

文章编号 1004-924X(2010)09-2036-08

# 光电吊舱内框架减振系统设计

甘至宏

(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:**为了实现在在喷气机上用光电吊舱观测导弹发射全程的动态状况,设计了光电吊舱内框架减振系统。首先,分析了吊舱的工作环境和框架结构的工作原理,指出内框架减振的必要性。然后,讨论减振轴系的特性,指出内框架加减振器的轴系必须消间隙,并设计了一种模块式驱动轴系,此模块将力矩电机的厚度与轴承的厚度合二为一,减少了轴系的占用空间,增加了有效载荷空间。最后,提出了一种切实可行的内框架减振系统,该系统采用模块式组合方式,具有灵活性和通用性;采用内框架系统独立装调,平推进入外框架安装的设计,使内框架减振系统极易安装调试。对这种装有内框架减振系统的光电吊舱在振动台上做振动试验并观测模拟目标,结果表明,吊舱工作状况良好,跟踪目标的视频图像清晰流畅;在摇摆台上做跟踪精度检测实验,检测结果显示,跟踪精度误差不大于 1 mrad,满足指标要求。

**关键词:**光电吊舱;内框架减振结构;模块式驱动轴系

**中图分类号:** V27; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101809.2036

## Design of inner frame vibration absorbing system for optoelectronic pod

GAN Zhi-hong

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

**Abstract:** In order to observe the dynamic processing of missile launching by a optoelectronic pod, an inner frame vibration absorbing system for the optoelectronic pod was developed. Firstly, the working environments and working principles of the pod were analyzed, and the necessity to damp the vibration of inner frame was pointed out. The characteristics of vibration absorbing systems were discussed and how to eliminate the shaft gas was given. A module driving shaft was designed, which combined the thicknesses of torque motor and bearings to decrease the shafting space and to increase the space of effective load. Finally, an inner frame vibration absorbing system was designed. By module combination, the system is more flexible and universal. Furthermore, by using the independent appliance and carrying horizontally forward the inner frame into the outside frame, the system is easy to assemble and adjust greatly. A vibration experiment on the optoelectronic pod with an inner frame vibration absorbing system was carried out in a test field and a simulated target was also observed, obtained results indicate that the pod has a good working condition and the video image of target is clear and flu-

收稿日期:2010-04-07;修订日期:2010-06-08.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展规划项目(No. 2009CB72400105)

id. The tracking experiment shows that the tracking error is less than 1 mrad.

**Key words:** optoelectronic pod; inner frame damping structure; module driving shaft

## 1 引言

吊舱是指安装有机械设备或武器并吊挂在机身或机翼下的流线形短舱段,光电吊舱可用于观测导弹发射和飞行过程中的动态状况。由于飞机起降会产生较大的冲击,空中飞行的大机动动作也要产生较高的过载力,因此对吊舱的结构强度和刚度有一定的要求。另外,飞机发动机组产生的振动;飞机航线、速度、高度、姿态的急剧变化产生的振动;各种大气现象和空气动力现象颤振、扰流、抖振、结冰等引起的振动;相对摄像机窗口的空气流动和低频热动力现象等引起的振动等都会使观测载荷的视轴瞄准线产生晃动,严重影响图像质量和指向精度<sup>[1-2]</sup>。以往光电吊舱和其载体飞机间通过4个减振器相连,在多数情况下,光电吊舱需探出机外工作,其质心与减振器的支撑中心很难重合,在动态环境下容易产生耦合角振动,对成像质量、目标定位和数据引导精度都有影响。不过由于飞机飞行速度较低而且在光电吊舱工作时间段飞行姿态较平稳,因而光电平台的基准与飞机惯导基准的关系可认为固定不变,通过坐标变换综合计算光电平台瞄准线的角度数据和飞机惯导的航姿数据,就可实现目标定位和数据引导功能<sup>[3-7]</sup>。本文描述的吊舱工作环境与通常的环境不同,在工作中该吊舱与飞机上的标准挂架连接,吊舱与飞机间无法加减振器。为了用该吊舱观测导弹飞行过程的动态状况,本文从设计和安装实用性的角度出发,设计了光电吊舱内框架减振系统。描述了吊舱分系统光电头舱的设计思路和设计过程,分析了吊舱的工作环境和框架结构的工作原理,指出内框架减振的必要性;通过分析减振轴系的特性,设计了一种模块式驱动轴系。实验检测证明设计的内框架减振系统轴系紧凑,可增加有效载荷空间,减振器布局合理,减少了线-角耦合的程度,且安装方便。该吊舱能实现横滚向 $n \times 360^\circ$ ,方位向 $\pm 90^\circ$ 观测; $180^\circ$ 处于保护状态;工作时有目标定位和数据引导功能。考虑观

