

激光跟踪仪在重型车床几何精度检测中的应用

邓玉芬^{1,2}, 郭俊杰¹, 王金栋¹, 李海涛¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 650093, 昆明)

摘要: 为了对重型车床装配中相关各几何精度进行快速准确的测量,提出了一种基于激光跟踪仪的多基点分时测量方法。该方法建立了一种新基准,即在主轴与尾座两顶尖之间建立虚轴,以此虚轴为基准来调节导轨及其他部件的精度,从而实现车床各几何精度的快速准确测量。该基准是在基于激光跟踪仪的多基点分时测量方法的基础上,采用圆柱拟合算法得到两轴心线,将两轴心线调节到同轴而实现的。针对激光跟踪仪无法对挡光部位进行测量的问题,专门设计了轴心线辅助测量装置,以解决挡光的问题。对多基点分时测量方法的仿真及实验结果表明,采用该方法测量重型车床的几何精度,只需要一台激光跟踪仪,且测量一台重型车床的几何精度大约只需要 4 h,因此大大提高了测量效率。

关键词: 激光跟踪仪;虚轴;圆柱拟合;辅助测量

中图分类号: TH161.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)01-0074-06

Laser Tracker in Geometric Precision Detection for Large Horizontal Lathe

DENG Yufen^{1,2}, GUO Junjie¹, WANG Jindong¹, LI Haitao¹

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

2. School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: To rapidly and accurately detect the geometric precision of large horizontal lathe, a multi-pointed and time-sharing measurement with laser tracker is proposed. A virtual axis is set between principal axis and tailstock, then precision of the guide rail and other parts is adjusted up to the virtual axis standard. Two axis lines are obtained by cylindrical fitting, then adjusted to coaxial to establish the new standard. In the simulation and experiments, only one laser tracker is necessary to detect the geometric precision of large horizontal lathe in four hours, and an auxiliary measuring service of axis line is designed to solve light barrier.

Keywords: laser tracker; virtual axis; cylindrical fitting; auxiliary measuring

重型车床总装配中的测量、调整是个复杂耗时的工作,现有的测量工艺、检具、仪器等已经不能满足重车装配中测量、调整的需要。在传统的测量中,一般是先调节导轨的精度,再以床身导轨为基准测量其他几何精度,但由于重型车床车身较长,使用传统的方法已经无法满足测量的要求,因此本文提出

了一种新的测量方法,即在主轴与尾座两顶尖之间建立一条虚拟轴心线,并以此虚轴为基准来测量车床的几何误差。

虚轴的建立需要在主轴锥孔及尾座套筒内分别插入标准芯棒,用激光跟踪仪采集芯棒表面离散目标点,再用圆柱拟合算法得到主轴及尾座套筒轴心

收稿日期: 2012-06-29。 作者简介: 邓玉芬(1977—),女,博士生;郭俊杰(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175415);国家科技重大专项资助项目(2012ZX04012032)。

网络出版时间: 2012-10-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121029.1700.006.html>

线,将两轴心线同轴度调至公差范围内,以此为基准来测量其他相关的几何精度。本文主要介绍了采集离散目标点的多基点分时测量算法,以及采用圆柱拟合算法获得同轴度的方法,并针对激光跟踪仪无法测量挡光部位的问题,专门设计了主轴轴心线测量机构。

1 多基点分时测量方法原理

多基点分时测量方法是在基于多边法的坐标测量系统的基础上,采用 4 路或 4 路以上的距离测量系统来获得冗余的测量数据,并利用它们实现系统的自标定,从而精确得到各基点的坐标以及其他系统参数的方法^[1]。该方法的测量原理如图 1 所示。

