

文章编号 1004-924X(2013)03-0664-08

零阿贝误差的纳米三坐标测量机工作台及误差分析

黄强先, 余夫领*, 宫二敏, 王晨晨, 费业泰

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为避免常规三坐标测量机(CMM)中的阿贝误差,同时降低导轨运动误差对测量机测量不确定度的影响,研制了一种在三维测量方向上同时符合阿贝原则的纳米 CMM 工作台。该工作台做三维运动, x 导轨和 y 导轨采用共平面结构;工作台三维测量系统的测量线正交于一点且正交点与测头中心点重合, x 向和 y 向测量系统的测量线与 xy 导轨面共面。针对本工作台的特点,在参考常规三坐标测量机误差分析的基础上,详细分析了该工作台中各项误差的影响,给出了影响测量机不确定度的主要误差源,并对这些误差提出了修正方法。在研制的工作台上对一等量块进行了实验测试。结果显示,一等量块工作面的平面度测量标准差为 11 nm,台阶高度标准差为 21 nm,其中台阶高度测量平均值与检定值相差 1 nm。理论分析和实验结果表明,所研制的工作台从结构上避免了 CMM 中多项误差源的影响,尤其是避免了阿贝误差的影响,可用于高精度的三维测量。

关键词: 三维纳米工作台; 纳米三坐标测量机; 阿贝误差; 误差修正

中图分类号: TH72; TH711 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132103.0664

Nano-CMM stage with zero Abbe error and its error analysis

HUANG Qiang-xian, YU Fu-ling*, GONG Er-min, WANG Chen-chen, FEI Ye-tai

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

* *Corresponding author, E-mail: yufl11@163.com*

Abstract: A new type nanometer Coordinate Measuring Machine(CMM) stage which meets the Abbe principle in three-dimensional directions is proposed to avoid the Abbe error in conventional CMMs and reduce the guide motion error that influences on the nano-CMM measurement uncertainty. The stage can move in three dimensional directions and its x guide and y guide are in a coplanar structure. The three measuring lines of the stage are orthogonal and intersect at one point which coincides with the center of a probe. Moreover, the measuring lines of x measurement system and y measurement system are coplanar with the plane of the xy stage. According to the characteristics of this stage, the impacts of various errors on the stage are analyzed, the main source errors to the measurement uncertainty are given and new correction methods for those errors are proposed. Finally, two pieces of first gauge block are measured on the developed stage. Measurement results show that the standard deviation of flatness error of first gauge block working surface is 11 nm, and that of step height is about 21

收稿日期:2012-12-04; 修订日期:2013-01-30.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划重点项目(No. 2008AA042409)

nm and the difference between the average of step heights and the calibrated value is about 1 nm. The theoretical analysis and experiment show that the nano-CMM avoids the impact of various error sources, especially the impact of Abbe error, and can be used in high-precision three-dimensional measurement.

Key words: three-dimensional nano-stage; nano Coordinate Measuring Machine(nano-CMM); Abbe error; error correction

1 引言

随着现代制造业的发展,对各种超精密加工零件、超精密光学元件、微机电系统(MEMS)、半导体器件等三维轮廓的高精度测量、计量等方面的需求越来越迫切。当工件尺寸公差要求在亚微米级以内,因设计、装配、环境等方面存在着各种误差,尤其是存在有较大阿贝误差的传统三坐标测量机(CMM)便不再能满足测量要求,因此研制小型的纳米三坐标测量机^[1]已成为现代测试技术的热点,近年来世界各国均投入巨资进行研究。日本东京大学 Takamatsu 教授研究的 Nano-CMM^[2],机台结构采用对称移动桥式的传统 CMM 缩小设计,以双 V 型凹槽中放置精密圆棒的方式设计 x 、 y 向导轨,以摩擦轮结构实现位移驱动;德国 Ilmenau 技术大学 Jäger 教授所研制、后由 SIOS 公司商品化的三维纳米定位平台^[3],其 x 、 y 轴采用线性马达驱动,丝杠副传动的两个单轴运动台堆栈组合实现二维运动,加装了用于运动误差补偿的 PTZ 微动平台;瑞士 METAS 研制的 Ultra precision CMM^[4],采用计量系统与三维运动工作台分离的结构设计,其 x 、 z 向运动靠组合式 V 型导轨的左右平移实现,通过导轨下装空气轴承以隔离振动影响。此外还有英国 NPL 的 Small CMM、荷兰 IBS 的 Isara400-uCMM^[5] 等。

