

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 18220051301729

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

光学元件测量轨迹规划与数据处理技术研究

Research on Path Planning and Data Processing Technology for

Optical Lens Measuring

郭 江

指导教师姓名: 郭隐彪 许乔 教授

专 业 名 称: 精密仪器及机械

论文提交日期: 2008 年 5 月

论文答辩时间: 2008 年 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。

2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

随着先进光学元件的设计和制造技术的发展,各种精密光学元件尤其是非球面光学元件被广泛地应用于各种高清晰度电视、高速复印机及航天、航空、国防等行业中,与此同时,对非球面光学元件的面形及其参数的检测提出了更高的要求。

通常光学元件的加工主要包括以下几个阶段:铣磨成型,粗磨,精磨,抛光。为保证各个阶段的加工精度,检测技术成为先进光学元件制造技术的关键。合理的检测方法以及数据处理方法对评价光学元件面形质量以及提高补偿加工的精度起着很大的影响。

本课题的主要目的是针对光学元件粗磨和精磨阶段的精度要求,设计出合理的检测系统和测量轨迹,建立并实现一套可用于光学元件检测的数据处理系统。本文的研究内容主要包括:

1. 采用离线检测与在线检测相结合的方式满足光学元件加工不同阶段的精度要求。完成了在线检测系统的软硬件设计,通过对比在线检测与离线检测的实验结果,分析出影响在线检测系统检测精度的主要因素,并针对这些因素采取相应的措施抑制检测系统的误差,进一步提出了一种优化的无线检测系统设计方案。

2. 分别对平面、斜面、轴对称非球面以及非轴对称非球面面形的光学元件进行了测量轨迹规划,并通过大量测量轨迹实验从数据采集精确度、测量效率、测量坐标系以及适用情况等几个方面对各种测量轨迹进行了深入的分析。

3. 设计了数据处理系统,通过标度变化、剔除奇异项、平滑处理等操作实现了对测量数据的预处理,同时分析了测量误差产生的原因,建立了基于标准件的系统误差分离与修正方法,并通过误差补偿实验验证了该方法的可行性与准确性。

4. 建立了基于非线性最小二乘法的曲线/曲面拟合算法和基于三次样条曲面的曲面插值算法,通过拟合算法分析与测试实验验证了拟合算法的精确性,并通过曲线/曲面拟合与曲面插值实验对测量评价算法进行了有效的应用。进一步,将曲面插值技术应用到 CCOS 的抛光路径规划的研究,提出了一种基于网格划分的路径规划方法。

关键词: 光学元件; 测量轨迹规划; 误差补偿; 测量评价算法

Abstracts

With the development of optical design and manufacturing technology, more and more optical lenses especially aspheric lenses have been widely used in high-resolution television, high-speed copycats, space navigation and etc.. At the same time, the requirement for the accuracy of optical lens is becoming higher, so the machining and measuring of lens have become an important topic in the optical system.

The machining process of lens mainly includes shaping grinding, rough grinding, fine grinding and polishing. In order to guarantee the machining accuracy, measuring is becoming a key technology. The reasonable measuring and data processing method is very helpful for compensation machining and evaluating the surface quality of lens. This paper presents designing the measuring system and path, setting up and carrying out a data processing system for the advanced optical lens manufacturing.

This project stems from National Hi-Tech Research and Development Program of China (863 Program), which name is “Ultra-precision grinding and measuring”. The main work can be described as follows:

1. The on-machine measuring system is integrated with off-machine measuring system during different stages of optical lens manufacturing. The on-machine measuring system is designed. Through comparing the results of on-machine and off-machine measuring experiments, the main factors affecting the on-machine measuring system are acquired, and some steps which can reduce the errors effectively are presented and carried out. In addition, a kind of optimized on-machine measuring system is designed.
2. The measuring paths for different kinds of lenses including plane lens, inclined plane lens, axisymmetric lens and non-axisymmetric lens are planned. Through large amounts of experiments, the paths are compared and estimated from different aspects including measuring efficiency, application situations and etc..
3. The data processing system is designed. The measuring data is pre-processed by scale conversion, singularity points deleting and data smoothing. The causes of measuring system errors are analyzed, and the system error separation and revision method is set up by using standard lens. Through error separation and revision experiments, the system errors are separated, and the results indicate that the method is reliable and precise.
4. Based on the principle of the nonlinear least square fitting method and spline surface interpolation, the curve and surface fitting algorithm and surface interpolation algorithm are

