

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2614870

基于 MCSA 的数控机床进给系统装配质量检测研究*

周 冉¹, 张 哲¹, 刘曾远^{1,2}, 徐方超¹, 孙 凤¹

(1. 沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870; 2. 通用技术集团大连机床有限责任公司 大连 116000)

摘 要:针对现有数控(CNC)机床进给系统装配质量检测存在信号干扰、装配缺陷弱特征提取难等问题,基于电流信号具备非接触测量、快速响应和采集便捷的特性,提出一种基于电机电流特征分析(MCSA)的装配质量在线检测方法,为解决上述检测难题提供新路径。首先,从机械结构受力角度,系统分析机床进给系统在匀速、加速和减速3种运动状态下所受载荷与所需电机扭矩之间的关系;然后,建立机床进给系统在导轨与丝杠不平行、丝杠预紧力过大及防护罩卡顿等典型装配缺陷下,电机电流信号与所受载荷间的线性映射关系,从而通过理论分析不同装配问题导致的载荷变化会对电机电流产生怎样的影响;最后,搭建机床进给系统装配质量检测信号采集系统,模拟进给系统不同典型装配问题工况,采集不同工况下电机电流数据,进行相关性验证实验和机床进给系统常见装配质量问题模拟实验。相关性实验数据表明电机电流与进给系统扭矩呈正相关关系;装配质量问题模拟实验表明不同装配缺陷会对电机电流信号产生特异性影响,使电机电流信号特征对应发生特定变化。通过分析进给系统在运行时,机床电机电流产生的异常变化,实现对CNC机床进给系统装配质量的有效检测,为后续基于电流信号分析的装配质量问题识别研究奠定了基础。

关键词: 进给系统;装配质量;电机电流;数控机床

中图分类号: TH165+.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

Research on assembly quality detection of CNC machine tool feed system based on MCSA

Zhou Ran¹, Zhang Zhe¹, Liu Zengyuan^{1,2}, Xu Fangchao¹, Sun Feng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of technology, Shenyang 110870, China;

2. Genertec Dalian Machine Tool, Dalian 116000, China)

Abstract: To address the issues of signal interference and the difficulty in extracting weak features of assembly defects in the current computer numerical control (CNC) machine tool feed system assembly quality inspection, this paper proposes an online assembly quality detection method based on motor current signature analysis (MCSA). This method leverages the non-contact measurement, rapid response, and convenient data acquisition characteristics of current signals, offering a new approach to tackle the aforementioned inspection challenges. Firstly, from the perspective of mechanical stress, this article systematically analyzes the relationship between the loads on the machine tool feed system and the required motor torque under three motion states: constant speed, acceleration, and deceleration. Subsequently, the machine tool feed system is established under typical assembly defects such as misalignment between the guide rail and the screw, excessive screw preload, and protective cover jamming, to study the linear mapping relationship between the motor current signal and the applied load. This allows for theoretical analysis of how load variations caused by different assembly issues affect the motor current. Finally, a signal acquisition system for the assembly quality inspection of the machine tool feed system was established. Different typical assembly problem conditions of the feed system were simulated, motor current data under different conditions were collected, and correlation verification experiments as well as simulation experiments of common assembly quality problems of the machine tool feed system is conducted. Relevant experimental data indicate that the motor current is positively correlated with the feed system torque; assembly quality problem simulation experiments show that different assembly defects can have specific effects on the motor current signal, causing

收稿日期:2026-01-19 Received Date: 2026-01-19

* 基金项目:辽宁省科技重大专项(2025JH1/11700005)项目资助

specific changes in the features corresponding to the motor current signal. By analyzing the abnormal changes in the machine tool motor current during the operation of the feed system, effective detection of the assembly quality of the CNC machine feed system can be realized, laying the foundation for subsequent research on identifying assembly quality issues based on current signal analysis.

Keywords: feed system; assembly quality; motor current; CNC machine tool

0 引言

随着精密和高精密制造技术的广泛应用和快速发展,对数控(computer numerical control, CNC)机床的加工精度要求越来越高^[1],现代数控技术正朝着高主轴转速和高进给速度方向发展^[2]。精度、可靠性和寿命是衡量数控机床性能的核心指标,而机床装配质量是影响机床核心指标的重要因素之一,其优劣直接关乎用户现场工件的加工质量。数控系统自带诊断功能,但只能检测大部分电气系统故障,对于机床装配质量问题却难以检测^[3-4],如机床的导轨不平行、拉罩卡顿、轴向窜动等缺陷。同其他设备的故障诊断不同,数控机床诊断的核心目标是确保加工精度,这要求在机床出现重大缺陷、严重影响机床性能前就进行识别与分析。进给系统作为机床的关键部件,其装配质量是影响机床整体性能的关键要素。传统的机床装配质量检测方法主要是在机床外部安装各种传感器获取机床的运行状态信息,但机床机械结构往往是封闭的,会导致传感器安装困难,并且振动信息耦合性较强等因素也制约了机床运动部件的弱特征提取效果^[5]。由于电流信号具备非接触测量和快速响应等特性^[6],可作为数控机床装配质量检测的有效手段。

