

基于空间长度约束的坐标控制场精度增强方法

谢政委 林嘉睿* 郝继贵 任 瑜

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 为了实现大空间几何量测量的全局定向和精度控制,需要在空间内构建精密三维坐标控制场。目前,利用激光跟踪仪单站建立坐标控制场是最有效手段,但面对局部更高的测量精度需求,必须减小全局定向过程中的转站误差,增强区域的控制场精度。利用激光跟踪仪干涉测距精度高的特性,并用跟踪仪靶球座配合碳纤维杆现场构造多个空间长度基准(微米量级精度),长度基准可灵活布置于所需空间区域,作为约束加入到跟踪仪多站位对控制点的冗余测量过程当中,从而克服单站空间遮挡问题并优化跟踪仪测角误差,进一步提高所构建长度基准的控制点坐标精度,实现区域测量场的精度增强。实验结果表明,该方法可使全局定向精度在10 m测量范围内优于0.04 mm,进一步满足现场大空间几何量测量的高精度要求。

关键词 测量; 坐标控制场; 精度增强; 长度约束; 激光跟踪仪

中图分类号 TB92

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0108005

Accuracy Enhancement Method for Coordinate Control Field Based on Space Length Constraint

Xie Zhengwei Lin Jiarui Zhu Jigui Ren Yu

*State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University,
Tianjin 300072, China*

Abstract In order to achieve global orientation and accuracy control in large space geometric measurement, precise three-dimensional coordinate control field need to be established. Using a laser tracker to establish coordinate control field by single station is the most effective means recently. But in face of higher accuracy in local area, coordinate transform error between stations must be reduced in the process of global orientation, and accuracy of control field in the region must be enhanced. By using high accuracy ranging interference of laser tracker, multiple spatial length standards are constructed with carbon fiber rods and target ball seats, and arranged flexibly in the desired region in the space. In the process of using a laser tracker to make redundant measurement of control points by multi-station, length standards are added as constraints to overcome space occlusion and optimize tracker angle measurement error, further improve the coordinate accuracy of control points used to construct length standard, thus enhance the local field measurement accuracy. The experimental results show that accuracy of global orientation is better than 0.04 mm in the range of 10 m with this method, which meets high accuracy requirement of large space geometric measurement.

Key words measurement; coordinate control field; accuracy enhancement; length constraint; laser tracker

OCIS codes 120.3930; 120.5700; 280.3400

收稿日期: 2014-07-11; 收到修改稿日期: 2014-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(51225505、51305297)、高等学校博士学科点专项科研基金(20130032120067)

作者简介: 谢政委(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光及光电测试技术等方面的研究。E-mail: xie2008hit@126.com

导师简介: 郝继贵(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事激光及光电测试技术等方面的研究。

E-mail: jiguizhu@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: linjr@tju.edu.cn

1 引 言

随着高端重大型装备制造水平的提高,在航空、航天、水电、船舶等制造装配领域,大型装备的几何量测量面临着测量空间尺寸大与测量精度要求高两者难以兼顾的问题,制约着大型装备的研制和制造工艺的进步^[1-3]。为了解决测量范围与测量精度之间的矛盾,实现大空间几何量测量的全局定向和精度控制,必须在空间内构建用于全局坐标系统一的三维坐标控制场^[4]。高精度的坐标控制场能够有效地减小转站定向过程中测量数据的精度损失,提高大型装备的几何量测量精度。

传统的三维坐标控制场多采用经纬仪、全站仪以及摄影测量等构建^[5-6],然而经纬仪测量效率低^[7],全站仪测量精度不高,摄影测量所用合作靶标不方便^[8-9],这些不足限制了坐标控制场应用于更广泛场合。激光跟踪仪作为一种大尺寸三维坐标测量仪器,具有测量范围大、精度高、效率高优点,因此利用激光跟踪仪单站式构建坐标控制场是目前最有效手段。然而单站式测量只能覆盖跟踪仪自身有限的测量空间,且测量过程中容易出现空间遮挡,另外激光跟踪仪的测角误差相对较大(1.5"左右),降低了控制点的测量精度,导致转站误差增大,因此在测量精度要求更高的场合,单站式测量难以满足测量需求。

