

基于模型预测控制的锂电池主动均衡算法研究

邵玉龙^{1,2}, 杨春光¹, 李 龙¹, 周时国¹, 孙万臣²

(1. 宇通客车股份有限公司, 郑州 450061; 2. 吉林大学, 长春 130022)

摘 要:为提高锂电池组电量均衡效率,提出一套高效主动均衡新算法,以均衡时间最短为目标,采用占空比动态调整均衡电流大小,使得在每个均衡周期内的均衡电流都是最优解,高效实现电池组电量的均衡控制。

关键词:电池组; 主动均衡; 模型预测; 控制算法

中图分类号:TM912; U469

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2022)04-0008-04

Research on Active Balance Method of Lithium Battery Based on Model Prediction Control

SHAO Yulong^{1,2}, YANG Chunguang, LI long¹, ZHOU Shiguo¹, SUN Wanchen²

(1. Yutong Bus Co., Ltd., Zhengzhou 450061, China; 2. Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract:To improve the power balance efficiency of the lithium battery group, the authors propose a new high-efficiency active balance algorithm, which takes the shortest balance time as the target, uses the duty ratio dynamically adjust the equilibrium current value, reaches the optimal solution in each balance cycle, and realizes the efficient balance control of the battery group power.

Key words:battery group; active balance; model prediction; control algorithm

电池单体的不一致性会导致单体的容量、内阻、电压、电解液密度不一样^[1],也导致电池组充电充不满、放电放不尽,电池组整体容量大大下降^[2]。在电池正常使用过程中,由于使用环境、自放电等因素的影响,不一致性会进一步扩大^[3],使电池处于欠均衡状态。因此,对电池组中各单体电池的电量进行均衡是保障电池组正常运行的重要任务^[4-5]。

1 主动智能均衡方案

1.1 均衡方案分析

均衡方式分为主动均衡和被动均衡两种^[6]。被动均衡通过电阻消耗掉电池单体多余的能量,实现单体电压的一致性,在只有一个电池单体电量偏多的情况下,效果较好;但在只有一个电池单体电量较少的情况下,会导致其余电池单体全部放电,进一步扩大

电量的不一致性^[5]。相比之下,主动均衡方式通过能量转移而非能量消耗实现电池能量均衡,主动将多余的电量重新分配^[7],是一种效率较高的均衡方式^[8];但现有技术还难以快速精准地进行能量转移,存在过均衡的现象。为此,本文设计了一种基于模型预测的主动智能均衡方案,可实现能量转移次数最少,均衡效率最高。

1.2 主动智能均衡电路

本文主动均衡原理如图1所示。以单体1需要放电为例,闭合开关G1P,单体1开始向DC/DC线圈充电,当充电电流达到最大值时,电感中存储的磁场能量达到最大;此时断开G1P,闭合G1S,电感中的能量转移到电池组侧线圈中,通过开关G1S对电池模组(单体1~12)充电,当充电电流降为0时,断开G1S,闭合G1P,单体1再次给DC/DC充电,重复以

收稿日期:2022-01-05。

第一作者:邵玉龙(1989—),男,博士;工程师;研究方向为新能源汽车和电池管理系统。E-mail:syl20081243@126.com。

通讯作者:杨春光(1982—),男,工程师;研究方向为客车产品运营、电池一致性维护技术。E-mail:yangcg@yutong.com。

上过程,直到单体1的能量恢复到平均水平。

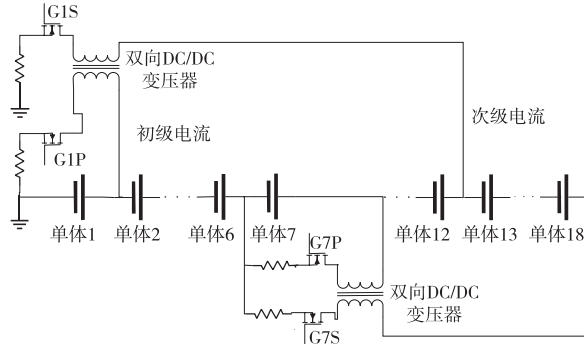


图1 主动均衡原理示意图

1.3 主动均衡电流模型预测控制

本文采用模型预测控制(MPC)算法控制均衡电流,不寻求均衡系统的全局最优控制变量^[9],而是在一个有限预测时域内,同时利用系统当前输出和目标的偏差值、系统过去输出和目标的偏差值及系统未来输出和目标的偏差信息^[10],算出一个满足约束条件且成本最低的控制变量^[11]。

