

文章编号 1004-924X(2013)10-2587-07

微纳测量机测头弹性结构的参数设计

陈晓怀, 陈 贺*, 王 珊, 李瑞君, 高 伟

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:根据微纳米三坐标测量机对测头各项指标的要求,提出了 4 种测头弹性结构的设计方案。通过力学分析建立测头弹性结构三维刚度模型,应用有限元分析软件 ANSYS 分别对 4 种弹性结构的刚度进行仿真计算;然后,分析讨论了 4 种弹性结构的性能特点。综合考虑测量刚度、灵敏性及结构紧凑稳定等多种因素,选择十字型结构作为微纳米测量机测头的弹性结构,并对其进行了结构参数的优化和测头刚度各向同性设计。搭建了高精度三维微位移测试平台,对测头的测量范围、线性、位移误差进行了实验验证。仿真分析和实验结果表明,测头的弹性结构满足测量范围 $40\ \mu\text{m}\times 40\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$ 、测量刚度小于 $0.5\ \text{mN}/\mu\text{m}$ 及刚度各向同性的要求,整体测量误差小于 $100\ \text{nm}$ 。

关键词:坐标测量机;微纳米测量;接触扫描测头;弹性结构设计;有限元分析

中图分类号:TH72;TH112 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132110.2587

Design of elastic structure parameters of probe in micro-nano CMM

CHEN Xiao-huai, CHEN He*, WANG Shan, LI Rui-jun, GAO Wei

(School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: chenheh fut@163.com

Abstract: According to the isotropic requirements of micro-nano Coordinate Measuring Machines (CMMs) for a probe, four kinds of elastic structure design schemes for the probe were proposed. A three-dimensional stiffness model of elastic structure was established by mechanical analysis. The stiffnesses of four elastic structures were simulated by using finite element analysis software ANSYS, and the performance characteristics of the four structures were analyzed and discussed. In consideration of a variety of factors like measuring stiffnesses, sensitivity and stable compact structures, a cross shape structure was selected as the elastic structure of micro-nano CMM probe, and its structure parameters were optimized and stiffness isotropic was designed. A high precision three-dimensional micro displacement test platform was set, and the measuring range, linearity and displacement error of the probe were tested and verified by experiments. Simulation and experiment results show that the elastic structure of the probe meets the requirement of a measuring range of $40\ \mu\text{m}\times 40\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$, stiffness less than $0.5\ \text{mN}/\mu\text{m}$ and stiffness isotropic, and its overall measurement error is less than $100\ \text{nm}$.

收稿日期:2013-05-07;修订日期:2013-07-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51275148);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA042409)

Key words: Coordinate Measuring Machine(CMM); micro and nano measurement, contact scanning probe, elastic structure design, finite element analysis

1 引言

随着精密加工和精密测量技术的发展,在半导体的刻线加工、关键零部件的反求等工程领域中,对评定加工质量和获得高精度几何参数的要求越来越高。作为评定几何参量的主要测量装置,高精度的微纳测量机的研发成为精密测量领域关注的重点^[1-3]。

测头是测量机的重要部件,测头的性能对提高测量机的整体精度具有关键的作用^[4]。微纳测量机采用接触扫描式测头,相比于硬式和触发式测头更能减小测量误差,实现高精度测量^[5-7]。测头弹性结构的合理设计和结构参数的选择对测头的稳定性、灵敏度、测量精度、动态性能和测量刚度有重要的影响。本文采用光学测位移原理,设计了接触扫描式测头。通过合理设计和选择弹性结构参数,最大限度地提高了测头的测量精度。

2 测头结构与测量原理

测头系统主要由测针、弹性结构、 z 向线位移测量系统、角位移测量系统等组成,如图 1 所示。 z 向线位移测量系统采用迈克尔逊干涉仪测量 z 向的线位移;角位移测量系统通过四象限光电探测器检测测量光束入射到光敏面上光点的位置,进而测得横向的偏角^[8]。测量时测针的测球与被测件接触,测量力使弹性结构产生变形,测量反射镜产生 z 向线位移和横向角位移。测量光束经过

