

高精度角位移平台的研制及误差补偿*

姚雪峰^{1,2}, 孙 慈¹, 杨 晋^{1,2}, 尹 禄^{1,2}, 赵宏伟³

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 吉林大学机械科学与工程学院 长春 130025)

摘 要: 在拉曼光谱仪中,要求承载分光元件转动的角位移平台在具备较大的转动范围、较高的转角分辨率和转角定位精度的同时还具备较快的转动速度,传统的几种驱动方式很难同时满足上述所有要求。有鉴于此,设计了一种采用力矩电机直接驱动技术的高精度角位移平台。一般控制方法的控制精度在很大程度上依赖于反馈元件的测量精度,为了突破反馈元件测量精度对整个控制精度的影响,采用了一种更为精确的误差补偿校正技术,并搭建了误差测量装置,将测得的绝对转角误差在控制器中通过一定的控制算法加以有效的补偿。最后,对结构设计和误差补偿校正的效果进行了实验检测。结果显示:当测量步距为 1° 时,双向绝对定位精度优于 $1.008''$;当测量步距为 10° 时,双向绝对定位精度为 $0.648''$;回转轴系的轴向晃动误差小于 $\pm 5''$ 。以上结果验证了该角位移平台具有机械精度高、转角分辨率高、定位准确等技术优势,能够满足拉曼光谱仪等相关仪器的使用需求。

关键词: 拉曼光谱仪;角位移平台;直驱;补偿校正

中图分类号: TP217+.3 TH741.2+2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Development and error compensation of the high precision turntable

Yao Xuefeng^{1,2}, Sun Ci¹, Yang Jin^{1,2}, Yin Lu^{1,2}, Zhao Hongwei³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: High-precision turntable is widely used in many occasions such as precision machinery, spectrometers, optical equipment and high-end CNC machine tools. The turntable which bears the rotation of the spectral components in the Raman spectroscopy should satisfy the requirements of large rotating range, higher resolution, higher angle position precision and faster rotational speed. However, it's hard to meet all the above requirements through the traditional driving methods. A high-precision turntable is presented which employs torque motor direct driving technology. As known to all, the precision of general methods is largely dependent on the measurement accuracy of the feedback element. In order to address this problem, a more accurate error compensation correction technology is adopted and the error measuring system is set up to compensate the measured absolute angular error through a certain control algorithm. The effect of the structural design and error compensation correction are detected in the experiment. The result shows that when the measurement pith is 1° , the bidirectional absolute positioning accuracy is better than $1.008''$. When the measurement pith is 10° , the bidirectional absolute positioning accuracy is better than $0.648''$ and the axial shaking error of rotating shaft system is less than $\pm 5''$. The above results show that the turntable has high mechanical precision, high angular resolution, accurate positioning and other technical advantages, which satisfies the demand of the Raman spectrometer and other related instruments.

Keywords: Raman spectroscopy; turntable; direct drive; compensation and correction

收稿日期: 2016-03 Received Date: 2016-03

* 基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ120351)、国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2008-1)、国家重点基础研究发展计划(973)(2014CB049500)、吉林省科技发展计划(20140204075GX)项目资助

1 引言

高精度的角度位移平台在精密机械、光谱仪器、光电设备、高档数控机床等许多场合都有着非常广泛的应用。在拉曼光谱仪、单色仪等光学仪器中,作为分光元件的棱镜或光栅需绕通过回转中心的轴线做某些特定规律的回转运动,仪器波长与分光元件转角之间具有一定的函数关系^[1-3],角位移平台的作用就是承载分光元件实现上述回转运动。

