

引文格式: 韩伟, 崔益铭, 刘阔, 等. 基于分步体对角线法的数控机床空间误差补偿[J]. 航空制造技术, 2023, 66(23/24): 79-85.

HAN Wei, CUI Yiming, LIU Kuo, et al. Volumetric error compensation of CNC machine tools based on method of sequential step diagonal[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(23/24): 79-85.

基于分步体对角线法的数控机床空间误差补偿*

韩伟¹, 崔益铭¹, 刘阔¹, 陈玉峰², 陈虎², 王永青¹

(1. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024;

2. 科德数控股份有限公司, 大连 116600)

[摘要] 空间误差的测量与补偿是提升机床加工精度的重要手段。本文采用一种基于激光多普勒位移测量仪的分步体对角线法测量辨识了机床的几何误差元素。然后, 基于齐次坐标变换理论, 建立了立式加工中心的空间误差模型, 并采用离线修改 G 代码的方式实施了机床空间误差补偿。与激光干涉仪多线法相比, 分步体对角线法更加简便快捷, 通过 4 次测试快速获得 12 项关键几何误差元素。误差测试与补偿试验结果表明, 加工中心的整体精度水平有了大幅度提高, 体对角线误差降低为原来的 32.5%。

关键词: 空间误差; 分步体对角线法; 误差补偿; 误差辨识; 齐次坐标变换矩阵

Volumetric Error Compensation of CNC Machine Tools Based on Method of Sequential Step Diagonal

HAN Wei¹, CUI Yiming¹, LIU Kuo¹, CHEN Yufeng², CHEN Hu², WANG Yongqing¹

(1. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Kede Numerical Control Co., Ltd., Dalian 116600, China)

[ABSTRACT] The measurement and compensation of volumetric error is an important means to improve the machining accuracy of machine tools. A measurement method based on a laser Doppler displacement meter is used to identify the geometric error elements of the machine tool. Then, based on the theory of homogeneous coordinate transformation, the volumetric error model of the vertical machining center is established. And use offline modification of G code to implement machine tool volumetric error compensation. Compared with the laser interferometer multiline method, the method of sequential step diagonal is simpler and faster, and 12 key geometric errors can be quickly obtained through 4 tests. The results of error test and compensation show that the overall accuracy level of machining center has been greatly improved, and the body diagonal error has been reduced to 32.5%.

Keywords: Volumetric error; Method of sequential step diagonal; Error compensation; Error identification;

Homogeneous coordinate transformation matrix

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.23/24.079

随着现代制造业对加工精度的要求日益增长, 数控机床也向着高精度、高可靠性的方向发展。除了热误差、力误差等误差源外, 几何误差是机床精度的主要影响因

素之一^[1]。根据国际标准 ISO 230-1^[2], 运动轴有 6 项几何误差, 因此三轴机床的几何误差达到 21 项。机床各个运动轴的几何误差耦合形成了空间误差。机床的

* 基金项目: 国家自然科学基金(51775085); 辽宁省科技重大专项(2020JH1/10100016); 辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC1807081)。

空间误差是指在机床工作空间内,刀尖切削点相对于工件在位置和方向上的偏差。空间误差表示在机床工作空间内每点的误差,是机床各运动轴多项几何误差矢量相互叠加的结果。因此,开展几何误差快速测量与辨识方法研究是误差补偿的基础。

机床几何误差测量与辨识可以分为直接测量法和间接测量法两类。直接测量法是使用激光干涉仪、球杆仪、激光跟踪仪等测量仪器直接测得几何误差。间接测量法是基于仪器测量数据、经过计算后间接获得几何误差项的测试方法。相对而言,后者测量效率更高、可获得误差项更多,但测量精度稍差。刘又午等^[3]提出了激光干涉仪9线法辨识三轴机床21项几何误差,但此方法仍然具有测试费时费力的缺点;ISO 230-4: 2005^[4]中的圆测试可以通过球杆仪快速检测直线轴联动的轮廓精度和垂直度;Wang^[5]提出了一种分步体对角线法用于快速辨识三轴机床几何误差元素,但Soons^[6]指出该方法辨识的直线度和定位误差元素将受到机床角度误差的影响而不准确,Ibaraki等^[7]指出激光头和反射镜的对准误差将对辨识精度产生影响;Mutlba等^[8]使用激光跟踪仪在4个站位连续测试大型机床的误差,其测试精度容易受到热误差和重复精度的制约。

