

文章编号: 1672-8785(2016)07-0001-09

论红外光学系统的视场

王忆锋

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘 要: 视场是红外光学系统的一个重要性能参数。视场与光学系统的焦距成反比。通过改变焦距或者变焦可以调节视场, 这一过程的核心是变焦透镜。详细分析了红外光学系统的视场概念, 并主要基于国内相关文献资料, 介绍了红外变焦光学技术的思路与发展动态。

关键词: 视场; 变焦; 红外光学系统; 光学设计

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.07.001

On the Field of View of Infrared Optical System

WANG Yi-feng

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Field of View (FOV) is one of the important parameters of an infrared optical system. It is inversely proportional to the focal length of the optical system. The FOV can be adjusted by changing the focal length or by zooming. The core of this adjustment is the zoom lens. The FOV concept of an infrared optical system is analyzed in detail. The idea and development trend of infrared zoom technology are presented mainly on the basis of the related papers published domestically.

Key words: field of view; zoom; infrared optical system; optical design

0 引言

视场也称视界或视野, 是指光学系统在固定不动的状态下的观察范围的大小, 通常以角度来计量。视场是红外光学系统的一个重要指标。由于功能单一, 单视场红外光学系统在实际使用中有所限制。因此, 双视场或多视场是军用红外光学系统的发展方向。通过变换焦距实现不同视场的过程称为变焦。本文探讨了视场概念, 并主要基于国内相关文献资料, 介绍了红外光学变焦技术的发展思路及动态。

1 关于红外光学的基本概念

图 1 所示为红外探测中目标与探测器之间的能量辐射的几何关系^[1]。若探测器足够灵敏, 红外探测过程则可与光学参数无关。但实际上, 因为目标面积大约在 m^2 量级, 而且目标光子是呈发散分布的, 所以单元探测器的光敏面积一般大约在 μm^2 量级。此时, 如果直接用图 1 所示的几何关系来实现红外探测, 那么作用距离就很可能近到没有军用价值。透镜面积一般大约在 cm^2 量级。如图 2 所示^[1], 通过引入一片透

收稿日期: 2016-03-15

作者简介: 王忆锋 (1963-), 男, 湖南零陵人, 工学士, 高级工程师, 主要从事器件仿真研究。

E-mail: wangyifeng63@sina.com

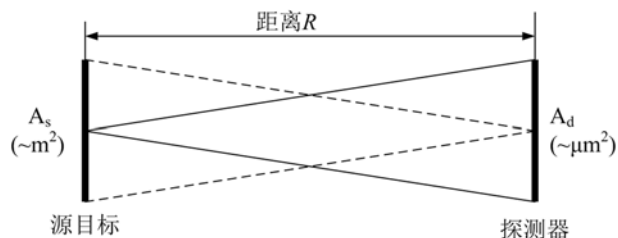


图1 源目标与探测器之间的能量辐射的几何关系

镜,即可把大约 cm^2 面积上的光子数会聚到 μm^2 的面积上,从而增加红外整机的作用距离。这时从透镜开始到探测器为止的部分就构成了一个光学系统。从概念分析上来看,可以将光学系统等效为一片透镜。当然,实际的光学系统由多片透镜组成,它们按照一定的功能可以分为若干透镜组。本文将不加区别地使用透镜和透镜组这两个术语。

根据外形的不同,透镜可以分为凸透镜(正透镜,以下简称为透镜)和凹透镜(负透镜)两大类。如果透镜的厚度与曲率半径相比足够小,则将其称为薄透镜。如图3所示,以透镜所在位置为界,将物体所在的空称为物方空间,并将成像所在的空间称为像方空间(以下各量值均在像

方空间中进行定义)。一束平行于主光轴的光线通过透镜后相交于一点,该点称为焦点。经过焦点并垂直于光轴的平面称为焦平面;透镜成像所在的平面称为像平面。透镜的中心称为光心;焦点与光心之间的距离称为焦距(记为 F),其变化量 ΔF 称为离焦。焦距 F 的倒数称为光焦度。

图4所示为单透镜的成像过程,其成像公式为^[1]

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{F} \quad (1)$$

式中, p 为物体与透镜之间的距离,简称物距; q 为所成物体之像与透镜的距离,简称像距。

作用距离较远是军用红外系统最主要的特征。这时,物距 p 大约在 km 量级,而焦距 F 一般在 cm 左右量级,于是由式(1)可知 $q \approx F$,即焦平面与像平面基本上是重合的。换言之,此时像平面就是焦平面。或者说,探测器芯片所在位置就是焦平面所在位置,这可能就是“焦平面探测器”这一称谓的由来。

