

极端工况下轮毂电机防护结构可靠性评估与改进

李 召 杨兴园 马卫东

东风汽车集团有限公司研发总院 湖北 武汉 430000

摘要：轮毂电机在实际运行中面临高温、低温、潮湿、粉尘等多种极端环境挑战，对防护结构提出更高要求。本文构建了防护结构可靠性评估指标体系，介绍了评估方法与流程，分析了材料、结构设计、制造工艺及工况条件对可靠性的影响，并提出了材料、结构、制造工艺的改进设计策略，以提升轮毂电机防护结构在极端工况下的可靠性。

关键词：轮毂电机；防护结构；可靠性评估；极端工况；改进设计

引言：轮毂电机作为电动汽车的核心部件，其防护结构可靠性直接影响整车性能。极端工况下的环境挑战对防护结构提出了更高要求。当前防护结构在复杂环境中仍存在密封失效、散热不足等问题，亟需深入研究可靠性提升方法。本文从工况分析入手，建立评估体系，识别关键影响因素，提出改进方案，为轮毂电机防护设计提供参考。

1 极端工况对轮毂电机防护结构的要求

1.1 极端工况类型分析

轮毂电机在实际运行中面临多种极端环境挑战。高温环境会导致电机内部温度急剧上升，影响绝缘材料性能和永磁体磁特性。低温环境使材料脆性增加，润滑剂粘度增大，影响轴承运转性能。潮湿环境引发金属部件腐蚀，降低电气绝缘性能，可能造成短路故障。粉尘环境中细小颗粒物侵入电机内部，加剧运动部件磨损，堵塞散热通道。冲击振动环境对结构连接件产生交变应力，导致螺栓松动或焊缝开裂。电磁干扰环境影响传感器信号精度，可能造成控制失误。这些极端工况往往复合出现，对防护结构提出更高要求。不同地理区域和季节变化使工况条件更加复杂多变。车辆行驶过程中的动态载荷进一步增加了环境因素的不可预测性。

1.2 轮毂电机防护结构的功能与性能要求

轮毂电机防护结构需要满足多方面的功能需求。防护功能是最基本要求，需要有效阻隔外界污染物和水分侵入电机内部。散热性能直接影响电机功率密度和持续工作能力，要求防护结构具备高效热传导路径^[1]。机械强度指标确保防护结构在冲击振动条件下保持完整，不发生破裂或变形。密封性能需要平衡防护与散热需求，既要防止外部介质侵入，又要允许内部热量散出。电磁屏蔽功能抑制外部干扰，保证控制信号传输可靠性。轻量化设计要求在满足防护前提下尽量减轻结构重量，降低簧下质量。耐久性能要求防护结构在长期使用后仍能保

持设计性能，不发生老化失效。可维护性设计需要考虑日常检查维修的便利性，降低维护成本。这些性能要求相互制约又相辅相成，需要综合考虑优化设计。防护结构还需适应轮毂空间的严格限制，在有限空间内实现多功能集成。材料选择需要考虑环境适应性和成本因素，确保大规模生产的可行性。结构工艺性要求设计方案便于制造和装配，保证产品质量一致性。

2 轮毂电机防护结构可靠性评估

2.1 评估指标体系构建

轮毂电机防护结构可靠性评估需要建立全面的指标体系。防护等级指标反映结构对外界环境的屏蔽能力，包括防尘防水等级和电磁屏蔽效能。散热性能指标衡量热量传导和散发效率，包含温升速率和稳态温度差值。机械强度指标评估结构承受载荷的能力，涉及静态强度、疲劳寿命和冲击韧性。密封性能指标表征结构隔绝介质的能力，包括气密性测试结果和液体渗透率。材料耐久性指标考察长期使用性能变化，包含老化系数和腐蚀速率。振动特性指标反映结构动态响应性能，涉及固有频率和阻尼比。重量效率指标衡量防护效果与结构重量的比值，体现设计优化水平。工艺一致性指标评估制造质量稳定性，包含尺寸公差和装配精度。这些指标构成多维度评价体系，需要根据具体应用场景确定权重分配。指标间存在相互影响关系，需要建立耦合分析模型。

2.2 可靠性评估方法

理论分析方法为可靠性评估提供基础框架。应力-强度干涉模型计算结构在载荷作用下的失效概率，考虑材料性能分散性。失效模式与效应分析系统识别潜在故障类型及其影响程度，建立故障树描述因果关系。概率风险评估方法量化不确定性因素的影响，预测极端工况下的失效风险。仿真分析方法扩展了评估的深度和广度。有限元分析模拟结构在机械载荷下的应力应变分布，识别薄弱环节。计算流体动力学仿真研究散热性能，优化

