文章编号 2095-1531(2014)06-0942-07

激光接收与彩色电视共窗口设计

张学明
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春,130033)

摘要:介绍了激光接收和彩色电视共窗口的多波段光谱融合技术。采用一个焦距为20~450 mm的连续变焦距镜头(视场角在13.68°×10.26°~0.61°×0.46°内连续变化),在会聚光或平行光的条件下,采用立方棱镜或平板玻璃分光,分别进行了对比试验。结果显示,使用会聚光下的立方棱镜分光,在大视场13.68°×10.26°的情况下,光线入射角最大,色偏移严重,图像颜色严重失真。随着视场角的减小,光线入射角减小,图像颜色失真程度逐渐减小,越接近小视场0.61°×0.46°,图像颜色失真现象基本消失;而使用平板玻璃对平行光分光的条件下分光,连续变焦距镜头在整个视场范围内,不仅光学像差满足要求,同时解决了棱镜分光的色偏移问题,图像颜色正常,在空间尺寸苛刻的情况下,彩色电视光学系统MTF在108 lp/mm时达到了0.3,设计结果满足工程应用要求。

关 键 词:分光镜;多波段光谱;共窗口融合;色偏移;像差
中图分类号:TP394.1; TH691.9 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20140706.0942

Optical design of laser receiving and color TV confocal-window

ZHANG Xue-ming
(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zxm5399520@sina.com*

Abstract: This paper introduces the multi-band spectral fusion technology of laser receiving and color TV confocal-window. A continuous zoom lens with focal length of 20-450 mm and angel of vision from 13.68°×10.26°~0.61°×0.46° is adopted. Under the condition of concentrated or parallel light, the contrast tests are implemented respectively using cubic prism or flat glass to separate light. Results show that when using cubic prism under concentrated light in the big angel of vision of 13.68°×10.26°, with the biggest light incident angle, serious color deviation and image color distortion occur. With the decrease of angel of vision and light incident angle, the degree of image color distortion declines, and almost disappears when getting closed to the small angel of view of 0.61°×0.46° gradually. However, under the condition of using flat glass and parallel light to separate light, continuous zoom lens can not only meet the requirement of optical aberration in the whole range field of view, but also solve the color deviation problem occurred in cubic prism, which shows

收稿日期:2014-10-09;**修订日期**:2014-11-11
基金项目:中科院长春光机所创新工程资助项目(No. Y3CX1SS14L)

a regular image color. Under the restrict limitation of room size, the MTF of color TV optical system reaches 0. 3 at 108 lp/mm and the design result meets the requirement of engineering application.

Key words: spectroscope; multi-band spectrum; confocal-window fusion; color deviation; image deviation

1　引　言

独立光路光学系统[1-11]已经不能满足多种领域的应用要求,对此多种形式的共光路光学系统的应用日趋广泛。如同一波段共光路光学系统[12-14],是将同一波长的两路光通过共光路光学系统设计,实现了各种参数的测量(如磁头间隙、表面粗糙度及长度的测量等)。对于成像光学系统,不同波段共光路光学系统[18-21],能满足两种或多种波段的光在共光路光学系统中各自实现对目标的成像及探测。双波段红外共光路光学系统的设计[18-19],能满足两种不同的红外波段在共光路光学系统中各自实现对目标的成像,可见光及红外波段的共光路光学系统[20]、甚至三波段(可见光、激光、红外)共光路光学系统[21]也得到了应用。

共光路光学系统均为共窗口光学系统或是共窗口、共用光学元件的光学系统,[18-21]均为黑白成像光学系统,没有讨论彩色成像系统共光路。由于采用分光技术会带来色偏移,而独立窗口光学系统[1-11]无需引入分光技术,不存在色偏移问题。如果不同波段的光谱入射到同一窗口或共用透镜组,就需要采用分光技术分离不同波段的光谱,并经过不同的光学系统,传输到不同用途的探测器上。分光技术使用的分光镜不外乎平板玻璃分光和棱镜分光,通常需光线在45°入射角的条件下使用分光镜,以获得相互垂直的反射光与透射光。由于像散及偏振的影响,这两种分光形式差别很大,使用平板分光像差不能忽视,而使用棱镜分光虽然解决了像差问题,但其色散影响也是不容忽视的[15-17]。

