新能源汽车电机控制器故障预警系统构建研究

吴 楠
西安智德汽车电子控制系统有限公司 陕西 西安 710299

摘 要：新能源汽车电机控制器作为动力系统的核心部件，其运行可靠性直接影响整车安全与驾乘体验。针对电机控制器故障具有渐进演化与突发耦合的双重特征，本文从系统架构层面探讨故障预警系统的构建路径。研究首先梳理电机控制器典型故障模式与失效机理，明确预警系统需覆盖的监测对象与特征参数；继而提出“感知—传输—处理—决策”四层系统架构，阐述各层的功能定位与关键技术选型；在此基础上，重点探讨基于多源信息融合的预警模型构建方法，包括特征提取、状态评估与阈值动态调整策略；最后分析预警系统与整车控制器的协同机制及工程化面临的主要挑战。研究表明，构建分层解耦、模型驱动与数据驱动相结合的预警系统，是实现电机控制器故障早期识别与主动防护的有效途径，可为新能源汽车动力系统的预测性维护提供理论参考，对提升整车运行安全性与降低全生命周期维护成本具有积极意义。

关键词：新能源汽车；电机控制器；故障预警；系统架构；多源信息融合

引言

随着新能源汽车产销规模的持续扩大，动力系统的安全性与可靠性问题日益受到关注。电机控制器（MotorControlUnit,MCU）作为连接动力电池与驱动电机的关键环节，承担着转矩控制、能量管理与故障保护等核心功能。其工作环境复杂，长期承受高电压、大电流、高温及振动冲击，功率器件老化、传感器漂移、冷却系统退化等隐患难以完全避免。一旦控制器发生故障，轻则导致车辆动力中断，重则引发安全事故，因此对其运行状态进行实时监测与早期预警具有重要的工程价值。传统故障诊断多在故障发生后进行，属于被动响应模式，难以满足新能源汽车对安全性的高要求。故障预警强调在故障萌芽阶段识别异常征兆，为驾驶员或整车控制器争取处置时间，从而实现从“事后维修”向“事前预防”的转变。近年来，学界围绕电机控制器的故障诊断开展了大量研究，涵盖功率器件退化监测、传感器故障识别与控制系统容错等方向，但针对预警系统整体架构的系统性探讨仍显不足，多数研究聚焦于单一算法或单一部件的诊断精度提升，缺乏从系统工程视角对预警流程、层次结构与协同机制的整体设计。

1 电机控制器故障模式与预警需求分析

1.1 典型故障模式

电机控制器的故障可依据发生部位划分为功率器件故障、传感器故障、控制电路故障与冷却系统故障四类。功率器件（以IGBT和SiCMOSFET为主）故障占比最高，主要表现为短路、开路与参数退化三种形式。短路故障往往突发且破坏性强，可在毫秒级时间内造成器件损坏；开路故障多由键合线断裂或焊料层开裂引起，导致电流通路中断；参数退化则表现为导通压降上升、开关时间延长、栅极阈值电压漂移等渐进特征，其演化周期通常较长，为预警提供了宝贵的时间窗口。传感器故障主要包括电流传感器、电压传感器与位置传感器的零点漂移、增益误差及信号丢失，其后果是控制精度下降甚至控制失稳，严重时可能引发过流或失控。控制电路故障涉及驱动电路、保护电路与通信接口，常见形式为驱动能力下降、保护逻辑失效与通信误码率升高。冷却系统故障则表现为水道堵塞、水泵性能衰减与散热硅脂老化，间接导致功率器件结温异常升高，加速其退化进程。

1.2 失效机理与预警窗口

从失效机理看，电机控制器故障多遵循“应力累积—参数漂移—功能退化—彻底失效”的演化路径。以功率器件为例，结温波动引发的热疲劳会逐步削弱焊料层与键合线的机械强度，进而导致导通电阻增大与热阻上升，形成正反馈式的退化过程。这一过程中，器件电气参数与热参数的变化先于功能性失效出现，构成了预警的物理基础[1]。具体而言，导通压降的微小上升、开关时间的缓慢延长以及结温波动的异常增大，均可在功能失效前被检测到。因此，预警系统需能够捕捉早期退化信号，而非仅响应已发生的功能故障。同时，不同故障模式的演化速率差异显著，突发型故障要求系统具备高采样率与快速响应能力，渐进型故障则更依赖长期趋势跟踪与趋势预测能力。

