

基于激光追踪仪多站位测量的 CMM 空域坐标修正方法

陈洪芳¹, 郑博文¹, 石照耀¹, 孙衍强¹, 隆昌宇², 杨再华²

¹北京工业大学北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124;

²北京卫星环境工程研究所, 北京 100029

摘要 三坐标测量机(CMM)是坐标测量技术中高效率的精密测量系统,随着超精密加工技术的发展,对三坐标测量机测量精度的要求越来越高。考虑到三坐标测量机在测量过程中的弱刚性状态,提出了一种基于激光追踪仪多站位测量的三坐标测量机空域坐标修正方法。首先建立激光追踪仪多站位测量系统,然后利用激光追踪仪的高精度干涉测长值对被测空域内的三坐标测量机待测点坐标进行修正,最后利用三线性插值方法对三坐标测量机的被测空域坐标进行修正。仿真实验结果表明利用所提出的空域坐标修正方法得到的标准球直径标准差均值为 $0.098\ \mu\text{m}$,小于三坐标测量机直接测量得到的标准差均值 $0.118\ \mu\text{m}$,验证了所提出的方法可以有效提高三坐标测量机空域坐标精度。

关键词 测量; 三坐标测量机; 激光追踪仪; 多站位测量; 坐标修正

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0304003

CMM Spatial Coordinate Correction Method Based on Laser Tracer Multistation Measurement

Chen Hongfang¹, Zheng Bowen¹, Shi Zhaoyao¹, Sun Yanqiang¹,
Long Changyu², Yang Zaihua²

¹Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²Beijing Satellite Environment Engineering Research Institute, Beijing 100029, China

Abstract Coordinate measuring machine (CMM) is a high efficiency precision measurement system for coordinate measurement technology. As the development of ultra-precision machining technology, the requirement of the measuring precision of CMM is getting higher and higher. Considering the weak rigid body state of CMM in the process of measurement, this paper proposes a CMM spatial coordinate correction method based on multistation measurement of laser tracer. Firstly, the laser tracer multistation measurement system is set up. Then, the coordinate of measuring point of CMM is corrected by using the high precision interference length of the laser tracer. Finally, the measuring spatial coordinate of CMM is corrected by using the trilinear interpolation method. The simulation experimental results show that the average of the standard deviation of the standard sphere diameter obtained by proposed spatial coordinate correction method is $0.098\ \mu\text{m}$, which is smaller than $0.118\ \mu\text{m}$, the average of the standard deviation is directly measured by CMM. The results verify that the proposed method can effectively improve the spatial coordinate accuracy of CMM.

Key words measurement; coordinate measuring machine; laser tracer; multistation measurement; coordinate correction

OCIS codes 120.6085; 080.2720; 200.4560

收稿日期: 2016-10-10; 收到修改稿日期: 2016-11-22

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ17053904)、国家自然科学基金(50805003)、航天器高精度测量联合实验室基金项目

作者简介: 陈洪芳(1980—),女,博士,副教授,主要从事精密测量技术与仪器、激光干涉测量与信号处理等方面的研究。

E-mail: hfchen@bjut.edu.cn

1 引言

坐标测量技术作为国家先进制造领域的前沿技术之一,是衡量精密制造和测量水平的重要标志,并已成为现代机械制造业中保证设备和零件质量的关键^[1-2]。三坐标测量机(CMM)作为坐标测量技术中高效率的精密测量系统,以其测量精度高、速度快、柔性等特点,在现代化的生产制造和航空、航天等领域中起着越来越重要的作用。随着科学技术的进步和超精密加工技术的发展,对 CMM 测量精度的要求越来越高。快速、准确地对 CMM 进行标定,检测出 CMM 的各项误差并进行误差补偿,是提高 CMM 测量精度的重要途径之一^[3],也是一种以较低成本大幅度提高 CMM 测量精度的先进技术手段。

