

基于PI控制的分段恒流锂电池充电器设计

徐苏东¹, 袁哲², 阚加荣¹, 卞佳龙¹, 周斌¹, 李炎¹

¹盐城工学院电气工程学院, 江苏 盐城

²和远智能科技股份有限公司, 山东 济南

收稿日期: 2023年7月17日; 录用日期: 2023年9月18日; 发布日期: 2023年9月25日

摘要

为满足锂电池高效率的充电需求, 设计了基于PI控制的分段恒流锂电池充电器。采用同步Buck电路作为主电路, 4节锂离子电池串联成锂电池组作为充电目标, 采用PI算法对锂电池充电器的输出电流、电压进行双闭环控制, 通过可变充电电流实现锂电池组的快速充电。通过MATLAB/Simulink软件建立分段恒流锂电池充电系统的仿真模型, 仿真结果表明, 所设计的分段恒流锂电池充电器相比传统的恒流-恒压充电模式充电速率提高了2.86%, 充电电量提升了4.26%, 验证了该分段恒流锂电池充电器的可行性和高效性。

关键词

锂电池充电器, 分段恒流, 同步Buck, PI算法, 双闭环控制

Design of Segmented Constant Current Lithium Battery Charger Based on PI Control

Sudong Xu¹, Zhe Yuan², Jiarong Kan¹, Jialong Bian¹, Bin Zhou¹, Yan Li¹

¹School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

²Heyuan Intelligence Technology Co., Ltd., Jinan Shandong

Received: Jul. 17th, 2023; accepted: Sep. 18th, 2023; published: Sep. 25th, 2023

Abstract

In order to meet the demand of high-efficiency charging of lithium battery, a segmented constant current lithium battery charger based on PI control was designed. The synchronous Buck circuit is used as the main circuit, and four lithium-ion batteries are connected in series into a lithium battery pack as the charging target. PI algorithm is used to control the output current and voltage of the lithium battery charger in a double closed-loop way, and the lithium battery pack can be quickly

charged by variable charging current. The simulation model of the segment-constant-current lithium battery charging system was established by MATLAB/Simulink software. The simulation results showed that the designed segment-constant-current lithium battery charger increased the charging rate by 2.86% and the charging capacity by 4.26% compared with the traditional constant-current and constant-voltage charging mode. The feasibility and high efficiency of the segmented constant current lithium battery charger are verified.

Keywords

Lithium Battery Charger, Segmented Constant Current, Synchronize Buck, PI Algorithm, Double Closed Loop Control

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着现代电子设备的不断普及和发展, 锂离子电池作为一种高效、高能量、长寿命的电池被广泛应用于移动通讯、数码产品、电动车辆、储能系统等领域[1] [2] [3]。锂电池充电器作为锂电池应用过程中不可或缺的关键部件, 其性能直接影响着电池的使用寿命、安全性和充电速率[4] [5] [6], 因此, 针对锂电池充电器的研究已经成为当前锂电池领域的一个重要研究方向。然而, 锂电池的使用寿命容易受到充电方式的影响, 为了提高锂电池的使用寿命, 人们提出了包括恒涓流、恒流和恒流 - 恒压充电方式[7] [8]。由于恒涓流和恒流充电方法需要较长的充电时间, 其应用受到限制[9] [10]; 恒流 - 恒压充电方式可减少充电时间, 但由于锂电池的可接受充电的能力会随着充电的进行逐渐降低, 在充电后期过大的充电电流会使电池内部产生气泡, 对电池造成损坏, 影响其充电效率[11] [12]。

因此采用分段恒流 - 恒压充电方式, 先采用较大的充电电流对锂电池组充电, 在接近充电截止电压时, 减小充电电流继续充电直至达到充电截止电压, 进入恒压模式。该充电方式相比于传统的恒流 - 恒压充电方式既提高了锂电池的使用寿命, 又加快了充电速率。