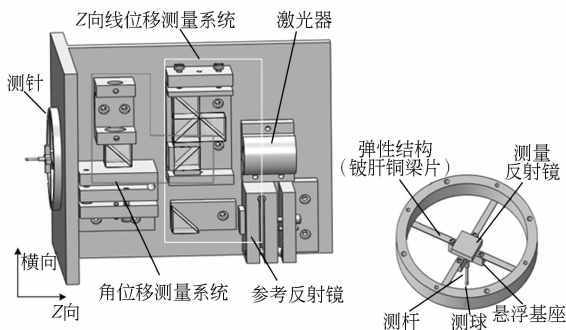


图 1 测头系统结构图

Fig. 1 Structure of probe system

测量反射镜反射后,通过分光棱镜分成两束分别进入 z 向线位移测量系统和角位移测量系统实现三维测量。

3 测头弹性结构设计

测头弹性结构利用材料的固有属性,要求具有合适的刚度,故选择铍青铜(弹性模量 $E=128 \times 10^9$ Pa)为结构材料。铍青铜梁片和悬浮基座的尺寸需根据测头的测量范围、刚度和灵敏度、测量力大小、测杆的有效测量长度等因素合理选择。

为了保证测量的稳定性,应使测头各向的刚度相同,即同一测量力使测球各向产生的位移相同^[9]。为了减小温度对结构变形和测量的影响,测头整体采用对称分布且具有单一热学中心的结构设计^[10]。根据测头性能及精度要求,提出了 4 种弹性结构方案,如图 2 所示,4 种结构都能保证测针结构的装配体也是对称的。通过力学分析和有限元仿真进行结构和参数的优化设计。

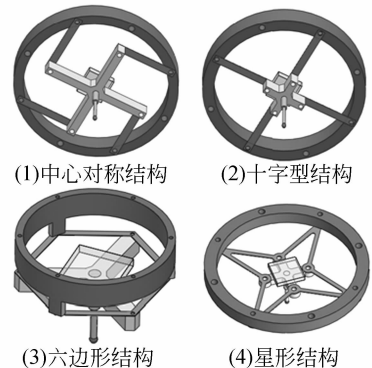


图 2 测针结构图

Fig. 2 Schemes of probe structure

4 力学分析

测量力引起测球的位移有横向角位移和 z 向线位移。根据测力和各向同性要求,通过力学分析,分别讨论横向和 z 向测量力产生位移情况,为基座和铍青铜梁片结构参数设计提供理论依据。

4.1 z 向测量力分析

由于每段铍青铜梁片在 z 向的受力相同,这

里取其一段进行分析,每段受力 $F_0 = F_z/N_i$, N_i 为铍青铜梁片的段数 ($N_1 = N_2 = 4, N_3 = 6, N_4 = 8$), 每段的受力如图 3 所示。

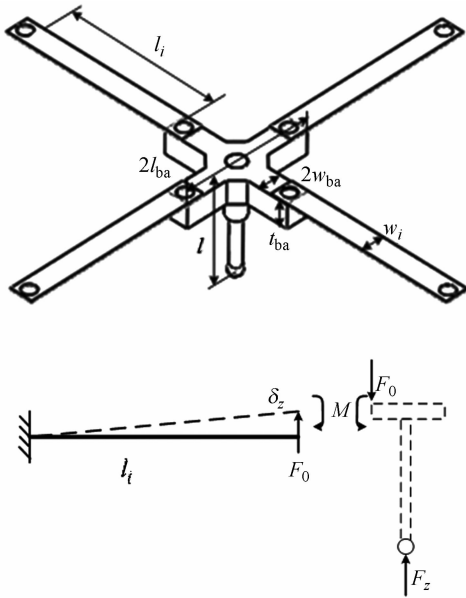


图 3 结构参数与 z 向测量力示意图

Fig. 3 Structure parameters and measuring force along z axis

以十字型结构为例,设 z 向的测量力大小为 F_z ,在力学分析中,除铍青铜梁片外其余结构皆视为刚体,由弹性力学知识得方程组:

$$\begin{cases} \frac{1}{2}M\theta + \frac{1}{2}F_0\omega_B = \frac{F_0^2 l_i^3}{6EI_z} \\ \frac{l_i^3}{3EI_z}F_0 - \frac{Ml_i^2}{2EI_z} = \delta_z \end{cases}, \quad (1)$$

