

STUDY ON DESIGN METHODS OF FREE-FORM IMAGING SYSTEMS AND
THEIR APPLICATION IN HEAD-MOUNTED DISPLAYS

自由曲面光学系统设计方法及其 在头盔显示技术中的应用研究

程德文 王涌天 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

北京理工大学优秀博士学位论文出版项目基金资助

STUDY ON DESIGN METHODS OF
FREE-FORM IMAGING SYSTEMS AND THEIR APPLICATION
IN HEAD-MOUNTED DISPLAYS

自由曲面光学系统设计方法及其
在头盔显示技术中的应用研究

ISBN 978-7-5763-2314-6



9 787576 323146 >

定价：88.00元

STUDY ON DESIGN METHODS OF FREE-FORM IMAGING SYSTEMS AND
THEIR APPLICATION IN HEAD-MOUNTED DISPLAYS

自由曲面光学系统设计方法及其 在头盔显示技术中的应用研究

程德文 王涌天 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书主要介绍自由曲面成像光学系统的设计方法以及在头盔显示技术中的应用。本书主要内容包括：自由曲面数理描述方法；自由曲面成像系统逐步逼近优化算法；通用型 Wassermann-Wolf 偏微分方程系统初始结构的求解方法；像面整体成像质量的自动平衡算法；自由曲面楔形棱镜式头盔显示器目视光学系统的设计和优化；自由曲面拼接式大视场、高分辨率头盔显示方法；自由曲面双焦面真实立体感头盔显示方案和相关设计。本书可作为高等院校相关专业高年级本科生以及研究生学习光学成像系统设计的教材或参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

自由曲面光学系统设计方法及其在头盔显示技术中的应用研究 / 程德文, 王涌天著. -- 北京: 北京理工大学出版社, 2023. 4

ISBN 978 - 7 - 5763 - 2314 - 6

I. ①自… II. ①程… ②王… III. ①曲面—光学系统—设计—应用—防护头盔—显示—研究 IV. ①TB811

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 072954 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 14

字 数 / 189 千字

版 次 / 2023 年 4 月第 1 版 2023 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 88.00 元

责任编辑 / 刘 派

文案编辑 / 李丁一

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

作者简介

程德文，男，北京理工大学博士，教授，博导。教育部新世纪优秀人才，国家万人计划青年拔尖人才，国家优秀青年科学



基金获得者。国内最早从事自由曲面光学系统设计、虚拟现实（VR）和增强现实（AR）头戴显示技术的研究，对VR和AR头戴显示技术中的关键科学问题进行了深入探讨，大幅提高AR显示系统的显示效果和整体性能指标。申请专利100余项，包括美国和欧洲授权发明专利10余项，部分专利成功转化并得到国外知名企业多年付费使用。发表100余篇高水平学术论文，多次应邀参加国际会议特邀报告。承担国家重点研发计划、国家自然科学基金、国家973和863子课题等项目10余项。



投稿邮箱: xueshu@bitpress.com.cn

咨询电话: (010) 68911947 68911085

作者简介

王涌天, 北京理工大学杰出教授, 长江学者、国家杰青, 北京市混合现实与新型显示工程技术研究中心主任。兼任科技部



有关国家重点研发专项总体专家组成员, 全国信息技术标准化技术委员会委员, 中国图象图形学学会副理事长, 中国光学工程学会常务理事, 中国计算机学会理事, 中国光学学会监事。长期在技术光学、虚拟现实和增强现实领域从事教学和科研工作, 发表专著4部、SCI论文320余篇, 授权国内外发明专利200余项, 主持制定虚拟现实和增强现实领域首批国家标准6项。有关成果得到广泛应用, 获得国家技术发明奖和国家科技进步奖各1项, 省部级和国家一级学会科技奖励10余项。

