



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

基于自由曲面的超短焦投影物镜关键技术研究

作者姓名: 于百华

指导教师: 杨怀江 研究员

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 光学

培养单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

2019 年 6 月

**Research on Key Technology of Ultra-short-focus Projection
Objective System based on Freeform Surfaces**

**A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Optics**

By

Yu Baihua

Supervisor: Professor Yang Huaijiang

**Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences**

June 2019

中国科学院大学 研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名： 于百华
日 期： 2019.05.22

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名： 于百华	导师签名： 杨子江
日 期： 2019.05.22	日 期： 2019.05.22

摘 要

随着科技的飞速发展和整个社会生活品质的提高,人们在追求大屏幕高清投影显示的同时也希望投影系统能够占据更小的空间,因此投影系统逐渐朝着大屏幕、超短焦距、低投射比、大视场角、高分辨率、高清晰度的方向发展。传统的投影显示系统逐渐无法满足这些严苛的要求。超短焦投影系统能够在超短的投影距离处实现超大屏幕的投影,可以突破空间环境的限制,而且能够实现优异的成像质量,因而逐渐引起了人们的兴趣,成为投影显示领域的主流发展方向和国内外研究的热点。

超短焦投影物镜作为超短焦投影系统中的关键组成部分,能够决定系统的投射比、投影画面的成像质量以及系统的体积等关键性能,因而非常有必要对新型的超短焦投影物镜进行研究。随着投射比的降低和视场角的增大,投影系统的光路结构变得越来越复杂,像差也越来越难以校正,而自由曲面具有很高的设计自由度,因此逐渐被引入到超短焦投影物镜的光学系统设计中。超短焦投影物镜系统需要解决的技术难点主要包括:第一,采用何种有效方法优化出超短焦投影系统中的自由曲面初始面形的问题;第二,如何降低超短焦投影物镜的投射比,并设计出可工程化应用的超短焦投影物镜的问题;第三,如何采用合理的方案研制出超短焦投影系统原理样机的问题。

基于上述研究背景及技术难题,本文重点研究了自由曲面的光学设计方法以便于设计超短焦投影系统中的自由曲面;同时结合所提出的自由曲面设计方法,对具有低投射比的超短焦投影物镜的光学系统设计进行了研究;最后基于所设计的超短焦投影物镜光学系统,对原理样机的研制问题进行了研究。本文主要的研究内容包括:

- 1、自由曲面光学设计方法的研究。结合成像系统中自由曲面的应用需求,在构建-迭代方法的基础上进行改进,提出了直接迭代优化的设计方法,并分别设计了自由曲面反射镜和包含自由曲面的折射透镜对该方法进行了验证。设计结果显示 RMS 光斑可快速收敛到衍射极限。为了进一步研究适用于超短焦投影物镜系统中的自由曲面设计方法,又在此基础上进行改进,提出了多视场加权优化迭代的设计方法,并设计了一种超短焦投影物镜系统。仿真结果表明,采用提出

的方法能够得到可用于优化的自由曲面初始面，能够对系统畸变进行有效校正。

2、基于自由曲面的超短焦投影物镜光学设计研究。结合自由曲面光学设计方法，分析了超短焦投影物镜光学设计的理论基础，对比了超短焦投影物镜的各种光路结构及其优缺点。在此基础上，首先设计了一种采用高阶非球面具有低投射比的超短焦投影物镜，其投射比达到了 0.18，并对系统的成像质量进行了分析。为了进一步降低超短焦投影物镜的投射比，在超短焦投影物镜光学系统中引入自由曲面进行设计，并设计出了一种投射比为 0.11 的超短焦投影物镜。最后将其与传统的折射型投影物镜的设计结果进行了分析比较，证明了本文中所设计的超短焦投影物镜性能的优越性。

3、超短焦投影系统验证。为了验证本文中所设计的超短焦投影物镜光学系统具有工程应用的价值，研制了超短焦投影系统的原理样机。研制过程包括机械调整结构的设计、光学元件的加工和检测、超短焦投影系统的精密装调等。最后对原理样机的实际性能进行了测试与分析，实验结果表明本文中所研制的超短焦投影系统性能良好，满足设计要求。

关键词：超短焦投影，自由曲面，光学设计

Abstract

With the rapid development of science and technology and the improvement of the quality of life of the whole society, people hope that the projection system can occupy a smaller space while pursuing the large screen projection display. Therefore, the projection system gradually develops towards the direction of large screen, low throw ratio, ultra-short focal length, large field-of-view angle, high resolution, high definition and low cost. The traditional projection display system can not meet these strict requirements gradually. Ultra-short-focus projection system can achieve large screen projection at very short projection distance, which can break through the limitation of space environment. It has gradually aroused people's interest and become the mainstream development direction of projection display field and the research hotspot at home and abroad.

Ultra-short-focus projection objective, as a key component of ultra-short-focus projection system, can determine the key performance parameters such as throw ratio, image quality of projection screen and system volume. Therefore, it is necessary to design a new type of ultra-short-focus projection objective to further reduce the throw ratio of the system and broaden the application market in the field of projection display. However, as the throw ratio decreases and the field of view angle increases, the projection system becomes more and more complex, and aberration correction becomes more and more difficult. Freeform surface is gradually introduced into the optical design of ultra-short-focus projection objectives because of its high degree of freedom. Therefore, the technical difficulties that need to be solved in ultra-short-focus projection objective system mainly include: firstly, how to optimize the initial surface shape of freeform surface in ultra-short-focus projection system by using effective methods; secondly, how to reduce the throw ratio of ultra-short-focus projection objective and design the ultra-short-focus projection objective for engineering application; thirdly, how to establish a prototype of the ultra-short-focus projection system.

Based on the above research background and technical difficulties, this paper focuses on the optical design method of freeform surface to facilitate the design of freeform surface in ultra-short-focus projection system. At the same time, combining with the design method of freeform surface, the optical design of ultra-short-focus

projection objective with low throw ratio is studied. Finally, combining with the designed ultra-short-focus projection objective, the development of the principle prototype is advanced. A study was carried out. The main research contents include:

1. Research on the optical design method of freeform surface. According to the application requirement of freeform surface in imaging system, based on the construction-iteration method, a direct iteration optimization design method is proposed, and the method is verified by designing freeform surface reflector and refractive lens containing freeform surface respectively. The design results show that the RMS spot can converge to the diffraction limit quickly. In order to further study the freeform surface design method suitable for ultra-short-focus projection objective system and improve it, a multi-field weighted optimization iteration design method is proposed, and an ultra-short-focus projection objective system is designed. The simulation results show that the proposed method can obtain the initial surface of freeform surface which can be used to optimize, and can effectively correct the system distortion.

2. Optical design of ultra-short-focus projection objective based on freeform surface. Combining with freeform surface optical design method, the theoretical basis of optical design of ultra-short-focus projection objective, the principle and advantages and disadvantages of various optical path structures of ultra-short-focus projection objective are analyzed. On this basis, a kind of ultra-short-focus projection objective with high-order aspheric surface and low throw ratio is designed. Its throw ratio reaches 0.18, and the imaging quality of the system is analyzed. In order to further reduce the throw ratio of ultra-short-focus projection objective, the design of ultra-short-focus projection objective was studied by using freeform surface, and an ultra-short-focus projection objective with throw ratio of 0.11 was designed. Finally, the design results of the system are compared with those of the traditional refractive projection lens, which proves the superiority of the designed system.

3. Verification of Ultra-short-focal projection system. Combined with the designed ultra-short-focus projection objective system based on freeform surface, the optical engine, the designed ultra-short-focus projection objective and the projection screen are combined, the appropriate structure scheme is selected, the principle prototype is built, and the performance of the principle prototype is tested and analyzed.

Key words: Ultra-short- focus projection, freeform surface, optical design

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	V
图目录.....	IX
表目录.....	XIII
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题的研究背景及意义.....	1
1.1.1 投影显示技术概述.....	1
1.1.2 超短焦投影物镜.....	6
1.1.3 自由曲面.....	10
1.2 课题国内外研究现状.....	13
1.2.1 超短焦投影物镜研究现状.....	13
1.2.2 自由曲面设计方法研究现状.....	18
1.3 主要研究内容和结构安排.....	21
1.3.1 论文的研究内容.....	21
1.3.2 论文的结构安排.....	22
第 2 章 超短焦投影物镜的理论基础.....	25
2.1 引言.....	25
2.2 投影物镜光学设计理论基础.....	25
2.2.1 投影物镜结构的高斯光学理论.....	25
2.2.2 反远距型投影物镜结构的设计参数.....	27
2.3 超短焦投影物镜原理分析.....	28
2.3.1 折射式投影物镜原理.....	28
2.3.2 反射式超短焦投影物镜原理.....	30
2.3.3 折反式超短焦投影物镜原理.....	31
2.4 超短焦投影物镜光学系统参数指标.....	33

2.4.1 屏幕尺寸、投射比及视场角.....	33
2.4.2 相对孔径与 F 数	34
2.4.3 光通量与光亮度.....	35
2.4.4 物镜焦距与放大率.....	36
2.4.5 畸变.....	36
2.4.6 MTF	38
2.5 本章小结.....	41
第 3 章 多视场加权优化迭代自由曲面光学设计方法	43
3.1 引言.....	43
3.2 自由曲面的常用设计方法.....	43
3.2.1 偏微分方程方法.....	43
3.2.2 同时多曲面设计方法.....	45
3.2.3 直接构建设计方法.....	47
3.2.4 构建-迭代设计方法	49
3.3 自由曲面直接迭代设计方法.....	49
3.3.1 直接迭代方法原理.....	50
3.3.2 直接迭代方法设计步骤.....	51
3.3.3 自由曲面反射镜设计实例.....	52
3.3.4 自由曲面折射透镜设计实例.....	54
3.4 自由曲面多视场加权优化迭代设计方法.....	56
3.4.1 多视场加权优化迭代方法原理.....	56
3.4.2 多视场加权优化迭代方法设计步骤.....	58
3.4.3 多视场加权迭代优化设计方法实例.....	60
3.5 本章小结.....	65
第 4 章 基于自由曲面的折反式超短焦投影物镜光学设计	67
4.1 引言.....	67
4.2 采用高阶非球面的超短焦投影物镜光学设计.....	67
4.2.1 系统的设计指标.....	67
4.2.2 超短焦投影物镜设计结果.....	68
4.2.3 超短焦投影物镜的像质评价.....	69

4.3 基于自由曲面的超短焦投影光学设计.....	71
4.3.1 超短焦投影系统的设计指标.....	71
4.3.2 折射部分的优化设计.....	74
4.3.3 自由曲面反射镜的设计.....	75
4.3.4 超短焦投影物镜的一体化优化设计.....	76
4.3.5 设计结果分析与评估.....	77
4.3.6 基于自由曲面的超短焦投影物镜的公差分析.....	80
4.4 基于自由曲面的超短焦投影物镜的优势分析.....	83
4.5 本章小结.....	85
第 5 章 超短焦投影物镜系统验证	87
5.1 引言.....	87
5.2 超短焦投影系统结构设计.....	87
5.2.1 折射部分结构设计.....	87
5.2.2 反射部分结构设计.....	89
5.2.3 超短焦投影系统整体结构.....	91
5.3 自由曲面反射镜加工与检测.....	93
5.3.1 自由曲面反射镜加工.....	93
5.3.2 自由曲面反射镜检测.....	93
5.4 超短焦投影物镜系统的装调.....	94
5.5 系统性能测试与分析.....	96
5.5.1 系统性能测试.....	96
5.5.2 系统性能分析.....	98
5.6 本章小结.....	103
第 6 章 总结与展望	105
6.1 论文工作总结.....	105
6.2 创新之处.....	106
6.3 工作展望.....	106
参考文献.....	109
致 谢.....	117

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	119
-------------------------------	-----

图目录

图 1.1	CRT 三枪投影系统示意图	2
图 1.2	三片式 LCD 投影系统示意图	3
图 1.3	数字微镜器件(DMD)的结构原理图	4
图 1.4	DMD 芯片角度偏转示意图	4
图 1.5	单片式和三片式 DLP 投影系统示意图	5
图 1.6	LCoS 投影系统示意图	5
图 1.7	LCoS 面板结构原理图	6
图 1.8	空间光调制器型投影系统的原理结构图	7
图 1.9	折射式投影物镜结构示意图	8
图 1.10	反射型超短焦投影物镜结构示意图	9
图 1.11	折反结合型超短焦投影物镜结构示意图	9
图 1.12	自由曲面透镜的照明效果图	11
图 1.13	投射比的定义	13
图 1.14	NEC WT600 超短焦投影系统	14
图 1.15	LP-XL40 和 LP-XL50 投影机	14
图 1.16	HCP-A8 投影机	15
图 1.17	LPI 公司的超短焦投影系统	15
图 1.18	折反式投影光学系统结构示意图	16
图 1.19	RAC100 投影机	16
图 1.20	Osamu Nagase 的折反式超短焦投影物镜光学结构	17
图 1.21	Vrije Universiteit Brussel 发表的包含自由曲面的超短焦投影系统示意图	17
图 1.22	北理工的折反型超短焦投影物镜	18
图 1.23	Wassermann-Wolf 方法	19
图 2.1	反远距光路结构示意图	26
图 2.2	负-正-正型光学结构示意图	29
图 2.3	正-负-正型光学结构示意图	29

图 2.4	反射型超短焦投影物镜光学结构示意图.....	30
图 2.5	视场角与光学系统性能的关系曲线图.....	32
图 2.6	最小视场角与有效视场角示意图.....	32
图 2.7	不同系统投射比的对比图.....	34
图 2.8	相对畸变定义的示意图.....	37
图 2.9	TV 畸变示意图	38
图 2.10	光学传递函数测试靶板示意图.....	38
图 2.11	条状物体的亮度曲线示意图.....	39
图 2.12	扩散函数对像的影响示意图.....	39
图 2.13	图像对比度示意图.....	39
图 2.14	调制函数曲线示意图.....	40
图 2.15	具有相同极限分辨率的调制函数曲线对比示意图.....	41
图 3.1	Wassermann-Wolf 方法	44
图 3.2	SMS 方法原理示意图.....	46
图 3.3	直接构建方法原理示意图.....	47
图 3.4	直接构建法设计过程示意图.....	47
图 3.5	CI 方法示意图.....	49
图 3.6	直接迭代方法的原理图.....	50
图 3.7	直接迭代方法流程图.....	51
图 3.8	1 次迭代后的 RMS 光斑	53
图 3.9	6 次迭代后的 RMS 光斑	53
图 3.10	RMS 光斑半径与迭代次数的直方图	53
图 3.11	5 次迭代后的自由曲面面形.....	54
图 3.12	透镜的初始结构图.....	54
图 3.13	6 次迭代后的自由曲面透镜.....	55
图 3.14	自由曲面透镜的 RMS 光斑图	55
图 3.15	折射型自由曲面 RMS 光斑大小随迭代次数的变化图	55
图 3.16	视场重叠问题示意图.....	56
图 3.17	多视场加权方法原理图.....	57
图 3.18	多视场加权方法流程图.....	58

图 3.19	多视场加权设计过程示意图.....	59
图 3.20	改进的多视场方法流程图.....	60
图 3.21	计算得到的半视场的自由曲面矢高.....	61
图 3.22	去除倾斜后的自由曲面矢高.....	62
图 3.23	包含自由曲面的超短焦物镜初始光学结构.....	62
图 3.24	初始投影系统的畸变网格.....	63
图 3.25	最终投影系统的结构图.....	63
图 3.26	最终投影系统的畸变网格.....	64
图 3.27	最终投影系统的点列图.....	64
图 3.28	最终投影系统的 MTF 曲线	64
图 4.1	最终系统的光路结构图.....	68
图 4.2	最终系统的畸变.....	69
图 4.3	最终系统的光斑点列图.....	70
图 4.4	最终系统的 MTF 曲线	70
图 4.5	超短焦投影物镜的相对照度曲线图.....	71
图 4.6	超短焦投影物镜的折射部分光路结构图.....	74
图 4.7	折射部分的光斑点列图.....	75
图 4.8	自由曲面的矢高图.....	76
图 4.9	去除旋转对称项后自由曲面的矢高图.....	76
图 4.10	系统优化流程图.....	77
图 4.11	超短焦投影物镜结构图.....	78
图 4.12	基于自由曲面的最终系统的结构图.....	78
图 4.13	最终系统的 MTF 曲线	79
图 4.14	最终系统的网格畸变图.....	79
图 4.15	最终系统的光斑点列图.....	80
图 4.16	公差分配与分析流程图.....	82
图 4.17	基于自由曲面的最终系统的公差分析结果图.....	83
图 4.18	传统的折射型投影物镜结构图.....	84
图 4.19	超短焦投影物镜结构图.....	84
图 5.1	超短焦物镜的折射部分光路图.....	87

图 5.2	超短焦物镜折射部分的结构示意图	88
图 5.3	超短焦物镜折射部分模型图	88
图 5.4	平面反射镜示意图	89
图 5.5	自由曲面的 3D 模型	90
图 5.6	自由曲面固定及支撑结构示意图	90
图 5.7	超短焦物镜中反射部分的结构示意图	91
图 5.8	光学引擎固定支撑示意图	91
图 5.9	超短焦物镜的结构图	92
图 5.10	超短焦投影系统整体布局图	92
图 5.11	加工的自由曲面反射镜	93
图 5.12	自由曲面面形检测结果	94
图 5.13	组装后的折射透镜组	95
图 5.14	组装后的反射部分	95
图 5.15	原理样机实物图	96
图 5.16	超短焦投影系统原理样机投影图	97
图 5.17	畸变性能测试图	98
图 5.18	十字格坐标图	99
图 5.19	原理样机畸变测试图	99
图 5.20	黑白格投影图像	101
图 5.21	照度测量方法的示意图	101

表目录

表 2.1	各种光源亮度的典型值.....	36
表 3.1	超短焦投影系统的参数.....	61
表 4.1	超短焦投影系统的设计指标.....	68
表 4.2	基于自由曲面的超短焦投影物镜的光学设计指标.....	73
表 4.3	公差分配结果.....	82
表 5.1	折射部分调节机构设计指标及设计结果.....	89
表 5.2	平面反射镜调节机构设计结果.....	89
表 5.3	自由曲面调整架设计结果.....	90
表 5.4	畸变测量数据表 (mm)	100
表 5.5	照度不均匀性的测量结果.....	102

第1章 绪论

1.1 课题的研究背景及意义

视觉是人们获取信息的主要方式之一，显示作为对视觉信息的展示，成为人们获取信息的重要途径。伴随着光电子技术和计算机技术的迅猛发展，显示技术得到了空前的发展，并渗透在人类社会和生活各个方面的各个方面，改变着人们的生活方式。

如今，显示技术已经进入了多样化发展的时代，投影显示作为显示技术中一个重要的分支，是实现大屏幕显示的重要技术手段，已经在军事、科学研究、教育、通信、航空航天、医疗、娱乐消费、商务洽谈等领域得到了广泛的应用和发展。

1.1.1 投影显示技术概述

投影显示技术最早可以追溯到中国两千多年前的皮影戏，但是真正意义的经典投影显示技术是从一百多年前法国 Louis Lumiere 兄弟发明的电影开始的，从此以后投影显示技术便成为人们获得大面积图像的基本方法。随着电子信息技术的快速发展，视频信息显示技术也得到了相应的发展。20 世纪 40 年代，德国的科技工作者首先制造出了 CRT（Cathode Rays Tube）投影显示器，该投影系统是历史上首次采用光电结合技术实现非机械式产生的视频显示，成为了现代光电投影显示技术的雏形^[1]。

CRT 投影显示技术是最早出现并得到广泛应用的具有动态视频图像的大屏幕投影显示技术。20 世纪 80 年代中期，随着非球面镜头技术的发展，三管式 CRT 投影显示技术得到了迅猛的发展，并成为了市场上得到最广泛应用的大屏幕动态视频的显示技术，如图 1.1 所示为 CRT 三枪投影机的原理示意图。20 世纪 90 年代中期，随着低成本非球面镜头技术的突破，CRT 投影机^[2-4]的应用变得日益广泛。该系统具有图像动态范围大、色彩饱和度好的特点，且与电视 CRT 的显示器件相同，因而非常适合视频信号的图像显示，也因此成为 90 年代技术最成熟、市场应用数量最多的背投影电视主流技术。

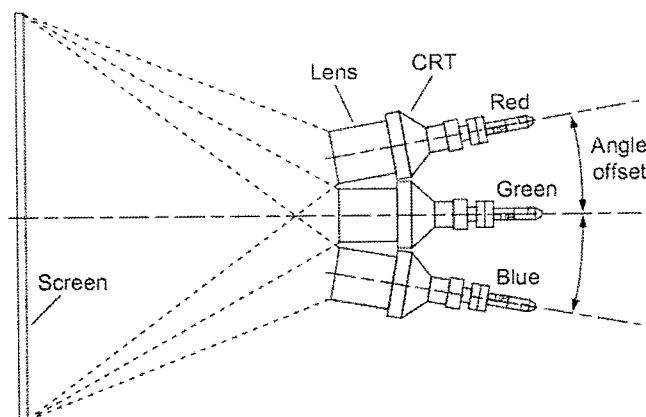


图 1.1 CRT 三枪投影系统示意图

Figure 1.1 Schematic diagram of CRT three-gun projection system

20 世纪 80 年代中后期，由于 CRT 的色会聚较为困难，图像分辨率和对比度不高，且只适用于较小屏幕的投影显示，并且高亮度 CRT 投影管不适用于静态数据图像显示，这些不足均严重限制了其在数字信息显示中的应用，因此高分辨率的大屏幕投影显示技术成为当时具有较高技术难度而又亟待突破的高新技术。

为了实现大屏幕投影显示，人们开始研究各种空间光调制器等新器件，同时各种新技术也伴随着得到了发展，这使得投影显示技术发展迅速。其中最具代表性的就是 20 世纪 90 年代之后，液晶以及数字微镜器件^[5,6]（Digital Micromirror Device）等微显示元件的兴起，它们推动着投影显示技术发生了革命性的变化与发展，从此现代投影显示技术相关的产业得以形成。

根据产生图像源的显示器件的不同进行分类，现代投影显示技术主要包括 LCD 投影显示技术^[7,8]、DLP 投影显示技术^[9,10]和 LCoS 投影显示技术^[11-14]等。这些投影显示技术的基本原理都是将微显示器件调制得到的图像源经光学系统进行放大并投影到屏幕上。通过这种分离产生图像的显示器件与投影图像的方式，更易于实现大尺寸屏幕的投影显示。

LCD 投影显示技术是以透射式液晶显示器件（Liquid Crystal Device, LCD）作为核心元件的投影显示技术。该技术的原理是利用液晶的光电效应来改变液晶分子的排列方式，进而改变其光学特性，从而产生不同颜色的图像。液晶投影显示技术在初期一般采用单片彩色 LCD 作为像源，然后通过光学系统放大并投影到屏幕上。1989 年，日本 EPSON 公司成功研制出世界上首台 LCD 投影机，其

型号为 VJP-2000。但初期彩色液晶板的光学透射率较低，通常只有 1%~2% 的透过率，所以投影显示的亮度特别低。从 90 年代中后期开始，随着高温多晶硅技术的发展，LCD 投影显示的光学效率得到了提高。同时液晶板的面积也在不断减小，成本大幅降低，投影的光亮度也在不断提高。LCD 投影显示技术也因此得到了进一步的发展，逐渐从单片式 LCD 投影发展为三片式 LCD 投影，这种投影系统在输出光亮度、图像分辨率以及色彩方面均得到了显著提高，图 1.2 所示为一种典型的三片式 LCD 投影系统的原理示意图。

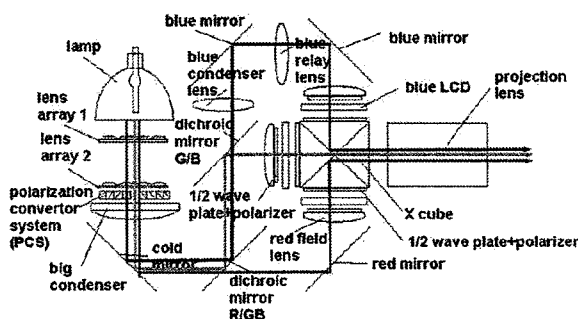


图 1.2 三片式 LCD 投影系统示意图

Figure 1.2 Schematic diagram of three-piece LCD projection system

当时，日本的 EPSON 和 SONY 等公司在 LCD 投影显示技术领域处于绝对领先的地位。然而，其他国家在大屏幕投影显示的研究方面也开辟出了独特的道路。美国 TI 公司基于 DMD (Digital Micromirror Device) 芯片逐渐发展了 DLP (Digital Light Processing) 投影技术。

DMD 芯片是一种由数百万个微小的铝反射镜组成的微镜阵列，每个微反射镜相当于一个像素，并且可以通过电路控制实现 $\pm 12^\circ$ 的角度偏转，如图 1.3 所示为 DMD 结构原理图。当记忆晶胞位于“ON”时，微镜会偏转至 $+12^\circ$ ，当位于“OFF”时，微镜会偏转至 -12° [15]，如图 1.4 所示为 DMD 芯片角度偏转示意图。DMD 芯片的微镜数量越多，也就意味着芯片的分辨率越高。由于每个微镜的尺寸和质量很小，其转动速度快至微秒量级，因而通过对每个微镜像素进行控制就可以实现整个 DMD 的控制。DLP 技术以 DMD 作为空间光调制器，通过集成电路对每个微镜像素进行控制从而实现将图像转化为微镜转动角度的状态的分布，处于“ON”状态的微反射镜会将光线反射到投影物镜的通光孔径内，此时对应的屏幕像素为亮；而处于“OFF”状态的微反射镜会将光线反射偏离通光孔径，此时对应的屏幕像素为暗，这样便实现了对照射在 DMD 上的反射光束的

空间分布的控制，从而可以改变每个像素的亮度，进而实现对光的调制以产生图像源。由于微反射镜的转动速度非常快，因而根据单位时间内微反射镜转动到亮位置的次数就可以控制图像的亮暗，从而实现图像亮度的数字化。DMD 通过调制技术可以表现出 1670 万种颜色和 256 段的灰度层次，因此能够让投影画面色彩更加鲜明、细腻更加逼真。

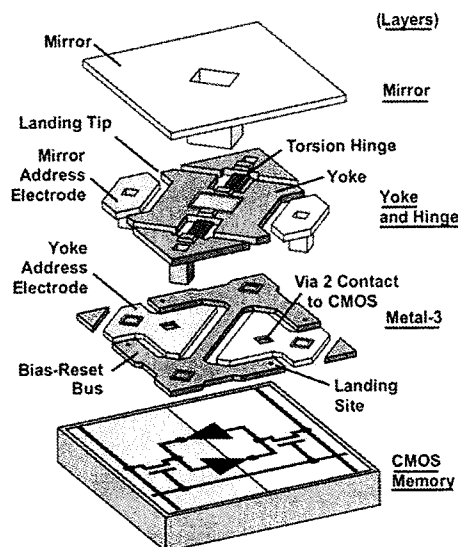


图 1.3 数字微镜器件(DMD)的结构原理图

Figure 1.3 Structural schematic diagram of digital micromirror device (DMD)

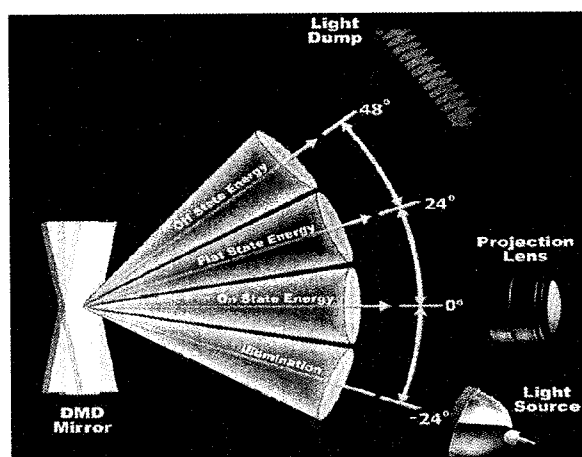


图 1.4 DMD 芯片角度偏转示意图

Figure 1.4 Diagram of angle deflection of DMD chip

20 世纪 80 年代后期，以 DMD 为空间光调制器的 DLP 投影机开始进入市场。常见的 DLP 投影系统主要包括单片式投影系统和三片式投影系统两种，它们的原理示意图如图 1.5 所示。由于这种投影技术采用光的反射来实现图像的调制，

因此在均匀性和对比度等方面都具有出色的表现；相比于透射式调制方式而言，反射式调制具有更高的能量利用率，在亮度上完全数字化、色彩还原性好而且具有高分辨率、高稳定性、图像噪声小、投影显示效果优异、制造成本较低等优势，因此被广泛应用于各个领域，市场份额逐渐扩大，成为了一种大屏幕投影显示的主流技术。

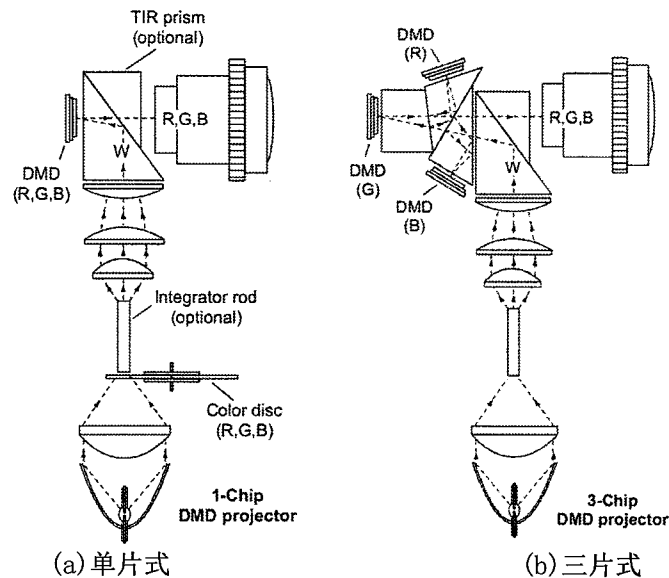


图 1.5 单片式和三片式 DLP 投影系统示意图

Figure 1.5 Schematic diagrams of monolithic and trilithic DLP projection systems

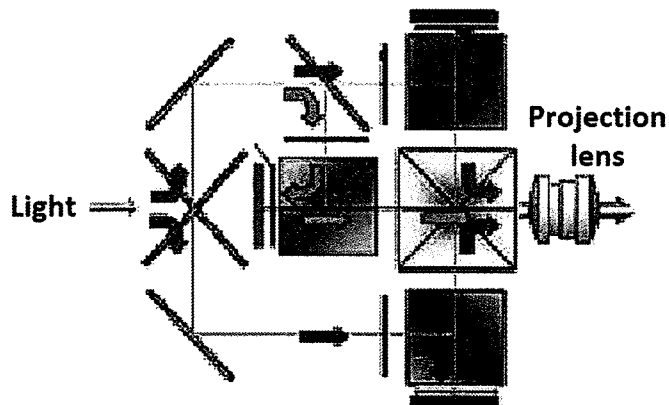


图 1.6 LCoS 投影系统示意图

Figure 1.6 Schematic diagram of LCoS projection system

LCoS 投影技术于 20 世纪 90 年代后期出现，是美国硅谷的一些科技公司最先发展起来的一种基于反射式硅基液晶（Liquid Crystal on Silicon, LCoS）芯片的新型投影显示技术，这种投影系统的原理示意图如图 1.6 所示。该技术采用了

CMOS 半导体技术，在硅单晶片上利用半导体技术制作 CMOS 阵列作为像素的驱动元，然后制备厚缓冲层，然后依次经过磨平和镀铝的过程，构成 CMOS 基板，再将该基板与包含透明电极的玻璃基板贴合，最后在中间注入液晶从而形成 CMOS 器件，LCoS 面板结构原理图如图 1.7 所示。相比于 DLP 投影技术，LCoS 芯片具有偏振特性，可以采用偏振分光棱镜将入射和反射光束进行分离。

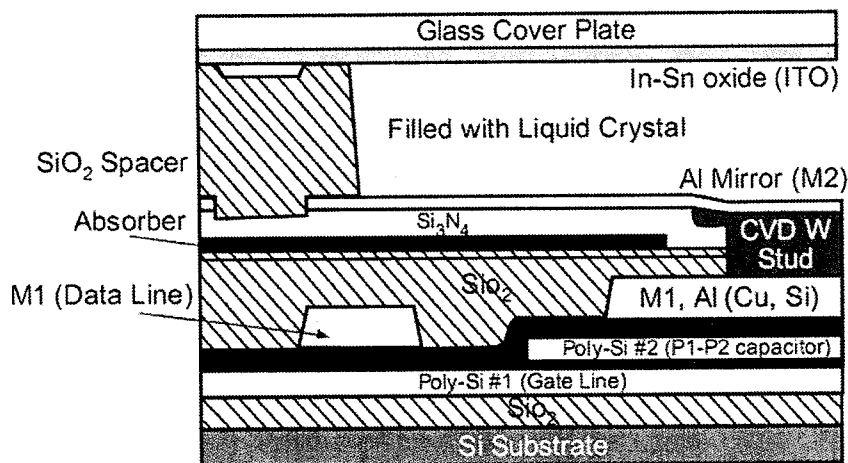


图 1.7 LCoS 面板结构原理图

Figure 1.7 LCoS panel structure schematic diagram

前述三种投影显示技术各自具有不同的优势，LCD 投影技术是最早发展起来并且最为成熟的投影显示技术；DLP 投影显示系统发展迅速且是最简单的投影技术；LCoS 投影技术的芯片容易制备，尤其适用于超小型的投影显示，但相应的投影光学系统设计较为复杂。DLP 投影显示技术由于色彩及亮度等方面的诸多优势，而且制造成本较低，系统简单，已经逐渐在教育、科研研究、商务会谈和公众娱乐等大屏幕投影显示领域中得到了广泛的认可和应用。

1.1.2 超短焦投影物镜

现代投影显示系统的发展速度随着各应用领域日益增长的市场需求而不断加快，人们在追求大屏幕的同时还希望投影系统能够占据更小的空间，因此，投影系统正在朝着高分辨率、大屏幕和短焦距的方向不断发展。从原理结构上，投影显示系统是由光源；微显示器件；光学引擎，主要包含照明系统、分色合色系统、投影物镜、显示屏幕和精密调节机构；电子系统以及整机结构这些部分构成，如图 1.8 所示为空间光调制器型投影系统的原理结构图。

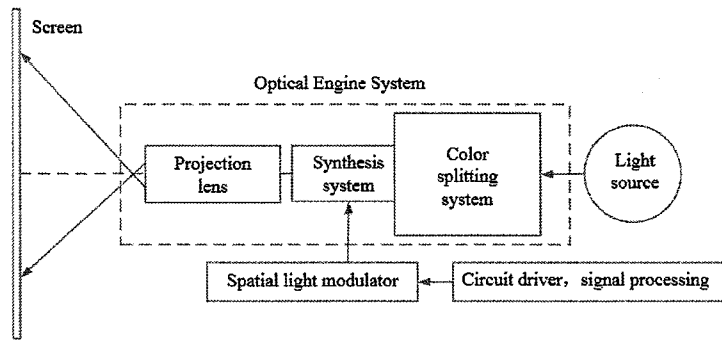


图 1.8 空间光调制器型投影系统的原理结构图

Figure 1.8 schematic diagram of spatial light modulator projection system

投影物镜在投影系统中的作用是将空间光调制器产生的图像源放大后投影到显示屏幕上,所以投影物镜的性能在一定意义上决定了投影系统的性能,即决定了投影图像的品质。按照投影镜头的焦距长短进行分类,可以将投影显示系统分为长焦投影系统、普通投影系统、短焦投影系统和超短焦投影系统四种类型。