其中: ω_B 为梁片末端的挠度, δ_z 为测头在测量力作用下在 z 向产生的位移, $\omega_B = \delta_z$; θ 为簧片的转角, M 为在每段铍青铜梁片上产生的弯矩, I_z 为弹性铍青铜梁片的惯性矩;铍青铜梁片的长为 l_i , 宽为 w_i , 厚为 t_i 。由方程组(1)解得:

$$\delta_z = \frac{F_0 l_i^3}{12EI_z}, \quad (2)$$

$$I_z = \frac{w_i t_i^3}{12}. \quad (3)$$

由式(2)与(3)可得到测头在 z 向的测量刚度 K_z , K_z 表示产生单位位移所需力的大小:

$$K_z = \frac{F_z}{\delta_z} = \frac{4Ew_i t_i^3}{l_i^3}. \quad (4)$$

由式(4)可知,当梁片和悬浮基座的参数取定

时,此弹性机构在应力极限范围内位移与力的大小成线性关系。

4.2 横向测量力分析

同样以十字型结构为例,在测球受横向测量

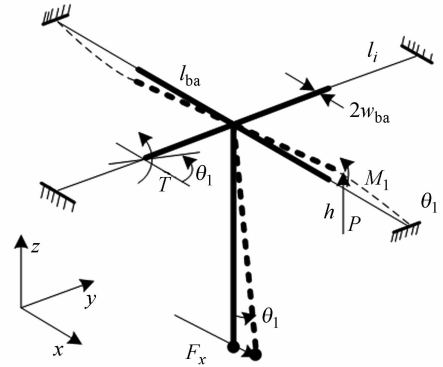


图 4 结构横向受力示意图

Fig. 4 lateral force of probe

力时,结构的变形如图 4 所示。取悬浮基座、测杆测球的装配体为分析对象,装配体被视为刚体。由平衡条件得平衡方程:

$$F_x l = 2M_1 + 2Pl_{ba} + 2T, \quad (5)$$

边界条件为:

$$\theta_1 = \frac{\delta_x}{l} = \frac{Tl_i}{GJ} = \frac{Tl_i}{GKw_i l_i^3}, \quad (6)$$

其中:基座半长为 l_{ba} ;测杆长为 l ; M_1 为铍青铜梁片变形产生的弯矩, P 为铍青铜梁片末端与悬浮基座之间的作用力, T 为铍青铜梁片扭转产生的扭矩; θ_1 是整个弹性结构的偏转角, δ_x 为测球在测量力 F_x 的作用下在横向产生的位移量, J 为截面的极惯性矩, G 为铍青铜梁片的切变模量, GJ 为非圆截面的抗扭刚度, K 为常数,可以通过查表得到, K 取 0.33, 弹性模量 E 、泊松比 μ 与 G 的关系为 $G = E/[2(1+\mu)]$, μ 取 0.3。

梁片的变形方程由待定系数法可得:

$$\omega(x) = \frac{1}{6EI_z}C_1 x^3 + \frac{C_2 x^3}{2EI_z} + C_3 x + C_4 \quad (0 \leq x \leq l_i). \quad (7)$$

边界条件为 $w'''(x) = P, w''(x) = -M_1, w'(0) = \theta, w(0) = h, w'(l_i) = 0, w(l_i) = 0$ 。

解方程(5)~(7)可得测量刚度 $K_x = F_x/\delta_x$

$$K_x = \frac{1}{l^2 l_i^3} (24EI_z l_{ba}^2 + 12EI_z l_i l_{ba} + 2GKw_i t_i^3 l_i^2 + 12EI_z l_i l_{ba} + 8EI_z l_i^2). \quad (8)$$

