

用√符号选择一类	
教 学	
科 研	√
编号 (由专家组填写)	

第十一届全国高校物理实验教学研讨会
本科学生物理实验论文评比表

学生姓名: 王子淳

申报学校: 三明学院

联系方式: 电话: 17350332859

QQ: 976594177

E-mail: e1999wzc@163.com

填表日期: 2022年7月19日

全国高校物理实验教学研讨会组委会制

二〇二〇年一月

学 生 作 者 及 发 表 有 关 物 理 实 验 论 文 情 况	姓名	王子淳	性别	男	出生年月	1999.06
	学校名称	三明学院				
	入学时间	2017.9	毕业时间	2021.6		
	学号	20170666129				
	参评论文： （题目、杂志名称，卷/期、页、年）					
	全球面镜卡塞格林式望远系统的设计，光学技术，47（6），654-657，2021					
	（注：论文的第一作者必须为大学本科生，且其论文研究工作是在本科生阶段完成的，到现场答辩的为该论文的学生作者之一。）					
	论文作者情况（按发表论文作者顺序列出）：					
	姓名	身份	单位	作用/贡献		
	王子淳	411303199906251038	三明学院机电工程学院	光学仿真及设计，论文初稿撰写		
郑联慧	350425198406220317	三明学院机电工程学院	参与论文修改及基金支持			
余家富	362202200001265056	三明学院机电工程学院	参与论文修改			
肖荣辉	350424197606050913	三明学院机电工程学院	参与论文修改及基金支持			
许晓赋	350583198412154933	三明学院机电工程学院	参与模型设计、论文撰写指导、投稿及基金支持等工作			
简要介绍（研究背景、问题、方法、创新点、学术及应用价值和引用情况等）：						
<p>折反射式望远系统广泛应用于天文、航海等环境的观测需求。然而，目前大部分的折反射式望远系统为提高其成像质量，常采用非球面镜系统。由于非球面镜系统的镜头加工及组装等难度相对较高，为避免此类问题，本论文利用 <i>Zemax OpticStudio</i> 光学设计软件设计一款具有易加工的全球面镜卡塞格林式望远系统。该系统能有效地校正像差，具有较好的成像质量，能应用于工业生产使用。该结构方案有望为卡塞格林式折反射望远光学系统的设计提供新的思路。</p>						

	指导教师姓名	许晓斌	职称	讲师
指导教师评语	对学生发表论文评语及论文情况说明:			
	<p>本论文基于利用 ZEMAX OpticStudio 光学设计软件设计了一款具有视场小及易校正像差的全球面卡塞格林式望远系统,理论上为解决非球面反射镜的加工问题和改善系统轴外像质得到了较好的成像质量。论文立题鲜明,具有一定的创新,表明该学生能熟练应用光学设计软件进行相关问题的研究和讨论,数据及结论可靠,讨论分析得当。该论文能够发表在《光学技术》杂志上,说明该论文得到相关同行的高度认可。</p>			
	指导教师 (签名): 许晓斌		2022年7月19日	
学校推荐意见	同意推荐			
	负责人 (签名):			2022年7月19日
大会学术组专家意见	专家组组长 (签名):		年 月 日	
评比结果	理事长 (签名)		年 月 日	

文章编号: 1002-1582(2021)06-0654-04

全球面镜卡塞格林式 望远系统的设计

王子淳, 郑联慧, 余家富, 肖荣辉, 许晓赋*

(三明学院 机电工程学院, 福建 三明 365004)

摘 要: 折反射式望远系统广泛应用于天文、航海等环境的观测需求。然而目前大部分的折反射式望远系统为提高其成像质量常采用非球面镜系统。由于非球面镜系统的镜头加工及组装等难度相对较高, 为避免此类问题, 论文利用 Zemax OpticStudio 光学设计软件设计一款具有易加工的全球面镜卡塞格林式望远系统。望远系统由一带孔的主反射镜、一次反射镜以及四个辅助透镜组成。其 F 数为 2.6, 焦距为 760mm, 工作波长在 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 线性拦光比为 0.45, MTF 值在频率 35lp/mm 内均大于 0.5, 尺寸控制于 $\Phi 350 \times 800\text{mm}$ 以内。在上述技术指标的基础上, 该系统能有效地校正像差, 具有较好的成像质量。该结构方案有望为卡塞格林式折反射望远光学系统的设计提供新的思路。