长焦投影系统一般可视为高端工程用投影系统,这种系统具有投影面积大、投影距离远的特点,且光亮度可高于 10000lm,因而适合在金融中心、商场等环境背景亮度高、所需投影面积大的环境中使用。普通投影系统一般采用焦距为 30mm 左右的标准镜头,光亮度大约为 2000-3000lm,由于其体积和重量适中,适合固定安装,也可以在短距离内移动,具有性价比较高,易于维护等优点,因此在学校和企业等场景中具有非常广泛的应用。

随着生活空间的不断缩小和各应用领域对投影镜头性能要求的提高,投影物镜的焦距被逐渐缩短,从而发展出了短焦投影镜头^[16,17]。常见的短焦镜头一般是广角式的鱼镜头^[18,19],这种镜头的焦距长度一般在 6-15mm 范围内,其发展的初期主要应用于广角照相机^[20-22]。相比于普通的投影镜头,采用鱼镜头可以在更短的投影距离实现更大屏幕的投影,节省空间而且安装便利,因而其应用也逐渐从教育领域扩展到商务、娱乐等更多的领域,但是这种鱼镜头中一般存在难以校正的线性畸变^[23]。

随着相关技术的发展,人们对投影镜头的研究不断深入,投影镜头的焦距被进一步缩短,出现了超短焦投影物镜^[24-29];相对于短焦投影镜头而言,超短焦投影镜头可以在更短的投影距离处实现更大屏幕的投影,能够更好地满足各应用领域的实际性能需求,在这样的背景下超短焦投影物镜得到迅速发展。这种镜头一般是在短焦投影镜头的基础上添加辅助光学元件来实现的,焦距一般小于 6mm。

超短焦投影镜头的出现,使得投影一定屏幕尺寸的投影画面所需的投影距离进一步缩短,因而极大地拓展了投影机的应用场景。

目前超短焦投影镜头的常用光路结构主要有三种,折射型结构、反射型结构和折反结合型结构。折射型结构一般是由多个球面或非球面的透射光学元件组成的,典型的折射型投影镜头如图 1.9 所示。这种镜头一般包含三个部分,第一部分主要是用来放大视场角,而第二和第三部分主要是决定镜头的相对孔径以及轴上点的成像质量。随着焦距的缩短、F 数的减小以及视场角的逐渐增加,会导致各种像差,如色差、场曲和畸变等急剧增加并且难以同时实现良好校正。为了校正场曲通常需要更加复杂的镜头结构来满足 Petzval 和条件,这必然会导致研制成本的明显增加。对于折射型投影物镜,从成本和技术的角度来考虑,折射型投影镜头能够达到的极限是投影 100inch 的画面需要 2 米的投影距离^[30]。

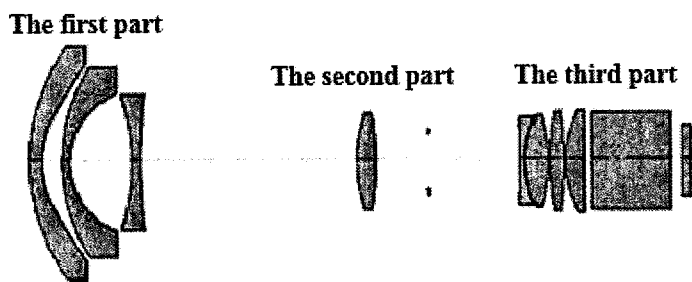


图 1.9 折射式投影物镜结构示意图

Figure 1.9 Structural schematic diagram of refractive projection objective

为了进一步缩短投影距离以实现超短焦投影,需要不断发展新的投影镜头光路结构。反射型投影镜头^[31,32]一般是由三片或四片大放大倍率非球面反射镜组成的投影物镜结构^[30],如图 1.10 所示。由于反射型镜头结构不会产生色差,因此在色差的表现上具有明显优势。然而,为了实现超短距离投影,反射式投影系统通常采用离轴式设计,这样会导致反射镜在固定时难以保证其倾斜和偏移,这也就要求采用更加精密的机械固定结构,不利于工程应用和批量化生产,成本较高,这限制了其进一步的推广和应用。

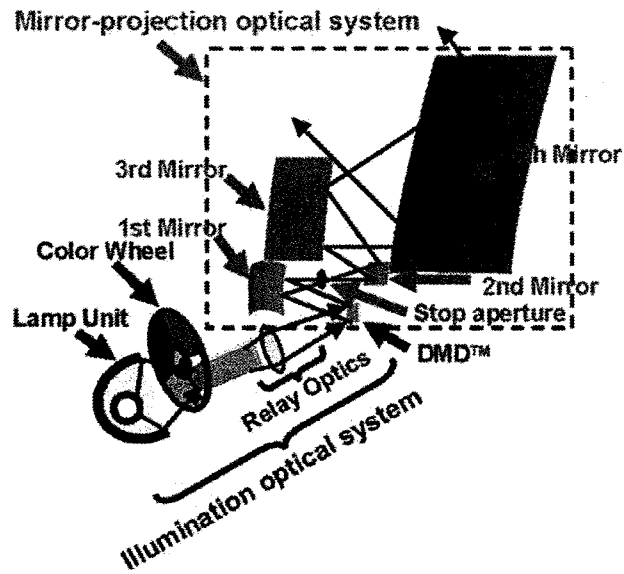


图 1.10 反射型超短焦投影物镜结构示意图

Figure 1.10 Structural schematic diagram of reflective ultra-short-focus projection objective system

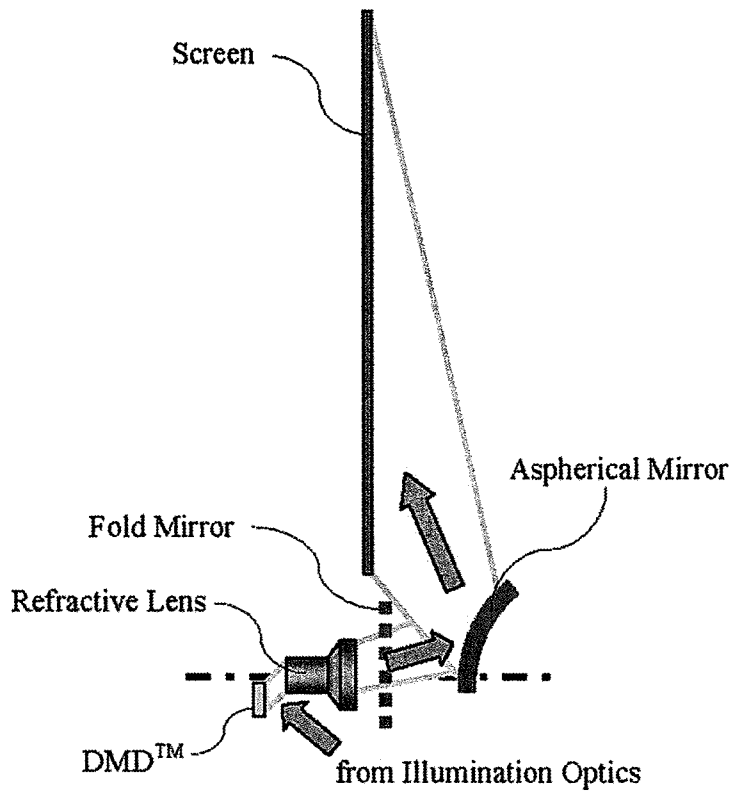


图 1.11 折反结合型超短焦投影物镜结构示意图

Figure 1.11 Structural schematic diagram of a combined refractive ultrashort focal projection objective

折反结合型投影镜头^[33,34]一般由一组旋转对称的折射透镜和一片或两片非球面反射镜组成,如图 1.11 所示为折反结合型超短焦投影物镜结构示意图,在这种系统中,通常折射透镜组部分靠近空间光调制器,是为了放大像面和校正系统的主要像差,例如,色差、场曲等,反射镜部分靠近显示屏幕,主要用于校正畸变和缩短投影距离。折射部分主要承担正光焦度而反射部分承担较大的负光焦度,通过这种正负光焦度组合的反远距型光学结构,可以获得较大的后截距。这种折反结合型的镜头结构综合了折射镜投影物镜和反射型投影物镜的优点,所以已经发展成为了近年来超短焦投影物镜的主流设计结构。

随着投影镜头焦距的不断缩短,镜头的元件和结构复杂度越来越高。如果继续采用传统的球面或非球面来实现超短焦投影镜头的光学设计,则需要越来越多的光学元件;而且伴随着视场角的增加,投影物镜的畸变变得更加难以校正。因而人们逐渐开始将具有更高自由度的自由曲面^[35,36]引入到超短焦投影镜头的设计中,因此自由曲面的设计成了折反式超短焦投影物镜设计的关键点和难点。

1.1.3 自由曲面

自由曲面^[37-39]是近年来随着超精密加工和检测技术的快速发展而得以发展和应用的一种新型光学面型,其最简单的定义就是缺乏平移或旋转对称性的光学曲面。自由曲面打破了传统球面或非球面的对称性,扩展了光学表面的种类并创造了新的可能。从更数学化的角度上讲,自由曲面可以被定义为曲面函数中包含两个变量的光学表面,例如角度和半径或者 x 和 y , 而不是一个变量。在光学设计中,光学设计师会把任何本身不具备旋转对称性的曲面都视为自由曲面。20 世纪 70 年代 Polaroid SX-70 即时相机^[40]采用了“非旋转图形”的离轴非球面,这个离轴非球面在今天便可以定义为自由曲面。

自由曲面具有很高的设计自由度,能够扩大视场、提高光学系统的紧凑性,大幅提高光学系统性能并降低装调难度,因此被越来越多的引入到光学系统的设计中。自由曲面的设计思想最早可以追溯到 20 世纪 60 年代中期,主要基于非成像光学理论,用于实现重新分配光强或光源分布、光束整形^[41]等特定的照明要求^[42-44],提高能量利用率。由于不涉及到物像关系,设计较为简单。后来,自由曲面被逐渐应用到成像领域^[45-48],用于各种像差的校正,以提高成像质量。

1965 年,Spence 等人提出了“宏焦点”圆锥曲面的概念,并基于非成像光

学的理论展开了对自由曲面的光学设计,设计过程中自由曲面由多个离散的椭圆或抛物线曲线段拼接得到,无法表达成解析式形式,被视为自由曲面的雏形^[49]。

1972 年, Schruben 提出了一种可以通过微分表达式来求解的连续型自由曲面,但遗憾的是并未给出具体的求解方法^[50]。1974 年, Schruben 采用数值求解的方法求解偏微分方程,得到了照明系统中自由曲面的反射镜面型,可以实现均匀的圆形照明^[51],但是并未给出具体的照明效果图。

2002 年, OEC 公司的 Ries 和 Muschwaeck 提出可以使用数值求解偏微分方程的方法来计算自由曲面面型,并给出了计算机仿真的照明效果图^[52],如图 1.12 所示。用均匀发光体作为光源,计算得到的折射型自由曲面可对光源发出的光进行重新分布,形成特定图样并实现均匀照明。但是,这种非连续型自由曲面难于加工。

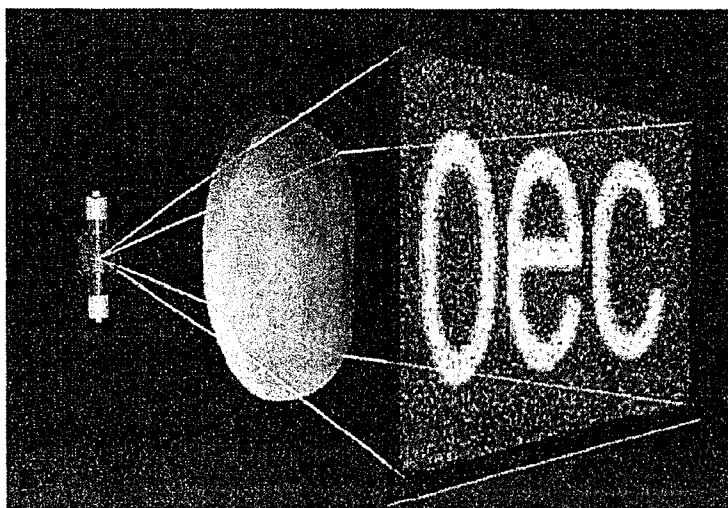


图 1.12 自由曲面透镜的照明效果图

Figure 1.12 Illustration of illumination effect of freeform lens

之后的很多年,人们对自由曲面的研究主要集中在自由曲面面型的表达方式上,或者是通过若干曲面拼接来设计自由曲面,又或者是基于 B 样条曲线^[53]对节点参数进行修改来设计满足特定要求的自由曲面,然而这些方法类似于试错法,设计效率和准确度都很低。因此,人们开始研究可通过解析式表示的面型表征方法。

目前,自由曲面已有多种面型表示方法。例如, NURBS 曲面构造方法^[54-57]、多项式表示方法^[58-63]、径向基函数表示方法^[64-69]等。其中 NURBS 曲面构造法主要是将曲线上的点坐标 $P(x_s, y_s, z_s)$ 通过基函数 N 和控制点坐标 Q 的方式进行表

示，如公式 1.1 所示，然后通过改变控制点的方式来改变自由曲面面型。

$$P(x_s, y_s, z_s) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) Q_{i,j}(x_s, y_s, z_s) \quad (1.1)$$

通过这种方式表示的自由曲面，其面型复杂程度与控制点的数量紧密相关，面型越复杂所需的控制点越多，当然所表示的面型就越准确，然后用于优化的参数也越多，其优化时间会更长。这种方法常用于照明领域中的自由曲面设计。

常用的自由曲面的多项式表示方法有 Zernike 多项式、XY 多项式和切比雪夫多项式等高阶连续型多项式，如公式 (1.2) 所示。

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=1}^N A_j f(x, y) \quad (1.2)$$

其中 c 为曲率， k 为圆锥系数， A_j 为第 j 项多项式的系数， $f(x, y)$ 为第 j 项多项式的表达式。这种方法通过拟合面型系数来表示自由曲面，所采用的系数越多拟合得到的面型越为准确。这种面型表示方法相比于 NURBS 方法更加直观，能够适用于成像系统中的自由曲面设计。

径向基函数表示方法是通过多个径向基函数(Radial basis function)叠加的方式来描述自由曲面的一种方法，曲面表达式如公式 (1.3) 所示。

$$z(x) = \sum_{n=1}^N \phi(\|x - c_n\|) w_n, x \in R^s \quad (1.3)$$

其中 $\{x\}$ 为评价点， $\{c_n\}$ 为基函数的中心， $\{w_n\}$ 为权向量， s 为空间维数，一般地， $s \geq 1$ 。采用径向基函数描述自由曲面，需要确定的参数主要有基函数的类型、基函数的个数、基函数的中心以及形状因数^[70]。

随着人们对光学成像系统性能要求的不断提升，原本用于照明领域中的自由曲面设计方法逐渐被应用到成像领域中，用于提高成像系统的性能，如汽车后视镜^[71]、超短焦投影物镜、头盔显示器^[72-75]、成像光谱仪^[76-80]、视频成像系统、EUV 光刻机^[81]、天文望远镜^[82]、多通道成像系统^[83]、显微镜^[84]等光学成像系统。

超短焦投影是投影系统的发展趋势。在超短焦投影系统中，随着超短焦投影物镜焦距的不断缩短和视场角的逐渐扩大，基于自由曲面的超短焦投影物镜光学设计是实现大屏幕、高分辨率的超短焦投影系统所必须解决的问题。然而采用自由曲面以后，专利库中可用的包含自由曲面的超短焦投影物镜初始结构非常少，因而目前基于自由曲面的超短焦投影物镜的光学设计，一般需要先结合自由曲面

的设计方法,根据设计指标进行自由曲面的设计,获得初始的基于自由曲面的超短焦投影物镜结构,然后再通过设计软件进行优化,最终得到满足要求的超短焦镜头。因此,不管是超短焦投影物镜还是其中自由曲面光学设计方法的研究都具有重要的意义。

1.2 课题国内外研究现状

1.2.1 超短焦投影物镜研究现状

在投影领域中,投射比 $TR^{[85,86]}$ (Throw Ratio) 是衡量超短焦投影物镜在一定投影距离处投影出画面大小的能力的一个专用术语,它的定义为投影距离和屏幕宽度的比值,如公式(1.4)和图 1.13 所示。投影系统的投射比越小,也就意味着其投影出一定尺寸的画面所需要的投影距离越短。对于超短焦投影物镜,其投射比一般小于 0.38。

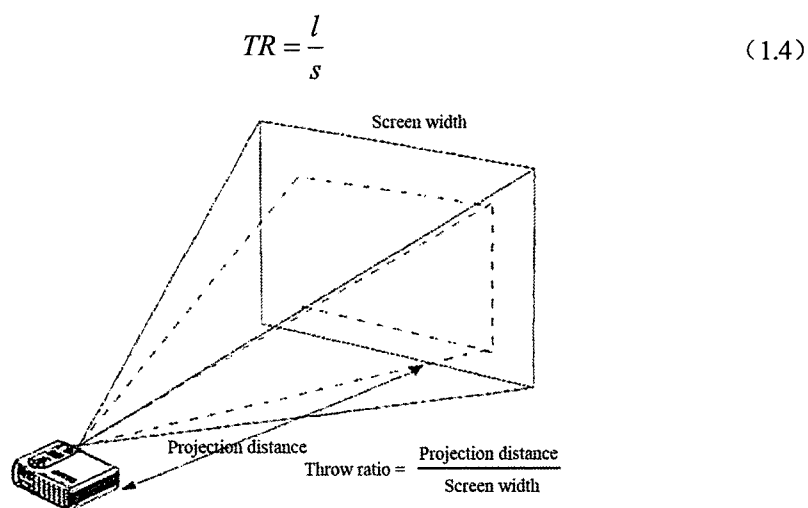


图 1.13 投射比的定义

Figure 1.13 Definition of throw ratio

2003 年, NEC 公司采用反射式物镜结构,首次研发出了一种型号为 WT600^[30] 的投影机,如图 1.14 所示。其投影物镜采用了四片非球面反射镜,以 0.7inch 的 DMD 作为空间光调制器,在 65cm 的投影距离处投影出 100inch 的投影画面,实现了当时世界上的最短投影距离,物镜投射比为 0.32。它为其之后的超短焦投影镜头的研究提供了新的镜头结构设计思路,且在色差控制方面具有独特优势。然而由于这种镜头采用的是离轴式结构,因而其装配难度较大且对公差要求很高,

另外设计中所采用的大口径非球面反射镜的加工和检测十分困难,会造成高成本,这就使其难于推广与应用。

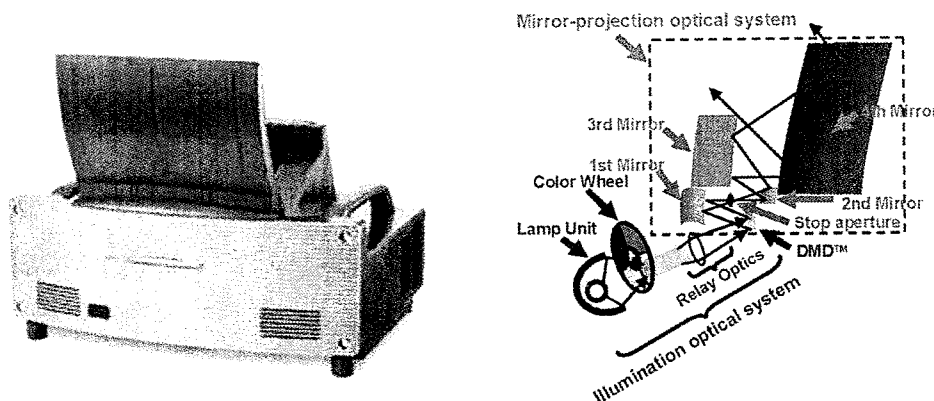


图 1.14 NEC WT600 超短焦投影系统

Figure 1.14 NEC WT600 ultra-short-focus projection system

2006 年, SANYO 公司推出了一种折反式光路结构的投影机, 其型号为 LP-XL40, 能够在 76cm 的投影距离处实现 60inch 的投影画面, 投射比为 0.62, 算是一种短焦投影系统。2007 年, 该公司又继续研发出了折反式投影机 LP-XL50, 该系统可实现更短的投影距离, 可在 46cm 的投影距离处实现 80inch 屏幕的投影, 投射比为 0.31, 机身距离墙面的最短距离仅为 8cm, 如图 1.15 所示。然而这个投影物镜也存在着体积大、价格昂贵的缺点, 使其未能进行推广^[33]。

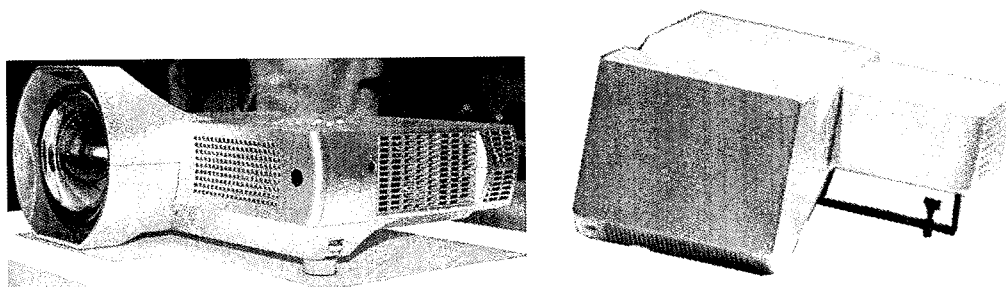


图 1.15 LP-XL40 和 LP-XL50 投影机

Figure 1.15 LP-XL40 and LP-XL50

2008 年年初, HITACHI 公司推出了一款首次采用自由曲面的折反式超短焦投影机 HCP-A8, 如图 1.16, 可在 47cm 处投影出 60inch 的画面, 投射比是 0.38。该投影物镜在折射部分中采用了非球面和自由曲面, 反射部分为一块自由曲面反射镜。相比于未采用自由曲面的超短焦投影机, 这种投影机能够更好地校正畸变、场曲等像差, 投影像质高, 色彩明亮均匀。

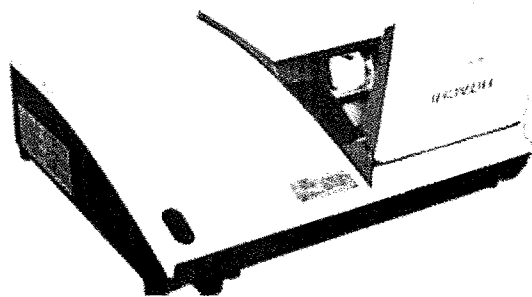


图 1.16 HCP-A8 投影机

Figure 1.16 HCP-A8 projector

为了实现更短的投影距离, 投影显示行业内很多公司都对超短焦投影系统开展了研究。2008 年, LPI 公司^[87]也设计了一种折反式超短焦投影系统, 如图 1.17 所示, 这种系统包含两片自由曲面反射镜, 缩短了投影距离, 可在 33.5cm 处投影出 80inch 的画面, 这项工作在当时似乎是不可实现的, 这也证明了自由曲面在超短焦投影系统设计中具有巨大的潜力。

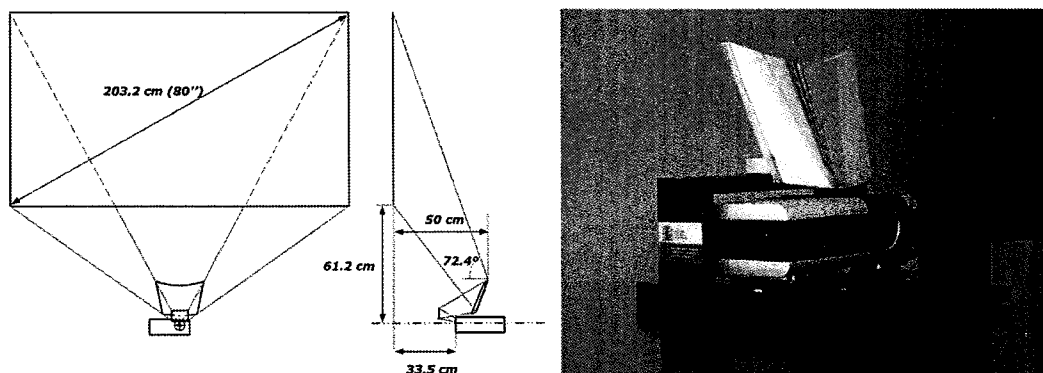


图 1.17 LPI 公司的超短焦投影系统

Figure1.17 Ultra-short-focus projection system of LPI

此外, 2008 年, Sanyo 公司发表了一种折反混合式超短焦投影机^[33], 如图 1.18 所示, 可实现变焦投影, 在 410mm 的距离处可实现 64inch 的画面, 在 500mm 的距离处可实现 78inch 的画面。

2011 年, Sanyo 公司公布了一种折反结合型投影系统^[88], 其投射比低于 0.2, 可实现投影距离为 320mm, 80inch 屏幕的超短焦投影。

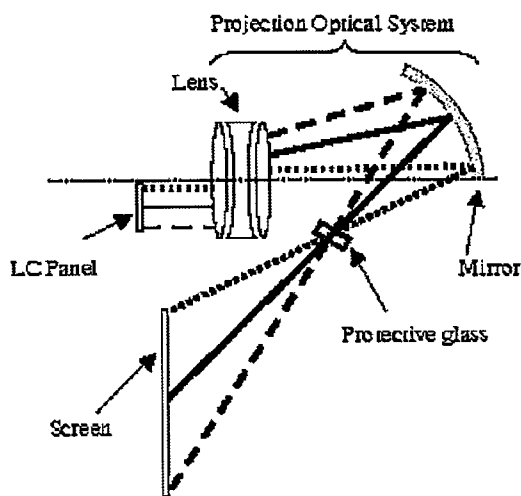


图 1.18 折反式投影光学系统结构示意图

Figure 1.18 Layout of hybrid projection system.

2012 年, ACTO 公司推出了型号为 RAC100 的投影机, 在投影距离 49.5cm 处能够实现 80inch 的投影画面, 该投影机的投射比为 0.3。这种投影机采用了 3LCD 投影技术, 分辨率达到 1K 水平 1024×768 , 对比度为 3200:1, 亮度为 2000lm。该投影机的外观如图 1.19 所示, 然而这种投影机的光学结构并未公开。

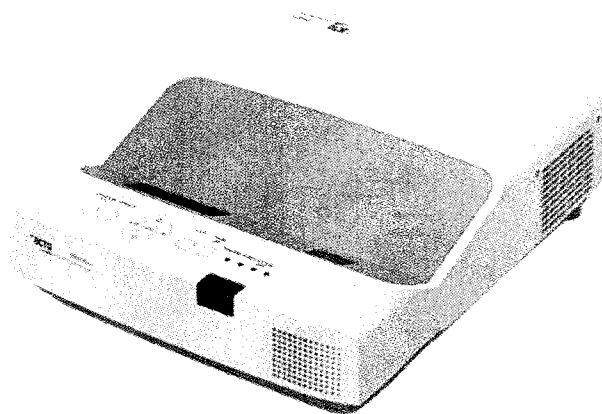


图 1.19 RAC100 投影机

Figure 1.19 RAC100 projector

2013 年, Osamu Nagase 设计了一款折反结合型超短焦投影镜头^[89], 这种镜头共包括 14 片折射透镜和一片非球面的反射镜, 如图 1.20 所示, 可在 49.5cm 的投影距离处投影出 78inch 屏幕尺寸的投影画面, 且投影屏幕尺寸能够进行一定程度的变化, 投射比达 0.31。然而该镜头结构复杂, 需要较高的加工和装配要求。

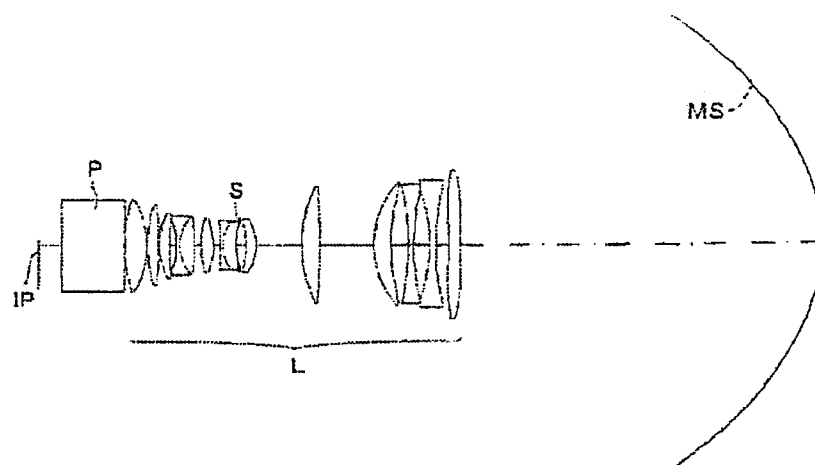


图 1.20 Osamu Nagase 的折反式超短焦投影物镜光学结构

Figure 1.20 Layout of hybrid ultra-short-focus projection system designed by Osamu Nagase

2016 年, Vrije Universiteit Brussel、LPI(Light Prescriptions Innovators)以及 Universidad Politecnica de Madrid 共同发表的文献^[26]中提出一种折反式超短焦投影物镜的设计, 如图 1.21 所示。该系统采用两片自由曲面反射镜, 可在投影距离为 48cm 处实现 2m (78.3inch) 屏幕尺寸的投影画面, 投射比为 0.24, 畸变小于 1.5%, 然而该文献中只报道了超短焦投影系统的光学仿真设计结果。

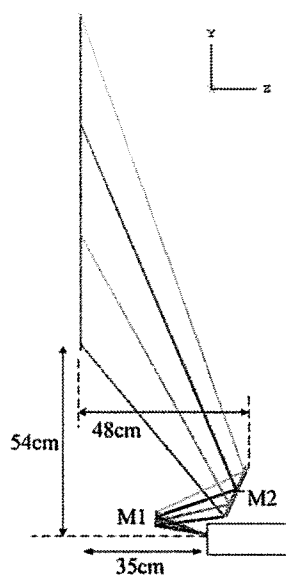


图 1.21 Vrije Universiteit Brussel 发表的包含自由曲面的超短焦投影系统示意图

Figure 1.21 Schematic diagram of an ultra-short-focus projection system with freeform surfaces published by Vrije Universiteit Brussel

Sony 公司研制的 4K 分辨率, 147inch 的大屏幕投影电视已经形成产品并投放到市场中, 但是该公司并对此项技术进行公开报道。

与国外相比，国内在超短焦投影物镜的研究方面仍存在一定差距。2016 年，北京理工大学设计了一种超短焦投影物镜^[35]，该物镜包含一个折射透镜组和一片凹的自由曲面反射镜，可在 44cm 的投影距离实现 60inch 屏幕尺寸的投影画面，该设计的投射比为 0.29，最大畸变小于 4%，系统结构如图 1.22 所示。

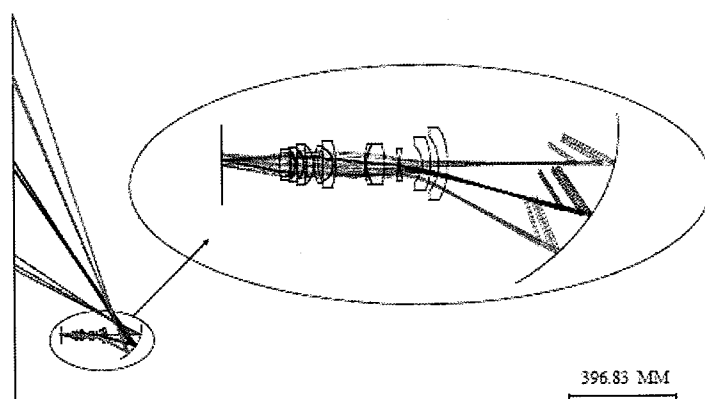


图 1.22 北理工的折反型超短焦投影物镜

Figure 1.22 Layout of refractive-reflective ultra-short-focus projection system of Beijing University of Technology

结合上述超短焦投影物镜的研究现状来看，国外对于超短焦投影物镜的研究大部分已经形成产品，而国内虽然也已取得一些进展，但与国外仍有一定差距。在超短焦投影物镜中引入自由曲面已经成为一种趋势，但是，对于大视场系统中自由曲面的光学设计方法仍有待进一步研究。为了进一步缩短超短焦投影物镜的投射比，在更短投影距离实现更大屏幕尺寸的超短焦投影，需要进一步研究自由曲面的设计方法。

1.2.2 自由曲面设计方法研究现状

近年来，随着对自由曲面研究的不断深入，已发展出了一系列自由曲面设计方法。目前，多参数优化方法、基于节点像差理论的设计方法、直接设计方法和构建-迭代设计方法是成像光学系统中四种常用的自由曲面设计思路。

多参数优化方法主要是在具有良好约束的传统设计的基础上，根据需要选择一种自由曲面面型，例如，Zernike 多项式曲面，XY 多项式曲面，或者其它更加新奇有效的自由曲面的表述方式，然后，采用商用的光学设计软件中内部封装的优化方法逐步对面形参数进行优化直至将评价函数降至最小而得到自由曲面的一种设计方法。然而，为了满足光学系统的成像质量要求，需要采用的自由曲面

项数通常较多,也就是优化变量会很多,所以采用多参数优化方法的设计效率较低,而且面型的收敛主要取决于设计的复杂性以及所选择的初始结构。

1977年,美国亚利桑那大学光学研究中心的 Roland V. Shack 最先提出了节点像差理论(NAT)的概念^[90],然后由 K. P. Thompson 进一步发展^[91],将其从概念扩展到通过非对称光学系统的5阶的像差场的完整的理论。这项工作是在1979年完成的,但后来才发表在文献中^[92]。基于节点像差理论的设计方法首先被用于旋转对称光学系统,近几年被扩展到自由曲面中^[93-95]。2012年, Jannick P. Rolland 和 Kevin P. Thompson 首先将其用于自由曲面的光学设计^[96]中,并发表在 Optics Express 期刊上。这种方法主要是在系统设计中控制或消除已知像差的设计方法。2017年, Y. Zhong 等人提出了基于高斯括号和节点像差理论对非旋转对称系统的初始系统设计方法^[97],并且对两个 TMA (Three Mirror Anastigmat) 系统进行设计,使用非线性最小二乘法优化减小了初级像差。国内对于节点像差场这种方法的研究并不是很多。实际上,节点像差场理论这种设计方法一般需要已知系统中的像差,然后利用已知像差来想出用于控制或减小系统像差的设计方法。