自从 20 世纪 80 年代第一次研制出激光跟踪测量系统以来,面向现场的便携式坐标系统——激光跟踪仪,解决了坐标测量机标定效率和精度提高的难题。激光跟踪仪是一种便携式无框架的坐标测量装置,通过在球坐标系中测量角度、测量长度及运用相应算法求解出目标点的空间坐标。内部的激光干涉仪测量出目标镜相对于跟踪镜之间的距离变化,两个编码器测量出跟踪镜的俯仰角和偏摆角,位置敏感探测器可以检测由于目标镜的移动引起的反射光束和入射光束的偏移,并通过电机驱动控制跟踪镜俯仰和偏摆方向的转动,使光束保持对目标镜的跟踪。基于激光跟踪仪的测量原理,通过多基站下的全球定位系统的定位方法可以实现 CMM 的标定。Wendt 等^[4]建立了一种由至少 4 个激光跟踪仪组成的完整在线测量系统,利用比较在线测量系统测点坐标、CMM 测点坐标得到的三维空间误差,提高 CMM 的测量精度;Gaska 等^[5-6]利用激光跟踪仪测量系统建立了 CMM 的运动残差模型,有效地降低了确定 CMM 运动残差所需的时间,并确定了 CMM 的最优测量空间;张振久等^[7]提出的机床导轨系统误差检测方法,能够推广到多轴平台和多轴机床的误差检测;Wang 等^[8]提出了一种基于激光跟踪仪的多站分时测量方法,适合中高档数控机床的几何精度检测;谢政委等^[9]利用跟踪仪干涉测距构建空间长度基准,提高了区域坐标控制场的精度;殷建等^[10]利用激光跟踪仪证明了旋转轴误差辨识测量方法在误差补偿中的有效性。

激光跟踪仪是专门用于校准数控机床和坐标测量机的激光跟踪系统,干涉仪装在万向节装置中围绕仪作为干涉仪的参考镜的固定球体移动,也因此旋转机械轴的径向和横向偏差并不会显著影响测量精度,激光跟踪的精度不受机械结构的影响,主要取决于参考球面的质量和空间位置的变化,既能大幅度提高测量精度,又能缩短整个检测周期。由于多站位测量模型的解算过程较为繁琐,而且会引入多站位的自标定误差。

本文基于 CMM 在测量过程中的弱刚性体状态,提出了基于激光跟踪仪多站位测量的 CMM 空域坐标修正方法,利用激光跟踪仪的高精度干涉测长值对被测空域内的 CMM 待测点坐标进行优化,得到测量点的高精度坐标值,利用三线性插值方法对 CMM 的被测空域坐标进行修正。应用所提出的激光跟踪多站位测量模型解算方法,可以快速、高精度地实现 CMM 的标定。

2 基于激光跟踪仪的多站位测量系统修正 CMM 空域坐标原理

2.1 多站位测量系统修正 CMM 空域坐标原理

基于激光跟踪仪的多站位测量系统,是将一台激光跟踪仪放置在 CMM 测量平台上,至少放置 4 个位置,并在每一个位置进行完整测量(如图 1 所示),系统实验装置如图 2 所示。为了测量出 CMM 的空间位置点坐标,利用 CMM 在每个空间位置点的坐标值对激光跟踪仪在 CMM 测量平台上的位置进行计算,通过不同基站下激光跟踪仪的坐标,即可标定被测空间点的坐标。利用多个基站上激光跟踪仪测量出的 CMM 测头与激光跟踪仪之间的相对位移得到空间点的理论三维坐标值,进而实现 CMM 的标定。

利用一台激光跟踪仪采用转站的方式构建多站位测量模型。建立方法如下,假设激光跟踪仪在 m 个站位下测量 n 个待测点,激光跟踪仪每个站位的坐标为 $P_j(X_j, Y_j, Z_j)$,待测点坐标为 $A_i(x_i, y_i, z_i)$,激光跟踪仪在每个站位 P_j 对应到第一个待测点 A_1 的距离为 d_j ,激光跟踪仪测量得到的高精度干涉测长值为 l_{ij} ,根据三维空间两点距离公式得到激光跟踪仪在每个站位对应到待测点的距离 d_{ji} :

$$d_{ji} = \sqrt{(x_i - X_j)^2 + (y_i - Y_j)^2 + (z_i - Z_j)^2} = d_j + l_{ij}, \quad (1)$$

