

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 200229018

UDC _____

学 位 论 文

高精度轴对称非球面及工具测量系统研究

**Study on Measurement System of High Precision
Axisymmetrical Aspheric Surface and its Tools**

谢仁宁

指导教师姓名: 郭隐彪 教授

申请学位级别: 硕 士

专 业 名 称: 测试计量技术及仪器

论文提交日期: 2004 年 10 月

论文答辩时间: 2004 年 月

学位授予单位: 厦 门 大 学

学位授予日期: 2004 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2004 年 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而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

高精度非球面制造技术是精密加工和超精密加工领域的热点问题。一直以来，非球面元件制造难，测量技术更是非球面制造技术中的瓶颈，各国专家和学者投入大量的人力和物力全方位地研究非球面的加工和测量问题。

本课题来源于国家 863 科技计划项目“大型光学非球面透镜数控高效加工

技术”。基于补偿加工的在线测量技术是目前大口径非球面加工制造采用的主流测量技术之一，本课题的研究目的就是建立一个基于补偿加工的在线测量系统，用于：

1. 进行非球面工件在线测量，为非球面补偿加工提供补偿数据。
2. 提供对非球面加工砂轮表面的测量，为砂轮提供精度指标。

本课题的主要研究工作如下：

- 1、分析与比较各种非球面检测技术的优缺点。
- 2、分析补偿加工原理和在线测量技术，根据测量系统硬件组成原理，配置测量系统硬件体系。
- 3、研究测量系统数据采集原理和数据采集方案，采用查询方式设计数据采集软件。
- 4、根据加工精度要求，基于最小二乘法，分别采用多项式拟合算法和圆拟合算法设计数据处理软件。
- 5、以 Visual C++6.0 为开发平台，采用单文档多视技术，设计应用程序界面。
- 6、进行试验评价测量系统硬件与软件，分析测量系统误差，并评价测量系统的稳定性。

关键词：非球面；数据处理；精度测量

Abstracts

The aspheric manufacture technique of high accuracy is a heat point problem in the field of precisely processes and exceeding precisely processes. Up to now, to manufacture aspheric element is hard, and its measurement technique is the vase throat in the aspheric manufacture technique. Many state nation specialists and learned men are putting their great quantity labour power and resource in all directions to research aspheric process and its measurement problem.

This task stems from one 863 science and technology program in the country, which is "high efficient numerical control process technology of large optics aspheric lens". The online measurement technique based on compensation processing is one of main measurement techniques which are adopted in the manufacture of large calibre aspheric at the moment. The aim of this task is to establish a online measurement system based on compensation processing, which is used to:

1. Carry on aspheric workpiece online measurement, and provide error data for compensation processing.

2. Carry on the surface of aspheric machining grinding wheel measurement, and provide accuracy targets for the grinding wheel.

The main research work of this task is as follows:

1. Analyse and compare merits and demerits of diversified aspheric measurement techniques.

2. Analyse the compensation processes principle and the online measurement technique, and configure measurement system hardware according to the constituent principle of measurement system.

3. Study data sample principles and data sample project, and program data sample software in inquiry means.

4. Adopt polynomial fit algorithm and circular fit algorithm separately based on the least square law to program data processing software according to the demand of machining accuracy.

5. Using the development terrace of Visual C++6.0, adopt the technique of single document/multiple views to program the application interface.

6. Design experiments to test measurement system hardware and software, analyse measurement system error, and evaluate measurement system stability.

Key word: Aspheric; Data processing; Accuracy measurement

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 本论文的背景、选题及研究意义	3
§ 1.3 本论文的研究内容	5
第二章 非球面测量系统	7
§ 2.1 在线检测与误差补偿技术	7
§ 2.2 非球面工件在线测量	10
§ 2.3 砂轮修形测量	12
§ 2.4 补偿加工控制流程	13
§ 2.5 测量系统硬件体系	14
§ 2.6 小结	21
第三章 测量数据采集	23
§ 3.1 数据采集原理	23
§ 3.2 数据采集方案分析	31
§ 3.3 小结	36
第四章 测量数据处理及算法	37
§ 4.1 数据处理流程	37
§ 4.2 数据处理算法分析	45
§ 4.3 小结	55
第五章 实验分析	56
§ 5.1 数据采集与处理实验	56
§ 5.2 非球面工件算法实验	58
§ 5.3 砂轮算法实验	60
§ 5.4 误差分析	61