直接设计方法主要是在优化之前基于偏微分方程或者密集点云的数值计算来直接设计的方法,主要包含偏微分方程方法和同时多曲面设计方法等方法。

偏微分方程方法^[98-102]通过入射光线、出射光线和曲面法线之间的关系,并结合理想物像关系的约束,建立偏微分方程组,通过方程组的求解可以获得自由曲面参数。1949年 Wassermann 和 Wolf 根据等光程原理提出了一种微分方程组,使用两个方程分别描述透镜的前后两个自由曲面。通过求解该方程组能够获得透镜的自由曲面面形^[98],如图 1.23 所示。但是该方法只解决了轴上点视场的球差校正问题,无法对其他视场点的球差进行校正。

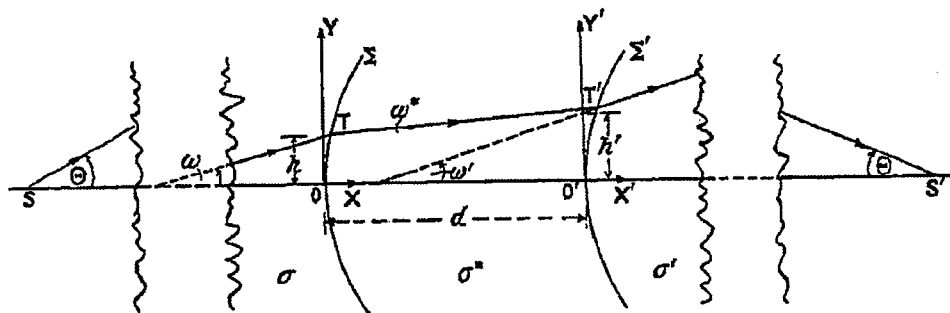


图 1.23 Wassermann-Wolf 方法

Figure 1.23 Wassermann-Wolf method

2007 年, R. Hicks 基于光的反射定律, 结合像面和自由曲面反射镜之间的对应关系, 提出了一个微分方程, 对其求解得到了一个自由曲面反射镜面型。采用小视场角的成像物镜结合计算所得的自由曲面反射镜, 设计了一个超广角镜头, 实现了大视场成像系统的畸变校正。这种方法在建立偏微分方程时只对每个视场采样一条主光线, 意味着系统孔径需小至只能允许一条光线经过, 所以该方法只适用于小光瞳的系统。

2010 年, 北京理工大学的王涌天团队采用偏微分方程的方法设计自由曲面光学系统^[103], 以离轴自由曲面棱镜式头戴显示器系统设计为例, 获得了具有 20° 视场, 8mm 出瞳和 15mm 有效焦距的设计。但是这种方法存在它的局限性, 只适用于小视场的光学系统。

20 世纪 90 年代, Universidad Politécnica de Madrid & LPI (Light Prescriptions Innovators) 的 Juan C. Minano, P. Benítez 等人提出了 SMS 方法^[104-106]。该方法基于费马原理, 即从同一个点发出的光线, 不管以何种路径经过光学系统到达它们的像点, 它们所经过的光程为相等的。这种方法最初是被应用在非成像光学设计中, 例如太阳能聚光器等, 能够针对扩展光源设计出光学器件。这种方法对非成像系统领域彻底进行了革新。后来发展为在成像系统设计中用于同时设计多个自由曲面, 值得注意的是采用这种方法计算的自由曲面的数目要与视场点的数量相同。1997 年 P. Benítez 等人运用 SMS 法设计超高数值孔径成像式 RX 型聚光器^[107]。

总之, 这两种直接设计方法在计算过程中考虑到的视场点的数目方面都有限制, 这就阻碍了其更广泛的应用。

2012 年, 美国罗切斯特大学的 Jannick P. Rolland 团队提出了二维反射镜设计的直接计算的算法^[108], 将 Olikier 提出的抛物线方法、Olikier 和 Wang 分别独立提出的线性编程^[109,110]以及数值积分方法联系起来^[111]。这种算法假定一种预定的光源到目标的映射, 通过将二次曲线沿着给定光线方向与光线直接相交, 从而直接计算他们的焦参数, 将圆锥截线段拼接起来从而获得自由曲面。这种算法相比于抛物线方法和线性编程方法, 在计算时间上可缩短几个量级。

2013 年, 清华大学提出了一种自由曲面设计方法, 能够设计具有宽线性视场的自由曲面^[112]。为了产生平滑准确的曲面轮廓, 他们提出了两个特殊的限制条件。作者用这种方法设计了 $\pm 60^\circ$ 视场角的 $f-\theta$ 单一透镜验证了所提出的方法, 计算得到的曲面可以被作为进一步优化的初始点。经过光学设计软件优化后, 透

镜的 MTF 接近衍射极限, 扫描误差优于 $1\mu\text{m}$ 。然而, 该方法仅适用于设计 2D 自由曲面。

2014 年, 清华大学提出采用直接构建的设计方法用于计算离轴反射成像系统中的自由曲面^[113]。这种算法采样多个视场和不同光瞳坐标的光线来逐点计算自由曲面上的数据点。但是采用这种算法计算得到的自由曲面初始系统成像质量较低, 作者在文献中介绍的设计实例系统得到的平均 RMS 光斑直径超过 1mm , 而且对于具有更先进规格和更高性能要求的系统, 采用直接构建过程得到的系统成像质量和畸变会更差, 进一步优化将会更为困难。

2015 年, 清华大学同一团队又利用逐点三维构建-迭代方法进行自由曲面和自由曲面成像系统的直接设计^[114]。在曲面构建阶段, 通过控制多个视场和不同光瞳坐标的光线, 直接计算多个自由曲面上的数据点的坐标以及曲面法线。然后再用迭代过程提高成像质量或者实现更好的光线映射关系。利用构建-迭代方法可以得到更理想的自由曲面初始设计, 而且对后期的软件优化以及设计系统成像质量的提高具有重要意义。

虽然目前已经发展了一些自由曲面的光学设计方法, 但是对于成像系统设计, 特别是适合大视场的自由曲面优化算法仍然需要进一步研究。需要提出更先进的自由曲面优化算法, 使得计算得到的自由曲面能够满足大视场成像系统中所有视场的成像质量要求, 为获得包含自由曲面的大视场成像系统初始结构提供有益思路, 而这也是论文将要研究的内容。

1.3 主要研究内容和结构安排

1.3.1 论文的研究内容

本论文以基于自由曲面的超短焦投影系统作为研究对象, 重点针对自由曲面的设计方法、超短焦投影物镜的光学系统设计及工程验证等关键技术进行了相关的研究工作。主要研究内容包括:

第一, 自由曲面设计方法研究。分析了自由曲面设计方法的问题和局限性, 并针对自由曲面优化方法的计算复杂度进行改进, 根据成像系统中要求的物像关系, 基于几何光学原理提出了一种直接迭代优化的自由曲面光学设计方法, 从理论上阐述了实现成像系统中自由曲面形状计算的依据, 并通过单个自由曲面反射镜和透镜的计算, 验证了该算法的有效性。该方法可同时对所有光线进行计算,

并得到理想的自由曲面形状，有效降低了计算复杂度，提高了自由曲面的收敛速度和设计效率。在这种方法的基础上进行改进，提出了一种多视场优化的设计方法，主要用于设计大视场成像系统中的自由曲面，该方法在计算自由曲面时同时考虑了所有视场的光线。该方法可基于平面直接优化得到自由曲面，降低了对自由曲面初始面的要求，应用于大视场系统中可直接得到进一步优化的自由曲面初始面；

第二，基于自由曲面的超短焦投影物镜光学设计研究。首先采用高阶非球面设计了一种超短焦投影物镜，然后针对本文所要设计镜头的参数指标，分析了投影系统的结构类型，采用折反混合式的结构并选取了合适的折射部分初始结构，采用提出的算法对自由曲面反射镜进行了设计，并结合折射部分，得到了超短焦镜头的初始结构，并用光学设计软件对物镜整体进行了优化和仿真分析，最终得到了满足要求的折反混合式的超短焦投影物镜，有效缩短了超短焦投影物镜的焦距和投射比，实现了低投射比的超短焦投影；

第三，超短焦投影物镜系统验证。为了验证折反混合式超短焦投影物镜的性能，开展了对物镜光学元件加工和面形检测方法的研究，并对超短焦镜头的光学元件进行了加工和面形检测，采用合适的方案进行装调并搭建了原理样机，对样机的性能进行了测试与分析。

1.3.2 论文的结构安排

本文的具体结构安排如下：

第一章为绪论。本章主要介绍了投影技术及超短焦投影物镜和自由曲面光学设计方法的发展概况，回顾了超短焦投影物镜和自由曲面光学设计方法的国内外研究现状，并对本文的主要研究内容和结构安排进行了简要的阐述。

第二章为超短焦投影物镜的理论基础。本章主要介绍了超短焦投影物镜的理论基础，包括投影物镜结构的高斯光学理论、反远距型物镜结构参数的相互关系以及不同结构类型投影物镜的原理，并对超短焦投影物镜光学系统的各项参数指标进行了分析。

第三章为多视场加权迭代优化自由曲面光学设计方法。本章主要研究了自由曲面的光学设计方法，首先介绍了几种常用的自由曲面设计方法，然后在构建-迭代方法的基础上进行改进，提出了成像系统中的自由曲面直接迭代优化的设计

方法来提高面形的收敛速度,并进一步改进提出了一种多视场加权迭代优化的设计方法,用于设计超短焦投影物镜中的自由曲面。

第四章为基于自由曲面的超短焦投影物镜光学系统设计研究。本章首先采用高阶非球面设计了一种超短焦投影物镜,然后,为获得更低投射比的超短焦投影系统,结合实际的加工成本等因素,进一步采用自由曲面设计了一种具有低投射比的超短焦投影物镜系统。详细阐述了超短焦投影系统的设计指标、折射部分的优化设计、自由曲面反射镜的设计、基于自由曲面的超短焦投影物镜的一体化优化设计以及公差分析等设计过程。

第五章为超短焦投影物镜系统验证。为验证本文中设计的超短焦投影物镜的实际性能,首先设计了物镜的机械结构,然后确定了自由曲面光学元件的光学加工和检测方案,并采用合适的方案对超短焦投影物镜系统进行了装调,完成了原理样机的搭建,最后对实际性能进行了测试与分析。

第六章为总结与展望。本章总结了本文的主要研究工作,总结了论文的主要创新点,并对下一步的研究工作作了展望。

第2章 超短焦投影物镜的理论基础

2.1 引言

超短焦投影物镜是超短焦投影系统的成像物镜,决定着整个投影系统的投射比以及成像质量等,即决定着在一定投影距离处实现投影画面尺寸大小的能力以及投影画面的图像质量等。随着超短焦投影系统逐渐朝着超短投影距离、大屏幕、高清晰度的方向发展,对投影物镜的发展要求则是短焦距、大视场和低畸变,这就使得超短焦投影物镜的设计变得更加困难。

本章从投影物镜光学设计的基础理论着手,对物镜光学设计结构及像差理论等进行了分析和介绍,以此为投影物镜设计参数的确定和投影距离的缩短提供理论上的指导。然后分别介绍了透射式投影物镜、反射式超短焦投影物镜和折反式超短焦投影物镜的原理,在选取物镜结构时,需要同时考虑到不同类型物镜的结构特点及其在像差校正方面的因素,以便于满足设计要求并简化系统结构。最后,在投影物镜光学理论的基础上,对超短焦投影物镜的参数指标进行了分析。

2.2 投影物镜光学设计理论基础

2.2.1 投影物镜结构的高斯光学理论

一般来说,短焦距的投影物镜具有较大的视场角。而且投影物镜一般要在空间光调制器和投影物镜之间放置保护玻璃和棱镜等元件以便于与照明系统进行衔接,因而需要较长的工作距离。为了同时满足大视场角和长工作距离的要求,投影物镜一般采用反远距型结构。反远距型光路结构一般采用负正透镜分离的结构形式,将具有负光焦度的透镜作为光学系统的前组,而令正光焦度透镜作为后组,其光路结构如图 2.1 所示。当平行光经过光学系统前组时被发散,然后经过光学系统的后组会聚,最终成像在焦平面上,这样,便使得光学系统的工作距离长于焦距。大视场角的轴外光线被光学系统的前组发散后,到达光学系统后组时视场角便会变小,从而可以实现大视场角的设计要求。

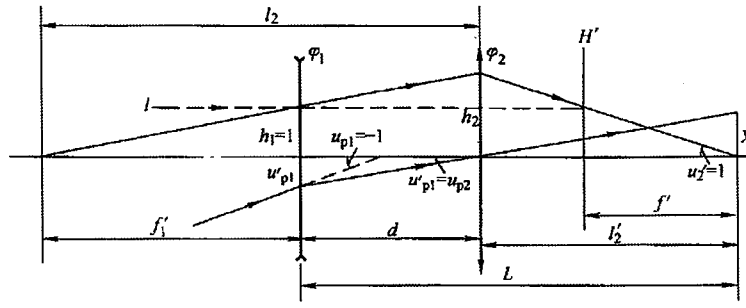


图 2.1 反远距光路结构示意图

Figure 2.1 Schematic diagram of an anti-telescopic objective

为了实现投影系统的光学设计，还需要基于高斯光学理论进一步分析反远距型物镜结构的原理。如图 2.1 所示，假设光学系统的总光焦度为 $\varphi=1$ ，设光学系统前组和后组的光焦度分别为 φ_1 和 φ_2 ，系统前后两组之间的距离为 d 。当令物高 $h_1=1$ 时，光线经过后组后的倾斜角为 $u'_2=1$ ，假设轴外主光线经过后组透镜的主点，则光线在后组上的投射高度为 $h_{p2}=0$ 。然后假设光线入射到光学系统前组的倾斜角为 $u_{p1}=-1$ ，此时光线经过光学系统前组出射后与光轴的交点的距离为：

$$l'_{p1} = d \quad (2.1)$$

而整个光学系统的光学不变量为

$$J = -n_1 h_1 u_{p1} = 1 \quad (2.2)$$

设前组角放大率的倒数为

$$\frac{1}{\gamma_1} = \frac{u_{p1}}{u'_{p1}} = 1 - d\varphi_1 \quad (2.3)$$

而且工作距离

$$l'_2 = h_2 = 1 - d\varphi_1 = \frac{1}{\gamma_1} \quad (2.4)$$

即光学系统前组主光线的角放大率的倒数等于光学系统的工作距离。这时，可以求出光学系统的总长度为

$$L = d + l'_2 = \frac{1}{\gamma_1} + \frac{1 - \frac{1}{\gamma_1}}{\gamma_1} \quad (2.5)$$

光学系统前后两组的光焦度与光学系统前组的角放大率的倒数 $1/\gamma_1$ 的关系为

$$\varphi_2 = (1 - \varphi_1) / \frac{1}{\gamma_1} \quad (2.6)$$

对于在光学系统中承担负光焦度的前组，其孔径角为

$$u'_1 = \varphi_1 \quad (2.7)$$

对于具有正光焦度的后组，其分担的孔径角为

$$u'_2 - u'_1 = 1 - \varphi_1 \quad (2.8)$$

光学系统前组轴外视场的主光线的相对孔径为

$$2h_{p1}\varphi_1 = \frac{2\left(\frac{1}{\gamma_1} - 1\right)}{\frac{1}{\gamma_1}} \quad (2.9)$$

光学系统前组轴外视场的主光线高度是

$$h_{p1} = \frac{\frac{1}{\gamma_1} - 1}{\frac{1}{\gamma_1} \varphi_1} \quad (2.10)$$

当已知光学系统前组主光线的角放大率的倒数 $\frac{1}{\gamma_1}$ 和前组的光焦度 φ_1 时，便能够根据前述公式计算得到光学系统后组的光焦度 φ_2 、光线与后组交点距离光轴的高度 h_2 和光线在前组上的投射高度 h_{p1} 和光学系统的总长度 L 。

2.2.2 反远距型投影物镜结构的设计参数

采用反远距型光路结构设计投影物镜时，既要考虑工作距离以及视场角的设计要求，还需要同时兼顾系统的体积和物镜结构的复杂性等因素，而且这些参量彼此之间也存在着相互的制约和影响。因此，在进行光学设计之前，需要明确各项设计指标相互之间的关系。

由公式 (2.4) 可知，光学系统前组主光线的角放大率的倒数等于光学系统的工作距离，因此为了获得更长工作距离的光学系统，就需要增加光学系统前组主光线的角放大率的倒数 $\frac{1}{\gamma_1}$ ，与此同时系统的视场角也会增大。由此可见，在设计时，给出充分大的 $\frac{1}{\gamma_1}$ 对获得长工作距离和大视场角是至关重要的。

由公式 (2.3) 可知, 当给定了前组角放大率的倒数 $\frac{1}{\gamma_1}$ 时, 若要减小两组距离 d , 则必须增加前组光焦度 φ_1 , 而当 φ_1 增大时, 又会引起 φ_2 的增加, 而此时根据公式 (2.4) 和 (2.5) 可知, 前后两组的相对孔径也会因此而增加, 而这又会导致和孔径有关的高级像差的增加。为了尽可能地减化系统结构的复杂性, 又需要在给定的前组角放大率的倒数 $\frac{1}{\gamma_1}$ 下, 尽可能地减小前组光焦度 φ_1 , 而这又会使两组距离 d 增加, 从而导致系统总长变大。

在归化条件下, 即焦距 $f'=1$, 则公式 (2.4) 也可写成

$$\frac{1}{\gamma_1} = \frac{l'_2}{f'} \quad (2.11)$$

反远比即工作距离和焦距的比值, 所以 $\frac{1}{\gamma_1}$ 也就是反远比。一般来说, 反远比要比 1 大, 其值越大, 表示系统具有越长的的工作距离。而由公式 (2.3) 可知, 前组光焦度 γ_1 可表明经过前后组透镜后系统视场角的降低率。而且 γ_1 又直接影响相对孔径, 也就是前组光焦度影响系统结构的复杂度。

由此可见, 前组角放大率的倒数 $\frac{1}{\gamma_1}$, 前组光焦度 φ_1 和两组距离 d 之间有着不可分割的联系, 三者之间互相制约, 所以, 在物镜的设计过程中, 需要综合考虑工作距离、视场角、系统总长以及结构的复杂性因素来确定 $\frac{1}{\gamma_1}$ 、 d 及 φ_1 这三个结构参数。

2.3 超短焦投影物镜原理分析

2.3.1 折射式投影物镜原理

折射式投影物镜是一种全部采用透射型光学元件的物镜结构, 而为了设计具有更短焦距和长工作距离的投影物镜, 折射式投影物镜一般采用反远距型光学结构。从具体结构上, 常用的折射型投影物镜的结构一般包含两种形式, 即基于反远距结构发展的“负-正-正”的结构; 另一种则是“正-负-正”的结构。

如图 2.2 所示为“负-正-正”型投影物镜结构示意图, 这种类型的结构能够获得长工作距离。采用两个正透镜组分担光焦度, 有利于像差的校正, 并且可以

简化每组透镜的结构,例如采用双胶合,或者用三透镜组作为负透镜。

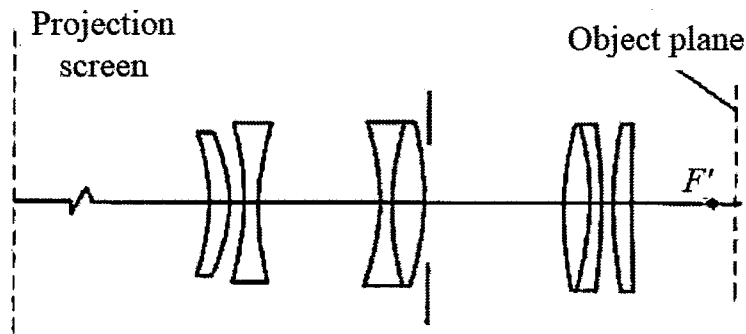


图 2.2 负-正-正型光学结构示意图

Figure 2.2 Schematic diagram of negative-positive-positive projection objective

对于这种结构的投影物镜,一般将光阑置于中间镜组上,其与前面的负光焦度镜组构成伽利略望远镜式结构。当光阑与前焦面重合时,便构成了远心光路结构,这种远心光路能够消除由于调焦不准确而导致的测量误差。

“正-负-正”型结构的投影物镜,能够获得较大的孔径和长工作距离,如图 2.3 所示。其光阑一般设在镜组中间,利于轴外像差的校正,特别地,通过前后组之间的平衡可对垂轴色差和色畸变实现良好校正。轴上光线经过光学系统前组透镜会聚后,投射到后组上的高度便会降低,这有利于系统孔径像差的校正。三组透镜中后组分担了大部分光焦度,结构复杂。这种“正-负-正”型结构具有反远距型物镜结构的特点,工作距离较长,并且利于校正像差。

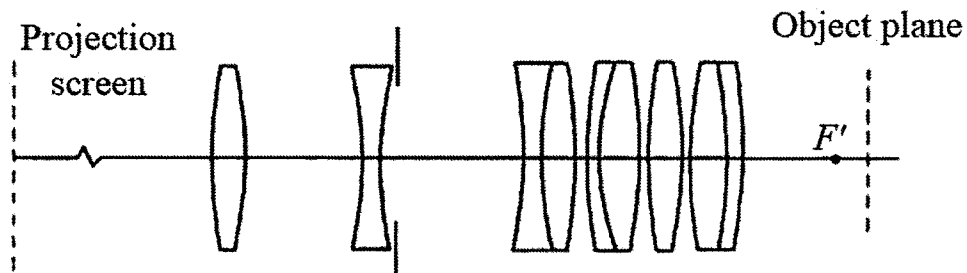


图 2.3 正-负-正型光学结构示意图

Figure 2.3 Schematic diagram of positive-negative-positive projection objective

折射型投影物镜的优点在于它在工艺上具有很大的可实现性,采用传统的制造和检测方法就可以实现,且性能可靠,成本也可控制在较低范围内。其缺点主要是为实现大视场角,投影物镜的结构变得越来越复杂,采用折射型物镜很难设计出具有很大大视场角的超短焦投影物镜。

2.3.2 反射式超短焦投影物镜原理

反射型超短焦投影物镜一般由三或四片反射镜组成，反射镜的面型一般采用非球面或自由曲面，由于物镜结构中不包含折射型光学元件，因而这种结构的投影物镜系统不会产生色差。其设计的原理主要是基于近轴方程和 Petzval 条件，通过分配各元件所负担光焦度的方法确定系统的初始结构。系统反射镜的数量是由所有反射镜的总反射率和反射面的散射效应决定的，而系统的装配取决于近轴方程和 Petzval 条件。设系统焦距为 F_n ，Petzval 和是 p ，反射镜的数量为四片，各反射镜的焦距分别用 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 表示，而从空间光调制器到各反射镜再至屏幕的各元件之间的间隔分别依次用 d_0 、 d_1 、 d_2 、 d_3 来描述，如图 2.4 所示。

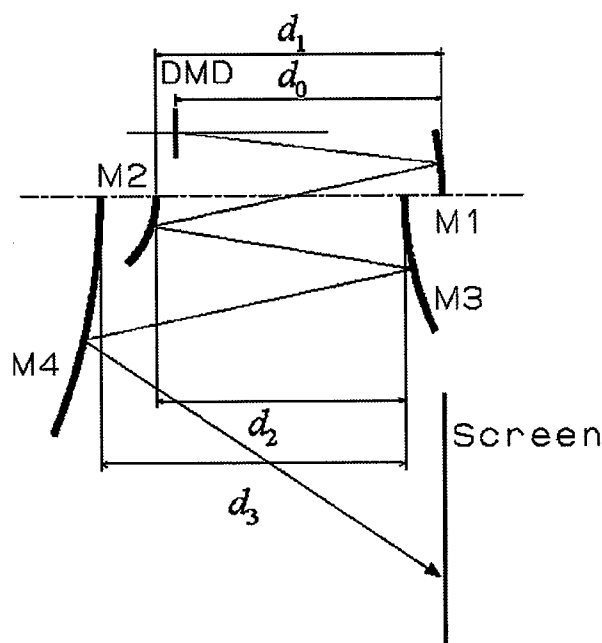


图 2.4 反射型超短焦投影物镜光学结构示意图

Figure 2.4 Schematic diagram of reflective ultra-short-focus projection system

根据预先设定的物镜结构并基于近轴几何光学理论，可分别计算得到系统的总焦距和 Petzval 和如下

$$\frac{1}{F_4} = \frac{1}{F_3} + \frac{1}{f_4} - d_3 \frac{1}{f_4} \frac{1}{F_3} \quad (2.12)$$

$$p \propto \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_4} \quad (2.13)$$

式中， F_4 为焦距，可由投影距离和放大倍率确定； p 为 Petzval 和，其意味着场

曲量, 理想值为 0; F_3 表示反射镜 M_1 、 M_2 和 M_3 的组合焦距。根据公式 (2.12) 和 (2.13), 当已知系统焦距 F_4 和 Petzval 和 p 时, 就能得到反射镜 M_1 到 M_3 的组合焦距 F_3 、反射镜 M_4 的焦距 f_4 以及 M_3 与 M_4 之间的间隔 d_3 。对每个反射镜来说, 其光焦度为

$$\varphi = \frac{R}{2} \quad (2.14)$$

式中, R 为反射镜的曲率半径。

计算得到初始结构参数之后, 就可以针对具体的设计采用非球面或自由曲面的面形来优化各个反射镜, 从而实现对各种像差的校正。具体的优化设计过程主要是指各反射镜的面型及位置的确定。采用的非球面的一般方程为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^n \alpha_i r^{2i} \quad (2.15)$$

其中, $c=1/r$, r 是曲率半径, $r^2 = x^2 + y^2$ 。基于上述这些公式及原理进行计算和优化, 可设计得到反射型投影物镜结构。

2.3.3 折反式超短焦投影物镜原理

传统的折射型投影物镜难以实现真正的超短焦投影, 反射型投影物镜虽然已经有公司推出了相应超短焦投影物镜产品, 例如 Jun Ogawa 等人研制的 WT600 投影机, 然而由于其受高装配要求和高成本的制约, 所以很难进行广泛地推广。而折反式超短焦投影物镜系统综合了折射型和反射型投影物镜的优点, 逐渐成为超短焦投影物镜的主流光学结构。因而, 为了进一步缩短投影距离, 有必要对折反式超短焦投影物镜的原理进行研究与分析。

折反式^[117-119]超短焦投影物镜是由一组折射透镜和一片反射镜组成的, 其中反射镜可以采用非球面或者自由曲面面形。其结构类似于反远距型物镜结构, 即通常靠近空间光调制器的折射部分承担正的光焦度, 而靠近屏幕的反射部分承担负的光焦度, 这样的物镜结构更容易使系统获得长工作距离。折射部分通常是用于将空间光调制器产生的图像进行放大并校正系统的主要像差, 而反射部分则主要用于校正畸变和扩大视场角。

对于折反式超短焦投影物镜来说, 其视场角通常很大, 而且视场角会对光学

系统的性能产生重要影响，二者之间的关系如图 2.5 所示。这里首先需要知道两个重要的视场角概念，即最小视场角 $M.A.$ 和有效视场角 $E.A.$ ，因为这两个视场角会对系统的实际性能和设计难度具有很大影响。二者的定义如图 2.6 所示， $M.A.$ 为最小视场角，其定义为最小视场的光线与光轴所成的夹角，而 $E.A.$ 是有效视场角，指的是最大视场角与最小视场角之间的差，即

$$M.A. = \theta_{\min} \quad (2.16)$$

$$E.A. = \theta_{\max} - \theta_{\min} \quad (2.17)$$

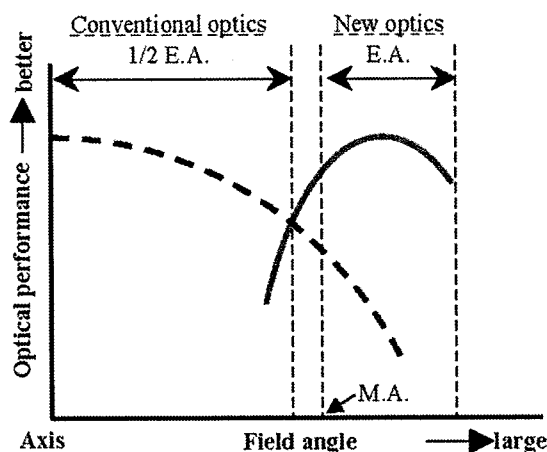


图 2.5 视场角与光学系统性能的关系曲线图

Figure 2.5 Diagram of the relationship between field-of-view angle and optical performance

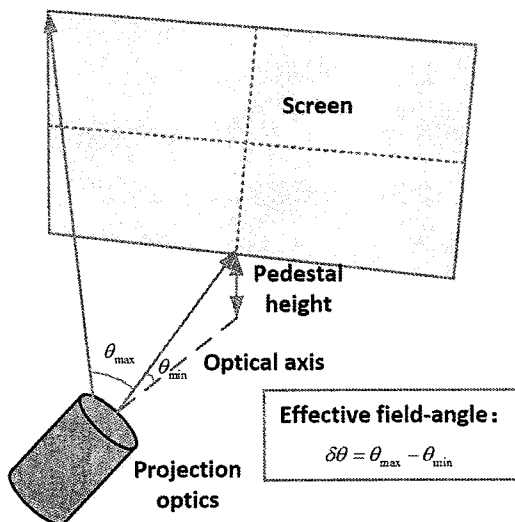


图 2.6 最小视场角与有效视场角示意图

Figure 2.6 Schematic diagrams for defining minimum and effective field angles

在弄清上述这两个概念之后，再看图 2.5。从图中可以看出，当视场角较小

时,光学系统的性能会随视场角的增加而降低,而当视场角继续增加时,存在一个区间,在这个区间中光学系统的性能会随着视场角的增加先提高后降低。因而,通过控制该区间的大小使其保证在某个较小的范围内,就可以获得较高的成像性能。这就意味着在设计过程中,希望同时获得大的 $M.A.$ 和窄的 $E.A.$,也就是最小视场角 $M.A.$ 需要远离近轴区域,而有效视场角 $E.A.$ 需要很窄以便于提高系统性能并使设计更简单。

当设计折反式超短焦投影物镜这样的大视场成像系统时,场曲的校正也是一个需要重点考虑的问题。一般来说,根据 Petzval 和理论,校正场曲必须要满足 Petzval 和条件,而对于复杂的大视场系统来说,透镜结构就会因此而变得更加复杂。然而,有一种情况可在不满足 Petzval 和条件的情况下便对场曲进行有效校正,即当有效视场角 $E.A.$ 远离近轴区域而且区间较窄时,通过在满足该情况的某个特定有效视场角范围内对光学参数进行优化便可对场曲进行校正,即使其不满足 Petzval 和条件,而且采用这种方法还会极大地简化物镜的结构。

综上所述,折反式超短焦投影物镜系统,通过引入反射镜,不仅可以避免引入色差,还可以通过反射镜分担一部分视场角,从而减少折射部分承担的视场角而降低其像差校正的难度和透镜结构的复杂度、同时缩短投影距离并且校正畸变,从而使得整个投影物镜更易于获得更大的视场角、实现超短焦投影及高像质的投影画面。因此,本文中的超短焦投影物镜采用折反式光路结构。

2.4 超短焦投影物镜光学系统参数指标

光学系统的性能指标能够反映出其传递信息的能力,因此性能指标的计算及确定是光学设计中非常关键的步骤。对于超短焦投影系统的物镜而言,需要具有短焦距、大视场角等性能,在实际的设计过程中它们也会作为约束参与优化。因此,掌握焦距、视场等各项性能指标的理论并以此确定合适的性能指标是保证超短焦投影物镜的设计可以顺利进行的基本前提和保障。

2.4.1 屏幕尺寸、投射比及视场角

超短焦投影意味着在极短的投影距离处获得大屏幕的投影显示。投射比指的是投影距离和屏幕宽度的比值,如图 2.7 所示为不同投射比的投影系统对比图,可以看出投射比越小越好。随着投影技术的发展,投影物镜的投射比被不断减小,

普通投影物镜约为 1~1.2，短焦投影物镜的投射比为 0.6~1，而超短焦投影物镜小于 0.38，而且该值仍然在不断减小。

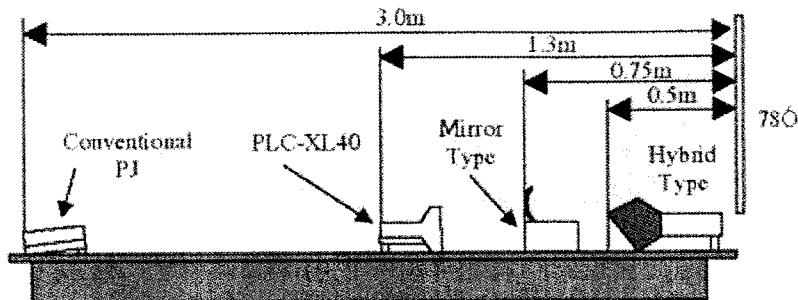


图 2.7 不同系统投射比的对比图

Figure 2.7 Comparison of different throw ratio

投射比是与视场角紧密相关的一个性能指标，视场角与投射比之间的关系可以近似表示为

$$\tan \omega = \frac{s}{2l} = \frac{1}{2TR} \quad (2.18)$$

式中， ω 为半视场角， s 为投影屏幕对角线的长度， l 为投影距离， TR 为系统的投射比。从公式 (2.18) 可以看出，要想获得投射比小的投影物镜，就必须使视场角增大，而这就会使得系统像差更难校正，系统的设计难度更大。

2.4.2 相对孔径与 F 数

投影系统的相对孔径是衡量光学系统收集能量的能力，投影物镜相对孔径的确定需要与空间光调制器及照明系统相匹配。在大视场成像系统中，对于远离光轴的边缘视场点来说，其在像面上的照度远小于轴上视场的照度。因此为了提高投影系统的像面照度，需要增大其相对孔径。然而物镜的相对孔径越大，其轴外像差越难校正，系统的设计难度也就越大，因而不能盲目地增大投影物镜的相对孔径，而是需要根据系统的实际性能需求，综合权衡后对物镜选择合适的相对孔径。

光学系统的 F 数是相对孔径的倒数，F 数的计算式为

$$F \text{ number} \approx \frac{1}{2 \sin \theta} \quad (2.19)$$

其中 θ 表示像方孔径角。公式 (2.19) 表明，像方孔径角 θ 较小时，系统的 F 数

与其成反比关系。对于投影物镜而言，像方孔径角与微显示芯片的出射光角度相互对应，因而当投影系统采用的微显示芯片确定后，便可以按照如下关系设定合适的 F 数

$$F \text{ number} \leq \frac{1}{2 \sin \theta} \quad (2.20)$$

这是因为 F 数越小，照明系统中更大角度的出射光束也能够进入投影物镜，也即物镜从照明系统收集的能量越高。

2.4.3 光通量与光亮度

投影系统在屏幕上的光通量与光亮度等性能指标与系统的能量利用率大小紧密相关。对于投影光学系统来说，从光源发出的光线经过投影物镜投射到屏幕上，屏幕上的每一点都可视为一个朗伯辐射体，在周围 2π 空间里发生漫反射。假设投影屏幕上的一个微小面积为 dS ，它对应的光通量为

$$d\Phi = L \cos i dS d\omega \quad (2.21)$$

式中， L 表示光亮度， i 为微小面积 dS 与立体角 $d\omega$ 的夹角。则余弦辐射微面元的总光通量为

$$\Phi = L dS \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos i \cdot \sin i di = \pi L dS \quad (2.22)$$

