

数控装备误差补偿关键技术研究

潘芳煜, 白跃伟, 聂黎, 王小刚, 刘凯, 伍小燕

(上海第二工业大学 智能制造与控制工程学院, 上海 201209)

摘要: 制造业虚拟工厂模式可以降本增效、优化服务质量, 是应对全球化激烈竞争的不二选择。在该模式下, 为不断提升产品质量, 主要研究与之生产过程相关的数控装备精度提升关键技术即误差补偿关键技术, 具体包括误差源分析、误差建模、误差测量及误差数据处理。由此, 以五轴机床为数控装备的代表, 找出了影响其精度的 45 项几何误差; 并通过误差建模, 构建了这 45 项误差与五轴机床系统总误差的关系; 其次, 根据五轴机床误差特性, 构建了测量系统, 并证实了该系统的有效性; 最后, 针对测量数据, 展开误差处理分析, 解决了非测量节点数据问题, 同时大幅降低了数据量信息, 为快速有效地进行误差补偿奠定了数据基础。

关键词: 虚拟工厂; 数控装备; 误差补偿; 几何误差; 误差测量

中图分类号: TH69

文献标志码: A

The Key Technology of Error Compensation for CNC Equipment

PAN Fangyu, BAI Yuewei, NIE Li, WANG Xiaogang, LIU Kai, WU Xiaoyan

(School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Shanghai Polytechnic University,
Shanghai 201209, China)

Abstract: The virtual factory model of manufacturing industry can reduce cost and increase efficiency, optimize service quality, so it is good choice to cope with the fierce global competition. In order to continuously improve product quality in the mode, the accuracy enhancement of CNC equipment related to the production process was mainly focused on, which were the key techniques of error compensation, including error source analysis, error modeling, error measurement and error data processing. Therefore, the five-axis machine tool was taken as the representative of CNC equipment, and 45 geometric errors which affected its accuracy were found out; through error modeling, the relationship between these 45 errors and the total system error of the five-axis machine tool was established; then, according to the error characteristics of the five-axis machine tool, the measuring system was constructed and its effectiveness was verified; finally, data handling was carried out for the measurement data, which provided non-measurement node data and greatly reduced the amount of data information, so it laid a data foundation for rapid and effective error compensation.

Keywords: virtual factory; CNC equipment; error compensation; geometric error; error measurement

0 引言

面对全球市场日益激烈的竞争, 企业 (尤其是制造型企业) 只有不断的提升质量、降低成本、提高效率及优化服务 (例如个性化定制等), 才能赢得一

席之地。面对如此严峻的要求, 制造业需要不断地升级, 凭借智能制造技术、数字孪生技术及互联网+ 技术等兴起与发展, 虚拟工厂制造模式应运而生。该模式可视为一种虚拟组织, 在该组织内多企业及用户可以针对某产品实现协同制造^[1-3], 如图 1 所

收稿日期: 2023-08-31

通信作者: 潘芳煜 (1986-), 女, 江苏盐城人, 讲师, 博士, 主要研究方向为先进制造等。E-mail: fypan@sspu.edu.cn

基金项目: 上海第二工业大学校基金项目 (EGD23DS03) 资助

示。在给定的权限下, 组织内部的企业 (与客户) 可以实时知晓 (甚至参与) 伙伴企业的设计及生产全过程。由此, 客户可以全方位全过程的参与到产品的研发和生产过程, 可以随时对各环节进行个性化定制, 提高客户的体验感及满意度; 同时, 由于组织内部实时信息共享, 各企业可以根据伙伴企业的信息, 及时优化生产安排, 实现效率的提升; 再之, 各伙伴企业均利用擅长的优势力量参与至该产品的研发、生产与销售环节, 因此相对于传统单厂完成该任务, 质量相对更高, 也更加节约成本。

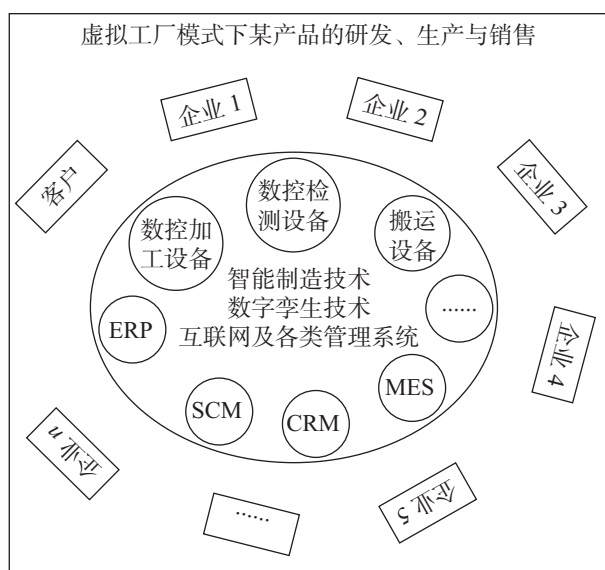


图1 虚拟工厂模式下产品的研发、生产与销售

Fig. 1 Product development, production and sales based on virtual factory

在虚拟工厂模式下, 为了不断地提升产品的质量, 首先应当关注与之生产过程相关的数控装备, 包括负责加工的数控机床、负责搬运的工业机械手以及负责检测的三坐标测量机等, 只有确保它们精度良好, 才能生产出质量好的产品。因此, 提升数控装备的精度, 才是提高产品质量的关键。而数控装备精度提升方式, 通常分为两种, 一种是误差防止法, 就是通过超高的零件设计、精良的制造以及精密的安装来尽可能避免误差源的引入, 但该方法成本昂贵且受限于当前的制造水平, 并非上乘之选; 而另一种就是误差补偿法, 它是通过引入新的误差与数控装备系统中稳定的误差相抵消, 以实现装备的精度提升, 该法成本低廉, 效率较高、且不受限于装备使用磨损 (当设备磨损时, 调整补偿量即可), 因此其为最佳选择。

