

doi:10.3788/gzxb20144303.0322003

一种可实现两档切换降落相机的镜头设计

吕娟, 杨建峰, 贺应红, 马小龙, 薛彬

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710126)

摘 要:设计了一种用于深空探测的新型宽视场多光谱降落相机,通过两档切换,实现了 1.5 m~+∞ 以及 30 cm 两档成像范围的目标探测.在 1.5 m~+∞ 档,能实现着陆器下降过程中对被测星体表面的全色成像;在 30 cm 档,采用蓝绿、红色以及近红外三个独立的发光二极管光源阵列分别对着陆后近距离目标进行照明,通过对采集到的多光谱图像进行处理,可实现目标组成成分的鉴定.取降落相机设计谱段 420~900 nm,方形视场 $49.5^\circ \times 49.5^\circ$, F 数 5.4,当目标距离为 1.5m~+∞ 时,焦距 f_1 为 12.9 mm;目标距离 30 cm 时,焦距 f_2 为 12.5 mm.系统中第一镜采用近似无光焦度的前置弯月透镜,利用镜片的开合完成不同成像范围的档位切换,使系统焦距在两档切换时变化不大,目标不易丢失.分析可知,镜头在 35 lp/mm 处,系统调制传递函数均达到 0.6 以上,成像质量接近衍射极限;全视场畸变优于 1.2%;第一镜倾斜、偏心公差设计合理.该设计解决了以往定焦降落相机在着陆后无法对近距离目标清晰成像的问题.

关键词:光学设计;深空探测;降落相机;两档切换;宽视场;全色成像;多光谱成像

中图分类号:P185

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)03-0322003-5

Optical Design of A two-way Switched Descend Camera

LÜ Juan, YANG Jian-feng, HE Ying-hong, MA Xiao-long, XUE Bin

(Xi'an Institute of Optics and Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710126, China)

Abstract: A new descent camera which used for deep space exploration was designed. This camera can explore different distance targets by opening and closing the first optical lens. With the first optical lens in the optical path, the objective was focused for objects at distances ranging from 1.5 m to infinity. In this mode, the camera can take full-color pictures (spectral bandwidth 420~900 nm) of the cytaster surface. With it removed, the camera was focused at an object distance of 30 cm. In this mode, three lights of different wavelengths which were blue-green, red, and NIR were used independently to illuminate the close range objects and the camera can take multispectral pictures of the explored objects. This camera have a focal ratio $f/5.4$ and project a square field of view $49.5^\circ \times 49.5^\circ$ on the CCD. When at the infinity mode (with the first optical lens), the focal length is 12.9 mm and when at the close-up mode (without the first optical lens), the focal length is 12.5 mm. The first optical lens of the descent camera is a meniscus lens and it almost have no focal power. So the system focal changes lightly no matter with or without this lens. By this way, the drawback of a traditional two-way switch system that detected objects easily be lost when modes shift can be easily overcome. The design result show that the Modulation Transfer Function is higher than 0.6 in full-field at 35 lp/mm. The distortion of the system in full-field is better than 1.2%. Tilt and decenter tolerance of the first lens also have a reasonable result.

Key words: Optical design; Deep space exploration; Descend camera; Two-way switch; Wide field of view; Full-color image; Multispectral image

OCIS Codes: 220.0220; 220.1000; 220.3620; 300.0300; 300.3700

基金项目:国家重大专项嫦娥三号工程项目资助

第一作者:吕娟(1986-),女,助研,硕士,主要研究方向为空间光学及成像光学系统设计. Email:lvjuan_24_cathy@163.com

收稿日期:2013-07-08;录用日期:2013-10-10

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

降落相机是着陆器降落过程获取降落图像的主要传感器,一般要求其具有重量小、视场大、成像范围广等特点,在着陆器下降选址及避障过程中发挥重要作用^[1~3]. 国内外对于降落相机的设计及应用有很多:火星探测好奇号着陆器上的火星降落相机(Mars Descent Imager, MARDI),成像范围约 4.5 m~+∞,焦距 9.7 mm, F 数 3.0,视场角 90°,谱段范围 420~700 nm^[4],系统采用七片式定焦装置,用以获取环境地形的全彩图像;国内 508 研究所设计的月球探测降落相机,光谱范围 500~800 nm^[5],成像范围 4 m~+∞,焦距 14.8 mm,设计视场 45°×45°. 这些降落相机均能实现着陆器下降过程中,对地表环境的宽视场成像. 但着陆器着陆后,降落相机窗口玻璃距离被测星体表面的距离只有 30 cm 左右,这时由于目标距离太近,降落相机失去对焦功能,对于没有调焦机构的光学系统而言,不能对近距离目标清晰成像.

