

· 光学设计与制造 ·

## 新型红外光学系统的结构特点与技术分析

刘群龙<sup>1</sup>, 吴晗平<sup>1,2</sup>, 张焱<sup>1</sup>, 胡大军<sup>1</sup>

(1. 武汉工程大学理学院, 湖北 武汉 430205; 2. 武汉工程大学光电子系统技术研究所, 湖北 武汉 430205)

**摘要:**随着红外探测技术的发展, 红外光学系统的作用已不容忽视. 在归纳总结传统结构形式的折射式、反射式和折反射式红外光学系统的基础上, 分析了现代红外光学系统中离轴三反、二元光学、自适应技术等结构特点, 从技术上比较了传统红外光学系统和现代红外光学系统的优缺点, 探讨了红外光学系统的发展趋势. 对新型红外光学系统的发展具有一定的参考作用.

**关键词:** 红外光学; 结构特点; 技术分析

**中图分类号:** TN21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2010)02-0029-06

## Structural Features and Technical Analysis of New Infrared Optical System

LIU Qun-long<sup>1</sup>, WU Han-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, HU Da-jun<sup>1</sup>

(1. School of Science, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Institute of Optoelectronic System Technology, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** With the development of infrared technology, the effect of infrared optical system should not be overlooked. The structural features of modern infrared optical system (such as off-axis three-mirror system, binary optical system and adaptive optical system) were analyzed on the basis of the summarizing traditional infrared optical system (such as reflective IR optical system, refractive IR optical system and catadioptric IR optical system). The advantages and disadvantages of traditional infrared optical systems and modern infrared optical systems were compared from the technical aspect, and the development tendency of the infrared optical system was explored. There is some theoretical guidance role and significance in further research and development of new infrared optical system.

**Key words:** infrared optics; structural features; technical analysis

传统的红外光学系统有 3 类, 即反射式、折射式和折反射式. 折射式镜头视场大, 无遮挡损失, 像差易通过光学设计矫正, 但口径大、成本高且不易制作, 通常用于 250 mm 以下的口径; 反射式镜头无色差, 多波段系统可共用口径, 但其轴外像差较大. 实用系统一般采用折反射式镜头, 即通过反射镜和透镜的组合来获得满意的像质.

与一般光学系统要求不同, 某些应用红外光学

系统不仅要求体积小、质量轻、结构坚固稳定, 还要考虑其由于环境温度等诸多因素引起的系统精确性和稳定性等性能的变化<sup>[1]</sup>. 故红外光学系统光学材料的选择以及其结构要求成为这些红外光学系统设计过程需考虑的关键因素. 研究如何使红外光学系统在要求环境条件下有稳定的性能, 同时不增加系统尺寸、质量及成本, 使其具有较好的可靠性, 对新型红外光学系统的研究具有十分重要的意义. 国外

收稿日期: 2010-02-05

基金项目: 技术基础项目子课题(2008-263)

作者简介: 刘群龙(1988-), 男, 湖北汉川人, 武汉工程大学在读, 主要研究方向为红外光学系统设计; 导师简介: 吴晗平(1964-), 男, 湖南澧县人, 教授, 工学博士, 主要研究方向为光电系统总体技术及设计.

对此方面的研究尤为重视,特别是近年来新型红外光学这一领域迅速发展,从传统的折射、反射式结构到现在新型的离轴反射、折衍混合、谐衍射、合成孔径、自适应光学等都为现代红外系统发展提供了新的活力。

## 1 传统红外光学系统的结构特点

### 1.1 折射式

折射式光学系统在结构上一般有两组元系统、三组元系统、四组元系统等。两组元系统一般有远距式、反远距式、匹兹瓦式、高斯式等。三组元系统一般都是3片系统的复杂化。4片系统一般都是Ross四片式系统及其复杂化形式<sup>[2]</sup>。

文献[3]中就设计了一种折射3次成像的折射式红外搜索/跟踪光学系统,其像质优良,MTF达到衍射极限,由于对光路进行空间三维折叠,其外形尺寸包络于一个球体内。文献[4]中也设计了一种折射式的CBERS-1卫星CCD相机光学系统,此系统经过恶劣环境考验,质量稳定,成像清晰。

