

[文章编号] 1003-4684(2023)01-0033-05

基于改进布谷鸟算法的快速充电方法

张 宇, 徐 思

(湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 针对锂离子电池快速充电问题,提出了一种基于改进布谷鸟算法的快速充电方法。首先建立锂离子电池等效电路模型和热模型,然后以充电时间和温升为优化目标,采用多阶充电的方法,最后用改进布谷鸟算法搜索每个阶段的充电电流。讨论了充电时间和温升的权重系数对电池充电性能的影响,与传统布谷鸟算法相比,优化布谷鸟算法充电方法能够在温度升高几乎相同的情况下,充电时间减少约 5% 左右,平衡了充电速度和温升,延长了锂离子电池的使用寿命。

[关键词] 锂离子电池; 改进布谷鸟算法; 充电时间; 温升

[中图分类号] TM912.9 **[文献标识码]** A

电动汽车的发展^[1-2]离不开先进的电池技术,如何实现锂离子电池的快速充电也成为当代的热点之一。充电方法对电池确保高质量运行至关重要,充电控制是最重要的因素之一,会影响充电速度、效率、温升,甚至电池寿命^[3]。目前传统的充电方法有恒流充电、恒压充电和分段式恒流恒压充电^[4]。于春梅等^[5]提出了分段恒流结合脉冲充电的方法,能降低电池的极化反应,减少电池充电时间并提高电池的利用效率,但没有考虑充电过程中的温升问题。井子源等^[6]提出基于 SOC 的充电控制策略,使用充电过程中的温升和能量损耗为指标,通过遗传算法优化每段 SOC 的充电电流,降低了电池功耗,但在充电过程中 SOC 分段方式考虑的样本有限。文滨等^[7]提出一种多阶恒流充电和脉冲充电结合的方法,并用模糊控制对充电过程中的充电电流进行控制,该方法在脉冲充电模式中,脉冲占空比的最优化控制不够完善。Zou C 等^[8]提出一种优化充电时间的快速充电方法,建立了电池的电化学模型,研究电池的热特性,用先进的控制理论预测充电特性,电池的温升为约束条件,结果证明该方法能在保证安全的情况下减少充电时间。

目前对充电性能增强的研究是在优化充电电流,较少能量损耗、充电时间和温升。在充电期间,电池的特征参数和充电电流限制高度依赖 SOC,特征参数在不同的 SOC 范围内变化。所以本文提出一种多目标充电优化方法,充分考虑了不同 SOC 阶

段的充电限制条件。首先提供了等效电路模型和电池热模型,然后提出一种用于锂离子电池多级充电的多目标充电优化策略,最后分成八个阶段优化充电电流,并比较充电结果。

1 锂离子电池建模

1.1 锂离子电池等效电路模型

对图 1 使用 KCL 和 KVL 得:

$$C_1 \frac{dU_p}{dt} + \frac{U_p}{R_1} = I$$
$$U_0 = U(t) - IR - U_p(t)$$

式中, U_p 为电池极化电压,即为 R_1 或 C_1 端电压, I 为电池电流,充电时为正,放电时为负。结合上式,解得电池极化电压

$$U_p(t) = U_p(0) e^{\frac{t}{R_1 C_1}} + I R_1 (1 - e^{\frac{t}{R_1 C_1}})$$

可估算出电池在 t 时刻的 OCV。

$$U_{ocv} = U_{out} + IR + U_p$$

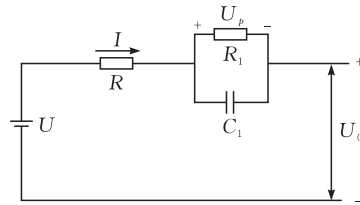


图 1 电池一阶 RC 模型

1.2 锂离子电池热模型的建立

建立热模型用来计算充电期间的温度升高。在本文中,表面温度被认为是电池温度,并且假设是均

[收稿日期] 2021-12-18

[第一作者] 张 宇(1972-),女,湖北松滋人,湖北工业大学教授,研究方向为光伏发电系统应用

[通信作者] 徐 思(1994-),女,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为储能

匀的。电池热平衡方程式可以表示如下:

$$mC \frac{dT_s}{dt} = Q_g - Q_d$$

其中: m 表示电池重量; C 表示热容量; T_s 表示电池的平均表面温度; Q_g 表示发出的能量; Q_d 表示耗散的能量。发热包含两个部分:不可逆转的发热和可逆的发热。