在紧凑型的光电设备中,采用多光谱共窗口光学系统设计很有必要,本文采用了连续变焦距光学系统进行试验,使用激光波段与可见光波段共窗口光学设计,实现激光波段的探测与可见光彩色电视对目标的成像技术。这里分别对棱镜分光及平板玻璃分光对彩色成像颜色失真的影响及像差影响进行分析与验证,提出了合理的共窗口光学设计方案。

2　光学系统设计

受体积和空间的限制,在满足像差和彩色电视图像颜色不失真的情况下,设计一个焦距为20~450 mm的连续变焦距镜头(视场角在13.68°×10.26°~0.61°×0.46°范围内连续变化),实现可见光波段(0.4~0.7 μm)与激光波段(波长为1.06 μm)的光学系统共窗口设计,光学系统的主要技术指标需满足:

$D/f \geqslant 1:6.5$;

MTF@108 lp/mm ≥ 0.25;

畸变≤4%。

2.1　平板分光与棱镜分光

对于一个共窗口设计的光学系统,需采用分光技术,对不同波段的光进行分光。分光形式有两种,一是平板分光,二是棱镜分光,如图1所示。

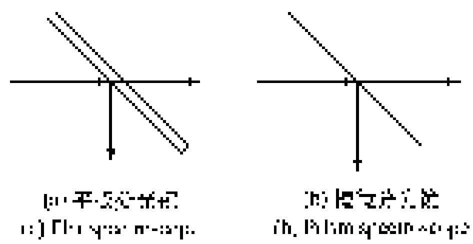

图1　两种分光形式

Fig. 1　Two forms of light split

如图1所示,采用了以45°角入射光线形式。从像差的角度考虑:平板分光和棱镜分光时,产生的像散为:

$$S = \frac{1-n^2}{n^3} d\theta^2 \theta_p^2, \tag{1}$$

式中，n 为玻璃折射率，d 为玻璃厚度，θ 为轴上光线入射角，θ_p 为轴外光线入射角。

当平板玻璃或棱镜应用在平行光路分光时，$\theta=0$，$\theta_p\neq0$，则 $S=0$，平板分光或棱镜分光都不会产生像散；

当平板玻璃或棱镜应用在会聚光路分光时，$\theta\neq0$，$\theta_p\neq0$，则 $S\neq0$，平板分光或棱镜分光都会产生像散。

光线入射后既可以在平行光路分光，也可以在会聚光路分光，物镜前面为平行光，物镜后面则为会聚光，可以在物镜前或物镜后置于分光镜实现分光。

当平板用于会聚光路分光时，考虑到平板倾斜后，入射角度变大，会产生较大像散，从而降低系统成像质量，对此利用两块倾斜平板，分别沿 X、Y 两个不同方向倾斜，前者用于分光，后者用于消除垂直方向产生的像散，通过两块平板后的像点没有像散，但这种结构工艺上调整比较困难，未被采纳。

从镀膜的角度考虑：与平板分光相比，棱镜分光会产生强烈的偏振。特别是用于会聚光路分光时，会产生严重的色偏移，即随着入射角度的变化，分光特性的偏振程度发生变化，严重影响彩色成像效果。表现为对固定景物成像时，会造成颜色变调、失真，形成一条彩带。在对运动景物成像时，会造成同一景物因成像角度不同而呈现不同颜色。

立方棱镜分光的另一个缺点是不如平板分光的反射率大，对于 0.4～0.7 μm 和 1.060 μm 波长的光，平板玻璃的反射率达 90% 以上，而立方棱镜分光的反射率只在 55% 左右，反射率较低。

2.2 两种分光的设计

根据上述分析可知，由于平板玻璃与棱镜分光具有不同的特性，对两种分光系统分别进行设计，并试验验证。

2.2.1 立方棱镜分光光学系统设计

对于彩色电视成像与激光接收共窗口的设计，采用立方棱镜分光时，立方棱镜置于物镜后方。如果立方棱镜置于物镜前方，由于镀膜的影响，会产生偏振和色偏移，反而增大了设计体积，所以采用后置棱镜的方案。

