

对无热化设计的像面位移补偿研究

瞿 伟^{1,2} 刘卫林¹

¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 温度变化会导致光学系统最佳焦面发生偏离,使得光学系统成像质量下降,为了使得光学系统成像质量保持稳定,对光学系统无热化设计进行研究。从温度变化导致像面位移的角度来研究,推导出像面位移公式,以像面位移公式来指导无热化补偿设计。以一个常温下达到衍射极限的光学系统为例,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,发现更改其中的4个参数都可以使像面位移减小或者为零,从而使系统成像质量提高,达到无热化设计目的。像面位移公式能够指导光学系统的无热化设计。

关键词 光学设计; 温度分析; 像面位移; 无热化设计

中图分类号 TH74 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.022201

Research on Design with Athermalization Image Plane Displacement

Qu Wei^{1,2} Liu Weilin¹

¹*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract The changes of temperature may lead to the divergence of best focal plane of its optical system, which will make the imaging quality of optical system decline. In order to maintain the optical system imaging quality stable, we study the athermalization of the optical system. A new way of athermalization what is divergence of the best focal plane is studied. The surface displacement formula is studied, then the surface displacement formula is used to guide the design of athermalization compensation. For example, we study the system that reaches diffraction limit in normal temperature. When the temperature ranges from $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, it is found that modify the four parameters in the surface displacement formula will make the surface displacement decrease or go to zero. So the optical system imaging quality gets improvement and achieves athermalization. The conclusion is that the surface displacement formula can guide the design of athermalization.

Key words optical design; temperature analysis; imaging displacement; athermalization

OCIS codes 220.2560; 220.1010; 220.1000

1 引言

对光学系统进行无热化设计的研究已经有很多,也提出了三种普遍的无热化设计方法^[1-3]: 光学被动式、机电主动式、机械被动式。但是这三种方法是独立的,并没有统一于一种理论中。

温度的变化会导致光学系统的最佳焦面偏离预定的像面,通过补偿像面位移,可以改善成像质量,使得光学系统在较宽的温度范围内有稳定的像质,即达到无热化设计。因此对像面位移进行补偿就可以实现温度补偿,实现无热化设计。

本文将从对像面位移补偿^[4]的新角度来研究无热化设计,以像面位移公式来指导无热化设计,提出的方法统一于像面位移公式中^[5-9]。

收稿日期: 2015-06-30; 收到修改稿日期: 2015-08-14; 网络出版日期: 2015-12-30

作者简介: 瞿 伟(1991—),男,硕士研究生,主要从事光电跟踪测量系统温度分析方面的研究。

E-mail: 664918920@qq.com

导师简介: 刘卫林(1969—),男,硕士,副研究员,主要从事光电跟踪测量系统光机总体设计方面的研究。

E-mail: ioeliuweilin@163.com

2 温度变化导致的光学系统像面偏移

光热膨胀系数定义为单位焦距在单位温度变化时的焦距改变量。折射透镜的光热膨胀系数为

$$\chi = \frac{1}{f} \cdot \frac{df}{dt} = \alpha_0 - \frac{1}{n - n_0} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1)$$

因此由温度变化引起的单块透镜的焦距变化为

$$\Delta f = f \cdot \chi \cdot \Delta T, \quad (2)$$

其中 f 是单块透镜的焦距, ΔT 是温度变化量。

假设光学系统由 n 组透镜 L_1, L_2, \dots, L_n 组成, 各组透镜焦距分别为 f_1, f_2, \dots, f_n , T_0 为参考温度, ΔT_j 为 L_j 组透镜的温度变化量, x_{0j} 为透镜的物距, 则像面位移推导如下。

当温度为 T_0 时

$$\frac{1}{x_j} - \frac{1}{x_{0j}} = \frac{1}{f_j} \quad (3)$$

当温度为 $T_0 + \Delta T_j$ 时

$$\frac{1}{x'_j} - \frac{1}{x_{0j}} = \frac{1}{f_j + \Delta f_j} \quad (4)$$

由(3)式和(4)式可得

$$\frac{1}{x_j} - \frac{1}{x'_j} = \frac{\Delta f_j}{f_j \cdot (f_j + \Delta f_j)} \quad (5)$$