测时的稳定性的要求及飞机的高速飞行状况,结合以前平台的经验,采用了四框架两轴陀螺稳定平台的形式,外框架系统用于克服风阻,随动于内框架运动;内框架系统用于精确跟踪,相对外框做小角度运动,从而实现了过顶跟踪,观测过程无死区等。

## 2 陀螺稳定平台工作过程和减振的必要性

本文描述的吊舱分系统光电头舱是陀螺稳定平台,是一种稳定和伺服相结合的自动控制系统,它有两种工作过程,稳定过程和跟踪过程。稳定过程实际上就是隔离载机扰动的过程,载机的扰动将给稳定平台施加一个扰动力矩,使平台产生错误的偏转,装在平台上的陀螺感受到这个偏转运动后,陀螺上的角度传感器相应地输出一个电信号,经伺服回路操纵伺服电机纠正这一错误偏转,从而消除载机扰动对光电跟踪器的干扰和平台的扰动,使瞄准线得到稳定。跟踪过程由光电跟踪器给出瞄准线和目标间的相对偏差信号(脱靶量),转换后输入力矩器,产生一个力矩加在陀螺上,陀螺输出一个电信号驱动伺服电机带动平台运动消除此偏差,使瞄准线准确地跟踪目标<sup>[8]</sup>。

由于平台的陀螺带宽、电机的运转特性以及机械结构的固有频率等因素限制,陀螺稳定平台的控制作用只能是低通滤波作用,目前控制带宽可做到25 Hz,而25 Hz~2 000 Hz及以上的振动扰动需减振隔离。另外,振动也使陀螺仪产生漂移,使加速度计产生误差,交变干扰力矩也会使陀螺仪产生过大的角运动,直接影响平台稳定系统的工作,这些都需要对平台采取防振措施。

由于本吊舱横挂在飞机的机翼处,与飞机上的标准挂架连接,陀螺稳定平台外框架系统无法加减振器,因此,本文选择内框架系统加载减振器。

### 3 陀螺稳定平台内框架减振结构特性

内框架减振有其特殊性,不是原有内框架直接加减振器就能解决的,这里首先分析其结构特性。以往内外框架间是刚性连接,外框架的球体就是内框架的支架,改进后内框架系统要通过减振器与外框架的球体柔性连接,结构对比如图 1 所示:

