

交流充电桩散热系统设计与温升控制实验分析

蔡美行

浙新四维智能科技（杭州）有限公司 浙江杭州 310000

【摘要】随着电动汽车的推广，交流充电桩安全稳定运行至关重要，其内部功率器件电能转换及元件运行会产生大量热量，若散热不畅，易导致性能降低、元件老化甚至引发安全事故。本研究基于热传导、对流换热原理，深入剖析发热源与散热需求，设计了自然对流与强制风冷相结合的复合散热系统，并运用热仿真软件对散热鳍片、风道等结构参数进行优化。通过不同充电功率与环境温度工况的实验验证，该系统能有效控制升温，相较于单一散热方式显著提升散热性能，为交流充电桩散热系统优化提供理论与实践支持，助力电动汽车充电设施建设。

【关键词】交流充电桩；散热系统；温升控制；实验分析

Experimental analysis of heat dissipation system design and temperature rise control of AC charging pile

Cai Meixing

Zhejiang Xin Siwei Intelligent Technology (Hangzhou) Co., LTD Zhejiang Hangzhou 310000

【Abstract】 With the growing popularity of electric vehicles, ensuring the safe and stable operation of AC charging stations is crucial. The internal power devices generate significant heat during energy conversion and component operation. Poor heat dissipation can lead to performance degradation, component aging, and even safety incidents. This study, based on the principles of heat conduction and convective heat transfer, analyzes the heat sources and cooling requirements. A composite cooling system combining natural convection and forced air cooling was designed, and thermal simulation software was used to optimize parameters such as cooling fins and air ducts. Experiments under various charging power levels and environmental temperatures have demonstrated that this system effectively controls temperature rise, significantly enhancing cooling performance compared to single cooling methods. This provides theoretical and practical support for optimizing the cooling systems of AC charging stations, aiding in the development of electric vehicle charging infrastructure.

【Key words】 communication charging pile; heat dissipation system; temperature rise control; experimental analysis

引言

电动汽车普及使交流充电桩这一关键基础设施的数量和使用频率显著上升，交流充电桩工作时，内部功率器件会因电能转换产生大量热量，热量若不能及时散发，会造成充电桩内部温度急剧升高，过高温度不仅会降低功率器件性能，加速电子元件老化，缩短充电桩使用寿命，还可能在严重情况下引发安全事故。因此设计高效散热系统与精准温升控制策略，对保障交流充电桩稳定可靠运行十分关键，尽管多种散热方式已应用于交流充电桩，但不同工况下的散热效果和温升控制精度仍有提升空间，需要进一步研究。

一、交流充电桩发热原理与散热需求分析

（一）交流充电桩内部发热源分析

交流充电桩内部发热源和电能转换、信号处理关联密切，核心发热组件功率模块，拿 IGBT 来说，导通时半导体材料电阻让电流通过产生功率损耗，电流越大损耗越明显；关断时器件电容充放电与电路寄生参数作用产生高频开关损耗，这两种损耗构成功率模块主要发热原因，高功率脉冲充电时 IGBT 频繁开关，致使开关损耗成倍上升。充电控制器集成大量集成电路、电阻电容等元件，数据处理、信号放大传输时，电子迁移碰撞引发能量损耗并产生热量，复杂控制算法运行使元件工作频率提高，发热量随之增加，现代充电桩常用的 MPPT 算法虽能提升充电效率，却会加大控制器运算负荷与发热。变压器绕组传输电能时，自身电阻消耗电能转化为热量；铁芯在交变磁场下，磁畴翻转产生磁滞损耗，感应涡流也导致能量损耗，热量在变压器内积聚，硅钢片材质等级和叠片工艺直接影响磁滞损耗，绕组绕制方式与线径选择对铜损起关键作用。多个发热源相互作用，使充电桩内

部形成复杂温度场,区域温差超 20℃,对散热系统均温性和效率构成挑战。

(二)不同工况下充电桩的散热需求

充电桩散热需求随充电工况和环境条件变化有明显不同,低功率充电时,电能转换较平稳,功率模块电流电压应力小,产热有限,自然对流等基础散热方式就能满足散热需要,这时充电桩内部微弱温差带动空气缓慢流动,散热鳍片可有效把热量传到周围环境,让设备稳定运行^[1]。但切换到高功率快充模式,功率模块需处理更大电流和功率,功率损耗急剧增多,单位时间产热量是低功率工况下的数倍。像 7kW 快充,功率模块瞬间高热量会使局部温度迅速上升,若不及时散热,会严重影响器件性能,原来的散热方式无法及时散发热量,必须用强制风冷等更高效散热手段,风扇强制空气流动能显著增强对流换热效果,快速带走热量。