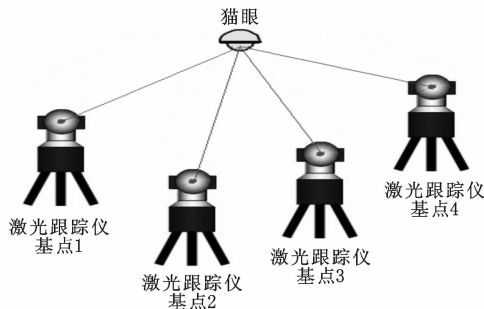


图 1 多基点分时测量方法原理示意图

激光跟踪仪多基点分时测量算法不仅避免了测角信息,而且提高了测量精度,同时也降低了测量成本。具体测量方法为:将一台激光跟踪仪分别放在车床周围 4 个不同的基点位置,为了多获得冗余数据,减少随机误差对测量结果的影响程度,提高测量精度,基点位置布局时,在保证不挡光的情况下应尽量分散,而且基点布局要有一定的高度差,考虑到测量精度和效率,基点数目以 4~6 个为宜^[2]。激光跟踪仪对跟踪镜相同的运动轨迹进行跟踪测量,用激光跟踪仪自带的测量软件可以采集到大量的目标点坐标。利用测量得到的大量目标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以及目标点空间坐标标定算法,准确标定跟踪镜运动过程中各目标点坐标。将这些离散的坐标利用圆柱拟合算

法拟合出轴心线,同时测量主轴与尾座心轴的同轴度,并以此为基准来测量车床其他的几何误差。

2 多基点分时测量算法

由于实际测量中,基点的位置很难准确得到,因此需要先通过测量得到的大量目标点坐标,准确标定出基点所在的位置,然后再标定空间目标点的三维坐标。

2.1 基点标定算法

根据理论给出的大量目标点,以及目标点与各基点之间的距离,用两点距离公式即可求出各基点在空间的位置坐标,以及各基点与初始目标点的相对距离,从而完成基点标定。设理论目标点坐标为 $B(x_i, y_i, z_i)$, $i=1, 2, \dots, n$, 4 个基点的坐标为 $P(x_j, y_j, z_j)$, $j=1, 2, 3, 4$, 各个基点到初始目标点的距离设为 L_j , $j=1, 2, 3, 4$, 目标点移动时其中心到跟踪镜中心的距离增量设为 ΔL_i , $i=1, 2, \dots, n$, 以标定第 1 个基点的坐标为例进行算法推导,其他基点的算法类似。

设第 1 个基点的坐标为 $P(x_1, y_1, z_1)$, 初始目标点到第 1 个基点的距离为 L_1 , 根据两点距离公式,可得如下方程

$$((x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2 + (z_i - z_1)^2)^{1/2} = L_1 + \Delta L_{1i} \quad (1)$$

取

$$f_1(x_1, y_1, z_1, L_1) = ((x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2 + (z_i - z_1)^2)^{1/2} - L_1 \quad (2)$$

以上函数为非线性函数,根据求解非线性最小二乘方程的基本方法需要先将式(2)线性化^[3]。取 x_{10} 、 y_{10} 、 z_{10} 、 L_{10} 为 x_1 、 y_1 、 z_1 、 L_1 的近似值, δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 为 x_1 、 y_1 、 z_1 、 L_1 的偏差量,得到

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{10} + \delta_1; & y_1 &= y_{10} + \delta_2 \\ z_1 &= z_{10} + \delta_3; & L_1 &= L_{10} + \delta_4 \end{aligned}$$

