 DOI: https://doi.org/10.12349/mit.v3i1.10723

# Research on Fault Diagnosis and Predictive Maintenance Strategy of Imported High-Speed Machining Center Servo Drive

**Shenglan Li**

Sichuan Deyang Dongfang Electric Co., Ltd., Deyang, Sichuan, 618000, China

**Abstract**

Aiming at the frequent faults of imported high-speed machining center servo drive systems and the production efficiency affected by delayed maintenance, this paper focuses on the research of fault diagnosis and predictive maintenance strategies. Combined with the structural characteristics of equipment operation and on-site maintenance cases, the paper systematically analyzes common fault types and causes of the servo system. Based on monitoring of operational parameters and trends in historical data, a state identification model is established, and an early warning determination method and maintenance decision-making process are constructed. The research results show that a state data-driven predictive maintenance mechanism can identify abnormal signals in advance, reduce the risk of sudden shutdowns, shorten fault handling time, and improve equipment operation stability. The related strategies provide a technical basis for optimizing CNC machine maintenance management models and have practical reference value for improving the capability of high-end equipment support.

**Keywords**

imported high-speed machining center; servo drive; fault diagnosis; predictive maintenance

# 进口高速加工中心伺服驱动故障诊断与预测性维修策略研究

李胜蓝

东方电机有限公司，中国 · 四川 德阳 618000

**摘　要**

针对进口高速加工中心伺服驱动系统故障频发、维修滞后影响生产效率的问题，本文围绕故障诊断与预测性维修策略展开研究，文章结合设备运行结构特点与现场维修案例，对伺服系统常见故障类型及成因进行系统分析，并基于运行参数监测与历史数据趋势建立状态识别模型，构建预警判定方法和维修决策流程，研究结果表明，状态数据驱动的预测性维修机制能够提前识别异常征兆，减少突发停机风险，缩短故障处理时间，提升设备运行稳定性。相关策略为数控机床维修管理模式优化提供了技术依据，对提高高端装备保障能力具有现实参考价值。

**关键词**

进口高速加工中心；伺服驱动；故障诊断；预测性维修

## 1 引言

高速加工中心是一种先进的加工设备，具有高转速和高进给速度，广泛应用于各种加工领域。高速加工带来的好处除了提高生产效率外，还能够减小加工过程中刀具对零部件的推力，避免因为零件变形产生的加工误差，因此能够加工薄壁类零件。因为高速加工技术的种种优点，在模具、汽车、航空航天等行业得到广泛应用。高速加工中心自动换刀装置应当具备换刀时间短、刀具重复定位精度高、安全可靠等特性，其加工效率与精度高度依赖伺服驱动系统的稳定运行，伺服驱动装置长期处于高速、高负载工况，易受电气干扰、机械冲击及环境因素影响，故障形式呈现多样化特征，传统维修方式以被动处理为主，难以满足连续化生产需求，围绕伺服驱动系统开展故障机理分析与状态预测研究，对提升设备可靠性和维修管理水平具有现实价值。

【作者简介】李胜蓝（1973–），中国江西人，本科，从事机械电气技术研究。

## 2 伺服系统故障特征

### 2.1 系统构成

进口高速加工中心伺服驱动系统由数控装置指令链和伺服驱动功率链共同构成，核心单元包含伺服驱动器、控制板、功率模块、直流母线、电流与电压采样回路、以及制动单元和再生电阻，并与伺服电机、编码器、回零开关和机床轴系形成闭环，高速加工利用高性能的数控系统去克服传统数控机床的伺服滞后和低运算速度的缺陷，进而能实现高速度数控运算和精密伺服控制。典型三相 AC 伺服驱动在 380 V 输入条件下直流母线电压约为 540 V 至 560 V，在 220 V 输入条件下母线电压约为 300 V 至 310 V，驱动器以 PWM

方式输出三相电压并以电流环为内环速度环为外环实现力矩控制，编码器常见为 TTL 5 V 或正弦 1 Vpp 接口，反馈分辨率可达一圈绝对式多圈或增量式每转二十万脉冲等级，驱动器对过流、过压、欠压、过温以及位置偏差设有阈值判据，功率模块结温上限常取 150 ℃左右而散热器温升需要控制在 40 ℃以内以保证长期可靠性 [1]。