近年来,学者们在空间误差建模方面进行大量研究,主要采用了多体理论^[9]、齐次坐标变换法^[10]、旋量理论^[11]等方法。其中,齐次坐标变换方法常用来表达相邻坐标系的位姿关系与转换关系,快速建立空间误差模型。

在误差补偿方面,常用的方法包括离线修改G代码和坐标系零点偏移。修改G代码^[12]是指在加工前对G代码指令进行误差补偿,该方法适用于准静态误差的离线补偿;坐标系零点偏移法^[13]是利用机床的零点偏置功能,通过修改偏移量实时补偿误差,通常用于时变误差(热误差等)的补偿。

综上所述,目前常用的机床误差辨识方法都存在各自的缺点。杨赞等^[14]分析了30台立式加工中心几何误差元素的灵敏度,结果表明角度误差对机床精度影响最小并将其视为非关键误差元素,而分步体对角线法正好可以测得除角度误差以外的12项几何误差。因此,为了实现机床误差快速测试与补偿,采用分步体对角线法对一台辛辛那提SABRE1000立式加工中心进行空间误差的测试,辨识12项关键误差元素,并利用误差模型离线修改G代码的方式实现补偿。试验表明,经过补偿后的机床空间误差有了大幅降低。

1 分步体对角线误差辨识方法

1.1 激光多普勒位移测量仪

激光多普勒位移测量仪(Laser Doppler displacement meter, LDDM)是由美国光动公司1985年研制的一款高效激光测量系统,用于校准CNC机床、坐标测量机等精密平台,其产品精度通过了众多国内外第三方(如Lab、NIST、中国计量院等)权威机构的检测。

LDDM通常由单孔激光头、处理模块、平面镜、温度压力补偿、转向镜以及各种电缆等组成,如图1所示。激光头利用多普勒以及光学外差原理^[15],采用光电装置隔绝散射,激光经转向镜和平面镜反射后被探测器接收。转向镜和平面镜后配有旋转螺母,可微调镜组的俯仰和偏摆角度。相对于双频激光干涉仪,LDDM具有易于安装调试、测量范围大、测量精度高等优点^[16]。

激光多普勒位移测量仪基于多普勒效应和光外差原理,如图2所示^[15]。激光频率为 f_0 ,反射镜以速度 V 运动,激光频率变化 Δf 可通过多普勒原理计算得到,如式(1)所示。而根据光外差原理,可以通过测量相位差计算出位移量 X 。

$$\Delta f = \frac{2f_0 V}{C}$$

$$X = \frac{C}{2f} \left(N + \frac{\phi}{2\pi} \right) \quad (1)$$

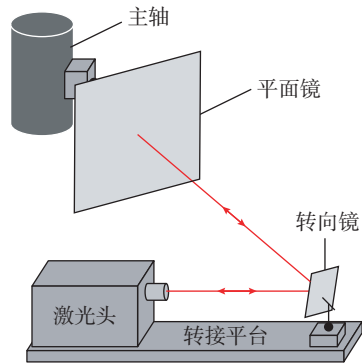


图1 LDDM主要组成部分
Fig.1 Main components of LDDM

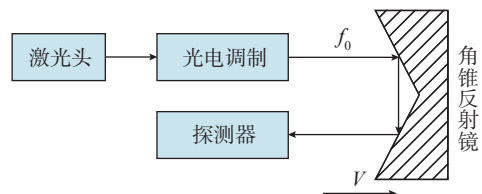


图2 LDDM测试原理^[15]
Fig.2 LDDM test principle^[15]

式中, C 为光速; N 为激光相位周的整计数值; ϕ 为相位角。

1.2 分步体对角线法误差辨识原理

体对角线测量方法最早由美国光动(OPTODYNE)公司提出,后来光动公司又提出了改进的分步体对角线的方法^[17]。体对角线测量即沿着机床工作空间的4条体对角线进行测量,从而解耦得到机床12项误差。这些误差包括3项定位误差、6项直线度误差和3项垂直度误差。文献[14]统计了30台立式加工中心的误差测量结果并对其进行灵敏度分析,分析结果表明,影响立式加工中心空间定位精度的关键误差元素就是上述12项误差,而角度误差可以视作非关键误差元素。

改进的分步体对角线方法将每一步对角线上的运动分解为 X 、 Y 、 Z 方向上的3小步顺序执行,从而得到3倍的数据信息^[17-18]。如图3所示,测量空间分段路径的共8条来回对角线分别为PPP、NPP、PNP、PPN、NNN、PNN、NPN及NPN,其中3个字母依次表示为 X 、 Y 、 Z 向, N 为负向, P 为正向。例如,PPP就是指向3个轴的坐标都增加方向的对角线。如图4所示,在空间中刚体沿着 Y 方向从 A 点运动到 B 点,存在误差矢量 $E(y)$ 。

