$S_{24} = N \sum_{i=1}^N y_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) - \sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2),$$

$$S_{33} = 2[N \sum_{i=1}^N z_i^2 - (\sum_{i=1}^N z_i)^2], \quad S_{34} = N \sum_{i=1}^N z_i(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) - \sum_{i=1}^N z_i \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)$$

当 $(x_0, y_0, z_0)$ 不足够小时, 以 $(x_0, y_0, z_0)$ 为新坐标系原点, 对采样数据进行坐标变化, 直到 $(x_0, y_0, z_0)$ 为足够小才。

### 5.5.2 几何要素之间的相互关系

该文主要用到的几何要素之间的相互关系包括距离、角度。

两个要素之间的距离包括两点距离、点线距离、点面距离、线面距离和面面距离等。点包括圆心、球心和交点等, 线包括圆柱轴线、法线和交线等。如图 5-19 所示为一些两要素之间的距离。

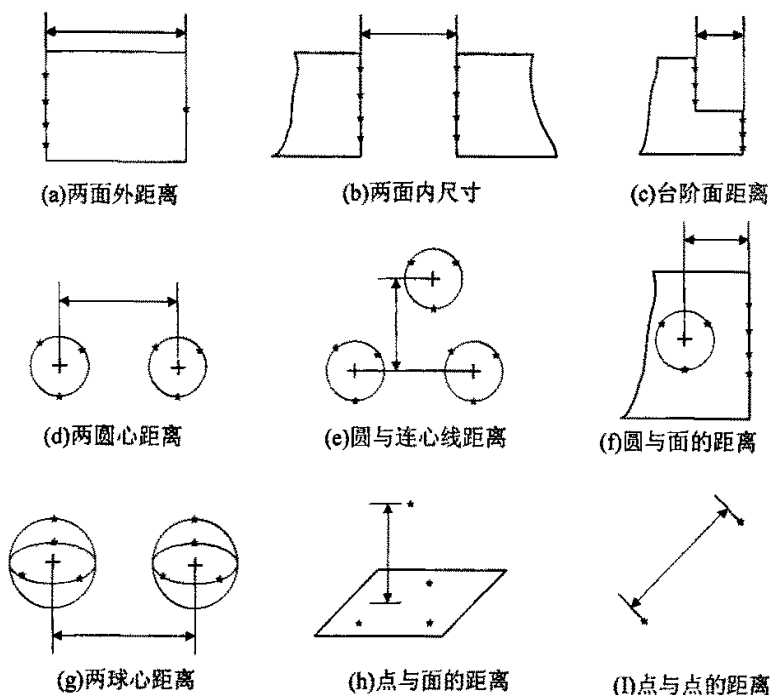


图 5-19 两要素之间的距离

两个要素之间的角度包括两线之间的角度、线面之间的角度和两面之间的角度。线包括圆柱轴线、交线和两点连线等, 面包括测量拟合得到的平面。如图 5-20 所示为一些两要素之间的角度。

### 5.5.3 形状与位置误差

形状与位置误差包括直线度误差、平面度误差、圆度误差、圆柱度误差、垂直度误差、位置度误差、轮廓度误差、同轴度误差和跳动误差等。

利用三坐标测量机测量形状与位置误差，以坐标测量机的坐标系为基准，将测量过程转化为坐标点位置的采集，然后数据处理软件再根据所测得的点云坐标数据，按最小二乘或最小包容准则计算出所需测量的形位误差值。

