文章编号:1001-5078(2013)02-0128-04

·综述与评论·

离轴反射式光学系统的研究进展与技术探讨

李荣刚,张兴德,孙昌锋,刘 琳,李江勇,王 诚
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘 要:离轴反射式光学系统具有大口径、宽光谱,高分辨率等特点,在空间与远程探测技术领域具有良好的应用前景。离轴反射式光学系统的复杂性加大了其设计与工程化的难度。本文在分析其特点的基础上,结合国内外的研究情况,对其设计方法、波前探测、计算机辅助装调、光学零件加工检测、轻量化等技术进行探讨。

关键词:离轴反射式光学系统;波前探测;计算机辅助装调;轻量化
中图分类号:TH743 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2013.02.002

Development and analysis of off-axis reflection optical system

LI Rong-gang, ZHANG Xing-de, SUN Chang-feng, LIU Lin, LI Jiang-yong, WANG Cheng
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Off-axis reflection optical system is usually used in space optics and remote sensing owing to its merits of large aperture, high resolution and broad spectral band. It is difficult to design and fabricate an off-axis reflection optical system due to its complexity. Characteristics and development of the technology are introduced in the paper. Methods of optical design, wave-front sensing, computer-aided alignment, lightweight developing are proposed and discussed.

Key words: off-axis reflection optical system; wave-front sensing; computer-aided alignment; lightweight

1 引 言

随着空间远程探测及航空航天技术的发展,对光学系统要求越来越高,具体表现在:更高的空间分辨率、更高的光谱分辨率、更宽的光谱范围、全天时观测能力等方面[1],为此,用于这些领域的光学系统一般具有长焦距、大口径、多光谱、结构紧凑等特点。由于光学材料性能的限制及宽光谱范围色差的影响,采用折射式光学系结构形式很难实现此类光学系统,在工程中一般采用反射式或折反射式的光学结构形式[2]。离轴反射式光学系统在实现大孔径、多波段、高光学效率系统方面具有明显的优势。

近年来,随着设计新方法、波前探测与计算机装调、大口径反射镜轻量化、离轴光学零件加工检测等技术的发展与成熟,为离轴反射式光学系统发展注入了新的活力。

2 特点与应用领域

离轴反射式光学系统主要具有以下优点[3]:

(1)无色差,有利于多光谱系统的实现;

(2)无中心遮挡,有利于提高系统的光学效率与成像质量;

(3)结构相对紧凑,光路可多次转折;

(4)不受光学材料的限制,口径可以做大;

(5)固有无热化,环境适应性较强。

相对于其独特的优势,其缺点也十分明显,主要表现在:

(1)视场相对较小,探测范围小;

(2)含有离轴(偏轴)非球面,不利于零件的加工与检测;

作者简介:李荣刚(1977-),男,硕士,高级工程师,从事光电系统的设计与研究工作。E-mail:ioptics_lrg@yahoo.com.cn

收稿日期:2012-06-29;修订日期:2012-07-15

(3)光学系统装调困难;

(4)价格昂贵。

离轴反射式光学系统的特点决定了其高端的应用领域,主要用于多光谱成像、远程预警探测、对地侦测、高分辨率光学遥感;其载体多为机载、星载光电平台。

3　研究进展

多年来,国内外相关单位在离轴反射式光学系统研究方面投入了大量的精力,并取得积极的成果。

在国外,美国在此研究领域的投入最为突出。美国自 20 世纪 60 年代开始着手研究离轴反射式光学系统在机载侦察设备上的应用,U2 侦察机上的肯尼迪系统最具代表性[4]。受到当时技术的限制,该系统仅采用离轴抛物面镜,系统瞬时视场很小,一般用于采用单元器件的行扫系统。70 年代开始出现了离轴三反消像散系统(TMA)。在 20 世纪 80 年代,在 TMA 结构的基础上,离轴反射式光学系统得到蓬勃的发展。

进入 21 世纪以来,随着空间防御及远程预警探测计划的开展,美国进一步加紧在此领域的研究力度。Raytheon 公司于 2004 年披露了一款四镜反射系统[5](如图 1 所示)。与传统的离轴三反系统相比,其结构更为紧凑,相对口径更大;该系统的物理长度与系统焦距的比值小于 0.3,系统的 F 数可达 $F3$,并且该系统具有平像场的特点。2010 年,Corning 公司推出一款新型的全反射式光学系统[6](如图 2所示)。该系统具有宽光谱,双视场,结构紧凑

