

文章编号 1004-924X(2011)01-0083-07

# 机载光电侦察平台复合减振设计

王平<sup>1</sup>, 王伟<sup>2</sup>, 丁金伟<sup>1</sup>, 程志峰<sup>1,3</sup>, 刘家燕<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 长春应用化学研究所, 吉林 长春 130033; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**为减小振动对机载光电侦察平台成像质量和稳定精度的影响,对光电平台进行了复合减振设计。分析了复合减振原理,针对以往单级隔振系统存在的缺点在平台内框架和外框架之间设计了二级减振系统,更加有效地隔离了外框架传递到内框架上的振动。采用二维参数优化方法计算出了复合减振系统的最优固有频率比  $f_{opt}$  为 1.43,最优阻尼比  $\zeta_{opt}$  为 0.243。最后,通过振动试验验证了光电平台复合减振效果。与以往单级隔振系统相比,复合减振系统的最大振动传递率降低了 50%,振动传递率小于 1 的频率范围更宽,高频时传递率的衰减程度也大大优于单级隔振系统。得到的结果表明了光电平台复合减振设计的合理性和有效性。

**关键词:**光电平台;复合减振;振动传递率;减震器

**中图分类号:** V241.02 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111901.0083

## Vibration damping design for airborne electro-optical surveillance platform

WANG Ping<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, DING Jin-wei<sup>1</sup>, CHENG Zhi-feng<sup>1,3</sup>, LIU Jia-yan<sup>1</sup>,

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*;  
3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** In order to reduce the influence of vibration on the image quality and precision stability of a airborne electro-optical surveillance platform, a vibration damping design was performed. Based on the detailed analysis of complex damping theory, a two-grade damping system between the inter and outer frames of the platform was designed to isolate the vibration from inter frame to outer frame effectively in view of the shortcoming of the single-stage vibration isolation system. By using the two-dimensional parameter optimization method, the optimum natural frequency ratio  $f_{opt}$  and the optimum damping ratio  $\zeta_{opt}$  of the vibration damping system were calculated to be 1.43 and 0.243, respectively. Finally, the vibration damping effect was illustrated through a vibration test. Compared with the previous single-stage vibration isolation system, experimental results show that the maximum vibration transmissibility of vibration damping system is lower by 50%, the frequency range of vibration transmission

收稿日期:2010-04-12;修订日期:2010-06-08.

基金项目:武器装备预研基金项目(No. 51460040104ZK1001);国防预研基金资助项目(No. 1040603)

rate less than 1 is wider, and the amplitude range of transmissibility on high frequency is much better than that of the single-stage vibration isolation system. It is concluded that the vibration damping design is feasible and effective for electro-optical surveillance platforms.

**Key words:** electro-optical platform; vibration damping; vibration transmissibility; damper

## 1 引言

随着现代军事技术的飞速发展,航空侦察在战争中的地位显得越来越重要。航空侦察的主要设备是机载光电侦察平台,其任务是获取高质量的图像,具有机动灵活、实时准确、范围广、针对性强等特点。光电侦察平台上通常配有可见光、红外等多种适于各种环境的任务载荷,除光学载荷自身的品质外,影响成像质量的主要因素是载体振动引起物体的像在靶面上的位移。为提高平台光学载荷成像系统的成像质量和稳定精度,必须对载体的振动加以抑制。抑制载体振动的方法主要有电子稳像、光学稳像、被动减振、主动减振等。由于被动减振不需要系统之外的能源装置支持减振装置工作,并且结构简单、经济实用,因而航空侦察设备的基座上大都采用被动减振技术来消除载体的扰动<sup>[1-4]</sup>。

光电平台在工作时受到的振动主要来自两部分,一部分来自载机,包括飞机发动机组工作产生的振动;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、抖振引起的振动;相对载荷窗口的空气流动和低频热动力现象引起的振动等。这些振动是平台所受振动的主要来源,也是平台减振设计所着力解决的问题。振动的性质主要是随机振动,振动量级随载机的不同差别也很大。另一部分振动来自平台自身,包括载荷内部的调焦、变倍、调光机构等工作引起的振动;载荷座架摇摆产生的振动;载荷重心不固定产生的振动等。这些振动量级虽较小,但由于直接作用到载荷上,所以也不能忽视<sup>[5-6]</sup>。