式中 $i=1, 2, 3, \dots, n, j=1, 2, 3, \dots, m$ 。

由于在 m 个站位下测量 n 个待测点,所以方程的数目为 $m \times n$ 个,根据(1)式可知未知数的个数为 $4m +$

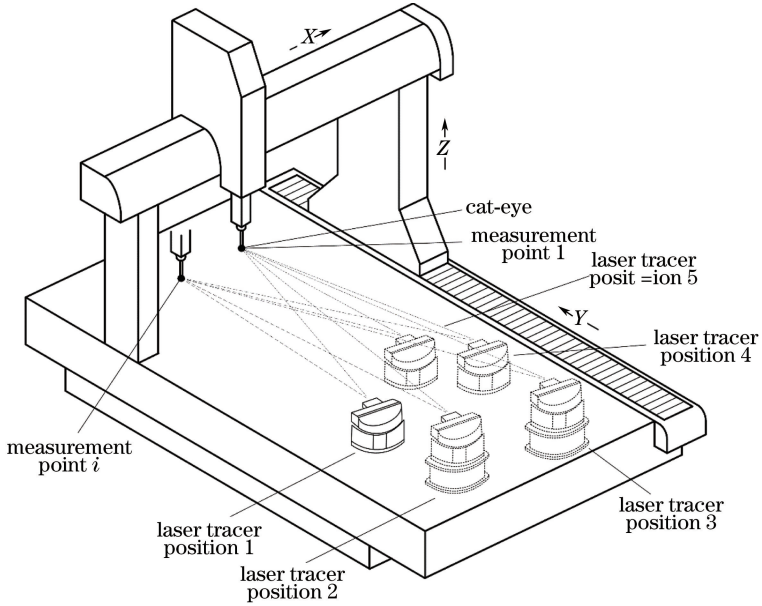


图 1 基于激光追踪仪的多站位测量系统

Fig. 1 Multistation measurement system based on laser tracer

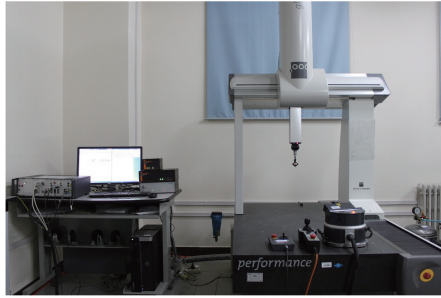


图 2 实验装置

Fig. 2 System experiment setup

$3n$, 为使方程组可解, 应满足下列关系式

$$m \times n \geq 4m + 3n, \quad (2)$$

所以站位 m 应满足 $m \geq 4, n \geq 16$ 。

因为(1)式为超定方程组, 采用最小二乘法求解有

$$F(X_j, Y_j, Z_j, k) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - 2x_i X_j - 2y_i Y_j - 2z_i Z_j + k - 2d_j l_{ij} - l_{ij}^2) \rightarrow 0, \quad (3)$$

式中 $k = X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2 - d_j^2$, (3) 式应满足下列条件

$$\frac{\partial F}{\partial X_j} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial Y_j} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial Z_j} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial d_j} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial k} = 0. \quad (4)$$

求解(4)式可以得到站位坐标 $P_j(X_j, Y_j, Z_j)$ 以及激光追踪仪在每个站位对应到第一个待测点的距离 d_j 。

(3)式同时满足下列条件

$$\frac{\partial^2 F}{\partial X_j^2} = 8 \sum_{i=1}^n x_i^2 > 0, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial Y_j^2} = 8 \sum_{i=1}^n y_i^2 > 0, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial Z_j^2} = 8 \sum_{i=1}^n z_i^2 > 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial d_j^2} = 8 \sum_{i=1}^n l_{ij}^2 > 0, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial k^2} = 2 > 0. \quad (6)$$

用激光追踪仪测得的高精度干涉测长值可以作为约束条件, (1)式可以写为误差方程

$$v_{ij} = \sqrt{(x_i - X_j)^2 + (y_i - Y_j)^2 + (z_i - Z_j)^2} - d_j - l_{ij}. \quad (7)$$

(7)式是非线性方程,直接求解是困难的,采用线性化的方法,将非线性函数化为线性函数,按线性参数进行处理^[11]。为此对(7)式进行一阶泰勒级数展开得到

$$v_{ij} = \sqrt{(x_i |_0 - X_j |_0)^2 + (y_i |_0 - Y_j |_0)^2 + (z_i |_0 - Z_j |_0)^2} + \frac{x_i |_0 - X_j |_0}{L_{ij} |_0} \cdot (dx_i - dX_j) + \frac{y_i |_0 - Y_j |_0}{L_{ij} |_0} \cdot (dy_i - dY_j) + \frac{z_i |_0 - Z_j |_0}{L_{ij} |_0} \cdot (dz_i - dZ_j) - d_j - l_{ij}, \quad (8)$$