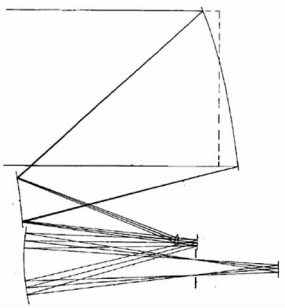

图 1　Raytheon 公司的四镜反射系统

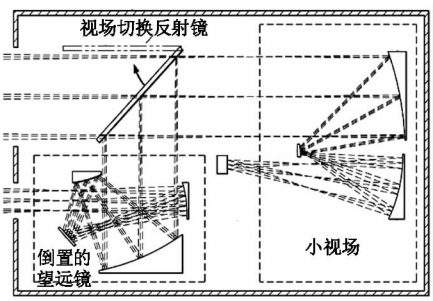

图 2　Corning 公司的双视场反射系统

的特点。系统通过反射镜的切换实现双视场,视场倍率可达 4 X。

在国内,一些大学与研究所,也相继开展了离轴反射式光学系统的研究,并得到相应的应用,目前国内单位的研究还是主要基于 TMA 的结构形式。近来,天津津航技术物理研究所在 TMA 的基础上设计了共孔径红外双色离轴全反射系统[7](如图 3 所示),实现了红外双色复合成像,系统具有平像场的特点。该系统在中波红外波段的焦距为 1000 mm,长波红外波段的焦距为 800 mm,系统长度与焦距的比值约为 0.5。

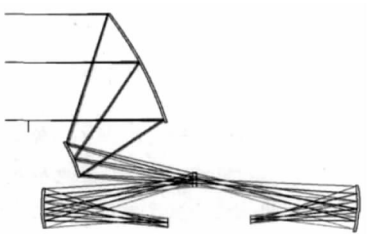

图 3　共孔径红外双色离轴全反射系统

就目前国内外的研究情况来看,离轴反射式光学系统在设计、工艺、检测方面存在一些技术瓶颈,其大部分研究还停留在理论设计与试验阶段,距工程化还存在较大的差距。

4　技术探讨

随着设计分析方法的丰富,光学加工检测技术的进步,新的设计理念与技术方法为离轴反射式光学系统的发展提供了新的手段。下面从光学系统设计方法、波前探测与计算机辅助装调、离(偏)轴光学零件的加工检测、轻量化设计与分析等方面进行一些探讨。

4.1　设计新方法

离轴反射式系统不再是传统旋转对称型的结构形式,为了达到结构紧凑的目的,系统已经过多次转折,坐标系发生多次变化,系统表现出光学参数与实际存在一定的差别。采用光线计算的方法是保证系统光学参数的正确性的可靠方法,譬如,焦距可利用不同视场间的主光线在当前坐标系下形成的像高进行控制。另外,光学零件之间相互位置也只能依靠其在坐标系的坐标进行控制,以免造成系统在优化过程中光学零件间的相对位置的不确定性。

离轴反射式光学系统中存在平移与倾斜等参量,像差的表现形式发生了很大的变化[8],对其补偿十分困难。为了获得高质量的离轴反射式光学系统,自由曲面[9]成为一种必要的技术途径。自由曲面是一类非旋转对称、形状不规则的曲面结构,其能

够拓展优化自由度,提升光学系统的像差平衡能力,改善了光学系统的视场适应能力。美国国家航空航天局(NASA)与欧空局(ESA)已经开展自由曲面在离轴反射式光学系统的研究。自由曲面的数学模型很多,其中泽尼克(Zernike)多项式最具代表性。

4.2 波前探测技术

离轴反射式光学系统的加工、装调过程都要用到波前探测技术,其核心为光学系统波面像差的测定。光学系统的波面像差是代表光学系统成像品质的最根本的物理量,可以根据波像差数据获得系统的点扩散函数(PSF)及光学传递函数(MTF)。通过波面的泽尼克(Zernike)拟合,可以获得系统各种像差信息,为系统的补偿提供依据。通过实时的波前探测与闭环控制技术,可以自动实时补偿光学系统的波前畸变,使系统具有自适应的功能。

