

基于外部实物标准的激光跟踪仪基站标定原理及方法研究

李海涛* 徐曙磊 王雅雯 白晓宾 荆晓宁

陕西科技大学机电工程学院,西安,710021

摘要:设计了一种适用于激光跟踪仪基站标定的外部实物标准——基站标测定仪。介绍了激光跟踪仪的基站标定原理;采用高精度三坐标测量机对基站标测定仪重复定位精度进行测量,验证了其具有高精度重复定位的特点,验证了基站标定原理的可行性,可实现靶镜空间的精确定位;最后引入基站标测定仪至数控机床定位误差测量实验,并与激光干涉仪测量结果进行对比,研究发现,两种测量原理误差值变化趋势基本一致,X轴定位误差测量最大偏差为 $1.8\ \mu\text{m}$,Y轴定位误差测量最大偏差为 $2.3\ \mu\text{m}$ 。结果表明,基站标测定仪的标定原理是可行的,精度满足激光跟踪仪标定要求,测量结果与现有成熟设备一致性好,该方法为激光跟踪仪基站标定提供了一种新的思路。

关键词:基站标定;实物标准;误差测量;激光跟踪;数控机床

中图分类号: TG659; TN249

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.08.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Calibration Principle and Method of Laser Tracker Base Stations Based on External Physical Standard

LI Haitao* XU Shulei WANG Yawen BAI Xiaobin JING Xiaoning

School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, 710021

Abstract: A kind of external physical standard for laser tracker base station calibration was designed, which was called BSC. Firstly, the principle of BSC of laser tracker was introduced. Then a high-precision CMM was used to measure the repeated positioning accuracy of the BSC, which verified the characteristics of high-precision repeated positioning, verified the feasibility of the calibration principle of the base stations, and might realize the accurate positioning of the target mirror in space. Finally, the BSC was introduced into the CNC machine tool positioning error measurement experiments, and the measurement results were compared with that of the laser interferometer. The research finds that the two measurement principles of the error value change trends are basically the same, the maximum deviation of X axis positioning error measurement is as $1.8\ \mu\text{m}$, the maximum deviation of Y axis positioning error measurement is as $2.3\ \mu\text{m}$. The results show that the calibration principle of the BSC is feasible, the accuracy meets the calibration requirements of the laser trackers, and the measurement results are in good agreement with the existing mature equipment. This method puts forward a new idea and method for the calibration of the laser tracker base stations.

Key words: base station calibration (BSC); physical standard; error measurement; laser tracking; CNC machine tool

0 引言

数控机床作为装备制造业的“工业母机”^[1],是先进制造与工业智能化的基石,是产业国际竞争的前沿^[2],不仅广泛应用于消费电子、光电产品

等行业,同时在航空航天等涉及国家命脉的领域占有极其重要的地位^[3]。随着航空航天、军工、船舶、汽车等行业的发展,对数控机床加工精度也提出了越来越高的要求^[4]。目前我国数控机床产业快速发展,但由于核心技术的缺失,在数控机床的精度检测等方面仍旧存在不足^[5],故开展数控机床精度检测等方面的研究尤为重要。

影响数控机床加工精度的因素有很多,包括机床结构参数、加工参数及多项误差等^[6]。其中几何误差对机床加工精度的影响最大,达到40%

收稿日期:2024-06-01

基金项目:国家自然科学基金(52105556);陕西省教育厅服务地方专项(24JC007);陕西省重点研发计划“三项改革”综合试点项目(2023GXLH-080);陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2024QCY-KXJ-006);西咸新区科技计划重点研发计划(XJZZ-2023-009)

以上^[7]。科技发展日新月异,各种测量仪器不断换代升级,各类测量方法层出不穷^[8],激光跟踪仪作为一种三维动态的高精度测量仪器,在机床误差检测中具有先天优势,已经被广泛应用于数控机床精度检测领域^[9]。目前,利用多台激光跟踪仪进行误差检测依然采用机床定位系统读数进行基站标定,导致基站标定精度差、测量结果无法溯源、测量精度无法评定。近年来,国内外学者对基站标定算法、布局优化等方面开展了相关研究。ZHANG等^[10]提出一种基于平面约束原理的系统参数算法,有效提高了测量精度,显著减小了系统误差。GUILLORY等^[11]以较低成本设计了一套由四个测量头和单个旋转靶镜组成的多边法测量系统,该系统测量精度优于50 μm。李笑宇等^[12]提出了标定点十字交叉分布的自标定优化方法,提高了基站自标定的精度。但是上述方法在基站自标定过程中,采用的原始数据皆来自于数控机床定位系统坐标读数,其本身包含数控机床各项误差,标定结果引入了机床自身误差。