通过非线性方程线性化的方法得到求解偏差量矩阵的方程为

$$\delta_i = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n C_{1i}^2 (x_{10} - x_i)^2 & \sum_{i=1}^n C_{1i}^2 (x_{10} - x_i)(y_{10} - y_i) & \sum_{i=1}^n C_{1i}^2 (x_{10} - x_i)(z_{10} - z_i) & - \sum_{i=1}^n C_{1i} (x_{10} - x_i) \\ \sum_{i=1}^n C_{1i}^2 (x_{10} - x_i)(y_{10} - y_i) & \sum_{i=1}^n C_{1i}^2 (x_{10} - x_i)^2 & \sum_{i=1}^n C_{1i}^2 (y_{10} - y_i)(z_{10} - z_i) & - \sum_{i=1}^n C_{1i} (y_{10} - y_i) \\ \sum_{i=1}^n C_{1i}^2 (x_{10} - x_i)(z_{10} - z_i) & \sum_{i=1}^n C_{1i}^2 (y_{10} - y_i)(z_{10} - z_i) & \sum_{i=1}^n C_{1i}^2 (x_{10} - x_i)^2 & - \sum_{i=1}^n C_{1i} (z_{10} - z_i) \\ \sum_{i=1}^n C_{1i} (x_{10} - x_i) & \sum_{i=1}^n C_{1i} (y_{10} - y_i) & \sum_{i=1}^n C_{1i} (z_{10} - z_i) & - n \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n C_{1i} (x_{10} - x_i) \left(\Delta L_{1i} - \frac{1}{C_{1i}} + L_{10} \right) \\ \sum_{i=1}^n C_{1i} (y_{10} - y_i) \left(\Delta L_{1i} - \frac{1}{C_{1i}} + L_{10} \right) \\ \sum_{i=1}^n C_{1i} (z_{10} - z_i) \left(\Delta L_{1i} - \frac{1}{C_{1i}} + L_{10} \right) \\ \sum_{i=1}^n \left(\Delta L_{1i} - \frac{1}{C_{1i}} + L_{10} \right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$C_{1i} = \frac{1}{((x_i - x_{10})^2 + (y_i - y_{10})^2 + (z_i - z_{10})^2)^{1/2}}$$

求解 $\delta_1 \sim \delta_4$, 即可得到第 1 个基点的坐标 $P(x_1, y_1, z_1)$, 以及第 1 个基点到初始目标点的距离 $L_1 = L_{10} + \delta_4$ 。采用同样的方法可以标定出另外 3 个基点的空间坐标, 分别记为 $P_i(x_{pj}, y_{pj}, z_{pj})$, $j = 1, 2, 3, 4$, 以及每个基点到初始目标点的距离 $L_2 \sim L_4$ 。

2.2 目标点标定算法

设标定的目标测量点的坐标为 $B(x_i, y_i, z_i)$, i

$= 1, 2, \dots, n$, 以推导第 1 个目标点的坐标为例, 根据两点距离公式, 有如下方程

$$((x_i - x_{pj})^2 + (y_i - y_{pj})^2 + (z_i - z_{pj})^2)^{1/2} = L_j + \Delta L_{1j} \quad (4)$$

取

$$f_1(x_1, y_1, z_1) = ((x_i - x_{pj})^2 + (y_i - y_{pj})^2 + (z_i - z_{pj})^2)^{1/2} \quad (5)$$

同样将式(5)先进行线性化, 线性化的方法与系统自标定算法中的线性化方法类似, 经过迭代推导, 得到

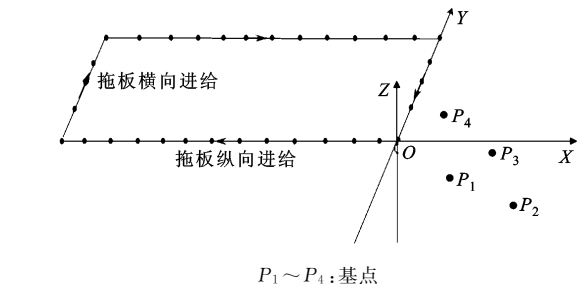
$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^4 K_{1j}^2 (x_{10} - x_{pj})^2 & \sum_{j=1}^4 K_{1j}^2 (x_{10} - x_{pj})(y_{10} - y_{pj}) & \sum_{j=1}^4 K_{1j}^2 (x_{10} - x_{pj})(z_{10} - z_{pj}) \\ \sum_{j=1}^4 K_{1j}^2 (x_{10} - x_{pj})(y_{10} - y_{pj}) & \sum_{j=1}^4 K_{1j}^2 (y_{10} - y_{pj})^2 & \sum_{j=1}^4 K_{1j}^2 (y_{10} - y_{pj})(z_{10} - z_{pj}) \\ \sum_{j=1}^4 K_{1j}^2 (x_{10} - x_{pj})(z_{10} - z_{pj}) & \sum_{j=1}^4 K_{1j}^2 (y_{10} - y_{pj})(z_{10} - z_{pj}) & \sum_{j=1}^4 K_{1j}^2 (z_{10} - z_{pj})^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^4 K_{1j} (x_{10} - x_{pj}) \left(L_{1j} + \Delta L_{1j} - \frac{1}{K_{1j}} \right) \\ \sum_{j=1}^4 K_{1j} (y_{10} - y_{pj}) \left(L_{1j} + \Delta L_{1j} - \frac{1}{K_{1j}} \right) \\ \sum_{j=1}^4 K_{1j} (z_{10} - z_{pj}) \left(L_{1j} + \Delta L_{1j} - \frac{1}{K_{1j}} \right) \end{bmatrix}, K_{1j} = \frac{1}{((x_{10} - x_{pj})^2 + (y_{10} - y_{pj})^2 + (z_{10} - z_{pj})^2)^{1/2}} \quad (6)$$