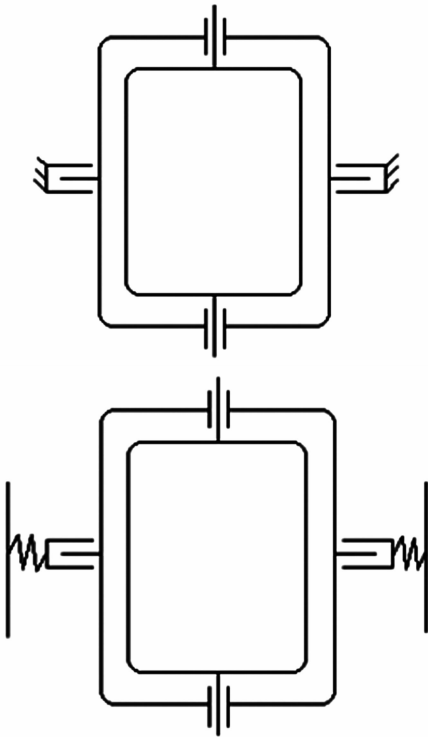


图 1 内框架不减振与内框架减振时内外框架连接对比示意图

Fig. 1 Comparison of inner frames with and without damping functions

内外框架间是刚性连接时,轴的两端常采取联合消间隙或一端消间隙另一端为活动的辅助轴,结构示意图如图 2。

内框架系统要通过减振器与外框的球体柔性连接时,图 2 所示的轴系结构就会有问题。四框架两轴系统中外框随动于内框,按要求两者的瞄准线随机角度偏差不大于  $1 \text{ mrad}$ 。内框架减振器的布局要使弹性支点中心与减振质量的质心重合,保证线-角振动解耦,避免带来较大的角扰

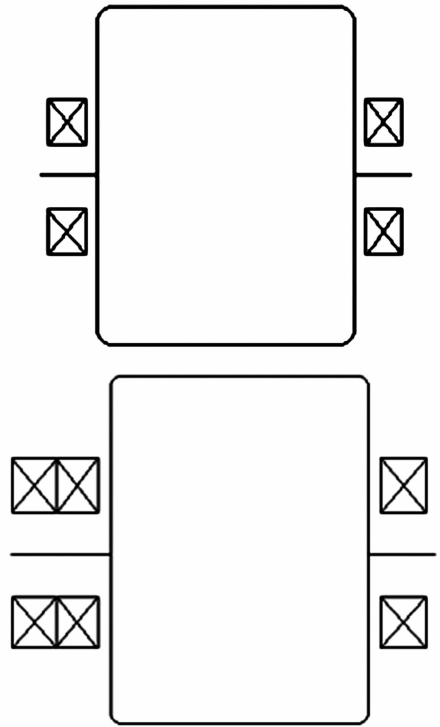


图 2 内外框架间是刚性连接时的轴系示意图

Fig. 2 Shafting with rigid connection between inner and outer frames

动。当轴系的定子基座与减振器连接,不消间隙的轴一侧由于轴承固有间隙的影响,使减振器受力不均,引起线-角耦合,因而要求加减振器的轴系每一侧的轴都要消间隙。如果每一侧的轴上都有一对轴承组合来消间隙,就会加大轴向的占用空间,减小了内框架的有效载荷空间,而加大内框架的有效载荷空间、减小框架内线绕力矩对伺服控制影响是设计的目标之一,为此要将内框架轴系设计成扁且中空的形式。针对此要求,本文设计了一种新颖的轴系。

图 3 为原有轴系结构装配剖视图,图 4 为新的轴系结构剖视图。新轴系中将轴承内环作定环,外环作动环;成对使用的两轴承外环直接与力矩电机转子的内孔配合,轴承内环通过中空的芯轴和电机座与力矩电机定子连接;电机转子的另一端同轴连接输出轴头作为此力矩电机驱动轴模块的输出端口。此模块将力矩电机的厚度与轴承的厚度合二为一,减少了轴向的占用空间,因而加大了有效载荷空间。

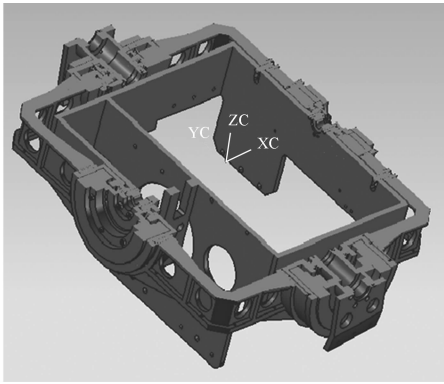


图 3 内外框架间是刚性连接时轴系剖视图

Fig. 3 Cutaway view of shafting with rigid connection between inner and outer frames