由上式可知，余弦辐射面的光通量与光亮度 L 和辐射面积 dS 成正比。在投影显示领域中，系统的输出光通量一般通过屏幕上的光亮度来进行评定。屏幕的光亮度越高，也就意味着系统输出的光通量越高，系统的信噪比也就越高。

在光度学中，光亮度指的是单位立体角内单位面积所发射的光通量。在投影系统中，屏幕的亮度主要是由光学引擎中的不同分系统对杂散光的控制所决定的。为了尽量避免杂散光进入投影物镜中，一般会采用全反射棱镜将投影光束从照明光束中提取出来。当照明光源相同时，DLP 投影技术在光亮度方面相比于其他的投影技术具有更明显的优势。

随着人们对高亮度、真色彩等更好投影效果的追求，投影光源的亮度成为了需要重点关注的参数。一些传统光源亮度如表 2.1 所示。从表中可以看出，超高压汞灯等传统光源也能实现较高的亮度，但是由于汞属于有毒物质，而且其他传统光源也都存在寿命较短等方面的不足，因此人们逐渐倾向于采用 RGB 三基色激光等新光源来代替传统光源。激光光源具有诸多的优点，例如亮度高，寿命长，

体积小，而且其单色性好，具有更窄的光谱带宽，颜色饱和度更高。对于传统光源，虽然也可以实现高饱和度的颜色，但是这会牺牲其亮度值，因为传统光源一般只能采用切割光源的光谱的方式获得高饱和度颜色。投影显示系统中，光源的基色饱和度越高越好，而激光光源不仅饱和度高，而且色域广，更不需要分色合色系统，因此具有明显的优势。

表 2.1 各种光源亮度的典型值

Table 2.1 Typical values of brightness of various light sources

光源	亮度 L (cd/m^2)
钨丝投影灯	3×10^3
氙弧灯	$1.5 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^5$
金属卤化物灯	4×10^4
投影放映灯	20×10^6
白色 LED 灯	$(4 \sim 10) \times 10^6$
超高压 (UHP) 汞灯	$(40 \sim 100) \times 10^7$

2.4.4 物镜焦距与放大率

焦距是衡量超短焦投影系统的一个重要参数指标，它与物镜的投影距离和放大倍率具有密切关系，其计算公式可表示为

$$f = \frac{M}{1-M} l \quad (2.23)$$

其中 M 为物镜的倍率， l 表示投影距离。在计算投影物镜的焦距时，一般以空间光调制器产生的像源作为像面而把屏幕作为物面；此外，由于投影物镜对物体成倒像，因而放大倍率一般取负值。

2.4.5 畸变

畸变是与视场角有关的一种垂轴像差，它与视场角的三次方成正比，因而对于具有大视场角的超短焦投影物镜而言，畸变是一种不容忽视的像差^[116]。

畸变通常定义为理想像高与实际像高的差值，即

$$\delta Y'_z = Y'_z - y' \quad (2.24)$$

其中 y' 为理想像高， Y'_z 为实际像高。在光学设计中，通常用相对畸变来描述光学系统的畸变量，含义为公式 (2.24) 所示的像高差相对于理想像高的百分比，

即

$$\text{Dist}\% = \frac{Y'_z - y'}{y'} \times 100\% \quad (2.25)$$

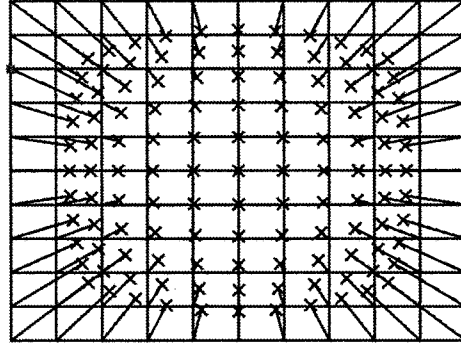


图 2.8 相对畸变定义的示意图

Figure 2.8 Schematic diagram of the definition of relative distortion

如图 2.8 所示为相对畸变定义的示意图，相对畸变一般不应超过 2%。对于大视场成像系统，一般会采用网格畸变进行评价，其定义为

$$\text{Dist} = \frac{R_{\text{distorted}}}{R_{\text{predicted}}} \times 100\% \quad (2.26)$$

$$R_{\text{real}} = \sqrt{(x_r)^2 + (y_r)^2} \quad (2.27)$$

$$R_{\text{predicted}} = \sqrt{(x_p)^2 + (y_p)^2} \quad (2.28)$$

$$R_{\text{distorted}} = \sqrt{(x_p - x_r)^2 + (y_p - y_r)^2} \quad (2.29)$$

其中，下标 r 和 p 分别指代像点在像面上相对于参考视场位置的实际坐标和理想坐标。

在投影显示系统的实际像质评价中，通常用 TV 畸变来衡量投影显示图像的视觉畸变，如图 2.9 所示，其定义为

$$\text{TV Dist \%} = \frac{\frac{A_1 + A_2}{2} - B}{B} \times 100\% \quad (2.30)$$

相对畸变和 TV 畸变的区别在于：前者描述了图像中像点的实际位置与理想位置之间的差距，后者则关注的是图像边缘与中心位置变形的相对情况。采用

TV 畸变评价投影系统的像面变形，主要是由于在实际测量中，无法在屏幕上确定系统的理想像点位置，而只能测量得到系统的实际像点；而且投影系统性能的最终评价主体要是人眼，TV 畸变更符合人眼视觉特性。一般来说，TV 畸变小于 2% 时，人眼很难察觉到变形。

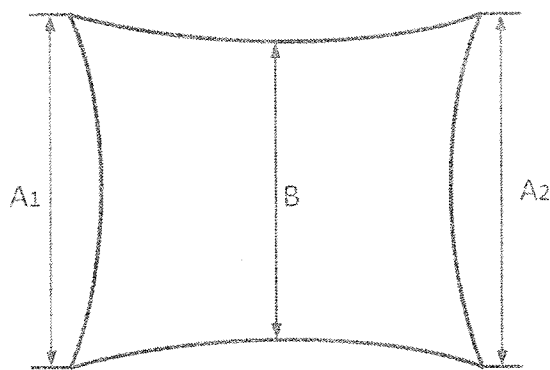


图 2.9 TV 畸变示意图

Figure 2.9 schematic diagram of TV distortion

当一个具有畸变的成像系统对一个关于中心对称的方格图像成像时，可以看到在四个拐角处的像要比侧边处的像具有更大的位移，因而在校正畸变时要更多关注边缘视场。

2.4.6 MTF

用来测量系统性能的一种条形靶板一般是由一系列相互交替的等宽度亮暗线条组成，如图 2.10 所示，设图形的频率是每毫米 N 条线，则其周期为每毫米 $1/N$ 。通常，将几组不同间距的图形作为物，然后通过被测光学系统成像，系统能够清晰分辨的最细的一组图形便是该系统的极限分辨率，用每毫米线条数来表示，即 lp/mm。

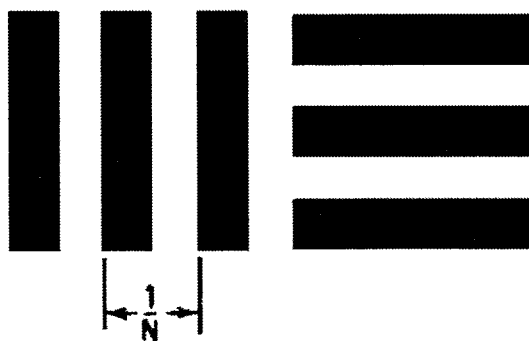


图 2.10 光学传递函数测试靶板示意图

Figure 2.10 Schematic diagram of strip target for optical transfer function

当条形图案经过光学系统成像时，每条细线的像都会变得弥散，而弥散线的横截面便是线扩散函数。图 2.11 表示一个条状物体的亮度的横截面图。当物体经过光学系统成像时，每条线都被成像为一条弥散线，用排列起来的扩散函数描述其照度分布，它的像是所有扩散函数之和，如图 2.12 所示。从图中可以直观地看出，像的四角会由于扩散函数的原因变得圆滑。

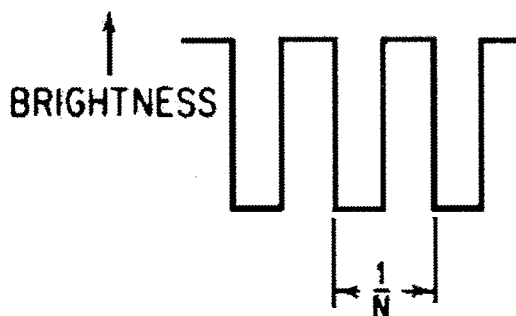


图 2.11 条状物体的亮度曲线示意图

Figure 2.11 Brightness Curve Diagram of Bar Objects

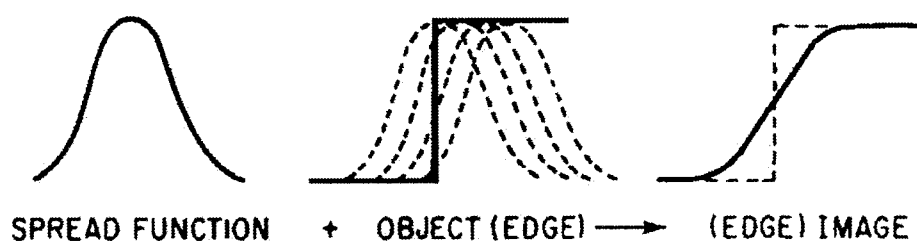


图 2.12 扩散函数对像的影响示意图

Figure 2.12 Diagram of the effect of diffusion function on image

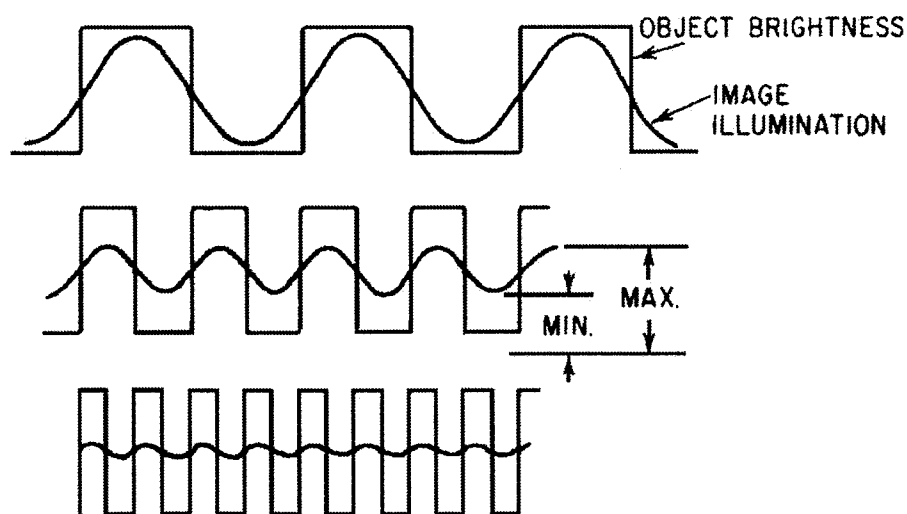


图 2.13 图像对比度示意图

Figure 2.13 Image contrast diagram

当测试图形变得越来越细时，像的亮暗之间的对比会随之下降，如图 2.13 所示，图形的亮线经过系统后所成的像会相对变暗，而图形的暗线的像会相对变亮，观察起来，线条的清晰度变差。当图像的对比度低于系统探测器可以探测到的最小值时，图像就不可分辨。

若把图像的对比表示为一种“调制”，用公式表示为

$$M = \frac{\max - \min}{\max + \min} \quad (2.31)$$

其中，max 和 min 分别表示像的最大和最小亮度。则调制便可以被绘制成关于图像中每毫米线条数的函数曲线，即频率的函数曲线，如图 2.14 所示，由图可以确定系统的极限分辨率。

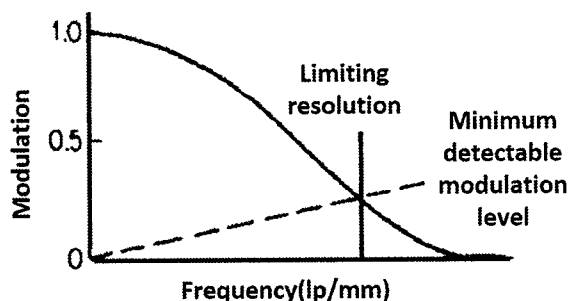


图 2.14 调制函数曲线示意图

Figure 2.14 Modulation Function Curve Diagram

如图 2.14 中所示，光学系统的性质使得像的照度分布发生变化，然而，扩散函数不会改变图形经过光学系统成像后的亮度分布形式，即若用正弦波表示靶标图形的亮度分布，则仍然用正弦波表示其像的亮度分布。因此，调制传递函数被广泛地应用于光学系统性能的描述。调制传递函数的定义为：

$$\text{MTF}(\nu) = \frac{M_i}{M_o} \quad (2.32)$$

其中， M_i 和 M_o 分别表示像的调制和物的调制。MTF 和频率 ν 的函数曲线是测量各种成像系统性能的通用方法，它可以反映光学系统的各种像差，是一种非常有效且客观全面的像质评价标准。

MTF 能够很好地描述光学系统对物体不同空间频率成分的传递能力。一般

来说,低频部分表征物体的大概轮廓,中频部分表征物体的层次,而高频部分则反映物体的细节,所以两条具有相同极限分辨率的MTF也可以有完全不同的性能,如图2.15所示。若极限分辨率相同,当低频部分的调制曲线较高时,图像的清晰度更高、反差更强,即图2.15(a)中系统的低频部分具有更高的对比度,而图2.15(b)中系统具有更高的极限分辨率。所以,在高极限分辨率和高对比度之间进行取舍需要根据系统对哪个指标更为重要进行判断。

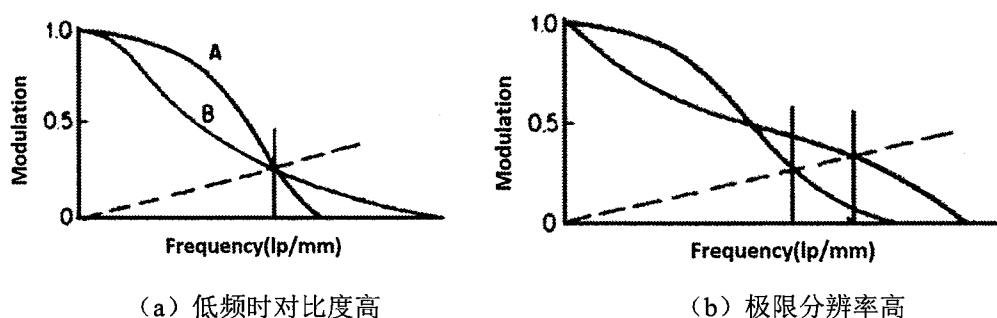


图 2.15 具有相同极限分辨率的调制函数曲线对比示意图

Figure 2.15 Contrast diagram of modulation function curve with the same limit resolution

对于投影显示系统而言,最终通过人眼来评价投影图像的质量,一般来说,人眼能够很好地分辨 0.2 以上的对比度,所以通常要求投影光学系统在截止频率处的调制传递函数要高于 0.2。

2.5 本章小结

本章主要介绍了超短焦投影物镜的理论基础。首先阐述了超短焦投影物镜光学设计的基本理论,从投影物镜结构的高斯光学理论讲起,讨论了反远距型结构参数之间的相互关系以及对系统设计及像差等方面的影响;然后分析了超短焦投影物镜的成像原理,以便于为超短焦投影物镜的设计奠定理论基础;接着,讨论了超短焦投影物镜光学系统的各项参数指标,为本论文中超短焦投影物镜系统的参数确定提供了理论支持。通过本章对超短焦投影物镜理论基础的研究和介绍,为本论文中研制一种具有低投射比且可工程化应用的超短焦投影物镜提供了有益的理论指导。

第3章 多视场加权优化迭代自由曲面光学设计方法

3.1 引言

为了设计具有低投射比的超短焦投影物镜,采用传统的球面或非球面光学元件,不仅系统结构复杂,而且像差难以校正。而自由曲面的设计自由度较高,能够在简化结构的情况下提高像质,在光学设计中具有巨大的应用潜力。在超短焦投影物镜中引入自由曲面用以降低投射比,是超短焦投影系统发展的必然趋势。

自由曲面目前并没有得到广泛应用,主要是由于自由曲面面型本身不具有对称性导致其设计和加工较为困难。特别是关于自由曲面的光学设计方法,它仍然是需要重点解决的问题,需要针对不同系统的不同设计指标采用不同的方法计算得到自由曲面,无法用一种普遍的方法设计得到所有自由曲面。

本章对自由曲面的设计方法进行了研究。首先介绍了常用的自由曲面优化方法,总结了现有方法的适用范围,在此基础上,提出了两种自由曲面的设计方法,用以计算成像系统中的自由曲面形状。分别详细介绍了这两种方法的原理,然后进行了自由曲面面形设计的仿真。设计实例的仿真结果验证了这两种方法的有效性及可行性。

3.2 自由曲面的常用设计方法

3.2.1 偏微分方程方法

偏微分方程方法通过入射光线、出射光线和曲面法线之间的关系,并结合理想物像关系的约束,建立偏微分方程组,通过方程组的求解可以获得自由曲面参数。其中如何准确地建立偏微分方程是该方法的关键。

这种偏微分方程方法最初是基于 1949 年 Wasserman 和 Wolf 提出的 Wasserman-Wolf 的微分方程。Wasserman-Wolf 方法是用来计算中心对称的成像系统中的两个相邻的非球面,首先根据阿贝正弦条件建立微分方程组,该方程组包含两个一阶偏微分方程,然后通过对其数值求解可完成非球面面形的计算,能够使光学系统的球差和彗差得到良好校正。

这种方法在计算之前,首先要把光学系统总共划分为三个空间,即待计算非球面之前的物空间 σ 、待计算非球面之间的空间 σ' 和待计算非球面之后的像空间

σ' ，其对应折射率分别设为 n 、 n^* 和 n' ，两个待计算非球面分别表示为 Σ 和 Σ' ，并分别引入了以两个待求非球面中心为原点的两套独立的笛卡尔坐标系，分别用 T 和 T' 表示光线与两个待计算的光学曲面的交点，两曲面间隔为 d ，如图 3.1 所示。

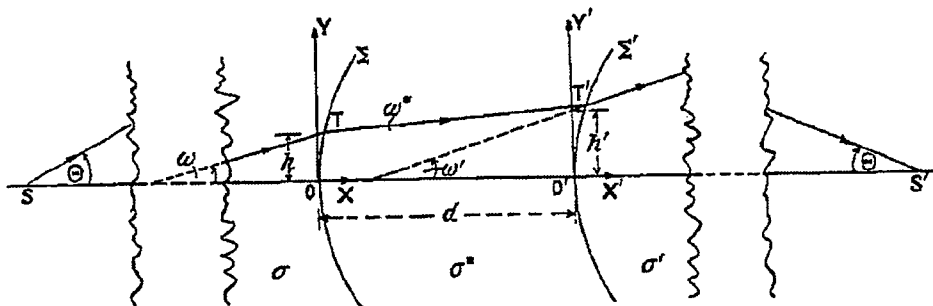


图 3.1 Wassermann-Wolf 方法

Figure 3.1 Wassermann-Wolf method

设从光轴上的一点 S 发出的一条光线，经过待计算曲面之前的光学系统折射后，以 ω 角度入射到第一个待计算非球面，其在第一个待求非球面上的投射高度为 h ，则该光线在 OY 坐标系下可以表示为关于 ω 和 h 的函数，即

$$\begin{cases} \omega = \omega(t) \\ h = h(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

其中 t 是光线参数。由于在实际应用中，很少能够获得公式 (3.1) 的分析解形式，所以该方法是通过对于不同的 t 值进行光线追迹获得 ω 和 h 的列表。

该光线经过系统折射后在第二个待求面上投射高度为 h' 处以与光轴成 ω' 角度出射。同理，可以将出射光线在 $O'Y'$ 坐标系下表示为关于 ω' 和 h' 的函数，即

$$\begin{cases} \omega' = \omega'(t') \\ h' = h'(t') \end{cases} \quad (3.2)$$

其中 ω' 和 h' 都是参考 $O'Y'$ 坐标系， t' 在含义上类似于 t 。 ω' 和 h' 的值是通过对于选定的 t' 从像点 S' 向像空间 σ' 反向追迹光线得到的。由等光程条件可知， t 和 t' 应满足正弦条件

$$t/t' = C \quad (3.3)$$

其中 C 为恒定值。在分别确定了计算待求面所用的入射和出射光线之后，便可以基于斯涅耳定律和物像之间的对应关系，建立偏微分方程。

如图 3.1，假设交点 T 在 OY 坐标系下的坐标为 (x, y) ，交点 T' 在 $O'Y'$ 坐标系

下的坐标为 (x', y') 。根据折射定律可以得到

$$n(\cos \omega dx/dt + \sin \omega dy/dt) = n^*(\cos \omega^* dx/dt + \sin \omega^* dy/dt) \quad (3.4)$$

其中 ω^* 表示 TT' 与光轴所成的角度。由图 3.1 中的几何关系可知, 角度 ω^* 以及两交点 T 、 T' 的坐标分别满足如下关系

$$\begin{cases} \sin \omega^* = \frac{R_y}{R} \\ \cos \omega^* = \frac{R_x}{R} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\begin{cases} y = h + x \tan \omega \\ y' = h' + x' \tan \omega' \end{cases} \quad (3.6)$$

其中光线及其在 x 和 y 方向的分量之间的关系为

$$\begin{cases} R_x = x' - x + d \\ R_y = y' - y \\ R^2 = R_x^2 + R_y^2 \end{cases} \quad (3.7)$$

联立公式(3.4)、(3.5)和(3.6)便可得到关于光线在第一个非球面上交点 T 的微分方程

$$\frac{dx}{dt} = - \left[\frac{(n^* R_x - n R \cos \omega)}{(n^* R_y - n R \sin \omega)} + \tan \omega \right]^{-1} \left[\frac{dh}{dt} + x \frac{d}{dt} \tan \omega \right] \quad (3.8)$$

同理可知, 交点 T' 的微分方程为

$$\frac{dx'}{dt} = - \left[\frac{(n^* R_x - n^* R \cos \omega')}{(n^* R_y - n^* R \sin \omega')} + \tan \omega' \right]^{-1} \left[\frac{dh'}{dt} + x' \frac{d}{dt} \tan \omega' \right] \quad (3.9)$$

通过公式(3.8)和(3.9)以及(3.6)和(3.7)便可以计算得到位于 Σ 和 Σ' 上的点 T 和 T' 的坐标。按此方法对所有光线进行求解, 便可得到两个待测非球面 Σ 和 Σ' 上的点云坐标。

通过这种方法推导得出的一阶偏微分方程, 结合给定的边界条件的约束, 可以证明, 如果方程有解, 则解将是唯一的。然而这种方法在视场点的数量方面存在限制。

3.2.2 同时多曲面设计方法

同时多曲面的设计方法主要是基于费马原理。采用这种方法可以同时求解多

个曲面，其要求计算的视场的数量需要与求解的曲面的数量相同。这种方法的计算原理如下：

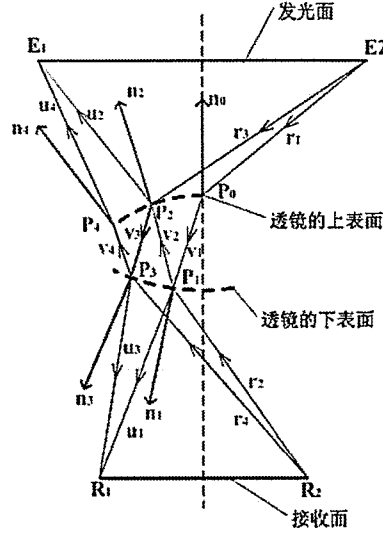


图 3.2 SMS 方法原理示意图

Figure 3.2 Schematic diagram of SMS method

以两个折射自由曲面组成的透镜计算为例，定义两个物点 E_1 、 E_2 和两个像点 R_1 、 R_2 。光线从 E_1 点出射经过待求表面后到达像点 R_2 ，从 E_2 点出射的光线经过待求表面后到达像点 R_1 。设两个待求自由曲面之间的材料折射率是 n ，计算自由曲面所需的已知条件包括第一个自由曲面上初始点的坐标 P_0 及该点对应的法线向量 n_0 ，以及两对物像点之间的光程 S_1 和 S_2 ，即

$$S_1 = |E_1 P_2| + n |P_2 P_1| + |P_1 R_2| \quad (3.10)$$

$$S_2 = |E_2 P_0| + n |P_0 P_1| + |P_1 R_1| \quad (3.11)$$

首先计算从 E_2 经过 P_0 和 P_1 到达 R_1 的这条光线，根据入射光线与前表面的交点 P_0 及该点的法线 n_0 ，可计算出光线经过第一个表面后的光线向量 v_1 ，然后根据公式 (3.12) 可推出光线从 P_0 经过 P_1 到 R_1 之间的光程 S

$$S = S_2 - |E_2 P_0| \quad (3.12)$$

由向量关系可知， P_1 的向量可以表示为

$$\vec{P}_1 = \vec{P}_0 + |P_0 P_1| \vec{v}_1 \quad (3.13)$$

根据公式 (3.12) 和 (3.13) 可以计算得到 P_1 ，再由折射定律可以计算得到

该点的法向量 n_1 。然后计算从 R_2 经过 P_1 和 P_2 到达 E_1 的这条光线，可以得到 P_2 和 n_2 。再通过计算从 E_2 经过 P_2 和 P_3 到达 R_1 的光线，可获得 P_3 和 n_3 ，按此顺序依次计算，就可计算得到上下两个曲面上的所有数据点坐标 P_i 及其法线向量 n_i 。

当计算得到离散数据点和法线向量之后，需要采用插值的方法获得连续的曲面函数，这主要是因为离散数据点很少会导致其拟合精度较低。

3.2.3 直接构建设计方法

直接构建方法依据入射光线和出射光线的关系，通过反射定律逐点求解得到自由曲面上的离散数据点云，然后对其拟合，从而实现自由曲面的构建。如图 3.3 所示，对于光学表面上的两个点，即点 P 和在其相邻的微小区域内的点 Q ，两点连线 PQ 近似垂直于点 P 处的法线 $\bar{N}$ 。也可以说，点 Q 近似位于点 P 的切平面上。所以这种方法在计算自由曲面时的原理可以表述为：每个数据点是通过计算采样光线与最近的数据点的切平面的交点得到的，当完成所有光线的计算时，便获得了所有数据点信息。

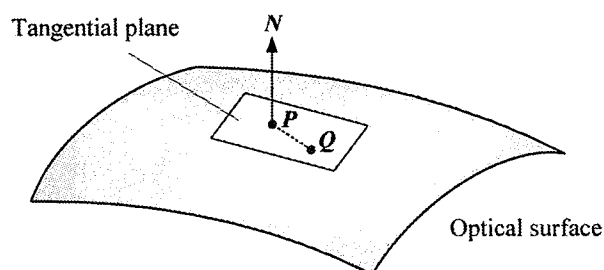


图 3.3 直接构建方法原理示意图

Figure 3.3 Schematic diagram of direct construction method

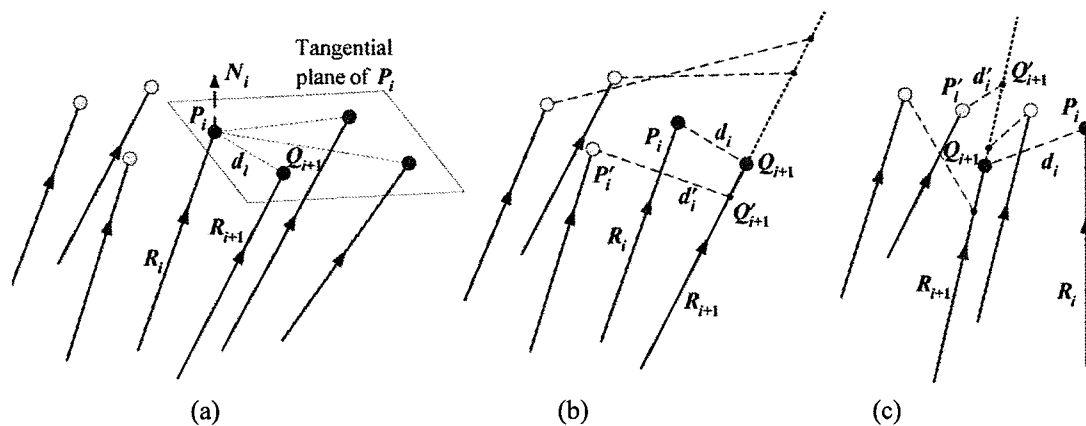


图 3.4 直接构建法设计过程示意图

Figure 3.4 Illustration of design process of direct construction method

这种方法在计算自由曲面时，需要首先确定待测面前后两个表面的信息，将采样光线与前面的交点作为光线的起点，将光线与待计算光学面之后的相邻面的交点作为光线的终点。设总共采样 K 条特征光线，然后根据上面的原理，就可以对第 i 个数据点 P_i 进行计算，如图 3.4 所示。

(1) 首先，固定第一条采样光线 R_1 的初始数据点 P_1 ，并将其作为光线与自由曲面的交点。

(2) 当计算得到第 i 个数据点 P_i 后，希望对应的特征光线 R_i 从起点 S_i 经过待计算的自由曲面后可以被折转到对应的终点 E_i 。因此，在 P_i 点的曲面法线 N_i 可以基于反射定律来计算

$$N_i = \frac{r'_i - r_i}{|r'_i - r_i|} \quad (3.14)$$

然后就可以得到在 P_i 点处的切平面。

(3) 计算剩余未计算的 $K-i$ 条特征光线与 P_i 点处的切平面的交点，找到距离 P_i 点最近的交点并定义为 Q_{i+1} ，对应的最短距离被定义为 d_i ，对应的特征光线被定义为下一条特征光线 R_{i+1} ，则下一个数据点 P_{i+1} 位于这条特征光线 R_{i+1} 上，但是却不一定是得到的交点 Q_{i+1} ，因为已经计算的数据点中，可能会存在一个数据点与 R_{i+1} 距离更近。如果 $i=1$ ，即只计算得到了一个数据点，则 P_1 就是已经计算得到的数据点中距离下一条特征光线 R_2 最近的数据点。所以 Q_{i+1} (Q_2) 就作为下一个数据点 P_2 ，此时，就可以跳过下面的步骤 (4) 和步骤 (5)，如果不是，则继续根据下面的步骤计算下一个数据点 P_{i+1} 。

(4) 如果 $2 \leq i \leq K-1$ ， P_i 点可能不是距离下一条特征光线 R_{i+1} 最近的数据点。所以，如图 2.4 (b) 所示，需要找出 P_i 点之前计算的所有 $i-1$ 个点的切面与特征光线 R_{i+1} 的交点，每一个数据点和对应的交点构成一个数据点-交点对，总共有 $i-1$ 个数据点-交点对，找出其中数据点和交点之间的最短距离，并将这一点对中的数据点、交点和最短距离分别定义为 P'_i 、 Q'_{i+1} 和 d'_i ，则 P'_i 是已经计算的所有数据点中距离 R_{i+1} 最近的数据点。

(5) 比较 d_i 和 d'_i ，其中较小的距离所对应的交点与光线 R_{i+1} 最近，把对应

的交点 Q_{i+1} 或 Q_{i+1}' 作为数据点 P_{i+1} ，即若 $d_i \leq d_i'$ ，则 Q_{i+1} 是下一个数据点 P_{i+1} ，反之 Q_{i+1}' 是下一个数据点 P_{i+1} 。

(6) 重复上述步骤 (3) - (5)，可计算得到 P_{i+1} 的坐标，然后 P_{i+1} 点处的法线通过步骤 (2) 计算，重复 (2) - (5) 直至得到待计算曲面上所有 K 个特征数据点。

当得到自由曲面上的离散点云后，需要再将其拟合为解析表达式表示的自由曲面面形。

3.2.4 构建-迭代设计方法

构建-迭代 (CI) 方法是采用构建和迭代两个过程来计算自由曲面的一种方法，它是在直接构建方法的基础上又增加了一个迭代过程。一般来说，采用直接构建方法计算得到的自由曲面，光线与计算面的交点通常与期望的目标点之间有一定的偏差。因而，这种方法在构建过程的基础上采用迭代过程主要是为了减小特征光线与目标面交点和理想目标点之间的偏差。具体地说，通过 3.2.3 小节中的直接构建方法计算得到自由曲面以后，将其作为下一次迭代的初始曲面。在迭代过程中，每条光线的目标点 T_i 就是与其相对应的理想目标点 $T_{i,ideal}$ ，如公式 (3.15) 和图 3.5 (a) 所示。

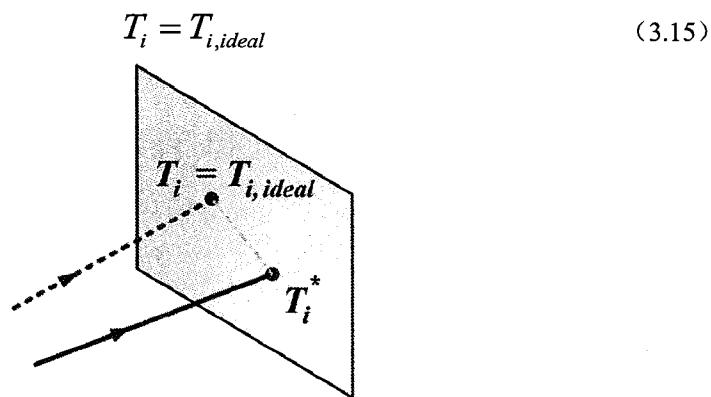


图 3.5 CI 方法示意图

Figure 3.5 Illustration of point-by-point construction-iteration method

3.3 自由曲面直接迭代设计方法

一般来说，一条光线经过一个光学表面后的实际像点位置主要取决于曲面法线，因此在成像系统中，准确的法线方向对获得良好的成像质量是非常重要的。

本文在构建-迭代方法的基础上进行改进，提出了一种基于曲面法线的直接迭代优化方法来计算成像系统中的自由曲面。在设计过程中，根据入射光线和理想出射光线的单位方向矢量，采用曲面法线的直接迭代优化过程，来计算自由曲面的形状。

