

地铁车辆永磁同步电机驱动系统的故障诊断与容错控制

朱丽媛¹ 王小花¹ 李明²

1. 青岛中车四方轨道车辆有限公司 山东青岛 266100; 2. 包头北方创业有限责任公司 内蒙古自治区包头市 014016

DOI: 10.12238/ems.v7i3.12306

[摘要] 本文集中探讨了地铁车辆中永磁同步电机驱动系统的故障诊断与容错控制问题。永磁同步电机, 作为地铁列车的关键驱动组件, 其运行状态直接关系到列车的行驶安全与运营效率。文章开篇便详细描述了永磁同步电机的工作原理、结构构造以及运行特征, 进而介绍了地铁车辆驱动系统的组成架构、控制策略和性能评估标准。针对驱动系统可能遭遇的各类故障, 文章深入剖析了故障成因及其对系统性能的潜在影响, 凸显了故障诊断的至关重要性。接着, 文章探讨了多种故障诊断技术, 如信号处理技术、模型基础方法和数据驱动途径, 并据此设计了一套故障诊断系统。

[关键词] 地铁车辆; 永磁同步电机; 故障诊断; 容错控制

一、引言

地铁作为现代都市不可或缺的交通工具, 其安全稳定运行对于城市运转至关重要。永磁同步电机, 凭借高效、低噪等显著优势, 已成为地铁车辆驱动系统的核心组件, 广泛应用于地铁领域。然而, 在长期的运营过程中, 电机驱动系统难免会遭遇各类故障, 这些故障不仅会干扰列车的正常运行秩序, 更可能危及乘客的安全鉴于此, 对地铁车辆永磁同步电机驱动系统的故障诊断与容错控制进行深入研究显得尤为迫切。本文将深入剖析永磁同步电机的工作原理及驱动系统的构成要素, 细致分析可能出现的故障类型及其对系统的影响, 并积极探索有效的故障诊断与容错控制策略。期望通过本研究, 为地铁车辆的安全、高效运行提供坚实的技术支撑。

二、永磁同步电机驱动系统基础

1. 永磁同步电机的工作原理

永磁同步电机, 作为一种节能高效的电动设备, 其独特之处在于其精巧的结构与工作原理。该电机主要由定子、转子以及轴承等关键部件组成, 而转子内部嵌入的永磁体, 正是电机得以持续稳定运行的核心要素。在电机中, 永磁体负责产生稳定且恒定的磁场, 其磁场分布经过精心规划, 确保电机在运转时能够实现高效的能量转换。一旦电机接通电源, 定子绕组便会产生旋转磁场, 这个旋转磁场与永磁体产生的恒定磁场相互交织, 进而产生强大的电磁转矩, 驱使电机转子旋转。得益于其工作原理, 永磁同步电机展现出高效、低噪音以及高功率密度等卓越运行特性。在地铁车辆中, 它能够实现车速的精确控制, 确保车辆平稳加速与减速, 为乘客带来愉悦的乘车体验。同时, 其高效性能也大幅降低了地铁车辆的能耗, 契合了现代城市绿色出行的环保理念。

2. 地铁车辆永磁同步电机驱动系统

地铁车辆永磁同步电机驱动系统是现代地铁设计中不可或缺的一部分, 其高效的性能与可靠性为地铁的运行提供了坚实的保障。该系统主要由电机、变频器、传感器及控制单元组成。

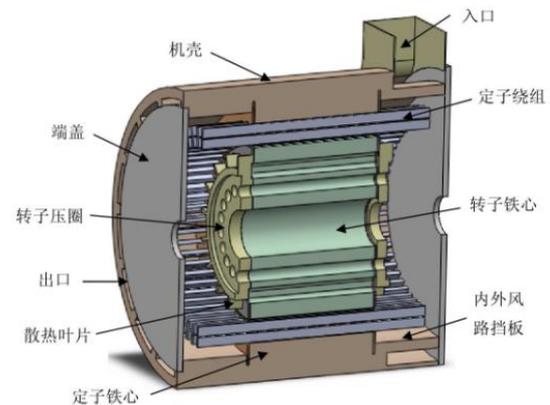


图 2-2 地铁车辆永磁同步电机驱动系统

驱动系统的构成与功能尤为关键。其中, 电机作为系统的核心, 将电能转化为机械能, 带动地铁车辆运行。变频器则通过调节电压与频率, 实现对电机转速的精确控制。传感器部分, 用于实时监测电机的各项运行参数, 如温度、转速等, 并将数据传输至控制单元。控制单元依据预设算法与反馈数据, 动态调整变频器的输出, 确保电机的高效运行。