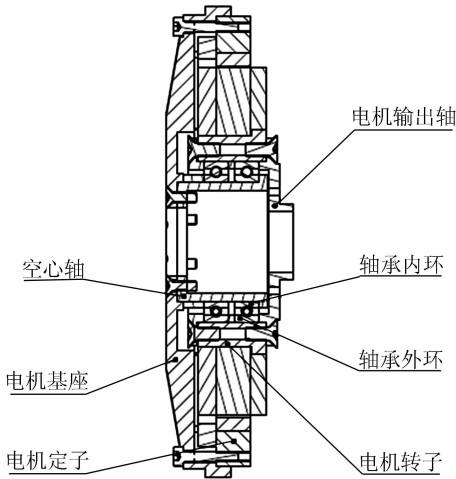


图 4 力矩电机驱动轴模块剖视图

Fig. 4 Cutaway view of moment motor driving model

### 4 内框架减振系统布局

除了合理地设计内框架轴系外,本文还对减振系统进行了合理布局。

#### 4.1 减振器基础知识

若用  $m$  表示被隔离物体的质量,  $K$  表示减振器的刚性系数,  $C$  表示阻尼系数, 又设基础振动为简谐振动  $y_0 = Y_0 \cdot \sin ft$ , 则系统的固有频率  $f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , 系统的阻尼比系数  $\xi = \frac{c/m}{2\sqrt{k/m}}$ , 频率比  $\lambda = \frac{f}{f_0}$ ; 若物体的振动运动方程为  $y = Y \sin(ft - \varphi)$ , 则减振系统的位移的绝对传递率  $T = \left| \frac{Y}{Y_0} \right| =$

$\frac{\sqrt{1+(2\xi\lambda)^2}}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2+(2\xi\lambda)^2}}$ 。  $T$  和  $\lambda, \xi$  三者的关系曲线如图 5 所示。

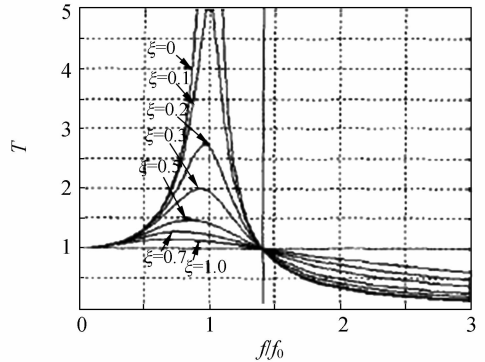


图 5  $T, \lambda$  和  $\xi$  的关系

Fig. 5 Relation curves of  $T, \lambda$  and  $\xi$

要使系统具有减振功能, 必须使位移的绝对传递率  $T < 1$ 。由分析知,  $\lambda = \sqrt{2}$  时,  $T = 1$ ; 只有在  $\lambda > \sqrt{2}$  时, 才能实现  $T < 1$ , 达到减振的目的。随着  $\lambda$  增大,  $T$  值越来越小, 隔振效果越来越好。但也不宜过大,  $\lambda$  值大意味隔振器要设计得很软, 静挠度要很大, 相应的体积也要很大, 这样会使装置的稳定性差, 易摇晃。再者, 当  $\lambda > 5$  后,  $T$  值的变化并不明显, 不能再显著改善隔振效果。实际工作中采用的频率比常在 2.5~4.5 之间, 此时相应的隔振效率为 80%~90%。另一方面, 由于阻尼的存在,  $T$  值随  $\xi$  值的变化是连续的, 当  $\lambda < \sqrt{2}$  时, 阻尼的增加能减少  $T$  值, 特别在共振区域 ( $\lambda = 0.8 \sim 1.2$ ) 内作用更为明显。当  $\lambda > \sqrt{2}$  时, 阻尼增加,  $T$  值也相对增加, 会降低减振效果。实际工作中还常会遇到一些外界冲击和扰动, 为避免使被减振物体产生过大振幅和谐振, 常人为地增加阻尼来抑制振动, 实用的最佳阻尼比  $\xi = 0.1 \sim 0.2$  [9]。