鉴于降落相机着陆后便失去用途的弊端,本文设计了一种新型宽视场多光谱降落相机. 相机设计中没有采用复杂的调焦机构,而是将光学系统的第一片设计成近似无光焦度的弯月透镜,利用此镜片的开合切换,实现 1.5 m~+∞以及 30 cm 两档成像范围的目标探测. 该相机既能实现着陆过程对被测星体表面的全色成像,又能在着陆后,通过不同波段光源的照明,对近距离目标进行多光谱成像;不但能获取近距离目标图像信息,还可获得其光谱信息^[6],实现探测目标的成分测定等. 对于减轻着陆器重量,实现一机多用等目标具有重要意义.

1 降落相机光学系统设计

1.1 系统设计指标

降落相机选用型号为 TH7888A 的电荷耦合器件图像传感器(Charge-Coupled Device, CCD)作为探测器,其光敏区像元数 1 024×1 024,像元尺寸为 14×14 μm². 此相机能实现 30 cm(Close-up mode)以及 1.5 m~+∞(Infinity mode)两档探测范围内清晰成像,光学系统的设计指标如表 1.

表 1 光学设计参量

Table 1 Optical design parameter

	Close-up (30 cm) mode	Infinity (1.5 m~+∞) mode
Spectral range	420~900 nm	420~900 nm
Field of view	70°(49.5°×49.5°)	70°(49.5°×49.5°)
Aperture	$f/5.4$	$f/5.4$
Focal length	12.5 mm	12.9 mm
Optics length	19.4 mm	24.7 mm

1.2 光源波段选择

在降落过程中,由于太阳光对地表的照射,着陆相机不需要额外光源提供照明,即可得到被测目标的全色图像(波段范围 420~900 nm). 降落相机着陆后,由于着陆器对于太阳光的遮挡,近距离被测目标漆黑一片,为了照亮视场内目标,需要外部光源开启进行照明. 光源的波段选择,一般根据探测星体表面的物质构成成分而定. 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space, NASA)于 2005 年发射的火星勘测轨道飞行器,携带了一台高分辨率成像科学系统,这台摄影机在同一地点可分别摄取三种不同频段的目标影像. 三种照明光源的波段范围分别为蓝绿频段、红色频段以及近红外频段,其峰值波长如表 2^[7].

表 2 HiRISE 光源各波段的峰值波长

Table 2 Light source's peak wave length at each band

Filter	Central wavelength/nm
Red	694
Blue-green	536
NIR	874

针对火星表面存在的各种矿物质(如火山灰成分玄武凝灰岩,固定成分火山岩辉石,水铁矿、赤铁矿等可变成分),参考美国国家勘探局(United States Geological Survey, USGS)光谱数据库提供的矿物光谱数据^[8],通过分析可得到火星表面不同矿物质的光谱响应,如图 1 所示. 图中纵坐标代表近红外与蓝绿谱段的响应比值,横坐标代表蓝绿谱段与红色谱段的响应比值(与各谱段光源强度以及探测器响应曲线有关),右侧为火星表面典型矿物质成分.

