

三坐标测量机几何误差的建模及测量

潘芳煜, 白跃伟, 聂黎, 王小刚, 刘凯

(上海第二工业大学智能制造与控制工程学院, 上海 201209)

摘要: 误差补偿是提高三坐标测量机整体精度的高效且经济的手段, 为通过该途径实现三坐标测量机精度的提升, 进行了其前行基础步骤的研究——误差源分析、误差建模及误差测量。由此, 找出了对三坐标测量机精度影响重大的21项几何误差; 根据误差特性, 建立了对应的误差矩阵, 同时介绍了测量方法和测量原理, 并用实验证实了该方法的可行性, 为后续的误差补偿方法来提升三坐标测量机精度奠定了基础。

关键词: 三坐标测量机; 几何误差; 误差建模; 误差测量

中图分类号: TH72; TH711

文献标志码: A

0 引言

随着现代化的发展, 工业领域的产品日益多样化、复杂化和精细化, 这也对其加工设备提出了更高的要求, 因此其对应的检测设备需要有更高的精度才能满足市场的需求。作为检测设备的代表, 三坐标测量机 (Coordinate Measuring Machine, CMM) 因其精度高、测量速度快以及性能稳定, 已广泛运用于诸多领域 (机械制造、精密仪器加工、地质测量、汽车、航空航天等), 其中高精度是 CMM 的关键要素, 因此如何提高它的精度来满足日新月异的市场变化是众多学者的研究热点。

传统提升 CMM 的精度方法是采用误差防止法, 该方法是从机械设计及制造的各个环节进行各项优化, 采用超高的零件设计、精良的制造以及精密的安装来避免或尽可能地减少误差源的引入, 由此实现 CMM 的精度提升。然而这种方法存在严重的瓶颈与不足, 首先它很受制造水平的限制, 而且增加了机器的成本, 尤其是精度达到某一程度时, 再提高精度会造成成本按指数倍数的增长^[1]; 同时, 这种高精度的三坐标的维护成本也极高, 随着机器的使用磨损, 精度也极易丧失。所以, 采用误差防止法来提高三坐标精度是有限度的, 已经无法满足当今日新月异的市场变化。

为了低成本、高效率地实现 CMM 精度的提升, 本文摒弃传统的误差防止法, 对新兴的误差补偿法及其基础进行深入研究。误差补偿法的理念与误差防止法完全不一样, 并不刻意限制误差源的引入, 相反, 它是在系统中增加新的误差, 与原误差相抵消来实现 CMM 精度的提升。因此, 采用该方法首先需要对机器系统中的稳定误差进行采集, 通过数学模型建模, 生成误差模型, 而后将新的误差引入补偿系统, 即在原有的系统中加入一个新的修正项, 由此与当前误差相抵消, 实现三坐标精度的提高^[2]。

1 提升 CMM 精度的步骤

提升 CMM 精度的步骤如图 1 所示, 采用误差补偿法来实现精度的提升首先需要进行 3 个基础步骤, 即误差源分析、误差建模和误差测量。

根据误差特性, 误差可以分为两类: 一种是准静态误差, 一种是动态误差。所谓准静态误差就是指随时间变化缓慢且直接与自身结构相关的误差, 而动态误差则相反, 其随时间变化而变化, 因此情况特别复杂^[3]。变化缓慢的准静态误差可以通过误差补偿法进行修正, 故本文主要研究 CMM 的准静态误差, 该类误差约占各类误差源的 60%~70%, 主要分为以下 3 类^[4]:

收稿日期: 2016-06-29

通信作者: 潘芳煜 (1986-), 女, 江苏盐城人, 讲师, 博士, 主要研究方向为精密测量等。E-mail: fypan@sspu.edu.cn。

基金项目: 上海第二工业大学校基金项目 (EGD16XQD05、EGD16XQD08), 上海第二工业大学校重点学科建设项目 (XXKZD1603), 上海市科委科技行动计划 (13521103602), 国家自然科学基金 (51605273) 资助