基于以上理论可以对减振器提出合理要求, 实际应用中常选用合格供方的减振器专业生产厂的成熟产品, 先根据待减振的负载重量来平均分配每个减振器的公称载荷, 再按具体的结构空间选取或定制减振器。

#### 4.2 减振器的选取

考虑到本吊舱工作环境的恶劣性和飞机飞行姿态的多样性, 内框架减振不是固定 3 个方向的减振, 而是全方位的。JPG-F 型干摩擦高阻尼隔



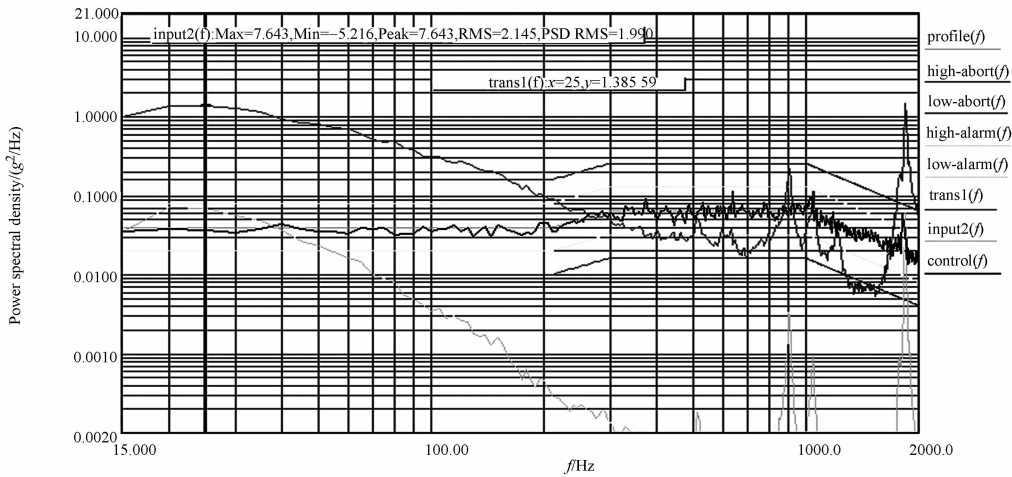


图 7 隔振系数曲线

Fig. 7 Curve of damping ratio

### 4.3 减振器的布局

由文献[10]知,在动力学方程刚度矩阵中,非主对角线元素为零时,线振动不会耦合角振动;通过各元素的表达式可知,在弹性装置刚度不为零的情况下,采用关于内框架质心对称布置 8 个相同的弹性元件(如图 8),即可实现非主对角线元素为零。应用此种弹性连接方式,动力学方程组简化为 6 个单自由度二阶微分方程组,通过对每个方程进行优化设计,选择合理的弹性元件参数,即可达到减小角振动的目的。

心更易于保持与弹性支点中心重合。这里将减振器底座与转轴的定基座固连,减振器的支撑端 2 个 1 组与 1 个过渡板连接,4 个过渡板连接到外框,外框有与 4 个过渡连接板相适应的安装面,且安装孔靠近框架外侧易于安装。