求解 $\delta_1 \sim \delta_3$, 即可求得第 1 个目标点的坐标 $B(x_1, y_1, z_1)$, 用同样的方法可分别求出所有目标点的坐标。

2.3 多基点分时测量算法的仿真

采用多基点分时测量方法对车床几何精度进行检测, 下面分别对基点和目标点的标定过程进行仿真。假设拖板沿图 2 所示路径运动, 纵向进给行程为 10 m, 步距 250 mm, 横向进给行程为 1 m, 步距为 100 mm, 走完全程可以得到 101 个测量点。

图 2 中的 $P_1 \sim P_4$ 分别为 4 个基点的位置布局, 假设基点坐标分别为 $P_1(3\ 640, -750, -1\ 670)$ mm、 $P_2(5\ 140, -1\ 060, -1\ 670)$ mm、 $P_3(4\ 930, -220,$



$P_1 \sim P_4$: 基点
图 2 拖板运动轨迹示意图

$-1\ 670)$ mm、 $P_4(3\ 590, 310, -1\ 540)$ mm, 通过两点距离公式求出各基点到各测量点的距离, 再求出

目标点变化时的距离增量。下面分几种情况分别进行仿真。

2.3.1 不考虑拖板运动误差 假设拖板能够按照程序设定准确到达测量点,当拖板走完整个行程时,便可以得到 101 个没有误差的测量点数据。根据多基点分时测量算法即可标定出各个基点的位置坐标。表 1 为系统自标定误差,其中 Δx 、 Δy 、 Δz 分别为基点标定坐标与理论基点坐标之间的误差值。

表 1 系统自标定误差

基点	$\Delta x/\mu\text{m}$	$\Delta y/\mu\text{m}$	$\Delta z/\mu\text{m}$
P_1	-0.21	-0.14	-0.58
P_2	0.42	-0.13	0.35
P_3	0.20	-0.24	-0.44
P_4	-0.11	-0.64	0.63

从标定结果来看,基点的坐标与理论设定值比较接近,误差都在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以内,符合重型车床的误差标准,说明该算法是可行的。通过目标点的推导算法得到被测目标点的坐标,根据图 2 设定的运动轨迹,得到部分目标点的标定偏差如表 2 所示。

表 2 部分目标点的仿真标定误差

目标点	$\Delta x/\mu\text{m}$	$\Delta y/\mu\text{m}$	$\Delta z/\mu\text{m}$
A_1	0.11	0.55	-0.44
A_2	-0.72	-0.25	-0.42
A_3	0.23	0.17	-0.42
A_4	0.79	-0.26	-0.68

2.3.2 考虑拖板运动误差 为了简化计算,拖板运动过程中的随机误差按照随机正态分布给出^[4]。假设拖板随机误差服从 $[0\text{ }\mu\text{m},5\text{ }\mu\text{m}]$ 的正态分布,则每个测量点的坐标为理论值与误差值之和,系统自标定时所采用的目标点坐标即为有误差的坐标,系统自标定结果如表 3 所示。

