

高分辨率视频摄远物镜光学系统设计及成像实验

高兴宇^{1,2,3} 郁道银¹ 龙跃² 萧泽新³¹天津大学精密仪器及光电子工程学院, 天津 300072²柳州欧维姆机械股份有限公司, 广西 柳州 545005³桂林电子科技大学机电工程学院, 广西 桂林 541004

摘要 为了满足斜拉桥拉索表面缺陷的远程检测要求, 基于摄远型物镜结构原理设计加工了高分辨率视频摄远物镜光学及机械系统。根据物方 300 m 外分辨 4 mm 线宽的分辨率要求, 按照焦距 $f'=320$ mm 计算, 确定摄远物镜像方分辨率为 234 cycle/mm。选择适当初始结构, 用光学设计软件 OSLO 进行焦距缩放、替换玻璃、减少镜片等多步骤优化, 最后得到相对孔径为 1/5.7、视场角为 $2\omega=1.379^\circ$ 、分辨率达到 250 cycle/mm 的摄远物镜光学结构。合理设计光机结构, 加工装调实验样机。分辨率测试实验证明其实际物方分辨率可以达到 300 m 远分辨 4 mm 线宽。在斜拉桥工程现场成像实验表明该系统符合实际工程结构表面缺陷远程检测的要求。

关键词 光学设计; 高分辨率摄远物镜; 光学像差优化; 远程表面缺陷检测

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.101101

Optical System Design of High Definition Video Telephoto Objective and Its Imaging Experiment

Gao Xingyu^{1,2,3} Yu Daoyin¹ Long Yue² Xiao Zexin³¹School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China²Liuzhou OVM Mechatronics Incorporated Corporation, Liuzhou, Guangxi 545005, China³School of Mechatronics Engineering, Guilin University of Electronics Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract In order to satisfy the remote detection requirements for the surface defects on the cables of cable stayed bridges, an opto-mechanical system of a high definition video telephoto objective is designed and manufactured. According to the objective definition requirement of 4 mm at the distance of 300 m, the imaging definition of 234 cycle/mm with a focal length of 320 mm is determined. A proper initial configuration is chosen, and then some optimization procedures are carried out with the optics design program OSLO, including the focus zooming, glass exchanging, lens reduction, etc. Finally an optical configuration of the telephoto objective is obtained with the relative aperture of 1/5.7, the field angle of $2\omega=1.379^\circ$, and the definition of 250 cycle/mm. The opto-mechanical structures are designed rationally and the experimental objective is manufactured. The definition testifies that its actual objective definition reaches 4 mm at the distance of 300 m. The site imaging experiment results at the location of a cable stayed bridge show that this system satisfies the remote detection requirements for the surface defects on the real engineering structures.

Key words optical design; high definition telephoto objective; optical aberration optimization; remote detection of surface defects

OCIS codes 110.6770; 220.3620; 080.3620; 040.5160

1 引言

斜拉桥的拉索在运营过程中受外界环境的影响, 表面会逐渐出现裂纹、表皮脱落、锈蚀等质量问题, 需要对其进行及时的检测^[1-2]。目前桥梁表面缺陷检测方法主要有破损断裂性能评估^[2]、电测法^[3]、激光检测机器人检测^[4]、桥梁工程车检测、近距离牵引摄像头检测^[5]、光纤应变检测^[6]等, 但是这些方法都各自具有局限

收稿日期: 2014-05-05; 收到修改稿日期: 2014-05-12; 网络出版日期: 2014-09-03

作者简介: 高兴宇(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事先进光学成像技术及应用方面的研究。

E-mail: gxy1981@guet.edu.cn

性,在工程上使用并不普遍。将图像检测法引入桥梁检测领域是近年来的重点研究方向^[7-8],常用的有近距离采集图像法和远程视频检测两种方法。近距离检测需要将摄像头通过工程车或爬升机器人带到拉索表面进行图像采集^[6],检测速度较慢,效率低,且牵引机的轮子会损伤拉索表面。远程视频检测需要有高分辨率的摄远物镜来获取拉索表面裂纹图像,目前只有法国司忒结构监测公司的 Scansites 远程检测系统在实际工程中使用(<http://www.sites-china.com.cn>),但是成本较高。近年来国内对于摄远成像光学系统的设计研究比较多,但主要偏向于航空航天领域中反射式或红外光学系统的研究^[9-13],专门适用于斜拉桥拉索裂纹检测的高分辨率摄远光学系统研究不多,但这方面的需求非常广泛和迫切。

