

文章编号 1004-924X(2009)10-2385-07

机载光电平台球罩的视轴指向误差

韩松伟, 项阳, 刘洵, 孟中, 毛大鹏, 吴志勇, 王国华, 丁金伟, 李永刚
(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:机载光电平台光学镜头前的透光窗口须选用内外球心重合的等厚球形玻璃球罩,这是由于球罩在加工过程中产生的内外表面球心不重合会给视轴指向精度带来附加误差。本文根据光路图推导出了产生这种误差的数学表达式,分析了内外球心偏离对视轴指向精度的影响,进行了相关实验并对实验数据进行处理。实验结果表明,实测数据与数学理论推导结果吻合得很好。当某机载光电平台球罩的内外表面球心沿视场中心线的偏离达到0.26 mm时,45°视场处的视轴指向误差实测值达到0.075°,超出了0.029°(0.5 mrad)的允许值。为了将球罩加工误差带来的视轴指向偏差减小到理想值0.017°(0.3 mrad)以内,内外球心偏离必须控制在0.10 mm以内。根据分析结论重新加工了球罩内外表面,将球罩内外球心偏离控制在0.1 mm以内后,视轴误差均满足要求。

关键词:光电平台;玻璃球罩;视轴指向精度

中图分类号:V243.5 **文献标识码:**A

Effect of spherical shell of airborne electro-optical platform on optical axis pointing precision

HAN Song-wei, XIANG Yang, LIU Xun, MENG Zhong, MAO Da-peng,
WU Zhi-yong, WANG Guo-hua, DING Jin-wei, LI Yong-gang

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

Abstract: A concentric glass spherical shell with a uniform thickness is usually chosen as the transparent window mounted in front of the optical lens of an airborne opto-electronic platform, because the misalignment of the spheric centers on inside and outside surfaces produced by the fabrication can cause additional pointing errors. In this paper, the theoretical expression of addition pointing error based on an optical path is derived and the effect of the misalignment of the spheric centers on inside and outside surfaces on the pointing accuracy of a sight axis is analyzed. Several kinds of experiments are undertaken and the data processing result of the experiment indicates that the measurement results are in agreement well with the theoretical results. When the concentric misalignment of a spherical center is 0.26 mm, the axial pointing error at a 45° field of view reaches 0.075°, which is higher than the error limitation 0.029° (0.5 mrad). Analyzed results also show that the concentric misalignment should be controlled below to 0.10 mm in order to reduce the pointing error to 0.017° (0.3 mrad).

收稿日期:2008-05-21;修订日期:2008-07-31.

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA121803)

Based on the analyzed results, the inside and outside surfaces of the spherical shell is reprocessed, the experimental results demonstrate that the pointing error is acceptable when the concentric misalignment is controlled in 0.10 mm.

Key words: electro-optical platform; glass spherical shell; optical pointing precision

1 引言

机载光电平台是由多个光电观察、测量系统组成的综合航空遥感器,平台上通常搭载有可见光、红外和激光等适用于不同环境的任务载荷,具有机动灵活、适应性强、实时准确等特点,被广泛应用于地质、测绘等领域;将其作为战场信息的快速获取通道也被广泛应用于军事侦察,打击效果评估等领域。机载光电平台作为飞机的重要任务设备,是跟踪过程中实现视轴指向变化和视轴陀螺稳定的执行机构,用于在飞机姿态发生变化时使视轴在惯性坐标系中保持稳定^[1-2]。

飞机在飞行状态下,因为速度很快,会产生较大的气动载荷。气动载荷通过玻璃球罩直接加到机载光电平台上,由于气动载荷变化大,将产生风阻干扰力矩。飞机的机动飞行也将产生相应的惯性力矩,如不加以平衡,将使平台光轴偏离瞄准目标,造成视轴指向误差。另外飞机的各种振动,也将传递到平台,使平台光轴产生相应振动,造成电视图像模糊及跟踪瞄准误差^[3]。此外,在惯性稳定平台中,影响平台稳定精度的干扰源还有:线绕力矩、摩擦力矩、框架的不平衡力矩、载体角速度扰动以及反馈元件的漂移等^[4-6]。为减小风阻力矩的影响,本文主要分析在光学镜头前所加的玻璃球罩由于内外表面球心不重合所带来的视轴指向误差。