目前在光谱仪器中应用比较广泛的角位移驱动方式主要有蜗轮蜗杆传动、杠杆传动(包括正弦传动机构、余弦传动机构以及余割机构等等)以及钢带滚轮传动3种方式。

在常见的三光栅单色仪中光栅转台采用的是蜗轮蜗杆传动方式,这种传动方式最大优势在于转动角度大、结构简单、传动比线性固定以及可以实现相对较高的转动速度等,但受限于结构原理,蜗轮蜗杆传动方式也存在分辨率低、反向间隙大等问题,因此定位精度普遍不高。杠杆传动机构按照传动关系可以分为正弦传动机构、余弦传动机构以及余割传动机构等,其主要特点是结构简单,色散元件的转角分辨率比较高。根据杠杆传动机构的传动关系式,色散元件的转角分辨率与杠杆臂长成反比,因此,增长杠杆臂长就可以提高色散元件的转角分辨率。但根据材料力学中一端固定、一端受力梁的挠曲变形计算公式可知^[4-5]随着杠杆臂长的增大,其挠曲变形量会以立方的比例增加,因此单纯的加长杠杆臂长会影响到整个仪器的结构刚度和稳定性。该问题的存在使得杠杆形式的传动机构很难实现较高的转角精度。从严格意义上讲杠杆传动机构的转角传递函数为非线性的反三角函数,因此想要在控制上保证转台转角绝对定位精度也存在着很大的困难。

在多棱镜系统中,如果各棱镜间的转速比是一定的,而且它们转轴相距的距离较大,就适合采用钢带滚轮的传动机构。钢带滚轮传动机构可以通过设定驱动各棱镜滚轮的直径来实现各棱镜转动的速比,因此具有速比恒定等优点。但由于整套机构结构复杂,中间环节较多,传动精度很难保证,而且钢带也容易出现打滑现象,因此在使用过程中也具有一定的局限性。

由上述分析可见,以上3种角位移驱动方式都无法同时满足转角分辨率、绝对定位精度、定位速度以及转动范围等性能指标的要求。为此,本文设计并制造出了一台在机械结构上采用力矩电机直驱方式、在控制方法上采用误差补偿校正技术的角位移平台^[6-8]。通过对实物的各项精度测试验证了该角位移平台的各项精度指标均达到了预先的设计要求。

2 高精度角位移平台的结构设计及实现方法

本文设计的高精度角位移平台在通过回转轴线的截面上获取的剖视图如图1所示。角位移平台在机械结构上主要由力矩电机、转接环、交叉滚柱轴环、衬套、圆光栅和台面等几部分组成。力矩电机的定子通过螺钉与外壳连接,力矩电机的转子通过转接环与交叉滚柱轴环的内圈相连,交叉滚柱轴环的外圈通过衬套与外壳连接。角位移平台的台面通过轴肩直接固定到交叉滚柱轴环的内圈上,台面上同时安装有圆光栅,作为角度控制的反馈元件。

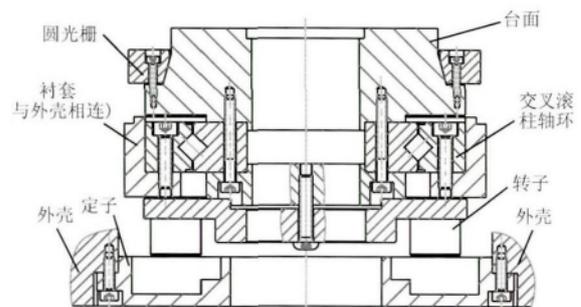


图1 截面剖视图

Fig. 1 Cross section view

2.1 力矩电机直驱方式的选择

角位移平台采用两相无刷直流力矩电机驱动。电机的定子和转子可以完全分离并且电机转子本身并无轴承支撑,如图2(a)和(b)所示,这样可以方便地将电机转子与负载直接耦合在一起,完全省去了中间的机械传动环节,因此具有定位准确、无空回、动态响应速度快等优点,可以实现较高的转角分辨率以及双向重复定位精度。

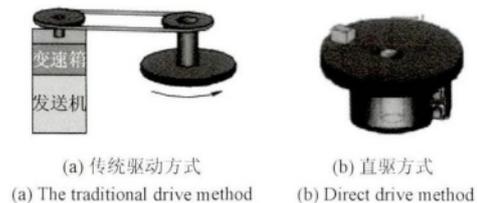


图2 驱动方式对比

Fig. 2 The comparison of drive methods

无刷直流力矩电机的自身特性决定其不会发生步进电机的“失步现象”以及伺服电机的“抖动现象”,因此不会在低速运转时产生“蠕动现象”并且有利于实现角位移平台运转时的低振动特性,从而可以提高其精度和可靠性。

