

新能源汽车电机驱动系统故障检测与维护策略

莫宗维 王涛 曲彬

重庆电讯职业学院，重庆市，402247；

摘要：随着新能源汽车行业的快速发展，电机驱动系统作为其核心部件之一，其稳定性和可靠性对整车性能有着决定性的影响，因此，研究电机驱动系统的故障检测与维护策略显得尤为重要。本文首先介绍了电机驱动系统的结构组成，然后详细分析了该系统可能出现的常见故障类型。在此基础上，本文探讨了多种故障检测技术与方法，包括故障诊断模型的构建、故障特征的提取与分析以及故障预测算法的应用。

关键词：新能源；汽车电机驱动；故障检测；维护策略

DOI:10.69979/3041-0673.24.5.001

引言

随着新能源汽车市场的快速发展，电机驱动系统作为其核心部件之一，其稳定性和可靠性对整车性能有着决定性影响。然而，电机驱动系统在长期运行过程中不可避免地会出现各种故障，这些故障若不能及时发现和处理，将严重影响车辆的使用安全和寿命。因此，研究新能源汽车电机驱动系统的故障检测与维护策略，对于保障新能源汽车的安全运行和提高其使用效率具有重要意义。

1 电机驱动系统结构

电机驱动系统作为新能源汽车的核心部分，其结构设计直接影响着车辆的性能和效率。系统主要由驱动电机、电机控制器、电源系统、传动机构以及冷却系统组成，各部分协同工作，共同实现车辆的驱动功能。

驱动电机是电机驱动系统的核心元件，它将电能转化为机械能，驱动车辆行驶。目前主流的驱动电机类型包括永磁同步电机（PMSM）、交流异步电机（ACIM）和开关磁阻电机（SRM）。永磁同步电机凭借其高效率、高功率密度和良好的调速性能，成为新能源汽车的首选。电机内部包括定子、转子、换向器（对于交流异步电机）或磁场调控系统（对于永磁同步电机），以及必要的电磁绕组。

电机控制器是驱动电机系统的“大脑”，它负责接收来自整车控制器的指令，通过精确控制电机的电流和电压，以实现电机的转矩和转速控制。控制器通常包括控制算法、功率模块、传感器接口和通信接口等组成部分。控制算法基于电机模型进行设计，以保证电机在各种工况下的稳定运行。功率模块则通过开关操作，调整电机的供电，实现电机的调速和转向。

电源系统负责为电机控制器提供稳定的电能，通常由车载电池组、电池管理系统（BMS）和DC/DC变换器构成。电池组为车辆提供主要的能量来源，BMS则实时监控电池状态，确保电池安全运行，而DC/DC变换器则根据系统需求，调整电

压水平，以满足电机控制器和车内其他电子设备的需求。

传动机构，包括齿轮箱、差速器等，将电机的高转速、低扭矩转换为适合车轮驱动的低转速、高扭矩，以适应不同的行驶工况。传动机构的设计会影响到车辆的加速性能、NVH（噪声、振动与harshness）水平以及结构复杂度。

冷却系统是电机驱动系统不可或缺的部分，它确保电机在适宜的温度下运行，防止过热导致的性能衰减或损坏。冷却方式多样，可以是空气冷却、液体冷却，甚至更先进的油冷或水冷热交换系统。电机控制器和冷却系统之间的密切协作，通过传感器监测温度，根据温度反馈调整冷却策略，确保电机在安全范围内高效运行。

2 电机驱动系统常见故障类型

电机驱动系统在新能源汽车中的重要性不言而喻，然而，由于其复杂性和工作环境的多样性，故障的发生难以避免。常见故障类型主要包括电机故障、控制器故障、电源系统故障以及传动机构和冷却系统相关的故障。

电机故障通常涉及电机绕组的短路或开路，这些故障可能因过电压、过电流、过热或机械损伤引发。永磁同步电机的故障可能涉及永磁体退磁，导致电机性能下降。交流异步电机的故障可能源自换向器的磨损或电刷接触不良。开关磁阻电机的故障可能由于开关元件故障或磁场调控不当导致。

控制器故障多由电子元件的失效、软件错误或通信问题引起。过热、电源波动或电磁干扰可能导致控制器内部的微处理器、功率模块或传感器损坏。此外，控制算法的错误配置或更新也可能导致控制策略失效，进而影响电机性能。

电源系统故障通常与电池管理系统（BMS）的异常有关，例如电池单元的故障、电池包的热失控或电解液泄漏。DC/DC变换器的问题，如电压调节失效、过载保护失灵，也可能导致电源供应不稳定，影响整个驱动系统的工作。