§ 5.5 系统可靠性实验	62
§ 5.6 小结	64
第六章 应用程序设计	65
§ 6.1 软件开发及编程环境	65
§ 6.2 主要函数功能分析	67
§ 6.3 主要程序功能实现	70
§ 6.4 程序界面	88
§ 6.5 小结	89
第七章 结论与展望	91
致谢	93
参考文献	94

Contents

Chapter 1 Introduction	1
§ 1.1 Introduction	1
§ 1.2 Background, selection and purpose of the thesis	3
§ 1.3 Outline of the thesis	5
Chapter 2 Aspheric Measurement System	7
§ 2.1 Technology of measurement on-line and error compensation	7
§ 2.2 Measurement on-line of aspheric workpiece	10
§ 2.3 Measurement of dressed grinding wheel	12
§ 2.4 Control flow of error compensating machining	13
§ 2.5 Hardware of measurement system	14
§ 2.6 Conclusions	21
Chapter 3 Measure Data Sample	23
§ 3.1 Principle of data sample	23
§ 3.2 Analysis of data sample project	31
§ 3.3 Conclusions	36
Chapter 4 Data Processing and Arithmetic	37
§ 4.1 Flow chart of data processing	37
§ 4.2 Analysis of data processing arithmetic	45
§ 4.3 Conclusions	55
Chapter 5 Analysis of Experimentation	56
§ 5.1 Data sample and processing experimentation	56
§ 5.2 Aspheric workpiece arithmetic experimentation	58
§ 5.3 Grinding wheel arithmetic experimentation	60
§ 5.4 Analysis of error	61
§ 5.5 System stability experimentation	62

§ 5.6 Conclusions	64
Chapter 6 Application Program	65
§ 6.1 Software program and its environment	65
§ 6.2 Analysis of Primary function	67
§ 6.3 Primary program function realization	70
§ 6.4 Program interface	88
§ 6.5 Conclusions	89
Chapter 7 Conclusions and Prospect	91
Thanks	93
References	94

廈門大學博碩士論文摘要

第一章 绪论

§ 1.1 引言

在光学系统中采用非球面光学元件,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^{[1][2]}。同时,随着光学技术和计算机技术的发展,非球面元件的应用领域越来越广泛。在航天航空、国防等高科技领域,一些核心部件广泛使用高精度的非球面元件,在办公自动化设备、高质量的照相机变焦系统等高科技民用领域中,高精度的非球面光学元件也是必不可少的^{[1][3]}。这些都促使非球面的加工及检测技术成为亟待解决的问题。

因此,非球面的加工和检测技术不仅是一个国家不可或缺的技术手段,而且具有极高的经济价值,世界各国都投入大量的人力、物力研究非球面的加工和检测技术,主要的研究课题有:非球面数控成型加工、数控研磨方法;表面精度的测量及评价技术等^{[4][5]}。非球面的加工和检测技术获得快速的发展。

