

使用位置敏感探测器的精密倾斜平台及倾斜角度控制方法

冀聪^{1***}, 王子轩², 杨钢¹, 王晶¹, 鄢黎明¹, 王河林¹, 吴彬¹, 程冰¹, 陈春霖¹,
孙格雯¹, 常少华¹, 张宁², 王肖隆^{1*}, 林强^{1**}

¹浙江工业大学理学院浙江省量子精密测量重点实验室, 浙江 杭州, 310023;

²之江实验室量子传感研究中心, 浙江 杭州, 310000

摘要 设计了一种压电陶瓷驱动的精密倾斜平台及其倾斜角度控制方法, 实现了高精度倾斜控制。该控制系统主要由主控制器、位移探测模块、数模转换模块、高压驱动模块4部分组成, 可实现快速精确的倾斜控制。运用了球透镜与位置敏感传感器相结合的方法测量和控制精密倾斜控制平台的倾斜角度。实验结果表明, 该平台控制精度优于 $0.5\ \mu\text{rad}$, 且结构简单、易于装设, 特别适用于要求倾斜角度精密控制且低成本的工程应用环境。

关键词 测量; 倾斜平台; 位置敏感探测元件; 比例积分控制

中图分类号 O436.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1912001

Precise Tilt Platform Using Position Sensitive Detector and Control Method for Tilt Angle

Ji Cong^{1***}, Wang Zixuan², Yang Gang¹, Wang Jing¹, Wu Liming¹, Wang Helin¹,
Wu Bin¹, Cheng Bing¹, Chen Chunlin¹, Sun Gewen¹, Chang Shaohua¹, Zhang Ning²,
Wang Xiaolong^{1*}, Lin Qiang^{1**}

¹Key Laboratory of Quantum Precision Measurement of Zhejiang Province, College of Science,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

²Research Center for Quantum Sensing, Zhejiang Lab, Hangzhou, Zhejiang 310000, China

Abstract A precise tilt platform driven by piezoelectric ceramics and the control method for tilt angle are designed to achieve high precision tilt control. The control system is mainly composed of a main controller, a displacement detection module, a digital-to-analog conversion module, and a high-voltage driving module, which can realize fast and precise tilt control. The method combining the ball lens and the position sensitive sensor is used to measure and control the tilt angle of the precise tilt control platform. Experimental results show that the control precision of the platform is better than $0.5\ \mu\text{rad}$, and the structure is simple and easy to install. It is especially suitable for engineering application environments that have the requirements of precise tilt control and low cost.

Key words measurement; tilt platform; position sensitive detector; proportional-integral control

OCIS codes 120.4570; 120.4640

1 引 言

精密控制技术在物理、化学、生命科学等众多科研领域发挥着越来越重要的作用。在各类精密控制系统中, 精密倾斜平台^[1-2]可提供微弧度级精度的倾斜角度控制, 广泛应用于众多科研领域。常见的精

密倾斜平台驱动形式包括直线电机式、压电陶瓷(PZT)式、电磁驱动式以及音圈电机式等。采用PZT驱动的精密倾斜平台因具有结构紧凑、分辨率高、响应速度快、驱动力大等优点^[3-4]而被广泛使用。为了实现精密倾斜平台的高精度倾斜角度控制, 需采用与其精度相适合的测量技术^[5-9], 以实现

收稿日期: 2020-05-12; 修回日期: 2020-06-02; 录用日期: 2020-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(61875175, 61727821)、国家重点研发计划(2017YFC0601602, 2016YFF0200206)

* E-mail: xlwang@zjut.edu.cn; ** E-mail: qlin@zjut.edu.cn; *** E-mail: congjisu@163.com

倾斜平台的全方位实时监测与控制。

本文利用 PZT 致动器设计了一种基于三个 PZT 驱动的精密倾斜平台^[10-12],并使用球透镜与位置敏感传感器相结合的方法测量精密倾斜平台的倾斜角度,采用比例-积分-微分(PID)控制器对其进行控制。通过该方法可以有效地补偿外界环境扰动对平台控制系统精度产生的影响^[13],从而使得平台拥有较高的稳定性和倾斜角度分辨率。

