

文章编号 1004-924X(2014)10-2773-06

基于压电陶瓷光电相移驱动的大行程纳米定位系统

许素安*, 谢敏, 孙坚, 陈乐, 王桂荣
(中国计量学院机电工程学院, 浙江杭州 310018)

摘要: 由于压电陶瓷驱动器作纳米定位控制系统驱动元件会导致定位过程中出现超调及振荡现象, 故提出了一种新的基于外差干涉仪和自制高频相移电路的光电相移压电陶瓷驱动方法。实验论证了在严格控制的实验环境下, 压电陶瓷能实现自主位置锁定并以纳米量级步距值被逐步推进。步距值可控的压电陶瓷驱动器与商用宏动平台结合, 可实现纳米精度重复性的大行程定位系统。实验结果表明, 对于 5 mm 往返行程的位移, 在靠近目标处执行理论值为 5 nm 步距值的步进位移时, 系统的定位重复性精度小于 1 nm。该定位方法规避了压电陶瓷的机械非线性误差, 具有系统架构简单, 定位速度快等优点, 可应用于当前纳米科技和超精密加工等领域。

关键词: 纳米定位系统; 外差干涉仪; 压电陶瓷执行器; 高频相移电路; 宏、微二级运动
中图分类号: TN384; TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142210.2773

Long range nano-positioning system based on optoelectronic phase-shift for piezoelectric actuator

XU Su-an*, XIE Min, SUN Jian, CHEN Le, WANG Gui-rong

(College of Mechanical and Electrical Engineering,
China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)
* Corresponding author, E-mail: xusuan@cjlu.edu.cn

Abstract: As overshoot and oscillation phenomena will occur when a piezoelectric ceramic actuator is taken as a driving element for nano-positioning systems, this paper proposes a new piezoelectric ceramic displacement control method based on a home made high frequency phase-shifting electronic circuit and a heterodyne interferometer. On the experiments, it demonstrates that the piezoelectric ceramic could be locked actively and be driven step by step in a nanometric scale under a strictly controlled experimental environment. This controlled stepper piezoelectric actuator combined with a commercial macro stage achieves a displacement system with nanometric repeatability over a millimeter range. Experimental results show that this system has a repeatability smaller than 1 nm when it has over back and forth displacement of 5 mm and executes the step by step displacement with the step value of 5 nm near the target position. The positioning method avoids the mechanical defects of piezoelectric actuator and is characteristics by simpler structure, faster positioning and suitable for numerous applications in nanotechnology and ultra precision machining.

收稿日期: 2014-02-20; 修订日期: 2014-04-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51105348, No. 61203113); 浙江省钱江人才计划资助项目 (No. 2013R1066); 第 45 批教育部留学回国启动基金资助项目

Key words: nano-positioning system; heterodyne interferometer; piezoelectric actuator; high frequency phase-shifting circuit; macro-micro dual movement

1 引言

当前,纳米科技、微电子加工、先进制造业、生物医学等领域均需要大行程(指毫米级)纳米级定位^[1-4],用于大面积样品测量的原子力显微镜和半导体工业中的光刻机也需要对工作台在毫米行程上实现纳米或亚纳米精度的定位控制。目前,多国计量领域的科学家也在致力于千克基准量子化的研究。无论是欧美国家的“功率天平”方案,还是我国科学家提出的“能量天平”方案,都是要解决毫米行程纳米定位这一关键问题^[5]。

目前的工艺水平所生产的大行程位移台虽然可实现毫米行程纳米分辨率的定位,可受机械缺陷的制约,这些位移台的重复性和精度还在几十纳米以上,已不能满足今后工业发展的要求。另外,半导体行业国际半导体技术发展路线(ITRS2009版)对关键尺寸不确定度(3σ)的要求,也已由2010年的1.9 nm提高到2016年的0.9 nm。因此,开发毫米行程纳米或亚纳米精度的定位系统已成为相关领域各国科学家竞相研究的热点^[6-8]。

