

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.02.023

车用锂电池健康状态下快充方法研究综述

张志刚¹, 张涛², 汤爱华¹, 姚疆³, 蒋依汗¹

1. 汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室, 重庆 400054;
2. 招商局检测车辆技术研究院有限公司, 重庆 401329; 3. 重庆市公安局交通管理局, 重庆 400054

摘要: 为了改善电动汽车使用便捷性, 锂离子动力电池快速充电被广泛用于新能源汽车充电领域, 然而, 不当的快速充电会加速电池老化, 引发电池热失控等一系列安全问题, 如何实现锂离子动力电池安全、可靠地快充已成为行业的热点和痛点. 本文通过对国内外文献的归纳整理, 阐述了锂离子动力电池在快充条件下的主要阻碍因素及基于电化学—热耦合模型的快充方法和快充趋势, 探讨了锂离子动力电池的电化学特性、热特性、老化机理及阳极析锂机理, 在总结当前主流的快充策略优缺点基础上, 提出了电动汽车用动力电池电化学—热耦合模型的安全快充方法的研究趋势.

关键词: 锂离子动力电池; 电化学—热耦合模型; 阳极析锂机理; 快充方法

中图分类号: U469.722 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):
文章编号: 1673-9868(2022)02-0194-13



Methods of Fast Charging EVs Lithium-ion Power Battery in Healthy State: A Research Review

ZHANG Zhigang¹, ZHANG Tao², TANG Aihua¹,
YAO Jiang³, JIANG Yihan¹

1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Automobile Parts, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing, 400054, China;
2. China Merchants Testing Vehicle Technology Research Institute Co., Ltd, Chongqing, 401329, China;
3. Chongqing Traffic Management Bureau, Chongqing, 400054, China

Abstract: In order to improve the convenience of use Electric Vehicles (Evs), Fast charging of lithium-ion power battery is widely used in the field of charging new energy vehicle. However, improper fast charging will accelerate battery aging and cause a series of safety issues such as thermal runaway. Nowadays, how

收稿日期: 2021-07-29
基金项目: 重庆市高校创新研究群体资助项目(CXQT21027); 重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-msxmX0464); 重庆理工大学科研启动基金资助项目(2021ZDZ004).
作者简介: 张志刚, 教授, 博士后, 主要从事车辆动力传动系统设计与试验技术研究.

to achieve safe and reliable fast charging of Lithium-ion power batteries has become a hot and pain point in Ev industry. In this paper, based on the review of literatures worldwide, the main obstacles of lithium-ion power batteries under fast charging conditions, fast charging methods and trends based on electrochemical-thermal coupling models were summarized. The text content is mainly extended from the following aspects: electrochemical characteristics, thermal properties, aging mechanism and anode lithium plating mechanism. The research trend of fast and safe charging methods for Ev power battery based on electrochemical-thermal coupling model is proposed by summarizing the current mainstream strategies in fast charging.

Key words: lithium-ion power battery; electrochemical-thermal coupling model; anode lithium plating mechanism; fast charging method

当今全球正面临严峻的能源短缺危机,石油消耗量快速增长的同时,大量化石燃料的使用与滥用加剧了环境污染^[1].纯电动汽车作为一种零排放、绿色低碳的交通工具发展迅猛,然而,由于续航里程和充电速度等因素导致的里程焦虑和充电焦虑是制约纯电动汽车大规模推广的瓶颈^[2].锂离子电池(后面简称锂电池)由于具有比能量高、比功率大、无记忆性等良好性能,已被视为理想的新一代电动汽车动力源^[3-4].快速充电策略是当前储能领域的研究重点,通过快充策略以减少充电时间、延缓电池老化、提升充电效率^[5-7].文献[8]建立了锂电池的电-热模型,研究了锂电池在充电过程中的极化特性,提出一种Reflex快充策略,有利减小电池极化,并且可以减少电池温升及容量衰减.文献[9]介绍了一种面向控制的电化学模型,可以用于在线观测充电过程中阳极上锂的沉积,基于模型进一步提出了一种在线无损快速充电算法,可以在保护电池的同时缩短充电时间.文献[10]通过粒子群寻优算法,以充电时间、容量及充电效率为优化目标,提出一种自适应分阶段恒流充电策略,相对于传统的恒流恒压(Constant Current Constant Voltage, CC-CV)充电模式,该策略充电时间短、温升小,电池容量衰退较小.

本文从锂电池特性和老化机理入手,将限制锂电池快速充电能力的影响因素分类阐述,分析主流充电方法的优缺点及适用范围.基于锂电池电化学-热耦合模型和电动汽车行业发展需求,提出了锂电池健康状态下快速安全充电的研究趋势.

1 锂离子电池特性及快充影响因素

1.1 锂离子动力电池老化机理

锂电池在循环充放电时,电池内部通常会发生复杂的电化学反应,由于反应具有不可逆性常造成电池电极活性物质及可循环活性锂离子减少,进而造成电池容量下降和电阻上升,使得电池老化衰退^[11-12].电池老化主要体现为阻抗增加和容量衰退,这是由电池内部电化学性质所决定的^[13].电池老化的原因有:电极活性材料的腐蚀溶解^[14-16]、结构变化^[17-19]、活性物质颗粒破裂^[20-22]等导致正负电极受损,固体电解质膜(solid electrolyte interphase, SEI)生长增厚^[23-24]、负极析锂^[25-26]等导致的活性锂离子损失,这些因素将导致电池最大可用容量衰减,如图 1 所示.锂电池实际使用过程中的老化分为两类:循环老化及日历老化.循环老化即锂电池在充放电循环过程中发生的不可逆容量损失,主要影响因素有充放电电流、截止电压、荷电状态(State of Charge, SOC)、温度、放电深度(Depth of Discharge, DOD)等^[27],为实现安全快速充电,研究电池老化机理具有重要意义^[28].

文献[29]使用单粒子模型对锂电池进行充放电循环实验,根据实验数据中的容量和电压比对,分析出电池容量衰减有 3 个阶段:

- 1) 电池容量衰减主要是由于 SEI 膜形成;
- 2) 电池老化过程中阴极材料衰退占比增大,但活性锂离子消耗为主要原因;
- 3) 电池老化衰退主要原因为阴极材料衰退,且阳极变化会加速电池老化.

