

文章编号 1004-924X(2014)04-1004-08

车铣复合加工中心综合误差检测及补偿策略

谢春^{1*}, 张为民²

(1. 同济大学中德工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 根据五轴车铣复合加工中心的结构及其运动链构型特点, 设计了综合误差检测方案。检测包括车主轴床身至铣主轴运动链的空间误差检测以及车主轴的热误差检测两部分。由于检测方案使刀具—工件之间构成了完整的运动链, 解决了单纯的空间误差检测方法未考虑车主轴运动链误差影响的问题。文中同时提出了车铣复合加工中心综合误差补偿策略以及运用神经网络算法的几何误差和热误差综合补偿模型。采用分步体对角空间误差检测后, 实施了空间误差补偿。补偿后四条体对角线的空间误差都明显减小, 减小幅度从 15.24 μm 到 50.83 μm , 误差补偿效果从 39.10% 提高到 78.06%。本文提出的方法极大地改善了空间误差补偿精度。

关键词: 五轴加工中心; 车铣复合加工中心; 综合误差; 误差检测; 误差补偿

中图分类号: TG659; TH161.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142204.1004

Comprehensive measurement errors of 5-axis turning-milling centers and their compensation strategies

XIE Chun^{1*}, ZHANG Wei-min²

(1. Sino-German College of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

* Corresponding author, E-mail: xc0522@tongji.edu.cn

Abstract: A comprehensive error measurement plan was designed based on the structure and characters of the kinematic chain for a 5-axis turning-milling combine machine system to compensate errors. The measurement tests include two parts: the volumetric error between turning main spindle frame and milling spindle and the thermal error of turning main spindle. As the plan combined the tool and the working piece to be a complete kinematic chain, the problem of the turning main spindle chain error effect which was not considered in the single space measurement was solved. The comprehensive error compensation model of geometrical errors and thermal errors were also set up based on artificial neural network algorithm and then the volumetric error was compensated after measurement in body diagonals along three axes. The experiments show that the volumetric errors of four body diagonals are obviously decreased with the values from 15.24 μm to 50.83 μm after compensation and the compensation effects have been improved from 39.10% to 78.06%. The method improves volumetric error compensation accuracy.

Key words: 5-axis machining center; turning-milling machining center; comprehensive error; error measurement; error compensation

收稿日期: 2013-09-02; 修订日期: 2013-11-01.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (No. 2012ZX04005031)

1 引言

数控机床误差检测的方法主要有单项误差检测和对角线误差检测。五轴数控机床的误差至少有39项^[1],而一台配置完整的五轴车铣复合加工中心的误差多达75项^[2]。如果采用单项误差检测法,须对每个轴进行标定和校准^[3],这必将花费巨大的时间和成本。另外,由于数据采集时间间隔过长,数控机床误差的随机性还会影响数据之间的一致性和相关性,从而降低数据的有效程度。最重要的一点是,数控机床单项误差的变化并不能直接映射到加工误差上,有时二者的变化方向甚至相反,这使得对单项误差实施补偿效果不佳。因而,对于多轴数控机床,只有采用空间误差检测方法才能直观地反映刀具相对于工件的加工误差,进而实施有效的误差补偿。

最初的数控机床的误差补偿只涉及检测和补偿两部分工作,误差补偿通过修改数控加工程序和代码实现^[4-5]。后来,经研究发现,有效的误差补偿首先应建立误差模型,之后才能进行误差检测和补偿,而且误差建模和检测关系密切,相互依赖^[6-7]。确定模型中机床误差元素和误差检测量之间的函数关系或逻辑算法的过程是误差辨识,故数控机床的误差研究包括误差建模、误差元素辨识、误差测量和误差补偿4部分,其中:误差检测是联系纽带。自20世纪70年代以来,根据数控机床空间误差建立的模型和采集地数据更接近机床加工误差^[8-10]。继而出现了ISO230-6数控机床体对角线误差检测标准和相关测试手段等。

有关空间误差补偿的研究始于三坐标测量机(CMM),将其研究成果应用到结构型式基本相同的三轴数控铣床上,取得了令人满意的结果。五轴数控机床是在三轴数控机床的基础上增加了2个转动轴。但随着运动轴数的增加,不仅机床的误差项增多,而且转动轴产生的误差对其它运动轴的影响比移动轴要复杂,从而导致五轴数控机床的误差建模、误差辨识、误差测量和误差补偿技术比三轴数控机床难度大的多。

目前,对五轴数控机床误差的研究主要在双摆头、双转台和摆头转台3种典型结构上进行,而对于运动链构型与摆头转台类似^[11]的车铣复合加工中心却鲜有讨论。本文以某五轴车铣复合加

