

锂电池电动自行车充电安全研究

雷金永

十堰科盟科技有限公司，湖北十堰，442000；

摘要：本文系统研究了锂电池电动自行车充电安全问题，从锂电池工作原理、充电系统构成、安全隐患分析、关键技术优化及多维度防护措施等方面展开深入探讨。研究指出，过充、过放、短路及温度异常是充电过程中的核心风险源，需通过优化电池管理系统（BMS）、应用智能充电技术、构建环境监测体系等手段降低风险。此外，用户行为规范、产品设计升级和行业监管强化是保障安全的重要支撑。本文结合案例分析、技术对比及政策建议，提出了覆盖技术、管理和教育层面的综合解决方案，为行业安全发展提供理论依据与实践指导。

关键词：锂电池；电动自行车；充电安全；热失控；BMS；物联网；安全标准

DOI：10.69979/3041-0673.25.01.017

引言

电动自行车作为绿色出行工具，近年来在中国快速普及。截至 2023 年，我国电动自行车保有量已突破 3.5 亿辆，其中 90% 以上采用锂电池作为动力源。然而，锂电池的高能量密度特性也带来了安全隐患。截止 2024 年 5 月 30 日，国家消防救援局数据显示，2024 年已发生电动自行车火灾 10051 起，造成 35 人死亡，近 3 年相关火灾起数年均增长 20%。按此计算，平均每天有 67 起电动自行车起火事件在全国各地发生。不过应急管理部消防救援局有关负责人曾介绍过，由于不少电动自行车火灾未引发周边物品燃烧，当事人多数不报警，此数据可能与实际数据相差较大，即真实的数据可能比统计的更多，其中 83% 与充电过程直接相关，造成人员伤亡和财产损失高达数十亿元。这一严峻形势凸显了充电安全研究的紧迫性。

本研究基于锂电池化学特性与电动自行车充电场景，结合国内外事故案例与技术进展，系统分析安全隐患成因，并提出多维解决方案。研究不仅关注技术改进，还强调用户行为优化与政策法规完善，旨在构建“技术-管理-教育”三位一体的安全防护体系，为行业可持续发展提供支撑。

1 锂电池电动自行车充电系统概述

1.1 锂电池技术特性与分类

锂电池通过锂离子在正负极间的嵌入与脱嵌实现能量存储与释放。根据正极材料不同，主流类型包括：

(1) 三元锂电池（NCM/NCA）：能量密度高（200-

300Wh/kg），但热稳定性较差，易发生热失控；

(2) 磷酸铁锂电池（LFP）：循环寿命长（>2000 次），热稳定性优异，但能量密度较低（120-160Wh/kg）；

(3) 磷酸锰铁锂电池（LMFP）：该电池为 LFP 电池的变种，能量密度相比于传统的 LFP 电池可以提高 20%，兼具安全性和热稳定性，同时改善了低温稳定性和其他性能。

(4) 锰酸锂电池（LMO）：成本低、安全性好，但循环寿命较短（约 500 次）。

不同电池类型在电动自行车中的应用需权衡能量密度、成本与安全性。例如，高端车型多采用三元锂电池以提升续航，而共享电单车则倾向 LFP 电池以降低维护成本。

1.2 充电系统构成与工作原理

1.2.1 电动自行车充电系统由以下核心组件构成：

- 锂电池组：通常由数十至数百节电芯串并联组成，需通过结构设计来确保散热与机械稳定性；
- 充电器：将 220V 交流电转换为适配电池组的直流电，输出参数需与电池规格严格匹配；
- 电池管理系统（BMS）：实时监控电芯电压、温度及电流，执行均衡控制、过充/过放保护及故障诊断。

1.2.2 充电过程分为两阶段：

- 恒流阶段（CC）：以最大允许电流（通常 0.5C-1C）充电至截止电压（如三元电池 4.2V/单体）；
- 恒压阶段（CV）：维持截止电压，电流逐渐下降至设定阈值（如 0.05C），完成充电。

