

应用激光跟踪仪的数控机床几何精度检测

王金栋, 郭俊杰, 邓玉芬, 费致根

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了对数控机床几何精度进行快速、高精度检测,提出了一种基于激光跟踪仪的多站分时测量方法. 该方法通过一台激光跟踪仪先后在不同的基站位置对机床相同的三维空间进给运动轨迹进行了测量,利用测量得到的大量测量点到不同基点的距离变化量建立了超定方程组. 采用最小二乘法对方程组求解,准确标定出机床运动过程中各测量点的坐标,然后分离出机床的各项几何误差. 通过对多站分时测量的原理分析,给出了多站分时测量方法的具体算法,并对该方法的测量误差进行了分析. 仿真和实验结果表明,多站分时测量方法是可行的,该方法具有快速、精度高等优点,适合中高档数控机床几何精度的检测.

关键词: 几何精度;激光跟踪仪;多站分时测量;最小二乘法

中图分类号: TH161.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)03-0085-06

Geometric Precision Detection for Numerical Control Machine Tool Based on Laser Tracker

WANG Jindong, GUO Junjie, DENG Yufen, FEI Zhigen

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To rapidly and accurately detect the geometric precision of numerical control (NC) machine tool, a method based on the multi-station and time-sharing measurement principle was proposed. A laser tracker was used to measure the same 3D motion trajectory of the machine tool moving components at different base stations, and the over-determined equations were established based on large amount of measured data concerning the distance variation between measuring point and base point. The coordinates of each measuring point during motion can be accurately calibrated by solving the equations with least squares method, then the geometric errors of the machine can be separated. The principles of multi-station and time-sharing measurement were analyzed, and the algorithms of multi-station and time-sharing measurement were given, and the measurement errors of the method were discussed. The simulation and experiments verify the feasibility and accuracy of this multi-station and time-sharing measurement method, which is suitable for medium-high level of NC machine in geometric precision detection.

Keywords: geometric precision; laser tracker; multi-station and time-sharing measurement; least square method

快速、准确检测出数控机床的各项误差并进行误差补偿,是提高数控机床加工精度的重要途径^[1]之一. 目前,国内外用来检测数控机床几何误差的方法有很多,常见的有实物基准测量法、激光球杆仪、

正交光栅测量法、激光干涉测量法等,但这几种方法均属于静态测量,在检测效率和检测精度以及通用性上均存在着不足,因此不能满足高精度、快速的检测要求^[2]. 国外一些国家已经采用激光跟踪仪来检

测机床精度,德国联邦物理研究院利用激光跟踪仪在不到2 h的时间内即可对一台三轴机床的误差完成标定,并且检测精度很高^[3].

本文采用一种基于激光跟踪仪的多站分时测量方法来检测数控机床的精度,通过对多站分时测量方法进行分析、仿真和实验,验证了该方法的可行性.

1 多站分时测量原理

激光跟踪三维坐标测量系统主要是基于球坐标法、三角法、多边法原理,按跟踪系统的数量还可将其分为单站、多站2种方法.采用单站法测量时,由于转角的测量精度有限,而且角度测量本身的不确定性会随距离的增大而增大,与激光干涉的测距精度相差甚远,影响了空间坐标的整体精度,不适合测量精度要求较高的场合^[4],因此采用单站法对高精度机床检测时难以保证测量精度.采用多站法测量时,仅用激光跟踪仪的测距信息,而不用其测角信息,因此具有较高的测量精度,可以满足高精度测量的要求,但需要多台激光跟踪仪同时对目标点进行测量,成本太高^[5].

为了节约成本,保证较高的测量精度,通过一个激光跟踪仪先后在不同位置对目标点进行测量,并且只利用激光跟踪仪的测距信息,即多站分时测量,如图1所示.采用多站分时测量方法检测机床精度的原理是:控制机床在三维空间进给,并在其运动轨迹上设置一定数目的测量点.一台激光跟踪仪先后在不同的基站位置对机床相同的运动轨迹进行测量,利用测量得到的大量测量点到不同基点的距离变化量,通过基点空间位置自标定算法、测量点空间坐标标定算法,便可准确标定出机床运动过程中各测量点的坐标,最后分离出机床的各项几何误差.