激光跟踪仪基站标定技术一直是行业难题,针对这一问题,本文对激光跟踪仪基站标定原理和被测点测量方法进行研究,提出了一种适用于激光跟踪仪基站标定的基本原理,制造了实物标准——基站标定义。通过基站标定义实现了激光跟踪仪基站标定和被测点测量。

1 激光跟踪仪基站标定原理

1.1 被测点多站位多边法测量原理

激光跟踪仪在测量之前,首先必须知道激光跟踪仪相对于数控机床坐标系的具体坐标(如图1所示 n_i 的坐标),准确确定激光跟踪仪坐标的过程就是基站标定。一般采用多站位多边法测量^[13-14],测量原理如图1所示, M 为被测点坐标。通过获得多个 n_i 初始基站点坐标,以及它们相对于被测点 M 的距离,建立方程组获得 M 点坐标值。在实际测量过程中,增加一路或多路冗余测量,引入 $n(n \geq 4)$ 个初始基站点形成冗余方程,通过不断引入初始基站点使得冗余方程个数大于未知量个数,以此来获得初始基站点的系统参数和被测目标点的坐标值,从而实现空间目标点的测量。多站位多边法测量能够利用冗余数据来实现系统迁移和挡光自动恢复等功能,同时基于激光测距原理,具有良好的系统稳定性和测量精度。

从测量原理来看,采用激光跟踪仪进行测量

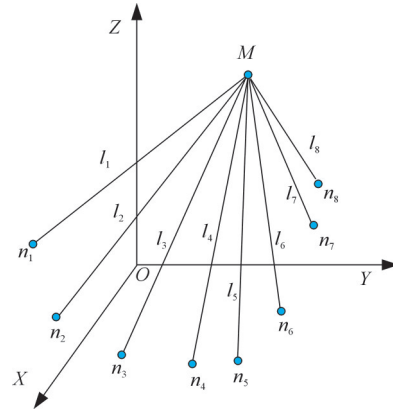


图1 多站位多边法测量原理

Fig.1 Multi-station multi-lateral measurement principle

包含两个步骤:一是对激光跟踪仪进行基站标定,二是被测点测量。被测点测量原理及算法已经相对成熟,如何实现高精度的基站标定已成为实现高精度测量亟需解决的关键技术问题。

1.2 基站标定义标定过程

基站标定义标定过程如图2所示,通过基站标定义4个固定点的坐标 T_i 以及其距离激光头的距离建立荣誉方程组,解析获得激光头坐标值,计算过程与上述被测点确定过程类似。因此,基站标定义高精度标定的核心便是获得高精度重复定位的4个固定点坐标值,且能够量值溯源。

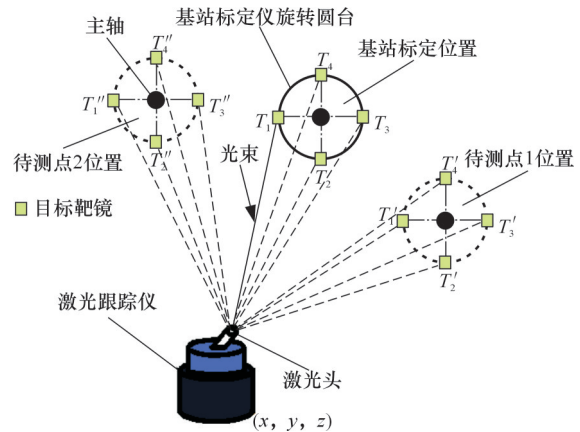


图2 基站标定义标定工作原理

Fig.2 Working principle of BSC

1.3 基站标定义高精度标定原理

图3所示为靶镜调整装置结构。靶镜安装在靶镜调整支架上,整个靶镜调整支架在前后压缩弹簧、上下左右调整片簧作用下可以微调。其中,前后通过上下圆柱导轨及滑块可以进行较大范围的调整,用于在4个不同固定点之间进行切换。在靶镜调整装置固定安装有3个精密球,用于和其他部分进行配合。由图3可以看出,靶镜固定安装在靶镜调整装置上,通过3个精密球可以唯一确定

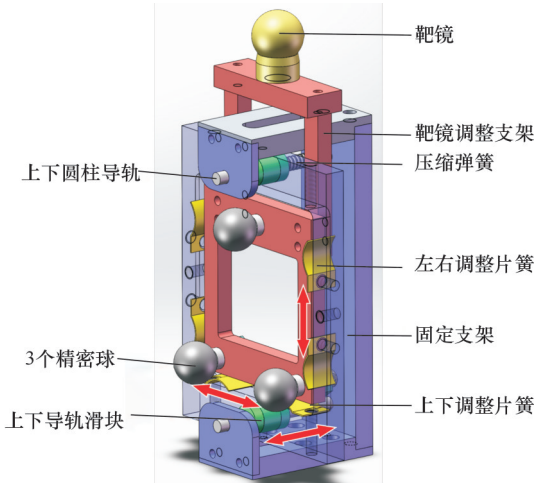


图3 靶镜调整装置结构

Fig.3 Structure of target mirror adjusting device

靶镜调整装置和靶镜的位置和姿态。

图4所示为3对精密球与电磁铁的高精度配合原理。精密球位置固定,当两者吸合以后,通过电磁铁调整支架可以前后、左右微调电磁铁的位置。整个电磁铁调整支架固定安装在基板上,靶镜调整装置安装在转台上。