2. 充电电路拓扑及其工作原理

2.1. 充电电路拓扑

采用同步 Buck 降压电路进行能量传送, 与传统 Buck 电路区别在于用 MOS 管取代了续流二极管, 由于 MOS 管的导通电阻很小, 通常在毫欧级, 减少了二极管带来的导通损耗, 提高了降压电路的转换效率。同步 Buck 电路拓扑如图 1 所示, 其中 S_1 、 S_2 为功率开关管, 需要一相同的频率信号以互补的方式进行驱动, 电感 L 和电容 C 构成输出滤波电路。

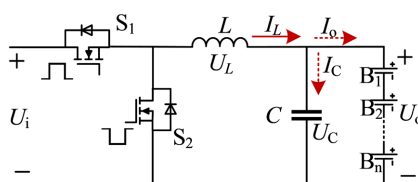


Figure 1. Synchronous Buck charging circuit
图 1. 同步 Buck 充电电路

2.2. 工作原理分析

Buck 变换器采用 PWM 控制方式进行工作, 采用电感电流连续导通模式(CCM), 主要波形图如图 2 所示:

图中, 定义开关管 S 的开通时间为 t_{on} , 关断时间为 t_{off} , 开关周期为 $T = t_{on} + t_{off}$, 则占空比 D 等于

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (1)$$

根据图 1 中所标注的电压和电流量的关系, 可有基尔霍夫电压定律得

$$\begin{aligned} U_i &= U_{S1} + U_o + U_L \\ U_{S2} &= U_o + U_L \\ I_L &= I_C + I_o \end{aligned} \quad (2)$$

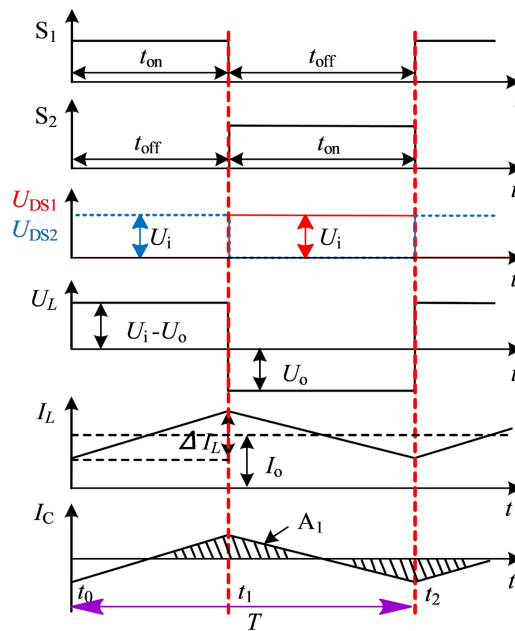


Figure 2. Working waveform of Buck converter in CCM condition

图 2. Buck 变换器在 CCM 状态的工作波形

模态 1: $t_0 \sim t_1$ 阶段, 即开关管 S_1 导通、 S_2 关断时间内, $U_{S1} = 0$, 根据公式(2)可得 $U_L = U_i - U_o$ 。在该段时间内, 电感电流的增加量表达式为

$$\Delta I_{L(+)} = \frac{(U_i - U_o)t_{on}}{L} = \frac{(U_i - U_o)}{L} DT \quad (3)$$

模态 2: $t_1 \sim t_2$ 阶段, 即开关管 S_2 导通、 S_1 关断时间内, $U_{S2} = 0$, $U_L = -U_o$ 。根据公式(2)在该段时间内, 电感电流线性下降, 得到电感电流的下降量表达式为

$$\Delta I_{L(-)} = \frac{(-U_o)t_{off}}{L} = \frac{-U_o(1-D)}{L} T \quad (4)$$

根据 $\Delta I_{L(+)} = |\Delta I_{L(-)}|$, 整理得

$$U_o = DU_i \quad (5)$$

公式(2)中, I_L 和 I_C 分别为电感电流和电容电流在一个开关周期内的平均值。根据电容在一个开关周期内其电流平均值为 0, 即 $I_C = 0$, 因此 $I_L = I_o$ 。

由于电容电流是一个交变量, 造成了输出电压 U_o 有一个波动值 ΔU_o 。(即输出电压纹波), 图 2 中, 电容电流 I_C 波形中的三角形 A_1 的面积为电容在该段时间内电荷的增加量为

$$\Delta Q_1 = \frac{1}{2} \times \frac{T}{2} \times \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{T \Delta i_L}{8} = \frac{\Delta i_L}{8f} \quad (6)$$