1 误差补偿法实施步骤

采用误差补偿法提升数控装备精度, 需要分为以下几个步骤, 首先是识得误差源, 找出对数控装备精度影响的误差; 其次是建立误差模型, 分析各个误差对系统总误差的影响和关系; 最后是获取各误差, 即误差测量; 获得的误差测量结果需进行数据处理, 以满足补偿的需要, 在上述步骤均完成后, 实施误差补偿, 具体如图2所示。

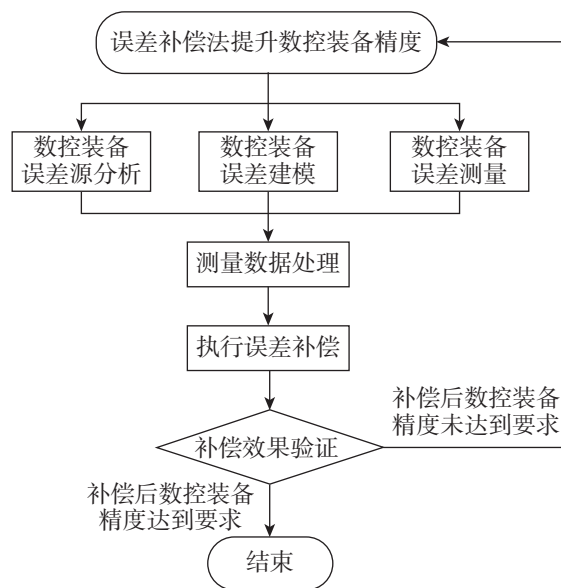


图2 误差补偿法提升数控装备精度的步骤

Fig. 2 Error compensation method to improve the precision of CNC equipment

2 误差源分析

数控装备品种复杂, 在虚拟工厂模式下, 通常就涉及机床、机械手、三坐标测量机等, 而且不同的装备涉及的误差也不一样, 为了便于阐述, 本文以典型的五轴机床为例进行展开分析, 如图3所示。

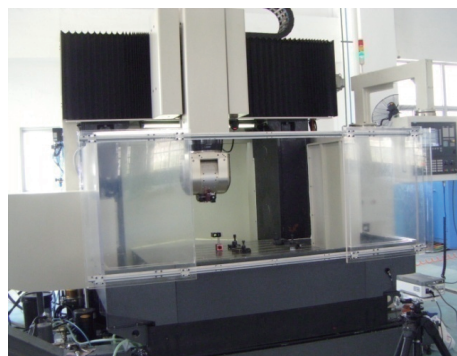


图3 五轴机床

Fig. 3 The five-axis machine tool

机床的空间误差主要由准静态误差和动态误差构成,其中准静态误差占比 70%,而几何误差是决定机床准静态精度的重要因素^[4],因此本文主要分析机床的几何误差,而该误差又分为单轴误差以及坐标体系误差。

(1) 单轴几何误差。单轴几何误差是指机床运动部件在 6 个自由度方向约束未尽,而产生的 3 个位移与 3 个角度误差。为避免赘述,以 Y 轴为例进行分析,如表 1 所示。故对于具有 3 根平移轴及 2 根旋转轴的五轴机床而言,共计有 30 项单轴几何误差。

表 1 Y 轴单轴几何误差

Tab. 1 Single axis geometrical error of Y-axis

位置误差	符号	角度误差	符号
定位误差	$\delta_y(y)$	滚动角误差	$\varepsilon_y(y)$
直线度误差	$\delta_x(y)$	角度误差	$\varepsilon_z(y)$
	$\delta_z(y)$		$\varepsilon_x(y)$

(2) 坐标体系几何误差。坐标体系几何误差主要是指轴与轴之间的位置及方向误差,例如垂直度误差、平行度误差等。

平移轴坐标体系几何误差就是 3 根平移轴间的垂直度误差,分别是 ε_{xy} , ε_{xz} 和 ε_{yz} 。而旋转轴

比平移轴略为复杂,其旋转中心位置非常重要,以 C 轴为例,如图 4 所示,其旋转中心位置偏差就有 XOC、YOC 和 ZOC,分别表示为 P_{xC} , P_{yC} 和 P_{zC} ,其中当 C 轴旋转时,ZOC 的误差并不影响其自身,但是如果后续有其他旋转轴,则会影响后续(例如图 3 中的 A 轴)。除了位置误差,旋转轴也和平移轴一样存在与理论轴不重合的误差夹角,即在 ZY 平面内的垂直度误差 AOC (垂直于 Y 轴),用 S_{yC} 表示;ZX 平面内的垂直度误差 BOC (垂直于 X 轴),用 S_{xC} 表示;以及零位角度误差,用 S_{zC} 表示,该项误差并不影响 C 轴本身,而是影响后续旋转轴。旋转轴 A 轴的误差与 C 轴相似,如表 2 所示。