关 键 词: 光学设计; 折反射式望远系统; 成像质量

中图分类号: O435.2; O439 **文献标识码:** A

DOI:10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2021.06.003

Design of all-spherical mirror based Cassegrain telescopic system

WANG Zichun, ZHENG Lianhui, YU Jiafu, XIAO Ronghui, XU Xiaofu*

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Sanming University, Sanming 365004, China)

Abstract: Cassegrain telescopic system has been widely employed in environmental observation such as in astrophysics and navigation. Currently available Cassegrain telescopic system mainly used aspheric mirror systems in order to gain satisfied imaging quality. However, aspheric mirror systems are difficult to fabricate and assemble. In the present study, an easier to be fabricated global Cassegrain telescopic system was designed by using the optical design software Zemax OpticStudio. The structure consists of a primary mirror with a hole, a secondary mirror, and four auxiliary lenses, which the F is 2.6 and the focal length is 760mm. Its wavelength can be operated from 0.9 to $1.7 \mu\text{m}$ and the linear block ratio about 0.45. MTF within the frequency of 35 lp/mm is great than 0.5, and the size (Φ) is small than $350 \times 800\text{mm}$. According to the above specifications, the structure has a better imaging quality with better aberration correct capability. The proposed structure can provide a new way for designing Cassegrain reflectional telescopic optical systems.

Key words: optical design; catadioptric telescopic system; image quality

收稿日期: 2021-06-23; 收到修改稿日期: 2021-08-06

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(11803015); 福建省自然科学基金面上项目(2020J01387); 福建省中青年教师教育科研项目(JAT190722); 三明学院科学研究发展基金项目(B201935)

作者简介: 王子淳(1999—), 男, 本科生, 从事光学设计研究。e1999wzc@163.com

许晓赋(1984—), 男, 讲师, 博士, 从事硅基光子学与微纳操控、光学设计。

* 通讯作者: andelie12@163.com

0 引言

折反射式望远系统是一种将折射系统与反射系统相结合,可以较好地消除球差和轴外像差,提高望远镜成像质量的光学系统^[1],因而被广泛应用于天文领域(主要是天文观测和天文摄影等)。国内外不少学者对此类望远系统做了较详细研究。比如:曹峰梅等^[2]提出的一种基于仿视网膜成像器件的折反射全景系统设计。C Buy 等^[3]采用高放大率、低像差的紧缩折反射望远镜对处女座引力波探测器进行了改进和升级,实现更高灵敏度的测量。由此可见,折反射式系统在未来仍然具有很大的发展空间和实用价值。

卡塞格林式望远镜是一种由抛物面的凹面主镜和双曲面的凸面次镜组成的反射式望远镜^[4]。因其具有无色差、结构紧凑和适用波段范围较宽的特点,而被广泛应用于大型天文望远镜、对地遥感和紫外以及红外光学系统中^[4-6]。但传统的卡塞格林式望远系统依然存在着如下缺点:视场小(通常视场不超过 0.5°),存在遮光现象而不可避免地损失光通量,像质不易得到校正^[7],非球面镜在加工、检测和对准方面存在局限性^[4-6]等。因此,设计者采用在卡塞格林系统中加入透镜组构成折反射式系统的方法来达到增大视场,改善像质的目的。比如:李婕等人在卡塞格林系统中引入曼金反射镜,并结合非球面和中继透镜组的使用,可有效地改善系统的视场和相对孔径^[6]。

为了兼顾折反射式望远镜和卡塞格林系统的各自优势,摒弃其自身的缺陷,本论文以解决非球面反射镜的加工问题和改善系统轴外像质为出发点,设计出一款由全球面主、次反射镜和四个辅助透镜构成的卡塞格林式望远系统。该系统不仅保留了卡塞格林系统无色差、波段宽的优势,通过采用全球面镜来降低加工难度、校正轴外像差以及加入透镜组来校正球面镜所带来的球差,从而达到良好的成像质量。

1 折反射望远系统的设计

1.1 设计指标

针对卡塞格林式望远系统焦距较长、应用的波段较宽以及视场较小等设计特点,本次设计采用卡塞格林望远系统加透镜组来构成折反射式望远系统,其主要技术参数如表 1 所示。本论文设计的卡