实现波前探测的途径很多,如干涉测量方法、五角棱镜扫描方法、夏克 - 哈特曼(Shack-Hartmann)方法[10],这些方法基于对波前的直接测量,受外界因素(如光源、环境等)的影响很大。与以上方法不同,基于差分原理的波前探测可以有效避免这些因素的干扰,该方法的原理如图 4 所示。

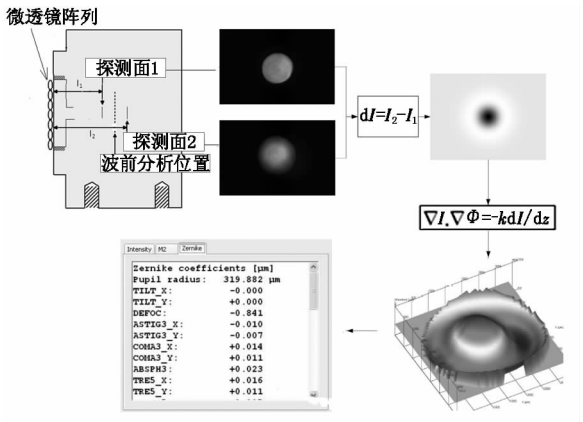

图 4 基于差分原理的波前探测原理

4.3 计算机辅助装调

由于离轴反射式光学系统的复杂性,利用传统的装调方法很难检测光机耦合误差。计算机辅助装调是针对传统装调方法不可视,不定量,随机成分多,装调周期长等缺点而提出的一种新的装调方法,它能定量地给出失调量,从而指导装调过程。

计算机辅助装调的有效实施的基础为系统准确可靠的误差分析、测定及补偿。通过分析,可获得每个参数对系统性能影响的灵敏度及方向性,进而在光机耦合设计过程中确定系统的补偿调整方案。系统误差可通过波前探测的方法精确获得。计算机辅助装调是反复迭代的过程,虽然该方法的解不唯一,但其具有很高的精确性与稳定性,计算机辅助装调的过程如图 5 所示。

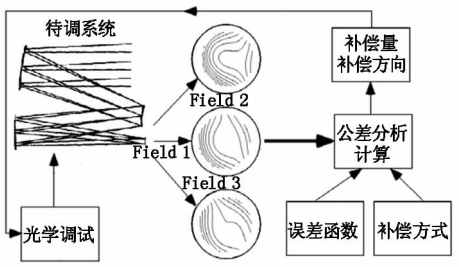

图 5 计算机辅助装调过程

4.4 离(偏)轴非球面的加工检测

离轴光学零件的传统加工方法为:先加工尺寸大的母镜,再根据需要选择其中子镜。随着光学系统的孔径及离轴量的增大,传统工艺很难实现离轴非球面的加工。随着超精密数控、离子束加工技术,磁流变抛光技术的发展,直接进行离轴光学零件的加工成为现实,并且可以实现自由曲面的加工。

相对于加工而言,离轴光学零件的检验更为困难,通常借助补偿器或者 CGH 等通过零位补偿实现对其面形进行检测,这种检测方法时间周期长、成本高、而且容易引入大量的加工装调误差。日前,随着波前探测技术的成熟,采用子孔径拼接与计算机“缝合”技术检测离轴非球面面形的成为可能,这种方法的原理是:利用参考波对离轴非球面的不同区域进行波前测量,通过子孔径拼接算法可求得整个非球面的面形[11]。

4.5 轻量化设计与分析

离轴反射式光学系统的光学元件与结构组件采用热膨胀系统近似或相等的金属材料制成,实现系统的固有无热化。机载、星载的应用环境对离轴反射式光学系统的质量提出了苛刻的要求。结构采用框架薄壁设计是降低系统质量的有效途径,图 6 为一种离轴反射式光学系统及轻质反射镜的结构示意图。框架薄壁的结构形式在一定程度上降低了系统的刚度,不容易保证光学系统成像质量。随着系统

