

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学 号: 19920111152789

UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

智能抛光方法去除特性及控制技术研究

Research on Removal Characteristics and Control

Techniques of Intelligent Polishing Methods

谢 银 辉

指导教师姓名: 王振忠 副教授

专业名称: 仪器仪表工程

论文提交日期: 2014年 4 月

论文答辩时间: 2014年 月

学位授予日期: 2014年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2014 年 4 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈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其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。

声明人（签名）：

年 月 日



## 摘 要

非球面光学元件可以获得高质量的图像效果和高品质的光学特性,已广泛应用于激光聚变装置、大型天文望远镜、数码视听设备、光纤通信、医疗设备等高新技术领域的光电系统。因此光学元件的精密制造技术受到许多国家的重点关注,抛光作为精密加工的最后一道工序,是非球面面形精度和表面质量得到保证的基础。现阶段,在非球面抛光过程中主要采用由计算机控制的智能抛光技术。因此加强智能抛光控制关键技术的研究,对提升非球面抛光效率和精度有着重要的作用。

本文针对目前先进光学元件抛光技术特点,围绕提高加工精度和效率的目标,对智能抛光控制关键技术进行研究,主要包括去除特性分析、运动控制算法优化、工艺软件开发和抛光验证实验。

(1) 根据小磨头抛光、能动盘抛光和气囊抛光的去除机理,分别建立去除函数的数学模型,并进行傅立叶变换,处理得到对应的修形能力曲线,分析不同抛光方法对空间频率误差的修正能力。

(2) 建立非轴对称非球面的气囊抛光进动运动控制模型,在运动模型的基础上提出最有效率运动控制策略,并进行运动模型仿真和控制算法的验证。

(3) 分析光栅路径和螺旋线路径的应用范围、运动特点及加工参数要求,提出一种新的抛光路径——基于改进 Prim 算法的路径,并通过仿真得到路径结果。

(4) 设计并完成了智能抛光系统工艺控制软件,实现了面形数据读取及处理、加工参数设置、抛光路径生成和机床控制文件输出的功能。

(5) 进行抛光实验,分析实验结果,验证本文优化方法的正确性。

**关键词:** 智能抛光; 去除特性; 运动控制; 路径规划

## Abstract

Aspheric optical lenses with high form accuracy have been widely used in the high-tech fields such as laser fusion, large astronomical telescope, digital audio-video equipment, medical instrument and optical fiber communication, since the application of aspheric optical lenses can obtain high quality of graphic effects and optical properties. For this reason, the precision manufacturing techniques of aspheric optical lens have been concerned by a lot of countries. And polishing as the final step of precision manufacturing procedures is the basis for obtaining fine surface texture and roughness of aspheric optical lens. At present, intelligent polishing techniques controlled by computer have been adopted in optical lenses polishing. Therefore it is very necessary to strengthen the study of intelligent polishing techniques to improve polishing accuracy and efficiency.

According to the characteristic of intelligent polishing techniques, key technical research on intelligent polishing have been conducted to improve polishing accuracy and efficiency, mainly including analysis of material removal characteristic, optimization of motion control algorithm, software development and polishing experiments. The main work in this paper is as follows.

(1) The models of removal function have been established based on the removal mechanism of three kinds of polishing methods, CCOS, CCAL and bonnet polishing. And then the analysis of correction ability of spatial frequency error is investigated through Fourier transformation of established removal function models.

(2) The movement control model for bonnet tool polishing is presented in order to process non-axisymmetric aspheric lenses with precession. And then some simulations are carried out to verify the movement model and control algorithm.

(3) A new polishing path based on Prim algorithm is put forward to improve polishing efficiency, by comparative analysis of motion characteristics of raster path and spiral path.

(4) The process control software of intelligent polishing has been developed,

including the function, interferometric data result input and data processing, polishing parameters setting, polishing path generation and NC program output.