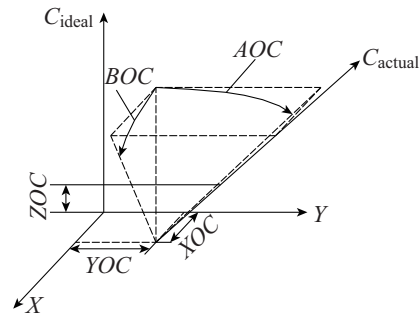


图 4 旋转轴坐标体系几何误差

Fig. 4 Coordinate system geometrical error of rotary axis

表 2 旋转轴坐标体系几何误差

Tab. 2 Coordinate system geometrical error of rotary axes

轴	坐标体系几何误差	符号
旋转轴	C 轴与 X 轴在 XZ 平面内的垂直度误差	$S_{xC}(\varepsilon_{xzc})$
	C 轴与 Y 轴在 YZ 平面内的垂直度误差	$S_{yC}(\varepsilon_{yzc})$
	A 轴与 C 轴在 XZ 平面内的垂直度误差	$S_{cA}(\varepsilon_{xca})$
	A 轴与 Y 轴在 YC 平面内的垂直度误差	$S_{yA}(\varepsilon_{cya})$
	C 轴与 Z 轴的平行度误差	S_{zC}
	A 轴与 X 轴的平行度误差	S_{xA}
	C 轴旋转中心位置沿 X 向的偏差	P_{xC}
	C 轴旋转中心位置沿 Y 向的偏差	P_{yC}
	C 轴旋转中心位置沿 Z 向的偏差	P_{zC}
	A 轴旋转中心位置沿 X 向的偏差	P_{xA}
	A 轴旋转中心位置沿 Y 向的偏差	P_{yA}
	A 轴旋转中心位置沿 Z 向的偏差	P_{zA}

3 几何误差建模

几何误差建模是通过数学模型分析各项几何误

差对系统空间总误差影响,建立两者之间的关系。为了便于进一步讨论,首先将图 3 中五轴机床的实物图转化为结构示意图,如图 5 所示,其中 0 为床身,

1 为机床工作台, 沿 Y 轴运动; 2 为加工工件; 3 为滑块, 沿 X 轴运动; 4 为立柱, 沿 Z 轴运动; 5 为旋转头, 绕 C 轴可实现 $0^\circ \sim 360^\circ$ 旋转; 6 为摇摆头, 绕 A 轴可实现 $\pm 110^\circ$ 的摇摆; 7 为主轴; 8 为刀具。

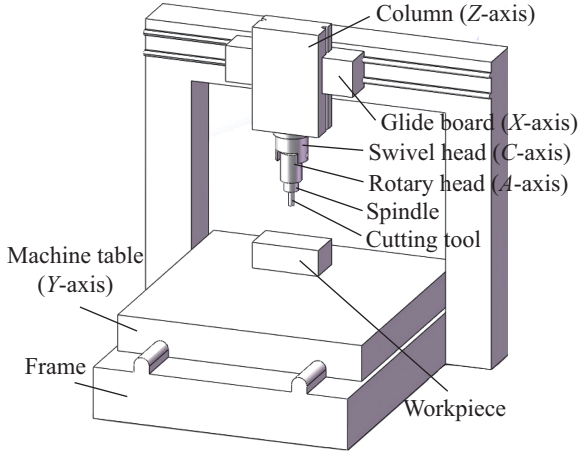


图 5 五轴机床结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of five-axis machine tool

从图 5 中可知, 五轴机床分为了两个支链——刀具支链和工件支链。刀具支链由床身、滑块、立柱、旋转头、摇摆头、主轴和刀具组成; 工件支链由床身、工作台和工件组成 (见图 6)。

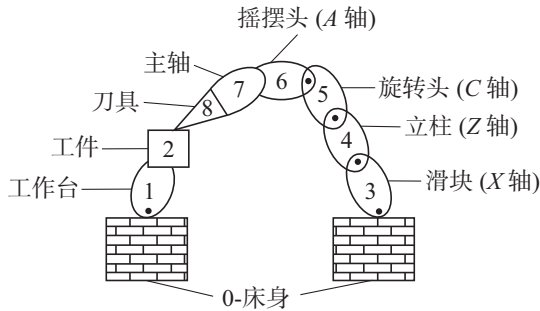


图 6 五轴机床运动链

Fig. 6 The kinematic chain of five-axis machine tool

在理论状态下, 当机床工作时, 刀尖点和工件的被加工位置吻合于特点的设计点 A , 而实际由于误差的存在, 刀尖点和工件的被加工位置吻合于点 A' , 则 AA' 间的差距 (即矢量 AA') 就是几何空间误差。假设工件加工点在工件坐标系的位姿为 T_w , 刀尖点在刀具坐标系的位姿为 T_t , 由于各个位姿无法在不同坐标系中对比, 故需将两者位姿转化至同一坐标系中, 即两支链共有的床身坐标系进行比较。

刀尖在床身坐标系的位置矩阵为

$${}^0T_t = \left[\prod_M T_{ij} \right] = T_{03}T_{34}T_{45}T_{56}T_{67}T_{78}T_t \quad (1)$$

