

五轴联动机床运动轴位置信息高频率高精度实时采集*

程英豪,李迎光,郝小忠,刘长青,张博文

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

[摘要] 高频率高精度的机床运动轴位置信息可用于精确地拟合出机床的加工轨迹,是机床动态误差监测、动态加工精度评估的基础。针对加工过程中机床运动轴位置信息高频率、高精度采集的难题,提出一种五轴联动机床运动轴位置信息高频率高精度实时采集方法。基于机床伺服系统位置环信号采集与分析获取高频原始位置信息,将高频原始位置信息转换为坐标值后进行线性误差补偿和考虑回转误差的齐次运动学变换,最终得到工件坐标系下刀位点坐标形式的高频率、高精度的机床运动轴位置信息。在一台配置西门子 840Dsl 系统的 DMU 80P 五轴数控机床上对采集方法进行验证,试验结果表明五轴同步采集频率达到 1kHz;相对于机床静态定位精度,线性轴采集精度达到 $\pm 2\mu\text{m}$,旋转轴采集精度达到 $\pm 0.0025^\circ$ 。

关键词: 五轴联动机床;高频率;高精度;位置环信号采集;刀位点坐标;加工轨迹

A Method of High-Frequency High-Precision Real-Time Acquisition for Motion Axis Location Information of Five-Axis Machine Tool

CHENG Yinghao, LI Yingguang, HAO Xiaozhong, LIU Changqing, ZHANG Bowen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] The high-frequency and high-precision machine tool motion axis location information can be used to fit the machining trajectory of the machine tool accurately, which is the foundation of dynamic error monitoring and dynamic machining accuracy evaluation. Aiming at the problem of acquiring high-frequency and high-precision machine tool motion axis location information, a method of high-frequency high-precision real-time acquisition for the motion axis of five-axis machine tool was put forward. This method based on gathering and analyzing the signal of the CNC servo system position loop for getting the high-frequency original position information. And then, compensate the linear errors and using homogeneous coordinates transformation which considers the rotary errors after the high-frequency original position information was transformed to coordinate values. The acquisition method was verified on a DMU 80P five-axis machine tool with Sinumerik 840Dsl system. The test indicates a conclusion that five-axis synchronous acquisition frequency reaches 1kHz, compared with the precision of the static location, linear axis acquisition precision reaches $\pm 2\mu\text{m}$ and rotary axis acquisition precision reaches $\pm 0.0025^\circ$.

Keywords: Five-axis machine tool; High frequency; High precision; Position loop signal acquisition; Cutter location point coordinates; Machining trajectory

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.01/02.087

随着零件结构复杂程度和精度要求的提高,五轴联动机床凭借其加工复杂空间曲面时的优良性能,广泛应用于航空航天、精密机械等高端制造领域^[1]。对于现代

高速高精度机床而言,几何精度控制已经达到了相当高的水平,相较而言,动态误差对机床加工质量的影响较大,在五轴联动加工复杂曲面时尤其突出^[2]。Wang等^[3-5]的研究表明S试件可以较好地综合复现出机床的动态误差,但使用这种方法需要进行加工试验以及相关的检测设备。Florussen^[6]和Zhong等^[7]基于R-test测试仪实现了多轴联动时动态误差的检测,但这种方法只能应

* 基金项目: 国家级大学生创新训练计划(201710287043); 工信部智能制造专项(40205000150X); 江苏省杰出青年基金项目(BK20140036); 教师教学能力提升专项(1611JF0502Z)。

用于机床空切削状态。高精度的机床加工轨迹本身就包含了加工过程中的动态误差信息,通过对其监测分析可以识别机床的动态误差大小及变化情况,从而对机床的动态加工性能进行评估。除此之外,采用调整伺服参数或切削参数的方法减少动态误差时,可以通过对加工轨迹分析来验证效果。

为了获取精确的机床加工轨迹信息以支撑加工轨迹监测分析的研究,首先需要获取高频率、高精度的刀位点坐标形式的机床运动轴位置信息。机床加工是一个连续的过程,而采集到的刀位点坐标是离散的点位数据,只有采集频率足够高、采样点密度足够大、采集周期小于机床插补周期时,才能保证加工轨迹信息的精确;另外,因采集值精度要求高,误差过大的数据无法反映真实的轨迹信息,从而使监测与评估失去意义。

获取机床位置信息主要有两种思路,一种是借助于数控系统实时通讯直接获取系统内部各轴的坐标变量值;另一种是在伺服系统位置环采集原始位置信号,从硬件端获取机床位置信息。前者采集到的数值相对准确,以西门子数控系统为例,主要有 OPC 通讯^[8]、NC-PLC 通讯^[9]和 HMI 二次开发^[10]3种途径。但由于数据源为 NC 内存中的坐标变量,所以采集极限频率受限于系统位置环周期,而且通讯过程中的多环节会耗费大量的时间,难以获取插补级频率的实时坐标数据。文献 [2] 和 [11] 中提到了通过采集机床光栅尺信号获取机床位置信息再转换为坐标的方法,并以此为基准分别进行了加工误差补偿和轮廓误差预测准确度的验证。使用该方法采集机床位置信号的频率理论上与数控系统无关,因而可以实现高频率采集。但由于测量系统——工件坐标系下刀位点坐标的运动传递环节中机床存在多种类型的误差,如果不进行误差补偿,得到的坐标数据误差较大,无法用于加工轨迹的监测分析,而文献 [2] 及 [11] 中并没有提到光栅尺数据的补偿问题。