表 3 考虑误差情况下的基点标定误差

基点	$\Delta x/\mu\text{m}$	$\Delta y/\mu\text{m}$	$\Delta z/\mu\text{m}$
P_1	1.12	-0.98	0.97
P_2	-1.22	1.32	-1.37
P_3	2.56	1.52	2.11
P_4	-1.46	-2.48	2.33

从标定结果看,误差在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以内,但与不考虑机床误差时相比,标定误差有所增加,说明基点标定的准确性跟机床本身的精度有关。被测目标点坐标

的标定误差如表 4 所示,从目标点坐标标定误差来看,目标点坐标的标定误差比不考虑机床误差时的标定误差有所增加,说明机床误差对标定结果有一定的影响。

表 4 考虑误差情况下部分目标点的标定误差

目标点	$\Delta x/\mu\text{m}$	$\Delta y/\mu\text{m}$	$\Delta z/\mu\text{m}$
A_1	-1.23	-0.96	-1.33
A_2	-2.24	-2.51	-1.78
A_3	-1.19	2.29	-2.59
A_4	-2.89	-3.43	-2.61

3 同轴度的测量

3.1 同轴度测量原理

针对激光跟踪仪无法对挡光部位进行测量的问题,根据重型卧式车床主轴和尾座检验芯棒的特点,设计制作了轴心线辅助测量装置。将猫眼反射镜托举出检验芯棒相对于激光跟踪仪光路的盲区,实现了激光跟踪仪对检验芯棒的连续无障碍测量,进而实现了对主轴顶尖与尾座顶尖轴心线的测量。图 3 为测量装置结构图,图 4 为驱动轮特殊的安装方向。

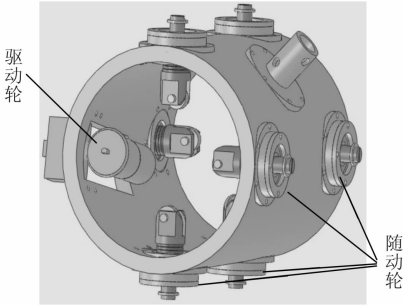


图 3 轴心线辅助测量装置整体结构图

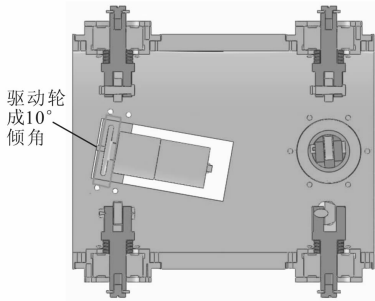
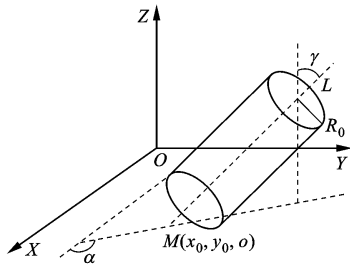


图 4 驱动轮特殊的安装方向

如图 3 所示,辅助测量装置的整体是一个圆环型结构,圆环结构外围分两层,并均匀分布了 8 个轮

面朝环形内侧安装的轮子,其中一个轮子为驱动轮,另 7 个轮子为结构相同的随动轮。如图 4 所示,测量时在主轴锥孔内插入一个标准检验芯棒,然后将该辅助装置套接于检验芯棒上,驱动轮与检验芯棒壁的径向截面成确定的 10° 夹角。驱动轮运动时依靠摩擦力驱动整套装置,而本身则绕检验芯棒进行螺旋运动,同时 7 个随动轮会自动调整与驱动轮的运动方向,并跟随驱动轮运动,从而实现了装置整体绕检验芯棒旋转和前进。安装在辅助装置延长臂上的猫眼反射器跟随整套装置绕检验芯棒旋转,旋转过程中放置在外围的激光跟踪仪进行一系列点坐标的数据采集,采集的所有点坐标基本形成一条螺旋线,将这些坐标利用圆柱拟合算法拟合出轴心线,即为主轴的轴心线。采用同样的方法可以得到尾座的轴心线,以主轴轴心线为基准,可计算出尾座轴心线与主轴轴心线之间的同轴度误差,圆柱拟合算法的示意图如图 5 所示。