本文针对斜拉桥拉索表面缺陷远程检测对摄远光学系统高分辨率的要求,设计了高分辨率视频摄远物镜光学系统。根据物方分辨率和焦距,用高斯光学计算像方分辨率、视场角、相对孔径等基本光学参数,从文献中合适的光学结构作为初始结构;用光学设计软件 OSLO 进行像差优化设计,通过焦距缩放、减少镜片、更换玻璃等步骤逐步优化设计出符合要求的光学结构;将该摄远物镜加工调试后,进行了分辨率测试实验和工程现场成像实验,证明了该系统分辨率达到使用要求,可进行小批量试产。

2 高斯光学参数计算及初始结构选择

斜拉桥拉索上端固定在几十米至上百米高的索塔上,远程观测距离从几十米到上千米不等。由于拉索直径一般为 100~300 mm,为了提高分辨率,视场可以尽量减小,只要能看全拉索的直径即可。因此本视频摄远系统为小视场、高分辨率系统。分辨率为本摄远系统最重要的要求,其他光学参数的选择都要在满足分辨率设计要求的基础上再进行计算。实际斜拉桥工程检测中,要求能够至少在 300 m 外检测到 4 mm 宽度的裂缝或锈蚀点,根据图 1 中摄远物镜的高斯光学光路图,可以计算出摄远物镜的物方极限分辨角为

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\sigma}{-L}\right) = \arctan\frac{4}{300000} = 1.333 \times 10^{-5}, \quad (1)$$

式中 σ 为物方极限分辨率, $-L$ 为物距。选择摄远物镜的焦距 $f' = 320$ mm, 则其对应的像方分辨率为

$$\sigma' = f' \tan \varphi' = 320 \text{ mm} \times \frac{4}{300000} = 0.00427 \text{ mm} = 4.27 \mu\text{m}. \quad (2)$$

从调制传递函数(MTF)角度考虑,摄远物镜的极限分辨率应达到 $1000/4.27 = 234$ cycle/mm。考虑到实际镜头的镜片加工和装配误差会导致成像质量低于设计结果,为了保证有一定的分辨率余量,设计镜头时要使物镜像方 MTF 值在 250 cycle/mm 时达到 0.1。为了能够观测到拉索上尽可能细的裂纹,要求摄远物镜像方分辨率要与接收器的分辨率相匹配。根据奈斯特采样定理,光电接收器至少要两个像素才能分辨出 1 条线宽,像方接收器的像素最大不超过 $4.27 \mu\text{m} / 2 \approx 2.1 \mu\text{m}$ 。本文中采用像素为 $1.4 \mu\text{m}$ 的 1/2.3"、1400 万像素 CMOS 相机,其对角线长度为 7.7 mm,即像方视场为 $2y' = 7.7$ mm,视场角为 $\omega = y'/f' = 0.689^\circ$ 。

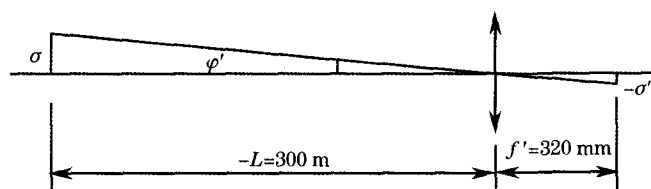


图 1 摄远物镜分辨率计算

Fig.1 Calculation of the definition for the telephoto objective

通过以上讨论,确定了望远系统基本光学参数,根据这些参数选择合适的初始结构。为了达到高分辨率要求,初始结构选择了文献[14]中焦距为 $f' = 1000$ mm 的摄远物镜,其光学结构参数如图 2 所示,像差曲线如图 3 所示。

由图 2~3 可以看出,该初始结构通光孔径为 $D = 80$ mm,相对孔径 $D/f' = 1/12.5$,其前组三胶合透镜为复消色差光组,中组 4 片透镜为中继光组,后组双胶合为负光焦度组,整体上为正-负-负光焦度组的典型摄远物镜结构组合。虽然初始结构像差比较大,但是该光学结构中使用了 3 片低折射率、低色散的氟冕玻璃 O_F_FPL53(1.43875, 94.99)材料,因而具有较好的像差优化的潜力,只要合理地优化结构参数,可以达到较好的设计结果。