误差矢量 $E(y)$ 可分解为3个方向误差分量与 X 、 Y 、 Z 方向的单位向量 \vec{x} 、 \vec{y} 、 \vec{z} 乘积之和^[19]。

$$\vec{E}(y) = \delta_{xy}\vec{x} + \delta_{yy}\vec{y} + \delta_{zy}\vec{z} \quad (2)$$

$E_x(y)$ 表示沿 Y 轴运动时在 X 方向的综合误差,沿任意体对角线方向的矢量 R 可表示为

$$\vec{R} = \frac{X}{R}\vec{x} + \frac{Y}{R}\vec{y} + \frac{Z}{R}\vec{z} \quad (3)$$

沿着 Y 轴运动时,在不同体对角线方向的空间误差为

$$\begin{aligned} dR(y)_{PPP} &= \delta_{xy}\frac{X}{R} + \delta_{yy}\frac{Y}{R} + \delta_{zy}\frac{Z}{R} \\ dR(y)_{NPP} &= -\delta_{xy}\frac{X}{R} + \delta_{yy}\frac{Y}{R} + \delta_{zy}\frac{Z}{R} \\ dR(y)_{PNP} &= \delta_{xy}\frac{X}{R} - \delta_{yy}\frac{Y}{R} + \delta_{zy}\frac{Z}{R} \\ dR(y)_{PPN} &= \delta_{xy}\frac{X}{R} + \delta_{yy}\frac{Y}{R} - \delta_{zy}\frac{Z}{R} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $dR(y)_{PPP}$ 表示在对角线PPP方向,沿 Y 轴运动时在该方向产生的误差。通过解方程组式(4)以及 X 、 Z 轴的相应方程组可以得到

$$\begin{cases} \delta_{xx} = [dR(x)_{PPP} - dR(x)_{NPP}] \frac{R}{2X} \\ \delta_{yx} = [dR(x)_{PPP} - dR(x)_{PNP}] \frac{R}{2Y} \\ \delta_{zx} = [dR(x)_{PPP} - dR(x)_{PPN}] \frac{R}{2Z} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \delta_{xy} = [dR(y)_{PPP} - dR(y)_{NPP}] \frac{R}{2X} \\ \delta_{yy} = [dR(y)_{PPP} - dR(y)_{PNP}] \frac{R}{2Y} \\ \delta_{zy} = [dR(y)_{PPP} - dR(y)_{PPN}] \frac{R}{2Z} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \delta_{xz} = [dR(z)_{PPP} - dR(z)_{NPP}] \frac{R}{2X} \\ \delta_{yz} = [dR(z)_{PPP} - dR(z)_{PNP}] \frac{R}{2Y} \\ \delta_{zx} = [dR(z)_{PPP} - dR(z)_{PPN}] \frac{R}{2Z} \end{cases} \quad (7)$$

在测量过程中, dR_{PPP} 、 dR_{NPP} 、 dR_{PNP} 和 dR_{PPN} 可以通过测量得到,在进行体对角线双向测量时还可以得到 dR_{PNN} 、 dR_{NPN} 、 dR_{NPN} 和 dR_{NNN} ,将其代入式(5)~(7)中即可计算出9项误差值。

对于进给轴的3项垂直度 S_{xy} 、 S_{yz} 和 S_{zx} 来说,如图5所示,一般确定 X 轴为基准轴, S_{xy} 和 S_{zx} 以 X 轴为基准,正方向符合 Z 、 Y 轴右手螺旋法则, S_{yz} 以 Y 轴为基准,其正方向符合 X 轴右手螺旋法则。

可以根据直线度计算3项垂直度误差。首先,采用

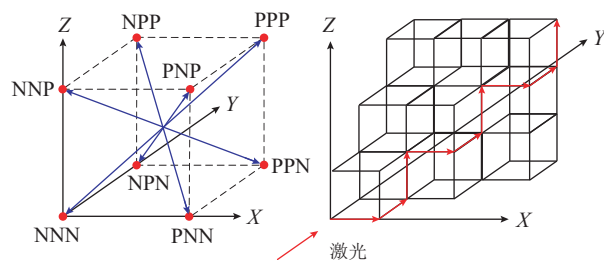


图3 体对角线测量路径与分步体对角线测量
Fig.3 Body diagonal measurement path and sequential step diagonal measurement

