

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407281

# 基于变论域模糊 PID 算法的锂电池组级联式均衡控制\*

吴文进<sup>1</sup> 吴晶<sup>1</sup> 郭海婷<sup>1</sup> 查申龙<sup>1</sup> 苏建徽<sup>2,3</sup>

(1. 安庆师范大学电子工程与智能制造学院 安庆 246133; 2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009;

3. 合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室) 合肥 230071)

**摘要:**为了解决锂电池组在长期使用过程中串联单体电池之间电压存在不一致的问题,提出了一种基于变论域模糊 PID 控制的级联式双向 Cuk 均衡电路系统。该系统采用级联式双向 Cuk 均衡电路实现了不相邻电池之间的均衡,采用变论域模糊 PID 算法提高了电池电压的均衡速度。为了验证该系统的可行性与优越性,在 MATLAB/Simulink 中设计了传统双向 Cuk 均衡电路和级联式双向 Cuk 均衡电路仿真模型,模糊 PID 算法和变论域模糊 PID 算法控制下的仿真实验结果对比表明,基于变论域模糊 PID 算法的级联式双向 Cuk 均衡拓扑的均衡时间比未加控制算法的传统双向 Cuk 均衡拓扑的均衡时间减少了 64.29%;比未加控制算法的级联式双向 Cuk 均衡拓扑的均衡时间减少了 50.82%;比基于模糊 PID 算法的级联式双向 Cuk 均衡拓扑的均衡时间减少了 14.29%。系列仿真实验结果对比分析验证了基于变论域模糊 PID 控制的级联式双向 Cuk 均衡电路系统可以提高电池的电压均衡速率。

**关键词:**锂电池组;级联式双向 Cuk 电路;变论域模糊 PID 算法;均衡时间

**中图分类号:** TM912; TN108.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 480.40

## Cascaded equalization control of lithium batteries based on variable discourse domain fuzzy PID algorithm

Wu Wenjin<sup>1</sup> Wu Jing<sup>1</sup> Guo Haiting<sup>1</sup> Zha Shenlong<sup>1</sup> Su Jianhui<sup>2,3</sup>

(1. School of Electronic Engineering and Intelligent Manufacturing, Anqing Normal University, Anqing 246133, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3. Institute of Energy of Hefei Comprehensive National Science Center (Anhui Energy Laboratory), Hefei 230071, China)

**Abstract:** During the long-term use of lithium battery packs, there is a problem of inconsistent voltages among the series-connected individual batteries. To solve this problem, a cascade bidirectional Cuk equalization circuit system based on variable domain fuzzy PID control is proposed in this paper. In this system, a cascade bidirectional Cuk equalization circuit is employed to achieve equalization between non-adjacent cells, and the variable domain fuzzy PID algorithm is exploited to enhance the voltage equalization speed. To verify the feasibility and superiority of the system, simulation models of the traditional bidirectional Cuk equalization circuit and the cascaded bidirectional Cuk equalization circuit were designed in MATLAB/Simulink. The comparison of simulation results under the control of the fuzzy PID algorithm and the variable domain fuzzy PID algorithm reveals that the balancing time of the cascade bidirectional Cuk balancing topology based on the variable domain fuzzy PID algorithm is decreased by 64.29% compared with the traditional bidirectional Cuk balancing topology without a control algorithm. The equalization time of the cascade bidirectional Cuk equalization topology without a control algorithm is reduced by 50.82%. The balancing time of the cascade bidirectional Cuk balancing topology based on the fuzzy PID algorithm is reduced by 14.29%. According to the analysis of the simulation results, it is demonstrated that the cascade bidirectional Cuk equalization circuit system based on fuzzy PID control in the variable theory domain can augment the voltage equalization rate of the battery.

**Keywords:** lithium battery pack; cascade bidirectional Cuk circuit; variable domain fuzzy PID algorithm; equilibrium time

收稿日期: 2024-02-20 Received Date: 2024-02-20

\* 基金项目: 国家自然科学基金(62205005)、安徽高校协同创新项目(GXXT-2021-025)、储能技术学院质量工程项目(2021cyxy045)资助

# 0 引言

电池均衡技术是改善由于制作工艺、日常使用等多方面因素造成电池组中串联电池之间不一致性<sup>[1-4]</sup>问题的重要方法。均衡方法分为主动均衡与被动均衡<sup>[5]</sup>。被动均衡一般是通过电阻放电的方式降低高电压单体电池的电压,电路拓扑简单,但均衡过程中产生的热量会导致电池过热并造成能量损耗。主动均衡是利用储能元件完成电池间的能量转移,具有均衡效率高、能量利用率高等优点。常用的储能元件包括电容、电感、变压器和变换器。文献[6]介绍了电容型均衡拓扑,电压高的单体电池将能量储存在电容中,再通过电路控制传递给电压低的单体电池,但该拓扑存在漏电以及容量储能受限制的缺点。文献[7]介绍了电感型均衡拓扑,通过控制电路中的开关管转移单体电池的电荷,实现电池的均衡,但此方法成本高、响应时间慢。文献[8]介绍了变压器型均衡拓扑,通过控制开关管将高能量电池的能量转移至低能量电池实现均衡,但因成本较高、开关阵列复杂导致适用范围受限。文献[9]介绍了变换器型均衡拓扑,可以实现电路的双向均衡,同时具有充电回路与放电回路,可以实现对能量低的电池充电以及能量高的电池放电,提高均衡效率,缩短均衡时间。