为了满足测头测量刚度的各向同性要求,令

$K_x = K_z$, 选定结构参数可以得到结构的测量刚度。通过设定阈值使测量力保持恒定, 即测量力 $F_x = K_x \delta_x$ (或 $F_z = K_z \delta_z$), 当 $K_x = K_z$ 时, 设定 $\delta_x = \delta_z$ 。位移与测量力成线性关系, 通过力与位移的关系可以选择结构的尺寸, 使比例系数 $K_x = K_z$, 以保证测头在空间各向位移的线性度一致。

用上述分析方法, 同样可以得到中心对称、六

边形、星型结构的尺寸参数。由表 1 中数据可知, 4 种结构的测量刚度都符合要求。中心对称结构的测量刚度最大, 六边形结构的测量灵敏性最好, 但六边形结构的测杆尺寸较长, 测量力引起测杆的变形比较大, 会对测量精度造成影响。综合考虑测量刚度、灵敏性及结构紧凑稳定等多种因素, 最终选择十字型结构作为测头的弹性结构。

表 1 结构参数与测量刚度比较表

Tab.1 Measuring stiffnesses of four structures and parameters

结构	l_i/mm	w_i/mm	t_i/mm	l_{ba}/mm	w_{ba}/mm	t_{ba}/mm	测量刚度/ $(\text{mN} \cdot \mu\text{m}^{-1})$
中心对称结构	13	2	0.1	13	1	2	0.474
十字型结构	15	2	0.1	5	1	2	0.309
六边形结构	16	1	0.1	16	1	1.5	0.176
星形结构	13	1	0.1	5.5	1	1.5	0.473

5 结构的有限元分析

对于选定的十字型测头, 满量程测量时测量力的大小为 6.18 mN。为验证结构参数的选择是否满足各向同性; 测量力为 6.18 mN 时, 测球的位移能否达到 $20 \mu\text{m}$ 。用有限元分析软件 ANSYS 对结构进行了分析, 并取测球上的路径曲线, 得到测球的位移量值。分析结果为测量力为 6.18 mN, 测球的位移为 $20.02 \mu\text{m}$ 。测球在 1 mN 作用力下的 z 向变形和横向变形位移分布等值线如图 5 所示。

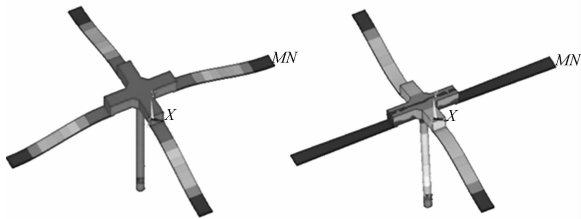


图 5 十字型 z 向和横向有限元分析变形图

Fig.5 FEA analysis deformation results of cross structure

为了验证测头在 xy 平面内的各向同性, 在平面不同方向施加大小相同的力, 观察测球的位移。如图 6 所示, 在 xy 平面内每间隔 15° 对测球施加 1 mN 的力, 通过测球上的路径曲线得到测球的位移变形量。图 6 中, 辐射状的直线为角度等分线, 圆形的曲线为位移标示线。位移曲线离

圆心越远说明测球在测量力的作用下位移越大, 位移曲线的圆度越趋向于标准圆表明测头在横向的各向同性越好。图 6 表明测头在横向的各向同性比较好, 最大偏差不超过 10 nm/mN 。

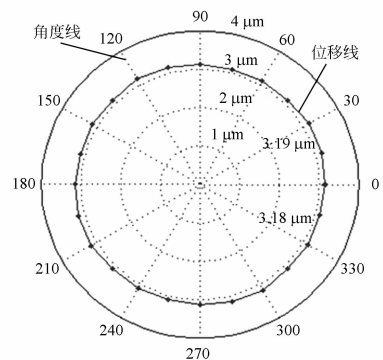


图 6 横向测量刚度仿真位移图

Fig.6 Lateral displacement of measuring stiffness simulation

图 7 比较了横向的各向同性和 z 向的各向同性在, 曲线表示在受大小相同的力时分别在横向和 z 向的位移变形量, 从图中可以看出横向的位移线和 z 向的位移线几乎重合, 说明横向和 z 向的各向同性符合要求。测量范围越小测头的各向同性越接近, 各向异性偏差越小, 测量的精度越高。当测球受 1 mN 的 z 向力时, 模拟分析显示 z 向位移为 $3.19 \mu\text{m}$; 当测球受 1 mN 的横向力时, 模拟分析表明横向位移为 $3.13 \mu\text{m}$, 测头的各向异性偏差为 60 nm/mN 。