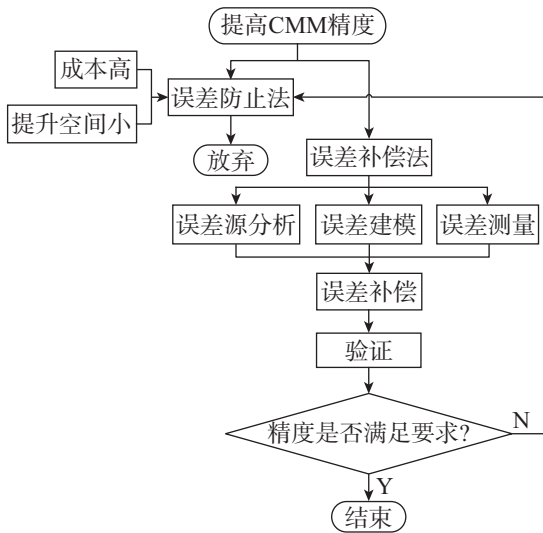


图1 提升 CMM 精度的步骤

Fig. 1 The process to enhance CMM's precision

- (1) 由结构件的有限精度造成的几何误差;
- (2) 与测量机的结构件的有限刚度有关的误差, 主要是因为其移动部件的重量产生的;
- (3) 热误差。

上述 3 类误差中, 几何误差占有很大的比例, 因此, 本文将着重对其进行分析。

2 CMM 的几何误差

工作部件沿着导轨运动时存在着 6 项误差, 即 3 个位移和 3 个角度误差, 如图 2 所示。

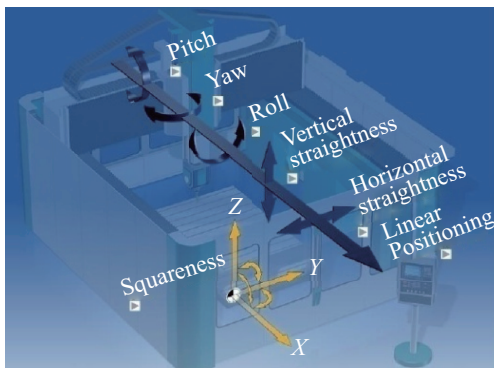


图2 CMM 平移轴误差

Fig. 2 The errors of CMM's translational axes

以 X 轴运动为例, 其运动时有 1 项直线定位误差 δ_x , 2 项直线度误差: 在 XY 平面内的直线度误差 δ_y 和在 XZ 平面内的直线度误差 δ_z , 除此之外的 3 项角度误差分别是 1 项滚动误差 ε_x , 2 项角度误差, 即在 XY 平面内绕 Z 轴旋转的角度误差 ε_z 和在 XZ 平面内绕 Y 轴旋转的角度误差 ε_y 。其中, δ 代表位

移误差, ε 代表角度误差, 括号内的字母代表运动方向, 而下标字母代表误差方向。

类似, Y 轴的误差为: $\delta_x(y)$, $\delta_y(y)$, $\delta_z(y)$, $\varepsilon_x(y)$, $\varepsilon_y(y)$, $\varepsilon_z(y)$; Z 轴的误差为: $\delta_x(z)$, $\delta_y(z)$, $\delta_z(z)$, $\varepsilon_x(z)$, $\varepsilon_y(z)$, $\varepsilon_z(z)$ 。

除了每个轴的单轴误差外, 各个轴之间还存在轴间误差, 即垂直度误差, 分别为 ε_{xy} 、 ε_{xz} 和 ε_{yz} 。故综上所述, CMM 的几何误差共计 21 项 (见表 1)。

表 1 21 项几何误差

Tab. 1 21 geometric errors

轴	单项误差	符号
X 轴	线性定位	沿 X 轴运动的直线定位误差 $\delta_x(x)$
	直线度	沿 X 轴运动在 XY 平面 Y 方向直线度误差 $\delta_y(x)$
		沿 X 轴运动在 XZ 平面 Z 方向直线度误差 $\delta_z(x)$
	角度误差	沿 X 轴运动的滚动误差 $\varepsilon_x(x)$
		沿 X 轴运动在 XZ 平面的绕 Y 轴的角度误差 $\varepsilon_y(x)$
		沿 X 轴运动在 XY 平面的绕 Z 轴的角度误差 $\varepsilon_z(x)$
Y 轴	线性定位	沿 Y 轴运动的直线定位误差 $\delta_y(y)$
	直线度	沿 Y 轴运动在 XY 平面 X 方向直线度误差 $\delta_x(y)$
		沿 Y 轴运动在 YZ 平面 Z 方向直线度误差 $\delta_z(y)$
	角度误差	沿 Y 轴运动在 YZ 平面绕 X 轴的角度误差 $\varepsilon_x(y)$
		沿 Y 轴运动的滚动误差 $\varepsilon_y(y)$
		沿 Y 轴运动在 XY 平面绕 Z 轴的角度误差 $\varepsilon_z(y)$
Z 轴	线性定位	沿 Z 轴运动方向的直线定位误差 $\delta_z(z)$
	直线度	沿 Z 轴运动在 XZ 平面 X 方向直线度误差 $\delta_x(z)$
		沿 Z 轴运动在 YZ 平面 Y 方向直线度误差 $\delta_y(z)$
	角度误差	沿 Z 轴运动在 YZ 平面的绕 X 轴的角度误差 $\varepsilon_x(z)$
		沿 Z 轴运动在 XZ 平面的绕 Y 轴的角度误差 $\varepsilon_y(z)$
		沿 Z 轴运动的滚动误差 $\varepsilon_z(z)$
轴间	垂直度	X 轴和 Y 轴的垂直度误差 ε_{xy}
		X 轴和 Z 轴的垂直度误差 ε_{xz}
		Y 轴和 Z 轴的垂直度误差 ε_{yz}

