

无热技术在光学系统中的应用

奚晓,岑兆丰,李晓彤

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室,浙江 杭州 310027)

摘要:围绕环境温度对光学系统性能的影响及其解决方法,分析了温度效应的三个方面的因素:光学元件的折射率、曲率半径和中心厚度以及光学元件之间的空气间隔,并讨论了这三个因素与温度变化之间的关系。提出使用无热设计来消除温度效应对光学系统的影响,并且比较了当前三种无热技术之间的优缺点。最后给出了一个红外光学系统作为例子予以分析,在设计过程中使用了机械主动式无热技术,以补偿温度变化所产生的影响,通过比较使用无热设计前后系统的成像质量,说明了无热设计可以消除光学系统中温度效应的影响,使系统在较大的温度范围内保持较好的成像质量。

关键词:光学系统; 温度效应; 无热技术

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)04-0388-03

Application of athermalisation in optical systems

XI Xiao, CEN Zhao-feng, LI Xiao-tong

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This paper focuses on the temperature effect and its solution. Analysis is made concerning temperature effect on three factors: refractive index of optical elements, curvature radius and center thickness of optical elements, and the space distance between optical elements, and their relation to temperature variation are as well discussed. Athermalisation is introduced to eliminate the influence of temperature in optical systems, and the advantage and the disadvantage of the three athermalisations used currently are compared. An infrared optical system is taken for example. In the design process, the mechanical active athermalisation is used for eliminating the influence of the temperature change. And the image quality comparison with/without athermalisation is made. It is concluded that the influence of temperature effect could be eliminated so that the high image quality could be realized in a wide temperature range.

Key words: Optical system; Temperature effect; Athermalisation

0 引言

通常设计的光学系统,只考虑在一般常规条件下使用。但是对于在特殊环境中工作的光学系统,由于

其环境温度的变化,使得光学材料的光学、结构参数都将发生相应的变化,从而引起成像质量的下降。因此对于这些系统来说,如果不考虑温度因素所带来的影响,将会严重影响系统的工作质量^[1]。

收稿日期:2004-08-02; 修订日期:2004-10-08

作者简介:奚晓(1978-),男,浙江天台人,硕士,主要从事光学系统设计研究。

光学系统的性能随着温度而变化,使系统的最佳像面发生偏离,并且破坏原有的像差校正状态。这种由温度引起的性能衰减统称为光学系统的热效应或温度效应。为了消除温度效应对光学系统产生的影响,可以使用无热技术对系统进行补偿,使系统在一个较大的温度范围内保持较好的成像质量,从而使光学系统能够在较大范围的温度环境下正常工作^[2]。

1 温度变化引起光学元件参数的变化

光学系统的温度效应主要表现在以下两个方面:

(1) 由温度变化引起的光学元件折射率的变化。常用的光学设计软件在追迹光线时所使用的折射率都是相对折射率而不是绝对折射率,所以计算在指定温度条件下光学材料的折射率变化时,需要计算在参考温度条件下光学材料的折射率、空气的折射率、光学材料的绝对折射率;计算在指定温度条件下光学材料的绝对折射率的变化值、空气的折射率、玻璃的相对折射率。

最后的结果是在指定温度条件下玻璃的相对折射率,这是通常用来追迹光线的折射率。因为在执行光线追迹时,仅与折射率的比例值有关,所以没有必要采用绝对折射率。

对于空气,可使用下式来计算其折射率^[3]:

$$n_{\text{air}} = 1 + \frac{(n_{\text{ref}} - 1)P}{1.0 + 3.4785 \times 10^{-3} \times (T - 15)}$$

$$\text{式中 } n_{\text{ref}} = 1 + \left[6432.8 + \frac{2949810\lambda^2}{146\lambda^2 - 1} + \frac{25540\lambda^2}{41\lambda^2 - 1} \right] \times 1.0 \times 10^{-8}$$

T 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; P 为大气压; λ 为波长, μm 。玻璃的绝对折射率随着温度变化的变化值由下式给出^[1]:

$$\Delta n_{\text{abs}} = \frac{n^2 - 1}{2n} \left[D_0 \Delta T + D_1 \Delta T^2 + D_3 \Delta T^3 + \frac{E_0 \Delta T + E_1 \Delta T^2}{\lambda^2 - \lambda_k^2} \right]$$