如何在保证获取高于插补频率实时刀位点坐标的同时保证采集数据的精度,并基于商业数控机床进

行开发,目前还没有成熟的解决方案。借鉴伺服系统位置环信号采集的思想和高档数控系统误差补偿方法,本文提出一种五轴联动机床运动轴位置信息高频率高精度实时采集方法,为构建精确的机床加工轨迹以实现动态误差监测、动态加工精度评估奠定了基础。

1 位置环信号采集原理与信号处理方法

1.1 位置环信号采集原理

现代数控机床所配置的伺服系统主要有全闭环和半闭环两种控制模式,其中高档数控机床多采用全闭环控制,本文也以全闭环为例。机床伺服系统在进行全闭环运动控制时有 3 个闭环,分别为电流控制环、速度控制环和位置控制环,如图 1 所示。

其中,位置环的测量元件一般多采用光栅尺,其反馈信号即为原始位置信号,反映了进给轴的位移情况。以光栅尺为例,它输出的原始位置信号为 AB 两相差分正弦波,每变化一个周期对应机床轴在光栅尺上走过一个固定距离,AB 两相信号的相位偏差情况则反映了进给轴运动的方向。如果通过转接头或外加附件将光栅尺测量信号导出,当采样频率足够高时,就能获得高频原始位置信号。对这些信号进行处理分析,就可以得到高频率的机床位置信息,再转换为坐标数据即可。

1.2 原始位置信号——坐标值转换

现代数控机床大部分采用增量式测量系统,采集到的原始位置信号反映的是机床轴相对于参考位置的位移情况;对原始位置信号进行有方向的周期计数,就可以得到用于位移计算的参数值。对于机床自身来说,参考位置一般为参考点。在本文提出方法中,参考位置为初始采集位置,即开始采集原始位置信号时的机床轴在测量系统中的位置。以 X 轴为例,则:

$$X_{\text{Meas}} = X_{\text{Ori}} + N_X \cdot \delta_X \quad (1)$$

其中, X_{Meas} 为 X 轴在测量系统中的原始坐标; X_{Ori} 为初始采集位置处的 X 轴在测量系统中的坐标; N_X 为 X 轴

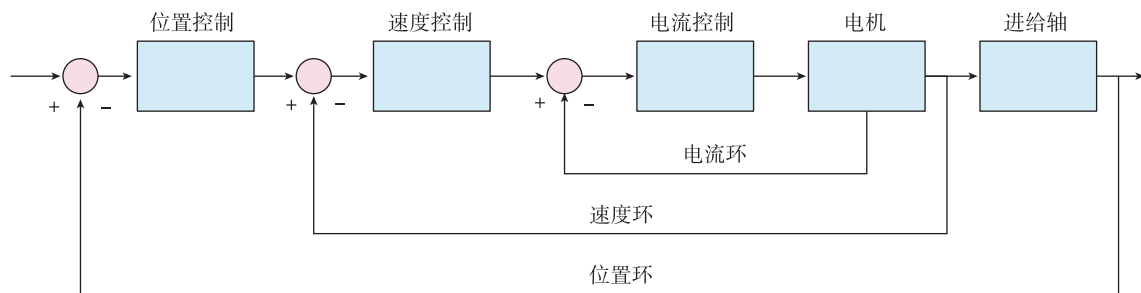


图1 全闭环伺服控制系统结构示意图

Fig.1 Diagram of full closed-loop servo control system structure

用于计算位移的参数值; δ_x 可视为 X 轴的“脉冲当量”,即位移参数值 +1 时 X 轴在测量系统中的坐标变化量,通过试验进行标定。其余坐标轴的坐标转换方法与 X 轴相同。

2 线性误差补偿与考虑回转误差的齐次运动学变换

2.1 误差补偿分析

从测量系统中得到的原始位置信息到工件坐标系下的刀位点坐标,中间环节存在多种类型的误差。由于误差作用机制不同,本文采取的补偿方法和进行补偿的环节也不相同。由图 2 可知,线性误差在“原始位置信号-机床坐标系下实时坐标”环节中进行补偿,回转误差在“机床坐标系下实时坐标-工件坐标系下实时坐标”环节中进行补偿。

由于机床部件制造和装配精度等原因引起的定位误差以及热胀冷缩引起的温度误差等几何误差的存在,测量系统中的位置信息并不能真实反映机床进给轴的实际位置。这类误差直接影响单轴的定位精度,本文称之为线性误差 δ_{line} ,在计算机床坐标系下实时坐标时需进行补偿。