式中标为 $|_0$ 的为该数值的近似值,实际计算中测量点的近似值 $x_i |_0, y_i |_0, z_i |_0$ 可以用CMM坐标系下的测量点代替。结合奇异值分解算法与精度控制阈值联合解算模型^[12],根据(8)式即可得到CMM测量点的空域坐标修正值 (dx_i, dy_i, dz_i) 。

2.2 递推迭代法提高测量点坐标修正精度方法

由(8)式可知,应用基于激光追踪仪多站位测量系统修正CMM空域坐标方法得到的修正值 (dx_i, dy_i, dz_i) ,影响其修正精度的变量主要有 $X_j |_0, Y_j |_0, Z_j |_0, d_j$,以上变量求解的精度直接影响测量点坐标修正值的修正精度。提出用递推迭代的方法提高变量 $X_j |_0, Y_j |_0, Z_j |_0, d_j$ 求解的精度。主要方法如下:

- 1) 将测量点坐标 $(x_i |_0, y_i |_0, z_i |_0)$ 与 (dx_i, dy_i, dz_i) 相加,得到初步修正后的测量点坐标 $(x_i |'_0, y_i |'_0, z_i |'_0)$;
- 2) 将 $(x_i |'_0, y_i |'_0, z_i |'_0)$ 和激光追踪仪测量得到的高精度干涉测长值 l_{ij} 代入(4)式,求解得到精度更高的站位坐标 $P'_j(X'_j, Y'_j, Z'_j)$ 和精度更高的激光追踪仪在每个站位对应到第一个待测点的距离 d'_j ;
- 3) 将 $(x_i |'_0, y_i |'_0, z_i |'_0), P'_j(X'_j, Y'_j, Z'_j)$ 和 d'_j 代入(8)式,求解得到迭代的中间修正值 (dx'_i, dy'_i, dz'_i) 。将当前迭代的中间修正值 (dx'_i, dy'_i, dz'_i) 与上次迭代的中间修正值 (dx_i, dy_i, dz_i) 进行比较,比较 (dx'_i, dy'_i, dz'_i) 数值与 (dx_i, dy_i, dz_i) 数值的数量级,如果有降低趋势则后续需继续进行迭代,如没有降低则终止迭代;
- 4) 将 $(x_i |_0, y_i |_0, z_i |_0), P'_j(X'_j, Y'_j, Z'_j)$ 和 d'_j 代入(8)式,求解方程组得到精度较高的修正值;
- 5) 重复步骤1)到4)的过程,其中1)中与 $(x_i |_0, y_i |_0, z_i |_0)$ 进行加法运算的修正值总是最新求解得到的,直到迭代终止。

2.3 CMM空域坐标修正方法

设Q为CMM在测量空间范围内测得的任意一点,坐标为 (x_Q, y_Q, z_Q) 。确定Q点在划分网格空间内所属的小立方体空间。设立方体的8个顶点分别为A、B、C、D、E、F、G、H,其中平面ADHE垂直于CMM的x轴,Q点到平面ADHE的距离为 L_x ;平面ABFE垂直于CMM的y轴,Q点到平面ABFE的距离为 L_y ;平面ABCD垂直于CMM的z轴,Q点到平面ABCD的距离为 L_z ,如图3所示。

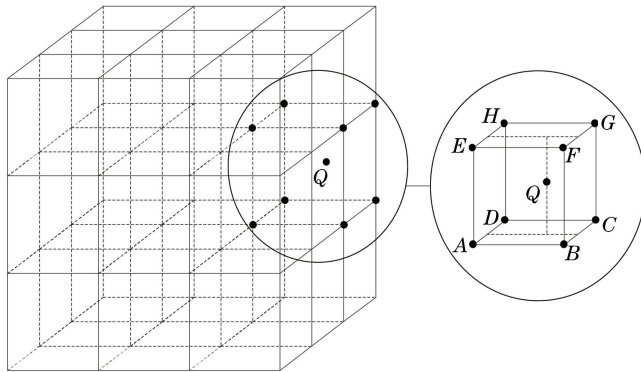


图3 测量空间网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measuring spatial grid

