

# 新能源汽车电驱系统可靠性设计体系探讨

曾 智

浙江远程商用车研发有限公司 浙江 杭州 310000

**摘要：**通过深入探讨新能源汽车电驱系统可靠性设计体系。阐述其组成、工作原理与性能要求，介绍系统性、模块化等设计原则及FMEA等设计方法，详细剖析电机、控制器、变速器与传动系统的可靠性设计关键技术，以某知名车型为例说明设计成效，旨在为提升新能源汽车电驱系统可靠性提供全面参考。

**关键词：**新能源汽车；电驱系统；可靠性设计

引言：在全球倡导绿色出行、新能源汽车蓬勃发展的当下，电驱系统作为新能源汽车的核心，其可靠性直接关系到车辆性能与用户体验。随着新能源汽车市场份额不断扩大，对电驱系统可靠性提出更高要求。本文围绕此展开对新能源汽车电驱系统可靠性设计体系的深入探讨。

## 1 新能源汽车电驱系统概述



新能源汽车电驱系统核心组件示意图

新能源汽车电驱系统是车辆动力输出的核心单元，其性能直接决定整车的动力响应、能耗效率及安全表现。该系统由三大核心组件构成：电机、控制器和传动装置，三者协同实现电能向机械能的精准转化与高效传递。其中，永磁同步电机凭借其高功率密度、高能量转换效率及紧凑结构设计成为主流选择，能够在宽泛转速区间内持续输出稳定动力；控制器作为电驱系统的“神经中枢”，通过实时采集车辆行驶信号，动态调节电机转速、转矩及能量回收强度，确保复杂工况下的动力平顺性和系统安全性；传动装置则通过多级减速器优化传动比，配合差速器实现动力合理分配，既满足城市拥堵路况下的频繁启停需求，又能适应高速行驶时的瞬时高负荷工况<sup>[1]</sup>。

电驱系统需攻克多物理场耦合的技术挑战：在频繁启停的城市工况中，要确保电机温升可控、控制器响应实时；面对高速巡航或急加速等极端场景，需通过先进的热管理策略和电磁优化技术维持系统稳定。其可靠性

设计贯穿电磁兼容、振动抑制、故障诊断等多个维度，采用集成化封装工艺和冗余控制算法，在提升功率密度的同时，构筑多重安全屏障。随着碳化硅器件应用、扁线绕组技术等创新突破，新一代电驱系统正朝着更高集成度、更宽高效区间的方向演进，为新能源汽车带来媲美传统燃油车的驾驶体验，同时实现能耗水平的持续优化。从整车边界条件来看，对于乘用车，其设计寿命通常设定在10-15年或行驶里程15-30万公里，需着重强化电机的高效运行与控制器的精准控制，以满足日常通勤及中短途出行需求。而商用车由于使用强度大、行驶里程长，设计寿命多在15-20年或行驶里程50-100万公里，更要强化电机的耐用性、传动系统的承载能力以及热管理系统的可靠性。

## 2 新能源汽车电驱系统可靠性设计原则

### 2.1 系统性与综合性原则

在新能源汽车电驱系统可靠性设计中，系统性与综合性原则贯穿始终。首先，要从整体系统的角度出发，充分考量电驱系统与整车其他子系统之间的相互关联和影响。电驱系统并非孤立存在，其与电池管理系统、制动系统等紧密协作。例如，在能量回收过程中，电驱系统需与制动系统精准配合，实现高效的能量回收并保障车辆制动安全，这就要求设计时综合优化各子系统接口，确保信息交互流畅、控制协同精准。

### 2.2 模块化设计原则

将电驱系统划分为多个功能明确的模块，如电机模块、控制器模块、传动模块等。每个模块独立设计、开发与测试，这不仅便于生产制造和质量管控，还能提高系统的可维护性与可扩展性。当某个模块出现故障时，可快速定位并更换相应模块，极大缩短维修时间，降低车辆停驶风险。在设计模块时，要注重模块间接口的标准化与通用性，确保模块能够灵活组合、适配不同车型需求。通过模块化设计，电驱系统可随着技术发展，便

捷地对单个模块进行升级改进，推动整个系统性能不断提升。

### 3 新能源汽车电驱系统可靠性设计方法

#### 3.1 故障模式与影响分析（FMEA）

故障模式与影响分析（FMEA）是新能源汽车电驱系统可靠性设计的基础且关键的方法。在电驱系统设计初期，工程师需全面梳理电机、控制器、传动装置等各部件可能出现的故障模式。针对每种故障模式，深入分析其对电驱系统乃至整车功能的影响程度。以电机绕组短路为例，这可能导致电机瞬间停转，直接使车辆失去动力，严重危及行车安全，属于高影响程度的故障。通过FMEA，不仅要评估故障影响，还要探究故障发生的原因，如电机绕组短路可能源于绝缘材料老化、过电流冲击等。依据分析结果，制定针对性预防和改进措施，像选用更优质的绝缘材料、优化电路保护策略，以此降低故障发生概率，提高电驱系统可靠性。

