 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i11.8115

Research on Improving Charging Efficiency of Electric Vehicle Charging Piles in Low-Temperature Environments

Fang Wang

Shunyi District Metrology and Food and Drug Inspection Center, Beijing, 101300, China

Abstract

With the rapid development of the electric vehicle industry, the practicality of charging piles as core supporting facilities has attracted attention. The charging efficiency electric vehicle charging piles is greatly reduced in low-temperature environment, which has become an important bottleneck restricting the popularization of electric vehicles in northern regions and high latitudes. This paper with the mechanism of low-temperature influence on charging system, analyzes the change law of core elements such as battery characteristics, charging pile components performance, charging interface and circuit in-temperature conditions, and clarifies the key factors that restrict charging efficiency. On this basis, from the three dimensions of technology optimization, structure improvement and process regulation, this paper proposes efficiency improvement paths, including battery preheating technology upgrading, charging pile thermal management system optimization, charging protocol adaptation improvement and other specific schemes, which provide theoretical support and practical reference for the improvement of charging piles in low-temperature environment.

Keywords

Electric vehicle; Charging pile; Low temperature; Charging efficiency; Improvement strategy

低温环境下电动汽车充电桩充电效率提升研究

王芳

北京市顺义区计量和食品药品检测中心，中国 · 北京 101300

摘　要

随着电动汽车产业的快速发展，充电桩作为核心配套设施的实用性受到了关注。低温环境下电动汽车充电桩充电效率大大降低，成为制约北方地区及高纬度区域电动汽车普及的重要瓶颈。本文从低温对充电系统的影响机理入手，分析电池特性，充电桩组件性能，充电接口与线路等核心要素在低温条件下的变化规律，明确制约充电效率的关键因素。在此基础上，从技术优化，结构改进，流程调控三个维度，提出针对性的效率提升路径，包括电池预热技术升级，充电桩热管理系统优化，充电协议适配改进等具体方案，为低温环境下充电桩性能提升提供理论支撑与实践参考。

关键词

电动汽车；充电桩；低温；充电效率；提升策略

1 引言

在“双碳“目标引领下，电动汽车凭借其零排放，低能耗优势成为交通运输领域绿色转型的核心载体，而充电桩的普及程度与使用效率直接决定电动汽车的应用体验。然而，在冬季低温环境或高纬度地区，充电桩充电效率大幅度下滑，不仅提高了充电时长，加大用户等待成本，而且有可能导致电池寿命损耗，严重影响电动汽车的市场接受度 [1]。低温环境对充电系统的影响是多维度，深层次的，它涉及电池电化学特性，充电桩硬件性能，能量传输过程等多个环节的协同作用。

现有相关研究多集中于单个环节优化，缺乏系统整体的剖析。因此，深入探究低温环境下充电桩充电效率的制约机理，构建多维度协同的提升方案，对于完善电动汽车充电基础设施，推动电动汽车产业高质量发展具有重要的现实意义 [2]。

2 低温环境对充电桩充电效率的影响机理

2.1 电池低温特性对充电效率的基础性制约

低温锂电池采用特殊材料和工艺制成，能够在零下 50 摄氏度的极端环境中保持稳定的放电容量和工作性能。此类电池不仅具有比能量高、循环性能好的特点，还广泛应用于军事装备、航空航天、极地科研等领域。其宽泛的工作温度范围和通过国际安全认证进一步提升了适用性。一方面，低温会引起电池电解液粘度升高，锂离子在电解液中的扩散速率降低，使电池负极不能及时吸收足量的锂离子，从而抑制充电电流的增加 [3]。另一方面，低温会增大电池内阻，如欧姆内阻、极化内阻等，充电时更多的电能转化为热能损耗，

【作者简介】王芳（1979–），女，中国北京人，本科，从事计量检测研究。

不仅降低了能量利用效率，也可能因热积累而产生安全隐患。此外，低温下电池的可用容量会发生暂时性的衰减，为了避免过充损伤，BMS 会自动降低充电功率上限，间接延长了充电时间，表现为充电桩充电效率的降低。

2.2 充电桩核心组件低温性能衰减

充电桩作为能量转换与传输的核心设备，其内部功率模块，控制单元等关键组件的工作性能对温度非常敏感。低温环境下，充电桩功率模块中的绝缘栅双极型晶体管，金属氧化物半导体场效应晶体管，MOSFET 等电力电子器件的开关特性会发生变化，开关损耗显著增大，使得能量转换效率下降。同时，控制单元中的微处理器，传感器等元件在低温下响应速度变慢，可能出现信号传输延迟或者检测精度下降的问题，影响充电过程的闭环控制效果，进而导致充电电流，电压的稳定性不足，降低整体充电效率。此外充电桩内部的电容，电感等无源元件在低温下参数会发生漂移，破坏电路的阻抗匹配状态，加剧能量损耗 [4]。