目前,提高控制点精度是减小转站误差最有效手段^[10-12],能直接增强控制场精度,因此本文从提高转站控制点测量精度出发,利用激光跟踪仪干涉测距精度高的特性(0.5 μm/m),提出一种基于空间长度约束的坐标控制场精度增强方法,该方法摒弃了成本较高的实物基准尺,而在跟踪仪干涉测距方向利用靶球座配合碳纤维杆(热膨胀系数极小)现场灵活构建多个空间长度基准,构建后的基准可灵活布置于所需空间区域,其构造长度基准的控制点形成了待增强的区域坐标控制场,随后把长度约束加入到跟踪仪多站位对全局控制点的冗余测量过程当中,优化跟踪仪的测角误差,提高所构建长度基准的控制点坐标精度,利用该区域控制点进行转站所带来的误差进一步降低,从而提高整体测量精度。

2 长度基准的构建

激光跟踪仪的距离测量采用激光干涉测距,可直接溯源至激光波长,具有极高的测量精度,因此可利用高精度的激光干涉测距现场标定控制点间的距离,实现空间内任意尺度长度基准的构建。空间长度基准构建过程如下:把靶球座安放于碳纤维杆的两端,形成空间基准尺,由于受跟踪仪测角精度的制约,基准长度的矢量方向必须置于跟踪仪干涉测距方向,便可得到溯源到干涉精度的长度基准。

如图1所示,设碳纤维杆两端控制点为A、B,激光跟踪仪所在位置为T,T到AB连线的垂线交AB于S,则控制点间的距离d用(1)式表示:

$$d = l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos \theta_2, \quad (1)$$

式中 l_1 、 l_2 为控制点A、B激光干涉测距的观测值, θ_1 、 θ_2 为控制点A、B的激光干涉测距方向与AB连线的夹角。

对(1)式求导,得

$$\Delta d = \cos \theta_1 \Delta l_1 - l_1 \sin \theta_1 \Delta \theta_1 - \cos \theta_2 \Delta l_2 + l_2 \sin \theta_2 \Delta \theta_2, \quad (2)$$

式中 Δd 为控制点间距离d的测量误差, Δl_1 、 Δl_2 为激光干涉测距误差, $\Delta \theta_1$ 、 $\Delta \theta_2$ 为激光跟踪仪的测角误差。

当激光跟踪仪位于AB连线的延长线上,即 $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ 时,(2)式简化为

$$\Delta d = \Delta l_1 - \Delta l_2. \quad (3)$$

此时,控制点A、B位于干涉测距方向,控制点间距离的测量误差主要取决于激光跟踪仪的干涉测距误差,激光跟踪仪的测角误差可以忽略,这样即可将控制点间距离的标定精度溯源至激光干涉测距的精度。利用这一特性,可以精确标定控制点间的距离。

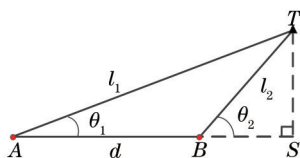


图1 长度基准构建数学模型

Fig.1 Construction model for length standard

如图2所示,将碳纤维杆架设在激光跟踪仪正前方放置的两个三角架上,调整三脚架高度,使两控制点连线与跟踪仪干涉测距方向基本重合(为了便于调整,通常使碳纤维杆两端控制点的 Z 坐标基本为0),即(2)式中的 θ_1 、 θ_2 角度基本为0,从而利用高精度的激光干涉测距标定碳纤维杆上控制点间的距离,实现长度基准的构建。