可见光与近红外激光入射到窗口，经物镜会聚后，入射到棱镜的反射面。可见光透射后经成像光学系统在 CCD 靶面成像，激光经棱镜反射后会聚到探测器接收。

如图 2 所示，激光与可见光经物镜 1 会聚后，经立方棱镜 2 分光，可见光直接透射，经过变倍补偿组 3 及反射镜 4 一次反射，再经过后固定调焦组 5 成像后及二次反射镜 6 反射，最后入射到探测器 CCD 靶面上成像。

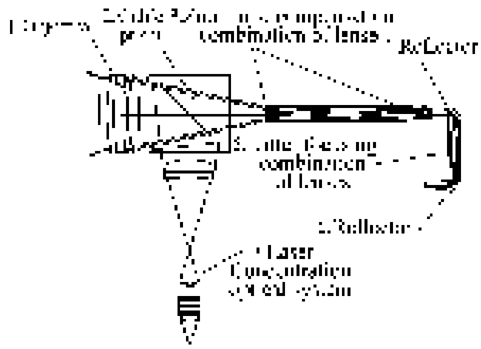

图 2 立方棱镜分光光学系统

Fig. 2 Cubic prism spectroscopic optical system

2.2.2 平板分光光学系统设计

由于平板玻璃在会聚光分光时，存在像差大的问题，需要另一平板玻璃补偿像差，这部分设计、装调较复杂。这里将平板玻璃置于物镜前方，平板玻璃厚度为 10 mm，镀半透膜，可见光波段透射，激光波长全反射。对于平板玻璃用于平行光分光，光学系统设计如图 3 所示。

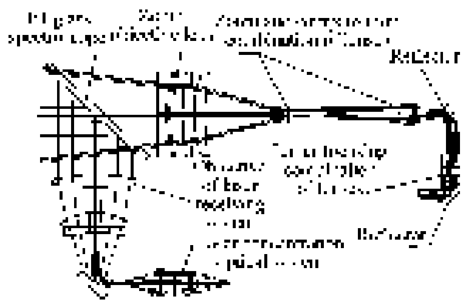

图 3 平板玻璃分光光学系统

Fig. 3 Flat glass spectroscopic optical system

图 3 中激光与可见光波段平行光谱入射到平板玻璃上,可见光直接透射,经物镜 2 会聚,会聚后的可见光经变倍补偿组后及一次反射镜 4 反射,再经过后固定调焦组透镜 5 成像及二次反射镜 6 反射,最后在探测器 CCD 靶面上成像,实现对景物的成像。

