

《精密检测与装校技术》专题文章导读

沈湘衡

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

应用于跟踪、测量和遥感领域的光电设备制造集成了光学、精密机械、电子学和计算机等多学科的先进技术,是一个国家光电仪器研发能力与水平高低的重要标志,我国广大科研人员在该领域已经取得了可喜的成就和长足的进步。

在光电设备的研制和生产中,除需要不断提升设计开发能力外,在产品形成过程中还应有相适应的检测与装校技术的支持,因此在检测方法、装校技术及检测装置的研究方面,尚有待继续努力和提高。

长春光机所精密检测与装校技术研究室长期从事光电设备的检测与评价研究,在光学检测、计算机辅助装调、光电设备总体能力评估、检测装置开发等方向上进行了多方面的探索,本专题就是部分研究工作的总结。《机载光电平台动态检测装置设计》一文,重点讨论了动态地物目标生成装置的工程化实现以及高精度摩擦传动结构的具体设计。《空间交会测量技术在计算机辅助装调中的应用》一文,提出了采用高精度经纬仪空间交会测量的方法,解决了对离轴三反光学系统装调过程的失调量监视与测量的难题。《五角棱镜扫描系统中调整误差及制造角差的影响分析》一文,针对大口径光学平面的面形测量中诸多影响参数进行了分析,推导出了构成面形检测系统中各项误差关系的二阶近似公式。《泰曼-格林型静态便携式干涉仪的设计》一文,结合离轴三反光学系统的检测与装调,介绍了一种小型便携式干涉仪的设计方案及工程实现。《光电测量设备光学系统的像面照度均匀性检测》一文,介绍了利用均匀面光源和图像处理技术构成的检测系统实现室内光电测量设备像面照度的均匀性测试。以上文章希望能为有关同行提供参考,并欢迎开展探讨与相互交流,以便提高针对光电设备制造中精密检测与装校技术的能力和水平。

文章编号 1004-924X(2008)12-2503-07

机载光电平台动态检测装置设计

陈琦¹,何煦^{1,2},韩冰^{1,2}

(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 研究生院,北京 100039)

摘要:以某型机载平台的实际检测需求为出发点,在机载平台实验室条件下,进行跟踪误差、捕获性能等动态性能检测,从理论上分析了以模拟地物目标进行动态精度检测的可行性。结合现有的工程实际与工艺水平讨论了动态检测装置地物目标仿真器(动态精度检测的核心测试设备)的工程化原理与设计,并进行了三维建模实践。在此基础上,重点论述了对测试精度起关键作用的摩擦传动器的设计过程,最终得到了符合动态测试需求的新型检测设备设计方案。实验结果表明:仪器的水平轴系精度 $<10''$,光学投影系统指向精度 $<15''$ 。

关键词:机载稳像平台;动态检测;地物目标;动态模拟装置;摩擦传动

中图分类号:V243;TP391.9 **文献标识码:**A

Design of testing equipment for airborne optoelectric platform

CHEN Qi¹, HE Xu^{1,2,3}, HAN Bing^{1,2}

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

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: On the basis of the requirement of dynamic testing for a airborne optoelectric platform, the tracking errors and acquiring characteristics of the airborne optoelectric platform were tested simultaneously in a lab and the possibility of application of new designed equipment to dynamic testing was analyzed. The principle and design ideas of the new equipment based on the existing technological standard were investigated, and simulation experiments were carried out. Then, the key parts of new equipment based on the friction transmission principle were discussed. Finally, a new design scheme coincident with testing requirement was obtained. The experiments indicate that the leveling rotation shaft precision of the equipment and the pointing precision of optical projection system are less than $10''$ and $15''$, respectively.