通过2.1和2.2节所述方法得到A、B、C、D、E、F、G、H的测点修正值。利用8个顶点的修正值,三线性插值法求空域中任意一点Q点的误差修正值可以表示为

$$\Delta_Q = (1 - k_3)[(1 - k_1)(1 - k_2)\Delta_A + k_1(1 - k_2)\Delta_B + k_1k_2\Delta_C + (1 - k_1)k_2\Delta_D] +$$

$$k_3[(1-k_1)(1-k_2)\Delta_E + k_1(1-k_2)\Delta_F + k_1k_2\Delta_G + (1-k_1)k_2\Delta_H], \quad (9)$$

式中 $k_1 = \frac{L_x}{|\overrightarrow{AB}|}$, $k_2 = \frac{L_y}{|\overrightarrow{AD}|}$, $k_3 = \frac{L_z}{|\overrightarrow{AE}|}$, $\Delta_A, \Delta_B, \Delta_C, \Delta_D, \Delta_E, \Delta_F, \Delta_G, \Delta_H$ 分别为 A、B、C、D、E、F、G、H 的坐标修正值。

3 实验结果

3.1 递推迭代法提高测量点坐标修正精度的仿真实验

为验证所提出的迭代算法能够有效、正确地提高 CMM 测量点坐标修正精度,设激光追踪仪转站 4 个站位进行测量,空域测量点数量为 18 个,设随机引入的测量点误差曲线如图 4 所示。

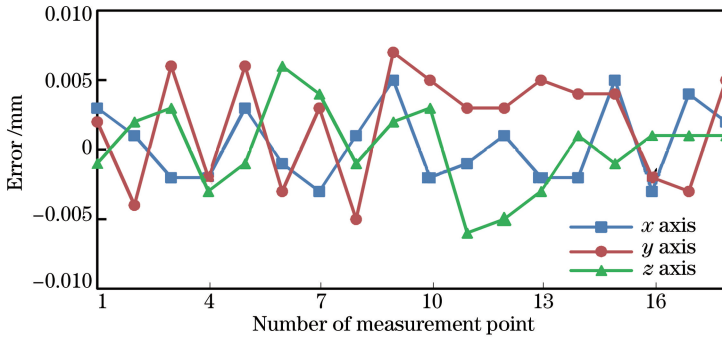


图 4 测量点分别在 x 、 y 、 z 轴方向引入的误差

Fig. 4 Error introduced by measuring point in x , y and z axes

运用所提出的基于激光追踪仪多站位测量对 CMM 空域坐标进行修正的方法,利用激光追踪仪的高精度干涉测长值对 CMM 被测空域内的 18 个待测点坐标进行优化,得到测量点的高精度坐标值,为了分析所提出的递推迭代法的效果,分别计算得到测量点坐标值的不迭代修正值和迭代 3 次后的修正值,将计算得到的数据与图 4 引入的误差进行差值处理,若处理后的差值曲线越接近零,则表明测量点修正精度越高。绘制的误差曲线分别如图 5、6、7 所示,可以看出使用迭代方法后求得的 x 、 y 、 z 轴方向的修正值比不使用迭代的修正值更接近引入误差,这在一定程度上说明了迭代算法的有效性,但需要进一步说明。即使用递推迭代方法后 CMM 空域坐标修正值精度提高。

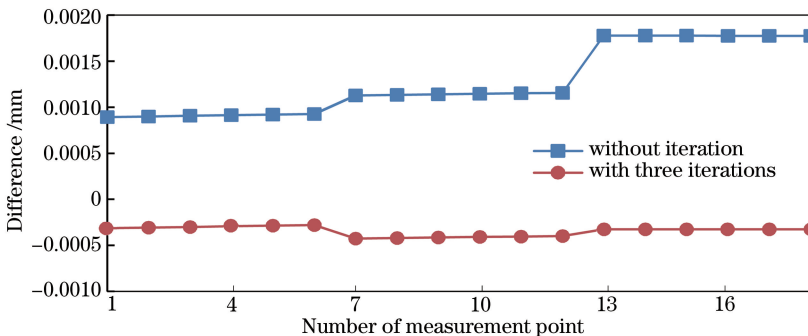


图 5 x 轴方向迭代、不迭代修正值分别与引入误差差值的比较图

Fig. 5 Comparison between introduced error and correction value with and without iteration in x -axis direction