carried out separately. The fitting algorithm is verified by testing experiments. The experiment results indicate that the fitting residual errors are in the 1 nm magnitude order, so the curve fitting algorithm can be used in the high-precise curve and surface fitting exactly. Furthermore, a kind of path planning method for CCOS (Computer Controlled Optical Surfacing) is presented by using the surface interpolation technology mentioned above.

Key words: Optical lens; Path planning; Errors compensation; Evaluation algorithm

厦门大学博士论文摘要库

目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 国内外研究状况 | 3 |
| 1.3 本课题的主要研究内容 | 5 |
| 第二章 先进光学制造中在线检测系统设计 | 7 |
| 2.1 检测方式分析 | 7 |
| 2.2 在线检测系统设计 | 8 |
| 2.2.1 系统原理 | 9 |
| 2.2.2 系统硬件 | 9 |
| 2.2.3 系统软件 | 12 |
| 2.3 离线与在线检测实验对比 | 15 |
| 2.4 检测系统优化设计 | 16 |
| 2.5 小结 | 18 |
| 第三章 光学元件测量轨迹规划 | 19 |
| 3.1 平面/斜面测量轨迹规划 | 19 |
| 3.1.1 光栅式测量轨迹 | 19 |
| 3.1.2 ‘Z’字形测量轨迹 | 20 |
| 3.2 轴对称面形测量轨迹规划 | 21 |
| 3.2.1 子午线式测量轨迹 | 21 |
| 3.2.2 光栅式测量轨迹 | 22 |
| 3.2.3 同心圆式测量轨迹 | 23 |
| 3.2.4 螺旋线式测量轨迹 | 24 |
| 3.3 非轴对称面形测量轨迹规划 | 25 |
| 3.3.1 非轴对称非球面方程 | 26 |
| 3.3.2 沿主轴方向光栅式测量轨迹 | 26 |
| 3.3.3 沿副轴方向光栅式测量轨迹 | 27 |
| 3.3.4 同心圆+光栅式测量轨迹 | 28 |

| | |
|-------------------------------|-----------|
| 3.4 数据采集过程 | 30 |
| 3.5 测量轨迹实验 | 30 |
| 3.6 小结 | 33 |
| 第四章 数据预处理与误差补偿 | 34 |
| 4.1 数据处理系统设计 | 34 |
| 4.2 数据预处理 | 35 |
| 4.2.1 标度变化 | 35 |
| 4.2.2 剔除奇异项与平滑处理 | 35 |
| 4.2.3 数据预处理实验 | 38 |
| 4.3 误差补偿 | 39 |
| 4.3.1 误差补偿技术 | 39 |
| 4.3.2 误差产生原因及分类 | 41 |
| 4.3.3 系统误差分析 | 42 |
| 4.3.4 基于标准件的误差分离与误差修正方法 | 46 |
| 4.3.5 误差分离与修正实验 | 49 |
| 4.4 小结 | 51 |
| 第五章 测量评价算法及实现 | 52 |
| 5.1 面形测量主要评价指标 | 52 |
| 5.2 拟合算法基本原理 | 53 |
| 5.3 曲面插值基本原理 | 56 |
| 5.4 拟合算法分析与测试 | 61 |
| 5.5 曲线/曲面拟合与曲面插值实验 | 65 |
| 5.6 扩展技术研究 | 70 |
| 5.7 小结 | 72 |
| 第六章 结论与展望 | 73 |
| 6.1 结论 | 73 |
| 6.2 展望 | 73 |
| 参 考 文 献 | 74 |
| 硕士期间科研成果 | 76 |
| 致 谢 | 78 |