(5) Polishing experiments are carried out to support the theoretic work presented in this paper.

**Keywords:** Intelligent Polishing; Removal Characteristic; Motion Control; Path Planning

厦门大学博硕士论文摘要库





## 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 课题研究背景.....	1
1.2 非球面光学元件加工方法.....	1
1.3 光学元件抛光技术概况.....	3
1.3.1 小磨头抛光技术.....	5
1.3.2 能动盘抛光技术.....	8
1.3.3 气囊抛光技术.....	9
1.4 智能抛光控制关键技术研究.....	11
1.5 论文主要研究内容.....	12
<b>第二章 不同抛光方法去除特性研究</b> .....	<b>14</b>
2.1 不同抛光方法的去除函数比较.....	14
2.1.1 小磨头抛光去除函数.....	14
2.1.2 能动盘抛光去除函数.....	18
2.1.3 气囊抛光去除函数.....	20
2.2 去除函数频谱及误差修正能力分析.....	24
2.2.1 小磨头抛光去除函数频谱及分析.....	24
2.2.2 能动盘抛光去除函数频谱及分析.....	26
2.2.3 气囊抛光去除函数频谱及分析.....	28
2.3 小结.....	30
<b>第三章 智能抛光运动控制算法研究</b> .....	<b>32</b>
3.1 非球面气囊抛光进动控制算法.....	32
3.1.1 气囊抛光进动运动控制.....	32
3.1.2 非球面气囊抛光进动运动建模.....	34
3.1.3 工件上任意两相邻抛光点的进动运动模型.....	35
3.1.4 气囊抛光进动控制及运动仿真.....	39

3.2 抛光路径规化.....	44
3.2.1 光栅路径.....	44
3.2.2 螺旋线路径.....	45
3.2.3 基于改进 Prim 算法的抛光路径.....	47
3.3 小结.....	56
<b>第四章 智能抛光系统工艺控制软件开发.....</b>	<b>58</b>
4.1 需求分析.....	58
4.2 系统总体架构规划.....	59
4.3 系统详细设计.....	60
4.3.1 平面制造子系统.....	60
4.3.2 非球面制造子系统.....	63
4.4 小结.....	65
<b>第五章 抛光验证实验.....</b>	<b>67</b>
5.1 实验设备及加工环境.....	67
5.2 光学元件抛光实验.....	68
5.2.1 Prim 路径对比实验.....	69
5.2.2 加工临界值对比实验.....	72
5.2.2 网格大小和进给速度对比实验.....	75
5.3 小结.....	79
<b>第六章 总结与展望.....</b>	<b>80</b>
6.1 总结.....	80
6.2 展望.....	81
<b>参考文献.....</b>	<b>82</b>
<b>致谢.....</b>	<b>87</b>
<b>硕士期间科研成果.....</b>	<b>88</b>

## Contents

<b>CHAPTER 1 INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 BACKGROUND OF THESIS.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 MACHINING METHODS OF ASPHERIC.....</b>	<b>1</b>
<b>1.3 SURVEY OF OPTICAL POLISHING.....</b>	<b>3</b>
1.3.1 Computer control optical surfacing.....	5
1.3.2 Computer control active lap.....	8
1.3.3 Bonnet polishing.....	9
<b>1.4 KEY TECHNICAL RESEARCH ON INTELLIGENT POLISHING.....</b>	<b>11</b>
<b>1.5 OUTLINE OF THESIS.....</b>	<b>12</b>
 <b>CHAPTER 2 RESEARCH ON REMOVAL MECHANISM OF VARIOUS POLISHING METHODS.....</b>	 <b>14</b>
<b>2.1 COMPARISON OF REMOVAL FUNCTIONS OF VARIOUS POLISHING METHODS..</b>	<b>14</b>
2.1.1 Removal function of CCOS.....	14
2.1.2 Removal function of CCAL.....	18
2.1.3 Removal function of bonnet polishing.....	20
<b>2.2 ANALYSIS OF CORRECTION ABILITY OF SPATIAL FREQUENCY ERROR.....</b>	<b>24</b>
2.2.1 Analysis of frequency spectrum of CCOS.....	24
2.2.2 Analysis of frequency spectrum of CCAL.....	26
2.2.3 Analysis of frequency spectrum of bonnet polishing.....	28
<b>2.3 CONCLUSIONS.....</b>	<b>30</b>
 <b>CHAPTER 3 RESEARCH ON MOTION CONTROL ALGORITHM OF INTELLIGENT POLISHING.....</b>	 <b>32</b>
<b>3.1 CONTROL ALGORITHM OF PRECESSION MOTION FOR BONNET POLISHING.....</b>	<b>32</b>
3.1.1 Control of precession motion for bonnet polishing.....	32