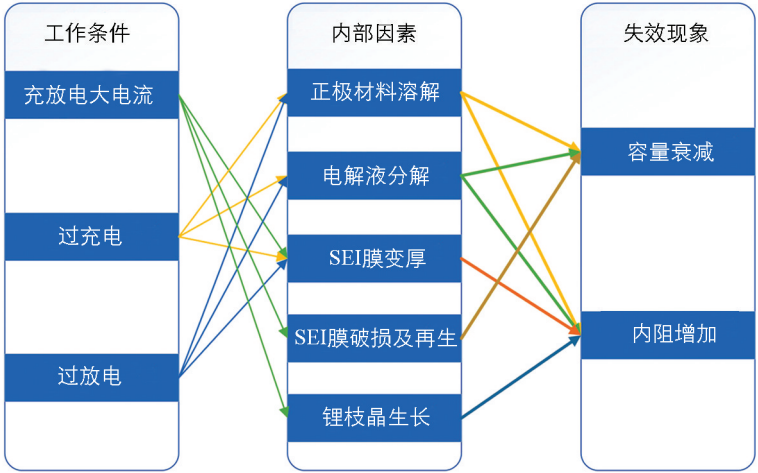


图 1 锂离子电池老化机理

文献[30]通过研究充电电流倍率、温度及 DOD 对磷酸铁锂电池老化的影响,表明温度对锂电池老化影响较大,DOD 影响较小.此外,在大倍率电流充电过程中,电流倍率对锂电池容量衰减有显著影响.文献[31]研究发现温度上升使得 SEI 增长速率增大,锂电池循环后期,阳极动力学特性受到 SEI 膜限制,导致阳极析锂.文献[32]通过研究不同 SOC 窗口和充电电流倍率下锂电池容量衰减特性,发现锂电池在循环过程中,在高 SOC 和大倍率电流条件下阳极石墨层机械形变发生率增大,进而导致锂电池容量衰减.文献[33]研究表明,在低温和大倍率充电工况下阳极析锂发生率增大,使锂电池容量衰退加剧.

1.2 锂电池健康状态定义

电池健康状态(State of Health, SOH)表征锂电池当前状态下相较出厂时的储电能力,用来定量描述电池老化的进程,用百分数表示.由于电池的容量、内阻及剩余可充电次数等特征参数都会随着电池老化而发生变化,故 SOH 可用不同的特征参数来表示,其定义如下:容量定义 SOH^[34]、内阻定义 SOH^[35]和剩余可充电次数定义 SOH^[36].文献[37]研究了发生化学反应时锂离子运动和消耗过程,并结合电池容量衰退过程,提出了容量损失、浓度变化等共计 5 个方程,可计算出容量损失,还可模拟不同的充电截止电压和放电深度对电池老化进程的影响,预测精度也很高.文献[38]将 Thevenin 等效电路模型中的欧姆内阻作为电池 SOH 的衡量指标,运用双扩展卡尔曼滤波器对模型参数进行在线辨识,结合电池老化的研究,对 SOH 进行估计.文献[39]选取电动汽车运行过程中电池管理系统监控的历史数据(电流、电压、温度)来实时跟踪 SOH,在对数据集进行归一化处理后训练神经网络模型,并利用电动汽车运行数据对模型进行验证,平均误差小于 2.18%.综合国内外研究现状可知,由于影响电池老化进程的影响因素较多,电化学模型难以对锂电池内部复杂的状态变化逐个描述,而等效电路模型将电池内部简化处理可能导致模型误差较大^[40],因此利用电池历史运行可监控数据对 SOH 进行估计已经成为主流研究方向.

1.3 影响锂离子动力电池快速充电因素

锂电池在其充电过程中受电池当前 SOC 和 SOH 状态及温度、充电电流等因素影响较大,且这些因素之间互相联系、互为影响,具有强耦合性^[41],其关系如图 2 所示.

1.3.1 SEI 膜生长

锂电池第一次充放电时,阳极与电解质发生电化学反应,在阳极界面会形成一层 SEI 膜. SEI 膜的形成对锂电池有两个方面的影响^[42]. 其一, SEI 膜在生长过程中会消耗掉一定量可移动锂离子,从而造成锂电池部分容量的不可逆损失;另一方面, SEI 膜允许锂离子通过,但可以隔绝电子和电解液的通过,从而防止了负极中的锂离子和电解液的进一步反应,保证锂电池能够在限定的电压区间内稳定工作^[43]. 但随着电池循环使用次数的增加, SEI 膜持续生长,阻碍了部分锂离子在电解液中的运动,使得电阻增大.

在 SEI 膜的形成过程中，会对电池的循环特性、倍率特性及温度特性等产生影响^[44]。文献[45-46]通过试验研究阳极材料在不同工况下的变化状况，表明阳极界面 SEI 膜形成导致锂离子动力特性受到阻碍，使得电池极化和电阻增大，并且电流倍率和循环次数增大也会使电阻增大。文献[47]通过事后拆解的方法分析了充电电流倍率对三元锂电池老化的影响，研究发现高充电电流倍率使得 SEI 膜生长速率增大，进一步导致电池阻抗增加和加剧容量衰减。文献[25, 48-49]研究发现电池循环过程中，石墨表面 SEI 膜的增长，使得电极孔隙率降低，阻碍了锂离子动力学特性，增大电池极化，进而导致锂电池在适宜工况下发生阳极析锂。

1.3.2 负极析锂副反应

相比于 SEI 膜生长的副反应而言，锂电池在循环使用过程中负极析锂的可能性较低^[50]，但在特殊工况下，如大倍率电流充电、过充及低温，也可能发生阳极析锂，如表 1 所示。

表 1 不同工作条件下的负极析锂诱因

工作条件	析锂诱因	工作条件	析锂诱因
大倍率充电	缓慢的锂固相扩散	长循环	SEI 膜变厚导致负极阻抗增加
过充	负极嵌锂位置达到饱和	低温	锂固相扩散和电荷传递过程变慢

阳极析锂后，由于析出的部分锂金属在放电时无法被氧化为锂离子，导致这部分的锂离子无法继续发挥化学能和电能之间转化的作用，从而造成电池容量的衰减。另一方面，析出的锂金属通常以锂枝晶的形式附着在负极颗粒表面，锂枝晶生长到一定程度时能刺破隔膜，造成正负电极发生短路，进而引发热失控^[51]。

目前学者对锂电池析锂原因开展的研究，可以分为“浓度说”^[52]和“电位说”^[53]。“浓度说”认为电池负极表面锂离子浓度达到饱和而无法继续嵌入负极，“电位说”认为是电池负极表面电位低于 Li/Li^+ 平衡电位而导致的。文献[54]通过将局部挤压的隔膜组装成扣式半电池，因为局部闭合隔膜的周围锂离子浓度较高，使得该位置过电位较大，导致阳极析锂。文献[3]采用析锂电势作为判定，对锂电池析锂电流边界进行标定，也就是依据负极电位阈值，将锂电池在快速充电过程中出现的负极析锂副反应边界电流作为整个电池充电范围内的最大充电电流。文献[55]通过移位电压判断阳极析锂的时间点，在电池循环中移位电压急剧增大时，会发生阳极析锂，并证实充放电电压受到电池内阻和锂储量的影响。