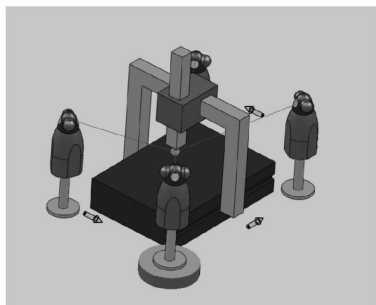


图1 激光跟踪仪多站分时的测量原理

2 多站分时测量算法

采用多站分时方法测量时,利用测量得到的大

量数据,先标定出激光跟踪仪在不同测量位置的基点,然后再对空间测量点坐标进行标定.

2.1 基点空间位置的自标定

为确定测量点的三维坐标,需要知道激光跟踪仪在4个位置测量时基点的空间坐标,以及它们到初始目标动点的绝对距离.在标定基点的4个位置坐标时,采取每个基点位置单独标定的原则,给出基点 P_1 的标定过程.假设 A_0 为初始目标点,并沿着事先设定好的路径运动,在运动路径上设置一定数目的测量点,且各测量点的理论坐标 $A_i(x_i, y_i, z_i)$, $i=1,2,\dots,n$ 是已知的,用激光跟踪仪跟踪目标点,并实时测量目标点到基点的距离变化量.由于激光跟踪仪测距是基于激光干涉原理的,且目标点到基点距离的相对变化量与激光跟踪仪的测距零位设置无关,因此假定瞄准 A_0 时,将激光跟踪仪的测距读数设置为0,则在目标点的移动过程中,激光跟踪仪的测距读数就是目标点到基点的相对距离变化量.将 A_0 到 P_1 的距离记为 L_1 ,测量过程中将 A_i 到 P_1 的相对距离变化量^[6]记为 L_{1i} .

$$\left. \begin{aligned} & \text{设 } P_1(x, y, z) A_i \text{ 到 } (x_i, y_i, z_i) \text{ 按两点距离得到} \\ & ((x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2)^{1/2} = L_1 + L_{11} \\ & ((x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2)^{1/2} = L_1 + L_{12} \\ & \vdots \\ & ((x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2)^{1/2} = L_1 + L_{1i} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

基点标定时实际所取测量点数往往多于4个,这时自标定方程组将是超定方程组,可用最小二乘法求解.求解最小二乘问题的数值算法有很多,如信赖域法、Gauss-Newton法、广义逆法等,但无论采用哪一种数值算法,都需要给定一个初值,为了避免迭代初值的选定,采用解析方法对最小二乘问题进行求解.将式(1)中的第1个方程两边平方并展开,可得

$$\begin{aligned} & x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - 2x_1x - 2y_1y - 2z_1z + \\ & x^2 + y^2 + z^2 - L^2 - 2LL_{11} - L_{11}^2 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)是关于 x, y, z 和 L 的二次非线性方程,令 $C=x^2+y^2+z^2-L^2$,则可将式(2)线性化,得到

$$\begin{aligned} & x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - 2x_1x - 2y_1y - \\ & 2z_1z + C - 2LL_{11} - L_{11}^2 = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

根据最小二乘原理,目标函数为

$$\begin{aligned} F(x, y, z, L, C) = & \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - \\ & 2x_ix - 2y_iy - 2z_iz + C - 2LL_{1i} - L_{1i}^2)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

由极值原理,若使 F 为极小,则必有

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial x} &= 0; & \frac{\partial F}{\partial y} &= 0; & \frac{\partial F}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial F}{\partial L} &= 0; & \frac{\partial F}{\partial C} &= 0\end{aligned}\quad (5)$$

同时式(4)中各二阶偏导数恒正,即

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} &= 8 \sum_{i=1}^N x_i^2 > 0; & \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} &= 8 \sum_{i=1}^N y_i^2 > 0; \\ \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} &= 8 \sum_{i=1}^N z_i^2 > 0; \\ \frac{\partial^2 F}{\partial L^2} &= 8 \sum_{i=1}^N L_{1i}^2 > 0; & \frac{\partial^2 F}{\partial C^2} &= 1 > 0\end{aligned}\quad (6)$$

