

## 便携多表面反射式望远系统光学设计

徐乾智, 王洋\*, 黄蕴涵, 付跃刚

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 为了减小手持双目望远系统的体积与质量, 在单片多表面光学系统原理的基础上, 建立了单片多表面望远系统的模型, 构建了中心厚度与遮拦比的关系表达式, 通过计算得到了系统的初始结构, 并进一步优化出一款便携多表面反射式望远系统。该望远系统由单片透镜组成, 光线在透镜中发生 4 次反射, 各反射面均为偶次非球面。系统的工作波段为可见光, 放大倍率为  $5\times$ , 透镜的基底为聚甲基丙烯酸甲酯, 直径为 15 mm, 总长为 5 mm, 全视场为  $1.15^\circ$ 。优化后的镜头全视场波像差满足使用要求, 光学传递函数(MTF)曲线平滑, 在 60 lp/mm 处大于 0.2, 成像质量良好。通过将优化系统与传统的伽利略式望远系统进行对比, 发现该系统满足市场对于便携式望远系统的需求。

**关键词** 光学设计; 小型化; 望远系统; 环形孔径; 折叠光路

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0722001

## Optical Design of Portable Multi-Surface Reflective Telescope System

Xu Qianzhi, Wang Yang\*, Huang Yunhan, Fu Yuegang

School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** In order to reduce the volume and weight of the hand-held binocular telescope, based on the principle of the single-chip multi-surface optical system, this paper establishes the model of the single-chip multi-surface telescope, constructs the relationship expression between the center thickness and the shielding ratio, obtains the initial structure of the system by calculation, and further optimizes a portable multi-surface reflective telescope. The telescope consists of a single lens, in which the light is reflected for four times in the lens, and each reflecting surface is an even aspheric surface. The working band of the system is visible light band, the magnification is  $5\times$ , the base of the lens is PMMA, the diameter is 15 mm, the total length is 5 mm, and the full field of view is  $1.15^\circ$ . The optimized full-field wave aberration of the lens meets the requirements of use, the optical modulation transfer function (MTF) curve is smooth and greater than 0.2 at 60 lp/mm, and the image quality is good. By comparing the optimized system with the traditional Galileo telescope system, it is found that the system meets the market demand for portable telescope systems.

**Key words** optical design; miniaturization; telescopic system; annular aperture; folded optical path

**OCIS codes** 220.1250; 220.3620; 110.6770

## 1 引言

1608 年荷兰的一位眼镜商汉斯·利伯希利用两块镜片制造了人类历史上的第一架望远镜。望远系统通过放大远处物体对人眼的张角, 从而达到把物

体拉近了的效果, 放大的效果可以用视觉放大倍率描述, 同时望远系统可以收集到更多的光线并将其送入人眼, 使观察者能够看到光亮较微弱或远距离物体。

望远系统广泛应用于各种场合。反射式望远系

收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2020-10-23; 录用日期: 2020-11-17

基金项目: 吉林省科技发展计划项目优秀青年人才基金(20190103046JH)

\* E-mail: wangyang11.17@163.com

口径较大、放大倍率较高,更容易实现轻量化和无热化,且不存在色差与二级光谱,经常被用于远距离观测天体、激光通信等;而透射式望远系统口径较小、结构简单、加工装调容易,经常被用于观察镜、军用瞄准镜等。目前用于歌剧院、演唱会、体育赛事等大型场地的观剧镜多为手持双筒望远系统,这类望远系统不易携带且不适合长时间使用,所以设计一款能够保证放大倍率与焦距的小型化望远系统符合目前的市场需求。