1.3.3 充电极化现象

锂电池在充放电状态下出现内部锂离子浓度短时间内的分布不均现象，即为锂电池的极化。锂电池的极化受充放电电流大小、环境温度、内部活性物质浓度等因素影响^[56]，极化现象阻碍锂离子动力特性，导致温升高、阳极析锂等，进而使得充电电流曲线不能达到最大充电电流曲线，极化严重时，可能使得电池电压陡升，损坏电池^[57]。

文献[58-59]建立锂电池的等效电路模型，研究了电池极化电压与端电压之间的关系。文献[60]通过分析锂电池极化电压，建立了反映电池内部复杂离子运动的方程，通过计算锂电池充放电时锂离子流值来获得极化电压变化规律。文献[61]将锂离子电池的充放电策略作为控制目标，研究了电池 SOC、充放电形

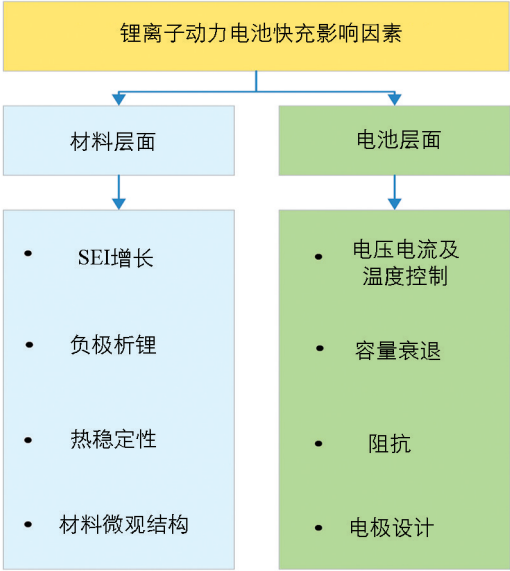


图 2 锂离子动力电池快充影响因素

式、充放电倍率大小和工作温度等方面与电池极化电压之间的相互联系. 文献[62]等采用极化电压时间常数进行快充优化策略设计依据, 能够较好地平衡充电过程中快充速率、极化电压和温升速度.

1.3.4 温度对充电影响

电池的温度对内部活化酶的活性有较大影响, 进而影响电池内电化学反应速度, 同时影响电池内锂离子脱嵌速率和扩散迁移速率^[63]. 电池温度在充电中后期不断累积, 电池温度过高部分能量会转化为热量消耗, 导致实际充电容量不足, 并且严重情况下会导致电池热失控、燃烧等现象. 温度过低, 锂离子电池反应缓慢, 充电速率降低, 充电时间延长^[64]. 根据电池温度—可接受充电电流曲线, 表明在 25℃ 下充电效果最佳, 电池性能较好^[65-66].

文献[67]研究表明, 环境温度影响电池的电解液浓度和活性, 当温度越高电解液活性和浓度越高, 锂离子扩散和迁移速率增加. 文献[68]研究了温度变化在循环充放电过程中对锂电池的影响, 发现环境温度影响循环充放电过程中阴极 SEI 膜的增长速率. 高温不仅会阻碍电池寿命, 还会增加发生灾难性故障的危险, 相反, 低温也会限制电池寿命, 因为电池内部电阻增加. 文献[69]通过实验分析了不同环境温度下电池内阻状况, 在环境温度为 25℃ 下磷酸铁锂电池的内阻是环境温度为 60℃ 状况下的 5 倍.

1.3.5 充电电流倍率对电池性能影响

不同充电电流倍率下的三元锂电池和磷酸铁锂电池充电时间特性分别如图 3 所示. 总体上, 提高充电电流倍率可以缩短充电时间, 然后电流倍率上升到一定值后, 充电时间缩减的程度开始减小, 最终趋于平缓^[70]. 锂电池循环寿命受到充电电流倍率显著影响, 不同充电电流倍率下电池容量曲线表现为先下降后上升, 当电池循环次数超过 300 次之后, 在高倍率电流充电条件下, 电池最大可用容量急剧衰减^[71]. 提高充电上限电压, 有利于抑制电池容量衰减, 其原因为提高充电上限电压, 使得正负极电势差增加, 嵌入至负极的锂离子数量增加. 然而当充电电压过高, 负极电势降至 0V 以下时, 将会导致负极析锂, 从而导致电池容量急剧衰减^[72]. 在快充条件下, 应当监测负极电位和电流密度, 避免负极析锂, 降低充电安全风险.

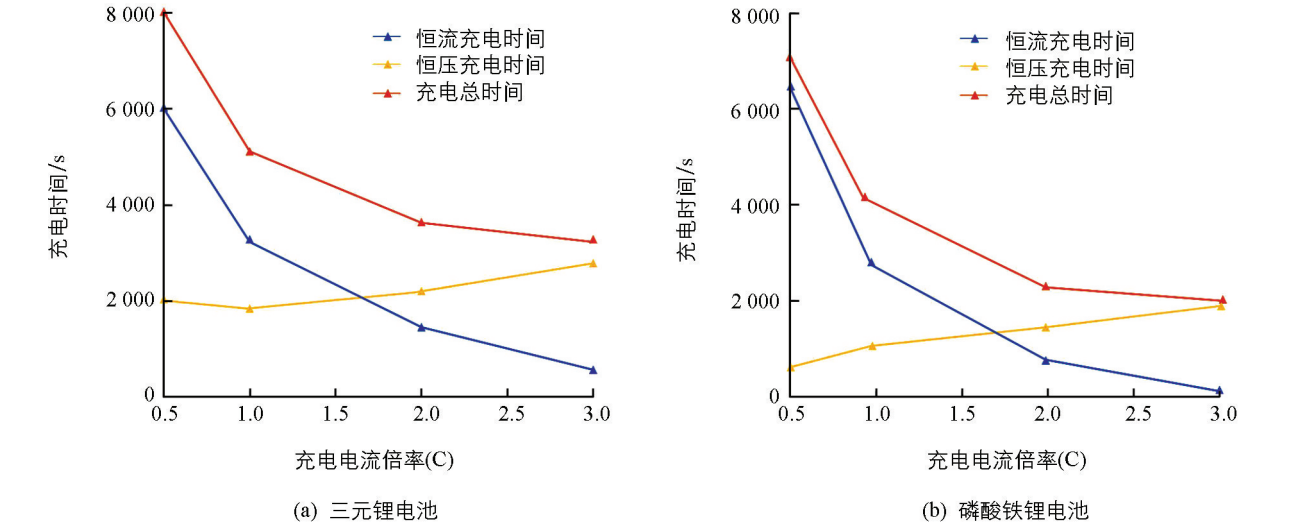


图 3 不同充电电流倍率下的充电时间特性

1.4 热特性

锂电池在快速充电进行中会生热, 主要表现为化学热、极化热、欧姆热和副反应热^[73]. 由于某一类型锂电池使用过程中容量变化不大, 因而电池化学热变化不大, 而极化热、欧姆热及副反应热都和电池采用的充电策略有关. 电池的极化程度越高、副反应越剧烈, 生热更多, 这样使得电池温升速率加快^[74-75]. 在充放电过程中锂电池会产生各种热, 其中所产生的焦耳热与电流平方成正比, 在大电流快充条件下电池生热量较大、温升快^[76]. 在快速充电条件下, 电池热管理也是当前研究热点. 文献[77]基于锂电池电—热模型, 分析对比了电池常规充电和过充电条件下的电、热特性, 表明常规充电条件下, 电池温升是由于充电产生