通过数控机床的机械结构可知,机床进给系统通常由伺服电机、联轴器、丝杠、螺母、轴承等相互配合的部件组成,其中伺服电机提供动力,带动其他部件移动。这些部件的运行状态会直接影响伺服电机转子的运行,从而间接影响了电机定子电流信号的变化^[7]。

在使用电机电流信号分析检测故障方面,祝洪宇等^[8]针对电机电流特征分析(motor current signature analysis, MCSA)诊断转子断条故障时存在特征量信息不足的问题,提出主元成分分析与麻雀搜索算法相结合的鼠笼电机转子断条故障诊断方法。Ghediri 等^[9]基于 MCSA 提取幅值、频率等能够反映电机运行状态的特征,再通过支持向量机实现特征分类。Amitabh 等^[10]基于电机电流信号分析提出一种与供电频率无关的健康指标(health indicator, HI),以用于轴承故障诊断。贾朱植等^[11]提出高分辨率谱估计的早期转子断条故障诊断方法,以解决 MCSA 法频率分辨率低的固有缺陷。陈峙等^[12]认为齿轮的故障可通过观测相关轴信号变化进行诊断,并提出异步电动机电流信号的调制信号双谱分析方法,实现对与电动机连接的齿轮传动系统的故障检测。

高宏力等^[13]采用恒算法的频域波器去除干扰噪声,通过主成分分析方法优化提取的负载电流时频域特征,利用混合模型在线构建故障及寿命预测模型,延长了机床使用寿命。Jung 等^[14]等采用先进的信号处理技术在 MCSA 分析中实现定转子、对中、偏心和轴承等多种故障的诊断。毛江涛等^[15]基于 MCSA 的齿轮故障诊断技术,以电机定子电流为切入点,检测机器以及电机中的机械故障和电气异常,该方法对系统不会造成任何干扰。耿雷雷等^[16]利用 MCSA 分析法对滑动轴承的摩擦状态进行监测,预防滑动轴承的磨损以免影响加工精度。关博凯等^[17]基于 MCSA 法建立机电耦合模型,从油膜应力分析潜水电机轴承不对中故障,证明方法有效提升了大型潜水电机的轴承故障诊断准确率。

综上引入 MCSA 对进给系统进行装配质量检测。本文主要分析理论上电机电流信号与旋转扭矩的线性映射关系,以及典型装配问题对电机电流的动态影响,之后进行电机电流信号与旋转扭矩相关性验证实验与典型装配问题模拟实验。

1 基于 MCSA 的机床进给系统装配质量检测原理

1.1 机床进给系统装配质量问题受力分析

从机械结构受力角度系统分析预紧力过大、防护罩故障和丝杠导轨不平行等典型装配质量问题对进给系统受力状况产生的影响,进给系统直线进给轴由驱动器、伺服电机与机械传动结构构成^[18],受力简图见图 1。

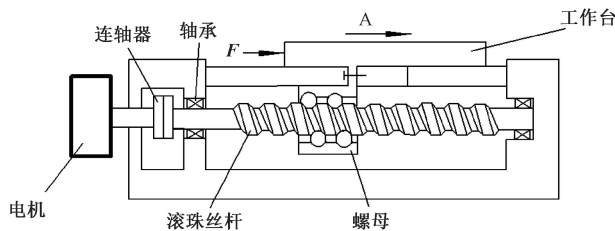


Fig. 1 Horizontal reciprocating axial load

对滚珠丝杠进给系统的轴向载荷受力分析,公式由文献[19]查到,轴向载荷 F_a 可由式(1)导出。

$$\begin{cases} F_{a1} = \mu mg + f + ma \\ F_{a2} = \mu mg + f \\ F_{a3} = \mu mg + f - ma \end{cases} \quad (1)$$

其中, F_{a1} 为工作台加速运动时的轴向载荷, F_{a2} 为工作台匀速运动时的轴向载荷, F_{a3} 为工作台减速运动时的轴向载荷, f 为导轨的摩擦阻力。工作台直线运动所需的电机扭矩为:

$$T_1 = \frac{F_a P_h}{2\pi\eta} \quad (2)$$

其中, T_1 为摩擦扭矩, P_h 为丝杠导程, η 为丝杠效率(一般取 0.9)。

$$T_2 = \frac{\mu F_Y P_h}{2\pi} \quad (3)$$

其中, T_2 为预压引起的摩擦转矩, μ 为预压螺帽的内部摩擦系数(取 0.1), F_Y 为预压载荷。

$$T_3 = J \cdot \alpha \quad (4)$$

其中, T_3 为加速进给扭矩, J 为系统总转动惯量, α 为角加速度。

丝杠运动时扭矩关系为:

$$T_{\text{匀速}} = T_1 + T_2 \quad (5)$$

$$T_{\text{加速}} = T_1 + T_2 + T_3 \quad (6)$$

$$T_{\text{减速}} = T_1 + T_2 - T_3 \quad (7)$$

1.2 电机电流与装配质量问题关联性分析

导轨与丝杠不平行、丝杠预拉伸不当、轴向窜动、电机转轴与丝杠不同轴、防护罩安装不当、运动部件润滑不充分等机床进给系统装配问题,是机床实际生产时,常发生的装配问题。本文主要选取拉罩卡顿、预紧力过大和丝杠导轨不平衡 3 种情况。