为了实现望远系统的小型化与轻量化,2006年,fSONA 通信公司通过改进格里高利式望远结构,设计了一款适用于自由空间光通信的多次反射的望远系统<sup>[1]</sup>。通过在该系统主镜和次镜之间使用折叠光路的平面反射镜,大幅度地缩短了系统的轴向距离;基于该原理,Tremblay 等<sup>[2]</sup>于 2007 年设计了一款单片四反折叠超薄镜头,其厚度为 5.5 mm,全视场为 17°,外直径为 28 mm,有效焦距为 18.6 mm,遮拦比为 0.81,波长位于可见光波段;2009 年,Zhang 等<sup>[3]</sup>在 SPIE 中发表了一篇关于 8 次反射折叠型镜头的文章,该镜头的厚度为 5 mm,全视场角为 6.6°,外直径为 60 mm,有效孔径为 37 mm,有效焦距为 38 mm,遮拦比为 0.89;2015 年,戈兰<sup>[4]</sup>结合光学接收标签系统,设计了一款基于环形孔径超薄透镜的四反光学标签接收系统,共采用了 4 个偶次非球面,其厚度为 7.6 mm,外直径为 28 mm,全视场角为 17°,有效焦距为 36 mm,遮拦比为 0.814,工作波长为可见光;2019 年,Xiong 等<sup>[5]</sup>基于航空铝材料设计了一款 8 次反射成像系统,该系统由一片平面镜与一片具有 4 个同心带的非球面镜片组成,外直径为 120 mm,有效直径为 56.21 mm,遮拦比为 0.87,焦距为 103.66 mm,全视场角为 2°;2020 年,杜康等<sup>[6]</sup>为了解决分辨率与系统大小的矛盾,基于同轴四反结构设计了一款同轴主三镜一体化光学系统,该系统的整体长度小于 200 mm,焦距为长度的 8.75 倍,像质良好,在较短的轴向距离内获得了较大的焦距。上述各例均为聚焦系统,通过折叠光路获得较大的焦距,在保证像质的情况下实现系统的小型化。

本文基于单片多表面光学系统设计思想,设计了一款口径为 15 mm 的平行光出射的无焦光学系统,望远系统的工作波长为可见光,放大倍率为 5×,全视场角为 1.15°,系统总长为 5 mm,后截距为 15 mm,设计结果表明,本系统与人眼配合使用得到的像质良好。

## 2 单片多表面光学系统及望远系统

### 2.1 单片多表面望远系统

单片多表面望远系统在单一透镜中进行多次反射,从而达到折叠光路的效果,该系统可以在很短的轴向距离内实现大于轴向距离数倍的焦距,如图 1 所示。

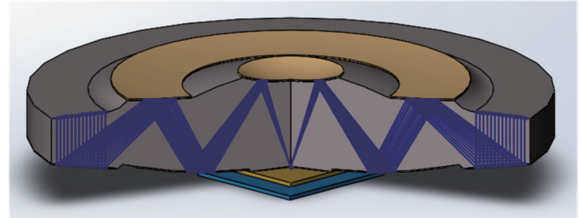


图 1 单片多次反射光学系统

Fig. 1 Monolithic multiple reflection optical system

图 1 中的环形折叠光学系统具有实像点,本次设计在此基础上改进此种结构,设计一款平行光出射的无焦光学系统,即单片多表面望远系统。首先,根据高斯光学理论,利用光学设计软件设计两个具有一定光焦度的理想平面反射镜,出射光为平行光,如图 2 所示。

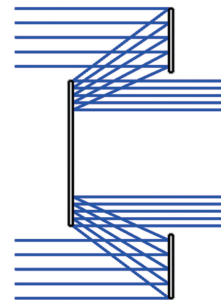


图 2 两片理想平面反射镜组成的无焦光学系统

Fig. 2 A focus optical system with two ideal plane mirrors

### 2.2 单片多表面望远系统计算

在实际的应用中,各反射镜面并非理想成像,边缘视场往往带来大量的球差。在图 2 的基础上,为减小系统的球差,将各反射面改为抛物面,结构如图 3 所示。图中 A 为边缘光线与抛物面 1 的交点,G 为 A 点向光轴所作的垂线与光轴的交点, $L_1$  为点 G 至焦点 O 的距离, $R_1$  为抛物面 1 的曲率半径, $d_{\text{sag},1}$  为  $\frac{R_1}{2} - L_1$ ,同理可得  $L_2, R_2, d_{\text{sag},2}$ 。 $D$  为系统的边缘光线到光轴的距离, $D_c$  为抛物面 2 的边缘光线高度,设等效入瞳直径为  $D_a$ ,遮拦比为  $\varphi$ ,等效入瞳面积为  $S_a$ ,可得