塞格林式望远系统视场很小,三个视场分别为 0° 、 0.7° 和 0.92° 。

表 1 主要技术参数

光学参数	数值
焦距/mm	760
F 数 F/#	2.6
工作波段/ μm	0.9、1.2、1.7
对角像高/mm	12.33
成像要求	MTF@35lp>0.3
尺寸要求/ mm^2	$\Phi 350 \times 800$
系统重量/kg	<55
线性拦光比	0.45

1.2 设计结果

按照表 1 中的技术指标,利用 Zemax OpticStudio 光学设计软件对光学系统初始结构进行设计、优化,可得到如图 1 所示的光学系统结构,其结构参数如表 2 所示。该系统结构的 F 数为 2.6,焦距为 760mm,工作波段在 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 之间,线性拦光比为 0.45,光学尺寸小于 $\Phi 320 \times 650 \text{mm}$,主反射镜 $\Phi 320 \text{mm}$,厚度取 20mm,中间挖洞 $\Phi 132 \text{mm}$,材料采用 H-K9L,重量约为 4.5kg;次反射镜 $\Phi 132 \text{mm}$,厚度取 10mm,材料采用 H-K9L,重量约为 0.3kg。其他四片玻璃重量为 0.7kg,玻璃总重量小于 5.5kg,满足表 1 的技术参数。

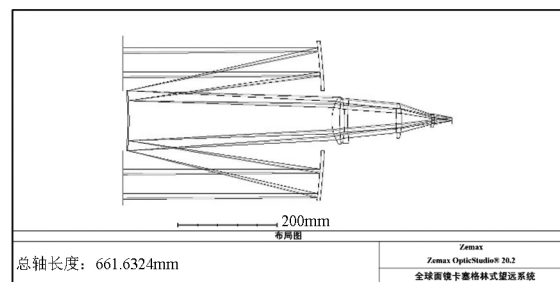


图 1 光学系统图

在包含反射镜结构的光学系统中,该镜头设计最大的缺点是拦光问题。如图 1 所示,一束输入的光束通过该光学结构会遇到次反射镜的孔径而发生遮挡,从而产生拦光效果。因此,拦光比(也称遮拦比)可定义为拦光部分的直径与输入光束直径之比。其产生的后果不仅会造成能量的损失,而且传递函数会随着拦光面积的增大而下降^[8]。因此,需要控制好拦光比的适合大小,才能设计出比较完善的光学系统。本次设计出的光学系统线性拦光比为 0.45。

表 2 最终的结构设计参数

表面类型		曲率半径 R/mm	厚度 D/mm	材料
物面	标准面	无限	无限	
(孔径)	标准面	无限	400.000	
(孔径)	标准面	-1322.980	-388.364	MIRROR
光阑	标准面	-702.891	408.362	MIRROR
	标准面	86.612	16.017	H-ZBAF3
	标准面	349.356	10.167	
	标准面	-248.064	6.000	H-ZF52N
	标准面	448.244	97.406	
	标准面	341.884	11.172	H-ZK9
	标准面	-138.413	60.878	
	标准面	-31.301	5.000	H-ZLAF55F
	标准面	-43.205	34.999	
像面	标准面	无限		

2 像质评价

利用操作数对系统中各光学表面的曲率半径、间隔及折射率等变量进行优化,并进行反复的校正和平衡各类像差,可得到成像质量较好且满足技术参数中成像要求的光学系统结构,如图 1 所示。一般而言,折反射系统主要由反射面承担光焦度且反射面不存在色差,因而利用无光焦度或弱光焦度透镜组可校正剩余的球差和彗差^[9]。通过优化后,本论文结构中的传递函数曲线(MTF)、点列图(SPT)以及场曲和畸变如图 2、3 和图 4 所示。

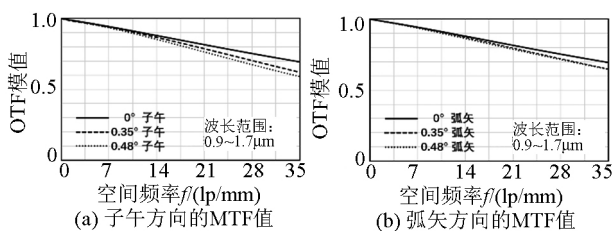


图 2 MTF 曲线图

对于 MTF 曲线而言,光学传递函数和光学系统像差、衍射效果等都密切相关。利用 MTF 曲线来对光学系统的成像质量进行像质评价是客观且可靠的。MTF 曲线的高频成分和截止频率决定了图像的分辨率,而低频和中频成分则决定图形整体轮廓的清晰度。低频和中频响应是决定图像清晰度的重要因素。品质好的光学成像系统,应该对图像从低频到高频都有很好的信息传递能力,并且对应的各个频率的 MTF 曲线应当接近衍射极限系统的 MTF 曲线。由图 2 的 MTF 曲线图可见,在频率 35lp/mm 处以内,该光学系统在 0°、0.7°以及 0.92°

