

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107623

电动汽车大功率充电设备的多段恒流充电方法^{*}

王 义 刘 欣 高德欣

(青岛科技大学 自动化与电子工程学院 青岛 266061)

摘要: 目前大多数电动汽车充电设备输出功率有限,所采用的充电方法较为简单,造成电动汽车的充电过程存在时间长、能耗高、温升大等问题。为了解决这些问题,设计了一种大功率充电设备,基于最优充电曲线,提出了一种电动汽车的多段恒流充电方法,并将此充电方法应用于大功率充电设备中。首先,设计了大功率充电设备的电气结构图;其次,根据动力电池的充电特性,给出了多段恒流充电方法的实现流程;然后,在大功率充电设备上,与传统的恒流充电方法和恒流恒压充电方法进行了实验对比分析。结果表明,多段恒流充电方法与传统的1C恒流充电和1C恒流恒压充电方法相比,能够缩短5%以上的充电时间,与传统的2C恒流充电方法和2C恒流恒压充电相比,可以降低50%以上的充电温升,并且能够在比较短时间内使电池容量达到80%,满足电动汽车快速充电的要求。因此,本文提出的方法能够均衡电动汽车动力电池的充电时间和充电温升,延长电动汽车动力电池的使用寿命,综合性能更优。

关键词: 电动汽车;大功率充电设备;动力电池;最优充电曲线;多段恒流充电方法

中图分类号: TM910 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Multi-stage current charging method for electric vehicle high-power charging equipment

Wang Yi Liu Xin Gao Dexin

(School of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: At present, most electric vehicle charging devices have limited output power and the charging methods used are relatively simple, which causes problems such as long charging time, high energy consumption and high temperature rise in the charging process of electric vehicles. In order to solve these problems, this paper designs a high-power charging equipment and proposes a multi-stage current charging method for electric vehicles based on the optimal charging curve, and this charging method is applied to the high-power charging equipment. Firstly, the electrical structure diagram of the high-power charging equipment is designed; secondly, the implementation process of the multi-stage current charging method is given according to the charging characteristics of the power battery; then, the experimental comparison and analysis with the traditional constant current charging method and constant current and constant voltage charging method are conducted on the high-power charging equipment. The results show that the multi-stage current charging method can shorten the charging time by more than 5% compared with the traditional 1C constant current charging and 1C constant current and constant voltage charging methods, reduce the charging temperature rise by more than 50% compared with the traditional 2C constant current charging method and 2C constant current and constant voltage charging, and make the battery capacity reach 80% in a relatively short time, which can meet the requirements of fast charging of electric vehicles. Therefore, the method proposed in this paper can balance the charging time and charging temperature rise of electric vehicle power battery, prolong the service life of electric vehicle power battery, and have better overall performance.

Keywords: electric vehicle; high power charging equipment; power battery; optimal charging curve; multi-stage current charging method

0 引 言

我国电动汽车市场在过去几年间经历了爆发式增长,

电动汽车动力电池的续航里程不断增长,动力电池容量不断增加^[1-2]。但是,常用的便携式充电器和家用充电桩大多采用交流充电方式,输出功率有限,使得动力电池很难在较

收稿日期:2021-08-18

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61673357)、山东省重点研发计划项目(公益类)(2019GGX101012)、山东省高等学校科学技术计划项目(J18KA323)、山东省研究生导师指导能力提升项目(SDY18092)资助

短的时间内充满。大功率充电设备具有快速充电的优点,在电动汽车充电领域得到了广泛的应用。日前,大功率充电设备大多都会采用恒流或恒流恒压充电方法对电动汽车进行充电^[3-5]。文献[6]采用恒流充电方法实现了电动汽车动力电池的充电,能够减少充电时间,但会造成动力电池的能量损耗大、温升大、寿命短等问题;文献[7]采用恒流恒压充电方法实现了动力电池的充电,可以减少动力电池充电过程的能量损耗和温升,降低对动力电池的损害,但会增加充电时间。文献[8]提出动力电池存在一条最优充电曲线,如果按照这条最优充电曲线充电,可以降低充电温升、增加充电速率、延长电池使用寿命等。