#### 3.2 可靠性分配与预计

可靠性分配是将电驱系统整体的可靠性目标合理分配到各个子系统及部件。首先明确电驱系统在一定行驶里程或使用时间内的可靠性指标，如平均故障间隔里程（MTBF）。某款新能源汽车电驱系统设定的目标MTBF为30000公里。根据各部件在系统中的重要性、复杂程度以及历史数据，运用数学模型进行可靠性指标分配。例如，控制器作为电驱系统的核心控制部件，对其可靠性要求相对更高，分配到的MTBF值也更大，经计算，其分配到的MTBF可达40000公里，而电机的MTBF分配值约为35000公里，传动装置则为32000公里。可靠性预计则是在设计阶段，基于部件的类型、质量等级、使用环境等因素，预测电驱系统及各部件的可靠性水平。常用的预计方法有相似产品法、应力分析法等<sup>[2]</sup>。相似产品法通过参考成熟的类似电驱系统产品可靠性数据，结合新设计的差异进行修正，预估新系统可靠性。通过可靠性分配与预计，能及时发现设计中可靠性薄弱环节，提前调整设计方案，确保电驱系统达到预定可靠性目标。经预计，若不进行设计优化，某部件在特定工况下的失效率将达到0.005次/小时，经过优化后，可降低至0.002次/小时。

#### 3.3 可靠性试验与验证

试验类型丰富多样，包括环境试验、寿命试验、性能试验等。环境试验模拟电驱系统在不同环境条件下的运行状况，如高温、低温、湿度、振动、沙尘等环境。在高温试验中，将电驱系统置于高温箱内，长时间运行测试，观察其在高温环境下电气性能、机械性能是否稳定，能否正常工作，以此检验系统对高温环境的适应能

力。根据试验数据，当环境温度达到50℃时，某电驱系统的电机效率下降了约5%，控制器响应速度延迟8ms。寿命试验则在模拟实际工况下，对电驱系统进行长时间运行测试，积累故障数据，评估系统实际使用寿命是否满足设计要求。某款电驱系统经过2000小时的寿命试验后，出现3次可修复故障，经评估其实际使用寿命基本满足设计的2500小时要求。性能试验专注于测试电驱系统在不同工况下的性能指标，如电机效率、控制器响应速度、传动效率等，确保系统性能可靠。通过对试验过程中采集的数据进行分析，及时发现设计缺陷和潜在故障隐患，反馈给设计部门进行优化改进。

### 4 新能源汽车电驱系统可靠性设计关键技术

#### 4.1 电机可靠性设计

在材料选择上，优质的电磁线对于保障电机绕组的电气性能与可靠性起着关键作用。例如，高纯度的铜材电磁线，具有低电阻特性，能有效降低绕组发热，减少因过热导致的绝缘老化风险，进而提升电机长期运行的稳定性。选用高性能的绝缘材料，如聚酰亚胺薄膜，其具备卓越的耐高温、耐电晕性能，可极大增强电机绕组的绝缘可靠性，防止短路故障发生。电机结构设计也需精细考量，合理的通风散热结构是保障电机在各种工况下稳定运行的重要因素。采用轴向通风与径向通风相结合的方式，能高效地将电机运行产生的热量带走，维持电机内部温度在合理范围。比如，在电机外壳设置散热筋，增加散热面积，配合内部的通风通道，使冷却空气能充分流经电机发热部位，确保电机不因过热而性能下降。另外，优化电机的机械结构，增强转子与定子的同心度，可减少电机运行时的振动与噪声，降低机械磨损，提高电机的整体可靠性。

#### 4.2 控制器可靠性设计

控制器是电驱系统的“大脑”，负责精确控制电机的运行。优化电路布局，减少电磁干扰（EMI）对控制器的影响。通过合理规划布线，将敏感电路与功率电路分开，采用多层电路板设计，增加接地层与屏蔽层，有效抑制EMI，保障控制器内部信号传输的稳定性与准确性。软件算法的可靠性同样不容忽视。先进的控制算法能够提升控制器对电机的控制精度与响应速度，同时增强系统的容错能力。例如，采用模型预测控制（MPC）算法，该算法可根据电机实时运行状态与系统设定目标，预测未来一段时间内电机的运行趋势，并提前调整控制策略，使电机始终保持在最佳运行状态。软件设计中融入故障诊断与容错控制功能，当检测到控制器内部或电机出现故障时，能迅速切换到备用控制模式，维持车辆的基