将被控对象用状态空间方程表示,该状态空间模型以每节单体电池的SOC为状态变量 $x(k)$;空间模型以 $x(k)$ 与所有电池SOC的平均值的差值作为目标函数 $y(k)$;将控制对象模型化,可得到状态空间方程(6)。如图1所示,假设双向DC/DC均衡系统中的电池组有 n 串电池串联,有 m 组均衡通道,电池1~ n 的容量可通过对角矩阵 Q_x 表示,电池的SOC定义为 $x(t)$,则流过每一串电池的电流为

$$Q_x \cdot x(t) \in \mathbf{R}^n \quad (1)$$

其中,

$$Q_x = \begin{bmatrix} \hat{C}_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \hat{C}_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \hat{C}_n \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{n \times n},$$

$$x(t) = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n]^T$$

电池的SOC=0代表电池能量为0,SOC=1代表电池满电。若电池之间的SOC相差较大,则需要能量转移,电荷在 m 个通道之间进行传递。如果用一个对角矩阵 Q_u 来表示通道1到通道 m 的最大均衡电流,用 $u(t)$ 表示归一化之后的各个通道均衡

电流,则实际的均衡电流可以表示为

$$Q_u \cdot u(t) \in \mathbf{R}^m \quad (2)$$

其中,

$$Q_u = \begin{bmatrix} \hat{I}_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \hat{I}_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \hat{I}_m \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{m \times m} \quad (3)$$

电压最高的电池放出的电量被转移到了整个电池组,如果转移的总电量是1,则电池组内每个电池(包括放电的电池)都得到 $1/n$ 的电量,所以放电的电池转移的电量是 $1/n-1$,其他电池是 $1/n$ 。同理,电压最低的电池得到的电量来自整个电池组,如果转移的总电量是1,则电池组内每个电池(包括充电的电池)都失去 $1/n$ 的电量,所以充电的电池转移的电量是 $1-1/n$,其他电池是 $-1/n$ 。均衡电量在电池单体之间进行传递, n 串电池和 m 组通道之间的联系可以通过矩阵 $T \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 来表示:

$$T = \begin{bmatrix} 1/n-1 & 1/n & \cdots & 1/n \\ 1/n & 1/n-1 & \cdots & 1/n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/n & 1/n & \cdots & 1/n-1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{n \times m} \quad (4)$$

则在单位时间 Δt 内转移的电量可以用 $E = TQ_u \cdot u(t)\Delta t$ 来表示, $u(t) > 0$ 表示充电, $u(t) < 0$ 表示放电。均衡的目标是在最短的时间内实现每个电池的SOC与所有电池SOC的平均值的差值最小,即 $y(t)$ 接近目标值0。

$$y(t) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i/n - x_1 \\ \sum_{i=1}^n x_i/n - x_2 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i/n - x_n \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1/n-1 & 1/n & \cdots & 1/n \\ 1/n & 1/n-1 & \cdots & 1/n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/n & 1/n & \cdots & 1/n-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

选择电池容量 $x(t)$ 作为状态变量,控制电流

$u(t)$ 作为输入控制变量, $y(t)$ 作为系统输出,则均衡过程的状态控制方程可以表示为

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $A=E_n$, $B=Q_x^T E=Q_x^T T Q_u u(t) \Delta t$, $C=T$ 。

系统约束为 $u(t) \in \{u \in \mathbf{R}^m \mid -1 \leq u \leq 1\}$,即每个通道均衡电流有限制。

基于状态空间方程式(6),模型预测控制的输出是每个电池单体的均衡电流大小,均衡电流的实现是通过双向 DC/DC 变压器的开断控制的,如图 1 所示,每个单体都有一个 DC/DC 变压器;模型预测控制的输入是各单体的 SOC、电压、电流、上一控制时刻的均衡电流;通过模型预测后续 p 个周期的输出,在预测周期内预测输出 $\bar{y}$ 和设定目标值 r 在时域 H_p 内误差最小,通过该优化问题,求解出最优制序列 $[u(k) \ u(k+1) \cdots u(k+c)]$;如图 2 所示, x_0 表示系统在 k 时刻的状态, u 表示系统的输入, y 为系统的输出, H_p 为预测时域, H_c 为控制时域。

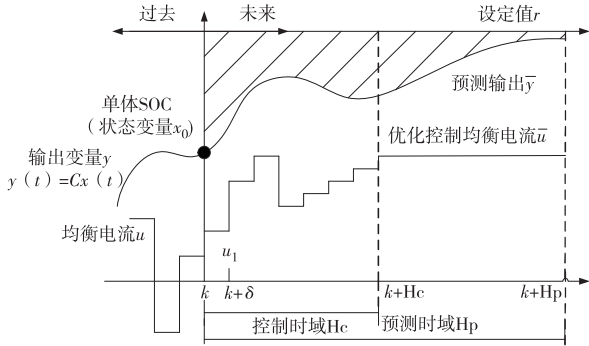


图2 主动智能均衡 MPC 原理图

线性规划是在约束条件下,通过数学计算找到使成本函数最小的决策方法^[12]。线性规划问题可表示为^[13]

$$\min z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i (i = 1, 2, \dots, m) \\ x_j \geq 0 (j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (8)$$