2.2 轴向回转基准的选择

轴系的轴向晃动误差对光谱仪器的波长测量精度有

着很大的影响,因此轴向回转基准的选择对仪器的性能起着至关重要的作用。本角位移平台选用了日本 THK 公司 USP 精度等级的交叉滚柱轴环作为轴向回转基准,其三维结构图与实物图分别如图 3(a)和(b)所示,其精度指标如表 1 所示。如图 3(a)所示,在交叉滚柱轴环中,圆柱形滚柱在呈 90°的 V 形沟槽滚动面上通过聚四氟乙烯材料的间隔保持器被排列成垂直交叉状,这种设计使得单个轴承就可承受来自径向、轴向等所有方向的各种载荷,与使用传统的角接触球轴承相比,在体积和重量大幅减小的情况下刚性提高了 3~4 倍。该等级的交叉滚柱轴环旋转精度实现了超超精密级,从表 1 中可以看到,内圈的轴向和径向跳动公差均明显优于外圈,因此在设计上采用内圈旋转外圈固定的安装方式,这样可以提高轴系的回转精度。

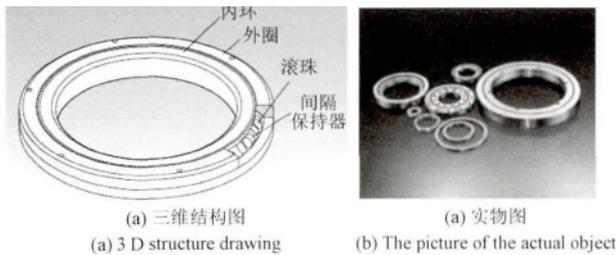


图 3 交叉滚珠轴承

Fig. 3 Double-row angular contact roller ring

表 1 交叉滚柱轴环精度指标

Table 1 The precision index of double-row angular contact roller ring

测试部位	径向跳动公差/ μm	轴向跳动公差/ μm
内圈	2	2
外圈	3	3

2.3 角度传感器的选择

角度传感器作为闭环控制的测量反馈元件,其自身的测量精度直接影响系统的控制精度。角度传感器选用的是增量式圆光栅,结合使用光学参考位开关确定系统的绝对零点位置,在配合使用相关读数盒细分后其分辨率最高可达 32 bits,相当于每周可以采样 4 294 967 296 个数据点。受限于整体的结构尺寸,角位移平台选用的圆光栅标称尺寸为 104 mm。根据厂家的技术资料,在包含了诸如安装偏心误差等因素的影响下,圆光栅的系统精度达到了 $\pm 2.1''$ 。

3 轴系回转精度的测量

为了验证装配后角位移平台回转轴系的旋转精度,对装配好的角位移平台进行了轴向晃动误差的测量。搭建的测量系统如图 4 所示,测量系统由被测角位移平台、

标准平面反射镜以及激光自准直仪组成,激光自准直仪的分辨率为 $0.02''$,测量精度为 $\pm 0.2''$ 。

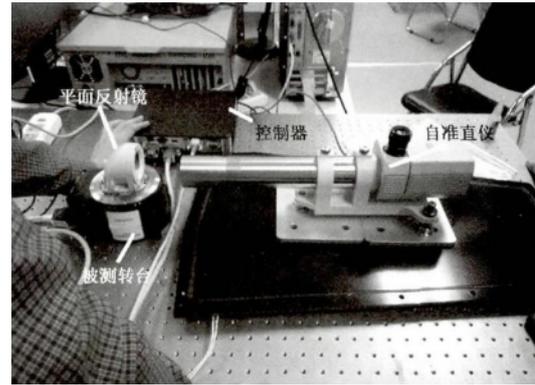


图 4 转角分辨率及轴系回转精度测试

Fig. 4 The measurement of the axis rotary accuracy and the angle resolution

测量轴系回转精度的过程如下:首先采用自准直方法将标准平面反射镜与激光自准直仪在水平和竖直两个方向上都调整至垂直状态,接着通过控制器给角位移平台每隔 20° 发出一个间歇角度位置信号,然后在每个间歇位置都调整标准平面反射镜使激光自准直仪在水平方向的读数为零,最后记录下该位置激光自准直仪在竖直方向的读数,此读数即为在该角度位置的轴系轴向晃动误差。重复测量两次得到的误差测量结果如表 2 所示,从表中可以看到轴向晃动误差的最大值为 $4.65''$,可以满足拉曼光谱仪等相关仪器的使用要求。