控制策略与调速方法方面, 永磁同步电机驱动系统采用了矢量控制或直接转矩控制策略, 通过复杂的控制算法实现精准的速度调节。此外, 系统还配备了多种调速手段, 如基于电压频率比的开环调速与闭环调速, 以适应不同运行工况。

系统性能评价指标涵盖了效率、动态响应速度、稳定性与可靠性等方面。通过综合评估这些指标, 可以全面衡量驱动系统的优劣, 并为后续的维护与优化提供依据。

地铁车辆永磁同步电机驱动系统以其独特的优势, 在现代地铁交通中得到了广泛应用。了解并掌握该系统的工作原理与故障诊断方法, 对于保障地铁运行的安全性与可靠性具有重要意义。

3. 故障类型与影响分析

下表列出了地铁车辆永磁同步电机驱动系统中常见的故障类型、原因及其对系统性能的影响。

表 2-3 永磁同步电机驱动系统故障类型与影响分析

故障类型	故障原因	对系统性能的影响	故障诊断紧迫性
电机过热	负载过大、散热不良	降低效率、缩短寿命	高
变频器故障	元件老化、电压波动	无法调速、系统瘫痪	高
传感器失效	线路断路、元件损坏	控制失准、系统不稳定	中
控制单元错误	软件 bug、硬件损坏	误动作、系统失控	高

分析上述表格，可以看出，电机过热、变频器故障以及控制单元错误等故障对系统性能影响严重，甚至可能导致系统瘫痪。因此，故障诊断的重要性与紧迫性不言而喻。及时准确地识别并处理这些故障，对于保障地铁车辆的安全运行至关重要。

表 3-1 永磁同步电机驱动系统故障诊断方法概述

诊断方法	原理简述	优点	局限性
基于信号处理的诊断方法	分析电机运行信号（如电流、电压等）的特征，识别故障模式	实时性好，对硬件依赖低	对信号噪声敏感，可能误判
基于模型的诊断方法	建立电机数学模型，通过观测器估计电机状态，与实际状态对比	精度高，可预测故障趋势	依赖精确的数学模型，鲁棒性低
基于数据驱动的诊断方法	利用机器学习算法分析大量运行数据，识别故障模式	不依赖模型，适应性强，能处理复杂数据	需要大量数据训练，计算复杂度较高

基于信号处理的诊断方法通过直接分析电机运行信号，能够快速响应故障，但其准确性受信号噪声影响较大。基于模型的诊断方法依赖精确的数学模型，虽然精度高，但鲁棒性较低，对实际运行环境的适应性较差。基于数据驱动的诊断方法则利用机器学习算法分析大量运行数据，不依赖模型，适应性强，能处理复杂数据，但需要大量数据训练，计算复杂度较高。在实际应用中，应根据具体情况选择合适的故障诊断方法，或结合多种方法进行综合诊断。

2. 故障诊断系统设计与实现

在地铁车辆永磁同步电机驱动系统的故障诊断技术中，系统的构建与实施占据核心地位。传感器的甄选与信号获取是故障诊断的基石。针对电机的运行状况及潜在故障特性，必须慎重选择适宜的传感器，例如电流监测器、电压检测器、温度感应器等，以全方位捕捉电机的实时数据。同时，传感器的布置需科学合理，确保信号采集的精准无误。故障特征的提炼与识别算法是诊断系统的核心要素。原始信号需历经滤波、增益调整、模数转换等预处理步骤，以萃取与故障紧密相关的特征。接着，运用如支持向量机、神经网络等先进的模式辨识技术，对提取的特征进行细致分类，从而精确判断电机是否存在故障及其类型。系统软硬件的集成则需配备高效的数据处理核心与实时操作系统，确保诊断的即时性与精确性。此外，人性化的交互界面设计也至关重要，以便维修人员迅速锁定并解决问题，提升地铁车辆的运行稳健性与安全性。系统需历经严苛的测试与优化，以适应地铁车辆的复杂环境与高要求。