3.3.1 直接迭代方法原理

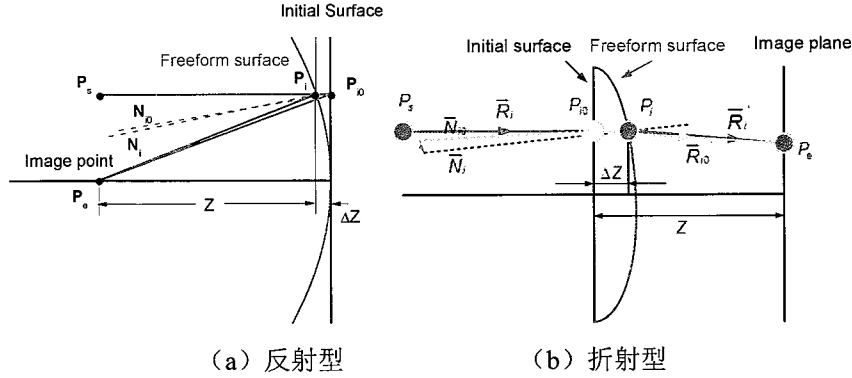


图 3.6 直接迭代方法的原理图

Figure 3.6 Schematic illustration of direct iterative design method

如图 3.6 所示，对单一视场内的光线来说，当入射光线及其上一点 P_s 和出射光线上一点 P_e 已知时，如果可求得 $\vec{r}_i$ 和 $\vec{r}_i'$ 在待计算面上的准确交点 P_i ，则通过反射定律或折射定律，便可准确地求解出 P_i 点的法线 N_i ，即

$$N_i = \frac{\vec{r}_i' - \vec{r}_i}{|\vec{r}_i' - \vec{r}_i|} \quad (3.16)$$

$$n'(\vec{r}_i' \times N_i) = n(\vec{r}_i \times N_i) \quad (3.17)$$

其中 $\vec{r}_i = \overrightarrow{P_s P_i} / |\overrightarrow{P_s P_i}|$ ， $\vec{r}_i' = \overrightarrow{P_i P_e} / |\overrightarrow{P_i P_e}|$ ，二者分别代表入射光线的单位方向矢量和出射光线的单位方向矢量。如果入射光线和出射光线在光学表面上的交点不准确，即实际交点 P_{i0} 与待求面上满足物像关系的理想交点 $P_i(x, y, z)$ 之间存在一个偏差 $\Delta T(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ ，则交点的坐标变为 $P_{i0}(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$ ，计算的法线方向矢量 N_{i0} 变为

$$N_{i0} = \frac{\vec{r}_{i0}' - \vec{r}_{i0}}{|\vec{r}_{i0}' - \vec{r}_{i0}|} \quad (3.18)$$

$$n'(\vec{r}_{i0}' \times N_{i0}) = n(\vec{r}_{i0} \times N_{i0}) \quad (3.19)$$

当 $\Delta T(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 远小于已知点 P_s 和 P_e 与待求光学表面之间的距离 $|\overrightarrow{P_s P_i}|$ 和 $|\overrightarrow{P_i P_e}|$

时, 则可以将计算的出射光线 $|\overline{P_{i0}P_c}|$ 近似认为是理想的出射光线 $|\overline{P_iP_c}|$, 即忽略了 $|\overline{P_{i0}P_i}|$ 的距离。一般来说, 光学表面的矢高相对于光线的起点或终点到其在光学表面上对应的交点之间的距离是一个小量。因此在法线的计算过程中, 通常可忽略矢高, 然后根据入射光线在初始平面上的交点 P_{i0} 计算出曲面的法线, 通过拟合数据点和曲面法线, 便可计算出自由曲面的形状。但矢高的忽略会导致法线的计算存在一定的误差, 为了缩小矢高和法线的偏差, 将计算的自由曲面作为一个新的起始面, 重新计算光线与曲面的交点以及交点处的法线方向矢量, 从而缩小曲面上实际交点坐标与理想交点坐标的偏差、实际法线与理想法线的偏差, 进而减小光线在像面的实际像点与理想像点之间的偏差, 如此多次迭代可设计得到理想的自由曲面。

这种方法的优点在于在计算曲面上的数据点时, 不会受到相邻点的影响, 每条光线的数据点都是根据其自身的理想物像关系计算得到的, 因而计算的面形的准确度更高, 而且这种方法不需要逐点构建过程, 因而面形的收敛速度更快。

3.3.2 直接迭代方法设计步骤

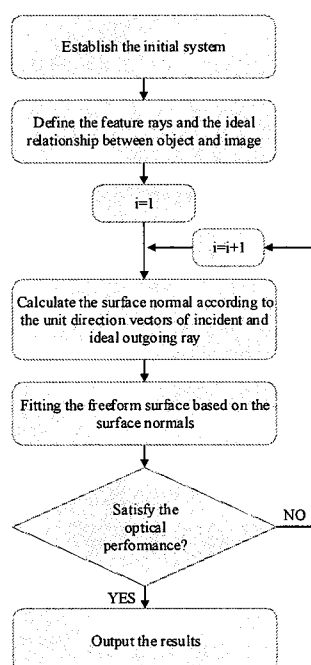


图 3.7 直接迭代方法流程图

Figure 3.7 Flow chart of direct iterative design method

如图 3.7 所示为设计步骤的流程图, 在开始计算自由曲面之前, 首先建立一

个初始系统,自由曲面的初始面应该近似位于理想的自由曲面所在的位置。然后,基于初始系统采样光线,本文在整个圆形孔径内以矩形网格的方式采样光线,即视场的圆形光瞳在 x 和 y 方向上分别被划分为 n 个等间隔的坐标点。所有采样光线与待求面相邻的前一面的交点作为光线的起点,采样光线与待求面相邻的后一面的理想像点作为光线的终点。

计算自由曲面时,首先,将入射光线与自由曲面初始平面的交点作为未知表面的初始数据点,光线与初始面交点处的法线为初始实际法线。然后,根据入射光线和理想的出射光线,通过反射定律或折射定律对数据点处的期望法线方向进行求解。接着根据计算得到的所有离散数据点和法线方向矢量,拟合得到可用解析表达式表示的连续自由曲面,如 Zernike 多项式、XY 多项式等。

然后判断理想法线与实际法线之间偏差是否能够满足精度要求,若不满足,则对曲面法线进行下一次迭代,从而通过多次迭代过程,逐步减小初始自由曲面法线向量与理想法线向量之间的偏差,直至曲面法线偏差减小到满足要求的精度范围,得到最终的自由曲面面形。

3.3.3 自由曲面反射镜设计实例

按照上节中介绍的直接迭代设计方法,设计了一片入瞳直径为 30mm 的曲面反射镜和一个包含自由曲面的透镜。在计算自由曲面反射镜时,采样 $K=151 \times 151$ 条光线,采用 Zernike 多项式用以表示曲面面型,根据迭代过程的面形精度,最终确定 Zernike 的项数为 20 项,如公式 (3.20) 所示。

$$\begin{aligned}
 z = & \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + A_1 + A_2\rho \cos \theta + A_3\rho \sin \theta + A_4(2\rho^2 - 1) + \\
 & A_5\rho^2 \sin 2\theta + A_6\rho^2 \cos 2\theta - A_7 \sin \theta (2\rho - 3\rho^3) - A_8 \cos \theta (2\rho - 3\rho^3) + \\
 & A_9\rho^3 \sin 3\theta + A_{10}\rho^3 \cos 3\theta + A_{11}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1) - A_{12} \cos 2\theta (3\rho^2 - 4\rho^4) - \\
 & A_{13} \sin 2\theta (3\rho^2 - 4\rho^4) + A_{14}\rho^4 \cos 4\theta + A_{15}\rho^4 \sin 4\theta + \\
 & A_{16} \cos \theta (10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho) + A_{17} \sin \theta (10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho) - \\
 & A_{18} \cos 3\theta (4\rho^3 - 5\rho^5) - A_{19} \sin 3\theta (4\rho^3 - 5\rho^5) + A_{20}\rho^5 \cos 5\theta
 \end{aligned} \quad (3.20)$$

经过 1 次迭代得到的自由曲面对应的 RMS 光斑如图 3.8 所示,图中红色代表 RMS 光斑而黑色圆代表艾里斑。从图中可以看出,经过第 1 次迭代后的 RMS 光斑半径小于 0.15mm,但是未达到衍射极限。为进一步提高成像质量,增加了迭代次数,经过 6 次迭代得到的自由曲面所形成的 RMS 光斑半径已经收敛到衍射极限范围内,如图 3.9 所示。

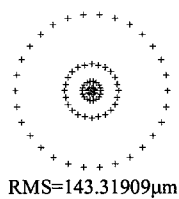


图 3.8 1 次迭代后的 RMS 光斑

Figure 3.8 RMS Spot diagram of the freeform mirror with 1 iteration

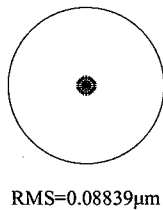


图 3.9 6 次迭代后的 RMS 光斑

Figure 3.9 RMS Spot and Airy spot diagram of the freeform mirror with 6 iterations

图 3.10 给出了 RMS 光斑半径与迭代次数的直方图，可以看出，RMS 光斑大小随迭代次数快速收敛到衍射极限范围内，然后保持稳定。系统的艾里斑半径为 $1.363\mu\text{m}$ ，经过 2 次迭代后，RMS 光斑半径为 $1.32017\mu\text{m}$ ，已经达到了衍射极限，与第 1 次迭代后相比，RMS 光斑半径下降了 99.08%，而经过 5 次迭代后，RMS 光斑半径已经稳定在 $0.08839\mu\text{m}$ 。如图 3.11 所示为 5 次迭代后的最终面形。

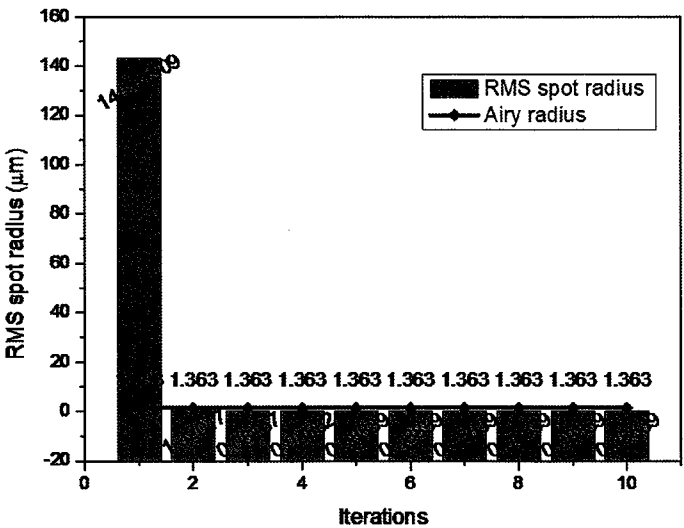


图 3.10 RMS 光斑半径与迭代次数的直方图

Figure 3.10 RMS spot radius with iterations

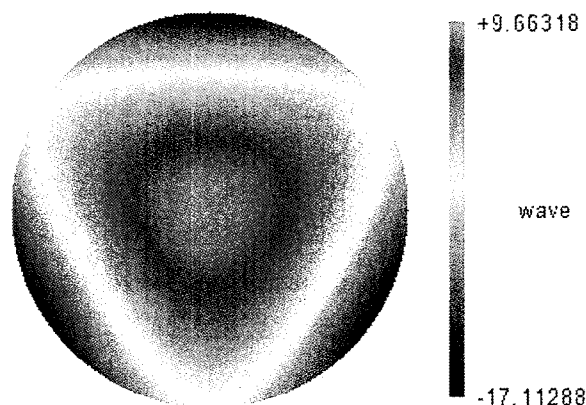


图 3.11 5 次迭代后的自由曲面面形

Figure 3.11 2D model of calculated freeform surface mirror with 6 iterations

3.3.4 自由曲面折射透镜设计实例

为了验证该方法对折射自由曲面设计的有效性,本文设计了一个包含自由曲面的透镜,其第一面是球面,第二面是自由曲面。如图 3.12 所示是其初始结构,其中自由曲面初始面设为平面。在光瞳上,以矩形网格的方式进行采样光线,系统波长为 587nm,理想像点设定在一个离轴的位置。

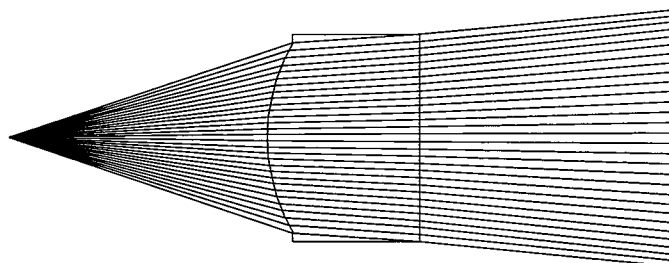


图 3.12 透镜的初始结构图

Figure 3.12 Layout of the initial system of single lens

确定初始系统后,采用上文所述的直接迭代设计方法计算自由曲面。计算过程中,光线与透镜第一面的交点作为光线的起点,将理想像点作为光线的终点,采用 Zernike 多项式表示曲面的面型,如图 3.13 所示为求得的最佳自由曲面透镜的光学结构。图 3.14 给出了 RMS 光斑图,其中用黑线表示的圆代表艾里斑。从图中可以看出,经过 6 次迭代后的包含自由曲面的透镜的 RMS 光斑大小已经远小于艾里斑。

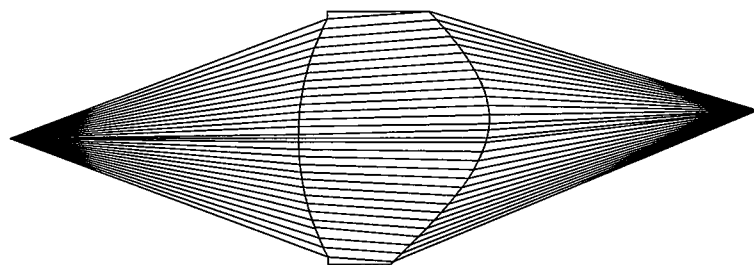
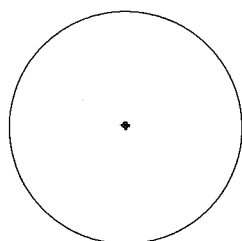


图 3.13 6 次迭代后的自由曲面透镜

Figure 3.13 Layout of the resulting system of a single freeform lens with 6 iterations



RMS=0.025 μ m
Airy=0.09382 μ m

图 3.14 自由曲面透镜的 RMS 光斑图

Figure 3.14 RMS Spot and Airy spot diagram of the single freeform lens

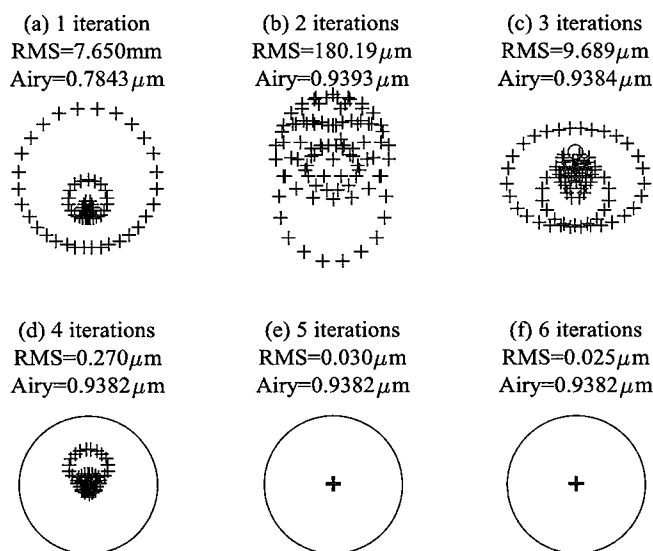


图 3.15 折射型自由曲面 RMS 光斑大小随迭代次数的变化图

Figure 3.15 RMS Spot and Airy spot diagram of the freeform lens with different iterations

如图 3.15 所示为经过不同迭代次数的自由曲面透镜的 RMS 光斑图。从图中可以看出，当进行 1 次迭代后，RMS 光斑半径为 7.65005mm，该值较大，其原因主要是在离轴成像系统中，自由曲面的初始面距离理想的目标面偏差较大，所以只进行 1 次迭代是不够的。增加迭代次数后，RMS 光斑变小。当运行 4 次迭

代时，RMS 光斑半径收敛到了衍射极限范围内。经过 5 次迭代后，RMS 光斑半径稳定在一个理想值。因此，无需继续迭代。图 3.15 表明，即使自由曲面的初始面与理想面有较大偏差，采用所提的方法仍然能够使其快速收敛到衍射极限范围内，只需很少的几次迭代过程。这就验证了所提出的自由曲面直接迭代设计方法的有效性与可行性，而且该方法对初始面的要求较为宽松。

3.4 自由曲面多视场加权优化迭代设计方法

在多视场成像系统中，不同视场的光线在光学表面上的足迹区域之间会存在重叠，重叠区域内的光线需满足不同的物像关系，如图 3.16 所示。因此，在多视场成像系统中，为了使系统所有视场都获得好的成像质量，设计的自由曲面是对所有视场的成像质量进行综合平衡之后的结果。基于此思想，本文对上一节中提出的直接迭代优化设计方法进行了改进，并提出了一种多视场加权优化迭代的设计方法，根据多个视场的入射光线和理想出射光线的单位方向矢量，通过对所有视场分别设置不同的权重的方法计算自由曲面的形状。

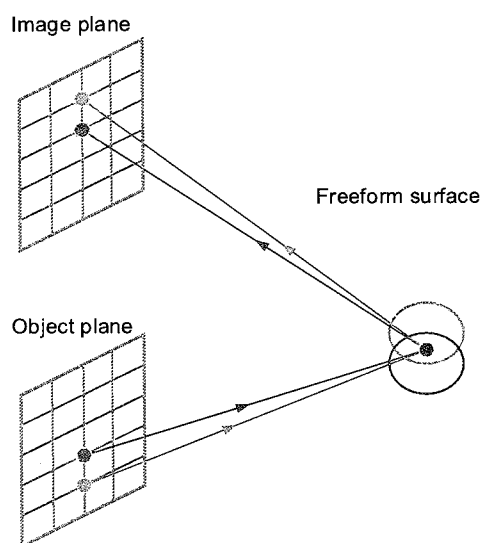


图 3.16 视场重叠问题示意图

Figure 3.16 Illustration of the field overlapping problem

3.4.1 多视场加权优化迭代方法原理

对于多视场的成像系统来说，基于 3.3 节中的法线迭代的设计思想进行改进，如图 3.17 所示为多视场加权方法原理图，同时考虑多个视场的光线。设总视场数为 M ，每个视场在整个光瞳上以矩形网格形式采样 N 条光线，则总的采样光

线数为 $M \times N$ 。如图 3.17 所示, 每个圆代表一个视场, R_{ki} 表示来自第 k 个视场的第 i 条光线。从 P_S 点发出的光线, 经过待计算曲面后, 到达像面上的 P_E 点。

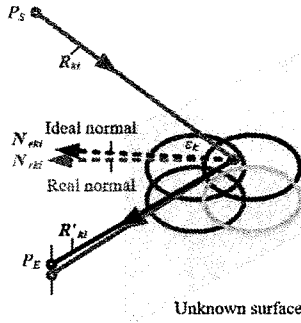


图 3.17 多视场加权方法原理图

Figure 3.17 Illustration of the principle of the design method

将自由曲面的初始面设为平面。采样光线在曲面上所有交点处的理想法向量可根据反射定律求出, 如公式(3.21)所示。

$$N_{eki} = \frac{R'_{ki} - R_{ki}}{|R'_{ki} - R_{ki}|} \quad (3.21)$$

在计算过程中, 自由曲面面型可用公式 (3.22) 所示的连续的多项式表示。

$$z(x, y) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N A_i f(x, y) \quad (3.22)$$

将光线在曲面上的实际法向量表示为

$$N_{rki} = \left(\frac{\partial z}{\partial xi}, \frac{\partial z}{\partial yi}, -1 \right) \quad (3.23)$$

将每条光线的理想法线与实际法线的偏差记为

$$\delta_{ki} = \left[N_{ekix} - \frac{\partial z}{\partial xi}, N_{ekiy} - \frac{\partial z}{\partial yi} \right] \quad (3.24)$$

则每个视场的法线偏差可表示为

$$\delta_k = \sum_{i=1}^N \left\{ \left[N_{ekix} - \frac{\partial z}{\partial xi} \right]^2 + \left[N_{ekiy} - \frac{\partial z}{\partial yi} \right]^2 \right\} \quad (3.25)$$

为了使计算的自由曲面能同时对不同视场实现较好的成像质量, 对不同的视场进行加权

$$\delta = \varepsilon_1 \delta_1 + \varepsilon_2 \delta_2 + \cdots + \varepsilon_M \delta_M \quad (3.26)$$

其中, ε_k 表示不同视场的权重, 其对应的下标代表当前视场。因此, 通过改变每个视场的权重, 就可以控制来自相邻视场重叠区域的光线, 从而使其更倾向于到达具有大权重视场的理想像点。然后, 再采用迭代过程来减少所有视场的法线偏差, 并在这个过程中, 根据不同视场的法线偏差对权重进行更改, 直至所有视场的成像质量都可以被很好地平衡, 得到期望的自由曲面。

3.4.2 多视场加权优化迭代方法设计步骤

如图 3.18 所示, 在开始计算自由曲面之前, 首先建立一个初始系统, 自由曲面的初始面应该近似位于理想的自由曲面所在的位置。为了计算出能使所有视场都能实现较好成像质量的自由曲面, 需要基于初始系统采样所有视场的光线, 设视场采样总数为 M , 各视场采样光线数量为 N 。所有采样光线与待求面相邻的前一面的交点作为光线的起点, 采样光线与待求面相邻的后一面的理想像点作为光线的终点。

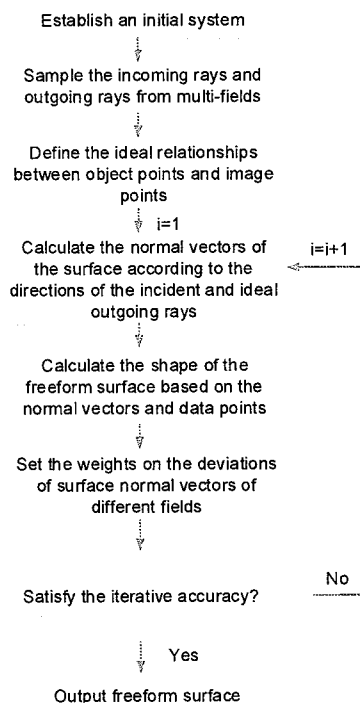


图 3.18 多视场加权方法流程图

Figure 3.18 Flow chart of the normal-weighted optimization iteration design method

当采样光线及其起点终点确定以后, 采用上述方法计算自由曲面, 设计过程示意图如图 3.19 所示。首先, 将入射光线与自由曲面初始平面的交点 P_{i0} 作为未

知表面的初始数据点，光线与初始面交点处的法线为初始实际法线 N_{ir0} ，如图 3.19(a)所示；然后结合入射光线和理想出射光线，通过反射定律或折射定律，求解期望的法线 N_{ie1} ，如图 3.19(b)；接着根据各视场自由曲面的数据点 P_{i0} 和法线方向矢量 N_{ie1} ，采用文献^[121]的方法拟合得到自由曲面 Freeform1，根据拟合的自由曲面计算光线与自由曲面的交点 P_{i1} 及交点处的实际法线矢量 N_{ir1} ，如图 3.19(c)；计算各视场实际法线矢量与理想法线矢量的偏差，再按照各视场法线矢量偏差均方根值的大小，对不同视场设置权重，权重值的大小与法线矢量偏差均方根值的大小成正比。设置初始权重时，所有视场的权重值是相同的，经过一轮迭代后，根据各视场的法线偏差判断权重是否合理，然后相应地对权重值进行调整。对法线偏差大的视场，增加其权重值，法线偏差小的视场，则减小其权重值，也就是说，各视场的权重值是根据法线偏差的反馈来进行合理调整的。在迭代过程中，依据各视场法线偏差情况，更改各视场权重以使各视场法线偏差均逐步收敛，当自由曲面面形精度满足要求时，便完成优化过程，如图 3.19(d)所示。

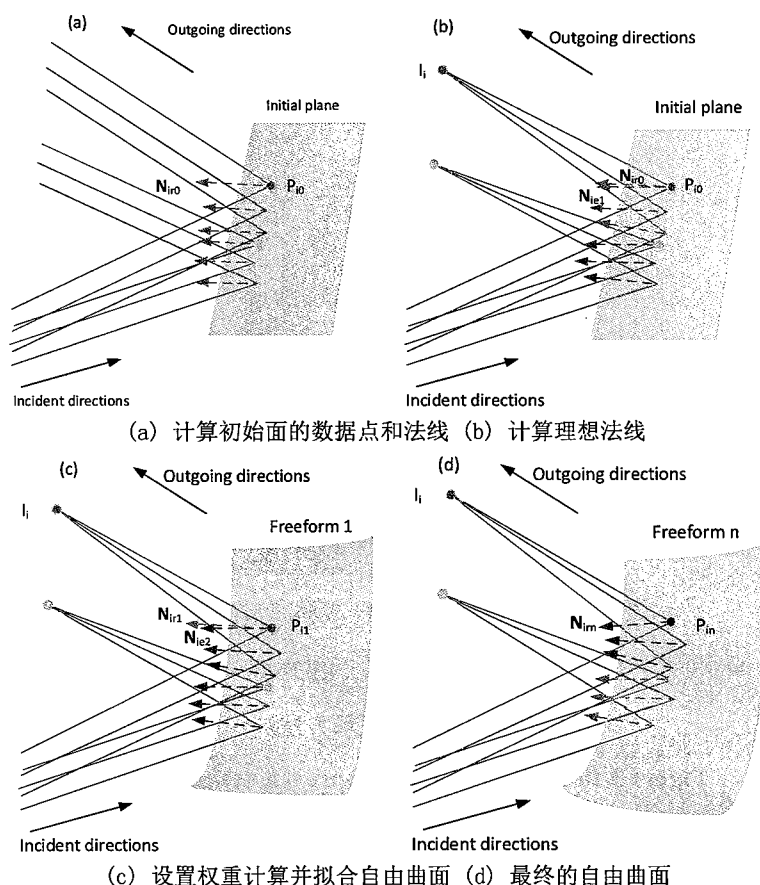


图 3.19 多视场加权设计过程示意图

Figure 3.19 Illustration of the process of normal-weighted optimization iteration method

为了进一步优化设计过程,提高设计效率,在此基础上,对算法进一步改进,增加了关于合理采样视场数量的分析与确定过程,如图 3.20 所示,这主要是考虑到由于这种方法在计算过程中需要对不同视场设置权重,所以,视场的采样数量会影响计算精度和设计效率。具体地说,视场的采样数量越多,计算的面形精度越准确,计算时间也越长。但是当视场的采样数量增加到足够大的值时,面形精度的提高便不再明显。而且,当自由曲面的面形精度提高时,自由曲面的加工难度也会相应增加,所以视场的数量并不是越大越好。因此,在计算自由曲面过程中,有必要同时考虑面形精度、计算时间和加工难度来决定合适的视场采样数量。

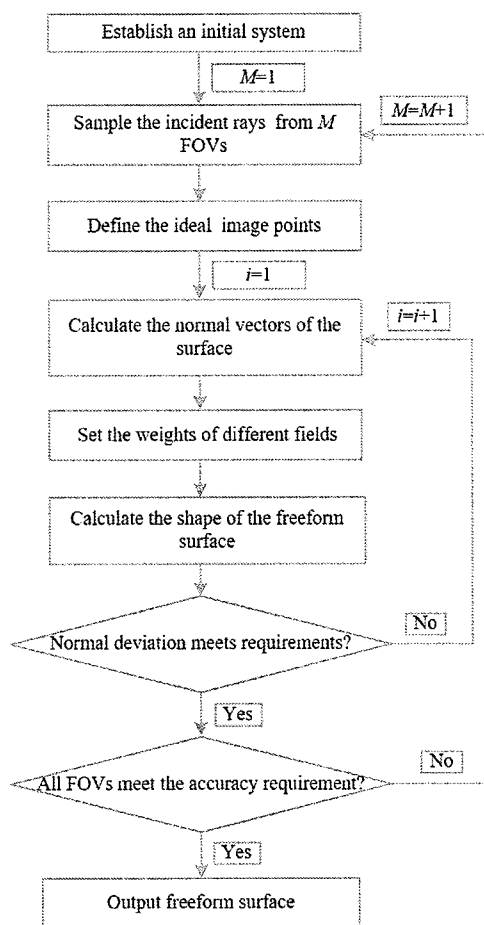


图 3.20 改进的多视场方法流程图

Figure 3.20 Flowchart of the improved design method

3.4.3 多视场加权迭代优化设计方法实例

使用 3.4 节提出的自由曲面设计方法,设计了一个包含自由曲面反射镜的折反式超短焦投影物镜的光学系统,其设计指标如表 3.1 所示。

表 3.1 超短焦投影系统的参数

Table 3.1 Specifications of the ultra-short-focus projection system

Parameter	Specification
DMD size	0.65 inch
Screen size	100 inch
Projection distance	230 mm
Field of view	165°
Configuration	Refractive-reflective combined
Distortion	<1%
MTF	>0.3@0.43 lp/mm

在计算自由曲面之前，通过系统的折射部分校正超短焦投影系统主要的离轴像差和色差。考虑到投影系统关于 YOZ 平面对称，在设计过程中只考虑 x 视场的一半。为了适应矩形屏幕，以矩形网格的方式采样了 51×51 个视场，每个视场采样均匀分布于整个光瞳的 9×9 条光线计算自由曲面。

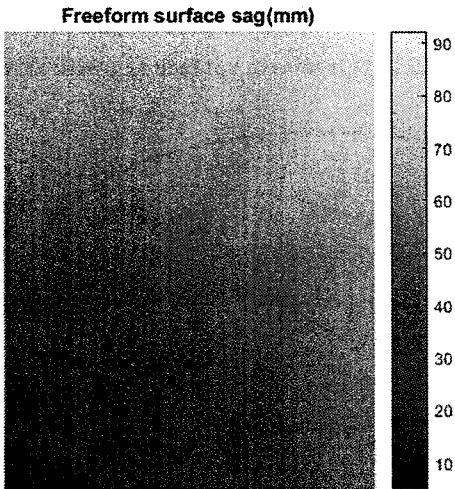


图 3.21 计算得到的半视场的自由曲面矢高

Figure 3.21 2D freeform surface sag map of the calculated freeform surface of half field

将采样光线和系统折射部分的最后一个光学表面的交点作为采样光线的起点，将理想的像点作为采样光线的终点。然后，基于 3.4 节的优化算法计算自由曲面反射镜。计算时，采用 XY 多项式用以表示曲面面型，即

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=2}^{154} c_i x^m y^n \quad (3.27)$$

公式 (3.27) 中 c 代表曲面的基底曲率, k 表示二次曲面常数, c_i 为 XY 多项式中第 i 项的面形系数。经过多次优化迭代之后, 法线方向矢量偏差的均方根值为 1.0550×10^{-2} 时, 得到的自由曲面如图 3.21 所示, 去除倾斜后的面形矢高图如图 3.22 所示。

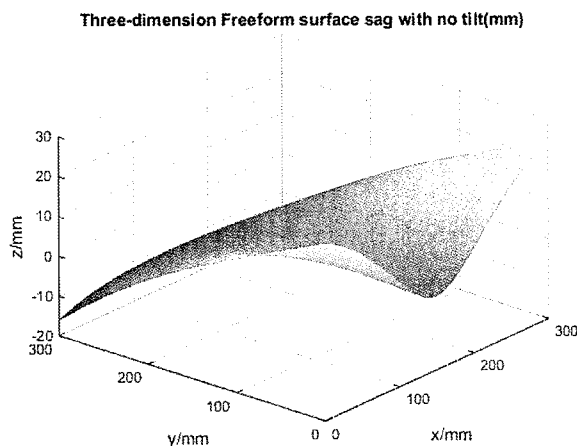


图 3.22 去除倾斜后的自由曲面矢高

Figure 3.22 3D freeform surface sag with zero tilt

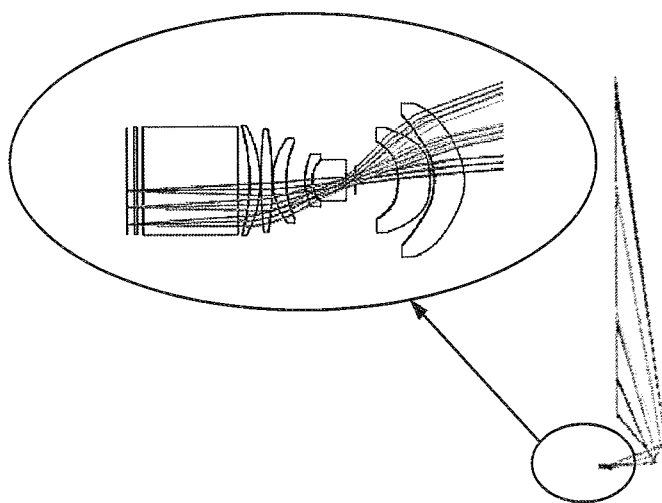


图 3.23 包含自由曲面的超短焦物镜初始光学结构

Figure 3.23 Layout of the initial ultra-short-focus projection system with the calculated freeform surface

应用求得自由曲面初始面后, 超短焦投影镜头初始系统的光路结构如图

3.23 所示, 由图可知, 光线经过自由曲面反射镜后能够接近理想像点。计算的包含自由曲面的初始系统的畸变如图 3.24 所示, 最大畸变为 3.36%。

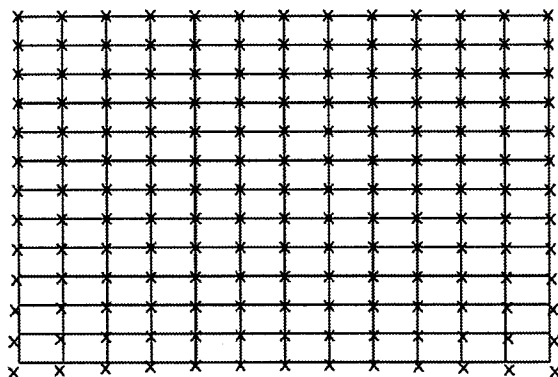


图 3.24 初始投影系统的畸变网格

Figure 3.24 Distortion diagram of the initial projection system

为进一步提高成像质量, 将包含计算得到的自由曲面的系统作为光学设计软件进一步优化的起点, 最终系统可在 230mm 的投影距离实现屏幕尺寸为 100 inch 的投影, 焦距为 1.60mm, 物镜的系统总长为 349.9mm, 系统的光路结构如图 3.25 所示。

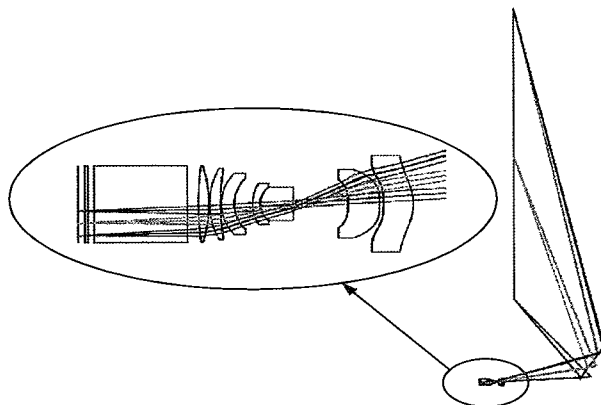


图 3.25 最终投影系统的结构图

Figure 3.25 Layout of the example final projection system

最终系统的畸变网格如图 3.26 所示, 最大畸变为 0.72%。RMS 光斑点列图如图 3.27 所示, 光学传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 如图 3.28 所示, 可以看出系统 MTF 在 0.43 lp/mm 处高于 0.4。最终设计得到的系统性能指标均满足设计要求, 表明所提设计方法对于大视场成像系统中自由曲面的设计是适用并有效的。