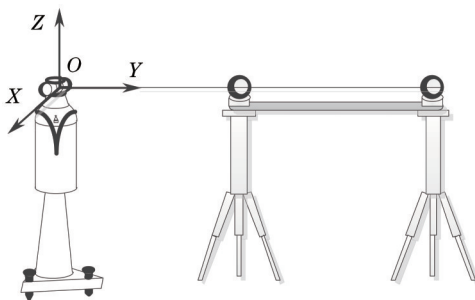


图2 控制点间长度基准的标定
Fig.2 Calibration of length standard between control points

3 区域精密三维坐标控制场的建立

3.1 引入长度基准的初始坐标控制场

如图3所示,在标定好若干个(需要2个以上)空间长度基准的基础上,建立三维坐标控制场的一般过程是:首先在测量空间布设多个全局控制点,将标定好的碳纤维杆灵活置于控制场中所需的精度增强区域(如阴影部分所示),将碳纤维杆两端的控制点加入到全局控制点当中,即引入空间长度基准;激光跟踪仪在空间中多个站位依次测量全局控制点,从而建立多测站冗余测量的坐标控制场。得到每个站位下全局控制点的三维坐标后,可通过相应的数据配准算法,将每个测站坐标系下的数据配准到统一的全局坐标系下(如以第一个站位坐标系作为全局坐标系),从而实现所有测量站位的方位定向。

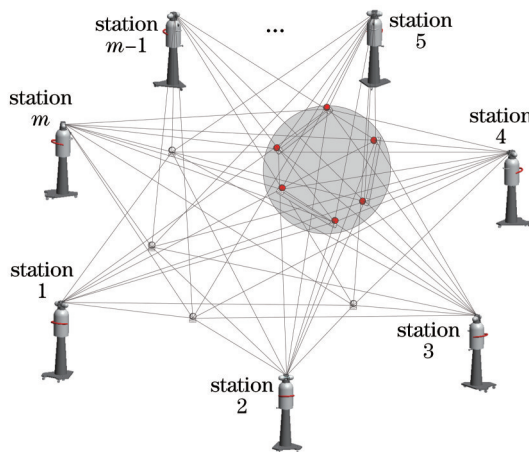


图3 激光跟踪仪建立坐标控制场
Fig.3 Coordinate control field constructed by laser tracker

3.2 全局控制点三维坐标的优化

通过数据配准算法得到各测量站位间的方位定向关系后,根据激光跟踪仪测量原理建立跟踪仪测长、水平角、垂直角约束方程,并利用构建的长度基准建立高精度的长度约束方程,对全局控制点的三维坐标进行优化改正。

假设测量空间中存在 n 个全局控制点,控制点在全局坐标系下的三维坐标为 (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, 2, \dots, n$ 。激光跟踪仪在空间中 m 个站位下测量这 n 个全局控制点,每个站位在全局坐标系下的三维坐标为 (X_j, Y_j, Z_j) , $j = 1, 2, \dots, m$ 。

每个测量站位局部坐标系下控制点的三维坐标由全局坐标系下控制点的三维坐标通过(4)式转换得到

$$\begin{bmatrix} x_{ij}^s \\ y_{ij}^s \\ z_{ij}^s \end{bmatrix} = \mathbf{R}_j \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 \mathbf{R}_j 为全局坐标系到站位 j 局部坐标系的旋转矩阵。在测量站位局部坐标系下控制点的三维坐标 $(x_{ij}^s, y_{ij}^s, z_{ij}^s)$ 转换成球坐标测量参数为 $(l_{ij}^s, \alpha_{ij}^s, \beta_{ij}^s)$ 。

在测量空间中,长度基准两端全局控制点间的距离 L_k 表示为

$$L_k = \sqrt{(x_{k1} - x_{k2})^2 + (y_{k1} - y_{k2})^2 + (z_{k1} - z_{k2})^2}, \quad (5)$$

式中 (x_{k1}, y_{k1}, z_{k1}) 和 (x_{k2}, y_{k2}, z_{k2}) 分别为全局坐标系下第 k 个长度基准两端全局控制点的三维坐标, $k = 1, 2, \dots, m_1$ (m_1 为构造的长度基准个数)。