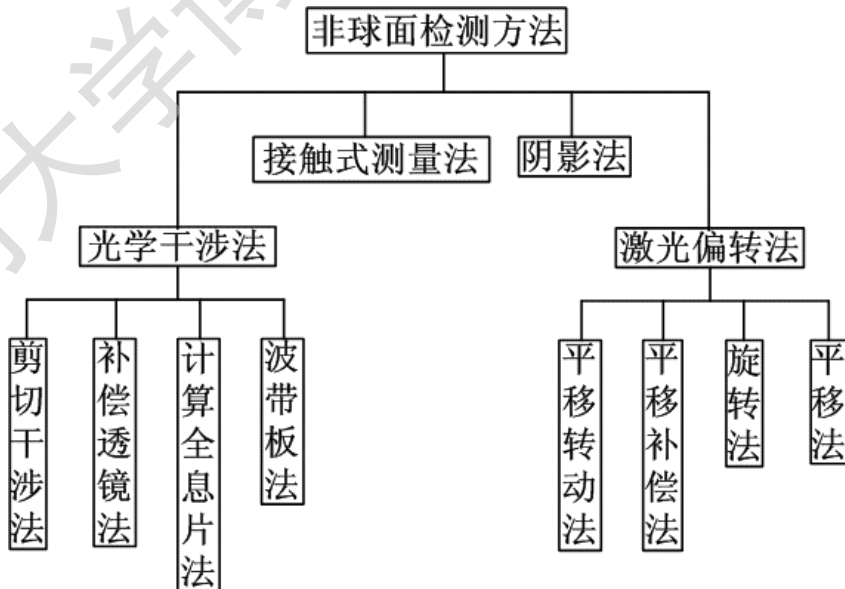


图 1.1 非球面检测方法

对于非球面零件的面形测量,八十年代以来,国内外对干涉法、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,常用的光学非球面检测方法如图 1.1 所示^{[2][3][6][7]}。

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,一直成为检测非球面的主要途径。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象,可一次处理整幅图象信息,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非球面的检测^{[2][8][9][10][11][12][13]}。

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^{[2][8]}。

八十年代以来,用激光束偏转法测量非球面的研究报导增多。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^{[2][3][14]}。

总之,非球面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,加以选用。

§ 1.2 本论文的背景、选题及研究意义

近年来，随着光学技术、计算机技术和机械制造技术的飞速发展，非球面制造技术发展很快。传统的手工加工方法虽可达到精度要求，但加工效率低，加工周期长，加工成本高。各国都在探索经济而又高效的非球面制造技术，国内外普遍认为数控加工技术是解决非球面加工难的根本途径，现在已经发展到用数控机床进行数控磨削和数控抛光加工非球面的阶段。

当前，在国际上以美国为首的一些发达国家利用数控技术和在线测量技术已经实现大径非球面的自动加工^[1]。在我国，从 80 年代才开始对超精密制造技术进行研究，比国外整整落后了 20 年，对非球面自动加工设备的研制也较晚。最近，国内一些学者提出用补偿加工技术实现大口径非球面的数控加工的方案^{[15][16]}，并研制出了对应的数控机床，将成功解决我国大口径非球面加工难的问题。



图 1.2 非球面制造设备

本课题来源于国家 863 科技计划项目“大型光学非球面透镜数控高效加工技术”，本项目的主要目的在于实现非球面光学元件制造中，加工的超圆滑性技

术,并解决非球面表面精度测量及评价问题,使得非球面光学元件加工在加工精度、加工效率和加工成本等方面均理想,达到精度高、通用性好、简单快速的目标。针对现有大型非球面、平面镜制造中加工精度很难保证和加工效率低的问题,提出大型光学非球面加工及在线测量系统的一项新技术。图 1.2 即为在加工现场拍摄的课题研究所用的制造设备,图 1.3 是在加工现场拍摄的砂轮修形照片。