L_j 组透镜的垂轴放大倍率 β_j 为

$$\beta_j = \frac{f_j}{x_{0j} + f_j} \quad (6)$$

则由(5)式和(6)式可得 L_j 组透镜在温度变化 ΔT_j 时的像面偏移为

$$\Delta x_j = x'_j - x_j = \frac{\chi \cdot \Delta T_j \cdot \beta_j^2 \cdot x_{0j}^2}{f_j \cdot (1 + \chi \cdot \Delta T_j)} \quad (7)$$

则经过其后面的各组透镜后的像面偏移量为

$$\Delta p_{0j} = \Delta x_j \cdot \beta_{j+1,n}^2 = \frac{\chi \cdot \Delta T_j \cdot \beta_j^2 \cdot x_{0j}^2 \cdot \beta_{j+1,n}^2}{f_j \cdot (1 + \chi \cdot \Delta T_j)} \quad (8)$$

式中 $\beta_{j+1,n}$ 是后面各组透镜的垂轴放大倍率的乘积。整个光学系统的像面偏移量为

$$\Delta P_0 = \sum_{j=1}^n \Delta p_{0j} = \sum_{j=1}^n \frac{\chi \cdot \Delta T_j \cdot \beta_j^2 \cdot x_{0j}^2 \cdot \beta_{j+1,n}^2}{f_j \cdot (1 + \chi \cdot \Delta T_j)} \quad (9)$$

令(9)式中

$$A_j = \frac{\chi \cdot \Delta T_j}{f_j \cdot (1 + \chi \cdot \Delta T_j)}, \quad B_j = \beta_j^2 \times x_{0j}^2, \quad C_j = \beta_{j+1,n}^2 \quad (10)$$

可以看出, A_j 只与透镜的玻璃材料、焦距及温度变化有关, B_j 只与透镜的光学间隔有关, C_j 只与透镜后面各组的垂轴放大倍率有关。

(9)式就是像面位移公式, 要想补偿像面位移, 即需要使得公式最后为零或极小。由于各组透镜的焦距有正有负, 故而完全可以通过合理选择不同的参数来使得像面偏移为零或极小。

3 对像面位移补偿的无热化设计

3.1 无热化设计条件

一个无热的光学系统应该满足系统光焦度、消热差与消色差3个条件^[10]。消热差的基本原理是通过选择合适的光学材料使得系统的光学元件的热差系数(又称温度焦距位移系数)与机械热差系数相互补偿, 进而实现系统的无热化设计。通过补偿像面位移使得系统最佳焦面位置不动, 实际上就是满足了消热差的条件。而且像面位移补偿是在光学系统初步设计之后进行的, 光学系统初步设计完成, 应该除了温度影响没有考虑外, 系统焦距和成像质量均满足。此时进行像面位移补偿, 使得系统最佳焦面位置不动, 也即是保持

系统的焦距不变,满足光焦度条件。只有消色差条件不能完全满足,通过像面位移补偿,系统的成像质量能够达到什么地步就只取决于系统色差,暂时没有研究这方面。

3.2 光学系统结构

根据(9)式可以看出,要进行像面位移补偿,可以改变这几个参数:1)选择合适的 χ ,即合适的玻璃材料;2)进行温控设置,减小 ΔT_j ;3)合理设置透镜的光学间隔;4)各透镜的焦距选择合适,即光焦度分配合适。这几种方式可以单独使用也可以混合使用。

采用一个光学设计实例^[6]来说明对像面位移补偿的无热化设计问题。光学系统焦距为400 mm,光谱范围0.4~0.9 μm ,相对孔径1/4,视场角6.2°,光学系统光路如图1所示,图2为系统设计成像质量评价,图3为20 °C时的结构参数。