相比于电容型、电感型和变压器型均衡拓扑,变换器型均衡拓扑具有均衡效率高和均衡时间短的优点,所以本文采用双向 Cuk 变换器<sup>[10-11]</sup>作为均衡拓扑结构的基本单元。但传统双向 Cuk 均衡拓扑只能实现相邻单体电池之间的均衡<sup>[12-13]</sup>,因此,本文在传统双向 Cuk 均衡拓扑的基础上提出了一种级联式双向 Cuk 均衡拓扑,均衡控制策略采用变论域模糊 PID 控制算法<sup>[14-15]</sup>该均衡方法可以同时实现相邻单体电池以及电池模组之间的能量转移,缩短串联电池组的均衡时间,提高了均衡效率,不同控制算法下的仿真实验验证了本文提出的均衡方法的有效性。

## 1 均衡拓扑分析

### 1.1 均衡电路

如果以 4 节电池单体构成串联电池组为对象,则构建的传统双向 Cuk 均衡拓扑电路如图 1 所示(图 1~5 的电路拓扑中, B 代表的元件是电池; C 代表的元件是电容; L 代表的元件是电感; D 代表的元件是二极管; Q 代表的元件是开关管)。若电池  $B_1$  的电压高于相邻电池  $B_2$  的电压,则电池  $B_1$  通过电感  $L_1$ 、 $L_2$  和电容  $C_1$  构成的回路将能量直接转移至电池  $B_2$  实现电压均衡;若电池  $B_1$  的电压高于不相邻电池  $B_4$  的电压,则电池  $B_1$  先与相邻的电池  $B_2$  之间均衡,之后依次与电池  $B_3$ 、 $B_4$  之间实现

均衡。该拓扑结构均衡过程时间长,效率低,所以只适用于电池数量少的电池组。

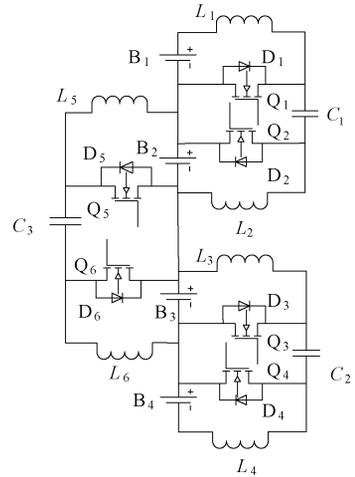


图 1 传统双向 Cuk 均衡拓扑

Fig. 1 Traditional bidirectional Cuk balanced topology

同样如果以 4 节电池单体构成串联电池组为对象,则构建的级联式双向 Cuk 均衡拓扑如图 2 所示。若电池  $B_1$  的电压高于不相邻电池  $B_4$  的电压,则电池  $B_1$  通过电感  $L_a$ 、 $L_b$  和电容  $C$  构成的回路直接将能量转移至电池  $B_4$  实现电压均衡。该均衡拓扑可以同时实现电池  $B_1$  和  $B_2$ 、电池  $B_2$  和  $B_3$ 、电池  $B_3$  和  $B_4$  以及电池模组 1(电池  $B_1$  与电池  $B_2$ ) 和电池模组 2(电池  $B_3$  与电池  $B_4$ ) 之间的均衡,即同时实现相邻单体电池以及电池模组之间的均衡,提高了均衡效率。

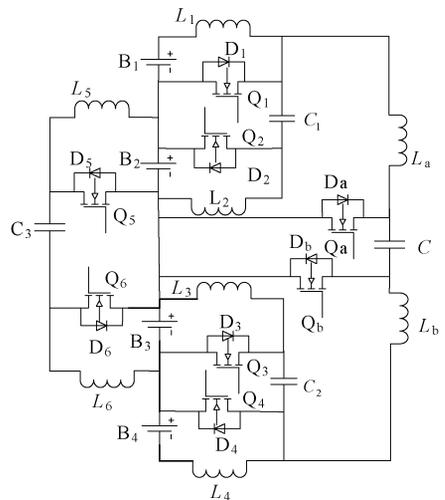


图 2 级联式双向 Cuk 均衡拓扑

Fig. 2 Cascading bidirectional Cuk balanced topology

### 1.2 均衡原理

级联式双向 Cuk 均衡拓扑电路中的最小均衡单元如

图 3 所示,它是由两个开关功率管、两个续流二极管、两个储能电感以及一个传递能量的耦合电容组成,具体均衡原理如下:

假设  $V_{B1} > V_{B2}$ , 为了使电池  $B_1$  的能量转移至电池  $B_2$ , 通过设置占空比来控制  $Q_1$  的开关状态。假设开关管的周期为  $T$ , 开关管的导通时长为  $T_{on}$ , 导通占空比为  $T_{on}/T$ 。电池均衡的过程中的两个阶段的工作状态分析如图 3 所示。