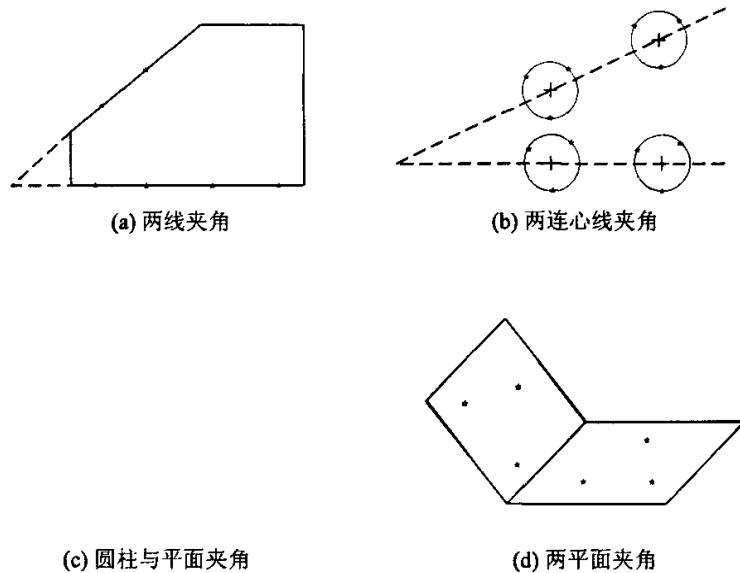


图 5-20 两要素之间的角度

## 5.6 自动测量路径规划

测量机测量某一工件上的具体某一元素（如平面、球体、圆柱等）时，需要有测量路径，测量路径是由三轴的直线运动合成，保证检测过程中测头与工件或其他物体不发生碰撞，手动测量时是由测量操作者随时对障碍信息进行处理确定的，自动测量则靠软件程序自动生成。

测量路径有三大要素（如图 5-21 所示），即名义探测点、名义触测方向和逼障点。逼障点的数量和测量点的数量是相对应的，设置逼障点的原则是安全和路径最短原则。

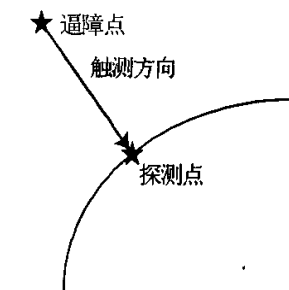


图 5-21 测量路径的三要素

### 5.6.1 直线测量的路径规划

直线测量时，首先要示教测量的范围，即被测直线的两个端点，然后通过软件设置回退距离和测量间距，程序会自动生成逼障点和测量路径。逼障点在距离被测直线为回退距离的一条直线上，间隔即为测量间距，自动测量时，测头从起始点位置对应的逼障点向垂直于被测直线的方向运动，触测到被测直线后回退到下一个逼障点，直到完成测量。如图 5-22



示。

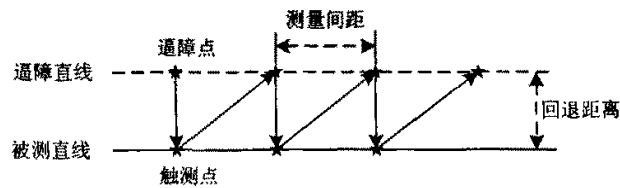


图 5-22 直线测量路径

### 5.6.2 圆弧测量的路径规划

#### 1) 外圆弧测量时的路径规划

外圆弧测量时，首先要通过手动示教的方法得知圆弧的圆心位置、圆弧半径和圆弧的起始和终止点，即先通过手动控制测头去触测工作台上的工件圆弧，理论上测量 3 个点即可以确定圆心位置和圆弧半径，另外还要按顺序示教被测圆弧的起始和终止点。上述示教过程完成后测量机即进入对外圆弧的自动测量过程，逼障点选取在比被测圆弧名义半径大回退距离  $d$  的逼障圆弧上，测量方向是逼障点与圆弧圆心的连线，指向圆心，测头从逼障点向圆心方向移动，触测到被测圆弧表面则回退到下一逼障点，测量完成后测头自动回到安全位置。如图 5-23 所示。

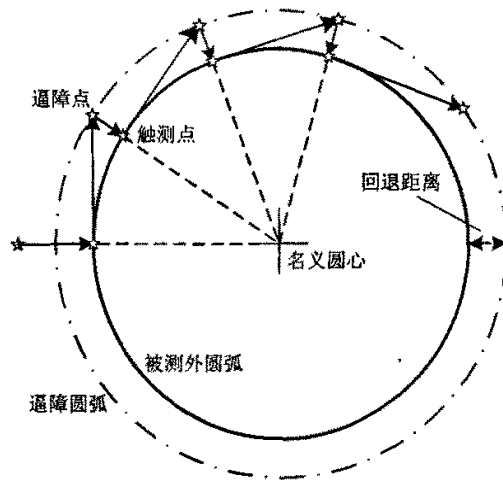


图 5-23 外圆弧测量路径

#### 2) 内圆弧测量时的路径规划

内圆弧测量与外圆弧类似，首先也要通过手动示教的方法得知圆弧的圆心位置、圆弧半径和圆弧的起始和终止点，即先通过手动控制测头去触测工作台上的工件圆弧，理论上测量 3 个点即可以确定圆心位置和圆弧半径，另外还要按顺序示教被测圆弧的起始和终止点。上述示教过程完成后测量机即进入对外圆弧的自