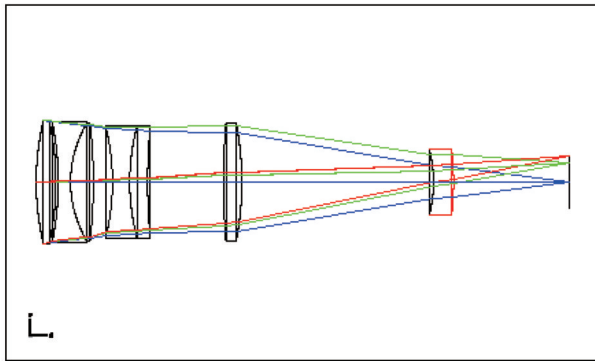


图1 光学系统光路图

Fig.1 Optical structure of optical system

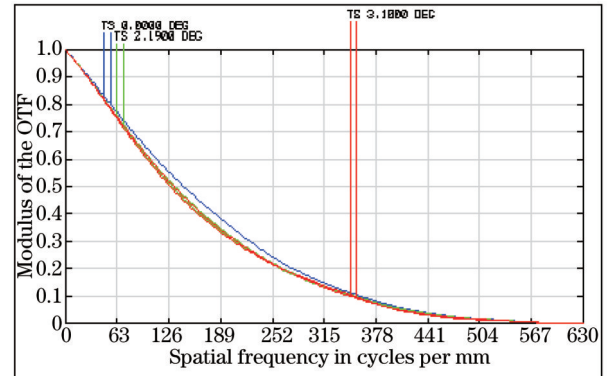


图2 系统设计调制传递函数

Fig.2 Modulation transfer function of optical system

Surf.	type	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity
1*	Standard	214.8619580 V	16.00000000	SK10	50.31309813
2*	Standard	-230.744155 V	2.00000000		50.05096032
3*	Standard	-240.617258 V	10.00000000	N-KZFS11	49.48326073
4*	Standard	92.81719100 V	18.48900000	SK55	47.75809176
5*	Standard	-429.005116 V	15.54828100		47.61117047
6*	Standard	-187.020793 V	14.00000000	N-KZFS11	45.57343946
7*	Standard	175.7910910 V	14.55530000	SF11	45.61538199
8*	Standard	441.9531130 V	61.71369500		45.38572433
9*	Standard	555.9858600 V	15.00000000	N-SK15	48.36114056
10*	Standard	-241.442660 V	155.7746090		48.32308654
11*	Standard	-104.593492 V	16.30050000	F4	26.12894185
12*	Standard	-230.025869 V	94.01721961		26.36348255
LMA	Standard	Infinity	-		21.71220647

图3 20 °C时的光学系统结构参数

Fig.3 Structural parameters of the optical system at 20 °C

从设计结果可以看出,这个光学系统成像质量非常好,接近衍射极限,结构也比较合理。但是这只是在20 °C时的设计结果。设镜筒材料为铝合金,对这个系统进行热分析,发现在-40 °C~60 °C的温度范围内成像质量并不稳定。图4是光学系统在60 °C时的调制传递函数(MTF)。

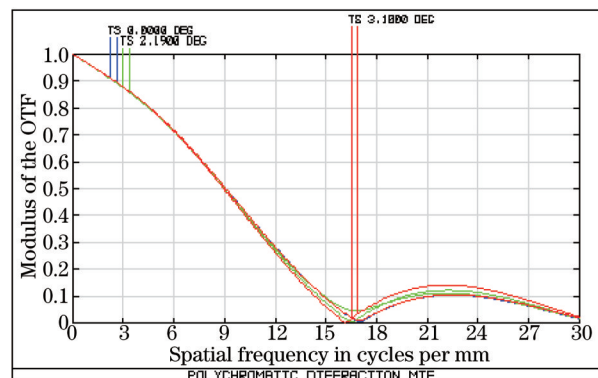


图4 60 °C时的MTF

Fig.4 MTF of optical system at 60 °C

可以发现当温度变化而不采取补偿措施时系统的传递函数将急剧下降,为此必须进行温度补偿设计。

3.3 选择合适的光学玻璃

根据(9)式,发现选取合适的 χ 值,即选择合适的光学玻璃,是可以使得系统的像面偏移减小甚至为零。于是对光学系统重新进行优化分析,把面3、5、6的玻璃更换为SK16、SFL56、N-SK10,修改后截距以使像面达到最佳焦面,表1是更换玻璃之后的MTF。