式中 n 是在参考温度条件下光学材料的相对折射率; ΔT 是温度的变化量;其他 6 个常数由材料制造商提供。

(2) 温度发生变化时,由于材料的热胀冷缩,光学元件的曲率半径和厚度以及元件之间的间隔也发生相应的变化。其变化量为:

$$dL = L \cdot X_g \cdot dT$$

式中 X_g 为材料的线性热膨胀系数。在一定的温度范围内是一个常数,只与材料本身有关。

2 光学系统的无热设计

由于温度变化将会引起光学元件的光学、结构等参数发生变化,从而使系统的成像质量变差。因此要求通过一定的补偿技术,使光学系统在一个较大的温度范围内保持较好的成像质量。这种方法称为无热设计。目前常用的无热技术大体上可以分为三大类^[4,5]:

(1) 机械被动式无热技术。利用装配材料的热胀冷缩或者有形状记忆特性的合金,使一个或一组透镜产生轴向位移,从而补偿由温度变化所引起的焦移。

(2) 机械(电子)主动式无热设计。利用传感器探测出环境温度的变化量,驱动电机带动透镜产生相应的轴向位移。

(3) 光学被动式无热技术。利用不同光学材料特性之间的差异,通过材料之间的合理组合来消除温度效应的影响,从而获得无热效果。

下面将用一个红外光学系统来说明无热设计^[6-8]。其系统结构如图 1 所示。系统的有效焦距为 147 mm,孔径为 60 mm,工作波段为 3~5 μm ,视场为 $\pm 2^{\circ}$,总长为 170 mm。该系统由三片镜片组成,其材料分别为氟化镁、硫化锌和锗。常温条件下的成像质量如图 2 所示,图 2(a)表示点列图,图 2(b)表示 MTF 曲线。

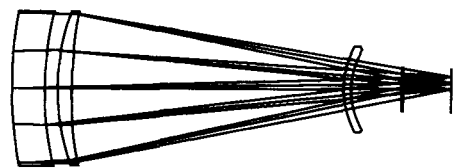


图 1 光学系统结构图

Fig.1 Structure of optical system

当系统的环境温度变化时,光学元件的折射率、面形曲率半径和中心厚度以及元件之间的空气间隔都发生了变化,从而影响到系统的成像质量,如图 3、图 4 所示。两图中(a)表示系统的点列图,(b)表示系统 MTF 曲线。

比较图 2~图 4 可以看出,当系统的环境温度发生变化时,系统的成像质量明显变差。为了使系统在一个较大温度范围内保持较好的成像质量,使用无热

技术, 改变第一个镜片和第二个镜片之间的间隔, 在 0℃时为 105.49 mm, 在 40℃时为 105.29 mm, 其间隔随温度的变化率为-0.05 mm/℃。系统在 0℃和 40℃时的成像质量如图 5、图 6 所示。两图中(a)表示点列图, (b)表示 MTF 曲线。

可以看出, 当使用无热技术后, 系统在 0℃和 40℃时的成像质量与 20℃时相比, 几乎没有下降,

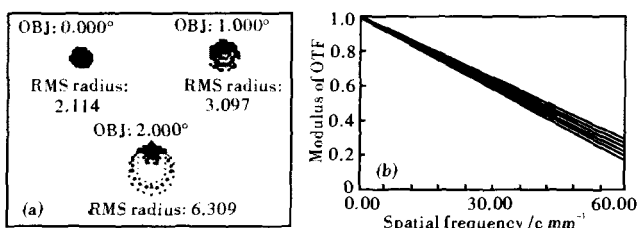


图 2 系统的点列图和 MTF 曲线(20℃)

Fig.2 Spot diagram and MTF of system(20℃)

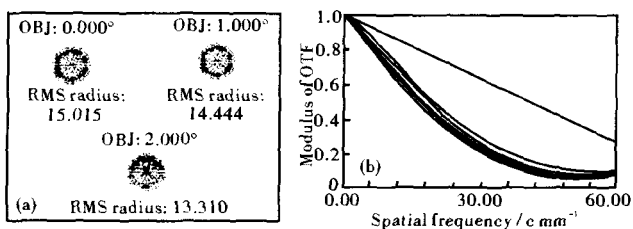


图 3 使用无热设计前系统的点列图和 MTF 曲线(0℃)