Gen	Setup	wavelength	Field Points	Variables	Draw On	Group	Notes
Lens: No name		Zoom 1 of 1		Efl 1.0000e+03			
Ent beam radius		Field angle		0.229181 Primary wavln		0.58756	
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL		
OBJ	0.000000	2.5395e+21	1.0158e+19		AIR		
1	66.871049	9.472467	45.000000	K	N-LAK12	C	
2	52.502357	44.025388	45.000000		O_S-FPL53	C	
3	-112.562372	9.472467	40.000000		N-SK16	C	
4	-242.175186	28.618026	40.000000		AIR		
5	-348.762032	5.018122	30.000000		SF1	C	
6	1.5765e+03	8.057946	30.000000		AIR		
7	-59.359103	5.028280	25.000000		N-LAK10	C	
8	-346.542478	0.380930	25.000000		AIR		
9	78.616401	13.274152	25.000000		O_S-FPL53	C	
10	66.708519	2.773173	20.000000		AIR		
11	134.343969	4.764169	20.000000		SF1	C	
12	1.2402e+03	23.450071	20.000000	K	AIR		
AST	0.000000	70.050548	20.000000	AK	AIR		
14	-75.508010	3.715340	14.000000	K	N-LAK10	C	
15	79.012569	6.325983	14.000000	K	F5	C	
16	-87.883166	273.500000	14.000000	K	AIR		
TMS	0.000000	0.000000	4.021623	S			

图2 焦距为 $f'=1000$ mm的摄远物镜结构参数

Fig.2 Configuration parameters of the telephoto objective with $f'=1000$ mm

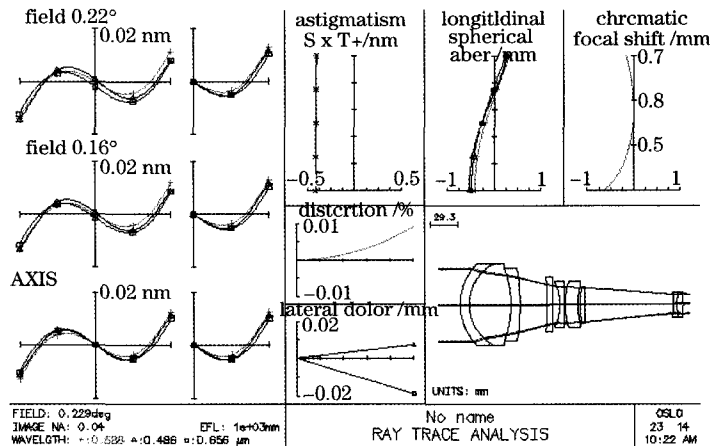


图3 焦距为 $f'=1000$ mm的摄远物镜像差曲线

Fig.3 Aberration curves of the telephoto objective with $f'=1000$ mm

3 像差优化设计结果

将图2的初始结构经过焦距缩放、更换玻璃、减少镜片等优化措施之后,最终设计结果的像差曲线如图4所示,图5为MTF曲线图。该结构焦距 $f'=320$ mm,通光孔径 $D=56$ mm,相对孔径 $D/f'=1/5.7$,机械筒长 $L=679.52$ mm。从图5可以看出中心视场和边缘视场MTF曲线基本重合,并且在分辨率为250 cycle/mm时MTF值为0.08,分辨率已经基本满足设计要求。

与初始结构相比,该结构有如下优点:1) 由原来的9片镜片减少为7片镜片,并且用较便宜的N-FK51(1.4865,84.47)和H-FK61(1.497,81.6)代替价格昂贵的O_F_FPL53,大大降低了成本;2) 原初始结构的第一组三胶合第二面由于曲率较大,使得通光口径较小,限制了相对孔径,优化后的结构没有大曲率的面,使得相对孔径由原来的1/12.5上升到1/5.7,提高了分辨率;3) 没有初始结构中组部分的太多的小间隙结构,在加工和装调时结构工艺性提高,装调难度降低。