现代数控系统在位置控制时,通常需要进行包括测量系统误差、丝杠螺距误差、温度误差、反向间隙误差、

垂度误差等多项误差的补偿。以 Sinumerik 840X 系列数控系统为例,全闭环位置控制环节误差补偿主要有测量系统误差补偿、温度误差补偿以及垂度误差补偿,补偿原理如图 3 所示。所以,可知 $\delta_{line} \approx \{\delta_{Meas}, \delta_{Temp}, \delta_{Sag}\}$ 。其中, δ_{Meas} 为测量系统误差, δ_{Temp} 为温度误差, δ_{Sag} 为垂度误差。

δ_{Meas} 是由于光栅尺自身刻线的精度以及在后续安装时直线度、挠度等原因引起的误差,在位置反馈环节进行补偿; δ_{Temp} 是由于温度变化引起的机床部件尺寸变化造成的误差,在数控系统计算位置控制器设定值时进行补偿; δ_{Sag} 是由于机床部件位置改变时自重的影响而引起的相关轴的定位误差,在数控系统计算位置控制器设定值时进行补偿。

五轴联动机床旋转轴运动时,回转轴的转心距误差和回转轴偏心距也会影响刀位点在工件坐标系下的实际位置,本文称该误差为回转误差 δ_{rota} 。 δ_{rota} 的存在影响机床坐标系到工件坐标系的运动学转换,因此需要对理论齐次运动学变换公式进行修正。

2.2 线性误差补偿方法

数控系统进行线性误差补偿的依据是系统内置的补偿文件(补偿数据+补偿算法)。借鉴数控系统的误差补偿方法,从数控系统中获取机床补偿文件,在 PC 中对原始坐标信息进行误差补偿。

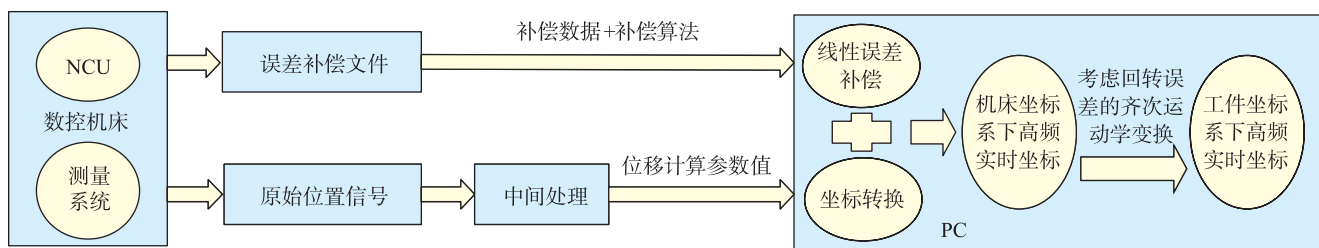


图2 误差补偿过程示意图

Fig.2 Diagram of errors compensation process

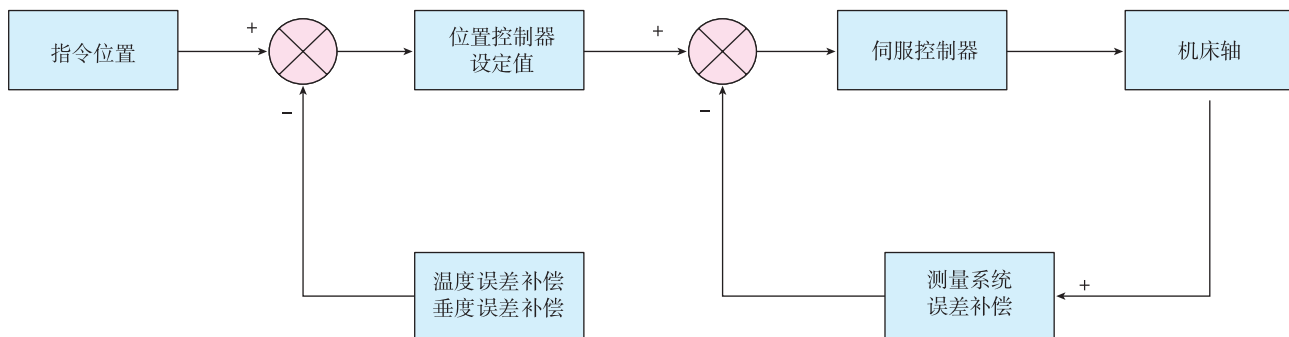


图3 西门子840Dsl系统位置控制环节误差补偿过程示意图

Fig.3 Diagram of errors compensation process for position control of Sinumerik 840Dsl system

以西门子 840Dsl 系统为例,由图 3 可知,机床每一时刻的实际位置认为是当前指令位置,位置控制器设定值即机床测量系统中的实际位置。

以 X 轴为例,一次控制周期完成时,各参数之间的关系可以表示为:

$$X_{Com} - \Delta_{Temp} - \Delta_{Sag} = X_{Set} = X_{Meas} + \Delta_{Meas} \quad (2)$$