工件被加工点在床身坐标系的位置矩阵为

$${}^0T_w = \left[\prod_N T_{ij} \right] T_w = T_{01}T_{12}T_w \quad (2)$$

几何空间误差为

$$\begin{bmatrix} E \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0T_t - {}^0T_w = \left[\prod_M T_{ij} \right] - \left[\prod_N T_{ij} \right] T_w = T_{03}T_{34}T_{45}T_{56}T_{67}T_{78}T_t - T_{01}T_{12}T_w \quad (3)$$

式中: T_{ij} 为坐标系 i 向坐标系 j 转换的变换矩阵; T_w 为工件加工点在工件坐标系的位姿; 0T_w 为工件加工点在床身坐标系中测量点的位姿; T_t 为刀尖点在刀具坐标系的位姿; 0T_t 为刀尖点在床身坐标系的位姿。

对于相邻的坐标系 ij 而言, 当坐标系 i 向坐标系 j 转换时, 其变换矩阵 T_{ij} 可由位置矩阵 $T_{ij,p}$, 位置误差矩阵 $T_{ij,pe}$, 运动矩阵 $T_{ij,s}$ 和运动误差矩阵 $T_{ij,se}$ 4 部分求得:

$$T_{ij} = T_{ij,p}T_{ij,pe}T_{ij,s}T_{ij,se} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zp} & \varepsilon_{yp} & \delta_{xp} \\ \varepsilon_{zp} & 1 & -\varepsilon_{xp} & \delta_{yp} \\ -\varepsilon_{yp} & \varepsilon_{xp} & 1 & \delta_{zp} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zpe} & \varepsilon_{ype} & \delta_{xpe} \\ \varepsilon_{zpe} & 1 & -\varepsilon_{xpe} & \delta_{ype} \\ -\varepsilon_{ype} & \varepsilon_{xpe} & 1 & \delta_{zpe} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zs} & \varepsilon_{ys} & \delta_{xs} \\ \varepsilon_{zs} & 1 & -\varepsilon_{xs} & \delta_{ys} \\ -\varepsilon_{ys} & \varepsilon_{xs} & 1 & \delta_{zs} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zse} & \varepsilon_{yse} & \delta_{xse} \\ \varepsilon_{zse} & 1 & -\varepsilon_{xse} & \delta_{yse} \\ -\varepsilon_{yse} & \varepsilon_{xse} & 1 & \delta_{zse} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

因此, 几何空间误差式 (3) 中所涉及的所有坐标

系变换矩阵, 均可采用式 (4) 计算得出, 为避免赘述, 此处以 T_{01} 为例, 展开详细介绍, 如下式所示:

$$T_{01} = T_{01,p} T_{01,pe} T_{01,s} T_{01,se} =$$

$$\mathbf{I}_{4 \times 4} \mathbf{I}_{4 \times 4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(y) & \varepsilon_y(y) & \delta_x(y) \\ \varepsilon_z(y) & 1 & -\varepsilon_x(y) & \delta_y(y) \\ -\varepsilon_y(y) & \varepsilon_x(y) & 1 & \delta_z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(y) & \varepsilon_y(y) & \delta_x(y) \\ \varepsilon_z(y) & 1 & -\varepsilon_x(y) & \delta_y(y) + y \\ -\varepsilon_y(y) & \varepsilon_x(y) & 1 & \delta_z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

按照式 (5) 的样式, 通过式 (4) 可以求得所有式 (3) 中涉及的坐标变换矩阵, 并将所得结果代入式 (3), 即可推出几何空间误差。由于每一个误差项在数量级上均很小, 因此可以忽略二阶及二阶以上的无穷小, 结果则如下式所示:

$$\begin{bmatrix} E \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta y & \Delta z & 1 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

式中:

$$\Delta x = \delta_x(x) - \delta_x(y) + \delta_x(z) - p_x + x - x_{wd} +$$

$$p_y \varepsilon_z(y) - p_z \varepsilon_y(y) + \varepsilon_z(y) y_{wd} - \varepsilon_y(y) z_{wd} +$$

$$\delta_x(A) \cos(C) + \delta_x(C) \cos(C) + x_{td} \cos(C) -$$

$$\delta_y(C) \sin(C) + \varepsilon_{xz}(C) z_{td} \cos(A) +$$

$$\varepsilon_y(z) z_{td} \cos(A) - \varepsilon_z(A) y_{td} \cos(C) +$$

$$\varepsilon_y(A) z_{td} \cos(C) + \varepsilon_{xz} y_{td} \sin(A) +$$

$$\varepsilon_y(z) y_{td} \sin(A) - \varepsilon_{xy} x_{td} \sin(C) +$$

$$\varepsilon_{xya} x_{td} \sin(C) - \varepsilon_z(C) x_{td} \sin(C) -$$

$$\varepsilon_z(x) x_{td} \sin(C) - \varepsilon_z(z) x_{td} \sin(C) -$$

$$\delta_y(A) \cos(A) \sin(C) - y_{td} \cos(A) \sin(C) +$$

$$\delta_z(A) \sin(A) \sin(C) + z_{td} \sin(A) \sin(C)$$

$$\Delta y = \delta_y(x) - \delta_y(y) + \delta_y(z) - p_y - y - y_{wd} -$$

$$p_x \varepsilon_z(y) + p_z \varepsilon_x(y) + \varepsilon_{xy} x - \varepsilon_z(y) x_{wd} +$$