工中心为对象,从其构型和运动链角度提出了误差检测方案,并进行了空间误差检测和补偿,进而给出了基于构型的补偿策略。

2 五轴车铣复合加工中心误差建模及其综合误差补偿策略

2.1 五轴车铣复合加工中心运动链构型

车铣复合加工中心(Turning-Milling Center, TMC)如图1所示。其从加工功能上可看作是车削中心(Turning Center, TC)和铣镗中心(Machining Center, MC)组合的产物。TMC和TC的区别在于TMC用一个铣主轴代替了TC中的上刀塔。TC具有8个控制轴,其中4个为联动轴;而TMC比TC多出一个铣主轴B轴,具有9个控制轴,其中5个为联动轴,这使得TMC比TC能加工出更复杂的零件。

TMC有4个运动链,分别是:铣主轴(Milling Spindle, MLS)运动链、车主轴(Main Spindle, MNS)运动链、车副轴(Second Spindle, SDS)运动链和下刀塔(Bottom Tower, BMT)运动链。9个控制轴($X_1, X_2, Y, Z_1, Z_2, Z_B, B, C, C_B$)中有5个为联动轴(X, Y, Z, B, C),如图2所示。

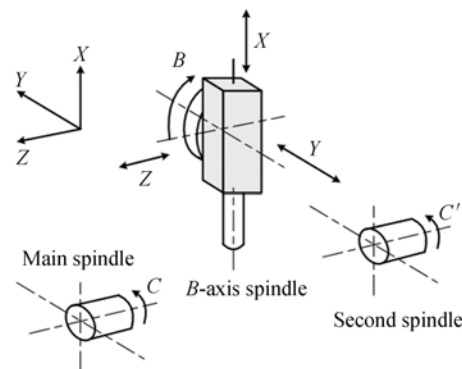


图1 车铣复合加工中心运动轴

Fig.1 Moving axis of turning-milling machining centers

2.2 空间误差建模

建立误差模型是误差研究和补偿的前提,误差模型的精确程度直接影响着误差补偿结果。在一个车铣复合加工中心中,设刀心点相对于工件坐标 $O(O_X, O_Y, O_Z)$ 的误差矢量为 $\Delta O(\Delta O_X, \Delta O_Y, \Delta O_Z)$, T 为理想位姿转换矩阵, O_w 为刀心点相对工件的理想坐标,则有:

$$\Delta O = T \cdot O - O_w \quad (1)$$

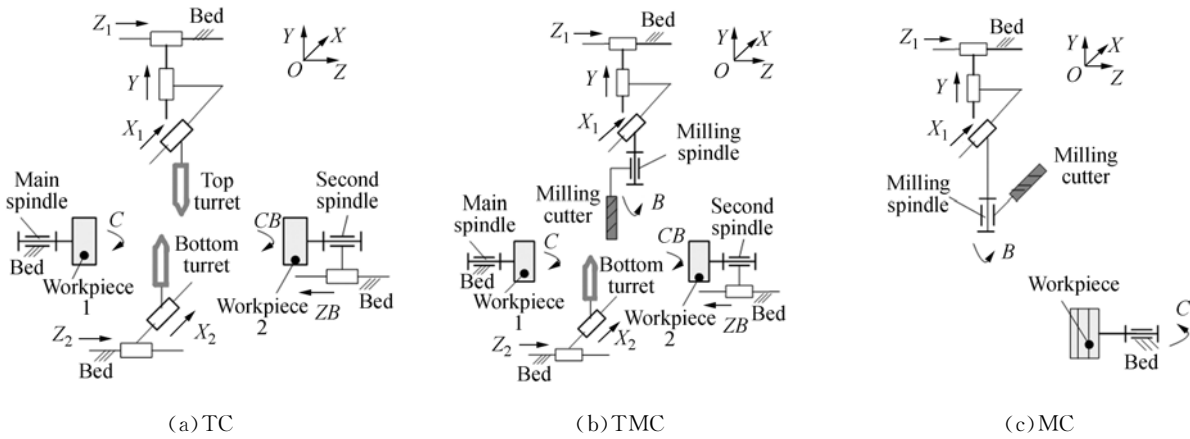


图 2 TC, TMC 和 MC 运动链

Fig. 2 Kinematic chains of TC, TMC and MC

当刀具运动链和工件运动链分别由 n 个和 n' 个刚体构件组成时, 机床多刚体联接关系如图 2(b) 所示, 刀具相对于工件的运动学方程可表示为:

$$\mathbf{T}_n^{n'} = [\mathbf{T}_n^0]^{-1} \cdot \mathbf{T}_n^0 = [\mathbf{T}_{an'}^{(n-1)'}]^{-1} \cdots [\mathbf{T}_{a2'}^{1'}]^{-1} [\mathbf{T}_{a1'}^0]^{-1} \cdot \mathbf{T}_{a1}^0 \cdot \mathbf{T}_{a2}^1 \cdots \mathbf{T}_{an}^{(n-1)}, \quad (2)$$