表 2 轴向晃动误差检测结果

Table 2 The precision index of double-row angular contact roller rings

测量面 n	角位移平台 转角 β_n ($^\circ$)	示值误差 2 次测量结果 ($''$)		示值误差 平均值 $\Delta\beta$ ($''$)
		第 1 次	第 2 次	
1	0	0	0	0
2	20	2.4	2.7	2.55
3	40	3.2	2.9	3.05
4	60	4.1	4.5	4.3
5	80	4.5	4.8	4.65
6	100	4.7	4.3	4.5
7	120	3.6	3.5	3.55
8	140	2.9	3.1	3.0
9	160	1.7	1.3	1.5
10	180	0.4	0.1	0.25
11	200	-1.3	-1.0	-1.15
12	220	-2.6	-2.4	-2.5
13	240	-3.7	-3.6	-3.65
14	260	-4.3	-4.2	-4.25
15	280	-3.9	-4.3	-4.1
16	300	-2.7	-2.5	-2.6
17	320	-1.2	-0.9	-1.05
18	340	-0.8	-0.4	-0.6

4 误差补偿原理与误差补偿结果

在角度位置控制中,一般将圆光栅测量得到的角度位置数据反馈到控制器中对角位移平台进行闭环反馈控制,控制原理框图如图5所示^[9-15]。这种控制算法的控制精度在很大程度上取决于反馈元件的测量精度。但在工程实际中受制于测量元件的结构偏心、安装误差以及自身精度等级等诸多因素的影响,经一级反馈控制后的绝对转角精度还不能直接满足相关仪器对转角精度的要求。因此,本文在一级反馈控制的基础上又提出了一种误差补偿校正控制方法,该方法的控制原理框图如图6所示。与一级闭环反馈控制相比,控制器中除了计算机发出的控制指令和圆光栅反馈回来的位置数据外又加入了一路补偿校正信号。该补偿校正信号的获得基于的前提是当角位移平台的机械结构具备一定的精度和经闭环反馈控制后,其转角的绝对误差曲线具有很高的重复性。在此前提下,使用更高精度等级的测量元件把角位移平台每隔一定角度所对应的绝对转角误差测量出来并写入到控制器中,这样就可以通过后期的控制算法把这些可重现的绝对转角误差有效的补偿掉一部分。

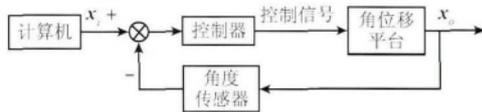


图5 闭环反馈控制原理框图

Fig. 5 The principle diagram of closed-loop feedback control



图6 误差补偿校正方法原理框图

Fig. 6 The principle diagram of error compensation and correction method

图7为转角精度测量装置的示意图,整个测量装置由超高精度角度编码器、被校准角位移平台、转接轴以及相关支撑部件组成。超高精度角度编码器是Heidenhain公司生产的RON 905,带内置轴承和定子联轴器,在考虑到安装误差的情况下其系统精度为 $\pm 0.4''$,高出角位移平台圆光栅一个精度等级。当角位移平台转动时,将圆光栅和参与标定的超高精度角度编码器获得角度值进行比较做差后就可以得到绝对转角误差。

图8为转角精度测量装置的实物图,位于上方的为超高精度角度编码器,被测角位移平台在其下方,二者通

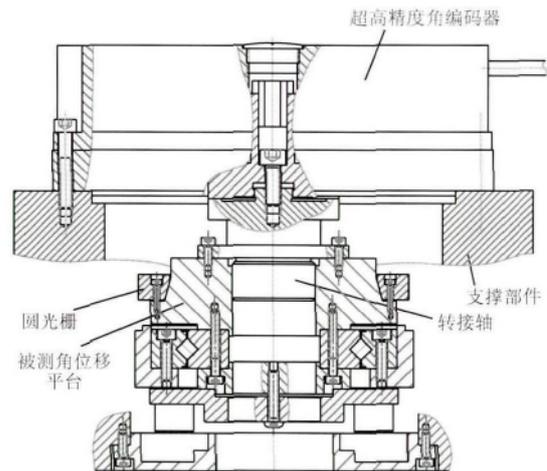


图7 转角精度测量装置示意图

Fig. 7 The schematic diagram of the angle accuracy measurement device

过一根连接轴刚性连接。编码器的固定部分和角位移平台的外壳均通过螺栓固定在环形的支撑部件上。考虑到振动可能对测量带来不利影响,整个测试装置安装到具有隔振地基的花岗岩平台上。