容量测试包括 CCCV 充电和 CC 放电。在 25℃ 时 CCCV 充电进行充电过程,CC 模式的充电电压限制为 3.65 V,CV 模式的截止电流为 0.05 C。放电过程在 1 C 下进行,直到达到 2.5 V。放电容量被视为电池容量。在本文中,C 是电池放电 1 h 的电流速率。电池单元特性参数在每 5% SOC 间隔时识别,然后在 OCV 稳定之前静置 2 h。考虑到充电之间的滞后效应和放电,本文使用的 OCV-SOC 曲线为平均 OCV-SOC 曲线。

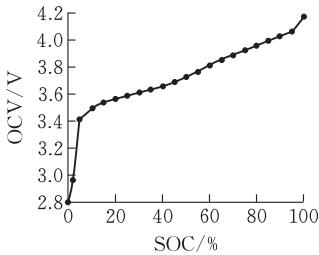


图2 SOC-OCV 图

2 多目标充电优化方法

2.1 恒流-恒压充电法

电池的充电可以描述成从初始 SOC 到最终状态 SOC 的充电过程。传统的 CCCV 充电模式可以充入大约 80% 的 SOC,该模式可以分为两个阶段(图 3),首先电池被恒定的电流预充电至预先设定的截止电压;然后充电模式切换至恒压充电模式,即电池的端电压不变,充电过程一直持续到电流下降到充电时间到达设定的截止时间或者规定的截止电流,达到充电的截止电流需要很长时间。CCCV 充电模式简单且易于实现,但该方法不能满足快速充电要求,第二阶段的恒压充电的小电流会大大延长总体充电时间;而且恒流恒压充电并未考虑电池极化效应的影响,充电末期极化效应的加剧会导致充电能量损失增加以及电池温度上升,对电池的充电造成不利影响。所以应考虑并监测电池温度的上升,并根据不同的充电区域调节充电电流以实现快速充电并确保温度在安全范围内。

2.2 优化方法

本文提出一种多阶恒流充电方法,该优化方法具体步骤如下:首先把充电过程中 SOC 划分为几个阶段,然后把电池的充电时间和温度上升作为目标

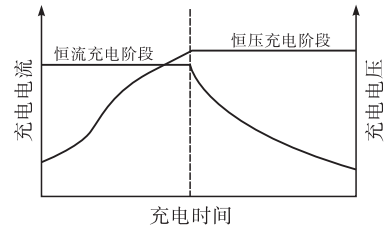


图3 恒流-恒压充电原理

函数,每个阶段的充电电流的约束由充电电流限制和电池特性的参数决定,再使用改进布谷鸟算法优化每个阶段的充电电流。

把 SOC_0 到 SOC_{end} 划分为 n 个阶段,在每个阶段都有恒定的电流 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$,除了最后阶段是 ΔSOC_n ,大多数 SOC 的变化与 ΔSOC 相同,表达式如下:

$$\Delta SOC_n = SOC_{end} - (n-1) \times \Delta SOC_k$$

每个阶段的充电时间如下:

$$t_k = \frac{Q_k}{I_k} = \Delta SOC_k \times \frac{Q}{I_k}$$

其中: I_k 表示第 k 阶段的充电电流; Q_k 表示第 k 阶段的电池容量; t_k 表示第 k 阶段的充电时间; Q 表示电池容量。

所有充电阶段的总时间

$$t = \sum_{k=1}^{n-1} t_k + t_n$$

任何阶段每个时间的 SOC 表达式如下:

$$SOC_{k,n} = SOC_{k,0} + \frac{\int_0^n I_k dt}{Q} \times 100\%$$

其中: k 表示第 k 个充电阶段; n 表示第 n 个采样时间。

充电容量如下所示:

$$Q_{cha} = (SOC_{start} + (n-1) \times \Delta SOC + \Delta SOC_n) \times Q$$

其中: Q_{cha} 表示整个充电过程的电荷质量; SOC_{start} 表示初始状态的 SOC。

每个阶段温升总和

$$\Delta T_{all} = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots + \Delta T_n$$