3.2 实验分析

3.2.1 确定 CMM 最优测量空间的实验

CMM 测量空间的不同位置存在不同的误差,在进行尺寸较小零部件的测量时,选取合适的空间位置有利于得到测量精度相对较高的结果。为了确定 CMM 最优测量空间,进行了如下实验。

激光追踪仪转站 5 个站位测量,即 $m=5$,在 CMM 空间中设置 64 个待测点并编号,即 $n=64$,然后按待测点编号的顺序移动激光追踪仪的靶镜并读取激光追踪仪的位移测量值,依次转站激光追踪仪到不同站位,

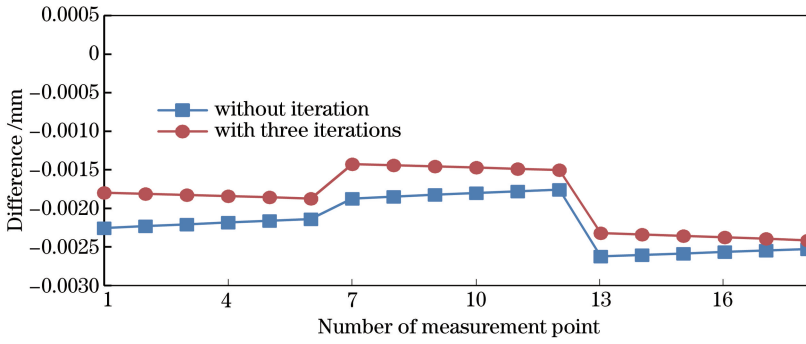


图 6 y 轴方向迭代、不迭代修正值分别与引入误差差值的比较图

Fig. 6 Comparison between introduced error and correction value with and without iteration in y-axis direction

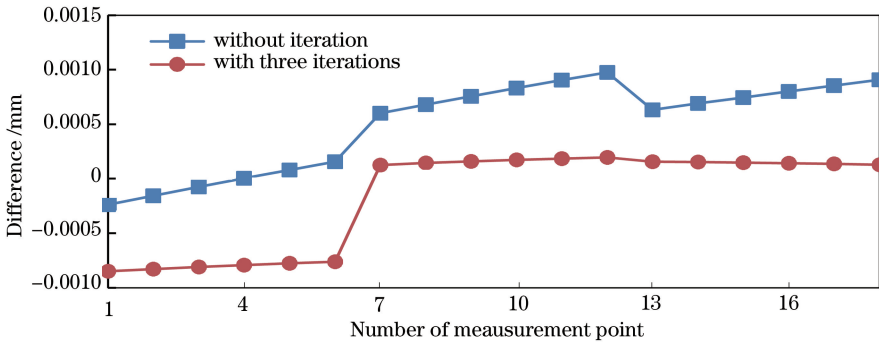


图 7 z 轴方向仿真迭代、不迭代修正值分别与引入误差差值的比较图

Fig. 7 Comparison between introduced error and correction value with and without iteration in z-axis direction

按相同的待测点编号移动靶镜,实验共得到 320 个待测点的激光追踪仪位移测量数据。

首先将激光追踪仪转站测量所得到的数据代入到激光追踪仪多站位测量模型(1)式中,初步解算出激光追踪仪各站位在 CMM 及坐标系下的坐标值;再以(4)式解算的坐标值和 CMM 提供的待测点坐标值作为(8)式中各相应参数的近似值,解算出各待测点的坐标修正值;最后通过加入迭代算法的方法对数据进行处理,得到 64 个待测点在 x 、 y 、 z 三个方向上的修正值,如图 8 所示。

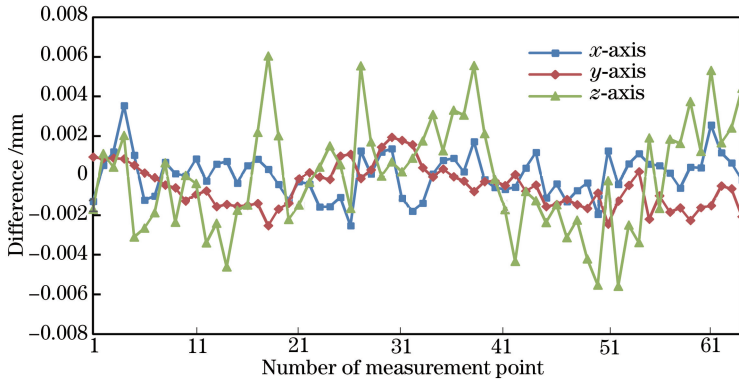


图 8 测点在 x 、 y 、 z 轴方向的修正值

Fig. 8 Correction of the measuring points in the x , y and z axis directions

确定测量空间内任意已知坐标测点在空间细分中的所属小立方体空间,如图 3 所示,然后采用三线性插值模型(9)式对测量空间内任意已知坐标的测点进行修正,图 9、10、11 分别为经三线性插值处理后得到的 CMM 空域坐标在 x 轴、 y 轴、 z 轴方向上修正的示意图。