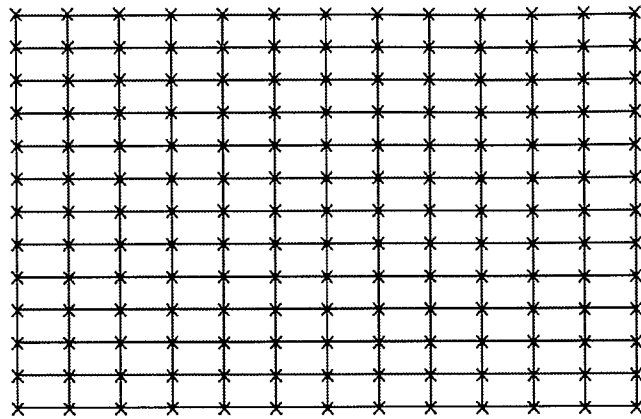


图 3.26 最终投影系统的畸变网格

Figure 3.26 Distortion of the example final projection system

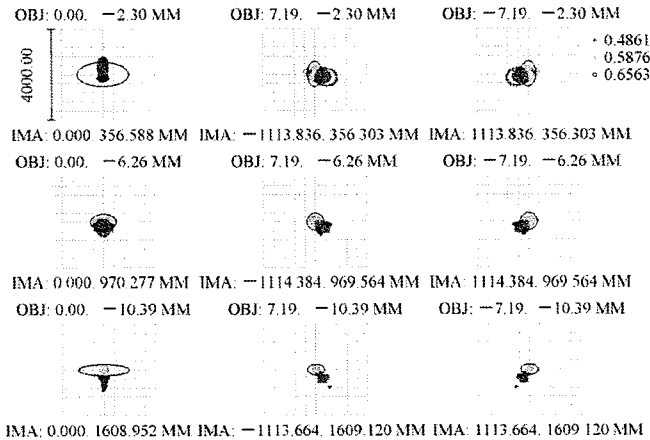


图 3.27 最终投影系统的点列图

Figure 3.27 RMS spot diagram of the example final projection system

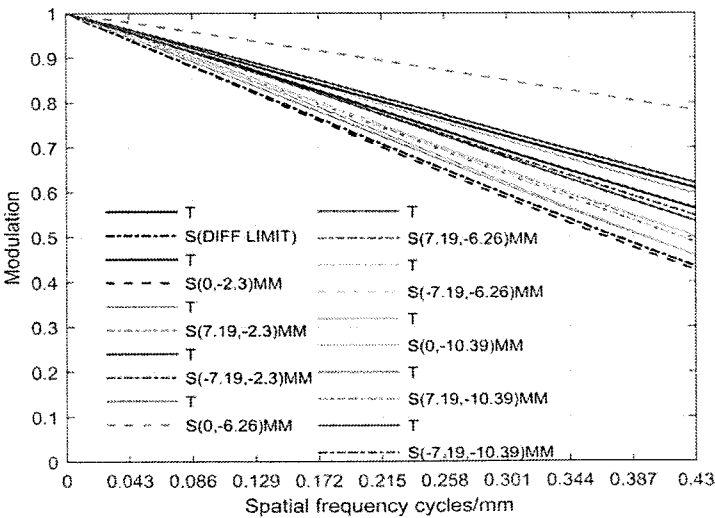


图 3.28 最终投影系统的 MTF 曲线

Figure 3.28 MTF curves of the example final projection system

3.5 本章小结

本章主要针对自由曲面的设计方法进行了研究。首先对几种常用的设计方法进行了阐述,分析了各自的原理和设计过程,并讨论了每种方法的特点。在构建-迭代方法的基础上进行改进,提出了两种自由曲面的设计方法,用于设计成像系统中的自由曲面的形状,分别是直接迭代设计方法和多视场优化迭代设计方法。对于直接迭代设计方法,通过直接迭代过程逐步减小采样光线在曲面上理想法线向量与实际法线向量之间的偏差来计算出自由曲面的形状。该方法在计算自由曲面的数据点时,不受相邻点的影响,每条光线均可按照其物像关系,同时独立地进行计算,计算的曲面形状准确度更高。本文采用该方法分别设计了一个自由曲面反射镜和一个包含自由曲面的透镜,设计结果表明,系统的成像质量可快速收敛到衍射极限,从而验证了直接迭代设计方法的有效性。基于这种方法进行改进,又提出了适用于大视场成像系统的多视场优化迭代设计方法。根据多个视场的入射光线的单位方向矢量和理想的出射光线方向矢量,通过对所有视场分别设置不同的权重的方法计算自由曲面的形状。最后将该方法应用到折反式超短焦投影物镜系统中,用于设计其中的自由曲面反射镜,设计结果验证了该方法的有效性。

第4章 基于自由曲面的折反式超短焦投影物镜光学设计

4.1 引言

超短焦投影物镜是超短焦投影系统的重要组成部分,它在投影系统中的作用是将空间光调制器产生的图像源放大并投射到屏幕上。超短焦投影物镜决定着整个超短焦投影系统的成像质量和投影距离等,同时还影响着整个系统的结构大小和紧凑性。

本章基于前述的超短焦投影物镜光学设计的理论基础以及自由曲面设计方法,将进行基于自由曲面的超短焦投影物镜系统的光学设计,旨在设计出具有更低投射比的超短焦投影系统。本章中,将围绕基于 DLP 投影技术的超短焦投影物镜的光学系统设计而展开,对系统中的设计指标、折射部分的优化、自由曲面反射镜的设计和折反射部分的一体化优化设计进行了研究与说明,并利用 ZEMAX 软件进行了系统仿真,仿真结果表明,所设计的基于自由曲面的超短焦投影物镜可大幅简化系统的结构、降低系统的投射比,从而证明了所设计系统具有较好的性能。

4.2 采用高阶非球面的超短焦投影物镜光学设计

超短焦投影物镜是超短焦投影系统中的关键组成部分,决定着投影系统的投射比、成像质量、系统体积等重要性能参数。高阶非球面是一种广义的自由曲面,为了后续对自由曲面进行深入研究,首先基于高阶非球面反射镜设计了一种具有低投射比的超短焦投影物镜系统,投射比达到 0.18。

4.2.1 系统的设计指标

采用 0.47inch 的 DMD 作为空间光调制器,其解析度为 1920×1080 ,像元尺寸为 $5.4\mu\text{m}$ 。将 DMD 作为物面,投影屏幕作为像面。为了与照明系统实现良好匹配,本设计中采用物方远心光学结构。如表 4.1 所示为本文中超短焦投影物镜的设计指标。

表 4.1 超短焦投影系统的设计指标

Table 4.1 Specifications of ultra-short-focus projection system

Specifications	Values
Focal length	1.83mm
DMD size	0.47 inch
Screen size	120 inch
Projection distance	484 mm
FOV	155°
F-number	2.5
Optical structure	Refractive-reflective combined structure
Distortion	<0.4%
MTF	>0.3@0.363lp/mm

4.2.2 超短焦投影物镜设计结果

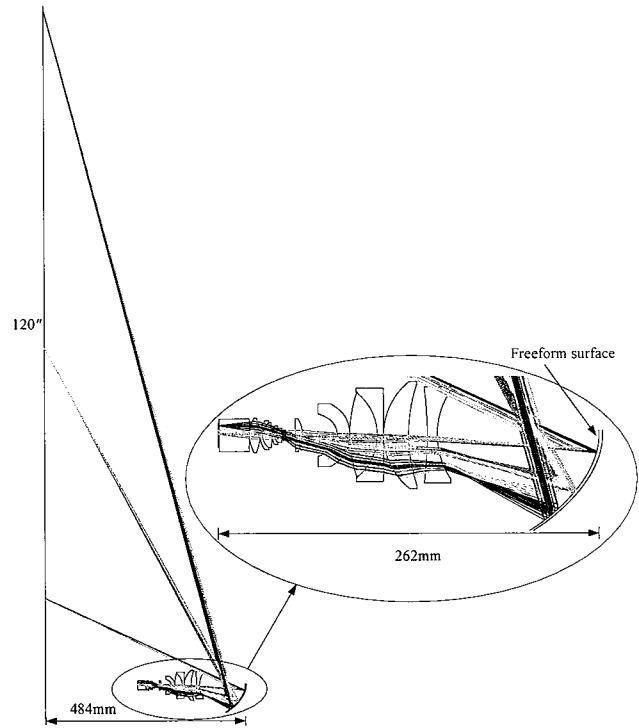


图 4.1 最终系统的光路结构图

Figure 4.1 Layout of the final ultra-short-focus projection system based on aspheric surface

物镜系统采用折反式结构，采用偶次非球面作为反射镜的面型，采用光学设计软件设计得到的超短焦投影物镜的光路结构图如图 4.1 所示。最终系统能够在 484mm 的投影距离处实现 120inch 的大尺寸屏幕的投影，系统的投射比为 0.18。

4.2.3 超短焦投影物镜的像质评价

结合系统的设计指标,采用光学设计软件对本文中所设计的超短焦投影物镜光学系统的成像质量进行了分析和验证。

(1) 系统的畸变

图 4.2 所示为系统的网格畸变图,从图中可以看出,系统的最大畸变为 0.28%,达到了设计指标要求。

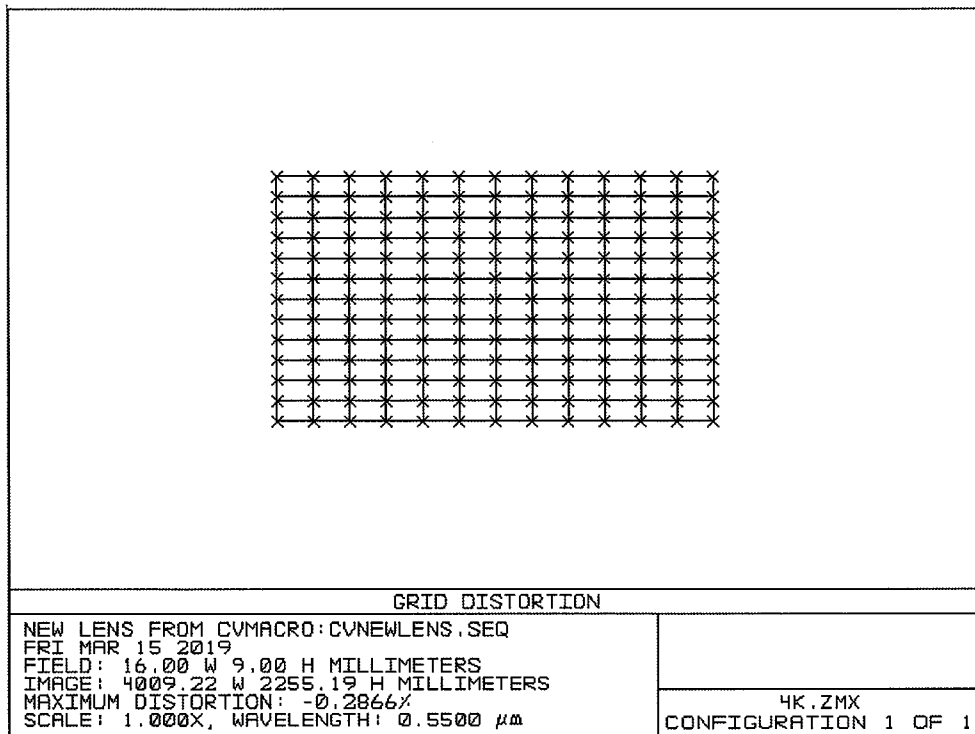


图 4.2 最终系统的畸变

Figure 4.2 Distortion of the final system

(2) 光斑点列图

超短焦投影物镜的光斑点列图如图 4.3 所示,从图中可以看出,系统 RMS 光斑半径的最大值小于 $840\mu\text{m}$ 。由于 DMD 的像元尺寸为 $5.4\mu\text{m}$,系统的放大倍率为 255 $\times$,因而对应于屏幕上的像素大小为 $1377\mu\text{m}$ 。所以,系统的光斑半径均小于一个像素大小,而且每个视场的几何光斑半径均小于对应 RMS 光斑半径的 3 倍以上。

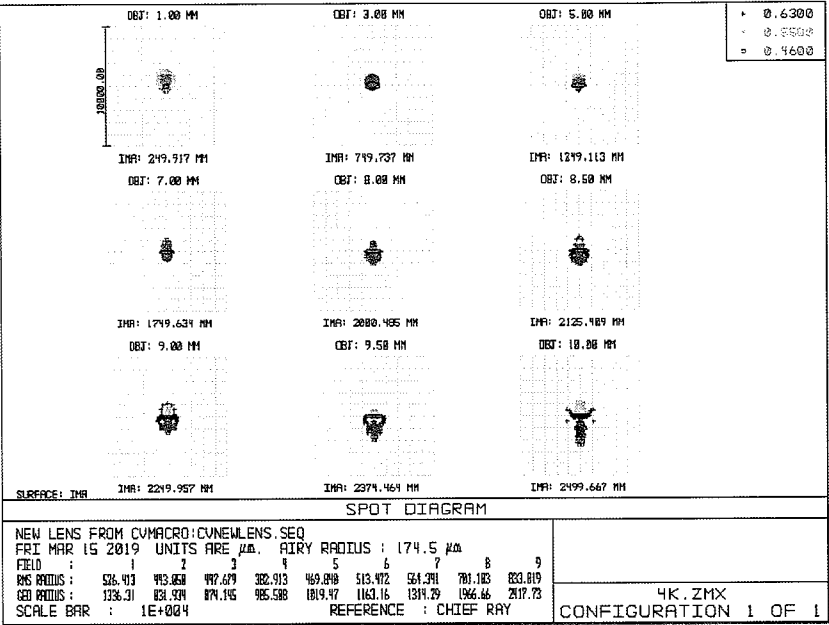


图 4.3 最终系统的光斑点列图

Figure 4.3 Spot diagram of the final system

(3) 调制传递函数 MTF 曲线

如图 4.4 所示为超短焦投影物镜的 MTF 仿真结果曲线。由于 DMD 的像元尺寸为 $5.4\mu\text{m}$ ，系统的放大倍率为 $255\times$ ，因而系统的截止频率为 $1000/(2\times 5.4\times 255)=0.363\text{lp/mm}$ 。从图 4.4 中可以看出，所有视场的 MTF 在截止频率处均高于 0.3，满足系统的设计指标。

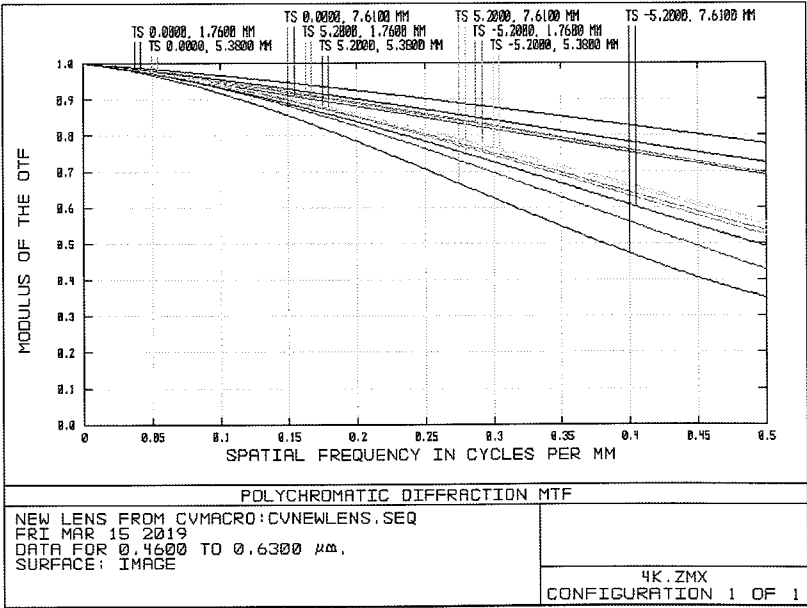


图 4.4 最终系统的 MTF 曲线

Figure 4.4 MTF curve of the final system

(4) 相对照度曲线

超短焦投影物镜的相对照度仿真结果曲线如图 4.5 所示。最大视场处的超短焦投影物镜的相对照度为 95.78%，达到了超短焦投影系统的照度要求。

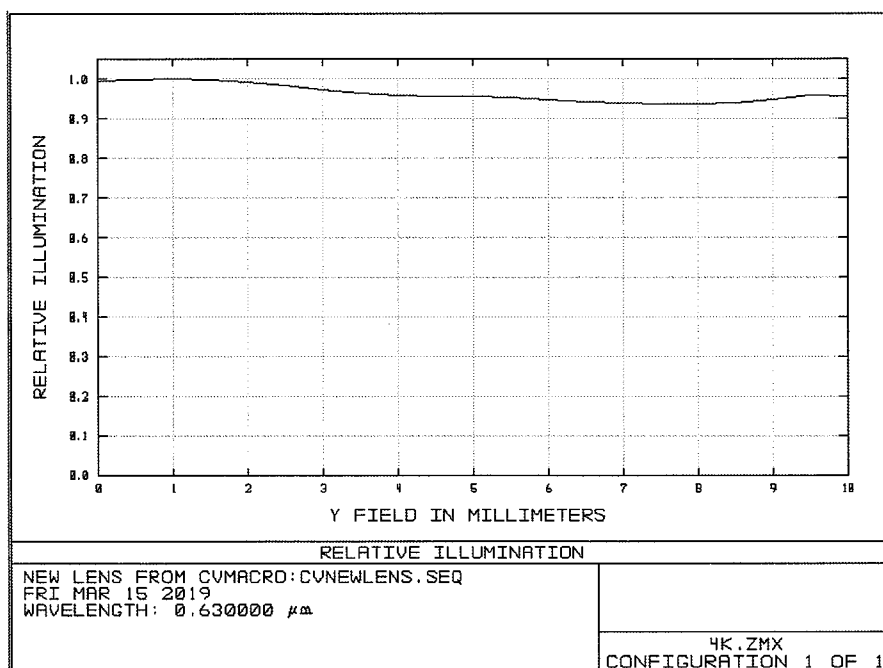


图 4.5 超短焦投影物镜的相对照度曲线图

Figure 4.5 Relative illumination curve of ultra-short-focus projection objective

4.3 基于自由曲面的超短焦投影光学设计

为了进一步降低超短焦投影物镜的投射比，本文在超短焦投影物镜的光学系统中引入了自由曲面，采用折反式结构设计得到了具有更低投射比的超短焦投影物镜，投射比达到 0.11。

4.3.1 超短焦投影系统的设计指标

超短焦投影光学系统一般包含三部分，即照明系统，投影物镜和投影屏幕。超短焦投影物镜是为了在超短的投影距离处实现大尺寸屏幕的投影。本章所提出的基于自由曲面的超短焦投影物镜系统的光源主波长分别为 656.3nm，587.6nm 和 486.1nm。采用 TI 公司的 DMD 作为空间光调制器。从光源发出的三色激光照射在 DMD 上经过其进行数字光调制产生图像源后，经过投影物镜成像并投影在显示屏幕上，能够在短距离内获得大屏幕的投影画面。具体的超短焦投影系统的设计指标如下：

(1) 分辨率：超短焦投影物镜的物理分辨率与 DMD 的像素数有关，像素数量越多，相应的分辨率越高。为了能够获得高清晰度的投影画面，采用 0.65inch 的 DMD 芯片，它同时作为照明系统的受照射面和投影物镜系统的物面。其像素数为 1920×1080 ，也就是说由 1920×1080 个微小反射镜组成，每个微镜与投影屏幕上的一个像素相对应，DMD 的像元尺寸为 $7.5\mu\text{m} \times 7.5\mu\text{m}$ ，图像的长宽比为 16: 9。

(2) 屏幕尺寸、投射比及视场角：由于超短焦投影物镜一般应用于大屏幕投影显示中，所以一般希望屏幕尺寸大于 100inch 以上，本文中确定屏幕尺寸为 130inch。由于超短焦投影物镜主要是为了在超短的投影距离实现大屏幕投影，从而避免高亮度的投影光射入人的眼睛造成损伤。为了获得更低的投射比，投影距离设为 320mm，因而投射比为

$$TR = \frac{l}{s} = 0.11 \quad (4.1)$$

其中 l 和 s 分别为投影距离和屏幕尺寸。根据推导公式 (2.18)，可大概计算出视场角为

$$2\omega = 2\arctan \frac{s}{2l} = 2\arctan \frac{1}{2TR} = 158^\circ \quad (4.2)$$

超短焦投影物镜的半视场角约为 79° ，根据 2.3.3 节中介绍的光学系统的性能和视场角之间的对应关系，设定本论文中超短焦投影物镜的有效视场角为 23.5° ，所以得到最小视场角为 55.5° 。

(3) 相对孔径与 F 数：超短焦投影物镜要与照明系统保持孔径的匹配。为了保证获得足够高的能量，照明系统的 F 数应该略大于投影物镜的 F 数。因为激光光源的 F 数大于 3.5，所以投影物镜系统的 F 数确定为 3.5 是足够的。为了与照明系统相匹配，并结合照明系统的光路特点，设定所提出的超短焦投影物镜的结构为远心结构。

(4) 照度均匀性：为了获得高像质的投影画面，希望光源经过超短焦投影物镜后在屏幕上能够有较高的照度均匀性。因为本文采用的是激光光源，所以每个像素点的照度是相同的，而对应投影屏幕上也是相同的，因而设定照度均匀性在 90% 以上。

(5) 物镜焦距与放大率：本文中采用的 DMD 尺寸为 0.65inch，投影屏幕尺

寸为 130inch, 放大倍率为

$$M = -\frac{130}{0.65} = -200 \times \quad (4.3)$$

根据公式 (2.23) 可得, 系统的焦距大约为

$$f = \frac{M}{1-M} l = -1.59 \text{mm} \quad (4.4)$$

公式 (4.4) 是在傍轴近似条件下给出的计算结果, 而在折反射的离轴光学系统中, 会存在一定量的偏差, 因此该计算结果只能为光学设计提供参考, 并不代表最终系统的设计结果。

(6) 畸变: 在投影显示领域, 一般采用 TV 畸变来衡量投影画面的变形, 而在大视场的投影物镜光学系统中, 常采用网格畸变来描述系统的畸变性能。本文中, 将中心视场作为参考视场, 为了获得更好的像质, 设定畸变小于 0.1%。

(7) MTF: 为了便于对屏幕上的实际投影效果进行分析, 并对超短焦投影物镜的结构进行优化, 本章中对折反式超短焦投影物镜的光学设计, 采用正向光路设计方法, 即直接将 DMD 作为物面, 将投影屏幕作为像面, 由于本文中采用的 DMD 的像元大小为 $p = 7.5 \mu\text{m}$, 所以系统的截止频率为

$$\text{cutoff frequency} = \frac{1}{2p \times M} = 0.33lp / \text{mm} \quad (4.5)$$

其中, M 为系统的放大倍率。为了很好地满足人眼的分辨力要求, 本设计中要求截止频率处的 MTF 要高于 0.2。

以上这几个参数指标是关于超短焦投影物镜的主要结构参数和性能指标要求, 而在耐湿性等其他方面按照一般要求处理。将超短焦投影物镜的设计指标汇总于表 4.2 中。

表 4.2 基于自由曲面的超短焦投影物镜的光学设计指标

Table 4.2 Specifications of the projection objective system

Parameters	Value
DMD size	0.65 inch (1920×1080)
Focal length	1.95mm
Projection system	telecentric
Throw ratio	≤0.2

Screen size	130 inch
Field of view	158 degree
F/#	3.5
Resolution	MTF>0.2@0.3335 lp/mm
Maximum distortion	<0.1%

4.3.2 折射部分的优化设计

基于上节中确定的设计参数指标，本文首先对折射部分进行了设计。在折射部分设计过程中，系统的焦距、 F 数和视场角是需要考虑的主要参数。由于折反式系统的放大率是折射部分和反射部分放大率的乘积，所以两个部分的放大率需要在优化时进行平衡。也就是说，如果折射部分更复杂，则反射部分相对简单，否则，反射部分相对复杂，所以系统对折射部分的放大率并没有确定的要求。通过采用人机交互逐步逼近的方法优化折射系统，在满足初级像差要求的基础上平衡高级像差。

在折反式超短焦投影物镜中，一般除了畸变以外，其余的轴外像差和色差需要通过折射部分进行校正。为了校正场曲，本章采用增加最小视场角同时减小有效视场角的方法。为了校正色差，选用了两组双胶合透镜，这些双胶合透镜的使用可以降低对元件加工、检测和装调公差的要求。

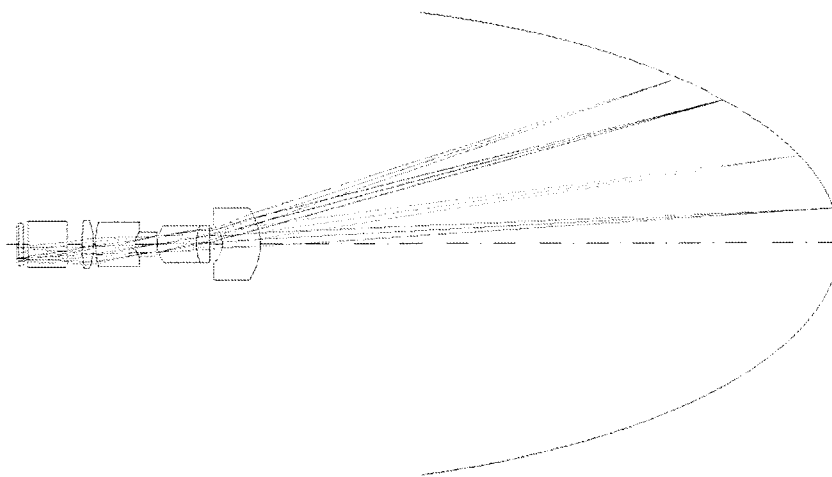


图 4.6 超短焦投影物镜的折射部分光路结构图

Figure 4.6 Layout of refractive lenses of the projection system

DMD 经过折射部分成像到中间一次像面上，然后这个中间像经过反射镜反射放大后成像在投影屏幕上。折射部分的光学结构如图 4.6 所示，图 4.7 给出了

其光斑点列图。

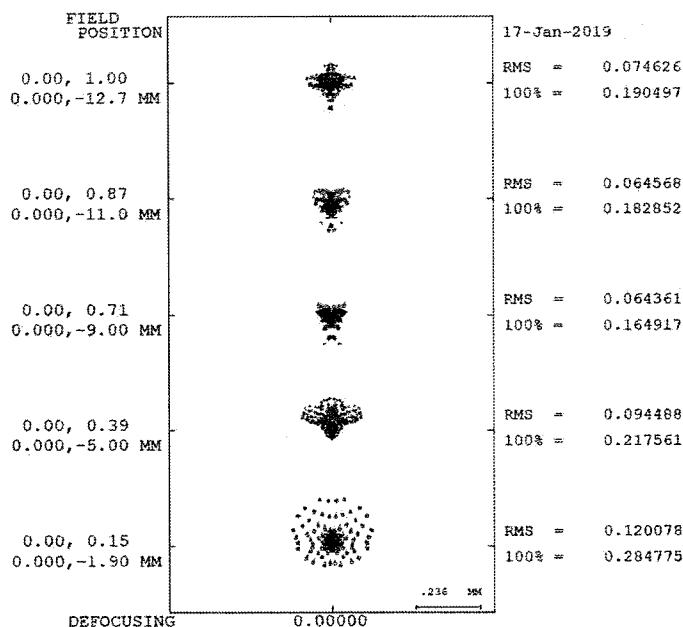


图 4.7 折射部分的光斑点列图

Figure 4.7 Spot diagram of the refractive part of the projection system

4.3.3 自由曲面反射镜的设计

自由曲面反射镜的设计是超短焦投影物镜系统中非常关键的一部分，其主要用于校正系统的畸变。本文中主要依据折射部分的出射光线方向以及理想像点的位置，采用 3.4 节中所提出的多视场加权优化迭代设计方法计算自由曲面反射镜的面形系数。具体地说，这种方法主要是通过对不同视场设置不同的合适的权重，然后采用在优化迭代过程修改权重值，逐渐缩小理想法线与实际法线之间的偏差，达到平衡所有视场成像质量并获得自由曲面的目的。

反射镜的面型表示为

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_{i=1}^8 A_i \left(\sqrt{x^2 + y^2} \right)^i + \sum_{j=1}^4 B_j \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{160} \right)^{9-j} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (4.6)$$

其中 c 是曲率， k 是二次曲面常数， $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ， A_i 是奇数次非球面多项式的系数， B_j 是 Odd Cosine 多项式的系数。因为系统关于 YOZ 面对称，公式 (4.6) 中只采用了 x 的偶次项。得到的自由曲面的面形矢高如图 4.8 所示，去除旋转对称项后的自由曲面矢高如图 4.9 所示。从图 4.9 中可以看出，去除旋转对称项后的自由曲面的矢高值很小。

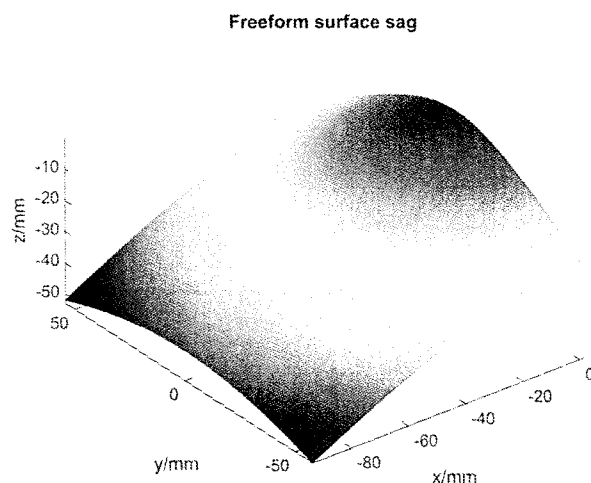


图 4.8 自由曲面的矢高图

Figure 4.8 Sag of the calculated freeform surface mirror

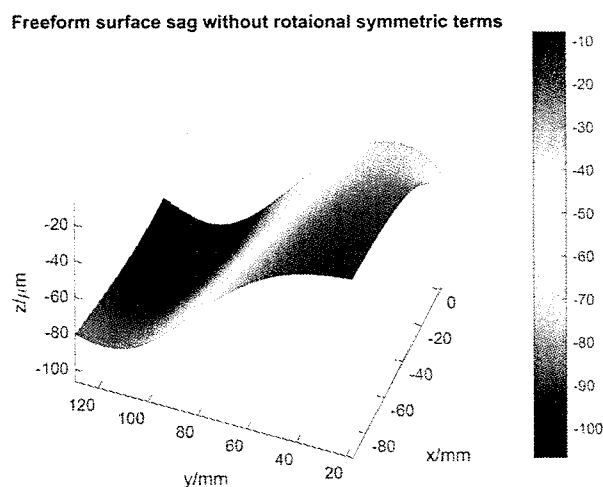


图 4.9 去除旋转对称项后自由曲面的矢高图

Figure 4.9 Sag of the calculated freeform surface mirror after removing rotational symmetry terms

4.3.4 超短焦投影物镜的一体化优化设计

自由曲面反射镜设计完成后,将折射部分和反射镜整体作为超短焦投影物镜的初始结构,再按照设计要求逐步调整与优化,使其逐步趋向于设计目标。在一体化优化的过程中,需要对反射部分与折射部分进行反复的迭代计算和优化。

优化过程采用光学设计软件进行,以默认的评价函数搭配手动输入的操作数构造优化过程中的评价函数。由于超短焦投影系统的残留像差较大,所以主要采用光斑半径 (Spot Radius) 作为优化目标。MTF 和畸变作为超短焦投影物镜光

学系统的性能评价指标。

在设置操作数及其权重时,要保证设置的参数指标之间没有相互矛盾的情况。而且,需要根据实际优化时的结果及预期的优化目标,不断调整相关操作数的权重,保证优化时的权重值保持合理。设置的优化条件要合适,要求过于严格会导致系统优化异常,要求过于宽松则不易达到优化目标,因此需要根据经验权衡调整及设定。系统优化的流程图如图 4.10 所示。

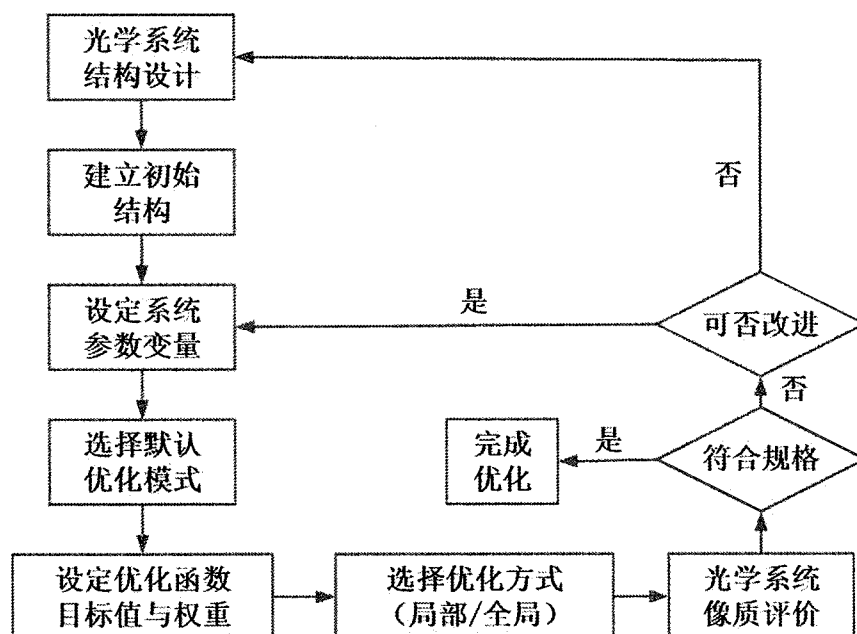


图 4.10 系统优化流程图

Figure 4.10 Flow chart of system optimization

4.3.5 设计结果分析与评估

基于上节中的优化思想,包含自由曲面反射镜的超短焦投影系统的光路结构如图 4.11 所示。

考虑到实际工程以及系统的体积等问题,本文在提出的物镜光路结构中增加了一面折叠镜,用于折转光路,折叠后的最终系统的光路结构图如图 4.12 所示,从折射镜组出射的光束经过平面反射镜折转,然后被自由曲面反射镜反射,最终成像到投影屏幕上,平面反射镜的引入大幅缩小了系统的体积。