策划编辑: 李丁一

执行编辑: 李丁一

封面设计: 北京方张博设计



前 言

几何光学是一门历史悠久而又迅猛发展的学科，早在公元前 400 多年，中国的《墨经》中就观察和解释了小孔成像问题；现代，照相机、显微镜、望远镜、投影仪等光学设备被人们广为熟知，几何光学已经广泛在科学探索、提高人类生活水平中发挥重要作用。

光学成像设备通常关注的核心指标有小像差、高传函和高透过率。传统光学镜头通常采用平面或球面光学元件，因为这些光学元件的加工工艺成熟、生产方式相对简单、成本较低，并且通过多个元件的组合可以矫正不同的像差。然而随着光学系统技术参数和传感器性能的迅速提升，单纯依靠传统光学表面进行像差矫正的挑战很大，即使增加光学元件的数量，成像质量也难以提升，甚至无法满足使用要求；另外，会出现降低系统透过率、增加系统装调难度、增大系统体积重量和成本等一系列问题。因此，非球面等面形更为复杂、自由度更多的光学表面应运而生。

光学自由曲面也是一种光学曲面描述方式。光学自由曲面是表面形状自由度非常高的光学面形，相较于传统的平面、球面具有更多的数理描述自由度和灵活性。它不仅可以更有效地矫正系统像差、改善成像质量、增大系统的视场和工作距离等技术指标、减少光学元件数量进而提升系统透过率，同时还能够简化光学系统结构、减小系统的

体积和重量。

单就光学元件而言，其进步主要包括材料科学的进步，如渐变折射率材料、折射率和阿贝数的提高，提高了元件材料选型的自由度；光学表面加工工艺的进步，如面形描述能力的提升、自由度的增加，从非球面到自由曲面，从光学平面到衍射表面再到微纳表面（折反射到衍射再到光场调控）。做好光学“表面文章”，势必大幅促进光电科学仪器设备的发展。

国内外已有不少光学系统设计的著名著作，在阐述光学系统像差理论、像质评价方法、典型光学结构和材料时，引入具体的光学设计软件，讲解光学设计方法。然而针对自由曲面离轴成像光学系统设计的相关著作尚不多见。本书将详细地讲述自由曲面光学系统的数理描述、拟合及设计方法，结合经典的自由曲面棱镜光路结构和头戴显示系统等实例向读者介绍光学自由曲面的设计方法。

我们编写此书的目的，旨在探索一种能够培养光学设计人才的新型教学途径，满足我国制造业对光学设计人才的需求。本书的内容体系是将光学设计软件为工具融入理论学习与光学设计实践等多环节中，对有关的光学设计理论，着重阐述如何应用，摒弃一些著作或教材使用的复杂数学推导，只保留前人在像差理论、光学设计结构选型等方面的实用结论，用浅显易懂的语言讲述对复杂光学结构的优化方法，介绍基于自由曲面的光学设计与工程应用等方面的基础知识。

本书内容分为7章。

第1章绪论，首先介绍光学自由曲面的定义、应用实例及作用、意义，然后分析自由曲面成像系统描述方法、像差评价和优化方法的研究现状，综述自由曲面在头盔显示技术中的应用。

第2章详细介绍光学自由曲面的数学描述方法，同时介绍了自由曲面的形态演变，包括最佳拟合球面和复曲面基底面的拟合方法、曲

面重构的最小二乘法、奇异值分解方法和最优化求解方法；此外，还介绍了一种能够提高设计效率、简化光学设计流程、改进转换精度的自由曲面数学描述方法。

第3章介绍了自由曲面成像系统设计的逐步逼近优化算法，利用球面搭建光学系统的初始结构，使其满足基本的结构和初阶光学特性要求，在此基础上逐步升级曲面的面形描述方式，并结合更为严格的优化控制条件进行设计，最终得到满足要求的设计结果。

第4章介绍 G. Wassermann 和 E. Wolf 两位著名科学家提出的 W - W 偏微分方程设计方法，针对目前 W - W 方法不够通用的问题，进一步提出了通用型 W - W 偏微分方程组，使其适用于离轴非对称光学系统的设计。通过通用型 W - W 方法求解自由曲面成像系统的初始结构，并在此基础上进一步优化出满足要求的系统。