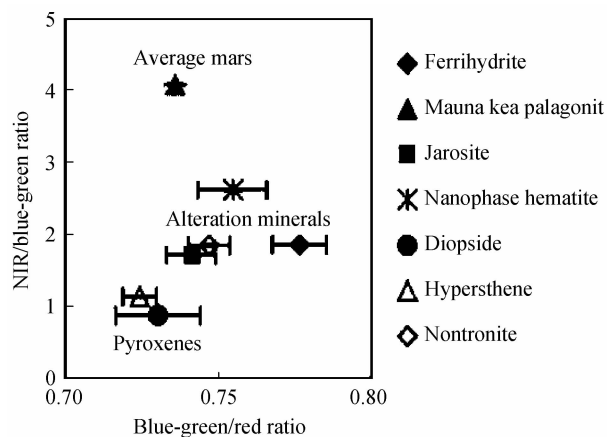


图 1 火星表面不同矿物质各谱段光谱响应

Fig. 1 Different optical spectrum response in Mars surface of different minerals

根据火星勘测轨道飞行器上成像系统的光谱分析,本系统可采用蓝绿、红色以及近红外三个独立的发光二极管(Light Emitting Diode, LED)光源阵列,分别对被测星体表面进行照明并成像,可实现不使用滤光轮分光的情况下,分析得到被测星体的空间及所需光

谱信息.通过对被测物质各波段的光谱响应比进行分析(需排除光源辐射能量以及探测器各波段响应差异),根据美国国家勘探局提供的光谱数据库信息,可初步得出被测星体的主要物质组成成分.

1.3 结构选型

对于航天相机而言,其关键技术是体积小、结构紧凑、成像质量好,如何解决结构紧凑与成像质量的矛盾,是设计能否成功的关键之一^[9].对于宽视场短焦镜头而言,畸变控制、焦平面光通量、照度均匀性是镜头好坏的重要评判标准.考虑到以上几点,设计中排除了反射式以及折反式结构,因为随着视场的增大,反射式系统的遮拦比随之增加,系统光通量下降.与此同时,为了保证航天相机的抗辐照特性,所有镜头玻璃需采用耐辐射玻璃,特别是第一镜,应采用航天材料选用目录内的抗辐照石英玻璃^[10].

针对宽视场、短焦距折射式光学镜头设计,一般采用几种光学形式,如天塞型、反远距型、双高斯系统等.天塞型结构简单、重量低,中心锐度高,但边缘成像质量较差;反远距型具有超广角、短焦、后截距长等特点,但系统体积较大;双高斯型具有结构紧凑、畸变小、系统象差低且 F 数大等优点,适合于航天相机的设计应用^[11].

设计基于霍洛刚(Hologon)结构,采用Hologon双高斯改进型,系统光阑放置于两片胶合的凸透镜中间,两边采用弯月透镜组成.当着陆器开始降落,被测星体距离降落相机 $1.5\text{ m}\sim+\infty$ 时,镜头采用四片式结构,第一片选用具有耐辐射能力的石英玻璃,此时可对被测星体成像,在蔽障及选址过程中起到作用.当着陆器降落后,相机如没有自动对焦功能,则无法对近距离目标清晰成像.如在相机中设计对焦机构,不仅需要结构精密的调焦组件,相机的重量也会增加.

为了近距离清晰成像,本文采用打开第一片石英透镜的方法,使系统由四片变成三片式结构,主面向前移动,近距离目标在像面处可清晰成像,其示意图如图2.

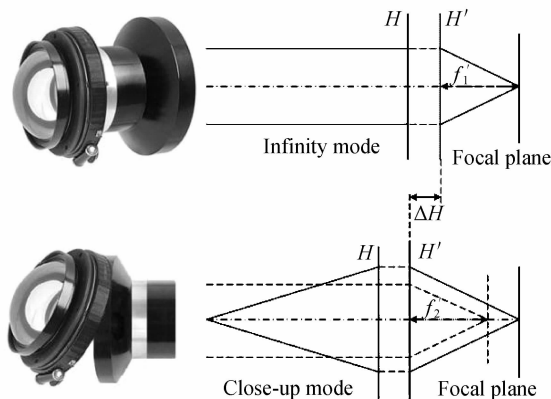


图2 主面移动示意图

Fig. 2 Diagram of the moving process of primary plane

石英镜片闭合状态时,系统对无穷远清晰成像,焦距 f_1 ;石英镜片打开后,相机的主面 HH' 前移(远离焦平面),系统焦距由 f_1 变成 f_2 .根据高斯物像关系公式,系统后截距不变,物距为 30 cm 目标恰好能在原始焦面位置处清晰成像.

