

学校编码: 10384 分类号_____密级 _____

学 号: 200229012 UDC_____

学 位 论 文

高精度非球面加工技术研究 Research on the technology of high precision aspheric surface manufacturing

黄 浩

指导教师姓名: 郭 隐 彪 教 授

申请学位级别: 工 学 硕 士

专 业 名 称: 测试计量技术及仪器

论文提交日期: 2 0 0 5 年 3 月

论文答辩日期: 2 0 0 5 年 3 月

学位授予单位: 厦 门 大 学

学位授予日期: 2 0 0 5 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2005年3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

随着光学技术的不断发展,多种采用非球面镜的高性能光学系统被越来越广泛地应用到各种大型投影电视、高清晰度电视、高速复印机及照相机中。与球面光学零件比较,非球面光学零件具有矫正像差、简化系统、提高光学系统精度优点。当前,非球面器件广泛应用于航天、航空、国防等行业中,非球面光学零件的制造也面临着提高加工精度、提高加工效率的两大难题。超精密磨削加工克服了传统磨削、衍磨、抛光加工效率低等缺点,是一种新的加工光学非球面零件的方法。

在机械加工的各种方法中,精密磨削是决定加工工件的形状精度、表面粗糙度和表面加工质量的主要手段,可以获得高精度和高光洁度的加工表面。在金刚石砂轮对轴对称非球面的超精密加工中,通常使用三种砂轮:平面砂轮、圆弧砂轮、球面砂轮。这三种砂轮各有不同的适用范围。加工中除了砂轮的形状精度、尺寸精度及机床误差的影响外,砂轮磨削线速度及进给速度也是影响加工精度的一项重要因素。由于轴对称非球面加工特性,加工中砂轮各加工点磨削线速度及砂轮于非球面各区域停留时间均不相同。这就造成了砂轮在各加工点磨削量差异,从而影响加工精度。

分析误差产生的原因,提出了从误差数据中分离出砂轮半径误差及主轴长度误差所引起的系统误差,并更新砂轮半径数据及主轴长度数据;将分离后剩余数据作为新的补偿误差数据进行补偿加工的新方法。另提出将砂轮及工件主轴转速设为恒定,而控制砂轮进给速度来达到控制加工误差的新控制方法。并以该技术为基础设计并实现了高精度非球面制造系统控制软件。

这些技术避免了传统磨削加工方法中存在的加工量不均匀缺陷,从理论上提高了系统的加工精度。实验结果表明:

- (1) 新技术扩展了砂轮的使用范围,降低了生产成本。
- (2) 对于连续加工各种轴对称非球面,无须更换砂轮,提高了加工效率。
- (3) 增加加工系统的可靠性,提高工价的成品率。
- (4) 采用新方法的数学模型更接近于理论计算轨迹,可以进一步提高工件的加工精度。

关键词 非球面 金刚石砂轮 加工精度

Abstract

With the development of optical technology, many high performance aspheric optical systems have been widely used in high-resolution television and high-speed copycats and cameras. Compare with spherical optical accessory, the aspheric lens has the ability to simplify system structure and improve the accuracy of system. At present, aspheric lens have been widely used in space navigation and national defense area. And the manufacturing of aspheric lens also face two problem, first is improve machining accuracy and the second is improve machining efficiency. Ultra-precision grinding is a new technology of optical aspheric machining. Compare with the technology of traditional grinding, lap and polishing, it has the advantage of good efficiency.

Precision grinding is the main method to determine the workpiece's form accuracy, roughness and surface quality. It can obtain high accuracy and glabrous surface. In the Axisymmetric aspheric surface machining of diamond grinding wheel, there is three type of wheel: plane, arc and sphere wheel. They can be used in different area. Besides the effect of the form accuracy, the dimensional accuracy of the grinding wheel and the machine error to the process accuracy, the grinding linear velocity of the grinding wheel and its feed velocity are vital factors of affecting the process accuracy. Due to the characteristics of axisymmetric aspheric machining, the grinding linear velocities on different machining points of the grinding wheel, and the time for which the grinding wheel stays on different areas of the aspheric workpiece would change on the machining process. The grinding removal quantity on various machining points would be different, and the process accuracy would be worsening.