用矩阵形式表示:

$$\min Z = CX \quad (9)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=0}^n p_j x_j \leq b \\ X \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中, $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$, $X = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T$, $p_j = [a_{1j} \ a_{2j} \ \cdots \ a_{mj}]^T (j = 1, 2, \dots, n)$, $b = [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_m]^T$ 。

用 MATLAB 求解线性规划问题的步骤为:通过遍历尝试的方法,找到一个可行解,然后判断是否为最优解,如不是则继续迭代,直到找到一个最优解,或者判定为无解^[14]。

MATLAB 线性规划的标准方程^[15]为

$$\min z = f^T x \quad (11)$$

$$\text{s. t. } Ax \leq b, A_{eq}x = b_{eq}, lb \leq x \leq ub \quad (12)$$

对应的 MATLAB 线性规划函数 linprog() 如下:

$$[X, fval] = \text{linprog}(f, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub) \quad (13)$$

式(11)~(13)中, f 为目标函数系数, x 为控制变量, A 和 b 为不等式约束系数, A_{eq} 、 b_{eq} 为等式约束系数, ub 、 lb 为控制变量 x 的上下限值, $fval$ 为目标函数 z 在约束条件下的最小值, X 为目标函数 z 在约束条件下取最小值时控制变量 x 的值。

在对均衡过程进行 MPC 控制时,成本函数可以表示为

$$\min(|u_1| + |u_2| + \cdots + |u_n|) \quad (14)$$

为了把这个问题转换成标准的线性规划问题,令 $w_i = (u_i + |u_i|)/2$, $v_i = (|u_i| - u_i)/2$ 。则, $u_i = w_i - v_i$, $|u_i| = w_i + v_i$,其中, $w_i > 0, v_i > 0$ 成立。

若记:

$$\begin{cases} w = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T \\ v = [v_1, v_2, \dots, v_n]^T \end{cases} \quad (15)$$

则将上面的问题转换成:

$$\min \sum_{i=1}^n (w_i + v_i) \quad (16)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} A(w-v) \leq b \\ w, v \geq 0 \end{cases} \quad (17)$$

约束函数可进一步表示成:

$$\text{s. t. } \begin{cases} [A \ -A] \begin{bmatrix} w \\ v \end{bmatrix} \leq b \\ w, v \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

即可利用 MATLAB 的 linprog() 函数优化求解。

2 均衡效果验证

搭建电池组均衡实验台,通过对比采集到的均衡

电流和 SOC 来评估基于 MPC 的均衡控制效果。将 MPC 控制算法和通过 S 函数编写的线性规划求解函数, 通过 MATLAB 自动代码生成工具生成 C 代码^[16]。如图 3 所示, 由 24 串钛酸锂电池组成电池组, 每个从控制器控制 12 串电池, 主从控制器之间通过菊花链进行通信, 使用多通道霍尔式电流传感器测量均衡电流的大小, PC1 用来调试 BMS 主控制板, 控制从控制器 1 和 2 实现电池均衡功能, PC2 用来记录采集到的电流值。

