

文章编号: 2095-2163(2021)06-0092-04

中图分类号: TN253

文献标志码: A

# 自由曲面反射式投影成像系统的设计

宗 卉, 杨 波, 顾鹏翔

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 为了使投影设备具有超短投影距离,同时具有大尺寸高清显示画面,本文设计了一款采用自由曲面全反射式成像光路小投射比的超短焦距投影物镜。系统使用 16.5 mm(0.65 in) DMD 微透镜显示芯片,采用远心光路提高像面照度均匀性;利用光学设计软件 CodeV 进行镜片设计与优化,最终得到由 4 片非球面反射面构成的投影物镜。物镜投射比为 0.25、焦距为 2 mm、光学总长 34 mm、投影距离 1 m-4 m,画面尺寸为 4 m-16 m(157-630 in);各视场 MTF 值在单个像素对应的奈奎斯特频率处均达到 0.25 以上,水平、垂直 TV 畸变均小于 2%,各项指标满足系统设计的要求,镜片数少,结构简单。

**关键词:** 光学设计;超短焦投影;全反射式;自由曲面

## Design of freeform surface reflective projection imaging system

ZONG Hui, YANG Bo, GU Pengxiang

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**【Abstract】** In order to make the projection device have ultra-short projection distance and large size hd display screen at the same time, an ultra-short focal length projection objective lens with a small projection ratio using free-form surface total reflection imaging optical path is designed. The system includes a 16.5(0.65 in) digital micromirror device, the telecentric path is used to improve the uniformity of illumination on the image surface. The optical design software Code V was used for lens design and optimization. Finally, a projection objective lens composed of four aspheric reflectors is obtained. Objective projection ratio is 0.25, focal length is 2 mm, optical length is 34 mm, projection distance is 1 m-4 m, screen size is 4 m-16 m(157-630 in); The MTF value of the field of view reached more than 0.25 at the Nyquist frequency corresponding to a single pixel, Horizontal and vertical TV distortion are less than 2%, Each index satisfies the system design request, the lens piece number is few, the structure is simple.

**【Key words】** Optical design; Ultra-short focal length projection; Total reflection type; Free-form surface

## 0 引言

图像显示作为人类接触信息的窗口,是人类获取信息的直接形式之一,也是社会沟通与交流的基本渠道<sup>[1]</sup>。投影仪的原型是利用光和影,将图像显示在屏幕上的幻灯机<sup>[2]</sup>。随着投影技术的快速发展,人们可以脱离电子屏幕的装载限制,在很多场合都可以便捷地进行投影成像,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,尤其在家庭、教育、商用等对空间限制较大的领域中,节约空间等同于节约成本,小面积房间就可以进行会议与影音体验,教室里的多媒体设备也变得更加轻便,使用者也可以免受投影过程中的光照影响。目前,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<sup>[3]</sup>。因此,研究者们纷纷提出了超短焦距投影显示系统的各类方案。最初实现超短焦投影镜头的设计方式为多镜片折射式设计,而近几年随着自由曲面的发展,使用折反式离轴设计的超短焦投影开始增多。如:使用全玻璃球面折射透镜的折反式超短焦变焦投影系统(包含 16 片球面折射透镜和一片非球面反射镜);整个系统采用 15 个透射镜片和一个非球面反射镜片,其中反射镜采用凹面反射镜进行视场扩大的结构<sup>[4-5]</sup>等。这种折反式系统的共同特点是采用多片折射透镜和一片反射镜,镜片数量多,加工精度要求高。而离轴全反射式镜头具有无色差、重量轻、热稳定性好和大口径等优点,有效规避同轴部分的中心遮拦,提高了能量利用率<sup>[6-7]</sup>。

离轴系统中的光学元件存在偏心与倾斜,非对称的结构会产生非常规像差,普通球面镜片难以在

**基金项目:** 国家重点研发工程(2016YFB0402000)。

**作者简介:** 宗 卉(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:光学设计;杨 波(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向:图像处理、光学设计与计算光学。

**通讯作者:** 杨 波 Email:504534891@qq.com

**收稿日期:** 2021-02-21

一定数量内加以校正,而自由曲面的使用则可以较好地校正这些像差。近年来,光学元件的精密加工、检测技术不断进步,自由曲面相关的设计理论不断发展,自由曲面的使用也越来越广泛。较早出现的采用四片离轴反射非球面镜片的超短焦投影机,做到了投射比 0.32<sup>[1]</sup>。本设计采用全反射离轴结构,仅使用四片自由曲面镜片,全部采用反射镜片的形式,没有色差,结构简单。

