

使用简单机械结构实现红外光学系统无热化

吴晓靖,孟军和

(天津津航技术物理研究所,天津 300192)

摘要:为了介绍简单机械结构实现红外光学系统无热化的原理和方法,首先简单比较了国内外进行红外光学系统无热化设计的三种方法,然后给出了在红外3~5 μm波段、3°视场范围和-40~60℃工作温度范围下经过无热化设计后的系统设计结果。结果表明,使用简单机械结构,不仅能在较大视场和较宽的工作温度范围内获得接近衍射极限的成像质量,而且系统结构简单,工作可靠。

关键词:红外光学系统; 无热化; 热膨胀; 凸轮

中图分类号:TN21 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)04-0391-03

Athermalizing infrared optical systems by using simple mechanical framework

WU Xiao-jing, MENG Jun-he

(Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300192, China)

Abstract: In order to describe principle and method of the athermalizing technique using simple mechanical framework in this thesis, firstly, three ways of athermalizing of infrared optical system are compared. Secondly, an optical system working at 3~5 μm, 3° field of view and -40~60℃ temperature range was designed. Furthermore, the image quality approaching the diffraction limit in a larger spatial field view and wider thermal range can be obtained when simple mechanical framework is used in the optical system.

Key words: Infrared optical system; Athermalization; Thermal expansion; Cam

0 引言

为了提高系统的环境适应性,通常要求光学系统在一个很宽的温度范围内保持稳定的光学性能。随着温度的变化,光学材料的折射率、光学元件的尺寸和面形都会发生变化,使光学系统产生离焦和其他像差,导致成像质量变差。与可见光光学材料相比,红外光学材料具有很高的折射率温度变化系数,所以温度

变化对红外光学系统性能的影响更严重^[1]。因此,要保证红外光学系统在较宽的温度范围内稳定工作,就必须消除温度对红外光学系统的影响,即对红外光学系统进行无热化设计。

综合国内外的研究报道,进行红外光学系统无热化设计的方法一般有以下三种:光学被动式、机械主动式和机械被动式^[2]。光学被动式方法是不外加任何调焦机构,只依靠光学系统自身成像原理和光学材料

收稿日期:2005-05-21; 修订日期:2005-06-16

作者简介:吴晓靖(1977-),女,天津人,工程师,硕士,主要从事光学设计及其结构的研究。

及机械结构材料的热特性匹配来实现无热化设计。虽然这种方法使系统具有质量轻和结构简单的特点,但国内可用的红外光学材料太少,不能满足该方法需要至少三种以上光学材料匹配的要求^[3]。由于二元光学元件具有无热差、负色散特性,国外把它当成一种光学材料在无热化设计中使用,但国内二元光学加工工艺尚不成熟,只能在有限尺寸的平面基底上加工二元结构,所以现阶段光学被动式方法难以广泛使用。机械主动式方法,即查表法,是在光学系统热敏感度大的光学元件(一般为物镜)附近加测温系统,根据已有的调焦数据,通过机械机构实现无热化。目前该方法技术成熟,国内多采用,但这种系统的体积和复杂性都很大,可靠性下降。机械被动式方法,即使用简单机械结构,设计出的系统体积较小,国内的机械加工装配水平完全可以满足系统的性能和精度要求,且目前国内未见该方法的应用报道,所以机械被动式方法具有推广应用的潜力。

1 使用简单机械结构实现无热化的原理

使用简单机械结构实现红外光学系统无热化是在光学系统中外加简单机械结构,利用结构的热膨胀,抵消补偿像面的热漂移。

据国外报道,机械被动式方法常用的简单机械结构主要有三种:双/多层镜筒结构、双/多层支撑杆结构和周向驱动-凸轮结构^[2]。

双/多层镜筒结构和双/多层支撑杆结构均利用不同层结构材料的热膨胀系数差来实现热驱动。图1为这两种结构的原理图。周向驱动-凸轮结构利用结构材料的周向膨胀驱动凸轮进而实现轴向驱动。图2显示了两种周向驱动-凸轮结构的原理图^[4]。

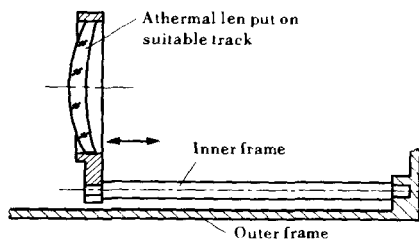
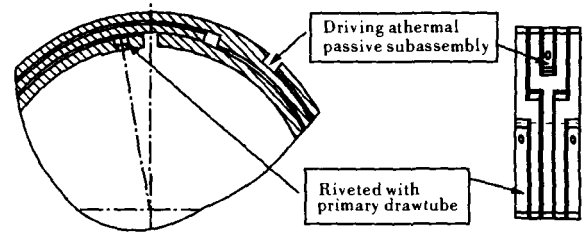


图 1 双/多层镜筒结构和双/多层支撑结构的原理图

Fig.1 Double/multilayer drawtube frame and double/multiplayer support pole frame



(a) 多层周向驱动-凸轮结构 (b) 单层多环周向驱动-凸轮结构
(a) Multilayer ring-way driving cam configuration (b) Single layer multi-rings driving cam configuration