动测量过程，逼障点选取在比被测圆弧名义半径小回退距离  $d$  的逼障圆弧上，测量方向是逼障点与圆弧圆心的连线，被离圆心，测头从逼障点向被离圆心方向移动，触测到被测圆弧表面则回退到下一逼障点，测量完成后测头自动回到安全位置。如图 5-24 所示。

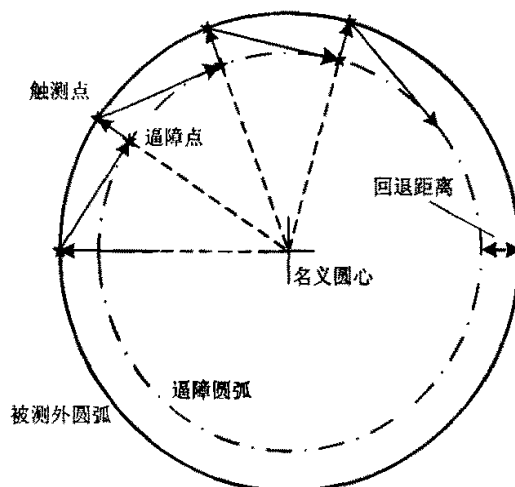


图 5-24 内圆弧测量路径

## 5.7 结晶器内外尺寸的自动测量

结晶器内外表面的测量要求是测量横截面的内外尺寸，每隔一定距离测量一个横截面的内外尺寸。要完成结晶器内外横截面尺寸的测量，测量点很多，若通过手动控制测头触测，操作人员劳动强度大，效率低，并且人为因素对测量结果也会产生影响。故为该测量机开发了针对结晶器的自动测量程序。

测量时要先导入被测结晶器的型号参数，另外还要手动示教触测结晶器某一横截面的特征点已确定结晶器的空间位置和边界条件。设置和示教完成后测量机便进入自动测量过程，从最上横截面开始，每个横截面都是由直线和圆弧组成，完成一个横截面的测量 Z 轴便下移一定距离开始下一横截面的自动测量，直到完成所有横截面的测量，测头自动回退到安全位置。

该机自动测量程序通过导入结晶器型号参数，可以方便的对不同型号的结晶器进行测量。

## 第六章 总结与展望

### 6.1 总结

本论文项目来源于马钢公司第三钢轧总厂企业横向课题“异型坯连铸结晶器多维坐标尺寸自动测量机的研制”，主要在机械结构的设计、伺服电机运动控制、数据采集系统的设计、误差源分析与建模、误差分离与修正、自动测量路径规划、测量点云坐标数据的处理、软件程序的开发等方面进行一系列的研究。

**本人主要完成以下工作：**

1、测量机主机结构的设计，本测量机采用 L 桥式结构，完成主体结构 and 主要部件的选型与设计。

2、设计手动测量控制器，实现对测头三维多级运动的平稳控制，方便测量采样，提高测量精度和效率。

3、分析影响测量机测量精度的各项误差，并应用齐次坐标转换理论建立 21 项几何误差修正的数学模型。对测量机的测量不确定度进行评定，找出影响测量精度的瓶颈因素。

4、应用双频激光干涉仪，自准直仪，激光跟踪仪等高精度仪器对三坐标的 21 项几何误差进行分离。对影响精度较大的各项误差进行修正，通过软件的方法提高仪器的测量精度。

5、在 Visual C++6.0 环境下编写软件实现测头的三维运动控制，采样路径的规划设计，各轴移动坐标的数据采集，数据库的读写，采集数据的误差修正，坐标系的转换，测量数据的处理，结果的显示和输出等。

### 6.2 展望

本测量机将应用于生产实际，由于钢厂的恶劣环境和特殊的测量要求，使测量机的测量精度和测量效率受到限制，所以还有一些方面需要继续完善。

1、由于被测结晶器的特殊形状，测量机的测杆较长、较细，刚度难以保证，测量机触测运动时，容易造成测头抖动，引起较大的触测误差，因此，还需在提高测杆刚度方面继续进行研究。