为了防止和减小风阻力矩的影响,机载光电平台均在光学镜头前设置透光窗口,且多选用内外表面球心重合的等厚球形玻璃球罩。在光学加工的过程中,由于设备、工艺、技术、材料、人员等原因,加工时球罩内外表面的球心会有不重合的问题发生,从而产生非等厚误差,影响平台的视轴指向精度。本文对平台研制过程中静态测角误差总是达不到指标的原因进行了分析,发现给视轴指向带来附加误差的原因是玻璃球罩内外表面球心不重合。在高精度两轴转台上对装有超差球罩的光电平台进行了视轴指向精度测试,检验结果

与理论分析符合得很好。对玻璃球罩进行重新加工后,减小了内外表面球心不重合偏差,提高了视轴指向精度,产品精度达到了指标要求。

2 球罩对视轴指向精度影响分析

2.1 球罩光路的几何关系

光电平台的镜头通过一等厚的玻璃球罩来观测外界景物,球罩的内外表面是同心球面,且其球心重合。如果由于加工的原因,使球罩内外表面同心度不够,就会带来视轴指向误差。下面以外表面的正入射光线(法线方向)为例,研究这种误差,如图 1 所示。

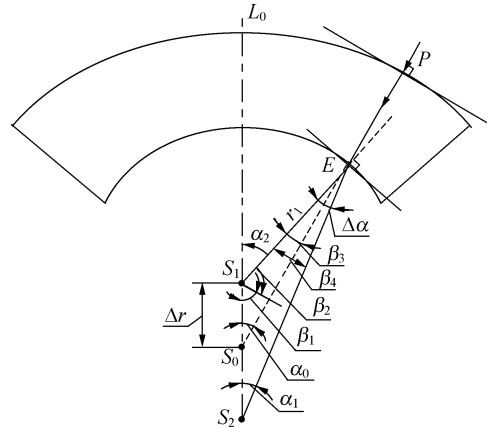


图 1 球罩内外球面的几何关系

Fig. 1 Geometric relations between internal and external spherical surfaces

图 1 中: L_0 为光电平台球罩中心线; PE 为入射光线; ES_2 为入射光线的出射光线; α_0 为球罩内外表面同心的理想情况下,实际正入射光线与中心线(即 0 位线)的夹角; α_1 为球罩内外表面不同心的情况下,出射光线与中心线(即零位线)的夹角; $\Delta\alpha$ 为由于球罩内外表面球心不重合带来的视轴指向偏差; Δr 为玻璃球罩内外表面球心的偏离量; r_1 为球罩内表面半径。

从图 1 可得到如下的关系式:

$$\beta_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha_0, \tag{1}$$

$$\beta_2 = \arccos\left(\frac{\Delta r \sin \alpha_0}{r_1}\right), \tag{2}$$

$$\beta_3 = \frac{\pi}{2} - \beta_2, \tag{3}$$

由 ES_2 表示 PE 的出射方向,则由折射率公式^[8]:

$$n_0 = \frac{\sin \beta_4}{\sin \beta_3}, \tag{4}$$

可得:

$$\beta_4 = \arcsin(n_0 \sin \beta_3), \tag{5}$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 - \beta_4, \tag{6}$$

$$\alpha_2 = \pi - \beta_1 - \beta_2, \tag{7}$$

将式(7)代入式(6)可得:

$$\alpha_1 = \pi - \beta_1 - \beta_2 - \beta_4, \tag{8}$$

整理后得下式:

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} + \alpha_0 - \arccos\left(\frac{\Delta r \sin \alpha_0}{r_1}\right) - \arcsin(n_0 \sin \beta_3), \tag{9}$$

将式(3)代入式(9)得:

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} + \alpha_0 - \arccos\left(\frac{\Delta r \sin \alpha_0}{r_1}\right) - \arcsin(n_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_2\right)) = \frac{\pi}{2} + \alpha_0 - \arccos\left(\frac{\Delta r \sin \alpha_0}{r_1}\right) - \arcsin(n_0 \cos \beta_2), \tag{10}$$

将式(2)代入式(10)得:

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} + \alpha_0 - \arccos\left(\frac{\Delta r \sin \alpha_0}{r_1}\right) - \arcsin(n_0 \cos \arccos\left(\frac{\Delta r \sin \alpha_0}{r_1}\right)) = \frac{\pi}{2} + \alpha_0 - \arccos\left(\frac{\Delta r \sin \alpha_0}{r_1}\right) - \arcsin(n_0 \frac{\Delta r \sin \alpha_0}{r_1}), \tag{11}$$

由式(11)可以得到指向误差:

$$\Delta \alpha = \alpha_0 - \alpha_1 = \arccos\left(\frac{\Delta r \sin \alpha_0}{r_1}\right) + \arcsin\left(n_0 \frac{\Delta r \sin \alpha_0}{r_1}\right) - \frac{\pi}{2}, \tag{12}$$

此式表明了球罩内表面半径 r_1 和玻璃折射率 n_0 为已知时,视轴指向误差与入射角 α_0 之间的关系。

2.2 球罩加工误差对视轴指向精度的影响

理想情况下,玻璃球罩内外表面的不同心度

$\Delta \alpha$ 为 0,即 $\alpha_0 = \alpha_1$ 。但由于玻璃球罩内外表面的不同心度,所造成的误差将如式(12)所示。

因此可以得出 $\Delta \alpha$ 是一个以 α_0 为自变量的函数。下面以方位为例,取 $r_1 = 126.65 \text{ mm}$, $\Delta r = 0.26 \text{ mm}$, $n_0 = 1.5163$,对 α_0 在 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 以 1° 为步长取值,得到如图 2 的 $\Delta \alpha$ 与 α_0 的计算关系曲线。

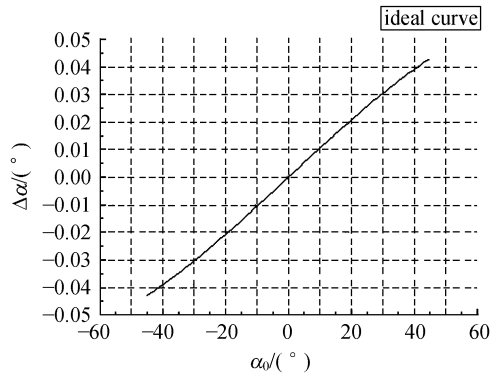


图 2 由式(12)计算得到的视轴误差的计算曲线
Fig. 2 Calculating curve of optical axis errors from formula(12)

从理论分析的曲线可以看出, $\Delta \alpha$ 与 α_0 的关系近似为一条直线,其特点是误差随着光线斜入射角度的增大而呈现递增趋势。同理,当取 α_0 角为一定值,令 Δr 为变量时,曲线也近似为一条直线,以 $\alpha_0 = 45^\circ$ 为例,如图 3 所示。

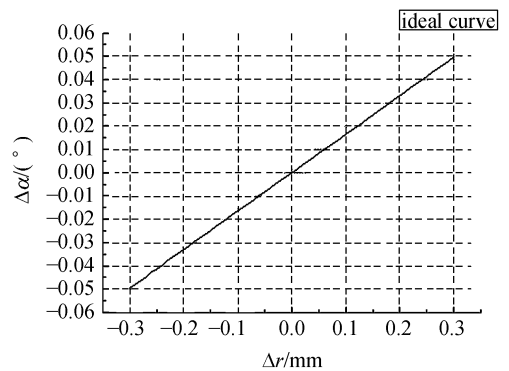


图 3 以 Δr 为自变量误差的理论分析曲线
Fig. 3 Theoretical analysis curve of errors by taking Δr as variable