阿贝原则是仪器设计和长度测量中应遵循的基本原则。常规的三坐标测量机是一种三维测量装置,在结构上不满足阿贝原则,阿贝误差是其主要误差源,且很难通过提高加工精度和装配要求进一步减小,限制了测量精度的提高,因此不能满足上述零部件或器件测量不确定度要求。针对上述需求和传统 CMM 的结构缺陷,本文研制了一

种纳米 CMM 工作台,其在三维测量方向上同时符合阿贝原则,从而大大减少了误差并降低了加工精度要求。在常规 CMM 误差分析的基础上,文中对纳米 CMM 工作台存在的其他误差进行了分析,列出影响测量不确定度的误差源,并提出了相应的修正方法。

2 CMM 工作台系统设计及特点

纳米 CMM 整体结构布局如图 1 所示,主要包括花岗岩材料的基座与悬臂梁, xyz 三轴的激光干涉仪、激光反射镜和压电陶瓷驱动电机,三维运动工作台,力平衡系统,测头系统等。其测量范围为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,激光干涉仪测长分辨率为 1 nm ,驱动电机分辨率可达 0.3 nm ,测量系统设计总不确定度 $\leq 100\text{ nm}$ 。CMM 主框架由花岗岩基座、三维运动工作台和安装固定测头的悬臂梁组成。测量时,被测工件被摆放在 CMM 中间的三维运动工作台上,由各轴电机驱动工作台移动,并由各轴激光干涉仪通过工作台上装有的激光反射镜,反射测量信号来感测位移

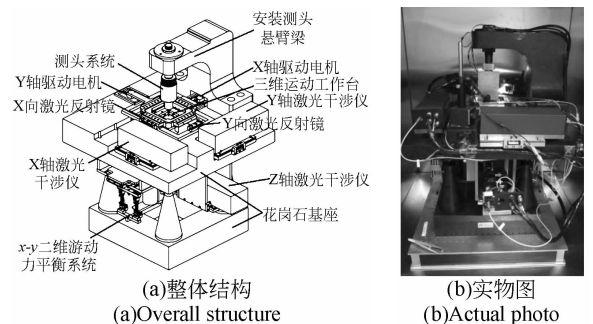


图 1 纳米 CMM 整体结构图

Fig. 1 Framework of nano-CMM

变化,当被测工件触碰到固定在悬臂梁下的测头时,由测头系统反馈电压信号^[6],当反馈的电压值

达到设定目标电压值时,软件系统将同时记录此时激光干涉仪显示值和测头坐标值,通过软件中的算法处理,显示出被测点三维空间坐标值,从而实现采点测量。

在长度计量的仪器设计中,阿贝原则是一个最基本的原则,影响着仪器测量精确度。在传统 CMM 中,影响测量不确定度的主要原因就是在三维测量方向上难以同时符合阿贝原则,严重限制了 CMM 测量精度的提高。为了解决这一难题,避免阿贝误差对 CMM 三维测量方向的影响,研制了上述纳米 CMM,其工作台结构设计遵循“331”原则即三轴标尺线相互垂直并交于一点,由 x 、 y 标尺线构成的测量面与 x 、 y 轴导轨导向面相互重合,且测头中心点与各轴标尺线交点重合,简称为三线共点、三面共面,点面重合^[7]。

(1) 三线共点布置

三轴激光干涉仪与热膨胀系数较低的钢材材料加工成的调整机构,构成了纳米 CMM 的测量系统,如图 2 所示。通过在工作台中间架设一个三面相互垂直的标准四方棱镜,调整三轴激光标尺线相互垂直并交于一点,使 CMM 在空间上的阿贝臂为 0。