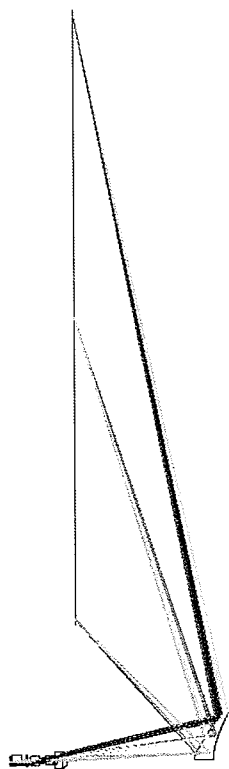


图 4.11 超短焦投影物镜结构图

Figure 4.11 Layout of the ultra-short-focus projection objectives

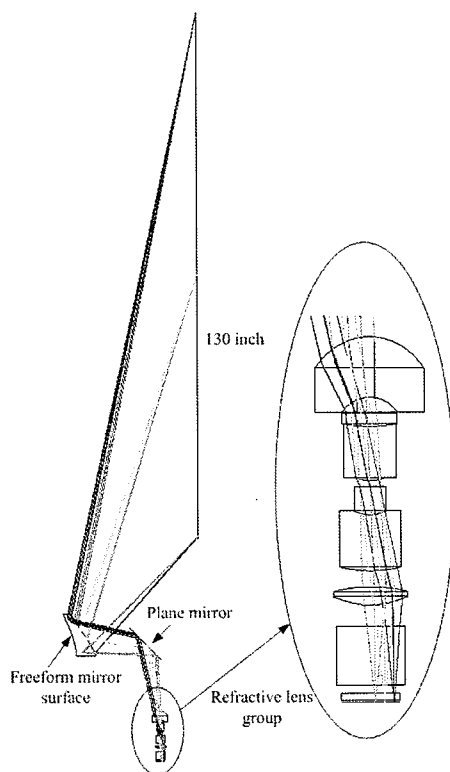


图 4.12 基于自由曲面的最终系统的结构图

Figure 4.12 Layout of the final projection system based on freeform surface

如图 4.13 所示为最终系统的 MTF 曲线, 由图可以看出, 大部分视场在截止频率 0.33lp/mm 处的 MTF 均高于 0.4, 只有最大和最小视场的 MTF 在截止频率处高于 0.2, 相比于其他视场稍低些。这是由于在优化过程中, 对这两个视场设置的权重比其他视场的权重小, 也就是在设计过程中牺牲了少量的边缘视场的成像质量, 以此来提高中心视场附近的成像质量。

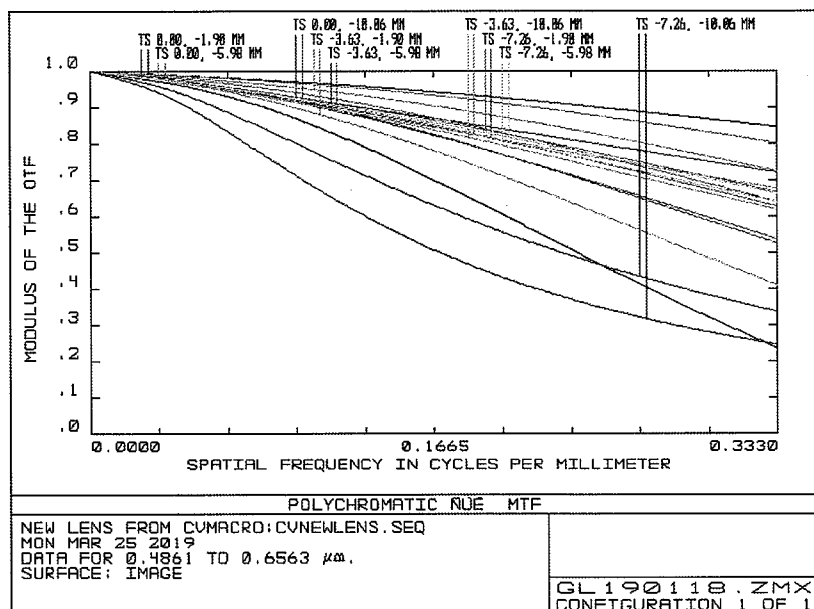


图 4.13 最终系统的 MTF 曲线

Figure 4.13 MTF curve of final system

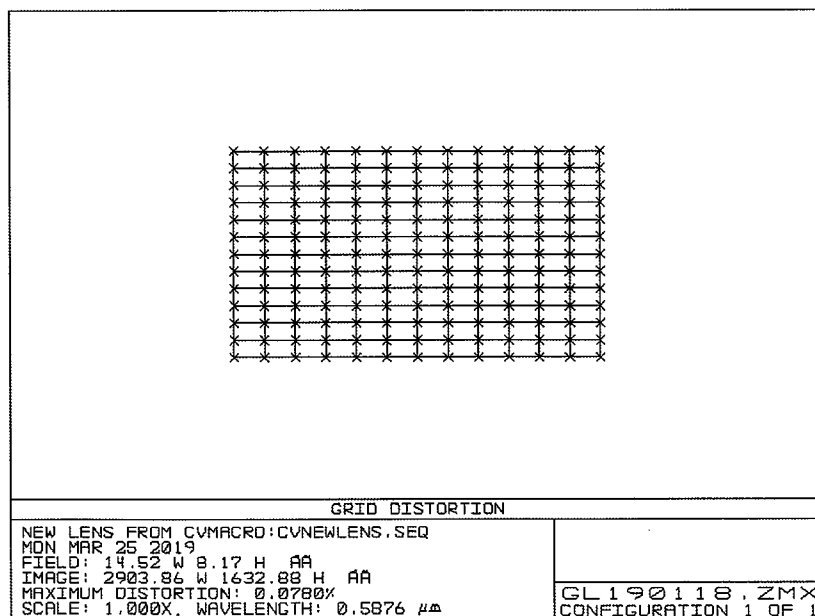


图 4.14 最终系统的网格畸变图

Figure 4.14 Distortion of the final system

对于大视场的超短焦投影物镜系统中,畸变是一个非常重要的用于评价系统性能的指标。图 4.14 给出了系统的网格畸变图,从图中可以看出,系统的畸变通过肉眼几乎无法觉察,也就是看不出理想像点与实际像点之间的差异。从数值上,系统的最大畸变值为 0.07%,设计结果小于畸变目标值 0.1%,因而满足了设计指标要求。

系统的光斑点列图如图 4.15 所示,图中每个蓝色的方框代表投影屏幕上的一个像素,其大小为 $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$,可以看出,大部分视场的光斑形状都比较规则,而且能够集中在一个像素以内,只有最大和最小的边缘视场的光斑形状相比于其他视场不够规则,这主要是由于我们考虑到最大和最小视场分别位于屏幕的角落和最底处,在实际使用中,图像的观看权较小,所以在优化过程中,对这几个视场设置的优化权重小于其他视场,这意味着我们牺牲了很少的几个边缘视场的成像质量来提升相对重要视场的成像质量。图中的光斑为几何光斑, RMS 光斑会比图中的光斑更小些,也就是超短焦投影物镜的点列图光斑能够很好地集中在一个像素之内。

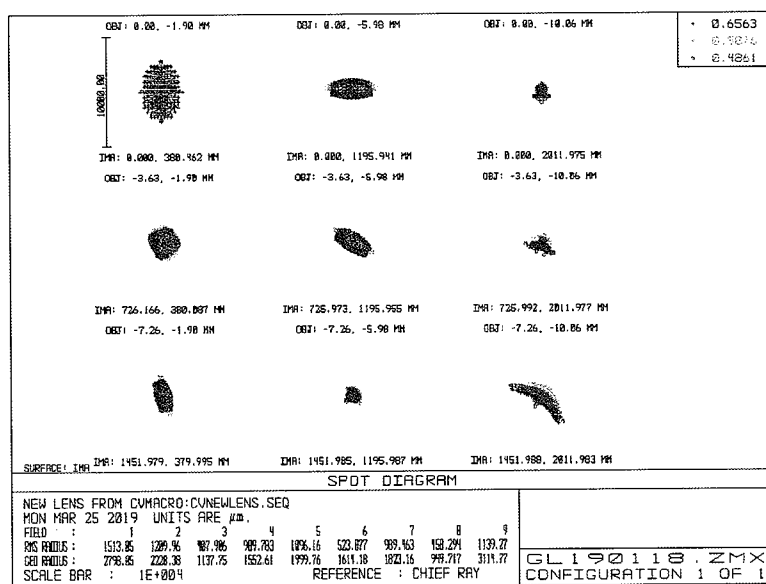


图 4.15 最终系统的光斑点列图

Figure 4.15 Spot diagram of the final projection system with freeform surface

4.3.6 基于自由曲面的超短焦投影物镜的公差分析

为了验证本论文中所设计的基于自由曲面的折反式超短焦投影物镜的光学系统能够实现工程应用,需要对其进行公差分析,从而确认系统的公差要求是能够实现的,进而指导机械结构的设计和各元件的加工,从而保证加工和装配后的

系统性能符合设计要求。

4.3.6.1 公差分析的基本原则

公差分配^[120]的指导思想是根据光学系统性能所容许的要求, 给出一个尽可能大的公差值。一般来说, 公差分析要避免的问题主要有两个, 分别是技术条件要求不够充分和要求过于严格。前者就是指应该确定的技术条件描述不完整, 而后者是确定的公差相比于必需的公差更为严格。技术条件描述存在遗漏的话, 可能会导致光学系统在加工和装调过程中出现意料之外的误差, 甚至会导致系统研制的失败; 技术条件要求过于严格则会给加工和装调增加难度, 相应的也会增加成本。因而, 合理地给出光学公差的分配是一项特别有益的工作。

影响光学系统性能的公差主要分为四类: 第一类是光学元件的加工公差, 例如曲率半径、厚度、空气间隔等; 第二类是光学材料的公差, 例如折射率、阿贝数等, 第三类是装调过程引入的公差, 如光学零件的倾斜、偏心、在 z 轴上的位置和装配定位等; 第四类是环境公差, 例如材料的热胀冷缩、温度、振动引起的对位、机械应力等, 一般在实际公差分配时, 主要考虑前三类公差。通常不同的公差对系统性能的影响存在不同程度的补偿作用, 这种补偿可以是在数量大小方面的配合, 也可以是在正负公差方面的配合。由于具有这种补偿作用, 使得某些系统公差在相互配合时可以适当放宽。

公差分析的流程图如图 4.16 所示, 根据理论设计的系统, 进行系统的成像质量评价, 确定系统允许的性能偏离值, 然后便可以开始进行公差分析。首先对系统的各个元件定义起始的公差范围, 选择合适的补偿群, 然后对公差进行灵敏度分析, 便可以知道在现有的公差范围内, 参数的变化对系统性能的影响, 然后判断是否满足系统的性能要求, 再判断设置的公差范围是否可满足工程实践的能力, 根据上述两个判断对公差范围进行相应调整, 然后对系统的质量进行评价, 当系统质量满足要求时, 则可确定最终的公差范围。一般来说, 在公差分析的过程中, 公差是从较为宽松的起始范围开始设置的, 然后再逐步收紧公差范围, 直至达到要求。

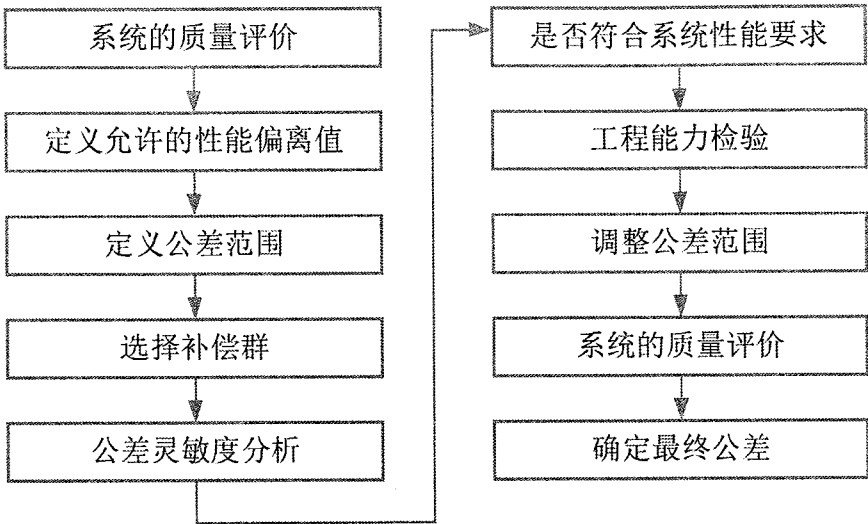


图 4.16 公差分配与分析流程图

Figure 4.16 Flow chart of tolerance allocation and analysis

4.3.6.2 超短焦投影物镜的公差分析

按照上述的公差分析方法，对本论文中所设计的超短焦投影物镜进行了公差分析，公差分配结果如表 4.3 所示，公差分析结果如图 4.17 所示。从图中可以看出，只有最小视场的 RMS 光斑在 90%处小于 1.6mm，而其他视场的光斑在 90%处均小于 1.3mm，这与设计结果是符合的，由于最小视场位于屏幕的底端，因而这个结果能够满足工程实践能力。

表 4.3 公差分配结果

Table 4.3 Tolerance allocation results

序号	元件加工公差				装配公差		
	面形公差 PV (λ)	半径公差 (光圈) N=2	厚度公差 (mm)	元件楔形 TIR ($^{\circ}$)	间隔公差 (mm)	偏心公差 (mm)	倾斜公差 ($^{\circ}$)
折射组	1/4~1	N=2	0.03	1	0.03~0.05	0.03	1
平面镜	1/2	N=2		0.5		0.1	1
自由曲面	2 μ m				调节	0.03	1

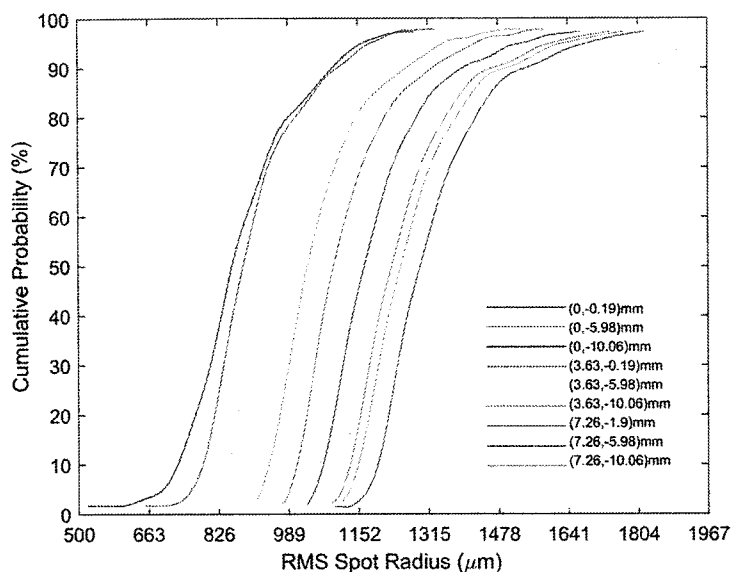


图 4.17 基于自由曲面的最终系统的公差分析结果图

Figure 4.17 Tolerance analysis result of the final projection system with freeform surface

4.4 基于自由曲面的超短焦投影物镜的优势分析

为了突出本章所提出的超短焦投影物镜的优越性,与一个传统的折射型投影物镜的设计实例进行了对比。基于自由曲面的超短焦投影物镜系统与采用传统光学元件的透射式投影物镜系统的主要区别,是超短焦投影物镜系统中采用折反式光路结构,并且引入了自由曲面反射镜。

在光学结构方面,如图 4.18 所示为一种折射型投影物镜的光学结构图,其总长为 704mm。从图中可以看出,该物镜共包含 21 个光学元件,光学结构复杂,并且包含多个加工难度较大的弯月透镜,并且由于光学元件过多会导致系统的机械设计和装调难度较大,整机成本较高。如图 4.19 所示,基于自由曲面的折反式超短焦投影物镜光学系统总长只有 439mm,由一个包含四个传统透射型光学元件的折射透镜组、一片平面反射镜和一片自由曲面反射镜构成,结构形式较为简单。可以看出,基于自由曲面的折反式超短焦投影物镜能够大幅度地简化光学系统结构,使用更少的光学元件便可以实现甚至超越复杂的传统折射型投影物镜系统所能实现的性能。

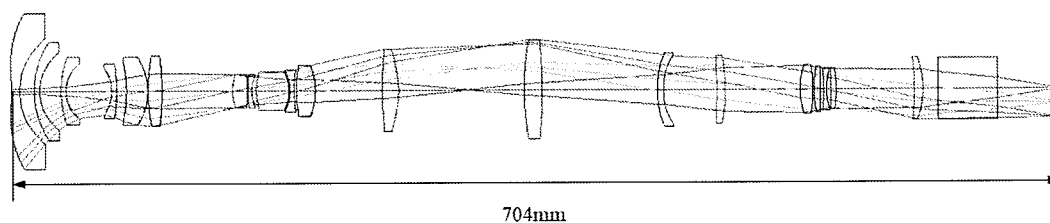


图 4.18 传统的折射型投影物镜结构图

Figure 4.18 Layout of the traditional refractive projection objectives

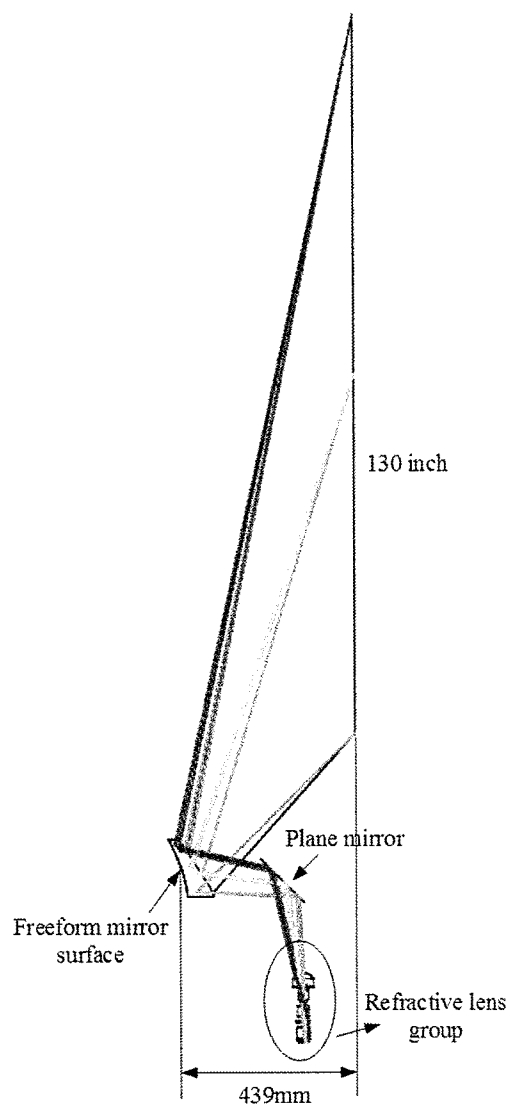


图 4.19 超短焦投影物镜结构图

Figure 4.19 Layout of the ultra-short-focus projection objective

在投射比方面，折射型投影物镜的投射比一般较大。本章所设计的基于自由曲面的超短焦投影物镜系统具有非常短的投射比，可以在 320mm 的投影距离处

实现屏幕尺寸为 130inch 的大屏幕投影显示, 投射比为 0.11。在视场角方面, 折射型投影物镜的视场角为 130° , 超短焦投影物镜的视场角为 160° , 折射型投影物镜的视场角存在设计极限。

在光路结构方面, 相比于 4.2 节中的基于高阶非球面的折反式超短焦投影物镜的折射部分包含 9 个光学元件, 而基于自由曲面的超短焦投影物镜折射部分仅包含 4 个光学元件, 结构更为简单。

4.5 本章小结

超短焦投影物镜是具有大视场角的光学系统, 其光学设计是一个技术性非常强、需要反复调整与优化的工作, 不仅要依托理论知识还要考虑工程上的可实现性问题, 特别是引入自由曲面反射镜后, 超短焦投影物镜的光学设计需要重点考虑其中自由曲面的设计。

本章是基于自由曲面的超短焦投影物镜设计, 对整个过程进行了详细的论述与分析, 从最初的各项参数指标的计算和设定, 然后基于其中的几项关键指标, 进行折射镜头的优化设计。之后, 根据设计的折射镜头的出射光线以及理想的物像关系, 采用提出的多视场优化迭代设计方法计算得到了自由曲面反射镜。然后对折射部分和反射镜整体进行了一体化设计, 通过不断地调整与优化, 最终得到了基于自由曲面的超短焦投影物镜, 然后通过光学设计软件对整个系统的性能进行了分析, 证明了本文中设计的超短焦投影物镜能够满足设计指标要求。最后, 对整个投影物镜光学系统进行了公差分析, 分析结果表明该系统能够满足工程应用的要求。

第 5 章 超短焦投影物镜系统验证

5.1 引言

为了验证基于自由曲面的超短焦投影物镜的实际性能,对设计的系统搭建了原型样机。本章首先阐述了系统的光机结构设计,然后对自由曲面反射镜的光学加工和检测进行了阐述与分析,然后讨论了系统装调过程,最后对原型样机的实际性能进行了测试与分析。

5.2 超短焦投影系统结构设计

超短焦投影系统光学设计完成后,需要对光学系统进行机械结构设计,以便于对光学零件进行固定和组装。针对本文中设计的折反式投影物镜的光路结构特点,在机械结构的设计过程中,需要对折射部分和反射部分分别单独进行设计。

5.2.1 折射部分结构设计

超短焦投影物镜的折射部分是一个旋转对称的折射透镜组,共包含 4 个光学元件,其中可分为 6 片光学透镜,如图 5.1 所示。超短焦镜头折射部分的机械结构包括折射镜片 L1-L6、镜筒及隔圈、镜头固定法兰及轴向调节凸轮,如图 5.2 所示。

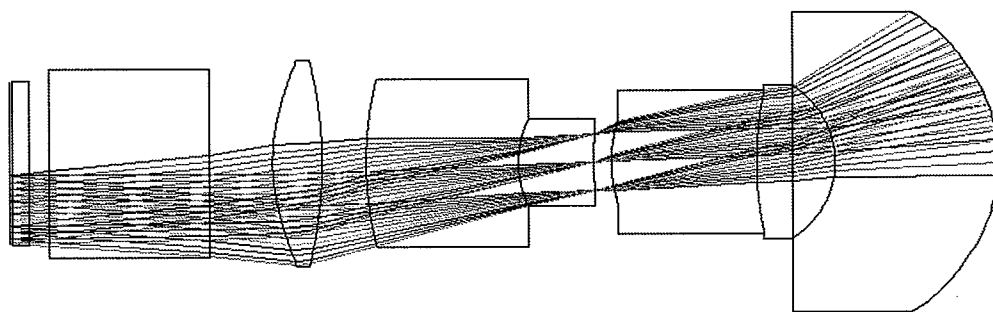


图 5.1 超短焦物镜的折射部分光路图

Figure 5.1 Optical structure of refractive part of the ultra-short-focus projection objective

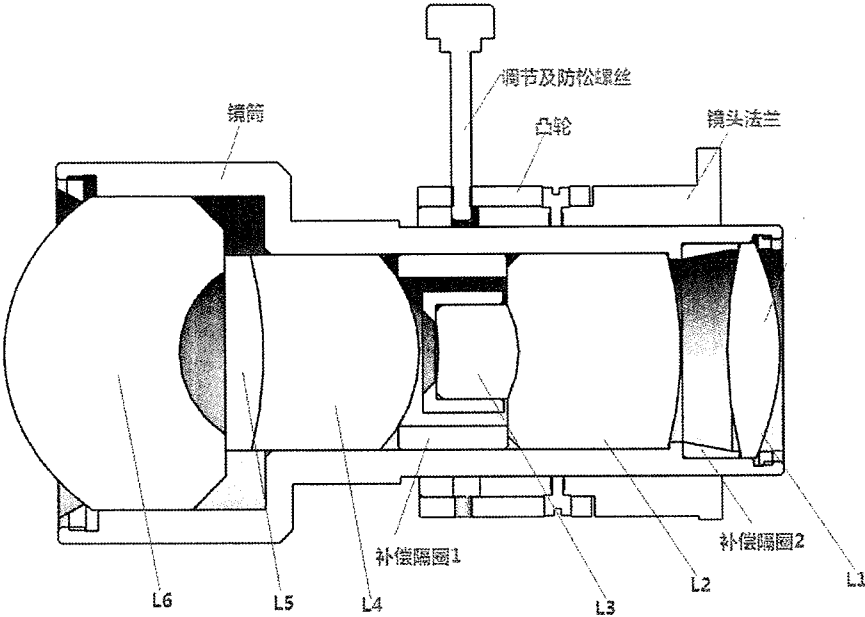


图 5.2 超短焦物镜折射部分的结构示意图

Figure 5.2 Structural illustration of refraction part of ultra-short-focus projection objective

如图 5.3 所示,超短焦投影物镜通过镜头法兰与光学引擎法兰部分连接固定,其中 XY 方向调节通过螺栓孔间隙实现,连续在线调节,调节后螺栓固定;Z 向调节通过凸轮实现,连续在线调节,调节后通过防松螺丝紧固;折射部分调节机构设计指标及最终设计结果如表 5.1 所示。

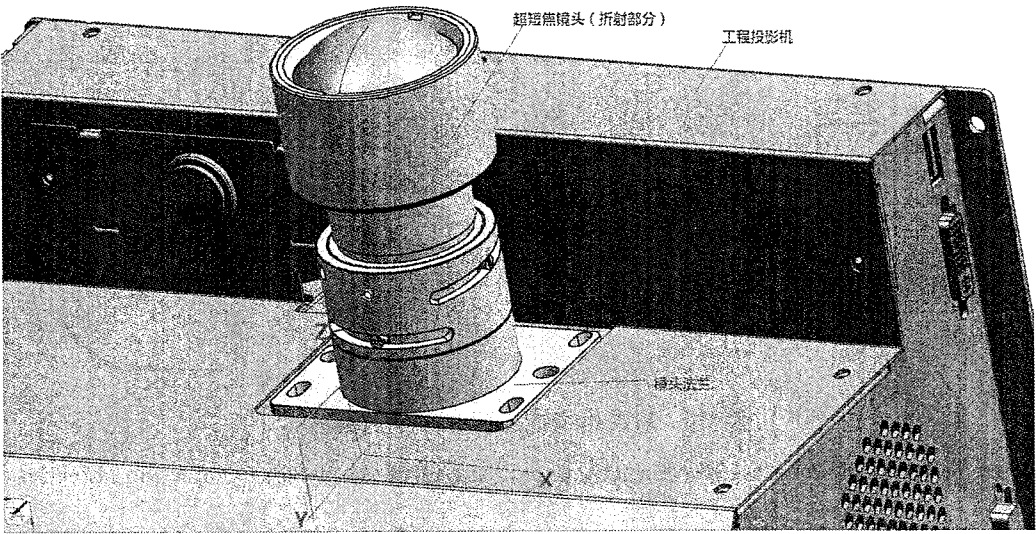


图 5.3 超短焦物镜折射部分模型图

Figure 5.3 Structural model of the refractive part of ultra-short-focus projection objective

表 5.1 折射部分调节机构设计指标及设计结果

Table 5.1 Design indicators and results of regulating mechanism of refractive part

项目	调节行程	分辨率	备注
X 向位移	$\pm 0.25\text{mm}$	连续调节	在线调节
Y 向位移	$\pm 2\text{mmmm}$	连续调节	在线调节
Z 向位移	$\pm 2.5\text{mm}$	连续调节	在线调节

5.2.2 反射部分结构设计

超短焦投影物镜的反射部分是由一块平面反射镜和一块自由曲面反射镜组成的。其中，平面反射镜采用铝合金材料加工，如图 5.4 所示，通过平面反射镜支撑部分粗定位，采用三点硅胶垫片支撑平面反射镜实现反射镜 XY 两方向倾斜调节，补偿光学设计要求的倾斜公差。调节机构设计结果如表 5.2 所示。

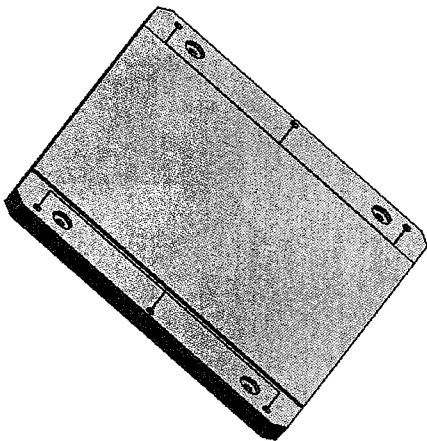


图 5.4 平面反射镜示意图

Figure 5.4 Structural model of plane mirror

表 5.2 平面反射镜调节机构设计结果

Table 5.2 Design result of plane mirror regulating mechanism

项目	调节行程	分辨率
X 向倾斜	$\pm 45'$	1'
Y 向倾斜	$\pm 75'$	1'

在加工自由曲面反射镜时，采用了铝合金材料，其三维模型如图 5.5 所示。如图 5.6 所示，通过自由曲面反射镜固定板部分粗定位，通过调整架实现 XYZ

三个方向位移调节，补偿光学设计要求的间隔和偏心公差。调整架采用现有干涉仪标准镜调整架，调整架设计结果如表 5.3 所示。

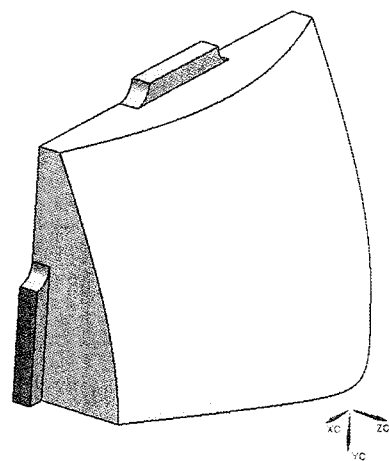


图 5.5 自由曲面的 3D 模型
Figure 5.5 Model of freeform surface mirror

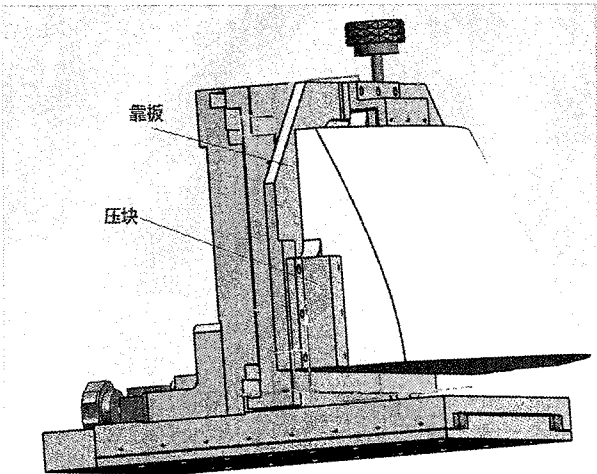


图 5.6 自由曲面固定及支撑结构示意图
Figure 5.6 Illustration diagram of freeform surface mirror fixed and supported

表 5.3 自由曲面调整架设计结果

Table 5.3 Design results of adjusting frame for freeform surface mirror

项目	调节行程	分辨率
X 向位移	±7mm	连续调节
Y 向位移	±7mm	连续调节
Z 向位移	±25mm	连续调节

自由曲面反射镜的支撑直接采用反射镜加工过程中的使用工装及定位方式进行支撑和固定，如图 5.6 所示，减少外力引入导致的反射镜面型变化，通过靠板与 XYZ 调整架连接，便于调节 XYZ 位移。如图 5.7 所示是超短焦物镜中反射部分的整体结构示意图。

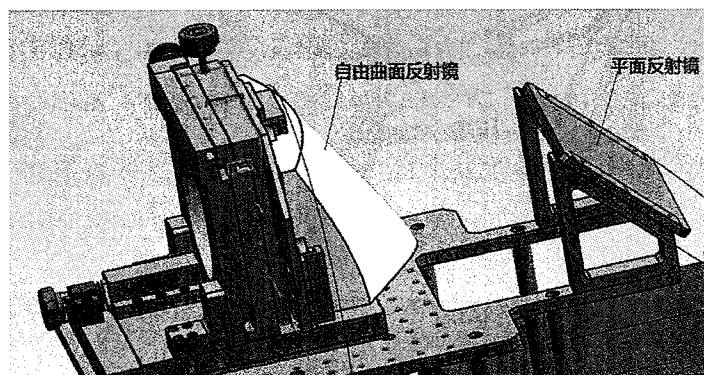


图 5.7 超短焦物镜中反射部分的结构示意图

Figure 5.7 Structural illustration of the reflective part of the ultra-short-Focus projection objective

5.2.3 超短焦投影系统整体结构

光学引擎无外部固定接口，因此通过 Y 型压板将光学引擎固定于光学平板后，再进行系统成像调节；通过三坐标测量平台测得投影机镜头固定法兰面与基准面平行度为 0.3mm，如图 5.8 所示，该部分倾斜会引入镜头折射部分的倾斜公差，该部分公差通过调节平面反射镜倾斜进行补偿，如在实际装调过程出现调节结构调节量无法补偿投影机法兰面倾斜公差的情况，则通过增加垫片调节镜头法兰面与固定基准面的不平度进行调节。

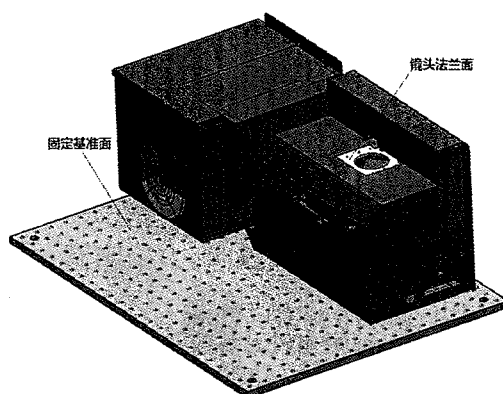


图 5.8 光学引擎固定支撑示意图

Figure 5.8 Fixed support sketch of projector

超短焦物镜系统的结构如图 5.9 所示，包含光学引擎、投影物镜以及屏幕的超短焦投影系统的整体布局图如图 5.10 所示。

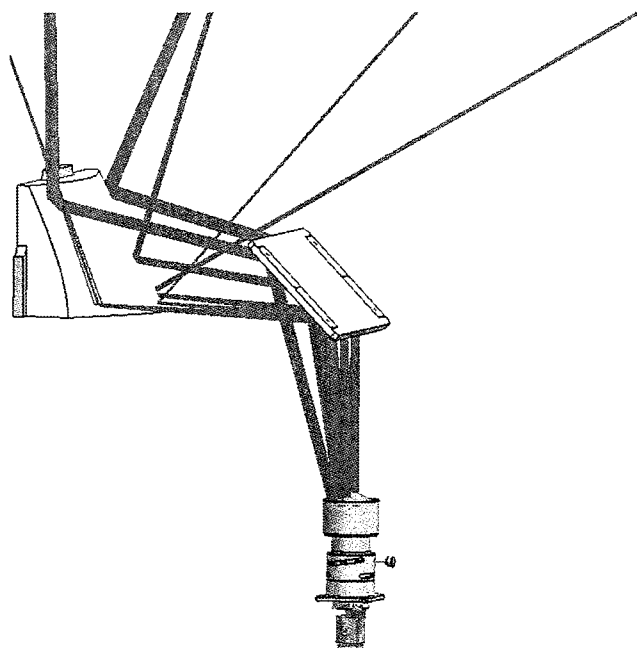


图 5.9 超短焦物镜的结构图

Figure 5.9 Overall structure of the ultra-short-focus projection objective

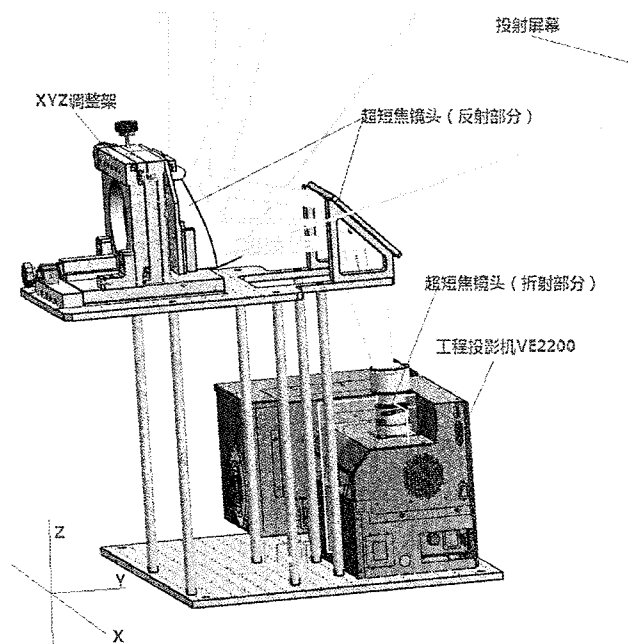


图 5.10 超短焦投影系统整体布局图

Figure 5.10 Overall structural diagram of the ultra-short-focus projection system