Contents

| | |
|---|-----------|
| Chapter 1 Introduction | 1 |
| 1.1 Background..... | 1 |
| 1.2 Home and Abroad Correlative Research..... | 3 |
| 1.3 Outline Of The Thesis..... | 5 |
| Chapter 2 Machine Measuring System Design | 7 |
| 2.1 Measuring Method Analysis..... | 7 |
| 2.2 On-Machine Measuring System Design..... | 8 |
| 2.2.1 The Principle of System..... | 9 |
| 2.2.2 The Hardware of System..... | 9 |
| 2.2.3 The Software of System..... | 12 |
| 2.3 Comparison of On-Machine and Off-Machine Measuring Experiments..... | 15 |
| 2.4 Optimization of On-Machine Measuring System..... | 16 |
| 2.5 Conclusion..... | 18 |
| Chapter 3 Measuring Path Planning | 19 |
| 3.1 Plane/Inclined Plane Lens Measuring Path Planning..... | 19 |
| 3.1.1 Grating Measuring Path..... | 19 |
| 3.1.2 ‘Z’ Measuring Path..... | 19 |
| 3.2 Axisymmetric Lens Measuring Path Planning..... | 21 |
| 3.2.1 Meridian Measuring Path..... | 21 |
| 3.2.2 Grating Measuring Path..... | 22 |
| 3.2.3 Concentric-circle Measuring Path..... | 23 |
| 3.2.4 Spiral Measuring Path..... | 24 |
| 3.3 Non-Axisymmetric Lens Measuring Path Planning..... | 25 |
| 3.3.1 Equation of Non-Axisymmetric Aspheric Lens..... | 26 |
| 3.3.2 X-axis Grating Measuring Path..... | 26 |
| 3.3.3 Z-axis Grating Measuring Path..... | 27 |
| 3.3.4 Concentric-circle & Grating Measuring Path..... | 28 |
| 3.4 Data Collection Process..... | 30 |

| | |
|---|-----------|
| 3.5 Measuring Path Experiment | 30 |
| 3.6 Conclusion | 33 |
| Chapter 4 Data Pre-processing and Error Compensation | 34 |
| 4.1 Data Processing System Design | 34 |
| 4.2 Data Pre-processing | 35 |
| 4.2.1 Scale Conversion..... | 35 |
| 4.2.2 Singularity Points Deleting and Data Smoothing..... | 35 |
| 4.2.3 Data Pre-processing Experiment..... | 38 |
| 4.3 Error Compensation | 39 |
| 4.3.1 Error Compensation Technology..... | 39 |
| 4.3.2 Classification and Causes of Errors..... | 41 |
| 4.3.3 System Error Analysis..... | 42 |
| 4.3.4 Error Separation and Revision Method by Standard Lens..... | 46 |
| 4.3.5 Error Separation and Revision Experiment..... | 49 |
| 4.4 Conclusion | 51 |
| Chapter 5 Evaluation Algorithm and Implementation | 52 |
| 5.1 Surface Evaluation Parameter..... | 52 |
| 5.2 The Principle of Fitting Algorithm..... | 53 |
| 5.3 The Principle of Interpolation Algorithm..... | 56 |
| 5.4 Test and Analysis of Fitting Algorithm..... | 61 |
| 5.5 Experiments of Curve/Surface Fitting and Surface Interpolation..... | 65 |
| 5.6 Extend Application of Surface Interpolation Technology..... | 70 |
| 5.7 Conclusion..... | 72 |
| Chapter 6 Conclusions and Prospects | 73 |
| 6.1 Conclusions..... | 73 |
| 6.2 Prospects..... | 73 |
| References | 74 |
| Appendix | 76 |
| Acknowledgement | 78 |

第一章 绪论

1.1 研究背景

先进光学元件主要包括平面、斜面、球面及非球面光学元件等，加工材料主要是光学玻璃、微晶玻璃、结构陶瓷等硬脆性材料，因此目前主要采用超精密磨削加工，作为一种解决各种高尺寸精度、高表面质量、高形状精度的有效加工方法，超精密磨削能大大地提高零件的加工效率。由于磨削加工工具砂轮是用磨料的许多微小切削刃进行切削，所排除的切屑也极其微小，所以加工精度高。而且由于砂轮是多刃工具，同时参与切削的切削刃很多，虽然排除的切屑很小，但加工效率较高。随着超精密磨削加工技术的不断发展，光学元件正在向小型高精度化和大型高精度化方面快速发展^[1-3]。