图 2 两种周向驱动-凸轮结构

Fig.2 Two kinds of ring-way driving cam configuration

2 具体的设计实例

为了进行比较,设计了两个口径 90 mm 视场角 3°、波段 3~5 μm 、焦距 120 mm 红外系统,外接结构件采用铝材料(线膨胀系数: $23.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)。工作温度范围-40~60 $^\circ\text{C}$ 。

第一个系统完全采用 3 片折射元件,材料为硅、锗和硒化锌。经过光学设计软件优化后,在常温下,此系统符合像质评价的“瑞利判据”标准。图 3 为常温 20 $^\circ\text{C}$ 下系统的结构。常温 20 $^\circ\text{C}$ 下的结构参数列在表 1 中。其中第 4 面和第 5 面为二次非球面,加上二次非球面的目的是更有利于消像差。用 CODEV 软件模拟温度变化的影响(包括光学元件折射率的变化、光学元件的热膨胀和结构件的热膨胀),可以看出像面明显漂移。经计算,这个系统在-40~60 $^\circ\text{C}$ 温度范围内变化时,系统的最大离焦量为 132 μm ,而此时系统的最大焦深为 36 μm ,所以必须对此系统设计进行改进。

第二个系统是在第一个系统的基础上附加简单机械结构。将第一个系统的第一和第二片透镜组作为固定组,将第三片透镜作为无热化补偿组,利用简单机械结构的热膨胀驱动无热化补偿组前后移动。可用 CODEV 光学设计软件模拟这个过程,得到补偿组在-40~60 $^\circ\text{C}$ 温度范围内的补偿移动量为-0.16 mm。图 4(a)、(b)、(c)分别表示第二个系统,也就是使用了简单机械结构的系统在 20、60、-40 $^\circ\text{C}$ 时的调制传递函数(MTF)状况,可以看到在-40~60 $^\circ\text{C}$ 温度范围内的

像质基本上接近衍射极限。

表 1 无热化光学系统 1 的结构参数 (20 °C)

Tab.1 Constructional parameters of the athermal system 1 (20 °C)

	RDY	THI	GLA
OBJ	Infinity	Infinity	
1	83.38137	13.589787	Si
2	201.37867	4.343138	
3	251.82908	4.20000	Ge
4(asphere)	124.05205	46.676318	
5(asphere)	16.53237	4.114525	ZnSe
STO	12.99656	33.545500	
IMG	Infinity	0.000000	

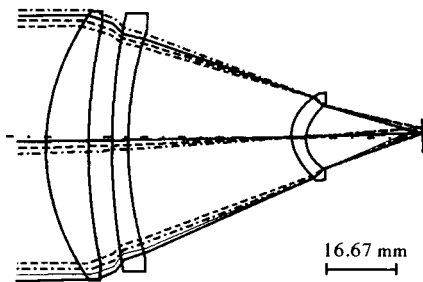


图 3 光学系统 1 的结构

Fig.3 Configuration of optical system 1

将双/多层镜筒结构应用到第二个系统中。结构设计见图 5。图中高膨胀材料选用铝 (热膨胀系数: $23.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), 低膨胀材料选用钛 (热膨胀系数: $7.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)。共用四层镜筒, 两层为铝材料, 长度分别为 110 和 60 mm, 两层为钛材料, 长度分别为 90 和 33.98 mm。四层镜筒连接后在 $-40 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的热膨胀量计算如下:

$$(110+60) \times 7.8 \times 10^{-6} \times 100 - (90+33.98) \times 23.6 \times 10^{-6} \times 100 \approx -0.160 \text{ mm}$$