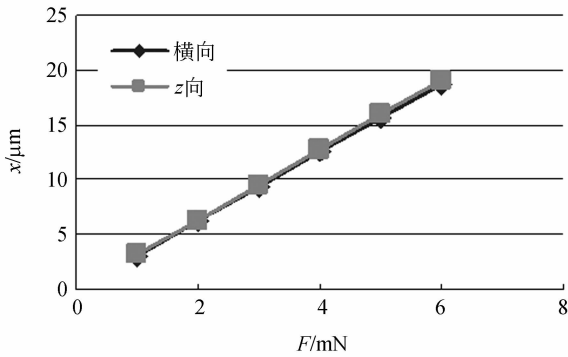


图 7 横向和 z 向测量刚度比较图

Fig. 7 Comparison of measuring stiffnesses in two directions

6 实验测试

对十字型测头的线性、量程及精度进行测试,测头性能测试平台如图 8 所示。用 PI 公司的高精度工作台驱动测头产生位移,测头的横向位移由测头的输出电压表示,测头的 z 向位移由迈克尔逊干涉仪显示。工作台驱动测头每 2 μm 产生一个步距,记录测头每次的电压值和 z 向位移量,定位台驱动测头在横向的移动范围为 ±20 μm,在 z 向的移动范围为 20 μm。通过观察图 9 测头的线性关系可以看出,测头的量程满足 40 μm × 40 μm × 20 μm。

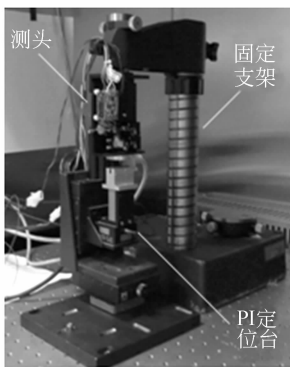


图 8 测试平台图

Fig. 8 Test platform

对数据进行最小二乘拟合得出线性关系,横向的线性关系为 $y = 0.2695x - 0.0714$, z 向的线性关系为 $y = 1.0332x - 0.0045$ 。将拟合模型

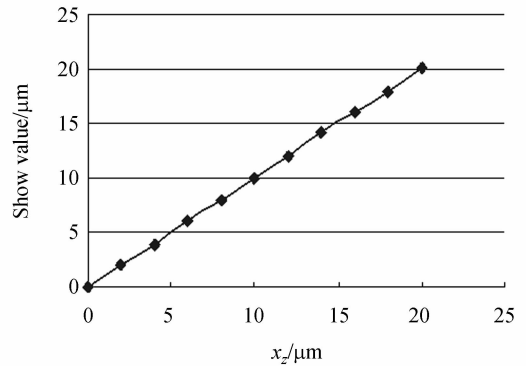
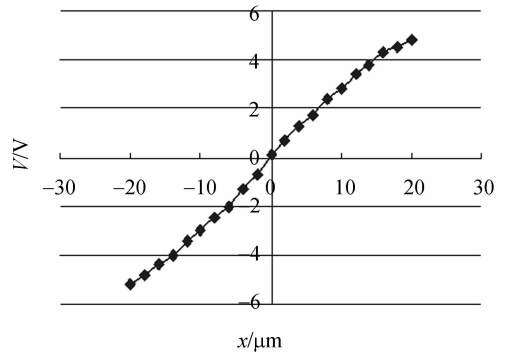


图 9 测头的线性与量程测试图

Fig. 9 Test results of linear and measuring range

的估计值与实际测得数据进行比较,并转换为测头位移测量误差:横向的测量误差为 30 ~ 100 nm; z 向的测量误差为 0 ~ 50 nm。当测头的重复性较好时,可以对测头进行误差分离与修正,能进一步提高测头的测量精度。