现有的纳米定位控制系统大多采用压电陶瓷驱动器作为驱动元件,但压电陶瓷固有的非线性、迟滞和蠕变等缺点会导致定位过程中出现超调及振荡现象,从而制约了定位系统精度和效率的提高。针对这一问题,国内外学者提出了一些压电陶瓷迟滞、蠕变建模和补偿的方法^[9-14]。从实际应用的角度来看,这些非线性的前馈补偿方法可以消除非线性对系统的影响,但这些方法应用在纳米定位时,算法繁杂,不能满足定位的实时性要求。

本文在外差激光干涉仪的基础上,提出运用相位锁定跟踪来驱动压电陶瓷运动的定位控制方法。在锁相回路中,可根据量化的相移值以相应步长推动压电陶瓷。步距值可控的压电陶瓷与大行程(毫米级)位移台相结合,可完成大行程纳米精度的位置控制。

2 系统原理和设计

2.1 位置控制原理

图1为基于光电相移压电陶瓷驱动的纳米定位方法原理图。其中,外差激光干涉仪频差输出为20 MHz;移动镜置于压电陶瓷上,其位置信息由干涉仪输入激光束与出射激光束的相位差值求得;自制高频电路板输出信号 S_1 和 S_2 ,这2个信号的频率均为20 MHz,与外差干涉仪拍频信号相同。图中,信号 S_1 被发送至干涉仪的激光头以产生2个外差干涉所需的同步信号;信号 S_2 被发送至混频器作为锁相回路中的参考信号,信号 S_2 与干涉仪的输出信号 S_3 进行相位比较;信号 S_3 为干涉仪的测量信号,含有移动镜的位置信息。通过计算机控制信号 S_1 或信号 S_2 均能产生一定量值的相移量。干涉仪的输出信号 S_3 通过PLL(锁相环)回路与信号 S_2 实现相位跟踪锁定。

图1的工作原理为:假设信号 S_2 上有一定量值的相移,闭合PLL锁相回路则利用多普勒效应驱动移动镜,以补偿相位差;假设相移量产生在信号 S_1 上,则移动镜向相反的方向移动。这样,就可以通过控制施加于信号 S_1 或信号 S_2 的相移量值来控制移动镜的位置。

高频相移电路由频率为10 MHz的高稳振荡器组成。锁相回路产生2路频率均为20 MHz的信号。相移电路能使这2路信号产生量值为 $\Delta\phi=2\pi/p$ 的相移, p 为整数,可通过计算机设置。对于双程外差干涉仪来说, 2π 的相移量值对应于 $\lambda_0/4n$ 的位移量,其中: λ_0 为真空激光波长值; n 为空气折射率。位移量值与相移量的关系为:

$$\Delta x = \frac{\lambda_0 \Delta\phi}{8\pi n} \quad (1)$$

相移量通过数字脉冲发生器的指令控制脉冲,因相移量为数字量,所以位置控制的不确定度主要受激光波长值的不确定限制。由公式(1)可知,对应于 $2\pi/32$ 的相移量,步进位移的理论值为5 nm,而实际所能达到的步距位移值受实验环境、干涉仪的分辨率等因素的影响。值得一提的是,本文中的位置伺服控制系统不能直接测量移

动镜的位移值,所有测量值均取自 Zygo 公司的数据采集系统。

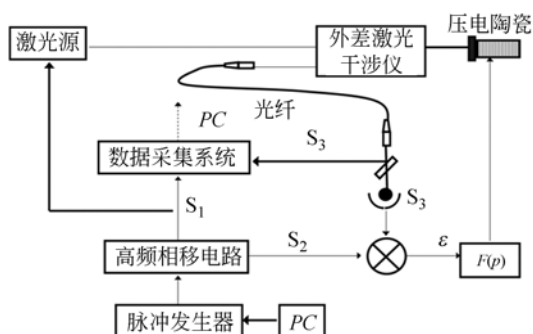


图 1 定位控制系统原理示意图

Fig. 1 Principle schematic of positioning control method based on phase-shifting optoelectronics