已知转矩平衡方程^[20]:

$$T_e = T_L + \frac{J}{P_i} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{D}{P_i} \cdot \omega + \frac{K}{P_i} \cdot \theta \quad (8)$$

$$T_e = K_T \cdot i \quad (9)$$

其中, T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩, 指外部机械负载施加的阻力矩; J 为电机转动惯量, 指反映惯性对转速变化的抵抗; D 为转矩阻尼系数, 指摩擦或风阻导致的能量损耗; K 为弹性转矩系数, 指机械传动部件的刚性和轴扭转刚度; K_T 为转矩常数; P_i 为感应电机的极对数, 指影响机械角度与电气角度的转换; θ 为扭转角轴的机械扭转角度。

已知电压平衡方程:

$$u = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{K}{P_i} \cdot \omega \quad (10)$$

其中, u 为定子绕组电压, R 为绕组电阻, i 为电机电流, L 为绕组电感。

当匀速运动时, 不考虑转动惯量的影响。弹性变形稳定, θ 恒定, 弹性力矩为固定值, 因此不考虑弹性恢复力矩。转矩平衡方程简化为:

$$T_e = T_L + \frac{D}{P_i} \cdot \omega \quad (11)$$

当匀速运动时, 电流稳定, $di/dt = 0$, 因此不考虑电感项, 电压平衡方程简化为:

$$u = R \cdot i + \frac{K}{P_i} \cdot \omega \quad (12)$$

1) 拉罩卡顿时, 工作台在匀速运行阶段在拉罩卡顿处会导致轴向载荷增大 F_a 增大。将式(2)和(9)代入式(11)得:

$$K_T \cdot i = \frac{F_a P_h}{2\pi\eta} + \frac{D}{P_i} \cdot \omega \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)并求解得电流 i 得:

$$i = \frac{P_h}{2\pi\eta \left(K_T + \frac{DR}{K} \right)} \cdot F_a + \frac{Du}{KK_T + DR} \quad (14)$$

K_T 等其他参数在系统稳定时通常为常数或变化很小。由式(13)可以知电流 i 与轴向载荷 F_a 是一次线性关系, 且拉罩卡顿时, 会导致轴向载荷 F_a 变化, 影响电流。

2) 预紧力过大时, 预压载荷 F_Y 增大, 摩擦扭矩 T_2 增大。

将式(5)和(12)代入式(11)并求解得电流 i 得:

$$i = \frac{\mu P_h}{2\pi \left(K_T + \frac{DR}{K} \right)} F_Y + \frac{\frac{P_h F_a}{2\pi\eta} + \frac{Du}{K}}{K_T + \frac{DR}{K}} \quad (15)$$

预压螺帽的内部摩擦系数 μ 等参数在系统稳定时通常为常数或变化很小。由式(15)可以看出电流 i 与预压载荷 F_Y 是一次线性关系。预紧力增大, 导致扭矩变大, 电流也随之变大。

3) 丝杠导轨不平行导致工作台运动时产生侧向力, 需额外克服摩擦阻力 i 和调整方向的分力, 导致轴向载荷 F_a 增大, 同时会导致预压载荷 F_Y 分布不均, 局部摩擦加剧, 等效摩擦系数上升, 最后会导致进给系统扭矩变大, 进而电流增大。

2 进给系统电流与扭矩相关性验证实验

2.1 机床进给系统装配质量问题受力分析

机床进给系统信号采集系统的硬件部分包括电流互感器、位移传感器、电源、采集仪器、伺服驱动器与电机连接线; 软件部分为基于 LabVIEW 设计开发的软件, 该软件的功能主要为电机电流数据和位移数据的降噪与采集、数据的存储、数据的显示。

试验台使用某型号立式加工中心, 通过本实验验证丝杠扭矩与电机电流之间的相关性, 进一步证明装配缺陷会导致扭矩异常进而影响电流特征,

霍尔交流电流变送器测量位置在伺服驱动器 X 轴电机输出线上串联动力线, 用霍尔交流电流变送器检测单

根动力线,如图2所示。将激光测距仪固定在工作台上,如图3所示。



图2 霍尔交流电流变送器安装示意图

Fig.2 Wiring diagram for hall AC current transmitter

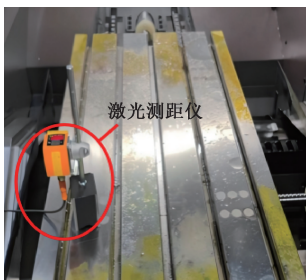


图3 激光测距仪安装示意图

Fig.3 Mounting diagram for laser distance meter

2.2 扭矩与电流相关性验证

根据工况选择巴特沃斯滤波类型和滤波阶数与频率。机床空载运行。进给速度改变时,扭矩和电流也会改变。由此选择X轴进给速度3 000、4 000 mm/min进行实验,工作台运行全行程,一个来回为一组。实验数据记录见图4、5,以图5为例,0~6 s时,工作台处于静止阶段。6 s时工作台启动,电流和扭矩迅速变大,并有小幅回落,迅速变大是由于启动时需要克服最大静摩擦力和提供加速度,小幅回落是因为到匀速运动时只需要动摩擦力。18 s时工作台运动到X轴端点并换向,电流和扭矩也由负变正。33 s时工作台由匀速减速至静止。两组实验的工作台加速、匀速、换向和减速阶段,电流和扭矩变化的趋势完全一致。