5.3 自由曲面反射镜加工与检测

5.3.1 自由曲面反射镜加工

完成系统的光学设计和公差分析以及系统的机械结构设计后,就需要对光学零件进行工程出图,使其转换成可用于指导加工的工程图纸,然后便可根据图纸对所有元件进行光学加工。由于所设计的超短焦投影物镜中的折射透镜组中的元件均为传统的光学透镜,其加工方法和技术较为成熟,不作阐述,本文中自由曲面反射镜的加工采用单点车削方法。加工的过程中,需要根据光学检测结果再结合经验的判断,根据需要再对其进行修磨,直至反射镜面形精度能够满足要求,如图 5.11 所示为加工完成后的自由曲面反射镜。

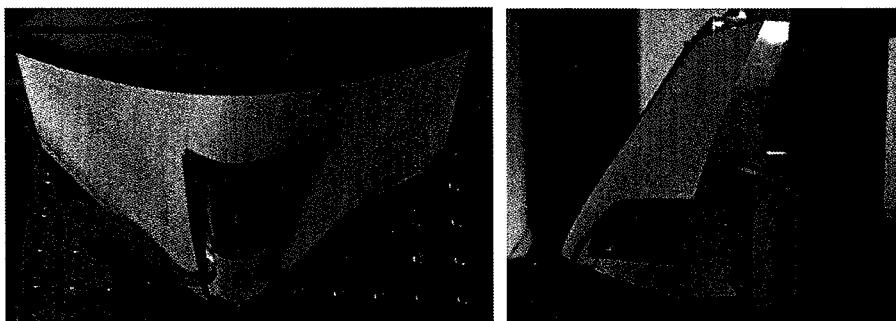


图 5.11 加工的自由曲面反射镜

Figure 5.11 Manufactured freeform surface mirror

5.3.2 自由曲面反射镜检测

在光学元件完成初步加工后,便可对其进行光学检测,从而对光学元件的进一步加工提供反馈和指导。由于本文设计的超短焦投影物镜中的折射部分均为传统的光学透镜,因而本文仅对自由曲面反射镜的光学检测进行阐述。本文中,采用三坐标测量机对自由曲面进行光学检测。

测量自由曲面反射镜时,首先将其放置在三坐标机的量程范围内,然后用探针沿着预先设定好的路径对被检自由曲面进行逐点接触式扫描测量,得到其表面所有采样点的三维坐标。再采用算法对其进行数据处理与分析,主要是将理想面形和实际测得的面形进行匹配定位,即通过定位过程将测量坐标系和自由曲面的设计坐标系进行对齐,从而使设计模型与实际测量点达到最佳匹配的状态,然后获得面形误差,用以评价自由曲面的实际面形,进而指导光学加工的误差修正,本文中自由曲面面形检测结果如图 5.12 所示。由图可以看出,面形误差的 PV 值

为 4.328 个波长，其中波长为 632.8nm，能够满足公差和使用要求。

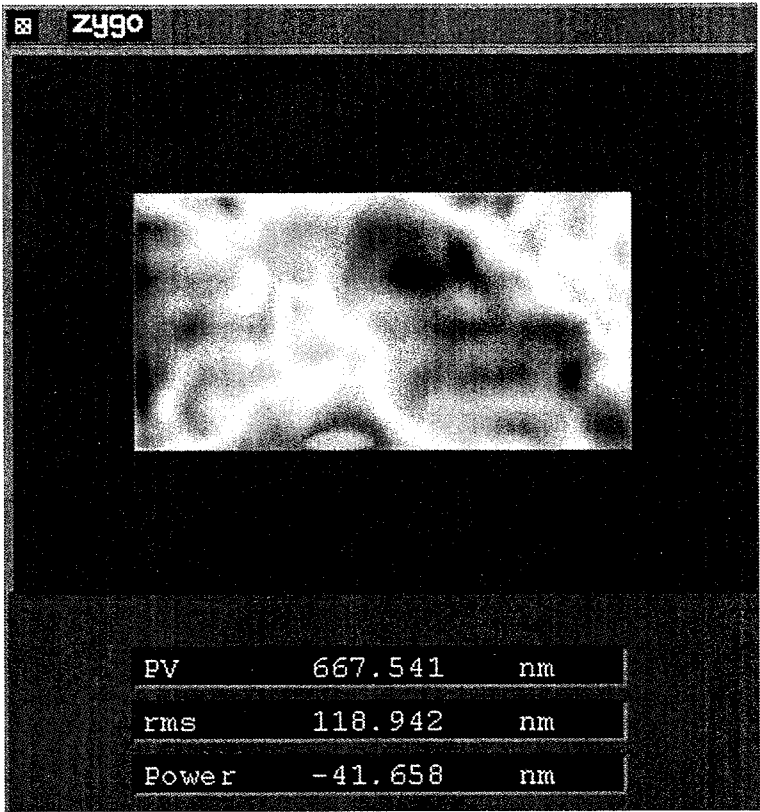


图 5.12 自由曲面面形检测结果

Figure 5.12 Surface shape detection results of freeform surface mirror

5.4 超短焦投影物镜系统的装调

超短焦投影物镜包括折射透镜组、平面反射镜和自由曲面反射镜三个主要组成部分，其装调过程中，首先对各部分进行独立组装，然后将它们与光学引擎及屏幕等组合搭建成完整的原理样机，最后通过对各组成部分进行精密调整来完成超短焦投影系统的整机联调。

折射透镜组采用传统的装调方法，将光学元件依次放入镜筒中，然后通过隔圈保证各光学元件之间的距离，组装完成后的折射透镜组如图 5.13 所示。折射透镜组装调完成后，将其通过镜头法兰与光学引擎法兰部分连接固定。平面反射镜直接通过三点硅胶垫片固定到机械支撑架上，自由曲面反射镜通过固定板进行粗定位，然后安装到其调整架上。反射部分的安装需要避免因没有正确固定而导致的表面变形，组装后的反射部分如图 5.14 所示。这样，便完成了整个超短焦投影系统的搭建。

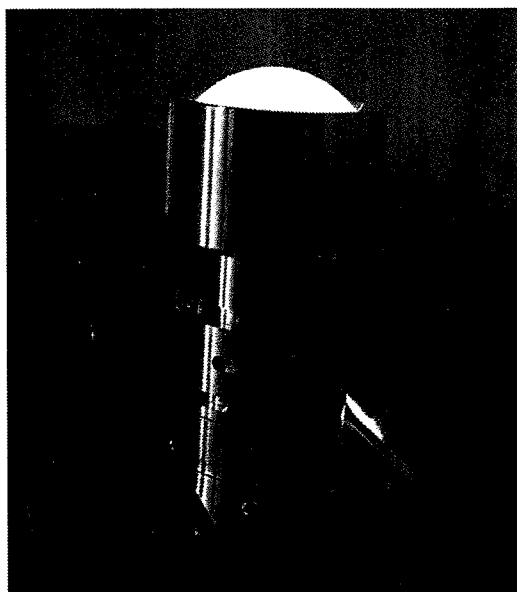


图 5.13 组装后的折射透镜组

Figure 5.13 Refractive lens group after assembly

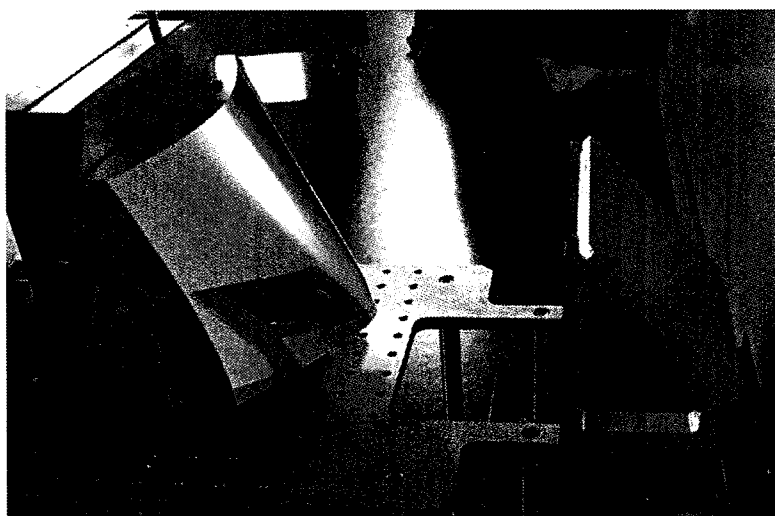


图 5.14 组装后的反射部分

Figure 5.14 Reflective part after assembly

整机联调过程中，对于折射部分，XY 方向的像质补偿调节量通过螺栓孔间隙实现，Z 方向的补偿通过凸轮结构调节。平面反射镜通过三点硅胶垫片实现 XY 两个方向的倾斜调节，自由曲面反射镜通过干涉仪标准镜调整架实现 XYZ 三个方向位移调节，用以补偿光学设计要求的间隔和偏心公差。调整过程中，通过标准网格图的投影效果对装调过程进行直观反馈。如图 5.15 所示是本文中装调完成后的超短焦投影系统的原理样机实物图。

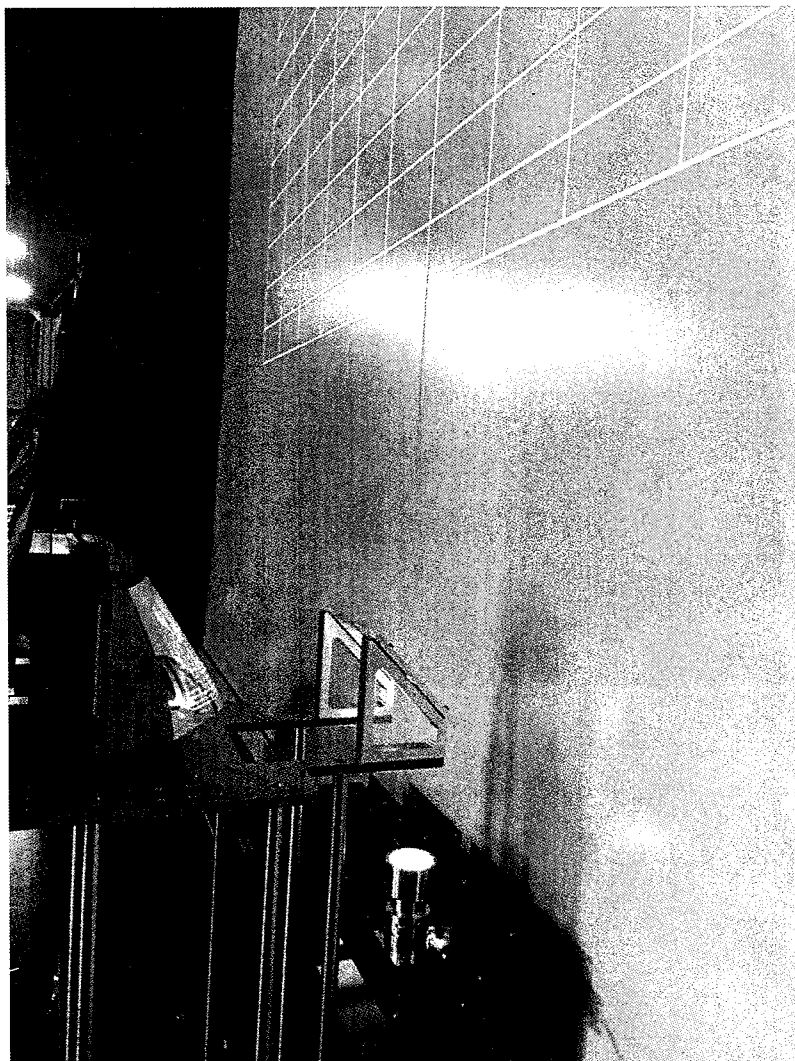


图 5.15 原理样机实物图

Figure 5.15 Principle prototype physical diagram of the projection system

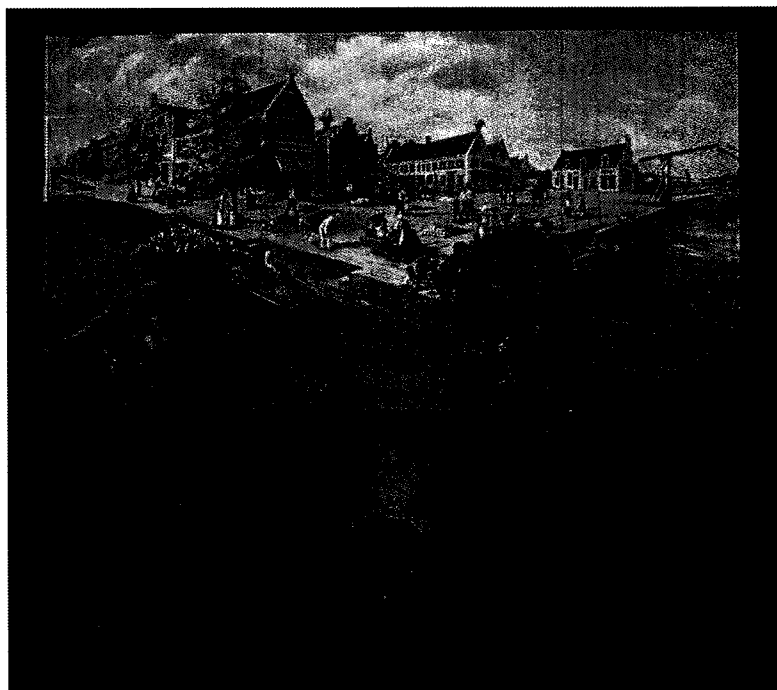
5.5 系统性能测试与分析

5.5.1 系统性能测试

原理样机的装调完成后，需对其性能进行测试。本文中的超短焦投影系统采用了 DLP 投影技术，激光光源发出的光经过照明系统后照射在 DMD 空间光调制器上，经过其数字光调制产生像源，再经过超短焦投影物镜进行放大并投影在屏幕上，如图 5.16 所示为原理样机投影图。



(a) 侧面投影效果图



(b) 正面投影效果图

图 5.16 超短焦投影系统原理样机投影图

Figure 5.16 Projection image of the prototype of ultra-short focus projection system

5.5.2 系统性能分析

5.5.2.1 畸变测试

在对超短焦投影系统的样机进行性能测试时，通常用 TV 畸变评价系统画面的变形，如图 5.17 所示，TV 畸变通常用水平方向和垂直方向的 TV 畸变来表示。

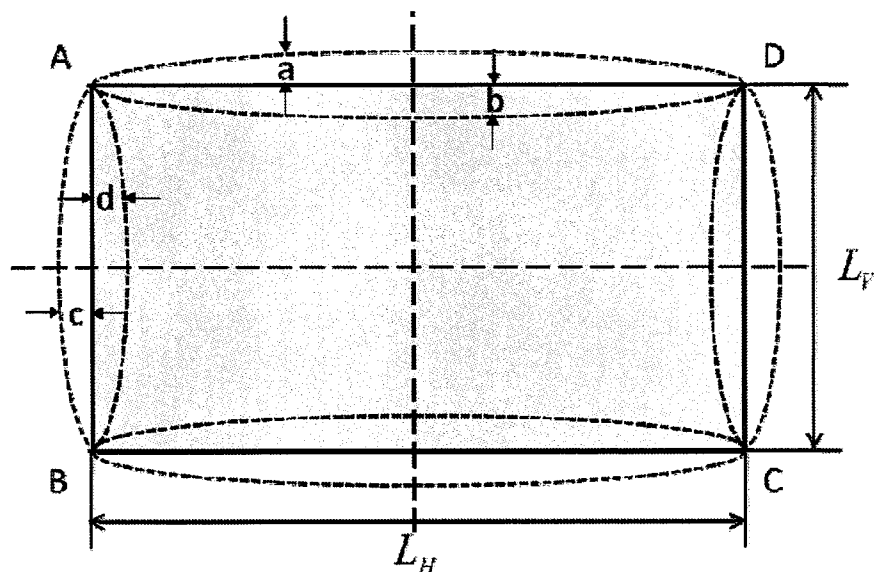


图 5.17 畸变性能测试图

Figure 5.17 Distortion performance test diagram

TV 畸变计算公式如下式所示：

$$\begin{cases} \text{TV Dist_H} = \frac{c}{L_H} \times 100\% \\ \text{TV Dist_V} = \frac{a}{L_V} \times 100\% \end{cases} \quad (5.1)$$

$$\begin{cases} \text{TV Dist_H} = \frac{d}{L_H} \times 100\% \\ \text{TV Dist_V} = \frac{b}{L_V} \times 100\% \end{cases} \quad (5.2)$$

其中公式(5.1)用于计算桶形畸变，公式(5.2)用于计算枕形畸变，其中 TV Dist_H 和 TV Dist_V 分别表示水平 TV 畸变和垂直 TV 畸变， a, b, c, d 分别表示包含畸变的像相对于四角像点构成的矩形像外边侧和内边侧的最大偏离值。 L_H 表示投影图像水平方向上的边缘宽度（等于上、下两边的平均值）， L_V 表示投影图像垂直方向上的边缘宽度（等于左、右两边的平均值）。

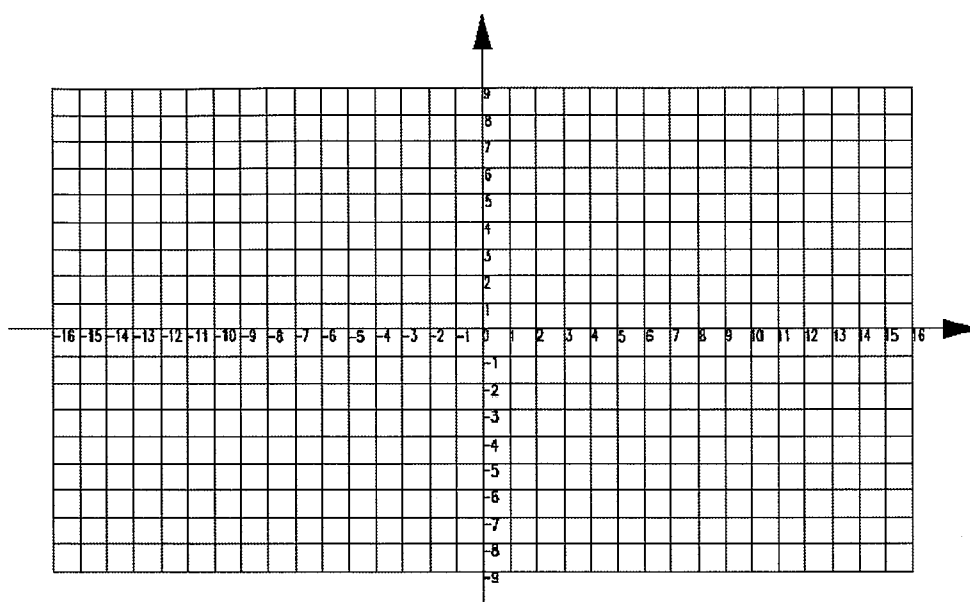


图 5.18 十字格坐标图

Figure 5.18 Cross lattice coordinate chart

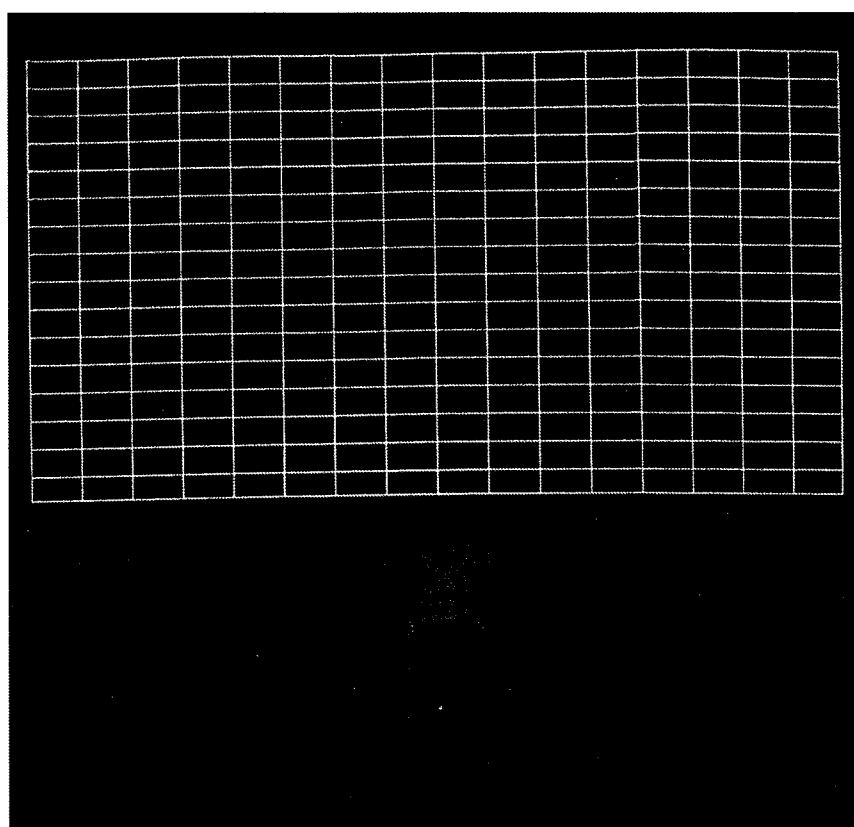


图 5.19 原理样机畸变测试图

Figure 5.19 Distortion testing image of the prototype

具体的测试过程如下：

- (1) 如图 5.18 所示，将带刻度的十字网格图放在屏幕上，使坐标轴的中心与图像中心重合，然后记录位于画面四个顶点处的坐标，计算出画面的水平和垂直宽度；
- (2) 以 2cm 的间隔分别读取图像上下左右四个边缘上的坐标值；
- (3) 用第 2 步中的坐标减去第 1 步中计算的画面水平宽度和垂直宽度的一半，选择绝对偏离量最大的值代入 (5.1) 和 (5.2)，便可计算得到水平和垂直 TV 畸变。

原理样机测试畸变的现场测试结果如图 5.19 所示，由图可见，投影画面顶端有轻微波浪形变形，这主要是由于本文直接将墙面作为投影屏幕，而墙面的平整度欠佳造成的，而且由于屏幕尺寸较大，所以画面也会受到相机拍照角度的影响而产生轻微变形。如表 5.4 所示为畸变的实际测量结果，由表可知，投影图像的水平 TV 畸变值是 0.55%，垂直 TV 畸变为 0.74%，该实测值略大于设计值，原因可能是样机装调过程中引入的误差导致的，但是该样机的畸变性能可满足使用要求。

表 5.4 畸变测量数据表 (mm)

Table 5.4 Distortion measurement data

顶点坐标 (x,y)	最大偏离位置坐标 (x,y)	参数	参数值
A (-1440, 811)	(-1448, 14)	水平宽度	2878
B (-1439, -810)	(-1446, -6)	垂直高度	1619
C (1438, -812)	(12, -814)	水平 TV 畸变	0.55%
D (1439, 808)	(8, -816)	垂直 TV 畸变	0.74%

5.5.2.2 对比度测试

对于超短焦投影物镜来说，投影画面的亮度对比度会明显影响视觉观看效果，因而我们对投影图像的对比度进行了测试。如图 5.20 所示为原理样机投影的黑白格图像，其对比度测量结果优于 1000:1，由图像也可以直观地看出系统的对比度性能良好，可满足观看需求。

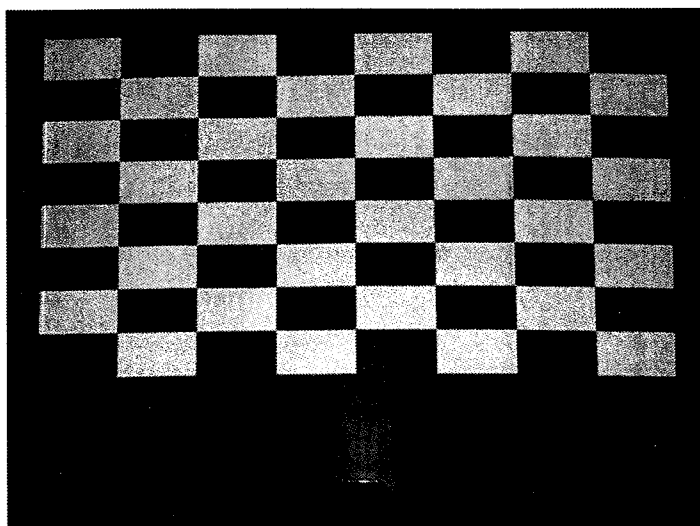


图 5.20 黑白格投影图像

Figure 5.20 Black and White Lattice Projection Image

5.5.2.3 照度均匀性测试

照度是评价大视场投影系统的投影效果的一个重要指标。通常，投影系统的屏幕照度是采用九宫格中心测量的方法进行标定。对大视场系统来说，由于其边缘视场的照度通常低于中心视场的照度，所以在对边缘视场的照度进行测量时，需要增加测量采样点。美国国家标准局通过十三点测量的方式进行了照度均匀性测量，这种方法主要是基于九宫格测量方法，即将图像分割为等面积的九宫格，然后在整个矩形视场的四个边缘各增加一个测量点，其分别近似位于中心点与屏幕顶点之间距离的十分之一的位置，如图 5.21 所示。

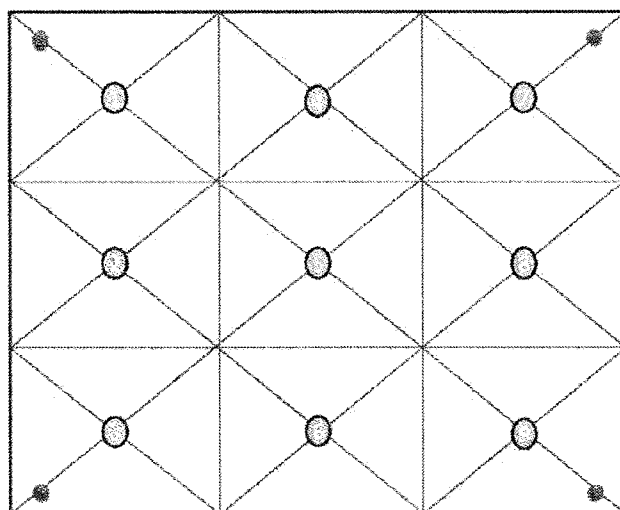


图 5.21 照度测量方法的示意图

Figure 5.21 Schematic diagram of illumination measurement method for projection system

然后，采用照度计对 13 个不同位置的测量点的照度进行测量，再采用这些照度值数据，按照如下公式便可计算投影屏幕的照度均匀性。

$$U_{+} = \left(1 - \frac{E_{\max} - \bar{E}}{\bar{E}} \right) \times 100\% \quad (5.3)$$

$$U_{-} = \left(1 - \frac{E_{\min} - \bar{E}}{\bar{E}} \right) \times 100\% \quad (5.4)$$

式中， U_{+} 和 U_{-} 分别代表正、负照度均匀性， $E_{\max}$ 、 $E_{\min}$ 为各测量点的最大、最小照度值， $\bar{E}$ 为各测量点照度的平均值。若计算的 U_{+} 和 U_{-} 的绝对值都大于 90%，则像面的照度均匀性便能够满足要求。当照度均匀性不符合要求时，可以通过镀膜或者采用像差渐晕来进行改进。

在黑暗环境下，使用照度计对本文中搭建的原理样机的照度进行了测量，在投影屏幕上共选取了十三个测试点，这十三点分别是位于整个屏幕上等间隔的九宫格区域的九点和屏幕四角的四个点，测量结果如表 5.5 所示。

表 5.5 照度不均匀性的测量结果

Table 5.5 Testing results of illumination inhomogeneity for ultra-short-focal projection system

测试区域		照度值 (lx)		
中心	42	42.94	42.1	
中心	41	43.64	42.6	
中心	41.6	45.5	42.92	
边缘	40.5	40.8	40.6	40.4

由表中数据可以看出，整个投影画面的照度均匀性基本良好，只是最小视场附近区域的亮度相对于其他区域稍高，虽然在光学设计时已尽力平衡整个视场内的照度均匀性，然而，这在大视场的投影系统中是难以避免的。通过公式 (5.3) 和公式 (5.4) 可以计算得到正、负照度均匀性分别为+91.8%和-96.1%，由此可知，照度均匀性满足设计和使用要求。

5.6 本章小结

本章主要对设计的超短焦投影物镜系统进行了系统验证。首先根据光学系统设计的结果和要求,利用UG软件对物镜各个组件进行了光机结构设计,为原理样机的装调提供了合理的结构方案。然后对自由曲面反射镜加工与检测的方法和结果进行了讨论与分析。接着将光学引擎、超短焦投影物镜和屏幕三者整体进行了装调,搭建了一台投射比非常低的超短焦投影显示系统原理样机,测试结果表明,本文中样机的投影画面具有良好的像质,对比度较高,且肉眼无法观察到明显畸变。采用合理的方案对搭建的原理样机的主要技术指标进行了性能测试,给出了结果并对其进行了讨论与分析。首先,对原理样机输出的投影画面的TV畸变进行了测试,结果表明投影画面的畸变达到设计要求。然后对屏幕上的亮度对比度和照度均匀性进行了测试,结果表明这两项参数均满足系统的指标要求。

第6章 总结与展望

6.1 论文工作总结

针对超短焦投影物镜系统的关键技术, 本论文主要完成了适用于超短焦投影物镜系统中的自由曲面设计方法的提出, 投影物镜系统的光学设计理论基础的析, 包括物镜结构的光学理论、超短焦投影物镜光学结构类型的对比和方案选取、系统主要参数指标的分析与确定, 超短焦投影物镜的光学设计以及各光学元件的公差分析及其与传统折射型投影物镜设计结果的比较, 超短焦投影系统原理样机的搭建以及性能测试与分析等工作。

本文的主要工作如下:

1. 根据投影显示技术的发展概述以及超短焦投影物镜和物镜中光学元件面型的发展趋势及其国内外研究现状, 提出了在超短焦投影物镜光学系统设计中引入自由曲面的设计方案, 用以在超短的投影距离处实现大屏幕的投影画面, 推动超短焦投影物镜向更低投射比的方向发展。

2. 对不同投影物镜光学结构的高斯光学理论以及反远距型投影物镜结构的特点进行了讨论, 对反远距型投影物镜的关键参数之间的相互关系进行了分析与讨论。然后分别对折射型、反射型和折反型投影物镜在原理、像差校正和成本等方面的优缺点进行了分析与比较, 并确定本论文中超短焦投影物镜的设计采用折反型光路结构。并对超短焦投影系统中的投射比、视场角、F 数、光亮度、照度均匀性以及畸变、MTF 等设计指标进行了分析。

3. 对自由曲面的常用设计方法进行了阐述, 重点分析与讨论了偏微分方程方法、同时多曲面设计方法、直接构建方法和构建-迭代方法的原理及优缺点, 并在构建-迭代方法的基础上进行改进, 提出了直接迭代优化的设计方法和多视场加权优化迭代的设计方法, 从理论上阐述了实现成像系统中自由曲面形状计算的依据, 给出了具体的设计步骤, 并分别通过设计实例验证了两种方法的有效性。

4. 设计了一款低投射比的基于自由曲面的折反式超短焦物镜, 通过光学设计软件对整个超短焦投影物镜光学系统进行了仿真与分析, 该投影物镜的焦距为 1.95mm, 光学总长为 439mm, 最大畸变值为 0.07%, 仿真结果表明设计的超短焦投影物镜满足设计指标要求。然后将该投影物镜与传统的折射型投影物镜的设

计结果进行了分析比较,验证了提出的超短焦投影物镜系统性能的优良性。最后对该光学系统进行了公差分析,用以指导光学元件的加工和装调。

5. 根据超短焦投影物镜系统的光学设计与公差分析结果,对整个超短焦投影系统中各组成部分进行了结构设计。对所设计的自由曲面反射镜进行了光学加工,并给出了加工面形的检测结果。然后结合光学引擎、超短焦投影物镜和屏幕,搭建了一台超短焦投影系统原理样机,可在 320mm 的投影距离处投影出 130inch 尺寸的投影画面,投射比低至 0.11。最后,采用对原理样机的性能进行了测试与分析,包括畸变、亮度和照度均匀性等主要指标,性能测试结果与设计结果相互符合,达到了设计指标要求,为超短焦投影系统后续的产业化发展打下了基础。

6.2 创新之处

1. 在构建-迭代方法的基础上进行改进,提出了直接迭代优化的自由曲面设计方法,可以提高计算单视场系统中的自由曲面面形的收敛速度,在计算数据点法线时不受相邻点的影响,因而每一条光线都可以直接根据其对应的理想物像关系得到更准确的数据点和法线,且提高了自由曲面的收敛速度。在此基础上,提出了多视场加权优化迭代的自由曲面设计方法,通过对不同视场的法线偏差设置权重可以平衡多个视场的成像质量,且对采样视场的数量进行了控制,可在满足成像质量要求的前提下采样尽可能少的视场数量,这样可以解决由于采样过多而导致的效率降低的问题。

2. 基于自由曲面反射镜,提出了一种超低投射比的超短焦投影物镜光学结构,与传统的折射型投影物镜相比,这种超短焦投影系统的投射比更低、可大幅简化折射部分的透镜结构,系统结构更加紧凑,而且能够在更短的投影距离内实现更大屏幕的投影,并切实提高了投影系统的整体性能。

3. 完成了具有超低投射比的基于自由曲面的超短焦投影系统原理样机的搭建,并对该系统的性能进行了测试,验证了包含自由曲面的超短焦镜头的实际性能,为未来基于自由曲面的超短焦投影物镜的批量化生产和市场化普及奠定了良好的基础。

6.3 工作展望

针对超短焦投影系统,对自由曲面优化算法、超短焦投影物镜的光学设计及

畸变校正以及原理样机的搭建等关键技术进行了研究。本论文的研究工作是在实验室现有的技术条件下完成的,取得了一定的研究成果,但是在以下方面仍然可以展开更加深入的研究。

1. 自由曲面的优化设计方法仍需要进一步改进,进一步提升其自动化和智能化,进一步降低自由曲面反射镜的加工难度,进而降低整个光学系统在加工和装调方面的难度。

2. 超短焦投影物镜的光学设计需要进一步改进,从而进一步降低投射比和系统制造成本。

3. 在实现原理样机小型化方面需要进一步研究,使其最终可实现批量化生产,从而得到大范围的推广和应用。