在载体振动环境下的成像仪器会因振动产生动态变形和目标像移,导致系统成像对比度变差、图像模糊和图像清晰度下降,进而会影响伺服跟踪精度,甚至会造成跟踪目标丢失,因而机载光电

平台振动隔离技术备受关注。本文重点研究了属于被动控制振动的一种复合减振技术,相比以往光电平台采用的单级隔振系统,复合减振技术对载机振动的抑制更加有效,在一些振动环境较恶劣的载机上也能获得较好的成像质量和稳定精度,对于光电平台的振动隔离有着重要的意义。

## 2 复合减振基本原理及设计

### 2.1 复合减振基本原理

两轴四框架结构是光电平台最为常用的一种框架形式,具有稳定性好、抗干扰能力强、响应快等优点<sup>[7]</sup>。以往光电平台一般采用平台基座通过单级隔振系统固定到载机上进行减振,由于平台内框架和外框架之间是刚性连接,外框架的振动会直接传递到内框架及任务载荷上,不能有效地减少振动对成像质量的影响。如果在内、外框架之间加一级隔振系统会大大降低振动对内框架任务载荷的影响。平台二级减振示意图如图 1 所示,载荷固连到内框架上,内框架通过一级隔振系统连接到外框架,平台基座再通过二级减振系统固连到载机上。与以往单级隔振系统相比,由外框架传递到内框架的振动干扰要小得多。

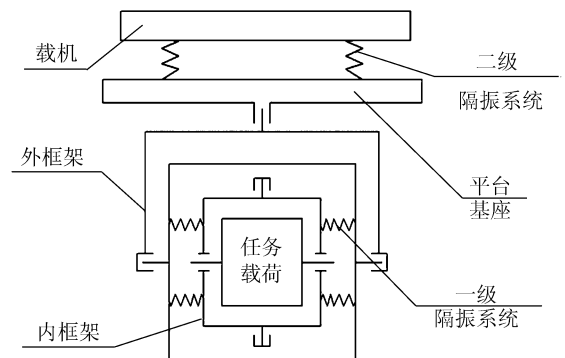


图 1 平台二级减振示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-grade damping of platform

光电平台工作时,载机上的振动通过二级隔振系统传递到平台基座上,再通过一级隔振系统传递到内框架上,从而引起载荷的振动。载机、平台基座及内框架上的任务载荷组成了一个多自由度的弹簧-质量-阻尼系统<sup>[8]</sup>。复合减振理论模型如图 2 所示。 $m_1$  为内框架重量; $m_2$  为平台基座和外框架的重量; $x_1, x_2, u$  分别为内框架、外框

架、载机的位移; $k_1, c$  为一级隔振系统的弹性系数和阻尼; $k_2$  为二级隔振系统弹性系数。根据牛顿定律列出两级隔振系统方程组(1),并对其进行拉普拉斯变换,可得出振动传递率公式(2):

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c \dot{x}_2 - k_1 x_2 &= 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + c \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_2 - c \dot{x}_1 - k_1 x_1 &= k_2 u, \end{aligned} \quad (1)$$

$$T = \frac{|x_1|}{|u|} = \sqrt{\frac{\mu^2 f^4 + 4 \zeta^2 \mu^2 f^4 g^2}{[\mu f^2 - (1 + \mu + \mu f^2) g^2 + \mu g^4]^2 + 4 \zeta^2 g^2 [\mu f^2 - (1 + \mu) g^2]^2}}, \quad (2)$$

式中,质量比  $\mu = m_2/m_1$ ;固有频率比  $f = \omega_2/\omega_1$ ,  $\omega_1^2 = k_1/m_1$ ,  $\omega_2^2 = k_2/m_2$ ; 阻尼比  $\zeta = c/c_c$ ,  $c_c = 2\sqrt{m_1 k_1}$ ; 频率比  $g = \omega/\omega_1$ ,  $\omega$  为激振频率。隔振系统的作用是尽量减轻载机的振动对平台载荷的扰动,因此这里希望振动传递率  $T < 1$ , 并且越小越好。当给定  $\mu = 0.5, f = 1.6$  时,选择不同的阻尼比值进行数值计算,用 Matlab 绘制出的传递率

曲线,如图 3 所示。从图中可以看出,不同  $\zeta$  对应的曲线有 3 个公共点。只有当  $g$  大于某一值时,  $T$  才会小于 1, 即才会有减振作用。这个值在第一公共点和第二公共点之间,当  $\zeta$  不同时,这个值也不同。所以固有频率  $\omega_1$  一定要选得合适,否则可能会使振动增强。