激光波长则经平板玻璃 1 反射,再经过物镜 7 及激光会聚光学系统 8,将激光光斑会聚到激光探测器上。为了缩小光学系统的体积,采用折返式光路设计。

2.2.3　平板分光光学系统设计结果

根据理论分析结果,由于棱镜分光具有色散特性,应用于彩色成像系统具有严重的局限性,因此,本文重点讨论平板玻璃分光光学系统的设计。

图 4 为平板玻璃分光光学系统在长焦位置的传递函数(MTF)曲线。

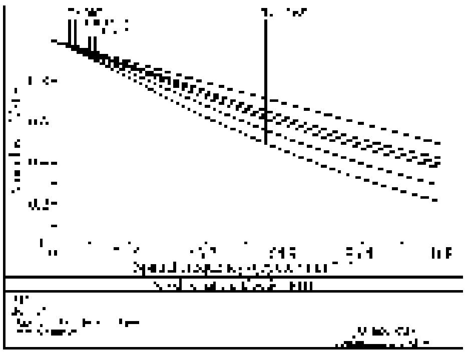

图 4　长焦位置传递函数曲线

Fig. 4　MTF curves on long focus position

在空间尺寸有限的情况下,图 4 为连续变焦距镜头中长焦位置 MTF 曲线,从图中可以看出,中心波长 MTF 在108 lp/mm处能够达到 0.3 的较高水平。

图 5 为变焦距镜头使用平板玻璃分光在长焦位置能量点列图,光斑能量集中。

图 6 是变焦距镜头使用平板分光在短焦位置的 MTF 曲线,中心波长 MTF 在108 lp/mm处同样能够达到 0.3 的较高水平。

图 7 是平板分光在短焦位置的 MTF 曲线点列图,光斑能量集中。

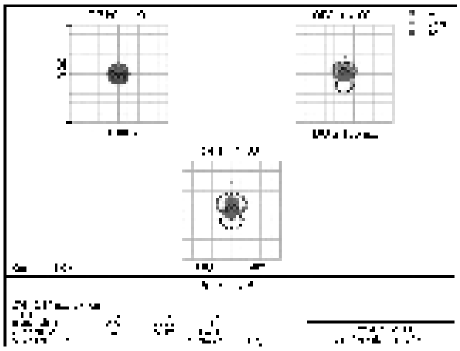

图 5　长焦位置点列图

Fig. 5　Spot diagram on long focus position

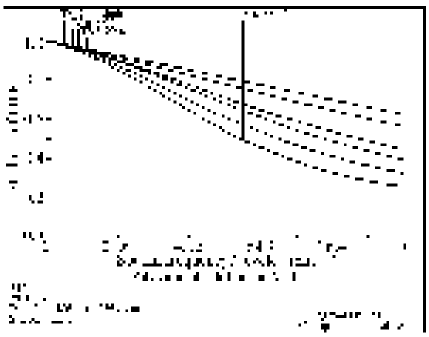

图 6　短焦位置传递函数曲线

Fig. 6　MTF curves on short focal length position

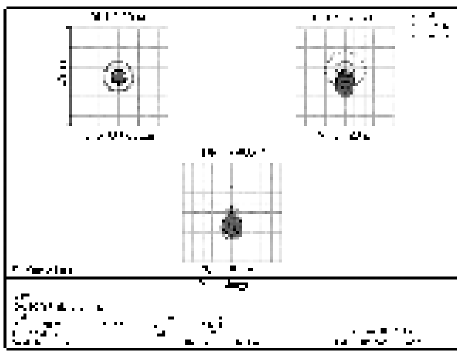

图 7　短焦位置点列图

Fig. 7　Spot diagram on short focal length position

3　结果与讨论

文中从理论上分析、讨论了棱镜分光及平板玻璃分光特性,依据两种分光系统的设计,做了相

应的对比性试验。实验中,彩色CCD成像探测器用于视场角在13.68°×10.26°~0.61°×0.46°范围内的连续变焦距镜头。图8是连续变焦镜头在视场角度在13.68°×10.26°的成像效果图,图像颜色偏红,严重失真。试验结果还表明,随着变焦距镜头的视场角度逐渐减小,图像颜色失真现象逐渐减轻,直到最终消失,这种现象完全符合棱镜分光的偏振特性,即随着光线入射角度的变化引起的棱镜色偏移严重程度发生变化。

图8 立方棱镜分光光学系统大视场成像

Fig. 8 Large FOV imaging with cubic prism spectroscopic optical system

由于平板玻璃在会聚光路分光存在严重像散,所以对平板玻璃在平行光路分光进行了实验,图9是平板分光大视场成像效果图,图像清晰,也无色散现象,不仅如此,而且在连续变焦距镜头的整个视场范围内图像清晰、无颜色失真现象。

图9 平板分光光学系统成像

Fig. 9 Imaging with flat glass spectroscopic optical system

从实验结果可以看出,对于共光路系统的设计,尤其彩色成像光学系统的设计,不仅要考虑分光镜的像散现象,还要充分考虑分光镜的色偏移现象。平板置于平行光路分光,能够很好地解决这些问题。

对于激光接收系统,不存在像散与颜色失真问题,设计较简单。在调整光学系统的时候,则需要激光光轴与连续变焦距系统光轴的不平行度满足在1′的范围内即可。图3的设计虽然解决了像散和色偏移现象,与图2的设计比较,缺点是系统长度需要加长。