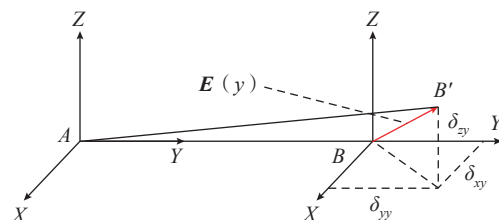


图4 误差矢量
Fig.4 Error vector

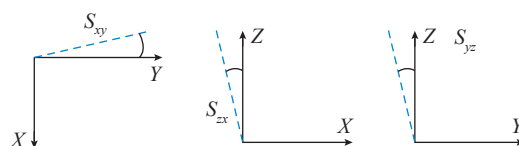


图5 垂直度误差
Fig.5 Squareness errors

最小二乘法拟合直线度,获得进给轴在该方向的偏角,以 Y 轴在 X 方向直线度 $E_x(y)$ 为例,即

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \delta_{xyi} - n \bar{y} \bar{\delta}_{xy}}{\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2}, a = \bar{\delta}_{xy} - b \bar{y} \quad (8)$$

式中, n 为 Y 轴测量点数; y_i 是第 i 个测量点坐标。由最小二乘法可以计算得到 Y 轴在 X 方向的偏角 $A_x(y)$, 即 a 。偏角 $A_x(y)$ 的正方向是 X 轴正向。同理,其他轴的偏角也可通过最小二乘法计算。因此,垂直度误差可以表示为

$$\begin{aligned} S_{xy} &= -(A_x(y) + A_y(x)) \\ S_{yz} &= -(A_z(y) + A_y(z)) \\ S_{zx} &= -(A_x(z) + A_z(x)) \end{aligned} \quad (9)$$

2 空间误差建模及补偿

2.1 空间误差建模

采用齐次坐标系变换方式,对该机床建立空间误差模型。该机床的结构可简写为 WXYZST,与文献 [14] 中的机床相同。根据齐次坐标变换理论,相邻坐标系间的变换矩阵为

$${}^f T_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^y T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^f T_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$${}^s T_w = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^z T_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{zs} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{zs} \\ 0 & 0 & 1 & Z_{zs} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^s T_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{st} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{st} \\ 0 & 0 & 1 & Z_{st} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, ${}^y T_x$ 表示 X 轴坐标系相对于 Y 轴坐标系的变换矩阵; X_{zs} 等表示主轴 s 与 z 轴的位置关系; X_{st} 等表示刀具 t 与主轴 s 的位置关系; f 表示床身坐标系。理想情况下刀具坐标系 t 相对于工件坐标系 w 的齐次变换矩阵为

$${}^w T_t = ({}^f T_y {}^y T_x {}^x T_w)^{-1} {}^f T_z {}^z T_s {}^s T_t \quad (12)$$

几何误差的存在会导致刀尖点的位置发生偏移。实际情况下,在忽略转角误差时,直线轴误差变换矩阵为

$${}^f T_z^e = E_{S_{xz}} \cdot E_{S_{yz}} \cdot {}^f T_z \cdot E_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & S_{xz} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_{xz} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -S_{yz} & 0 \\ 0 & S_{yz} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_{xz} \\ 0 & 1 & 0 & \delta_{yz} \\ 0 & 0 & 1 & \delta_{zz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$${}^y T_x^e = {}^y T_x \cdot E_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_{xx} \\ 0 & 1 & 0 & \delta_{yx} \\ 0 & 0 & 1 & \delta_{zx} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^f T_y^e = E_{S_{xy}} \cdot {}^f T_y \cdot E_y = \begin{bmatrix} 1 & -S_{xy} & 0 & 0 \\ S_{xy} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_{xy} \\ 0 & 1 & 0 & \delta_{yy} \\ 0 & 0 & 1 & \delta_{zy} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中,右上角标 e 表示该齐次变换矩阵受到误差的影响。于是,在有误差的情况下,刀具坐标系 t 相对于工件坐标系 w 的齐次变换矩阵为

$${}^w T_t^e = ({}^f T_y^e {}^y T_x^e {}^x T_w)^{-1} {}^f T_z^e {}^z T_s {}^s T_t \quad (16)$$