$$\varphi = \frac{D_c}{D}, \quad (1)$$

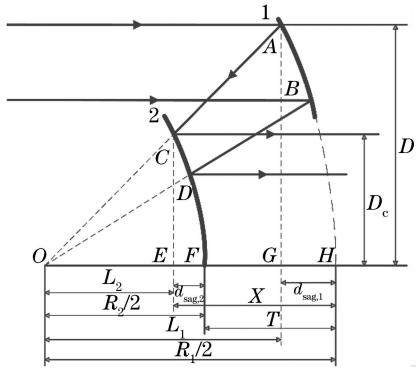


图 3 无焦系统光路图

Fig. 3 Light path diagram of afocal system

$$S_a = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 - \pi \left( \frac{D_c}{2} \right)^2 = \pi \left( \frac{D_a}{2} \right)^2, \quad (2)$$

即

$$D_a = D \sqrt{1 - \varphi^2}. \quad (3)$$

若系统有  $n$  个光学表面, 则  $d_{\text{sag},n}$  可表示为

$$d_{\text{sag},n} = \frac{c_n r_n^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c_n^2 r_n^2}}, \quad (4)$$

式中:  $c_n$  为第  $n$  个面的曲率;  $r_n$  为边缘光线入射至第  $n$  个面的径向坐标;  $k$  为抛物面的二次曲面系数, 为  $-1$ ;  $D_n$  为第  $n$  个面的口径, 经简化得

$$d_{\text{sag},n} = \frac{D_n^2}{2R_n}, \quad (5)$$

式中:  $R_n$  为抛物面  $n$  的曲率半径。由  $\triangle OCE \sim \triangle OAG$  可得

$$X = \frac{R_1}{2} - L_2 = \frac{R_1}{2} - L_1 \frac{D_c}{D} = \left( \frac{R_1}{2} - \frac{D^2}{2R_1} \right) \frac{D_c}{D}, \quad (6)$$

$$T = X - d_{\text{sag},2}, \quad (7)$$

$$R_2 = R_1 - 2T, \quad (8)$$

$$d_{\text{sag},2} = \frac{D_c^2}{2R_2} = \frac{D_c^2}{2R_1} \frac{D_c}{D} = \frac{D_c D}{2R_1}, \quad (9)$$

式中:  $T$  为元件中心厚度。综上, 元件中心厚度  $T$ 、抛物面 1 的曲率半径  $R_1$  与遮拦比  $\varphi$  的关系为

$$T = \frac{R_1}{2} (1 - \varphi). \quad (10)$$

考虑到佩戴的舒适性以及质量, 选定初始结构的中心厚度为 4 mm; 较大的遮拦比将影响进入系统的光能量, 过小的遮拦比不利于后续系统的设计。考虑到一般情况下人眼瞳孔的大小为 3 mm 及望远系统放大倍率的要求, 经过分析后确定本次设计为 4 次反射结构, 遮拦比为 0.7。通过计算得到第一个曲面的曲率半径为 27 mm, 第二个面曲率半径为

19 mm, 单片多表面望远系统的光学初始结构如图 4 所示。



图 4 系统初始结构

Fig. 4 Initial structure of system

### 3 系统光学设计与优化

#### 3.1 基底选取

考虑到加工的难易程度及色差的校正问题, 传统的单片多表面光学系统均采用  $\text{CaF}_2$  材料作为基底进行设计<sup>[6]</sup>, 并使用单点金刚石车削的方法进行加工。在不同折射率介质相交处, 介质对于不同波长的光的折射率各不相同, 所以产生了色差<sup>[7]</sup>。本次设计光线从空气中平行射入基底, 并在基底介质中进行多次反射, 随后平行射出, 整个过程中只在最后一个表面上产生微小色差, 所以不同于普通的单片多表面光学系统, 色差对本次设计的系统影响并不大。