其中: $\mathbf{T}_n^{(n-1)'}$, \cdots , $\mathbf{T}_2^{1'}$, \mathbf{T}_1^0 , \mathbf{T}_1^0 , $\mathbf{T}_2^1 \cdots \mathbf{T}_n^{(n-1)}$ 分别为相邻刚体间的理想位姿转换矩阵。

若 $\mathbf{T}_{an'}^{(n-1)'}$, \cdots , $\mathbf{T}_{a2'}^{1'}$, $\mathbf{T}_{a1'}^0$, \mathbf{T}_1^0 , $\mathbf{T}_2^1 \cdots \mathbf{T}_{an}^{(n-1)}$ 表示上述各理想位姿转换矩阵的实际位姿转换矩阵, 并且 $\mathbf{O} = [O_x, O_y, O_z, 1]^T$ 表示刀心点在工件坐标系中的坐标矢量, 则有:

$$\Delta \mathbf{O}_W = [\mathbf{T}_{an'}^{(n-1)'}]^{-1} \cdots [\mathbf{T}_{a2'}^{1'}]^{-1} \cdot [\mathbf{T}_{a1'}^0]^{-1} \cdot \mathbf{T}_{a1}^0 \cdot \mathbf{T}_{a2}^1 \cdots \mathbf{T}_{an}^{(n-1)} \mathbf{O} - \mathbf{O}_W. \quad (3)$$

由此得到车铣复合加工中心刀心点误差模型如下:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{O}_X &= (-\Delta X_X - \Delta X_Y - \Delta X_Z - \Delta X_C + \Delta X_B) + (\Delta \gamma_X + \Delta \gamma_Y + \Delta \gamma_{XY} + \Delta \gamma_Z + \Delta \gamma_C - \Delta \gamma_B - \Delta \gamma_{XB}) \mathbf{O}_Y - (\Delta \beta_X + \Delta \beta_Y + \Delta \beta_Z + \Delta \beta_{XZ} + \Delta \beta_C + \Delta \beta_{ZC} - \Delta \beta_B - \Delta \beta_{XB}) \mathbf{O}_Z \\ \Delta \mathbf{O}_Y &= (-\Delta Y_X - \Delta Y_Y - \Delta Y_Z - \Delta Y_C + \Delta Y_B) - (\Delta \gamma_X + \Delta \gamma_Y + \Delta \gamma_{XY} + \Delta \gamma_Z + \Delta \gamma_C - \Delta \gamma_B - \Delta \gamma_{XB}) \mathbf{O}_X + (\Delta \alpha_X + \Delta \alpha_Y + \Delta \alpha_Z + \Delta \alpha_{YZ} + \Delta \alpha_C + \Delta \alpha_{ZC} - \Delta \alpha_B) \mathbf{O}_Z \\ \Delta \mathbf{O}_Z &= (-\Delta Z_X - \Delta Z_Y - \Delta Z_Z - \Delta Z_C + \Delta Z_B) + (\Delta \beta_X + \Delta \beta_Y + \Delta \beta_Z + \Delta \beta_{XZ} + \Delta \beta_C + \Delta \beta_{ZC} - \Delta \beta_B - \Delta \beta_{XB}) \mathbf{O}_X - (\Delta \alpha_X + \Delta \alpha_Y + \Delta \alpha_Z + \Delta \alpha_C + \Delta \alpha_{YC} + \Delta \alpha_{ZC} - \Delta \alpha_B) \mathbf{O}_Y, \end{aligned} \quad (4)$$

其中: X, Y, Z, B, C 为运动轴; ΔX_X 为定位误差;

ΔY_X 为 XY 平面内直线度误差; ΔZ_X 为 XZ 平面内直线度误差; $\Delta \alpha_X$ 为滚转误差; $\Delta \beta_X$ 为仰俯误差; $\Delta \gamma_X$ 为偏摆误差; $\Delta \alpha_{YZ}, \Delta \beta_{XZ}, \Delta \gamma_{XY}$ 为垂直度误差; $\Delta \beta_{XB}, \Delta \gamma_{XB}$ 为 A 轴角度偏差, 以此类推。

2.3 热误差建模

在众多车主轴的温度数据中筛选出用于建模的温度数据, 建立了定量描述温度对热变形影响的热漂移-温度模型。运用多元线性回归方法, 先构造一个五元一次方程, 设热漂移为 E , 检测温度为 T_1, T_2, \cdots , 环境温度为 T_0 , 则:

$$\Delta T_1 = T_1 - T_0, \Delta T_2 = T_2 - T_0, \Delta T_3 = T_3 - T_0, \Delta T_4 = T_4 - T_0, \Delta T_5 = T_5 - T_0,$$

则该多项式可写成:

$$E = \beta_0 + \beta_1 \Delta T_1 + \beta_2 \Delta T_2 + \beta_3 \Delta T_3 + \beta_4 \Delta T_4 + \beta_5 \Delta T_5. \quad (5)$$