2.3 目标函数和约束条件

本文的多阶段充电是要减少充电时间并且控制温度升高。但是有一些充电限制,如充电电流、充电电压和 SOC。优化的约束条件如下:

$$\begin{cases} SOC_{min} = 10\% \\ SOC_{max} = 90\% \\ i_{min} = 2.4 \text{ A} \\ i_{max} = 40 \text{ A} \\ U_{min} = 2.5 \text{ V} \\ U_{max} = 3.65 \text{ V} \end{cases}$$

由于充电时期内不同 SOC 范围的模型参数 U, R, R_1 和 C_1 ,需考虑不同阶段的充电条件限

制,充电电流不应超过电池可使用的最大电流,充电电压不应超过充电阶段的最高电压。对于分段恒流充电而言,首先要把充电的过程分成若干个阶段,以 10%SOC 为一个充电的阶段,要将 10%SOC 充到 90%SOC 需要将充电过程分成 8 个阶段,每个阶段的充电电流有 N 种选择,一共有 N8 种选择,对这些选择都进行寻优算法去处理的计算量太大,通过改进的布谷鸟算法可以更有效的得到最优解。

目标函数可以描述为:

$$\begin{aligned} obj &= at + \beta \Delta T \\ \alpha + \beta &= 1 \end{aligned}$$

式中: α 为充电时间在目标函数中的权重系数; β 表示温升在目标函数重点权重系数; t 表示充电时间; ΔT 表示充电过程中的温升。

将目标函数转换为适应度函数:

$$\begin{cases} F(x) = a \times obj + b \\ a = \frac{2}{obj_{\min} - obj_{\max}} \\ b = \frac{2 \, obj_{\min}}{obj_{\max} - obj_{\min}} + 2 \end{cases}$$

适应度范围规定为 $[0, 2]$, 式中 obj_{\min} 为目标函数的最小值, obj_{\max} 为目标函数的最小值。目标函数的值越大, 适应度就越小, 目标函数最小时适应度为 2, 目标函数最大时适应度为 0。电池充电过程中最优的情况是充电时间最小, 同时温升最小, 所以目标函数越大说明充电效果越差。

3 算法介绍

3.1 布谷鸟(CS)算法的基本原理

布谷鸟选择适合自己鸟巢的方式是随机的, 为了模拟布谷鸟的育雏行为, Xin-She Yang 和 Suash Deb 等^[9]提出了以下三条理想规则:

- 1) 每只布谷鸟一次只产一颗蛋, 并随机寻找一个鸟巢放置。
- 2) 在随机寻找的鸟巢中, 最好的鸟巢会保留到下一代。
- 3) 可利用的寄生鸟巢数量是一定的, 宿主鸟能发现外来鸟蛋的概率为 p 。

布谷鸟使用随机搜索的策略来选择宿主巢, 该策略是由 Levy 航班设计的, 这对于解释不同种类生物的食物搜索行为是有用的, Levy Flight 模拟随步行其步长由以下方程定义:

$$levy(\lambda) \approx z^\lambda$$

其中 z 表示飞行长度, λ 表示飞行方差。

3.1.1 莱维飞行 布谷鸟按照莱维飞行的方式来寻找鸟窝:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \alpha \oplus L(\lambda), i = 1, 2, \dots, n$$

式中, $\alpha = \alpha_0 (X_b - X_i^t)$ 代表步长 ($\alpha_0 = 0.01$ 为常数, X_b 代表当前的最优解), X_i^t 代表第 i 个鸟窝在第 t 代的位置, $L(\lambda) = \frac{u}{|v|^{\frac{1}{\beta}}}$ 服从 Levy 分布, 且

$$u \sim N(0, \delta_u^2), v \sim N(0, 1), \beta = 1.5, \delta_u = \left\{ \frac{\Gamma(1 + \beta) \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1 + \beta)/2] \beta 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta}.$$

3.1.2 偏好随机游走 每个布谷鸟蛋都有可能会被鸟窝的主人发现并丢弃, 设鸟蛋被发现的概率为 p , 按偏好随机游走的搜索策略产生新的解:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + r(X_j^t - X_i^t)$$

式中 X_k^t 和 X_j^t 表示两个随机解, $r \sim U[0, 1]$ 是缩放因子。

3.2 PID 控制

PID 控制是指比例、积分、微分控制, PID 控制器问世至今已有近 70 年历史, 它以其结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便而成为工业控制的主要技术之一^[10]。PID 控制系统结构见图 4。