2.2 高频相移电路

定位控制系统中的高频相移电路可产生与外差干涉仪同频率的 2 路高频信号,且这 2 路高频信号的相位差值可控。高频相移电路的结构如图 2 所示,主要包括快速比较器、锁相倍频器、信号分配器、脉冲抑制器、分频器。首先快速比较器将外部时钟信号 S_{CLK} 转化为方波信号,锁相倍频器将该方波信号倍频,信号分配器将该倍频信号分配至两路,一路经由数字分频器 1 直接分频,另一路倍频信号由脉冲抑制器抑制一个脉冲(相应的相移为 2π)后由数字分频器分频,分频器 1 和分频器 2 的分频倍数均为 2^{-p} (p 为整数),则分频器 1 的输出信号相对分频器 2 的输出信号有 $\frac{2\pi}{2^p}$ 的相移。以高频相移电路输出相移量为 $\frac{2\pi}{32}$,频率均为 20 MHz 的 2 路信号为例,PLL 倍频器的倍频倍数应为 32,即倍频器的输出频率为 $32 \times 20 = 640$ MHz,分频器 1 和 2 的分频倍数均为 32,即相应的 p 值为 5。

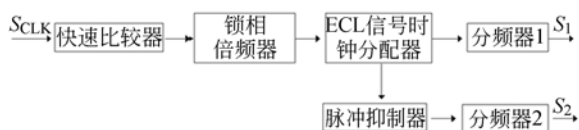


图 2 自制高频相移信号发生电路

Fig. 2 Generating circuit of homemade high-frequency phase-shifting signal

3 实验研究

定位实验系统示意图如图 3 所示。将光电相移驱动的压电陶瓷 ST2 (Thorlabs AE0505D16, 该压电陶瓷 ± 20 V 电压的最大行程为 $\pm 15 \mu\text{m}$) 与商用大行程定位平台 ST1 结合,构成毫米行程的定位系统。大行程运动机构为直线电机运动平台 (AeroTech ABL80020)。该运动平台自带 PID 控制,行程为 200 mm,分辨率为 10 nm。压电陶瓷执行器的行程为 $15 \mu\text{m}$,分辨率为亚纳米级。移动镜采用微晶玻璃立方体 (ZD),整个系统集成在 ST1 单元上。

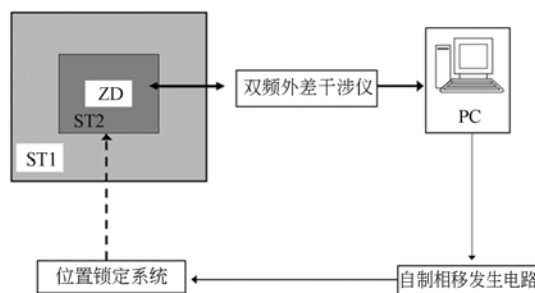


图 3 毫米行程纳米定位实验系统示意图

Fig. 3 Diagram of experimental system with nanopositioning and millimeter range

商用双频外差干涉仪 (Zygo-ZMI2001) 的测量分辨率为 0.31 nm。实验室内安装有气象测量仪以监控实验室内的温度 (PT100, $1\sigma = 0.01^\circ$),湿度 (HygroM4, $1\sigma = 1\%$) 和压力 (Paroscientific $1\sigma = 3$ Pa) 的变化。实验系统的位移测量与控制通过 Labview 软件和数据采集卡实现。

定位系统中的定位平台 (ST1) 与压电陶瓷 (ST2) 相互独立。大行程位移由 ST1 完成而 ST2 不动作,当靠近目标位置时,高频相移电路产生相移驱动 ST2 以纳米级步距值位移运动。这样,微动台仅在目标位移处用来修正宏动台的机械运动误差。整个系统的位移范围受宏动台 (ST1) 直线度的影响,ST1 的直线度需小于压电陶瓷的行程范围。在本系统中,压电陶瓷的行程为 $15 \mu\text{m}$,移动镜可移动 5 mm 而不打破伺服控制回路;定位系统软件采用 Labview 平台编写,程序流程图如图 4 所示。程序流程图中 d 为理论位移值, d' 为测量位移值,误差值 $\epsilon = d' - d$ 。工作时先启动宏动台 ST1,当宏动台的位移误差值 ϵ 大于 100

nm 时,重新发送宏动台位移命令,位移量值为 $-\epsilon$,循环往复直至位移误差小于 100 nm。之后,ST2 动作,ST2 以 5 nm 的固定步长进行步进位移。因此,ST2 可在目标位移终点处修正宏动台 ST1 的位移误差值。