BMS 在此过程中需精确控制充电参数，防止因电压

漂移或温度异常引发安全事故。

2 锂电池电动自行车充电安全隐患分析

2.1 典型安全隐患及其机理

2.1.1 过充与过放

- 过充：当充电电压超过电芯上限（如三元电池 4.25V），正极材料过度脱锂，导致电解液分解产气，内压升高可能引发壳体破裂或热失控。

- 过放：放电至电压过低（如 $<2.5V$ ）会造成负极铜集流体溶解，电池容量永久衰减，严重时可能引发内部短路。

2.1.2 短路

- 内部短路：隔膜破损或枝晶生长导致正负极直接接触，瞬间大电流产生焦耳热，引发链式放热反应；

- 外部短路：充电接口进水、金属异物接触等引发外部回路短路，若 BMS 未能及时切断电流，可能引燃周边可燃物。

2.1.3 温度异常

- 高温环境：环境温度 $>45^{\circ}C$ 时，SEI 膜分解加速，副反应增多，热失控阈值降低；

- 低温充电： $<0^{\circ}C$ 时锂离子迁移速率下降，易在负极表面析出金属锂，形成枝晶刺穿隔膜。

2.2 事故案例实证分析

案例 1：2021 年北京某小区火灾，因用户使用劣质充电器导致三元电池过充，BMS 失效后引发爆燃，造成 3 人受伤；

案例 2：2022 年上海一外卖员私自改装电池组，并联电芯容量不匹配引发内部短路，车辆在充电时起火；

案例 3：2023 年广州某地下车库电动自行车集中充电站因通风不良，多车同时充电导致环境温度超标，触发连锁热失控。

案例 4：2024 年 2 月 23 日，南京市某小区居民住宅 6 号楼发生重大火灾事故，造成 15 人死亡、2 人重伤、42 人轻伤或轻微伤，直接经济损失 3300 余万元。经调查认定，事故由违规改装的电动自行车超标大容量锂离子电池热失控起火引起上述案例表明，安全隐患多源于技术缺陷、用户不当行为及环境管理疏漏的综合作用。

案例 5：2025 年 1 月 10 日，九江市瑞昌市一电动自行车静止状态起火，未造成人员伤亡，火灾直接财产损失 1000 元。经调查，起火原因系蓄电池故障，车辆

和蓄电池损毁严重，无法查明品牌，购买时间在 3 年以上。

3 提高锂电池电动自行车充电安全性的关键技术

3.1 电池管理系统（BMS）的深度优化

3.1.1 高精度状态估计

- 采用扩展卡尔曼滤波（EKF）或神经网络算法，实现 SOC（荷电状态）与 SOH（健康状态）的实时估算，误差控制在 $\pm 3\%$ 以内；

- 引入阻抗谱分析技术，检测电芯内部微短路或老化征兆。

3.1.2 多级均衡控制

- 主动均衡：通过 DC-DC 转换器转移高电量电芯能量至低电量电芯，均衡效率 $>85\%$ ；

- 被动均衡：对过充电芯并联电阻放电，成本低但能耗较高，适用于低端车型。

3.1.3 热管理策略

- 在电池组内嵌入温度传感器阵列，结合风冷或液冷系统动态调节散热强度；

- 开发基于相变材料（PCM）的被动热管理模块，在热失控前吸收大量潜热。

3.2 智能充电技术的创新应用

3.2.1 自适应充电算法

- 脉冲充电：以间歇式大电流脉冲减少极化效应，提升充电效率并降低温升；

- 涓流补偿：在 CV 阶段叠加微小电流脉冲，解决因电池老化导致的“虚满”问题。

3.2.2 物联网（IoT）集成

- 通过 NB-IoT 或 LoRa 模块将充电数据上传至云平台，实现远程监控与异常预警；

- 结合用户充电习惯大数据，优化充电策略并推送个性化安全提示。

3.3 充电环境监测与预警体系

- 多参数传感器网络：部署温湿度、烟雾、VOC（挥发性有机物）传感器，实时监测环境状态；

- 边缘计算节点：在本地完成数据预处理，通过 AI 模型（如 LSTM）预测风险概率，缩短响应时间；

- 分级预警机制：设置黄、橙、红三级警报，联动

消防系统与物业管理平台，实现实时报警和快速应急处置。

4 锂电池电动自行车充电安全防护措施

4.1 用户层面的行为规范

4.1.1 选购与使用：

- 认准 GB/T 36972-2018《电动自行车用锂离子蓄电池》认证产品；
- 使用原装充电器，避免混用不同品牌充电器；
- 每月检查电池外观是否鼓包、接口是否氧化；
- 每半年进行一次深度放电校准，延长电池寿命。

4.2 产品设计的技术升级

4.2.1 结构优化：

- 采用模块化电池设计，单个模块故障时可快速隔离；
- 增加防爆阀与泄压通道，缓解热失控压力；
- 在充电器和 BMS 中集成多重保护功能，如过压、过流、过温保护等；设计合理的充电接口，防止误插和短路。

4.2.2 材料创新：

- 应用陶瓷涂覆隔膜（如勃姆石涂层），提升耐高温性能；
- 开发阻燃电解液（添加磷酸酯类化合物），延缓火势蔓延；
- 加快研发全固态电池，提升锂电池本质化安全水平。