L :圆柱轴心线; R_0 :圆柱半径; γ : L 与 Z 轴夹角;
 M : L 与 XOY 平面夹角; α : L 的投影与 X 轴夹角
图 5 圆柱拟合算法示意图

确定空间圆柱的 5 个基本参数分别为 x_0 、 y_0 、 α 、 γ 、 R_0 ,其中 x_0 、 y_0 为轴线 L 与坐标平面 XOY 的交点 M 的坐标,由它来确定圆柱的位置,由 α 、 γ 确定圆柱的中心轴线 L 。根据推导计算,得到圆柱拟合的非线性方程组为^[5]

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n (x_0 - x_i) F_0 &= 0; \quad \sum_{i=1}^n (y_0 - y_i) F_0 = 0 \\ \sum_{i=1}^n R_0 F_0 &= 0; \quad F_0 = \sum_{i=1}^n ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + z_i^2 - D_D^2 - R_0^2) \\ \sum_{i=1}^n D_D (-x_i \sin \alpha \sin \gamma + y_i \cos \alpha \sin \gamma) F_0 &= 0 \\ \sum_{i=1}^n D_D (-x_i \cos \alpha \cos \gamma + y_i \sin \alpha \cos \gamma - z_i \sin \gamma) F_0 &= 0 \\ D_D &= x_i \cos \alpha \sin \gamma + y_i \sin \alpha \sin \gamma + z_i \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

应用通用非线性方程组数值算法,即可求出圆柱参数。调整轴心线的同轴度主要是调整两轴心线的方向矢量相对于坐标轴的夹角,当二者夹角小于公差范围时,可认为二者同轴,即获得虚拟轴心线。

3.2 同轴度测量算法的仿真

为了采集目标点的数据,将测量装置安放到主轴锥孔内的标准芯棒上,将激光跟踪仪分别放置在 4 个不同的基点位置上,通过遥控测量机构,实现螺旋式行进。将激光跟踪跟踪仪设置为每隔 5 s 采集一次数据,当测量装置行进走完芯棒全长时,可以采集到大量目标点的数据。测量装置按照相同的运动轨迹行走 4 次,通过多基点分时测量算法可以标定出目标点坐标,再利用圆柱拟合算法拟合出芯棒的轴心线。采用同样的步骤在尾座芯棒上重复操作,可以得到尾座芯棒的轴心线,以及两顶尖的同轴度。测量装置安装示意图及运动方向如图 6 所示。

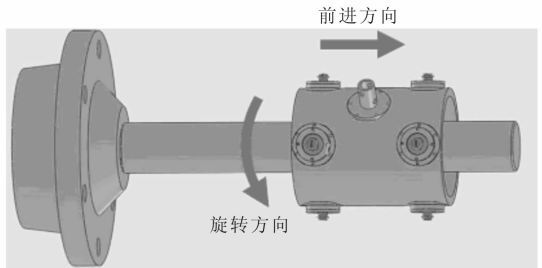


图 6 轴心线测量装置及其运动方向

如表 5 所示,假设用多基点分时测量算法得到主轴芯棒部分目标点坐标,则根据大量目标点坐标,应用圆柱拟合算法,拟合出主轴轴心线的方向向量 $R_1(0.000\ 125, 1.000\ 111, 0.000\ 101)$ mm,再用同样的方法得到尾座轴心线的方向向量 $R_2(0.000\ 098, -1.000\ 103, 0.000\ 104)$ mm,根据空间两向量夹角的运算,可得两轴心线之间的夹角为 $0.000\ 001\ 1\ \text{rad}$,两轴心线接近同轴。

