

考虑充电时间和容量的锂离子电池充电优化策略

刘婷, 李勇, 姜利, 黄宇铎, 王祎泉

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 随着锂离子电池被广泛应用, 研究电池的快速充电策略具有重要意义。基于五段恒流充电方法, 以充电时间和容量作为充电性能的考核指标, 提出了一种充电电流的优化策略。首先通过混合动力脉冲测试(HPPC), 建立了电池的二阶 RC 等效电路模型, 遗传算法被用于模型参数的辨识以提高模型精确度。然后分析了不同权重下的充电时间和容量对电池充电性能的影响, 并根据所获得的充电性能来选取最优的电流组合。最后通过与恒流恒压(CC-CV)充电方法进行对比, 验证了所提出优化策略的有效性。所得的最优充电模式在充电容量上比 CC-CV 方法减少了 2.35%; 在充电时间上比恒流阶段电流取 1.5C 时的 CC-CV 方法减少了 3.02%, 比电流取 1C 时的 CC-CV 方法减少了 22.9%。

关键词: 锂离子电池; 充电策略; 多段恒流充电; 等效电路模型

Charging optimization of Li-ion batteries based on charging time and capacity

LIU Ting, LI Yong, JIANG Li, HUAN Yuduo, WANG Yixiao

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: With the wide application of Li-ion batteries, it is of great significance to study the quick charging strategy of batteries. In this paper, an optimal charging current strategy is presented based on the five-stage constant-current charging method, and taking charging time and capacity as the evaluation indexes of charging performance. Firstly, the second order RC equivalent circuit model of the battery is established by hybrid impulse test (HPPC), the GA is used to identify the model parameters to improve the accuracy of the model. Then the optimal charging current with different weights combinations is obtained by changing the weights of charging time and capacity, and the effects of different weights of charging time and capacity on the charging performance of the battery are discussed to determine the final current combination. Finally, the effectiveness of the proposed optimization strategy is verified by comparing with the CC-CV charging method. The proposed charging strategy reduce the charging capacity by 2.35% compared with the CC-CV method, the charging time is 3.02% lower than CC-CV method when the current is 1.5C at the constant-current stage, and 22.9% lower than CC-CV method when the current is 1C.

Key words: Li-ion batteries; charging strategy; multi-stage constant-current charging; equivalent circuit model

0 引言

动力电池是影响电动汽车发展的重要因素, 锂离子电池因其具有高充电效率、低自放电率、高比能量、无记忆效应等优点而被广泛应用在电动汽车中^[1]。与传统汽车相比, 电动汽车虽然具有低噪声、无污染等优点^[2], 但是电动汽车的充电时间较长且电池容量有限, 从而限制了电动汽车的长时间、长距离运行, 因此, 减少电池充电时间和提高充电容量是目前研究的重点之一^[3]。

目前市面上广泛采用恒流恒压(CCCV)的方法给电池充电, 即先以恒定电流给电池充电, 充电过

程中电压上升, 当电压值达到截止电压时改为恒定电压充电^[4]。虽然这种方法能够获得较大的充电容量, 但是在恒压阶段充电速度比较慢并且充电电流受限于最大充电电流, 不能满足快充的需求^[5]。针对这些问题, 研究人员提出了多段恒流充电方法, 并证明该方法具有延长电池寿命、提高充放电效率、缩短充电时间等优点^[6]。寻找电池的最佳充电方式可以看作一个组合优化问题, 智能算法在解决相关问题上得到了广泛应用, 文献[7]采用粒子群算法寻找最优充电电流组合, 但是该算法存在容易陷入局部最优解的问题; 文献[8]采用蚁群算法计算优化电流, 该方法存在计算量大、求解速度慢等问题。文

献[9]和文献[11]采用田口方法, 根据正交表设计实验对五段恒流充电性能进行研究, 但是该方法基于大量的实验数据, 需要较长的研究时间。

基于多段恒流充电策略, 本论文提出了一种将充电时间和容量作为充电性能考核指标的五段恒流充电方法。为了减少实验分析的成本、提高电池模型的精度、加快优化问题的寻优速度, 遗传算法被应用于锂离子电池的参数辨识和最优充电电流的求解。论文第一部分通过混合动力脉冲测试(HPPC)数据辨识出电池等效电路参数。第二部分为考虑充电时间和容量的五段恒流充电策略的电流优化, 并通过仿真分析验证了所得充电模式的有效性。最后对论文所做工作进行了总结。