表1 更换玻璃后光学系统在30 lp/mm时的MTF
Table 1 MTF of 30 lp/mm of the optical system after changing glasses

Parameter	Value					
Temperature	-40 °C	-20 °C	0 °C	20 °C	40 °C	60 °C
MTF	0.38	0.42	0.46	0.48	0.50	0.51

尽管修改后并没有达到衍射极限,但在-40 °C~60 °C温度范围内MTF大于0.25,成像质量比较稳定。

3.4 修改玻璃和重新分配光焦度

更进一步,在更换玻璃的基础上重新分配光焦度,即修改(9)式里面的 χ 和 f 值,以求达到更好的无热化设计效果。图5是修改后的光学结构参数,表2是修改后的MTF。

Surf. type	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter
OBJ	Infinity	Infinity		Infinity
1*	Standard	241.3548140 V	SK10	50.31309813
2*	Standard	-203.644704 V		50.05096032
3*	Standard	-213.805285 V	N-KZFS11	49.48326073
4*	Standard	97.41213897 V	SK16	47.75809176
5*	Standard	-283.101661 V		47.61117047
6*	Standard	-153.750803 V	N-KZFS11	45.57343946
7*	Standard	303.9376816 V	SFL56	45.61538199
8*	Standard	-1.365E+005 V		45.38572433
9*	Standard	-594.831135 V	N-SK10	48.36114056
10*	Standard	-170.401476 V		48.32308654
11*	Standard	-92.4376635 V	F4	26.12894185
12*	Standard	-173.457225 V		26.36348255
LMA	Standard	Infinity	-	20.95170906

图5 修改 χ 和 f 后的光学结构参数

Fig.5 Structural parameters after changing χ and f

表2 修改 χ 和 f 后光学系统在30 lp/mm时的MTF

Table 2 MTF at 30 lp/mm of the optical system after changing χ and f

Parameter	Value					
Temperature	-40 °C	-20 °C	0 °C	20 °C	40 °C	60 °C
MTF	0.60	0.72	0.80	0.82	0.79	0.63

显然,更换玻璃后重新分配光焦度,光学系统在-40 °C~60 °C的温度范围内的MTF有很大的提高,成像质量良好。

3.5 修改光学透镜间隔

根据(9)式,修改式中的物距即修改透镜间的光学间隔也能达到补偿像面位移的目的。不同于上面两种方式,这种方式在每个温度点都需要一个不同的光学间隔,即需要根据温度来改变光学间隔。表3是修改后的各温度下的光学间隔及MTF。

表3 补偿后的光学间隔及MTF

Table 3 Optical interval and MTF after compensation

Temperature	-40 °C	-20 °C	0 °C	20 °C	40 °C	60 °C
Interval of face 8	61.44345396	61.50413404	61.56625839	61.63019141	61.69625095	61.76471418
Interval of face 10	155.8218356	155.8017149	155.7867042	155.7748335	155.7642704	155.7532785
MTF	0.86	0.88	0.89	0.90	0.89	0.88

实际上采用这种方式后光学系统的MTF接近衍射极限,与初始系统在常温下的像质接近。但是由于每个温度下的光学间隔都不同,就需要采取措施保持不同的光学间隔。有两种方式可以实现,主动调焦式和被动调焦式。主动调焦式是事先存储好温度-位移数据然后通过驱动电机来调节光学间隔,可以调节较大的距离。被动调焦式适用于极小的位移调整,利用镜筒、隔圈等材料本身的热胀冷缩来引起透镜间隔的变化。