1.3 预警需求界定

基于上述分析，电机控制器故障预警系统应满足以

下需求：其一，覆盖关键部件与关键参数，具备多源信息获取能力，能够同时监测电气量、热学量与机械量；其二，能够在故障早期阶段识别异常，兼顾渐进型与突发型故障，既要有灵敏的早期检测能力，又要有可靠的突发响应机制；其三，具备实时性与可靠性，适应车载嵌入式平台的算力约束，在有限资源下保证预警算法的稳定运行；其四，能够与整车控制器协同，输出分级预警信息并触发相应保护策略，实现从感知到执行的闭环管理。此外，系统还应具备一定的自适应能力，能够根据车辆运行工况与个体差异调整预警参数，降低误报与漏报率。

2 故障预警系统总体架构设计

2.1 四层架构框架

本文提出“感知层—传输层—处理层—决策层”的四层预警系统架构。该架构遵循分层解耦的设计原则，各层承担明确的功能职责，层间通过标准化接口交互，便于模块化开发与后续升级。感知层负责原始信号的采集与预处理，包括电流、电压、温度、振动及转速等物理量的传感测量。传输层承担数据汇聚与通信任务，需兼顾带宽、延迟与电磁兼容性。处理层是系统的核心，完成特征提取、状态评估与预警判定。决策层则面向整车应用，输出预警等级并协调保护动作。四层架构的优势在于将复杂的预警任务分解为可独立优化的子模块，同时保持整体功能的完整性。

2.2 感知层设计

感知层的关键在于传感配置的合理性与信号质量的可控性。除控制器已有的电流、电压与温度采样外，可增设功率模块壳温与冷却液温度测点，以增强热状态感知能力。对于振动信号，可选用MEMS加速度计安装于控制器壳体，捕捉功率器件松动或冷却系统异常引起的机械响应。信号预处理环节需完成滤波、去噪与同步采样，确保后续特征提取的输入质量[2]。考虑到控制器内部存在高频开关噪声，感知层应在硬件层面采用屏蔽、隔离与差分传输等措施，在软件层面结合数字滤波与自适应降噪算法，提升信噪比。此外，传感通道应具备自检功能，能够识别传感器自身的失效状态，避免因传感故障导致误判。

2.3 传输层设计

传输层可采用车载CAN总线与内部高速数据总线相结合的方案。低频状态量通过CAN总线传输，满足整车通信协议的兼容性；高频采样数据则通过SPI或LVDS等内部总线传输至处理单元，以降低通信延迟。为提升可靠性，传输层应具备差错检测与重传机制，并对关键数据实施冗余传输。在电磁兼容性方面，通信线束应合理布局，避开功率回路的强干扰区域，必要时采用光纤或隔离收发器。传输层还需考虑数据的时间同步问题，确保多源信号在融合时具有一致的时间基准，这对于故障定位与因果分析至关重要。

2.4 处理层与决策层设计

处理层部署于车载嵌入式处理器或域控制器中，承担计算密集型任务，包括特征提取、状态评估与预警判定。为适应算力约束，处理层宜采用分级计算策略，将轻量级特征计算置于近传感器端，复杂模型推理置于域控制器端。决策层则依据处理层输出的健康状态评估结果，将预警划分为提示、警告与严重三个等级，分别对应驾驶员提醒、功率降额与安全停机等策略。两层之间通过标准化接口交互，确保预警逻辑与整车控制策略解耦。决策层还应具备优先级仲裁功能，当多个预警同时触发时，依据风险程度确定响应顺序。

3 基于多源信息融合的预警模型构建

3.1 特征提取方法

预警模型的有效性取决于特征对退化状态的敏感度。对于功率器件，可提取导通压降、开关时间、结温波动幅值等特征；对于传感器，可监测零点偏移与增益变化率；对于冷却系统，可关注热阻变化与温升速率。时域特征如均值、方差、峰度计算简单，适合嵌入式部署；频域特征如谐波幅值与边带能量则对早期退化更为敏感。实际应用中宜采用时域与频域特征相结合的方式，兼顾计算效率与诊断灵敏度[3]。此外，可引入时频域特征如小波包能量熵，捕捉非平稳退化过程中的瞬态特征。特征选择环节应采用相关性分析与主成分分析等方法，剔除冗余特征，降低模型复杂度。