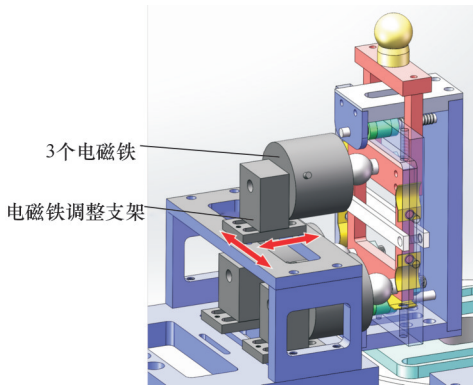


图4 基站标定仪高精度配合原理

Fig.4 High precision coordination principle of BSC

基站标定仪高精度标定原理如图5所示。首先进行靶镜坐标点的确定,电动转台转动,将精密球及靶镜旋转至电磁铁组A处,通电后,电磁铁获得磁力,吸引精密球与电磁铁上的无磁球窝配合,固定电磁铁的位置,即可确定靶镜在基站标定仪中的第1个位置。转台旋转转动90°,至电磁铁组B处,重复上述精密球与无磁球窝紧密配合的过程,可知靶确定镜的第2个位置,依此类推,确定靶镜的4处位置,实现4个特征点 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 的高精度定位,靶镜的4个位置如图5所示。

标准球采用国际G5级标准球,球形误差小于 $0.13 \mu\text{m}$,表面粗糙度值优于 $0.014 \mu\text{m}$,批次直径变动量小于 $0.25 \mu\text{m}$ 。电磁铁一端采用锥形结构与标准球配合,此结构广泛用于如双球杆仪等

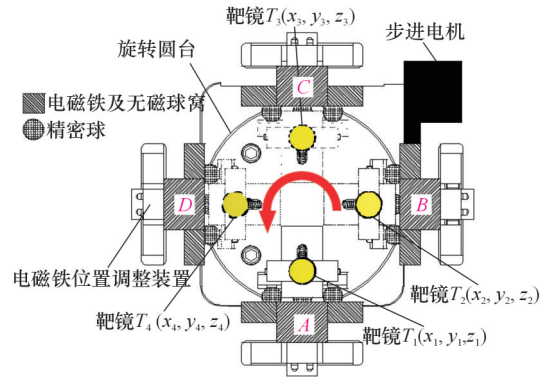


图5 靶镜在基站标定仪中的位置

Fig.5 Position of the target mirror in the BSC

仪器中,标准球与电磁铁配合后的重复定位精度可以达到 $0.3 \mu\text{m}$ 以上。

1.4 激光跟踪仪基站标定原理

靶镜4个位置确定后,通过高精度三坐标测量机测量获得靶镜4个位置的空间坐标值 $T_i(x_i, y_i, z_i)$,从而确定4个点的相对位置关系。

完成上述过程后,进行激光跟踪仪基站点坐标的确定。将基站标定仪下端主轴连接装置(图6)安装在机床主轴上,建立基站标定仪与机床坐标系之间的联系。确定靶镜相对位置关系后精密球及靶镜位于电磁铁组A,此时将电磁铁组通电,精密球与电磁铁组无磁球窝配合,靶镜位置1确定,记录激光跟踪仪在初始位置的距离测量值,并记录为 l_1 ,已知此处靶镜坐标 $T_1(x_1, y_1, z_1)$;将转台依次旋转 90° 至电磁铁组B、C、D处,记录测长读数为 l_2 、 l_3 、 l_4 。则有

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} &= l_1 \\ \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} &= l_2 \\ \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} &= l_3 \\ \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2} &= l_4 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

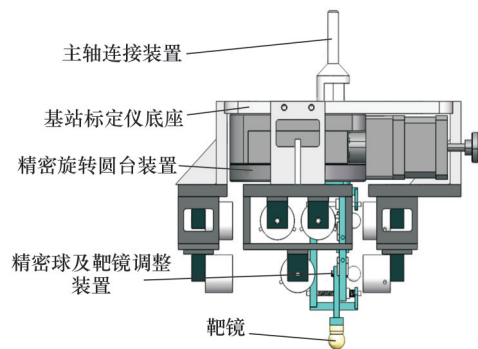


图6 基站标定仪侧视图

Fig.6 Side view of BSC

测量完成后进行数据处理工作。已知4个靶镜位置的空间坐标点 $T_i(x_i, y_i, z_i)$ 以及激光跟踪仪与4个靶镜之间的距离 l_i ,采用多站位多边法的测