### 1.2 反射式

纯反射式光学系统是一种没有色差和二级光谱的传统红外光学系统。双反射镜系统是目前反射式结构中应用较广泛的一种结构。双反射系统是由2面反射镜组成,其中大的叫主镜,小的叫次镜。若次镜为凸镜,且所处位置在主镜焦点之内,这种系统称为卡塞格林系统;若次镜为凹镜,且所处位置在主镜焦点之外,则称为格里高里系统<sup>[5]</sup>。比较这2种系统,由于卡塞格林系统的次镜遮光较少,镜筒较短等优点,使得它在红外装置中得到广泛的应用。若将卡塞格林系统的主镜改成双曲面,此时的系统称R-C系统,其不仅能消除球差,还能消除彗差。除此之外R-C系统还具有以下优点<sup>[6]</sup>:(1)利用反射镜折叠光路,缩小了镜头的体积和减轻了质量;(2)完全没有色差;(3)可以在紫外到红外的很大波长范围内工作;(4)反射镜的镜面材料比透射镜的材料容易制造,特别是对大口径零件更是如此。因此,R-C系统被广泛地应用在大型天文望远系统、航天光学遥感、紫外和红外仪器以及聚光照明等方面。

### 1.3 折反式

一般情况下,反射系统视场角较小,为了校正像

差扩大视场,采用反射镜加折射改正镜的形式设计出了折反射式光学系统。典型的红外光学折反系统中,用卡塞格林系统作为反射系统是最常用的。由于折反射光学系统主次镜分担大部分光焦度,因此有利于无热化设计,又利用反射镜折叠光路,故缩小了镜头的体积和减轻了质量,且长度可以做到比焦距短。

文献[7]在结构上提出了一种新型的折反式结构,用球面反射镜取代卡塞格林系统中的非球面主次镜,用折射透镜补偿剩余像差,增大了视场(达到 $4^\circ$ ,一般折反系统为 $1^\circ$ 左右,很难超过 $3^\circ$ ),此种结构不存在卡塞格林系统因有非球面主次镜而产生加工精度高和装调困难的问题,该系统结构紧凑、口径大、焦距长、分辨率高,各视场能获得接近衍射极限的成像质量。文献[8]中也设计了一种紧凑型的折反红外光学系统,其在 $-40\sim 60^\circ\text{C}$ 范围内具有良好的消热差作用,且结构紧凑、体积小。

## 2 现代新型红外光学系统的结构特点

上述光学结构是红外光学系统所广泛采用的传统整体口径系统结构形式,即系统主镜采用一整块镜子。这种结构简单、成像质量好,但是由于高精度反射镜的加工困难,系统在复杂环境中镜面变形等原因致使光学系统的性能下降。针对上述问题国外积极研究相应的解决办法。

### 2.1 离轴三反光学系统

在空间遥感领域,对空间光学系统分辨率的要求也越来越高,这就要求在多光谱的条件下,光学系统需要长焦距和大口径,甚至大视场来满足需要<sup>[9]</sup>。对于折射系统,如果要满足这些要求,需采用特殊光学材料或复杂结构来校正二级光谱。结果是体积和质量过大,无法满足小型化、轻量化的要求。离轴三反射镜光学系统具备与共轴全反射光学系统相同的优点,如无色差、无二级光谱、使用波段范围宽、易做到大口径、抗热性能好、结构简单、宜轻量化等,可成功解决系统中心的遮拦问题,且其系统优化变量多,在提高系统视场大小的同时能改善系统的成像质量,因此成为研究的热点。