3.6 本例的其他无热化方法

根据(9)式,减小温度的变化也能使得像面偏移减小,故而对光学系统加上温控装置,将光学系统控制在特定的温度下工作,这样显然就不用考虑温度对光学系统的影响了。

根据光学被动式无热化方法的原理^[5],光学玻璃的热膨胀系数与镜筒材料的热膨胀系数越接近越好,于是修改镜筒的材料。将镜筒材料由常规的铝合金更改为钛合金(热膨胀系数为 $7.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$),其他都不修改的情况下,光学系统在各温度下的MTF值如表4所示。显然,镜筒材料的选择对于光学系统的温度效应有很大的影响。

表4 更改镜筒材料后在30 lp/mm时的MTF
Table 4 MTF at 30 lp/mm after changing tube material

Parameter	Value					
Temperature	-40 °C	-20 °C	0 °C	20 °C	40 °C	60 °C
MTF	0.55	0.75	0.86	0.89	0.87	0.81

4 结 论

推导了光学系统在温度影响下的像面位移公式,发现根据像面位移公式进行像面补偿能很好的提高成像质量,减小温度效应。根据像面位移公式提出了4种无热化方式,以一个常温设计达到衍射极限的光学系统为例进行无热化设计,采用4种方式之一或者混合使用,使得无热化设计后的光学系统在-40 °C~60 °C这个较宽的温度范围内成像质量有很大的提高,甚至使光学系统达到衍射极限。说明此像面位移公式可以指导光学系统无热化设计。

参 考 文 献

- 1 Wang Xuexin, Jiao Mingyin. Research of design method of infrared optical system without heating up[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(1): 129-133.
王学新, 焦明印. 红外光学系统无热化设计方法的研究[J]. 应用光学, 2009, 30(1): 129-133.
- 2 Li Lin, Wang Xuan. Current status and prospects for thermal effects on optical systems and athermalisation techniques[J]. Optical Technology, 1997, 05: 26-29.
李 林, 王 焯. 环境温度对光学系统影响的研究及无热化设计的现状与展望[J]. 光电技术, 1997, 05: 26-29.
- 3 Thomas H Jamieson. Thermal effects in optical systems[J]. Optical Engineering, 1981, 20(2): 156-160.
- 4 M Olivieri, S Pieri, A Romoli. Analysis of defocusing thermal effects in optical systems[C]. SPIE, 1996, 2774: 283-292.
- 5 Jiao Mingyin. General conditions for thermal compensation in optical systems[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(3): 195-197.
焦明印. 光学系统实现热补偿的通用条件[J]. 应用光学, 2006, 27(3): 195-197.
- 6 Liu Yingqi. Study on Apochromatism of Wide Spectral Optical System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009, 33-40.
刘莹奇. 宽光谱光学系统复消色差研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009, 33-40.
- 7 Zhang Yuanying, Ren Xuechang, Lu Qinghong, *et al.*. Optical system design of shelter holographic sight[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0609005.
张远颖, 任雪畅, 炉庆洪, 等. 潜式全息瞄准器的光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0609005.
- 8 Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316003.
薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316003.
- 9 Xue Qingsheng, Cao Diansheng, Yu Xiangyang. Optical design of neotype Schwarzschild spectral imaging system with a large relative aperture[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0116001.
薛庆生, 曹佃生, 于向阳. 新型大相对孔径 Schwarzschild 光谱成像系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0116001.
- 10 Sun Aiping, Gong Yangyun, Chen Zhong, *et al.*. Athermal design of a large-aperture, wide-field assisting pilot infrared lens [J]. Infrared Technology, 2013, 35(10): 617-622.
孙爱平, 龚杨云, 陈 忠, 等. 大孔径辅助驾驶仪红外镜头无热化设计[J]. 红外技术, 2013, 35(10): 617-622.