球面是光学系统中用的最多的光学元件，平面/斜面光学元件主要用作透射及反射镜。除此之外，非球面光学元件越来越多的被光学系统采用。非球面光学元件是指面形由多项高次方程表示，面形上各点的半径均不相同的光学元件。它不仅可以减少光学元件的数量和重量，缩小系统的尺寸，简化仪器结构，而且有利于像差校正，改善成像质量，还能够增加光学设计的自由度，降低成本。因其具有优良的光学性能，在航天航空、机载设备、卫星、惯性制导及惯性导航系统激光制导系统、红外探测系统等国防高科技领域，以及民用光电产品方面，如投影仪、显微镜、照相机、CD 读写装置和激光加工机等领域有着广泛的应用。一些主要的光学器件及其应用领域如表 1.1 所示^[4-7]。

表 1.1 光学器件的材料及应用

| 器件类型 | 材料 | 应用领域 |
|---------|-----------|----------------|
| 普通镜头 | 光学玻璃 | 显微镜、CD/DVD、投影仪 |
| 红外线镜头 | 单晶锗、单晶硅 | 夜视镜、医用内视镜、激光加工 |
| 普通反射镜 | 铝合金、铜、磷青铜 | 激光加工机、大型显示器 |
| 注射模具 | 陶瓷、镍合金 | 激光打印机 |
| 椭圆柱体反射镜 | 石英玻璃、碳化硅 | X 射线系统 |

在非球面光学元件中，人们常见的是具有回转轴的回转非球面即轴对称非球面，而对非球面的另一种——自由曲面却知道的很少。在光学上，将这种不具备任何对称轴的非球面称为自由曲面，也叫做非对称面。这种曲面上任何一点的曲率均不相同。平面、

斜面、球面、轴对称非球面及自由曲面的性质比较如表 1.2 所示。

表 1.2 几种曲面性质比较

| 性质 \ 曲面 | 平/斜面 | 非球面 | |
|---------|------|--------|------|
| | 球面 | 轴对称非球面 | 自由曲面 |
| 对称轴 | 无数条 | 有且只有一条 | 无对称轴 |
| 曲面上点的斜率 | 相同 | 不同 | 不同 |
| 加工方法难易 | 易 | 难 | 最难 |
| 检测方法难易 | 易 | 难 | 最难 |

对于先进光学元件的面形测量八十年代以来，国内外对于干涉法、接触式三坐标测量机法、激光束偏转法等各种测量方法进行了大量研究。迄今为止，常用的光学元件面形的检测方法如图 1.1 所示^[8-11]。