用 Matlab 计算出 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$, 由此得到沿 X, Y, Z 向的热误差模型:

$$\begin{aligned} E_x &= -48.239 + 2.433 \Delta T_1 - 0.949 \Delta T_2 + 54.386 \Delta T_3 + 10.523 \Delta T_4 - 13.02 \Delta T_5, \\ E_y &= -36.713 + 4.824 \Delta T_1 - 1.735 \Delta T_2 + 7.236 \Delta T_3 + 14.771 \Delta T_4 - 24.546 \Delta T_5, \\ E_z &= 54.386 - 0.735 \Delta T_1 + 0.250 \Delta T_2 - 1.764 \Delta T_3 - 2.561 \Delta T_4 + 2.497 \Delta T_5. \end{aligned} \quad (6)$$

2.4 车铣复合中心综合误差补偿策略

基于构型的车铣复合加工中心综合误差检测方案同时包含几何误差检测和热误差检测, 而这 2 种误差的产生机理和变化规律各不相同, 并且这些因素和条件常常是随机的、不确定的。这样, 用于建立综合误差模型的非线性算法系统就需要

具有以下条件:能够同时考虑许多因素和条件;能够对不精确的和模糊的信息进行处理;具有并行、分布式存储和处理能力。

神经网络(Neural Networks, NN)模型通过调整内部节点之间的相互连接而形成的复杂网络关系,达到处理信息的目的。它具有很强的分析判断能力和实时处理能力。在神经网络中,得到广泛应用的是逆传播网络(Back Propagation, BP)。鉴于其具有网络结构简单、使用方便等特点,可解决大多数神经网络所面临的问题,所以本文采用BP神经网络构建误差补偿模型。

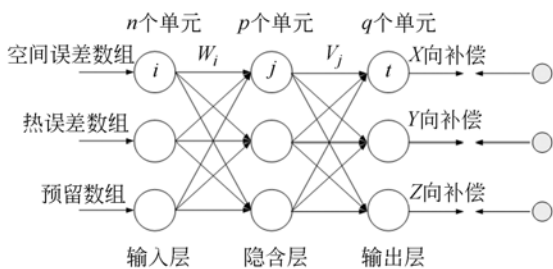


图3 BP神经网络综合误差补偿模型

Fig. 3 Compensation model of comprehensive errors for BP neural network

构造如图3所示的三层BP网络。该结构包括输入几何误差数组、热误差数组、预留数组。其中,预留数组用于输入学习数组。几何误差和热误差需要运用多体动力学、统计回归、遗传算法、支持向量机等方法建立相应的误差模型^[12-13],其输出为X向、Y向、Z向的补偿值。如果补偿误差过大,则按减少期望输出与实际输出间误差的原则,从输出层经各中间层、最后返回输入端,并调整该输入层的权重。

左、右各层之间各个神经元实现全连接,而上下层神经元之间无连接。当给网络提供一对学习模式后,神经元的激活值将从输入层经中间层向输出层传播,在输出层的各神经元输出对应于输入模式的网络响应。

如果实际输出值与期望输出值的误差大于所限定的数值,就要对网络进行校正。校正从后向前进行,即所谓的误差逆传播。

根据如图3构建的神经网络模型,将车铣复合加工中心误差检测方案和补偿策略结合为一体,研究其误差的建模及补偿。

设空间误差数组模型 $E_1 = f_1(E_{X1}, E_{Y1},$

$E_{Z1})$;热漂移数组模型 $E_2 = f_2(E_{X2}, E_{Y2}, E_{Z2})$,其中: E_{X1}, E_{Y1}, E_{Z1} 和 E_{X2}, E_{Y2}, E_{Z2} 分别是空间误差和热误差的3个坐标分量。具体补偿步骤如下:

(1) 输入向量为空间误差数组 $E_1 = f_1(E_{X1}, E_{Y1}, E_{Z1})$ 和热漂移数组 $E_2 = f_2(E_{X2}, E_{Y2}, E_{Z2})$ 。

(2) 输出向量为 X, Y, Z 三坐标的补偿值;

(3) 确定参数值:根据空间误差的贡献概率确定空间误差输入层至中间层的连接权 W_{1j} ;根据热误差的贡献概率确定热误差输入层至中间层的连接权 W_{2j} ;设定误差函数 E;给定计算精度值和最大学习次数 m 。

(4) 该BP空间综合误差补偿模型的输出误差为机床的标定精度。

3 基于构型的车铣复合加工中心综合误差检测方案设计

针对本文试验用五轴车铣复合加工中心(如图4所示)的构型,设计了如图5所示的包括空间误差和热误差在内的综合误差检测方案。这套方案旨在获得较完整的刀具—工件运动链误差检测系统,使所检测的误差更全面,更接近实际误差。考虑到车主轴的主要误差成分是热误差,故确定空间误差检测在车主轴床身和铣主轴滑块之间进行,采用分步体对角线检测法;热误差检测在车主轴部件上进行,并获取温度和热漂移信息。