3. 故障诊断技术实例分析

在地铁车辆永磁同步电机驱动系统的实际运营中，故障诊断技术发挥了关键作用。以一起电机运行异常事件为例，故障诊断系统迅速捕捉到问题，准确指出是电流传感器出现了故障。该系统装备了高灵敏度的电流监测装置，实时追踪电机电流变化，并借助先进的信号解析与模式辨识技术，有

三、永磁同步电机驱动系统故障诊断技术

1. 故障诊断方法概述

在地铁车辆的运行中，永磁同步电机驱动系统的故障诊断技术至关重要。以下是几种常见的故障诊断方法概述，以及基于这些方法的数据表格和分析。

效挖掘出故障特征，及时触发报警。评估结果显示，该系统能精确判定故障类型，为维修团队提供了有力的诊断依据，大幅缩减了故障查找时间，提升了地铁运营效率。但实践中也发现，传感器精度易受环境条件干扰，算法对复杂故障的辨识力尚需增强。未来，将致力于研发更稳固的传感器，优化算法以提升辨识精度，并增强系统的自适应力，以更好地应对地铁运行中的诸多挑战，推动故障诊断技术再上新台阶。

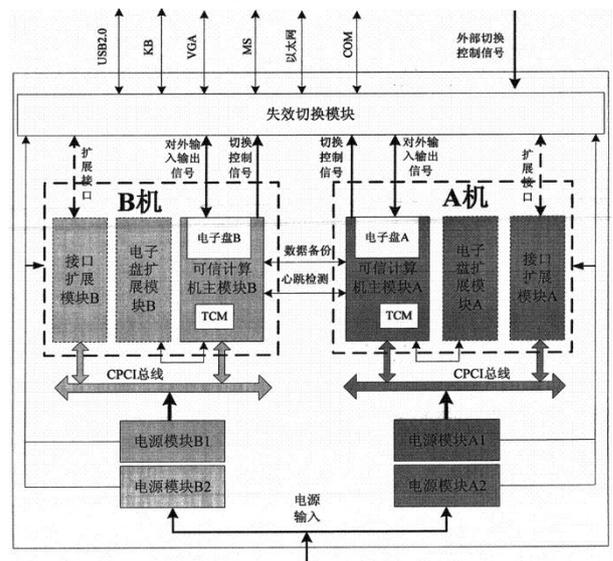


表 4-2 容错控制系统设计

四、永磁同步电机驱动系统容错控制技术

1. 容错控制原理与方法

容错控制，作为增强系统稳定性的核心技术，其精髓在于即便系统某些部件出现故障，也能确保系统持续稳定运行，或至少能在性能轻微下降的状况下继续工作。在地铁车辆的永磁同步电机驱动系统中，容错控制的作用尤为凸显。容错控制策略丰富多样，依据实施方式可划分为被动与主动两类。

被动容错通过构建具有强鲁棒性的控制机制,在故障发生前便考虑其可能性,以保障系统性能不受影响。主动容错则更具适应性,能在故障出现后,依据具体情况动态调整控制参数或架构,确保系统稳定运行。设计永磁同步电机驱动系统的容错控制体系时,需遵循若干原则:确保系统具备备份能力,关键部件需有替代;系统应能实时监控故障,迅速响应并处理;同时,还需兼顾成本、复杂度和可维护性,确保方案切实可行,为地铁车辆安全运行提供坚实保障。

2. 容错控制系统设计与实现

永磁同步电机驱动技术在地铁车辆领域的应用日益普及,但其运行环境复杂且工作条件苛刻,系统故障风险随之增加。因此,开发并应用永磁同步电机驱动系统的容错控制技术显得尤为重要。

容错控制的核心在于构思并实施一种控制策略,确保系统部件发生故障时,整体系统仍能维持稳定运行。这一控制体系主要依托冗余配置、故障监测及系统重构等技术手段。容错控制策略依据其工作方式,可划分为被动与主动两类。被动容错依赖于预先设定的固定控制器,结构简明但灵活性有限;而主动容错则能在线实时调整控制器参数,以适应故障状况,展现出更高的灵活性和适应性。

设计容错控制系统时,需遵循几项关键原则:

1. 可靠性: 系统需在故障后仍能持续可靠运行,防止次生故障或严重故障的发生。
2. 实时性: 故障检测与容错措施需迅速响应,以最大限度减少故障对系统性能的影响。
3. 透明性: 容错控制策略应对用户透明,用户无需在故障时介入,系统应能自动完成容错切换。