1 锂离子电池等效电路模型

1.1 二阶 RC 等效电路模型

建立合适的电池模型是研究电池充电的关键。本文采用二阶 RC 等效电路模型^[11], 并通过 HPPC 实验和遗传算法辨识模型参数。电池的等效电路如图 1 所示。

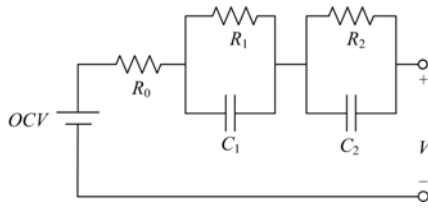


图 1 二阶 RC 等效电路模型

Fig. 1 Second-order RC equivalent circuit model

图中: R_0 是欧姆内阻; R_1 、 R_2 是极化电阻; C_1 、 C_2 是极化电容; OCV 为电池开路电压。

当以恒定电流 I 给电池充电时, 有:

$$V = OCV + IR_0 + V_1 + V_2 \quad (1)$$

式中, V_1 、 V_2 分别是极化电阻 R_1 、 R_2 的端电压。

1.2 HPPC 测试和模型参数辨识

HPPC 测试即采用连续的脉冲激励序列对动力电池进行充放电实验, 以获得电池在不同荷电状态^[12] (SOC: 电池剩余容量和最大容量的比值) 下的动态特性。测试中设置脉冲时间为 30 s, 静置时间为 600 s, 脉冲电流从 0.5 A 递增到 3 A。HPPC 测试结果如图 2 所示。

图 3 是从测试结果中截取的部分曲线, 用于参数辨识。由图 3 可以看出: 当充电电流突变为零时, 式(1)可写为

$$V = OCV + V_1(0)e^{-\frac{t}{\tau_1}} + V_2(0)e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (2)$$

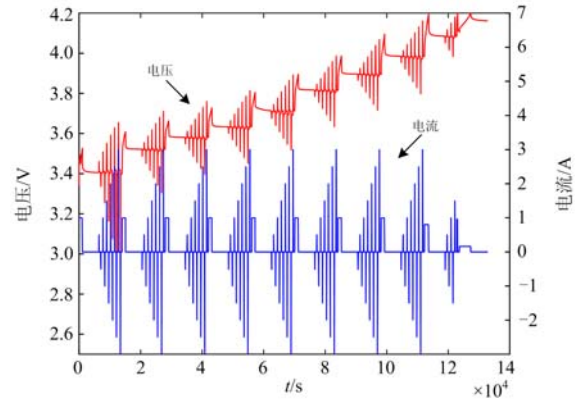


图 2 HPPC 测试结果

Fig. 2 Result of HPPC experiment

式中: $\tau_1 = R_1 \times C_1$, $\tau_2 = R_2 \times C_2$; $V_1(0)$ 、 $V_2(0)$ 分别是静置前一刻 R_1 和 R_2 两端的电压。

电池静置一段时间后, 电池端电压基本稳定, 此时的端电压认为是 OCV ; 再由遗传算法对电池极化阶段的曲线进行拟合, 得到拟合参数 $V_1(0)$ 、 $V_2(0)$ 和 τ_1 、 τ_2 。