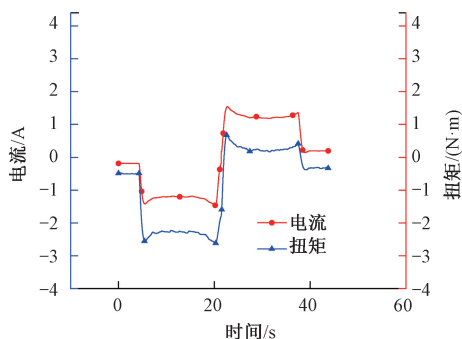


图4 3 000 mm/min 曲线

Fig.4 3 000 mm/min line graph

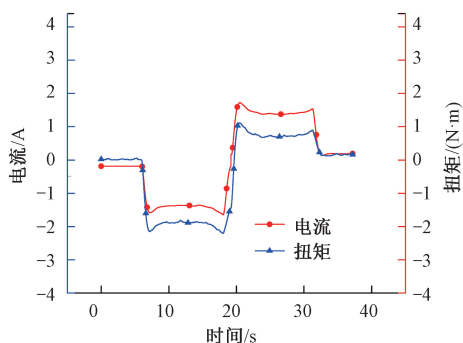


图5 4 000 mm/min 曲线

Fig.5 4 000 mm/min line graph

使用皮尔逊相关系数计算电流与扭矩相关性。皮尔逊相关系数常用于衡量两个变量之间线性相关程度的统计量。皮尔逊相关系数计算公式为式(16)。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (16)$$

$r = 1$ 时,表示两个变量的变化趋势基本相同,即两者完全正相关。 $r = -1$ 时,表示两个变量的变化趋势基本相反,即两者完全负相关。 $r = 0$ 时,表示两个变量间不相关,或其他非线性相关关系。 $0 < r < 1$ 时,表示两个变量存在线性相关,并随着 r 越接近 1,线性相关程度越强, r 越接近 0,线性相关程度越弱。

如图6所示为采集的电流-扭矩数据曲线图。工作台刚启动时,电流与扭矩从零迅速变大;工作台运动时,电流与扭矩变化较小,所以长曲线是工作台刚启动时,短曲线为工作台运动时。将采集的数据代入公式计算得出两者的电流和扭矩的相关性均为 0.99,即 $r = 0.99$ 。证明扭矩与电流存在强相关性,验证上文分析的扭矩变化会影响电流变化,确保电流信号能够作为诊断装配质量的可靠指标,从而替代传统复杂的机械检测方法。

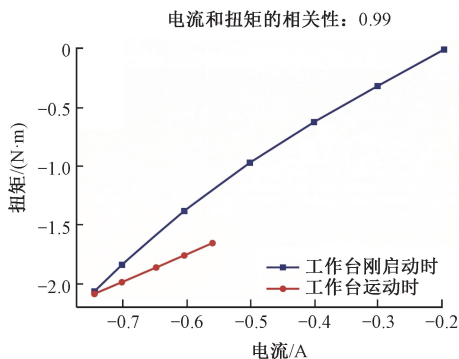


图6 扭矩电流相关性曲线

Fig.6 Torque-current correlation curve

2.3 标准数据采集

选择无装配问题的立式加工中心,采集其进给系统电流数据作为标准数据。选择 X 轴进给速度 1 000、2 000、3 000、4 000 mm/min,所得数据如图 7 所示,工作台全行程,一个来回为一组。采集过程总共分为 6 个阶段,工作台静止阶段、启动加速阶段、负向匀速阶段、换向阶段、正向匀速阶段、减速至停止阶段。以 1 000 mm/min 采集的位移曲线图为例:3 s 前工作台处于静止阶段,电流无变化,3 s 时工作台从静止开始加速,电流迅速变大,并有小幅回落,3~50 s 匀速运行,在 50 s 时到 X 轴端点,工作台反向运行,电流也开始由负变正,100 s 时,工作台回到起始点并停止运动。

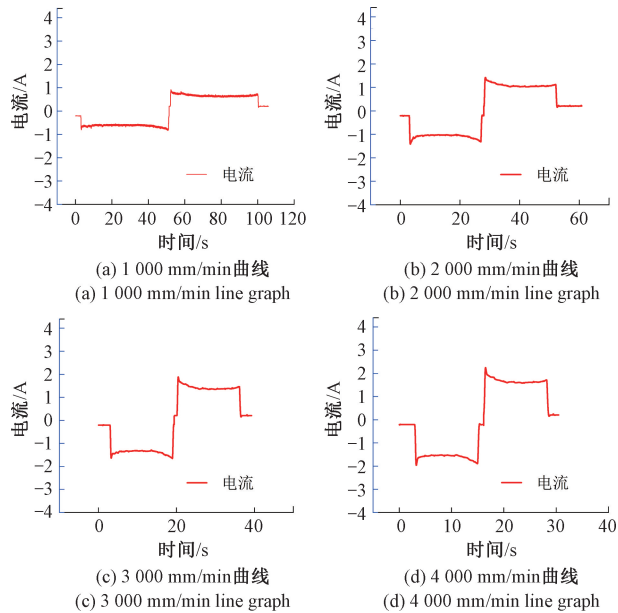


图 7 不同 X 轴进给速度标准数据电流位移图像
Fig. 7 Images of standard data current and displacement at different X -axis feed speeds

