

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.09.011

图像测量显微镜数控二维载物台的设计*

苏 进^{1,2}, 夏豪杰^{3*}, 敖银辉¹

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广东三水合肥工业大学研究院, 广东 佛山 528100; 3. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对数字显微镜大幅面图像拼接中图像扫描的问题,设计了用于显微镜图像拼接的数控二维载物台机械结构与控制系统。通过采用二维堆叠式共面结构减少了阿贝误差,提高了系统集成度,同时结合有限元分析方法,对机械结构进行了分析;基于单片机设计了基于高精度光栅尺反馈与PID精密运动控制结合的二维数控平台的闭环位移控制系统,实现了二维移动平台X/Y方向的运动控制;采用双频激光干涉仪对所设计的数控二维载物台进行了标定,建立了运动控制误差补偿模型,提高了系统运动精度。研究表明:该结构在10 kg负载下形变为0.229 5 μm ;经补偿后,在100 mm \times 100 mm的行程范围内重复定位精度小于 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。

关键词:显微镜;二维平台;运动控制;误差补偿

中图分类号:TH742;TH39;TN16

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)09-0944-05

Two-dimensional numerical control system of stage for image measuring microscope

SU Jin^{1,2}, XIA Hao-jie³, AO Yin-hui¹

(1. College of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Research Institute of Hefei University of Technology in Sanshui, Foshan 528100, China; 3. College of Instrument Science and Opto Electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the problem of scanning the large-format image stitched by digital microscope, a two-dimensional numerical control mechanical structure and control system of stage was designed. The two-dimensional stacked coplanar structure was used to reduce the Abbe error, which improved system integration. Finite element analysis on the mechanical structure was conducted. Controlled by MCU, a closed-loop displacement control system of the two-dimensional numerical control stage based on the combination of grating scale feedback with high-precision and PID precision motion control was designed, which could achieve motion control of the two-dimensional movable stage in the directions of both X and Y. The dual-frequency laser interferometer was used to calibrate the designed numerical control two-dimensional stage, and the online compensation model of motion control error was established. Therefore, motion precision of the system improved. The results indicate that deformation of the structure is 0.229 5 μm under the load of 10 kg, after compensation, repetitive positioning accuracy is less than $\pm 5 \mu\text{m}$ in the travel range of 100 mm \times 100 mm.

Key words: microscope; two-dimensional platform; motion control; error compensation

0 引 言

数字显微镜在形貌检测、生物医疗等领域具有重要应用。显微镜图像检测具有视场较小、成像幅面不足的技术限制,从而在大幅面表面质量检测、大幅面生物组织

图像检测等应用中受到限制。利用精密运动平台与工业相机相互配合进行图像拼接,是低成本解决大幅面显微图像检测的有效手段,同时利用运动图像的快速采集与图像融合也是实现超工业相机自身像素分辨率的有效途径。因

收稿日期:2019-01-08

基金项目:佛山市科技创新团队项目(2014IT100115)

作者简介:苏进(1992-),男,湖北天门人,硕士研究生,主要从事精密运动平台方面的研究。E-mail:1083562575@qq.com

通信联系人:夏豪杰,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:hjxia@hfut.edu.cn

此,二维数控显微镜载物台是实现大幅面显微图像拼接的基础部件,实际应用要求二维平台结构紧凑、偏平,并通过反馈控制系统来提高整个定位工作台的定位精度。

定位平台的应用非常广泛,包括精密加工、医学、航空航天等多个领域,国内外相关的研究也非常多。不同的应用领域,对平台的定位精度、行程等要求也不同。根据平台的定位精度主要分为纳米级和微米级,其研究方法也不尽相同。该应用设计针对的是微米级的定位平台。微米级数控二维平台一般采用堆叠式的机械结构。郝敏^[1]采用了直线电机的驱动方式,并利用气浮导轨的方式减小了误差。耿远迎等^[2]设计的显微镜工作台定位系统采用了电机驱动齿轮齿条传动,并配有光耦,其重复定位精度为 $\pm 50 \mu\text{m}$ 。吴耀春等^[3]设计的显微镜工作台采用了 AT89C52 单片机控制步进电机驱动齿轮齿条传动,并采用了光栅尺反馈,其重复定位精度可达到 0.020 mm 。包建东等^[4]设计的二维精密定位平台采用了 LabVIEW2010 作为控制软件系统开发平台,通过上位机控制波型旋转超声电机驱动滚珠丝杠传递运动,配以光栅尺反馈与 PID 控制算法组成了闭环控制,其控制精度达到 $\pm 0.008 \text{ mm}$ 。