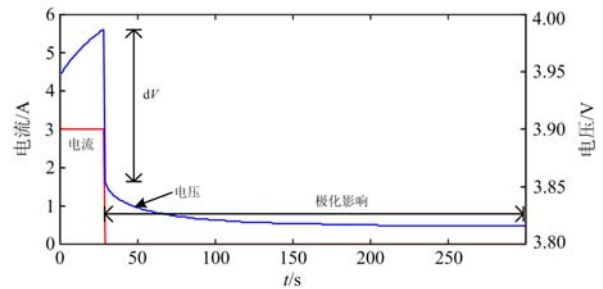


图 3 电池参数辨识

Fig. 3 Battery parameters identification

用遗传算法拟合极化阶段曲线的目标函数为

$$\begin{cases} \text{Minimum obj} \\ \text{obj} = 100 \times ((v_{\text{real}}(1) - v_{\text{fit}}(1)))^2 + \\ \sum_{t=2}^{599} (v_{\text{real}}(t) - v_{\text{fit}}(t))^2 + \\ 100 \times ((v_{\text{real}}(600) - v_{\text{fit}}(600)))^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, v_{real} 、 v_{fit} 分别为实验数据和拟合数据。

R_0 、 R_1 、 R_2 由式(4)计算:

$$\begin{cases} R_0 = \frac{dV}{dI} \\ R_1 = \frac{V_1(0)}{I} \\ R_2 = \frac{V_2(0)}{I} \end{cases} \quad (4)$$

最后再由拟合得到的时间常数计算极化电容

C_1 和 C_2 。

图 4 和图 5 分别为 $SOC=50\%$ 时电池极化曲线的拟合结果和拟合误差。

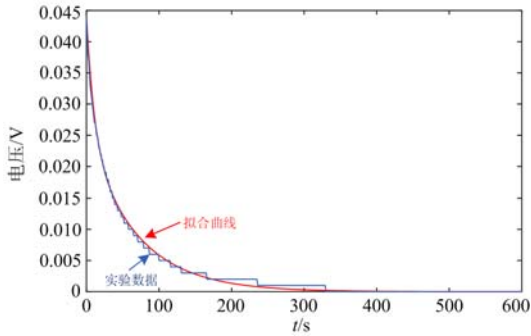


图 4 遗传算法拟合曲线

Fig. 4 Fitting result of GA

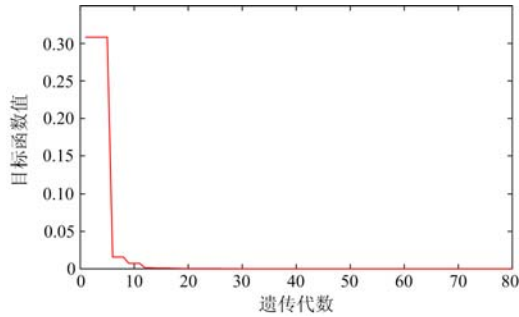


图 5 拟合误差

Fig. 5 Fitting error

按照上述方法计算出不同 SOC 下电池模型的参数值, 如表 1 所示。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

SOC	OCV/V	R_0/Ω	R_1/Ω	R_2/Ω	C_1/F	C_2/F
0	3.317	0.062	0.009 9	0.021 3	1 578.283	649.355
0.05	3.349	0.060 33	0.019 7	0.006 2	903.228	27 337.343
0.1	3.406	0.052 67	0.013 5	0.006 5	1 104.4	16 522.78
0.2	3.522	0.050 67	0.005 9	0.006 8	11 252	1 941.5
0.3	3.581	0.047 33	0.002 9	0.009 4	1 779.6	4 510.6
0.4	3.633	0.046 33	0.002 6	0.011 1	1 362.5	3 768.8
0.5	3.713	0.045	0.006 4	0.007 3	1 731.1	6 490.2
0.6	3.816	0.037	0.004 6	0.008 6	1 437.4	5 191.9
0.7	3.896	0.037 33	0.008 9	0.004 1	1 797.8	29 543
0.8	3.985	0.039 49	0.006 5	0.006 8	10 825	1 590.4
0.9	4.085	0.041 33	0.005 2	0.004 2	11 211	2 225.5
1.0	4.161	0.045 95	0.018 3	0.082 5	10 940	2 755.5

