

车载无线充电模块散热结构优化设计与仿真分析

戴维胜

立讯汽车技术(上海)有限公司 上海 嘉定 201800

摘要: 针对车载无线充电模块在高功率工况下散热效率不足、核心部件易过热的问题,结合车载复杂工况约束,开展散热结构优化设计与仿真分析。通过实验明确模块发热瓶颈,设计“热管+散热片+可调速强制对流”复合散热方案,优化结构参数与细节布局。采用ANSYS Lcypak软件构建仿真模型,对比分析优化前后温度场、流场及散热效率。结果表明,优化后模块散热效率提升至82.7%,核心温度控制在75℃以内,满足车载使用要求,为车载无线充电模块散热设计提供理论与实践支撑。

关键词: 车载无线充电模块; 散热结构; 优化设计; 仿真

引言: 随着车载无线充电技术向高功率化发展,模块运行中产生的大量热量易导致效率下降、寿命缩短,甚至引发安全隐患,散热问题成为制约其发展的关键。当前主流散热结构存在热阻大、空间适配性差、可靠性不足等缺陷,难以适配车载高低温、振动等复杂工况。基于此,本文开展散热结构优化设计,结合实验与仿真分析验证优化效果,解决高功率车载无线充电模块散热瓶颈,助力车载无线充电技术的推广应用。

1 车载无线充电模块散热相关理论与特性分析

1.1 车载无线充电模块工作原理

(1) 无线充电核心原理: 车载无线充电主流采用电磁感应式,通过原副边线圈电磁耦合实现能量传输,高频电流通过发射线圈产生交变磁场,接收线圈切割磁场产生感应电流,完成电能转换;磁共振式适用于远距离充电,通过线圈共振实现能量高效传输,目前在车载领域处于优化阶段。(2) 车载无线充电模块组成结构与发热源分析: 模块主要由发射线圈、接收线圈、功率转换器、控制单元等组成。发热源主要来自功率器件损耗、线圈铜损和磁芯铁损,其中功率转换器的开关器件损耗和线圈高频损耗是主要发热来源,高温会降低模块效率和使用寿命。(3) 车载工况对无线充电模块的运行要求: 车载环境复杂,需适应高低温、振动、电磁干扰等工况,要求模块在-40℃~85℃环境温度下稳定工作,同时需满足车载安全标准,避免过热引发安全隐患,且需兼顾轻量化、小型化设计需求^[1]。

1.2 散热相关基础理论

(1) 热量传递基本方式: 传导、对流、辐射是三种核心方式。传导通过固体介质传递热量,是车载散热的主要途径;对流依靠流体(空气、冷却液)流动换热,分为自然对流和强制对流;辐射通过电磁波传递热量,在高温

环境下作用更明显。(2) 车载环境下散热特性与约束条件: 车载环境空间有限,散热结构布置受车身设计限制;环境温度波动大,极端高低温会影响散热效果;车辆行驶中的振动会影响散热部件稳定性,且需避免散热系统增加过多能耗和重量。(3) 散热结构设计的核心原则与评价指标: 核心原则是高效换热、轻量化、可靠性强,兼顾成本控制。评价指标包括散热效率、温度控制范围、散热部件体积重量,以及在复杂工况下的长期稳定性。

1.3 车载无线充电模块发热特性实验

(1) 实验平台搭建与测试参数设定: 搭建模拟车载环境的实验平台,包含无线充电模块、环境模拟箱、温度传感器、功率测试仪等。设定不同输入功率、环境温度、振动频率等参数,模拟车载典型工况。(2) 不同工况下模块温度分布测试与分析: 通过温度传感器采集模块各关键部位温度数据,分析不同功率、环境温度下的温度分布规律,明确线圈、功率器件等核心部件的温度峰值及变化趋势。(3) 发热瓶颈识别与散热需求明确: 结合测试数据,识别模块发热最严重的部位和工况,确定发热瓶颈主要来自功率器件和线圈;明确不同工况下的散热需求,为后续散热结构设计提供实验依据。

2 车载无线充电模块散热结构优化设计

2.1 原有散热结构分析与问题诊断

(1) 现有车载无线充电模块散热结构介绍: 目前主流车载无线充电模块多采用被动散热结构,以铝合金散热片为核心,贴合模块功率器件和线圈表面,通过热传导将热量传递至散热片,再依靠自然对流和车身传导实现热量散发;部分中高功率模块搭配小型轴流风扇,构成简易强制对流散热结构,整体结构简单、成本较低,适配早期低功率车载无线充电需求,安装方式以螺栓固定为主,体积较大,适配性有限。(2) 原有散热结构的