2.3 充电接口与传输线路的低温损耗加剧

充电接口与传输线路是充电桩与电动汽车联接的重要节点，低温时损耗大幅度提高。一方面，低温会使导线的电阻值升高，根据焦耳定律，电阻越大线路传输过程中的热损耗就越大，这在大电流充电场合表现得更为明显。另一方面，低温环境下，充电接口处的金属触点易出现氧化，凝露等现象，致使接触电阻增大，不仅增加了局部能量损耗，而且会造成触点发热，接触不良等现象，影响充电功率的稳定输出。此外，若充电线缆缺乏有效的保温防护，低温会导致线缆柔韧性下降，内部导体与绝缘层之间可能出现微小间隙，进一步增加传输损耗，降低充电效率。

3 低温环境下充电桩充电效率的关键制约因素

3.1 电池活性衰减的本质性制约

电池活性衰减是低温下充电效率下降的根本原因。低温不仅抑制了电池内部的电化学反应速率，还导致电池正极材料的锂离子脱嵌能力下降、负极嵌锂容量减少，使得电池的充放电性能大幅降低。更为关键的是，电池管理系统（BMS）在低温环境下的保护策略会进一步限制充电效率。为避免电池出现锂析出、极化过大等损伤，BMS 会自动降低充电截止电压、限制最大充电电流，这种保护性限制虽然保障了电池安全，但也直接导致充电功率无法达到设计峰值，延长了充电时长。此外，长期在低温环境下充电会导致电池循环寿命下降，形成“低温充电效率低—充电时间长—电池损耗加剧”的恶性循环。

3.2 充电桩热管理系统的功能性缺失

当前多数充电桩的热管理系统设计未充分考虑低温环境的使用需求，存在明显的功能性缺失。一方面，充电桩内部功率模块在充电过程中会产生大量热量，但低温环境下的散热系统与保温设计缺乏协同，导致模块温度过低时无法快速升温至最佳工作区间，而温度升高后又可能因散热过度导致温度波动过大。另一方面，充电桩的热管理多采用被动散热方式，缺乏主动加热与恒温控制功能，在极端低温条件下，内部组件温度难以维持在正常工作范围，导致性能衰减。此外，热管理系统与充电控制单元之间缺乏联动，无法根据环境温度、充电功率等参数动态调整热管理策略，进一步降低了充电桩在低温环境下的适应性。

3.3 充电协议的低温适配性不足

充电协议作为充电桩与电动汽车之间的通信桥梁，其低温适配性不足是制约充电效率的重要因素。当前主流的充电协议（如 GB/T 18487.1、CCS 等）虽明确了充电过程的通信规范，但未针对低温环境制定专项适配策略。低温下，电池状态参数（如 SOC、内阻、温度）的变化速率加快，而传统充电协议的参数采样频率与调整周期无法及时响应这些变化，导致充电功率的调整滞后于电池实际状态。同时充电桩和电池管理系统的信息交互也存在延迟，充电桩不能准确地获取电池的实时需求，只能按照固定的充电曲线输出功率，难以实现最优充电策略，影响充电效率。另外，低温进一步降低了不同品牌电动汽车与充电桩之间的协议兼容性，容易产生充电中断，功率骤降等问题。

4 低温环境下充电桩充电效率提升的技术路径

4.1 电池预热技术的优化升级

电池预热是电池低温充电最核心的措施，要通过主动预热和被动保温相结合的方法将电池温度提高到 15-30° C 的最佳工作区间。主动预热技术可以采用电池包内置加热膜或液冷加热系统两种方式 : 加热膜通过电加热方式直接对电池单体加热，升温速度快，成本低，并且可以通过 BMS 控制加热功率，避免局部过热 ; 液冷加热系统则通过冷却液的循环加热实现电池包的整体升温，温度分布均匀，适用于大容量动力电池。被动保温技术可以在电池包的内部加入高效保温材料如聚氨酯泡沫、气凝胶等，减少热量损失，同时电池包的结构设计得更合理，减少热传导损耗。此外，还可以将充电桩与电池预热系统联动，在充电前由充电桩为电池提供预热电源，做到“预热 - 充电“一体化，减少充电总时间。

4.2 充电桩热管理系统协同改进

构建“加热 - 保温 - 散热“协同的主动热管理系统，是提升充电桩低温性能的关键。一方面，在功率模块，控制单元等核心组件处附加 PTC 加热器或电热丝，通过温度传感器实时监控组件温度，当温度低于最佳工作区间时自动启动加热，保证组件快速升温。另一方面，优化散热系统设计，将可调速风扇与散热片组合起来，根据组件温度来动态调节散热功率，避免在低温下散热过度。同时，在充电桩外壳内侧加入保温隔热层，采用聚氨酯硬泡等高效保温材料，减少内部与外界的热交换。此外，建立热管理系统与充电控制单元的联动机制，根据环境温度、充电功率、组件温度等多参