将根据式(1)中的像距 q 定义的像平面称为

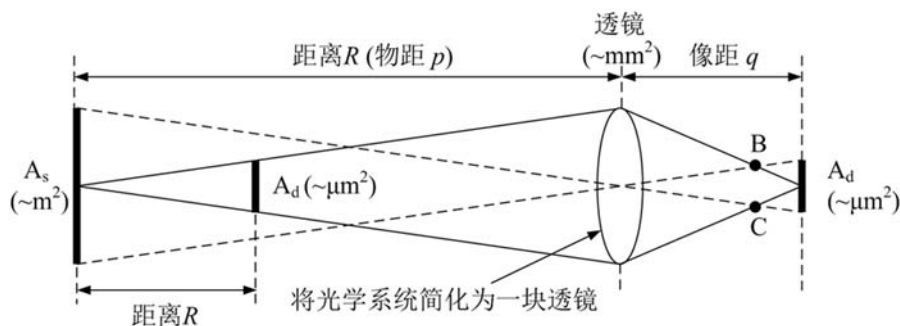


图2 一个光学系统所收集到的辐射能量

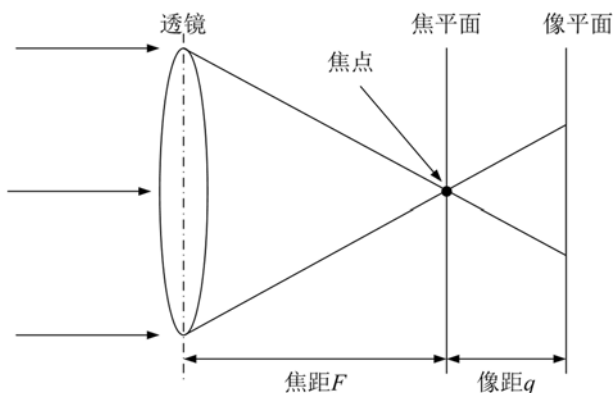


图3 透镜的焦点、焦距、像距、焦平面和像平面

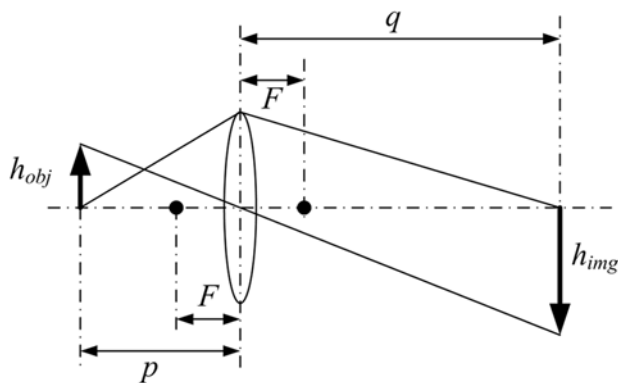


图4 单透镜的成像方程

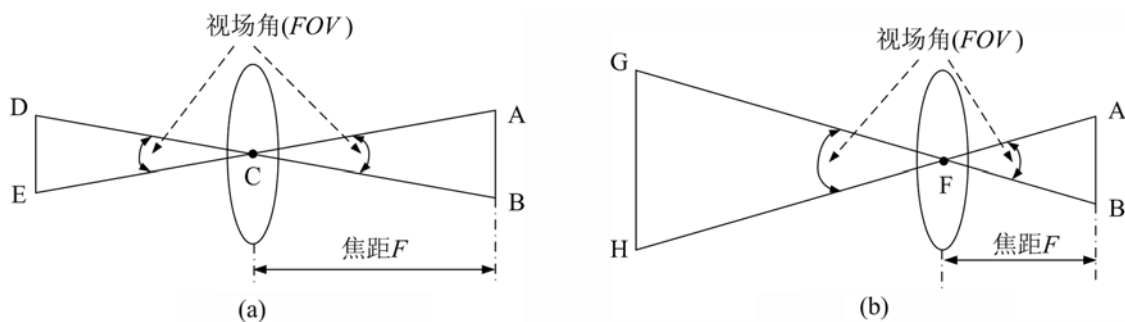


图 5 (a) 长焦距对应于小视场; (b) 短焦距对应于大视场

理论像平面; 将根据探测器芯片所在位置定义的像平面称为实际像平面。一般红外系统装调完毕后, 探测器芯片的位置即被固定, 这也就意味着实际像平面的位置是不变的。而另一方面, 根据式 (1) 可知, 当物距 p 不变时, 像距 q 以及相应的理论像平面会随焦距 F 发生变化, 导致理论像平面可能位于实际像平面的前面, 也可能位于实际像平面的后面。因此, 为了获得最佳的成像效果, 我们就需要一种调节或者补偿机制: 当理论像平面在探测器芯片的前面时, 把它往后推出; 当理论像平面在探测器芯片的后面时, 把它往前拉。总之, 要使理论像平面与实际像平面重合, 这一过程简称为变焦。

2 关于视场的概念

在图 5 中, 设探测器的纵向尺寸为 AB , 则其视场角为

$$FOV = \frac{AB}{F} \quad (2)$$

由式 (2) 可见, 光敏面大小和焦距长短是影响视场大小的两种因素。假定光敏面不变, 影响视场的因素则只剩下焦距一项。这时, 如果焦距固定不变, 那么视场也会保持不变, 这样的光学系统称为定焦系统。若焦距发生改变, 则视场也会随之变化, 这样的光学系统称为变焦系统。另外, 从式 (2) 中还可看出, 长焦距对应于小视场, 如图 5(a) 所示; 短焦距对应于大视场, 如图 5(b) 所示。

作为一种概念性的形象描述, 假定小视场所覆盖的场景区域为 1 个面积 (单位), 大视场所覆盖的场景区域为 5 个面积。假设探测器的

规格即光敏元的数量为 640×512 , 同时假设不管是大视场还是小视场, 均用 640×512 个光敏元去覆盖。在平均处理之后, 小视场所对应的分辨率比较细密, 适用于目标识别; 大视场所对应的分辨率比较粗疏, 适用于目标搜索。因此, 双视场或多视场对于军事应用来说很有吸引力。