4.3 行业监管与政策支持

4.3.1 标准体系完善：

- 强制要求 BMS 具备故障自诊断与数据黑匣子功能；
- 制定充电设施建设规范，明确防火间距与消防配置；
- 编制锂离子电池全寿命周期中关于安全、质量及环境标准，（例如：国家标准 GB 43854—2024《电动自行车用锂离子蓄电池安全技术规范》就规定了电动自行车用锂离子电池和电池组的安全要求和试验方法等）。
- 强制要求锂离子电池、移动电源实施强制 CCC 认证管理，（例如：市场监管总局发布关于对锂离子电池等产品实施强制性产品认证管理的公告（2023 年第 10 号公告）。自 2023 年 8 月 1 日起对锂离子电池和电池

组、移动电源实施 CCC 认证管理。自 2024 年 8 月 1 日起，未获得 CCC 认证证书和标注认证标志的，不得出厂、销售、进口或者在其他经营活动中使用）。

4.3.2 市场监管强化：

- 建立锂电池全生命周期追溯系统，打击非法改装与二手电池翻新；
- 对充电场所实施安全评级制度，评级结果与保险费用挂钩；
- 强制锂离子电动自行车定期进行锂电池安全检测并与物联网（IoT）联网。

4.3.3 公众教育普及：

- 通过社区讲座、室外广告、短视频平台推广及短信推送“充电五步法”（选、查、充、断、检）；
- 将充电安全知识纳入驾驶员培训课程。

5 未来展望与技术挑战

5.1 全固态电池的潜在突破

全固态电池采用不可燃固态电解质，可从根源上消除电解液泄漏风险。目前，丰田、QuantumScape 等企业已实现实验室环境下 $>400\text{Wh/kg}$ 的能量密度，但量产成本与界面阻抗问题仍需攻克。预计 2030 年后，全固态电池有望逐步替代传统液态锂电池。

5.2 人工智能与数字孪生技术

- 构建电池数字孪生模型，通过虚拟仿真预测极端工况下的安全边界；
- 利用深度学习分析海量充电数据，提前识别隐性故障模式，并对相关故障进行预警及自动切断充电功能。

5.3 无线充电与换电模式推广

- 电磁感应式无线充电可减少插拔损耗，降低短路风险；
- 换电模式通过集中式充电站统一管理电池，但需解决标准化与成本分摊问题。

5.4 电池座椅一体化技术

- 电池座椅一体化技术可以防止用户私自更换大功率电池组，防止出现违规超标大容量锂离子电池改装情况。

6 结论

本研究系统的通过多维度分析了锂电池电动自行车

车充电安全问题,探讨了提高充电安全性的关键技术和防护措施。

研究表明,锂电池电动自行车充电安全需技术、管理与教育的协同推进。短期内,BMS 系统的优化、智能充电技术及充电环境监测可显著降低事故率;同时,需要用户、生产企业和监管部门共同努力,从使用习惯、产品设计和行业规范等多个层面采取综合措施,才能从根本上提高锂电池电动自行车充电安全性。

未来,随着新材料、新技术的不断涌现和商业模式创新,锂电池电动自行车充电安全将得到进一步改善。例如,固态电池技术的应用有望从根本上解决电解液泄漏和热失控问题;人工智能和数字孪生技术的深入应用将提高充电过程的安全性和智能化水平。

然而,充电安全是一个复杂的系统工程,需要持续关注和研究,以应对新形势下的挑战,为电动自行车行业的健康发展和公共安全保驾护航。建议政府、企业、

用户三方形成合力,构建覆盖“研发-生产-使用-回收”的全链条安全生态,为行业高质量发展奠定基础。

参考文献

- [1] 纯电动汽车电池管理系统维护策略与性能评估[J]. 陈庆柠. 时代汽车, 2024(11)。
 - [2] 电动自行车用锂离子电池产品质量安全风险研究[J]. 刘颖; 刘永胜. 产品可靠性报告, 2024(05)。
 - [3] 强制性国家标准 GB 43854-2024《电动自行车用锂离子蓄电池安全技术规范》发布[J]. 信息技术与标准化, 2024(05)。
 - [4] 电动自行车锂电池及动力电池管理系统的研究[J]. 张习晖, 中国自行车, 2024(03)。
- 作者简介: 雷金永(1990 年-), 男, 汉, 十堰郧西县, 十堰科盟科技有限公司, 注册安全工程师/安全总监、十堰市应急管理专家库成员、湖北省政府采购专家库成员, 研究方向: 化工、安全教育、新能源。