的不可逆热,然而在过充电条件下,电池热的产生主要是因为充电初期锂沉积导致的.文献[78]基于电池充电电压随 SOC 变化的规律,建立了电池生热量随 SOC 变化的热源方程式,并耦合了正负极耳的生热,采用数值模拟和试验相结合的方式建立了过充电—热耦合模型.研究表明,电池过充电过程中,最高温度出现在正极附近,最低温度出现在负极一侧的底角处,随着过充电流的增大,电池内外部和区域温差增大,电池的热均匀性变差,电池极耳的位置对电池的温度场分布有很大影响.文献[79]通过建立 18650 锂电池的电—热模型,对比分析 $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$, $\text{LiNi}_{0.8}\text{CoAl}_{0.05}\text{O}_2$, LiFePO_4 , LiMn_2O_4 , LiCoO_2 5 种阴极材料的热特性,研究表明,同一种材料充电电流倍率每增加 2C,温升增加大约 5°C .

2 主流充电法及安全快充策略

锂电池充电时,内部反应机理复杂,且涉及的参数具有强耦合、不可测等特性,但所涉及的参数对电池性能、循环寿命有较大影响,通常受到温度、充电电流倍率及 SOC 影响^[80, 81].针对电动汽车锂电池的充电,发展了多种充电方式,每种充电方式各有优缺点^[82],下面是目前使用的一些主流充电方法:

2.1 恒流恒压充电(Constant-Current Constant-Voltage Charging)

恒流恒压充电综合了恒流 CC 和恒压 CV 充电两个过程,首先,电池被恒定电流充电至预先设定的截止电压,随后,充电切换至恒压充电模式,即电池的端电压保持不变,充电过程一直持续到电流下降到规定的截止电流或充电时间到达设定的截止时间^[83].恒流充电过程可有效地减少充电时长,在恒压充电过程中将电池充满.然而恒压阶段充电电流下降缓慢,使得充电时间较长,且此过程中电池热量累积、极化增大,充电效率低^[84],而采用恒定大倍率电流充电则会导致后期出现较大温升,进而损坏电池.

基于标准 CC-CV 充电策略,许多研究学者提出了多种改进快充方法.文献[85]提出了 Boost 充电策略,该策略采用 CC-CV-CC-CV 和 CV-CC-CV 充电,在充电初期使用大倍率电流的 CC-CV 或 CV 充电,之后转换为标准 CC-CV 将电池充满;Boost 充电在充电速度上相较于传统 CC-CV 得到提升,然而充电初期使用大电流 CV 充电不利于电池性能.文献[86]在充分考虑恒流阶段和恒压阶段电池充电的特点后,提出一种变电流间歇充电方法:由于在开始阶段电池的充电可接受能力较大,因此采用大电流对电池进行充电,考虑到电池的极化效应,当恒流充电至电池截止电压后,暂停充电,此时电池电压将有所下降,随后减小恒流充电的电流值,重复上述过程,直至电流减小到预定值后,采用恒压充电完成最后阶段的充电过程,做到了对电池的保护.文献[87]提出了一种优化 CC-CV 充电电流曲线的三重优化目标充电策略,使用优化算法将充电温升、时间及能量损耗作为优化目标,通过对比各种优化算法及不同权重因子对优化目标的影响,研究表明,对目标函数中的子函数项的权重进行合理设置,从而可以获取不同优先等级的充电电流曲线.

2.2 脉冲充电法(Pulse Charging)

作为恒流恒压充电方法的代替方案,脉冲充电被认为是一种能够减少充电时间和提高电池充电及能量效率的有效方法^[88],该充电过程以预设的电流充电一段时间,之后伴随短暂的中断时间或以负脉冲放电,如此循环往复直到电池充满量,在两个连续脉冲之间增加停充期或者负脉冲,可以在下个正脉冲到来时使电池内部电化学反应达到均衡.相比传统的恒流充电,增加短暂的停歇或放电的脉冲充电会使锂电池有更强充电接受能力,比如会消除极化电压、抑制锂枝晶的生长以及减缓电池的老化和加快充电速度等^[89].

文献[90]提出了一种恒流脉冲间歇充电策略,该策略在充电时将脉冲电流占空比和幅值设为定值,缩减了充电时间和降低电池极化.但为了进一步缩短充电时间,则需要延长静置时间消除电池极化,如此将与设定目标冲突.文献[91]通过控制频率以实现最小化的电池阻抗,同时通过调整占空比来减小极化,可以在不损坏电池特性的情况下,不到 20 min 可充电到最大容量,相比传统的恒流恒压充电方法充电速度提高了两倍,比恒流充电方法效率提高超过 50%.文献[92]将锂离子的扩散进行理想化建模,从而分析得到

常规恒流充电下约 1 h 后锂离子浓度在石墨/电解质界面处达到饱和,故采用约 75% 的占空比的脉冲充电可平衡充电时间和锂离子浓度饱和之间的矛盾。

2.3 多段恒流充电法(Multistage Constant Current Charging)

恒流恒压充电法中,如果从 CC 阶段到 CV 阶段转换时间过早,会增加 CV 阶段的充电时间,如果转换时间太晚,电池会发生过度充电,可能会永久损坏电池^[93]。由于 CC-CV 充电法可能会导致过充和较长的充电时间,为避免这些问题,提出了多段恒流充电法。多段恒流充电指按一定规则将充电电流划分为多段,每段电流都是固定常数,先以某一恒定电流充电到设定阈值后,继续以另一恒定电流充电,直到电池容量达到设定值。在多段恒流充电过程中,将恒流恒压充电过程中的恒压阶段用一组逐渐减小的电流替代^[94]。

多阶段恒流充电最早由 Qian 等^[95]提出。文献[96]中采用优化多段恒流充电中的电流序列,实验结果表明,所获得的快速充电模式能够在 40 min 内将锂电池充电至 75% 容量,并且运用该充电模式,锂电池充放电循环寿命要比采用传统的 CC-CV 充电模式延长 60%。文献[97]运用连续正交阵列技术确定五步恒流充电方法的最佳充电模式,该方法用于寻找最优参数设置并简化了实验步骤。实验结果表明,所获得的充电模式能够使锂电池充电至 95% 的容量,并且与传统的恒定电流—恒定电压充电方法相比,该方法可以使充电过程更快且更安全并使电池具有更长循环寿命。文献[98]采用遗传算法以电池充电时间和温升为优化目标,采用了一种基于多阶段恒流充电策略,该策略通过改变权重因子,以平衡充电时间和温升之间关系,从而确定一组充电电流序列,并通过实验证实了该策略优化效果好,在充电过程中温升较低,总充电时间较短。