$$\varepsilon_x(y) z_{wd} + \delta_y(C) \cos(C) + \delta_x(A) \sin(C) +$$

$$\delta_x(C) \sin(C) + x_{td} \sin(C) + \varepsilon_{xy} x_{td} \cos(C) +$$

$$\varepsilon_{xya} x_{td} \cos(C) - \varepsilon_{yz} z_{td} \cos(A) -$$

$$\varepsilon_x(z) z_{td} \cos(A) + \varepsilon_z(C) x_{td} \cos(C) +$$

$$\varepsilon_z(x) x_{td} \cos(C) + \varepsilon_z(z) x_{td} \cos(C) -$$

$$\varepsilon_{yz} y_{td} \sin(A) - \varepsilon_x(z) y_{td} \sin(A) -$$

$$\varepsilon_z(A) y_{td} \sin(C) + \varepsilon_y(A) z_{td} \sin(C) +$$

$$\delta_y(A) \cos(A) \cos(C) + y_{td} \cos(A) \cos(C) -$$

$$\delta_z(A) \cos(C) \sin(A) - z_{td} \cos(C) \sin(A)$$

$$\Delta z = \delta_z(C) + \delta_z(x) - \delta_z(y) + \delta_z(z) - p_z + z -$$

$$z_{wd} + p_x \varepsilon_y(y) - p_y \varepsilon_x(y) - \varepsilon_{xz} x_{td} -$$

$$\varepsilon_y(C) x_{td} + \varepsilon_y(y) x_{wd} - \varepsilon_x(y) y_{wd} +$$

$$\delta_z(A) \cos(A) + z_{td} \cos(A) + \delta_y(A) \sin(A) +$$

$$y_{td} \sin(A) - \varepsilon_y(A) x_{td} \cos(A) +$$

$$\varepsilon_x(A) y_{td} \cos(A) + \varepsilon_x(C) y_{td} \cos(A) -$$

$$\varepsilon_{xz} x_{td} \cos(C) - \varepsilon_{xz} x_{td} \cos(C) -$$

$$\varepsilon_{yx} x_{td} \cos(C) - \varepsilon_{yz} x_{td} \cos(C) +$$

$$\varepsilon_z(A) x_{td} \sin(C) + \varepsilon_{yz} x_{td} \sin(C) +$$

$$\varepsilon_{yz} x_{td} \sin(C) - \varepsilon_x(A) z_{td} \sin(A) -$$

$$\varepsilon_x(C) z_{td} \sin(A) + \varepsilon_x(x) x_{td} \sin(C) +$$

$$\varepsilon_x(z) x_{td} \sin(C)$$

4 几何误差测量

数控装备的几何误差, 根据各项误差不同的特性可以采用激光干涉仪、球杆仪、水平仪、激光跟踪仪及激光位移传感器等设备, 为避免赘述, 此处以机床常用的激光干涉仪和球杆仪展开介绍。

(1) 单轴几何误差。机床单轴几何误差的测量设备主要是激光干涉仪, 其利用光的干涉原理, 即当两束同频率的相干光在某点相遇时, 倘若恰好是两波峰相遇, 则发生“相长性干涉”, 光强增强; 而倘若波峰遇到波谷, 则发生“相消性干涉”, 光强减弱。因此用激光干涉仪测量机床平移轴时, 线性干涉仪固定在静止的非被测轴上, 而线性反射镜固定在待测的平移轴上, 如图 7 所示。测量时, 一束光源从激光头发出, 由线性干涉仪中的分光镜将光束分为两束同频光, 一束垂直向上照在固定的线性反射镜 (见参考光束, 光程固定不变), 而另一束则透过分光镜, 射

至移动的线性反射镜 (见测量光束), 该反射镜与平移轴一并运动, 如图 8 所示。通过观测干涉的明暗交替次数可得光程的变化量, 而平移轴的运动量则是光程变化量的一半 [5]。

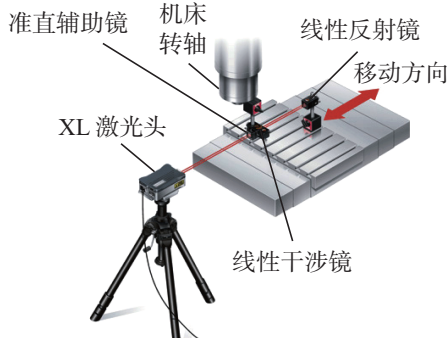


图 7 激光干涉仪测量平移轴的安装布置图

Fig. 7 The installation drawing of laser interferometer for translational axis

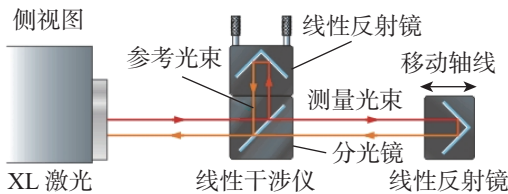


图 8 激光干涉仪测量平移轴的原理图

Fig. 8 The principle diagram of laser interferometer for translational axis

旋转轴的单轴几何误差测量方法与平移轴的类似, 为保持反射镜组直面激光源, 反射镜组上带有高精度转台, 如图 9 所示。测量时, 待测的机床旋转轴向某方向旋转特定的角度, 而反射镜组上的高精度转台会逆方向精确地旋转该角度, 例如待测轴沿正时针旋转 30° , 而误差的存在, 实际可能旋转 $(30+\Delta)^\circ$; 此时, 转台组件会逆时针精确旋转 30° , 这样就使得角度干涉镜保持正对激光头, 而误差 Δ 的测量原理如图 10 所示, 源于激光头的光束被分为两