Key words: airborne platform; dynamic testing; ground target; dynamic simulation equipment; friction transmission

1 引言

机载光电侦测平台是由多个光电观察,测量系统组成的综合航空遥感器,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。对机载稳像光电观测平台的实验室综合检测是评价其技术指标的重要手段,这主要包括:通过光电综合测试方法获得其光学系统的像质,焦距,透过率,视场等光学指标;对平台所包含的机械轴系的转动精度,定位精度,角度输出误差等指标进行单独测试和标定;对电子学控制的整体精度进行测试。而类似的静态测试方法只能对上述技术指标进行单独检测,很难从整体上评价机载稳像观测平台的真实性能与测绘精度,对机载平台在实际应用过程中的技术性能无法做出综合评价。本文从某型机载稳定平台的动态检测方案出发,以机载平台的动态性能综合检测原理为基础,对动态检测方法与测试装置功能需求的匹配性进行了分析,并以最终的三维设计结果为例,详细论述了该检测方案中的核心检测设备—地物目标仿真模拟装置的研制与设计过程。研究了其中的精度输出

的关键组件,提出了摩擦传动器的结构设计方案。

2 机载平台动态性能检测原理

机载侦测平台大多由光电成像、测量系统、机械旋转轴系、电子学综合控制系统等部分组成。由光电成像系统对地面目标成像,与之相连的机械旋转轴系与电子学综合控制系统使光电成像系统与地面目标保持适当的角度关系,再通过平台上的综合控制终端计算得到地面目标的角度与位置信息。其基本原理如图 1 所示。

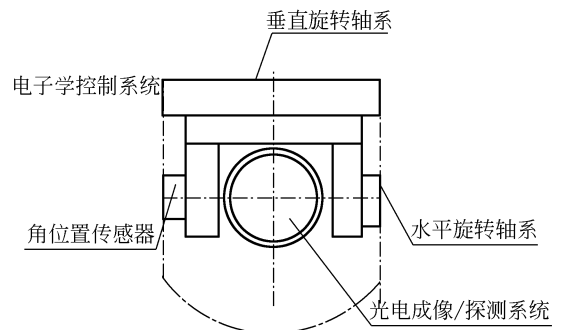


图 1 机载侦测平台基本组成原理图

Fig. 1 Basic principle diagram of airborne platform

对于机载光电侦察平台的研制人员和使用者,检测和评价机载光电平台测量数据的可信度是研制过程中必不可少的重要环节,也是该光电平台能否达到功能使用要求的重要依据。常用的实验室检测方法是应用常规的光学检测方法对机载平台光电成像系统的各项光学指标进行单独测试;使用经纬仪,转台等精密角度测量仪器对平台机械轴系部分的实际输出精度进行单独测试;使用程序逆向测试的方法检测电子学控制系统的控制精度与稳定性;以及使用动态光学靶标模拟的无穷远理想目标源对平台的角速度,角加速度等部分动态参数进行检测。

由此看出,常规的检测方法大多只能用于评价机载平台的静态参数,而大多数检测指标之间是相互割裂的。即使动态靶标模拟的无穷远目标对部分动态性能的测试也无法模拟机载平台在实际使用环境下对目标的捕获能力与测量精度。

为解决某型机载光电平台的实际检测需求,本文设计了全新的机载平台动态性能实验室检测方案,解决了在实验室条件下对机载平台动态性能进行检测的工程问题,这也是动态性能综合检测装置研制与设计的基本依据。

首先简要介绍该方案的基本原理,如图 2 所示。

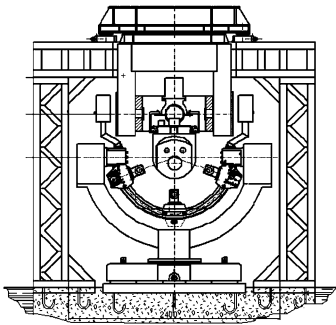


图 2 动态性能综合检测原理图

Fig. 2 Principle diagram of dynamic testing

机载侦测平台倒置安放于两维遥感台上可以实现机载平台整体的俯仰与方位角度变化,模拟平台在载机上的实际安装与使用状态。两维遥感台下为地物目标动态模拟设备。模拟无穷远地面景物目标,通过电子学控制的两维旋转机构实现无穷远地面仿真目标在二维空间的自由运动,从而模拟出侦测平台实际应用中的各种地面景物