2 精密倾斜平台的设计

本文所设计的基于三个 PZT 驱动的精密倾斜平台主要由 5 部分组成:固定底板、驱动部件、连接部件、传动部件以及运动部件。整个平台采用三个 PZT 并联驱动,如图 1 所示,该 PZT 可用于超高真

空环境下,其长度为 44 mm、直径为 20 mm,行程为 25 μm ,移动分辨率为 50 nm,最大负载为 1 kg。三个 PZT 间隔 120°,呈圆周分布,在三个 PZT 的组合驱动下可实现两个方向的自由运动及竖直方向的平移。为了减小构件的微小形变对平台精度的影响,传动部分采用刚度高的石英球头与弧槽配合传动的方式,球形顶头嵌于弧槽里面,在 PZT 伸缩运动时,球形顶头自由地在弧形槽内滑动,将伸缩平动转换为平台转动。平台连接部分由三个弹簧提供的初始预紧力连接,弹簧通过支杆连接,弹簧支杆通过左、右两端螺纹通孔分别安装在该精密倾斜平台的上、下底面,同时在支杆中间增加了一个弹簧限位槽,以消除弹簧在平台倾斜过程中的打滑问题。该平台具有 z 轴位移和 x 、 y 轴转动,共三个自由度。

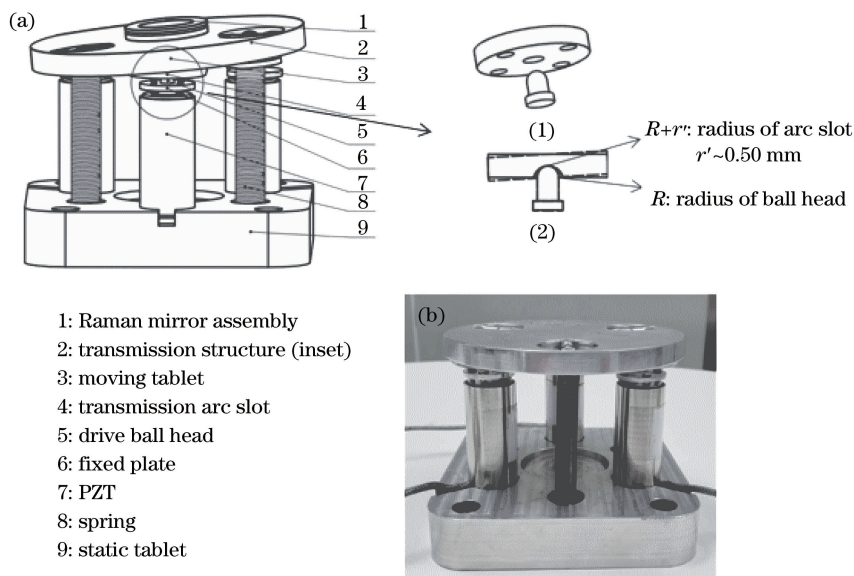


图 1 精密倾斜平台。(a)平台结构图,其中(1)为传动部分,(2)为剖视图;(b)实物图

Fig. 1 Precise tilt platform. (a) Structural diagram of platform, where (1) is transmission part, and (2) is cross-sectional view; (b) physical picture

3 控制原理及实验装置

3.1 平台运动学模型

本文所设计的精密倾斜平台具有三个自由度,

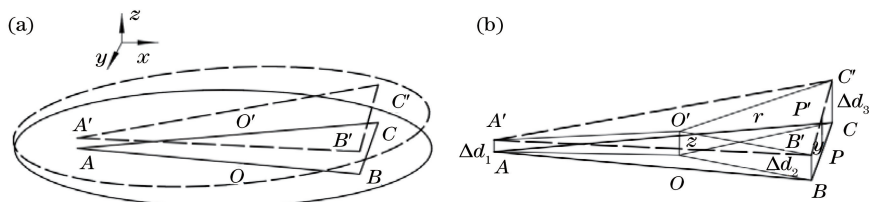


图 2 平台运动模型图。(a)平台空间运动状态;(b)PZT 位移与平台位姿关系

Fig. 2 Diagrams of platform motion models. (a) Spatial motion state of platform; (b) relationship between PZT displacement and platform posture