2、由于工厂的恶劣环境，还需不断改进手动控制器的电路设计，加

强其抗电磁干扰能力。使其更加方便、可靠。

3、继续探索几何误差分离的新方法，不断提高误差分离的高精度和高效率。

4、完善测量机的软件功能，充分发挥运动控制卡强大功能，是触测过程更加平稳、快速；扩大软件的自动测量功能，提高测量效率，减小人为因素干扰；完善软件界面，使其人机对话更加便捷。

## 参考文献

- [1] 张国雄, 三坐标测量机, 天津: 天津大学出版社, 1999
- [2] 张国雄, 三坐标测量机的发展趋势, 中国机械工程, 2000, 11(1-2): 222-226
- [3] 曹麟祥, 汪慰军, 三坐标测量机的现状、发展和未来[J], 宇航计测技术, 1996, Vbl, 16, No 2: 15~19
- [4] <http://www.magang.com.cn> 马钢公司网站
- [5] 刘春青, 李艳辉, 结晶器铜管的修复工艺, 天津冶金, 2005, 3: 9-10
- [6] 陈克, 张代萃, 方坯连铸机结晶器点检仪的研制, 冶金设备, 1999, 6: 1-3
- [7] 陈永成, 张太生, 小方坯结晶器铜管内腔控制的实践, 河南冶金, 1999, 3: 30-31
- [8] 章立军, 结晶器自动坐标测量机电气控制系统的设计, 合肥: 合肥工业大学硕士学位论文, 2006
- [9] 庞振基, 黄其圣, 精密机械设计[M], 北京: 机械工业出版社, 2000, 27~328
- [10] 赵跃进, 何献忠, 精密机械设计基础[M], 北京: 北京理工大学出版, 2003, 172~184
- [11] 赵松年, 张奇鹏, 机电一体化机械系统设计[M], 北京: 机械工业出版社, 1996, 228-243
- [12] 天津大学精仪系精密机械教研室, 精密机械零件[M], 天津: 天津大学出版社, 1982, 212-247
- [13] 王茁, 李颖卓, 张波, 机电一体化系统设计, 北京: 化学工业出版社, 2005
- [14] 邱映辉主编, 机械设计, 北京: 清华大学出版社, 2004
- [15] 张腊梅, 结晶器内腔尺寸三坐标测量机机械结构设计, 合肥: 合肥工业大学硕士学位论文, 2005
- [16] 孟超, 费业泰, 光栅信号时钟脉冲细分的误差分析, 宇航计测技术, 16(6), 1996, 12
- [17] 田红芳, 受温变形试验装置高精度光栅测量系统的研究, 合肥工业大学硕士学位论文, 1994
- [18] 曾毅编著, 现代运动控制系统工程, 北京: 机械工业出版社, 2006
- [19] 李幼涵编著, 伺服运动控制系统的结构及应用, 北京: 机械工业出版社