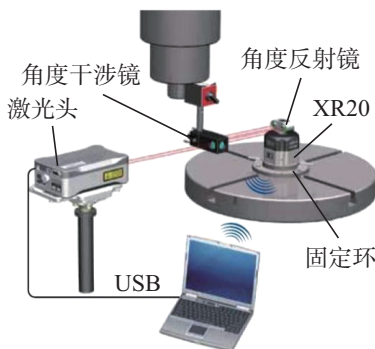


图 9 激光干涉仪测量旋转轴的安装布置

Fig. 9 The installation drawing of laser interferometer for rotary axis

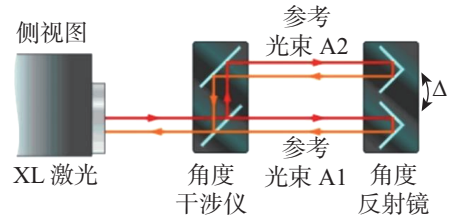


图 10 激光干涉仪测量旋转轴的原理图

Fig. 10 The principle diagram of laser interferometer for rotary axis

股, 一股直接通过干涉镜, 并从角度反射镜的某一半反射回激光头 (参考光束 A1)。另一股在干涉镜的分光器处发生反射, 二次反射后传到角度反射镜的另一半, 角度反射镜使光束通过干涉镜返回到激光头 (测量光束 A2), 由于误差 Δ 的存在, 测量光束 A2 和参考光束 A1 的光程不一致, 通过此光程差就可求得 Δ 。

(2) 坐标体系几何误差。球杆仪可以获得机床的坐标体系几何误差。球杆仪由一根纤维杆和两个球构成, 其中一个球相对于杆是固定连接; 另一端球则与杆边缘处的伸缩装置连接, 并在连接处设置了可伸缩移传感器, 这样就可以监测杆长的变换 [6], 如图 11 所示。当球杆仪工作时, 一端固定在工作台上 (以此点为圆心), 另一端与主轴相连, 并跟随机床主轴做插补圆运动, 此时球杆仪杆长的变化 (即圆弧半径的变化) 为

$$\Delta R = \frac{X\Delta X + Y\Delta Y + Z\Delta Z}{R} \quad (7)$$

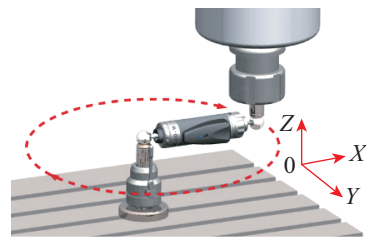


图 11 球杆仪

Fig. 11 The double ball bar

式中: ΔX 、 ΔY 和 ΔZ 分别为与主轴相连的球心与理论值分别沿 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的误差; R 为球杆仪在自由无约束的情况下校准过的杆长; ΔR 为球杆仪杆长的变化。

通过式 (7) 可以分离出机床各类几何误差的数学模型, 因此球杆仪对机床的所有误差项均敏感, 包括垂直度等。

5 实 验

从前文分析可知,五轴机床涉及的几何误差有 45 项,为避免赘述,本文挑选其中 3 项误差进行实验展示,其中 2 项为单轴几何误差,1 项为坐标体系几何误差。实验的对象为图 3 所示的五轴机床,其中 Y 轴的行程为 $0 \sim -1 \text{ m}$, X 轴的行程为 $0 \sim -1.2 \text{ m}$, Z 轴的行程为 $0 \sim -0.5 \text{ m}$, C 轴可以 360° 连续旋转, A 轴的行程为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。

5.1 单轴几何误差

单轴几何误差测量设备为 Renishaw 公司所生产的激光干涉仪,测量系统通常包含电脑、激光头、三脚架、环境温度材料传感器、干涉镜、反射镜、电源装置等。

(1) 平移轴单项几何误差。平移轴的单项几何误差由 Y 轴的定位误差为例进行详细介绍,激光干涉仪测量布置如图 12 所示,由于激光束可以直接与 Y 轴运行方向平行,所以安装比较容易,无需安

装转向镜去转向激光束(对于 X 轴和 Z 轴,本机床需要安装转向镜)。测量布置时,为了减少测量误差及测量不确定度,激光头布置尽可能靠近镜组,同时反射镜组处于近端极限位置时,要与干涉镜组尽可能的靠近。 Y 轴测量位置为 $0 \sim -1 \text{ m}$,其中步长 0.1 m ,测量次数为正反向两次,为了避免反向间隙对测量结果的影响,反向时均设置越程,测量结果如表 3 所示。