Fig.3 Spot diagram and MTF of system without athermalisation(0℃)

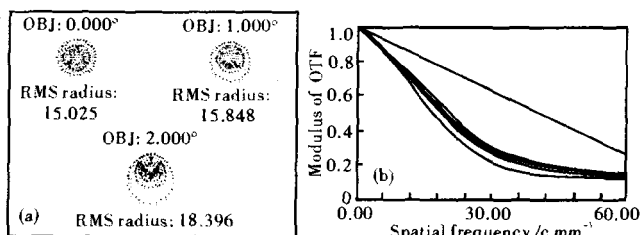


图 4 使用无热设计前系统的点列图和 MTF 曲线(40℃)

Fig.4 Spot diagram and MTF of system without athermalisation(40℃)

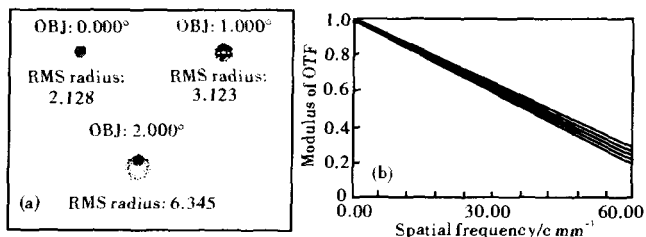


图 5 使用无热设计后系统的点列图和 MTF 曲线(0℃)

Fig.5 Spot diagram and MTF of system with athermalisation(0℃)

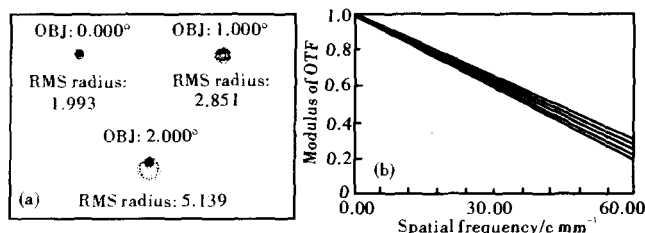


图 6 使用无热设计后系统的点列图和 MTF 曲线(40℃)

Fig.6 Spot diagram and MTF of system with athermalisation(40℃)

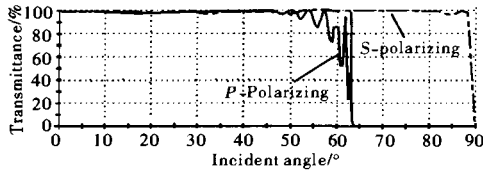
这样可以在一个较大的温度范围内使用该系统。

3 结论

从以上分析可以看出, 要改变的空气间隔的变化率为负数, 即当温度升高时, 要求空气间隔变小。而一般的金属材料都是热胀冷缩的, 因此不可能采用机械被动式来满足该系统的要求。所以这个系统采用了机械(电子)主动式无热技术, 利用热传感器、反馈电路和电机等电子系统, 使第一镜片和第二镜片之间的间隔产生-0.05 mm/℃的变化, 也可以按照预先存储在存储器中的温度-位移表来控制间隔, 从而使该系统在较大的温度范围内保持较好的成像质量^[9,10]。

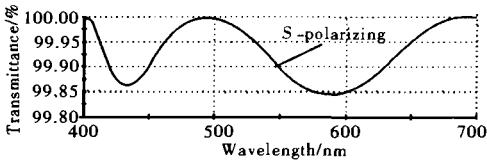
参考文献:

- [1] FENG Sheng-rong, LI Kai. Heat effect of infrared optical system [J]. Infrared Technology (冯生荣, 李凯. 红外光学系统的热效应. 红外技术), 1990, 12(2): 6-12.
- [2] LI Lin, WANG Xuan. Current status and prospects for thermal effects on optical systems and athermalisation techniques [J]. Optical Technology (李林, 王煊. 环境温度对光学系统影响的研究及无热系统设计的现状与展望. 光学技术), 1997, 26(5): 26-29.
- [3] Kohlrausch F. Praktische Physik. vol.1 [M]. Stuttgart: Teubner, zum Gebrauch für Unterricht, Forschung und Technik, 1968. 408.
- [4] Povey V. Athermalisation techniques in infrared systems [A]. SPIE [C]. 1986, 655. 142-153.
- [5] LI Lin, AN Lian-sheng. Theory and application of computer aided optical design [M]. Beijing: National Defense Industry Press (李林, 安连生. 计算机辅助光学设计的理论与应用. 北京: 国防工业出版社), 2002. 214-249.
- [6] GUO Yong-hong, SHEN Mang-zuo, LU Zu-kang. A thermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. Acta Optica Sinica (郭永洪, 沈忙作, 陆祖康. 折射/衍射 (下转第 409 页))