为了精确地控制其倾斜角度,需要确定 PZT 伸缩位移与平台姿态之间的关系。图 2 中 A、B、C 分别代表三个 PZT 的初始位置,O 为三个 PZT 的几何中心, r 为 PZT 到 O 的距离, Δd_1 、 Δd_2 、 Δd_3 分别为三个

PZT 的位移量, P 、 P' 分别为 BC 和 $B'C'$ 的中点, 其中 PP' 长度为 y 。

根据空间几何关系, 可得

$$\begin{cases} z = \frac{\Delta d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3}{3} \\ \sin \theta_y = \frac{y - z}{|OP|} \\ \sin \theta_x = \frac{\Delta d_3 - \Delta d_2}{|BC|} \end{cases} \quad (1)$$

由图 2(b) 中几何关系可得 $y = (\Delta d_3 + \Delta d_2)/2$, 则有

$$\begin{bmatrix} z \\ \sin \theta_y \\ \sin \theta_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3r} & \frac{1}{3r} & -\frac{2}{3r} \\ \frac{1}{\sqrt{3}r} & -\frac{1}{\sqrt{3}r} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta d_3 \\ \Delta d_2 \\ \Delta d_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} z = \frac{\Delta d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3}{3} \\ \sin \theta_y = \frac{2\Delta d_1 - (\Delta d_2 + \Delta d_3)}{3r} \approx \theta_y \\ \sin \theta_x = \frac{\Delta d_3 - \Delta d_2}{\sqrt{3}r} \approx \theta_x \end{cases} \quad (3)$$

3.2 位移测量装置

实验所采用的 PZT 为三英精控(天津)仪器设备有限公司生产的 NS-Z25-01 型, 伸缩量分辨率为 0.2 nm。对纳米级位移量进行定标和测量的方法主要分为非光学测量技术和光学测量技术两大类。非光学测量技术主要包括以电阻法、电容法和电感法为代表的电学测量技术; 光学测量技术主要包括光杠杆法、激光干涉法、光纤位移测量法等^[14]。其中激光干涉仪具有分辨率高、响应速度快、非接触等优点, 其缺点是结构复杂、成本高。

光电位置敏感器件(PSD)是一种对其感光面上入射光斑位置敏感的光电器件, 即当入射光斑落在器件感光面的不同位置时, PSD 将对应输出不同的电信号。通过对此输出电信号进行处理, 便可以得到入射光斑在 PSD 的位置。入射光强度和尺寸大小与 PSD 的输出信号均无关, 其输出信号只与入射光的位置有关。根据 PSD 的这一特性, 便可用它来测量倾斜平台的位移量。常用 PSD 元件的分辨率通常为微米级别, 直接使用该类元件无法实现高精度测量, 因此本实验使用球透镜与 PSD 相结合的方法将平台位移量放大, 从而实现微小位移的精确测量, 实验测量原理如图 3 所示。

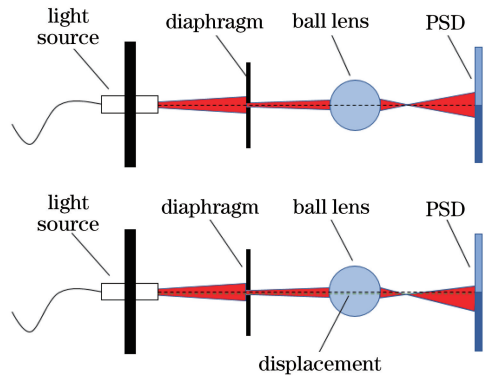


图 3 位移测量原理图

Fig. 3 Schematic diagram of displacement measurement

图 3 中测量光源采用带准直透镜的 780 nm 半导体激光二极管, 为达到最好的实验效果, 需要使测量光穿过球透镜中心位置, 实验中在球透镜前增加一个很小的圆形光阑(光阑直径 $d = 1$ mm)以缩小光斑直径。

设球透镜的焦距为 f' , 折射率为 n , 半径为 r , 三者近似满足

$$f' = \frac{nr}{2(n-1)}. \quad (4)$$

根据几何关系可以得出球透镜的放大倍率。当球透镜相对于其初始位置发生很小的偏移时, 根据球透镜的光学成像特性, 当入射光经过球透镜后, 其出射光的位移量会被球透镜放大。因此, 当出射光照射至 PSD 感光面上时, 经放大后的位移量便可被 PSD 探测到。在对 PSD 输出信号进行处理后, 便可得到其实际位移量。