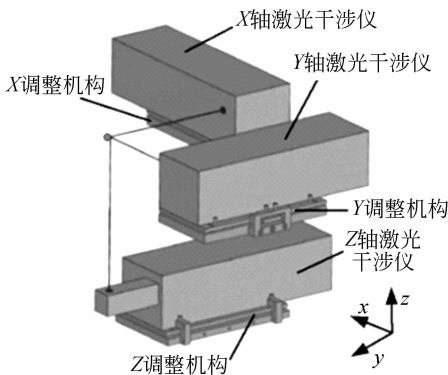


图 2 三线共点布置

Fig. 2 Arrangement of three scale lines with converged point

(2) 三面共面平台设计

为了使 x 、 y 导轨处于相同的高度,将运动工作台设计成相互嵌套的形式,如图 3 所示,运动台基座固定在花岗石基座上, x 工作台由电机驱动,沿运动台基座运动, y 工作台嵌套在 x 轴运动基座外侧, z 工作台嵌套在 y 工作台内,可自由升降。由机械加工保证 x 、 y 轴激光光束高度与 x 、 y 轴导轨高度相同,也就做到了“三面共面”: x 、 y 导

轨导向面与 x 、 y 激光标尺线构成的测量平面相重合。

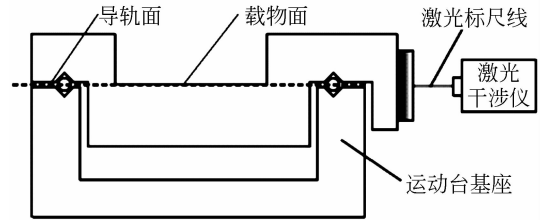


图 3 共平面设计

Fig. 3 Design of common plane

(3) 点面重合设置

在激光干涉仪和三维运动工作台安装调试完成后,通过测头系统调整测头高度,使测头中心与 x 、 y 激光标尺线构成的测量面重合,并处于其交点上。

(4) 力平衡系统

CMM 力平衡系统主要包括 x - y 二维游动力平衡系统(图 1a)和 z 轴一维重锤力平衡系统(图 4)。 x - y 二维游动力平衡系统是为了消除固定在 y 轴下的保持架(图 4)和 z 轴零部件的重力对 x 、 y 导轨变形的影响,并保证工作台处在 x 、 y 轴的任意位置时,力平衡机构所提供平衡力的大小和方向都能保持不变。 z 轴一维重锤力平衡系统是为了平衡垂直方向的 z 轴工作台重量而装配的 2 个平衡重锤,以避免 z 台重量大于电机推力而导致电机无法驱动工作台的现象。

3 CMM 工作台误差分析

在天津大学张国雄教授提出的常规 CMM 误差分析的基础上^[8],基于“331”原则设计,结合工作台运动而测头固定以及独立测量等特点,刚性几何误差、激光标尺线垂直度误差、热变形误差、力变形误差成为了纳米三坐标测量机工作台的主要误差源。