视场的 MTF 值均在 0.5 以上,满足规定的技术指标。

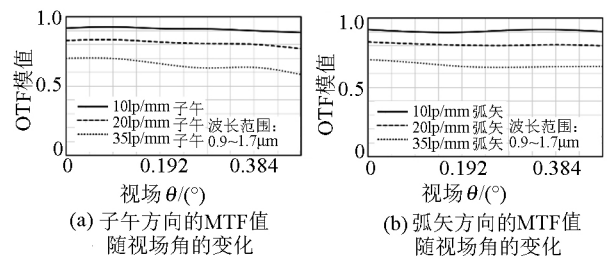


图 3 MTF 随视场角变化的曲线

为更加全面反映该光学结构的成像质量,在图 2 所示的三个视场的 MTF 曲线基础上,本论文还绘制了 MTF 随半视场变化的曲线,如图 3 所示。从该曲线可以看出,在 10lp/mm、20lp/mm 和 35lp/mm 处,MTF 值分别大于 0.88、0.77 和 0.58。结果表明,MTF 随着视场平滑过渡,没有高级项。因此,只采用上述 0°、0.7°以及 0.92°的三个采样视场数完全满足设计要求。

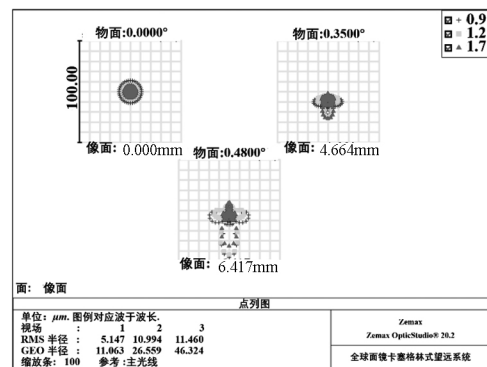


图 4 点列图

点列图是通过点的密集程度和弥散斑的半径来衡量光学系统的成像质量,是一种简便、直观的像质评价方法。图 4 所示为 0°、0.7°以及 0.92°三个视场的点列图。在点列图中,0°视场和 0.7°视场的光线都较为集中,而 0.92°视场的部分光比较分散,但整体光线还是比较集中。三个视场的几何半径均小于 50μm,弥散斑均方根半径均小于 12μm,符合设计要求。

场曲和畸变是光学系统的轴外像差中较为重要且需要校正的像差。场曲会影响到接收像面上物体的清晰程度,即在像平面上各视场中心区域与边缘区域的像的清晰程度不同。对于目视观察系统而言,考虑到人眼的调节作用(即:目视调节度),允许有一定范围的场曲存在。本设计的望远系统为目视系统且其视场较小。图 5 所示为该光学结构的场曲和畸变图。该结构的场曲远小于 0.2mm,符合场曲校正的要求。而畸变是主光线通过光学系统后在高

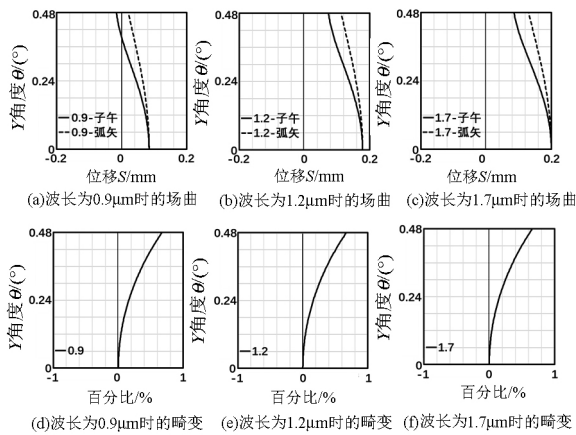


图 5 场曲和畸变

斯像面上的实际像高与理想像高的偏差,且畸变有正畸变和负畸变两种。在目视系统中,畸变小于 3% 是不易被察觉。图 5 所示的畸变是小于 1% 的正畸变,符合畸变校正的要求。