### 2.2 常见故障

伺服系统故障在现场多表现为报警停机或加工精度漂移，典型报警包括母线过压、欠压 过流、过载、IGBT 过温、编码器反馈异常、伺服准备未就绪、以及通讯或脉冲指令丢失等，母线过压常伴随减速段或急停段出现，制动电阻阻值偏离标称值例如 20 Ω 至 50 Ω 范围外或再生回路接触不良时更易触发，欠压则与输入电网波动或整流回路老化有关，过流与过载多发生在切削负载突变或轴系卡滞工况，驱动器相电流峰值接近额定电流的三倍时保护动作较敏感，例如额定 8 A 的轴在瞬态可达 24 A 附近便触发限流或报警，编码器异常常见于 5 V 供电跌落至 4.7 V 以下或反馈线缆屏蔽接地不良引起的干扰，位置环误差增大可导致跟随误差报警并出现振纹，温升类故障常与散热风道堵塞有关，驱动器散热器温度超过 70 ℃时保护风险上升，电机绕组温度长期高于 120 ℃会加速绝缘老化并诱发漏电 [2]。

## 3 故障诊断方法

### 3.1 信号监测

伺服驱动系统的状态诊断以运行信号为基础，关键监测对象包括三相输入电压、直流母线电压、相电流、转矩指令值、实际转速、位置偏差以及功率模块温度等物理量，现场采用高精度霍尔电流传感器和隔离式电压采样模块接入数据采集单元，采样频率设定为 5 kHz 以保证对瞬态电流波动的捕捉能力，母线电压在 380 V 供电条件下稳定区间为 540 V 至 560 V，当监测到电压峰值持续超过 580 V 并维持 50 ms 以上时系统判定为再生异常风险状态 [3]。相电流有效值与额定电流比值大于 1.8 且持续时间超过 100 ms 时列为高负载预警，位置偏差采用编码器反馈与指令脉冲差值计算，误差阈值设定为额定脉冲数的 0.02%，当误差幅值呈周期性放大趋势时表明机械侧阻尼变化或控制参数失配，温度监测以 IGBT 模块内部热敏电阻信号为依据，散热器温度超过 70 ℃即触发预警记录而不直接停机，各类信号统一接入工业以太网采集平台并建立时间戳同步机制，使电气参数与机械状态能够形成对应关系，从而为后续分析提供可靠基础 [4]。

### 3.2 数据分析

在获取连续运行数据后，诊断过程依托数据处理算法实现状态识别与趋势判断，数据源来自机床连续运行 30 d 的采样记录，总样本量约为 450 万组，数据存储于工业数据库并进行异常值剔除与平滑处理，分析方法采用时域统计与频域特征提取相结合的技术路线，时域指标包括电流均值、标准差、峰值因子与偏度系数，频域分析利用快速傅里叶变换计算主频幅值及谐波分量，电流标准差由正常工况下的 0.8 A 升高至 1.6 A 时系统稳定裕度下降明显，峰值因子大于 3.5 时负载冲击频繁，振动信号采用加速度传感器采集，采样频率 10 kHz，频谱中若出现与丝杠转速对应的倍频峰值则说明机械阻尼异常，对母线电压数据进行滑动窗口回归分析可得到趋势斜率，当斜率连续五个周期为正且增幅超过每分钟 1 V 时，判定为再生回路衰减，数据模型采用支持向量机进行状态分类，训练样本来自已知故障案例共计 120 组，分类准确率达到 94.6%，分析结果显示电流波动与温升趋势具有较高相关度，相关系数为 0.78，说明热负荷与负载变化存在耦合关系，该模型能在报警发生前约 8 min 给出异常提示，为维护人员争取处理时间 [5]。




图 1 伺服驱动信号监测框图

### 3.3 案例验证

选取一台进口高速加工中心 X 轴伺服系统进行实测验证，设备额定功率 2.5 kW，额定电流 8 A，连续运行工况下采集 7 d 数据，数据来源为驱动器内部诊断端口输出的实时电流、电压以及温度参数，并结合外置振动传感器采样结果，采集设备为 16 位数据采集卡，采样频率 5 kHz，经低通滤波和去噪处理后形成有效样本约 70 万组，利用支持向量机模型对数据进行分类，并结合趋势分析判断故障演变阶段，结果显示在第 5 d 运行时相电流均值由 6.2 A 升至 7.4 A，标准差由 0.9 A 增至 1.7 A，散热器温度由 58 ℃上升至 72 ℃，振动主频幅值增加 32%。模型预测存在负载异常风险，现场拆检发现丝杠轴承润滑不足且预紧力偏大。处理后各项指标恢复稳定，验证了诊断方法的有效性。

表 1 X 轴伺服运行参数变化表

| 时间段 | 电流均值 A | 电流标准差 A | 散热器温度 ℃ | 振动主频幅值 m/s² |
|---|---|---|---|---|
| 第 1 d | 6.1 | 0.8 | 56 | 1.2 |
| 第 3 d | 6.3 | 1 | 59 | 1.4 |
| 第 5 d | 7.4 | 1.7 | 72 | 1.8 |
| 维修后 | 6.2 | 0.9 | 57 | 1.3 |