本行驶功能,极大提高了电驱系统的可靠性与安全性<sup>[3]</sup>。

#### 4.3 变速器与传动系统可靠性设计

在齿轮设计上,选用高强度合金钢材料,并通过先进的热处理工艺提高齿轮表面硬度与芯部韧性。优化齿轮的齿形设计,采用修形技术,可降低齿轮啮合时的冲击与振动,提高传动平稳性与可靠性。对于传动轴等关键传动部件,合理的结构设计及动平衡优化必不可少。传动轴采用空心结构设计,在减轻重量的同时,不降低其强度与刚度,满足车辆轻量化需求的同时,提高传动效率。

#### 5 新能源汽车电驱系统可靠性设计实例分析

以某国际知名新能源车型为例,其电驱系统通过创新性可靠性设计实现行业标杆级性能。在电机设计领域,该车型突破传统单水道散热局限,采用双流道水冷结构,通过CFD仿真优化水道布局,使进出口冷却液温差严格控制在 $< 8^{\circ}\text{C}$ ,较单水道设计散热效率提升35%。配合聚酰亚胺薄膜与云母纸复合绝缘系统,经双阶真空压力浸渍工艺处理,耐电晕寿命突破1000小时,较单层绝缘方案延长40%,有效规避高频脉冲电压下的局部放电风险。

控制器架构选用第三代碳化硅(SiC)功率模块,实测开关损耗较硅基方案降低50%,结温峰值下降 $40^{\circ}\text{C}$ ,显著提升高温环境下的功率循环寿命。电磁兼容性设计采用“屏蔽层+吸收层”双重防护,屏蔽层覆盖率达90%以上,配合多层板布局优化,电磁干扰(EMI)强度降低20dB,满足CISPR25Class5严苛认证标准。软件层面集成实时故障诊断系统,可在100ms内识别22种潜在故障模式,结合自适应控制算法,使控制器在 $-40^{\circ}\text{C}$ 至 $85^{\circ}\text{C}$ 温域内保持零故障运行<sup>[4]</sup>。

传动系统创新采用“渗碳淬火+喷丸强化”复合工

艺,齿轮表面形成压应力层,接触疲劳强度提升30%,实测齿轮寿命超过40万公里。润滑系统采用强制润滑架构,油泵输出流量 $> 2\text{L}/\text{min}$ ,油路压力稳定在 $0.3\text{MPa}$ 以上,配合双唇口油封设计,有效阻隔98%的外部污染物。台架试验显示,该变速器在连续48小时高负载循环测试中,齿轮磨损量 $< 0.03\text{mm}$ ,较行业同类产品降低65%。

可靠性提升直接转化为市场优势:该车型电驱系统累计行驶故障率仅 $0.5\%$ /万公里,较行业均值 $1.2\%$ /万公里降低58%;用户满意度达92%,其中“动力响应平顺性”与“长期可靠性”维度评分均超过 $4.8/5.0$ 。通过设计验证,该车型在海南高温高湿(年均温 $28^{\circ}\text{C}$ 、湿度85%)、漠河极寒( $-35^{\circ}\text{C}$ )等极端环境下,电驱系统性能衰减率均控制在5%以内,充分证明可靠性设计策略的有效性。

#### 结束语

新能源汽车电驱系统可靠性设计涵盖多方面内容,从设计原则、方法到关键技术,各环节紧密相连。通过实例可见,合理设计能显著提升电驱系统可靠性。未来,随着技术持续进步,需不断完善设计体系,以适应新能源汽车向更高性能、更安全可靠方向发展的趋势,推动新能源汽车产业迈向新高度。

#### 参考文献

- [1] 韦国念,穆瑞林,金重明,等.新能源汽车电驱系统可靠性设计体系探讨[J].汽车知识,2023,23(8):78-80.
- [2] 刘昕伟,周美玲,陈剑美,张义伟,朱庆芹.新能源汽车高压连接器可靠性研究[J].时代汽车,2021(06):93-94.
- [3] 余翔,刘冬梅,何琰萍.新能源汽车高压互锁故障分析与排除[J].内燃机与配件,2020(07):186-187.DOI:10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2020.07.090.
- [4] 熊淑秋.新能源汽车驱动系统的机械制造技术与优化研究[J].时代汽车,2024,(17):73-5.