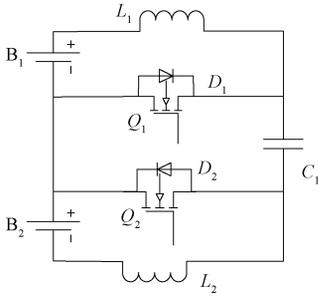


图 3 最小均衡单元结构

Fig. 3 Minimum equilibrium unit structure diagram

第一阶段工作状态: 当开关  $Q_1$  导通时, 工作状态电路原理如图 4 所示。

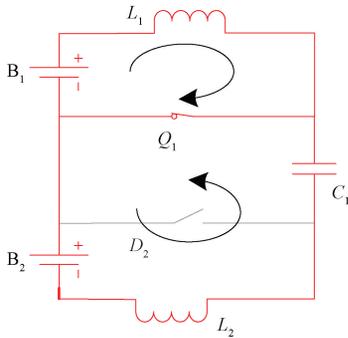


图 4 第一阶段工作状态电路图

Fig. 4 The first stage working state circuit diagram

电池  $B_1$  与电感  $L_1$  形成回路, 电池  $B_1$  给电感  $L_1$  充电, 此时有电流  $I_{L1}$  流过电感  $L_1$ , 电流线性增加, 因此得到关系式为:

$$L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} = V_{B1} - I_{L1}r_1 \quad (1)$$

式中:  $L_1$  为电感  $L_1$  的值;  $V_{B1}$  为电池  $B_1$  的电压;  $I_{L1}$  为流过电感  $L_1$  的电流;  $r_1$  为电池  $B_1$  的内阻。

推导可得电流  $I_{L1}$  的增加量为:

$$\Delta I_{L1+} = \frac{V_{B1} - I_{L1}r_1}{L_1}DT \quad (2)$$

式中:  $D$  为占空比;  $T$  为通断周期;  $\Delta I_{L1+}$  为  $I_{L1}$  在  $DT$  期间的增加量。

同时电池  $B_2$ 、电感  $L_2$  和电容  $C_1$  形成回路, 电容  $C_1$  给电感  $L_2$  充电, 此时有电流  $I_{L2}$  流过电感  $L_2$ , 电流线性增加, 因此得到关系式为:

$$L_2 \frac{dI_{L2}}{dt} = V_{C1} - V_{B2} - I_{L2}r_2 \quad (3)$$

式中:  $L_2$  为电感  $L_2$  的值;  $V_{C1}$  为电容  $C_1$  的电压;  $V_{B2}$  为电池  $B_2$  的电压;  $I_{L2}$  为流过电感  $L_2$  的电流;  $r_2$  为电池  $B_2$  的内阻。

推导可得电流  $I_{L2}$  的增加量为:

$$\Delta I_{L2+} = \frac{V_{C1} - V_{B2} - I_{L2}r_2}{L_2}DT \quad (4)$$

式中:  $\Delta I_{L2+}$  为  $I_{L2}$  在  $DT$  期间的增加量。

第二阶段: 当开关  $Q_1$  截止时,  $D_2$  正向导通, 工作状态电路原理如图 5 所示。

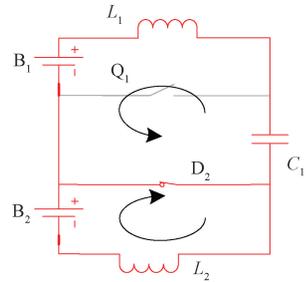


图 5 第二阶段工作状态电路图

Fig. 5 Second stage working state circuit diagram

电池  $B_1$ 、电感  $L_1$  和电容  $C_1$  形成回路, 电感  $L_1$  给电容  $C_1$  充电, 此时电流  $I_{L1}$  线性减少, 因此得到关系式为:

$$L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} = V_{B1} - V_{C1} - I_{L1}r_1 \quad (5)$$

推导可得电流  $I_{L1}$  的减少量为:

$$\Delta I_{L1-} = -\frac{V_{B1} - V_{C1} - I_{L1}r_1}{L_1}(1 - D)T \quad (6)$$

式中:  $\Delta I_{L1-}$  为  $I_{L1}$  在  $(1 - D)T$  期间的减少量。

同时, 电池  $B_2$  与电感  $L_2$  形成回路, 电感  $L_2$  给电池  $B_2$  充电, 此时有电流  $I_{L2}$  流过电感  $L_2$ , 电流线性减少, 因此得到关系式为:

$$L_2 \frac{dI_{L2}}{dt} = -(I_{L2}r_2 + V_{B2}) \quad (7)$$

推导可得电流  $I_{L2}$  的减少量为:

$$\Delta I_{L2-} = \frac{I_{L2}r_2 + V_{B2}}{L_2}(1 - D)T \quad (8)$$

式中:  $\Delta I_{L2-}$  为  $I_{L2}$  在  $(1 - D)T$  期间的减少量。

在一个开关周期内, 电流  $I_{L1}$  和电流  $I_{L2}$  的增加和减少量是一样的, 所以由式 (2)、(4)、(6)、(8) 可得式 (9) 为:

$$\begin{cases} (V_{B1} - I_{L1}r_1)D + (V_{B1} - V_{C1} - I_{L1}r_1)(1 - D) = 0 \\ (V_{C1} - V_{B2} - I_{L2}r_2)D - (V_{B2} + I_{L2}r_2)(1 - D) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

消去  $V_{C1}$  得到  $V_{B1}$  和  $V_{B2}$  的关系如式 (10) 所示。

$$\frac{V_{B1} - I_{L1}r_1}{V_{B2} + I_{L2}r_2} = \frac{1 - D}{D} \quad (10)$$

由以上推导过程可知:当  $V_{B1}$  高于  $V_{B2}$  时,电池  $B_1$  放电,电池  $B_2$  充电,且在均衡过程中电感  $L_1$ 、 $L_2$  的电流增量为 0,电感两端电压的平均值为 0,电池  $B_1$  减少的能量等于电池  $B_2$  增加的能量,同时由式 (10) 可知,通过调节开关管的占空比即可调整电池电压的均衡时间。当  $V_{B2}$  高于  $V_{B1}$  时,分析过程相同。