目标及运动特性。整套实验设备紧固安装于实验室的隔震地基上,实现了实验室条件下的动态性能综合测试。

3 地物目标仿真模拟装置设计原理

机载侦测平台动态参数在实验室条件下进行检测,其基本检测原理是由地物目标动态模拟装置提供在空间中按一定规律做二维运动的无穷远地面仿真目标,安置于遥感台上的机载平台在像移补偿工作条件下对上述目标进行实时跟踪与测量。而地物目标动态模拟设备提供空间运动轨迹与模拟地面目标的空间位置数据作为真值,与机载平台对仿真地物目标跟踪测量后得到的测量值进行数学计算,从而得到机载侦测平台的动态测量精度。同时在检测试验过程中改变地物目标动态模拟装置的空间运动参数(角速度、角加速度等),从而定量地得到机载侦测平台的动态性能指标。

根据上述分析可知,地物目标动态模拟装置应包括产生无穷远目标的光学系统,保证模拟目标进行空间二维运动的机械结构系统,以及对目标实际运动轨迹进行解算的角位置输出装置与电子学综合控制与计算系统。

3.1 机械结构总体组成

根据二维遥感台的整体边界尺寸与被检机载侦测平台的轴系运动特性,选取地物目标动态模拟装置中光学目标靶的空间运动特征为:沿空间圆周做向心回转的两维运动,并保证光学系统的出射光线始终指向空间坐标系的原点,即被检机载侦测平台光学系统的主点,其空间运动轨迹原理如图 3 所示。