在空间尺寸有限的情况下,图3光学系统的指标如表1所示,设计结果满足要求。

表1 设计结果

Tab. 1 Design result

项目	指标	指标完成情况
焦距	20~450 mm	20~450 mm
相对孔径	1:6.5	1:6.3
MTF@108 lp/mm	0.4	0.3
畸变	4%	3%

4 结 论

为了实现激光接收与彩色电视共窗口的光学系统设计,本文分别讨论了分光镜的像散特性和棱镜分光的偏振特性,由于镀膜的原因造成棱镜具有严重的偏振现象,对于彩色成像系统会造成严重的色偏移现象,严重影响到图像的颜色。

通过将平板置于平行光路分光与棱镜会聚光路分光两种光学系统的设计与实验,结果显示棱镜分光彩色图像具有严重颜色失真现象,而且越接近大视场图像颜色失真越严重,只有平板置于平行光路分光时,既可以解决平板分光会聚光路分光的像散现象,同时又可以很好地解决棱镜分光图像颜色失真现象。这一共窗口的光学设计方案,较好地实现了激光接收与彩色电视成像双波段光谱共窗口融合技术,可以应用于结构紧凑型的光电设备中,同时还可以给可见光彩色电视与中波、长波红外等光学系统共窗口融合技术提供参考。

参考文献：

[1] 晏雷，贾平，洪永丰，等．变焦距镜头凸轮曲线形式的选择[J]．应用光学，2010，31(6)：876-882.
YAN L, JIA P, HONG Y F, *et al.*. Selection of cam curve for zoom lens[J]. *J. Applied Optics*, 2010, 31(6): 876-882. (in Chinese)

[2] 陆强，李轶群，沈为民．大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]．光学学报，2010，30(9)：2674-2679.
LU Q, JI Y Q, SHEN W M. Design of a fore continual zoom system with high speed[J]. *Acta Optics Sinica*, 2010, 30(9): 2674-2679. (in Chinese)

[3] 李晓彤，何国雄．变焦距系统高斯解优化的研究[J]．浙江大学学报，1993，27(1)：122-127.
LI X T, HE G X. Research of optimization design for zoom lens Gaussian parameters[J]. *J Zhejiang University*, 1993, 27(1): 122-127. (in Chinese)

[4] 蔡伟，张新，冯秀恒，等．变焦距系统的变倍补偿方式[J]．光学 精密工程，2011，19(9)：2063-2071.
CAI W, ZHANG X, FENG X H, *et al.*. Compensating modes for zoom system[J]. *Opt. d Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2063-2071. (in Chinese)

[5] 李宏壮，张振铎，曹景太．长焦距超高倍率变焦距光学系统设计[J]．光子学报，2012，41(3)：358-363.
LI H ZH, ZHANG ZH D, CAO J T. Design of zoom optical system with long focal length and super-high zoom ratio[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(3): 358-363. (in Chinese)

[6] 胡际先．长焦距大口径连续变焦光学系统的设计[J]．应用光学，2007，28(5)：569-572.
HU J X. Design of long focal length large-aperture optical zoom system[J]. *J Applied Optics*, 2007, 28(5): 569-572. (in Chinese)

[7] 王平，张葆，程志峰，等．变焦距镜头凸轮结构优化设计[J]．光学 精密工程，2010，18(4)：893-898.
WANG P, ZHANG B, CHENG ZH F, *et al.*. Optimal design of zoom lens[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 893-898. (in Chinese)

[8] 王红，田铁印．5 倍变焦距光学系统小型化设计[J]．中国光学，2014，2(7)，315-319.
WANG H, TIAN T Y. Miniature design of 5 × zoom optical system[J]. *Chinese Optics*, 2014, 2(7): 315-319. (in Chinese)

[9] 苗健宇，张立平，翟岩，等．小型连续变焦相机的结构实现[J]．中国光学，2014，1(7)：169-174.
MIAO J Y, ZHANG L P, ZHAI Y. Structural realization of small zoom camera[J]. *Chinese Optics*, 2014, 1(7): 169-174. (in Chinese)