第5章介绍自由曲面成像系统的像面像质自动平衡，旨在全面提升自由曲面光学系统设计中后期的优化效率和效果，确保设计结果达到最优化，缩短产品的研发周期。

第6章介绍自由曲面成像系统的优化边界条件和头盔目视光学系统的优化设计，并以自由曲面楔形棱镜式头盔目视光学系统为例，给出了对其优化时特殊边界条件的设计思路和控制方法；介绍了大视场、大相对孔径、光学透视式头盔显示器的设计和研制结果。

第7章是自由曲面高性能头盔显示系统的研究，介绍了作者团队对两个方面进行的研究：①大视场、高分辨率头盔显示方案；②多焦面和变焦面头盔显示方案。在深入分析已有方案中存在问题的基础上，充分发挥自由曲面光学的优越性，创造性地提出了一种新型大视场、高分辨率拼接式头盔显示器和一种双焦面真实立体感头盔显示器，研究了相应的设计方法，成功地设计了上述头盔显示器所需的自由曲面目视光学系统。基于已经完成加工的自由曲面楔形棱镜，研制

了自由曲面拼接式头盔显示器原理样机。

本书是作者在多年从事光学设计研究工作的基础上产生的成果，并编成了教材。作者希望在此基础上，能有更多的光学设计爱好者产生从事光学设计方法研究的浓厚兴趣，使光学设计由少数人掌握的“艺术”变成易于掌握的实用化技术。

本书获北京理工大学优秀博士学位论文出版项目基金资助，在此表示感谢。

作者水平有限，书中不妥之处望读者提出宝贵建议。

作 者

2022 年 9 月于北京



目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 自由曲面成像光学系统	1
1.1.1 光学自由曲面的定义	2
1.1.2 自由曲面在成像光学系统中的应用实例	3
1.1.2.1 电视、电影投影系统	3
1.1.2.2 渐变焦点眼镜	3
1.1.2.3 照相机物镜	4
1.1.2.4 激光扫描系统	6
1.1.2.5 分色器	7
1.1.2.6 汽车后视镜	7
1.1.2.7 变焦镜头	8
1.1.2.8 消色差单透镜	9
1.1.2.9 空间相机	10
1.1.2.10 超近距投影仪	11
1.1.2.11 自由曲面楔形棱镜目视光学系统	12
1.1.3 光学自由曲面的作用与意义	13
1.1.4 自由曲面成像系统优化设计方法的研究现状	13
1.2 自由曲面头盔显示光学系统	15
1.2.1 离轴中继结构头盔显示技术	17

1.2.2	自由曲面楔形棱镜头盔显示技术	18
第2章	光学自由曲面的数学描述方法研究	20
2.1	光学自由曲面数学描述方法	20
2.1.1	双曲率面	21
2.1.2	复曲面	22
2.1.3	p 阶 XY 多项式曲面	23
2.1.4	复曲面基底 XY 多项式曲面	23
2.1.5	梯形畸变校正曲面	25
2.1.6	福布斯曲面	26
2.1.7	泽尔尼克多项式曲面	27
2.1.8	高斯基函数复合曲面	28
2.1.9	非均匀有理 B 样条曲面	29
2.2	自由曲面像差校正能力与光线追迹速度分析	30
2.2.1	自由曲面对像差的校正能力	30
2.2.2	自由曲面的光线追迹速度	32
2.2.3	自由曲面成像系统优化收敛速度分析	35
2.3	自由曲面的形态学演变	37
2.3.1	曲面重构方法	38
2.3.1.1	拟合曲面的定位匹配方法	38
2.3.1.2	最小二乘法 (LSQ) 和奇异值分解方法 (SVD)	40
2.3.1.3	最优化求解方法	43
2.3.2	最佳拟合球面与复曲面基底面	45
2.3.3	同阶复曲面、 XY 多项式曲面和 $AXYP$ 曲面间的拟合 转换	48
第3章	自由曲面成像系统设计的逐步逼近优化算法	51
3.1	逐步逼近优化算法原理	51
3.2	逐步逼近优化算法实例	52
3.3	逐步逼近优化算法的分阶段优化	53