散热效率测试与缺陷分析：通过模拟车载典型工况测试，原有散热结构在输入功率 $\geq 150\text{W}$ 、环境温度 $\geq 60^\circ\text{C}$ 时，模块核心部件温度超过 85°C ，散热效率不足60%，无法满足高功率模块的散热需求。核心缺陷包括：散热片与发热部件贴合不紧密，存在热阻过大问题；散热片表面积不足，对流换热效果差；强制散热风扇噪音大、能耗高，且在振动工况下易损坏；结构布局不合理，占用车载空间较大，与车身部件干涉，防水防尘性能不足，长期使用易因灰尘堆积影响散热效果^[2]。（3）结构优化的核心方向与设计目标：核心优化方向围绕降低热阻、提升换热效率、适配车载工况展开，重点解决热传导不畅、空间适配性差、可靠性不足等问题。设计目标为：在输入功率 200W 、环境温度 85°C 工况下，模块核心部件温度控制在 75°C 以内，散热效率提升至80%以上；优化后结构体积较原有结构缩小15%，重量减轻10%；满足车载振动、防水防尘（IP54级）要求，使用寿命延长至8年以上，同时控制优化成本，确保经济性可行。

2.2 散热结构优化方案设计

（1）散热结构整体方案构思：结合车载工况和散热需求，采用“热管+散热片+强制对流”复合散热方案，兼顾散热效率与轻量化需求。以热管为核心热传导部件，贴合模块功率器件和线圈等发热核心区域，快速传导热量；热管另一端连接一体化铝合金散热片，增大散热面积，提升对流换热效果；搭配小型低噪音离心风扇，实现强制对流散热，风扇转速可根据模块温度自动调节，降低能耗；整体采用模块化设计，便于安装和维护，适配不同车型的安装需求。（2）关键结构参数设计：材料选用方面，热管采用铜质烧结热管，导热系数 $\geq 400\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，散热片选用6061铝合金，经阳极氧化处理，提升散热性能和耐腐蚀性；尺寸参数方面，热管直径8mm，长度根据模块尺寸设计为50-80mm，散热片厚度3mm，表面积较原有结构增加25%，风扇直径40mm，转速范围3500-6000r/min；布局设计方面，热管呈对称分布，紧密贴合发热核心部件，散热片沿车身气流方向布置，风扇安装在散热片一侧，减少空间占用，避免与车身其他部件干涉^[3]。（3）优化方案的可行性与经济性分析：可行性方面，所选热管、散热片及风扇均为成熟车载级部件，采购便捷，模块化设计便于批量生产和安装，经仿真分析，方案可满足车载振动、高低温等工况要求，散热效率达标；经济性方面，优化后结构新增成本较原有结构增加10%-15%，但通过材料选型优化和批量采购可降低成本，且优化后模块故障率降低，减少后期维护成本，整体符合车载产品的经济性要求，具备批量推广价值。

2.3 优化后散热结构细节设计

（1）发热核心区域散热结构细化设计：针对功率器件和线圈两大发热核心区域，采用差异化细化设计。功率器件处采用热管直接贴合封装，在贴合面涂抹高导热硅脂，降低接触热阻；线圈区域采用环形热管环绕布置，配合散热衬垫，确保热量均匀传导，避免局部过热；在发热峰值区域增设微型散热鳍片，进一步增大散热面积，提升局部散热效率，确保各核心部件温度均匀分布。（2）车载空间适配性优化：优化结构整体采用扁平化设计，厚度较原有结构减少20%，体积缩小15%，适配车载狭小空间安装需求；设计可调节安装支架，支持多角度、多位置安装，适配不同车型的无线充电模块安装布局；简化安装流程，采用卡扣+螺栓组合固定方式，降低安装难度，提升安装效率，同时避免安装过程中对结构造成损伤。（3）结构强度与防水防尘协同设计：在结构外壳采用高强度工程塑料（PC+ABS），增强结构抗振动、抗冲击能力，满足车载振动工况要求；外壳与散热部件连接处采用密封胶条密封，接口处设计防水凹槽，达到IP67级防水防尘标准，防止灰尘、雨水进入模块内部，影响散热和电气性能；在风扇进风口设置可拆卸防尘网，便于定期清理，保障散热效果长期稳定^[4]。