3 CMM 几何误差建模

CMM 的结构通常如图 3 所示, 其中 0 是大理石基座, 固定不动; 1 是待测工件; 2 是龙门架, 沿 X 轴运动; 3 是滑块, 沿 Y 轴运动; 4 是立柱, 沿 Z 轴运动; 5 是测头。根据它的结构, CMM 可以分为两个支链, 一个是工件链, 一个是测头链。在理论情况下, 两支链的末端——工件和测头应该吻合于某一特定点, 而由于几何误差的存在, 其实际在此点并非吻合, 故通过其差距即可建立 CMM 的几何误差模型。

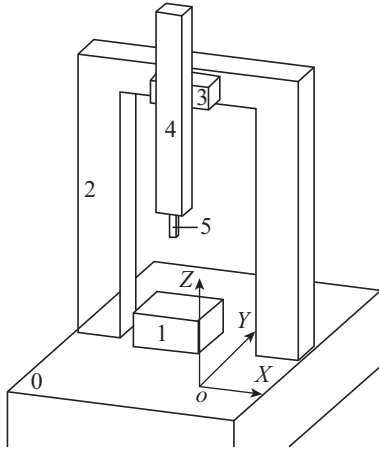


图 3 CMM 结构示意图

Fig. 3 The structure of CMM

假设工件采样点 W 在工件坐标系的位姿为 T_W , 测头 P 在测头坐标系的位姿为 T_P , 由于各个位姿在不同坐标系中无法进行对比, 故需转换到同一坐标系进行对比, 而两个支链中都包含基座 0, 因此将其转化至基座 0 坐标系中进行比较, 如图 4 所示。

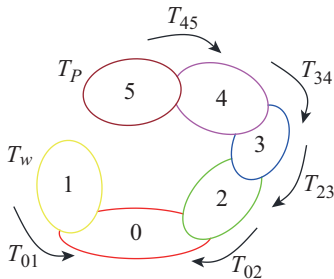


图 4 传递链

Fig. 4 The transfer chain

基于此, CMM 的误差矩阵为:

$$\left. \begin{aligned} {}^0T_W &= T_{01}T_W \\ {}^0T_P &= T_{02}T_{23}T_{34}T_{45}T_P \\ \begin{bmatrix} E \\ 1 \end{bmatrix} &= {}^0T_W - {}^0T_P \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: T_W 为待测件在待测件坐标系中被测量点的位姿; 0T_W 为被测件在基座坐标系中测量点的位姿; T_P 为测头在测头坐标系的位姿; 0T_P 为测头在基座坐标系的位姿。

对于相邻的坐标系 SV 而言, 当坐标系 V 向坐标系 S 转换时, 其变换矩阵 T_{SV} 可由 4 部分求得: 位置矩阵 $T_{SV,P}$, 位置误差矩阵 $T_{SV,pe}$, 运动矩阵 $T_{SV,s}$ 和运动误差矩阵 $T_{SV,se}$ 。矩阵之间的关系表达如下 (相邻坐标系变换见图 5):

