

文章编号 1004-924X(2010)09-2009-07

基于中心复合设计的空间相机热计算参数修正

陈立恒, 吴清文, 董吉洪, 徐抒岩

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高空间相机热分析计算的准确度, 提出了一种基于中心复合设计的热计算参数修正方法。介绍了中心复合设计方法, 对空间相机次镜及遮光罩加热区对次镜的加热效果进行了试验, 并根据试验建立了有限元模型。利用中心复合设计法设计了热计算参数, 将设计的参数作为不同的工况代入到有限元模型中进行计算, 根据计算结果拟合出次镜最高温度、自然对流换热系数和接触传热系数的回归方程, 并根据试验结果通过求解回归方程得到最终的热计算参数。最后, 将求解后的参数代入到有限元模型中重新进行计算。结果表明, 参数修正后的结果与试验结果一致性较好, 计算和试验的相对误差为 2%, 该方法同样适用于其它相机的热计算参数修正。

关键词: 空间光学; 空间相机; 热分析; 参数修正; 中心复合设计

中图分类号: V475.3; V416.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101809.2009

Parameter correction of thermal analysis for space camera based on center composite design

CHEN Li-heng, WU Qing-wen, DONG Ji-hong, XU Shu-yan

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A method to correct thermal calculation parameters based on the Center Composite Design (CCD) was presented for enhancing the thermal analysis accuracy of a space camera. Firstly, the CCD was introduced, and the thermal tests of second mirror and baffle for the space camera were summarized. The finite element mode of the thermal tests was established and the thermal analysis was dealt with by a software code TMG at different load cases. The parameters of thermal analysis were designed by means of the CCD, then they were taken as the different load cases for the thermal analysis. The regression equations about the highest temperature of second mirror, free convection coefficient and the contact coefficient of heat transfer were fitted according to the results of thermal analysis. The final thermal calculation parameters were obtained by solving the regression equations based on the test results. Finally, the thermal analysis was dealt with again by the parameters that had been solved. The results show that the calculation results of parameters corrected are in agreement with the results of thermal test well, and the relative error is 2%. Moreover, the method can be applied to the thermal analysis of other space cameras and shows a good universality.

收稿日期: 2010-01-26; 修订日期: 2010-03-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60507003)

Key words: space optics; space camera; thermal analysis; parameter correction; center composite design

1 引言

热分析计算是空间相机热控设计必不可少的一个环节,进行热分析计算主要有两个目的:(1)设计阶段根据初步热控方案基础上的热分析结果进行热设计,并反复进行热控方案的调整和再分析,最后结合热试验确定最终的热控方案;(2)对相机在轨工作温度进行预示并对最终热控方案的可行性进行考察^[1-4]。由于在热分析数学建模中做了若干基本简化假设,且一些计算参数的选择皆有一定误差,因此热分析所得到的温度与实际值之间必然存在一定的偏差,有些甚至相差较大。为了减少这种偏差,提高热分析的准确度,有必要用相机的热试验数据对热分析模型进行修正。利用试验数据对热模型进行修正的思想在 20 世纪 60 年代就被提出^[1-2]。中国从 20 世纪 70 年代开始进行了这方面的理论探索,在理论上取得了很大进展;20 世纪 90 年代后开始探索实用化方面的研究。在此基础上,翁建华博士在 20 世纪 90 年代中提出了综合修正方法,并进行了瞬态修正方面的探索研究^[5],以解决稳态试验工况不足的问题和瞬态试验数据利用不充分的问题。采用热试验数据修正热模型的方法很多,除半经验试凑法和最小二乘法外,还有统计回归分析法和最优估计法等。

在对空间相机热分析模型进行修正时,因为相机的设计参数可以测得很准确,所以它的误差主要不是来自设计参数,而是来自建立有限元模型过程中的一些不确定因素,像边界条件与连接的假设和简化等。对于这些由于不确定因素而引起的误差,必须通过调整这些可能引起误差的元素来修正有限元模型。模型修正主要应把握好两个关键环节:一是误差位置的确定,另一个是选择合理的修正方法。本文利用中心复合设计(Central Composite Design, CCD)的方法,将试验与仿真分析相结合,对某空间相机遮光罩和中筒的热试验计算模型进行了修正。