3.1 21 项刚性几何误差

对于 CMM 21 项刚性几何误差分析,需假设反射镜相互垂直且无自身形貌误差,激光标尺线相互垂直,单独考虑导轨运动误差的影响,如图 4 所示。

CMM 产生定位误差(1、7 和 13)的主要原因是激光干涉仪存在示值误差。示值误差包括激光

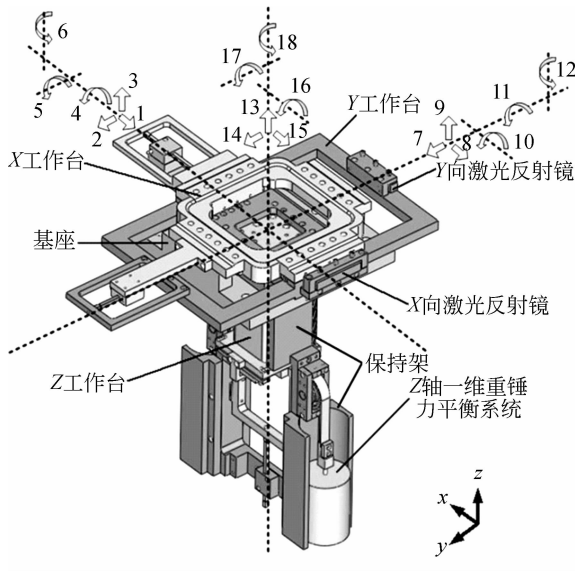


图4 纳米 CMM 工作台结构

Fig.4 Structure of nano-CMM stage

干涉仪自身系统误差和阿贝误差。激光干涉仪自身系统误差在此不予讨论。基于“331”原则设计的工作台实际装调后,存在着三线不共点或共点但与测头不重合等现象,即测量线与激光标尺线不在同一直线上,导致产生残余阿贝误差。由于CMM测头固定和工作台的结构特点,残余阿贝误差可综合在各轴激光干涉仪反射镜形貌误差中,用特制0级平晶作测量基准(平面度公差为30 nm),通过间接法测出激光干涉仪反射镜直线度或平面度误差,并在软件中给予修正。

对于导轨系统不完善性引起的各轴直线度运动误差和角运动误差,由于x、y轴结构一致,可以x轴为例分析,由于z轴机构是独立的,且上下运动对x、y轴激光干涉仪无附加输出,所以可独立分析。

将y、z两轴看作一刚性整体,当x轴单独运动时,工作台会在y、z两个方向上引起直线度运动误差(2和3),产生微位移。同时绕x、y、z三轴会分别产生滚转角运动误差4、俯仰角运动误差5和偏摆角运动误差6,这些角运动误差会在其他轴上引起微位移。这些微位移都会被激光干

涉仪实时读取。由于三线共点的结构布局,x轴运动引起的直线度运动误差和角运动误差,可由自身测量系统感知和修正,所以对测量结果不会产生影响。同理y轴上的直线度运动误差和角运动误差对测量结果也不会产生影响。

对于z轴运动误差分析,x、y轴运动误差分析方法已不再适用。将z轴运动分解为平移和旋转两个运动过程,如图5示。先假设初始坐标系 O_0 随工作台z向平移到 O_1 坐标系,然后 O_1 坐标系绕其原点旋转到 O_2 坐标系。

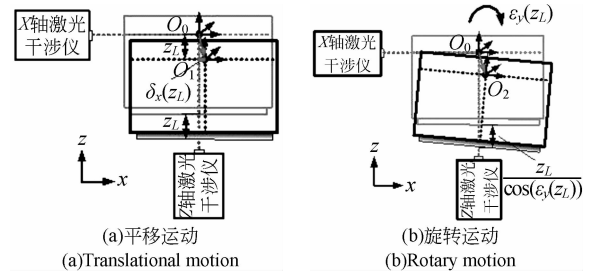


图5 z轴运动误差分解图

Fig.5 Exploded view of Z axis motion error

设工作台z向平移 z_L 距离到达 O_1 点(图5a),在这个过程中z台受到与z位移有关的x、y向直线度运动误差 $15\delta_x(z_L)$ 、 $14\delta_y(z_L)$ 的影响,用坐标变换 T_1 表达这个坐标变换的过程:

$$T_1 = \text{Trans}(\delta_x(z_L), \delta_y(z_L), z_L). \quad (1)$$

z台因导轨运动引起绕x轴的角运动误差 $16\epsilon_x(z_L)$ 、绕y轴的角运动误差 $17\epsilon_y(z_L)$ 、绕z轴的角运动误差 $18\epsilon_z(z_L)$,使得坐标系 O_1 旋转到坐标系 O_2 ,其坐标系变换用 T_2 表示:

$$T_2 = \text{Rot}(x, \epsilon_x(z_L))\text{Rot}(y, \epsilon_y(z_L))\text{Rot}(z, \epsilon_z(z_L)). \quad (2)$$