量方法并利用两点之间距离公式,可以获得三元高次非线性冗余方程组式(1),求解该方程组,获得激光跟踪仪基站坐标 $P(x,y,z)$ 。

1.5 被测点测量原理

采用基站标测定仪完成激光跟踪仪基站点标定后,进行被测点测量。移动机床主轴带动基站标测定仪至待测位置。已知激光跟踪仪的坐标点 $P(x,y,z)$ 和4个特征点的相对位置关系,通过激光跟踪仪测量出激光跟踪仪到4处靶镜的测长读数,即可通过下式求解出4个特征点在此位置下的坐标值 $T'(x'_i, y'_i, z'_i)$:

$$\begin{cases} \sqrt{(x'_1-x)^2+(y'_1-y)^2+(z'_1-z)^2}=l'_1 \\ \sqrt{(x'_2-x)^2+(y'_2-y)^2+(z'_2-z)^2}=l'_2 \\ \sqrt{(x'_3-x)^2+(y'_3-y)^2+(z'_3-z)^2}=l'_3 \\ \sqrt{(x'_4-x)^2+(y'_4-y)^2+(z'_4-z)^2}=l'_4 \end{cases} \quad (2)$$

进而推导出在此位置下数控机床的实际坐标,获得数控机床的实际坐标值后,与其理论坐标值进行对比,可以得到数控机床的整体几何误差,通过数控机床几何误差的分离算法可以将每项误差进行分离。

2 基站标测定仪工作原理及结构设计

2.1 基站标测定仪总体设计思路

由基站标测定仪的标定原理可知结构设计要求。首先基站标测定仪要能够获取4处靶镜位置坐标,通过绕转台旋转间隔 90° 分布的4个电磁铁组与精密球配合实现;其次靶镜与精密球位置相对固定不动,然后精密球要与电磁铁能够紧密配合。靶镜位置需满足4个不同位置的重复标定,需要电磁铁组与精密球吸合后,能够重新回到平衡位置以备靶镜位置的确定,要求精密球及靶镜调整装置能够进行三自由度微调。

根据上述结构设计要求,基站标测定仪整体结构如图6、图7所示,主要结构包括:精密转台旋转装置、电磁铁位置调整装置、精密球及靶镜调整装置以及主轴连接装置。电磁铁位置调整装置固定在转台旋转装置底座上,共分布有4处,绕转台旋转两两之间间隔 90° 进行布置;精密球及靶镜调整装置固定安装在转台旋转装置上,使其能够随转台旋转进行转动,当转到相应位置时,使精密球与电磁铁组进行配合;基站标测定仪通过精密球与电磁铁组无磁球窝的精密配合,确定靶镜在基站标测定仪空间中的位置姿态。

通过三坐标测量机确定4处靶镜的空间位置,推导出靶镜4个位置的相对坐标关系,即可对

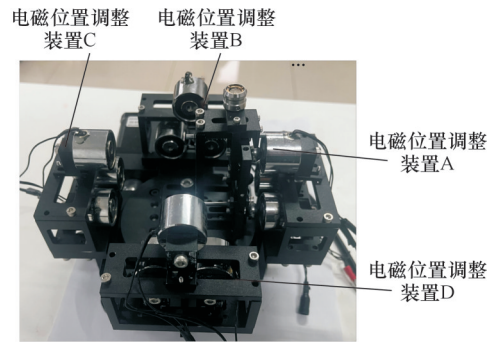


图7 基站标测定仪实物

Fig.7 Base station calibrator instrument

激光跟踪仪进行基站标定。

2.2 三自由度调整原理

精密球及靶镜调整装置中的精密球要与电磁铁位置调整装置中的电磁铁无磁球窝配合,保证两者能够紧密配合的同时,还需要在完成当前靶镜位置的测量后,精密球及靶镜能够回到初始状态,因此,精密球的位置能够进行三自由度微调。

为满足上述要求,本装置将精密球安装板置于调整板内部,采用片簧满足精密球和靶镜在X轴和Z轴方向上微调,其结构方式如图8所示,滑块通过左右两侧片簧的弹力使滑块保持平衡状态,而滑块底部安装在调整板上的片簧与滑块自身重力使滑块保持平衡状态。

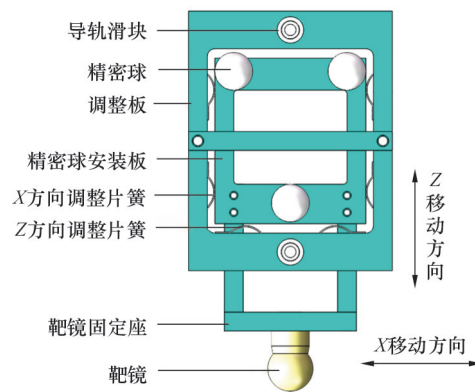


图8 片簧与精密球安装位置示意图

Fig.8 Schematic diagram of the installation position of the leaf spring and precision ball