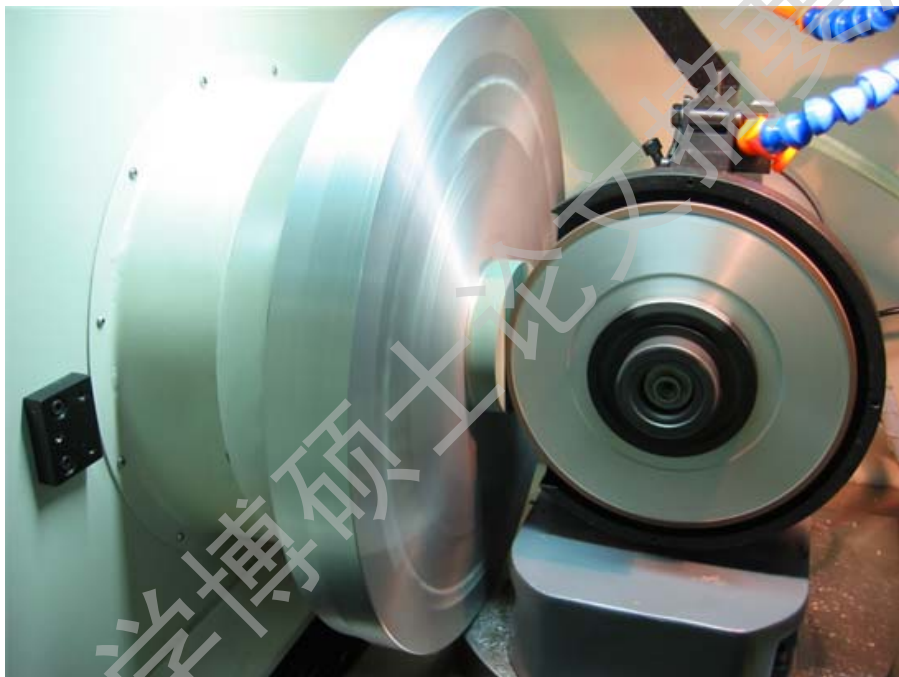


图 1.3 砂轮修形

通常加工一个非球面要经过以下几个阶段:铣磨成型,精磨,抛光。各加工阶段所需达到的精度如下所示:铣磨成型 $8\sim 12\ \mu\text{m}(\text{rms})$; 精磨 $0.3\sim 1.5\ \mu\text{m}(\text{rms})$; 抛光 $0.012\sim 0.03\ \mu\text{m}(\text{rms})$ [17]。注: rms指的是表面误差的均方根值。

对于计算机控制非球面加工技术来说,每一加工阶段都需要有定量的面形误差检测结果作为指导。面形误差从 $8\sim 12\ \mu\text{m}(\text{rms})$ 收敛到 $0.012\sim 0.03\ \mu\text{m}(\text{rms})$ 要降低两个数量级,对于这样大的跨度,应用同一种检测仪器及数据处理方法很难保证在各个阶段都如实地反应出面形误差的情况。铣磨成型阶段的精度易于由机床来保证,另外由于抛光阶段的材料去除量很小,故精磨阶段面形误差的收

敛速度将是影响整个CCOS过程效率的关键所在。精磨阶段的测量技术是计算机控制非球面加工技术的关键^{[17][18]}。由于在该阶段中面形误差与理想值偏差比较大,而且表面粗糙度不佳,所以不能应用传统的激光数字干涉仪进行测量^[17]。

本课题根据非球面补偿加工的要求,提出一种基于工控微机的高精度非接触式激光传感器的测量方案,具有以下特点:

1. 进行在线测量,为非球面补偿加工提供补偿数据。
2. 提供对非球面加工砂轮表面的测量,为砂轮提供精度指标。

测量系统实现简单,经济性好,精度高,通用性强,测量过程简便,具备快速的在线检测功能,尤其适合大口径非球面在半精加工阶段的检测。

本课题的顺利完成是实现高精度非球面加工设备国产化的重要保证,具有重大的学术意义和社会意义,不仅可以大大提高大型非球面镜的生产效率,而且可提高生产加工的“柔性”,打破外国对我国在高新技术引进上的封锁。同时,本课题的研究成果可为后人继续探索和研究非球面加工与检测技术提供有意义的借鉴。

§ 1.3 本论文的研究内容

本文对非球面工件、砂轮表面误差测量技术进行研究,建立测量系统硬件,开发测量系统软件,具体的研究内容包括:

第一章简要介绍非球面加工与检测技术的现况、本文的研究背景、来源、选题及研究意义;

第二章总体介绍补偿加工原理、在线测量技术、非球面补偿加工控制流程、测量系统硬件组成原理、测量系统硬件配置;

第三章介绍测量数据采集,包括数据采集原理、数据采集方案分析;

第四章介绍数据处理流程、数据处理算法分析,包括最小二乘法分析,多项式拟合分析,圆拟合分析;

第五章介绍测量实验分析,包括测量系统数据采集与数据处理实验分析、非球面工件算法实验、砂轮算法实验、误差分析以及测量系统稳定性实验;

第六章介绍测量系统应用程序设计，包括软件开发和编程环境、程序主要函数功能分析、主要程序功能实现和程序界面；

第七章总结全文的研究结论，并指明下一步的研究方向与重点。

第二章 非球面测量系统

数据采集与处理软件用于非球面工件测量以及非球面加工砂轮的测量，生成的数据文件用于为非球面工件补偿加工提供补偿数据，测量砂轮表面，以及用于判断所加工的非球面工件、砂轮的修形是否合格。