3.1.2	Movement modeling of precession for bonnet polishing aspheric lenses....	34
3.1.3	Movement modeling of precession for any two adjacent polishing spots...	35
3.1.4	Control and motion simulation of precession for bonnet polishing.....	39
<b>3.2</b>	<b>POLISHING PATH PLANNING.....</b>	<b>44</b>
3.2.1	Raster path.....	44
3.2.2	Spiral path.....	45
3.2.3	The polishing path based on improved Prim algorithm.....	47
<b>3.3</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>56</b>
<b>CHAPTER 4</b>	<b>PROCESS CONTROL SOFTWARE</b>	
<b>DEVELOPMENT</b>	<b>OF INTELLIGENT POLISHING.....</b>	<b>58</b>
<b>4.1</b>	<b>REQUIREMENT ANALYSIS.....</b>	<b>58</b>
<b>4.2</b>	<b>OVERALL FRAMEWORK.....</b>	<b>59</b>
<b>4.3</b>	<b>DETAILED DESIGN.....</b>	<b>60</b>
4.3.1	Plane manufacturing subsystem.....	60
4.3.2	Aspheric manufacturing subsystem.....	63
<b>4.4</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>65</b>
<b>CHAPTER 5</b>	<b>POLISHING EXPERIMENTS.....</b>	<b>67</b>
<b>5.1</b>	<b>EXPERIMENT DEVICE AND MACHINING CONDITION.....</b>	<b>67</b>
<b>5.2</b>	<b>POLISHING EXPERIMENTS.....</b>	<b>68</b>
5.2.1	Contrast experiment of path based on Prim algorithm.....	69
5.2.2	Contrast experiment of processing critical value.....	72
5.2.2	Contrast experiment of grid size and feed speed.....	75
<b>5.3</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>79</b>
<b>CHAPTER 6</b>	<b>CONCLUSIONS AND PROSPECT.....</b>	<b>80</b>
<b>6.1</b>	<b>MAIN INNOVATION.....</b>	<b>80</b>
<b>6.2</b>	<b>PROSPECT.....</b>	<b>81</b>

**REFERENCES..... 82**

**ACKNOWLEDGEMENT..... 87**

**ACHIEVEMENTS..... 88**

厦门大学博硕士学位论文摘要库



# 第一章 绪论

## 1.1 课题研究背景

非球面光学元件是一类非常重要的光学元件，指由多项高次方程决定面形、面形上各点的半径均不相同的光学元件，分为轴对称非球面光学元件和非轴对称非球面光学元件两种类型。与球面光学元件相比，非球面光学元件不仅可避免球差，还能够消除各类像差，减小光能损失，得到高质量的图像效果和高品质的光学特性<sup>[1-2]</sup>。近年来，随着光电子学的发展，非球面光学元件在军用和民用产品上的应用也越来越广泛，在激光聚变装置、大型天文望远镜、卫星红外望远镜、录像机镜头、激光视盘装置、光纤通信的接头、电视摄像管、医疗设备等中对非球面都有较大的需求<sup>[3-5]</sup>。例如，现代大型天文望远镜的主镜都是采用大口径非球面；美国国家激光聚变点火装置的 192 道光路中采用大量大口径非球面透镜；手机、数码相机等消费电子产品领域，每年需求各类非球面元件达数以亿计<sup>[6-7]</sup>。