4 光机结构设计

本项目的目的是开发高分辨率视频摄远物镜的实用化产品,合理的光机结构设计是保证光学设计结果在加工和装调之后能够达到使用要求的必要条件。基于该视频摄远物镜的光学结构和使用要求,光机结构设计需注意以下几个问题:1) 该物镜结构筒长达679.52 mm,由于光学透镜和机械零件的加工误差,其实际的最佳像面位置必然会比设计数据有所偏移,因此需要设计相机靶面的调焦装置;2) 为了减小杂散光的影响,在镜头前面要设计较长的遮光罩,长镜筒的内部要设计散光螺纹;3) 为了适应不同光照条件下的像面

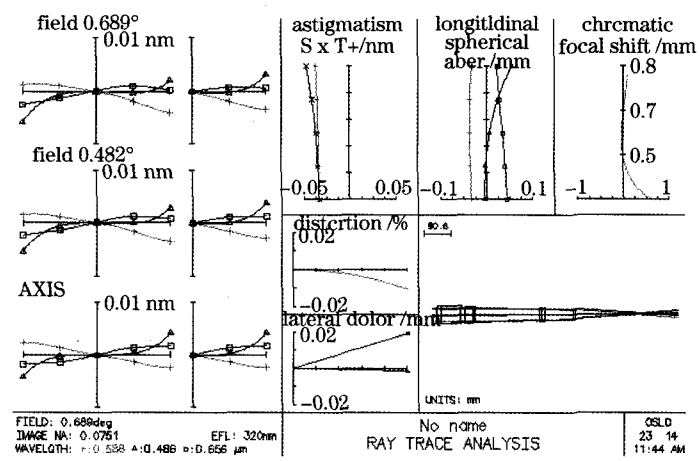


图4 摄远物镜最终优化结果像差曲线

Fig.4 Aberration curves of the telephoto objective after the final optimization

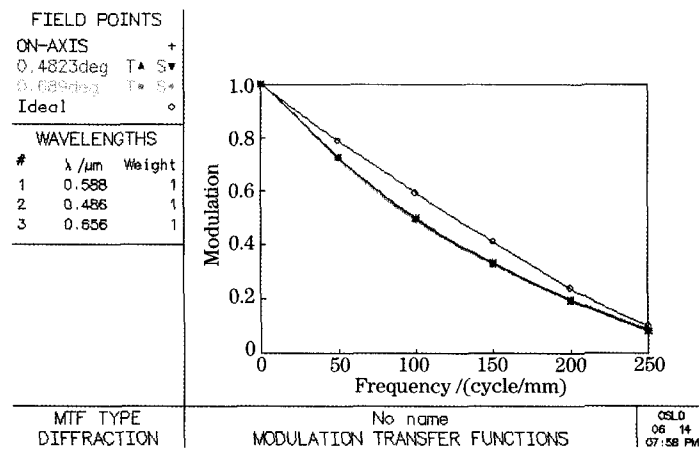


图5 摄远物镜最终优化结果MTF曲线

Fig.5 MTF curves of the telephoto objective after the final optimization

照度,需要使用可变光阑;4) 由于镜筒较长,装配最外面的镜片时为了使内部空气流出,需要在前筒侧壁打一个小通孔,否则内部气压会阻碍镜片装配。最后加工和装调完成的摄远物镜实物如图6所示。



图6 摄远物镜实物图

Fig.6 Picture of the telephoto objective

5 成像实验分析

5.1 成像分辨率实验

摄远物镜样机制作完成之后要对其进行成像实验,以验证其成像质量是否达到实际工程检测要求。首先是对成像分辨率进行测试。实验靶标为A4纸,上面绘制了线宽为3、4、5、6、8、10 mm共6组平行线,线间隔与线宽相等。将靶标放置于实验室对面宿舍楼的门上,经激光测距仪测量,物镜到靶标的距离为315 m,实验现场图片如图7(a)所示,摄远物镜获取的靶标图像如图7(b)所示。通过精确调焦、调节可变光阑和

CMOS相机的曝光时间,获得了能达到的最清晰的靶标图像。由图7可以看出可以清晰辨别5 mm以上的线宽,3 mm线宽则模糊不清,4 mm线宽可以勉强分辨出,因此本摄远物镜基本达到了在300 m以外4 mm分辨率的要求。