如图 8 所示,可以明显看出在机床进给系统运行时的同一阶段下,进给速度越快电机电流越大。

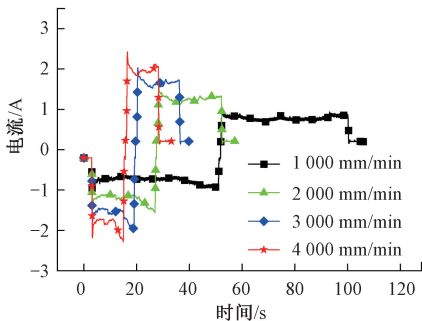


图 8 不同 X 轴进给速度标准数据电流对比
Fig. 8 Comparison images of standard data current at different X -axis feed speeds

高进给速度时电流波动较大,但在匀速阶段的电机电流基本趋近于直线,证明装配质量良好。

3 装配质量检测实验

基于前文的电机电流与装配质量问题关联性分析,本研究选取典型装配缺陷防护罩装配、预紧力过大以及丝杠-导轨不平行 3 类故障作为研究对象。

3.1 实验原理

1) 工作台防护罩故障实验

模拟生产中最常见的防护罩润滑不良造成防护罩卡顿的缺陷。选择卡顿的防护罩,装到机床上进行实验,采集实验数据。

2) 丝杠预紧力过大实验

据丝杠预拉伸建议值进行实验,从不施加预紧力开始采集数据,按梯度增加预紧力,直到超过预拉伸建议值。从胡克定律推广到预紧力与预拉伸的关系。

$$F = \sigma \cdot A = E \cdot \varepsilon \cdot A = E \cdot \frac{\Delta L}{L} \cdot A \tag{17}$$

$$A = \pi \left(\frac{d - P_h}{2} \right)^2 \tag{18}$$

其中, A 为有效截面的面积, d 为丝杠直径, P_h 为丝杠导程, ΔL 为丝杠被拉伸的实际长度变化量, L 为丝杠有效长度,指受预拉伸作用的自由长度,通常为两轴承支撑点之间的距离,通过丝杠预拉伸长度可以计算出丝杠所受的预紧力大小,丝杠参数见表 1。

表 1 丝杠参数

Table 1 Screw rod parameters

项目	参数	项目	参数
丝杠直径 d	40 mm	丝杠有效长度 L	1 110 mm
丝杠导程 P_h	16 mm	丝杠弹性模量 E	210 GPa
丝杠预紧长度 ΔL	0、0.02、0.04、0.06 mm		

3) 丝杠导轨不平行实验

丝杠导轨不平行有两种情况包括丝杠两端支撑上下异位和左右异位。由于上下异位方便测量具体数值,因此本实验主要考虑丝杠两端支撑上下异位的情况。

丝杠轴线因高度差产生的倾斜角度:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta h}{L}\right) \approx \frac{\Delta h}{L} \tag{19}$$

其中, Δh 为轴承座与电机座高度差, L 为丝杠两支撑点的跨距, D 为导轨有效长度。导轨与丝杠在垂直方向上的平行度误差:

$$\Delta = \theta \times D = \frac{\Delta h}{L} \times D \quad (20)$$

本文通过在轴承座下垫入塞尺来改变轴承座的高度,改变丝杠导轨不平行度。

3.2 工作台防护罩故障实验

如图9拉罩卡顿实验数据显示,拉罩卡顿不会影响电流变化趋势,但会导致匀速运行阶段出现电流波动和尖峰。如图10电流图像对比试验可以看出,不同进给速度下均会出现电流波动和尖峰,且波动范围与尖峰大小都随着进给速度变大而变大。

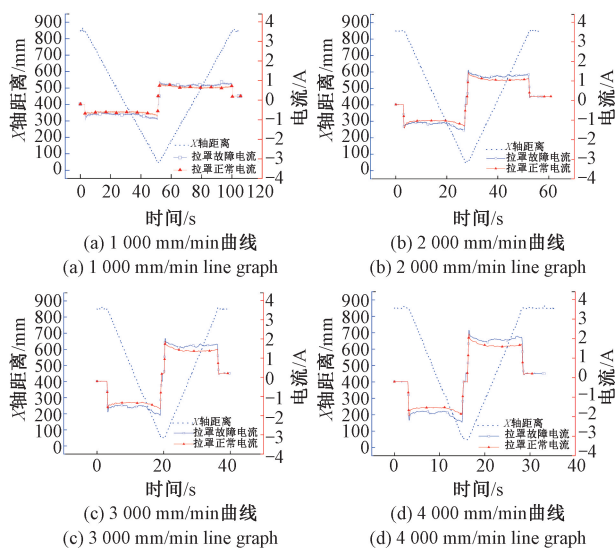


图9 不同X轴进给速度拉罩故障与无故障电流位移图像

Fig. 9 Current-displacement images of hood-pulling under faulty and fault-free conditions at different X-axis feed rates