设置调整板在Y轴运动即可满足精密球和靶镜三自由度调整。调整板运动设计如图9所示,由于精密球和电磁铁之间相互吸合,调整距离较大,故采用圆柱导轨和滑块使得调整摩擦小,流畅性好。在滑块两侧安装弹簧,用以保证精密球和靶镜处在平衡状态。

完成基站标测定仪机械结构设计后,采用PLC控制器对其进行自动化控制编程,使其在数控机床误差测量过程中能够实现自动化测量。

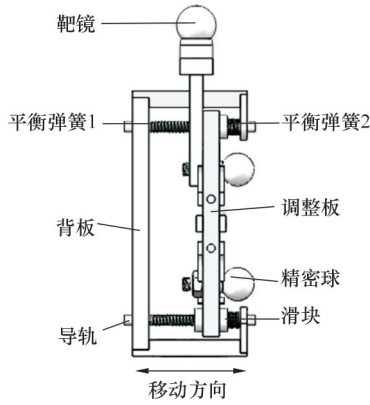


图9 调整板微调原理

Fig.9 Fine-tuning principle of adjustment board

3 基站标定义靶镜位置标定实验

根据基站标定义测量原理,要对激光跟踪仪进行标定,必须要知道基站标定靶镜4个固定点的准确坐标值。标定实验的目的有两个:一是获得4个固定点的重复定位精度;二是确定4个固定点的精确坐标。

基站标定义在进行数控机床误差测量过程中,需要通过4处靶镜的位置来确定激光跟踪仪基站点空间坐标和待测目标点的实际空间坐标,因此,基站标定义要能够完成多次高精度的重复定位。采用基站标定义进行基站标定和待测目标点的测量工作时,要确定基站标定义中4处靶镜的相对位置关系,即用第一处靶镜的空间坐标能够表示出另外3处靶镜的空间坐标。

将完成设备调试的基站标定义放置在三坐标测量机的大理石测量台上并将其固定。完成三坐标测量机各项准备后,进行基站标定义靶镜位置标定实验,如图10所示。当靶镜处于电磁调整装置A处时,通过三坐标测量机从不同角度方向对靶镜球体采点,计算并确定靶镜中心。为了确保基站标定义中靶镜每次重复定位精度满足要求,

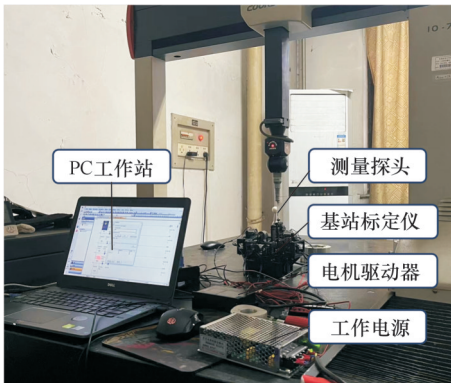


图10 基站标定义靶镜位置标定实验

Fig.10 Target mirror position calibration experiment of BSC

对靶镜所处的每个位置进行20次以上重复测量,验证其重复定位精度,计算其相对坐标。对20组坐标值求取平均值,认定该平均值即为每处靶镜的空间位置坐标。实验结果表明,该机构中靶镜中心空间坐标值最大偏差不超过 $0.9\ \mu\text{m}$ 。

电磁铁位置调整装置A处坐标的各项数据如表1所示,电磁铁位置调整装置A处的空间位置坐标为 $T_1(384.3373, 334.6227, 111.3580)\ \mu\text{m}$ 。

表1 电磁铁位置调整装置A处坐标值

Tab.1 Coordinate values of electromagnetic iron position adjustment device A

位置A	均值	最大值	最小值	差值/ μm	标准差
X	384.3373	384.3385	384.3363	2.2	0.002 89
Y	334.6227	334.6242	334.6214	1.8	0.002 48
Z	111.3580	111.3593	111.3568	2.5	0.001 63

电磁铁位置调整装置B处坐标的各项数据如表2所示,电磁铁位置调整装置B处的空间位置坐标为 $T_2(357.8257, 360.7145, 111.3398)\ \mu\text{m}$ 。

表2 电磁铁位置调整装置B处坐标值

Tab.2 Coordinate values of electromagnetic iron position adjustment device B

位置B	均值	最大值	最小值	差值/ μm	标准差
X	357.8257	357.8266	357.8248	1.7	0.003 69
Y	360.7145	360.7153	360.7137	1.6	0.002 70
Z	111.3398	111.3408	111.3387	2.1	0.001 31

电磁铁位置调整装置C处坐标的各项数据如表3所示,电磁铁位置调整装置C处的空间位置坐标为 $T_3(332.7063, 333.5293, 111.3802)\ \mu\text{m}$ 。