2 中心复合设计

CCD 是响应曲面研究(Response Surface

Methodology, RSM) 中最常用的二阶设计。CCD 得以广泛的应用归因于以下 3 方面^[6]:(1) CCD 的序贯本质,它自然地将因子点划分为 2 个子集,第 1 个子集估计线性和两因子交互效应,第 2 个子集估计曲性效应;(2) CCD 的高效性,以最少的试验循环提供了关于试验变量和试验误差的诸多信息;(3) CCD 的灵活性,其设计类型可以应用于不同的操作域和设计域,因而 CCD 被广泛应用于工程、科学和工业中。CCD 拟合如下的二阶响应曲面模型^[7-12]:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \epsilon,$$

模型中, x_j 为试验因子,即影响试验的因素,可根据实际的需求而定; y 为试验指标,可以通过试验或分析计算获得; β 与 ϵ 为回归系数。此模型包含 $1+2k+k(k-1)/2$ 个参数,因此必须至少有 $1+2k+k(k-1)/2$ 个不同的设计点,而且至少每个设计变量要取 3 个水平。CCD 由如图 1 所示的 3 类试验点组成,其中包括 2 个水平试验点(Factorial point)、2 个星号试验点(Axial point)和 1 个零水平试验点(Central point)。

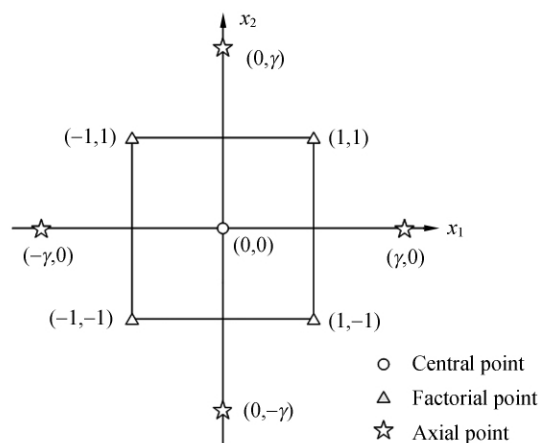


图 1 两因子中心复合设计

Fig. 1 CCD for $k=2$

基于 CCD 的定义及其特点,可以将其看成是一种处理热计算参数变量因子与试验指标之间关系的数学方法,通过回归方程建立起热计算参数与试验指标之间的关系,并用数学方式表达这种

关系,不但有质的相互关系,而且有量的相互关系。

3 遮光罩和中筒热试验

对某空间相机次镜及遮光罩加热区在常温常压条件下对次镜的加热效果进行了测试,观察了各个加热区以及关键部件(次镜)的温度变化情况,并根据试验结果对热分析计算的模型参数进行了修正。

试验对象为某空间相机遮光罩以及次镜组件,包括遮光罩、次镜、次镜座、次镜支杆和相机中筒。加热区包括遮光罩3个加热区和1个次镜加热区,遮光罩每个加热区的功耗为8 W,共计24 W,次镜加热区的功耗为4 W。空间相机次镜及遮光罩加热效果试验装置主要包括以下几个部分:(1)NI温度测试设备,(2)温度传感器:热电偶,(3)PC机,(4)Agilent电源。具体的传感器和加热区位置以及试验装置的示意图如图2所示。试验室温度为19℃,温度波动 $\leq \pm 1^\circ\text{C}$ 。试验过程中所有加热区同时加热30 min,在加热过程中观察测温点的温度变化情况。

试验结果表明,遮光罩以及次镜加热区加热对于次镜支杆以及次镜有一定的加热效果。其中当所有加热区同时加热时,试验过程中次镜最高

温度为22.15℃,次镜的温升为2.45℃。

4 热计算参数的修正

4.1 热计算参数的设计

在建立有限元模型的过程中,因为相机的设计参数可以测得很准确,所以热计算的误差主要不是来自设计参数,而是来自建立有限元模型过程中的一些不确定的因素,例如自然对流换热系数和接触传热系数等一些参数的选取。对于这些由于不确定因素而引起的误差,必须通过调整这些可能引起误差的元素来修正有限元模型,因此这里选取上述两个参数,即自然对流换热系数 x_1 和接触传热系数 x_2 作为CCD的因子。由于试验中关注的是加热区对次镜的加热效果,因此这里将次镜最高温度 y 作为考察指标,基于CCD进行了模拟试验的设计,建立了如图3所示的有限元模型。将模拟试验设计得到的不同因素水平作为不同的工况带入到有限元模型中进行热计算,得到不同工况时次镜的温度值。最后经过回归分析得到 y 与 x_1, x_2 之间的关系方程,并根据试验结果对方程进行规划求解,进而得到 x_1, x_2 的值。