由此可知,式(5)中各方程求得的极值是极小值,满足最小二乘条件,整理后可得

$$\begin{bmatrix} 2 \sum_{i=1}^N x_i^2 & 2 \sum_{i=1}^N x_i y_i & 2 \sum_{i=1}^N x_i z_i & 2 \sum_{i=1}^N x_i L_{1i} & - \sum_{i=1}^N x_i \\ 2 \sum_{i=1}^N x_i y_i & 2 \sum_{i=1}^N y_i^2 & 2 \sum_{i=1}^N y_i z_i & 2 \sum_{i=1}^N y_i L_{1i} & - \sum_{i=1}^N y_i \\ 2 \sum_{i=1}^N x_i z_i & 2 \sum_{i=1}^N y_i z_i & 2 \sum_{i=1}^N z_i^2 & 2 \sum_{i=1}^N z_i L_{1i} & - \sum_{i=1}^N z_i \\ 2 \sum_{i=1}^N x_i L_{1i} & 2 \sum_{i=1}^N y_i L_{1i} & 2 \sum_{i=1}^N z_i L_{1i} & 2 \sum_{i=1}^N L_{1i}^2 & - \sum_{i=1}^N L_{1i} \\ - \sum_{i=1}^N x_i & - \sum_{i=1}^N y_i & - \sum_{i=1}^N z_i & - \sum_{i=1}^N L_{1i} & \frac{N}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ L_1 \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - L_{1i}^2) \\ \sum_{i=1}^N y_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - L_{1i}^2) \\ \sum_{i=1}^N z_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - L_{1i}^2) \\ \sum_{i=1}^N L_{1i} (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - L_{1i}^2) \\ - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - L_{1i}^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

当式(7)中的系数行列式不为0时,有唯一确定的解。重复上述过程,即可标定出基点在 P_2 、 P_3 、 P_4 位置处的空间坐标,以及 A_0 到 P_2 、 P_3 、 P_4 的距离 L_2 、 L_3 、 L_4 。

2.2 基点空间位置优化

为了进一步提高基点位置的标定精度,对4个基点位置采用整体优化的方法,将基点位置自标定算法标定出的各个基点位置作为初始值,通过迭代的方法,得到优化后的4个基点位置^[7]。利用 Matlab 优化工具箱中的 lsqnonlin 函数对4个基点位置进行整体优化,优化的目标函数按照下式给出

$$J = \min \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^N ((x_{pj} - x_i)^2 +$$

$$(y_{pj} - y_i)^2 + (z_{pj} - z_i)^2 - (L_j + L_{ji})^2)^2 \quad (8)$$

2.3 测量点空间坐标的标定

当对激光跟踪仪的4个基点位置标定后,便可对测量过程中各测量点的实际坐标 $A'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$, $i=1, 2, \dots, n$ 进行标定。设标定得到的4个基点空间坐标为 $P_1(x_{p1}, y_{p1}, z_{p1})$ 、 $P_2(x_{p2}, y_{p2}, z_{p2})$ 、 $P_3(x_{p3}, y_{p3}, z_{p3})$ 和 $P_4(x_{p4}, y_{p4}, z_{p4})$, A_0 到 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 的距离分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 。采用类似基点标定的算法对测量点 $A'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ 进行标定,得到