实际测量过程中,激光跟踪仪在 m 个站位下测量 n 个全局控制点,得到各测量站位坐标系下的 $m \cdot n$ 组球坐标测量参数 $(l_{ij}^s, \alpha_{ij}^s, \beta_{ij}^s)$, 构造的长度基准为 L_k^u , $k = 1, 2, \dots, m_1$ 。

建立激光跟踪仪测长、水平角、垂直角约束方程及长度约束方程,表示为

$$\begin{cases} \Delta_{ij}^l = \arctan[(l_{ij}^s - l_{ij}^u)/l_{ij}^s] \\ \Delta_{ij}^\alpha = \alpha_{ij}^s - \alpha_{ij}^u \\ \Delta_{ij}^\beta = \beta_{ij}^s - \beta_{ij}^u \\ \Delta_k^L = \arctan[(L_k - L_k^u)/L_k] \end{cases}, \quad (6)$$

式中反正切转换用以保证量纲的统一。对于 m 个站位、 n 个全局控制点和 m_1 个长度基准,可建立 $3mn + m_1$ 个约束方程。

以激光跟踪仪各站位间方位定向得到的全局控制点坐标 (x_i^0, y_i^0, z_i^0) 和跟踪仪站位坐标 (x_j^0, y_j^0, z_j^0) 作为迭代初值,采用非线性最优化方法求解,即可得到全局控制点三维坐标的优化值。

4 实验验证

上述对长度基准的构建和引入长度基准的精密三维坐标控制场的构建进行了描述,为了验证理论分析的可行性,设计了两个实验:1) 基准长度精度验证实验;2) 长度约束增强控制场测量精度验证实验。

4.1 基准长度精度验证实验

实验采用的激光跟踪仪是 Leica 公司的 AT901-LR, 其干涉测长精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}/\text{m}$, 角度测量精度为 $6 \mu\text{m}/\text{m}$ 。实验环境如图 4 所示,步骤如下:

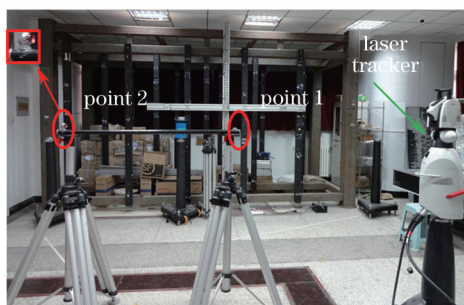


图 4 实验环境图

Fig.4 Experimental environment

1) 利用上文所述长度基准构建方法,在测量空间距离碳纤维杆中心 3 m 的站位 T1 处放置激光跟踪仪,调整控制点 Z 坐标基本为 0,使得两个控制点与跟踪仪坐标原点位于一条直线上,标定碳纤维杆两端控制点间距离 100 次;

- 2) 在距刚性杆中心相同距离的其他5个不同方位设置激光跟踪仪站位(T2~T6),两个控制点连线与跟踪仪不在一条直线,形成5个不同角度,在每个站位下激光跟踪仪标定碳纤维杆两端控制点间距离100次;
- 3) 统计不同站位下控制点间距离测量标准差,如表1所示。

表1 不同站位控制点间距离标定结果

Table 1 Calibration result of distance between control points by different stations

Station	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Standard deviation /mm	0.005	0.018	0.023	0.031	0.037	0.025

由表1分析可知,其他站位(T2~T6)下的控制点间距离标准差比站位T1大一个数量级,是由于受激光跟踪仪测角误差的影响,站位T1下的距离标准差达到了微米量级,从而证明利用长度基准构建方法标定控制点间距离的精度可溯源至干涉测长精度。

4.2 长度约束增强控制场测量精度验证实验

如图5所示,在15 m×10 m×4 m的测量空间内布设10个全局控制点,点 $P_1\sim P_6$ 依托于标定好的空间长度基准,灵活布置在所需区域,其他全局控制点分布较为均匀。在空间内设置8个不同的测量站位,在每个站位下激光跟踪仪测量每个全局控制点的三维坐标,逐次变换站位,直至完成全部测量任务。任意选取一个激光跟踪仪站位(如站位1)作为基准站建立全局坐标系,通过方位定向初步建立三维坐标控制场。随后建立激光跟踪仪测长、水平角、垂直角约束方程及高精度的长度约束方程,构建精密三维坐标控制场,优化全局控制点的三维坐标。