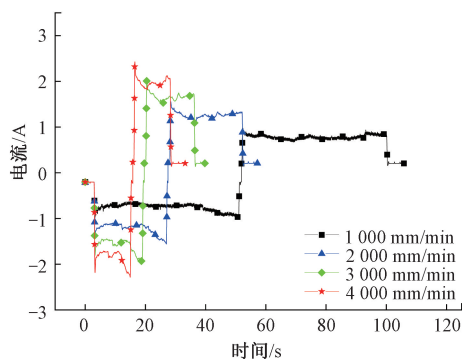


图10 不同X轴进给速度拉罩故障电流对比

Fig. 10 Comparison images of the current in case of pull cover failure at different X-axis feed speeds

从图9拉罩故障与标准数据电流对比图像看出,电流变化趋势基本吻合,但在启动加速阶段、换向阶段、减速阶段的拉罩卡顿下的电流会略大于标准数据电流,这是由于拉罩卡顿会导致局部摩擦增加,在加速阶段会产生额外的阻力。同时可以看出在负向、正向匀速阶段经过拉罩故障位置时,电流曲线会出现明显的凸起和尖峰,同时数据的

整体波动值增大,这可以作为防护罩故障的特征。实验结果符合上文的拉罩卡顿与电流关系的分析。

3.3 丝杠预紧力过大实验

本节设计了5组重复试验分别为无预紧、预紧0.02 mm、预紧0.04 mm、预紧0.06 mm。预紧程度从0 mm增加到0.06 mm,测量得到的电流变化趋势基本不变,截取部分测量数据,见图11。

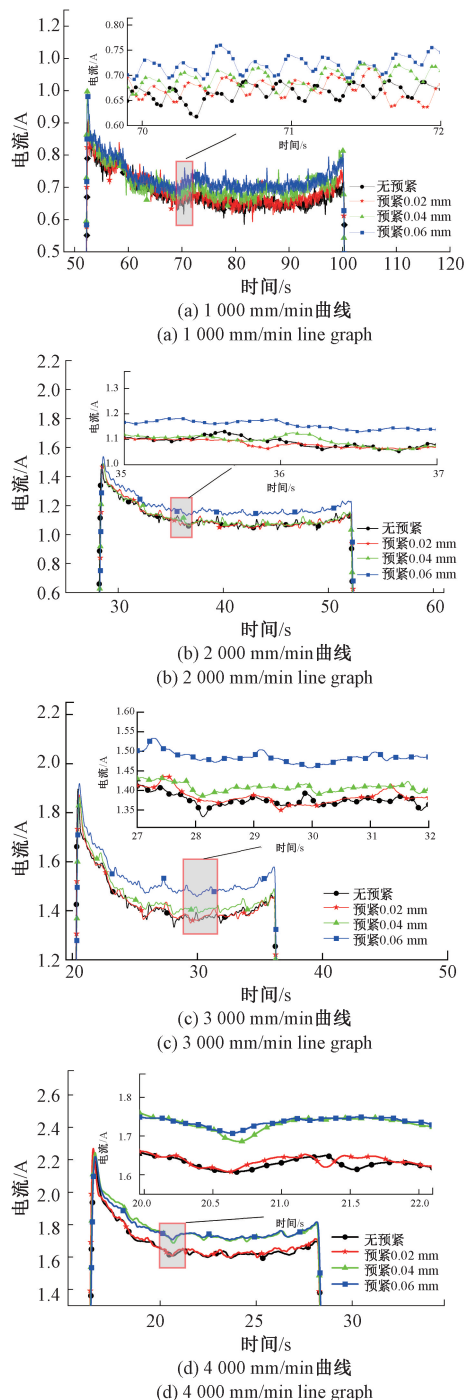


图11 截取不同X轴进给速度和预拉伸长度图像对比

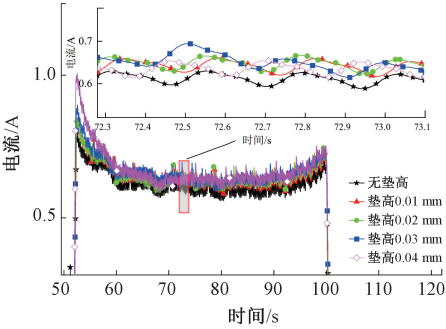
Fig. 11 Comparison of images intercepted at different X-axis feed speeds and pre-stretching lengths

随着预紧力增大,机床进给时电机在匀速区间的电流平均值会逐渐升高。这是由于预紧力变大导致螺母-丝杠接触力变大,进而增大摩擦和载荷,此时电机需输出更高的力矩,导致电流增大。通过局部放大图可以看到速度越低,电流波动越明显,但整体趋势还是符合预紧力越大,电流越大的规律。

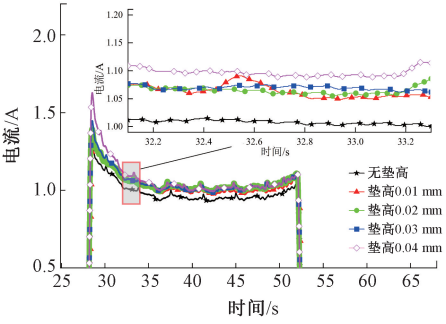
同时随着预紧力增大,工作台变速阶段瞬间产生的冲击更强,造成更高的瞬态电流峰值,电流图像会出现十分明显的弯曲。丝杠预紧程度与电流的弯曲程度在一定范围内是正相关的。