基于上述研究,本文将针对在图像测量显微镜下的应用要求,设计该数控二维载物台。

1 机械结构设计

导轨运动模块由于导轨不平直会产生定位和直线度误差,工作台的实际位移会和安置于导轨侧边的位置传感器由于不在同一直线上产生阿贝误差。传统平台由两个一维平台堆栈而成,平台间在垂直方向存在高度差,平台导轨系统的俯仰误差就会引起平台较大的阿贝误差,可以通过合理设计导轨结构降低阿贝误差。微型高精平台采用共平面结构设计将工作台面与两运动轴的导向面设计成同一高度平面,测量轴也位于该平面上,减小运动轴与测量轴的偏离距离,使阿贝误差接近零。

该平台设计行程为 $100 \times 100 \text{ mm}$,负载为 10 kg ,重复定位精度为 $\pm 5 \text{ mm}$ 。滚珠交叉导轨具有尺寸小,振动小,额定倾覆力矩大,直线度高等优点。故本研究采用其作为承载和导向装置,在满足设计参数要求的同时可以有效节省空间,降低高度。两导轨之间的高度差仅为 21 mm ,相对于传统导轨的堆叠结构的平台的高度差,可以减小阿贝误差。

本研究采用小型 28 mm 步进电机作驱动,高精度精密微型滚珠丝杠传递运动与力。

二维平台机械结构如图1所示(外形尺寸为 $286 \times 261 \times 60 \text{ mm}$,总质量为 4.95 kg)。

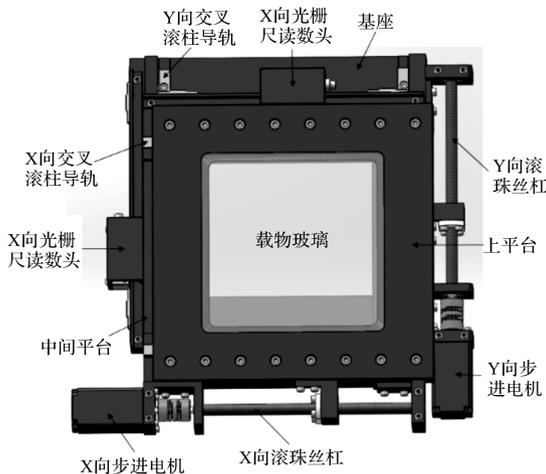


图1 二维平台机械结构

图1中:该平台由两个步进电机分别带动相互垂直的两根高精滚珠丝杆。 X 向步进电机旋转通过联轴器带动 X 向丝杆转动,从而带动中间平台,上平台,以及 Y 向传动系统在 X 轴向运动; Y 向步进电机旋转通过联轴器带动 Y 向丝杆旋转,从而带动上平台中的载物玻璃在 Y 轴向运动。两方向的运动合成,实现平台在二维平面的自由运动。

由于中间平台结构相对复杂,笔者运用 SolidWorks Simulation 对其进行应力载荷与形变仿真^[5]。负载会通过上平台和导轨传递给中间平台,故将 10 kg 的负载,即 98 N 的力加载于上平台中央,简化为将力加载在中间平台的导轨接触处。本研究采用实体网格,二阶高品质单元,并对其应力集中部位应用网格控制适当的加密网格,得到节点总数 $237\ 762$ 个,单元总数 $147\ 005$ 个。

然后通过 Simulation 分析得到中间平台的应力分布云图,可以得出其所受的最大应力为 $0.323\ 5 \text{ MPa}$ 。而其许用应力为:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n} \quad (1)$$

式中: σ_s —中间平台的屈服强度, $\sigma_s = 55.1 \text{ MPa}$; n —安全系数, $n = 1.3$ 。

经计算得 $[\sigma] = 42.4 \text{ MPa}$ 。其值远远大于中间平台所受的最大应力,因此,表明该平台是安全的。

通过 Simulation 分析得到中间平台的位移分布云图,可以得出其最大变形量为 $0.229\ 5 \mu\text{m}$,相对于其定位精度 $5 \mu\text{m}$,其变形量非常小,因此不会因为负载导致的变形对定位精度产生大的影响。