2.4 安全快充策略

锂电池充电策略主要研究目标包括 4 个方面:充电时间最小化、效率最高化、容量最大化及循环寿命最长化,然而不同目标之间存在竞争关系,缩短充电时间则需要提升电流倍率,而大倍率电流亦会使得极化电压增加,进而降低了充电效率。因此,基于电池特性如何权衡不同目标之间的关系,成为当前快速充电技术的研究重点^[99-100],对此,研究人员基于电池充电特性提出了健康状态下安全快速充电策略。

文献[101]提出一种基于 SOC 和 SOH 估计的安全充电策略,该策略采取对电池电压和电流实时监测,以对电池 SOC 和 SOH 进行估计,从而根据电池的状态情况调整电流倍率和充电上限电压,该策略在提高了充电速度和安全性的同时,容易控制和易于实现。

文献[102]在均衡考虑锂电池老化损耗和充电时间的前提下,基于电—热—老化多参数耦合模型提出了一种能够准确表征电池自身物理及化学反应特性的多级恒流充电策略。该充电策略通过粒子群优化算法将复杂充电过程转化为一个高度非线性的多目标优化问题予以求解,从而得到一组最佳充电电流序列,文中所提出的优化充电策略准确地表征了锂电池的实际工况特性,可抑制温度升高且能够延长电池的循环使用寿命。

文献[103]采用了一种计及电池迟滞效应的快速充电方法。该方法的主要思路是建立电池开路电压 OCV 与电荷状态 SOC 的函数关系,以便于评估充电时所需的能量。同时,根据此函数关系所得的充电能量估计值,确定快充充电电流。此外,通过限制电压迟滞效应,能够获取高精度的 OCV,进而提高充电能量估计值的准确性,缩短充电时间、提升电池寿命。

文献[104]研究了一种基于保持极化电压恒定的交替快速充电技术,定量分析了电流、荷电状态 SOC、电池老化等因素对极化电压的影响。通过在 SOC 域对极化特性的分析,研究得出在包含 SOC 的极化电压变化率中存在一个与电流、初始 SOC、初始极化状态和老化程度无关的拐点,极化电压变化率趋于稳定且在该拐点后保持一个较小值,进而提出了一种以极化电压为控制目标的基于恒极化充电的模糊控制充电算法,与传统 CC-CV 充电法相比,该充电控制算法显著缩短充电时间,且没有明显的寿命损失。

文献[105]提出了一种安全无损快速充电策略。基于降维负极电位估计模型,开发了负极电位闭环观测器,基于负极电位观测值开发了电流在线优化控制器及耦合控制策略,该策略根据输出反馈自适应修正

内部状态，实现内部电位实时精确观测，通过自动调整充电电流，使观测到的阳极电位始终保持在目标值附近，既减少了充电时间，也保证了电池运行在安全充电区间内。

3 挑战与趋势

为了减少用户的里程焦虑和满足客户充电期望这一需求，促使许多汽车制造商将快速充电能力作为电动汽车电池组的关键设计参数。近年来，大量的研究投入到了快速充电策略的各个方面，但仍存在许多知识欠缺^[106]。

3.1 当前充电技术面临的挑战

至今，研究人员已经开发出多种充电方法，以满足电动汽车快充所需，但每种充电方法各有优缺点，各种充电方法的不足之处如表 2 所示。

表 2 不同充电方法的缺点

充电方法	不 足 之 处
CC	1) 不能完全充满电；2) 充电时间长；3) 过充或欠充
CV	1) 寿命循环衰减；2) 充电时间长
CC-CV	1) 负极析锂；2) 充电时间长；3) 温升高
PC	1) 控制方法困难；2) 极化效应
MCC	1) 负极析锂；2) 过充电；3) 温升高；4) 充电时间长

目前使用的快速充电策略面临的主要挑战之一是充电电流的选择。快充条件下的充电电流倍率应该使充电速度和电池寿命达成一种平衡，为了缩短充电时间周期，目前的方法采用高倍率电流，这使得锂离子以更快的速度脱嵌、转移，这种现象将会导致电池寿命缩减，而且可能会导致电池热失控，大倍率充电还会产生析锂现象，影响锂电池的快速充电能力。

现有的建模方法有明显的局限性。基于等效电路的模型，除了一些物理参数外，不能获取关于电池内部状态信息，其次，获取的信息只在限制的条件下具有可靠性。而另一方面，全阶电化学模型的高精确度使其在实时性方面不易实现，而在快速充电条件下，电池参数的准确辨识是至关重要的。表征电池特性的关键参数有电压、电流、SOC 及开路电压，这些参数对充电电流的选择和内部温度的控制具有重要意义。

3.2 最优快速充电策略的实现

如图 4 所示，充电电流倍率、析锂副反应、热稳定性等锂电池特性相互关联，各参数间具有强耦合性。为了提高充电速度及确保安全性，应当精确辨识控制这些关键参数。许多学者提出了耦合电池模型，包括电—热模型、电—热—老化模型等，以获取多目标和最佳的充电策略。建立准确的电池模型后，制定充电时间、充电过程温升、能力损失最小化及容量和循环寿命最大化等目标函数的优化，利用多种智能优化算法，推导出用于控制充电策略和电池温度约束的最优充电电流倍率。

针对锂电池安全快速充电问题，存在的主要挑战在于：一是电池自身能够承受较大充电电流，这对电池极化电阻提出了更高的要求；二是电池在承受大倍率电流充电后，仍能维持良好的工作性能、循环寿命和热安全性，这就要求电池活性材料稳定性方面足够可靠。

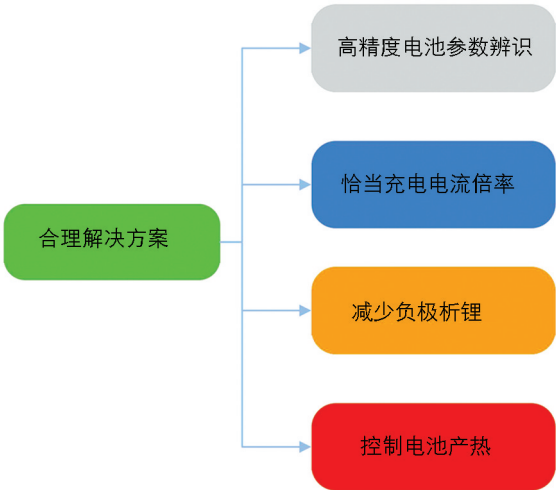


图 4 最优快速充电策略实现路径

4 结 论

综上所述,本文总结了锂电池的充电特性,系统地回顾和比较了目前锂电池的主流充电方法以及部分优化充电策略,这些优化充电策略在缩减充电时间、提高充电效率和延长电池使用寿命方面均有卓越的表现,探讨了目前锂电池快充策略的研究热点、难点,对于今后实现锂电池快充的关键技术、策略进行了展望.