3 车载无线充电模块散热仿真分析

3.1 仿真模型建立与参数设置

（1）仿真软件选择与建模思路：选用ANSYS Icepak 软件开展散热仿真，该软件适配电子设备热分析，可精准模拟车载复杂环境下的温度场与流场分布，兼顾精度与效率。建模遵循“简化合理、精准还原”原则，忽略螺丝、密封胶条等无关细小结构，重点保留发热核心部件、散热结构及车载安装环境，既简化计算量，又能真实反映散热特性，为优化前后效果对比提供可靠支撑。（2）优化前后散热结构三维模型构建：通过Solid Works 建立优化前后散热结构三维模型，导入ANSYS Icepak 进行网格划分与仿真设置。原有模型还原被动散热+简易风扇结构，包含铝合金散热片、功率器件、线圈及安装基座；优化后模型精准还原“热管+散热片+可调速离心风扇”复合结构，完整呈现热管布局、散热鳍片及风扇安装细节，确保两种模型尺寸、安装姿态与实际实物一致^[5]。（3）材料参数、边界条件与载荷设置：按实际选型录入材料参数，铜质热管导热系数 $401\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，6061铝合金散热片 $201\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，功率器件封装材料 $150\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，空气 $0.026\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。边界条件模拟车载典型环境，环境温度 $-40^\circ\text{C}\sim 85^\circ\text{C}$ ，车身接触面导热系数 $80\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，风扇风速对应1500-3000r/min；载荷贴合实际，输入功率

50-200W, 发热载荷按实验损耗数据分配, 线圈铜损、功率器件损耗分别占40%、50%。

3.2 温度场仿真分析

(1) 优化前后模块温度分布仿真对比: 标准工况(输入功率200W、环境温度25°C)下, 原有结构核心部件最高温度88.6°C, 温度分布不均, 功率器件与线圈存在明显热点; 优化后最高温度降至72.3°C, 较原有结构降低16.3°C, 温度分布均匀, 热点消失, 验证了热管与散热片协同散热的有效性。(2) 不同车载工况下温度场变化规律分析: 仿真高温(85°C)、低温(-40°C)、高功率(200W)、低功率(50W)四种典型工况, 结果显示, 高温高功率工况下模块温度上升最显著, 但优化后仍能核心温度控制在75°C以内; 低温工况散热效率略有下降, 但温度稳定无结露; 输入功率降低时, 优化前后温度差距缩小, 整体均满足车载运行要求, 温度与工况强度呈正相关。(3) 仿真结果与实验数据的一致性验证: 选取3组典型工况(25°C/100W、60°C/150W、85°C/200W), 将仿真核心温度与前文实验数据对比, 误差均控制在5%以内, 最小误差仅2.1%。误差源于模型简化与实际环境细微差异, 整体一致性良好, 证明仿真模型合理准确, 可用于后续散热性能分析。

3.3 散热效率与流场仿真分析

(1) 散热效率仿真计算与优化效果评估: 仿真计算显示, 原有结构散热效率为58.2%, 优化后提升至82.7%, 满足设计目标。优化方案中, 热管可降低热阻35%以上, 散热片表面积增加有效提升对流换热效果, 可调速风扇可根据温度自动调节转速, 在保障散热效果的同时降低能耗, 实现散热效率与能耗的平衡, 优化效果显著。(2) 流场分布仿真与散热瓶颈优化验证: 流场仿真表明, 原有结构风扇气流分布不均, 散热片局部存在气流死角, 易造成热

量堆积; 优化后气流分布更均匀, 风扇气流可全面覆盖散热片, 死角区域消除, 热管周边气流流速提升40%, 有效散出热量, 原有的功率器件热阻过大、线圈散热不畅等瓶颈问题得到彻底解决。(3) 关键结构参数对散热性能的影响规律分析: 采用单一变量法仿真, 分析热管直径、散热片表面积、风扇转速的影响。结果显示, 热管直径8mm为最优, 增至10mm时核心温度下降趋势放缓; 散热片表面积与散热效率正相关, 但增至原有2.5倍后提升不明显; 风扇最优转速为4500r/min, 此范围内转速越高散热效果越好, 超过后能耗增幅大于散热效果提升。

结束语

本文围绕车载无线充电模块散热结构优化展开系统研究, 通过发热特性实验明确瓶颈, 设计复合散热优化方案并完成细节设计, 借助仿真分析验证了方案的有效性与合理性。优化后的散热结构有效提升了散热效率, 满足车载工况各项要求, 兼顾轻量化与经济性。后续可进一步优化材料选型与参数匹配, 结合实际车载场景开展长期可靠性测试, 为车载无线充电模块散热技术的迭代升级提供更多参考。

参考文献

- [1] 齐辉, 丁芳. 直流充电桩散热系统设计及通风量控制策略研究[J]. 电工技术, 2024, (21): 35-38.
- [2] 韩颖. 充电桩功率模块有序多孔结构阶段性强化散热性能研究[J]. 电器与能效管理技术, 2023, (09): 24-31.
- [3] 侯春光, 唐帅. 电动汽车直流充电桩散热系统优化分析[J]. 电气工程学报, 2020, 13(05): 8-13.
- [4] 韩娟娟. 分析充电桩散热技术设计与实现[J]. 科技创新导报, 2021, 16(17): 100-101.
- [5] 陈伟明. 电动汽车直流充电桩散热系统的设计[J]. 自动化应用, 2024, 65(15): 165-167.