其中, X_{Com} 为指令值, X_{Set} 为位置控制器设定值, X_{Meas} 为测量系统中的原始坐标, Δ_{Temp} 为温度误差补偿值, Δ_{Sag} 为垂度误差补偿值, Δ_{Meas} 为测量系统误差补偿值。假设测量过程中的 X 轴当前实际坐标 X_{Real} 即为指令值,所以:

$$X_{Real} = X_{Com} = X_{Meas} + \Delta_{Meas} + \Delta_{Temp} + \Delta_{Sag} \quad (3)$$

计算补偿值的依据是机床补偿文件(补偿数据+补偿算法)和实际采集结果。计算 Δ_{Meas} 的输入为当前轴在测量系统中的原始坐标(未经过测量系统误差补偿),计算 Δ_{Sag} 的输入为基准轴的测量位置(经过测量系统误差补偿),二者的补偿算法均为分段线性插值。

测量系统误差补偿计算公式为^[12]:

$$\Delta_{Meas} = (\Delta_n - \Delta_{n-1}) / l \times (P - P_{n-1}) + \Delta_{n-1} \quad (4)$$

其中, l 为分段线性插值的分段间距; P_{n-1} 和 P_n 为轴测量值所在分段的端点坐标值,且前者小于后者; Δ_{n-1} 和 Δ_n 为当前分段端点值处的补偿值; P 为轴测量值(未经过测量系统误差补偿)。垂度误差补偿计算公式与式(4)形式相同,不同的是计算时的输入为基准轴的测量值,而补偿值则用于补偿轴的补偿^[13]。

计算 Δ_{Temp} 的输入为测量位置(经过测量系统误差补偿)以及机床温度监测点当前温度值。其计算公式为^[14]:

$$\Delta_{Temp} = K_0(T) + \tan \beta(T) \cdot (P' - P_0) \quad (5)$$

其中, $K_0(T)$ 为与轴位置不相关的温度误差补偿值, P' 为轴测量值(经过测量系统误差补偿); P_0 为轴参考点位置; $\tan \beta(T)$ 为与温度相关的温度补偿系数。

2.3 考虑回转误差的齐次运动学变换

不同结构类型的五轴联动机床运动学变换公式不相同,回转误差的作用效果和补偿公式也不相同。由于本文试验所用的五轴机床为非正交 45° 斜摆头形式(如图 4 所示),所以本文以该结构类型为例进行分析。

借鉴运动链思想对非正交 45° 斜摆头五轴机床的齐次运动学公式进行推导。运动链传递关系为:工件—C 轴—Y 轴—X 轴—Z 轴—B 轴—刀具,不考虑回转误差时,令 L 为 B 轴设计转心距,即 B 轴转动时刀基点到

转动轴的距离;令当前刀具长度为 t_1 ;令 C 轴回转中心在机床坐标系下的设计坐标值设为 (X_{C0}, Y_{C0}) ;默认 B、C 轴零点偏置均为 0,设当前零点偏置为 (X_0, Y_0, Z_0) 。机床坐标系下当前坐标为 (X, Y, Z, B, C) ,工件坐标系下刀位点坐标为 (x, y, z) 。

线性轴平移矩阵为:

$$T_{Line} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

B 轴旋转矩阵为:

$$T_B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-45^\circ) & -\sin(-45^\circ) & 0 \\ 0 & \sin(-45^\circ) & \cos(-45^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B & -\sin B & 0 & 0 \\ \sin B & \cos B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ & 0 \\ 0 & \sin 45^\circ & \cos 45^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

零点偏置平移矩阵为:

$$T_{mw} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

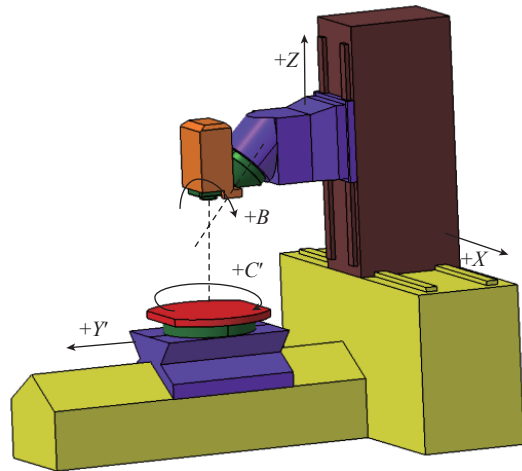


图4 非正交45°斜摆头五轴机床
Fig.4 Non-orthogonal 45° tilt head five-axis machine tool

C轴旋转矩阵为:

$$T_C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{C0} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{C0} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C & -\sin C & 0 & 0 \\ \sin C & \cos C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_{C0} \\ 0 & 1 & 0 & -Y_{C0} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

则齐次运动学变换矩阵可表示为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = T_{mw} T_C T_{Line} T_B \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -t_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