3.3.1	逐步逼近优化算法初始结构的建立	54
3.3.2	逐步逼近优化过程	57
3.3.2.1	全球面结构	57
3.3.2.2	全非球面结构	59
3.3.2.3	全复曲面结构	62
3.3.2.4	全XY多项式曲面结构	65
3.3.2.5	最终优化设计	74
3.3.3	逐步逼近优化算法最终的优化与分析	80
第4章	通用型W-W偏微分方程设计方法	82
4.1	引言	82
4.2	用于设计单个光学自由曲面的偏微分方程	83
4.3	用于设计两个光学自由曲面的偏微分方程	85
4.4	偏微分方程求解初始结构需要满足的假设条件	88
4.5	仿真与设计实例分析	89
第5章	自由曲面成像系统的像面像质自动平衡	97
5.1	像面整体成像质量的平衡	97
5.2	像面整体成像质量的自动平衡算法原理	98
5.3	像面整体成像质量的自动平衡算法实例	102
5.3.1	含有5个子午面抽样视场的投影式头盔显示系统	103
5.3.2	含有三重结构12个视场的电影变焦镜头	110
5.3.3	含有15个视场的楔形自由曲面棱镜光学系统	116
第6章	自由曲面成像系统的优化边界条件和头盔目视光学系统的 优化设计	125
6.1	头盔显示器结构形式的选取	125
6.2	自由曲面棱镜头盔显示器光学特性参数和初始结构的 确定	130
6.2.1	类似结构专利数据分析	132
6.2.2	优化初始结构的建立	133

6.3	浸没式自由曲面楔形棱镜头盔显示光学系统的优化控制条件	136
6.3.1	特殊物理结构边界条件的约束控制	136
6.3.2	全反射控制条件	139
6.3.3	像差控制条件	141
6.3.4	出瞳距离控制条件	143
6.3.5	自由曲面棱镜前表面的光焦度约束条件	143
6.4	自由曲面楔形棱镜浸没式头盔显示光学系统的设计与加工结果	144
6.4.1	全反射面上的入射角验证	148
6.4.2	与同类结构头盔显示产品光学系统的比较分析	151
6.4.3	与传统旋转对称结构目镜的比较分析	152
6.4.4	自由曲面楔形棱镜浸没式头盔显示器的样机加工与试验测试	154
6.5	自由曲面光学透射式楔形棱镜头盔显示器的设计与原理样机	156
6.5.1	光学透视光路设计方法研究	156
6.5.2	自由曲面光学透射式头盔显示器样机加工结果	161
第7章	自由曲面高性能头盔显示系统的研究	162
7.1	大视场、高分辨率头盔显示方案及其存在的问题	163
7.1.1	注视区域高清化头盔显示技术	165
7.1.2	双目分视头盔显示技术	165
7.1.3	双目交叠头盔显示技术	165
7.1.4	高端微型图像源头盔显示技术	166
7.2	光学拼接式头盔显示方案	167
7.2.1	显示图像的有效放大倍率	168
7.2.2	显示图像的渲染	169
7.2.3	显示通道过渡区域的渐晕问题	171