为使探测过程中目标不易丢失(放大倍率 M 近似不变),根据公式: $M = \frac{f' - l'}{f}$ ^[12],当物距一定时,要求镜片开合时焦距 f' 几乎不变,为此,第一片透镜可选用近似无光焦度的弯月透镜.

对于大视场和大相对孔径的光学系统,妨碍视场增大的主要象差之一是场曲.因此,采用正负透镜分离、弯月厚透镜,可有效消除场曲.同时,将光阑处透镜变为胶合透镜,选用色散差异大的两种玻璃可有效消色差,并补偿系统球差.设计时,将多数折射面弯向光阑,采用同心原则,可使象差便于校正.为了防止出现明显的晕斑,光学系统的最后一面应背向CCD^[13].具体设计结果如图3所示.图3中,第一镜闭合表示目标范围 $1.5\text{ m}\sim+\infty$ 时的光学结构,第一镜打开表示目标范围 300 mm 时的设计结果.

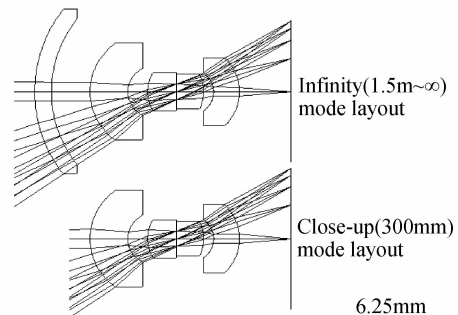


图3 光学系统设计图

Fig. 3 Optical system design

1.4 像质评价

大视场、大像差系统,可用调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)来对其评价成像质量.由于TH7888A型号CCD探测器的像元尺寸为 $14 \times 14\ \mu\text{m}^2$,可知光学系统的奈奎斯特频率为 35 lp/mm .对于定焦光学系统,不同目标距离的实际像面的离焦量略有不同.为满足在 $1.5\text{ m}\sim+\infty$ 都有好的成像质量,参考美国火星车上全景相机(Panoramic Camera, Pancam)最佳像面对应像距^[14],最后选定成像距离 4 m 处为最佳焦面位置.图4、图5为像距 4 m 及 $+\infty$ 时系统MTF.

图6为像距 30 cm 时光学系统MTF,设计结果表明,两种成像系统MTF在 35 lp/mm 处均达到 0.6 以上,系统像质接近衍射极限.图7为系统象差曲线,从图中可看出,光学系统的全视场畸变小于 1.2% ,此畸变对于降落相机图像采集无影响,且可通过图像处理