针对这些问题,本文以动力电池充电的能量损耗和充电时间为基础,构建了充电过程的目标方程,并依据最优充电曲线,提出了一种多段恒流充电方法。在 Matlab/Simulink 中搭建大功率充电设备模型,实现多段恒流充电方法,并将此方法与恒流、恒流恒压的充电方法进行实验分析,验证大功率充电设备是否可以可靠的运行以及本文方法的有效性和先进性。

1 大功率充电设备的原理与结构

大功率充电设备下的电动汽车充电示意图如图 1 所示,电动汽车将动力电池的电压、电流、电池荷电状态(state of charge, SOC)等信息发送到大功率充电设备,大功率充

电设备通过对这些信息进行分析与计算,输出电动汽车所需要电压、电流给动力电池进行充电。

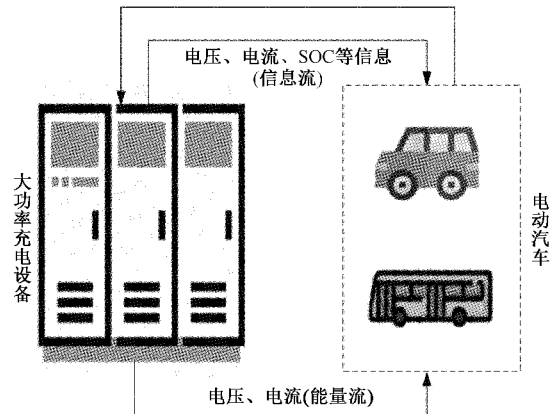


图 1 电动汽车充电示意图

大功率充电设备主要可由三部分构成,这三部分分别是供电系统、交流/直流(alternating current/direct current, AC/DC)变换器和直流/直流(direct current/direct current, DC/DC)变换器。供电系统由三相 380 V 交流电提供,与 AC/DC 变换器连接在一起。AC/DC 变换器不仅要负责对 380 V 的交流电进行整流,还要保持输出的直流电压稳定。DC/DC 变换器进行直流电压的转换,以适应不同电动汽车动力电池的充电需求,其拓扑图如图 2 所示。

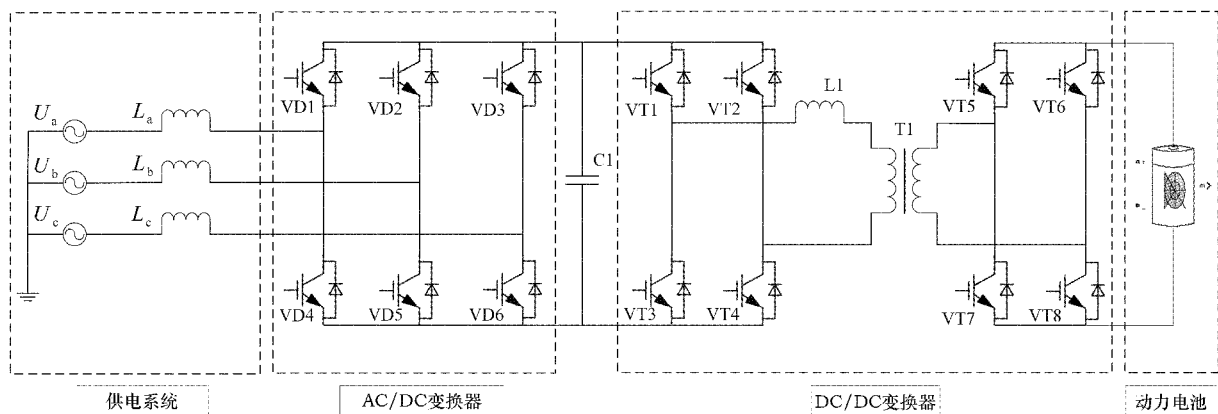


图 2 大功率充电设备结构图

AC/DC 变换器是一种电压型整流器,它采用目前应用最为广泛的电压电流双闭环控制方式和空间矢量脉冲宽度调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)算法产生控制 AC/DC 变换器的脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)信号^[9],实现对供电系统的整流和直流侧电压的稳定。为了保证电动汽车的充电质量和安全性,DC/DC 变换器选用隔离式双有源桥 DC/DC 变换器,它通过采用双移相控制方式产生 PWM 信号^[10],将直流侧电压的能量转换成符合电池组需要的电压、电流给动力电池充电。