Analyze the reason of error come into being, a compensation method has been put forward that separate system error of spindle and wheel radius error from machining error data. Then update the radius and spindle length data, and set the remain error as compensate data. In addition, a control method has been put forward that set wheel and workpiece rotate speed as constant, and control the feed speed of grinding wheel to reduce the error. Base on these technologies the control software of high precision aspheric machining has been realized.

These technologies can avoid the limitation of traditional grinding method, and improve machining accuracy greatly. The experiment results show that:

- (1) The new technology extends the use area of grinding wheel and reduces produce cost.
- (2) For the continuous machining of various axisymmetric aspheric surface, the new technology don't need to change wheel and can improve machining efficiency.
- (3) It can improve the reliability of machining system, and increase the finished product rate.
- (4) The machining locus will closer to ideal locus and improves machining accuracy more.

KEYWORDS: Aspheric Surface; Diamond Grinding Wheel; Machining Accuracy

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外发展概况.....	2
1.2.1 国内发展概况.....	8
1.2.2 国外发展概况.....	10
1.3 主要研究内容.....	4
第二章 非球面制造系统控制软件设计	6
2.1 系统软件设计.....	6
2.1.1 轴对称非球面表达式.....	8
2.1.2 系统 workflow 模型.....	8
2.1.3 目标系统功能分析.....	8
2.2 功能模块设计.....	7
2.2.1 参数输入模块.....	8
2.2.2 初始加工模块.....	10
2.2.3 补偿加工模块.....	10
2.2.4 砂轮修整模块.....	10
2.2.5 误差测量模块.....	10
2.3 系统软件实现.....	7
2.2.1 界面设计.....	8
2.2.2 代码实现.....	10
2.2.3 软件功能测试.....	10
2.4 小结.....	7
第三章 轴对称非球面加工误差分离及补偿技术研究	10
3.1 非球面加工误差分析.....	6
3.1.1 加工原理.....	8
3.1.2 加工误差.....	8

3.1.3 误差补偿原理	8
3.2 误差分离模型	6
3.2.1 圆弧砂轮圆弧部分半径误差分离	8
3.2.2 圆弧砂轮中心部分半径误差分离	8
3.2.3 平面砂轮与球面砂轮半径误差分离	8
3.2.4 主轴长误差分离	8
3.3 误差分离实验	6
3.3.1 分离步骤	8
3.3.2 分离数据确定	8
3.3.3 分离结果分析	8
3.4 小结	6
第四章 非球面加工砂轮均匀磨损与速度控制技术研究	15
4.1 传统加工方法加工误差分析	6
4.1.1 传统加工方法原理	8
4.1.2 传统加工方法误差分析	8
4.1.3 磨削深度与速度关系	8
4.1.4 匀速加工误差分析	8
4.2 砂轮均匀磨损控制模型	6
4.2.1 平面砂轮均匀磨损控制	8
4.2.2 球面砂轮均匀磨损控制	8
4.2.3 圆弧砂轮均匀磨损控制	8
4.3 进给速度控制模型	6
4.3.1 加工线速度计算模型	8
4.3.2 有效磨削面积计算模型	8
4.3.3 进给速度控制模型	8
4.4 控制系统实现	6
4.3.1 均匀磨损控制实现	8
4.3.2 进给速度控制实现	8
4.5 小结	6
第五章 非球面加工功能扩展技术	30