由于回转误差的存在,会影响 T_B 和 T_C 。设 B 轴轴心距误差为 ΔL , B 轴偏心距误差为 $(P_{BX}, P_{BY}, 0)$, C 轴偏心距误差为 $(P_{CX}, P_{CY}, 0)$, 则考虑回转误差的 B 轴和 C 轴的旋转矩阵 T'_B 和 T'_C 分别为:

$$T'_B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & P_{BX} \\ 0 & 1 & 0 & P_{BY} \\ 0 & 0 & 1 & \Delta L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} T_B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -P_{BX} \\ 0 & 1 & 0 & -P_{BY} \\ 0 & 0 & 1 & -\Delta L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$T'_C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & P_{CX} \\ 0 & 1 & 0 & P_{CY} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} T_C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -P_{CX} \\ 0 & 1 & 0 & -P_{CY} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

经过修正之后,用 T'_B 和 T'_C 分别替代式(10)中的 T_B 和 T_C ,再进行计算。

3 开发与验证

为了对本文提出的方法进行验证,以一台配置西门子 840Dsl 系统的 DMU 80P 五轴数控机床(如图 5 所示)为试验平台进行系统开发,对采集频率和采集精度指标进行试验验证。

3.1 基于TM41的高频原始位置信号采集

西门子 Sinumerik 840Dsl 数控系统的 SINAMICS S120 驱动控制系统有一个功能拓展模块——TM41 端子模块,其在机床电器柜中的安装图如图 6 所示。图 6 中间 5 个并列排布的长方体盒子即为 TM41 端子模块,每一个 TM41 对应一根进给轴。可以将光栅尺反馈信号模拟为增量编码器信号进行输出,且输入\输出采样频率能够达到 8kHz。使用这种方法获取的

原始位置信号频率足够高,而且避免了对机床测量系统线路的直接改动。输出信号为 AB 两相差分 TTL 方波,与光栅尺直接输出类似,每变化一个周期对应一个固定距离, A 、 B 两相信号的相位偏差情况反映了运动的方向。

使用编码器采集卡对原始位置信号进行处理分析,即进行有方向的周期计数。为了提高信号的采集精度,采用 4 倍频计数。每出现一次上升沿/下降沿,计数 ± 1 ,正负取决于 A 、 B 相位的偏差情况。为了保证采集计数的速度及可靠性,采用基于 FPGA 的编码器采集卡;为了减少 PC-采集卡的通讯时间,采用 PCI 高速总线协议来建立 PC-采集卡之间的通讯。

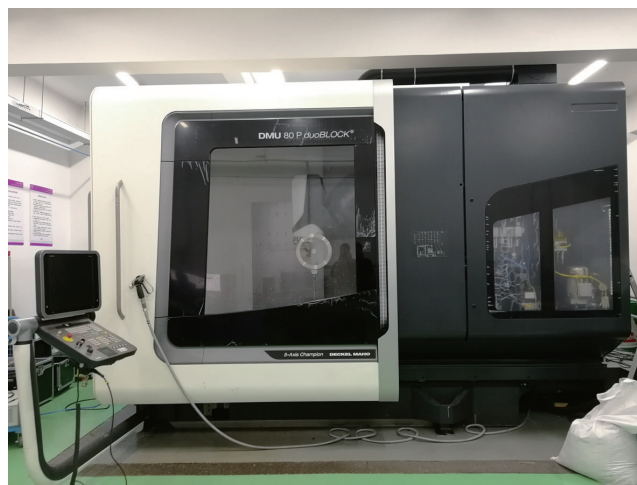


图5 DMU 80P五轴数控机床
Fig.5 DMU 80P five-axis machine tool

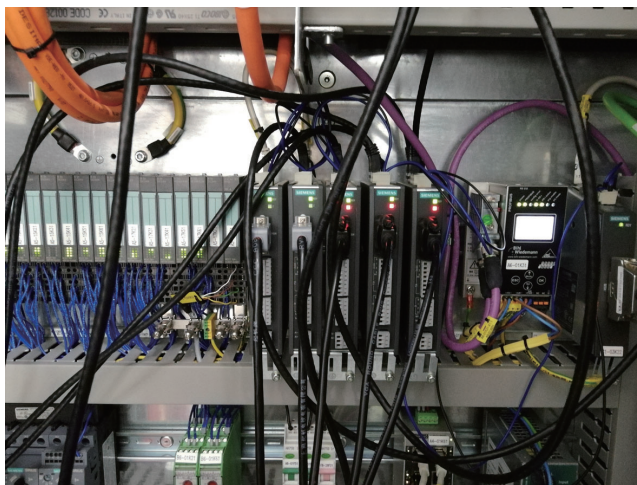


图6 TM41安装图
Fig.6 TM41 installation photo

3.2 系统拓扑结构及通信网络

系统拓扑结构及通信网络如图 7 所示。系统硬件部分包含 5 个 TM41 端子模块、2 块编码器采集卡以及相关通讯和连接线缆；软件部分基于 VC++6.0 开发,实现原始位置信号——坐标值转换、线性误差补偿以及考虑回转误差的齐次运动学变换。