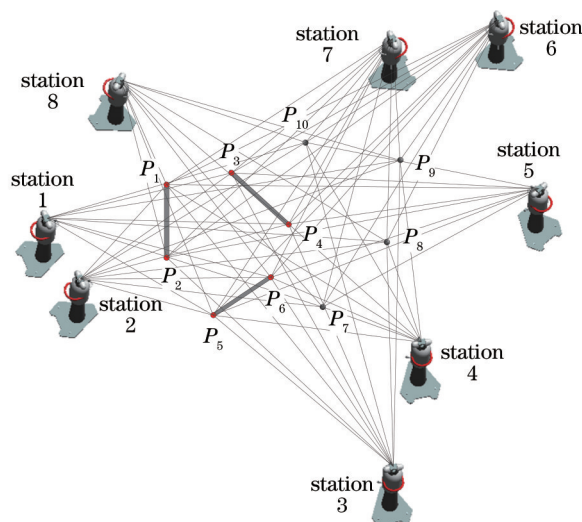


图5 激光跟踪仪测量布局

Fig.5 Layout of laser tracker measurement

为了验证长度约束增强控制场测量精度的有效性,选取构建长度基准的全局控制点为转站公共控制点,以站位2坐标系作为基准坐标系,分别根据优化前后公共控制点的三维坐标,将若干其他站位公共控制点的三维坐标定向到基准坐标系下,比较优化前后公共控制点的转站误差 $\Delta(\Delta = \Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2)^{113-151}$,如表2、3所示。

表2 优化前公共控制点转站误差

Table 2 Transformation error by common points before optimization

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
Station 3 /mm	0.065	0.060	0.062	0.056	0.057	0.055
Station 4 /mm	0.062	0.059	0.061	0.053	0.056	0.054
Station 5 /mm	0.059	0.060	0.057	0.055	0.058	0.053
Station 6 /mm	0.062	0.061	0.056	0.058	0.063	0.057
Station 8 /mm	0.047	0.051	0.049	0.054	0.052	0.055

表3 优化后公共控制点转站误差

Table 3 Transformation error by common points after optimization

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
Station 3 /mm	0.037	0.034	0.035	0.031	0.033	0.032
Station 4 /mm	0.035	0.033	0.034	0.030	0.032	0.031
Station 5 /mm	0.033	0.032	0.030	0.029	0.034	0.028
Station 6 /mm	0.036	0.035	0.031	0.034	0.037	0.033
Station 8 /mm	0.026	0.031	0.028	0.032	0.030	0.032

由表2、3比较可知,优化后公共控制点的转站误差明显好于优化前的转站误差,在10 m范围内整体转站误差优于0.04 mm,从而验证了利用长度约束增强精密三维坐标控制场的精度的方法是有效可行的。

5 结 论

针对激光跟踪仪单站建立坐标控制场精度不能满足测量需求以及可能存在空间遮挡等问题,提出一种利用空间长度基准作为约束提高三维坐标控制场精度的方法。该方法利用跟踪仪干涉测距构建空间长度基准作为约束,结合跟踪仪多站位对控制点的冗余测量,优化跟踪仪的测角误差,提高区域坐标控制场的精度。实验结果表明,利用激光干涉测距构造长度基准的精度能够达到微米量级;利用长度约束增强控制场的区域测量精度有效可行,在10 m范围内的转站精度优于0.04 mm。该方法的优势在于,现场只需一台激光跟踪仪便可构造达到激光干涉测距精度的长度基准,无需其他额外设备,摒弃成本较高的实物基准尺及干涉测距模块。构建的长度基准可随意布置,增强所需区域的控制场精度,体现了控制场的可重构性。