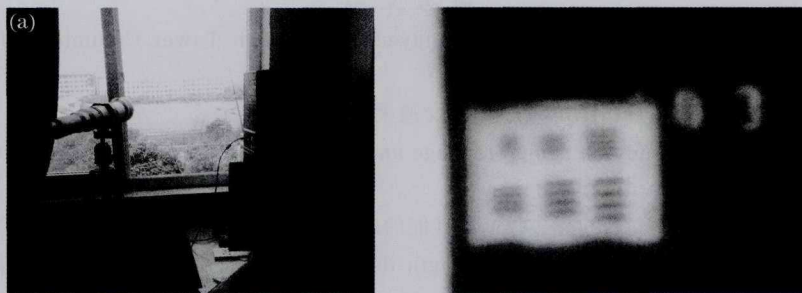


图7 摄远物镜成像分辨率实验。(a) 实验现场照片;(b) 对315 m远靶标成像

Fig.7 Definition test of the telephoto objective. (a) Photo of the experiment scene; (b) image of the target at the distance of 315 m

5.2 工程现场实验

为了验证该摄远物镜系统在工程现场的成像能否满足实际检测需求,到柳州壶西大桥进行了实地成像实验,图8(a)为壶西大桥全景。壶西大桥全长为517 m,为预应力混凝土独塔双索面斜拉桥,拉索主跨径为2×120 m,锁塔桥面以上高度为60 m。将摄远物镜放置于最外层拉索的底部,用激光测距仪测量索塔顶部距离约为140 m。图8(b)~(d)分别为使用设计的摄远物镜拍摄的索塔顶部、中部和距离90 m的拉索裂纹的图像。从图像中可以看出索塔顶部的裂纹都可清晰辨别,索塔中部细小裂纹都可以看清楚,拉索上的黑色裂纹也可以很清晰地看到。总体来说对于300 m以内的目标物体,该系统可以清晰分辨出4 mm大小的裂纹,这个距离基本能够满足大多数普通大桥、高楼、电视塔的检测要求。

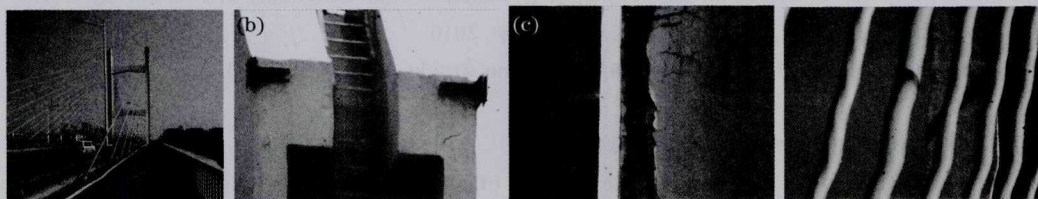


图8 柳州壶西大桥工程现场实验。(a) 壶西大桥全景图;(b) 距离观测点约140 m远的索塔顶部图像;(c) 距离观测点约120 m远的索塔中间表面裂纹图像;(d) 距离观测点约90 m远的拉索裂纹图像

Fig.8 Site experiment at the Huxi Bridge in Liuzhou. (a) Full view of the Huxi Bridge; (b) image of the top of the cable tower at a distance of about 140 m; (c) image of cracks at the middle of the cable tower at a distance of about 120 m; (d) image of crack point of a cable at a distance of about 90 m

通过工程现场实验,发现还有几个具体的问题需要解决:1) 室外环境光线对电脑屏幕观察的影响较大,必须给电脑屏幕较好的遮光措施才能看清屏幕;2) 桥梁振动对摄远物镜成像影响较大,图8(d)是由于桥梁振动引起的拉索摆动,而1400万像素CMOS相机的帧率较低,跟不上拉索摆动速度,所以使得拉索图像变形,需要更换帧率高的高分辨率相机来解决这个问题;3) 手动调焦装置在调焦时由于手的晃动会引起成像不稳定,使得调焦极难控制,需要设计镜头稳固装置使调焦不受轻微振动的影响;4) 要对摄远物镜进行防雨、防晒、防雾等抗环境干扰设计,以满足不同气象条件下的观测。项目下一步的工作就是要针对上述问题进行更实用化、商品化的设计,使系统真正满足工程结构表面质量缺陷实际检测的需要。