2 位移控制系统设计

2.1 控制系统组成

该系统采用 STC89C52 单片机作为控制芯片,用

光栅尺测量实时位置用于构建闭环反馈系统,其控制系统结构如图 2 所示。

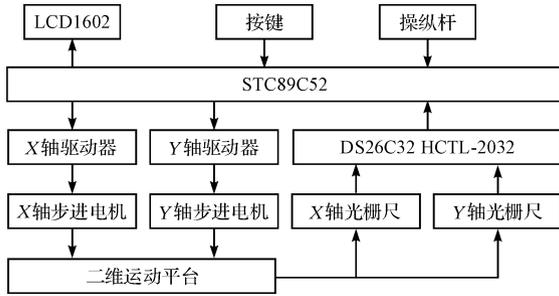


图 2 控制系统结构

图 2 中,系统通过按键选择不同的控制模式,输入控制参数,单片机发送两路脉冲控制信号,步进电机模块驱动滚珠丝杠将旋转运动转换成直线运动,实现平台的二维运动;X、Y 轴向光栅尺检测位置信号,并反馈给 DS26C32 和 HCTL-2032 芯片^[6],进行计数及鉴相处理,然后将数据传输给单片机进行处理,实现闭环控制。同时,还可以通过操纵杆控制,实现平台的快速移动,LCD1602 液晶显示模式状态,输入参数信息,及实时位置状态。

2.2 软件系统设计

系统软件部分采用 KeilC51 编译环境,使用 C 语言编写控制程序,并与 proteus 结合进行联调仿真,主要实现以下功能:

- (1) 按键、操纵杆的输入控制;
- (2) 对步进电机的控制,完成直线、圆弧、正弦、余弦插补等运动;
- (3) 读取经过 HCTL-2032 芯片处理的光栅尺反馈信号,并进行处理;
- (4) 液晶显示器的控制。

控制系统软件流程如图 3 所示。

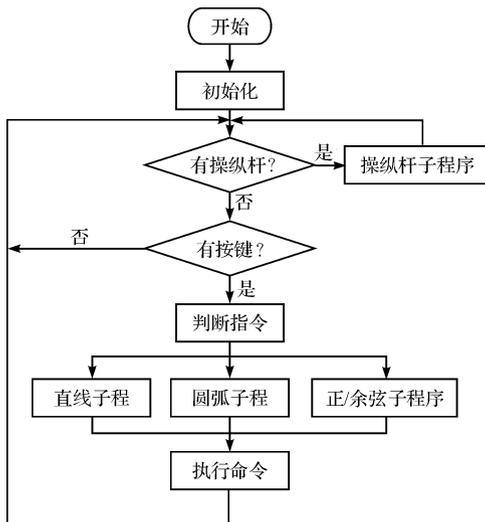


图 3 控制系统软件流程图

单片机系统采用逐行扫描查询法对按键进行扫描,识别按键输入的信息。通电后系统进行初始化,然后判断是否有操作操纵杆,如有则执行操纵杆子程序,否则判断按键是否有按下,通过按键输入运动模式、运动参数,然后控制步进电机做相应的运动,并通过光栅尺反馈信号结合增量式 PID 控制系统进行精确定位和控制。

任务完成后,可以重新操作操纵杆控制运动平台,也可以重新通过按键设置运动模式和参数实现下一步动作。

本研究采用数字 PID 增量式控制算法^[7]实现闭环控制。其控制算法为:

$$\Delta u = u_{(k)} - u_{(k-1)} = K_p [e_{(k)} - e_{(k-1)}] + k_i e_{(k)} + K_d [e_{(k)} - 2e_{(k-1)} + e_{(k-2)}] \quad (2)$$

式中: Δu —增量调节值; K_p —比例系数; K_i —积分系数; K_d —微分系数; $e_{(k)}$ —第 k 采样时刻输入的偏差值; $e_{(k-1)}$ —第 $k-1$ 采样时刻输入的偏差值; $e_{(k-2)}$ —第 $k-2$ 采样时刻输入的偏差值。