### 2.2 复合减振设计

隔振系统一般有这几个基本要求:系统的固有频率要低,共振时传递率要小,越过共振区后传递率曲线应陡峭地下降。在保证减振器固有频率低于基座频率的情况下,还应考虑它与平台某些关键元件(如陀螺)的固有频率有一定的间隔距离,以避免谐振干扰。基于上述原则,在 UG NX4.0 中建立光电平台复合减振有限元模型如图 4 所示,可见光和红外两个光学载荷固定在内框架上,内框架通过左、右两个连接板上的各 4 个减振器固定到外框架,平台基座经二级隔振系统与载机连接。由于与载机连接的二级隔振系统直接暴露在外,对环境适应性要求较高,故二级隔振系统采用 4 个金属弹簧减振器均布放置与载机固定。金属弹簧减振器具有较低固有频率,相比其他减振器有较好的低频减振效果,并且耐油污、耐高低温、不老化,特别适用于工作环境恶劣的场合。而一级隔振系统采用 8 个 JP 型橡胶减振器与外框连接,采取 3 个方向对称放置,这样可以最大限度地实现解耦<sup>[9]</sup>。JP 型橡胶减振器的主要优点是结构紧凑,安装尺寸低,在共振处有较大阻尼,可以有效抑制共振,高频减振效果好,这样内框架受到的高频扰动就得到了较好的抑制。

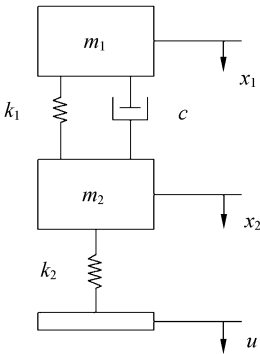


图 2 复合减振理论模型

Fig. 2 Theoretical model of vibration damping

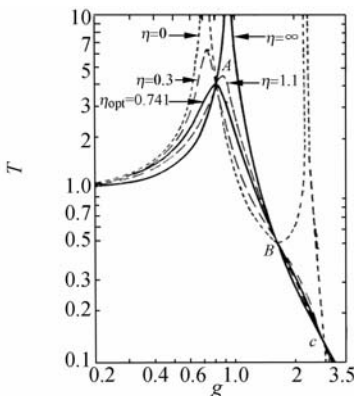


图 3 传递率和频率比的关系曲线

Fig. 3 Curves of transmissibility and frequency ratio

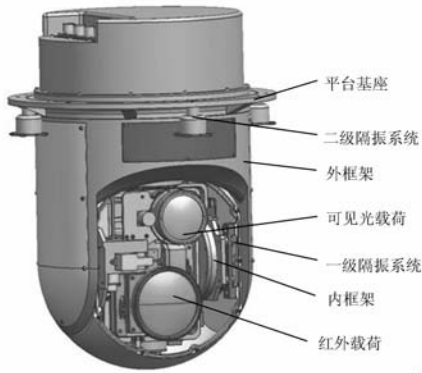


图 4 光电平台复合减振有限元模型

Fig. 4 Finite element model of vibration damping of electro-optical platform

### 2.3 复合减振系统结构参数优化

设计两级隔振系统要求计算最优结构参数, 实践中提出两种不同的最优参数问题, 它们的约束条件不同。分别如下<sup>[10-11]</sup>:

(1) 预先给定两级隔振系统的质量比  $\mu$  和两级的固有频率比  $f$ , 问题归结为寻找最优阻尼比  $\zeta_{\text{opt}}$ 。这是一维参数优化问题, 通常采用数值方法寻找  $\zeta_{\text{opt}}$ 。方法如下, 选择不同的阻尼比值分别进行数值计算, 用 Matlab 分别绘制出不同阻尼比传递率曲线, 当传递率曲线的峰点恰巧是第一公共点 A 时, 相应的阻尼比就是要找的  $\zeta_{\text{opt}}$ 。图 3 中用这种方法确定的最优阻尼比  $\zeta_{\text{opt}}=0.741$ 。