5.1 加工方法分析	6
5.1.1 传统加工方法	8
5.1.2 新加工方法	8
5.2 新方法数学模型	8
5.2.1 凹面最小基础半径判断	8
5.2.2 加工方法	8
5.3 加工功能扩展	6
5.3.1 平面砂轮	8
5.3.2 圆弧砂轮与球面砂轮	8
5.4 实验结果分析	6
5.5 小结	6
第六章 非球面磨削实验	30
6.1 实验环境及设备	6
6.1.1 设备	8
6.1.2 砂轮平衡	8
6.1.3 砂轮修整	8
6.1.4 测量	8
6.2 磨削实验	6
6.2.1 实验条件	8
6.2.2 初始加工	8
6.2.3 补偿加工	8
6.2.4 匀速进给与变速进给加工	8
6.3 小结	6
第七章 结论与展望	30
参考文献	37
发表的论文目录	41
致谢	42

Table of Contents

Chapter 1 Introduction	3
1.1 Background	1
1.2 Correlative Research.....	2
1.2.1 Domestic Research.....	8
1.2.2 Overseas Research.....	10
1.3 Main Research Area	4
Chapter 2 Design of Aspheric Manufacturing Software	
Control System	6
2.1 Design of System Software	6
2.1.1 Formula of Axisymmetric Aspheric	8
2.1.2 Workflow Model of System	8
2.1.3 Function Analysis of Target System	8
2.2 Design of function Module.....	7
2.2.1 Parameters Entry Module	8
2.2.2 Original Machining Module	10
2.2.3 Compensation Machining Module	10
2.2.4 Wheel Truing Module	10
2.2.5 Error Measurement Module	10
2.3 Realization of System Software.....	7
2.2.1 Interface Design	8
2.2.2 Code Realization	10
2.2.3 Function Test	10
2.4 Conclusions	7
Chapter 3 Study on Error Separation and Compensation	

Technology of Axisymmetric Aspheric Machining.....10

3.1 Error Analysis of Asperic	6
3.1.1 Machining Principle	8
3.1.2 Machining Error	8
3.1.3 Error Compensation Principle	8
3.2 Error Compensation Model	6
3.2.1 Separation of Arc Wheel' s Arc Part Radius Error	8
3.2.2 Separation of Arc Wheel' s Middle Part Radius Error	8
3.2.3 Separation of Plane and Sphere Wheel Radius Error	8
3.2.4 Separation of Spindle Length Error	8
3.3 Error Separation Experiment	6
3.3.1 Separation Step	8
3.3.2 Separation Data Determinate	8
3.3.3 Separation Results Analysis	8
3.4 Conclusions	6

Chapter 4 Design of Aspheric Manufacturing Software

Control System6

第四章 Research on Uniform Wear and Feed Speed Control

Technology of Aspheric Machining.....15

4.1 Machining Error Analysis of Traditional Machining Method	6
4.1.1 Principle of Traditional Machining Method	8
4.1.2 Error Analysis	8
4.1.3 Grinding Depth and Machining Speed	8
4.1.4 Error Analysis of Uniform Speed Machining	8

4. 2 Control Model of Wheel Uniform Machining	6
4. 2. 1 Plane Wheel	8
4. 2. 2 Sphere Wheel	8
4. 2. 3 Arc Wheel	8
4. 3 Control Model of Feed Speed Machining	6
4. 3. 1 Machining Linear Speed	8
4. 3. 2 Grinding Area	8
4. 3. 3 Control Model	8
4. 4 Realization of Control System	6
4. 3. 1 Realization of Uniform Wear Machining	8
4. 3. 2 Realization of Feed Speed Control Machining	8
4. 5 Conclusions	6

Chapter 5 Function Extend Technology of Aspheric Machining30

5. 1 Analysis on Machining Method	6
5. 1. 1 Traditional Machining Method	8
5. 1. 2 New Machining Method	8
5. 2 Mathematic Model of New Method	8
5. 2. 1 Determination of Minimum Basic Radius	8
5. 2. 2 Machining Method	8
5. 3 Machining Function Extend	6
5. 3. 1 Plane Wheel	8
5. 3. 2 Arc Wheel and Sphere Wheel	8
5. 4 Experiment Result Analysis	6
5. 5 Conclusions	6