图 2 与图 3 都近似为直线,其斜率为:

$$\rho_1 = -9.55 \times 10^{-4}, \tag{15}$$

$$\rho_2 = 0.1654. \tag{16}$$

3 球罩的实测结果与分析

3.1 实验方法

实际工作中分别对两个玻璃球罩零件(一精度合格玻璃球罩和一精度超差的玻璃球罩)在两个方向角上(方位和俯仰)做了测试。首先,将一个精度正常的玻璃球罩装到平台上,平台上电自检后调到 0 位;接着,调整所安装的高精度二维转台方位及俯仰角度值,使无穷远点目标(由平行光管提供)与视场中心十字丝重合,分别记录平台和转台数据;接着,转台以 1° 为步长,方位轴分别向左和向右转动 45° ,同时记录平台编码器数据;然后对数据进行处理;最后,将一个精度超差的玻璃球罩装到平台上,重复上述步骤,得到另一组数据。

3.2 测试结果与分析

分别对球面内外同心度精度合格和精度超差的玻璃球罩进行试验,将数据采出,按照误差理论及数据处理的原理^[9]对其进行处理,得到以下数据如表 1。

表 1 视轴误差 $\Delta\alpha$ 的计算与实测值

Tab. 1 Calculated and measured values of optical axis errors $\Delta\alpha$

α_0 ($^\circ$)	式(12)计算值 ($^\circ$)	合格球罩实测值 ($^\circ$)	超差球罩实测值 ($^\circ$)
-45	-0.042 94	0.005 02	-0.075 49
-44	-0.042 19	0.004 77	-0.076 19
-43	-0.041 42	0.004 53	-0.072 37
-42	-0.040 63	0.008 23	-0.074 82
-41	-0.039 84	0.004 04	-0.069 72
-40	-0.039 04	0.001 29	-0.066 85
-39	-0.038 22	-0.001 56	-0.069 69
-38	-0.037 39	-0.002 19	-0.061 4
-37	-0.036 55	-0.001 8	-0.057 4
-36	-0.035 69	0.002 14	-0.055 37
-35	-0.034 83	0.007 74	-0.051 93
-34	-0.033 96	0.005 08	-0.054 43
-33	-0.033 08	0.002 09	-0.051 79
-32	-0.032 18	0.007 34	-0.052 98
-31	-0.031 28	0.009 54	-0.050 04
-30	-0.030 36	0.006 85	-0.046 91
-29	-0.029 44	0.004 98	-0.042 92
-28	-0.028 51	0.010 02	-0.039 89