从有无中间像来分,实用的离轴三反镜系有2种结构形式,即有中间像的三镜系统和无中间像的三镜系统。在有中间像的三镜系统中,又可分为主镜

成中间像的三镜系统和主次镜成中间像的三镜系统.前者通过孔径离轴、视场共轴的方法,视场可达 $20^\circ$ 左右;后者光阑离轴形式的结构较紧凑,虽然这种结构视场角不能做得很大,但是这种系统有中间实像和实出瞳,在中间像处可以放置视场光阑,可以做到 100%冷光阑效率,这对限制杂散光是很有好处的.众多研究表明,这种三镜系统可实现 $3^\circ$ 以内的视场.在无中间实像的三反镜系统中,又可分为 2 种:主镜为凹面的三镜系统和主镜为凸面的三镜系统.前者的总长/焦距之比约在 $0.5\sim 1$ ,目前的宽覆盖遥感成像光学系统往往采取这种结构.后者类似于反远物镜,这种结构可以有 $40^\circ$ 以上的视场,但不利于减小系统结构尺寸<sup>[2]</sup>.

## 2.2 二元光学系统

### 2.2.1 二元光学的发展

二元光学(BOE)是美国林肯实验室于 1987 年正式提出的,它是在计算全息与相息图制作技术、微电子加工技术发展的基础上,运用光学衍射原理,集几种光学功能于一体发展起来的一门新兴光学分支,是基于光波的衍射理论,利用计算机辅助设计,并用超大规模集成电路制作工艺,在片基上(或传统光学器件表面)刻蚀产生 2 个或多个台阶深度的浮雕结构,形成纯相位、同轴再现、具有极高衍射效率的一类衍射光学元件.二元光学元件属于衍射光学元件且是衍射光学元件的主要组成,它解决了衍射光学元件的效率和加工问题,以多阶相位结构来近似相息图的连续浮雕结构.利用二元光学技术能够方便地制造出任意相位分布、高衍射效率、高精度的衍射光学元件,它的出现极大地推动了衍射光学分析、设计理论的发展和完善,拓宽了衍射光学元件的应用.

二元光学元件具有不同于常规元件的色散特性<sup>[10]</sup>,故可在折射光学系统中同时校正球差和色差,构成混合光学系统,以常规折射元件的曲面提供大部分的聚焦功能,再利用表面上的浮雕相位波带结构校正像差.而且二元光学中,可通过波带片的位置、槽宽与槽深及槽形结构的改变产生任意波面;可选择更大范围的材料;可集成得到多功能元件;使用亚波长结构还可以得到宽带、大视场、消反射和偏振等特性.此外,二元光学在促进小型化、阵列化、集成化方面的作用更是不言而喻.

### 2.2.2 折/衍混合光学系统

随着衍射光学技术的迅速发展,BOE 得到了广泛的应用.将 BOE 与传统的折射光学元件相结合构成的光学系统被称为折/衍混合光学系统(Hybrid Optical System,简称 HOS).HOS 可为设计者提供更多的参数自由度和材料选择的自由度,不仅能够降低设计难度,简化系统结构,更能够实现传统光学系统无法实现的特殊功能.从 20 世纪 80 年代中期起,随着二元光学技术及其他衍射光学元件制造技术的发展,使得制造易复制、精度高、任意相位分布的二元光学元件成为可能,HOS 作为 BOE 的一个重要应用受到了科研工作者的广泛关注.例如美国的热武器瞄准 TWS 系统,这也是衍射光学元件首次在大规模军用设备上的应用.在文献[11]根据大中型轰炸机光学观测瞄准系统的主要缺陷,结合光学观测瞄准的实际,探讨了基于二元光学的光学观测系统的组成结构和瞄准原理,文献[12]也对二元光学元件在导弹精确制导导引头上的应用做了研究.