图8 转角精度测量装置实物图

Fig. 8 The actual picture of the angle accuracy measurement device

图9为误差补偿校正前测得的绝对转角误差曲线。测量范围分别为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 和 $-400^\circ \sim 400^\circ$,测量步距分别为 1° 和 2° 。误差曲线的横坐标是角位移平台编码器的测量值;纵坐标为反馈控制后超高精度角度编码器测量值减去角位移平台圆光栅测量值得到的差值,即绝对转角误差。从图中可以看到,补偿校正之前的转角误差峰-峰值约为 $30.6''$,相邻两测试点间绝对转角误差差值的最大值为 $0.576''$ 。通过对比测量范围是 $0^\circ \sim 360^\circ$ 和 $-400^\circ \sim 400^\circ$ 的两根曲线可以发现角度重叠的 $0^\circ \sim 360^\circ$ 部分重合度很好,说明多次测量得到的绝对转角误差具有

很好的重复性; 观察测量范围从 $-400^{\circ} \sim 400^{\circ}$ 的曲线可以发现 $-360^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 区间和 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 区间曲线的走向趋势一致性很好, 说明绝对转角误差具有良好的周期性。绝对转角误差单次测量的周期性和多次测量的重复性表明所测的误差数据可以用来校正角位移平台的绝对转角误差, 因此将测得的误差数据列表文件写入到控制器中然后通过控制算法修正转角绝对误差是可行的。

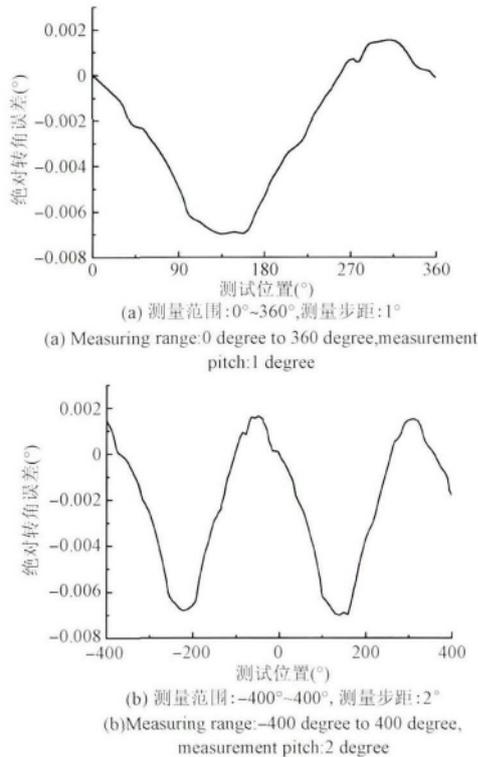


图 9 精度校正前的误差曲线

Fig. 9 The error curve before accuracy correction

在上述测试工作的基础上, 在控制器内部通过控制算法对该角位移平台在 $\pm 360^{\circ}$ 范围内的绝对转角误差进行了有效的补偿校正。补偿校正基于的算法如下: 当计算机发出目标角度 θ_x 的控制指令后, 在上一步生成的数据列表文件中查找相邻两角度位置 θ_i 和 θ_{i+1} 对应的绝对转角误差 u_i 和 u_{i+1} , 然后根据两点线性插值公式计算出 θ_x 位置所对应的绝对转角误差值 u_x 并用来修正控制器发出的理论控制信号。

$$u_x = u_i + \frac{u_{i+1} - u_i}{\theta_{i+1} - \theta_i} (\theta_x - \theta_i) \quad (4)$$

由相邻两测试点间误差的最大值为 $0.576''$ 可知, 上述算法的理论控制精度要优于 $0.576''$ 。图 10 为经误差补偿校正后测得的绝对转角误差曲线, 其中横坐标为角位移平台的控制目标值, 纵坐标为超高精度角度编码器测量得到的角度值与控制目标值的差值, 即角位移平台的绝对转角误差。测量范围分别为 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 和 $-400^{\circ} \sim$

