

新能源汽车电机驱动系统故障诊断优化探究

唐波强

特斯拉(上海)有限公司, 上海 200120

[摘要]随着全球能源危机以及环境污染问题变得越来越严重,新能源汽车作为替代传统燃油车的关键方案,其核心的电机驱动系统的可靠性与安全性已然成为了行业所聚焦的重点所在。文中就电机驱动系统故障诊断现有的各类方法展开系统剖析,并且对多种优化策略展开细致研讨,目的在于提高诊断的准确程度以及实时性。凭借综合运用多源信息融合技术以及智能算法方面的优化举措,同时结合实时诊断以及容错控制机制,去构建起一个高效且集成的诊断系统架构,进而为新能源汽车的稳定运行以及后续维护给予相应的理论支撑与实践方面的指引。

[关键词]新能源汽车; 电机驱动系统; 故障诊断

DOI: 10.33142/sca.v8i9.17969

中图分类号: U472

文献标识码: A

Research on Fault Diagnosis Optimization of Motor Drive System of New Energy Vehicles

TANG Boqiang

Tesla (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, 200120, China

Abstract: With the global energy crisis and environmental pollution becoming more and more serious, the reliability and safety of the core motor drive system of new energy vehicles, as a key scheme to replace traditional fuel vehicles, has become the focus of the industry. In this paper, the existing methods of fault diagnosis of motor drive system are systematically analyzed, and various optimization strategies are discussed in detail, in order to improve the accuracy and real-time diagnosis. With the comprehensive application of multi-source information fusion technology and intelligent algorithm optimization measures, combined with real-time diagnosis and fault-tolerant control mechanism, an efficient and integrated diagnosis system architecture is constructed, which will give corresponding theoretical support and practical guidance for the stable operation and subsequent maintenance of new energy vehicles.

Keywords: new energy vehicles; motor drive system; fault diagnosis

在“双碳”目标和节能减排政策的推动下,新能源汽车产业迎来快速发展机遇。电机驱动系统作为新能源汽车的重要组成部分,其性能优劣直接影响整车的动力性、经济性和安全性。然而,电机驱动系统结构复杂、工况多变,故障模式多样,给车辆运行可靠性带来挑战,因此,开展电机驱动系统故障诊断,对保障新能源汽车安全、提升其市场竞争力具有重要意义。

1 新能源汽车电机驱动系统概述

1.1 电机驱动系统组成与功能

新能源汽车电机驱动系统一般包含电机本体、功率变换器、传感器以及控制单元等部分。在这个系统当中,电机本体负责把电能转变成机械能,功率变换器能够实现电能的调节与分配,传感器用来实时监测系统的各项参数,而控制单元会依据输入的信号来输出相应的指令,以此来

协调整个系统的运行。电机驱动系统最为关键的功能是要能够提供稳定且高效的动力输出,并且凭借反馈机制达成对转速、转矩等参数的精准控制,从而保证车辆能够在不同的工况下具备良好的适应性以及可靠性。该系统不但要符合高功率密度以及高效率方面的要求,而且还要拥有较强的抗干扰能力以及容错性能,这样才能应对复杂道路环境以及负载变化所引发的各种挑战。随着材料科学以及电力电子技术不断地发展进步,像永磁同步电机、开关磁阻电机这类新型电机渐渐变成了主流的选择,它们较为紧凑的结构以及较高的控制精度又进一步推动了系统整体性能的提升。

1.2 常见故障类型与影响

电机驱动系统在运转之时,有可能出现各式各样的故障,像电机自身方面可能出现绝缘老化的状况,轴承也会

有磨损的情况，转子还可能存在偏心的问题；功率器件方面，比如 IGBT 就可能出现开路或者短路这类故障；传感器方面，其信号可能会出现漂移的现象，又或者直接失效；控制软件也存在故障的可能性，像是逻辑上出现错误，或者是通信出现中断等情况^[1]。这些故障要是没有得到及时且妥善的处理，那么就极有可能致使系统效率有所降低，输出转矩出现波动，甚至还会让系统完全停止运行。情况严重的时候，甚至能够致使车辆失去控制，进而引发安全事故。就好比电机出现过热故障，这很可能会使得材料加速退化，进而使得使用寿命大大缩短。而一旦传感器出现失效的情况，那么控制系统就会失去准确的反馈信息，如此一来便会产生误操作的现象。故障所造成的影响程度是和故障的具体类型以及发生的实际位置紧密相关的。局部出现的故障或许仅仅会让性能稍微有所衰减，然而关键部件出现故障之后，那可就有可能迅速地蔓延到整个系统当中去了。所以，建立起一套能够快速且准确开展故障诊断的机制，对于保障车辆的安全以及延长系统的使用寿命而言，是有着极为重要意义的。