考虑到  $\text{CaF}_2$  质地相对柔软、稳定性较差, 一般不作为单片透镜使用, 并且为了方便加工、适合量产, 本设计选用高分子透明材料 PMMA 作为基底, 该材料的质量小、强度较高, 光学透明性较高、耐腐蚀、耐湿、耐晒、绝缘性能好且更易于加工<sup>[8-9]</sup>。

#### 3.2 参数确定

##### 3.2.1 视场

目前演唱会以及各类文艺演出一般在体育场举行, 本文根据体育场的大小以及人眼在紧张时的视场最终确定望远系统全视场为  $1.15^\circ$ , 并以在 50 m 处清晰看到 1 m 左右的事物作为参考进行后续设计。

##### 3.2.2 放大倍率与后截距

传统的观剧镜由两个伽利略式望远系统组成, 由于其出瞳不与人眼瞳孔重合, 所以其放大倍率与视场相对较小; 又因为一般剧场占地面积有限, 所以需求的放大倍率较小, 传统的观剧镜的放大倍率一般为  $3\times$ 。本次设计的便携式望远系统需要与人眼搭配使用, 考虑到系统的实用性, 最终确定本次系统

的放大倍率为  $5\times$ ，出瞳距为 15 mm。

### 3.2.3 外形尺寸的大小

通过虹膜的收缩控制瞳孔面积的大小，进而实现对人眼入瞳直径的调节。根据光强的大小通常在 3~6 mm 范围之间变化，结合系统的放大倍率，确定系统直径  $D$  的大小为 15 mm。

### 3.3 优化

根据计算的初始结构进行优化，优化过程中利用操作数控制各反射面的垂轴距离和系统的轴向距离，基于偶次非球面得到最终的光学结构如图 5 所示，具体的结构参数如表 1 所示。