基于上述的技术流程进行了两因子CCD。这里试验因子数 $k=2$,分别为自然对流换热系数(x_1),接触传热系数(x_2),其中 x_1 的变化可取1~25 W/(m²·℃), x_2 的变化可取50~1 000 W/(m²·℃),若取0水平试验次数 $k_0=8$,则星号试

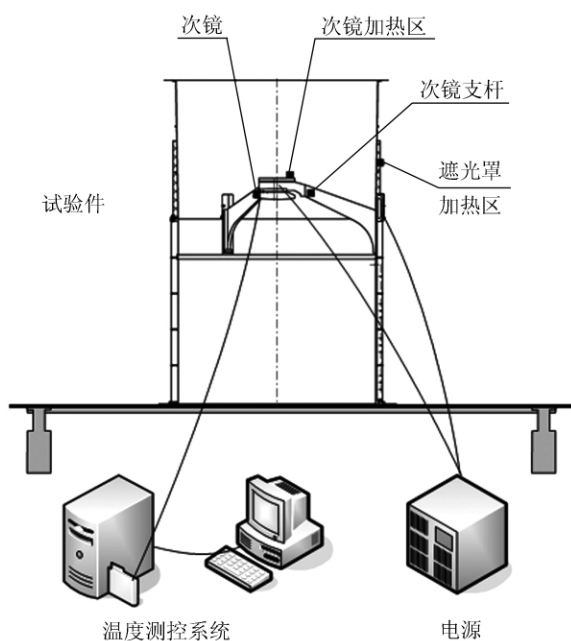


图2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test apparatus

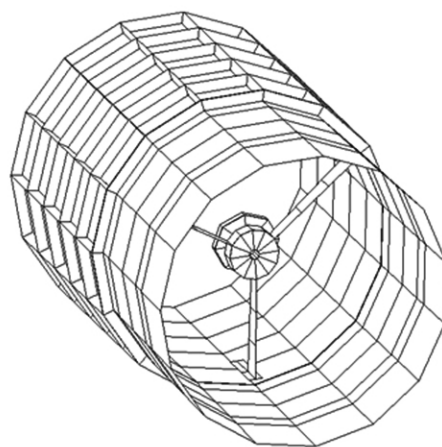


图3 试验状态有限元模型

Fig. 3 Finite element mode of thermal test

验点星号臂 $\gamma=1.414^{[13]}$, 经过计算可以得到各次试验的因素水平, 具体如表 1 所示。表中 z 为规范变量, 分别包括二水平试验点、零水平试验点和

星号试验点的数值。将各次的因素水平作为不同的条件输入到有限元模型中得到如表 1 所示的模拟试验结果。

表 1 CCD 表及模拟试验结果
Tab. 1 CCD matrix and simulation test results

试验号	z_1	z_2	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2	y
1	1	1	21.487	860.926	18 498.72	461.691 2	741 193.6	20.2
2	1	-1	21.487	189.074	4 062.633	461.691 2	35 748.98	20.1
3	-1	1	4.531	860.926	3 900.856	20.529 96	741 193.6	21.1
4	-1	-1	4.531	189.074	856.694 3	20.529 96	35 748.98	20.6
5	1.414	0	25	525	13 125	625	275 625	20.1
6	-1.414	0	1	525	525	1	275 625	22.2
7	0	1.414	13	1 000	13 000	169	1000 000	20.4
8	0	-1.414	13	50	650	169	2 500	20.1
9	0	0	13	525	6 825	169	275 625	20.4
10	0	0	13	525	6 825	169	275 625	20.4
11	0	0	13	525	6825	169	275 625	20.4
12	0	0	13	525	6 825	169	275 625	20.4
13	0	0	13	525	6 825	169	275 625	20.4
14	0	0	13	525	6 825	169	275 625	20.4
15	0	0	13	525	6 825	169	275 625	20.4
16	0	0	13	525	6 825	169	275 625	20.4