2 多段恒流充电方法设计

2.1 最优充电曲线原理

动力电池的充电过程存在一条最优充电曲线,如图 3 所示^[11-12]。由图 3 可知,动力电池在充电时,可接受的最大充电电流并不是一个常数,而是一条逐渐衰减的指数曲线,如式(1)所示。

$$I = I_0 e^{-\alpha t} \quad (1)$$

式中: I_0 为起始最大充电电流; α 为充电接受率。

最优充电曲线是目前各种充电方法的理论基础,它将

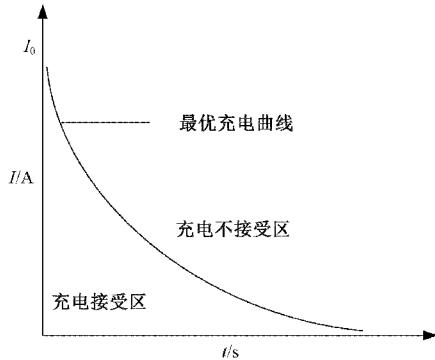


图 3 最优充电曲线图

整个充电过程分成了充电接受区和充电不接受区。当动力电池的实际充电电流位于充电不接受区时,会增加电池的析气现象,减少电池的使用寿命,并且充电效率不高;当动力电池的实际充电电流完全按照最优充电曲线变化时,电池的充电时间最少,充电效率最高;当动力电池的实际充电电流位于充电不接受区时,虽能控制析气现象,延长电池的使用寿命,但是充电电流太小,会增加充电时间^[12]。

根据电池的最优充电曲线可知, $0 \sim t$ 时曲线之下的面积为电池的充电容量,记为 C_s ,可用安时积分法计算,如式(2)所示。

$$C_s = \int_0^t i dt = \int_0^t I_0 e^{-\alpha t} dt = \frac{I_0}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (2)$$

电池完全充满时,充电容量设置为 C (即先前放掉的电池容量),则:

$$\alpha = \frac{I_0}{C} \quad (3)$$

因此,充电接受率 α 为起始最大电流 I_0 和放电容量之比。对于任何一定的充电容量, α 越高, I_0 就越大,充电就越快。显然,如果充电是沿最优充电曲线进行的, α 保持不变。

2.2 多段恒流充电方法设计

动力电池在充电过程中的能量损耗可由欧姆定律和电功计算公式求得,计算公式如式(4)所示。

$$W_{loss}(SOC, I) = \int_{t_0}^t I^2 R(SOC, I) dt \quad (4)$$

动力电池希望在能量损耗较少的情况下最短时间充满,因此目标方程的设计需要综合考虑充电时间和能量损耗。目标方程的所有参数均按无量纲设计,如式(5)所示:

$$J = kMt + (1-k)W_{loss}(SOC, I) \quad (5)$$

式中: kMt 代表动力电池的充电时间; $(1-k)W_{loss}(SOC, I)$ 代表动力电池充电过程中的能量损耗; t 为充电时间; k 为时间在目标方程中所占的比例系数; M 为度量常数(取 $I = 0.5I_0$ 、 $k = 0.5$ 时目标方程中两项取值相等的 M 值)。

比例系数 k 可由极限充电电流变化曲线得到。极限充电电流是指动力电池在处于某一 SOC 下,动力开路电压不超过极限值时相应的充电电流,计算公式如式(6)所示。

$$I_{limit}(SOC) = \frac{U - U_{oc}(SOC)}{R(SOC)} \quad (6)$$

式中: U 为动力电池充电截至电压; $R(SOC)$ 为动力电池不同 SOC 下的直流内阻, $U_{oc}(SOC)$ 为动力电池开路电压。将该曲线上的所有点除以极限电流最大值即可得到比例系数 k 。