结合式(1)和(2),经平移和旋转后左边变换 T 为:

$$T = T_1 T_2 = \text{Trans}(\delta_x(z_L), \delta_y(z_L), z_L) \text{Rot}(x, \epsilon_x(z_L))\text{Rot}(y, \epsilon_y(z_L))\text{Rot}(z, \epsilon_z(z_L)). \quad (3)$$

将式(3)求逆展开,约去微小项,便可得到点 O_0 在坐标系 O_2 下的坐标 (O_{x2}, O_{y2}, O_{z2}) :

$$\begin{pmatrix} O_{x2} \\ O_{y2} \\ O_{z2} \\ 1 \end{pmatrix} = (T_1 T_2)^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_x(z_L) \\ 0 & 1 & 0 & \delta_y(z_L) \\ 0 & 0 & 1 & z_L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\epsilon_z(z_L) & \epsilon_y(z_L) & 0 \\ \epsilon_z(z_L) & 1 & -\epsilon_x(z_L) & 0 \\ -\epsilon_y(z_L) & \epsilon_x(z_L) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\delta_x(z_L) + z_L \cdot \epsilon_y(z_L) \\ -\delta_y(z_L) - z_L \cdot \epsilon_x(z_L) \\ -z_L \end{pmatrix}. \quad (4)$$

而三轴激光干涉仪输出值为 $X=0, Y=0, Z=z_L/\cos(\epsilon_x(z_L) + \epsilon_y(z_L))$, 如图(5b)所示。角运动对 z 向激光干涉仪输出的影响仅为余弦误差, 由于角运动较小(约为 $10''$), 可忽略不计, 因此 z 轴单独运动时, 各轴激光干涉仪输出值应为:

$$X = 0, Y = 0, Z = z_L. \quad (5)$$

由式(4)和(5)对比可知, 当 z 轴单独运动时, z 轴的直线度运动误差和角运动误差对 CMM 的 x 、 y 轴测量值会造成一定影响, 而对 z 轴的测量影响仅为可忽略不计的二次误差。

对于三轴导轨垂直度误差分析, 以 x - z 轴为例, 导轨垂直度误差是与机构加工和装调有关, 加工装配之后, 就固定不变, 所以可将 x - z 方向的导轨看作一刚性整体(图 6)。当 z 轴向上移 z_L 时, 由于 x - z 导轨存在的垂直度误差, 会造成 x 轴激光干涉仪有微小位移 Δx 的变化, 被 x 轴激光干涉仪读取。由于工作台三线共点的结构, 所以 x - z 轴导轨存在的垂直度误差, 也可由自身测量系统感知和修正, 对测量结果不会产生影响。因此, x - y 、 y - z 轴导轨存在的垂直度误差对测量结果也不会产生影响。

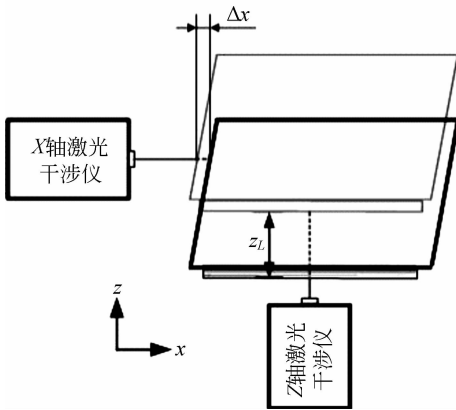


图 6 x - z 轴导轨垂直度误差

Fig. 6 Squareness error of X-Z axis guides

3.2 激光标尺线垂直度误差

由于加工和装调不够理想, 基于“331 原则”设计的工作台存在着三线不共点、三面不共面、标尺线不垂直等残余误差。其中三线不共点已分析过, 在激光标尺线共点且与测头重合的情况下, 两导轨面与测量面不共面, 不会对 CMM 测量产生影响。传统 CMM 标尺线一般都是附在各轴导轨上, 可归类到导轨垂直度误差中分析, 而纳米 CMM 各轴激