7.2.4	有效出瞳大小和有效出瞳距离	173
7.2.5	拼接头盔显示器中的其他问题	174
7.3	新型自由曲面拼接式头盔显示器	174
7.3.1	自由曲面拼接式头盔显示原理	175
7.3.2	自由曲面拼接式头盔显示器单通道目视光学 系统设计	175
7.3.2.1	成像光路设计与结果分析	176
7.3.2.2	透视光路设计与结果分析	177
7.3.3	基本拼接方法	180
7.3.4	更大视场角拼接形式	181
7.3.5	自由曲面拼接式头盔显示器样机研制	181
7.4	真实立体感头盔显示技术及其存在的问题	184
7.4.1	时分复用多焦面显示方案	186
7.4.1.1	改变光学元件和微显示器件相对位置显示方案	186
7.4.1.2	液体透镜	187
7.4.1.3	双折射透镜	187
7.4.1.4	变形镜	187
7.4.2	光路空间复用多焦面显示方案	187
7.4.2.1	层叠式显示器	187
7.4.2.2	分光路方式	188
7.5	新型可穿戴式双焦面真实立体感头盔显示器	188
参考文献		196
作者程德文获奖情况		210

第 1 章

绪 论

自由曲面具有非对称面形，能够提供众多的设计自由度和灵活的空间布局。自由曲面在成像光学系统中应用时，不仅可以大幅提高系统性能、改善成像质量，还能有效减小系统的体积和重量，从而满足现代光电成像系统的发展需求。头盔显示器目视光学系统是典型的大视场、大相对孔径成像系统，对系统的体积、重量有严格的要求，是自由曲面光学应用的一个良好范例。本章首先介绍光学自由曲面的定义、应用实例及其作用与意义，然后分析自由曲面成像系统描述方法、像差评价和优化方法的研究现状，综述自由曲面在头盔显示技术中的应用，最后介绍本书的研究内容和章节结构。

1.1 自由曲面成像光学系统

随着国防和民用光电技术的不断发展，自由曲面光学元件对现代成像系统的性能、像质、体积和重量等多方面都提出了更高的要求，不仅要求高品质的光学特性参数和优良的像质，还需满足小型化、轻量化等物理结构要求。在航天航空等领域，为了实现特殊的结构需求以及避免光路遮拦，光学系统往往需要采用离轴和反射相结合的方式折叠系统光路，这不可避免地产生了非对称和高阶像差，仅使用传统的球面、对称非球面元件将难以校正这些非对称像差，甚至无法实现



基本的成像要求。自由曲面光学元件具有非对称面形，能充分满足现代光电成像系统的发展要求，因此相关研究成为近年来国际光学工程领域的一个重要发展方向。

光学自由曲面随着光学加工、检测能力的提高应运而生并逐渐得到应用。从20世纪90年代起，自由曲面开始在非成像光学领域，例如在照明光学系统中得到成功的应用，主要体现在车灯设计、LED照明、光束整形等方面，通常作为反射器件的面形，按照度分布要求反射光能^[1]。与成像系统相比，照明系统对元件表面形状的加工误差要求相对宽松，这是光学自由曲面首先在照明系统中得到大规模应用的主要原因。

在很长一段时间内，光学自由曲面在成像系统中的应用受到了加工、检测水平的限制。近年来，美国、德国、日本等国在光学非球面和自由曲面相关技术上投入大量资金和研究力量，取得了长足的进步。随着多轴单点金刚石车床和树脂、玻璃模压技术的逐步成熟^[2]，以及多轴数控玻璃磨削和抛光技术的迅速发展^[2,3]，采用树脂或模压玻璃材料的自由曲面光学元件的大批量加工已经成为可能，甚至实现了光机一体化加工，大幅降低了系统的装调难度。目前采用光学自由曲面的成像系统产品包括激光打印机、扫描仪、大屏幕投影电视、近距投影仪、渐变焦距眼镜、无死角汽车后视镜、全景相机、超薄相机、鼠标光学镜头、轻便型视频眼镜等^[1,4]。这些产品的市场需求十分巨大，并且在迅速增长^[5]。

1.1.1 光学自由曲面的定义

广义地说，光学自由曲面是以下几种曲面的总称^[1,6-8]。

(1) 没有旋转对称轴的复杂非常规连续曲面，包括双曲率面、复曲面 (Anamorphic Aspherical Surface, AAS)、XY 多项式曲面、泽尔尼克多项式曲面等。