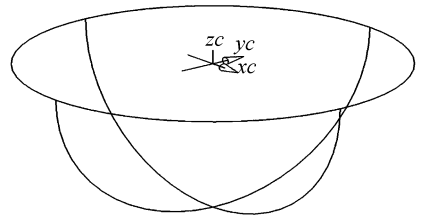


图 3 空间运动轨迹原理图

Fig. 3 Principle of space trajectory

光学模拟系统是地物目标动态模拟装置中模拟仿真地物目标的光学组件,由大视场平行光

管、液晶光阀组件、积分球式均匀照明光源、地面景物综合模拟软件组成。其基本原理如图 4、图 5 所示。

式镶嵌结构,在保证结构刚性与整体强度的同时通过特殊工艺手段提高轴系精度。在轴系的一端安置由圆形光栅与读数头组成的角位置同步传感器,其三维建模实例如图 6 所示。

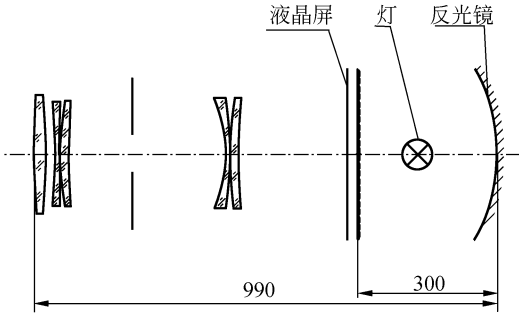


图 4 大视场平行光管光学原理图

Fig. 4 Optical principle of collimator with large field of view

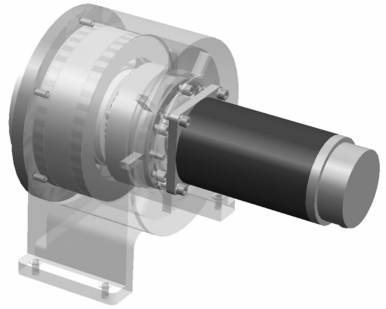


图 6 水平旋转轴系三维建模图

Fig. 6 Three-dimensional model of leveling rotation shaft

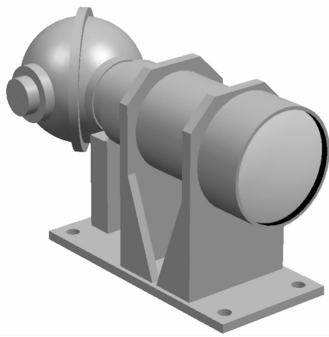


图 5 大视场平行光管三维建模图

Fig. 5 Three-dimensional model of collimator with large field of view

弧形导轨总成包括高强度铸造铝合金材料的导轨支架、高精度圆弧形滚动导轨组件、摩擦传动组件,以及平行光管连接件与外壳体部分,如图 7 所示。其中高强度铸造铝合金材料的导轨支架是弧形导轨总成的受力主体,为整个运动总成提供刚性支撑,同时作为弧形导轨总成与导轨水平旋转轴系的连接件,其各连接面间的位置关系又是二维运动耦合精度的保证。在工艺设计中将采用光学自准直法确定各安装基面间的空间位置关系。

积分球光源均匀照明液晶光阀,而液晶光阀的影像信息经大视场平行光管沿机载侦测平台光电成像系统的光轴被投射至入瞳处,并最终被机载侦测平台捕获并跟踪。而液晶光阀的实时影像信息可利用地物仿真软件根据机载平台在真实使用环境下的地面/海面目标的光学特性进行仿真模拟,从而实现近似外场飞行试验的效果。

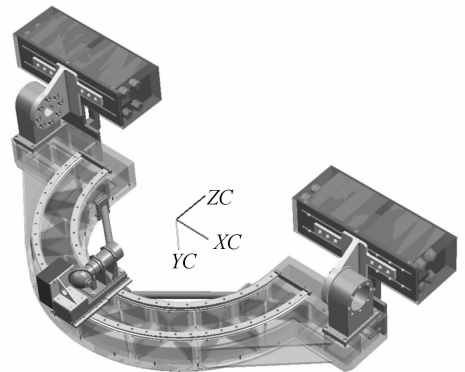


图 7 弧形导轨总成三维建模实例

Fig. 7 Three-dimensional model of arc-shaped rail assembly

为保证出射光线实时的向心指向性,以及光线的实际运动轨迹特性,应设计沿水平旋转的机械结构系统和沿圆弧方向做向心旋转的机械结构系统,并保证上述二维运动是可以相互耦合互不干涉的。依据以上原则,本文完成了地物目标动态模拟装置中弧形导轨结构与导轨水平旋转轴系结构的具体设计。

高精度圆弧形滚动导轨组件提供出射光线向心指向精度,而摩擦传动组件则为整个运动机构提供运动动力输入与实时角位置输出。

导轨水平旋转轴系结构为常规的轴承套-环

3.2 扭轮摩擦传动器的设计

扭轮摩擦传动机构是摩擦传动和螺旋传动相结合的产物,同时具有摩擦传动的平稳性、反向间隙小的优点和螺旋传动结构紧凑、导程小、行程大的优点,其工作原理是,使相对纯滚动的扭轮相对于传动轴即弧形导轨侧面偏过一个角度,这样在运动过程中,扭轮相对于传动轴做圆周运动的同时,也沿传动轴轴向做相对运动。扭轮摩擦传动机构工作原理如图 8 所示。