基于小误差假设,有误差情况下的变换矩阵 ${}^w T_t^e$ 应是误差运动变换矩阵 ${}^w E_t$ 与理想情况下的变换矩阵 ${}^w T_t$ 的乘积,即

$${}^w T_t^e = {}^w T_t \cdot {}^w E_t, {}^w E_t = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_z & \gamma_y & \eta_x \\ \gamma_z & 1 & -\gamma_x & \eta_y \\ -\gamma_y & \gamma_x & 1 & \eta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, η_x, η_y, η_z 为平移误差; $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ 为转角误差。忽略转角误差,化简后的空间误差为

$$\begin{cases} \eta_x = \delta_{xz} - \delta_{xy} - \delta_{xx} + S_{xy}(Y_{zs} + Y_{st}) + S_{zx}(Z_{zs} + Z_{st} + z) \\ \eta_y = \delta_{yz} - \delta_{yy} - \delta_{yx} - S_{xy}(X_{zs} + X_{st}) - S_{yz}(Z_{zs} + Z_{st} + z) \\ \eta_z = \delta_{zz} - \delta_{zy} - \delta_{zx} - S_{zx}(X_{zs} + X_{st}) + S_{yz}(Y_{zs} + Y_{st}) \end{cases} \quad (18)$$

由此,第 1.2 节中模型辨识得到的 12 项几何误差元素作为输入,通过空间误差模型可计算得到刀尖点的位置偏差。

2.2 空间误差补偿

由于目标机床为某航发公司的立式加工中心,公司有与该机床同型号的加工装备数台,专门用于某种航空零件的大批量加工制造。因此,采用离线修改 G 代码的方式完成误差补偿工作,流程如图 6 所示。

编写 Matlab 程序实现 G 代码修改流程。通过空

间误差模型,计算运动轨迹中的每一个点的空间误差是否在允差范围内。若误差满足允差要求,就按照此轨迹点加工;若不满足,则将空间误差反向叠加到运动轨迹点位上,实现误差的补偿。按照轨迹顺序,依次判别轨迹中所有的点,最后生成补偿后的 G 代码文件。

3 空间误差测试及补偿试验

3.1 基于 LDDM 的误差测试及补偿试验

在某航发公司的辛辛那提 SABRE1000 立式加工中心上进行空间误差测试,该机床采用科德 GNC 数控系统。测试过程中,车间内温度为 25 °C,所采用仪器包括激光多普勒位移测量仪、PC 等。测试现场如图 7 所示。

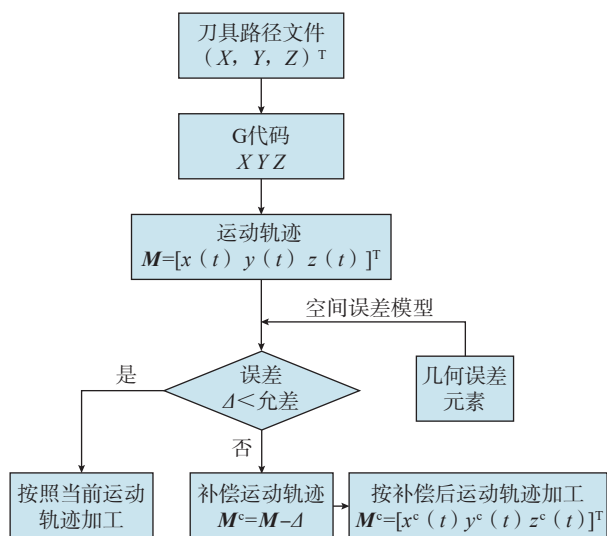


图 6 误差补偿流程
Fig.6 Error compensation process

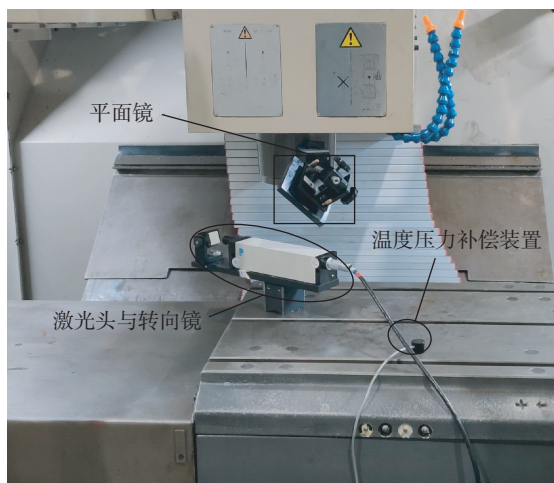


图 7 分步体对角线法误差测试
Fig.7 Method of sequential step diagonal error test

基于 LDDM 的空间误差测试流程如图 8 所示。

首先,在安装调试阶段连接测量设备,包括机床、激光头、温度压力补偿装置和测试软件等。将激光头和转向镜固定于转接平台,并通过磁性底座安装在工作台上;将平面反射镜通过磁性底座安装于主轴上,调整位置使得激光通路沿着某一条对角线方向。在测试软件中设置测试过程中移动的步距与点数信息。通过平面镜上的标靶调试激光,使得激光经反射后回到接收器。在软件中生成测量用 CNC 程序。