2 五段恒流充电优化策略

2.1 多段恒流充电

多段恒流充电即用阶段性的恒定电流给电池充电, 本文选择五个阶段。如图 6 所示, 每个阶段中,

电池端电压不断升高, 当端电压达到充电截止电压 (一般为 4.2 V) 时, 减少充电电流进入下一个充电阶段, 直到整个充电过程完成^[13]。

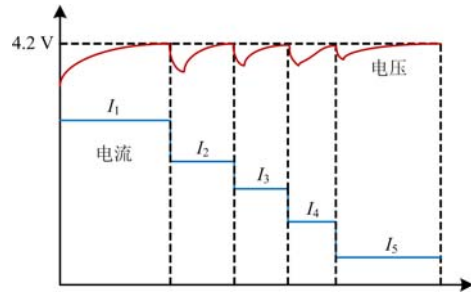


图 6 五段恒流充电

Fig. 6 Five-stage CC charging method

2.2 遗传算法

遗传算法源于生物界的遗传和进化行为, 它是一种解决有约束优化问题 and 无约束优化问题的随机全局搜索方法^[14]。具体操作步骤如图 7 所示。

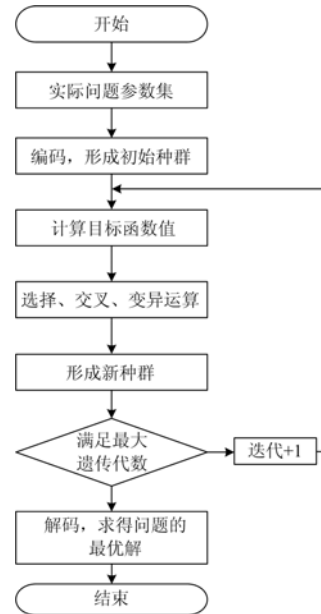


图 7 遗传算法流程图

Fig. 7 Flowchart of genetic algorithm

由图 7 可以看出: 首先需要确定待优化问题的控制参数, 然后将参数编码, 本文的控制参数为五段充电电流, 按二进制码进行编码; 随后初始化种群, 设定种群个体数为 80, 遗传代数为 60 代, 充电电流倍率上限和下限分别设置为 2C 和 0.1C (C 即电池充放电电流倍率, 其值等于充放电电流除以电池额定容量); 然后根据目标函数计算适应度值; 再由适应度值选择个体, 被选个体会进行交叉和变异运算, 交叉即参数编码之间的部分数据交换, 变异是改变参数编码上某一位或某些位的值, 设置交叉

概率为 0.7，变异概率为 0.008^[15]。经过上述步骤得到新种群，然后再重复该过程，直到获得最优解。

2.3 基于遗传算法的五段恒流充电优化设计

本文将充电时间和 SOC 的权值作为优化目标，通过比较不同权值的优化结果，来选择最优充电电流，得到最终的充电方法。目标函数为

$$\begin{cases} \text{Maximize } obj \\ obj = a \times \left(SOC_{\min} + \frac{t_{\max} - t}{t_{\max} - t_{\min}} \times (SOC_{\max} - SOC_{\min}) \right) + \\ (1-a) \times SOC \end{cases} \quad (5)$$

约束条件为

$$\begin{cases} I_1 > I_2 > I_3 > I_4 > I_5 \\ t_{\min} < t < t_{\max} \\ SOC > SOC_{\min} \end{cases} \quad (6)$$

式中： a 为充电时间的权值； $(1-a)$ 为容量的权值； t 和 SOC 分别为当前充电模式下的的充电时间和容量； t_{\max} 和 t_{\min} 分别是充电时间允许的上限和下限； SOC_{\min} 是容量的下限； I_1-I_5 是五段电流值。

2.4 仿真结果和分析

图 8 是 a 取 0.2、0.4、0.6 时的仿真结果，可以看出：目标函数的最大值在不断增加，并在种群遗传到 60 代时趋向稳定，可以认为目标函数在给定条件下收敛。