温度误差补偿计算需要获取温度监测点温度值,数控系统在工作过程中该值由 PLC 从传感器中获取,所以采集该值需另外开发采集模块。各轴温度误差补偿值以变量形式存储在 NC 之中,可以使用西门子 840Dsl 系统的 OPC UA 服务器方便地进行读取。考虑到实际加工过程中监测点温度值只处于缓慢变化或稳定状态,因而温度误差补偿值在加工过程中也处于缓慢变化或稳定状态。因此即使 OPC 读取频率低于采集频率,对补偿精度的影响也十分有限。所以,在系统开发时,可通过 OPC UA 客户端程序访问 OPC UA 服务器来直接获取温度误差补偿值,并在线性误差补偿环节进行补偿。

3.3 采集效果验证

为了对采集精度进行验证,在 DMU 80P 五轴数控机床上进行坐标采集试验。DMU 80P 机床有 X、Y、Z 3 个线性轴和 B、C 两个回转轴,试验过程中对 5 个坐标轴进行全行程坐标采集,线性轴采样点间距

为 50mm,回转轴采样点间距为 30°。其中,X 轴行程为 0~800mm,Y 轴行程为 -1050~0mm,Z 轴行程为 -850~0mm,B 轴行程为 -30°~180°,C 轴行程为 0~360°。当机床运动到采样点处时,将系统当前采集值(转换为机床坐标系下坐标值,保留到小数点后 4 位)与采样点理论坐标进行比较,并计算误差。试验结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出,X、Y、Z 轴采集误差均在 $\pm 2\mu\text{m}$ 范围之内,B 轴采集误差在 $\pm 0.001^\circ$ 范围之内,C 轴采集误差相对较大,但也在 $\pm 0.0025^\circ$ 之内。总体而言,采集精度满足加工轨迹监测需求。

4 结论

(1) 借鉴伺服系统位置环信号采集的思想和高档数控系统误差补偿方法,提出了一种五轴联动机床运动轴位置信息高频率高精度实时采集方法,包括高频原始位置信号采集分析、线性误差补偿以及考虑回转误差的齐次运动学变换。

(2) 以一台配置西门子 840Dsl 系统的五轴数控机床为试验平台,对本文方法进行了验证。试验结果表明五轴同步采集频率达到 1kHz;相对于机床静态定位精度,线性轴采集精度达到 $\pm 2\mu\text{m}$,旋转轴采集精度达到 $\pm 0.0025^\circ$ 。