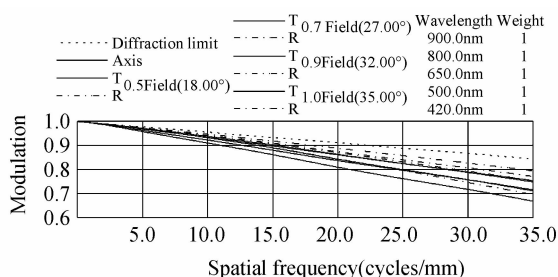


图 4 成像距离 4 m 处光学系统 MTF 曲线
Fig. 4 MTF at 4 m object distance

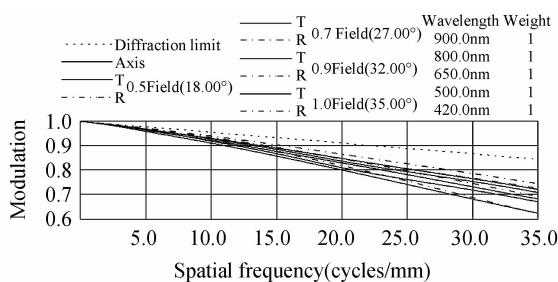


图 5 成像距离 $+\infty$ 处光学系统 MTF 曲线
Fig. 5 MTF at $+\infty$ object distance

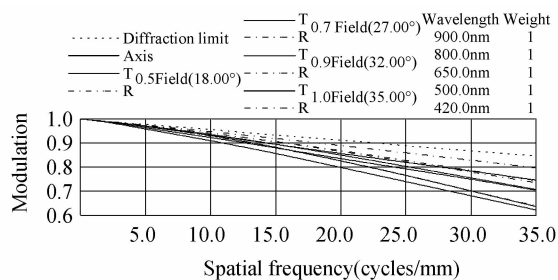


图 6 成像距离 30 cm 处光学系统 MTF 曲线
Fig. 6 MTF at 30 cm object distance

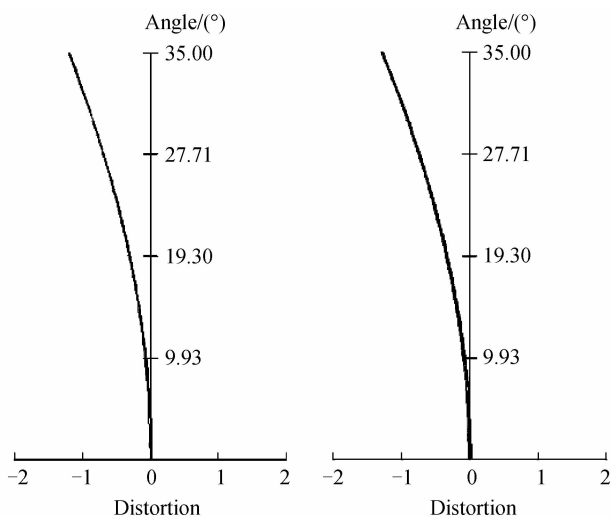


图 7 光学系统像差曲线

Fig. 7 Optical aberration of the two systems

来校正.图 8,图 9 分别为像距 $+\infty$ 和 30 cm 时能量集中度结果.横坐标为以像元中心为参考点的半宽,纵坐标为方形像元面积内包括的能量比值.相机选用 CCD 像元直径为 $14 \mu\text{m}$,可知在其像元面积内能量集中度均

大于 80%.光学系统成像质量良好.

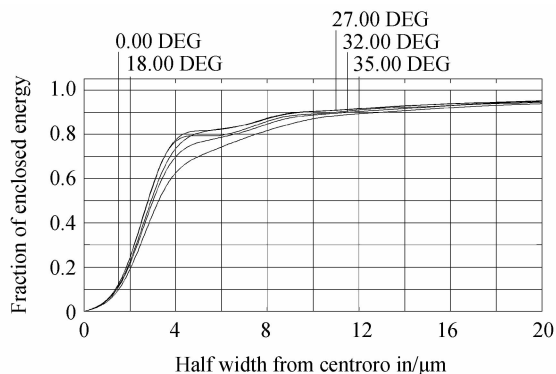


图 8 像距 $+\infty$ 时系统能量集中度示意图

Fig. 8 Diagram of energy concentration at too object distance

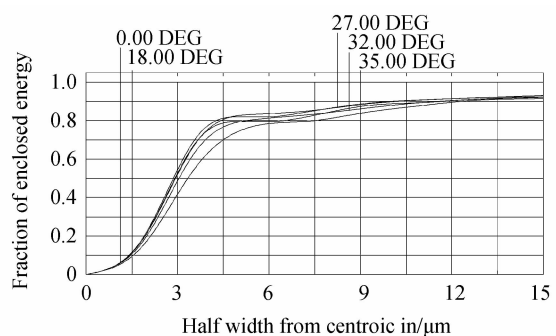


图 9 像距 30 cm 时系统能量集中度示意图

Fig. 9 Diagram of energy concentration at 30 cm object distance

由于降落相机的第一片镜片采用开合式结构,若此镜相对于系统光轴的偏心、倾斜公差过紧,将导致加工装配过程的难度加大;公差过紧还将导致相机复位准确度不能满足设计要求,系统重复开合后成像质量下降等问题.设计中采用后焦面作为系统补偿,经过公差分析发现,由于第一镜采用近似无光焦度的弯月透镜,光学系统对于此片透镜的同心度和倾斜度要求较为宽松.当同心度要求 $\leq 1 \text{ mm}$ 、倾斜度要求 $\leq 0.4 \text{ rad}$ 时,通过焦面补偿后系统传递函数基本无变化.因此,镜头的公差宽松^[15],能满足第一镜重复开合对于复位准确度的要求.