$$T_{SV} = T_{SV,P}T_{SV,pe}T_{SV,s}T_{SV,se} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{z_p} & \varepsilon_{y_p} & \delta_{x_p} \\ \varepsilon_{z_p} & 1 & -\varepsilon_{x_p} & \delta_{y_p} \\ -\varepsilon_{y_p} & \varepsilon_{x_p} & 1 & \delta_{z_p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{z_{pe}} & \varepsilon_{y_{pe}} & \delta_{x_{pe}} \\ \varepsilon_{z_{pe}} & 1 & -\varepsilon_{x_{pe}} & \delta_{y_{pe}} \\ -\varepsilon_{y_{pe}} & \varepsilon_{x_{pe}} & 1 & \delta_{z_{pe}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{z_s} & \varepsilon_{y_s} & \delta_{x_s} \\ \varepsilon_{z_s} & 1 & -\varepsilon_{x_s} & \delta_{y_s} \\ -\varepsilon_{y_s} & \varepsilon_{x_s} & 1 & \delta_{z_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{z_{se}} & \varepsilon_{y_{se}} & \delta_{x_{se}} \\ \varepsilon_{z_{se}} & 1 & -\varepsilon_{x_{se}} & \delta_{y_{se}} \\ -\varepsilon_{y_{se}} & \varepsilon_{x_{se}} & 1 & \delta_{z_{se}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

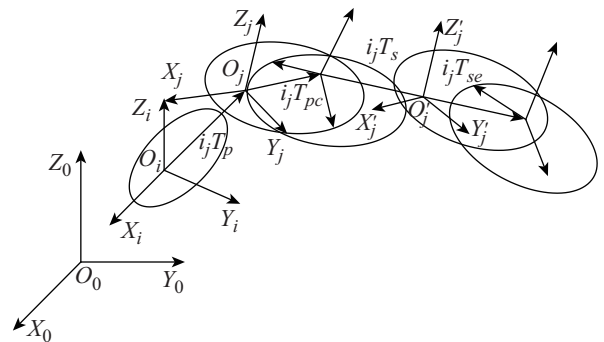


图 5 相邻坐标系变换示意图

Fig. 5 Transformation of adjacent coordinates

根据式 (2) 的结论, 则式 (1) 中涉及的所有转换矩阵: T_{01} 、 T_{02} 、 T_{23} 、 T_{34} 和 T_{45} , 皆可以推算出结果。为避免赘述, 本文以 T_{02} 为例给出如下公式:

$$T_{02} = T_{02,p} T_{02,pe} T_{02,s} T_{02,se} =$$

$$I_{4 \times 4} I_{4 \times 4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(y) & \varepsilon_y(y) & \delta_x(y) \\ \varepsilon_z(y) & 1 & -\varepsilon_x(y) & \delta_y(y) \\ -\varepsilon_y(y) & \varepsilon_x(y) & 1 & \delta_z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(y) & \varepsilon_y(y) & \delta_x(y) \\ \varepsilon_z(y) & 1 & -\varepsilon_x(y) & \delta_y(y) + y \\ -\varepsilon_y(y) & \varepsilon_x(y) & 1 & \delta_z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

4 CMM 误差测量

CMM 的几何误差可以通过激光干涉仪来测得。目前, 市面上的激光干涉仪主要分为两类: 一类是基于多普勒效应原理, 具体是通过对多普勒频率偏移进行测量获得数据; 而另一类是基于分光干涉原理, 它是通过记录干涉条纹数目来实现测量的^[5]。由于多普勒效应的激光干涉仪具有体积小、易对光、操作快的特点, 因此更适用于 CMM, 故本文主要针对此类激光干涉仪的原理进行分析。

激光多普勒干涉仪 (Laser Doppler Displacement Meter, LDDM), 由美国光动公司 (OPTODYNE INC) 研制, 其采用相干检测方法, 从移动物体表面的散射光中提取多普勒频移信号, 并对粗糙表面散射光引起的某些散斑效应有一定的适应性, 通过测量参考光与散射光混合的光信号中两个互相垂直的偏振分量之间的相位关系, 可以进行物体位移方向的检测, 如图 6 所示^[6]。具体来说, 光源 (激光器) 与目标间产生相对位移 → 相对速度 → 多普勒频移 → 计算频移和对应的相位偏移 → 计算位移^[7]。公式表示为:

$$\Delta f = (2f/c)\Delta v, \quad \Delta \theta = 2\pi(2f/c)\Delta z \quad (4)$$