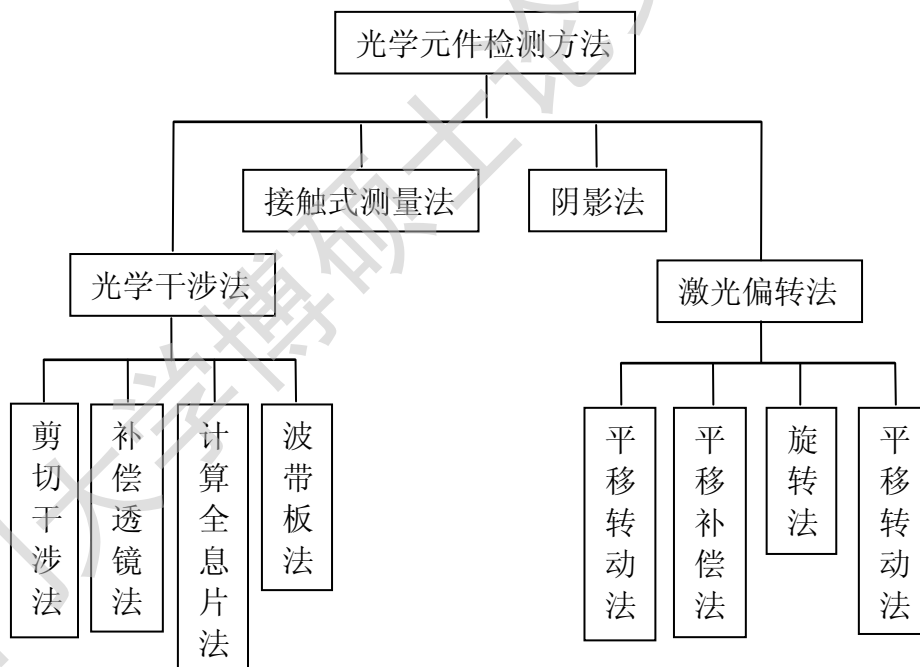


图 1.1 光学元件面形检测方法

在各种非接触式测量方法中，干涉法以其灵敏度高，加之补偿镜、计算全息、移相、外差、锁相、条纹扫描等先进技术的出现，一直成为光学元件检测的主要途径。这种方法基于光学干涉的原理，通过涉取被测表面的整幅干涉图像，可一次处理整幅图像信息，具有速度快，精度高的特点（优于 $\lambda/50$ ）。干涉法尽管有上述优点，但它要求光源有很好的时间和空间相关性；要配置自准光路，检测手段复杂；一般均以激光为光源，测量装置要求有很好的机械稳定性；对外界干扰十分敏感，需很好的维护，不宜作现场的在

线检测。此外,干涉法测量相对较小,被测表面的最大起伏量一般为几十微米,很少可测到上百微米,不宜用于大口径大矢高光学元件的检测^[12-17]。

接触式测量发展经历了较长时间,其系统结构较为成熟,有较高的准确性和可靠性;且接触式测量直接接触工件表面,受工件表面的反射特性、颜色及曲率等影响较小,配合测量软件,接触式测量可精确测量柱面、球面、非球面等几何球面。接触式测量中常使用三坐标测量机,利用接触式测微计测得一批离散数据,然后经过适当的数据处理以获得定量的误差分布,测量过程简单,直观,可靠。但其设备和代价均十分昂贵;触点与被测表面接触,易损伤被测表面,不利于表面质量的保持;由于每次只是扫过某个截面,不能反映整个表面的形貌状况;而且精度低,测量效率不高^{[8][12]}。

阴影法是一种建立在几何光学基础之上的半定量检验方法,它基于观测会聚同心球面波的波面完整程度来实现高灵敏度测量的,被检元件的缺陷引起了波面畸变,根据刀口切割阴影图的轮廓和亮度变化,可以判断出被检测元件的不完善程度和部位,该方法多用于检验大口径光学元件的面形误差,存在主观判断误差、定量困难、灵敏度不高等缺点。

八十年代以来,用激光束偏转法测量光学元件的研究报导增多。这种方法不需要标准参考面,通用性强,可对任意面形的非球面零件进行测量,不论是二次或高次曲面,也不论是凸面还是凹面,均可测量,而且是对被测面形进行绝对测量,测量范围大;测量精度较高,精度达到 $\lambda/5 \sim \lambda/10$,接近干涉法的水平。但激光束偏转法存在测量过程复杂,不全面,不直观的问题,相应的数据处理也较为复杂^[18]。

总之,光学元件的测量方法多种多样,各有所长,必须根据实际情况,从测量精度和范围、经济性以及仪器复杂程度等各方面因素综合考虑,再加以选用。

1.2 国内外研究状况

先进光学元件的测量系统主要有两大类,一类是接触式测量,另一类是非接触式测量。对于接触式测量系统目前英国 Taylor Hobson 公司的非球面轮廓测量系统在国际上享有极高声誉,该公司是专门制造接触式测量系统的国际权威。图 1.2 是该公司最新产品 Talysurf PGI 1240,具有 200mm×12.5mm 的测量范围、0.8nm 的传感器分辨率、0.06 μm 的形状误差能力。