通过观察图 9、10、11 的颜色区域分布,可以看出 $(270 \sim 340 \text{ mm}) \times (700 \sim 800 \text{ mm}) \times (-500 \sim -450 \text{ mm})$ 、 $(200 \sim 240 \text{ mm}) \times (800 \sim 850 \text{ mm}) \times (-540 \sim -400 \text{ mm})$ 区域中的颜色分布均在浅蓝色到黄色范围之内,即 x 、 y 、 z 轴方向的修正值均在 $-2 \sim 2 \mu\text{m}$ 之间,对比其他区域的颜色分布,可以确定为所选

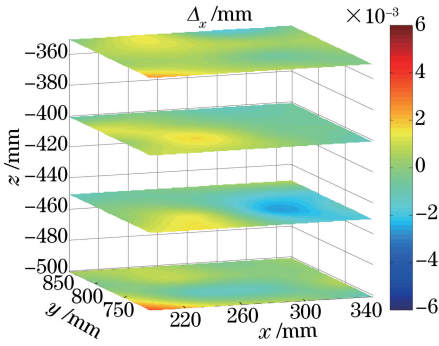


图 9 x 轴方向的空间坐标修正值

Fig. 9 Spatial coordinate correction value in the x -axis direction

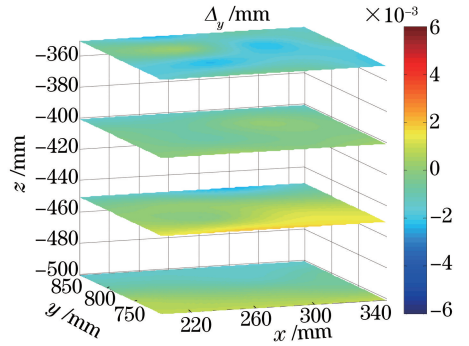


图 10 y 轴方向的空间坐标修正值

Fig. 10 Spatial coordinate correction value in the y -axis direction

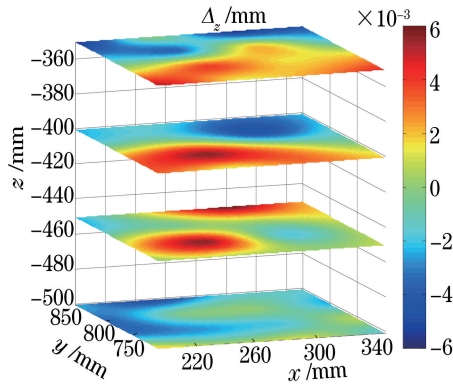


图 11 z 轴方向的空间坐标修正值

Fig. 11 Spatial coordinate correction in the z -axis direction

CMM 测量范围(200~350 mm)×(700~850 mm)×(-600~-350 mm)内的最优测量空间。

3.2.2 验证空域坐标修正方法的实验

为了验证基于激光追踪仪多站位测量的 CMM 空域坐标修正方法,在测量空间范围内选取 4 个位置分别对同一个标准球进行 9 次测量,实验装置如图 12 所示。

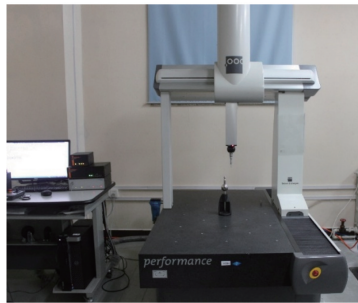


图 12 验证实验装置

Fig. 12 Verification experiment setup

计算在每个位置下标准球直径的测量数据标准差,比较 CMM 测量数据结果和进行修正之后的数据结果,如图 13 所示。可以看出使用空域坐标修正方法得到标准球直径的标准差小于 CMM 直接测量得到的标准差。CMM 直接测量的标准差均值为 $0.118 \mu\text{m}$,使用空域坐标修正方法得到标准球直径的标准差均值为 $0.098 \mu\text{m}$,可知空域坐标修正方法具有较好的误差修正效果。