假定图 5 所示的焦距是不变的, 则该图相当于是给出了两套分别具有小视场和大视场的定焦系统。从概念上来讲, 通过把这两套定焦系统并列在一起就可以获得双视场。这当然不是工程技术上的方案, 因为使用两套光学系统会带来体积、重量和成本等方面的问题。于是在工程技术上就很自然地产生了一种想法, 即能否在一套光学系统的框架内通过改变焦距来分别实现大视场和小视场? 假定两套定焦系统的前端 (例如第一片入瞳透镜等) 和后端 (例如探测器等) 是相同的, 直观上不难看出, 如果单独把其中的不同部分提取出来, 并将其做成两个可以互相切换或者调入/调出的部件, 那么就可以实现以上想法。

通过改变透镜表面的曲率半径、改变传输介质的特性或者改变工作温度都可以改变焦距。但是最简单的方法就是移动透镜, 即把同一透镜沿光轴横向移动, 如图 6(a) 所示; 或者换用不同参数的透镜, 如图 6(b) 所示。最长焦距与最短焦距之比称为变焦倍数或变焦倍率, 又称变焦比或变倍比。文献中所报道的变倍比有 $3 \times$ [2]、 $4.6 \times$ [3]、 $10 \times$ [4-5]、 $18 \times$ [6]、 $20 \times$ [7]、 $25 \times$ [8-9]、 $30 \times$ [10] 和 $35 \times$ [11] 等数值。变倍比越大, 视场的变化范围越大。变倍比大于 10 的, 一般称为高变倍比变焦镜头; 反之, 则称为低变倍比变焦镜头。

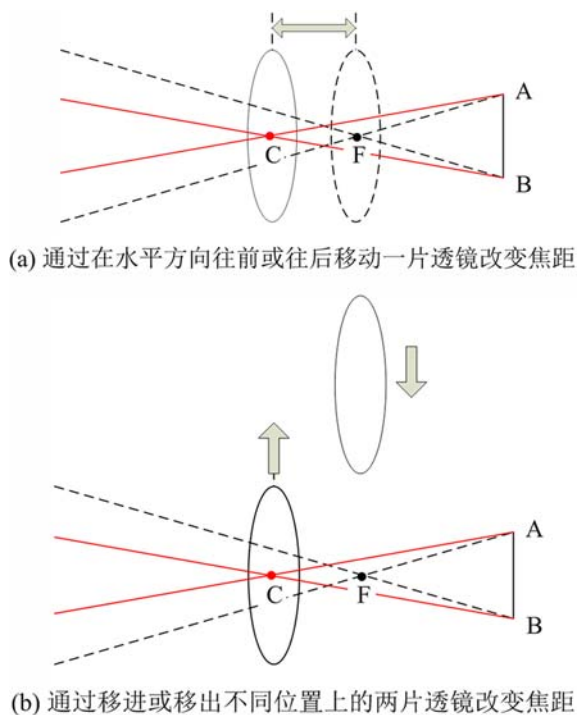


图 6 通过移动透镜实现变焦

在高变倍比系统中, 因为变化范围较大, 所以可以定义长焦、中焦和短焦三个位置。要做到同时兼顾长焦、中焦和短焦的像质是十分困难的, 因此我们可在保证中焦像质最好的前提下对长焦和短焦像质进行优化。刘峰等人在中焦时是采用平滑换根来提高变倍比的^[5,12]。在几何光学中, 研讨光学系统的理想成像性质的分支称为高斯光学, 或称近轴光学。高斯光学系统的解称为高斯解, 该解可以用作系统设计的初始结构^[10]。高斯解取值的恰当与否可以决定该变焦系统是否出现无解、是否最快变焦、是否平滑换根^[11,13]等。文献[14]介绍了一个用于变焦系统高斯光学计算的通用程序。该程序可以用来分析变焦系统变倍比的变化情况。

将图 2 中有关光学系统的部分抽取出来重画(见图 7(a)), 并注意到其中两束光线的交点 B 和 C。如图 7(b) 所示, 在不影响入射光线的前提下, 有可能会在 B 点和 C 点上使光线折转, 从而获得一个倒像(从数字信号处理的角度来说, 只需把这个倒像信号矩阵作一个转置即可复原出正像)。而为了使光线折转, 最直接的方法或许是再引入一片透镜, 如图 7(c) 所示。该透镜称

为中继透镜。同时对入瞳透镜(物镜)的参数进行相应调整。此时, 物镜所成之像即为中继透镜之物, 然后进行再一次成像, 这一过程称为二次成像^[3-4,10,15-18]。由于冷屏结构的关系, 致冷型红外成像系统一般都要用到二次成像。这时可以基于光瞳衔接原则将变焦系统和二次成像系统分成两部分进行单独设计, 经过优化后再将两部分衔接起来^[10]。文献[15]介绍了一种二次成像光学被动无热化设计。

为了降低杂散辐射的影响, 致冷型探测器一般都配有冷屏^[16,19]。在设计和调节前端光路时, 需要兼顾冷屏的结构特征, 以实现较好的冷屏效率。例如, 在图 7(b) 中, 注意到标注出的 I、J 和 K 三点。如图 7(c) 所示, 如果在 IK 处设置一个冷屏, 那么就有可能获得 100% 的冷屏效率。若要达到 100% 的冷屏匹配, 则可能会造成光学系统的前组透镜被较多放大, 从而限制光学系统的小型化水平, 同时也不利于杂散辐射的抑制^[19]。当采用二次成像方式时, 在满足冷