Chapter 6 Aspheric Grinding Experiments30

6. 1 Experimental Environment and Equipments	6
---	---

6.1.1 Equipments	8
6.1.2 Wheel Balance	8
6.1.3 Wheel Truing	8
6.1.4 Measurement	8
6.2 Grinding Experiments	6
6.2.1 Experimental Condition	8
6.2.2 Original Machining	8
6.2.3 Compensation Machining	8
6.2.4 Uniform and Various Feed Velocity Machining	8
6.3 Conclusions	6
 Chapter 7 Conclusions and Prospect.....	 30
 References	 37
 Acknowledgement	 42

第一章 绪论

1.1 研究背景

随着光学技术的不断发展，多种采用非球面镜的高性能光学系统被越来越广泛地应用到各种大型投影电视、高清晰度电视、高速复印机及照相机中。与球面光学零件比较，非球面光学零件具有矫正像差、简化系统、提高光学系统精度优点。当前，非球面器件广泛应用于航天、航空、国防等行业中，非球面光学零件的制造也面临着提高加工精度、提高加工效率的两大难题。超精密磨削加工克服了传统磨削、衍磨、抛光加工效率低等缺点，是一种新的加工光学非球面零件的方法。

在机械加工的各种方法中，往往以磨削作为终精加工的手段，即用磨削的方法加工出所要求的尺寸精度及形位精度。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，但加工效率还是很高的。

本文所研究的超精密加工技术，不单指某一特定的加工方法，或比某一给定的加工精度高一个量级的加工技术，而是指在机械加工领域中，某一个历史时期所能达到的最高加工精度的各种精密加工方法的总称。精密加工和超精密加工从概念上来说具有相对性，它们与那个时代的加工与测量技术水平紧密相关的。随着科学技术的进步，精密与超精密的标准也在不断地变化和提。尤其是当今科学技术突飞猛进地发展，昨天的超精密，在今天变成精密，而今天的精密，在明天又成为普通了^[1]。

在机械加工的各种方法中，精密磨削是决定加工工件的形状精度、表面粗糙度和表面加工质量的主要手段^[2]。磨削加工可以获得高精度和高光洁度的

加工表面，是光学非球面的主要加工方法之一。特殊要求的高精度非球面镜经常采用精密磨削加工方式。目前加工非球面镜片主要采用磨削方法。

1.2 发展概况

超精密加工技术是适应现代化高科技需要而发展起来的先进制造技术，是尖端技术产品开发中的关键手段，它综合应用了机械技术发展的新成果以及现代电子、传感技术、光学和计算机等高新技术，是高科技领域中的基础技术，不管是在军用工业，还是在国民经济的建设中都发挥着极其重要的作用。

目前，由于非球面镜对于提高光学系统性能的重要性，且其在军事、航天领域上的广泛应用，作为超精密加工领域中的一个关键性技术难题，各国都大力支持该方面研究。

1.2.1 国内发展

从 50 年代开始，我国相继建立了现代化的磨床、磨料磨具制造厂及专业研究所，造就了一大批从事磨床设计制造、磨料磨具研究、制造的专业科技队伍。现在，磨床工业经历了 50 年代初的测绘、仿制阶段 50 年代末期开始自行设计。从 80 年代初起开展超精密加工技术的研究，比国外落后了近 20 年^[3]。

国防科工委于 1995 年在中国航空精密机械研究所首先建立了国内第一个从事超精密加工技术研究的实验室，但是对于超精密非球面加工机床，目前国内研究较少。近年来，哈尔滨工业大学、国防科技大学、航空部二零三所、北京机床研究所、成都精密光学工程中心、中科院长春光学精密机械研究所等单位在精密设备研制上取得了一些成果，但针对非球面超精密加工工艺方面的研究还有比较大的差距，各研究单位都竞相投入较大的力量进行系统的研究^[4]。但是目前还有许多关键技术问题没有解决，远远不能满足日益高涨的需求。