传动机构的故障主要涉及齿轮磨损、轴承故障或润滑问题，这些问题可能降低传动效率，增加噪音，甚至导致车辆

行驶异常。冷却系统的故障可能表现为冷却液泄漏、风扇失效或热交换器堵塞，这些问题会导致电机过热，降低效率，甚至可能导致电机永久性损坏。

为确保新能源汽车的稳定运行，故障的早期识别和及时处理至关重要。故障检测技术如信号分析、状态估计和故障预测模型，有助于实时监控电机驱动系统，识别上述各类故障的早期迹象。通过定期维护，如电机绕组的检查、控制器软件的更新和电池包的健康状态评估，可以降低故障发生的概率。同时，利用大数据和机器学习技术进行预测性维护，能够对系统健康状态进行深入分析，实现故障的提前预测和精准定位，从而降低维修成本，提高系统可用性。故障发生后，快速响应和高效的诊断修复策略将确保最小的停机时间，保证车辆的正常运行。

3 故障检测技术与方法

3.1 故障诊断模型构建

故障诊断模型构建是新能源汽车电机驱动系统故障检测中的关键环节，它将复杂的数据分析与实际运行状况紧密结合，为故障的早期识别和精确判断提供科学依据。模型构建通常基于多种技术手段，包括数据驱动、模型驱动以及它们的融合，以实现对电机驱动系统运行状态的深入理解。

数据驱动的故障诊断模型主要依赖于大量实时采集的车辆运行数据，如电机电流、电压、温度、转速等。通过深度学习算法，如支持向量机（SVM）、神经网络（NN）、决策树（DT）或随机森林（RF），这些数据被转化为可识别的故障模式。异常检测技术，如主成分分析（PCA）、聚类分析（Clustering）或孤立森林（IsolationForest），则可以帮助识别数据中的异常点，从而揭示潜在的故障迹象。此外，时间序列分析，如滑动窗口分析和自回归模型（ARIMA），能够捕捉到数据随时间的动态变化，有助于提前预测故障。

模型驱动的故障诊断模型则基于系统物理模型，如电机的数学模型、热力学模型等，通过比较实际运行数据与模型预测结果的偏差来识别故障。例如，通过构建电机的数学模型，可以预测在给定输入下的电机输出，当实际输出与预测值有较大差异时，可能表明存在故障。这种方法通常更加精确，但需要深厚的理论基础和精确的模型参数。

混合方法的故障诊断模型结合了数据驱动和模型驱动的优势，它在利用数据驱动方法捕捉复杂故障模式的同时，通过模型驱动方法提供深入的物理理解。例如，可以先用数据驱动方法找出可能的故障区域，然后使用模型驱动方法进一步分析这些区域内的数据，以确定具体的故障原因。这种方法在解决复杂故障诊断问题时表现出较高的准确性和鲁棒性。

在构建故障诊断模型时，还需要考虑多源数据的融合，

包括车辆内部传感器数据、车辆通信网络数据，甚至外部环境数据，如温度、湿度等。多元数据融合有助于提高诊断的准确性和鲁棒性，有助于从多维度分析故障。

同时，为了确保故障诊断模型的有效性，需要定期进行模型验证和更新。这通常通过实际故障案例的分析和学习来实现，以确保模型能够适应不断变化的运行环境和新出现的故障模式。

故障诊断模型构建是电机驱动系统故障检测的核心技术，它通过结合数据驱动与模型驱动等多种方法，以及多元数据融合，实现对系统运行状态的精准监测和故障的早期识别。随着人工智能和大数据技术的不断发展，故障诊断模型的精确度和实时性将得到进一步提升，为新能源汽车电机驱动系统的健康管理与故障处理提供更强大的技术支持。

3.2 故障特征提取与分析

故障特征提取与分析是故障检测技术中的核心步骤，它将从海量的运行数据中筛选出关键信息，揭示潜在的故障征兆。这个过程通常包括信号预处理、特征提取和特征选择三个阶段。

信号预处理是故障特征提取的先决条件，它主要针对原始数据的噪声、失真和不完整性进行修正。常见的信号预处理技术包括滤波（如滑动平均滤波、Butterworth滤波）、信号标准化（如Z-score标准化、小波去噪）、信号重构（如Hilbert变换、小波包变换）等，这些方法有助于提高数据的纯净度，使得后续的特征提取更准确。

特征提取是从预处理后的信号中提取出与故障模式相关的特征参数。这可以通过统计分析（如均值、方差、频域特征）、时间序列分析（如短期自相关、长期自相关）、频谱分析（如傅立叶变换、小波变换）、形态学分析（如轮廓积分、边缘检测）等方法实现。这些特征参数能够反映电机驱动系统的正常运行状态和异常情况，如电流的波动、电压的突变、温度的异常升高或转速的不稳定等。