气流通道设计。多物理场耦合分析揭示电磁-热-机械相互作用机制, 评估综合性能^[2]。试验测试方法验证理论预测的准确性。环境适应性试验模拟高温、低温、湿热等极端条件, 观察防护效果。机械耐久性试验施加循环载荷, 测量结构性能衰减规律。密封性能测试采用气压法和水浸法, 量化防护等级。电气安全测试验证绝缘性能和电磁兼容性。

2.3 评估流程

数据采集是评估流程的首要环节。传感器网络实时监测温度、振动、压力等运行参数, 记录工况变化。材料性能测试获取强度、导热率等基础参数, 建立材料数据库。制造过程检测数据反映工艺一致性, 包括尺寸测量和装配记录。历史故障数据统计提供可靠性改进方向, 分析常见失效模式。指标计算阶段将原始数据转化为评估参数。信号处理技术提取特征值, 如振动频谱和温度梯度。统计分析计算性能参数的均值和方差, 评估稳定性。归一化处理消除量纲影响, 实现多指标综合。失效概率计算基于应力-强度干涉理论, 预测可靠度。综合评估阶段整合各类信息得出最终结论。层次分析法确定指标权重, 反映不同工况下的优先级。模糊综合评价处理不确定性问题, 给出可靠性等级。基于机器学习的智能评估模型挖掘数据关联规律, 提高预测精度。可视化技术呈现评估结果, 辅助决策分析。评估报告需包含改进建议, 指导防护结构优化设计。定期复评机制跟踪可靠性变化趋势, 实现持续改进。

3 极端工况下轮毂电机防护结构可靠性影响因素分析

3.1 材料因素

材料选择直接影响轮毂电机防护结构的可靠性表现。耐温性能决定材料在极端温度环境下的稳定性, 高温可能导致金属材料蠕变或高分子材料降解, 低温则引发材料脆性增加。耐腐蚀性能关系到结构在潮湿、盐雾等环境中的耐久性, 电化学腐蚀会削弱结构强度并影响外观完整性。机械性能指标包括屈服强度、抗拉强度和断裂韧性, 这些参数决定结构承受机械载荷的能力。导热系数影响散热效率, 导电性能关系到电磁屏蔽效果。材料的热膨胀系数差异可能导致连接部位产生热应力。耐磨性能对抵抗沙尘磨损至关重要, 硬度与韧性需要合理匹配。材料的老化特性决定长期使用后的性能保持率, 紫外线辐射和氧化反应会加速材料性能衰退。环境友好型材料需要考虑可回收性和无毒特性。材料成本与加工性能影响大规模生产的可行性, 需要在性能和成本间取得平衡。

3.2 结构设计因素

防护结构设计是确保可靠性的关键环节。结构形式选择需要考虑空间限制和功能需求, 整体式设计提供更好的密封性, 但会增加维修难度。散热通道布局影响热管理效率, 合理的流道设计可以降低风阻并提高换热系数。密封结构设计需要平衡防护等级与散热需求, 迷宫式密封配合透气膜可以实现良好平衡。连接结构设计要考虑动态载荷下的可靠性, 防松措施对抵抗振动至关重要。加强筋布置可以提高局部刚度, 但可能增加重量^[3]。减震结构设计能够缓冲冲击载荷, 降低传递到电机的振动能量。模块化设计有利于维修更换, 但可能影响整体密封性。电磁屏蔽结构需要考虑开口和接缝处的泄漏问题。防护结构的可制造性设计影响产品质量一致性, 需要避免复杂的成型工艺。结构轻量化设计要在保证强度的前提下减轻重量, 拓扑优化方法可以辅助实现这一目标。防护结构的维修性设计需要考虑日常检查和部件更换的便利性。

3.3 制造工艺因素

制造工艺质量直接影响防护结构的实际性能。加工精度决定零部件配合质量, 尺寸公差控制不当会导致密封失效。装配工艺影响结构整体性, 不当的装配顺序可能产生装配应力。表面处理工艺提升材料环境适应性, 阳极氧化或电镀可以增强耐腐蚀性。焊接工艺质量关系到连接强度, 焊接缺陷可能成为疲劳裂纹源。成型工艺选择影响零件内部质量, 注塑参数控制不当会导致缩孔或残余应力。热处理工艺调节材料微观组织, 不当的热处理可能引起变形或性能不达标。涂装工艺影响外观和保护效果, 涂层厚度不均可能提前失效。清洁度控制对密封性能至关重要, 装配过程中的污染物会降低密封效果。工艺稳定性决定产品一致性, 需要建立完善的质量控制体系。检测工艺验证制造质量, 无损检测技术可以识别内部缺陷。工艺文件规范指导生产操作, 详细的作业标准确保工艺执行准确性。