参考文献:

- [1] 李昆,赵理,赵博阳,等. 基于频繁项统计的流—安时积分 SOC 估计方法 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(11): 1-7.
- [2] MAKEEN P, GHALI H, MEMON S. Controllable Electric Vehicle Fast Charging Approach Based on Multi-Stage Charging Current Methodology [C] //2020 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon). December 7-8, 2020, Penang, Malaysia. IEEE, 2020: 398-403.
- [3] 周旋,周萍,郑岳久,等. 锂离子电池宽温度区间无析锂快充策略 [J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11(3): 397-405.
- [4] 莫兴丹,刘伟,谢健,等. 碱锰电池的小电流恒阻放电特性 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(5): 220-225.
- [5] 殷娟娟,王伟贤,袁小溪,等. 退役锂电池快速评价及分选方法研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(2): 15-23.
- [6] 黄泽好,金龙娥,邹艾宏,等. 乘用车关门声声品质 GA-SVR 预测研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(6): 187-194.
- [7] 马天翼,苏素,张宗,等. 计算机断层扫描技术在锂离子电池检测中的应用研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(2): 133-139.
- [8] ZOU C F, HU X S, WEI Z B, et al. Electrochemical Estimation and Control for Lithium-Ion Battery Health-Aware Fast Charging [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6635-6645.
- [9] CHU Z Y, FENG X N, LU L G, et al. Non-Destructive Fast Charging Algorithm of Lithium-Ion Batteries Based on the Control-Oriented Electrochemical Model [J]. Applied Energy, 2017, 204: 1240-1250.
- [10] 金智林,李静轩,李宇柔. 基于电控液压制动的汽车稳定性多目标协同控制 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(3): 10-15.
- [11] 魏永琪,赵玉兰,负海涛. 基于内阻估计燃料电池热功率的建模与分析 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(11): 117-123.
- [12] 葛帅帅,杨雨番,郭栋,等. 电动汽车电驱动系统机电耦合动态特性研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(5): 50-57.
- [13] DESHPANDE R, CHENG Y T, VERBRUGGE M W. Modeling Diffusion-Induced Stress in Nanowire Electrode Structures [J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(15): 5081-5088.
- [14] VETTER J, NOVAK P, WAGNER M R, et al. Ageing Mechanisms in Lithium-Ion Batteries [J]. Journal of Power Sources, 2005, 147(1-2): 269-281.
- [15] 龚敏明,卞景季,孙丙香,等. 锂离子电池分数阶等效电路模型低频参数演变规律研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(2): 6-14.
- [16] 周思宇,杨建伟,顾博,等. 基于城市特征差异性的充电设施规划 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(10): 133-141.
- [17] LIU S Y, SU J M, ZHAO J Y, et al. Unraveling the Capacity Fading Mechanisms of $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ at Elevated Temperatures [J]. Journal of Power Sources, 2018, 393: 92-98.
- [18] 刘晋霞,李庆烨,刘宗锋. 协同线圈对电动汽车动态无线充电系统的影响分析 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(2): 57-63.

- [19] LI J, DOWNIE L E, MA L, et al. Study of the Failure Mechanisms of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ Cathode Material for Lithium-Ion Batteries [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 162(7): 1401-1408.
- [20] SPINGLER F B, WITTMANN W, STURM J, et al. Optimum Fast Charging of Lithium-Ion Pouch Cells Based on Local Volume Expansion Criteria [J]. Journal of Power Sources, 2018, 393: 152-160.
- [21] MUKHOPADHYAY A, SHELDON B W. Deformation and Stress in Electrode Materials for Li-Ion Batteries [J]. Progress in Materials Science, 2014, 63: 58-116.
- [22] LU B, SONG Y C, ZHANG J Q. Selection of Charge Methods for Lithium-Ion Batteries by Considering Diffusion Induced Stress and Charge time [J]. Journal of Power Sources, 2016, 320: 104-110.
- [23] YANG L J, CHENG X Q, MA Y L, et al. Changing of SEI Film and Electrochemical Properties About MCMB Electrodes During Long-Term Charge/Discharge Cycles [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2013, 160(11): A2093-A2099.
- [24] 刘西, 张隆, 胡远志. 缩微智能车巡航控制系统开发方法研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(12): 18-26.
- [25] YANG X G, LENG Y J, ZHANG G S, et al. Modeling of Lithium Plating Induced Aging of Lithium-Ion Batteries: Transition from Linear to Nonlinear Aging [J]. Journal of Power Sources, 2017, 360: 28-40.
- [26] AGUBRA V, FERGUS J. Lithium-Ion Battery Anode Aging Mechanisms [J]. Materials, 2013, 6(4): 1310-1325.
- [27] SU L, ZHANG J, WANG C, et al. Identifying Main Factors of Capacity Fading in Lithium-Ion Cells Using Orthogonal Design of Experience [J]. Applied Energy, 2016, 163: 201-210.
- [28] 何洪文, 石曼, 曹剑飞, 等. 基于动态规划的再生制动能量管理策略 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(2): 74-80.
- [29] ZHANG Q, WHITE R E. Capacity Fade Analysis of a Lithium-Ion Cell [J]. Journal of Power Sources, 2008, 179(2): 793-798.
- [30] WANG J, LIU P, HICKS-GARNER J, et al. Cycle-Life Model for Graphite- LiFePO_4 Cells [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3942-3948.
- [31] JALKANEN K, KARPPINEN J, SKOGSTROM L, et al. Cycle Aging of Commercial NMC/Graphite Pouch Cells at Different Temperatures [J]. Applied Energy, 2015, 154(15): 160-172.
- [32] CHANG Y, LI H, WU L, et al. Irreversible Capacity of Graphite Electrode in Lithium-ion Batteries [J]. Journal of Power Sources, 1997, 68(2): 187-190.
- [33] 贺灵明. 基于电化学—热—副反应耦合模型的锂离子电池老化研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [34] RAMADASS P, BALA H, RALPH W, et al. Mathematical Modeling of the Capacity Fade of Li-Ion Cells [J]. Journal of Power Sources, 2003, 123(2): 230-240.
- [35] SCHMIDT A P, BITZER M, IMRE Á W, et al. Model-Based Distinction and Quantification of Capacity Loss and Rate Capability Fade in Li-Ion Batteries [J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(22): 7634-7638.
- [36] BARRÉ A, DEGUILHEM B, GROLLEAU S, et al. A Review on Lithium-Ion Battery Aging Mechanisms and Estimations for Automotive Applications [J]. Journal of Power Sources, 2013, 241: 680-689.
- [37] NING G, WHITE R E, POPOV B N. A Generalized Cycle Life Model of Rechargeable Li-Ion Batteries [J]. Electrochimica Acta, 2006, 51(10): 2012-2022.
- [38] DAI H F, WEI X Z, SUN Z C. A New SOH Prediction Concept for the Power Lithium-Ion Battery Used on HEVs [C] //2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. September 7-10, 2009. Dearborn, MI. IEEE, 2009: 1649-1653.
- [39] YOU G W, PARK S, OH D. Real-Time State-of-Health Estimation for Electric Vehicle Batteries: A Data-Driven Approach [J]. Applied Energy, 2016, 176: 92-103.
- [40] PETZL M, KASPER M, DANZER M A. Lithium Plating in a Commercial Lithium-Ion Battery-A Low-Temperature Aging Study [J]. Journal of Power Sources, 2015, 275: 799-807.