在永磁同步电机驱动系统中,实现容错控制可采用双电机冗余驱动方案。此方案通过实时对比主、从电机的工作状态,一旦主电机出现故障,立即切换至备用电机,并调整控制系统参数,确保驱动系统的扭矩和速度输出平稳过渡。同时,需构建故障监测系统,实时监控电机的电流、转速及温度等运行参数,一旦发现异常,即刻启动容错机制。

为实现这一设计,需经历以下步骤:

1. 系统建模与仿真: 建立永磁同步电机驱动系统的数学模型,模拟分析不同故障下的系统响应,验证容错控制策略的有效性。
2. 控制器设计: 开发主、从控制器,既满足主电机正常运行时的控制需求,又能在故障发生时实现快速切换控制。
3. 实验验证: 通过半实物仿真和实地测试,评估容错控制系统的性能,优化控制参数,确保系统在实际运行中的稳定性和可靠性。

通过上述设计与实施,永磁同步电机驱动系统在故障发生时,能依靠容错控制策略保持连续运行,显著提升地铁车辆的运行安全性和效率。

3. 容错控制技术效果验证

在地铁车辆的永磁同步电机驱动系统中,容错控制技术

的验证是通过构建实验平台和测试环境来完成的。该平台由永磁同步电机、驱动控制器、传感器以及数据采集系统等关键部件组成。通过模拟地铁实际运行中的各种故障情况,来检验容错控制策略的有效性。

在实验平台的搭建过程中,注重确保各组件之间的兼容性和实时响应能力,以尽可能准确地模拟地铁的真实运行环境。测试环境则结合了软件仿真和硬件在环仿真技术,以重现地铁运行中的各种故障场景。

在容错控制技术的实验过程中,故意引入故障,如电机某相绕组的短路故障,以观察系统的响应和容错控制策略的执行效果。系统能够迅速检测出故障,并自动切换至备用工作模式,有效避免系统崩溃。为了评估容错控制技术的性能,对比分析了故障发生前后系统的运行状态,包括电机的转速、扭矩、效率以及系统的稳定性等指标。通过对比故障前后的数据,量化了容错控制策略对系统性能的提升效果。此外,还对容错控制策略的实时性和可靠性进行了评估。通过大量的重复测试,确保系统能够在故障发生的极短时间内完成容错切换,从而保障地铁车辆的运行安全和乘客的舒适体验。

总之,通过构建实验平台和测试环境,对永磁同步电机驱动系统的容错控制技术进行了全面的验证。这确保了系统在故障情况下仍能保持稳定运行,为地铁车辆的安全运营提供了有力的保障。

五、结论

经过对地铁车辆永磁同步电机驱动系统容错控制技术的深入探究,成功搭建了实验平台,并开展了详尽的测试验证工作。测试结果显示,所开发的容错控制系统在电机遭遇故障时能够迅速做出反应,精确识别故障位置,并自动切换至预备的工作模式,从而确保了系统的持续稳定运作。实施容错控制策略后,系统的可靠性和安全性得到了显著提升,有效减轻了故障对地铁车辆正常运行的干扰。同时,通过对比分析系统在故障前后的性能表现,具体量化了容错控制技术所带来的改进效果,进一步证实了其在实践应用中的重要作用。总而言之,永磁同步电机驱动系统的容错控制技术为地铁车辆的安全运营奠定了坚实基础,展现出广泛的应用潜力和推广价值。

【参考文献】

- [1] 蒋雨菲, 沈坚, 段卓琳, 等. 基于特种车辆永磁同步多用途电机驱动系统设计[J]. 微特电机, 2022, 50(10): 44-47
- [2] 王清清. 永磁同步牵引电机无位置传感器矢量控制技术[D]. 大连交通大学, 2023.
- [3] 苏晗翀, 李义国, 裘文超, 等. 宁波地铁4号线车辆永磁同步牵引系统能耗性能研究[J]. 机电传动, 2023, (01): 113-121.
- [4] 吴彩秀, 李红佗, 庄舜雄. 地铁列车节能技术应用研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022, (08): 33-37.
- [5] 林泽雄. 地铁车辆永磁同步牵引系统与异步牵引系统选型分析[J]. 机电信息, 2021, (28): 30-32