完成准备工作后,分别进行 4 条体对角线的误差测量,在误差软件中进行分析计算,获得 12 项误差值。基于第 2.2 节中的误差补偿方法,对测试用 NC 代码实施补偿,生成补偿后的 CNC 文件,使用补偿后的代码重新进行误差测试环节。

3.2 空间误差测试及补偿结果

该加工中心工作空间为 600 mm × 400 mm × 400 mm,测试过程中 X、Y、Z 轴坐标增量分别为 60 mm、40 mm 和 40 mm。误差测试结果如图 9~12 所示,垂直度误差测试结果 XY 平面为 -12.25", YZ 平面为 9.32", ZX 平面为 -12.85"。

测试后发现,在没有任何补偿的情况下,体对角线方向的最大误差超过 50 μm,将会对机床的加工精度产生不良影响。根据上述误差测试结果,实施离线 G 代码

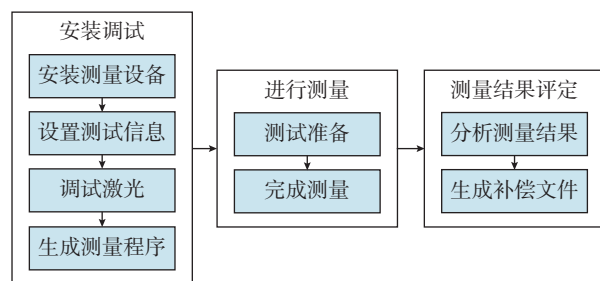


图 8 空间误差测试流程
Fig.8 Volumetric error test process

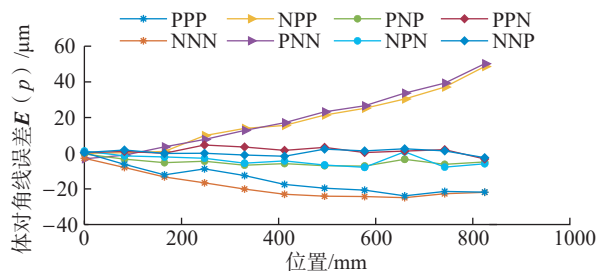


图 9 体对角线误差(补偿前)
Fig.9 Body diagonal errors (before compensation)

补偿,使用补偿后的G代码再次进行误差测试。经过补偿的空间误差补偿试验结果如图13~16所示,补偿后的垂直度误差XY平面为 $-2.21''$,YZ平面 $3.41''$,ZX平面 $0.66''$ 。

通过对比补偿前后的误差值可以看出,补偿前加工中心空间误差整体较大,体对角线误差为 $-24.9\sim 50.2\ \mu\text{m}$,X、Y和Z轴的几何误差分别为 $-11\sim 3.9\ \mu\text{m}$ 、 $-23.6\sim 2.4\ \mu\text{m}$ 和 $-25.9\sim 18.9\ \mu\text{m}$ 。经过误差补偿,体对角线误差降低至 $-8.8\sim 15.6\ \mu\text{m}$,X轴误差范围 $-2\sim 7\ \mu\text{m}$,Y轴误差范围 $-6.8\sim 3.8\ \mu\text{m}$,Z轴误差范围 $-2.2\sim 10.1\ \mu\text{m}$ 。经过空间误差补偿,垂直度误差由补偿前最小 $9.32''$ 减小为补偿后的 $0.66''$ 。试验结果表明,加工中心的空间误差已经有了大幅度的降低。采用分步体对角线法测量空间误

差具有操作简单、方便快捷的优点,并且其补偿精度足够高,可以满足实际生产中用户对数控机床空间误差补偿在精度和实用性方面的要求。

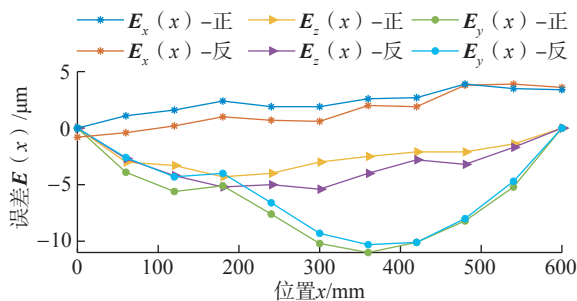


图10 X轴误差(补偿前)
Fig.10 X-axis errors (before compensation)