$$\begin{bmatrix} 2 \sum_{j=1}^4 x_{pj}^2 & 2 \sum_{j=1}^4 x_{pj} y_{pj} & 2 \sum_{j=1}^4 x_{pj} z_{pj} & - \sum_{j=1}^4 x_{pj} \\ 2 \sum_{j=1}^4 x_{pj} y_{pj} & 2 \sum_{j=1}^4 y_{pj}^2 & 2 \sum_{j=1}^4 y_{pj} z_{pj} & - \sum_{j=1}^4 y_{pj} \\ 2 \sum_{j=1}^4 x_{pj} z_{pj} & 2 \sum_{j=1}^4 y_{pj} z_{pj} & 2 \sum_{j=1}^4 z_{pj}^2 & - \sum_{j=1}^4 z_{pj} \\ - \sum_{j=1}^4 x_{pj} & - \sum_{j=1}^4 y_{pj} & - \sum_{j=1}^4 z_{pj} & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ C_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^4 x_{pj} (x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j L_{ji} - L_{ji}^2) \\ \sum_{j=1}^4 y_{pj} (x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j L_{ji} - L_{ji}^2) \\ \sum_{j=1}^4 z_{pj} (x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j L_{ji} - L_{ji}^2) \\ - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^4 (x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j L_{ji} - L_{ji}^2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: x_{pj} 、 y_{pj} 、 z_{pj} 为 P_j 的坐标, $j=1, 2, 3, 4$; L_j 为 A_0 到 P_j 的距离; L_{ji} 为在第 j 个基点位置、第 i 个测量点处激光跟踪仪的测距读数, $i=1, 2, \dots, n$ 。

3 多站分时测量方法的仿真实验

采用四站分时测量方法来检测机床,对基点和测量点的标定过程进行了仿真实验。

3.1 基点空间位置的标定仿真实验

假定 $P_1(300, 300, 600)$ 、 $P_2(300, 1\ 800, 600)$ 、 $P_3(-1\ 200, 300, 600)$ 和 $P_4(-1\ 200, 1\ 800, 1\ 100)$, 以及 $A_0(-800, 200, 150)$, 机床运动区域按正方体 $1\ 000\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$ 给出, 同时在正方体的每条边上均匀分布4个测量点。在测量过程中, 机床沿着预先设定好的路径在三维空间运动, 激光跟踪仪实时跟踪机床的运动。当机床运动

到各测量点处时,机床停止运动,记下该测量点位置处激光跟踪仪的测距读数,对不考虑机床误差和考虑机床误差的情况进行仿真.

在不考虑机床误差的情况下,机床能够按照控制指令准确运动到各测量点位置,当机床走完预先设定的路径之后,便得到多组没有误差的 A_i 坐标和 A_i 处所对应的激光跟踪仪读数,利用基点标定算法,便可以标定出测量时各个基点的位置.

仿真实验发现,通过大量测量点标定出来的基点坐标值和基点理论坐标值十分接近,最大偏差量 (P_4 在 y 向的偏差)为 $-1.411\ 3\times10^{-10}$ mm,偏差量很小,说明算法是可行的.

在考虑机床误差的情况下,为了简化计算,机床运动过程中的随机误差按照随机正态分布给出,而系统误差主要考虑温度变化而引起的标尺在各个方向长度的变化(热变形误差),并分3种不同的工况(见表1)进行仿真:①机床随机误差服从 $[0\ \mu\text{m},\ 5\ \mu\text{m}]$ 正态分布,标尺线膨胀系数 $r=1\times10^{-5}$;②机床随机误差服从 $[0\ \mu\text{m},\ 10\ \mu\text{m}]$ 正态分布, $r=1\times10^{-5}$;③机床随机误差服从 $[0\ \mu\text{m},\ 10\ \mu\text{m}]$ 正态分布, $r=2\times10^{-5}$.

表1 P_1 位置的标定结果 mm			
工况	x	y	z
1	300.000	299.992	599.996
2	300.002	299.991	599.995
3	300.000	299.984	599.991

在考虑机床误差的情况下,通过大量测量点标定出来的基点位置和基点理论位置的值比较接近,同时,随着机床误差的增大,标定出的基点位置与理论位置的偏差量总体上逐渐增大.由于基点的标定精度直接影响着后面测量点的标定精度,因此应尽量减小基点位置的标定误差.

3.2 基点位置整体优化仿真

在机床随机误差服从 $[0\ \mu\text{m},\ 5\ \mu\text{m}]$ 正态分布、 $r=1\times10^{-5}$ 的工况下,对4个基点位置采用整体优化的方法,进一步提高基点的标定精度(见表2).