表3 电磁铁位置调整装置C处坐标值

Tab.3 Coordinate values of electromagnetic iron position adjustment device C

位置C	均值	最大值	最小值	差值/ μm	标准差
X	332.7063	332.7073	332.7054	1.9	0.002 56
Y	333.5293	333.5304	333.5283	2.1	0.001 61
Z	111.3802	111.3811	111.3792	1.9	0.001 42

电磁铁位置调整装置D处坐标的各项数据如表4所示,电磁铁位置调整装置D处的空间位置坐标为 $T_4(358.5922, 307.3835, 111.3374)\ \mu\text{m}$ 。

表4 电磁铁位置调整装置D处坐标值

Tab.4 Coordinate values of electromagnetic iron position adjustment device D

位置D	均值	最大值	最小值	差值/ μm	标准差
X	358.5922	358.5934	358.5911	2.3	0.002 17
Y	307.3835	307.3837	307.3826	2.1	0.002 53
Z	111.3374	111.3384	111.3365	2.2	0.001 34

由基站标定义标定实验数据的处理可知,电磁铁位置调整装置A处的X轴的重复标定差值最

大为 $2.5\ \mu\text{m}$, B处 X轴的标准差最大为 0.003 69, 整体标准差很小, 说明基站标定仪重复标定数据集中, 重复标定精度高。

测量机床误差时, 假设 T_1 在机床坐标系的坐标为 $T_1(x, y, z)$, 则其他 3 个靶镜位置分别为: $T_2(x - 26.5097, y + 26.0925, z - 0.0182)$, $T_3(x - 51.6291, y - 1.0927, z + 0.0222)$, $T_4(x - 25.7432, y - 27.2385, z - 0.0206)$ 。得到靶镜相对位置关系后即可采用基站标定仪对激光跟踪仪进行基站标定、被测点测量以及机床误差测量。

4 基站标定仪机床误差测量实验

基站标定仪设计完成后, 已知基站标定仪中靶镜的相对位置关系, 接下来将对基站标定仪应用于基站点标定以及被测点测量进行实验研究。通过采用基站标定仪和自制三维激光双球杆测量装置^[15]对数控铣床 X、Y 轴的定位误差进行测量, 与激光干涉仪测量结果进行比较, 以验证基站标定仪作为外部实物标准的可行性和准确性。

本实验选用雷尼绍 XL-80 激光干涉仪, 首先在 X 方向进行误差测量, 实验开始后, 控制数控机床主轴带动反射镜向一侧移动, 设定相邻测量点间距 50 mm, Y 方向误差测量过程与 X 方向测量过程一致。图 11 所示为采用激光干涉仪测试现场。

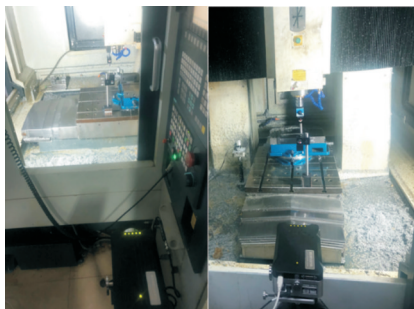


图 11 激光干涉仪测量误差实验

Fig.11 Error measurement experiment by laser interferometer

完成激光干涉仪测量实验后, 通过基站标定仪和自制三维激光双球杆测量装置测量数控机床

X 方向和 Y 方向的定位误差, 测量装置安装方式总体布局如图 12 所示。底座固定安装在机床工作台上, 主轴连接装置一端连接基站标定仪, 另一端被机床主轴夹持。当机床主轴或者工作移动时, 拖动自制激光跟踪双球杆仪动态跟踪测量。

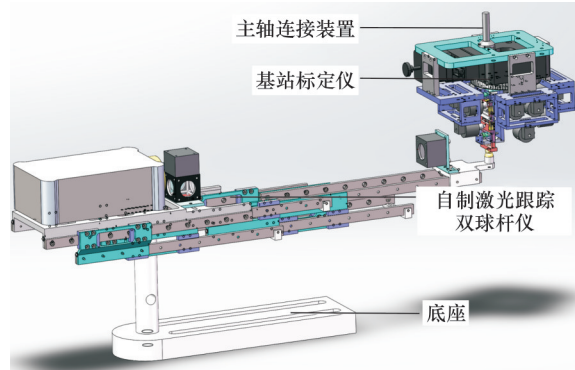


图 12 测量装置总体布局

Fig.12 Overall layout of measuring device

测量现场如图 13 所示。将基站标定仪连接在数控机床主轴上, 固定安装三维激光双球杆测量装置于数控机床工作台上, 选取合适的测量点进行测量, 三维激光双球杆测量装置和基站标定仪能够测量出被测点的实际坐标, 通过九线法误差分离算法^[16-17]对所获得的数据进行处理, 分离出 X 方向和 Y 方向定位误差。