特征选择则是从众多提取的特征中筛选出那些对故障诊断最具 discriminating power 的特征。特征选择的方法有基于信息理论的（如互信息、互信息熵）、基于统计的（如主成分分析、线性判别分析）、基于机器学习的（如随机森林、支持向量机的基元选择）等。通过特征选择，可以降低数据的维度，减少计算复杂性，同时提高诊断模型的精度和泛化能力。

特征提取与分析不仅要关注单一参数的变化，还要考虑参数之间的关联性。例如，通过协方差分析、相关性分析或聚类分析，可以发现不同参数之间是否存在同步变化或集群现象，这些关联性往往是故障的强有力指示。同时，通过建

立多变量模型，如潜在变量模型（如因子分析）或多源数据融合模型，可以综合考虑多个参数的特征，提高故障检测的鲁棒性。

故障特征提取与分析是故障诊断技术的关键环节，它通过深入挖掘和理解电机驱动系统的运行数据，提炼出故障的“指纹”，为后续的故障诊断和维护策略提供精确的依据。随着大数据和人工智能技术的进步，特征提取和分析的方法将不断优化，为新能源汽车电机驱动系统的故障检测与维护策略提供更高效、更精准的工具。

3.3 故障预测算法

故障预测算法是故障检测与维护策略中的重要组成部分，它通过分析历史数据和运行状态，运用先进的统计学和机器学习技术，对电机驱动系统的未来故障发生可能性进行预测，从而实现预防性维护和预测性维护。这类算法的应用能够显著降低故障带来的经济损失，提高系统的可靠性和运行效率。

故障预测算法主要可以分为监督学习和无监督学习两大类。监督学习算法是基于历史故障数据，通过训练模型来预测未来故障。常用的监督学习算法有决策树、随机森林、支持向量机、神经网络等。这些算法通过学习已知的故障模式，对新的数据进行分类，预测潜在的故障。例如，通过训练一个神经网络模型，输入车辆运行的实时数据，输出对故障发生的概率估计。

无监督学习算法则不依赖于历史故障数据，而是专注于发现数据中的异常和模式。这类算法包括自编码器、异常检测算法（如 IsolationForest、LocalOutlierFactor）和聚类算法（如 K-means、DBSCAN）。无监督学习的优势在于可以发现未知的故障模式，即使这些故障在历史数据中并未出现过。例如，使用自编码器来学习正常运行数据的压缩表示，当新的数据点无法通过模型准确重构时，可能意味着发生了故障。

在实际应用中，往往结合监督学习和无监督学习的优势，构建混合故障预测模型。例如，首先使用无监督学习算法进行初始的异常检测，筛选出可能包含故障信号的数据；然后，对这些异常数据应用监督学习算法进行精细化的故障类别识别。这种方法能够在保证高检测率的同时，降低误报和漏报

率。

还有些模型利用深度学习技术，如深度神经网络（DNN）和卷积神经网络（CNN），对原始传感器数据进行多级抽象，以提取复杂的故障特征。深度学习模型能够捕捉到数据的深层模式，对于复杂的非线性故障问题具有很好的适应性。

为了确保故障预测算法的有效性，需要定期对模型进行评估和优化。评估指标通常包括预测准确率、召回率、F1 分数和 AUC (AreaUnderCurve) 等。通过交叉验证和滚动预测等方法，可以在新数据到来时持续监控模型性能，及时调整参数或更新模型，防止模型过拟合或欠拟合。

故障预测算法的应用，使新能源汽车电机驱动系统的维护策略从被动的故障修复转变为积极的预防和预测。通过实时监控和智能诊断，可以提前安排维护，避免因突发故障导致的车辆停驶，提升用户体验，并降低整体维护成本。随着大数据和人工智能技术的持续进步，故障预测算法将更加精确和智能化，助力新能源汽车产业的可持续发展。

4 结语

在新能源汽车电机驱动系统的故障检测与维护策略中，故障预测算法的引入标志着维护工作从传统的经验驱动向数据驱动转变。通过这些算法，可以实现对电机驱动系统潜在故障的早期识别和预警，从而避免或减少故障带来的损失。故障预测算法的实施，不仅需要依赖先进的数据分析技术，还需要结合电机驱动系统的实际工作环境和运行条件，以确保预测结果的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] 陈亚茹. PLC 技术下新能源汽车电机驱动系统故障检测 [J]. 《大众汽车》, 2024 年第 2 期 109-111, 共 3 页
- [2] 张红宝. 新能源汽车电机驱动控制技术专利分析 [J]. 《中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术》, 2024 年第 8 期 0001-0004, 共 4 页
- [3] 马铖. 基于电子诊断技术的新能源汽车检测与维修技术研究 [J]. 《汽车零部件》, 2024 年第 2 期 116-119, 共 4 页