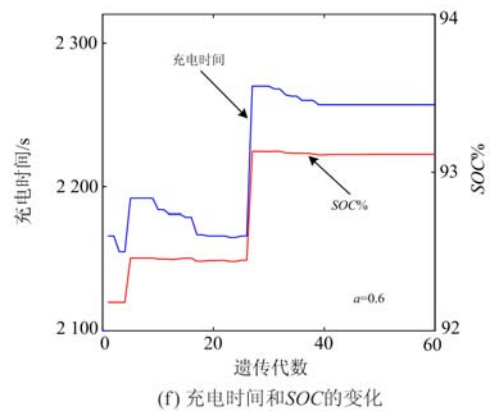
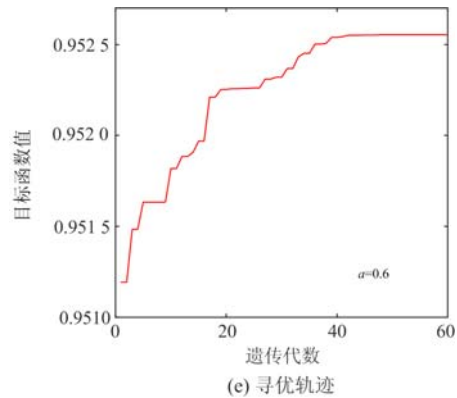
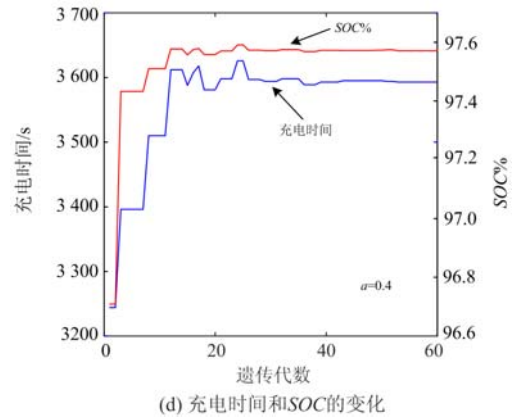
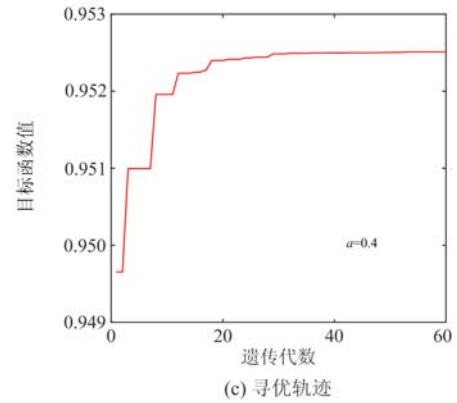
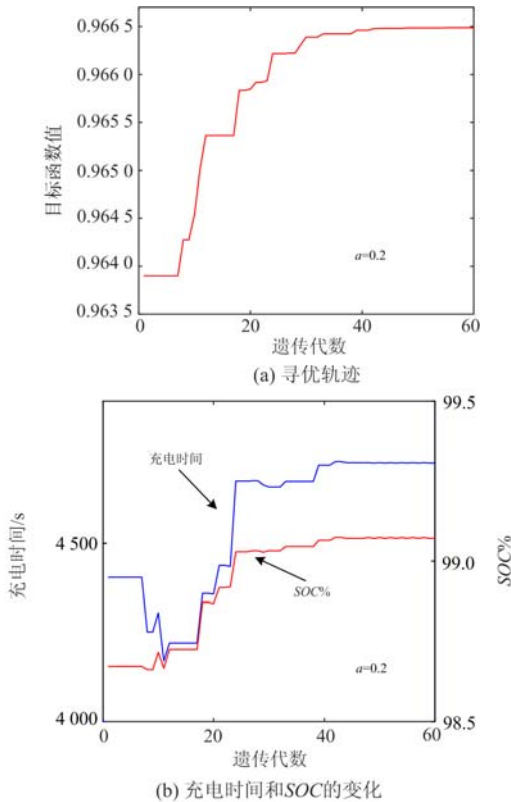


图 8 三种权值的优化结果

Fig. 8 Optimization results of three weights

仿真结果显示, 当 $a=0.2$ 时, 充电时间为 4 726 s, 获得的充电容量为 99.01%; 当 $a=0.4$ 时, 充电时间为 3 593 s, 比 $a=0.2$ 时的充电时间减少 23.97%, 但获得的充电容量只有 97.57%, 减少了 1.45%; 当 $a=0.6$ 时, 充电时间为 2 257 s, 比 $a=0.2$ 时的充电时间减少了 2 469 s, 同时获得的充电容量为 93.11%, 减少了约 5.96%。