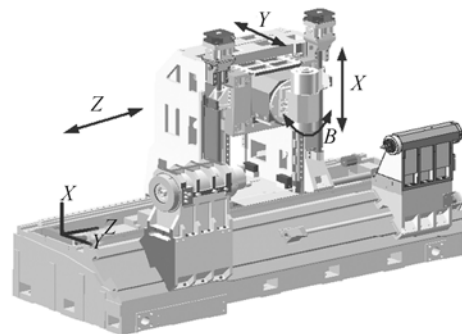


图4 试验用车铣复合加工中心 3D模型图

Fig. 4 3D model of TMC for test

检测方案具体如下:(1)在车主轴床身和铣主轴滑块之间,通过分步体对角线误差检测获得4个体对角线误差、X, Y, Z的3个定位误差、6个直线

度误差、3 个垂直度误差；(2)通过车主轴热漂移检测获得的是多个温度点的温度，以及 X、Y、Z 的 5 个热漂移。2 个系统检测数据的综合结果更接近刀具—工件运动链系统的实际误差，能够比较完整地描述五轴车铣复合加工中心的空间误差特性。

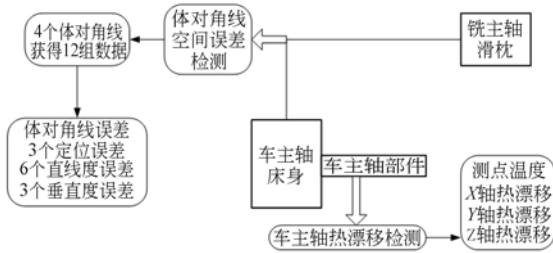


图 5 机床误差检测总体方案

Fig. 5 Overall scheme for machine error detection

4 车铣复合加工中心误差检测

4.1 空间误差检测方法及原理

目前，数控机床空间误差检测的常规方法主要是 ISO 230-6 标准法和分步体对角线位移测量法。ISO 230-6 是用体对角线位移来检测数控机床空间误差的国际标准；而体对角线检测对于所有误差组成相当灵敏，所用时间短、费用少，适用于机床空间性能的快速评定。检测仪器可采用激光干涉仪 (laser interferometer) 或具有类似精度的 ISO 230-1 标准推荐的其他测量系统。在数控机床的工作区域确定一个矩形棱柱作为检测范围，如图 6 所示。将测量仪器安装在矩形棱柱的一条对角线上，使起点和终点对准，设定机床在起点和终点间做矢量移动。分步体对角线位移测量法中，设棱柱体的长、宽、高分别为 nX 、 nY 、 nZ ，如果 P 代表坐标轴的正向， N 代表坐标轴的负向，则 PPP 代表从点 $(0,0,0)$ 到点 (nX, nY, nZ) 的体对角线矢量，该矢量的 X 、 Y 和 Z 向均为正；同理， NPP 、 PNP 和 PPN 分别代表另外 3 个体对角线矢量。

由图 6 可见，与 ISO230-6 标准检测法相比，分步体对角线位移检测法有以下优势：可获得更多的检测数据，并可直接得到大多数单项误差（包含 3 项位移误差、6 项直线度误差、3 项垂直度误差的空间误差和 2 项角度误差）^[14-16]。

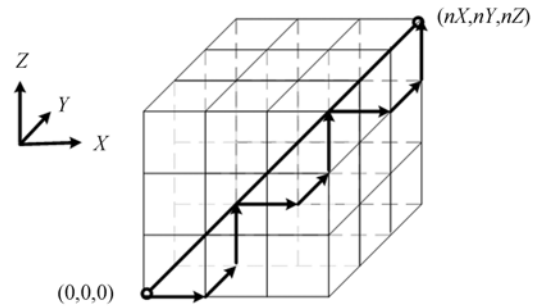


图 6 两种体对角线位移测量法

Fig. 6 Two measurement methods of diagonal displacement

4.2 空间误差检测试验

本文选用光动公司 LDDM 激光多普勒干涉仪对沈阳机床集团生产的某五轴车铣复合加工中心进行了分步体对角线空间误差检测。首先确定一个形状为棱柱体的机床工作空间作为检测区域，然后安装 MCV-5005 激光干涉仪测量装置，包括激光头、靶标等。激光头安装于床身，反射镜安装于 Y 轴双驱形式对应的丝杠滑块上，如图 7 所示。误差检测时，铣主轴 (B 轴) 的 3 个直线轴联动，用于检测 4 个体对角线的位移误差。激光干涉仪沿每一条体对角线进行正向和反向检测，获得 2 组数据和 2 条曲线，如体对角线 PPP/NNN-F 正向曲线和 PPP/NNN-B 反向曲