## 2.3 红外双波段光学系统

红外辐射主要有近红外( $0.75\sim 2.5\ \mu\text{m}$ )、中红外( $3\sim 5\ \mu\text{m}$ )和远红外( $8\sim 14\ \mu\text{m}$ )3 个大气窗口.目前的大多数红外光学系统都工作在其中的某一个单波段,但是由于红外系统使用的区域不同、气候温度的改变、目标的伪装等,单一波段的系统获取信息就会减弱,特别是探测目标本身的操作或者行为的改变导致辐射波段移动等原因,使得探测系统不能获取目标或者探测准确度的下降;随着遥感和精密制导技术的发展,根据目标和背景的辐射和反射特性,对可见光或者红外光谱中的 2 个或者多个波段的辐射进行同时探测和比较就显得非常重要.为了提高自身的生存能力和发现目标,在国外很早就提出了双波段成像系统的研究.在导引头系统中,美国在战斧 IV 巡航导弹的末制导中采用红外双波段制导,而在大气层内外拦截器中美国采用了红外中波和长波的复合制导<sup>[13]</sup>;文献[14]中就分析了空间双波段成像光谱仪光学系统的光学特性.此外,发展双波段成像技术在工业、医学、航天、气象等民用方面也均有广泛应用.

谐衍射透镜,也称为多级衍射透镜,其特点是相邻环带间的光程差是设计波长 $\lambda_0$ 的整数 $p$ 倍( $p\geq 2$ ),在空气中透镜最大厚度为 $p\lambda_0(n-1)$ ,是普通衍射透镜的 $p$ 倍( $n$ 为折射率).谐衍射光学元件可以

在一系列分离波长处获得相同的光焦度,利用光在传播中的折射和衍射2种特性,增加了光学设计过程中的自由度,能够突破传统光学系统的许多局限.同时由于谐衍射元件克服了普通衍射元件存在的大色散的缺点,根据红外波段的窗口特性,恰当地选择参量和设计中心波长就可以将衍射透镜成功引入双(多)波段光学系统的设计中,并对减少系统体积、提高成像质量等具有重要的实用价值.

## 2.4 自适应光学系统

增大光学系统口径的目的之一就是为了提高分辨率.但随着光学系统口径增大,也带来了一系列问题.大口径高分辨率的红外光学系统由于光学部件几何尺寸较大,故易受空间环境及光学系统内部环境影响而使系统像质变差.星载遥感仪器多采用提高仪器热控精度和主动调焦的方法来减小镜面温度变形对光学系统像质的影响.但提高热控精度会增加系统成本,而主动调焦主要解决系统离焦,对于由镜面温度变形引起的球差、彗差、像散等阶像差则作用不大<sup>[2]</sup>.

自适应光学是新近发展起来的一种集光学、机械与电学为一身的技术,它是以光学波前为控制对象的自动控制系统,通过对动态波前误差的实时探测、控制和校正使光学系统自动克服外界干扰,维持系统良好的性能.自适应光学系统通常由波前传感器、波前控制器和波前校正器3个部分组成.波前传感器实时探测畸变波前的波前误差信息,波前控制器将波前传感器探测到的波前误差信息转换为控制信号,波前校正器将波前控制器产生的控制信号转换为波前相位变化从而实时补偿波前畸变.随着微光刻技术、衍射光学、微电子、微机械制造技术等的发展,在国外一些研究机构已经研制出了微透镜阵列、微小 Hartmann-Shack (H-S)波前传感器组件以及微小型变形镜等自适应光学系统的关键部件<sup>[15]</sup>.

## 2.5 合成孔径系统

合成孔径系统是指利用干涉法、相干编码法和孔径组合的光学方法将容易制造的小口径光学系统合成为大口径系统.其中的小口径光学系统既可以是单独的镜片,也可以是独立的光学系统.

随着对地光学成像观测要求的逐步提高,迫切

需要效费比更高的高分辨率大视场太空望远系统.由多子镜拼接的合成孔径光学系统在空间观测中将占据越来越重要的地位<sup>[16]</sup>.这种形式的太空望远镜与普通光学系统在结构和成像性质上类似,但使用多块小口径子镜拼接成主镜来实现单一大口光学系统的功能,可在发射时折叠、在轨展开,具有发射体积小、质量轻、口径大、分辨率高、部署灵活多变等优点.