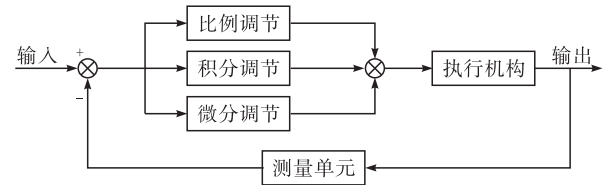


图 4 PID 控制系统结构图

该算法是将输出的结果经过比例、积分、微分 3 种运算方式叠加到输入中, 从而控制系统的行为。输入 $e(t)$ 与输出 $u(t)$ 的关系表达式如下:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

其离散形式的表达式如下:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \sum_t e(t) dt + k_d (e(t) - e(t-1))$$

常用的有 P、PI、PD 和 PID 控制。

3.3 基于 PI 控制的改进 CS 算法

在基本的 CS 算法中令 $k_p = \alpha_0 \frac{u}{|v|^{1/\beta}}$, $e(t) =$

$X_b - X_i^t$, 由此可得

$$X_i^{t+1} = X_i^t + k_p e(t)$$

所以基本的 CS 算法可以看做一个离散的比例控制系统, 因为比例控制存在稳态误差, 让后期布谷鸟算法收敛的精度不是很好。有学者提出了带权重系数 ω 的布谷鸟算法^[11], 如下:

$$X_i^{t+1} = \omega X_i^t + k_p e(t)$$

该方法取得了良好的效果。为了提高收敛速度, 本文提出了一种基于 PID 控制的布谷鸟算法。在上式中加入了积分, 其余不变, 表达式如下:

$$X_i^{t+1} = \omega X_i^t + k_p e(t) + k_i \sum_t e(t)$$

3.4 改进算法的收敛性分析

为了更方便的进行收敛性分析,将 PID 改进的 CS 算法近似为一个连续的系统,使用传递函数分析其收敛的条件。

上式等式两边同时减 X_i^t 有:

$$X_i^{t+1} - X_i^t = (\omega - 1)X_i^t + k_p e(t) + k_i \sum_t e(t)$$

连续系统近似表示如下:

$$\frac{X_i^t}{dt} = (\omega - 1)X_i^t + k_p e(t) + k_i \int e(t) dt$$

设初始条件为 0 进行拉普拉斯变换得:

$$sX_i(s) = (\omega - 1)X_i(s) + k_p E(s) + \frac{k_i}{s} E(s)$$

系统的开环传递函数:

$$G(s) = \frac{X_i(s)}{E(s)} = \frac{k_p + k_i/s}{s - \omega + 1} = \frac{s k_p + k_i}{s(s - \omega + 1)}$$

系统闭环传递函数:

$$\frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{s k_p + k_i}{s^2 + (k_p - \omega + 1)s + k_i}$$

系统的特征方程:

$$s^2 + (k_p - \omega + 1)s + k_i = 0$$
$$s^2 + 2 \frac{(k_p - \omega + 1)}{2 \sqrt{k_i}} \sqrt{k_i} s + k_i = 0$$

如果让系统稳定并震荡衰减就必须满足如下条件:

$$\begin{cases} k_i > 0 \\ 0 < \frac{(k_p - \omega + 1)}{2 \sqrt{k_i}} < 1 \end{cases}$$

初始条件为 0 的情况下,输入一个幅度为 A 的阶跃信号 $r(t) = A(t)$,系统稳态误差是:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s)$$

由 $E(s) = R(s) - X_i(s)$, $X_i(s) = G(s)E(s)$, 可知 $E(s) = R(s) - G(s)E(s)$, 所以 $E(s) = \frac{1}{1 + G(s)} R(s)$, 并得到:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G(s)} R(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + \frac{s k_p + k_i}{s(s - \omega + 1)}} \times \frac{A}{s} = 0$$

由此可知:在传统的布谷鸟算法中加入了积分环节之后,系统稳态误差为 0,提高了收敛速度和收敛精度(图 5、图 6)。

为了比较算法的精度,设定最大进化代数为 5000 并运行 30 次,比较每个测试函数适应度的均值(AVG)和标准差(STD)如表 1 所示,可以看出改进布谷鸟精度在所有测试函数中都能获得最优值 0,较传统布谷鸟有大幅提高。为了比较算法的收敛速度,将目标函数设置为 10^{-6} 并运行 30 次,比较算法的平均收敛代数(AVG)和标准差(SD)如表 2 所