4 结 论

通过激光追踪仪多站位测量系统测得的冗余数据,利用最小二乘法、泰勒级数展开、递推迭代、三线性插

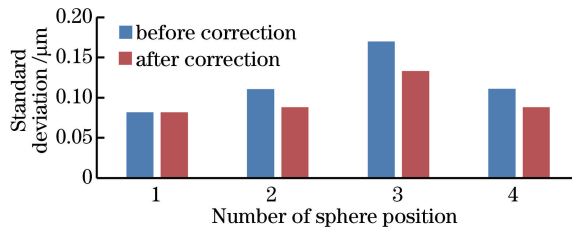


图 13 修正前后测得球直径的标准差

Fig. 13 Standard deviation of the measured diameter of sphere before and after correction

值完成对 CMM 空域坐标进行修正。实验结果表明:空域坐标修正方法利用激光追踪仪的测量数据,能够确定 CMM 的最优测量空间,提高了 CMM 的三维测量精度,使用空域坐标修正方法得到的标准差均值为 $0.098 \mu\text{m}$,具有较好的误差修正效果。所提出的方法提高了 CMM 的测量精度,此外所提出的方法还适用于其他坐标测量系统以及加工机床等。

参 考 文 献

- [1] Shi Zhaoyao, Zhang Bin, Lin Jiachun, *et al.* Half century of coordinate metrology technology—evolution and trends [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(5): 648-656.
石照耀, 张 斌, 林家春, 等. 坐标测量技术半世纪—演变与趋势 [J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(5): 648-656.
- [2] Zhang Guoxiong. Development of coordinate measuring technology [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2008, 44(3): 16-19.
张国雄. 坐标测量技术新进展 [J]. 航空精密制造技术, 2008, 44(3): 16-19.
- [3] Zhu Jia, Li Xingfei, Tan Wenbin, *et al.* Method of geometric error detection for measuring machine based on laser interferometer [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 25-30.
朱 嘉, 李醒飞, 谭文斌, 等. 基于激光干涉仪的测量机几何误差检定技术 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 25-30.
- [4] Wendt K, Franke M, Hartig F. Measuring large 3D structures using four portable tracking laser interferometers [J]. Measurement, 2012, 45(10): 2339-2345.
- [5] Gaska A, Krawczyk M, Kupiec R, *et al.* Modeling of the residual kinematic errors of coordinate measuring machines using laser tracer system [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2014, 73(1): 497-507.
- [6] Sladek J, Gaska A, Olszewska M, *et al.* Virtual coordinate measuring machine built using laser tracer system and spherical standard [J]. Metrology and Measurement Systems, 2013, 20(1): 77-86.
- [7] Zhang Zhenjiu, Hu Hong, Liu Xin. Measurement of geometric error of machine tool guideway system based on laser tracker [J]. Chinses J Lasers, 2011, 38(9): 0908002.
张振久, 胡 泓, 刘 欣. 基于激光跟踪仪的机床导轨系统误差检测 [J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0908002.
- [8] Wang J D, Guo J J. Algorithm for detecting volumetric geometric accuracy of NC machine tool by laser tracker [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(1): 166-175.
- [9] Xie Zhengwei, Lin Jiarui, Zhu Jigui, *et al.* Accuracy enhancement method for coordinate control field based on space length constraint [J]. Chinses J Lasers, 2015, 42(1): 0108005.
谢政委, 林嘉睿, 邾继贵, 等. 基于空间长度约束的坐标控制场精度增强方法 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0108005.
- [10] Yin Jian, Li Ming. Errors measurement for rotation axis of five-axis machine tool based on laser tracker [J], Chinses J Lasers, 2015, 42(4): 0408005.
殷 建, 李 明. 基于激光跟踪仪的五轴机床旋转轴误差测量 [J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408005.
- [11] Fei Yetai. Error theory and data processing [M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 60-62.
费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 60-62.
- [12] Chen Hongfang, Yan Hao, Shi Zhaoyao. Laser tracking multi-station positioning method for Mega-gear [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9): 2375-2380.
陈洪芳, 闫 昊, 石照耀. 面向特大型齿轮的激光跟踪多站位定位 [J]. 光学 精密工程, 2014, 22(9): 2375-2380.