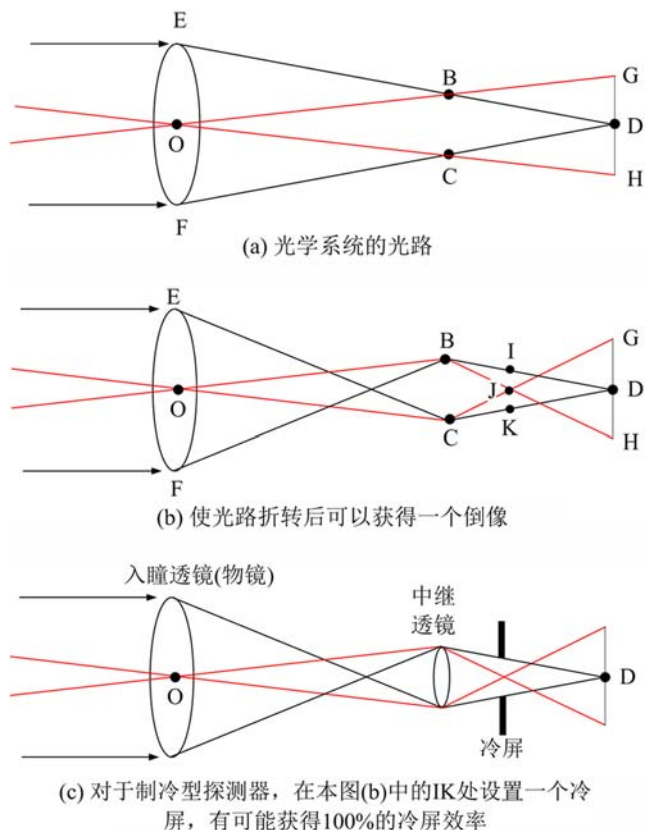


图 7 二次成像与冷屏

屏效率的前提下,可以有效缩小系统口径,这样有利于双视场光学系统的小型化^[3]。

另外,随着中继透镜的移动,光束可能会变大或变小,如图 8 所示。这时就需要用一个可变光阑来调节通光孔径。如果没有这样一个可变光阑,那么就会引入光学串音^[20],或者会挡住本该进来的光子。

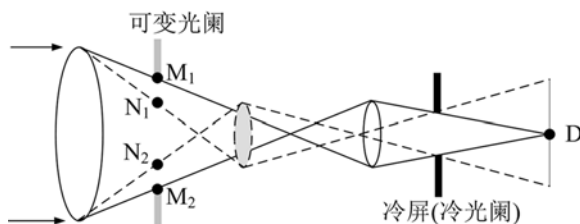


图 8 可变光阑

实际系统一般是用若干个中继透镜组来实现的。这些中继透镜组可以分为前固定组、变倍组、补偿组和后固定组。顾名思义,变倍组主要起变倍作用;前固定组用于形成一个满足变倍组要求的物平面;补偿组用于补偿像平面位置的移动,以在整个变倍过程中保持像平面位置不变;后固定组用于将变倍组所成的像调节到指定的像平面位置上。每个透镜组称为一个组元;四个透镜组称为四组元^[4]。根据不同的情况,有些系统可能会省去这四个透镜组中的一个或二个,于是相应地就有三组元^[21-22]或二组元^[10,23-24]系统。

在多组元的情况下,存在一个如何将光学系统的总焦距或总光焦度分配到各组元的问题。文献[25]利用 MATLAB 软件来分配变焦系统各组元的光焦度。以组元之间的间隔作为初始量,以变倍组的物距作为自由量,求出满足间隔要求的光焦度分配和组元运动形式。通过 MATLAB 仿真画出变焦过程中各组元的移动轨迹,然后分析各组元的偏角和视场角等因素对系统复杂程度的影响情况,并合理分配各组元的光焦度,最后制定出初始结构。初始结构的优化可以利用 ZEMAX^[2,10]和 CODE V^[8,26]等光学设计软件进行。

3 离散变焦光学系统

从数值变化的角度来看,离散变焦一般只有两个或三个焦距(档位)可供选择,因此离散变焦光学系统又称为双视场^[2-3,17-18,26-36]或三视场^[37-38]光学系统。与连续变焦相比,离散变焦结构简单,系统透射率高,装调相对容易^[2]。

文献[34-35]介绍了一种利用二元光学元件设计的仅含有 4 片透镜的双波段双视场光学系统。文献[36]介绍了一种采用轴向移动式变换视场的衍射双波段双视场光学系统。文献[2]报道了一套变倍比为 3 的双视场光学系统,其中两种结构共用主物镜。通过旋入 2 片透镜来实现小视场;通过旋入另外 3 片透镜来实现大视场。文献[3]采用切换变倍方式设计了一种变倍比为 4.6 的双视场光学系统。文献[17]报道了一种基于二次成像和前组透镜轴向移动变焦的中波红外双视场光学系统。