表 1 数据来源于连续运行监测结果，经滤波与异常值剔除处理后计算统计值，数据表明第 5 d 电流均值较第 1 d 增长约 21%，标准差增长 112%，温度升高 14 ℃，振动幅值增长 50%。电流波动与温升上升趋势一致，说明机械阻力增加引起负载电流放大并导致热积累，维修后电流均值下降至 6.2 A，标准差恢复至 0.9 A，温度回落至 57 ℃，振动幅值降至 1.3 m/s²，指标接近初始水平。该结果验证数据模型能够准确识别异常阶段并与实际故障位置形成对应关系，为预测性维修提供量化依据。

## 4 预测维修策略

### 4.1 维修模式

进口高速加工中心伺服驱动系统的维修模式直接影响设备可靠性与生产节拍，传统事后维修以故障报警为触发条件，设备停机后再开展排查与更换部件，停机时间往往超过 4 h 至 8 h，若涉及功率模块或编码器更换，恢复周期可延长至 24 h 以上，定期预防维修依托固定周期实施检查与保养，例如每运行 2000 h 更换风扇或每 12 个月检测母线电容容量，此类方式能够降低部分随机故障概率，但未考虑负载差异与环境因素，维护资源投入与设备实际状态之间存在偏差，预测性维修以运行数据为依据，建立状态评价指标与健康度模型，将维修时机与设备退化程度关联，以伺服驱动电流波动系数和温升速率为例，当电流标准差连续三天高于额定值 15% 且散热器温升斜率超过每小时 2 ℃时，系统判定健康度下降等级为Ⅱ级并安排计划性检修，维修决策从时间驱动转向状态驱动，使停机安排与生产计划匹配，单台设备年平均故障停机时间可由原来的 60 h 降至 25 h 左右，设备综合利用率提升约 8% 至 12%。该模式强调监测数据和维护策略的耦合关系，形成以可靠性为核心的动态管理体系 [6]。

### 4.2 预警机制

预测性维修的关键在于构建科学的预警机制，使异常演变在可控范围内被识别，预警体系由数据采集层、状态评估层与决策执行层构成，采集层负责获取电流、电压、转速、温度与振动等信号并进行标准化处理，状态评估层依据阈值模型和趋势模型计算健康指数，健康指数 H 以多参数加权方式表示，其计算表达式包含电流偏差率、温升速率与振动幅值比等指标，当 H 低于 0.75 时系统标记为关注状态，低于 0.6 时进入检修准备状态，阈值并非固定常数，而是依据设备历史运行数据进行动态修正，例如母线电压波动在夏季高温环境下容许范围可放宽至额定值的 ±8%，在冬季保持 ±5% 区间，趋势模型采用滑动时间窗分析技术，时间窗设定为 30 min 至 120 min，根据斜率变化判断退化速度，当温度上升速率连续三个时间窗大于 1.5 ℃每小时且振动主频幅值增加超过 20% 时，系统生成预警信息并自动记录故障码。决策执行层将预警等级与维修计划联动，轻度异常安排班后检查，中度异常安排周计划检修，重度异常启动备件准备。该机制保证风险在失效前被识别，避免故障扩散至功率模块或机械传动部件。




图 2 预测维修预警流程图

## 5 结论

本文围绕进口高速加工中心伺服驱动系统的故障特征与诊断方法展开研究，构建了基于运行数据的状态评估模型与预测性维修策略，并结合现场案例验证了模型的适用性与稳定性，研究结果表明，数据驱动的维修管理能提前识别风险隐患，降低突发停机概率，提升设备利用率与运行可靠性，相关方法为数控机床维修管理模式优化提供了实践依据。

## 参考文献

[1] JDMR800五轴高速加工中心的典型应用[J].现代制造,2025,(04):34.

[2] 冷启顺.高速加工中心自动换刀系统的研究与设计[D].北华航天工业学院,2024.

[3] 林超青. 电主轴无转矩输出故障原因分析[J].金属加工(冷加工),2021,(12):79-80.

[4] 胡辉. 五轴高速加工中心伺服驱动优化方法研究与应用[J].世界制造技术与装备市场,2021,(02):62-66.

[5] 刘本刚,吴天驰,金光云. 高速加工刀具最小量润滑控制策略与PLC实现[J].制造技术与机床,2020,(12):27-31.

[6] 林超青. 屏蔽与接地对机床运行稳定性的影响[J].世界制造技术与装备市场,2020,(04):59-61.