尽管非球面光学元件具有多种优点，但由于受到制造技术水平和加工装备的限制，非球面光学元件应用也相应受限<sup>[8-9]</sup>。因此精密光学制造技术受到许多国家的重点关注，非球面元件加工方法成为研究热点，它是尖端技术发展不可缺少的关键技术<sup>[10]</sup>。精密光学制造技术促进了机械、光学、电子、计算机等技术的发展，担负着支持高新科学技术进步的重要使命，也是衡量一个国家制造技术水平高低的重要标志。

## 1.2 非球面光学元件加工方法

目前，由于非球面光学元件具有提高光学系统性能的特点，广泛应用于军事、民用高新技术领域，因此非球面加工作为超精密加工领域中的关键性技术难题，各国都十分重视<sup>[11-13]</sup>。1970 年以后，军用光学技术如红外热成像和高能激光发展迅速。在该领域的应用中，要求光学元件具备成像质量好、重量轻、体积小和结构简单等特点<sup>[14]</sup>。为了紧跟时代发展的步伐，设计和制造出高质量的光学成像系统，1980 年以来，光学元件加工行业研究开发出许多新的光学元件加工方法<sup>[15-16]</sup>，主要有：数控单点金刚石车削技术、数控磨削技术、超精密抛光技术

和非球面复制技术等。这些加工方法，基本上解决了加工非球面元件时所存在的各种问题。前三种方法运用了计算机数控技术，具有效率高、加工精度较高等特点，非球面复制技术主要面向中小口径光学元件，适用于批量生产。以下将从加工原理、技术特点等方面对上述的非球面加工方法进行介绍。

### (1) 单点金刚石车削技术

计算机数控单点金刚石车削技术，是上世纪 60 年代由美国国防科研机构率先开发、并于上世纪 80 年代推广应用的非球面光学元件加工技术。它是在现代精密数控机床上，使用天然单晶金刚石作为刀具，在对机床和加工环境进行精确控制的条件下，直接利用金刚石刀具单点车削加工得到符合要求的非球面光学元件。该技术主要用于加工中小尺寸、中等批量的金属材料的光学元件和红外晶体，其特点是生产效率高、加工精度高、重复性好、适合批量生产、加工成本低于传统的加工技术<sup>[17-18]</sup>。该技术能够取代传统的手工加工工艺，但加工玻璃光学元件时，还不能直接通过车削得到满足质量要求的光学元件，在此基础上，仍需要对元件进行柔性抛光。

### (2) 超精密磨削技术

超精密磨削加工技术主要应用于高硬度的脆性光学材料，在机械加工的各种方法中，往往以磨削作为精加工的手段。在磨削加工中，由于工具砂轮是通过磨料中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。超精密磨削技术不存在传统磨削、研磨、抛光加工效率低等缺点，是一种确定性较高的光学非球面元件加工方法<sup>[19-22]</sup>。

### (3) 超精密抛光技术

超精密抛光是加工速度极慢的一种加工方法，依靠微小磨粒的机械作用对工件表面进行微量的材料去除，得到高精度的工件表面。近年来，随着光学系统的高速发展，光学元件的表面质量要求越来越高，而超精密抛光是保证元件表面质量的加工方法，能够得到表面粗糙度低于  $0.01\mu\text{m}$  的光学元件。如果对光学元件进行切削或磨削，工件的精度直接受到机床定位精度的影响，很难得到高形状精度的工件。而且抛光不同于切削和磨削，加工后不会在工件的表面留下微小凹凸的部分，得到的工件表面平整、光亮<sup>[23-24]</sup>。



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](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库