[10] 李刚，杨晓许，张恒金，等．基于卡塞格林系统的红外制冷型长焦分档变倍光学系统的设计[J]．中国光学，2014，7(2)：293-300.
LI G, YANG X X, ZHANG H J, *et al.*. Design of cooled infrared switch-zoom optical system with long effective focal length based on R-C system[J]. *Chinese Optics*, 2014, 2(7): 293-300. (in Chinese)

[11] 刘峰，徐熙平，孙向阳．高变倍比红外变焦距光学系统设计[J]．应用光学，2009，30(6)：1020-1023.
LIU F, XU X P, SUN X Y. Design of high zoom ratio thermal infrared zoom optical system[J]. *J Applied Optics*, 2009, 30(6): 1020-1023. (in Chinese)

[12] 岳兆阳，张蕊，白少先，等．共光路双频外差干涉法测量模拟磁头磁盘静态间隙[J]．中国激光，2005，32(12)：1664-1667.
YUE ZH Y, ZHANG R, BAI SH X, *et al.*. Measurement of simulated disk/slider stationary spacing by common-path dual-frequency interferometry[J]. *Chinese J. Laser*, 2005, 32(12): 1664-1667. (in Chinese)

[13] LIN Y, SCHILL J, WANG R W. Precision evaluation of a common-path interferometer in measurement of optical surfaces [J]. *CCTA Optical Sinica*, 1994, 14(1): 55-61. (in Chinese)

[14] 韩旭东，艾华．共光路移相单频激光干涉测长系统[J]．光学技术，2004，30(2)：195-198.
HAN X D, AI H. Common-path and phase-shif ting single frequency laser interferometer for length measurement [J].

Optical Technique,2004,30(2):195-198.(in Chinese)

[15] 孙燕萍,高军.棱镜成像光谱仪色散特性研究[J].航天返回与遥感,1999,20(4):23-26,45.
SUN Y P,GAO J. Prism dispersion characteristic imaging spectrometer research[J]. *Space Return and Remote Sensing*, 1999,20(4):23-26,45.(in Chinese)

[16] 楼永坚,曹向群.分光棱镜的分光性能测试研究[J].光学仪器,2002,24(6):7-10.
LOU Y J,CAO X Q. Dispersion prism spectral performance test research[J]. *Optical Instruments*,2002,24(6):7-10. (in Chinese)

[17] 于雪芹.棱镜色散与光栅色散的对比分析[J].三门峡职业技术学院学报,2011,10(6):116-117.
YU X Q. With the comparison and analysis of the grating dispersion prism dispersion[J]. *J. Sanmenxia Vocational and Technical College*,2011,10(6):116-117.(in Chinese)

[18] 王海涛,耿安兵.一体化红外双波段成像光学系统[J].红外与激光工程,2008,37(3):489-492.
WANG H T,GANG A B. Unified infrared imaging optical system of dual spectral[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008,37(3):489~492.(in Chinese)

[19] 张兴德,李荣刚,刘琳,等.红外双波段成像系统的研究与发展[J].激光与红外,2010,409(8):801-804.
ZHANG X D,LI R G,LIU L,*et al.*. Research and development of dual-band infrared camera system[J]. *Laser Infrared*, 2010,40(8):801~804.(in Chinese)

[20] 林青,金伟其,郭宏,等.可见光/长波红外共聚焦窗口望远物镜设计[J].光学学报,2012,32(9):1-5.
LIN Q,JIN W Q,GUO H,*et al.*. Cofocal-window telescope objective design in visible and long-wave infrared [J]. *Acta Optical Sinica*,2012,32(9):1-5.(in Chinese)

[21] 张静,刘敬海.多光路共窗口的现代光电跟踪系统 [J].光学技术,2001,27(4):3506-3510.
ZHANG J,LIU J H. Modern optic-electric tracker with multichannel and co-window[J]. *Optical Technique*,2001,27(4):3506-3510.(in Chinese)

作者简介:

张学明(1964—),男,湖北蕲春人,本科,研究员,主要从事航空成像与测量技术方面的的研究。E-mail:zxm5399520@ sina. com