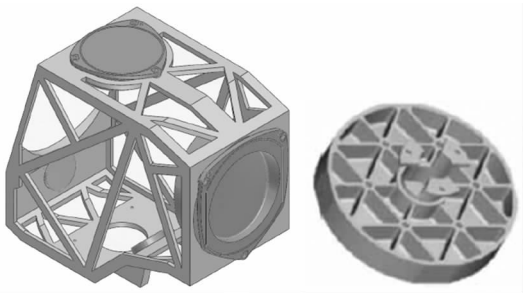

图 6 离轴反射式光学系统框架薄壁及轻质反射镜的结构形式

中金属反射光学元件轻量化率的增加,在比刚度提高的同时,其绝对刚度却在下降,镜面对支撑应力的敏感度迅速增加[12]。

对系统建立参数化的有限元分析模型,结合光机加工及装配工艺要求,合理选择关键的结构参数作为优化设计变量,对其进行优化设计[13]。优化过程除了考虑机械强度,力学性能因素外,还要考虑光学性能及环境适用性。有限元分析软件ANSYS,ALGOR FEAS 在此方面具有强大的优化功能。

5 结 论

为适应空间及远程探测的需求,具有大口径、高分辨率等特点的离轴全反射光学系统已成为空间光学领域研究的重点之一。随着设计手段的丰富,现代加工检测技术的进步,装调工艺的成熟,离轴反射式光学系统势必突破束缚其发展的技术瓶颈,在性能、工艺水平、研发成本与周期等方面得到进一步的提升。

参考文献:

[1] Yue Tao, Li Bo, Chen Xiaoli, et al. The current and future development of space optics[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011, 10: 1 – 9. (in Chinese)
岳涛,李博,陈晓丽,等. 空间光学发展现状和未来发展[J]. 航天返回与遥感,2011,10:1 – 9.

[2] Zhang Xingde, Li Ronggang, Liu Lin, et al. Research and development of dual-band infrared camera system[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(8): 801 – 804. (in Chinese)
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,2010,40(8):801 – 804.

[3] Michael Bass. Handbook of optics[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Companies, Inc, 2010: 2901 – 2938.

[4] Stephen B campana. The infrared & electro-optical systems handbook[M]. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1993, (5): 13 – 15.

[5] Lacy G Cook. Compact four-mirror anastigmat telescope: US, 6767103[P]. 2004.

[6] Julie L Bentley. Extreme broadband compact optical system with multiple fields of view: US, 20100321808[P]. 2010.

[7] Sun Chiquan, Zhao Kan, Meng Junhe. Off-axis total reflection optical system for common aperture IR dual-band imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 729 – 733. (in Chinese)
孙赤全,赵侃,孟军和. 共孔径红外双色离轴全反射系统[J]. 红外与激光工程,2012,41(3):729 – 733.

[8] Kevin Pual Thompson. Aberration fields in tilted and decentered optical systems[D]. Arizona: University of Arizona, 1980.

[9] John R Rogers. A comparison of anamorphic, keystone and zernike surface type for aberration correction[C]. Optical Society of American: International Optical Design Conference, 2010.

[10] Han Changyuan. Progress in space optics and wave front sensing technique[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2008, 1(12): 13 – 24. (in Chinese)
韩昌元. 空间光学的发展与波前传感技术[J]. 中国光学与应用光学,2008,1(12):13 – 24.

[11] Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Xuejun, et al. Testing an off-axis asphere by subaperture stitching interferometry[J]. ACAT Photonica Sinica, 2011, 40(1): 92 – 96. (in Chinese)
王孝坤,郑立功,张学军,等. 子孔径拼接干涉检测离轴非球面研究[J]. 光子学报,2011,40(1):92 – 96.

[12] Ma Wenli, Shen Mangzuo. Finite element structure analysis of a reflecting optical system with all metal components [J]. Opto-Electronic Engineering, 1994, 21(5): 10 – 16. (in Chinese)
马文礼,沈忙作. 全金属反射光学系统结构的有限元分析[J]. 光电工程,1994,21(5):10 – 16.

[13] Zhao Yuan, Zhang Dianfu, Wang Hongwei. Integrated thermal-structural-optical analysis of a space telescope [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(4): 404 – 407. (in Chinese)
赵源,张殿富,王洪伟. 某空间望远镜光机热集成分析[J]. 激光与红外,2012,42(4):404 – 407.