400° , 测量步距分别为 1° 和 10° , 每次测量都分正反两个方向。从曲线中可以看到, 经过补偿校正后: 当测量步距为 1° 时, 双向绝对转角误差的峰-峰值降到了 $1.008''$; 当测量步距为 10° 时, 双向绝对转角误差的峰-峰值降到了 $0.648''$ 。分析两个测试过程误差结果不一样的原因是当测量步距越小、测量步数越多, 测量系统的累积误差越大, 反之, 累计误差越小。

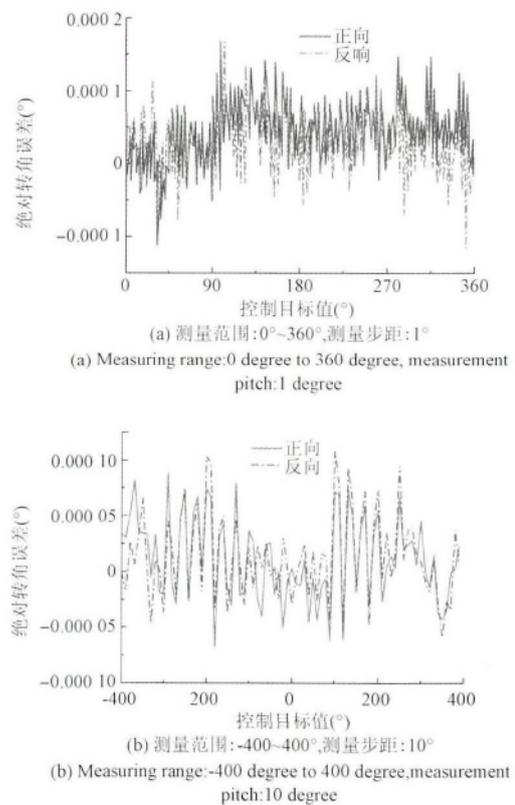


图 10 精度校正后的误差曲线

Fig. 10 The error curve before accuracy correction

5 结 论

本文设计并制造出了一台应用在拉曼光谱仪上采用力矩电机直驱技术的高精度角度位移平台, 选用高精度等级的交叉滚柱轴环作为回转基准并配合关键零件的研磨加工工艺, 使得轴向晃动误差小于 $\pm 5''$ 。角位移平台经一级反馈控制后其绝对转角误差峰-峰值为 $30.6''$, 根据测得的误差曲线可以看出具有良好的单次测量周期性和多次测量重复性。在此基础上采用误差补偿校正控制算法进行进一步的控制, 测得补偿校正后的角位移平台精度指标如下: 当测量步距为 1° 时, 双向绝对定位精度为 $1.008''$; 当测量步距为 10° 时, 双向绝对定位精度为 $0.648''$ 。上述各项精度指标均能满足拉曼光谱仪等仪器对分光元件转动精度的要求。