数动态调整热管理策略，实现温度的精确控制，维持组件的最佳工作温度范围。

4.3 充电协议的低温适配优化

充电协议的通信机制与控制策略，优化其在低温下的适配性。首先，提高协议的参数采样频率与信息交互速率，将电池温度，内阻，SOC 等关键参数的采样周期缩短至毫秒级，保障充电桩实时获取电池状态。其次，新增加低温专项控制策略，在协议中确定低温下充电曲线调整规则，如“分段恒流”充电模式，初期小功率预热电池，温度升高后逐步提升充电功率，避免由于功率太高电池极化过大。同时，优化充电桩与 BMS 的协同控制逻辑，建立动态功率分配机制，根据电池实时状态调整输出功率，实现最优充电。

4.4 低温专用充电桩的结构设计升级

针对低温环境的使用需求，对充电桩的结构、材料、接口进行专项设计升级。在结构设计上，采用全封闭结构，优化外壳密封性，减少冷空气进入；在充电桩内部设置独立的保温舱，将核心组件集中布置，通过主动加热与保温材料相结合的方式维持舱内温度。在材料选择上，外壳采用耐低温合金材料或改性工程塑料，线缆选用耐低温橡胶护套，确保低温下的机械性能与防护性能；核心组件选用宽温域型号，提升低温适应性。在接口防护上，采用双重密封结构，在充电枪与充电口内部添加加热元件，防止凝露结冰；优化触点设计，采用镀金或银合金触点，降低接触电阻，提高导电性。

5 低温环境下充电桩充电效率提升的实践优化方案

5.1 充电场站的低温适配布局

在低温地区的充电场站布局中，充分考虑环境因素对充电效率的影响。首先，优先选择背风，向阳的场地建设充电场站，利用自然光照与地形减少寒风侵袭，降低环境温度对充电桩的影响。二是合理规划充电桩安装密度，避免充电桩之间的气流干扰，也便于集中供暖或者保温措施的实施。对于户外充电桩，采用集群式安装，在充电桩群周围增加防风保温屏障，内部增加集中加热装置，形成局部温暖区域。此外，在充电场站设置移动保温棚、充电枪保温套等应急保温设施，为极端低温天气下的充电提供保障。

5.2 充电流程的智能化调控

结合物联网和人工智能技术，实现充电流程智能化调控，提高低温下充电效率。首先，开发充电桩智能监控平台，实时监测环境温度，充电桩状态，电池状态等参数，为充电策略调整提供数据支持。其次，打造“预约充电＋智能预热“模式，用户可以通过 APP 预定充电时间，系统根据预定信息提前启动电池预热和充电桩预热，使得充电开始的时候设备都在最优的状态下工作。同时，电池在不断地充电，充电时间和充电功率也会随着环境温度与电池的状态而不断的进行调整，从而避免无效充电的时间；当发现电池的温度过低时，会自动的增加电池的预热时间，然后等到电池的温度达到了要求后再启动正式充电。另外，建立充电数据反馈机制，通过分析低温下不同充电条件下的充电数据，持续优化充电策略。

5.3 运维管理的强化与完善

加强低温环境下充电桩的运维管理，是稳定充电效率的保障。首先，制定专项运维规程，加大低温季节巡检次数，重点检查充电桩加热系统，保温设施，接口密封等重要部位，及时发现故障，并及时修复。其次，建立组件定期更换制度，对在低温下易损耗的部件，如加热元件、密封件、触点等定期检查更换，保证设备性能。同时，加强运维人员专业培训，提高低温情况下的故障排查、应急处理能力。此外，建立用户反馈机制，及时收集用户在低温充电过程中遇到的问题，有针对性地优化充电桩性能与服务流程。

6 结语

低温环境下电动汽车充电桩充电效率的提升是一个系统工程，涉及电池，充电桩，充电协议，应用场景等多个维度的协同优化。由于低温引起电池活性衰减，充电桩组件性能下降，传输线路损耗增大，协议适配不足等问题，导致充电效率下降。通过电池预热技术升级，充电桩热管理系统优化，充电协议低温适配，专用结构设计升级等技术路径，结合充电场站布局优化，充电流程智能化调控，运维管理强化等实践措施，有效提高低温环境下的充电效率。

参考文献

[1] 朱玉豪,江盼.电动汽车空调热泵系统在低温环境下的性能研究[J].节能,2025,44(08):38-42.

[2] 李元栋,陈莹,禚爱红,柏齐,吴秀奇,李兰,许金峰.高低温环境下重型纯电动汽车阻力设定方法研究[J].客车技术与研究,2025,47(04):15-23.

[3] 罗文星.低温环境下电动汽车电池热管理系统动态控制策略研究[J].汽车测试报告,2025,(13):142-144.

[4] 毛毳,朱翔宇,赵志远.估计下降率评估方法在低温能量流优化试验中的应用[J].汽车与新动力,2025,8(01):56-63.