3.4 丝杠导轨不平行实验

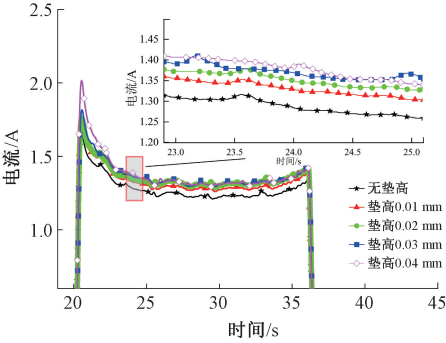
本节设计 5 组重复试验分别为无垫高、垫高 0.01、0.02、0.03 和 0.04 mm。测得电流变化趋势基本不变,现截取部分测量数据,以便观察,见图 12。



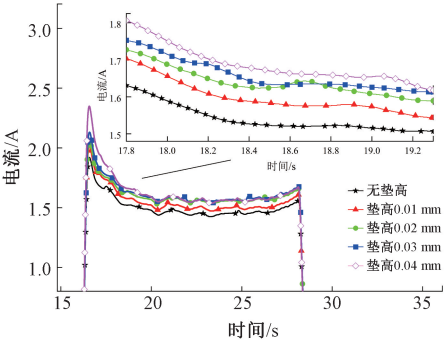
(a) 1 000 mm/min 曲线
(a) 1 000 mm/min line graph



(b) 2 000 mm/min 曲线
(b) 2 000 mm/min line graph



(c) 3 000 mm/min 曲线
(c) 3 000 mm/min line graph



(d) 4 000 mm/min 曲线
(d) 4 000 mm/min line graph

图 12 截取不同 X 轴进给速度丝杠导轨不平行电流数据

Fig. 12 Interception of current data for unparallel screw guide rails at different X-axis feed speeds

随着垫高量从 0~0.04 mm,机床进给电机在匀速阶段的电流平均值会逐渐升高,电流大小与垫高成正比,即导轨与丝杠不平行程度越大,电流越大,电流峰值越高。其次在电机启停、换向时电流也跟垫高的高度成正比,与曲线弯曲度也成正比,电流曲线呈现明显凹凸状。

丝杠与导轨不平行导致进给时摩擦和偏载增强,增大了运行过程中的摩擦力或侧向力,为保持进给速度不变,电机需输出更高的力矩,导致电流增大。对比不同速度下电流图,均呈现上述现象。

4 结 论

本文在理论上分析了电机电流与进给系统扭矩的相关性,及典型装配缺陷对电机电流的动态影响,之后进行相关性验证实验和机床进给系统常见装配质量问题模拟实验。

验证实验证明电机电流与进给系统扭矩呈正相关关系,即可以通过检测电机电流变化来判断机床进给时扭矩是否发生异常变化;装配问题模拟实验证明不同装配缺陷会使电机电流信号产生不同变化,可以通过电机电流图像产生的特殊变化判断机床出现的故障。

因此,基于 MCSA 的装配质量在线监测具有精确地检测性能,为数控机床进给系统装配质量提供了一种新的思路。后续将基于不同装配缺陷下电机电流信号产生不同的变化特征,研究装配缺陷识别方法。

参考文献

[1] 孙兴伟, 杨铜铜, 杨赫然, 等. 基于 CNN-GRU 组合神经网络的数控机床进给系统热误差研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10): 219-226.
SUN X W, YANG T T, YANG H R, et al. Research on thermal error of CNC machine tool feed system based on