环境温度对散热需求的作用颇为显著,炎热条件下,充电桩和外部环境的温度差缩小,依据热传导机制,自然散热的动力随之下降,热量向外传递变得困难,就算运用强制风冷手段,散热效能也会明显降低,寒冷环境里,尽管充电桩自身产热相对较少,但内部电子器件对温度波动颇为敏感,温度过低可能造成电解液黏度上升、电容参数变化等状况,从而对充电效能和设备使用寿命产生影响。所以在考虑散热时需同步采取保温办法,像在充电桩内部加装加热膜、用保温材料包覆关键部件等,使内部温度维持在合理范围,保障充电桩在不同工作状况和环境中都能持续稳定运作。

二、散热系统设计方案

(一)散热方式选择与原理

自然对流散热作为被动散热形式,核心驱动力来自空气密度随温度改变引发的浮力效应,充电桩运作时,内部发热元件令周边空气受热,密度减小,热空气因浮力上升,外部冷空气流入补充,形成自然空气环流,于充电桩外壳布设散热鳍片,可大幅扩大与空气的接触面积,根据热传导原理,更大接触面积有助于热量从固体表面向空气传递。牛顿冷却定律表明,对流散热过程中,散热量与物体表面和流体的温差、对流换热系数及散热面积相关,自然对流下较低的换热系数制约其散热能力,但其无需额外能源输入、无运动部件损耗的特点,使其在低发热场景中具有独特优势。强制风冷散热借助风扇机械驱动空气流动,主动突破自然对流的局限,风扇产生的气流加快散热表面附近的空气更替,有效减薄热边界层厚度,进而降低热阻,依据对流换热理论,空气流速提升直接提高对流换热系数,使热量能更迅速被带走^[2]。

然而风扇运行会产生电能消耗与机械噪音,且长期运转存在轴承磨损、扇叶故障等可靠性隐患。

复合散热系统融合两者优势,通过智能控制策略实现模式转换,充电桩处于低负荷运行时,自然对流可满足散热需求,系统此时保持静默散热状态,以降低能耗和运行噪音;当监测到内部温度升至特定阈值,意味着进入高负荷工况,强制风冷系统启动,风扇运转增强空气对流,迅速带走大量热量。这种分级散热模式充分发挥两种散热方式的特点,在保证散热效果的同时,兼顾系统能效与可靠性,确保充电桩在全工况范围内稳定运作。

(二)散热系统结构设计

散热系统结构设计作为实现高效散热的核心环节,需统筹热传递路径优化与空气动力学特性,散热鳍片采用叉指状排列方式,突破传统直列鳍片的空气流动模式,促使空气在鳍片间隙流动时生成更多湍流与扰动,此类湍流流动可提升空气与鳍片表面的接触频率及强度,进而强化热量交换过程。鳍片的高度、间距和厚度参数相互关联:高度增加虽能扩大散热面积,但过高会对鳍片间空气流通造成阻碍;间距过小会导致空气流动阻力上升,过大则会降低有效散热面积;厚度需在保障鳍片结构强度的基础上,尽可能减小热传导热阻,利用热仿真软件对上述参数进行多轮模拟与优化,最终确定的鳍片结构可在自然对流和强制风冷条件下均实现良好的散热效果。

风道设计的核心在于构建高效空气流通通道,需合理规划走向以确保冷空气顺畅流经所有发热元件并及时带走热量,功率模块等高发热区域可设置独立风道形成专属散热通道,使冷却空气集中作用于关键发热源以提升散热针对性,风扇布局需依据风道内气流分布与发热元件热量分布精准布置,如在风道入口设置大风量风扇提供充足空气动力,在发热元件附近布置辅助风扇增强局部散热能力^[3]。通过计算流体力学(CFD)模拟对风道形状、风扇位置及尺寸进行反复优化,可消除气流死区、降低空气流动阻力并实现空气在风道内的均匀分布,进而提高散热效率。隔热材料的应用是散热系统结构设计的重要环节,陶瓷纤维隔热毡等高性能材料因导热系数极低,能有效阻断发热元件向周边非发热部件的热量传递,在发热元件与控制电路板、外壳等部件间铺设此类材料形成热绝缘层,可减少热辐射和热传导影响,确保敏感电子元件工作在适宜温度环境中,提升充电桩整体可靠性与稳定性。