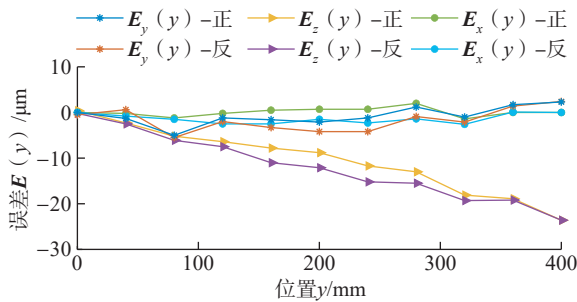


图11 Y轴误差(补偿前)
Fig.11 Y-axis errors (before compensation)

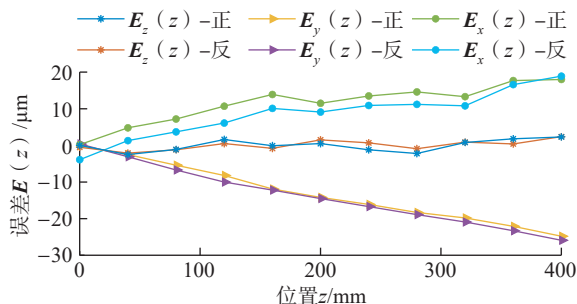


图12 Z轴误差(补偿前)
Fig.12 Z-axis errors (before compensation)

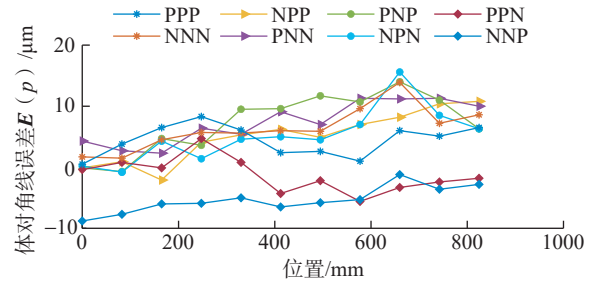


图13 体对角线误差(补偿后)
Fig.13 Body diagonal errors (after compensation)

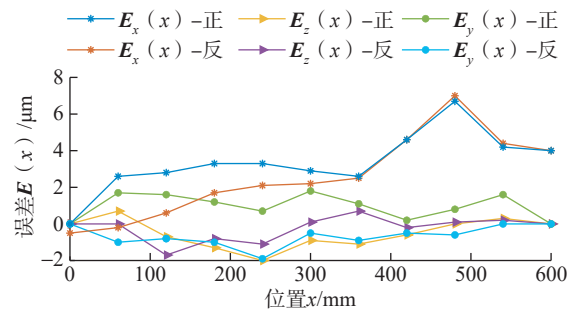


图14 X轴误差(补偿后)
Fig.14 X-axis errors (after compensation)

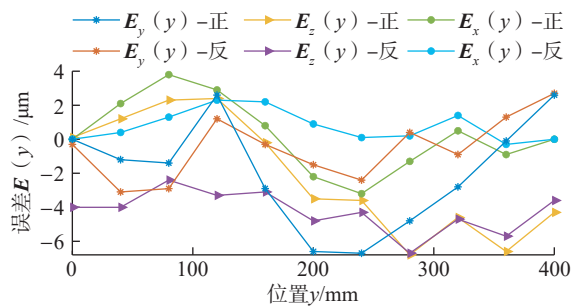


图15 Y轴误差(补偿后)
Fig.15 Y-axis errors (after compensation)

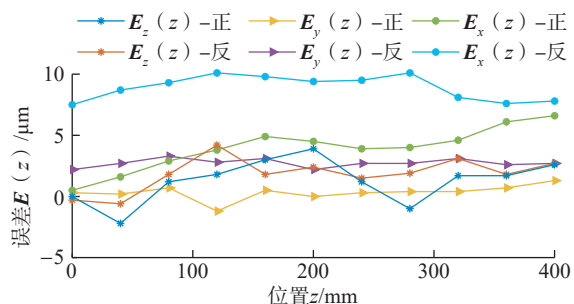


图16 Z轴误差(补偿后)
Fig.16 Z-axis errors (after compensation)

4 结论

采用分步体对角线法对加工中心进行测试,辨识了12项关键几何误差元素。采用齐次坐标系变换方法建立了空间误差模型并通过离线修改G代码的方式完成了空间误差补偿。由于该机床经过长时间使用,运动部件已经受到磨损,并不能达到最好的补偿效果。但测试与补偿试验的结果表明,空间误差补偿整体效果较好,体对角线方向误差、X轴、Y轴、Z轴误差和垂直度误差均有了大幅度降低,补偿后体对角线误差为原误差的32.5%。