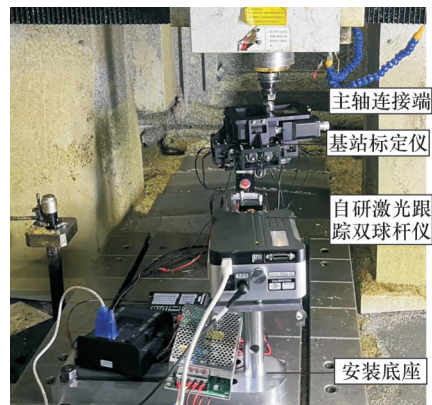


图 13 采用基站标定仪测量机床误差

Fig.13 Machine error measurement using BSC

采用激光干涉仪、基站标定仪及自研三维激光双球杆仪分别测量数控机床 X 轴和 Y 轴定位误差, 测量结果见表 5。

表 5 不同原理定位误差测量结果对比

Tab.5 Positioning errors measured by the laser interferometer

位置/mm		0	50	100	150	200	250	300
干涉仪测量误差/ μm	X轴	0	2.4	5.6	7.8	6.1	6.7	7.3
	Y轴	0	4.8	9.7	15.7	13.2	16.2	15.4
基站标定仪测量误差/ μm	X轴	0	3.6	5.1	7.2	5.8	7.9	9.1
	Y轴	0	5.3	8.6	16.5	14.6	18.3	17.7
误差差值/ μm	X轴	0	-1.2	0.5	0.6	0.3	-1.2	-1.8
	Y轴	0	-0.5	1.1	-0.8	-1.4	-2.1	-2.3

图 14 所示为两种不同测量原理设备的测量结果曲线分布,可以看出,不同测量原理误差值的变化趋势基本一致,说明该方法的原理是可行的。由表 5 可以看出,两种误差测量方式在 X 轴误差测量差值最大为 1.8 μm ,在 Y 轴误差测量差值最大为 2.3 μm 。采用两种不同方式进行更大行程的多次测量,测量结果的偏差均保持在 4 μm 以内,说明这种新的测量原理具有较好的稳定性。

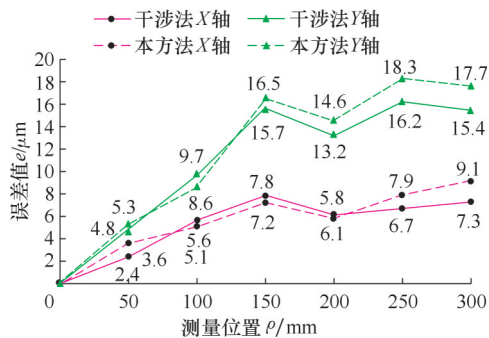


图 14 不同测量原理测量结果对比

Fig.14 Measurement results comparison based on different measurement principles

5 结论

1) 本文在分析现有基站标定不足的基础上设计了一种可以实现 4 个固定点高精度重复定位的基站标定装置——基站标定仪。作为实物外部标定标准,基站标定仪可以通过计量级三坐标测量机进行标定,实现了测量结果的量值溯源,使得采用激光跟踪仪进行误差测量时的测量结果评估成为可能。

2) 基站标定仪采用转台实现 4 个固定点位置的切换,每个位置采用 3 组 G5 级别精密球及电磁铁精密配合实现高精度重复定位,单组标准球与电磁铁配合后的重复定位精度可以达到 0.3 μm 以内,3 组配合后靶镜中心空间坐标值的最大偏差不超过 0.9 μm ,可以实现靶镜的高精度重复定位。

3) 通过对比基站标定仪和自制三维激光双球杆测量装置测量结果与激光干涉仪测量结果可知,两种误差测量方式在 X 轴误差测量差值最大为 1.8 μm ,在 Y 轴误差测量差值最大为 2.3 μm ,说明本原理是可行的,测量精度可以实现中高等精度机床误差的测量。

初代基站标定仪在实际应用过程中由于结构尺寸还没有完全优化、同时存在制造、装配误差等各方面因素导致现有测量精度比较有限,基站标

定仪标定精度仍有较大的提升空间。本文研究内容为激光跟踪仪应用于数控机床误差测量提供了新思路和方法,基站标定技术的成功研究将会解决激光跟踪测量基站标定精度差、测量结果无法溯源的难题,同时有助于促进激光跟踪仪在数控机床误差测量等领域的进一步推广。

参考文献:

[1] 袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
YUAN Julong, ZHANG Feihu, DAI Yifan, et al. Development Research of Science and Technologies in Ultra-precision Machining Field [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161-177.