与接触式测量相比,非接触式测量法具有测量速度快、对被测表面无损伤等优点。扫描白光干涉法是非接触式测量研究的重点方向之一。美国 Zygo 公司生产的激光干涉仪,被公认为世界标准的干涉分析系统。Zygo 公司的 Mark IV 型干涉仪是目前商品化

的功能最为齐全的精涉测量仪器，如图 1.3 所示。其主机部分就是一台卧式的加了移相机构的菲索干涉仪，美国 Veeco 公司同样是世界领先的精密测量仪器和工艺设备制造商，主要有 DI 扫描探针显微镜、近场光学显微镜、光学轮廓仪等等。

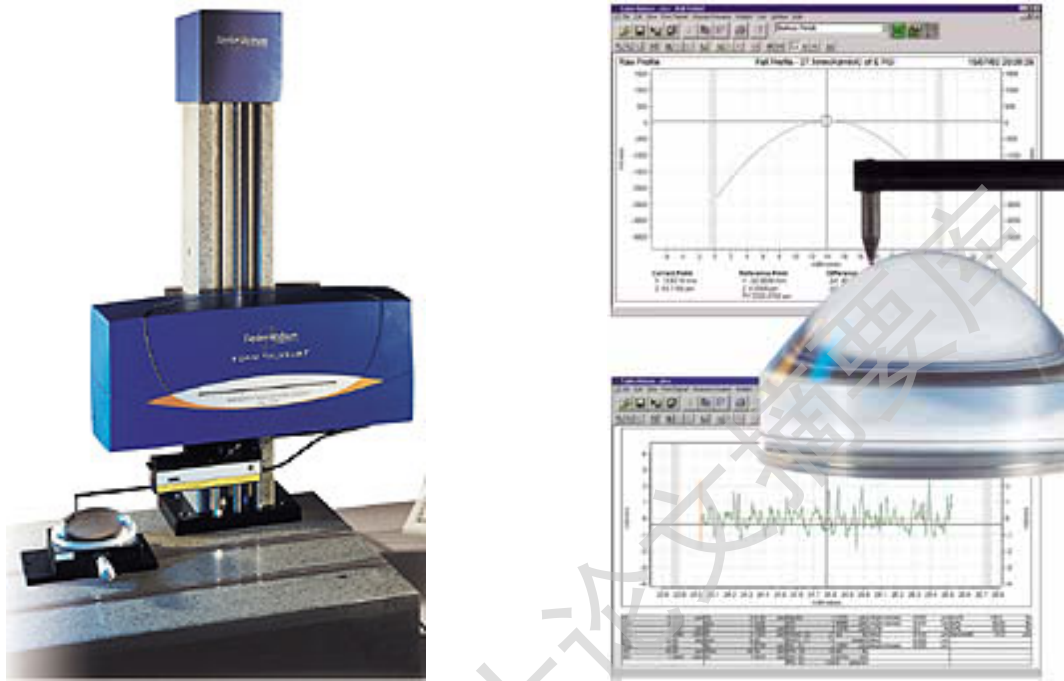


图 1.2 Talysurf PGI 1240

日本的超精密加工和检测技术虽然起步较晚，但发展速度非常快，主要应用在民用产品中，如声、光、电、图像、办公设备中的小型、超小型超精密加工。松下公司开发的 UA3P 超精密测量机，FTC 公司在 NEDO 支持下开发了小型超精密加工机 SGT100 及 SOMM 机上测量仪，都代表着世界发展水平，已经投入到实际应用。



图 1.3 Mark IV 型干涉仪

我国从 80 年代初才开始超精密加工和检测技术的研究，比国外整整落后了 20 年。

目前从事光学元件制造的研究机构主要有, 中科院光电研究所、中国航空精密机械研究所、北京机床研究所、哈尔滨工业大学、清华大学、长春光学精密机械研究所等。长春光机所应用光学国家重点实验室研制的数控非球面光学加工中心 FSG-II 集铣磨成型、磨边、精磨抛光和检测于一体^[19], 采用双测头加标准平尺结构的非球面面形测量仪, 通过对两个表头的差分, 实时消除了测量系统误差, 提高了精度, 可适用于离轴非球面研磨阶段的面形检测^[20]。浙江大学杨雨英等利用非接触式方法实时扫描测量精密光学元件表面轮廓, 利用干涉膜技术抑制各种噪声, 其横向分辨率为 $1\mu\text{m}$, 纵向分辨率为 0.1nm ^[21]。范光照教授提出的纳米三坐标测量机的结构设计与分析 (如图 1.4 所示), 张晓青^[22]等提出了一种采用平移加旋转对称法对非球面实现非接触式扫描测量的原理及方法等, 都极大地推动非球面光学元件的检测技术的发展^[23]。