光标尺线是与导轨分离且各自独立的, 所以还需对激光标尺线垂直度误差进行分析。

三轴激光标尺线在设计时要求相互垂直, 以便建立机器坐标系基准, 实际组装后各轴激光标尺线相互之间不是绝对垂直的。如图 7 所示, 假设 x 轴激光标尺线偏离垂直线夹角为 θ , 当工作台沿 x 轴从位置 A 运动到 B 时, 工作台实际移动距离为 x_0 , 而激光干涉仪会输出距离为 L , 偏差值 $\Delta x = L - x_0 = L(1 - \cos \theta)$, 为余弦误差。经调整后的激光标尺线垂直度误差基本控制在 $2'$ 以内, 即使在全行程测量范围(50 mm)内产生的余弦误差也只有 8.5 nm。所以由激光标尺线不垂直引起的误差在短行程测量过程中可忽略不计。

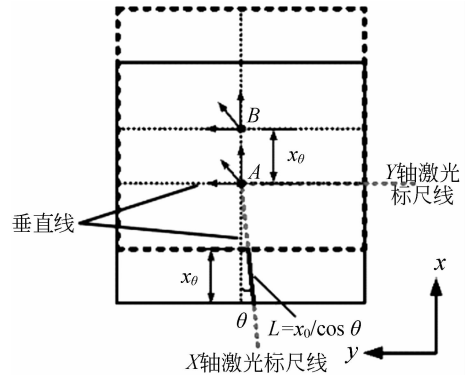


图 7 激光标尺线垂直度误差

Fig. 7 Squareness error of laser scale lines

3.3 热变形误差

当实际空间温度不是 20°C 时, CMM 机体尺寸、被测件尺寸等都会发生变化, 从而导致热变形误差。由于 CMM 放置在控温精度达 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 恒温箱中的恒温箱内, 恒温箱控温精度可达 $(20 \pm 0.05)^\circ\text{C}$, 处于两级控温环境, 温度场均匀, 且工作台是由线膨胀系数较低的殷钢材料制成, 结构较对称, 所以 CMM 工作台只有简单的热变形, 且主要是被测工件热变形误差。可利用热变形误差修正公式, 通过软件在测量结果中直接补偿。

3.4 力变形误差

使用刚度较高的殷钢材料加工而成的工作台, 加上良好的力平衡系统, 使力变形不再是影响 CMM 测量精度的重要因素。但是对于纳米级测量精度要求, 还需对工作台力变形误差进行简单分析。工作台的力变形误差主要是各轴导轨因受力

变形产生的误差。 z 轴在力平衡系统下,其导轨受力大小不会因 z 台的上下运动而发生变化,因此 z 轴导轨不受力变形影响。

x 轴工作台是由安装在 x 轴基座上的2对交叉滚柱导轨提供运动导向。对 x 轴工作台来说,其重量不变,重心位置恒定,当 x 轴工作台在 x 轴基座上运动时, x 轴基座上导轨的受力区域和大小会随 x 轴工作台的运动而发生位置变化,导致 x 轴导轨产生与位移有关的力变形误差,同样 y 轴也存在相同的力变形误差。这种力变形误差与导轨因加工和装配不理想而产生的自身运动误差影响效果相同。所以可将 x 、 y 轴导轨力变形误差影响综合到 x 、 y 导轨的运动误差中考虑,故 x 、 y 轴导轨的力变形误差对测量结果也不会产生影响。

4 一等量块测量结果及分析

纳米CMM除存在工作台误差之外,还存在有测头误差、激光反射镜形貌误差、激光反射镜垂直度误差等。为了验证工作台误差理论性分析的可行性,除测头误差外,对剩余的其他误差进行了修正。由于纳米CMM接触式测头存在偏心误差、测球等效作用半径误差、球度误差等误差项未修正^[9],尤其测头的球度误差至今在国际上还没有得到合理的解决^[10],难以在 x - y 方向上满足测量精度要求,而这些误差对 z 向测量不会产生影响,所以对一等量块的测量,主要是在纳米CMM的 z 方向上完成。为了避免量块与平晶间的研合间隙对测量值的影响,将2和5 mm的一等量块(检定值分别为2.000 022和5.000 024 mm,由中国计量