## 1 设计原理

按照光轴位置,成像系统分为共轴成像和离轴成像两种;按照光路转折方式,可分为折射、反射、折反式 3 种。共轴折射成像系统视场范围限制较多,视场角过大至接近 90°的话,近轴的计算公式为:

$$y' = -f' \times \tan\omega. \quad (1)$$

由于视场角的增大会产生严重的畸变和轴外像差,尤其是垂轴色差<sup>[4]</sup>。且视场角  $\omega$  越大,照度不均匀问题越严重,像差也因视场角的增大而变得不理想,因此式(1)已不再适用。设计过程中为了减小像差、提高照明质量,镜片数量随之增加,系统结构随之更复杂,加工与装配难度随之增大,成本也随之增加;常用反射式光学系统主要包括两反系统、三反系统和四反系统等<sup>[8]</sup>。同轴四反光学系统最大缺陷就是无法避免的中心遮拦,系统能量的减少会严重影响成像质量<sup>[9]</sup>。因此,传统的共轴折射结构不适用于大视场超短焦投影系统。

自由曲面由于其优秀的面型描述能力和像差优化能力,设计自由度远大于传统光学元件,从而在相同指标要求下,能够减少光学元件数量、减轻光学系统质量与体积。非成像系统,如照明系统中可直接使用离散数据点进行面形描述;但成像系统中,为了保证成像质量与光线追迹的速度与精度,通常采用具体数学表达式进行面形描述,大多是在基底球面或基底二次曲面的基础上,叠加非旋转对称项得到,基底球面可表示为:

$$z(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - c^2(x^2 + y^2)}}, \quad (2)$$

基底二次曲面可表示为:

$$z(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2(x^2 + y^2)}}. \quad (3)$$

其中,  $c$  为非球面顶点处的曲率,  $k$  是二次曲面的圆锥系数。自由曲面可分为常规面型、具有正交性质的面型、局部面型可控 3 种面型。具有正交性质的 Zernike 多项式像差校正能力强,可以依据矢量

像差理论对应关系,有针对性地对系统像差进行校正,因此应用较广。面形描述通常是在二次曲面基底上添加极坐标形式:

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_{j=1}^p C_j Z_j. \quad (4)$$

应用最多的是高次小变形自由曲面,是在基底二次曲面上发生微小变形得到的。根据基底二次曲面后的多项式不同,可分为奇次和偶次多项式。基底二次曲面后加上偶次项则是偶次多项式自由曲面,同理奇次多项式自由曲面在式(3)后面加上奇次项,则可由公式(5)进行描述:

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2(x^2 + y^2)^2}} + \beta_1 r^1 + \beta_3 r^3 + \beta_5 r^5 + \dots \quad (5)$$

为了改善成像与照明质量、控制成本与加工难度,本文采用离轴全反射式成像系统设计,离轴结构的设计可以拓宽系统对视场角的限制,尤其适用于大视场角的投影成像系统;自由曲面具有很强的非对称像差能力,优化设计自由度大<sup>[10]</sup>,4片自由曲面反射镜在转折光路的同时可以校正像差,规避色差的产生,且镜片数量少、质量轻、方便加工与装配。

## 2 设计指标

投影镜头的主要功能,是将图像源(微透镜显示芯片)上的图像放大并投影到背景上变成图像显示屏幕。本文选用 DMD 显示芯片。投影镜头的性能指标要求主要体现在像面的放大倍率与成像质量上。超短焦投影镜头在此基础上还要求投射比在 0.6 以下,本设计投射比为 0.25,完全符合超短焦投影要求。各指标数据见表 1。

表 1 系统技术指标表

Tab. 1 System technical indicator table

参数	指标
DMD 芯片尺寸/mm	16.5(1920 × 1080)
放大倍数	150-230
数值孔径	0.2
投影距离/mm	100-400
MTF	>0.25@0.6lp/mm
投射比	0.25
水平 TV 畸变/%	<0.2
垂直 TV 畸变/%	<0.1

## 3 设计方法

本设计突破传统光学成像系统设计理论和方

法,将多片自由曲面引入光学成像系统,采用 4 片自由曲面的离轴全反射设计结构,利用光学设计软件 Code V 完成镜头设计。由于镜头是大视场、小 F 数的非对称结构,难以从 Code V 专利库中找到合适的初始结构,需要自行创建。