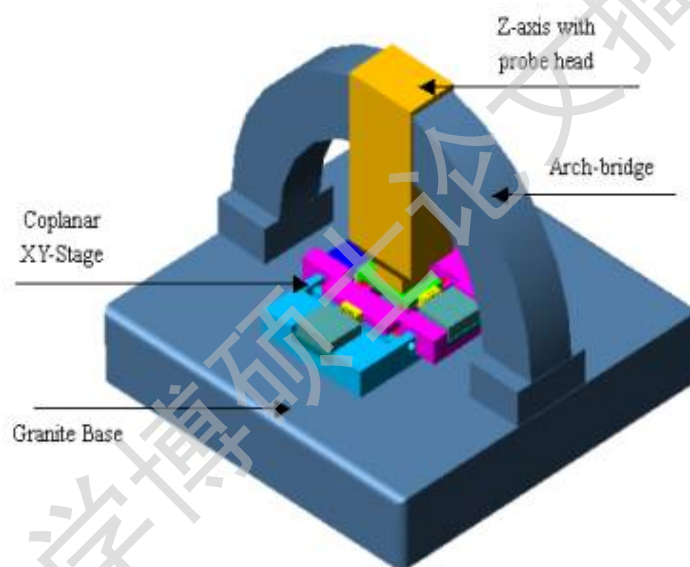


图 1.4 纳米三坐标整体机械结构示意图

1.3 本课题的主要研究内容

目前对于超精密磨削技术中离线检测技术已经发展得比较成熟, 而在线检测技术还不完善, 同时对于高精度检测技术, 在测量轨迹规划以及数据处理技术还缺少更加深入系统的研究。

本课题主要针对光学元件粗磨和精磨阶段的精度要求, 设计出合理的检测系统和测量轨迹, 建立并实现一套可用于光学元件检测的数据处理系统。

本课题得到国家“863”高科技项目(2006AA804206)和福建省高校创新团队项目的资助, 论文的主要内容包括以下几方面:

第一章简要介绍了课题的研究背景，目前光学元件的检测方法以及本课题的研究意义与内容。

第二章对三种检测方式即离线、在位及在线检测进行了分析，完成了在线检测系统的软硬件设计，通过对比在线检测与离线检测的实验结果，分析了影响在线检测系统检测精度的主要因素，并针对这些因素采取相应的措施抑制检测系统的误差，进一步提出了一种优化的无线检测系统设计方案。

第三章分析了测量轨迹对测量精度的影响，对平面/斜面、轴对称面形以及非轴对称面形进行了测量轨迹规划。通过大量测量轨迹实验进一步从数据采集精确度、测量效率、测量坐标系以及适用情况等几个方面对各种测量轨迹进行了深入的分析。

第四章设计了数据处理系统，通过标度变化、剔除奇异项、平滑处理等操作实现了对测量数据的预处理，同时对系统误差进行了深入地阐述，建立了基于标准件的系统误差分离与修正方法，并通过误差补偿实验验证了该方法的可行性与准确性。

第五章介绍了面形测量的主要评价指标，阐述了曲线/曲面拟合与曲面插值算法的基本原理，通过拟合算法分析与测试实验验证了拟合算法的精确性，并通过曲线/曲面拟合与曲面插值实验对测量评价算法进行了有效的应用。进一步，利用曲面插值技术做了 CCOS 的抛光路径规划的研究，提出了一种基于网格划分的路径规划方法。

第六章总结全文的研究结论，并指明下一步的研究方向与重点。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库