式中, f 为变换器的工作频率。则输出电压的波动值为

$$\Delta U_o = \frac{\Delta Q_1}{C} = \frac{\Delta i_L}{8fC} = \frac{(1-D)U_o}{8LCf^2} \quad (7)$$

从式(7)可以看出, 在电感电流波动值 Δi_L 、开关频率 f 一定的条件下, 输出电压波动值 ΔU_o 与电容 C 的大小成反比。

电感电流 I_L 是一个呈周期性脉动的锯齿波, 电感电流的平均值与输出的负载电流 I_o ($I_L = I_o$) 相等, 其电感电流的纹波值为

$$\Delta I_L = KI_o \quad (8)$$

式中: K 是纹波系数, K 值越小则电感电流的波动值越小, 一般取值范围为 0.2~0.4。

将式(3)代入(8)中, 得电感 L 的值为

$$L = \frac{(U_i - U_o)t_{on}}{KI_o} = \frac{(U_i - U_o)}{KI_o} DT \quad (9)$$

3. 系统控制策略

3.1. 系统充电控制流程图设计

分段恒流锂电池充电系统控制程序的主要功能是通过分析充电过程中锂电池组的各项参数并与已设定的参数进行比较, 然后给出相应的充电模式, 其充电控制流程图如图 3 所示。

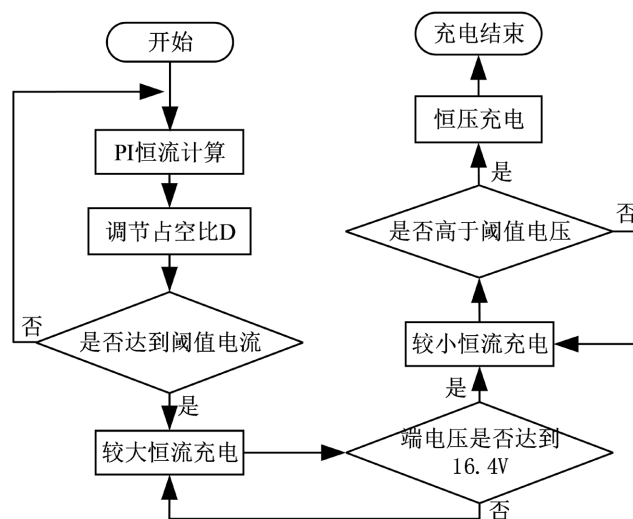


Figure 3. Charge control flow chart

图 3. 充电控制流程图

3.2. 充电控制策略

锂电池充电闭环控制采用电压电流双闭环控制结构如图 4 所示，由电流内环和电压外环组成，电压外环通过电压参考值 U_{ref} 对输出电压 U_o 进行调节，并给电流内环给定一个参考值 I_{ref} ，电流内环对电感电流 I_L 进行控制，并将电流控制器产生的值 U_r 和三角波 U_c 进行比较，产生可以控制开关管 S_1 、 S_2 导通与关断所需的占空比 D ，其中控制器由 PI 调节器和限幅器组成。

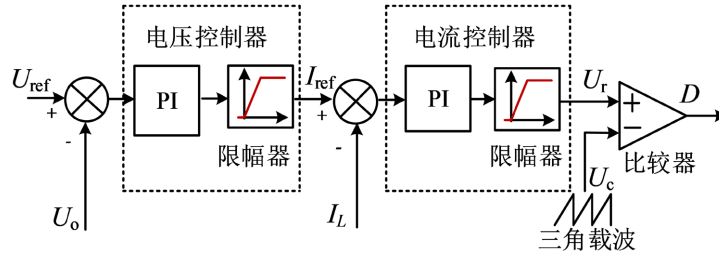


Figure 4. Voltage and current double closed loop control structure diagram
图 4. 电压电流双闭环控制结构图

控制策略中以电压控制器为例进行 PI 算法的分析，其控制框图如图 5 所示，通过控制调节系统中参数，让系统的静态响应和动态特性可以接近于系统理论需求状态，降低系统稳态误差，提高快速性和稳定性。