2 电机驱动系统故障诊断方法分析

2.1 传统诊断方法及其局限

传统故障诊断通常依靠专家经验以及阈值来判断，会通过分析历史数据和故障模式来构建规则库，借助信号处理技术比如傅里叶变换或者小波分析来提取特征参数，以此达成对常见故障的识别与分类。这些方法在简单的系统当中多少有些效果，不过它们存在一定的局限性，就是过于依赖先验知识并且适应能力比较差，很难去应对新型故障或者是复杂工况的变化情况。就好比说阈值方法很容易受到噪声的影响而出现误报的情况，专家系统又得耗费大量的人工干预且更新速度很慢，没办法满足实时性以及自学习的需求。随着系统的复杂程度不断增大，传统方法在诊断精度以及效率方面慢慢暴露出不少的不足之处，特别是在多故障同时发生或者渐进性故障的场景之下，诊断的效果明显变差，所以迫切需要引入更为先进的数据驱动以及基于模型的方法来弥补它的缺陷。

2.2 基于数据驱动的诊断方法

基于数据驱动的诊断方式会运用机器学习以及深度学习方面的算法，从数量众多的运行数据里去自动学习故障所具有的特征，它并不依靠精确的数学模型，而是借助模式识别还有分类来达成故障的检测以及隔离的目的。其中常用到的技术包含支持向量机、随机森林以及卷积神经网络等，这些方法可对高维非线性数据加以处理，并且能适应处于动态变化之中的环境情况。比如说通过对电流、

电压以及振动信号的时间序列展开分析，数据驱动的方法能够识别出潜在的故障模式，同时还能预测故障的发展趋势，它的优势体现在较强的泛化能力以及较高的诊断精度上，特别适用于那种传感器数据较为丰富但是机理却不太清晰的场景状况^[2]。不过这类方法对于数据的质量以及数量都有着较高的要求，而且在模型训练的过程当中，其对计算资源的消耗是颇为巨大的，在实时的应用环节中有可能会碰到延迟方面的问题，与此由于存在黑箱特性，所以诊断结果的解释性是比较差的，这就需要将其与其他的方法相结合起来以提升整体的可靠性程度。

2.3 基于模型诊断方法的进展

基于模型的诊断方法会先去构建系统的数学模型，像状态空间方程又或者是传递函数这类的，接着借助观测器或者滤波器来对系统状态加以估计，然后再把所估得的状态跟实际输出相互比较一番，如此一来便能生成残差信号，进而凭借此信号来检测以及定位故障。近些年来，这种方法在非线性系统以及自适应观测器设计领域收获了颇为显著的进展，就好比滑模观测器还有扩展卡尔曼滤波的应用，这使得其对参数扰动以及噪声的鲁棒性得以提升。基于模型的方法有着物理意义清晰明确的优势，并且其诊断速度也比较快，能够达成早期故障的检测与隔离目的，不过它的性能很大程度上要依靠模型的精度，要是系统参数出现时变情况或者存在未被建模的动态，那便容易出现漏报的情况。当下的研究趋势是将数据驱动方法与之结合起来，以此来修正模型可能出现的误差，又或者引入多模型切换机制，从而能够适应不同的运行工况，进而提高诊断系统的适应性以及可靠性。