## 2 电池组均衡控制策略设计

### 2.1 电池组均衡流程

以电池端电压作为均衡变量,则串联电池组的均衡控制流程如图 6 所示。

首先,采集各节电池的端电压,计算电池模组内的端电压差值,判断是否大于 0.01 V,若否,则组内均衡结束;若是,则启动组内均衡。进一步判断组内电池电压差是否大于 0.01 V,若否,则组内均衡结束;若是,则继续组内均衡直至结束。

计算电池模组内端电压差值的同时计算电池模组间的端电压差值,判断是否大于 0.01 V,若否,则组间均衡结束;若是,则启动组间均衡。进一步判断组间电池电压差是否大于 0.01 V,若否,则组间均衡结束;若是,则继续组间均衡直至结束。

最后,当组内均衡与组间均衡都结束时,整个均衡过程才结束。

### 2.2 变论域原理

传统的均衡算法通常采用模糊控制来调节均衡电路中的电流。由于模糊控制过程中论域是不改变的,所以误差较小时控制的精度较差。本文采用变论域模糊控制实现均衡电流的动态调整,在控制速度与精度上都优于传统模糊控制。

变论域模糊控制的原理是通过减小时变性所产生的误差来提高控制策略的精度。在模糊规则<sup>[16-17]</sup>数目不变的条件下,论域随误差变小而收缩,随误差变大而膨胀,论域的变化原理如图 7 所示。

### 2.3 伸缩因子的设计

初始论域范围设置偏小时,系统的控制精度会降低;初始论域范围设置偏大时,系统控制的稳定性会下降。因此,设计伸缩因子<sup>[18-19]</sup>来调节模糊控制器的论域范围。

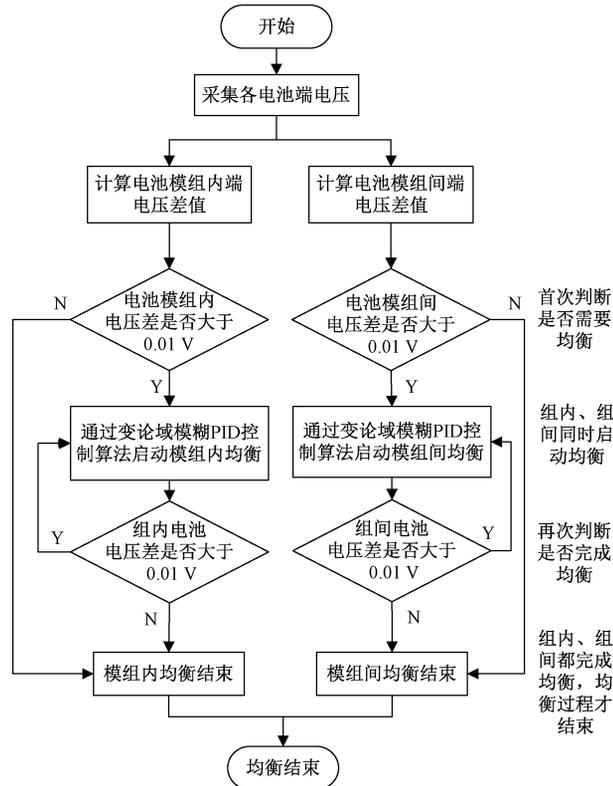


图 6 均衡流程图

Fig. 6 Equilibrium flow chart

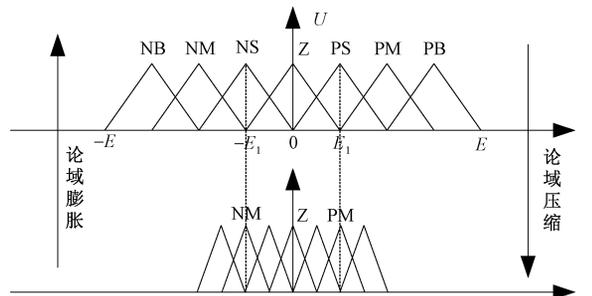


图 7 论域的变化原理图

Fig. 7 Schematic diagram of the variation of the domain of discourse

在不受外界其他因素干扰的条件下,伸缩因子能够同时实现系统论域和输入参数的改变,并且系统控制的精度更高,均衡时间更短。

伸缩因子的选择要符合对偶性、单调性、保零性、协调性和正规性的要求。有基于模糊推理、基于误差分级和基于函数模型这 3 种选取方法。本文选用基于函数模型的方式,输入、输出论域的伸缩因子表达式分别如式 (11)、(12) 所示。

$$\alpha(x) = 1 - \lambda e^{-kx^2}, \lambda \in (0, 1), k > 0 \quad (11)$$

$$\beta(y) = k_1 \sum_{i=1}^n p_i \int_0^y e_i(\tau) P d\tau + \beta(0) \quad (12)$$