- [41] 何志刚, 魏涛, 盘朝奉, 等. 一种基于粒子滤波和多项式回归的锂离子电池剩余寿命间接预测方法 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(11): 27-33.
- [42] 苏来锁. 多应力作用下能量型锂离子电池的老化行为研究 [D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [43] 李旭玲, 刘梦, 姜久春, 等. 计及循环寿命的锂离子电池优化使用研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(2): 40-46.
- [44] ZHANG D, HARAN B S, DURAIRAJAN A, et al. Studies on Capacity Fade of Lithium-Ion Batteries [J]. Journal of Power Sources, 2000, 91(2): 122-129.
- [45] KIDA Y, KINOSHITA A, YANAGIDA K, et al. Study on Capacity Fade Factors of Lithium Secondary Batteries Using $\text{LiNi}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_2$ and Graphite-Coke Hybrid Carbon [J]. Electrochimica Acta, 2002, 47(26): 4157-4162.
- [46] SOMERVILLE L, BARENO J, TRASK S, et al. The Effect of Charging Rates on the Graphite Electrode of Commercial Lithium-Ion Cells: a Post-Mortem Study [J]. Journal of Power Sources, 2016, 335: 189-196.
- [47] YANG X, WANG C Y. Understanding the Trilemma of Fast Charging, Energy Density and Cycle Life of Lithium-Ion Batteries [J]. Journal of Power Sources, 2018, 402: 489-498.
- [48] SCHUSTER S F, BACH T, FLEDER E, et al. Nonlinear Aging Characteristics of Lithium-ion Cells Under Different Operational Conditions [J]. Journal of Energy Storage, 2015, 1: 44-53.
- [49] 胡慧敏. 车用锂离子电池健康状态估计及剩余寿命预测 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [50] GIREAUD L, GRUGEON S, LARUELLE S, et al. Lithium Metal Stripping/Plating Mechanisms Studies: A Metallurgical Approach [J]. Electrochemistry Communications, 2006, 8(10): 1639-1649.
- [51] HONBO H, TAKEI K, ISHII Y, et al. Electrochemical Properties and Lideposition Morphologies of Surface Modified Graphite After Grinding [J]. Journal of Power Sources, 2009, 189(1): 337-343.
- [52] PURUSHOTHAMAN B K, LANDAU U. Rapid Charging of Lithium-Ion Batteries Using Pulsed Currents-A Theoretical Ananlysis [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2006, 153(3): A533-A542.
- [53] ARORA P, DOYLE M, WHITE R E. Mathematical Modeling of the Lithium Deposition Overcharge Reaction in Lithium-Ion Batteries Suing Carbon-Based Negative Electrodes [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1999, 146(10): 3543-3553.
- [54] CANNARELLA J, ARNOLD C B. The Effects of Defects on Localized Plating in Lithium-Ion Batteries [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 162(7): A1365-A1373.
- [55] HAELOW J E, GLAZIER S L, LI J, et al. Use of Asymmetric Average Charge-and Average Discharge-Voltages as an Indicator of the Onset of Unwanted Lithium Deposition in Lithium-Ion Cells [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2018, 165(16): A3595-A3601.
- [56] 邹梦杰. 动力锂离子电池充放电特性与热行为研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [57] 邓涛, 邓彪, 宋刚. 基于 SPC5634 的纯电动汽车整车控制器软件开发与实验 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(2): 32-39.
- [58] 陈莹. 电动车用锂离子电池快速充电技术研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2018.
- [59] 刘艳莉, 戴胜, 程泽, 等. 基于有限差分扩展卡尔曼滤波的锂离子电池 SOC 估计 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 221-228.
- [60] 李家曦, 孙友长, 庞玉涵, 等. 基于并行深度强化学习的混合动力汽车能量管理策略优化 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(9): 62-72.
- [61] KIM J H, LEE S J, KIM S K, et al. Modeling of Battery for EV using EMTP/ATPD Raw [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2014, 9(1): 98-105.
- [62] NYMAN A, ZAVALIS T G, ELGER R, et al. Analysis of Polarization in a li-ion Battery Cell by Numerical Simulations [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2010, 157(11): A1236-A1246.
- [63] 姚雷, 王震坡. 锂离子电池极化电压特性分析 [J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(9): 912-916, 922.
- [64] JIANG J C, LIU Q, ZHANG C P, et al. Evaluation of Acceptable Charging Current of Power li-ion Batteries Based on