## 2.6 自适应编码孔径成像<sup>[17]</sup>

编码孔径成像是混合——数字成像系统,采用多孔径编码掩模替代了具有聚光能力的光学元件(透镜、反射镜),这一掩模对将传播到一个二维探测器阵列的来自场景的波前进行编码,随后采用基于编码的掩模透射的知识,通过相关或解卷积对探测器的二维强度图案进行解码,恢复场景的图像.

自适应编码孔径成像是近年来美国和英国提出的一项能够进行实时大范围红外/可见光敏感和成像的新技术.自适应编码孔径传感器利用独特的成像结构实现大视场、类似于相控阵雷达的近瞬时波束方向操控和高分辨率,其编码的掩模可重构(例如可以当做空间光调制器),用于恢复图像的解码算法和参数也可变.由于采用了可重构的编码孔径,能够敏捷地、自适应地成像.

## 3 传统红外光学系统与新型红外光学系统的技术比较

传统红外光学系统和现代红外光学系统的优缺点比较如表1所示.

## 4 红外光学系统的发展趋势

现代红外光学系统要求是:(1)为了提高探测能力,要求有高的集光能力,这就要求光学系统有大的相对孔径并且无中心遮拦.(2)视场较大,同时现代的面阵探测器件要求平像场.(3)具有接近衍射极限的成像质量.(4)对弱信号的探测,要求光学系统具有中间像面.(5)光学系统热稳定性要好,在宽的温度变化范围内不离焦.(6)特定的应用背景,要求光学系统结构简单、质量轻、透过率高,以及满足特定的应用环境条件.

表1 传统红外光学系统和现代红外光学系统的优缺点比较

结构	结构类型	优点	缺点
传统结构	反射式	(1)没有色差和二级光谱; (2)温度效应小; (3)基片材料成本低.	(1)存在中心遮挡(光通量、MTF降低); (2)次镜支撑对准困难; (3)易受杂散辐射影响; (4)安装误差灵敏度高,装配难度大; (5)机构设计复杂.
	折射式	(1)全通光口径,无中心遮挡; (2)像质优化潜质大; (3)容易获得多视场系统; (4)光学系统安装误差灵敏度低; (5)结构设计简单.	(1)可用材料品种有限; (2)温度效应严重(热敏感); (3)成本高.
	折反射式	(1)焦距可以做得很长; (2)主镜口径可以做到与入瞳大小相当; (3)由于主次镜分担大部分光焦度,有利于无热化设计; (4)利用反射镜折叠光路,能缩小镜头的体积和减轻系统质量; (5)系统长度可以做的比焦距短.	(1)所需镜片多; (2)进入系统的杂散光多; (3)视场小; (4)有中心遮拦; (5)系统装配复杂,成本高.
新型结构	离轴三反射式	(1)无色差、无二级光谱; (2)使用波段范围宽、易做到大孔径、抗热性能好、结构简单、宜轻量化等; (3)可成功解决系统中心的遮拦问题,且其系统优化变量多,在提高系统视场大小的同时能改善系统的成像质量.	(1)结构不对称,装调技术是全世界公认的难点,特别是大口径三反离轴系统的装调,具有很大的技术挑战性和风险性; (2)研制周期长,成本高.
	折衍混合光学系统 (二元光的应用)	(1)二元光学元件具有微型化、易集成化和容易复制等优点; (2)由于二元光学元件的色散与材料无关,仅依赖于波长,且色散系数为负值,故根据这个性质,在光学系统中采用折衍射式混合结构能够有效地校正色差; (3)二元光学元件增加了光学设计对材料选择的自由度,可减少光学系统对昂贵材料和稀少材料的需求; (4)衍射光学元件具有反向光热膨胀系数的特点,可以通过选择相匹配的材料设计出折衍射混合的热稳定结构,使光学系统满足空间恶劣温度环境的应用需求.	(1)二元光学元件是一种表面三维浮雕结构,需要同时控制平面图形的精细尺寸和纵向深度,因而其制作难度很大; (2)衍射元件衍射效率低; (3)由于衍射光的影响,低频白色MTF降低; (4)受到透射材料热特性的影响,系统成像质量受外界环境温度影响较大.
	红外双波段光学系统	能在共口径光学系统的条件下同时获得长波红外和中波红外信息.	(1)受到透射材料热特性的影响,系统成像质量受外界环境温度影响较大; (2)系统笨重,装调困难.