式中, Δf 为频率偏移; $\Delta \theta$ 为相位偏移; Δv 为反射镜速度, Δz 为反射镜位移; f 为激光频率; c 为光速。

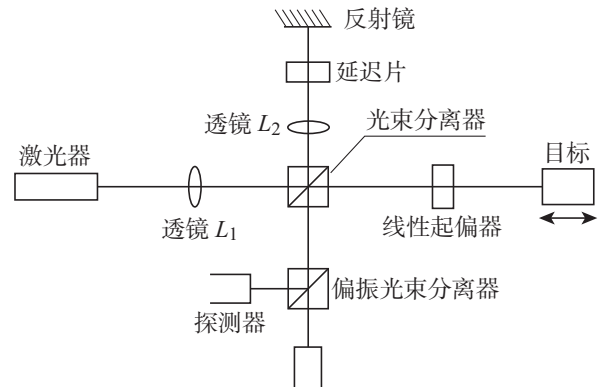


图 6 多普勒激光干涉仪光学原理
Fig. 6 The principle of LDDM

当位移超过激光半个波长时, 相位传感器的计数器将记录其相位的变化:

$$\Delta \theta = 2\pi N + \varphi \quad (5)$$

由此可以推算出位移的变化:

$$\Delta z = c(N + \varphi/2\pi)/(2f) \quad (6)$$

5 实验

为避免赘述, 本文挑选 CMM 21 项误差中的一类为例: Y 轴运动时, 绕 Z 轴的角度误差 ε_z 进行实验。

5.1 实验对象

待测 CMM 已服役 20 余年, 其型号为德国 OPTON (蔡司) 的 UMC550S, 如图 7 所示, 工作行程: $550 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$; 测量精度: $1.3 \times 10^{-6} + L/350$; 分辨率: 0.2×10^{-6} 。



图 7 三坐标测量机
Fig. 7 The CMM

5.2 实验仪器

多普勒激光干涉仪, 具体型号为 MCV-5002, 其具体测量功能与特性如图 8 所示。

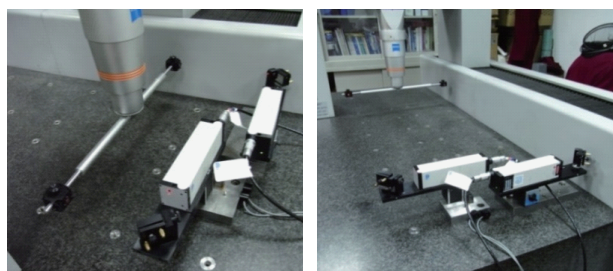
◆ 直线位移	◆ 位移分辨率: $0.01\ \mu\text{m}$
◆ 主动轴、从动轴的直线位移	◆ 位移精度: $1\ \mu\text{m}/\text{m}$
◆ 测量位移、角偏和直线度	◆ 测量距离: $30\ \text{m}$
◆ 角偏、直线度测量可实行动态采样	◆ 移动速度: $5\ \text{m}/\text{s}$
◆ 分轴步进对角线测量	◆ 体积测量范围: $3\ \text{m} \times 2\ \text{m} \times 1\ \text{m}$
	◆ 角偏测量精度: $0.2\% \pm 0.2\ \text{s}$
	◆ 直线度测量精度: $0.2\% \pm 0.01\ \mu\text{m}$

图 8 多普勒激光干涉仪 MCV-5002 测量功能与特性

Fig. 8 The performance of LDDM (MCV-5002)

5.3 测量过程与结果

测量对象为 Y 轴, 其行程为 $1200\ \text{mm}$, 其中 $5\sim 655\ \text{mm}$ 是频繁使用的工作区域, 该区域相对于别的区域磨损易大, 故测量主要针对此区。考虑到测量时长、测量点数对精度的影响^[8], 本次实验的步长设置为 $50\ \text{mm}$; 考虑到阿贝误差对测量结果的影响, 安装激光源尽量靠近主动轴^[9]; 在对光时, 激光束需尽可能的平行于被测轴, 即尽量减少余弦误差的引入^[10], 测量过程如图 9 所示。



(a) 近端 Near-end

(b) 远端 Far-end

图 9 Y 轴测量过程图

Fig. 9 The measurement of Y-axis

测量结果如图 10 所示, 其中 1F 为去程 ($5\ \text{mm} \rightarrow 605\ \text{mm}$), 1B 为返程 ($605\ \text{mm} \rightarrow 5\ \text{mm}$), 无论是去程还是返程, 其误差变化趋势相似, 皆为先正向扩大而后减小, 当 Y 坐标超过 $105\ \text{mm}$ 后, 其角度误差与其坐标位置近似成正比, 即坐标位置越大, 角度误差越大。去程的正向最大误差发生于 $55\ \text{mm}$ 处, 角度误差为 $1.87''$, 而负向最大误差发生于 $605\ \text{mm}$ 处, 角度误差为 $5.63''$; 返程的正向最大误差亦发生于 $55\ \text{mm}$ 处, 角度误差 $0.95''$, 负向最大误差发生于 $655\ \text{mm}$ 处, 角度误差为 $4.78''$ 。