3.3 闭环控制系统

基于上述 PID 控制原理与位移测量原理, 设计了精密倾斜平台控制系统, 如图 4 所示。精密倾斜平台控制系统主要包括 PID 控制器、位移测量模块、数模转换模块和执行机构(驱动模块)。

实验中设计了基于 STM32103ZET6 型微处理器芯片的数据采集处理和 PID 控制装置。PSD 测量的位移量(电压)信号由 24 位的数据采集卡记录并传递给控制器。数模转换采用基于 DAC8554 芯片的方案。采用 PA88 型高压运放组成的电压放大电路^[15]作为高压驱动模块。控制系统装置实物图如图 5 所示。

4 实验方法与分析

实验中所采用的精密倾斜控制平台被压电陶瓷驱动。压电陶瓷虽具有分辨率高、响应速度快、驱动力大等优点, 但开环控制下, 外界环境的扰动会对控

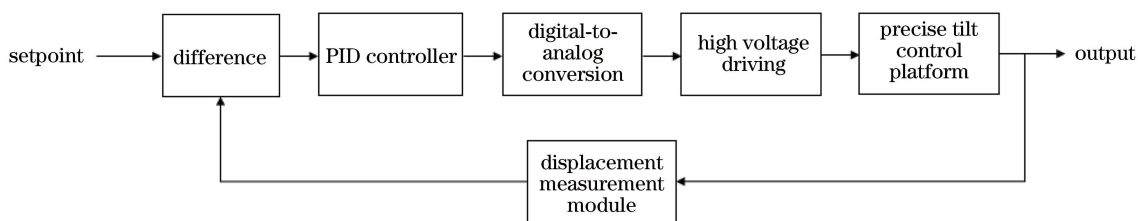


图 4 精密倾斜平台控制系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of precise tilt platform control system

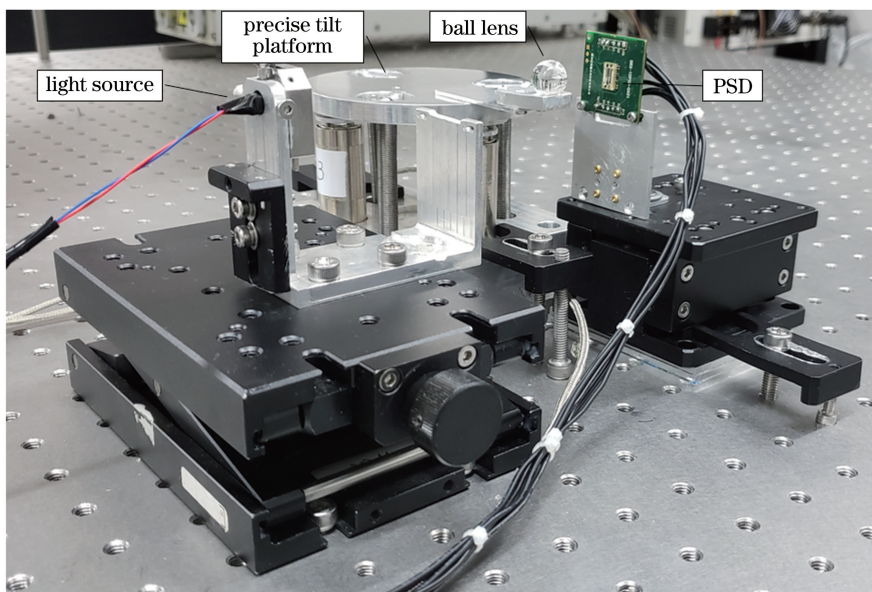


图 5 精密倾斜平台控制系统装置图

Fig. 5 Diagram of control system using precise tilt platform

制精度产生较大的影响,因此,采用了闭环比例积分 (PI)控制方法以补偿外界扰动引起的误差。为验证所设计的平台控制系统的闭环控制性能,分别使用开环和闭环控制方法,对平台在 10 min 测量时间内倾斜角度的变化进行测量。实验中采用 PSD 与球透镜相结合的位移探测装置测得单个 PZT 的位移量,再利用平台的运动学模型计算倾斜角度,开环控制与闭环控制效果对比如图 6 所示。开环控制下,在 10 min 测量时间内,平台的倾斜角度随时间的推移逐渐偏离设定值,而闭环控制状态下,在相同的测量时间内,平台的倾斜角度保持在了初始设定值。由对比结果可知,采用闭环控制后,开环控制中存在的倾斜角度漂移得到了较好的抑制。