$R(SOC)$ 可先根据文献[13]提出的直流内阻测试方法得到动力电池不同电流及 SOC 条件下的直流内阻,直流内阻计算公式如式(7)所示。

$$R\left(SOC, \frac{I_1 + I_2}{2}\right) \approx \frac{U(SOC, I_1) - U(SOC, I_2)}{I_1 - I_2} \quad (7)$$

根据 SOC 对 $R\left(SOC, \frac{I_1 + I_2}{2}\right)$ 求平均值即可得到 $R(SOC)$ 。 $U_{oc}(SOC)$ 可由动力电池直流内阻模型^[14]求得,直流内阻模型满足

$$U(SOC, I) = U_{oc}(SOC) + IR(SOC, I) \quad (8)$$

式中: $U(SOC, I)$ 为电池端电压。

对目标方程 J 进行分析,发现其只有一个极小值且为最小值。因此,可通过对式(5)进行求导,并令其等于 0,即可得到对应比例系数的充电电流 I 。

为了方便大功率充电设备的输出控制,根据马斯最优充电轨线,多段恒流充电方法将整个充电过程分为 10 段,每段 SOC 间隔为 0.1。取比例系数变化在该阶段内的代数平均值 $k(i)$,并根据目标方程求出该阶段的充电电流。

2.3 多段恒流充电方法分析

目前,额定容量为 80~160 Ah 的动力电池在纯电动汽车上应用较为广泛,所以本文以动力电池额定容量为 120 Ah 宝来电动汽车作为研究对象。该动力电池的额定电压为 300 V,最大允许充电电流为 4 C,充电温度的变化范围为 $0^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$ 。

对该动力电池采用 0.1 C~4 C 中间间隔为 0.1 C 的 40 个电流进行恒流充放电实验,根据式(7)得到动力电池不同电流及 SOC 条件下的直流内阻,并基于 SOC 对不同电流及 SOC 条件下的直流内阻求平均值,得到每段 SOC 的动力电池直流内阻 $R(SOC)$ 。采用 0.2 C 电流对动力电池进行充放电,由式(8)得到动力电池的开路电压。根据求得的动力电池直流内阻与开路电压,由式(6)计算得到极限充电电流,进而得到比例系数变化曲线,动力电池的比例系数变化曲线图如图 4 所示。

根据式(4)计算动力电池在每段 SOC 中能量损耗,并根据目标方程,求出整个充电过程多段恒流充电方法的 10 个充电电流,计算结果如表 1 所示。

根据动力电池参数,选取起始最大充电电流为 480 A。将动力电池容量全部放空,根据式(8)求得动力电池的充电接受率 $\alpha = 4$,再由式(1)得到动力电池的最优充电曲线,动力电池多段恒流充电方法的电流变化和最优充电曲线对比图如图 5 所示。

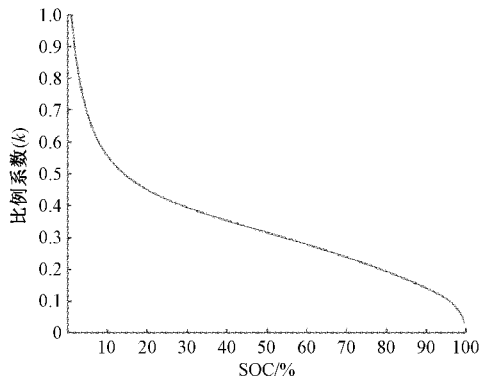


图 4 比例系数变化曲线图

表 1 动力电池各个 SOC 段内的充电电流

SOC(i)	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~0.9	0.9~1
比例系数	0.75	0.49	0.41	0.37	0.33	0.30	0.26	0.22	0.17	0.09
充电电流	3.98 C	2.20 C	1.83 C	1.63 C	1.43 C	1.28 C	1.09 C	0.89 C	0.67 C	0.38 C