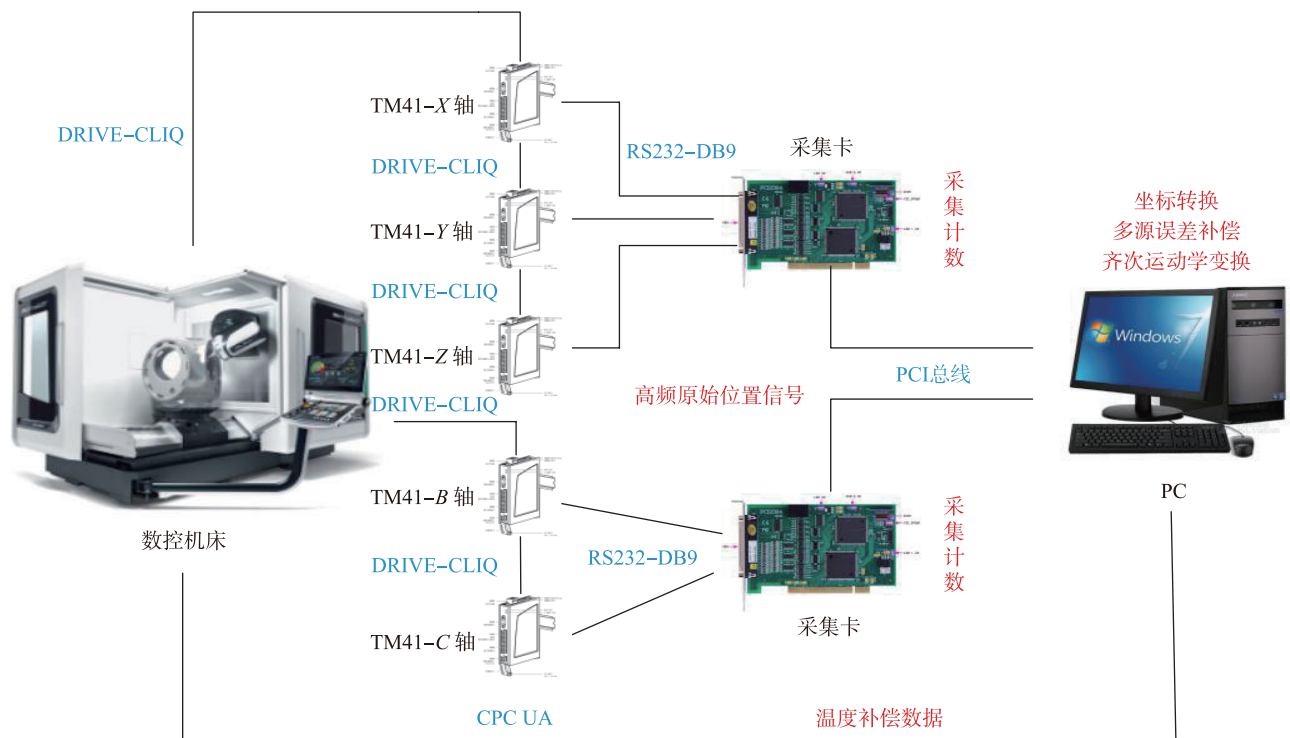


图7 采集系统拓扑结构及通信网络

Fig.7 Topological structure and communication network of the sampling system

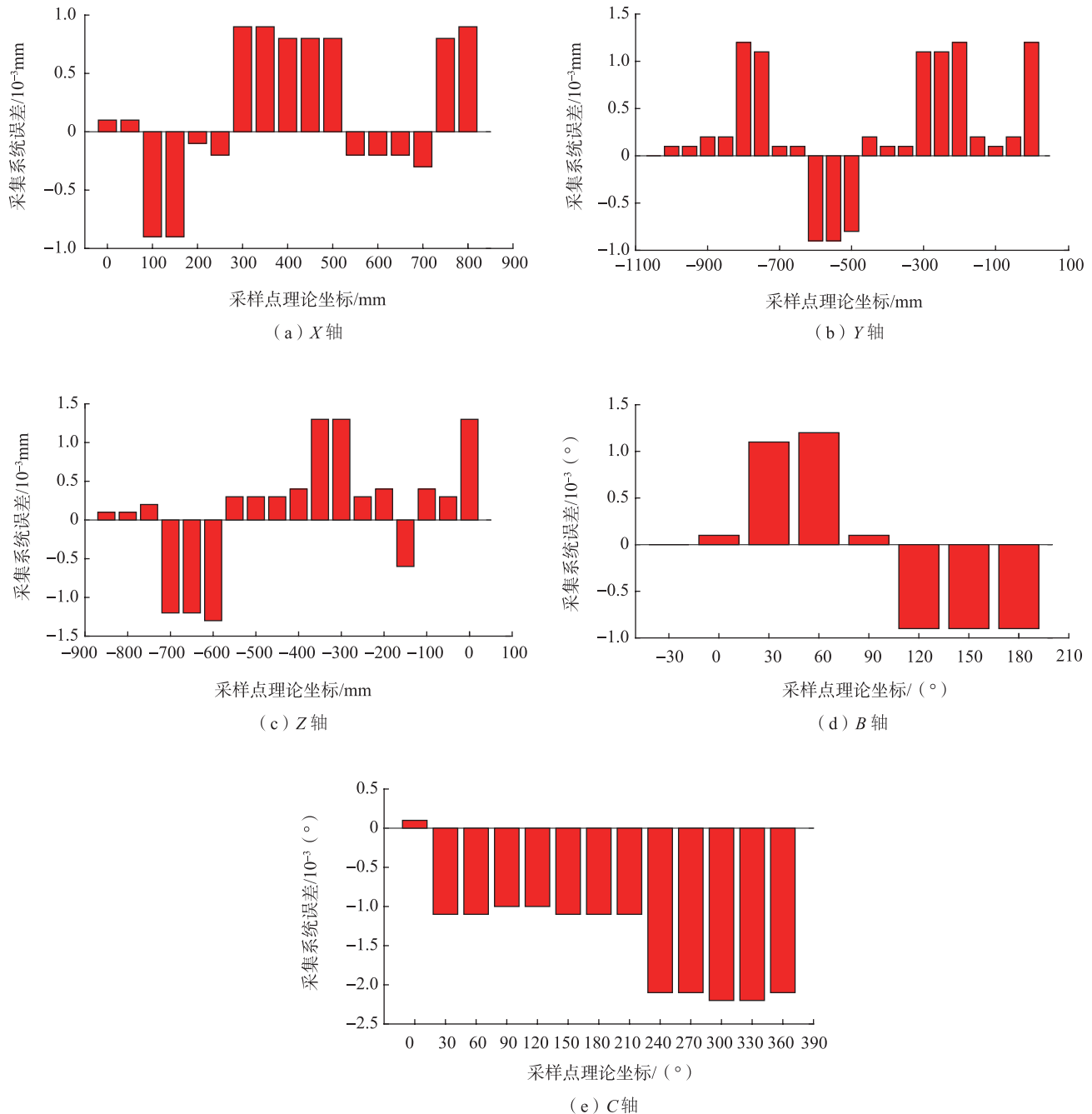


图8 5个坐标轴的采集系统误差
Fig.8 Sampling system error of 5 axes

参考文献

- [1] 姜忠, 丁杰雄, 王伟, 等. 基于RTCP功能的五轴数控机床动态误差溯源方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 187-195.
JIANG Zhong, DING Jiexiong, WANG Wei, et al. Tracing the source of the dynamic error for five-axis CNC machine tool based on RTCP[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 187-195.
- [2] 赵飞, 梅雪松, 李光东, 等. 数控成型磨齿机加工误差在线监测及补偿[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 171-177.
ZHAO Fei, MEI Xuesong, LI Guangdong, et al. Machining error online monitoring and compensation of numerical control forming gear grinding machine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 171-177.
- [3] WANG W, JIANG Z, TAO W J, et al. A new test part to identify performance of five-axis machine tool—Part I: geometrical and

kinematic characteristics of S part[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5-8): 729-738.