7 结论

针对微纳米测量机 4 种不同的弹性结构设计方案,通过力学分析建立刚度数学建模,应用有限元分析软件 ANSYS 进行结构刚度仿真,分析讨论了 4 种结构的优缺点,对测头的弹性结构方案进行了合理选择,并进行了结构参数的优化和测量刚度的各向同性设计。通过实验,验证了测头线性、量程、位移精度。仿真分析和实验结果表明,测头弹性结构符合 40 μm × 40 μm × 20 μm 的测量范围、测量刚度小于 0.5 mN/μm 的条件,满足各向同性设计要求,最大测量误差小于 100 nm。下一步将要进行重复性实验,有望通过误差修正进一步提高测头的测量精度。

参考文献:

- [1] BOS E J C. Aspects of tactile probing on the micro scale[J]. *Precision Engineering*, 2011, 35: 228-240.
- [2] 蔡轶珩, 向大超, 石照耀, 等. 球内反射式光纤测头[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2740-2746.
CAI Y H, XIANG D CH, SHI ZH Y, *et al.*. Inner-sphere reflecting fiber trigger probe[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(12): 2470-2746. (in Chinese)
- [3] HERRMANN M, GIESCHKE P, RUTHER P, *et al.*. CMOS-integrated three-axis force sensor for coordinate measurement applications [C]. *IEEE*, 2010: 2648-2652.
- [4] SPAAN H, WIDDERSHOVEN I, DONKER R. “Isara 400”超精密坐标测量机的设计与标定[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2236-2241.
SPAAN H, WIDDERSHOVEN I, DONKER R. Design and calibration of “Isara 400” ultra-precision CMM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2236-2241.
- [5] 费致根, 刘宇, 郭俊杰. 一种平行片簧结构扫描测头的研制[J]. 郑州大学学报, 2011, 32(4): 116-119.
FEI ZH G, LIU Y, GUO J J. Research on a type of parallel spring mechanism scanning probe [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2011, 32(4): 116-119. (in Chinese)
- [6] 刘芳芳, 费业泰, 夏豪杰. 纳米坐标测量机的三维接触式测头机构[J]. 纳米技术与精密工程, 2011, 9(3): 249-252.
LIU F F, FEI Y T, XIA H J. Research on the 3D Touch Probe Mechanism of Nano-CMM [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011, 9(3): 249-252. (in Chinese)
- [7] 程方, 费业泰. 纳米三坐标测量机接触式测头触发控制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2603-2609.
CHENG F, FEI Y T. Trigger control of touch probe for nano-CMM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2603-2609. (in Chinese)
- [8] 张欣婷. 高精度光电自准直仪的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
ZHANG X T. *Research on High Precision Photoelectric Autocollimator* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [9] WECKENMANN A, PEGGS G, HOFFMANN J. Probing systems for dimensional micro- and nanometrology [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, 17: 504-509.
- [10] 陈贺, 陈晓怀. 微纳米测量机工作台的结构及性能分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012, 11(11): 32-34.
CHEN H, CHEN X H. The structure and performance analysis of macro-nano CMM stage [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2012, 11(11): 32-34. (in Chinese)

作者简介:



陈贺(1987—),男,安徽砀山人,硕士研究生,2010年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事精密仪器及机械方面的研究。E-mail: chenhfut@163.com



王珊(1989—),女,贵州贵阳人,硕士研究生,2011年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事精度理论与应用方面的研究。E-mail: vicsong@126.com



李瑞君(1976—),男,内蒙古和林格尔人,博士,讲师,2001年、2005年、2013年于合肥工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事微纳测量技术方面的研究。Liruijun001@126.com



高 伟(1985—),男,安徽萧县人,硕士研究生,2010年于安徽理工大学获得学士学位,主要从事现代精度理论与应用方面的研究。E-mail: gaoweihgd@163.com

导师简介:



陈晓怀(1954—),女,安徽怀宁人,博士,教授、博士生导师。主要从事精密仪器精度设计、误差分析与不确定度理论及应用方面的研究。E-mail: chxh@hfut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)