(2) 预先只给定两级隔振系统的质量比, 问题归结为寻找  $\zeta_{\text{opt}}$  和最优两级固有频率比  $f_{\text{opt}}$ 。这是二维参数优化问题, 应用数值方法同样能求得  $\zeta_{\text{opt}}$  和  $f_{\text{opt}}$ 。暂时给定  $f$  值, 采用上述方法求得相应的“最优”阻尼比和传递率的峰值  $T_m$ , 然后在有实际意义的区域内改变  $f$  的数值, 重复上述计算, 求得与不同  $f$  值相应的一组“最优”阻尼比和传递率的峰值  $T_m$ 。最后, 从这一组传递率值中找出一个最小的峰值, 与其相应的固有频率比  $f$  就是要找的最优固有频率比  $f_{\text{opt}}$ , 而与其相应的“最优”阻尼比就是要找的真正的最优阻尼比  $\zeta_{\text{opt}}$ 。例如, 当两级隔振系统的  $\mu=2$  时, 用上述方法求得的  $f_{\text{opt}}=1.83, \zeta_{\text{opt}}=0.521$ 。与其相应的两级隔振系统的传递率曲线如图 5 所示, 比较图 5 与图 3 的传递率曲线可以看到, 按二维参数优化设计

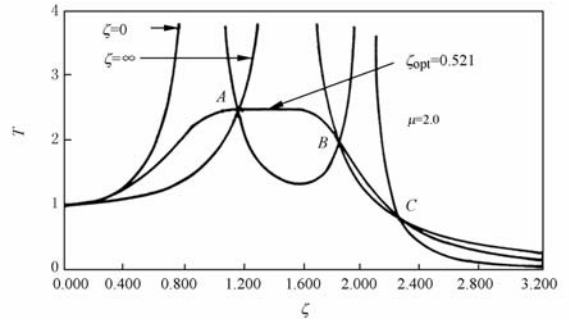


图 5 最优阻尼比传递率曲线

Fig. 5 Transmissibility curves of optimum damping ratio

根据有限元模型计算出内、外框架质量, 算出质量比  $\mu$ , 按上述优化方法进行参数优化, 最终优化的结果为  $f_{\text{opt}}=1.43, \zeta_{\text{opt}}=0.243$ 。依据上述结果, 通过计算选择的减震器性能参数如表 1 所示。由此通过两级减振装置构成了一个弹簧-质量-橡胶阻尼复合减振系统, 该系统利用弹簧的线性变形和橡胶受剪切、压缩的非线性变形阻尼耗散振动能量, 衰减振动幅值, 达到光电平台缓冲减振的目的。对于大振幅低频振动, 阻尼很大, 衰减光电平台相对载机的线位移和角位移; 对于小振幅高频振动, 阻尼较小, 大量衰减振动能量的传递。有效地产生了线性-软特性-硬特性变化的非线性特性<sup>[12]</sup>。

表 1 减震器性能参数

Tab. 1 Parameters of damper

减震器	Z 向固有频率/Hz	最大传递率	Z 向动刚度	阻尼比 $c/c_c$
金属弹簧减震器	10	<1.8	9	0.01
JP 橡胶减震器	7	<1.5	13.6	0.24

### 3 试验结果与分析

实验原理框图如图 6 所示, 控制台发出随机信号使振动台随机振动, 光电平台支架与振动台固定在一起, 平台基座通过金属减震器与支架相连, 这样就构成了一个基础受随机激励的弹簧-阻尼质量系统。支架传感器测得的振动信号和平台基座传感器及内框架传感器测得的振动信号经信号处理系统后一起输送到计算机内进行分析, 分别绘出控制谱和测量谱曲线。最后将各频率对应