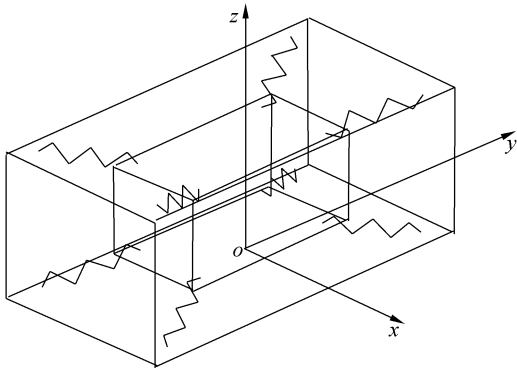


图 8 弹性元件关于内框架的质心对称的布局图

Fig. 8 Arrangement of flexible components around inner frame centroid

考虑方便安装和充分利用空间,在与外框连接的轴两侧对称安放减振器,布局如图 9。

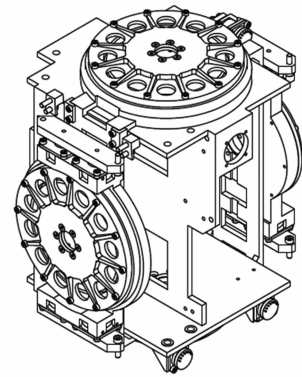


图 9 内框架减振系统布局外形图

Fig. 9 Arrangement of inner damping system

## 5 实验

模拟工作时的挂架形式,做了专用振动工装,在振动台上进行了吊舱振动试验。试验条件:20 ~ 500 Hz, 0.01g²/Hz; 500 ~ 750 Hz, +3 dB/oct; 750 ~ 1 500 Hz, 0.015g²/Hz; 1 500 ~ 2 000 Hz, -3 dB/oct; 加速度:5g; 方向: X, Y 向。结果表明,吊舱工作状况良好。观测模拟目标显示,跟踪目标的视频图像清晰流畅,满足要求。在摇摆台上做跟踪精度检测实验表明,跟踪

精度误差不大于 1 mrad, 满足指标要求。图 10 为实验现场,

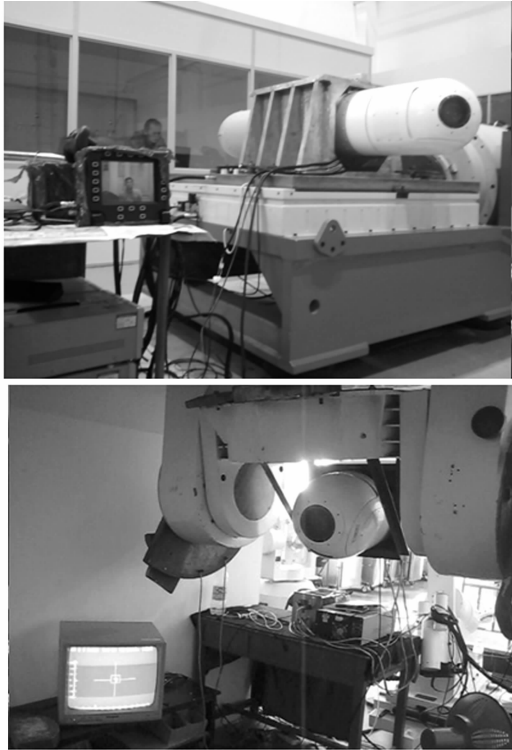


图 10 试验现场

Fig. 10 Test field

## 6 结 论

本文设计了光电吊舱内框架减振系统。内框架采用模块式组合, 其力矩电机驱动轴和角度传感器从动轴各做成独立的组件模块, 根据有效载荷重心位置, 分别安装于内方位框架两侧组成内方位轴系, 安装于内俯仰框架两侧组成内俯仰轴系, 使设计更具有灵活通用性。由于两模块都独立消间隙, 使与之相连的减振器能平均分担载荷重量, 产生相近程度的变形, 因而能减少线-角耦合。采用 8 个相同型号的全金属平板式减振器, 对称布局于内框架中心, 从理论上减少了线-角耦合的程度。采用内框架系统独立装调, 平推进入外框架安装的设计, 使内框架减振系统更易于安装调试。用户现场检测表明, 跟踪目标的视频图像清晰流畅, 跟踪精度误差不大于 1 mrad, 满足指标要求。