三、温升控制实验分析

(一) 实验方案设计

实验方案设计依照严谨的工程实验规范,致力于构建与实际运行场景高度契合的测试环境,搭建实验平台时,7kW交流充电桩样机采用主流模块化设计,使其内部结构与商用产品保持一致,从而保障实验结果具备工程实用性。可调节功率模拟负载能够精确模拟电动汽车电池在不同充电阶段的等效阻抗特性,覆盖恒流充电、恒压充电等多种模式,让充电桩在实验中展现真实的工作状态,高精度K型热电偶温度传感器具有快速响应能力,其直径仅0.5mm的探头可紧密贴合发热元件表面,最大程度降低接触热阻对测量结果的影响,确保温度数据准确可靠;同时在风道内沿空气流动方向布置多组传感器,用于监测气流温度变化,完整捕获散热过程中的热传递信息。数据采集系统运用同步采样技术,可实现对温度、电压、电流等多物理量的纳秒级同步采集,避免因采样不同步产生数据误差,采集的数据通过光纤传输至计算机,减少电磁干扰对数据质量的影响。

实验工况的设置充分考虑了充电桩实际运行过程中面临的复杂场景特征,研究选取3kW、5kW、7kW三种具有代表性的充电功率水平,其覆盖范围从家庭场景常用的慢充模式延伸至商业场景的典型快充区间;环境温度则设定为20℃、30℃、40℃三档,以此模拟春、夏季节不同时段的环境条件;通过设计不同散热模式的对比测试环节,能够直观展现单一散热方式与复合散热系统在性能表现上的差异^[4]。每种工况安排持续运行2小时的实验周期,确保充电桩内部热传递过程达到稳定状态,从而获取可靠的稳态温度数据;为进一步提高实验结果的可信度与可重复性,每个工况均重复进行3次独立测试,通过数据统计分析方法剔除异常测量值后,最终以平均值作为实验结果,实现对散热系统在多维度条件下性能表现的全面、准确评估。

(二) 实验结果与分析

实验结果分析运用多维度交叉验证方法,深入剖析散热系统性能特征,对比不同散热方式的温升曲线可见,低功率工况时自然对流散热虽可保持功率模块温度稳定,但热量累积速率相对较高;强制风冷通过主动增强对流作用,有效降低温度上升斜率;复合散热系统则融合两者优势,初期借助

自然对流降低能耗,随温度升高适时启动强制风冷,实现温度快速收敛与稳定控制。进入中功率工况,单一散热方式局限性逐步显现,自然对流已难以满足散热需求,而复合散热系统通过智能调控将温度控制在更低区间,充分展现其动态适应能力。高功率工况下,自然对流几乎无法抑制温升,强制风冷虽具一定效果,但复合散热系统依靠更高效的热量传递机制,将功率模块温度维持在安全工作范围,保障充电桩可靠运行。

环境温度对温升的影响分析显示,随着环境温度提升,散热系统的热驱动力明显削弱,单一散热方式与复合散热系统均面临散热难度显著增加的问题,以复合散热系统在中功率工况为例,环境温度每升高10℃,功率模块稳定温度平均上升约5℃,这一现象凸显高温环境下优化散热系统的必要性^[5]。通过散热效率计算与对比,复合散热系统在全功率区间均表现出显著优势,其依靠智能模式切换与结构优化,有效融合自然对流和强制风冷的特点,实现散热效率最大化,值得关注的是,高湿环境与高温环境叠加时,散热系统需应对绝缘性能下降与散热效率降低的双重挑战,复合散热系统通过风道设计优化,有效减少冷凝水对内部元件的影响。这些实验结果不仅为交流充电桩在复杂工况下的可靠运行提供有力实验支撑,也为后续散热系统优化明确方向,如探索新型散热材料与智能温控算法的深度结合。

结语

本研究围绕交流充电桩发热机理与散热需求展开深入剖析,设计出融合自然对流与强制风冷的复合散热系统,并开展温升控制实验,实验数据表明,该复合散热系统在不同充电功率及环境温度工况下,可有效降低充电桩内部温度、提升散热效率,相较单一散热方式优势显著。研究同时发现,极端高温环境中散热系统性能仍存提升空间,后续可进一步探索高效散热材料与智能散热控制策略,以持续优化交流充电桩散热系统,满足电动汽车日益增长的充电需求,增强充电桩运行的稳定性与可靠性。

参考文献

- [1]杜明慧.基于电工技术的新能源汽车充电系统优化设计探讨[J].汽车测试报告,2024,(18):53-55.
- [2]李劲松.新能源电动汽车充电桩设计[D].南昌大学,2024.DOI:10.27232/d.cnki.gnchu.2024.000683.
- [3]魏翔.基于运行风险评估的充电设施智能运维策略研究[D].南京邮电大学,2023.DOI:10.27251/d.cnki.gnjdc.2023.000117.
- [4]李亚伦.高比能量锂离子动力电池快充安全边界分析、感知与调控[D].清华大学,2021.DOI:10.27266/d.cnki.gqhau.2021.000340.
- [5]胡春雨,陆翌,李翔,等.充电设备移动检测平台的研究与设计[J].电源技术,2016,40(03):697-699.