首先,将光瞳与一半视场范围内的视场进行光线采样<sup>[10]</sup>,获得光瞳和视场坐标,再联合 Code V 和 MATLAB 进行采样光线和自由曲面交点的理想法向量的求解,在 MATLAB 中调用 Code V 中光线追迹命令;根据费马原理,求解采样光线与反射镜交点的理想法向量。对  $S_i$  和  $S_{ideal}$  之间光程  $S$  求泛导公式如下:

$$\delta S = \delta \int_{P_i}^{P_{ideal-1}} n ds = 0. \quad (6)$$

其中,  $P_i$  是采样光线与代设计曲面  $S_i$  的交点坐标;理想像点  $S_{ideal}$  是采样光线与像点的交点;  $n$  是折射率。根据反射定律得到理想法向量  $N$ :

$$\begin{aligned} \vec{N} &= \frac{r_i' - r_i}{|r_i' - r_i|}, \\ \vec{r}_i &= \frac{P_i - P_{i-1}}{|P_i - P_{i-1}|}, r_i' = \frac{P_{i+1} - P_i}{|P_{i+1} - P_i|}. \end{aligned} \quad (7)$$

再将所有采样光线与理想法向量进行拟合,得到自由曲面面型参数。

在初始结构的基础上,利用 Code V 中用户自定义函数控制与 AUTO 进行优化即可。首先选择可变化的光学参数,将系统中各透镜的基本参数如:曲率半径、厚度、空气间隙的厚度、折射率、阿贝数以及反射镜面型相关的参数设置成变量,通过用户自定义函数控制像面高度和宽度来控制畸变。使用软件中的 AUTO 优化代码优化系统的各种像差,同时更改视场和波长的权重以便优化。设计流程如图 1 所示。

## 4 设计结果

### 4.1 结构参数

超短焦投影镜头包括:

(1)显示芯片:用于调制从投影机照明系统出射的光束,且充当投影镜头的物面;

(2)透镜组:设置于显示芯片的成像光路上,用于保护镜头与光路照明;

(3)振镜:设置于第一透镜组之后,用于调整光路透镜;

(4)Zernike 多项式反射面 1:设置于振镜后,用于反射成像光束;

(5)孔径光阑:设置于 Zernike 多项式反射面 1 之后,用于限制成像光束;

(6)Zernike 多项式反射面 2、Zernike 多项式反射面 3 与奇次多项式反射面,均设置于孔径光阑之后,用于反射成像光束,并使图像成像于屏幕。各组件结构如图 2 所示:(右图为左图的部分放大,以获得更好的可视化效果。)

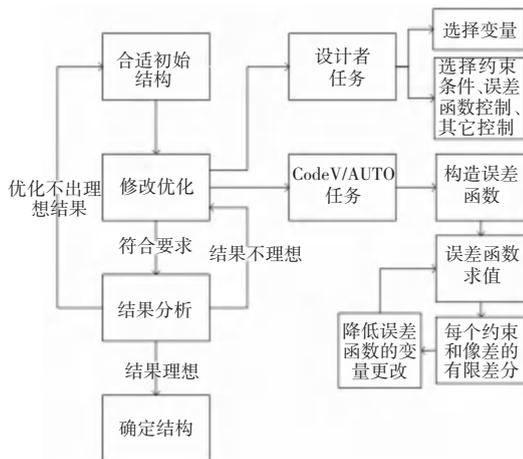


图 1 设计流程图

Fig. 1 Design flow chart



图 2 光学组件结构图

Fig. 2 Optical component structure diagram

此次设计的投影镜头中屏幕尺寸与非球面反射镜到屏幕距离的关系见表 2。

表 2 投射距离表

Tab. 2 Projection distance table

投射屏幕大小/英寸	非球面反射镜到屏幕距离/mm
157	100
394	250
630	400

### 4.2 成像结果

镜头的调制传递函数曲线如图 3 所示。根据 DMD 像元尺寸  $p$  和放大倍数  $M$ ,由奈奎斯特频率计算公式:

$$\nu = \frac{1}{2p\beta}. \quad (8)$$

得出调制传递函数的截止频率为 0.6lp/mm,截止频率处各个视场 MTF 值均大于 0.25,绝大多数均

大于 0.3; 点列图是通过计算, 把物点在像面的对应点呈现出来。弥散斑越小、越集中则成像质量越好。由 DMD 像元尺寸与最大放大倍率得到最大像斑尺寸为 1.73 mm, 弥散斑均较为理想, 如图 4 所示。