参考文献

- [1] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N. Error compensation in machine tools—A review[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, 40(9): 1235–1256.
- [2] Test code for machine tools—Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions: ISO 230-1: 2012[S]. International Organization for Standardization. 2012.
- [3] 刘又午, 刘丽冰, 赵小松, 等. 数控机床误差补偿技术研究[J]. *中国机械工程*, 1998, 9(12): 48–52.
- LIU Youwu, LIU Libing, ZHAO Xiaosong, et al. Research on error compensation technology of CNC machine tools[J]. *China Mechanical Engineering*, 1998, 9(12): 48–52.
- [4] Test code for machine tools—Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools: ISO 230-4: 2005[S]. International Organization for Standardization. 2005.
- [5] WANG C P. Laser doppler displacement measurement a breakthrough in submicrometer positioning technology[J]. *Laser Doppler Displacement Measurement*, 1987, 6(9): 69–71.
- [6] SOONS J A. Analysis of the step-diagonal test[C]//7th International Conference and Exhibition on Laser Metrology, CMM and Machine Tool Performance, LAMDAMAP 2005. Cranfield: Euspen, 2005: 126–137.
- [7] IBARAKI S, HATA T. A new formulation of laser step diagonal measurement—Three-dimensional case[J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(3): 516–525.
- [8] MUTILBA U, YAGÜE-FABRA J A, GOMEZ-ACEDO E, et al. Integrated multilateration for machine tool automatic verification[J]. *CIRP Annals*, 2018, 67(1): 555–558.
- [9] 刘又午, 章青, 赵小松, 等. 基于多体理论模型的加工中心热误差补偿技术[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(1): 127–130.
- LIU Youwu, ZHANG Qing, ZHAO Xiaosong, et al. Multi-body system-based technique for compensating thermal errors in machining centers[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(1): 127–130.
- [10] SRIVASTAVA A K, VELDHUIS S C, ELBESTAWIT M A. Modelling geometric and thermal errors in a five-axis cnc machine tool[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995, 35(9): 1321–1337.
- [11] MOON S K, MOON Y M, KOTA S, et al. Screw theory based metrology for design and error compensation of machine tools[C]// *Proceedings of ASME 2001 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Pittsburgh: ASME, 2001: 697–707.
- [12] ZHU S W, DING G F, QIN S F, et al. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 52(1): 24–29.
- [13] 杨建国, 张宏韬, 童恒超, 等. 数控机床热误差实时补偿应用[J]. *上海交通大学学报*, 2005, 39(9): 1389–1392.
- YANG Jianguo, ZHANG Hongtao, TONG Hengchao, et al. The application of real-time thermal error compensation on NC machine tools[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2005, 39(9): 1389–1392.
- [14] 杨赞, 朱梦瑞, 李慧敏, 等. 基于灵敏度分析的立式加工中心批量空间误差建模和补偿[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(7): 204–212.
- YANG Yun, ZHU Mengrui, LI Huimin, et al. Volumetric error modelling and compensation for batch of vertical machining centers based on sensitivity analysis[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(7): 204–212.
- [15] 朱小平, 池晓红. 激光多普勒技术与直线度测量[J]. *现代计量测试*, 1995, 3(5): 17–20.
- ZHU Xiaoping, CHI Xiaohong. Laser Doppler technique and straightness measurements[J]. *Modern Measurement and Test*, 1995, 3(5): 17–20.
- [16] 杨建国, 王正平. 基于LDDM的数控机床几何误差高效辨识[C]//2005年中国机械工程学会年会, 重庆, 2005.
- YANG Jianguo, WANG Zhengping. Geometric error high-efficiency identification of CNC machine tools based on the LDDM technology[C]//2005 Annual meeting of China Mechanical Engineering Society, Chongqing, 2005.
- [17] WANG C. Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors. Part I: Basic theory[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(10): 3933–3937.
- [18] JANEZKO J, GRIFFIN B, WANG C. Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric position errors. Part II: Experimental verification[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(10): 3938–3941.
- [19] 关贺, 杨建国, 窦小龙, 等. 数控机床空间定位精度的测量与补偿[J]. *世界制造技术与装备市场*, 2004(2): 80–83, 85.
- GUAN He, YANG Jianguo, DOU Xiaolong, et al. Measurement and compensation of volumetric positioning errors for CNC machines[J]. *World Manufacturing Engineering & Market*, 2004(2): 80–83, 85.

通讯作者: 刘阔, 副教授, 博士, 研究方向为智能数控加工技术。

(责编 古系)