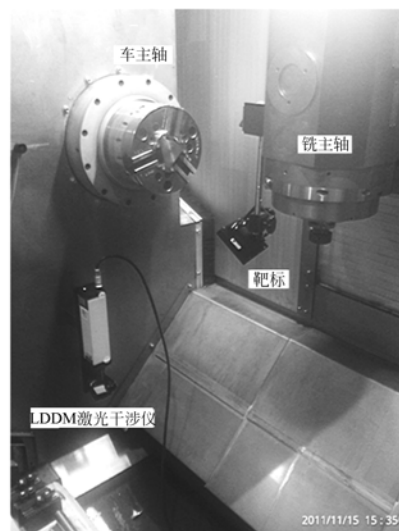


图 7 MCV-5005 激光干涉仪激光头、靶标安装示意图

Fig. 7 Installation diagram of laser head and target for MCV-5005 interferometer laser

线。根据体对角线的正、反向数据,生成与体对角线相对应的 X,Y,Z 轴正、反向误差,即沿 3 个坐标轴的定位误差 LF、LB,垂直直线度误差 VF、VB,以及水平直线度误差 HF、HB。将正、反向误差数据取均值,即得到该对应项的误差。

4.3 热误差检测原理及方法

车主轴夹持工件运转时,工件是悬臂状态,轴承是车主轴的主要热源,故热漂移是车主轴的重要误差源。本试验对车主轴的热漂移进行检测。

温度传感器有接触式和非接触式两大类。数控机床温度检测的常用接触式温度传感器是热电偶,近来又出现了包含温度传感器、A/D 转换器、信号处理器、存储器和接口电路的智能温度传感器^[17-18]。接触式温度传感器需要事先设计传感器的位置,因此,使用时既要充分考虑热源位置,又要兼顾机床的结构布局,同时,其连接的数据线也会给机床运动及检测带来不便。非接触式传感器可以克服上述缺点,所以,本文选用非接触式温度传感器即热像仪检测温度数据。它不受结构限制,捕捉的信息完整、连续,便于数据处理。

热误差检测分为温度检测和热漂移检测 2 部分:

(1) 车主轴温度检测

热像仪直接与 PC 机相连,实时采集数据。采用配套软件人工在热像图的测试对象上直接选取温度点。在车主轴轴承附近选择 2 个部位做热漂移检测:车主轴端面和车主轴后轴承部位。在车主轴端面提取 9 个温度点,在车主轴后轴承部位提取 20 个温度点,分别获得热平衡时的热像图及各温度点的数据和曲线。

(2) 车主轴热误差检测

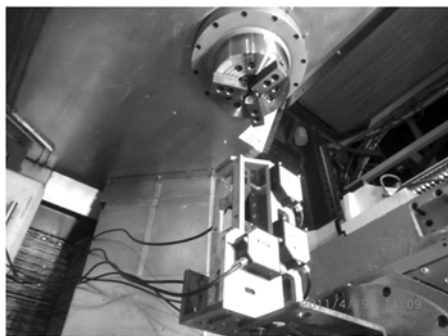


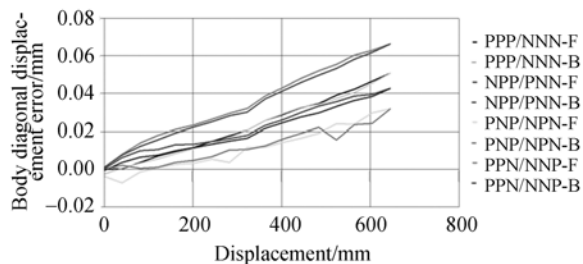
图 8 车主轴热误差检测位移传感器布置图

Fig. 8 Layout of displacement sensors for thermal detection of turning spindle

采用激光三角反射式位移传感器采集热误差数据,配备控制器和数据采集卡等装置,能够实现多个传感器的同时测量和数据同步采集。本次采用 5 个位移传感器检测车主轴热误差。其中, X 向 2 个, Y 向 2 个, Z 向 1 个,如图 8 所示。数据处理后得到 X,Y,Z 3 个方向的热漂移数据。

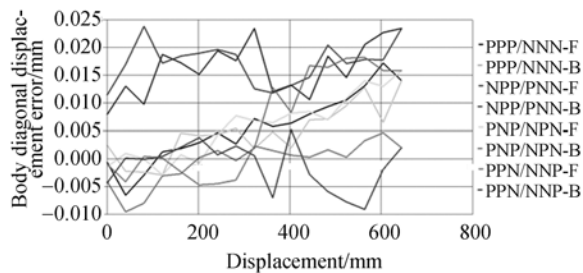
5 空间误差补偿及结果分析

在对某五轴车铣复合加工中心进行空间误差检测的基础上,通过调整数控加工程序中的 G 代码,采用分步体对角误差检测进行补偿。补偿前后的检测条件以及激光头和靶标等套件的安装方式不变,得到对应的误差补偿曲线和数据,如图 9 和表 1 所示。