2.4 诊断系统性能评价指标

故障诊断系统的性能往往是凭借诸多指标来展开综合评定的，像诊断准确率、误报率、漏报率、实时性以及鲁棒性等等都涵盖其中。诊断准确率所体现的是正确识别故障所占的比例情况，而误报率指的是原本处于正常状态却被错误地判定成故障的那种概率，漏报率说的就是故障没有被检测出来的那种情形，这些指标综合起来便决定了诊断系统的可靠性。实时性是要求诊断过程得在限定的时间范围之内完成，如此一来才能防止故障进一步扩散从而造成更为严重的损失，鲁棒性则是指系统在面临噪声干扰还有参数发生变化的情况下依旧能够维持其诊断性能的那种能力。计算复杂度以及资源消耗同样是重要的考量因素，在车载嵌入式平台当中更是需要去平衡诊断精度和硬件方面的限制。在对诊断系统进行优化的时候，得综合各方面因素来加以考虑，借助多目标优化的方法去探寻最佳

的折衷方案，进而保证在实际的应用过程当中既能实现高效的诊断效果又能做到经济方面的合理把控。

3 故障诊断优化策略探究

3.1 多源信息融合技术应用

多源信息融合技术会把来自不同传感器以及数据源的信息整合到一起，借助数据级、特征级还有决策级融合的方法来让故障诊断的完整性以及准确性得以提升。就好比说把电流、电压、温度以及振动信号综合起来，如此一来便能够更为完整地将系统状态的变化给捕捉住，还能把单一传感器出现失效所带来风险减少掉。在电机驱动系统的诊断方面，信息融合可有效辨别故障类型以及其严重程度，借助时空关联分析还可提升诊断的可信度，当下常用的融合算法有 D-S 证据理论、卡尔曼滤波以及神经网络融合等等。在处理具有不确定性的测量数据的时候，D-S 证据理论能够很好地将来自多个传感器的置信度分配加以合成，进而针对潜在故障做出更为合理的判断，不过它的计算复杂度相对来讲是比较高的，并且还得去解决证据冲突方面的问题。在运用多源融合技术的时候，得去解决数据异步、异构以及冲突等问题，与此同时还要对融合结构加以优化，以此来降低计算负载，进而达成更为可靠的诊断结果，还能为后续的容错控制给予相应的支持。从工程实践层面来讲，怎样去设计一种自适应的融合权重调整机制，让系统能够在不同的运行工况之下自动优选出最为相关的那些信息源，这是提升融合效果的一个极为关键的研究方向，而这需要对各种故障模式下不同物理量的响应特性以及关联关系有着较为深入的理解。

3.2 智能诊断算法优化

智能诊断算法的优化主要聚焦于对机器学习以及深度学习模型的结构和参数加以改进，以此来提高故障分类的精度以及泛化的能力。常见的优化方向有特征选择降维、模型结构轻量化以及集成学习的应用等。比如可借助主成分分析或者自动编码器来降低输入维度，又或者采用迁移学习来适应不同的运行条件。经过优化之后的算法能够更为有效地提取微弱的故障特征，并且减少出现过拟合的风险。与此还能够凭借在线学习机制达成模型的自适应更新，进而应对因系统老化或者环境变化而产生的种种挑战。具体来讲，面对深度网络模型在嵌入式设备上部署存在困难这一挑战，模型剪枝与量化技术受到了广泛的探索。它们可以在尽可能维持模型性能的情况下大幅度缩减模型的体积以及计算量，这对于实现车载端的实时智能诊断而言是极为关键的。不过，算法优化得在复杂度与性能之间寻求平衡，在嵌入式系统当中还要考量硬件资源的限制，所

以当下的研究着重于开发边缘计算友好型的算法，从而实现高效的实时诊断^[3]。集成学习框架把多个弱学习器组合起来也能够较为稳定地提升诊断模型的鲁棒性，然而其代价是使得训练与推理过程的计算开销有所增加，所以在实际的应用当中需要依据具体的需求来审慎地权衡与选择。