参 考 文 献

- 1 Ye Shenghua, Zhu Jigui, Zhang Zili, *et al.*. Status and development of large-scale coordinate measurement research[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29(4A): 1-6.
叶声华, 郝继贵, 张溢黎, 等. 大空间坐标尺寸测量研究的现状与发展[J]. *计量学报*, 2008, 29(4A): 1-6.
- 2 W T Estler, K L Edmundson, G N Peggs, *et al.*. Large-scale metrology—an update[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2002, 51(2): 587-609.
- 3 Hu Jinzhong, Yu Xiaofen, Peng Peng, *et al.*. Layout optimization of three-dimensional coordinate measurement system based on laser multi-lateration[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0108006.
胡进忠, 余晓芬, 彭 鹏, 等. 基于激光多边法的坐标测量系统布局优化[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0108006.
- 4 Cui Xiaochuan, Zhu Jigui, Long Changyu. Method of 3D shape measurement by using global control net[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 22(6): 3009-3013.
崔晓川, 郝继贵, 隆昌宇. 基于全局控制网的三维形貌测量方法[J]. *中国机械工程*, 2013, 22(6): 3009-3013.
- 5 G N Peggs, P G Maropoulos, E B Hughs, *et al.*. Recent developments in large-scale dimensional metrology[C]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2009, 223(B6): 571- 595.
- 6 He Bingwei, Lin Dongyi, Chen Zhipeng, *et al.*. Research of eliminating occlusion in visual construction of three-dimensional objects [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0708007.
何炳蔚, 林东艺, 陈志鹏, 等. 三维物体视觉测量重构中解决遮挡问题的方法研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0708001.
- 7 Tian Liude, Liu Chaohui, Zhao Jianke, *et al.*. Indoor test method of attitude measurement accuracy of photoelectric theodolite[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 34(8): 0812002.
田留德, 刘朝晖, 赵建科, 等. 光电经纬仪姿态测量精度室内检测方法[J]. *中国激光*, 2014, 34(8): 0812002.
- 8 Long Changyu, Zhu Jigui, Guo Yin, *et al.*. Correspondence method based on spatial intersection in portable visual metrology[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 34(8): 0815001.
隆昌宇, 郝继贵, 郭 寅, 等. 移动视觉测量中基于空间交会的匹配方法[J]. *中国激光*, 2014, 34(8): 0815001.
- 9 Liu Changjie, Ma Shuang, Guo Yin, *et al.*. Study on calibration technology of high-precision flexible coordinate measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1012002.
刘常杰, 马 爽, 郭 寅, 等. 高精度柔性坐标测量系统及其校准技术研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1012002.

- 10 Zhang Haolin, Lin Jiarui, Zhu Jigui. Three-dimensional coordinate transformation accuracy and its influencing factors[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(10): 26-31.
张皓琳, 林嘉睿, 郝继贵. 三维坐标转换精度及其影响因素的研究[J]. 光电工程, 2012, 39(10): 26-31.
- 11 Guo Yingqi, Tang Bin, Zhang Qiujiang, *et al.*. Research on coordinate transformation method of high accuracy based on space rectangular coordinates system[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(3): 125-128.
郭英起, 唐 彬, 张秋江, 等. 基于空间直角坐标系的高精度坐标转换方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(3): 125-128.
- 12 Hughes, A Forbes, A Lewis, *et al.*. Laser tracker error determination using a network measurement[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(4): 045103.
- 13 Fei Yetai. Error Theory and Data Processing (6th Edition)[M]. Beijing: China Machine Press, 2010. 60-62.
费业泰. 误差理论与数据处理(第六版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010. 60-62.
- 14 S Aguado, D Samper, J Santolaria, *et al.*. Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 53(1): 160-169.
- 15 N A Barakat, M A Elbestawi, A D Spence. Kinematic and geometric error compensation of a coordinate measuring machine[J]. Machine Tool Manufacture International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(6): 833-850.

栏目编辑: 何卓铭