-27	-0.027 57	-0.003 19	-0.041 66
-26	-0.026 62	3.82×10^{-4}	-0.036 74
-25	-0.025 67	0.005 01	-0.037 32
-24	-0.024 7	-0.003 48	-0.036 12
-23	-0.023 73	-0.008 05	-0.037 49
-22	-0.022 75	0.001 64	-0.033 75
-21	-0.021 76	0.006 35	-0.031 37
-20	-0.020 77	0.006 39	-0.022 93
-19	-0.019 77	-0.005 32	-0.021 13
-18	-0.018 77	-0.004 57	-0.032 68
-17	-0.017 76	-0.007 58	-0.034 08
-16	-0.016 74	0.008 14	-0.026 04
-15	-0.015 72	0.004 66	-0.023 88
-14	-0.014 69	0.003 64	-0.025 27
-13	-0.013 66	0.005 74	-0.027 89
-12	-0.012 63	-0.007 48	-0.028 15
-11	-0.011 59	0.006 59	-0.021
-10	-0.010 55	0.004 74	0.003 93
-9	-0.009 5	0.003 56	0.005 52
-8	-0.008 45	-0.006 79	0.003 14
-7	-0.007 4	6.72×10^{-5}	0.001 86
-6	-0.006 35	9.92×10^{-4}	-0.006 1
-5	-0.005 29	-0.004 5	-0.009 51
-4	-0.004 24	-0.004 68	-0.011 09
-3	-0.003 18	0.003 05	-1.82×10^{-4}
-2	-0.002 12	0.005 51	0.004 75
-1	-0.001 06	0.004 37	0.004 63
0	0	0	0
1	0.001 06	0.003 02	0.004 31
2	0.002 12	0.004 48	-0.003 64
3	0.003 18	0.003 49	0.006 54
4	0.004 24	0.006 94	0.001 65
5	0.005 29	0.003 84	0.008 58
6	0.006 35	0.001 2	0.007 77
7	0.007 4	-0.001 32	0.011 31
8	0.008 45	-0.001 93	0.013 33
9	0.009 5	5.86×10^{-5}	0.017 58
10	0.010 55	0.002 09	0.020 5
11	0.011 59	0.007 46	0.025 27
12	0.012 63	0.004 13	0.027 66
13	0.013 66	0.002 11	0.029 08
14	0.014 69	0.007 65	0.031 28
15	0.015 72	0.008 31	0.033 64
16	0.016 74	0.004 27	0.029 41
17	0.017 76	5.72×10^{-4}	0.025 66
18	0.018 77	0.006 02	0.031 91
19	0.019 77	-0.005 82	0.023 73
20	0.020 77	-0.002 01	0.026 26
21	0.021 76	0.004 96	0.033 21

22	0.022 75	-0.002 13	0.034 47
23	0.023 73	-0.002 06	0.035 94
24	0.024 7	0.004 02	0.040 21
25	0.025 67	0.003 95	0.041 47
26	0.026 62	4.86E-05	0.037 34
27	0.027 57	-0.001 53	0.035 06
28	0.028 51	-0.001 37	0.033 8
29	0.029 44	-0.001 82	0.037 27
30	0.030 36	0.010 04	0.051 86
31	0.031 28	0.003 68	0.051 74
32	0.032 18	0.002 96	0.049 2
33	0.033 08	0.008 19	0.057 78
34	0.033 96	-0.003 04	0.054 49
35	0.034 83	0.003 76	0.056 83
36	0.035 69	0.001 97	0.054 12
37	0.036 55	0.001 72	0.054 98
38	0.037 39	-0.004 02	0.057 92
39	0.038 22	-0.001 92	0.059 22
40	0.039 04	-0.001 21	0.057 72
41	0.039 84	-0.005 03	0.061 33
42	0.040 63	-0.004 96	0.063 94
43	0.041 42	0.006 58	0.069 72
44	0.042 19	0.009 7	0.072 65
45	0.042 94	0.003 75	0.068 17

将以上 3 组数据画在同一图中,得到图 4。

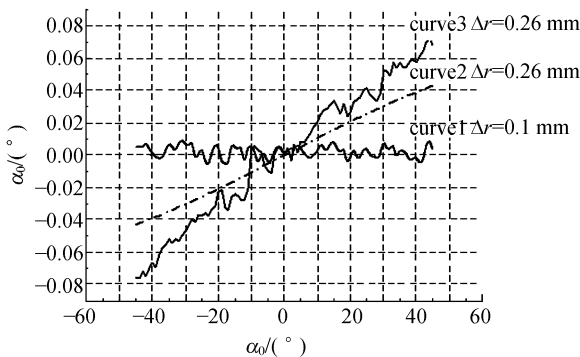


图 4 视轴误差计算值与实测值曲线

Fig. 4 Calculated and measured values of optical axis errors

图 4 中:

- 曲线 1 为 $\Delta r \leq 0.1 \text{ mm}$ 的 $\Delta\alpha$ 实测曲线;
- 曲线 2 为 $\Delta r = 0.26 \text{ mm}$ 的理论计算曲线;
- 曲线 3 为 $\Delta r = 0.26 \text{ mm}$ 的 $\Delta\alpha$ 实测曲线。

从图 4 可以看出,实际合格玻璃球罩(曲线 1)的视轴指向误差 $\Delta\alpha$ 在 $(-0.01^\circ, 0.01^\circ)$ 内,满足光电平台 $(-0.029^\circ, 0.029^\circ)$ 的精度要求。

对于内外球形表面不同心的玻璃球罩(曲线 2),其测量误差的计算曲线随着球形入射角度的增大而递增。实测内外表面同心度超差的误差曲线(如曲线 3),其变化趋势与计算曲线(如曲线 2)吻合,其高频起伏则是由不同心度外的其他误差源引起的。

4 结 论

本文对光电平台批产过程中一次偶发技术事件的产生原因进行了分析。生产过程中该光电平台的产品突然发现静态测角精度检测不合格,且视轴指向误差随转角增加而单调变大,虽多次检测并排除了多项误差来源,均不能解决。

综合分析证明,这种视轴误差是由球罩内外表面的球心不重合所致。当视场中心线上的不同心度达到 $\Delta r = 0.26 \text{ mm}$ 时,入射角为 $\pm 45^\circ$ 时的视轴理论计算误差为 0.043° ,实测的超差球罩则达到了 0.075 。为满足视轴误差 $\leq 0.3 \text{ mrad}$ (0.0172°) 的预定要求^[10],必须将不同心度减小到 $\Delta r < 0.1 \text{ mm}$ (见图 4)。

根据上述实测分析结论,本文对球罩内外表面进行了重新加工,将不同心度控制在 0.1 mm 以内。结果表明,视轴误差均满足要求(见图 4 曲线 1),问题得到圆满解决。

参考文献:

[1] 陈琦,何煦,韩冰.机载光电平台动态检测装置设计[J].光学精密工程,2008,16(12):2504-2509.
CHEN Q, HE X, HAN B. Design of testing equipment for airborne optoelectric platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2504-2509. (in Chi-

nese)
[2] 王晓军,贾继强,王俊善.机载三轴稳定平台跟踪方法研究与仿真[J].计算机仿真,2008,25(5):51-54.
WANG X J, JIA J Q, WANG J SH. Simulating of the tracking arithmetic for airborne three-axis stabilization platform [J]. *Computer Simulation*, 2008, 25 (5): 51-54. (in Chinese)

- [3] 陈健. 机载陀螺稳定平台自动控制系统研究[J]. 飞行试验, 2001, 17(3): 25-30.
CHEN J. Research on automation system of airborne gyro stabilized platform [J]. *Flight Test*, 2001, 17(3): 25-30. (in Chinese)
- [4] 沈宏海, 刘晶红, 张葆, 等. 航空光电成像平台角位置陀螺和角速率陀螺的稳定效果分析[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1293-1299.
SHEN H H, LIU J H, ZHANG B, *et al.*. Stabilization properties of airborne imaging platform based on position gyro and rate gyro [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1293-1299. (in Chinese)
- [5] 张秉华. 机载视轴稳定跟踪伺服系统[J]. 嘉兴高等专科学校学报, 2000, 13(4): 6-8.
ZHANG B H. Airborne line-of-sight stability tracking servo system [J]. *Journal of Jiaxing College*, 2000, 13(4): 6-8. (in Chinese)
- [6] KENNEDY D J, KENNEDY R L. Direct versus indirect line of sight (LOS) stabilization [J]. *IEEE transaction on control system technology*, 2003, 11(1): 3-15.
- [7] 涂德华. 共轴光学系统镜框结构设计[J]. 光学仪器, 2007, 2(1): 52-53.
TU D H. Structure design for lens frame of coaxial optical system [J]. *Optical Instruments*, 2007, 2(1): 52-53. (in Chinese)
- [8] 王志坚, 刘冬梅, 付跃刚. 光学工程基础[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2005: 77-78.
WANG ZH J, LIU D M, FU Y G. *Optic Engineering Basic* [M]. BEIJING: Weapon Industry Press, 2005: 77-78. (in Chinese)
- [9] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 10-11.
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 10-11. (in Chinese)
- [10] 汤华. 谈谈间接测量的误差分配[J]. 工业计量, 1998(5): 39-40.
TANG H. Error distributing of indirect measurement [J]. *Industrial Measurement*, 1998(5): 39-40.