2 结论

本文设计了一种新型的用于深空探测的降落相机,此相机利用第一片石英弯月形窗口玻璃的开合,实现 $1.5 \text{ m} \sim +\infty$ 以及 30 cm 两档成像范围的目标探测,对于着陆器降落过程的实时监控以及着陆后近距离目标的物质组成测定具有重要意义.解决了以往定焦降落相机在着陆后无法对近距离探测目标清晰成像的问题.在两档切换过程中,系统焦距变化不大,这样能防止探测目标丢失,可实现对选定目标的连续性探测.此相机的设计,对于减轻着陆器重量,实现一机多用等目标具有重要意义.

参考文献

- [1] WANG Hai-tao, HUANG Qiao-lin, JIANG Wan-song. Parameter design of descend camera on mars lander [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, **31**(3): 27-33. 王海涛,黄巧林,蒋万松. 火星着陆器降落相机参量设计[J]. *航天返回及遥感*, 2010, **31**(3): 27-33.
- [2] YUE Zong-yu, DI Kai-chang. Mars curiosity rover and its characteristics[J]. *Spacecraft Engineering*, 2012, **21**(5): 110-116. 岳宗玉,邸凯昌. 好奇号巡视器及其特点分析[J]. *航天器工程*, 2012, **21**(5): 110-116.
- [3] HALLOCK G S, HAGEROTT E C, SCHERR L M, *et al.* Optical designs for the mars' 03 rover cameras [DB/OL]. [2011-12-15]. <http://spiedl.org/terms.htm>.
- [4] GHAEMI F T. Design and fabrication of lenses for the color science cameras aboard the Mars Science Laboratory rover[J]. *Optical Engineering*, 2009, **48**(10): 0091-3286.
- [5] YUE Tao, ZHANG Hong-wei, HUANG Chang-ning, *et al.* The application of chang' E-2 CMOS camera technologies[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, **32**(2): 12-17. 岳涛,张宏伟,黄长宁,等. “嫦娥二号”卫星 CMOS 相机技术及应用[J]. *航天返回及遥感*, 2011, **32**(2): 12-17.
- [6] SUN Xin, BAI Jia-guang, WANG Zhong-hou, *et al.* An optical system design of aircraft carried multispectral camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3160-3164. 孙鑫,白加光,王忠厚,等. 一种机载多光谱相机的光学系统设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(12): 3160-3164.
- [7] MCEWEN A S, ELIASON E M, BERGSTROM J W, *et al.* Mars reconnaissance orbiter's high resolution imaging science experiment (HiRISE)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: 1-40.
- [8] CLARK R N, SWAYZE G A, WISE R. USGS digital spectral library [DB/OL]. [2007]. <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06.htm>.
- [9] HE Ying-hong, MA Zhen, ZHAO Bao-chang, *et al.* Optical system design of space sensor with two long focal length lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3027-3033. 贺应红,马臻,赵葆常,等. 实现两档长焦距的空间遥感光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 3027-3033.
- [10] YAN A-qi, ZHU Qing, CAO Jian-zhong, *et al.* Space optical system with large field of view and high resolution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 1975-1977. 闫阿奇,祝青,曹剑中,等. 用于航天的高分辨率大视场光学系统设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(10): 1975-1977.
- [11] 莱金. 光学系统设计[M]. 周海宪,程云芳,译. 4版. 北京: 机械工程出版社, 2009: 48-168.
- [12] 张以谟. 应用光学[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2010: 37-39.
- [13] CHANG Ling-ying, ZHAO Bao-chang, YANG Jian-feng, *et al.* Optical system design of space three-dimensional photographic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 539-541. 常凌颖,赵葆常,杨建峰,等. 用于航天立体摄影测量的光学系统设计[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 539-541.
- [14] BELL J F, SQUYRESS W, HERKENHOFFK E, *et al.* Mars exploration rover athena panoramic camera (pancam) investigation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**: 1-30.
- [15] 刘钧,高明,光学设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 266-274.