式中:  $k_1, p_i$  均为常数;  $P$  为常数向量。

### 2.4 控制器结构的设计

当误差随着输入量的增多而变大时,通过提高伸缩因子的数值,扩大模糊论域来达到理想的控制效果;同理,当误差减小时,降低伸缩因子的数值。本文提出的均衡系统有 2 个输入变量和 3 个输出变量,其中相邻电池的电压均值  $V_a$  和电压差  $V_e$  为输入变量,  $\Delta K_p, \Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  为输出变量。调整后的模糊论域如式 (13)、(14) 所示。

$$\begin{cases} E_1 = \{-\alpha[e_1(t)]E_1, \alpha[e_1(t)]E_1\} \\ E_2 = \{-\alpha[e_2(t)]E_2, \alpha[e_2(t)]E_2\} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} U_1 = \{-\beta[u_1(t)]U_1, \beta[u_1(t)]U_1\} \\ U_2 = \{-\beta[u_2(t)]U_2, \beta[u_2(t)]U_2\} \\ U_3 = \{-\beta[u_3(t)]U_3, \beta[u_3(t)]U_3\} \end{cases} \quad (14)$$

在式(13)和(14)中,  $E_1, E_2$  分别为输入变量  $V_a$  和  $V_e$  的论域边界;  $U_1, U_2, U_3$  分别为输出变量  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  的论域边界;  $e_1(t), e_2(t)$  分别为输入变量的误差;  $u_1(t), u_2(t), u_3(t)$  分别为输出变量的误差;  $\alpha[e_1(t)], \alpha[e_2(t)]$  分别为输入变量的伸缩因子;  $\beta[u_1(t)], \beta[u_2(t)], \beta[u_3(t)]$  分别为输出变量的伸缩因子。

通过上述分析,设计的变论域模糊 PID 控制器结构如图 8 所示。

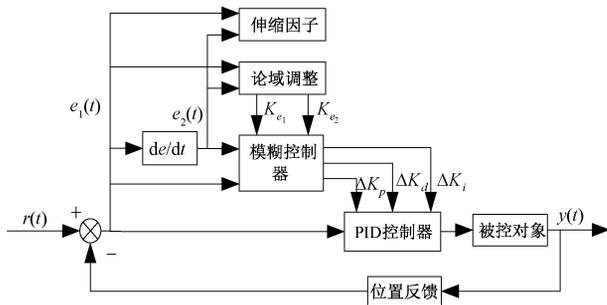


图 8 变论域模糊 PID 控制器结构

Fig. 8 Variable domain fuzzy PID controller structure

### 2.5 控制器参数及规则设置

根据电池均衡系统控制量的特点,本文提出的均衡系统输入量隶属度函数选取高斯隶属度函数<sup>[20-22]</sup>,可以描述不同种类的输入,输出量隶属度函数选取三角形隶属度函数。采用最大隶属度法,对模糊量去模糊化,最后的输出结果即为控制系统的参数。通过分析,得到模糊控制器的参数如表 1 所示。输入量、输出量的隶属度函数如图 9 所示。

$\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  的模糊控制规则如表 2 所示。当初始状态  $V_a, V_e$  较大时,为尽快消除电压差,同时避免产生较大超调导致系统不稳定,所以采用较大的  $\Delta K_p$ , 较小的

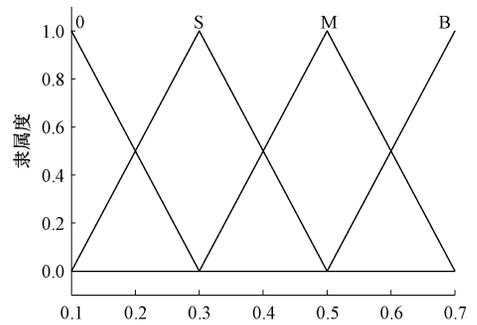
$\Delta K_d, \Delta K_i$  取 0; 当  $V_a, V_e$  接近设定值时,并使得系统超调适中,所以采用中等大小的  $\Delta K_p$ , 较小的  $\Delta K_i$  和中等大小的  $\Delta K_d$ ; 当  $V_a, V_e$  较小时,为了保持系统工作的稳定性并改善系统的动态性能,故取较大的  $\Delta K_p$ , 中等大小的  $\Delta K_i$  和较小的  $\Delta K_d$ 。

表 1 模糊控制器参数

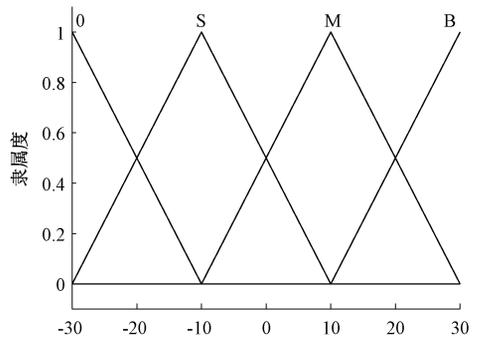
变量	$V_a$	$V_e$	$\Delta K_p$	$\Delta K_i$	$\Delta K_d$
基本论域	[0.1, 0.7]	[2.7, 4.2]	[-30, 30]	[-6, 6]	[-2, 2]
模糊子集	{零(0)、小(S)、中等(M)、大(B)}				
隶属函数	高斯	高斯	三角形	三角形	三角形
量化因子	3	3			
比例因子			18	1.6	3.5

表 2  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  的模糊控制规则

$V_a$	$V_e$			
	0	S	M	B
0	0/0/B	0/0/M	S/S/0	M/M/0
S	S/S/B	B/B/M	B/B/0	M/M/0
M	M/M/B	B/B/B	B/B/S	M/M/0
B	B/B/B	M/M/M	M/M/S	S/S/0