PID 参数采用 Z-N(Ziegler - Nichols)方法的临界比例度整定公式进行整定。

Z-N 临界比例度整定公式如表 1 所示。

表 1 Z-N 临界比例度整定公式

控制类型	K_p	K_i	K_d
P	$K_u/2$	-	-
PI	$K_u/2.2$	$1.2K_p/T_u$	-
PID	$0.60K_u$	$2K_p/T_u$	$K_p T_u/8$

K_u, T_u —系统在纯比例控制作用下产生等幅振荡时的比例增益和振荡周期^[8]

本研究首先将 K_i 和 K_d 设为 0,然后逐渐将 K_p 逐渐从 0 开始增加,通过串口助手将每一个采样周期控制器输出的偏差值保存到电脑上,并绘制其与时间的关系函数图,直到出现等幅振荡,记录此时的比例增益和振荡周期,即为 K_u 和 T_u 。然后通过 Z-N 临界比例度整定公式计算出 K_p, K_i, K_d 。得到 $K_p = 0.25, K_i = 0.5, K_d = 0.03$ 。

本研究采用逐点比较法实现直线和圆弧插补^[9-10],分为 4 步进行:

- (1) 偏差判别。根据偏差判断应该向哪个方向进给;
- (2) 坐标进给。根据判别的结果,是步进电机驱动沿相应的方向进给;
- (3) 偏差计算。计算进给后当前的偏差,为下一次进给做准备;

(4) 终点判断。判断是否已经到达终点, 已达到终点, 则停止插补, 否则, 执行(1)继续插补, 如此循环, 直到到达终点。

本文通过直线段逼近曲线的方法来实现正弦与余弦运动^[11]。将曲线按其角度值划分为相同的等份, 然后计算每一等份的弧段的起点与终点坐标, 用直线段去拟合, 然后通过直线插补实现每一直线段的运动, 最终实现正弦与余弦扫描运动。

3 系统误差补偿与实验测试

通过光栅尺反馈实现的闭环控制系统可以有效减小定位误差, 但在测量的过程中, 系统也会存在很多的误差, 其中包括光栅副的质量、处理信号的方法、机械光学结构、使用环境等引起的误差。从误差修正角度可以将这些误差分为周期累积误差、细分误差以及随机误差^[12]。同时, 由于结构的限制, 该平台系统光栅尺的测量轴线在平台的边缘, 实际搭载物体在平台中央, 这样会存在横向的阿贝误差; 平台导轨副的精度等也会对重复定位精度产生影响。周期累积误差、细分误差、阿贝误差和导轨副的精度引起的误差属于系统误差, 可以对其做误差补偿以修正。

通过测量误差曲线, 本研究在控制系统中加入一种尽量与测量误差曲线大小相等、方向相反的原始误差, 以抵消系统误差, 达到误差补偿的目的。

3.1 误差补偿方案原理

运动平台从0点到终点, 其整个行程系统误差基本上是不变的。本研究通过控制器给定运动平台在行程范围内的一些位置指令, 采用高精度的位置测量系统, 如激光干涉仪, 测得这些给定位置指令点的实际位置, 然后与指令位置相比较, 计算出各点的误差^[13]。

该平台采用实际位置减去指令位置得到误差值。经过测量多组误差数据, 取其平均值, 以减小随机误差。连接这些位置上的误差点就可以得到行程误差曲线。确知了行程误差曲线, 就可以用拟合的方法求出其函数表达式。曲线拟合可以尽可能地反映曲线的基本趋势。

曲线拟合函数与误差曲线之差称为残差, 其大小可作为衡量拟合函数好坏的标准, 通常采用最小二乘法的多项式拟合使残差的平方和最小来进行曲线拟合^[14-15]。然后通过编制程序将曲线拟合函数加入到控制程序中, 此后, 每次输入的位置指令将会自动考虑该位置下的误差值并补偿。比如, 由拟合函数计算在

10 mm 位置的误差为 +20 μm , 则在控制器运算过程中将 20 μm 转换为步进电机脉冲个数, 在相应的位置指令中减去这个脉冲数, 从而实现对误差的补偿。