(续上表)

结构	结构类型	优点	缺点
新 型 结 构	自适应 光学系统	实时探测、控制和校正使光学系统自动克服外界干扰,维持系统良好的性能,对于改善由镜面温度变形引起的球差、彗差、像散等高阶像差有很好的作用。	对于自适应光学系统的轻小型化、集成化的研究还有待发展。
	合成孔径系统	(1)系统可折叠,质量轻、口径大、分辨率高等优点; (2)有利于系统制造成本的降低。	(1)系统结构复杂; (2)合成孔径的图像质量随子孔径尺寸、排列方式及数量的改变而有所不同。

## 5 结 束 语

折射式、反射式和折反射式3种最基本结构的红外光学系统得到快速发展。在传统结构上发展起来的如R-C系统,离轴系统等使得红外光学系统的性能得到了很好的改善,其口径大小、视场大小、成像质量等都得到了提高。特别是近年来计算机技术的飞速发展,对于非球面镜的加工技术以及系统的检测和装调技术的日趋成熟,促进了红外光学系统的进一步发展。随着超薄型大镜加工、综合孔径、二元光学、自适应光学等技术的不断创新,使红外光学系统在轻小型化、大口径、低成本、高成像质量及复杂环境适应性等方面得到全面发展。

### 参考文献

- [1] 杨争,周伟,徐惠忠. 红外成像系统在军事领域的应用前景[J]. 红外与激光工程,2008,37(增刊):691-694.
- [2] 惠彬,裴云天,李景镇. 空间红外光学系统技术综述[J]. 光学仪器,2007,29(4):90-94.
- [3] 陈津津,赵劲松. 一种紧凑型折射式红外搜索/跟踪光学系统设计[J]. 光子学报,2008,3(5):279-282.
- [4] 张国瑞. CBERS-1卫星CCD相机光学系统设计[J]. 航天返回与遥感,2001,22(3):9-11.
- [5] 张幼文,红外光学工程[M]. 上海:上海科学技术出版社,1982:237-260.
- [6] 李刚,张恒金,徐沛尧. 红外R-C光学系统设计[J]. 红外技术,2004,26(2):60-63.
- [7] 郎琪,邹昕,王文生. 折反式坦克目标跟踪识别红外光学系统设计[J]. 仪器仪表学报,2009,30(3):575-579.
- [8] 刘瑞奇,陈星明,赵家琪. 一种紧凑型红外光学系统设计[J]. 激光与红外,2009,39(4):419-422.
- [9] 宋岩峰,邵晓鹏,徐军. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. 红外与激光工程,2008,37(4):706-709.
- [10] Mchugh TJ, Zweig DA. Recent advances in binary optics[J]. SPIE,1989,1052:85-90.
- [11] 刘泽乾,陶忠祥,于前洋. 二元光学在光学观测轰炸瞄准中的应用研究[J]. 光学技术,2006,32(5):754-758.
- [12] 郭志成,谌国森. 二元光学元件在导弹精确制导导引头上的应用[J]. 战术导弹技术,2008(3):73-75.
- [13] Del Grande N K. Dual-band infrared capabilities for imaging birdied object sites[J]. SPIE,1993,1942:166-177.
- [14] 杨新军,王肇圻,孙强,等. 红外双波段成像光谱仪红外光学系统的设计[J]. 光子学报,2005,34(1):50-54.
- [15] Rodney L C. Adaptive optics aims for earthly applications [J]. Photonics Spectra,1997(4):100-106.
- [16] 邓键,张伟,龙夫年. 大口径拼接式合成孔径光学系统设计[J]. 光学精密工程,2008,16(1):29-34.
- [17] 范晋祥,张渊. 新概念军用红外成像系统的发展[J]. 红外与激光工程,2008,37(3):386-390.

欢 迎 订 阅! 欢 迎 投 稿!