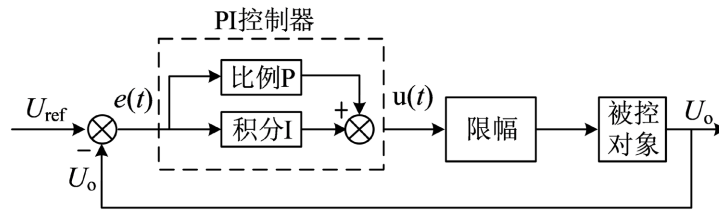


Figure 5. PI control block diagram
图 5. PI 控制框图

系统输出信号 $u(t)$ 与输入信号之间 $e(t)$ 的函数关系，即 PI 控制算法数学关系式为：

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \tag{10}$$

其中 K_p 为比例系数， T_i 为积分系数，通过比例环节减小误差，然后经过积分环节提高系统精度，减少调节响应时间。

将积分环节离散化得：

$$\int_0^t e(t) dt = \sum_{n=0}^k T e(n) \tag{11}$$

将公式(11)代入式(10)中，得到 PI 控制器离散化后数学公式为：

$$u(k) = K_p e(k) + \frac{K_p T}{T_i} \sum_{n=0}^k e(n) \tag{12}$$

4. 实验验证

4.1. 仿真参数设置

通过 MATLAB/Simulink 软件搭建了锂电池充电系统仿真模型，通过对恒流 - 恒压和分段恒流 - 恒压

两种充电模式进行仿真，为加快仿真时间，将提高锂电池模块的初始 SOC 值和初始电压值，在仿真过程中，以锂电池模块代表 4 节串联锂电池组，其系统仿真参数设置见表 1。

Table 1. System simulation parameters
表 1. 系统仿真参数

系统参数	数值
输入电压 U_i	25 V
锂电池模块初始电压	14.2 V
锂电池模块初始 SOC	70%
锂电池模块电池容量	2 Ah
传统恒流充电电流值	2 A
分段恒流切换电流值	2.5 A/1.5 A
分段恒流切换电压值	16.4 V
充电恒压值	16.6 V
主电路电感 L	680 μ H
输出侧电容 C	470 μ F
开关管 S_1 、 S_2 开关频率	20 kHz
电压控制器 PI 值	P = 60, I = 0.2
电流控制器 PI 值	P = 0.3, I = 45

4.2. 仿真结果分析

图 6 和图 7 分别为恒流 - 恒压和分段恒流 - 恒压两种充电模式的电感电流、输出电压波形图，图 8 为分段恒流充电模式的电感电流、电压仿真结果，图 9 和图 10 分别为恒流 - 恒压和分段恒流 - 恒压两种充电模式 SOC 曲线图。

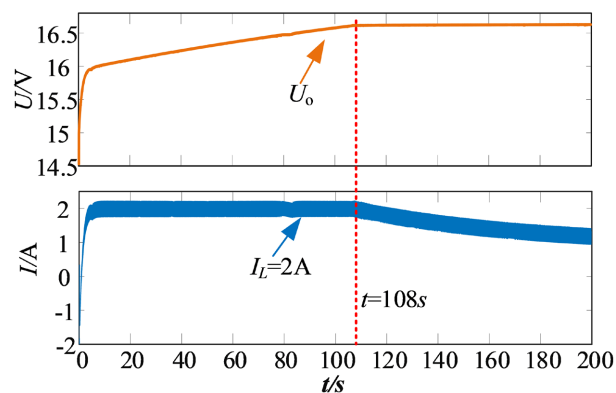


Figure 6. Constant current-constant voltage waveform diagram
图 6. 恒流 - 恒压波形图

图6为恒流-恒压波形,该充电模式在108s时锂电池组端电压达到了充电恒压值,由于充电电流逐渐减少,则SOC上升速率明显下降;从图9中可以看出整个充电过程中锂电池组SOC增加了23.5%。

图7中分段恒流-恒压模式先以2.5A较大电流进行恒流充电,在38s时达到设定的16.4V阈值电压后以1.5A进行再次充电,由于充电电流减小,锂电池电压出现急剧下降,所带来的好处是锂电池的浓差极化和欧姆极化会有所消除,使下一轮的充电更加顺利地进行,充电速度更快,使其在105s时达到充电恒压值。