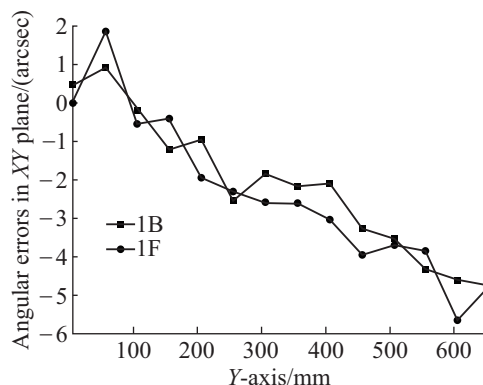


图 10 测量结果

Fig. 10 The result of Y-axis's measurement

6 结 论

(1) 通过对影响 CMM 精度的误差源分析, 找出了影响 CMM 精度重大的误差项目——21 项几何误差, 为后期有的放矢地针对重点测量奠定了基础。

(2) 通过齐次矩阵变换建立了误差模型, 为各误差项与补偿之间搭建了桥梁。

(3) 通过对误差项特性的分析, 对提出的测量方法进行实验, 实验结果证明了其可行性, 同时其结果也为后续的补偿奠定了数据基础。

存在的不足之处:

(1) 实验中的测量只涉及了平面内的测量, 不满足 CMM 整体空间内的各位置的补偿, 因此后续需对整体空间内的各位置获取进行研究。

(2) 本文对补偿的具体方法涉及较少, 后续需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 王永顺. 三坐标测量机误差的测量与补偿 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [2] 范晋伟, 邢亚兰, 郝艳梅, 等. 三坐标数控机床误差建模与补偿的实验研究 [J]. 机械设计与制造, 2008(9): 150-152.
- [3] 宇海英. 数控铣床误差检测与补偿方法研究 [J]. 金陵科技学院学报, 2008, 24(3): 32-36.
- [4] 林慎旺. 三坐标测量机精度检测评定及虚拟坐标系统研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- [5] 王会永, 满忠雷, 孙立, 等. 基于激光干涉仪的机床定位精度测量与分析 [J]. 检验检疫学报, 2015, 25(2): 36-43.
- [6] PLEYDELL E, 胡向东. 激光多普勒干涉仪测量物体 [J]. 国外计量, 1988(6): 14-22.
- [7] 步海光. 激光多普勒干涉仪在机床测量方面的应用 [J]. 制造技术与机床, 2003(3): 73-74.

- [8] 曹旭, 李明, 韦庆玥, 等. 三坐标测量中测量点数对精度影响的研究 [J]. 机械制造, 2013, 51(4): 71-74.
- [9] CASTRO H F F. Uncertainty analysis of a laser calibration system for evaluating the positioning accuracy of a numerically controlled axis of coordinate measuring machines and machine tools [J]. Precision Engineering, 2008, 32(2): 106-113.
- [10] 章海涛, 程维明, 欧阳航空. 基于单片机的余弦误差修正系统 [J]. 机电一体化, 2005, 11(2): 84-86.

Geometric Error Modeling and Measurement for Coordinate Measuring Machines

PAN Fangyu, BAI Yuewei, NIE Li, WANG Xiaogang, LIU Kai

(School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Shanghai Polytechnic University,
Shanghai 201209, China)

Abstract: Error compensation is the efficient and economic method to improve the precision of coordinate measuring machine (CMM). In order to enhance CMMs' accuracy by the method, the basic research on error compensation was concentrated on, which included error source analysis, error modeling and measurement. 21 geometric errors of key errors of CMM were found out error model was established and the measurement method with its principle was introduced. The feasibility of the experiment was validated and it laid the foundation for further error compensation method to enhance CMMs' accuracy.

Keywords: coordinate measuring machine (CMM); geometric error; error modeling; error measurement

简 讯

上海第二工业大学获得两项 2017 年度上海市自然科学基金资助项目

近日, 经上海市科委组织专家网上评审、见面会考评等评选程序, 上海第二工业大学获得两项上海市自然科学基金资助。获得资助的项目分别为工学部陈立飞的“高导热和高稳定的不同维数纳米碳材料协同强化传热的界面材料构筑及导热特性研究”、汪玲玲的“Au/氮掺杂碳纳米管催化剂的制备及光催化选择性氧化芳香醇研究”。项目期为 3 年, 资助力度为 20 万元/项。