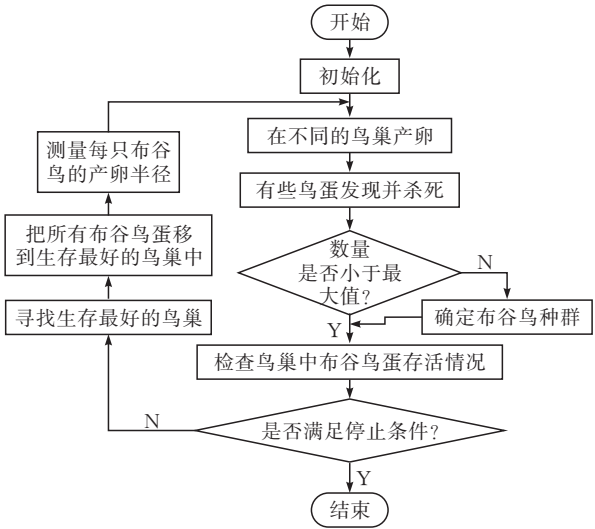


图 5 改进布谷鸟算法流程

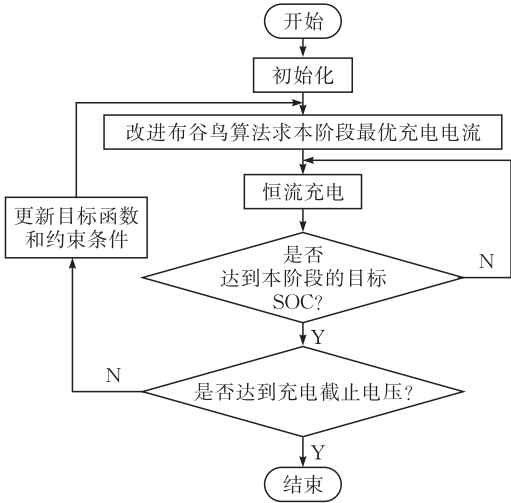


图 6 优化充电流程

示,可以看出改进布谷鸟算法较传统布谷鸟收敛速度大幅提升,且达优率(SR)为 100%。

表 1 精度比较

函数	传统 CS		改进 CS	
	AVG	STD	AVG	STD
F1	6.9346E-14	7.2193E-14	0	0
F2	1.1620E-18	9.1291E-19	0	0
F3	1.6350E-03	6.5712E-04	0	0
F4	8.2536E-01	5.4310E-01	0	0
F5	2.4654E-04	1.3503E-03	0	0

表 2 收敛速度比较

函数	传统 CS			改进 CS		
	AVG	SD	SR/%	AVG	SD	SR/%
F1	1955.93	44.54	100	15.73 *	0.45	100
F2	1279.16	36.76	100	10.03 *	0.18	100
F3	5000	0	0	9.93 *	0.25	100
F4	3181.20	865.61	83.33	16.53 *	0.51	100
F5	2311.03	618.56	96.76	11.83 *	0.38	100

4 实验验证

本文选取的 LiFePO₄ 电池的的参数如下:电池的

额定容量为 8 Ah,额定电压为 3.2 V,工作电压范围为 2.5~3.65 V,最大充电电流倍率为 5C。温升和充电时间权重系数为 $\alpha:\beta=5:5$,利用改进布谷鸟算法求得八个阶段的充电电流为 39.2,36.6,,29.8,14.3,12.9,11.8,8.5 和 9.7A。从图 7 可以看出,文中的温升模型能有效的模拟温度的变化,S1 至 S8 阶段的仿真和测量温度最大相差 0.75℃,测量温度最大上升 4℃并在 1534 s 内完成了充电。

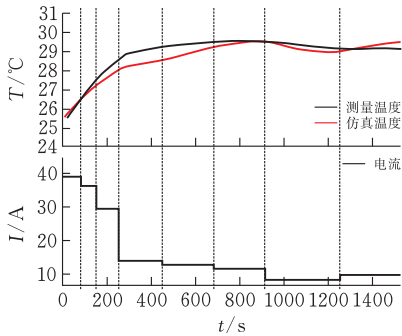


图 7 仿真与实验结果对比

S1 至 S3 阶段的 SOC 值比较小,充电电流很大,测量的温升急剧上升,最大温升达到 3.5℃。S4 至 S6 阶段的充电电流明显减少,温升相对平稳。S7 至 S8 阶段散热量大于发热量,温升略有下降,但