3 公差分析

光学系统除了要满足其像质达到设计要求外,还要求其加工工艺的可行性。因此,需要对该光学系统进行公差分析。在公差分析中,本结构的公差参数设置如图 6 所示。通过公差分析,公差结果如表 3 所示。结果表明,本结构在 35lp/mm 处有 90% 的 MTF 值都大于 0.32,系统的加工性能良好。



图 6 公差参数的设置

综上可以判断,该优化后的光学系统成像质量较好且公差分析能满足规定的技术参数。

表 3 公差的分析结果

概率	平均 MTF @35lp/mm	0° MTF @35lp/mm	0.7° MTF @35lp/mm	0.92° MTF @35lp/mm
90% >	0.36988574	0.51750091	0.33706751	0.32703511
80% >	0.42993223	0.57376360	0.39922157	0.36447195
50% >	0.51471797	0.64206468	0.51990049	0.41123147
20% >	0.56954743	0.67114205	0.60212970	0.50984907
10% >	0.58785422	0.68687358	0.62640922	0.54106140

4 结论

本文设计了一款 F 数为 2.6, 焦距为 760mm, 工作波段在 0.9~1.7 μm , 拦光比为 0.3, 光学尺寸

小于 $\Phi 320 \times 650\text{mm}$ 且易加工的全球面镜卡塞格林式望远系统。该结构中的反射系统部分采用全球面镜的卡塞格林式望远系统,而折射系统部分由四个辅助全球面透镜构成,能达到降低加工难度以及校正球面镜所带来的球差的目的。在满足技术参数的基础上,通过分析 MTF 曲线、点列图、场曲与畸变等像质评价及公差分析,可知该光学系统能达到良好的成像质量。

参考文献:

[1] 范应娟. 基于 ZEMAX 的折反射式望远物镜的设计[J]. 陕西科技大学学报:自然科学版,2013,31(02):146—149.
 Fan Yingjuan. Design of a catadioptric telescope objective based on Zemax[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 31(02): 146—149.

[2] 曹峰梅, 牟勇, 白廷柱. 基于视网膜成像器件的折反射全景系统设计[J]. 光学技术, 2018, 44(02): 133—139.
 Cao Fengmei, Mu Yong, Bai Tingzhu. Design of a catadioptric panorama system based on retina-like imaging device[J]. Optical Technique, 2018, 44(02): 133—139.

[3] C Buy, E Genin, M Barsuglia, et al. Design of a high-magnification and low-aberration compact catadioptric telescope for the Advanced Virgo gravitational-wave interferometric detector[J]. Classical and Quantum Gravity, 2017, 34(9): 095011.

[4] 钱超, 张金业. 基于 Zemax 的新型折返式卡塞格林望远镜系统设计[J]. 湖北工业大学学报, 2013, 28(05): 18—22.
 Qian Chao, Zhang Jinye. The design of a new cassegrain telescope system based on Zemax[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2013, 28(05): 18—22.

[5] 钱义先, 梁伟, 高晓东. 含多个非球面大视场卡塞格林系统光学设计[J]. 光子学报, 2009, 38(04): 896—899.
 Qian Yixian, Liang Wei, Gao Xiaodong. Optical design of cassegrain system with wide angle and multiple aspheric surfaces[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(04): 896—899.

[6] 李婕, 明景谦, 卢若飞. 一种改进型的红外卡塞格林光学系统设计[J]. 红外技术, 2010, 32(02): 76—80.
 Li Jie, Ming Jingqian, Lu Ruofei. Design of an ameliorating infrared cassegrain optical system[J]. Infrared Technology, 2010, 32(02): 76—80.

[7] 沈志娟, 曹一青. 大相对孔径长焦距同轴折反射式望远物镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0108002.
 Shen Zhijuan, Cao Yiqing. Design of a coaxial catadioptric telescope objective with large relative aperture and long focal length[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0108002.

[8] Daniel L. Marks, Nathan Hagen, Mark Durham, et al. Wide-field compact catadioptric telescope spanning 0.7~14 μm wavelengths[J]. Applied Optics, 2013, 52(18): 4334—4342.

[9] 袁健男, 付跃刚, 郭俊, 等. 改进型卡塞格林望远光学系统的优化设计[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2010, 33(03): 8—10.
 Yuan Jianan, Fu Yuegang, Guo Jun, et al. Optimization of improved cassegrain telescope system[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 33(03): 8—10.