该值与前面软件模拟的补偿移动量一致。

从图 5 可以看出系统结构图简单, 加工容易。所以可采用简单机械结构的第二个系统。

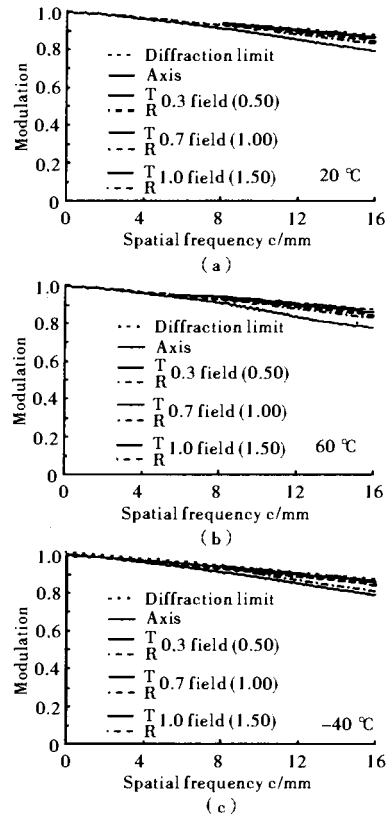


图 4 不同温度下的调制传递函数

Fig.4 MTF at different temperature

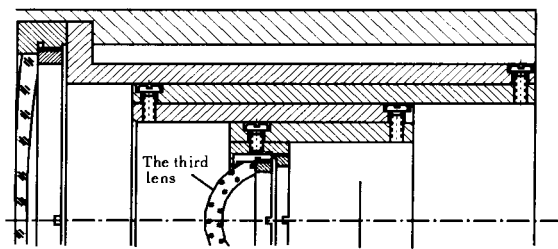


图 5 使用双/多层镜筒结构的系统结构图

Fig.5 Configuration of system using double/multilayer drawtube frame

3 结论

第二个系统使用了简单机械结构, 即进行了机械被动式无热化设计, 可以在较大视场内获得接近衍射极限的成像质量, 具有较宽的工作温度范围, 而且结构简单, 工作可靠。因此简单机械结构在红外光学系统的无热化设计、探讨变焦距和多波段系统的无热化设计中有很大的应用价值。 (下转第 405 页)

现一般的二值图像处理,例如,边缘检测、细化、抽骨架、剪枝等。

参考文献:

- [1] KONG Bing, WANG Zhao, TAN Yu-shan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. Infrared and Laser Engineering (孔兵, 王昭, 谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法. 红外与激光工程), 2002, 31(3): 275-279.
- [2] YANG Yao-quan, SHI Ren, YU Xi-ning. An algorithm to raise the location precision of laser spot center based on Hough transform [J]. Acta Optica Sinica (杨耀权, 施仁, 于希宁. 用 Hough 变换提高激光光斑中心定位精度的算法. 光学学报), 1999, 19(12): 1655-1660.
- [3] CHEN Xiao-dong, LI Wei-min, LI Jing, et al. Error analysis of the center of gravity method when used to get the position of a facula[J]. Optical Technique (陈晓东, 李为民, 李静, 等. 利用重心法求光斑信号位置的误差分析. 光学技术), 2000, 26(1): 5-8.
- [4] Pratt W K. Digital Image Processing. 2nd ed [M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [5] LI Xiao-feng, LUO Tong, DENG Ke, et al. Analysis and experiment of CCD-applied spatial optical communications light spot position locating gravity center calculation[J]. Optical Communication Technology (李晓峰, 罗彤, 邓科, 等. 采用 CCD 的空间光通信光斑位置提取重心算法的分析及实验. 光通信技术), 2004, 6: 13-15.
- [6] Meribout M, Ogura T, Nakanishi M. On using the CAM concept for parametric curve extraction[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(12): 21-26.
- [7] San J L, Dinstein I. Projection-based geometrical feature extraction for computer vision: algorithms in pipeline architectures[J]. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 1987, 9(3): 160-168.
- [8] Kenneth R Castleman; ZHU Zhi-gang, LIN Xue-yan, SHI Ding-ji. Digital Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry (Kenneth R Castleman; 朱志刚, 林学闫, 石定机. 数字图像处理. 北京: 电子工业出版社), 2002.
- [9] Pratt W K, Kabir I. Morphological Binary Image Processing with a Local Neighborhood Pipeline Processor [M]. Tokyo: Computer Graphics, 1984.
- [10] Arnold M. Verilog Digital Computer Design: Algorithm to Hardware [M]. NJ: Prentice Hall, 1998.

(上接第 393 页)

参考文献:

- [1] Jamieson T H. Thermal effects in optical systems[J]. Optical Engineering, 1981, 20: 156-160.
- [2] Veronica Povey. Athermalisation Techniques in Infrared System [A]. SPIE[C]. 655. 142-153.
- [3] Kanagawa Y, Wakabayashi S, Tiajime T, et al. Multilens system design with an athermal chart[J]. Applied Optical, 1994, 33(34): 8009-8013.
- [4] WU Xiao-jing, MENG Jun-he. Approach of athermalizing infrared optical systems[J]. Infrared and Laser Engineering (吴晓靖, 孟军和. 红外光学系统无热化设计的途径. 红外与激光工程), 2003, 32(6): 572-576.
- [5] Savage J A. Infrared Optical Materials and Their Antireflection Coatings [M]. New York: Academic Press, 1995.
- [6] Optical Research Associates. CODEV Reference Manual [Z]. California: Optical Research Associates, 1995.
- [7] YUAN Xu-cang. Optical Design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (袁旭沧. 光学设计. 北京: 北京理工大学出版社), 1988.
- [8] LI Lin, WANG Xuan, ZHANG Li-qin, et al. Thermal effects for optical system and design of an analysis program[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (李林, 王焯, 张丽琴, 等. 光学系统热效应及分析软件研制. 北京理工大学学报), 2000, 20(1): 112-114.
- [9] JIAO Ming-yin. The application of diffractive optical elements in IR imaging systems[J]. Journal of Applied Optics (焦明印. 衍射光学元件在红外成像系统中的应用. 应用光学), 2000, 21(6): 17-20.
- [10] JIN Le-tian, HU Yu-xi, YANG Jian-feng, et al. Thermal aberration analysis of coaxial spherical optical systems[J]. Acta Photonica Sinica (金乐天, 胡玉禧, 杨建峰, 等. 共轴球面光学系统的热像差分析. 光子学报), 1999, 28(7): 647-650.