[2] 杨叔子, 丁汉, 李斌. 高端制造装备关键技术的科学问题[J]. 机械制造与自动化, 2011, 40(1): 1-5.
YANG Shuzi, DING Han, LI Bin. Scientific Problems Originated from Key Techniques of Advanced Manufacturing Equipments [J]. Machine Building & Automation, 2011, 40(1): 1-5.

[3] 刘大伟, 汤立民. 国产高档数控机床的发展现状及展望[J]. 航空制造技术, 2014, 57(3): 40-43.
LIU Dawei, TANG Limin. Current Situation and Prospect of Domestic Advanced NC Machine Tool [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(3): 40-43.

[4] 王磊, 卢秉恒. 中国工作母机产业发展研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 29-37.
WANG Lei, LU Bingheng. Research on the Development of Machine Tool Industry in China [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 29-37.

[5] 王维, 杨建国, 姚晓栋, 等. 数控机床几何误差与热误差综合建模及其实时补偿[J]. 机械工程学报, 2012, 48(7): 165-170.
WANG Wei, YANG Jianguo, YAO Xiaodong, et al. Synthesis Modeling and Real-time Compensation of Geometric Error and Thermal Error for CNC Machine Tools [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(7): 165-170.

[6] MA Minjuan, WEI Peiwen. The Related Factors Affecting the Machining Accuracy of CNC Machine Tools and the Countermeasures [J]. Journal of Henan Science and Technology, 2017(11): 65-66.

[7] WANG Shilong, ZHOU Baocang, FANG Chenggang, et al. Research on Thermal Deformation of Large CNC Gear Profile Grinding Machine Tools [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1): 577-587.

- [8] YANG Jixiang, DING Han. A New Position Independent Geometric Errors Identification Model of Five-axis Serial Machine Tools Based on Differential Motion Matrices [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 104: 68-77.
- [9] 吴玉亮, 曹文智, 肖飞, 等. 基于激光跟踪仪的数控机床空间误差测量及补偿[J]. 机床与液压, 2023, 51(23): 139-143.
- WU Yuliang, CAO Wenzhi, XIAO Fei, et al. Measurement and Compensation of Spatial Errors of CNC Machine Tools Based on Laser Tracker [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51 (23) : 139-143.
- [10] ZHANG Fumin, ZHANG Huadi, QU Xinghua. A Multilateral Laser-tracking Three-dimensional Coordinate Measuring System Based on Plane Constraint [J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(1): 015205.
- [11] GUILLORY J, TRUONG D, WALLERAND J P. Assessment of the Mechanical Errors of a Prototype of an Optical Multilateration System [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(2): 025004.
- [12] 李笑宇, 林虎, 薛梓, 等. 激光跟踪多边测量自标定优化方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 10-17.
- LI Xiaoyu, LIN Hu, XUE Zi, et al. Self-calibration Optimization Method for Laser Tracking Multilateral Measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 10-17.
- [13] 孙威, 缪东晶, 李建双, 等. 系统参数标定过程对多边坐标测量系统测量不确定度的影响[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 50-57.
- SUN Wei, MIAO Dongjing, LI Jianshuang, et al. Influence of System Parameters Calibration Process on Measurement Uncertainty of Multilateral Coordinate Measurement System [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 50-57.
- [14] WANG Qiong, HOU Nan, SUN Hui, et al. Research on Problem of Robot Localization Based on Multilateral Measurement with Neural Computation [J]. Techniques of Automation and Applications, 2016, 35(2): 1-5.
- [15] 任工昌, 张膺之, 李海涛. 三维激光球杆仪的研制与仿真[J]. 机床与液压, 2021, 49(3): 105-109.
- REN Gongchang, ZHANG Yingzhi, LI Haitao. Development and Simulation of 3D Tracker-ball-bar [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49 (3) : 105-109.
- [16] 牛俊青, 牛兴华, 黄梦翔, 等. 三轴立式加工中心几何误差辨识试验研究[J]. 天津理工大学学报, 2024, 40(5): 8-15.
- NIU Junqing, NIU Xinghua, HUANG Mengxiang, et al. Study on Geometric Error Identification of Three-axis Vertical Machining Center [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2024, 40 (5) : 8-15.
- [17] 龚凌云. 基于改进的九线法实施数控机床几何精度补偿方法的研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(14): 40-43.
- GONG Lingyun. Research on Geometric Precision Compensation of NC Machining Tools Based on Modified 9-line Method [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(14): 40-43.

(编辑 陈勇)

作者简介: 李海涛*, 男, 1987年生, 副教授、博士。研究方向为精密测量。E-mail: lihaitao@sust.edu.cn。

本文引用格式:

李海涛, 徐曙磊, 王雅雯, 等. 基于外部实物标准的激光跟踪仪基站标定原理及方法研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(8): 1875-1882.

LI Haitao, XU Shulei, WANG Yawen, et al. Research on Calibration Principle and Method of Laser Tracker Base Stations Based on External Physical Standard [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(8): 1875-1882.