作者简介:

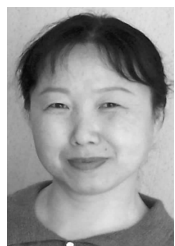


韩松伟(1980—),男,吉林蛟河人,2005年毕业于北京航空航天大学电子工程学院,现为中科院长春光学精密机械与物理所研究实习员,主要从事动基座光电设备的电子设计,通信及伺服控制方面的研究。E-mail: hsw2109@sina.com



项阳(1968—),男,吉林榆树人,理学博士,副研究员,研究兴趣为动基座光电测量技术。E-mail: xiangy@ciomp.ac.cn

通讯作者:



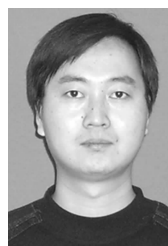
刘洵(1954—),女,吉林延吉人,研究员,硕士生导师,主要从事航空光电设备的测量与控制方面的研究。E-mail: liux@ciomp.ac.cn



孟中(1975—),男,吉林长春人,工学博士,助理研究员,主要从事动基座光电测量与控制技术的研究。E-mail: mengz@ciomp.ac.cn



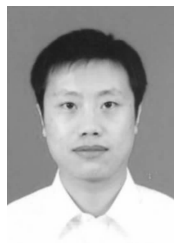
毛大鹏(1979—)男,吉林长春人,助理研究员,主要从事动基座光电测量与控制技术的研究。E-mail: mdp_ciomp@163.com



王国华(1975—),男,江苏盐城人,硕士,助理研究员,主要从事动基座光电测量与控制技术的研究。E-mail: jlwanggh@163.com



丁金伟(1976—),男,山东青岛人,工学学士,副研究员,主要从事光电仪器光机总体的研究。E-mail: jinweid@yeah.net



李永刚(1979—),男,陕西西安人,助理研究员,分别于吉林大学和中科院长春光学精密机械与物理所获工学学士和工学硕士学位,主要从事光电仪器光机结构的设计。E-mail: ciomliyong@tom.com

导师简介:



吴志勇(1965—),男,内蒙通辽人,研究员,博士生导师,主要从事光电测控设备总体技术和光纤通讯技术方面的研究。E-mail: wzy0607@yahoo.com.cn

● 下期预告

长缝光谱仪主结构的稳健优化设计

龚雨兵^{1,2,3},杨世模¹,陈志远¹

(1. 中国科学院 国家天文台,北京 100012;2. 桂林电子科技大学 机电工程学院,广西 桂林 541004;
3. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

为了减轻长缝光谱仪(LSS)主结构的重量,保持结构响应高稳定性,对 LSS 主结构进行稳健优化设计。分析了结构尺寸加工公差和材料参数波动等不确定性因素对 LSS 主结构稳健性的影响。调整结构尺寸加工公差,建立了以结构质量为目标、以结构频率为约束的 LSS 主结构稳健优化模型。应用蒙特卡罗模拟方法和蚁群优化算法对稳健优化模型进行优化求解。稳健优化后的结构质量为 33 kg,比初始质量减少 17.5%;频率为 77 Hz。稳健优化最优结构质量较确定性优化略高,但结构响应更为稳定,具备抵抗尺寸波动和材料参数波动的能力,满足设计要求。采用的设计方法对类似结构的稳健优化设计有参考意义。