社, 2006

- [20] 中村哲夫, 三坐标测量机测量误差的评价方法, 国外计量, 1994, 2: 8-13
- [21] 林璨, 三坐标测量机的精度检定与位置误差补偿, 现代计量测试, 1995, 2: 21-24
- [22] 吴敏镜, 从精密加工看计量技术的现状与发展, 宇航计测技术, 2000, Vo20 (2): 25-27
- [23] 杨洪涛, 费业泰, 陈晓怀等, 纳米三坐标测量机不确定度分析与精度设计, 重庆大学学报, 2006, Vol, 29 (8): 82-86
- [24] Shenwang Lin, Yetai Fei, Bangang Chen, Research on Dynamic Accuracy of Coordinate Measuring Machines, Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, 2006/5, 507-512
- [25] 杨公仆著, 工业机器人与机器人学, 西安, 西安交通大学出版社, 1989
- [26] 朱长江, 邓引斌编著, 偏微分方程教程, 北京: 科学出版社, 2005
- [27] 董晨松, 三坐标测量机动态误差研究, 天津大学博士论文, 2002
- [28] 马修水, 三坐标测量机动态误差源分析, 建模与修正技术研究, 安徽: 合肥工业大学博士论文, 2005,
- [29] 赵英剑, 张国雄, 三坐标测量机非刚体误差补偿模型中附加函数的研究, 组合机床与自动化加工技术, 1999, No 6: 28-32
- [30] 费业泰, 赵静, 王宏涛, 马修水, 三坐标测量机动态误差研究分析, 仪器仪表学报, 2004, No 4 (增刊): 773-776
- [31] 费业泰, 卢荣胜, 动态测量误差修正原理与技术, 北京: 中国计量出版社, 2001
- [32] 费业泰, 误差理论的研究与进展, 计量技术, 1998, No 8,
- [33] 严普强, 黄长艺, 机械工程测试技术基础, 北京: 机械工业出版社, 1985
- [34] 费业泰, 赵静, 陈维方, 三坐标测量机动态特性与动态精度研究, 第四届海峡两岸制造技术研讨会论文集(杭州), 2004年11月, P277-284
- [35] 施昌彦, 测量不确定度评定与表示指南, 北京: 中国计量出版社, 2000
- [36] 沙定国, 误差分析与测量不确定度评定, 北京: 中国计量出版社, 2003
- [37] 肖明耀, 康金玉译, 测量不确定度表达指南, 北京: 中国计量出版社, 2000, 8
- [38] 董晨松, 穆玉海, 张国雄, 评定三坐标测量机的动态误差, 中国机械工程, 1998, Vol, 9(7)
- [39] 林洪桦, 现代测量误差分析及数据处理, 计量技术, 1997, No 6: 41~45
- [40] 费业泰, 误差理论与数据处理, 北京: 机械工业出版社, 2000

- [41] 马修水, 费业泰, *New Measuring Scale of CMMs*, ISIST'2004, 哈尔滨工业大学出版社, Vol, 1, PP906~910
- [42] 马修水, 费业泰等, *ISO10360—2 标准若干问题的探讨*, 合肥工业大学学报, No 10, 2004
- [43] Orbak A, Y, *Modeling and Adaptive Control of Coordinate Measuring Machine[J]*, American Control Conference, 2004
- [44] 北京博彦科技发展有限公司, *Visual C++开发教程*, 北京: 清华大学出版社, 2000
- [45] 编程高手工作室, *Visual C++ 6.0 编程高手*, 北京: 北京希望电脑公司, 1999
- [46] 赛奎春, *Visual C++工程应用与项目实践*, 北京: 机械工业出版社, 2005
- [47] 周启涛, 高英编著, *Visual C++数据库开发基础与应用*, 北京: 人民邮电出版社, 2005
- [48] 振动计算与隔振设计组编, *振动计算与隔振设计*, 北京: 中国建筑工业出版社, 1976
- [49] 周长发编著, *科学与工程数值算法*, 北京: 清华大学出版社, 2002
- [50] 侯永涛, 黄娟编著, *SolidWorks 机械设计实用教程*, 北京: 化学工业出版社, 2006
- [51] 石博强, 赵金编著, *MATLAB 数学计算与工程分析范例教程*, 北京: 中国铁道出版社, 2005
- [52] 朱衡君主编, *MATLAB 语言及实践教程*, 北京: 清华大学出版社, 2005
- [53] 卢湘鸿主编, *Access 数据库与程序设计*, 北京: 电子工业出版社, 2006

## 攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] Shenwang Lin, Yetai Fei, Bangang Chen, Research on Dynamic Accuracy of Coordinate Measuring Machines, Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, 2006/5, 507-512, EI
- [2] 陈宝刚, 李光珂, 程文涛, 三坐标测量机动态精度影响因素研究, 黑龙江科技学院学报, 2007/1, 62-66
- [3] 陈宝刚, 费业泰, 结晶器坐标测量机不确定度分析及精度保证, 组合机床与自动化加工技术, 2007/4, 62-65
- [4] 陈宝刚, 费业泰, 李光珂, 程文涛, 长悬臂三坐标测量机测端抖动实时修正系统, 组合机床与自动化加工技术, 2007/5, 50-52
- [5] 陈宝刚, 费业泰, 齐次坐标在测量机误差修正模型中的应用, 工具技术, 已录用
- [6] 陈宝刚, 费业泰, 深内腔尺寸检测专用三坐标回转扫描测头, 计量技术, 已投稿