4.2 热计算参数的回归分析

根据表 1 中利用中心复合设计整理得到的热计算参数值以及根据不同参数值进行的有限元热分析计算的结果, 对中心复合设计的因子, 即自然

对流换热系数 x_1 和接触传热系数 x_2 以及考察指标, 即次镜最高温度 y 进行了回归分析, 得到如表 2 所示的分析结果。

表 2 CCD 回归分析结果
Tab. 2 CCD regression analysis results

	Coefficients	standard error	t Stat	P-value	Lower 95 %	Upper 95 %
Intercept	21.25754091	0.341621	62.22552	2.79×10^{-14}	20.49636206	22.01871975
x_1	-0.163601569	0.032151	-5.08852	0.000472	-0.235238748	-0.09196439
x_2	0.001998521	0.000817	2.446451	0.034466	0.00017834	0.003818702
$x_1 x_2$	-3.51044×10^{-5}	3.46×10^{-5}	-1.01358	0.334681	-0.000112274	4.20654×10^{-5}
x_1^2	0.004522038	0.000969	4.666096	0.000886	0.002362689	0.006681387
x_2^2	-1.10556×10^{-6}	6.18×10^{-7}	-1.78832	0.104011	-2.48302×10^{-6}	2.71902E-07
Multiple R=0.94906313						
Significance F= 9.94003×10^{-5}						

从上述的分析结果可以看出, y 与 x_1, x_2 之间的回归方程可以写为:
 $y=21.2575-0.1636x_1+0.0019x_2-3.5104 \times 10^{-5}x_1x_2+0.0045x_1^2-1.1056 \times 10^{-6}x_2^2$,
复相关系数 Multiple R=0.949, 以及方差分析结

果 Significance $F<0.01$, 说明该回归方程非常显著。t Stat 的分析结果表明各因素的主次顺序为 $x_1>x_1^2>x_2>x_2^2>x_1 \cdot x_2$ 。 x_1 和 x_1^2 对应的 P-value <0.01 , 所以因素 x_1 和 x_1^2 对模拟试验结果影响非常显著(* *); x_2 对应的 P-value 在 0.01

~ 0.05 , 所以 x_2 因素对模拟试验结果影响显著(*), 由于 x_1x_2 和 x_2^2 对应的“P-value” >0.05 , 所以 x_1x_2 和 x_2^2 对应的偏回归系数不显著, 可以将这两项并到残差中, 这样上述回归方程可变为:

$$y = 21.2575 - 0.1636x_1 + 0.0019x_2 + 0.0045x_1^2.$$

根据回归方程建立了自然对流换热系数、接触传热系数和次镜温度 3 个变量的响应曲面和等高线图, 从图中可以看出次镜温度随着自然对流换热系数以及接触传热系数的变化情况。

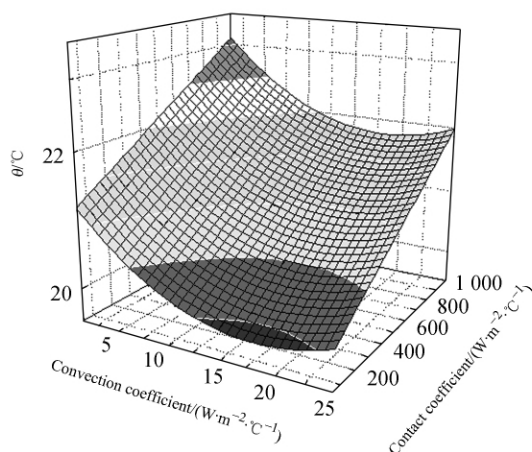


图4 回归方程的三维响应曲面

Fig. 4 Three-dimensional response surface plot of regression equation

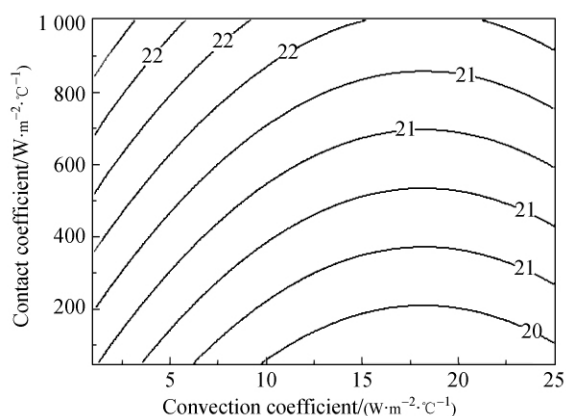


图5 回归方程等高线图

Fig. 5 Contour plot of regression equation

4.3 热计算参数修正结果

将试验中次镜的最高温度数据代入到回归方程中, 根据试验结果进行规划求解, 当次镜最高温度为 22.15°C 时, 对流换热系数为 $2\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, 接触传热系数为 $600\text{ W}/(\text{m}^2$