红外变焦系统通过移动部分组元实现变焦,加大了系统无热化的难度^[18]。文献[30]分析了热差对光学参数的影响情况。文献[26]介绍了一种采用径向切换式变倍机构实现两档视场切换的光学系统。他们通过使用具有不同温度折射率系统的正负透镜组合实现了被动无热化设计。文献[18]分析了折射/衍射光学系统的消热差原理,并建立了一个可平衡初级像差和热差的中波红外双视场变焦模型。他们通过分配光焦度、匹配光学材料和引入衍射面,在 $-40 \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内实现了变焦系统的消热差设计。文献[30]介绍了一种可平衡初级像差和热差的变焦模型。他们分别将热离焦和热色差等效为初级像差,然后通过选定透镜的初始形状和结构参数、分配光焦度、匹配光学材料特性以及引入非球面,实现了中波红外双视场变焦系统的消热差设计。

为了在变焦过程中获得令人满意的像质,需要尽可能地减小高级像差,包括各变焦位置上的轴上点与轴外点的像差、大视场与小视场的像差以及各种色差^[8]。为此可以引入非球面^[5,10,16,39]和衍射面^[8]等。文献[40]针对光学变

焦系统因像差校正状况而引起的像平面不稳定问题提出了一种校正方法。在像差校正中,文献[13]首先在保证各组元焦距固定不变的条件下分别对各组元进行优化,使其场曲、像散和球差等像差达到最小值;在大致确定各组元的像平面与物平面之后,再将其组合起来平衡剩余的场曲、像散、畸变和色差等剩余像差,从而实现对变焦系统的优化。

4 连续变焦光学系统

如果光学系统的焦距可以连续变化而不是仅可取两三个值,则将其称为连续变焦[4-5,8,12,16,41-45]光学系统。在连续变焦系统中,去掉不动的前固定组和后固定组,可动的只有变倍组和补偿组。补偿组焦距为正值的变焦系统称为正组补偿系统,补偿组焦距为负值的变焦系统称为负组补偿系统。变倍组和补偿组的相对位置的变化决定了系统的变倍比。当变倍组的焦距相同时,将两种补偿方式进行比较。基于正组补偿的连续变焦光学系统的结构细而长,但基于负组补偿的系统结构粗而短,且后者的二级光谱和球差均比前者的大。对于小视场系统来说,在对球差和二级光谱要求低的情况下,负组补偿可以达到要求;但对于大视场或大变倍比系统来说,要求二级光谱小,则宜采用正组补偿。文献[10]在设计 $30\times$ 变焦系统时,采用正组补偿方式实现了连续变焦。

变倍组与补偿组的位移量之间存在严格的一一对应关系。如果能够找出这种位移对应关系,并由某种驱动机构带动变倍组和补偿组同时按照这种关系移动,那么就可实现连续变焦。位移驱动结构大多为凸轮。作为一个具有曲线轮廓或凹槽的主动件,凸轮作等速回转运动或往复直线运动,其运动规律取决于轮廓曲线。通过将变倍组和补偿组的位移量与相应焦距之间的关系拟合成交距-位移曲线,即可得到凸轮的轮廓曲线^[13]。其设计好坏对于整个变焦过程中的像平面稳定性、像质情况以及工艺性能等都具有重要影响。用于设计凸轮轮廓曲线的方法

包括绘图法和解析法两种。文献[43]讨论了采用绘图法设计凸轮轮廓时产生误差的原因。文献[46]利用UG软件对凸轮轮廓进行了三维设计,并对所设计凸轮的结构进行了有限元分析。文献[43]介绍了一种利用Pro/Engineer软件对凸轮轮廓进行三维设计的方法。文献[10]介绍了一种基于MATLAB的凸轮曲线设计方法。他们通过输入相应参量(变倍组和补偿组的焦距、中焦状态下二组元的放大倍率以及变倍组的运动范围),即可得到凸轮曲线^[10]。文献[22]介绍了一种可简单、准确绘制凸轮曲线图形的计算公式。文献[47]介绍了一种用于计算凸轮曲线的某些点数值的通用公式和程序。

文献[48]介绍了一种基于ZEMAX光学设计软件的凸轮曲线优化设计方法。该方法利用ZEMAX宏语言编写了凸轮曲线设计程序,并得到了变倍组与补偿组之间准确的相对位移关系。文献[23]介绍了一种基于ZEMAX软件的二组元变焦系统凸轮曲线设计程序。文献[21]介绍了一种基于ZEMAX软件的三组元变焦系统凸轮曲线设计程序。文献[49]介绍了一种可改善补偿组凸轮曲线的方法。文献[12]基于ZEMAX软件中的多重结构,得到了变倍组与补偿组离散的相对位置关系,然后用MATLAB软件拟合出了补偿曲线。

变焦系统成像质量的高低在很大程度上取决于凸轮曲线的加工精度。文献[50]指出,影响凸轮曲线精度的主要因素为变倍组和补偿组的焦距以及两者的间隔。他们通过分析三者之间的对应关系,提出了一种凸轮曲线优化方法。文献[12]通过对凸轮曲线进行优化设计,有效控制了变焦过程中的光轴漂移问题。圆柱凸轮上的变倍曲线槽和补偿曲线槽的精度会影响变倍组与补偿组的光学关系^[42]。文献[42]分析了圆柱凸轮的工艺特性,并通过设计专用夹具满足了圆柱凸轮的加工精度要求。文献[51]讨论了变焦系统优化过程中有关渐晕系数处理的问题,并介绍了一种渐晕系数计算方法。

良好的凸轮曲线能够保证变焦的精确性、平滑性和转动力矩均衡,表现为驱动凸轮槽与槽内轴承之间的压力角较小^[52]。文献[53]介绍了一种用于选取压力角值域的方法。为了确保