3.2 状态评估模型

状态评估可采用模型驱动与数据驱动相融合的策略。模型驱动方法基于电机控制器的物理模型与失效机理，建立参数退化与可测变量之间的解析关系，具有可解释性强的优势。例如，基于热网络模型可推算结温变化，基于电机模型可估计转矩偏差。数据驱动方法则利用历史运行数据训练分类或回归模型，能够捕捉复杂非线性关系，常用方法包括支持向量机、随机森林与深度神经网络。二者融合的方式包括：以物理模型输出作为数据驱动模型的输入特征，或采用残差分析法，将物理模型预测值与实测值的偏差作为异常指标。融合策略可在保证可解释性的同时提升模型泛化能力。

3.3 阈值动态调整策略

固定阈值难以适应工况变化与个体差异，易产生误

报与漏报。本文建议采用动态阈值策略，依据运行工况（如负载率、环境温度、车速）对预警阈值进行自适应调整。具体可建立阈值与工况参数的映射关系，或采用统计过程控制方法，根据历史数据的分布特征动态设定控制限。对于关键参数，可引入趋势预测，当退化速率超过预期范围时提前触发预警。动态阈值的设计应兼顾灵敏度与鲁棒性，避免因工况波动导致频繁误报，同时确保对真实退化趋势的及时响应。

3.4 预警等级划分与输出

预警等级应反映故障的紧迫程度与潜在后果。提示级预警针对轻微异常，建议驾驶员关注并安排检查；警告级预警表示退化趋势明显，应触发功率降额以延缓故障发展；严重级预警则对应即将发生的功能性失效，需立即执行安全停机[4]。预警输出应包含故障部位、置信度与建议措施，便于整车控制器与驾驶员决策。为提高预警的可信度，可采用多模型投票或贝叶斯融合方法，综合多个评估结果生成最终预警结论，降低单一模型误判带来的风险。

4 系统协同与工程化挑战

4.1 与整车控制器的协同机制

预警系统并非孤立运行，需与整车控制器（VCU）及电池管理系统（BMS）协同工作。当预警触发时，VCU应根据预警等级调整转矩指令与功率输出，BMS则需配合调整放电策略，避免电池过载。协同机制的设计应明确接口协议、响应时序与优先级规则，确保多系统联动的确定性与安全性。例如，严重级预警触发时，VCU应在数十毫秒内完成转矩归零与高压下电，BMS同步切断放电回路。此外，协同机制还应支持预警信息的存储与上传，为远程监控与后续分析提供数据支持。

4.2 工程化面临的挑战

工程化应用面临多方面挑战。首先是算力与存储资源约束，车载平台难以承载复杂模型的在线训练，需在模型精度与计算开销之间权衡，可采用模型压缩、量化与剪枝等技术降低部署成本。其次是数据标注难题，故障样本稀缺且获取成本高，制约了数据驱动模型的效果，可通过迁移学习与半监督学习缓解样本不足问题。再次是电磁兼容性与环境适应性，控制器内部的高频开关噪声可能干扰传感信号，需在硬件设计与信号处理层面加以抑制[5]。此外，功能安全标准的合规性要求也对预警系统的失效模式与冗余设计提出了更高要求，需在系统设计阶段引入失效模式与影响分析，确保预警功能自身的可靠性。

结束语

本文围绕新能源汽车电机控制器故障预警系统的构建进行了系统探讨。研究明确了电机控制器的典型故障模式与预警需求，提出了四层系统架构，并分析了多源信息融合预警模型的构建方法。研究表明，将物理机理与数据驱动方法相结合，辅以动态阈值策略与分级预警机制，能够有效提升故障早期识别能力，为整车安全运行提供保障。未来研究可进一步聚焦轻量化模型部署、小样本条件下的迁移学习以及预警系统功能安全认证等方向，推动预警技术从理论框架走向工程落地。同时，随着车联网与云端计算技术的发展，预警系统有望实现车云协同的分布式架构，进一步提升预警精度与覆盖范围。

参考文献

[1]王磊,张俊,李明.基于多特征融合的电动汽车电机控制器故障诊断方法[J].电工技术学报,2022,37(14):3562-3573.

[2]陈志强,刘洋,赵鹏.新能源汽车驱动系统功率器件健康状态监测与预警综述[J].中国电机工程学报,2023,43(8):3015-3029.

[3]孙浩,周涛,郑凯.基于数据驱动的IGBT模块剩余寿命预测方法研究[J].电力电子技术,2021,55(6):45-49.

[4]李雪梅,王建国,张伟.电动汽车电机控制器故障诊断技术研究进展[J].汽车工程,2022,44(3):412-421.

[5]刘峰,陈晓东,黄志刚.基于深度学习的永磁同步电机驱动系统故障诊断[J].电机与控制学报,2023,27(2):88-97.