(a) 补偿前结果

(a) Results before compensation



(b) 补偿后结果

(b) Results after compensation

图 9 补偿前后的体对角线误差曲线

Fig. 9 Error curves of body diagonal displacement before and after compensations

在图 9 中,补偿前曲线基本平稳向上,这显示了随着机床运动距离的增大,误差不断累积;补偿后曲线急剧波动,这反映了数控系统在用 G 代码调整后的误差情况。表 1 是补偿前后的体对角

线误差值的比较。由表 1 可见,补偿后 4 条体对角线的误差都得到了很好的改善,误差降低的幅度为 15.24~50.83 μm ,精度提高了 39.10%~78.06%不等,这说明空间误差补偿效果明显。

表 1 误差补偿前后的体对角线误差值

Tab. 1 Diagonal error values before and after compensations

对角线	补偿前/ μm	补偿后/ μm	误差变化/ μm	补偿效果/(%)
PPP	50.53	12.58	-37.95	精度提高 75.10
NPP	43.20	15.85	-27.35	精度提高 63.31
PNP	38.98	23.74	-15.24	精度提高 39.10
NNP	65.12	14.29	-50.83	精度提高 78.06

试验还获得了补偿前后各坐标轴的定位误差、水平直线度误差和垂直直线度误差曲线和数值。补偿前 X 轴的定位误差和垂直直线度误差较大,水平直线度误差不明显;补偿后 X 轴的定位误差和垂直直线度误差有所改善,但是水平直线度误差却明显加大了,误差增大了近 9 倍,如表 2 所示。Y 轴和 Z 轴的补偿不理想,Y 轴仅垂直度误差有所好转,精度提高不大,Y 轴定位误差、水平直线度误差以及 Z 轴的 3 个误差都加大了,而且 Y 轴水平直线度误差增大了近 13 倍。

表 2 补偿前后各坐标轴误差值

Tab. 2 Errors in each axes before and after compensations

检测项目	补偿前/ μm	补偿后/ μm	结果对比/(%)	
定位精度	36.049	19.873	提高 44.87	
X 轴误差	垂直直线度	30.512	19.216	提高 37.02
	水平直线度	4.573	36.328	降低-694.40
Y 轴误差	定位精度	30.552	39.72	降低-30.00
	垂直直线度	14.544	13.267	提高 8.78
Z 轴误差	水平直线度	2.088	29.057	降低-1 291
	定位精度	31.503	37.815	降低-20.03
Z 轴误差	垂直直线度	9.098	23.311	降低-156.22
	水平直线度	29.029	32.648	降低-12.47

表 3 是补偿前后三轴之间垂直度误差的比较,由表 3 可见,ZX 平面和 XY 平面的垂直度精度有明显提高,但是 YZ 平面的垂直度精度降低了 308%。

表 3 补偿前后三轴之间的垂直度误差值

Tab. 3 Perpendicularity errors between three axes before and after compensations

	ZX 平面	YZ 平面	XY 平面	单位
补偿前	-0.000 022	-0.000 012	0.000 089	rad
	-4.56	-2.56	18.49	(")
	-0.001 267	-0.000 711	0.005 136	(°)
补偿后	ZX 平面	YZ 平面	XY 平面	单位
	0.000 004	0.000 049	-0.000 048	rad
	0.76	10.23	-10.06	(")
	0.000 211	0.002 842	-0.002 794	(°)
提高 81.81% 降低-308% 提高 46.07%				

上述分析表明,对车铣复合加工中心进行误差补偿后,各轴单项误差与体对角线误差的补偿方向表现出不一致性:即各轴单项误差有的减小,有的增大,个别的增大明显;但是作为空间误差的体对角线误差却是减小的,减小幅度为 39.10%~78.06%,误差补偿效果显著。这说明沿各个坐标轴降低单项误差并不一定能够降低代表机床加工误差的空间误差,很可能适得其反,从而达不到预期目的。

以上空间误差的检测和补偿方案是按照常规的数控机床体对角线空间误差检测方法制定的,符合数控机床共性规律,但由于没有考虑不同类型数控机床的结构形式和运动链构成的个性特点,其误差检测信息不全面。因此,有必要从试验用加工中心的构型出发,针对其功能部件的具体布局和运动设置设计符合五轴车铣复合加工中心的检测方案。

6 结 论

本文设计了基于车铣复合加工中心构型的某五轴车铣复合加工中心的综合误差检测方案,解决了以往检测方法未考虑车主轴运动链误差影响的问题。在综合考虑几何误差和热误差的影响条件下,提出了基于构型的车铣复合加工中心综合误差补偿策略。首先运用神经网络算法建立了几何误差和热误差综合补偿模型。然后运用分步体对角位移测量法检测了车铣复合加工中心的空间误差,并以相同的条件和方法实施了误差补偿,补偿之后 4 条体对角线的空间误差的降低幅度为 15.24~50.83 μm ,空间误差补偿精度提高了 39.10%~78.06%,精度明显提高。