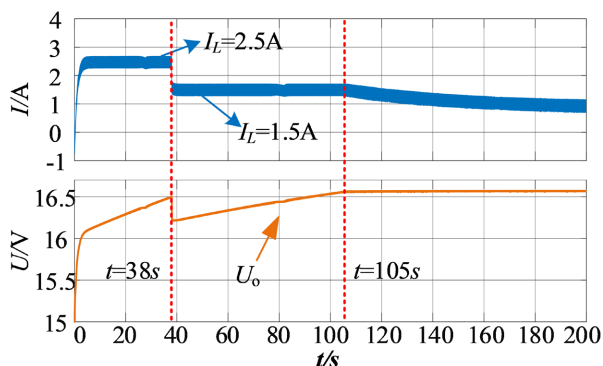
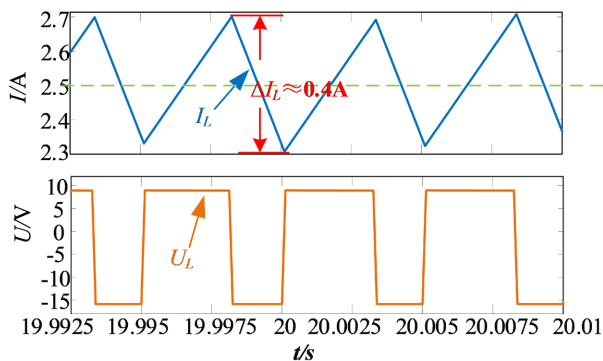
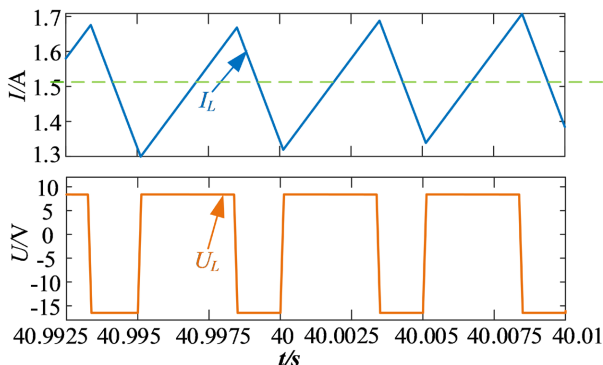


Figure 7. Segmented constant current-constant voltage waveform diagram

图7. 分段恒流-恒压波形图



(a) 2.5 A 恒流充电时电感电流 I_L 和电感电压 U_L 波形图



(b) 1.5 A 恒流充电时电感电流 I_L 和电感电压 U_L 波形图

Figure 8. The simulation results of inductance current and voltage in segmented constant current charging state