该载物台采用这种方法, 用激光干涉仪分别测量两个方向上的误差并绘制其曲线, 求得拟合曲线, 然后编写控制程序实现误差补偿。

3.2 实验分析与实验结果

搭建好实验平台后, 本研究对其定位误差进行测量, 测量工具选用雷尼绍 XL-80 激光干涉仪, 测量时将测量轴线置于平台运动方向的中间。

实验平台如图 4 所示。

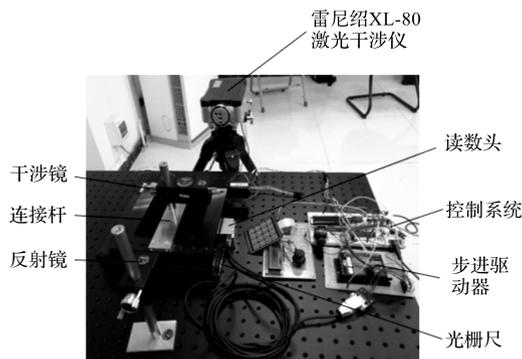


图4 实验平台

由于该平台设计的行程为 100 × 100 mm, 本研究分别对 X 轴和 Y 轴从 0 ~ 100 mm 范围内进行测量, 从 10 mm ~ 90 mm 内每 10 mm 取一个测量点, 测量 5 组数据。取各个测量点的均值作为数据拟合点, 绘制误差曲线, 并用 Matlab 曲线拟合工具箱 Curve Fitting 对误差曲线采用多项式拟合。对于 X 向, 用直线拟合时的和方差 $SSE = 39.81$, 确定系数 $R\text{-square} = 0.9954$; 采用二次多项式拟合时的和方差 $SSE = 36.41$, 确定系数 $R\text{-square} = 0.9958$ 。而和方差越接近于 0, 确定系数越接近于 1, 则说明拟合的程度越好, 故 X 向选择二次多项式拟合。对于 Y 向, 由其误差曲线可以看出大致呈二次曲线形式, 故对其也采用二次多项式拟合。

误差与曲线拟合如图 5 所示。

3.3 数据分析与补偿

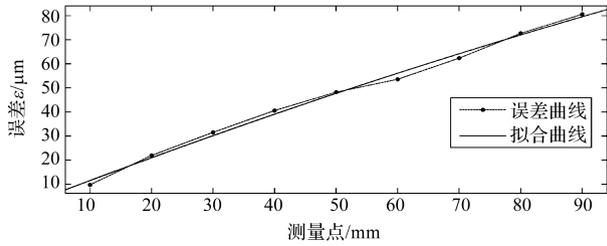
本研究获得误差曲线和拟合曲线后, 建立前馈控制补偿函数, 由 Curve Fitting 生成的误差修正函数为:

$$X \text{ 向: } y = -0.0006x^2 + 0.9473x + 1.563$$

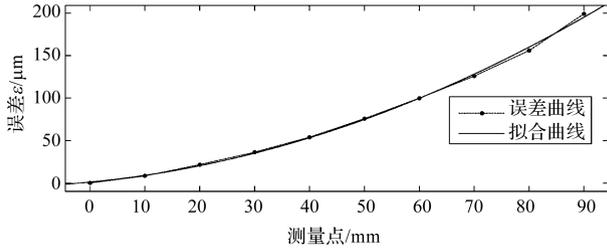
$$Y \text{ 向: } y = 0.0168x^2 + 0.6397x + 1.021$$