6 结 论

针对斜拉桥拉索表面质量缺陷的快速远程智能检测的需求,设计了一套高分辨率视频摄远物镜光学系统,并加工装配了摄远物镜实物,进行了分辨率检测实验和工程现场成像实验。设计结果和最终物镜实物都能够达到300 m外分辨4 mm线宽的分辨率要求,能够满足大多数中型工程结构远程检测的需求。该系统具有分辨率高、成本低、质量可靠、适用性广的优点,可部分代替进口同类产品,具有广泛的应用价值。项

目后续工作要继续完善系统的数字图像处理、自动化控制等软、硬件设计,针对具体工程环境改善应用性能,提高智能化水平,实现最终的产品定型。

参考文献

- 1 Deng Zhi. Survey and Analysis of Crack of Cable-Stayed Bridge High Tower Column[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
邓 智. 斜拉桥高达塔柱裂缝监测及分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- 2 Fan Hong, Ke Yong, Tang Tang. Study on cable breakage and fracture of long-span cable-stayed bridge[J]. Highway, 2010, (4): 164-169.
樊 鸿, 柯 勇, 唐 堂. 对大跨径斜拉桥拉索破损断裂性能的研究[J]. 公路, 2010, (4): 164-169.
- 3 Gao Shuling, Xu Shilang. Critical concrete crack length determination using strain gauges[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(9): 1432-1434.
高淑玲, 徐世焱. 电测法确定混凝土裂缝的临界长度[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(9): 1432-1434.
- 4 Yu Jiayong, Peng Wanghu, Zhu Jianjun, *et al.*. Research on the application of measurement robot to bridge inspection [J]. Central South Highway Engineering, 2007, 32(3): 33-36.
余加勇, 彭旺虎, 朱建军, 等. 测量机器人在大跨径桥梁检测中的应用研究[J]. 中南公路工程, 2007, 32(2): 33-36.
- 5 Zhao Qiang, Zhong Youming, Zhou Jianting. Remote crack monitoring system of bridge based on embedded technology and GPRS[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010, 29(5): 685-687.
赵 强, 钟佑明, 周建庭. 基于GPRS的嵌入式桥梁远程裂缝监测系统[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(5): 685-687.
- 6 Zhu Xinliang. Application of a High-Speed High-Precision Optical Sensor Technology in Bridge Monitoring[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
朱新亮. 一种高速高精度光纤传感技术在桥梁监测中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- 7 Song Pingli. Crack Detection of Bridge on Video Image[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
宋平丽. 基于视频图像的桥梁裂缝检测[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- 8 Xu Bing. A Study on the Bridge Diseases Inspection and the Cracks Measurement Based on the Imagery Processing Technology[D]. Xi'an: Chang'an University. 2009.
徐 兵. 基于图像处理技术的桥梁病害检查和裂缝测量研究[D]. 西安: 长安大学. 2009.
- 9 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen, *et al.*. Optical system design of space camera with large F number and long focal length [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2093-2097.
李旭阳, 李英才, 马 臻, 等. 大F数长焦距空间相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2093-2097.
- 10 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei, *et al.*. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. Acta Optica Sinica, 30(9): 2680-2683.
郭永祥, 李英才, 梁天梅, 等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. 光学学报, 30(9): 2680-2683.
- 11 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen, *et al.*. Optical system design of space camera with long focal length and correction of image distortion[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2657-2661.
李旭阳, 李英才, 马 臻, 等. 消畸变、长焦距相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2657-2661.
- 12 Liu Yingying, Pang Bo, Du Yunan, *et al.*. Optical design of athermalized infrared telephoto objective lens[J]. Semiconductor Optoelectron, 2013, 34(5): 858-862.
刘莹莹, 庞 博, 杜玉楠, 等. 红外无热化望远物镜设计[J]. 半导体光电, 2013, 34(5): 858-862.
- 13 Li Quanyong, Mu Meng, Mi Shilong. Design of infrared dual-band telephoto lens[J]. Journal of Changchun University of Science Technology (Natural Science), 2013, 36(6): 39-41.
李全勇, 牟 蒙, 米士隆. 双波段红外望远物镜设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 36(6): 39-41.
- 14 Milton Laikin. Lens Design [M]. 4th Edition, Zhou Haixian, Cheng Yunfang Transl.. Beijing: China Machine Press, 2009. 84-85.
弥尔顿, 莱克金. 光学系统设计[M]. 第四版, 周海宪, 程云芳译. 北京: 机械工业出版社, 2009. 84-85.