表 2 不同加权系数下的优化结果

Table 2 Optimization results under different weighting coefficients

a	t/s	SOC/%	I_1/A	I_2/A	I_3/A	I_4/A	I_5/A
0.1	5 486	99.54	5.114	3.034	1.745	0.268	0.267
0.2	4 726	99.01	4.794	2.668	1.326	0.293	0.293
0.3	4 227	98.14	4.560	3.258	2.162	0.421	0.379
0.4	3 593	97.57	5.108	3.087	1.717	0.469	0.382
0.5	2 344	93.57	5.174	3.462	2.322	1.447	0.852
0.6	2 257	93.11	5.169	3.555	2.607	1.631	0.925
0.7	2 035	91.33	5.149	3.555	2.786	1.862	1.280
0.8	1 768	87.77	5.158	4.035	3.418	2.833	2.156

表 2 为不同加权系数下的优化结果。如表 2 所示, 不同的充电模式对时间和容量的影响很大, 其中时间最长的达到 5 486 s, 最短的时间只有 1 510 s, 容量的差值也达到了 19.19%; 与此同时, 充电过程的后四段电流值受权重影响很大, 权值 a 越大则电流值越大, 充电时间越小, 充电容量也越小, 而第一阶段电流值受权重影响不大。

图 9 画出了各权值下时间和 SOC 的关系, 可以看出: 当 $a < 0.5$ 时, 延长充电时间得到的充电容量的增量较少, 而 $a > 0.5$ 时, 延长充电时间可以获得较多的容量增量。由于时间和容量相矛盾, 很难同时获得较小的充电时间和较大的充电容量, 结合图 9 可知, 应选择曲线上较凸且靠近 $a=0.5$ 的点作为最优点。为了尽量减少充电时间, 同时获得相对合适的容量, 最终选择了 $a=0.4$ 时的充电模式。

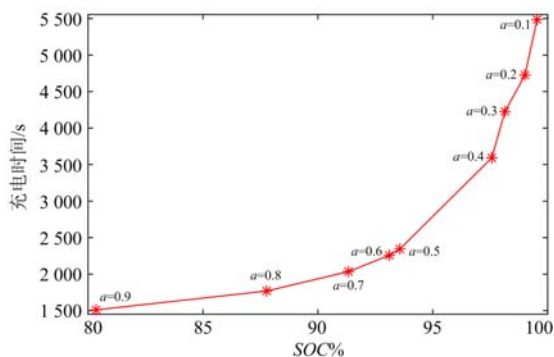


图 9 不同加权系数下充电时间和 SOC 的关系

Fig. 9 Relationship between charging time and SOC under different weighting coefficients

为了验证该充电模式的优劣性, 进行了电池充电的仿真对比测试。对比的充电模式为电池常用倍率下的恒流恒压充电: 1C-CCCV 和 1.5C-CCCV (1C-CCCV 表示恒流阶段充电倍率为 1C 的恒流恒压充电方式, 同理 1.5C-CCCV 表示恒流阶段的充电倍率为 1.5C)。

对比结果如表 3 所示, 1C-CCCV 和 1.5C-CCCV 的充电容量相同, 但 1C-CCCV 的充电时间多出 955 s, 这是由于两者 CC 阶段充电电流倍率不同而 CV 阶段充电截止电流相同导致的; 同时可知 CCCV 充电模式的充电容量主要取决于恒压阶段的截止电流, 恒压充电保证了电池容量足够大, 故上述两种 CCCV 法的充电容量相同, 而充电时间则取决于恒流阶段, 一般情况下恒流值越大充电时间就越短。

对于本文提出的五段恒流充电模式, 该模式的充电时间为 3 593 s, 比 1.5C-CCCV 的充电时间减少 3.02%, 比 1C-CCCV 充电时间减少 22.90%, 即该模式相较于 CCCV 充电能明显减少充电时间, 但是充电容量为 97.57%, 降低了 2.35%。