- CNN-GRU combine neural network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 219-226.
- [2] 岳玉霞, 王秀山, 李利军. 五轴数控机床的误差实时补偿控制器[J]. 电子测量技术, 2021, 44(13): 145-149.
- YUE Y X, WANG X SH, LI L J. Real-time error compensation controller for five-axis CNC machine tools[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(13): 145-149.
- [3] 孙秀茹, 闫丰伟, 高雨航. 组合机床电液控制系统分布式故障诊断策略研究[J]. 液压气动与密封, 2023, 43(9): 114-117.
- SUN X R, YAN F W, GAO Y H. Research on distributed fault diagnosis strategy of modular machine tool electro-hydraulic control system [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2023, 43(9): 114-117.
- [4] 祁阳, 巩亚东, 梁春游, 等. 数控机床故障分析与可靠性评价技术的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 831-834.
- QI Y, GONG Y D, LIANG CH Y, et al. Research on fault analysis and reliability evaluation technology of CNC machine tools [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40(6): 831-834.
- [5] 刘飞, 梁霖, 徐光华, 等. 基于电流信息的机床传动系统监测与诊断[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(5): 64-67, 71.
- LIU F, LIANG L, XU G H, et al. Monitoring and diagnosis of machine tool drive system based on motor current signal[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011(5): 64-67, 71.
- [6] HACHEMI B, GERALD B, KLIMAN. What stator current processing based technique to use for induction motor/rotor faults diagnosis? [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(2): 238-245.
- [7] 秦昌述, 张逸飞. 基于进给轴信号采样的机床装配质量检测方法[J]. 动力系统与控制, 2021, 10(3): 152-161.
- QIN CH SH, ZHANG Y F. Machine tool assembly quality inspection based on signal sampling of feed shaft [J]. Dynamical Systems and Control, 2021, 10(3): 152-161.
- [8] 祝洪宇, 孙禹娇, 孙文鹏, 等. 基于 KPCA 与 SSA-SVM 的电机转子断条故障诊断[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(12): 247-258.
- ZHU H Y, SUN Y J, SUN W P, et al. Fault diagnosis of broken rotor bars in squirrel cage motor based on KPCA and SSA-SVM [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(12): 247-258.
- [9] GHEDIRI A, GOLÉA N. Induction motor failures detection using motor current signal analysis and two-step support vector machine classifier [J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2024, 100(2): 272-278.
- [10] AMITABH P, BOZALAKOV D, DE BELIE F. Speed independent health indicator for outer raceway bearing fault using MCSA[J]. Machines, 2025, 13(12): 1095.
- [11] 贾朱植, 杨理践, 祝洪宇, 等. 基于高分辨率谱估计的早期转子断条故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 279-287.
- JIA ZH ZH, YANG L J, ZHU H Y, et al. High-resolution spectral analysis for incipient broken rotor bar diagnosis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 279-287.
- [12] 陈峙, 王铁, 谷丰收, 等. 基于电动机电流信号双谱分析的齿轮传动故障诊断[J]. 机械工程学报, 2012, 48(21): 84-90.
- CHEN ZH, WANG T, GU F SH, et al. Gear transmission fault diagnosis based on the bispectrum analysis of induction motor current signatures [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(21): 84-90.
- [13] 高宏力, 刘庆杰, 黄柏权, 等. 数控机床故障预测与健康管理关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10): 2217-2226.
- GAO H L, LIU Q J, HUANG B Q, et al. Key techniques of fault prediction and health management system in NC machine tool [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(10): 2217-2226.
- [14] JUNG J H, LEE J J, KWON B H. Online diagnosis of induction motors using MCSA[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(6): 1842-1852.
- [15] 毛江涛, 许晶晶, 马振泓, 等. 基于 MCSA 的齿轮传动系统故障检测仪设计分析[J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(3): 60-64.
- MAO J T, XU J J, MA ZH H, et al. Design and analysis of gear transmission system fault detector based on MCSA[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2023, 59(3): 60-64.
- [16] 耿雷雷, 李国富, 姜乃铭, 等. 基于 MCSA 的不同滑动轴承摩擦特征分析[J]. 热加工工艺, 2020, 49(22): 32-37.
- GENG L L, LI G F, JIANG N M, et al. Analysis on friction characteristics of different sliding bearings based on MCSA[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(22): 32-37.
- [17] 关博凯, 王硕, 鲍晓华, 等. 基于 MCSA 的大型潜水电机用导轴承不对中故障机电耦合数学模型构建研究[J]. 电气工程学报, 2025, 20(4): 96-105.

- GUAN B K, WANG SH, BAO X H, et al. Fault diagnosis and analysis of guide bearing misalignment in large-scale submersible motor based on electromechanical coupling numerical model [J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(4): 96-105.
- [18] 张维锋, 孙兴伟, 刘寅, 等. 数据-机理混合驱动下螺旋曲面加工能耗工艺参数优化方法[J/OL]. 电子测量与仪器学报, 1-17[2026-03-01].
- ZHANG W F, SUN X W, LIU Y, et al. Data-mechanism hybrid driven approach to optimizing energy consuming process parameters for helical surface machining[J/OL]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 1-17[2026-03-01].
- [19] 李林涛, 李海龙, 王冲, 等. 驱动滚珠丝杠的伺服电机旋转扭矩计算[J]. 机械工程师. 2014(7): 214-215.
- LI L T, LI H L, WANG CH, et al. Calculation of rotational torque of servo motor driving ball screw[J]. Mechanical Engineer, 2014(7): 214-215.
- [20] 马玉奇. 基于负载电流的机床进给系统装配质量检测[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- MA Y Q. Machine tool feeding system assembly quality inspection based on the load current [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.

作者简介



周冉, 2015 年于沈阳工业大学获得学士学位, 2021 年于沈阳工业大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学副教授, 主要研究方向为数控机床、振动俘能与减振技术。

E-mail: zhouran@sut.edu.cn

Zhou Ran received his B.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2015, his Ph.D. degree

from Shenyang University of Technology in 2021. He is currently an associate professor at Shenyang University of Technology. His main research interests include CNC machine tool, vibration capture and damping technology.



刘曾远, 2018 年于沈阳工业大学获得学士学位, 2025 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 现为通用技术集团大连机床有限责任公司员工, 主要研究方向为数控机床。

E-mail: 1290716485@qq.com

Liu Zengyuan received his B.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2018, and his M.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2025. He is currently an employee of China Genertec Technology Dalian Machine Tool Co., Ltd. His main research interests include CNC machine tool.



孙凤(通信作者), 2002 年于沈阳工业大学获得学士学位, 2005 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 2010 年于高知科技大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学教授, 主要研究方向为智能制造装备与数控机床技术、磁悬浮与磁力驱动先进理论技术。

E-mail: sunfeng@sut.edu.cn

Sun Feng(Corresponding author) received his B.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2002, his M.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2005, and his Ph.D. degree from Kochi University of Technology in 2010. He is currently a professor at Shenyang University of Technology. His main research interests include CNC machining technology and equipment of complex surfaces, permanent maglev and control technology, off-axis laser cutting technology, and intelligent suspension system with energy feedback and active control.