3.3 实时诊断与容错控制结合

实时诊断和容错控制相结合的方式，是把故障诊断的结果迅速反馈给控制系统，然后触发预先设定好的容错策略，比如重新构建控制规律或者切换到备份部件，以此来维持系统的最基本功能，并且防止故障进一步蔓延。这样的结合方式要求诊断模块具备很高的实时性以及很低的延迟，与此容错策略要依据故障的具体类型以及严重的程度来进行动态的调整。在电机驱动系统当中，常见的容错办法有硬件方面的冗余，像多设置一些传感器或者功率器件，还有软件方面的冗余，像是采用自适应观测器或者滑模控制等手段，借助这两者相互配合，达成在出现故障情况下的系统稳定运转。具体而言，在永磁同步电机驱动系统里，要是电流传感器出现了故障，那么一种行之有效的软件容错办法就是切换成基于电压模型的无传感器观测算法，以此来对电机转矩加以估计，进而确保车辆可以持续安全地开往维修点。在这个过程中，需要诊断单元能够快速且精准地识别出传感器已经失效的情况，并且及时告知控制器去实现控制模式的无缝切换。实时诊断和容错相结合的做法，一方面提升了系统的可靠性，另一方面也延长了设备的使用寿命，不过要想实现这一目的，就得解决诊断-控制接口的设计以及时间顺序的同步等问题，从而保证能够做到无缝切换并且让性能损失降到最低限度。

3.4 诊断系统架构集成优化

诊断系统架构集成优化涉及到硬件以及软件层面的协同设计工作，借助模块化、标准化以及接口统一等手段来提升系统的可扩展性以及维护性。比如把诊断功能嵌入到整车控制器当中，或者单独设立诊断单元，并且运用总线通信，像 CAN 或者以太网这样的方式来达成数据共享以及交互的目的。集成优化所追求的目标是减少资源方面的冗余情况，提高响应的速度，与此同时还能支持多故障诊断以及预测性维护等功能。当下的发展趋势是将云平台和边缘计算结合起来，以此实现数据的集中处理以及分布式的诊断。在车载网络这样的环境下，怎样确保诊断消息能够做到实时性以及确定性的传输，这无疑是一个需要去充分考量的问题^[4]。时间敏感网络技术给这一问题提供了一种可能的解决办法，它可以为那些关键的诊断以及控制

数据流给予有保障的带宽，同时还能提供低延迟的传输通道。在对架构进行优化的时候，得充分考虑到成本、可靠性以及兼容性等诸多因素，并且要通过仿真以及实验的方式来对其效能加以验证，进而构建起能够适应未来智能网联汽车需求的高效诊断系统。

4 结束语

本文全面且细致地剖析了新能源汽车电机驱动系统故障诊断当下所采用的方法以及可施行的优化策略，明确指出了传统诊断办法在较为复杂的工况环境之下所存在的种种局限性，同时也着重突出了数据驱动这一方式和模型-based 方法二者之间所具有的互补方面的价值。通过深入探讨像多源信息融合这类策略、智能算法优化方面的策略、把实时诊断和容错控制相结合的策略以及系统架构集成等相关策略，从而为促使诊断性能得以提升找寻到了具备可行性的路径。在未来的研究过程当中，应当将关注点放在多学科相互融合以及实际测量验证之上，着力强化诊断系统所具备的自适应能力以及预测能力，与此同时还要充分考虑到标准化相关事宜以及成本控制方面的情况，以

此来推动该技术朝着产业化的方向迈进。电机驱动系统故障诊断的优化其实是一个处于不断演进当中的过程，这需要学术领域和工业领域携手共努力，进而确保新能源汽车能够实现安全且可靠的运行状态，并且推动汽车产业达成可持续发展的目标。

[参考文献]

- [1]吴海军.新能源汽车电动驱动系统的性能优化与故障诊断[J].汽车维护与修理,2024(18):78-79.
 - [2]王志刚.新能源汽车电驱动系统性能优化与故障诊断[J].汽车知识,2024,24(12):149-151.
 - [3]李志强.新能源汽车永磁同步电机驱动系统多传感器融合故障诊断方法研究[J].专用汽车,2025(9):105-107.
 - [4]刘成,曾义和,刘玉良.新能源汽车电机驱动系统故障诊断与维修研究[J].汽车测试报告,2025(5):43-45.
- 作者简介：唐波强（1988.3—），毕业院校：沈阳化工大学，所学专业：机械工程学院/理论与应用力学，当前就职单位：特斯拉（上海）有限公司，职务：高级工艺工程师，职称级别：中级工程师。