(a) 输入量  $V_a, V_e$   
(a) Input quantity  $V_a, V_e$



(b) 输出量  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$   
(b) Output quantity  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$

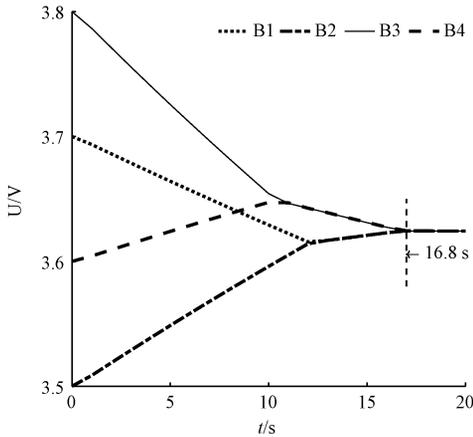
图 9 隶属度函数

Fig. 9 Membership function

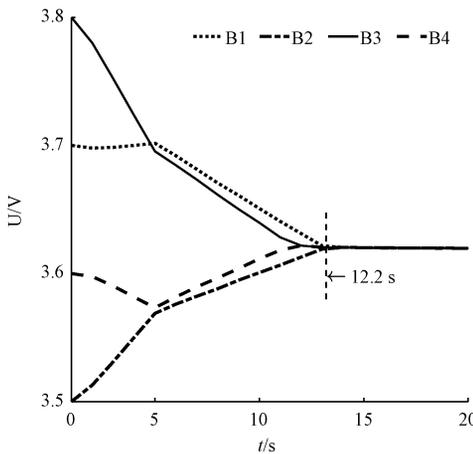
### 3 仿真结果及分析

在 MATLAB/Simulink 平台上建立了传统双向 Cuk 均衡电路和级联式双向 Cuk 均衡电路仿真模型。为加快运行速率,本文选取电容代替锂电池,电池的电压依次设置为  $U_1=3.7\text{ V}$ ,  $U_2=3.5\text{ V}$ ,  $U_3=3.8\text{ V}$ ,  $U_4=3.6\text{ V}$ , 相邻电池之间的电感值设置为  $100\text{ }\mu\text{H}$ , 电池组间的电感值设置为  $200\text{ }\mu\text{H}$ , 电容值设置为  $500\text{ }\mu\text{F}$ 。

将 4 节电池以串联的形式分别接入传统双向 Cuk 均衡电路和级联式双向 Cuk 均衡电路中,并进行仿真实验。仿真实验结果如图 10 所示。



(a) 传统双向Cuk均衡拓扑仿真实验结果  
(a) Simulation results of traditional bidirectional Cuk balanced topology



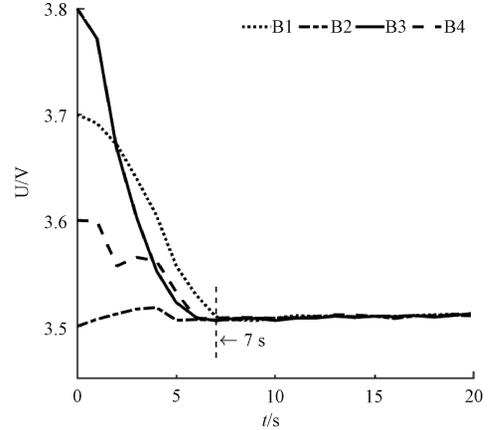
(b) 级联式双向Cuk均衡拓扑仿真实验结果  
(b) Cascaded bidirectional Cuk balanced topology simulation results

图 10 串联电池组在两种均衡拓扑结构下的仿真实验结果  
Fig. 10 Simulation experiment results of series battery in two equilibrium topologies

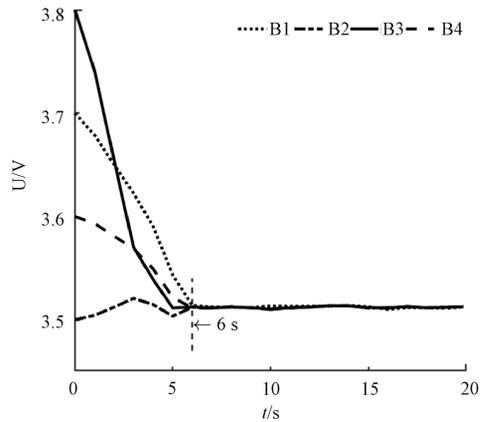
图 10(a)为传统双向 Cuk 均衡拓扑仿真实验结果,此时 4 节电池的端电压均衡时间为  $16.8\text{ s}$ ;图 10(b)为

级联式双向 Cuk 均衡拓扑仿真实验结果,此时 4 节电池的端电压均衡时间为  $12.2\text{ s}$ 。两种均衡拓扑结构下仿真实验结果对比表明,级联式双向 Cuk 均衡拓扑的均衡时间比传统双向 Cuk 均衡拓扑的均衡时间减少了  $27.38\%$ , 串联电池组的电压均衡速度和均衡效率大大提高。

将 4 节电池串联分别接入基于模糊 PID 控制的级联式双向 Cuk 均衡拓扑电路和基于变论域模糊 PID 控制的级联式双向 Cuk 均衡拓扑电路中,并进行仿真实验。仿真实验结果如图 11 所示。