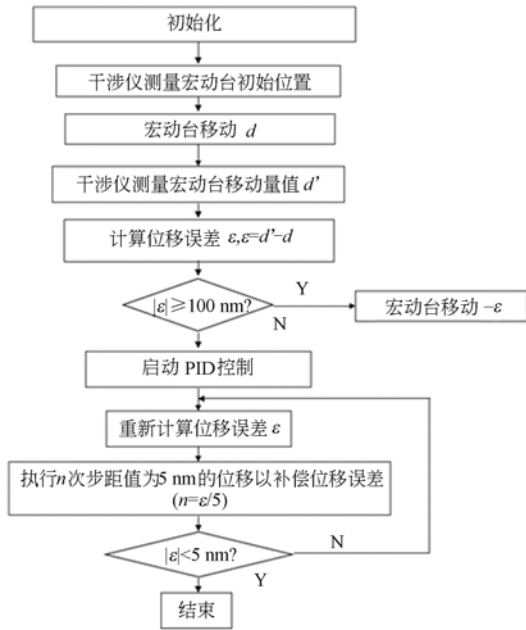


图 4 位移控制程序流程图

Fig. 4 Program flowchart for position control

为了验证位移系统的重复性,做了一些验证实验。取干涉仪测量初始零点位置为图 5 中的 A 点,直线电机移动一固定距离(此处为 5 mm),直线电机的位移分辨率为 10 nm,但其固有的机械缺陷误差为微米级;当直线电机逼近目标位置(距离 A 点 5 mm 的 B 处)时,位置误差由光电相移驱动的 ST2 进行补偿;图 5 中 ST2 执行的步距值为 5 nm;到达目标位置 B 并稳定后,以同样的方式回到初始位置(图 5 中的 A' 点)。系统的位移速度受数据采集系统带宽的制约,本文采用的 ZYGO-ZMI2401 采集系统,其带宽为 1.5 kHz。

图 6 所示为接近目标位置 B(离起点位置 5 mm 处)的步进位移曲线图。图中步进位移曲线的理论步距值为 5 nm,步进台阶数(n)为 12。图 6 中 B' 处的位移值为 4 999 942.87 nm(由 50 个相邻点位置值的平均值得到),则与终点 B 的距离为 -57.13 nm。为到达终点处,应执行的步进台阶数 $n = \frac{57.13}{5} \approx 12$ 。