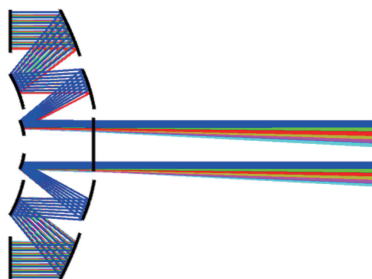


图 5 优化后的望远系统

Fig. 5 Telescope after optimization

### 3.4 设计结果分析

在系统后加入理想成像面，对系统的波像差和光

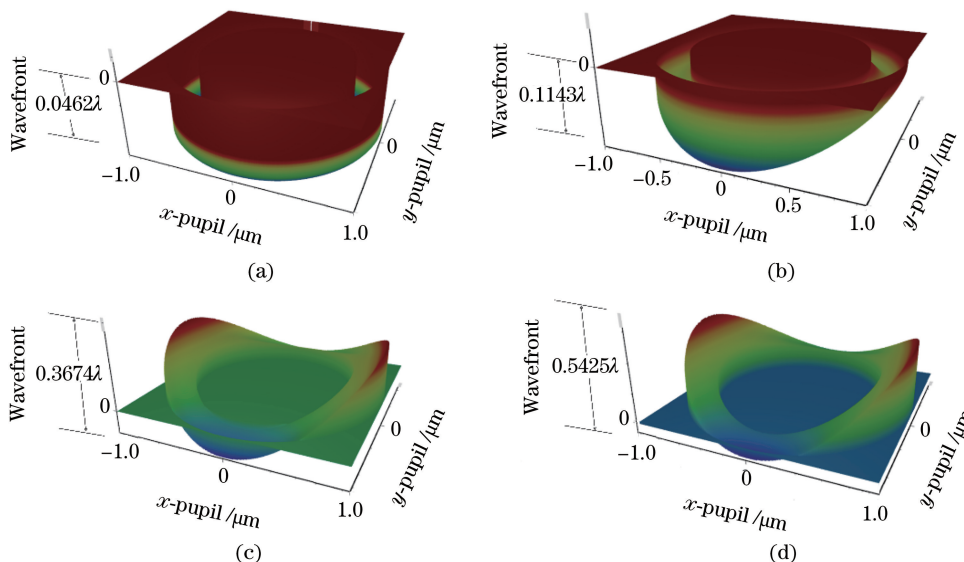


图 6 波前图。(a) 视场角为  $0^\circ$ ，斯特列尔比为 0.980；(b) 视场角为  $0.23^\circ$ ，斯特列尔比为 0.961；(c) 视场角为  $0.46^\circ$ ，斯特列尔比为 0.805；(d) 视场角为  $0.57^\circ$ ，斯特列尔比为 0.610

Fig. 6 Wavefront maps. (a) Field of view is  $0^\circ$ , and Strehl ratio is 0.980; (b) field of view is  $0.23^\circ$ , and Strehl ratio is 0.961; (c) field of view is  $0.46^\circ$ , and Strehl ratio is 0.805; (d) field of view is  $0.57^\circ$ , and Strehl ratio is 0.610

系统的 MTF 如图 7 所示，各视场的 MTF 曲线平滑且接近衍射极限，并在截止频率为 60 lp/mm 处大于 0.2，这表明本设计系统可以与人眼进行良

表 1 望远系统参数

Table 1 Parameters of telescope

Surface	Radius of curvature /mm	Thickness / mm	Material
	Infinity	0.0005	—
	Infinity	4.5160	PMMA
Object	-16.231	0	Mirror
	-16.231	-3.5910	PMMA
	-9.581	0	Mirror
	-9.581	3.7310	PMMA
Stop	-12.722	0	Mirror
	-12.722	-3.8970	PMMA
	-3.988	0	Mirror
	-3.988	3.6880	PMMA
	122.290	15.0000	—

学传递函数 (MTF) 进行分析。CodeV 镜头库中的一款成年人眼模型的入瞳直径为 4 mm，焦距为 16.6 mm，所以设理想成像面的焦距为 16.6 mm。

该系统各视场的波像差和斯特列尔比结果如图 6 所示，可以看出随着视场的增大，波像差逐渐增大，斯特列尔比逐渐下降，像质有一定程度的降低。人眼在集中注意力的时候只对观察点中心的一定范围区域内的视场比较敏感，对波像差在一个波长范围内的视场都可以进行有效的判断。

好的配合。

将本设计系统与一个放大倍率为  $5\times$ 、入瞳直径为 15 mm 的伽利略式望远系统进行对比，其物镜



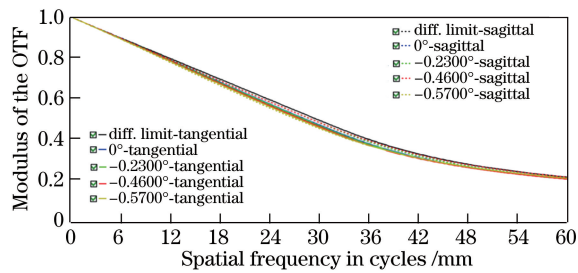


图 7 光学传递函数

Fig. 7 Optical transfer function

和目镜均为双胶合透镜,两种望远系统的外形尺寸对比情况如图 8 所示。可见,本文所设计的便携式望远系统的有效口径虽为伽利略式望远系统总口径的 70%,但是轴向距离约缩小为伽利略式望远系统的 1/8,径向尺寸有所减小,轴向尺寸及质量也大大缩小,这符合便携式、小型化的市场需求。