3.4 工况条件因素

实际使用工况对防护结构可靠性产生复杂影响。温度变化范围决定材料选择标准, 频繁的热循环会加速材料疲劳。湿度条件影响腐蚀速率, 高湿环境需要更高等级的防腐蚀措施。粉尘浓度决定密封等级要求, 细小颗粒物更容易穿透密封间隙。冲击振动强度决定结构设计标准, 随机振动谱分析指导动态设计。电磁环境干扰程度决定屏蔽需求, 高频干扰需要特殊的屏蔽措施。化学腐蚀环境如融雪剂影响材料选择, 需要评估各种化学介质的腐蚀性。紫外线辐射强度影响非金属材料老化速度, 需要添加抗紫外线剂。海拔高度影响散热效率, 高

海拔地区需要强化散热设计。降雨强度和道路积水深度决定防水等级要求,需要考虑暂时浸水情况。风速和风向影响散热通道设计,需要评估强制对流换热效果。坡度条件影响润滑系统设计,大坡度工况需要特殊的密封措施。负载变化频率决定疲劳分析谱,变幅载荷下的寿命预测更为复杂。

4 轮毂电机防护结构改进设计

4.1 材料选择与优化

耐高温材料选择需要考虑长期工作温度下的性能稳定性。高温合金在200℃以上环境仍能保持良好机械强度,适用于关键承力部件。陶瓷基复合材料具有优异的高温抗氧化性能,可用于热障涂层。耐低温材料需重点关注低温韧性,奥氏体不锈钢在-40℃环境下仍能保持良好塑性。铝合金通过适当热处理可改善低温性能,减轻结构重量。耐腐蚀材料选择应基于具体环境条件,钛合金在海洋环境中表现优异但成本较高。双相不锈钢平衡了耐蚀性和经济性,适合批量应用。复合材料如碳纤维增强聚合物兼具轻量化和耐腐蚀特性。表面改性技术可提升基材性能,微弧氧化处理能在铝合金表面生成陶瓷层。梯度材料设计可满足不同部位的差异化需求,实现性能优化。材料数据库的建立有助于快速筛选合适材料,缩短开发周期。材料性能测试应在模拟工况下进行,确保数据可靠性。

4.2 结构设计改进

防护结构形式优化需要兼顾防护效果和可维护性。模块化设计便于局部更换维修,降低维护成本。仿生结构设计借鉴生物外壳特征,实现轻量化与高强度的统一。散热结构改进重点优化气流组织,导流叶片设计可提高换热效率。均温板技术有效解决局部过热问题,降低热应力。密封结构采用多级防护理念,组合使用接触式和非接触式密封^[4]。迷宫密封配合磁性流体密封可显著提升防护等级。减震结构设计引入新型阻尼材料,降低振动传递率。拓扑优化方法可精确去除冗余材料,实现轻量化目标。3D打印技术实现复杂内部结构的精确成型,突破传统工艺限制。数字孪生技术辅助设计方案验证,缩短开发周期。结构可靠性分析需考虑多物理场耦

合效应,确保改进方案的有效性。人机工程学原理指导维修性设计,提高操作便利性。

4.3 制造工艺改进

加工工艺优化着重提高精度和效率。精密铸造技术适用于复杂结构件整体成型,减少机加工量。数控加工中心保证关键尺寸精度,表面粗糙度控制在Ra0.8以下。激光切割技术实现薄壁件的高精度加工,热影响区小于0.1mm。装配工艺改进重点控制配合质量,光学辅助装配系统提高对中精度。扭矩控制策略保证连接件预紧力一致性,防松措施采用组合式设计。自动化装配线提高生产效率,视觉检测系统实时监控装配质量。表面处理工艺根据功能需求差异化选择,硬质阳极氧化提高铝合金耐磨性。等离子喷涂制备的热障涂层可降低基底温度。化学镀镍提供均匀的防腐保护,适合复杂结构件。微弧氧化处理生成陶瓷化表面,兼具耐磨防腐特性。工艺参数优化采用响应面法,建立工艺-性能关系模型。在线检测技术实时监控工艺质量,及时调整工艺参数。数字化工艺管理系统实现全流程追溯,确保工艺稳定性。

结束语

轮毂电机防护结构可靠性研究是一项系统工程,需要综合考虑材料、设计和工艺等多方面因素。通过优化材料选择、改进结构设计和提升制造工艺,可显著提高防护结构在极端工况下的可靠性。未来应进一步研究智能防护技术和新型复合材料应用,推动轮毂电机防护技术发展。持续的技术创新将为电动汽车性能提升提供有力支撑。

参考文献

- [1]寇发荣,王佳欢,李强强,等.轮毂电机驱动汽车主动悬架自适应滑模控制研究[J].振动与冲击,2025,44(9):188-194.
- [2]蒋尚轩,彭兵.分布式驱动型电动汽车轮毂电机故障诊断[J].汽车与新动力,2025,8(2):35-40.
- [3]吉文博,谈笑,刘治敏,等.鼓刹型轮毂电机专用连接法兰的设计研究[J].工程与试验,2025,65(1):80-82.
- [4]牙举锋.轮毂电机技术在新能源汽车上的应用分析[J].时代汽车,2023,(11):92-94.