需要指出的是,上述空间误差检测和补偿只是工作的一部分,热误差检测和补偿以及综合误差补偿等将在后续工作中完成。

参考文献:

- [1] BOHEZ E L, ARIYAJUNYA B, SINLAPEECHEEWA C, *et al.*. Systematic geometric rigid body error identification of 5-axis milling machines [J]. *Computer-Aided Design*, 2007, 39(4): 229-244.
- [2] XIE CH, ZHANG W M. Structural kinematics and error law research of 5-axis turning-milling complex centers [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 148-149: 649-652.
- [3] 李锐钢. 基于激光跟踪仪标定五轴数控加工中心主轴[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 477-483.
- LI R G. Calibration of tool spindle for 5-axis CNC machine using laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 477-483. (in Chinese)
- [4] VAN TUTTERVELT C A, PENG J. Symbiosis of modelling and sensing to improve the accuracy of workpieces in small batch machining operations [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1999, 15(10): 699-710.
- [5] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N. Error compensation in machine tools—a review: Part II: thermal errors [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000, 40(9): 1257-1284.
- [6] LEETE D J. Automatic compensation of alignment errors in machine tools [J]. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1961, 1(4): 293-324.
- [7] FRENCH D, HUMPHRIES S H. Compensation for backlash and alignment errors in a numerically controlled machine tool by a digital computer program [J]. *Proceedings of the 8th MTDR Conference*, 1967, 8(2): 707-726.
- [8] SCHULTSCHIK R. The components of the volumetric accuracy [J]. *Annals of CIRP*, 1977, 25(1): 223-227.
- [9] CHEN J S, YUAN J X, NI J, *et al.*. Real-time compensation of time-variant volumetric errors on a machining center [J]. *J. Eng. Ind.*, 1993, 115(4): 472-479.
- [10] LIN P D, EHMANN K F. Direct volumetric error evaluation for multi-axis machines [J]. *Int. J. of Mach. Tools & Manufacture*, 1993, 33(5): 675-693.
- [11] CHUN X, ZHANG W M. Kinematic error model between milling spindle and bottom turret on turning-milling complex center [C]. *Proceedings of the 4th Asia International Symposium on Mechatronics (AISM)*, 2010: 379-382.
- [12] 夏毅敏, 张刚强, 罗松保, 等. 非球面超精密机床静压轴承温度场的分布 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1759-1764.
- XIA Y M, ZHANG G Q, LUO S B, *et al.*. Temperature field distribution of non-spherical hydrostatic bearings for ultra-precision machine tools [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1759-1764. (in Chinese)
- [13] WEI ZH ZH, ZHANG G J, LI X. The application of machine vision in inspecting position-control accuracy of motor control systems [C]. *Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, Shenyang, P. R. China: ICEMS*, 2001, 2: 787-790.
- [14] IBARAKI S, HATA T. A new formulation of laser step diagonal measurement—Three dimensional case [J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(3): 516-525.
- [15] WANG C. A definition of volumetric error [J]. *Manufacturing Engineering*, 2005, 134(1): 16-17.
- [16] SVOBODA O, BACH P, LIOTTO G, *et al.*. Definitions and correlations of 3D volumetric positioning errors of CNC machining centers [C]. *Proceedings of the IMTS 2004 Manufacturing Conference*, 2004(9): 1-8.
- [17] 林伟青, 傅建中, 许亚洲, 等. 基于 LS-SVM 与遗传算法的数控机床热误差辨识温度传感器优化策略 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9): 1682-1686.
- LIN W Q, FU J ZH, XU Y ZH, *et al.*. Optimal sensor placement for thermal error identification of NC machine tool based on LS-SVM and genetic algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1682-1686. (in Chinese)
- [18] 苗恩铭, 龚亚运, 成天驹, 等. 支持向量回归机在数控加工中心热误差建模中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 980-986.
- MIAO EN M, GONG Y Y, CHENG T J, *et al.*. Application of support vector regression machine to thermal error modeling of machine tools [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 980-986. (in Chinese)

作者简介:



谢春(1963—),女,吉林长春人,副教授,1989年于长春工业大学获得硕士学位,2013年于同济大学获得博士学位,主要从事机械设计、制造技术及自动化方面的研究。E-mail: xc0522@tongji.edu.cn



张为民(1965—),男,上海人,教授,1987年、1990年和1999年于同济大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事金属切削机床与加工工艺、制造系统及自动化等教学与科研工作。E-mail: iamt@tongji.edu.cn

(本栏目编辑:马健)
(版权所有 未经许可 不得转载)