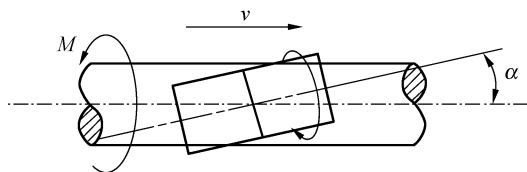


图 8 扭轮摩擦传动机构工作原理

Fig. 8 Working principle of twist-round friction-drive

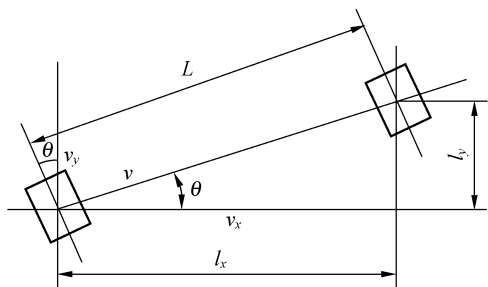


图 9 扭轮运动轨迹展开图

Fig. 9 Trajectory of twist-round

将扭轮摩擦传动机构沿传动轴展开,如图 9 所示。图中 x 方向为传动轴圆周展开方向, y 方向为传动轴轴向方向, α 为扭轮和传动轴轴线之间的夹角。设扭轮沿 x 方向和 y 方向的运动速度分别为 v_x 和 v_y ,扭轮沿相对传动轴位移方向的运动速度为 v ,由图 9 可知:

$$vt = \frac{v_x t}{\cos \alpha}, \tag{1}$$

式中, $v = \omega_2 r_2$, $v_x = \omega_1 r_1$ 。

这里, t 为运动时间, ω_1 和 ω_2 分别为传动轴和扭轮的角速度, r_1 和 r_2 分别为传动轴和扭轮的半径。将 v 和 v_x 的表达式代入式(1)可得:

$$\omega_2 = \frac{\omega_1 r_2}{r_2 \cos \alpha}, \tag{2}$$

相应的可以推导出 v_y 的表达式:

$$v_y = v_x \tan \theta = \omega_1 r_1 \tan \theta, \tag{3}$$

设 L_x 为扭轮相对于驱动轴圆周方向的位移, L_y 为扭轮相对于驱动轴轴线方向的位移,根据式(3), L_x 和 L_y 的关系为:

$$\tan \alpha = \frac{L_y}{L_x}, \tag{4}$$

当 $L_x = \pi D_q \tan \alpha$ 时(D_q 为传动轴的直径),即传动轴转过一周, L_y 的值就是扭轮摩擦传动机构对应的行程,根据式(4), L 的表达式为:

$$L = \pi D_q \tan \alpha, \tag{5}$$

α 的具体值可以根据需要来调整。因此,从理论上讲 α 的值可以任意小。摩擦传动机构在承受一定的载荷时,保持纯滚动的条件为:

$$F_t = \mu_s F_N, \tag{6}$$

式(6)中, F_t 为机构承受的等效轴向载荷, μ_s 为传动轴和扭轮之间的静摩擦系数, F_N 为传动轴和扭轮之间的正压力。当正压力选取不合适时,或者造成传动轴和扭轮表面压伤,或者造成扭轮相对传动轴的轴向滑动,使扭轮和传动轴之间的运动学关系不符合式(5)。因此,有必要设计一种正压力可调的扭轮摩擦传动机构,使传动轴和扭轮之间的正压力能够根据载荷的情况人为的调整。

根据上文的分析,本文完成了由双扭力轮组成的摩擦传动组,其中一组采用叠型弹簧顶紧机构并与力矩电机及减速器连接作为主动力输入扭轮,另一组与角位置传感器连接作为从动轮。两组扭力轮均采用轴承套式镶嵌结构。可以通过调整两组扭力轮之间的跨距来调整摩擦传动器的预紧压力,从而控制动力传输与摩擦力、转动力矩、重力矩之间的平衡关系,并确保传动行程 L 与角位置传感器的角度输出值吻合,实现闭环控制。摩擦传动器的三维建模实例如图 10、图 11 所示。

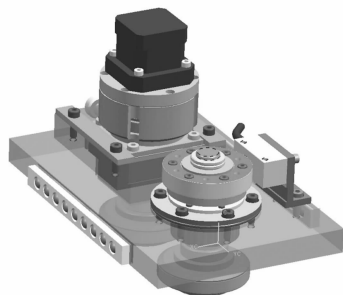


图 10 摩擦传动器三维建模实例 1

Fig. 10 Three-dimensional model 1 of friction-drive

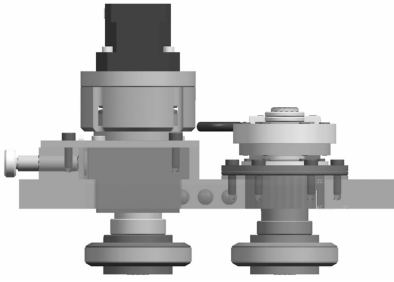


图 11 摩擦传动器三维建模实例 2

Fig. 11 Three-dimensional model 2 of friction-drive

弧形导轨侧截面和扭轮之间接触形变和它们之间的正压力的关系依据经验公式为:

$$\delta = 0.580 \frac{F_N}{lE} \left(\ln \frac{4r_1 r_2}{b^2} + 0.814 \right), \quad (7)$$

式中, δ 为弧形导轨侧截面和扭轮之间接触变形量, F_N 为弧形导轨侧壁和扭轮之间的正压力, l 为弧形导轨侧壁和扭轮之间的接触长度, 这里 l 为扭轮外套的长度, 即近似工作区的长度, E 为弧形导轨和扭轮轮材料的弹性模量比, r_1 和 r_2 为传动轴(此处为弧形导轨侧截面的轴向跨距)和扭轮的半径, b 由式(8)给出:

$$b = 1.522 \sqrt{\frac{F_N r_1 r_2}{lE r_1 + r_2}}, \quad (8)$$

由式(6)~(8)可以推导出扭轮和传动轴之间的正压力与其接触形变的关系为:

$$F_N = 1.724 \frac{lE\delta}{\ln \frac{4r_1 r_2}{b^2} + 0.814}, \quad (9)$$

根据扭轮运动轨迹展开图所示的比例, 可以得出碟形弹簧调节距离 Δh 和正压力 F_N 的关系:

$$F_N = 1.724 \frac{lE\delta\Delta h}{\ln \left(\frac{4r_1 r_2}{b^2} + 0.814 \right) L_1}. \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 一旦机构中的各项变量确定, 则正压力与调节量是呈线形关系的。在实际工程加工与装配中则存在一些随机变量影响碟形弹簧预紧力与调节量的关系。当两组扭力轮对导轨侧壁的正压力相等且与转动力矩、摩擦力矩平衡时, 可以保证整个机构运动的平稳与输出角度真值的准确性。

4 仪器误差与检测精度

如上文分析, 地物目标动态模拟装置是为机载侦测平台在像移补偿工作条件下进行捕获与跟踪测量目标空间位置真值的装置, 其角度输出精度将直接影响机载侦测平台的实际检测精度。其中摩擦转动系统的定位与角度输出精度最为关键, 将直接影响整个检测过程的精度。

在实际的摩擦传动系统中, 接触刚度的计算公式还应有一项修正系数, 该修正系数可以通过试验给出。在摩擦传动中, 摩擦力作为驱动力克服从动部分的阻力, 此时, 两物体接触点和接触线处于静摩擦状态, 符合静摩擦运动力学原理如式(6), F_N 为正压力, μ_s 为静摩擦系数。在一定的情况下, 当两物体保持相对静止时, 摩擦力随着阻力的增加而增加, 当阻力大于临界值时, 两物体便会产生滑动, 这时摩擦传动的力学特性就符合动摩擦的情况。在精密传动和超精密传动中, 应尽量避免此种“丢转”现象, 而一系列修正系数则应在机械加工后通过实际的标定实验确定。

由于动力输出与角位置输出不同轴, 由此引发的相对滑动也会为整个闭环控制带来误差, 进而造成空间真值的误差。也就是说, 即使动力输入无“丢转”, 角度输出轴无误差, 也无法保证获得输入与角度输出间一一对应关系。此种误差可以通过真值算法上的修正予以降低。

此外, 传统的轴系结构的端面与径向跳动误差也将降低输出角度的精度, 影响摩擦传动的效率与精度。

5 结 论

本文以全新的机载平台实验室动态性能综合评价方法为依据, 对其中的核心检测设备—地物目标动态模拟装置的工程化需求进行了分析, 介绍了具体的机械结构设计过程。提出了基于摩擦传动原理的新型传动手段, 并对其力学特性进行了分析与计算。