为保证倾斜平台对倾斜角度控制的准确性与可靠性,在 $0\sim 400\ \mu\text{rad}$ 范围内,将系统的倾斜角度控制目标值按照每隔一段时间以 $8\ \mu\text{rad}$ 的幅度递增,使用基于 PSD 与球透镜的位移探测装置与 Jewell Instruments 公司生产的 83162 型倾斜计同时对平台实际的倾斜角度进行实时测量,并将两种测量结果进

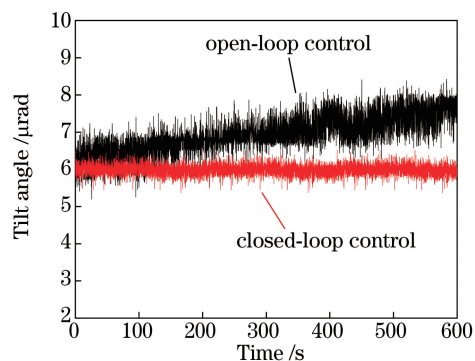


图 6 开环控制与闭环控制效果对比

Fig. 6 Comparison of open-loop control and closed-loop control

行对比(图 7)。测量结果表明,在 $0\sim 400\ \mu\text{rad}$ 范围内,两种方式测得的平台倾斜角度差在 2% 之内。

为验证所设计的精密倾斜平台及控制系统的控制分辨率,根据平台的运动学模型,设定阶跃的平台倾斜角度以控制目标值,可分辨的最小倾斜角度阶跃值即为倾斜平台的输出分辨率。实验中在 $0\sim 5\ \mu\text{rad}$ 范围内,将系统的倾斜角度控制目标值按

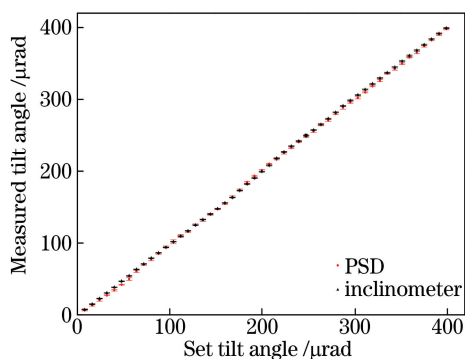


图 7 PSD 探测装置与倾斜计测量结果对比

Fig. 7 Comparison of measurement results between PSD detection device and inclinometer

照每隔一段时间以 $1 \mu\text{rad}$ 的幅度递增,则平台也会产生相应的倾斜角度。当设定倾斜角度以 $1 \mu\text{rad}$ 的梯度递增时,精密倾斜平台可分辨出其倾斜角度的变化,但为了进一步求取其准确的倾斜角度分辨率,需运用统计的方法。进行多次重复测量,并对所得的倾斜角度测量数据进行统计分析,求取倾斜角度在 $0 \sim 5 \mu\text{rad}$ 范围内以 $1 \mu\text{rad}$ 的梯度递增时每个倾斜角度的均值与标准差,如图 8 所示。

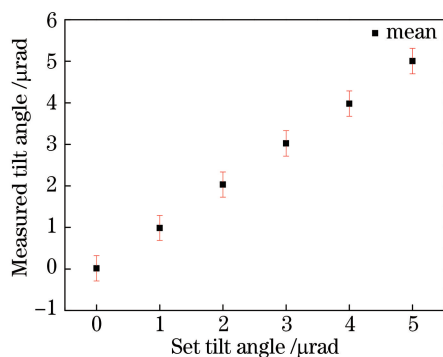


图 8 闭环控制分辨率统计图

Fig. 8 Resolution statistics of closed-loop control

由统计结果可得,平台倾斜角度的标准差为 $0.31 \mu\text{rad}$ 。根据所得到的标准差,该平台的倾斜角度分辨率优于 $0.5 \mu\text{rad}$ 。