然后将修正函数加入到控制输出函数里面, 从而实现补偿。补偿后测量平台的定位误差, 各个测量点测量 7 组数据, 得到平台的重复定位偏差。

重复定位偏差如图 6 所示。

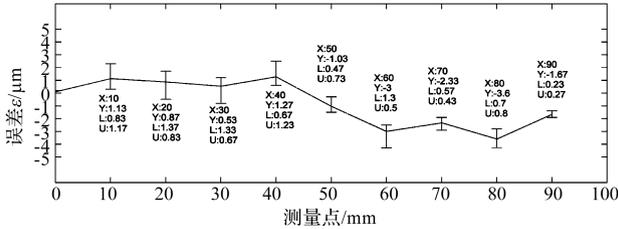


(a) X向误差与拟合

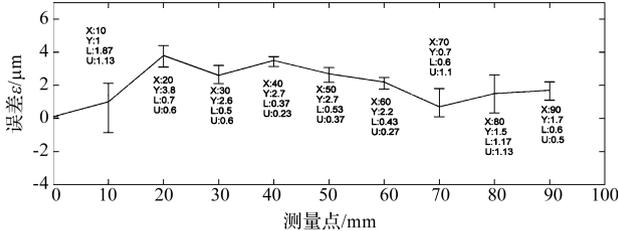


(b) Y向误差与拟合

图 5 误差与曲线拟合



(a) X向重复定位偏差



(b) Y向重复定位偏差

图 6 重复定位偏差

X—横坐标(测量点)值;Y—纵坐标(误差)值;L—Y的变动偏差下限值;U—Y的变动偏差上限值

由图 6 可知:定位精度平均值提高到 $-3.6 \mu\text{m} \sim 3.8 \mu\text{m}$, 每一个测量点的重复定位比较稳定,其最大偏差在 Y 向的 10 mm 处,为 $3.00 \mu\text{m}$ 。最大定位误差出现在 Y 向的 20 mm 处,其大小为 $4.4 \mu\text{m}$ 。

4 结束语

本文设计了一套高定位精度的图像测量显微镜数控二维载物台系统,通过扁平化设计使纵向阿贝误差减

小,设计了控制系统,实现直线、圆弧、正弦和余弦运动;采用直线光栅尺,有效减小了由于机械结构、装配以及运动中步进电机的步差等造成的定位误差;通过光栅尺反馈建立了闭环控制系统,并构建了误差补偿模型,针对光栅尺的测量轴线与实际搭载物体所在轴线位置较远形成的阿贝误差以及其他系统误差进行了补偿。

实验证明,该平台可以实现二维平面上高精度、高可靠性的运动,平台系统的定位精度可以达到 $-3.6 \mu\text{m} \sim 3.8 \mu\text{m}$ 。

参考文献 (References):

[1] 郝敏. 二维精密工作台测量系统设计[J]. 硅谷, 2011(17): 59-60.

[2] 耿迎远, 齐国生, 徐端颐. 显微镜工作台定位系统的设计与实现[J]. 光学技术, 2004, 30(1): 51-53.

[3] 吴耀春, 萧泽新, 高兴宇. 显微镜工作台闭环控制系统的设计与实现[J]. 光学技术, 2006, 32(z1): 135-137.

[4] 包建东, 徐威利, 谢小敏, 等. 二维精密定位平台控制算法研究[J]. 测试技术学报, 2015, 29(6): 540-545.

[5] 闫兴民, 张亮有. 基于 SolidWorks 起重机吊钩的有限元分析[J]. 机械工程与自动化, 2016(1): 44-45.

[6] 殷庆纵, 王新辉. 基于 HCTL-2032 的位移测量仪的设计[J]. 微型机与应用, 2009, 28(20): 74-77.

[7] 金奇, 邓志杰. PID 控制原理及参数整定方法[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2008, 22(5): 91-94.

[8] 夏红, 赏星耀, 宋建成. PID 参数自整定方法综述[J]. 浙江科技学院学报, 2003, 15(4): 236-240.

[9] 周虹. 两种数控直线插补算法的比较[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004(3): 101-102.

[10] 朱江新, 李言, 李淑娟, 等. 基于最小偏差法的过象限圆弧插补统一算法[J]. 西安理工大学学报, 2004, 20(1): 71-73.

[11] 洪美琴. 加工正弦函数曲线轮廓的插补计算精度分析与编程[J]. 现代机械, 2007(6): 24-25.

[12] 华晓青, 欧阳航空, 李鸣鸣, 等. 精密定位载物工作台的研制[J]. 机电一体化, 2005, 11(3): 39-43.

[13] 王宏涛, 赵转萍, 赵雪冬, 等. 滚珠丝杠螺距误差补偿法提高数控机床定位精度的研究[J]. 航空精密制造技术, 2001, 37(5): 2-4.

[14] 李丙才, 嵇海旭, 田相克. 丝杠行程误差补偿技术[J]. 机床与液压, 2005(1): 41-42, 79.

[15] 黄明辉, 王晗, 陈新, 等. 光栅尺测量精度误差补偿系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(12): 81-84.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

苏进, 夏豪杰, 敖银辉. 图像测量显微镜数控二维载物台的设计[J]. 机电工程, 2019, 36(9): 944-948.

SU Jin, XIA Hao-jie, AO Yin-hui. Two-dimensional numerical control system of stage for image measuring microscope[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(9): 944-948.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>