从表2可以看出,通过优化,基点位置整体标定精度有所提高,但提高程度不是很大.这是由于通过解析法和数值迭代法求解最小二乘问题的精度相当,因此将解析法获得的最小二乘解当作初值进一步迭代优化,而优化后的最小二乘解的变化也不会

太大.

表 2 优化前后基点位置的标定偏差					mm
测量点		Δx	Δy	Δz	ΔL
优化前	P_1	0.000 26	-0.007 92	-0.004 46	-0.002 31
	P_2	-0.004 87	-0.002 51	-0.004 62	-0.010 31
优化后	P_1	0.001 49	-0.007 21	-0.003 82	-0.000 39
	P_2	0.000 26	-0.004 86	-0.005 63	0.004 81

3.3 测量点标定仿真

给出部分测量点的坐标为 $A_1(-800,1\ 200,150)$ 、 $A_2(200,1\ 200,150)$ 、 $A_3(200,200,150)$ 和 $A_4(-800,200,1\ 150)$,在实际测量中,测量点在机床坐标系下的理论坐标是已知的.分2种情况进行仿真:①不考虑机床误差;②考虑机床误差.

在第①种情况下,通过4个基点标定出来的测量点坐标值和理论坐标值十分接近,最大偏差量 (A_1 在 z 向的偏差)为 $2.693\ 8\times10^{-10}$ mm,偏差量很小,说明本文算法是可行的.

在第②种情况下,给出了在机床随机误差服从 $[0\ \mu\text{m},\ 5\ \mu\text{m}]$ 正态分布、 $r=1\times10^{-5}$ 的工况下,标定出来的部分测量点的空间坐标,如表3所示.

表3 部分测量点的标定结果 mm			
测量点	x	y	z
A_1	-800.005	1 200.008	149.992
A_2	199.997	1 200.007	150.008
A_3	199.997	200.005	150.010
A_4	-800.004	200.003	1 150.010

通过标定得到了不同坐标轴上的多个测量点,根据机床各项几何误差的定义,便可以很容易地分离出机床的各项误差.

3.4 多站分时测量实验验证

基于多站分时测量原理,采用一台激光跟踪仪对实验室的数控机床进行精度检测.如图2所示,激光跟踪仪先后在4个基点位置对机床运动进行测量,总测量时间约为4 h.表4给出了采用四站分时测量时,标定得到的部分测量点坐标.

为了验证多站分时测量方法的可行性,将通过多站分时测量方法标定出的测量点坐标,与单站法激光跟踪仪直接测量出的测量点坐标进行对比.在单站法直接测量时,应将激光跟踪仪尽量靠近机床,以减小角度误差对空间坐标整体精度的影响.表5

给出了部分测量点在 2 种测量方法下的标定偏差。

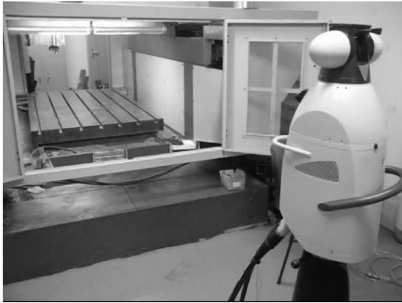


图 2 测量实验平台

表 4 部分测量点的标定结果 mm

测量点	x	y	z
A_1	-100.013 46	0.008 25	-0.007 79
A_2	-200.021 69	0.009 43	-0.011 55
A_3	-300.026 41	0.008 61	-0.004 01
A_4	-500.018 59	-99.993 07	-0.006 62

表 5 部分测量点的标定偏差 mm

测量点	Δx	Δy	Δz
A_1	-0.002 23	0.006 37	0.003 35
A_2	-0.003 27	0.007 46	-0.002 98
A_3	0.003 51	0.006 85	0.007 17
A_4	0.007 28	0.005 45	0.004 96

由表 5 可以看出,在 2 种测量方法下,绝大多数标定得到的测量点坐标都比较接近,因此多站分时测量方法是可行的.个别测量点的坐标最大偏差为 10 μm 左右,这是由于本次实验中 4 个基站位置布局在高度方向上的高度差较小,因此影响了多站分时测量方法的测量精度.在后续实验中,基站布局时应加大 4 个基站位置之间的高度差,同时还可以通过其他检测方法进一步验证该方法的测量精度.