凸轮具有较小的压力角, 文献 [54] 分别构造了凸轮变倍组和补偿组驱动力矩与各自压力角的函数表达式, 然后利用其函数组合构造了整体目标优化函数, 并优化计算了变倍曲线压力角与补偿曲线压力角的最优值。针对曲线局部压力角难以控制的情况, 文献 [55] 介绍了一种基于基线交换的变焦驱动设计方法。该方法通过在合适的变焦曲线位置上交换基线 (主驱动曲线) 解决了曲线局部压力角的控制问题。文献 [56] 分别采用动态矩阵控制和线性控制两种方法设计了用于变焦系统机械装置的控制器。文献 [52] 指出, 通过综合等间隔设计和等角距设计凸轮曲线方法的特点可以减小凸轮曲线的压力角, 从而实现复合式凸轮曲线的优化设计。文献 [41] 提出了一种基于 MATLAB 软件的凸轮曲线编程方法。该方法通过调整曲线参数, 计算了压力角并实现了压力角均衡, 最后绘制出了凸轮曲线。

从凸轮曲线需要满足的实际边界条件和函数连续性出发, 文献 [57] 分析和推导了几种常见的成像倍率与凸轮转角之间的函数关系, 并对设计实例进行了 MATLAB 仿真。除了变倍比之外, 还有一个关于变倍速率的问题。凸轮变倍所需空间较大, 变倍速率相对较慢, 无法满足包括小型化在内的高性能红外系统需求 [3], 因此基于步进电机的变焦镜头已经得到了很好的发展。文献 [58] 介绍了一种基于连续变焦的双电机联动方案。文献 [59] 介绍了一种利用微处理机和步进电机产生指令控制, 然后将其经过较为简单的传动链后实现变焦的方法。文献 [3] 采用电磁阀变倍实现了 60 ms 的变倍速率。文献 [24] 从二组元变焦系统前后物镜的相互运动关系着手, 通过矢量及点的运动合成与分解, 提出了凸轮曲线的分解合成设计法, 使凸轮曲线消除了拐点, 变焦系统的结构长度大大缩短, 变倍速率明显加快。文献 [5] 通过在中焦时采用平滑换根快速提高了变倍比。

各个光学元件之间存在相对运动的光学系统称为动态光学系统。变焦系统就是一种典型的动态光学系统。与采用光路计算并逐点描绘

补偿组曲线的一般方法不同, 文献 [60] 基于动态光学理论推导了补偿组公式, 获得了补偿组运动曲线, 并设计了用于补偿像移的凸轮机构。该方法具有像面完全稳定的特点。文献 [7] 分别运用动态光学理论、CODE V 和 ZEMAX 宏三种方法对一个 $20\times$ 变焦系统进行了变焦曲线拟合。数据分析表明, 基于动态光学理论拟合出的变焦曲线在满足系统要求的前提下更能保证像平面的稳定性。文献 [23] 基于动态光学和高斯光学原理, 借助 ZEMAX 软件的宏语言功能准确计算了凸轮曲线的数据。该方法不仅可以提高设计效率, 而且还可以根据曲线形状实时分析变焦系统的合理性和可靠性。

5 多组元全动型变焦系统

近年来, 随着变焦性能要求的提高, 出现了全动型变焦系统 [61]。其特点是, 在变焦过程中, 所有组元都会随着焦距 F 的变化而变化 [62]。

传统变焦系统的各组元功能均有明确分工, 即完全按照补偿像面位移的要求来设计补偿组的凸轮曲线。而在全动型系统中, 除了前组元之外, 各组元都会对变焦作出贡献, 并且要综合考虑像平面稳定问题。多数组元都在作非线性移动, 以充分发挥各组元的作用。组元需在有限的移动范围内实现尽可能大的变倍比, 并获得较好的成像质量 [63]。

在全动型变焦系统中, 每个组元都朝着最有利于系统的方向运动, 所有组元不再有固定和移动之分。由于不受变焦过程中各组元共轭距的变化量为常量的限制, 全动型变焦系统的像差校正能力和变焦能力均可得到较大提高, 但是其设计和加工也要比普通变焦系统复杂得多。文献 [61] 介绍了一种用于拟合设计各种形式的任意组元运动的变焦系统凸轮曲线的计算方法。文献 [62] 介绍了一种用于求解多组元全动型变焦系统的程序法。他们通过给定初始参数进行了初始计算, 然后通过给定限制条件对其进行了优化, 并求出了满足条件的光焦度分配及各组元数据。文献 [63] 介绍了一种用于全动型变焦物镜优化设计的隐含函数控制方法, 并分析了以间隔为变量的优化过程。

6 结束语

目前, 军用红外光学系统正在从单视场向多视场发展。实现多视场的核心是变焦, 而变焦一直是光学设计中的一大难点。组元数越多、自由度越大, 设计难度越高^[62]。红外变焦的原理和技术基本上与可见光变焦相同。由于可供选择的红外材料有限, 而且高质量的大口径红外材料较难制备, 红外变焦光学系统的设计要难于可见光变焦光学系统^[6]。高变倍比、大相对孔径、宽视场、小型化和高成像质量是红外变焦光学系统的发展趋势, 但实际上这些要求之间有的是相互矛盾的^[60]。例如, 高成像质量要求像差小, 但是随着相对口径的增大, 轴上点的像差(即球差)增大, 这就会导致像差校正的工作量增加且结构形式趋于复杂, 从而影响系统的小型化水平。另外, 轴外初级像差和高级像差会随着视场的变大而增加, 进而给平衡像差造成困难。