$\cdot ^{\circ}\text{C})$, 将规划求解得到的参数值作为计算模型修正后的输入条件代入到有限元模型中重新进行计算, 得到次镜的最高温度值为 21.7°C 。根据试验结果以及计算结果分别绘制了如图 6 和图 7 所示的试验过程温度曲线和参数修正后的计算温度曲线, 从图中可以看出试验和参数修正后的计算的温度拟合曲线具有较好的一致性, 计算和试验的相对误差为 2% 。

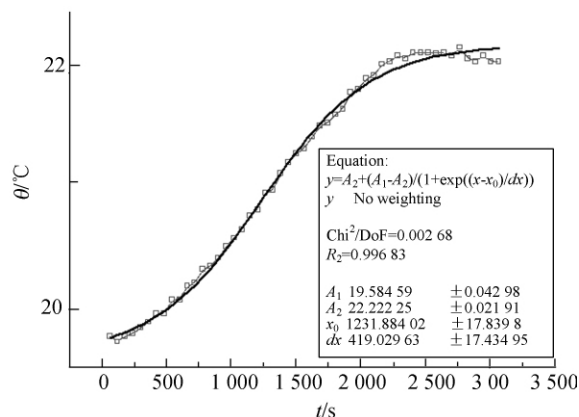


图6 试验温度拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of test temperature

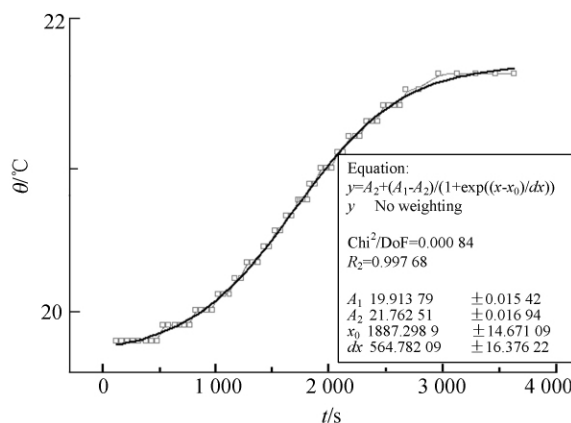


图7 计算温度拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of calculation temperature

5 结论

空间相机热计算的目的是根据相机内外热状况及热措施来确定其各部分的温度变化规律, 以便检验热设计是否已将各部分的温度控制在所要求的温度范围之内, 以及在给定的运行条件下是否预示相机的实际运行温度。由于在热分析计

算的数学建模中做了若干基本简化假设,且一些计算参数的选择皆有一定误差,因此热分析所得到的温度与实际值之间必然存在一定的偏差,有些甚至相差较大。为了提高空间相机热分析计算的准确度,本文提出了一种新的基于 CCD 的热计算参数修正方法,并通过试验与仿真计算相结合

的方式对某空间相机的部分组件的热计算模型进行了修正。结果表明,利用该方法进行模型修正、试验和参数修正后的温度拟合曲线具有较好的一致性,计算和试验的相对误差为 2%,这为相机其它部分的热分析计算模型的修正提供了必要的指导。

参考文献:

- [1] 闵桂荣. 卫星热控技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1991.
MIN G R. *Thermal Control of Satellite*[M]. Beijing: Astronautics Press, 1991. (in Chinese)
- [2] 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 1998.
MIN G R, GUO SH. *Spacecraft Thermal Control* [M]. 2nd. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [3] 陈长征, 赵贵军, 张星祥, 等. 空间光学镜头可适应边界温度的 CAE 计算方法[J]. 光学 精密工程. 2007, 15(5): 668-673.
CHEN CH ZH, ZHAO G J, ZHANG X X, *et al.*. A calculating method for temperature tolerance of space telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 668-673. (in Chinese)
- [4] 陈立恒, 吴清文, 罗志涛, 等. 空间相机电子设备热控系统设计[J]. 光学 精密工程. 2009, 17(9): 2145-2152.
CHEN L H, WU Q W, LUO ZH T, *et al.*. Design for thermal control system of electronic equipment in space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2145-2152. (in Chinese)
- [5] 李劲东. 卫星热网络模型修正技术进展及其改进方法研究[J]. 中国空间科学技术, 2004(3): 29-3.
LI J D. Development and modification of thermal network correction techniques for satellites Chinese Space[J]. *Science and Techonlogy*. 2004(3): 29-37. (in Chinese)
- [6] 张志红, 何桢, 郭伟. 在响应曲面方法中三类中心复合设计的比较研究[J]. 沈阳航空工业学院学报. 2007, 24(1): 87-91.
ZHANG ZH H, HE ZH, GUO W. A comparative study of three central composite designs in response surface methodology[J]. *Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering*, 2007, 24(1): 87-91. (in Chinese)
- [7] HANEED B H, TAN I A W, AHAMD A L. Preparation of oil palm empty fruit bunch-based activated carbon for removal of 2, 4, 6-trichlorophenol: Optimization using response surface methodology[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164: 1316-1324.
- [8] ZHENG Z M, HU Q L, HAO J. Statistical optimization of culture conditions for 1, 3-propanediol by *Klebsiella pneumoniae* AC 15 via central composite design[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 1052-1056.
- [9] DJOUDI W, AISSANI-BENISSAD F, BOUROUNIA-BACHA S. Optimization of copper cementation process by iron using central composite design experiments[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, 133: 1-6.
- [10] ZHANG X, WANG R J, YANG X X, *et al.*. Central composite experimental design applied to the catalytic aromatization of isophorone to 3, 5-xyleneol[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2007, 89: 45-50.
- [11] KASSAMAA L S, SHI J, MITTAL G S. Optimization of supercritical fluid extraction of lycopene from tomato skin with central composite rotatable design model[J]. *Separation and Purification Technology*, 2008, 60: 278-284.
- [12] ASLAN N. Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling and optimization of a multi-gravity separator for chromite concentration [J]. *Powder Technology*, 2008, 185: 80-86.
- [13] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2008.
LI Y Y, HU CH R. *Experiment Design and Data Processing* [M]. 2nd. ed.. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese)

作者简介:



陈立恒(1979—),男,吉林农安人,博士,助理研究员,2002年、2005年于吉林大学分别获得学士和硕士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位。主要从事空间光学遥感器热控制技术方面的研究。E-mail: chenliheng3@163.com



吴清文(1968—),男,四川简阳人,博士,研究员,博士生导师,1991年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1994年、1997年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光学精密仪器CAD/CAE研究和空间光学遥感器热控技术的研究。E-mail: wuqw@ciomp.ac.cn



徐抒岩(1963—),男,辽宁岫岩人,研究员,博士生导师,1985年于天津大学获得学士学位,1989年于中国科学技术大学获硕士学位,主要从事空间光学成像技术方面的研究。E-mail: xusy@ciomp.ac.cn

通讯作者:



董吉洪(1972—),男,吉林长春人,研究员,1995年于中国科学技术大学获学士学位,主要从事光学精密机械、光学遥感技术等方面的研究。E-mail: dongjihong2002@sohu.com

●下期预告

K9 基底细薄铜网上化学镀镍

刘小涵^{1,2},冯晓国¹,赵晶丽¹,高劲松¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033;2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为进一步提高高通光率网栅的电磁屏蔽性能,满足其环境适应性要求,在线宽约 $9\ \mu\text{m}$ 、膜厚约 $0.3\ \mu\text{m}$ 、周期 $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ 的细薄铜网上开展了镀镍工艺实验。首先,经涂胶、直写、显影、镀铜、去胶等工序,在 K9 基底上制备出细薄铜网栅试件。然后,对试件超声波除油,用 10% 的 HCl 溶液浸泡试件 10~15 s 进行镀前活化处理。接着,将试件放入已按成分要求配制好的化学镀镍溶液中,在恒温 $85\ ^\circ\text{C}$ 条件下化学镀镍 40~60 min。最后,从化学镀镍溶液中取出试件,放入烘箱烘干,缓慢冷却至室温。实验结果表明:镀层均匀、结合力强,同轴法测试 30 MHz~1.5 GHz 频带电磁屏蔽效能达到 32 dBm,比未镀镍前提高 11 dBm,而试件镀镍工艺导致其在 400~800 nm 波段平均透过率下降 $<1\%$ 。实验表明,在细薄铜网上能够镀制较好的镍层,可以在基本不影响光学透过率的前提下显著提高其电磁屏蔽效能和环境适应性。