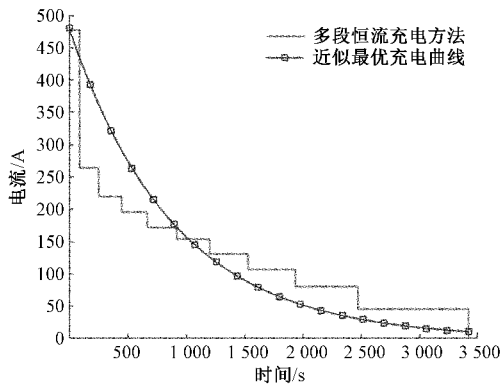


图 5 多段恒流充电方法与最优充电曲线对比图

battery 作为动力电池, 并将其类型设置为 Lithium-Ion, 额定电压设置为 300 V, 额定容量设置为 120 Ah。由于设备建设完成时没有电动汽车充电, 即设备在空载时直流侧电压先达到 700 V。当直流侧电压达到 700 V 后对动力电池进行充电, 观察直流侧电压变化, 直流侧电压变化如图 6 所示。

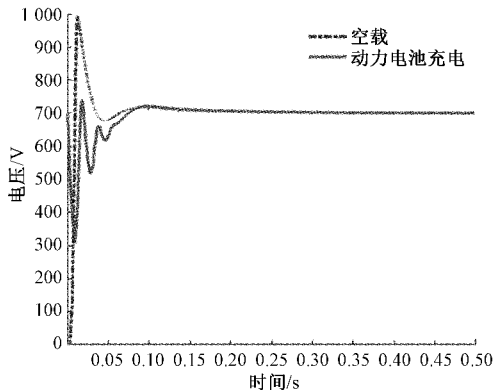


图 6 AC/DC 变换器电压变化图

根据图 5 可知, 多段恒流充电方法的电流变化与最优充电曲线的变化趋势近似相同。在充电前期位于充电接收区, 能够减少电池的析气现象, 增加电池的使用寿命; 在充电末期虽然位于充电不接收区, 但与最优充电曲线差距较小, 可以在对电池健康影响尽可能小的前提下缩短充电时间。

3 仿真与实现

在 Matlab/Simulink 搭建大功率充电设备模型, 并采用多段恒流充电方法实现对动力电池的充电。通过观察 AC/DC 变换器和 DC/DC 变换器运行状况, 验证大功率充电设备运行的可靠性。模型中, 选用 Simulink 库中的

由图 6 可知, 在空载时, 直流侧电压最大达到 998.5 V, 经过短暂的震荡后在 0.2 s 后达到设定电压 700 V; 在给动力电池充电时, 直流侧电压下降到 323 V, 在 0.3 s 后稳定在 700 V。由此可得, 大功率充电设备的 AC/DC 变换器满足保持直流侧电压稳定的要求。DC/DC 变换器实际运行电流和多段恒流充电理想值如图 7 所示。

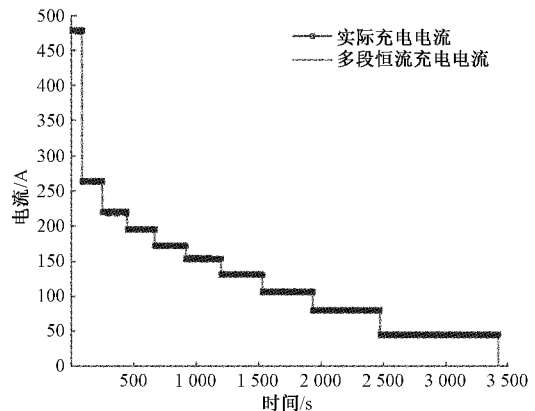


图 7 DC/DC 变换器输出电流图

由图 7 可知, DC/DC 变换器每个充电阶段的输出电流都比较稳定, 能够很好的跟踪多段恒流充电方法所计算的电流。

对动力电池进行多段恒流充电实验, 并与传统的恒流充电方法和恒流恒压充电方法进行对比, 具体实验结果如表 2 所示。

表 2 动力电池实验数据

充电方式	多段恒流	2 C 恒流	1 C 恒流	2 C 恒流恒压	1 C 恒流恒压
时间/s	3 422	1 800	3 601	2 262	4 333
温升/°C	9.89	19.64	9.70	16.51	7.71