(a) 基于模糊PID算法的级联式双向Cuk均衡拓扑仿真实验结果  
(a) Simulation results of cascaded bidirectional Cuk balanced topology based on fuzzy PID algorithm



(b) 基于变论域模糊PID算法的级联式双向Cuk均衡拓扑仿真实验结果  
(b) Simulation results of cascaded bidirectional Cuk balanced topology based on variable domain fuzzy PID algorithm

图 11 串联电池组在两种控制算法下的仿真实验结果  
Fig. 11 Simulation experiment results of series battery in two control algorithms

图 11(a)为基于模糊 PID 算法的级联式双向 Cuk 均衡拓扑仿真实验结果,此时 4 节电池端电压均衡时间为  $7\text{ s}$ ;图 11(b)为基于变论域模糊 PID 算法的级联式双向 Cuk 均衡拓扑仿真实验结果,此时电池组中各单节电池端电压达到均衡所需时间是  $6\text{ s}$ 。两种控制算法下的仿

真实实验结果对比表明,基于变论域模糊 PID 算法的级联式双向 Cuk 均衡拓扑的均衡时间比基于模糊 PID 算法的级联式双向 Cuk 均衡拓扑的均衡时间减少了 14.29%。图 10(a)和图 11(b)对比表明,基于变论域模糊 PID 算法的级联式双向 Cuk 均衡拓扑的均衡时间比未加控制算法的传统双向 Cuk 均衡拓扑的均衡时间减少了 64.29%。图 10(b)和图 11(b)对比表明,基于变论域模糊 PID 算法的级联式双向 Cuk 均衡拓扑的均衡时间比未加控制算法的级联式双向 Cuk 均衡拓扑的均衡时间减少了 50.82%。由图 10 和 11 的仿真实验结果可以得出,级联式双向 Cuk 均衡可以同时实现相邻单体电池以及电池模组之间的能量转移,缩短了串联电池组的均衡时间,同时验证了变论域模糊 PID 算法可以提高均衡效率。以上分析表明基于变论域模糊 PID 控制的级联式双向 Cuk 均衡拓扑实现了更快速、高效的电压均衡。

## 4 结 论

本文以双向 Cuk 变换器作为均衡拓扑结构的基本单元,提出了一种基于变论域模糊 PID 控制的级联式双向 Cuk 均衡电路系统。级联式双向 Cuk 电路同步实现了相邻单体电池之间和不相邻单体电池之间的能量转移,缩短了串联电池组的电压均衡时间,所提出的变论域模糊 PID 算法进一步提高了均衡过程的稳定性与效率。在 MATLAB/Simulink 中设计了传统双向 Cuk 均衡电路和级联式双向 Cuk 均衡电路仿真模型,不同控制算法下的仿真实验结果表明,基于变论域模糊 PID 控制的级联式双向 Cuk 均衡电路较大的提高均衡速率。该拓扑结构简单,均衡时间短,为实际的新能源汽车的动力电池均衡提供了具有实用价值的技术方案。在后续研究中,可以将所设计的均衡系统与实车的动力电池系统结合进行推广应用。

## 参考文献

- [ 1 ] 汪宇航, 黄海宏, 王海欣, 等. 基于荷电状态差异的退役电池健康状态快速估计研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12): 55-68.  
WANG Y H, HUANG H H, WANG H X, et al. Rapid estimation of decommissioned battery health state based on difference in charge state [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 55-68.
- [ 2 ] 吴忠强, 胡晓宇. 基于 STPF 的 SOC 估计及在多锂电池均衡中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 235-244.  
WU ZH Q, HU X Y. SOC estimation based on STPF and its application in multi-lithium battery equalization [J]. Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 235-244.
- [ 3 ] 汤祥宇, 陆华才. 动力电池分层均衡控制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(12): 234-241.  
TANG X Y, LU H C. Research on hierarchical equalization control of power battery [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(12): 234-241.
- [ 4 ] 曹朔, 李恭斌, 王运辉, 等. 串联电池组主动分层均衡电路的控制策略研究[J]. 电源技术, 2022, 46(11): 1289-1293.  
CAO SH, LI G B, WANG Y H, et al. Research on control strategy of active layering equalization circuit of series battery pack [J]. Power Supply Technology, 2022, 46(11): 1289-1293.
- [ 5 ] ZHANG S, WU S, CAO G, et al. Active equalization for lithium-ion battery pack via data-driven residual charging capacity estimation [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 422(10): 138583. 1-138583. 15.
- [ 6 ] 王梓齐, 严利民. 一种超级电容电压均衡策略[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(11): 131-133, 148.  
WANG Z Q, YAN L M. An ultracapacitor voltage equalization strategy [J]. Industrial Control Computer, 2022, 35(11): 131-133, 148.
- [ 7 ] 杨芮. 新型电动汽车电池组均衡系统研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2021.  
YANG R. Research on new electric vehicle battery balance system [D]. Chongqing: Chongqing Sanxia Institute, 2021.
- [ 8 ] 李郑斐. 锂离子电池组电压均衡技术的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.  
LI ZH F. Research on voltage equalization technology of lithium-ion battery pack [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [ 9 ] 王超, 詹敏, 柯锦洋, 等. 基于双向半桥 LLC 谐振变换器的退役电池组均衡方法[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(5): 154-162.  
WANG CH, ZHAN M, KE J Y, et al. Decommissioned battery pack equalization method based on bi-directional half-bridge LLC resonant converter [J]. Journal of Electric Machines and Control, 2024, 28(5): 154-162.
- [ 10 ] 唐佳维. 基于双向 Cuk 变换器的电动汽车锂电池组均衡研究[D]. 盐城: 盐城工学院, 2023.  
TANG J W. Research on equalization of electric vehicle lithium battery pack based on bidirectional Cuk converter [D]. Yancheng: Yancheng Institute of Technology, 2023.
- [ 11 ] 何俊儒, 王洪诚, 方余丞, 等. 基于 Cuk 双向变换器的串联电池均压法[J]. 蓄电池, 2016, 53(1): 26-30.  
HE J R, WANG H CH, FANG Y CH, et al. Battery equalization method in series based on Cuk bidirectional Converter [J]. Batteries, 2016, 53(1): 26-30.