1.2.2 国外发展

对非球面超精密加工研究得最早的国家是美国和前苏联。在非球面磨削机床制造方面比较发达的国家有美国、德国、日本、英国等。20 世纪 60 年代, 随着美国和前苏联之间军备上的竞争以及对太空的探索, 需要加工精度很高的航空器件, 尤其是精度很高的非球面光学元件。以此为起点, 超精密加工作为一种崭新的科技得到了迅速的发展。

其中最具有代表性的是美国 Union Carbide 公司于 1962 年研制成功 $R-\theta$ 方式的非球面刨成加工机床。这是一台具有位置反馈的双坐标数控车床, 可实时改变刀座导轨的转角 θ 和半径 R , 实现非球面的镜面加工。加工直径达到 $\Phi 380\text{mm}$, 加工工件的形状精度为 $\pm 0.6\mu\text{m}$, 表面粗糙度为 $Ra0.025\mu\text{m}$ 。

摩尔公司于 1980 年首先开发出了用 3 个坐标控制的 M-18AG 非球面加工机床。英国 Rank Pneumo 公司于 1990 年开发出 Nanoform 600 机床, 该机床能加工直径为 600mm 的非球面镜, 形状精度优于 $0.1\mu\text{m}$, 表面粗糙度优于 $0.01\mu\text{m}$ 。

而非球面镜的测量系统中, 目前 Taylor Hobson 公司的非球面轮廓测量系统在国际上享有极高声誉。而 Zygo 公司与 vecco 公司则擅长于表面测量设备则。

表 1.1 Taylor Hobson 非球面轮廓仪测量参数

型号	测量范围	分辨率	测量长
PGI 1240	12.5mm	0.8nm	200mm
PGI 840	8mm	0.8nm	120mm
Laser 635	8mm	3.2nm	120mm

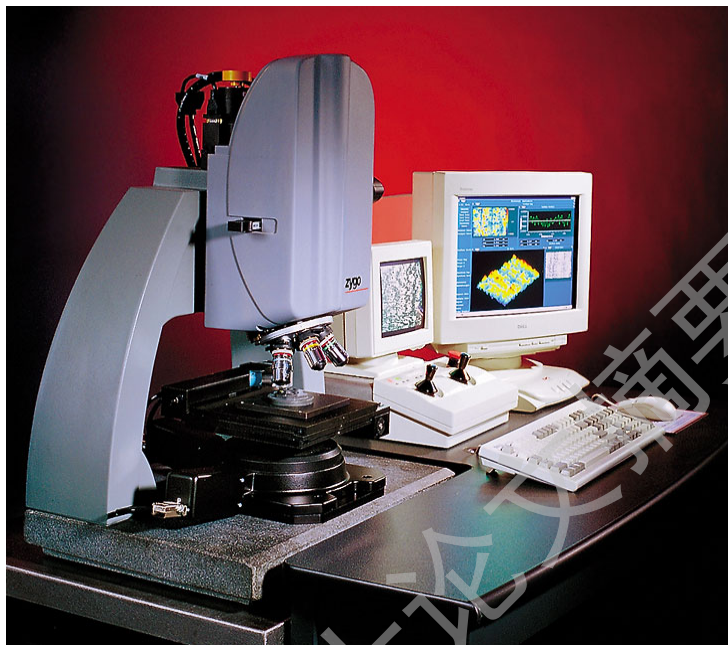


图 1.1 Zygo 公司 memview5000 表面光度仪

1.3 主要研究内容

本课题来源于国家 863 计划项目“大型光学非球面超精密加工技术研究”的部分内容。课题以大型光学非球面的超精密磨削加工技术及超精密非球面数控加工系统为主要研究内容。详细地研究了超精密磨削加工加工工艺等核心技术以及超精密磨削数控加工系统的设计与实现。为我国非球面超精磨削加工提供理论及实践基础。

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.

厦门大学博硕士学位论文摘要库