4 多站分时测量误差分析

采用多站分时测量方法时,需要在不同的基站位置对机床相同的运动轨迹进行测量.由于机床误差的存在,在不同时刻测量时,机床的运动轨迹是有所差别的,因此由分时测量引起了测量误差.

采用激光跟踪仪可以实现机床精度的快速检测,以本次实验为例,激光跟踪仪在每个基站位置对机床运动测量一次约为 15 min,由于测量时间较

短,测量环境的变化不会很大,因此对多站测量的结果影响较小.实际测量时,高中档数控机床具有一定的重复性保障,激光跟踪仪在不同基站位置测量时,同一个测量点的实际测量位置偏差不会很大,对于这部分误差,可以通过在每个基站位置,激光跟踪仪对同一个测量点进行多次测量,并求其平均值来获得.这样,在不同基站位置测量时,同一个测量点的实际测量位置偏差将会大大减小,从而也减小了基点位置的标定偏差.

在机床随机误差服从 $[0\ \mu\text{m}, 10\ \mu\text{m}]$ 正态分布、 $r=2\times 10^{-5}$ 的工况下,机床重复定位误差按照 5 μm 给出.激光跟踪仪对同一个测量点在不同测量次数下,由机床重复定位误差引起的基点位置标定偏差进行了仿真.

由表 6 可以看出,每个基站位置对同一测量点进行多次测量,通过求平均可以减小由机床重复定位误差所引起的基点位置标定偏差,并且随着测量次数的增多,基点位置标定偏差减小.因此,在每个基站位置对机床运动轨迹进行多次测量并求其平均,可以比较明显地减小分时测量所带来的测量误差.

表 6 不同测量次数基点位置的标定偏差 mm

测量次数	Δx	Δy	Δz	ΔL
3	-0.002 48	0.001 46	-0.000 13	-0.003 77
6	-0.001 49	0.000 50	-0.000 31	-0.001 38
10	-0.001 40	0.000 80	-0.000 17	-0.001 76

5 结 论

本文采用基于激光跟踪仪的多站分时测量方法来检测机床精度,由于测量过程中只涉及到位移量,因此该方法具有较高的测量精度.同时,采用该方法在 4 h 内完成了对一台数控机床的精度检测,由于检测效率较高,满足了快速、高精度的检测要求,因此适合对中高端数控机床的几何精度检测.

参考文献:

[1] SCHWENKE H, KNAPP W, HAITJEMA H, et al. Geometric error measurement and compensation of machines-an update [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(2):660-675.
[2] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N, et al. Er-

- ror compensation in machine tools-a review: part I geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(9):1235-1256.
- [3] SCHWENKE H, FRANK M, HANNAFORD J. Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2005, 54(1): 475-478.
- [4] 张国雄. 三坐标测量机 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1999: 307-310.
- [5] 张国雄, 林永兵, 李杏华, 等. 四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统 [J]. 光学学报, 2003, 23(9): 1030-1036.
- ZHANG Guoxiong, LIN Yongbing, LI Xinghua, et al. Four-beam laser tracking interferometer system for three-dimensional coordinate measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(9): 1030-1036.
- [6] 刘永东, 王佳, 梁晋文. 动态几何量多站法激光跟踪测量自标定 [J]. 光学技术, 1999(3): 25-27.
- LIU Yongdong, WANG Jia, LIANG Jinwen. Self-calibration of multi-station laser tracking system for dynamic geometric measurement [J]. Optical Technique, 1999(3):25-27.
- [7] 林永兵, 张国雄, 李真, 等. 四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统自标定与仿真 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(2):205-209.
- LIN Yongbing, ZHANG Guoxiong, LI Zhen, et al. Self-calibration and simulation of the four-beam laser tracking interferometer system for 3D coordinate measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(2):205-209.

(编辑 管咏梅)