参考文献

- [1] 王拓 戴连奎. 重整汽油在线拉曼分析系统开发与工业应用[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6):1201-1206.
WANG T, DAI L K. Development and industrial application of online Raman analysis system for catalytic reforming gasoline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(6):1201-1206.
- [2] 安岩 刘英 孙强 等. 便携式拉曼光谱仪的光学系统设计与研制[J]. 光学学报, 2013, 33(3):307-313.
AN Y, LIU Y, SUN Q, et al. Design and development of optical system for portable raman spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3):307-313.
- [3] 金星焕 陈和 董家宁 等. 凹面光栅拉曼光谱仪的光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(9):359-365.
JIN X H, CHEN H, DONG J N, et al. Optical design of concave grating raman spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9):359-365.
- [4] 刘双杰 郝永平. S型折叠式微悬臂梁刚度计算[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2):388-393.
LIU SH J, HAO Y P. Calculation for spring constants of folded serpentine micro-cantilevers [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2):388-393.
- [5] 贺学锋 杜志刚 赵兴强 等. 悬臂梁式压电振动能量采集器的建模及实验验证[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8):1771-1778.
HE X F, DU ZH G, ZHAO X Q, et al. Modeling and experimental verification for cantilevered piezoelectric vibration energy harvester [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8):1771-1778.
- [6] 孙渊涛 杨建玺 崔凤奎 等. 大型直驱静压转台关键技术分析与结构设计[J]. 机床与液压, 2014, 42(13):90-92.
SUN Y T, YANG J X, CUI F K, et al. Key technology analysis and structure design of large direct drive hydrostatic turntable [J]. Machine Tool & hydraulics, 2014, 42(13):90-92.
- [7] 黄静 刘朝晖 谢友金 等. 月基光学天文望远镜反射镜转台的设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8):2173-2179.
HUANG J, LIU ZH H, XIE Y J, et al. Design of 2-D reflection mirror gimbal for lunar based astronomy optical telescope [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8):2173-2179.
- [8] 田学光 田兴志 刘轩 等. 大型精密转台高精度角度微驱动装置的研制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5):1112-1118.
TIAN X G, TIAN X ZH, LIU X, et al. Development of angular micro driving device for large-scale and high accurate turntable [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(5):1112-1118.
- [9] 糜小涛 于宏柱 高键翔 等. 大型衍射光栅刻划机微定位系统控制器设计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2):473-480.
MI X T, YU H ZH, GAO J X, et al. Design of the controller of the micro-positioning system for large diffraction grating ruling engine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2):473-480.
- [10] 王志永 刘威 曾韬 等. 螺旋锥齿轮大轮齿形误差的在机测量[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5):1047-1053.
WANG ZH Y, LIU W, ZENG T, et al. On-machine measurement of tooth profile errors for the spiral bevel gears [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5):1047-1053.
- [11] 何煦 成贤错. 大型中阶梯光栅衍射效率测试仪器设计与集成[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9):2057-2067.
HE X, CHENG X K. Design and integration of the measurement instrument for diffraction efficiency of large echelle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9):2057-2067.
- [12] 徐新行 王恒坤 韩旭东 等. 机载小型化快速反射镜用微位移测量传感器设计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9):1937-1944.
XU X H, WANG H K, HAN X D, et al. Design of displacement sensor for fast steering mirror with small volume on airborne platform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9):1937-1944.
- [13] 贾勇 李岁芳 王玮. 安装误差对旋转式惯导系统影响及补偿[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12):2674-2680.
JIA Y, LI S L, WANG W. Influence and compensation of the installation error on rotation SINS [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12):2674-2680.
- [14] 张宏韬 杨建国 姜辉 等. 双转台五轴数控机床误差实时补偿[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21):143-148.
ZHANG H T, YANG J G, JIANG H, et al. Real-time error compensation for the two turntable five-axis nc machine tools [J]. Journal of Mechanical Engineering,

2010, 46(21): 143-148.

- [15] 王伟国, 刘廷霞, 李岩, 等. 用于三轴转台的卫星跟踪策略[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 871-878.

WANG W G, LIU T X, LI Y, et al. Secondary planet tracking tactic arithmetic for three-axis turntable [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23 (3): 871-878.

作者简介



姚雪峰(通讯作者), 分别在 2007 年 2009 年于吉林大学获得学士学位和硕士学位, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员、博士研究生, 主要研究方向为精密机械设计、制造和测量。

E-mail: yaoxf@qq.com

Yao Xuefeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from Jilin University in 2007 and 2009. He is currently a doctoral student and research assistant in Changchun institute of optics fine mechanics and physics. His main research interests include precision mechanical design, manufacture and measurement.



孙慈 2011 年于内蒙古大学获得学士学位, 2014 年于中国科学院大学获得硕士学位, 现为长春光机所研究实习员, 主要研究方向为光谱仪器设计。

E-mail: sunci1822@163.com

Sun Ci received her B. Sc. degree in 2011 from Inner Mongolia University, her M. Sc. degree in 2014 from University of Chinese Academy of Sciences. Now she is research assistant in Changchun Institute of Optics and Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. Her main research interest is spectral instrument design.



赵宏伟 2006 年于吉林大学获得博士学位, 现为吉林大学教授、博士生导师, 主要研究方向为原位测试以及精密机械。

E-mail: hwzhao@jlu.edu.cn

Zhao Hongwei received his Ph. D. degree from Jilin University in 2006. He is currently a professor and Ph. D. supervisor in Jilin University. His main research interests include the in-situ test and the precision machinery.