本文为类似机载稳像平台的实验室条件下动态性能综合评价与检测装置的研制提供了新的思路, 而其中摩擦传动系统的采用与设计方案的结合为高精度动力传输与高分辨率角位置输出相结合的机械结构形式提供了新的选择方案。

参考文献:

- [1] 田军委,王建华. 波动载荷下扭轮摩擦传动机构的导程分析[J]. 西安工业学院学报,2005,25(4):331-334.
TIAN J W, WANG J H. Lead analysis of twist-roller frictional transmission structure under dynamic load[J]. *Journal of XI'AN University of Engineering Science and Technology*, 2005,25(4):331-334. (in Chinese)
- [2] MIZUMOTO H, NOMURA K, MATSUBARA T, *et al.*. An ultra-precision positioning system using a twist—roller friction drive[J]. *Journal of the American Society for Precision Engineering*, 1993 (15):180-184.
- [3] MIZUMOTO H, ARII S, YOSHIMOTO A, *et al.*. Twist—roller friction drive for nanometer positioning: a simplified design using ball bearings[J]. *Annals of the CIRP*, 1996, 45(1):23.
- [4] 田军委,黄永宣,王建华,等.超精密传动系统电机驱动器系统性能测试[J]. 组合机床与自动化加工技术,2005,7(3):58-61.
TIAN J W, HUANG Y X, WANG J H, *et al.*. Motor-driver System Performance Test of the Ultraprecision Driver System[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2005,7(3):58-61. (in Chinese)
- [5] 刘波,刘宾. 压力可调式扭轮摩擦传动机构研制[J]. 设计与研究,2005,8(1):47-49.
LIU B, LIU B. Study on adjustable twist—roller friction driving structure[J]. *Design and Research*, 2005,8(1):47-49. (in Chinese)
- [6] 戴一帆,李圣怡. 扭轮摩擦驱动系统研究[J]. 国防科技大学学报,1999,21(2):51-56.
DAI Y F, LI SH Y. Study of Twist-round friction drive system[J]. *Journal of National University of Defense Technology Journal*, 1999,21(2):51-56. (in Chinese)
- [7] LUO B, LIN ZH H, LI SH Y, *et al.*. The driving property of twist—roller friction mechanism in ultra precision positioning system[J]. *SPIE*, 2001,4601:161-166.

作者简介:陈 琦(1961—),男,吉林长春人,研究员,主要从事精密机械与精密光学仪器的研究。

何 煦(1981—),男,吉林长春人,博士研究生,主要研究方向为超光谱成像系统的装调与检测技术。E-mail: 911max@sina.com

● 下期预告

超声技术在硅湿法腐蚀中的应用

曾毅波¹,王凌云²,谷丹丹¹,孙道恒²

(1. 厦门大学 萨本栋微机电研究中心,福建 厦门 361005;

2. 厦门大学 机电工程系,福建 厦门 361005)

为了获得平滑的硅湿法腐蚀表面,在硅湿法腐蚀中引入超声技术。先对超声湿法腐蚀系统进行改进,确保腐蚀溶液的顶部和底部温差在 0.5 ℃ 之内。然后,采用 60 ℃, 10 wt. % 质量分数的 KOH 溶液,超声频率为 59 kHz,超声功率设置在 60~180 W(间隔 10 W),对(100)硅片进行湿法腐蚀。最后运用激光共聚焦扫描显微镜(LSCM)对腐蚀后硅片表面粗糙度进行测量,并探讨超声参数的选择对腐蚀表面质量的影响。实验结果表明:超声功率在 120 W 时,可以获得平滑的腐蚀表面,表面粗糙度 R_q 值为 0.020 μm 。在湿法腐蚀系统中采用超声技术,可以明显改善腐蚀表面质量。在较低温度和较低浓度的 KOH 溶液中,选择合适的超声参数可获得高品质的腐蚀表面。