## 参考文献:

- [1] 赵鹏, 杨牧, 张葆. 航空机载光学设备的振动分析及座架减震器的设计[J]. 光学 精密工程, 1997, 7(3): 58-63.  
ZHAO P, YANG M, ZHANG B. Vibration analysis and absorber design of aviation airborne optical device[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 7(3): 58-63. (in Chinese)
- [2] 贾平, 张葆. 航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(1): 82-88.  
JIA P, ZHANG B. Aviation photoelectrical reconnaissance device's key technologies and development [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1): 82-88. (in Chinese)
- [3] 董斌, 丁亚林, 田海英, 等. 新型航空光学遥感器减振结构设计[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 2454-2459.  
DONG B, DING Y L, TIAN H Y, *et al.*. Design of vibration absorbing structure for aerial remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2454-2459. (in Chinese)
- [4] 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): 2503-2509.  
CHEN Q, HE X, HAN B. Design of testing equipment for airborne optoelectric platform [J]. *Design of testing equipment for airborne optoelectric platform*, 2008, 16(12): 2503-2509. (in Chinese)
- [5] 陈占军, 葛文奇, 李英, 等. 光电平台中陀螺解耦问题的研究[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 1712-1719.  
CHEN Z J, GE W Q, LI Y, *et al.*. Research of gyro decoupling problem on photoelectric platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 1712-1719. (in Chinese)
- [6] 狄文豹, 翟林培, 丁亚林, 等. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(2): 314-320.  
GENG W B, ZHAI L P, DING Y L, *et al.*. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*,

2009,17(2):314-320. (in Chinese)

- [7] 张葆,姚俊峰,高利民. 机载 GPS 测量定位技术研究[J]. 光学精密工程,2009,17(1):172-178.  
ZANG B, YAO J F, GAO L M. Measuring orientation technology based on airborne GPS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 172-178. (in Chinese)
- [8] 张葆,贾平,黄猛. 动载体成像模糊的振动被动控制技术[J]. 光学技术,2003,29(3):281-283  
ZHANG B, JIA P, HUANG M. Passive control technology of dynamic load image illegibility vibration [J]. *Optical Technology*, 2003, 29(3): 281-283. (in Chinese)

- [9] 成刚. 光电稳定跟踪的机械结构分析与研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2000.  
CHENG G. *Mechanical structure analysis and research of photoelectrical stably following up*[D]. Xian: Xian Electrical Technology University, 2000. (in Chinese)
- [10] 安源,许晖,金光,等. 动载体光电平台角振动隔振设计[J]. 半导体光电,2006,10(27):615-616.  
AN Y, XU H, JING G, et al.. Angle vibration damping design of dynamic load of photoelectrical system[J]. *Semiconductor Photoelectricity*, 2006, 10(27):615-616. (in Chinese)

#### 作者简介:



甘至宏(1963—),男,上海人,副研究员,1986年于长春光学精密机械学院获得学士学位,1996年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事航空侦察技术方面的研究工作。E-mail:gangzhihong1017@sina.com

(本栏目编辑:李树军)

#### ●下期预告

## 红外热像仪外场测温的大气透过率二次标定

李云红,张 龙,王延年

(西安工程大学 电子信息学院,陕西 西安 710048)

为了实现测温红外热像仪外场的精确测温,进行了大气透过率的二次标定。建立了测温红外热像仪的外场远距离测温标定模型,采用一个标准面源黑体和红外测温热像仪对大气透过率进行二次标定。首先,用标准面源黑体的设置温度标定大气透过率的二次修正系数;然后,在已知目标感兴趣区域发射率情况下,用二次修正系数对未知辐射源测量值进行修正,实现未知辐射源目标辐射温度的准确测量。随黑体设置温度从 50℃不断升高(二次大气透过率近似为 1),大气二次透过率修正系数在 50~100℃迅速下降,在 100~200℃下降趋势逐渐减缓,逐渐接近于一个大概为 0.7 的常数,结果为测温红外热像仪外场精确测温提供了保证。