表 5 主轴测量时部分目标点的坐标

目标点	$x/\mu\text{m}$	$y/\mu\text{m}$	$z/\mu\text{m}$
B_1	0	0	60
B_2	60	100	0
B_3	0	200	-60
B_4	-60	-300	0

4 多基点分时测量的实验验证

4.1 多基点分时测量方法

采用一台大型数控卧式车床进行实验,该车床

的型号为 CK61450,车床身长达 15 m,回转直径为 4.5 m,顶尖间最大承重质量为 160 kg。

实验中,将猫眼安装在刀架上,拖板按照预先设定的轨迹运动,激光跟踪仪分别放在 4 个不同的基点位置上,每个位置都可以采集到 101 个测量点的坐标。根据系统自标定算法,标定得到的基点坐标误差如表 6 所示。

表 6 基点标定误差

基点	$\Delta x/\mu\text{m}$	$\Delta y/\mu\text{m}$	$\Delta z/\mu\text{m}$
P_1	-20.66	11.88	-11.99
P_2	-21.53	14.27	-24.22
P_3	10.97	-22.31	-17.46
P_4	13.91	26.64	22.44

从实验结果中得到在大型车床上标定基点的误差为 20 μm 左右,符合重型车床误差标准,说明该算法是可行的。根据目标点标定算法,由测量得到的部分目标点的实验标定误差如表 7 所示。

表 7 部分目标点的实验标定误差

目标点	$\Delta x/\mu\text{m}$	$\Delta y/\mu\text{m}$	$\Delta z/\mu\text{m}$
A_1	32.22	-11.77	21.69
A_2	24.86	22.24	12.39
A_3	-12.65	27.49	-14.68
A_4	-18.34	-30.47	15.58

4.2 车床的各项几何误差

通过多基点分时测量算法,标定出拖板运动过程中采集到的目标点坐标,再利用误差分离算法将车床运动的 13 项几何误差分离出来^[6-7]。在分离得到的几何误差中,X 方向的最大直线度误差为 50.4 μm ,Y 方向的最大直线度误差为 81.81 μm ,垂直度误差为 21.01×10^{-3} rad,因此符合重型车床的检验标准。

5 结 论

本文提出了重型车床装配中的一种新基准,即在主轴与尾座之间建立虚轴,将此虚轴作为基准再调整导轨及其他几何精度,达到车床几何精度的快速测量。在多基点分时测量的基础上,通过对本文算法的推导以及仿真与实验的结果表明,采用该方法检测车床几何精度能够达到快速、高效的目的,因此比较适用于对大型复杂车床几何精度的测量。由于激光跟踪仪检测时对环境要求比较高,因此检测

车床精度时应在环境相对较好的条件下进行。本文的实验结果受现场环境影响较大,因此比仿真结果的误差要大一些。

在传统的测量方法中,测量不同的误差要采用不同的检测工具,测量起来费时费力,并且由于车身长,使同轴度误差不容易测到。采用本文方法进行测量时,只需要一台激光跟踪仪,且测量一台重型车床的几何精度大约只需要 4 h,因此大大提高了测量效率。

参考文献:

[1] 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.

[2] 王金栋,郭俊杰,邓玉芬,等. 应用激光跟踪仪的数控机床几何精度检测[J]. 西安交通大学学报,2011,45(3): 85-90.

WANG Jindong, GUO Junjie, DENG Yufen, et al. Geometric precision detection for NC machine tool based on laser tracker [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(3): 85-90.

[3] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社,1996: 95-96.

[4] 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.

[5] 邱绪云,王玉林,徐家川,等. 圆柱基本参数的三坐标测量方法[J]. 山东理工大学学报,2003,17(2): 56-58.

QIU Xuyun, WANG Yulin, XU Jiachuan, et al. Measuring method of basic parameters of cylinder with three coordinate [J]. Journal of Shandong University of Technology, 2003, 17(2): 56-58.

[6] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N, et al. Error compensation in machine tools-a review: Part 1 Geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(9): 1235-1256.

[7] 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津: 天津大学出版社,1999: 307-310.

(编辑 管咏梅)