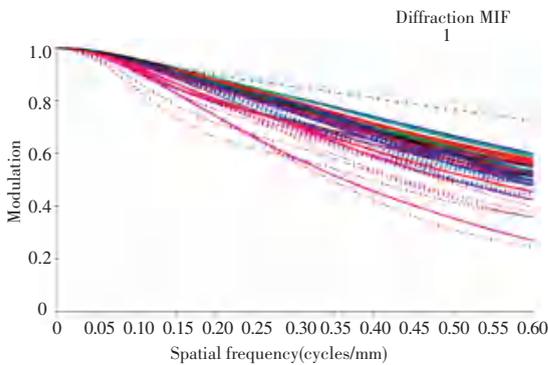


图 3 调制函数曲线图

Fig. 3 Modulation function graph diagram

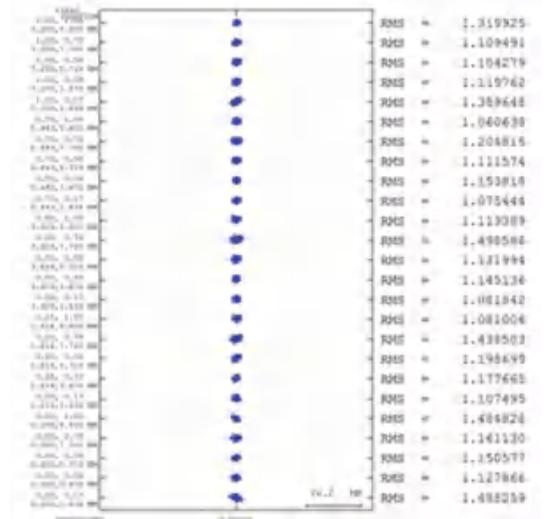


图 4 点列图

Fig. 4 Point diagram

## 5 结束语

本文提出了一种离轴全反射式超短焦投影镜头, 包含 4 片自由曲面, 突破传统光学对称结构的设计理论和方法, 将自由曲面的设计方法引入非对称成像系统中, 利用 MATLAB 和 Code V 进行了仿真设计, 实现了投射比仅为 0.25 的超短焦投影镜头, 结果从光学系统结构与成像像质两方面均呈现理想效果, 无色差, 结构简单, 成像质量理想。

## 参考文献

[1] 陈驰. 折反式超短焦投影镜头设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
 [2] 黄红林, 许键. 基于 Zemax 的微型投影镜头设计[J]. 光学仪器, 2016, 38(1): 49-52.  
 [3] 于百华. 基于自由曲面的超短焦投影物镜关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.  
 [4] 谢欣茹, 杨波, 潘帅, 等. 折反式超短焦变焦投影镜头的设计[J]. 光学技术, 2020, 46(1): 20-26.  
 [5] 李润芝, 杨波, 张婧京, 等. 采用折反式成像的超短焦距投影物镜设计[J]. 光学技术, 2018, 44(3): 305-309.  
 [6] 操超, 廖志远, 白瑜, 等. 基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计[J]. 物理学报, 2019, 68(13): 120-127.  
 [7] 杨通, 段璎哲, 程德文, 等. 自由曲面成像光学系统设计: 理论、发展与应用[J/OL]. 光学学报; 1-29[2020-12-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20200902.1045.002.html>.  
 [8] 徐义航. 具有自由曲面的离轴三反光学系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.  
 [9] 黄辰旭, 刘欣, 潘枝峰, 等. 基于自由曲面的大视场离轴四反光学系统设计[J]. 激光与红外, 2016, 46(3): 325-328.  
 [10] 操超, 廖胜, 廖志远, 等. 基于自由曲面的大视场离轴反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 37-45.

(上接第 91 页)

信息的解析和传递, 实现系统入库、出库等功能, 解决了传统方法速度慢、过程繁杂、作业滞后等弊端, 提高了企业的运行效率。该设计方案简单易操作、成本低, 提高了数据的精确性, 既能够帮助管理人员尽快的掌握并实现货物的具体情况, 又能实现物品的精准定位和快速的入库、出仓, 提高企业的运营效率。

## 参考文献

[1] 何梦雪, 洪欢中, 钟名高, 等. 国际仓储管理热点及前沿的可视化分析[J]. 中国物流与采购, 2020(14): 63-65.  
 [2] 张斌斌. 基于 ASP.NET 的电子元器件管理系统的设计与实现[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.  
 [3] 杜玮玮. 基于 B/S 的仓储物流管理系统设计与实现[D]. 大连:

大连理工大学, 2016.

[4] 贺晓燕, 陈兵, 汪慧, 等. 基于 C/S 结构的元器件管理系统的设计与实现[J]. 武汉理工大学学报(信息与工程版), 2015, 37(2): 143-146.  
 [5] 冯玉. 基于 C/S 架构的成品仓储管理系统的设计与实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.  
 [6] 陈廷侠, 赵红枝. MAX232 在串口通信中的作用分析与测试[J]. 新乡学院学报(自然科学版), 2009, 26(4): 19-21.  
 [7] 张照磊. 基于 STC12C5A60S2 单片机教学用机器人控制系统设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2017.  
 [8] 严林波. 基于 ZigBee 技术的无线通信模块研究[J]. 科学技术创新, 2020(29): 88-89.  
 [9] 蒲天应. 基于 ZigBee 技术无线通讯模块的研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2009.  
 [10] 胡斌, 陈玉青, 陈锋. 基于单片机的红外遥控自动开门系统[J]. 科技创新与应用, 2020(22): 41-43.