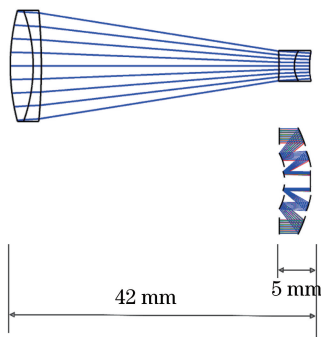


图 8 本文设计与伽利略式望远镜的对比

Fig. 8 Comparison of system designed in this paper with Galileo telescope

### 3.5 工艺性分析

本文所选用的 PMMA 基底为一种开发较早的有机玻璃,被广泛应用于汽车、医药、电子行业等各种日用消费品中。本文设计的望远系统的外形呈圆盘状,整个系统的结构呈旋转对称,各表面均采用偶次非球面,可以通过单点金刚石车削的方法进行加工,仅需一次装夹即可加工成型,同时可以保证较高的面型精度<sup>[10]</sup>;批量生产时也可以采用注塑工艺,可利用计算机数字控制机床(CNC)对模具进行精密的机械加工并抛光。PMMA 也是 3D 打印工艺的重要材料,近年来 3D 打印逐渐应用于光学元件加工,该方法可将计算机内三维数字模型以层层堆积的方式直接制作成几乎任何形状的三维光学实体。周楚建等<sup>[11]</sup>曾于 2018 年利用 3D 打印技术完成对人工角膜的加工,本文系统也可以通过 3D 打印的方法获得更高精度的非球面面型<sup>[12]</sup>。

## 4 结 论

在现有的单片多表面光学系统的基础上,根据人眼的结构参数,设计了一款便携式、小型化的望远系统。该系统通过在单片透镜中进行多次反射,达到压缩光束的目的,工作波长处于可见光波段,全视场角为  $1.15^\circ$ ,放大倍率为  $5\times$ ,直径为 15 mm,厚度为 5 mm,基底为 PMMA。优化后的光学结构的像质良好。将该系统制成眼镜或夹片式的结构,并将其与人眼配合使用,此款镜头具有实际应用价值,符合当今的市场发展需求。

### 参 考 文 献

- [1] Haney M W. Performance scaling in flat imagers[J]. Applied Optics, 2006, 45(13): 2901-2910.
- [2] Tremblay E J, Stack R A, Morrison R L, et al. Ultrathin cameras using annular folded optics [J]. Applied Optics, 2007, 46(4): 463-471.
- [3] Zhang R R, Shen W M. Ultrathin cameras using annular folded optics[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7156: 715604.
- [4] Ge L. The micro-optics label receiving system based on annular aperture ultra-thin lens [J]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015.  
戈兰. 基于环型孔径超薄透镜的微光学标签接收系统[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
- [5] Xiong Y P, Dai Y F, Chen S Y, et al. Monolithic multi-surface concentric folded visible imaging system [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10838: 108381H.
- [6] Du K, Liu C Y, Liu S, et al. Design of coaxial ultra-compact primary and tertiary mirror integrated optical system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 072202.  
杜康, 刘春雨, 刘帅, 等. 同轴超紧凑型主三镜一体化光学系统的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 072202.
- [7] Tremblay E J. Concentric multi-reflection lenses for ultra-compact imaging systems[EB/OL]. (2008-01-10) [2020-09-24]. [https://www.researchgate.net/publication/234312772\\_Concentric\\_multi-reflection\\_lenses\\_for\\_ultra-compact\\_imaging\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/234312772_Concentric_multi-reflection_lenses_for_ultra-compact_imaging_systems).
- [8] Zhang Y M. Applied optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1982.  
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [9] Herbert G. Handbook of optical systems [M]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005: 157-161.

- [10] Wei Y. Design method of single diamond turning progressive addition lenses and its realization [D]. Jinan: Shandong University, 2020.  
魏一. 单点金刚石车削渐进镜面设计方法及其实现 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [11] Zhou C J, He Z G, Yuan W H. Study of 3D printing technology in artificial cornea preparationin[J]. Value Engineering, 2018, 37(4): 146-147.  
周楚建, 何志国, 原伟浩. 3D 打印技术在人工角膜制备中的研究 [J]. 价值工程, 2018, 37(4): 146-147.
- [12] Wang D Q, Yuan Q, Yin C J, et al. Design and 3D printing of intraocular lens model based on human eye data in China[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 213301.  
王丹琦, 袁群, 殷长俊, 等. 基于我国人眼数据的人工晶体模型及其 3D 打印技术研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 213301.