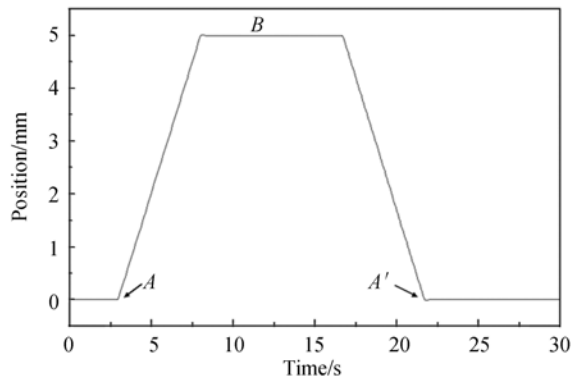


图 5 5 mm 行程来回位移轨迹

Fig. 5 Back and forth displacement trajectory of 5 mm

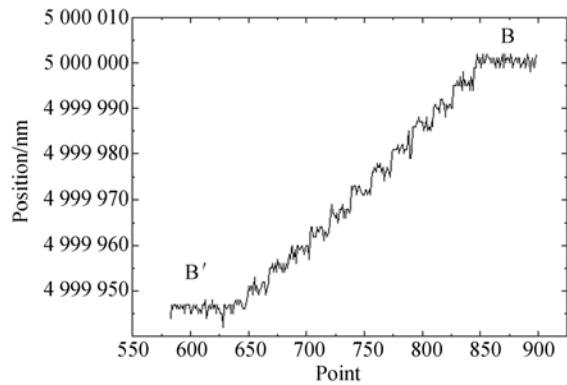


图 6 5 nm 步距值步进位移曲线

Fig. 6 Step displacement curves with step value of 5 nm

5 mm 行程的来回实验重复进行了 20 次,系统的重复性定义为起点(A)与终点(A')位置差值($x_A - x_{A'}$)的均方差。图 7 为位移量为 5 mm 的来回行程误差。采用均值和标准差公式计算:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3)$$

图中实线代表平均值,其值为 -0.096 nm,虚线代表均方差值,其值为 0.466 nm。

为了减小定位的不确定度误差,应考虑到几个主要误差源。首要误差源为空气折射率 n,公式(1)表明位移量值与空气折射率相关,空气折射率 n 可通过 Edlen 公式进行测量和补偿^[15],文中借助于室内环境监测仪的测量数据,对图 5~图 7 的实验结果进行了关于空气折射率 n 的补偿修正。第二大误差源为余弦误差,余弦误差公式为 $\epsilon = L \times \frac{\theta^2}{2}$,对于毫米行程的位移,如余弦角小于 1

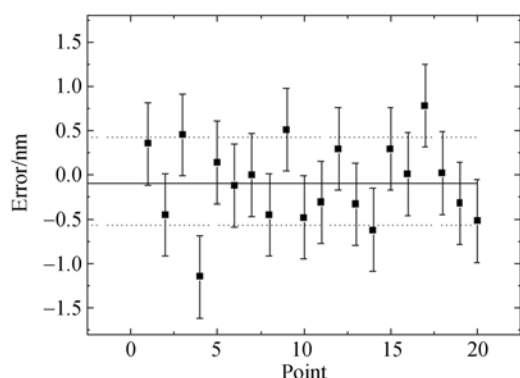


图 7 位移重复性实验结果图

Fig. 7 Repeatability of millimeter-range displacement

mrad, 则余弦误差可忽略^[16], 余弦值 ϵ 为 $\epsilon = (10^{-3}) \times \frac{(10^{-3})^2}{2} \approx 10^{-9} \text{ mm} = 1 \text{ pm}$, 可借助传统的激光束对齐直线调整技术, 将余弦角控制在 1 mrad 以内。第三大误差源为外差干涉仪的光学非线性, 经验证, 光学系统经过调节后, 实验用于

参考文献:

- [1] 刘振, 李岩. 计量型扫描显微镜中大行程纳米定位系统研制[J]. 光电子·激光 2010, 21(7):957-962. LIU ZH, LI Y. Development of large range positioning system used in metrological scanning microscope [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(7):957-962. (in Chinese)
- [2] 夏瑞雪, 陈晓怀, 卢荣胜, 等. 新型纳米三坐标测量机误差检定方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(3):250-256. XIA R X, CHEN X H, LU R SH, *et al.*. Research on error detection methods for a novel nano-CMM [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010, 24(3):250-256. (in Chinese)
- [3] 李伟, 高思田, 卢明臻, 等. 计量型原子力显微镜的位移测量系统[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4):796-802. LI W, GAO S T, LU M ZH, *et al.*. Position measuring system in metrological atomic force microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):796-802. (in Chinese)
- [4] HAITJEM A H. Achieving traceability and sub-nanometer uncertainty using interferometric techniques [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19:1-6.
- [5] 张钟华. 计量测试技术的新动态[J]. 中国计量学院学报, 2009, 20(1):1-7. ZHANG ZH H. A new trend in the technology of measurement and testing [J]. *Journal of China University of Metrology*, 2009, 20(1):1-7. (in Chinese)
- [6] 张金龙, 刘阳, 郭怡倩, 等. 纳米级超精密定位工作台的研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9):187-192. ZHANG J L, LIU Y, GUO Y Q, *et al.*. Research on ultra-precision nanopositioning stage [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(9):187-192. (in Chinese)
- [7] XU S, CHASSAGNE L, TOPCU S, *et al.*. Polarimetric interferometer for measuring the nonlinearity error of a heterodyne interferometric displacement system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(6):061201-1:5.
- [8] CHASSAGNE L, WAKIM M, XU S A, *et al.*. 2D nano-positioning system with a sub-nanometric repeatability over millimetre displacement range [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18:3267-3272.
- [9] 陈辉, 谭永红, 周杏鹏, 等. 压电陶瓷执行器的动态模型辨识与控制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1):88-95. CHEN H, TAN Y H, ZHOU X P, *et al.*. Identifi-