科学研究院检定)并列研合在0级平晶工作面上,组成 $H=3$ mm的台阶高度如图8所示。因此一等量块测量主要包括量块工作面平面度测量和台阶高度测量。

4.1 平面度测量

测量2 mm的一等量块工作面平面度,其采点布局如图8中2 mm量块表面所示,测量区域为4 mm×12 mm,共测量6组数据,表1是量块平面度测量的其中一组数据,图9是6组量块平面度测量结果,平面度平均值为80.5 nm,标准差达到11 nm。

表1 量块平面度测量数据

Tab.1 Measuring data of block flatness

测量区域	测点坐标			平面度 /nm
	x /mm	y /mm	z /mm	
4 mm×12 mm	30.198 397	32.454 638	32.338 444	80
	30.197 280	26.454 733	32.325 106	
	30.196 725	20.454 814	32.311 657	
	26.198 722	20.459 309	32.316 074	
	26.199 353	26.453 951	32.329 515	
	26.200 211	32.454 037	32.342 822	

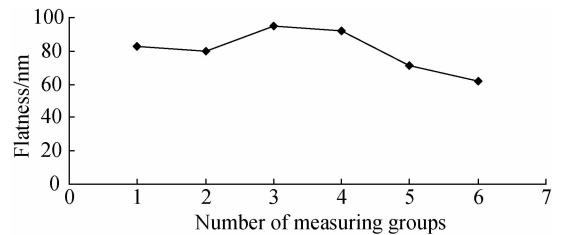


图9 量块平面度测量结果

Fig.9 Result of block flatness measurement

4.2 台阶高度测量

测量2和5 mm的一等量块组成的3 mm台阶高度,其采点布局如图8所示。共测量15组数据,表2是台阶高度测量的其中一组数据,图10是15组台阶高度测量结果,台阶高度平均值为3.000 003 mm,标准差达到21 nm,与检定值(3.000 002 mm)相差1 nm。

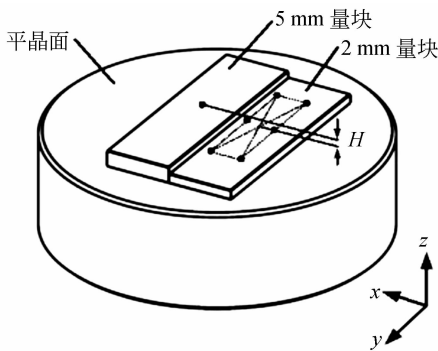


图8 一等量块测量示意图

Fig.8 Sketch graph of first gauge block measurement

表 2 台阶高度测量数据

Tab.2 Measuring data of step height (mm)

测量面	测点坐标		
	x	y	z
2 mm 量块	30.180 252	32.422 899	32.332 295
	30.179 303	26.423 164	32.319 054
	30.178 722	20.423 067	32.305 650
	26.180 358	20.427 469	32.309 879
	26.180 989	26.422 428	32.323 197
	26.181 771	32.422 700	32.336 453
5 mm 量块	19.180 299	26.421 931	29.330 452
台阶高度	3.000 019		