- [12] 付望. 锂离子电池主动均衡策略的研究与实现[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.  
FU W. Research and implementation of active equalization strategy for lithium-ion battery [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2023.
- [13] 曾文玺, 董育宁. 一种基于信息熵的级联式新类识别方法[J]. 软件工程, 2023, 26(11): 43-47.  
ZENG W X, DONG Y N. A new cascaded class recognition method based on information entropy [J]. Software Engineering, 2023, 26(11): 43-47.
- [14] 尚俊杰, 曹太强, 林轩, 等. 一种新型车载充电 DC-DC 变换器的变论域模糊 PI 预测控制[J/OL]. 电源学报, 1-14. [2024-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230619.1552.008.html>.  
SHANG J J, CAO T Q, LIN X, et al. Variable theory domain fuzzy PI predictive control for a novel on-board charging DC-DC converter [J/OL]. Journal of Power Sources, 1-14. [2024-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230619.1552.008.html>.
- [15] 孙瑀擎. 基于变论域模糊 PID 的典型开关变换器特性研究[D]. 延吉: 延边大学, 2022.  
SUN Y Q. Research on characteristics of typical switching converter based on fuzzy PID in variable discourse domain [D]. Yanji: Yanbian University, 2022.
- [16] 尹爱军, 朱文浩, 戴宗贤, 等. 模糊推理和深度学习数模融合的卡尔曼滤波腐蚀预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4): 27-34.  
YIN AI J, ZHU W H, DAI Z X, et al. Kalman filter corrosion prediction based on digital-analog fusion of fuzzy reasoning and deep learning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4): 27-34.
- [17] 王伯瑞, 刘晶, 郑培. 基于改进型模糊 PID 控制器锂电池均衡系统研究[J]. 电源技术, 2021, 45(5): 635-640.  
WANG B R, LIU J, ZHENG P. Research on lithium battery balancing system based on improved fuzzy PID controller [J]. Power Supply Technology, 2021, 45(5): 635-640.
- [18] ZENG W, JIANG Q, XIE J, et al. A functional variable universe fuzzy PID controller for load following operation of PWR with the multiple model [J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 140: 23-29.
- [19] 李强龙, 孙建瑞, 赵坤, 等. 基于 IALO-SVR 的锂电池健康状态预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 204-211.  
LI Q L, SUN J R, ZHAO K, et al. Health state prediction of lithium battery based on IALO-SVR [J].

Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 204-211.

- [20] 白喆. 电动汽车动力电池均衡控制系统研究与设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.  
BAI ZH. Research and design of power battery equalization control system for electric vehicle [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.
- [21] 刘威, 王友仁, 许煜辰, 等. 基于自适应选择主被动均衡拓扑的机载锂电池电源能量均衡方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 244-252.  
LIU W, WANG Y R, XU Y CH, et al. Energy balancing method of airborne lithium battery power based on adaptive selection of active and passive balancing topology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 244-252.
- [22] 刘凌峰, 陈晓雷, 仇国庆, 等. 多影响因素下混凝土浑浆浓度智能模糊监测[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 121-131.  
LIU L F, CHEN X L, QIU G Q, et al. Intelligent fuzzy monitoring of concrete slurry concentration under multiple influencing factors [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 121-131.

## 作者简介



吴文进, 2001 年于郑州轻工业大学获得学士学位, 2006 年于中国合肥工业大学获得硕士学位, 2018 年于中国合肥工业大学获得博士学位, 现为安庆师范大学电子工程与智能制造学院教授, 主要研究方向为电力电子系统及其控制、电能储存与节电技术。

E-mail: wuwenjinaq@163.com

**Wu Wenjin** received his B. Sc. degree from the Zhengzhou University of Light Industry in 2001, M. Sc. degree and Ph. D. degree from the Hefei University of Technology in 2006 and 2018, respectively. Now he is a professor in the School of Electronic Engineering and Intelligent Manufacturing, Anqing Normal University. His main research interests include power electronic system and its control, power storage and power saving technology.



吴晶(通信作者), 2023 年于安庆师范大学获得学士学位, 现为安庆师范大学电子工程与智能制造学院硕士研究生, 主要研究方向为储能电池建模和储能系统控制。

E-mail: wujing012@126.com

**Wu Jing** (Corresponding author) received her B. Sc. degree from the Anqing Normal University in 2023. Now she is the M. Sc. candidate of Electronic Engineering and Intelligent Manufacturing in Anqing Normal University. Her main research interests include energy storage battery modeling and energy storage system control.