涉仪的非线性误差可控制在 2 nm 以内, 该误差为系统误差不会影响定位重复性精度^[17]。

4 结 论

本文提出了基于外差干涉仪和自制高频相移电路的光电相移压电陶瓷驱动方法, 并就该方法开展了毫米行程上的定位重复性精度实验及压电陶瓷的最小步距值实验。实验表明, 压电陶瓷的最小步距值可控制在 5 nm, 采用宏、微控制切换方法, 在 5 mm 行程上来回位移控制的定位重复性精度优于 1 nm。该方法的突出优点为进行位移测量与控制提取的均为相位信息, 位移的精度与压电陶瓷自身的非线性、迟滞和蠕变无关, 从测量原理上避免了压电陶瓷执行器的机械非线性误差。基于该方法的系统架构简单, 定位速度快, 对于当前纳米科技、半导体领域、微纳机械加工均有一定的实用价值。

- fication and control of dynamic modeling for piezoceramic actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1):88-95. (in Chinese)
- [10] 朱维彬,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.
ZHU W B, ZHU SH A, YE SH L, *et al.*. Research on ultra-precision positioning platform based on phase tracking[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(10):2301-2306. (in Chinese)
- [11] 赖志林,刘向东,耿洁,等. 压电陶瓷执行器迟滞的滑模逆补偿控制[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6):1281-1290.
LAI ZH L, LIU X D, GENG J, *et al.*. Sliding mode control of hysteresis of piezoceramic actuator based on inverse preisach compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6):1281-1290. (in Chinese)
- [12] 张利军,杨立新,郭立东,等. 压电陶瓷驱动平台自适应输出反馈控制[J]. *自动化学报* 2012, 38(9):1550-1556.
ZHANG L J, YANG L X, GUO L D, *et al.*. Adaptive output feedback control for piezo-actuator driven stage [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(9):1550-1556. (in Chinese)
- [13] 王岳宇,赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞和蠕变的逆控制算法[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6):1032-1040.
WANG Y Y, ZHAO X Z. Inverse control algorithm to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramic[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):1032-1040. (in Chinese)
- [14] 陈代谢,殷伯华,林云生,等. 大范围高速原子力显微镜的前馈反馈混合控制方法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4):836-843.
CHEN D X, YIN B H, LIN Y SH, *et al.*. Feed-forward and feed-back controller for large-range and high speed AFM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):836-843. (in Chinese)
- [15] EDLEN B. The refractive index of air [J]. *Metrologia*, 1966, 2: 71-80.
- [16] BOBROFF N. Critical alignment in plane mirror interferometry [J]. *Precision Engineering*, 1993, 15(1):33-38.
- [17] WU C, SU C. Non-linearity in measurements of length by optical interferometry [J]. *Measurement Science & Technology*, 1996, 7:62-68.

作者简介:



许素安(1975—),女,浙江富阳人,博士,副教授,2009年于法国 Universite de versailles 大学获得博士学位,主要研究方向为纳米计量,微纳米测量技术与仪器。E-mail: xusuan@cjlu.edu.cn



谢敏(1975—),女,湖北人,讲师,1998年于浙江大学获得学士学位,2011年于中国计量学院获得硕士学位,主要从事智能控制,检测技术研究。E-mail: xiemin@cjlu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)