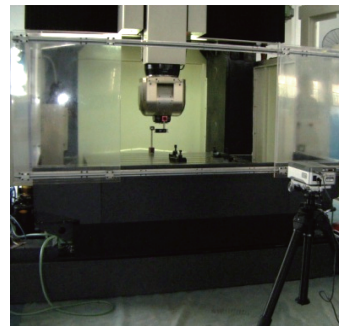


图 12 激光干涉仪测量 Y 轴布置
Fig. 12 The laser interferometer for Y -axis

表 3 Y 轴定位误差结果
Tab. 3 The result of Y -axis positioning error

Y/mm	误差/ μm (第 1 次去程)	误差/ μm (第 2 次去程)	Y/mm	误差/ μm (第 1 次回程)	误差/ μm (第 2 次回程)
0	0	-0.9	-1000	-8	-9.3
-50	0.2	-1	-950	-7.7	-8.8
-100	-0.4	-1.5	-900	-7	-8.1
-150	0	-1.3	-850	-6.2	-7.7
-200	-0.7	-2.2	-800	-5.4	-6.9
-250	-1.7	-3.3	-750	-4.8	-5.8
-300	-1.2	-2.6	-700	-4.5	-5
-350	-1.6	-3	-650	-4.4	-4.7
-400	-2.4	-3.6	-600	-2.2	-2.7
-450	-3.1	-4.3	-550	-3	-3.5
-500	-2.8	-4.1	-500	-2.6	-3.2
-550	-3.2	-4.5	-450	-2.9	-4
-600	-2.4	-3.7	-400	-2.4	-3.4
-650	-4.2	-5.6	-350	-1.9	-2.9
-700	-4.3	-5.7	-300	-1.3	-2.4
-750	-5.1	-6.2	-250	-1.8	-2.7
-800	-6.3	-7.1	-200	-0.8	-1.6
-850	-7.1	-8.1	-150	-0.5	-1.2
-900	-8	-9	-100	-1.5	-2.2
-950	-8.9	-10	-50	-0.7	-1.5
-1 000	-9.2	-10.6	0	-0.3	-1.2

(2) 旋转轴单项几何误差。旋转轴的单项几何误差由 C 轴的定位误差为例展开详细介绍。测量布置时,为了减少测量误差及测量不确定度,激光头布置

尽可能靠近镜组,同时反射镜组处于近端极限位置时,要与固定镜组尽可能的靠近,其布置图如 13 所示。 C 轴的测量范围是 $-360^\circ \sim 360^\circ$,步长为 20° ,

越程为 5° , 测量结果如表 4 所示。

表 4 C 轴定位误差结果
Tab. 4 The result of C -axis positioning error

C 轴测量 位置/ $^\circ$	误差/arcsec (去程)	C 轴测量 位置/ $^\circ$	误差/arcsec (回程)
-360	0	360	0.003 4
-340	0.001 6	340	0.006 6
-320	0.007 0	320	0.013 4
-300	0.014 8	300	0.016 6
-280	0.017 5	280	0.018 3
-260	0.011 8	260	0.017 9
-240	0.009 5	240	0.012 3
-220	0.006 3	220	0.009 5
-200	0.005 5	200	0.005 3
-180	0.006 8	180	0.007 0
-160	0.007 9	160	0.006 9
-140	0.008 9	140	0.007 3
-120	0.013 8	120	0.010 6
-100	0.017 3	100	0.014 5
-80	0.017 6	80	0.019 4
-60	0.016 1	60	0.016 6
-40	0.012 8	40	0.009 3
-20	0.007 7	20	0.003 0
0	0.002 9	0	0.004 6
20	0.002 2	-20	0.008 9
40	0.010 2	-40	0.015 0
60	0.015 9	-60	0.017 0
80	0.019 9	-80	0.018 1
100	0.013 7	-100	0.016 9
120	0.011 7	-120	0.010 4
140	0.008 5	-140	0.007 0
160	0.008 2	-160	0.003 9
180	0.009 6	-180	0.005 4
200	0.007 9	-200	0.005 2
220	0.012 5	-220	0.005 8
240	0.017 2	-240	0.009 2
260	0.021 6	-260	0.011 1
280	0.022 0	-280	0.017 0
300	0.020 4	-300	0.015 7
320	0.016 3	-320	0.005 7
340	0.010 5	-340	-0.000 1
360	0.008 3	-360	0.001 2

5.2 坐标体系几何误差

以 X 、 Y 轴的垂直度误差为例介绍机床坐标体系误差的测量, 测量设备采用 Renishaw 的 QC20 无线球杆仪, 如图 14 所示, 测量杆长 100 mm, 测量过程中 X 、 Y 轴插补圆, 全部测量行程 360° , 其中越程 45° , 测量结果如图 15 所示, X 轴和 Y 轴的垂直度为 $-27.2 \mu\text{m}/\text{m}$