图8. 分段恒流充电状态的电感电流、电压仿真结果

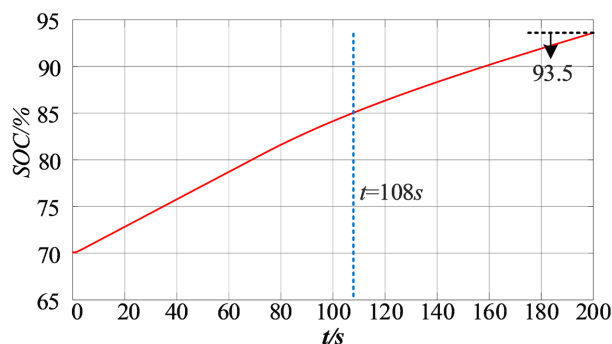


Figure 9. Constant current-constant voltage SOC curve

图 9. 恒流 - 恒压法 SOC 曲线图

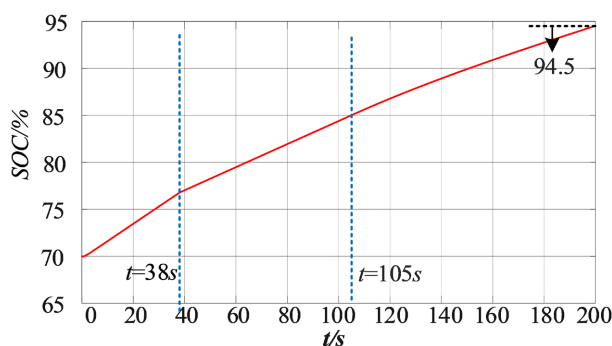


Figure 10. SOC curve of segmented constant current and constant pressure method

图 10. 分段恒流 - 恒压法 SOC 曲线图

图 8 为分段恒流充电模式下 2.5 A 和 1.5 A 电感电流、电压值，可以看出其电感电流纹波值为 0.4 A，将表 1 中的参数带入到式(9)中得出电流纹波系数 K 的值为 0.206，将 K 值代入式(8)中得出电感电流纹波值为 0.41 A，与仿真结果几乎一致。

从图 10 中 SOC 曲线看出，在 38 s 之前分段恒流 - 恒压模式 SOC 上升速率明显快于恒流 - 恒压模式，SOC 在该模式下增加了 24.5%。

表 2 为两种充电模式仿真结果对比，可以看出分段恒流 - 恒压模式相比传统的恒流 - 恒压充电模式充电速率提高了 2.86%，充电电量提升了 4.26%，验证了该分段恒流锂电池充电系统的可行性与高效性。

Table 2. Comparison of simulation results

表 2. 仿真结果对比

充电方法	16.5 V 时刻充电时间/s	SOC 增加量/%
恒流恒压	108	23.5
分段恒流 - 恒压	105	24.5

5. 结论

根据同步 Buck 充电电路拓扑，基于数学模型分析了该电路在电感电流连续运行模式下的工作原理，结合 PI 算法在 MATLAB/Simulink 软件中搭建了分段恒流锂电池充电系统仿真模型，验证了该系统的可

行性, 通过仿真数据比对, 该分段恒流锂电池充电器相对于传统的恒流 - 恒压充电器充电速率提高了 2.86%, 充电电量提升了 4.26%, 既提高了锂电池的使用寿命, 又加快了充电速率, 具有较大的市场应用前景。

参考文献

- [1] Wang, C., Zhang, X., Sun, D. and Gu, W. (2020) A Constant Current Digital Control Method for Primary-Side Regulation Active-Clamp Flyback Converter. 2020 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, 11-15 October 2020, 2934-2938. <https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9235987>
- [2] Xu, S., Qian, Q., Tao, T., Lu, S. and Sun, W. (2019) Small Signal Modeling and Control Loop Design of Critical Conduction Mode Active Clamp Flyback Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **36**, 7250-7263. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3040451>
- [3] Jo, S.W., Seok, H. and Kim, M. (2021) Dual-Mode Resonant Flyback Single Power-Conversion Inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **68**, 5776-5787. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2994887>
- [4] 董瑶. 锂电池组充电器及其管理系统的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [5] Jeong, M.G., Kim, S.H. and Yoo, C. (2016) Switching Battery Charger Integrated Circuit for Mobile Devices in a 130-nm BCDMOS Process. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **31**, 7943-7952. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2514518>
- [6] Lee, W.S., Kim, J.H., Lee, J.Y. and Lee, I.O. (2019) Design of an Isolated DC/DC Topology with High Efficiency of over 97% for EV Fast Chargers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **68**, 11725-11737. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2949080>
- [7] 卢雅豪, 邓军. 一种锂电池快速充电方法的设计与实现[J]. 电子设计工程, 2020, 28(1): 113-117+122.
- [8] 储海军. 可调恒流/恒压增益的无线电池充电器研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东南大学, 2019.
- [9] 马银山. 智能锂电池充电器研究与设计[J]. 电子测试, 2022, 36(24): 27-31.
- [10] 李庆红, 聂俊飞, 罗婷, 等. 基于 STM32 的锂电池充电控制电路设计[J]. 仪表技术, 2022(2): 37-40+62.
- [11] 吴晓刚, 崔智昊, 孙一钊, 等. 电动汽车大功率充电过程动力电池充电策略与热管理技术综述[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(6): 2218-2234.
- [12] 尹涛, 郑莉莉, 贾隆舟, 等. 锂离子电池浮充电研究综述[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(1): 310-318.