由表 2 可知,多段恒流充电方法与 2 C 的恒流充电相比,时间增加了 1 622 s,但是温度降低了 9.75 °C;与 1 C 的恒流充电相比,温度增加了 0.19 °C,但是时间减少了 181 s;与 2 C 恒流恒压充电相比,充电时间增加了 1 160 s,但是温度降低了 6.62 °C;与 1 C 恒流恒压充电相比,温度增加了 2.18 °C,但是时间减少了 911 s。充电过程中动力电池的电压、温度、SOC 变化曲线如图 8 所示。

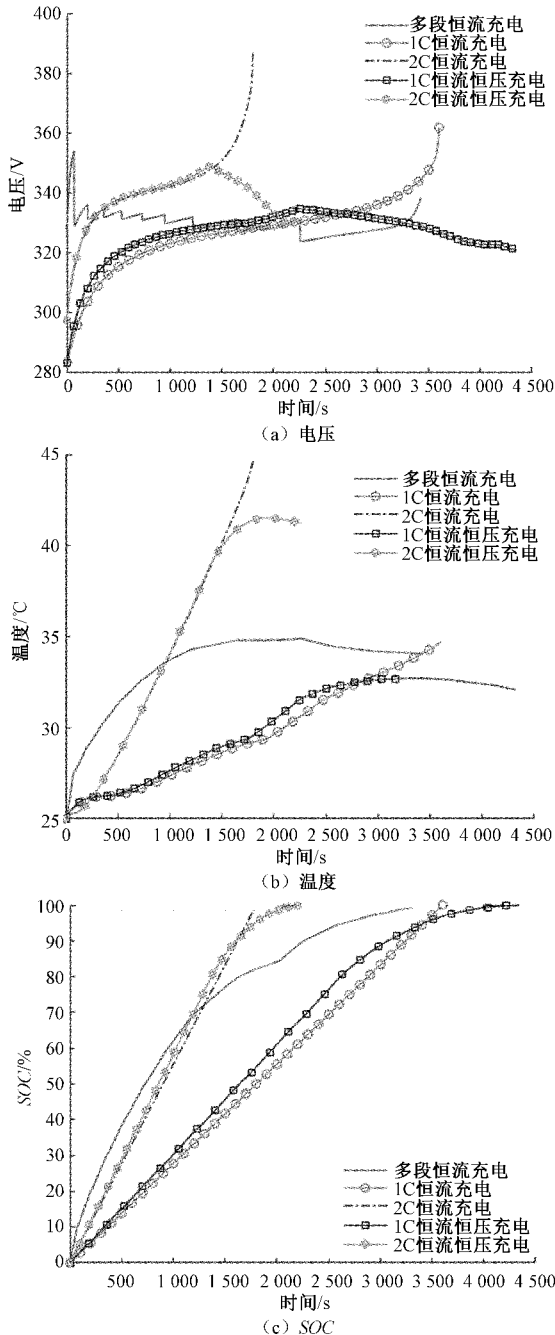


图 8 动力电池电压、温度、SOC 变化曲线图

由图 8 的电压和温度变化可知,多段恒流充电方法具有以下特点:在充电初期,动力电池的温度和电压上升较快;在充电末期,随着充电电流的不断减少,动力电池温度

和端电压逐渐降低。根据图 8 的 SOC 变化可知,2 C 恒流充电和 2 C 恒流恒压充电在 1 500 s 左右 SOC 达到 80%, 1 C 恒流充电和 1 C 恒流恒压充电在 2 600 s 左右 SOC 达到 80%,多段恒流充电方法在 1 700 s 左右 SOC 就可达到 80%。