的测量谱和控制谱值输入计算机进行处理,即可得到系统的传递率曲线。图 7 为光电平台做振动试验时的照片。

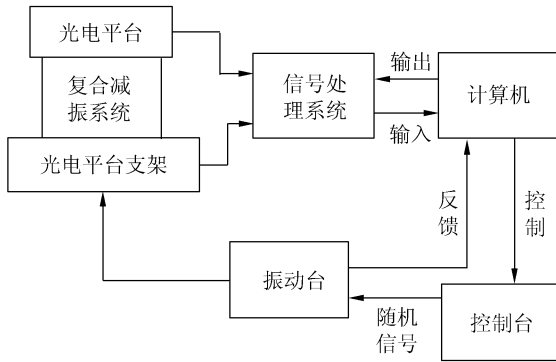


图 6 光电平台减振实验框图

Fig. 6 Experimental diagram of electro-optical platform damping test



图 7 光电平台振动试验图

Fig. 7 Diagram of optical platform vibration test

图 8,图 9 分别为光电平台水平和垂直方向的振动传递率曲线,其中外框架传递率曲线相当于光电平台采用单级隔振措施系统的振动传递率曲线,而内框架传递率曲线就是光电平台采用复合减振措施系统的振动传递率曲线。无论系统采用哪种减振措施,系统传递率曲线在低频区都会有一个峰值,这是由于减振系统固有频率和外界激励频率一致导致系统产生共振造成的。从图中可以看出,采用复合减振措施后,系统在水平方向上振动最大传递率和垂直方向上振动最大传递率要比单级隔振系统低 50%左右,并且复合减振系统传递率曲线在两个振动方向上传递率小于 1 的频率范围更宽,高频时传递率的衰减效果也要比以往采用单级隔振系统好得多。

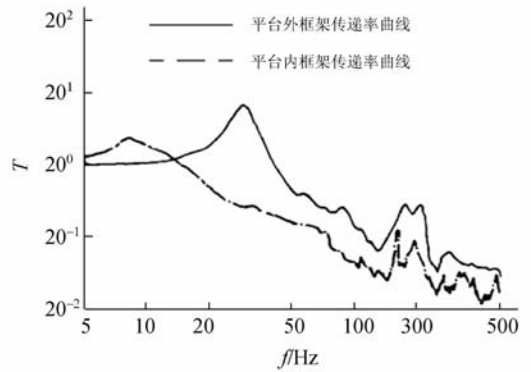


图 8 水平方向振动传递率曲线

Fig. 8 Curves of horizontal vibration transmissibility

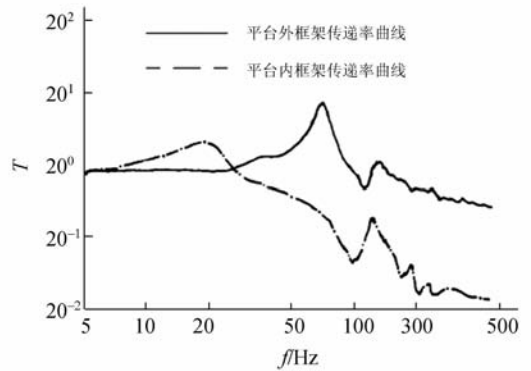


图 9 垂直方向振动传递率曲线

Fig. 9 Curves of vertical vibration transmissibility

从图中还可以看出在越过共振区后随着频率的增加会出现一系列的波峰,其原因是平台框架不可能是理想的刚体,会由于结构响应出现共振峰波,并且减振器在高频时所具有的分布质量特性也会产生驻波现象。如果减振器内阻尼比较大,可以削弱这些有害的峰值,提高减振器高频减振效果。

## 4 结 论

简述了振动对机载光电平台成像质量的影响,为提高成像质量,对光电平台进行了复合减振设计。采用二维参数优化方法对复合减振系统结构参数进行了优化,计算出复合减振系统的最优固有频率比  $f_{opt}$  为 1.43,最优阻尼比  $\zeta_{opt}$  为 0.243。通过对内框架进行二级减振设计大大降低了振动对内框架载荷的影响,振动试验验证了光电平台复合减振的有效性。相比以往单级隔振系统,复