5 结 论

设计了一种新型的低成本、结构简单的精密倾斜平台控制系统。该系统包含主控制器、位移探测模块、数模转换模块、高压驱动模块 4 部分,可实现快速精确的倾斜角度控制。实验表明,在开环控制状态下,受外界环境扰动的影响,该平台存在倾斜角度随时间的推移发生漂移的问题。在使用闭环控制后,平台在开环控制状态下存在的问题得到了比较好的改善,其倾斜角度分辨率优于 $0.5 \mu\text{rad}$ 。

参 考 文 献

- [1] Xu G H, He W, Fu J Z, et al. Precision tilting platform used for static calibration of accelerometers [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11): 2452-2458.
徐冠华, 何闻, 傅建中, 等. 用于加速度计静态标定的精密倾斜平台[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2452-2458.
- [2] He J, Xia H, Yan J Y, et al. A nano-positioning stage control system design [J]. Digital Technology & Application, 2019(10): 171-172.
何坚, 夏宏, 颜锦耀, 等. 一种三维纳米定位台控制系统设计[J]. 数字技术与应用, 2019(10): 171-172.
- [3] Ma L, Yang B, Tian Y Z, et al. Design of 3-DOF planar nano-positioning platform with 3-PRR structure [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(7): 1866-1873.
马立, 杨斌, 田应仲, 等. 3-PRR 平面三自由度纳米定位平台的设计[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1866-1873.
- [4] Zhu W B, Zhu S A, Ye S L, et al. Research on ultra-precision positioning platform based on phase tracking [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(10): 2301-2306.
朱维斌, 朱善安, 叶树亮, 等. 基于相位跟踪原理的超精密定位平台研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(10): 2301-2306.
- [5] Yang C, Zhang Z, Zhao Q. The study on precision positioning system of two-dimensional platform based on high speed and large range [J]. Precision Engineering, 2010, 34(3): 640-646.
- [6] Yang Z F, Li W L, Peng T R, et al. Performance of closed-loop correction with hysteresis compensation for unimorph deformable mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0522001.
杨宗峰, 李文来, 彭泰然, 等. 具有迟滞补偿的单压电变形镜的闭环校正性能[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0522001.
- [7] Zhai Y S, Liu W L, Wang X J, et al. Methods for laser beam drift compensation in laser alignment measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(7): 071203.
翟玉生, 柳文龙, 王新杰, 等. 激光准直测量中的光漂补偿方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 071203.
- [8] Yang C, Zhao Q, Wang H R, et al. Study on intelligent control system of two-dimensional platform based on ultra-precision positioning and large range[J]. Precision Engineering, 2010, 34(3): 627-633.

- [9] Wang H Y, Wang F J, Zhao X Y, et al. Dynamic characteristics of a high speed precision positioning platform driven by linear motors [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 197: 46-49.
- [10] Li J, Liu J Z, Zhang W W, et al. Research on the stiffness modeling of the high precision positioning platform under the thermal model[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 713/714/715: 789-794.
- [11] Tian Y, Liu C, Liu X, et al. Design, modelling and characterization of a 2-DOF precision positioning platform [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2015, 37(3): 396-405.
- [12] Li J P, Zhao H W, Qu X T, et al. Development of a compact 2-DOF precision piezoelectric positioning platform based on inchworm principle [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 222: 87-95.
- [13] Zhu M C, Luo X P, Wang Y P. The error analysis and compensation of two-dimensional precision positioning platform [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 268/269/270: 1380-1384.
- [14] Wang Z X, Ji C, Wang J, et al. Precision displacement measurement with nanometer resolution based on transmissive laser air-wedge interference [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0904006.
王子轩, 冀聪, 王晶, 等. 基于透射式激光空气隙干涉的纳米分辨率精密位移测量[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0904006.
- [15] Hu Y, Zhu Y Y. Design of a high voltage piezoelectric ceramic driving power supply [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(1): 71-76.
胡域, 朱玉玉. 一种高压压电陶瓷驱动电源的设计[J]. 压电与声光, 2020, 42(1): 71-76.