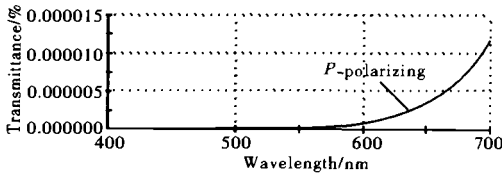
(a) 在参考波长 550 nm 偏振光随角度变化的透射率

(a) Transmittance as a function of the incident angle of the designed PBS at 550 nm



(b) 在入射角 70°时, S 偏振光的透射率

(b) Transmittance of S polarization as a function of wavelength at 70° incident angle



(c) 在入射角 70°时, P 偏振光的透射率

(c) Transmittance of P polarization as a function of wavelength at 70° incident angle

图3 计算的 P、S 透射率曲线图

Fig.3 Curve graph of calculated transmittance of P and S polarization

4 结束语

文中研究的偏振分光器不同于 MacNeille 的设计

原理,利用受抑全内反射和薄膜干涉原理设计,在宽波段宽角度范围内反射 P 偏振光,透射 S 偏振光。基于该原理,设计了用于背投系统的偏振分光器,并通过在膜系两边采用对称优化的方法使膜系满足设计要求,得到了令人满意的结果。

参考文献:

- [1] MacNeille S M.Beam Splitter[P].US Patent:2 403 731,1946-07-09.
- [2] Mouchart J,Begel J,Duda E.Modified MacNeille cube polarizer for a wide angular field[J].Appl Opt,1989,28(14):2847-2853.
- [3] Li Li,Dobrowolski J A.Visible broadband wide-angle, thin-film multilayer polarizing beam splitter [J].Appl Opt, 1996,35 (13): 2221-2225.
- [4] Philip Baumeister.Rudiments of the design of an immersed polarizing beam divider with a narrow spectral bandwidth and enhanced angular acceptance[J].Appl Opt,1997,36(16):3610-3613.
- [5] Shokooh-Saremi M,Nourian M,Mirsalehi M M.Design of multilayer polarizing beam splitters using genetic algorithm [J].Optics Communications,2004,233:57-65.
- [6] Li Li,Dobrowolski J A.High performance thin film polarizing beam splitter operating at angles greater than the critical angle[J].Appl Opt,2000,39(16):2754-2771.
- [7] Turner A F.Some current developments in multilayer optical filters [J].J Phys Radium,1950,11:440-460.
- [8] Baumeister P W.Optical tunneling and its application in optical filters[J].Appl Opt,1967,6:897-905.
- [9] TANG Jin-fa,ZHENG Quan.Applied Thin Film Optics[M].Shanghai:Shanghai Scientific and Technology Publisher(唐晋发,郑权.应用薄膜光学.上海:上海科学技术出版社),1984.90-95.

(上接第 390 页)

红外光学系统的消热差设计.光学学报),2000,20(10):1392-1395.

- [7] HU Yu-xi,ZHOU Shao-xiang,XIANGLI Bin,et al.Design of athermal optical system[J].Acta Optica Sinica(胡玉禧,周绍祥,相里斌,等.消热差光学系统设计.光学学报),2000,20(10):1386-1391.
- [8] LI Xiao-tong. Gemetroy optic and optical design[M].Hangzhou: Zhejiang University Press(李晓彤.几何光学和光学设计.杭州:浙江大学出版社),1997.
- [9] WU Xiao-jing,SUN Chi-quan,MENG Jun-he.Relationship between

- athermalizing infrared optical system and zoom lens [J].Infrared and Laser Engineering(吴晓靖,孙赤全,孟军和.红外光学系统无热化设计与变焦距镜头的关系.红外与激光工程),2002, 31(3): 249-252.
- [10] 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.