合减振系统的最大振动传递率低了 50%，振动传递率小于 1 的频率范围更宽，高频时传递率的衰减效果大大优于单级隔振系统。得到的结果说明

对光电平台进行的复合减振设计是成功的，提出的复合减振设计方法对于其他机载光电平台也是完全适用的。

### 参考文献：

- [1] HE F Y, CUI J C, FENG S L, *et al.*. Narcissus analysis for cooled staring IR system[J]. *SPIE*, 2007, 6772:67224.
- [2] RAWAL S. Metal-Matrix composites for space applications [J]. *JOM*, 2001, 4:14-17, 51.
- [3] 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 P. Passive vibration control of image blur resulting from mechanical vibrations on moving vehicles[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(3):281-283. (in Chinese)
- [4] 张葆, 洪永丰, 史光辉. 非均匀性校正红外杂散辐射抑制中的应用[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12):2422-2428.  
ZHANG B, HONG Y F, SHI G H. Application of non-uniformity correction to stray radiation suppression of infrared optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):2422-2428. (in Chinese)
- [5] 赵鹏. 振动对航空相机成像质量影响的分析[J]. *红外与激光工程*, 2001, 31(4):240-242.  
ZHAO P. The vibration analysis of optical instrument in flying platform [J]. *Infrared and Laser Engineerin*, 2001, 31(4):240-242. (in Chinese)
- [6] 甘至宏, 张葆, 掀芑芑. 机载光电稳定平台框架结构工程分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12):2441-2446.  
GAN ZH H, ZHANG B, HAN P P. Engineering analysis of airborne optoelectronic platform frame structure[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):441-446. (in Chinese)
- [7] 程志峰, 张葆, 崔岩, 等. 高体份 SiC/Al 复合材料在无人机载光电稳定平台中的应用[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11):2820-2827.  
CHENG ZH F, ZHANG B, CUI Y, *et al.*. Application of high volume fraction SiC/Al composites in unmanned airborne photoelectric stable platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2820-2827. (in Chinese)
- [8] 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, 27(5):614-617.  
AN Y, XU H, JIN G, *et al.*. Design of angular vibration isolation for optoelectronic platform on moving vehicle [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, 27(5):614-617. (in Chinese)
- [9] 鲍文亮, 黄显林, 卢鸿谦. 多框架光电平台动力学建模及耦合分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2009, 30(8):893-897.  
BAO W L, LIN H X, LU H Q. Dynamic modeling and coupling analysis of a multi-gimbal electro-optical platform[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009, 30(8):893-897. (in Chinese)
- [10] HADDEN S, DAVIS T, BUCHELE P, *et al.*. Heavy load vibration isolation system for airborne payloads [J]. *SPIE*, 2001, 4332:171-182.
- [11] KENNED Y P J, RHONDA L. Direct versus indirect line of sight (los) stabilization [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 11:3-15.
- [12] 马咏梅, 谢梅英. 基于 ANSYS 的低频弹簧橡胶减震器结构设计[J]. *机械设计与制造*, 2008, 9:16-18.  
MA Y M, XIE M Y. Compound absorber structure design for low frequencies vibration isolation [J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2008, 9:16-18. (in Chinese)

## 作者简介:



王 平(1982—),男,黑龙江齐齐哈尔人,助理研究员,2006 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光电仪器结构设计方面的研究。E-mail:wangping\_2002@163.com



刘家燕(1968—),女,吉林长春人,副研究员,1990 年于浙江大学光学仪器工程专业获得学士学位,主要从事光电仪器结构设计方面工作。E-mail:liujy\_224@sina.com



丁金伟(1976—),男,吉林人,副研究员,主要研究方向为光电仪器的光机总体设计。E-mail:jinweid@yeah.net

## 通讯作者:



王 伟(1982—),男,黑龙江齐齐哈尔人,助理研究员,2006 年于吉林大学获得硕士学位,主要研究方向为数字图像处理。E-mail:wboyw@126.com



程志峰(1979—),男,山东临沂人,助理研究员,博士研究生,主要从事光电仪器结构设计及优化分析等方面的研究。E-mail:chengzhif2004@yahoo.com.cn

## ● 下期预告

## 超功率体放电的形成及其应用

TARASENKO V F, BAKSHT E H, BURACHENKO A G, LOMAEV M I,  
RYBKA D V, SHULEPOV M A, SOROKIN D A, SHUTKO Y V

(俄罗斯科学院 强流电子所)

给出了在氮气中的高压体(扩散)放电特性的实验研究结果,高压体(扩散)放电应用于电压达数百千伏、持续时间为数纳秒、上升时间为几个纳秒的极间电压脉冲。研究了在氮气压强为 40 000~200 000 Pa 时,从扩散形式到火花放电的放电转换过程。确定了在氮气压强下电流幅度与逃逸电子束电流脉宽的关系。表明了导致极间扩散放电的超短雪崩电子束(SAEB)对放电过程有重要的影响。并在该压强下得出了 SAEB 瞬间产生相对放电电流的时延与压强的关系。根据该关系,时延随着压强增加而变化,并且在压强为 200 000 Pa 时最小,同时扩散放电电流脉冲的峰值随压强增加而减小。在 50 000 Pa 的压强下,使用刀片电极和 6 cm 长的  $N_2 : SF_6 = 10 : 1$  的激活媒质,可以得到输出能量为 2 mJ、脉冲功率为 0.55 MW 的激光。据报道,在大气压强下,对 AlBe 箔片的重复频率放电处理过程中,其表层清除了碳而且氧原子渗入箔片(每 300 个脉冲 450 nm)。