表 3 三种充电模式结果对比

Table 3 Comparison of three charging models

充电模式	t/s	SOC/%
1C-CCCV	4 660	99.94
1.5C-CCCV	3 705	99.94
提出的充电模式	3 593	97.57

3 结论

论文基于多段恒流充电方法, 以电池充电时间和容量作为充电性能的考核指标, 提出了一种充电电流的优化策略。遗传算法被用于电池模型参数的辨识和充电优化问题的求解, 以提高电池模型的精度和加速优化问题的求解。通过分析充电时间和容量取不同权重时对充电性能的影响, 得到充电时间关于充电容量的关系曲线, 最终获得最优的充电电流。仿真结果表明, 相比于传统的 CC-CV 方法, 所得充电电流能明显减少充电时间, 更适合在快充场合下的应用。

参考文献

- [1] 吴宇平, 袁翔云, 董超, 等. 锂离子电池应用与实践 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 7-8.
 - [2] 张涛, 张东方, 王凌云, 等. 计及电动汽车充电模式的主动配电网多目标优化重构[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 1-7.
- ZHANG Tao, ZHANG Dongfang, WANG Lingyun, et al. Multi-objective optimization of active distribution network reconfiguration considering electric vehicle charging

- mode[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(8): 1-7.
- [3] 李红, 墨柯. 新能源汽车及锂离子动力电池产业研究[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013: 5-6.
- [4] 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): 145-151.
WU Haisang, LIU Wei, CHEN Yingjie, et, al. Current situation of technology in charging optimization of Li-ion battery[J]. *Journal of Power Supply*, 2017, 15(5): 145-151.
- [5] 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.
WANG Feng. Research on multi-segment intelligent charging strategy for lithium-ion battery[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [6] 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): 113-119.
LIU Wei, WU Haisang, HE Zhichao, et al. A multistage current method for Li-ion battery considering balance of internal consumption and charging speed[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(9): 113-119.
- [7] LIU C L, WANG S C, CHIANG S S. SO-based fuzzy logic optimization of dual performance characteristic indices for fast charging of lithium-ion batteries[C] // *IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 2013: 474-479.
- [8] LIU Y H, TENG J H, LIN Y C. Search for an optimal rapid charging pattern for Li-ion batteries using the ant colony system algorithm[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, 57(5): 1328-1336.
- [9] LIU Y H, LUO Y F. Search for an optimal rapid-charging pattern for Li-ion batteries using the Taguchi approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(12): 3963-3971.
- [10] 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.
- [11] 杨驹丰. 基于等效电路模型的锂离子动力电池参数辨识与状态估计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [12] 王闪闪, 赵晋斌, 毛玲, 等. 基于电动汽车移动储能特性的直流微网控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(20): 32-37.
WANG Shanshan, ZHAO Jinbin, MAO Ling, et al. A control strategy based on mobile energy storage characteristic of electric vehicles in DC micro-grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(20): 32-37.
- [13] IKEYA T, SAWADA N, MURAKAMI J. Multi-step constant current charging method for an electric vehicle nickelmetal hydride battery with high-energy efficiency and long cycle life[J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 105(1): 6-12.
- [14] 张铃, 张钺. 遗传算法机理的研究[J]. *软件学报*, 2000, 11(7): 945-952.
ZHANG Ling, ZHANG Bo. Research on the mechanism of genetic algorithm[J]. *Journal of Software*, 2000, 11(7): 945-952.
- [15] 丁丹军, 戴康, 张新松, 等. 基于模糊多目标优化的电动汽车充电网络规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(3): 45-46.
DING Danjun, DAI Kang, ZHANG Xinsong, et, al. Network planning for electric vehicle charging based on fuzzy multi-objective optimization[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(3): 45-46

收稿日期: 2018-03-31; 修回日期: 2018-08-25

作者简介:

刘 婷(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: lting5857@163.com

李 勇(1982—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化运行与控制、电能质量分析与控制; E-mail: yongli@hnu.edu.cn

姜 利(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。E-mail: jiangli0924@hnu.edu.cn