变焦有连续变焦与离散变焦之分。在视场转换过程中, 连续变焦系统可以保持图像的连续性, 并可避免离散变焦切换过程中出现短时目标模糊的缺陷, 但是相应地也会增加系统的复杂程度。此外, 随着变焦性能要求的增高, 人们对凸轮精度的要求也会不断提高, 这就需要有好的凸轮曲线设计方法来与之相匹配^[48]。

参考文献

- [1] Dereniak E L, Boreman G D. Infrared Detectors and Systems [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- [2] 白瑜, 邢廷文, 杨建峰, 等. 实现光学被动热补偿的非制冷红外双焦光学系统 [J]. 激光与红外, 2010, 40(7): 748-751.
- [3] 曲贺盟, 张新. 高速切换紧凑型双视场无热化红外光学系统设计 [J]. 中国光学, 2014, 7(4): 622-630.
- [4] 杨乐, 孙强, 王健, 等. 长波红外连续变焦光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 999-1004.
- [5] 刘峰, 徐熙平, 孙向阳, 等. 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.
- [6] 张良, 刘红霞. 非制冷高变倍比连续变焦光学系统的设计 [J]. 应用光学, 2012, 33(2): 250-254.
- [7] 高天元, 侯振岩. 变焦曲线拟合方法的比较与研究 [J]. 光子学报, 2013, 42(1): 94-97.
- [8] 王保华, 刘英, 孙强, 等. 折射/衍射混合长波红外连续变焦光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 148-153.
- [9] 贾星蕊, 李训牛, 王海洋, 等. 大变倍比长波红外连续变焦光学系统设计 [J]. 红外技术, 2014, 36(7): 549-555.
- [10] 高金红, 付跃刚, 刘智颖, 等. 30×制冷型中波消色差红外变焦光学系统设计 [J]. 光电技术应用, 2013, 28(2): 13-17.
- [11] 陈津津, 金宁, 周立钢, 等. 高清晰大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2742-2747.
- [12] 刘峰, 徐熙平, 段洁, 等. 20×非制冷型红外变焦光学系统设计 [J]. 光子学报, 2010, 39(5): 866-870.
- [13] 刘波, 向阳, 刘畅. 车载近红外变焦距光学系统设计 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2011, 34(1): 34-37.
- [14] 李湘宁. 用于变焦距系统高斯光学计算与分析的通用程序 [J]. 光学仪器, 1993, 15(2): 12-15.
- [15] 罗金平, 王合龙, 刘欣, 等. 二次成像光学被动无热化设计 [J]. 电光与控制, 2012, 19(4): 85-88.
- [16] 郜洪云, 熊涛, 杨长城. 中波红外连续变焦光学系统 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1038-1043.
- [17] 郜洪云, 熊涛. 中波红外两档变焦光学系统 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1891-1894.
- [18] 姜凯, 周泗忠, 李刚, 等. 折反式中波红外双视场变焦系统无热化设计 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 403-407.
- [19] 曲贺盟, 张新, 王灵杰, 等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计 [J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322003.
- [20] 王忆锋, 马钰. 论红外焦平面器件的串音 [J]. 红外, 2014, 35(1): 1-8.
- [21] 曹红曲. 基于 ZEMAX 软件的三组元变焦系统凸轮曲线设计程序 [J]. 光学与光电技术, 2011, 9(3): 31-35.
- [22] 崔占刚, 罗春华, 汤金丹. 三组元变焦目镜的光学设计及其凸轮曲线的绘制 [J]. 光学技术, 2011, 37(6): 695-698.
- [23] 曹红曲, 金宁. 基于 ZEMAX 软件的二组元变焦系统凸轮曲线设计程序 [J]. 红外技术, 2004, 24(1): 38-43.
- [24] 卢若飞, 许光义. 变焦系统凸轮曲线的分解合成设计法 [J]. 云光技术, 1996, 9(3): 4-17.
- [25] 高铎瑞, 钟刘军, 赵昭, 等. 基于 Matlab 的变焦光学系统设计 [J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0416002.
- [26] 王铮, 王政. 双视场红外光学系统被动无热化设计 [J]. 激光与红外, 2014, 44(9): 1030-1034.