- Polarization Characteristics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6844-6851.
- [65] 张志强, 丁磊, 陈尉平. 串并联插电混合动力汽车试验研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(11): 63-68.
- [66] 舒星. 电动汽车锂离子电池充电特性及控制策略研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [67] DOUGHTY D H, ROTH E P, CRAFTS C C, et al. Effects of Additives on Thermal Stability of Li-ion Cells [J]. Journal of power sources, 2005, 146(1-2): 116-120.
- [68] QIAN K, ZHOU C, YUAN Y, et al. Temperature Effect on Electric Vehicle Battery Cycle Life in Vehicle-to-Grid Application [C]. China International Conference on Electricity Distribution. IEEE, 2011.
- [69] DUBARRY M, LIAW B Y, CHEN M S, et al. Identifying Battery Aging Mechanisms in Large Format Li-ion Cells [J]. Journal of power sources, 2011, 196(7): 3420-3425.
- [70] 厉青峰. 三元锂离子电池电化学-热耦合多尺度建模与热性能分析研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [71] LANRONG D, CHIEHEN C, HSIANGFU Y. A Robust, Intelligent CC-CV Fast Charger for Aging Lithium-Ion Batteries [C]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 2016.
- [72] FU R J, CHOE S Y, AGUBRA V, et al. Development of a Physics-Based Degradation Model for Lithium-Ion Polymer Batteries Considering Side Reactions [J]. Journal of Power Sources, 2015, 278: 506-521.
- [73] MEI W X, ZHANG L, SUN J H, et al. Experimental and Numerical Methods to Investigate the Overcharge Caused Lithium Plating for Lithium-Ion Battery [J]. Energy Storage Materials, 2020, 32: 91-104.
- [74] CHEN S C, WAN C C, WANG Y Y. Thermal Analysis of Lithium-Ion Batteries [J]. Journal of Power Sources, 2005, 140(1): 111-124.
- [75] 刘磊, 王芳, 樊彬, 等. 热特性方法在动力电池快充性能研究中的应用 [J]. 电源技术, 2018, 42(3): 365-366, 372.
- [76] ROMAIN M, OLIVIER B, PHILIPPE G, et al. Electro-Thermal Behavior of Four Fast Vharging Protocols for a Lithium-Ion Cell at Different Temperatures [C]. IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2018.
- [77] 云凤玲, 卢世刚. 基于高镍三元材料锂离子动力电池在循环前后的热特性分析 [J]. 稀有金属, 2018, 42(2): 182-190.
- [78] ZENG G H, BAI Z H, HUANG P F, et al. Thermal Safety Study of Li-ion Batteries Under Limited Overcharge Abuse Based on Coupled Electrochemical-Thermal Model [J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(5): 3607-3625.
- [79] 齐创, 朱艳丽, 高飞, 等. 过充电条件下锂离子电池热失控数值模拟 [J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(10): 1048-1055.
- [80] ZHENG G, ZHANG W C, HUANG X D. Lithium-Ion Battery Electrochemical-Thermal Model Using Various Materials as Cathode Material: A Simulation Study [J]. Chemistry Select, 2018, 3: 11573-11578.
- [81] 王枫. 锂离子动力电池分段智能充电策略研究 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [82] 劳力. 高比能锂离子动力电池系统充电策略及热失控安全研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [83] DURU K K, KARRA C, VENKATACHALAM P, et al. Critical Insights Into Fast Charging Techniques for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Device and Material Reliability, 2021, 21(1): 137-152.
- [84] 方浩然. 动力锂离子电池分段优化充电方法与应用研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [85] 王越洋. 基于模糊控制的锂离子电池恒定极化充电方法研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018.
- [86] NOTTEN P H L, VELD J H G O H, BEEK J R G V. Boostcahrqing li-ion Batteries: A Challenging New Charging Concept [J]. Journal of Power Sources, 2005, 145(1): 89-94.
- [87] 罗江鹏, 张玮, 王国林, 等. 基于出行链数据的电动汽车充电需求预测模型 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(6): 1-8.
- [88] LIU K L, LI K, YANG Z L, et al. An Advanced Lithium-Ion Battery Optimal Charging Strategy Based on a Coupled Thermoelectric Model [J]. Electrochimica Acta, 2017, 225: 330-344.
- [89] LIU Y H, HSIEH C H, LUO Y F. Search for an Optimal Five-Step Charging Pattern for Li-ion Batteries Using Consecutive Orthogonal Arrays [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(2): 654-661.

- [90] LI J, MURPHY E, WINNICK J, et al. The Effects of Pulse Charging on Cycling Characteristics of Commercial Lithium-Ion Batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2001, 102(1-2): 302-309.
- [91] CHEN L R. Design of Duty-Variied Voltage Pulse Charger for Improving Li-ion Battery Charging Response [J]. *IEEE Transactions on Industrial Eletronics*, 2009, 56(2): 480-487.
- [92] YIN M D, YOUN J, PARK D, et al. Efficient Frequency and Duty Cycle Control Method for Fast Pulse-Charging of Distributed Battery Packs by Sharing Cell Status [C] //2015 IEEE 12th Intl Conf on Ubiquitous Intelligence and Computing and 2015 IEEE 12th Intl Conf on Autonomic and Trusted Computing and 2015 IEEE 15th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops (UIC-ATC-ScalCom). August 10-14, 2015, Beijing, China. IEEE, 2015: 1813-1818.
- [93] PURUSHOTHAMAN B K, LANDU U. Rapid Charging of Lithium-Ion Batteries Using Pulsed Currents [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2006, 153(3): A533-A542.
- [94] WANG S C, CHEN Y L, LIU Y H, et al. A Fast-Charging Pattern Search for Li-ion Batteries with Fuzzy-Logic-Based Taguchi Method [C] //2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). June 15-17, 2015, Auckland, New Zealand. IEEE, 2015: 855-859.
- [95] QIAN L, JUN W, RUI X, et al. Towards a Smarter Battery Management System: A Critical Review on Optimal Charging Methods of Lithium-Ion Batteries [J]. *Energy*, 2019, 183: 220-234.
- [96] IKEY T, SAWADA N, MURAKAMI J A. Multi-Step Constant-Current Charging Method for Elcetric Vehicle Nickel/Metal Hydride Battery with High-Energy Efficiency and Long Cycle Life [J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 105(1): 6-12.
- [97] LUO Y F, LIU Y H, WANG S C. Search for an Optimal Multistage Charging Pattern for Lithium-Ion Batteries Using the Taguchi Approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009.
- [98] SAVOYE F, VENET P, MILLET M, et al. Impact of Periodic Current Pulses on Li-ion Battery Performance [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(9): 3481-3488.
- [99] ZHANG C P, JIANG J C, GAO Y, et al. Charging Optimization in Lithium-Ion Batteries Based on Temperature Rise and Charge time [J]. *Applied Energy*, 2017, 194: 569-577.
- [100] WU X, LIU L, SHEN L, et al. Fast Flexible Charging Strategy for Electric Vehicles Based on Lithium Iron Phosphate Battery Characteristics [C] //2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). September 17-19, 2018, Tianjin, China. IEEE, 2018: 2828-2832.
- [101] CONLEMAN M, HURLEY W G. An Improved Battery Characterization Method Using a Two-Pulse Load Test. *IEEE Trans* [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, 23(2): 708-713.
- [102] 史永胜, 张耀忠, 洪元涛, 等. 基于电—热—老化耦合模型的锂离子电池优化充电策略 [J]. *电子器件*, 2020, 43(5): 1078-1084.
- [103] HUANG S J, HUANG B G, PAI F S. Fast Charge Strategy Based on the Characterization and Evaluation of LiFePO₄ Batteries [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(4): 1555-1562.
- [104] JIUCHUN J, CAIPING Z, JIAPENG W, et al. An Optimal Charging Method for li-ion Batteries Using a Fuzzy Control Approach Based on Polarization Properties [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Techonology*, 2013, 62(7): 3000-3009.
- [105] 褚政宇. 基于降维电化学模型的锂离子动力电池无析锂快充控制 [D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [106] TOMASZEWSKA A, CHU Z Y, FENG X N, et al. Lithium-Ion Battery Fast Charging: A Review [J]. *eTransportation*, 2019, 1: 100011.