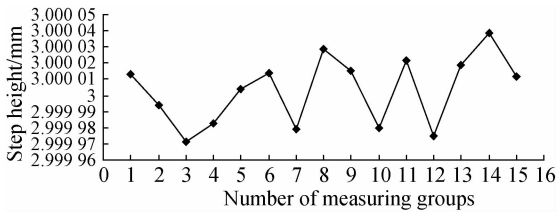


图 10 台阶高度测量结果

Fig. 10 Result of step height measurement

5 结 论

基于“331”原则的新型纳米 CMM 工作台,利用调整机构和标准四方棱镜来保证三线垂直共点;采用工作台相互嵌套的形式,实现了三面共面。通过调整测头系统高度,使测头中心与面重合并处于其交点上,在力平衡系统的作用下,消除了因垂直方向上的零部件重量产生的阻力和导轨变形,实现了 50 mm×50 mm×50 mm 的测量范围。通过对工作台存在的误差源分析表明,力变形误差、21 项刚性几何误差中除残余阿贝误差外,都不会对 CMM 测量结果产生影响。残余的阿贝误差综合到了各轴激光干涉仪反射镜形貌误差中,用特制平晶可以给予测出并修正。激光标尺线垂直度误差对短行程内测量可忽略不计。热变形误差对被测工件的影响,可通过热变形误差修正公式在软件中补偿掉。通过对一等量块测量可知,量块工作面平面度标准差达到 11 nm,台阶高度标准差达到 21 nm,而台阶高度测量平均值与检定值相差为 1 nm。分析和实验表明,基于“331”原则设计的工作台及误差分析,实现了在三维测量方向上同时符合阿贝原则,基本实现了三维测量空间上的“零阿贝误差”,避免或降低了 CMM 主要误差项的影响,对 CMM 误差修正和提高测量精度都具有重要意义。

参考文献:

- [1] TAKAMASU K, HIRAKI M, ENAMI K. Development of Nano-CMM and Parallel-CMM: CMM in the 21th Century [R]. *International Dimensional Metrology Workshop, Tennessee, USA, 1999.*
- [2] FUJIWARA M, YAMAGUCHI A, TAKAMASU K. *Evaluation of stages of Nano-CMM* [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [3] JÄGER G, MANSKE E, HAUSOTTE T, et al. The metrological basis and operation of nanopositioning and nanomeasuring machine NMM-1 [J]. *Tm-Technisches Messen*, 2009, 76(5): 227-234.
- [4] KÜNG A, MELI F, THALMANN R. Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18: 319-327.
- [5] SPAAN H, WIDDERSHOVEN I, DONKER R. Design and calibration of "Isara 400" ultra-precision CMM [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2236-2241.
- [6] 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)
- [7] 王晨晨. 异端类型三坐标测量机结构原理及误差修正技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012. WANG CH CH. *Study on the Structural Principle and Error Correction Technology of the Different types of CMM* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012. (in Chinese)

- [8] 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津:天津大学出版社,1999.
ZHANG G X. *Coordinate Measuring Machine* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999. (in Chinese)
- [9] 王立成,黄信达,丁汉. 原位检测系统中触发式测头的误差分析与补偿[J]. 中国机械工程,2012,23(15):1774-1778.
WANG L C, HUANG X D, DING H. Error analysis and compensation for touch trigger probe of on-

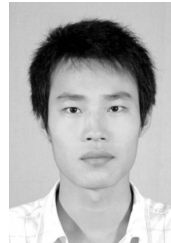
machine measurement system [J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23 (15): 1774-1778. (in Chinese)

- [10] MICHIHATA M, NAKAI D, HAYASHI T, *et al.*. Nano-dimensional measurement using optically trapped probe enhanced by interferometric scale [C]. *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, Portugal*, 2009: 1929-1934.

作者简介:



黄强先(1968—),男,山东即墨人,博士,教授,博士生导师,主要从事微纳米三维测量技术、纳米扫描探针技术研究及应用、仪器精度理论研究及应用等领域的研究。E-mail: huangqx@hfut.edu.cn



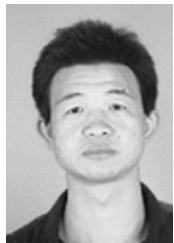
王晨晨(1985—),男,安徽阜阳人,博士,2012年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事精密机械设计、误差理论分析方面的研究。E-mail: xinchen1985@126.com



余夫领(1984—),男,河南柘城人,硕士研究生,2008年于河南科技大学获得学士学位,主要从事微纳米三维测量技术方面的研究。E-mail: yuf11@163.com



费业泰(1934—),男,安徽肥东人,教授,博士生导师,主要从事计量测试技术及仪器、微纳米测量技术及仪器、仪器精度理论研究及应用等领域的研究。E-mail: ytfei@hfut.edu.cn



宫二敏(1990—),男,安徽巢湖人,硕士研究生,2011年于安徽理工大学获得学士学位,主要从事微纳米三维测量技术方面的研究。E-mail: er-minkobe2010@yahoo.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)