图 13 激光干涉仪测量 C 轴布置
Fig. 13 The laser interferometer for C -axis



图 14 球杆仪测量安装图
Fig. 14 The installation drawing of double ball bar

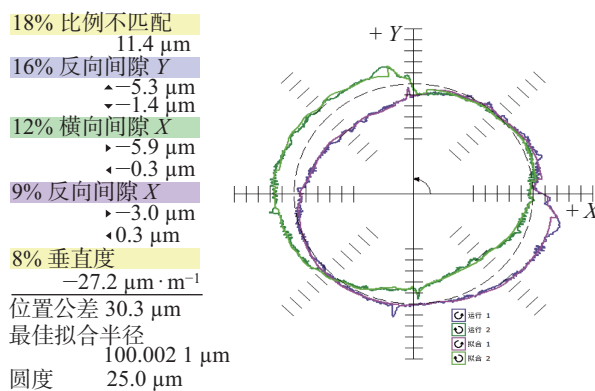


图 15 X 、 Y 轴球杆仪测量结果
Fig. 15 The result of X 、 Y -axis ball bar

6 补偿数据处理

机床是一个综合的系统, 涉及 45 项几何误差, 补偿时涉及的每一项误差的信息量巨大, 既包含测量节点信息, 也包括非测量节点信息。以 Y 轴定位误差而言, 光测量节点位置就包含 84 个测量结果 (见表 2), 再加上非测量节点的数据, 则信息量非常庞大。而在补偿时, 理论上补偿应该与其产生的误差同步, 而如果补偿给予的信息量过大, 则会发生滞后。而数控装备运行的过程是动态的, 这就意味着当装备从位置 A 已加工到位置 B 时, 补偿却才执行到位置 A, 由此会大大影响补偿的效果。因此, 在补

偿前,需要对数据进行处理,既解决非测量节点数据问题,又简化数据信息量。

数据处理思路:在某一阈值内,连续测量节点数值接近某一线段(用最小二乘法拟合),那么该段内

的补偿数据,就用该线段表示;当超过某一阈值时,则形成新的线段。阈值设定为原始测量数据最大值的 $1/20$,因此 Y 轴的定位误差节点位置可简化为 42 个,信息量同比降低了 50%,如表 5 所示。

表 5 简化后 Y 轴定位误差节点
Tab. 5 The simplification result of Y -axis positioning error

Y/mm	误差/ nm (第 1 次去程)	Y/mm	误差/ nm (第 1 次回程)	Y/mm	误差/ nm (第 2 次去程)	Y/mm	误差/ nm (第 2 次回程)
0	0	-1 000	-8.0	0	-0.9	-1 000	-9.3
-150	0	-750	-4.8	-150	-1.3	-650	-4.7
-250	-1.7	-650	-4.4	-250	-3.3	-600	-2.7
-300	-1.2	-600	-2.2	-300	-2.6	-450	-4.0
-450	-3.1	-550	-3.0	-450	-4.3	-300	-2.4
-550	-3.2	-450	-2.9	-550	-4.5	-250	-2.7
-600	-2.4	-300	-1.3	-600	-3.7	-150	-1.2
-650	-4.2	-250	-1.8	-650	-5.6	-100	-2.2
-700	-4.3	-200	-0.8	-750	-6.2	0	-1.2
-950	-8.9	-150	-0.5	-1 000	-10.6		
-1 000	-9.2	-100	-1.5				
		0	-0.3				

对于非节点位置的误差,可以通过节点位置的连线求得,如图 16 所示,其中红色“*”代表 84 个测量值,连线(线段)是通过最小二乘法拟合所得,连线和“*”重叠代表简化后的节点。从图中可以很直观地看出,数据简化处理后不仅解决了非测量节点数据问题,还大幅降低了节点数量,降低了信息量,为快速有效地补偿奠定了数据基础。

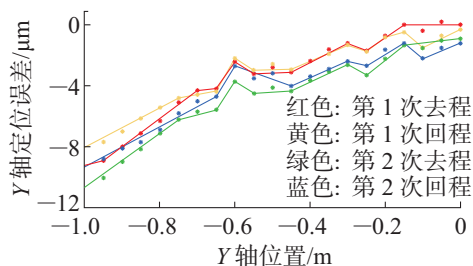


图 16 简化前后 Y 轴定位误差图

Fig. 16 Comparison diagram before and after simplification of Y -axis positioning error

7 结 论

虚拟工厂模式是未来制造业的大趋势,为在该模式下不断提升产品质量,本文主要研究了与之生产过程相关的数控装备精度提升关键技术,具体内容如下:

(1) 以五轴机床为数控装备的代表展开误差补偿研究,首先找出了影响五轴机床精度的 45 项几何误差,这为后续测量指明了方向。

(2) 通过齐次变换矩阵构建了误差模型,建立了五轴机床 45 项几何误差与系统总误差的关系。

(3) 针对五轴机床几何误差进行特性分析,并根据特性构建了测量系统,实验证明了测量系统的有效性。

(4) 针对测量所得的数据,进行了数据处理,不仅解决了非测量节点数据问题,还大幅降低了数据量信息,为快速有效地进行误差补偿奠定了数据基础。

本文还存在一定的不足,尤其是关于涉及补偿执行环节的分析较少,后续还需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 刘进,史康云,宋兴旺,等.虚拟工厂应用的研究综述[J].成组技术与生产现代化,2019,36(2): 17-23.
- [2] 汤伟文.一种智能制造虚拟工厂构建的研究[J].广东技术师范大学学报,2021,42(3): 26-32.
- [3] 张恩康,孙强,果伟.智能制造行业虚拟工厂搭建关键技术[J].制造业自动化,2022,44(7): 162-163.
- [4] 梁小冰,卢耀安,王成勇.双转台五轴机床旋转轴位置无关几何误差的辨识[J].中国机械工程,2023,34(21): 2585-2591.
- [5] 李凯.数控机床的精度检测与误差补偿[J].设备与技术,2023(1): 107-109.
- [6] 黄一师.球杆仪对两轴圆弧插补优化后的检测[J].今日制造与升级,2022(9): 114-116.