§ 2.1 在线检测与误差补偿技术

非球面镜的使用日益广泛，非球面镜要求的精度越来越高，许多学者从加工手段、加工设备、加工工具、测试手段等全方位对非球面的加工进行研究，以提高非球面镜的加工精度。

保证零件加工精度的途径有两条：一是靠所用的机床来保证，即机床的精度要高于工件所要求的精度，这是所谓的“蜕化”原则，也称之为“母性”原则；另一条思路：即在精度比工件要求较低的机床上，利用误差补偿技术，提高加工精度，使加工精度比机床原有精度高，这是“进化”原则，也称之为“创造性”原则。因此近年来，误差补偿技术受到重视，发展很快。

从提高加工精度的角度来看，也有两条途径：一条是误差的隔离和消除，即找出加工中误差产生的根源，采取相应措施，使误差不产生和少产生；另一条途径是误差的补偿，它立足于用相应的措施去“钝化”、抵消、均化误差，使误差减少，随着加工精度的提高，要提高加工精度的难度就越来越大，采用误差补偿技术的意义愈益重要，因此，在精密加工和超精密加工中，误差补偿技术已成为重要的手段之一。

从广义角度来讲，误差修正、校正、抵消、均化、“钝化”、分离都是误差补偿的各种形式或方法；从狭义的角度来讲，误差补偿应该是指对一定尺寸、形状、位置相差程度（差值）的补足。本文的误差补偿指的是后者。

误差补偿可分为实时与非实时误差补偿。在加工过程中，实时进行误差检测，并随后紧接着进行误差补偿，就是实时误差补偿，也就是在线检测误差

补偿，又称为动态误差补偿。其特点：误差补偿精度高；不仅可以补偿系统误差，而且可（部份）补偿随机误差；实现补偿的技术复杂；实施费用较高。非实时误差补偿只能补偿系统误差，又称之为静态误差补偿。

误差补偿又可分为软件与硬件误差补偿。软件补偿与硬件补偿的区分是看补偿信息是由软件还是由硬件产生。软件补偿的特点：有较高的动态性能，补偿值可随工作状态的变化而即时变化，即具有柔性；补偿信息通过计算机对所建立的数学模型进行运算后产生，因此所用的计算机控制系统，一般都是数控系统；补偿系统机械结构简单、经济、工作方便可靠。

误差补偿过程如下：反复检测误差出现的状况，分析其数值和方向，寻找其规律，找出影响误差的主要因素，确定误差项目；进行误差信号的处理去除干扰信号，分离不需要的误差信号，找出工件加工误差与在补偿点的补偿量之间的关系，建立相应的数学模型；选择或设计合适的误差补偿控制系统和执行机构，以便在补偿点实现补偿运动；验证误差补偿的效果，进行必要的调试，保证达到预期要求。

误差补偿系统组成示意图如图2.1所示^[19]。

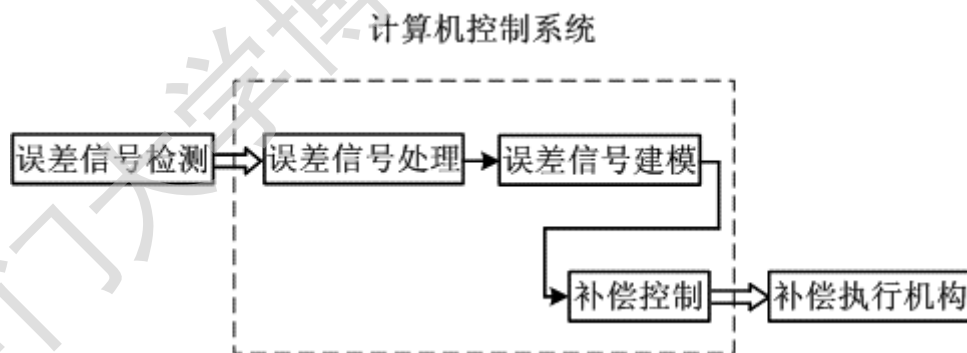


图2.1 误差补偿系统组成示意图

1) 误差信号的检测 误差信号检测是误差补偿控制的前提和基础，由误差检测系统来完成，误差信号检测的可行性和正确性直接影响误差补偿的效果。

2) 误差信号的处理 误差信号处理分离不需要的信号，提取所需要的信号，并满足误差补偿的要求。

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.

廈門大學博碩士論文摘要庫