在充电最后阶段因为极化电阻的不稳定性,仿真温度温升明显而测量温度略有下降(图 7)。

在本文中有两个目标函数,一个充电时间,一个温升。 α 代表充电时间的权重系数, β 代表温升的权重系数,SOC 分段比例为 10%,还选取权重比例 $\alpha:\beta=3:7$, $\alpha:\beta=7:3$ 进行对比,结果如图 8 和表 3 所示。在不同的权重系数下,随着 SOC 的增加,充电电流的整体趋势逐渐减小。随着 α 比重增加,充电时间减少,但温升增多。反之充电时间增加,温升减少。从实验结果可以看出,本文提出的方法可以在整个充电阶段优化充电电流,减少了充电时间并控制温升,随着电池的低温升高,还可以有效抑制电池老化。

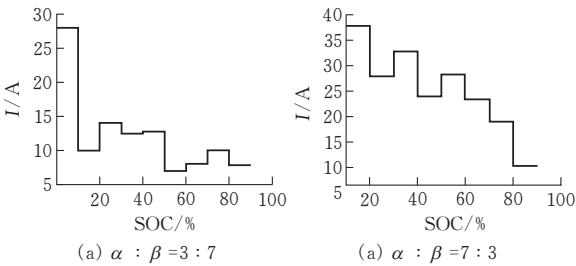


图 8 各权重系数充电电流优化结果

表 3 不同权重系数下温升和充电时间

权重系数	$\alpha:\beta=3:7$		$\alpha:\beta=5:5$		$\alpha:\beta=7:3$	
方法	改进算法	传统算法	改进算法	传统算法	改进算法	传统算法
温升/℃	3.2	3.3	4.0	4.1	4.2	4.4
充电时间/s	1567	1638	1534	1612	1479	1596

5 结论

快速充电作为电动汽车的关键技术,控制电池的充电时间和温升是及其重要的。本文提出了一种充电方法来平衡充电时间和温升,以充电时间和温升为目标,提出改进布谷鸟算法,在传统布谷鸟算法中引入 PID 控制中的积分环节,提高了收敛速度和精度。实验结果表明,所提出的充电方法可以在合理的温度升高的情况下明显减少充电时间,并且权重系数对电池充电性能具有重要影响。

[参 考 文 献]

[1] 王丽瑶.电动汽车充电技术综述[J].时代农机,2019,46(07):96-97.

[2] GAO LONG Z. Fast charging lithium batteries: recent progress and future prospects.[J]. Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany), 2019, 15 (15) : e1805389.

[3] 龚瑞昆,徐广璐.锂离子电池快速充电系统技术研究[J].现代电子技术,2020,43(22):27-29, 35.

[4] YANG X G, ZHANG G, GE S, ET AL. Fast char-

ging of lithium-ion batteries at all temperatures[J]. Proc Natl Acad Sci U S A. 2018;115(28):7266-7271.

[5] 叶剑晓,于春梅,梁奇.电动汽车用锂电池快速充电技术研究[J].电气传动,2018,48(06):93-96.

[6] 井子源. 车用锂离子电池 SOC 预估及充电控制策略研究[D].长春:吉林大学,2018.

[7] 文滨. 电动汽车充电的智能控制策略及系统集成设计研究[D].长沙:湖南大学,2013.

[8] ZOU CHANGFU, HU XIAOSONG, WEI ZHONG-BAO, et al. Electrochemical estimation and control for lithium-ion battery health-aware fast charging [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65 (08):6635-6645.

[9] XIN-SHE YANG, SUASH DEB. Multiobjective cuckoo search for design optimization[J]. Computers and Operations Research, 2013, 40(06) : 1616-1624.

[10] DABIRI A, MOGHADDAM B P, TENREIRO MACHADO J A.Optimal variable-order fractional PID controllers for dynamical systems[J].Journal of Computational and Applied Mathematics,2018,339:40-48.

[11] 周欢,李煜.具有动态惯性权重的布谷鸟搜索算法[J].智能系统学报,2015,10(04):645-651.