在充电末期,多段恒流充电方法和恒流恒压充电方法的终止电压相差不大,但是相比恒流充电方法却有大幅度的下降。电池充电终止电压的降低能够减少动力电池内部单体电池端电压的不一致性,减弱单体电池的超电势,增加动力电池的整体寿命,延长动力电池的循环次数^[14-15]。

4 结 论

本文针对电动汽车多数充电设备输出功率有限和采用简单充电方法所存在问题,提出了一种动力电池的多段恒流充电方法,并将其应用于大功率充电设备。多段恒流充电方法是基于动力电池能量损耗和充电时间的目标方程求得,电流变化趋势与最优充电曲线近似,能够兼顾电动汽车的充电时间和充电温升,并且相比于传统的恒流充电方法和恒流恒压充电方法具有更好的充电效果。此实验是通过仿真来验证所提出方法的可行性,并未考虑电动汽车充电时实际环境的影响,因此未来可以考虑环境因素对电动汽车充电的影响。

参 考 文 献

- [1] 符杨, 孟祥浩, 苏向敬, 等. 考虑逆变器无功支撑和三相选择的平衡主动配电网电动汽车有序充电控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 1-12.
- [2] 王杰, 唐菁敏, 刘思淼. 基于用户响应度的电动汽车有序充放电策略[J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 31-36.
- [3] 陈德海, 邹争明, 王超, 等. 基于三段优化法的车载锂电池的快速充电方法[J]. 汽车安全与节能学报, 2019, 10(3): 383-390.
- [4] TILLMANN S, LAHYANI A, ZAYOUD A A. Lithium-ion battery modeling using CC-CV and impedance spectroscopy characterizations [J]. SN Applied Sciences, 2020, 2(5): 1-8.
- [5] FLEURY X, NOH M H, GENIES S, et al. Fast-charging of lithium iron phosphate battery with ohmic-drop compensation method; ageing study[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 12(10): 21-36.
- [6] 程广明, 胡海兵, 邢岩. 电动汽车锂电池快速充电特性的研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(6): 88-90.
- [7] 吴海桑, 刘伟, 陈英杰, 等. 锂离子动力电池充电优化技术现状[J]. 电源学报, 2017, 15(5): 144-152.
- [8] 陈亚爱, 邱欢, 周京华, 等. 基于马斯曲线的铅酸电池快速充电控制策略[J]. 电池, 2020, 50(2):

- 157-161.
- [9] 刘月贤,王天钰,杨亚宇,等. 电动汽车充放电系统建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 70-76.
- [10] 黄帅,江道灼,谷泓杰,等. 多功能电动汽车模块化充放电系统控制研究[J]. 电力建设, 2015, 36(7): 167-174.
- [11] 袁臣虎,唐静雅,刘晓明,等. 锂电池全生命周期充电规划方法研究分析[J]. 电源技术, 2019, 43(10): 1645-1648,1736.
- [12] 袁臣虎,李海杰,王岁,等. 锂电池四阶段智能充电方法的研究[J]. 电源技术, 2019, 43(3): 402-404,414.
- [13] 何志超,杨耕,卢兰光,等. 基于恒流外特性和 SOC 的电池直流内阻测试方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(5): 532-537.
- [14] 刘伟,吴海桑,何志超,等. 一种均衡考虑锂电池内部能量损耗和充电速度的多段恒流充电方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 112-120.
- [15] 和祥运,陈中军. 充电截止电压对镍钴锰动力电池寿命的影响[J]. 电池, 2015, 45(2): 103-105.

作者简介

王义,硕士研究生,主要研究方向为深度学习、电动汽车充电设备与充电方法等。

E-mail:1668375030@qqq.com

刘欣,硕士研究生,主要研究方向为深度学习、锂离子电池检测技术等。

E-mail:1045129518@qqq.com

高德欣,博士,教授,主要研究方向为人工智能、优化控制、电动汽车充电技术等。

E-mail:qdgadexin@126.com