- [27] 赵延, 邓键, 于德志, 等. 光学被动消热差的长波红外双视场光学系统设计 [J]. **红外与激光工程**, 2014, **43**(5): 1545–1548.
- [28] 付跃刚, 黄蕴涵. 红外双视场枪瞄光学系统设计 [J]. **红外技术**, 2014, **36**(6): 451–456.
- [29] 贾永丹, 付跃刚, 刘智颖, 等. 双视场/双色红外消热差光学系统设计 [J]. **光子学报**, 2012, **41**(6): 638–641.
- [30] 邓键, 童卫红, 安晓强, 等. 双视场红外变焦镜头的无热化研究 [J]. **应用光学**, 2011, **32**(1): 133–137.
- [31] 张良. 无热化双视场红外光学系统的设计 [J]. **光学技术**, 2009, **35**(4): 566–568.
- [32] 陈吕吉, 陈津津, 李萍. 新颖变焦双视场长波红外光学系统设计 [J]. **红外技术**, 2011, **33**(7): 407–410.
- [33] 陈吕吉, 李萍, 冯生荣, 等. 中波红外消热差双视场光学系统设计 [J]. **红外技术**, 2011, **33**(1): 1–3.
- [34] 董科研, 潘玉龙, 王学进, 等. 谐衍射红外双波段双焦光学系统设计 [J]. **光学精密工程**, 2008, **16**(5): 764–770.
- [35] 董科研, 孙强, 李永大, 等. 折射/衍射混合红外双焦光学系统设计 [J]. **物理学报**, 2006, **55**(9): 4602–4607.
- [36] 李岩, 张葆, 洪永丰, 等. 谐衍射红外双波段双视场光学系统设计 [J]. **光学学报**, 2003, **26**(11): 200–204.
- [37] 贾星蕊, 李训牛, 曹易辉, 等. 红外双色三视场光学系统设计 [J]. **红外技术**, 2014, **36**(7): 549–555.
- [38] 付艳鹏, 冯晓燕, 戴赋贵, 等. 中波红外光学补偿三视场光学系统 [J]. **红外**, 2012, **33**(2): 17–22.
- [39] 杜玉楠, 牟达, 刘莹莹, 等. 20×长波红外变焦光学系统设计 [J]. **红外技术**, 2013, **35**(10): 607–611.
- [40] 李湘宁. 变焦运动的曲线修正与系统的象面稳定 [J]. **光学仪器**, 1993, **15**(1): 9–11.
- [41] 李金侠, 宋涛. 基于 Matlab 的连续变焦凸轮曲线编程 [J]. **舰船科学技术**, 2012, **34**(Z1): 14–17.
- [42] 莫萍, 蔡冬成. 连续变焦望远镜中凸轮的工艺性分析 [J]. **光电工程**, 1999, **26**(S1): 59–61.
- [43] 石彰, 杨春. 连续变焦光机系统凸轮轮廓设计 [J]. **激光与红外**, 2010, **40**(9): 1006–1009.
- [44] 周隆梅, 徐宗波, 卢子旺. 基于 Matlab 的连续变焦凸轮曲线编程 [J]. **舰船科学技术**, 2012, **34**(Z1): 56–58.
- [45] 白瑜, 杨建峰, 阮萍. 长波红外连续变焦光学系统设计 [J]. **光电技术应用**, 2008, **23**(5): 15–17.
- [46] 杨亮, 张宇, 李茂忠, 等. 变焦系统凸轮的优化设计及有限元分析 [J]. **新技术新工艺**, 2012, **21**(11): 16–18.
- [47] 周润林. 变焦镜头的凸轮曲线计算 [J]. **应用光学**, 1987, **7**(6): 11–13.
- [48] 林明发, 余晓芬. 基于 ZEMAX 二组运动变焦系统凸轮曲线优化 [J]. **光电工程**, 2009, **36**(4): 60–63.
- [49] 张秀丽. 改善补偿组凸轮曲线的新方法 [J]. **云光技术**, 2003, **16**(1): 16–17.
- [50] 陈鑫, 付跃刚. 变焦系统凸轮曲线的优化设计 [J]. **应用光学**, 2008, **29**(3): 45–47.
- [51] 崔军, 何国雄. 关于变焦系统优化过程中渐晕系数问题的讨论 [J]. **光学仪器**, 1990, **12**(3): 1–6.
- [52] 许正光, 赵一菲, 梁来顺. 用 OZSAD 软件实现复合式变焦凸轮曲线优化设计 [J]. **应用光学**, 2006, **27**(3): 203–207.
- [53] 唐剑兵. 变焦凸轮曲线的优化设计 [J]. **光学技术**, 1994, **20**(1): 27–30.
- [54] 陈卫宁, 杨洪涛, 刘伟, 等. 变焦凸轮曲线的优化设计方法 [J]. **红外与激光工程**, 2014, **43**(5): 1535–1539.
- [55] 许正光, 梁来顺. 基于基线交换的光学变焦驱动设计 [J]. **光学技术**, 2006, **32**(S1): 116–118.
- [56] 柏桂珍, 梅晓榕, 张华. 变焦镜系统的闭环控制 [J]. **光电工程**, 2005, **32**(1): 20–23.
- [57] 晏蕾, 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.
- [58] 陈秀萍, 张栓民, 孙婷, 等. 大倍率红外连续变焦系统双电机控制技术研究 [J]. **应用光学**, 2013, **34**(5): 754–757.
- [59] 张静, 刘敬海. 微处理机实现系统变焦的方法 [J]. **激光与红外**, 2000, **29**(3): 60–63.
- [60] 王春艳, 王志坚, 周庆才. 应用动态光学理论求解变焦光学系统补偿组凸轮曲线 [J]. **光学学报**, 2006, **26**(6): 891–894.
- [61] 崔军, 何国雄. 变焦系统凸轮曲线的拟合设计 [J]. **仪器仪表学报**, 1990, **11**(1): 108–112.
- [62] 钟刘军, 安志勇, 高铎瑞, 等. 多组元全动型变焦物镜设计 [J]. **激光与光电子学进展**, 2014, **51**(12): 122202.
- [63] 崔军, 何国雄. 全动型变焦距照相物镜的象差优化设计 [J]. **浙江大学学报 (自然科学版)**, 1990, **24**(4): 549–555.