[4] WANG W, JIANG Z, LI Q C, et al. A new test part to identify performance of five-axis machine tool—Part II validation of S part[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5-8): 739-756.

[5] JIANG Z, DING J X, SONG Z Y, et al. Modeling and simulation of surface morphology abnormality of 'S' test piece machined by five-axis CNC machine tool[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(9-12): 2745-2759.

[6] FLORUSSEN G H J, SPAAN H A M. Dynamic R-test for rotary tables on 5-axis machine tools[J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 536-539.

[7] ZHONG L, BI Q Z, HUANG N D, et al. Dynamic accuracy evaluation for five-axis machine tools using S trajectory deviation based on R-test measurement[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2017, 125: 20-33.

[8] 王帅, 胡毅, 何平, 等. 基于 OPC 技术实现西门子数控系统的数据采集 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(4): 69-71.

WANG Shuai, HU Yi, HE Ping, et al. The realization of data acquisition about Siemens CNC system based on OPC technology[J]. Combination of Machine Tools and Automatic Processing Technology, 2016(4): 69-71.

[9] 张高尉. 基于西门子 840D 的数控机床生产过程状态监测系统研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.

ZHANG Gaowei. Research on production processing state monitor system for Siemens 840D NC machine tool[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

[10] 付林云. MES 中数控车间数据采集系统的研究和应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

FU Linyun. Research and application of MES numerical control workshop data acquisition system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

[11] CONTE E G D, SCHÜTZER K, ABACKERLI A J. A hybrid monitoring-simulation system for contour error prediction on complex surfaces manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(1-4): 321-329.

[12] 刘朝华, 戴怡, 石秀敏. SINUMERIK 810D/840D 数控系统螺距误差补偿技术研究 [J]. 机床与液压, 2009, 37(4): 34-36.

LIU Zhaohua, DAI Yi, SHI Xiumin. Study on pitch error compensation of SINUMERIK 810D/840D CNC system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(4): 34-36.

[13] 刘朝华, 戴怡, 石秀敏. SINUMERIK 840D 数控系统垂直度误差补偿技术研究 [J]. 机床与液压, 2009, 37(7): 30-31.

LIU Zhaohua, DAI Yi, SHI Xiumin. Study on sag error compensation of SINUMERIK 840D CNC system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(7): 30-31.

[14] 刘朝华, 戴怡, 石秀敏, 等. 西门子 840D 数控系统温度误差补偿的研究与应用 [J]. 机床与液压, 2009, 37(9): 12-13.

LIU Zhaohua, DAI Yi, SHI Xiumin, et al. Study and application on temperature error compensation based on Siemens 840D CNC system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(9): 12-13.

通讯作者: 李迎光, 教授、博士生导师, 研究方向为飞机复杂零件智能数控加工, E-mail: liyingguang@nuaa.edu.cn.

(责编 逸飞)

(上接第86页)

G. Machining fixture layout design using ant colony algorithm based continuous optimization method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(9-10): 922-934.

[7] 董辉跃, 柯映林. 铣削加工中薄壁件装夹方案优选的有限元模拟 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2004(1): 18-22.

DONG Huiyue, KE Yinglin. Finite element simulation for optimal clamping scheme of thin-walled workpiece in Milling Process[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004(1): 18-22.

[8] 姜潮, 韩旭, 钟志华. 电阻点焊焊装夹具定位点的优化设计 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 192-196.

JIANG Chao, HAN Xu, ZHONG Zhihua. Locator optimization for resistance-spot-welding fixtures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 192-196.

[9] 赵敬安. 基于复杂薄壁件综合误差控制的装夹优化方法研究 [D]. 上海: 东华大学, 2010.

ZHAO Jing'an. Research on fixture optimize of the thin-walled parts based on the composite error control[D]. Shanghai: Donghua University, 2010.

[10] 周静. 装夹误差及其主动控制方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

ZHOU Jing. Research on the clamping error and its active control method[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[11] 石志云, 刘渝, 余时建. 基于遗传算法的柔性薄板冲压件定位位置优化设计 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31(7): 1145-1149.

SHI Zhiyun, LIU Yu, YU Shijian. The Locators' layout optimization for flexible sheet metal workpiece using the genetic algorithm[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(7): 1145-1149.

[12] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.

LEI Yingjie, ZHANG Shanwen. MATLAB genetic algorithm toolbox and application[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2005.

通讯作者: 李西宁, 博士、副教授, 研究方向为板料成形技术、飞机装配技术, E-mail: lixining@nwpu.edu.cn.

(责编 铃兰)