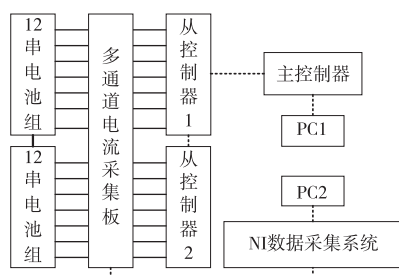


图3 主动均衡实验台架

初始条件中 SOC 最大值和 SOC 最小值相差 52%, 对应电池的电压差约为 0.5 V。通过 NI 数据采集系统采集到的均衡电流如图 4 所示。

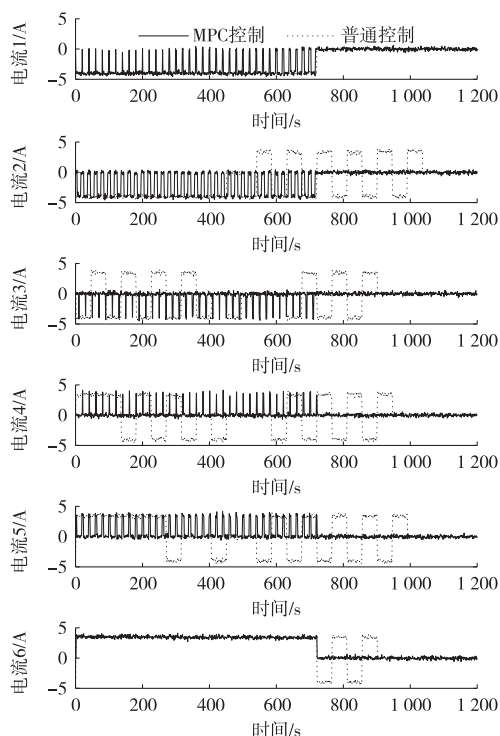


图4 MPC控制和普通控制的均衡电流对比

从图 4 中可知, 基于普通控制规则的均衡方式, 未对

整个均衡的过程进行解耦, 导致均衡电流的方向会经常改变, 对电池的寿命产生了不利影响, 也增大了均衡所消耗的时间; 在整个均衡过程中, 除了单体 1 的均衡电流没有改变方向, 其他 5 路电流都频繁地改变方向。基于 MPC 控制规则的均衡方式, 对电池组的均衡过程进行整体分析, 考虑均衡电池之间的相互影响, 实现了均衡过程的解耦, 所有电池的均衡电流都没有改变方向; 每一路均衡电流在一个控制周期内通过占空比来控制均衡的时间, 当需要以最大的均衡能力工作时, 占空比被调整为 1 (单体 6)。经过对比发现, 同样的初始条件下, 普通控制的均衡时间为 1 030 s; MPC 控制的均衡时间为 710 s, 均衡时间减少了 31%。

3 结束语

本文设计了基于模型预测的主动均衡控制方案, 采用 MPC 算法控制电池组均衡, 利用线性规划求解最小均衡时间, 实现串联均衡的最优控制。实验显示 MPC 算法能避免不必要的能量转移, 均衡时间减少了 31%, 验证了本文所提均衡策略的合理性。

参考文献:

- [1] 李振. 电动汽车车用锂离子电池组均衡系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [2] 曾辉. 串联锂离子电池组电感主动均衡研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [3] 董津生, 李盘忠, 闫立国, 等. 主动均衡技术的研究与实现[J]. 电动自行车, 2012(4): 28-30.
- [4] 杨书华, 邹鹏, 石文荣, 等. 锂离子电池能量均衡系统研究[J]. 电子技术应用, 2013, 39(11): 60-62.
- [5] ZHENG Yuejiu, OUYANG Minggao, LIU Languang, et al. On-line equalization for lithium-ion battery packs based on charging cell voltages; Part 1. Equalization based on remaining charging capacity estimation[J]. Journal of Power Sources, 2014(247): 676-686.
- [6] GALLARDO-LOZANO J, ROMERO-CADAVAL E, MILANES-MONTERO M I, et al. Battery equalization active methods[J]. Journal of Power Sources, 2014(246): 934-949.

(下转第 17 页)

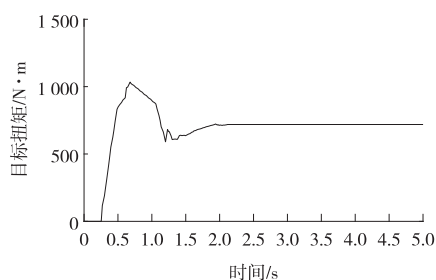


图4 目标扭矩图

3 结束语

本文在不增加传感器和执行机构的前提下,判断坡道起步辅助介入的时机,通过双闭环 PI 控制器控制电机输出驱动扭矩,使车辆在坡道上迅速达到平衡状态,在可接受的溜坡距离内实现了坡道起步辅助功能。

参考文献:

- [1] 郭立书,施正堂,张正兵,等. 电子驻车制动系统[J]. 农业机械学报,2008,39(12):31-33.
- [2] 王洪亮,张庆渴,谷文豪,等. 基于 PID 控制的坡道起步控制仿真与试验研究[J]. 汽车工程,2017,39(4):480-485.
- [3] 黄其,薛利昆,罗玲,等. 电动汽车整车控制器设计及测试[J]. 自动化与仪表,2019,34(3):14-18.
- [4] 崔海峰,刘昭度,王国业,等. 基于扭矩传感器的汽车坡道起步辅助系统[J]. 仪器仪表学报,2006,27(10):1191-1193.
- [5] 胡建军,杜瑞,吉毅. 纯电动汽车起步控制策略[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2013(8):19-25.
- [6] 莫旭辉,朱园园,杨辉. 电动汽车坡道起步电机转速控制研究[J]. 计算机仿真,2018,35(4):107-111.
- [7] 葛安林,雷雨龙,高义峰,等. 电控机械式自动变速器车辆上坡起步控制研究[J]. 汽车工程,1998(3):150-155.
- [8] 徐小兵,鲁振辉,窦本岗,等. 纯电动客车坡道起步辅助电机扭矩控制算法研究[J]. 客车技术与研究,2020,42(6):8-10.
- [9] 金辉,葛安林,秦贵和,等. 基于纵向动力学的坡道识别方法研究[J]. 机械工程学报,2002,38(1):79-82.
- [10] 王洪亮,赵熙俊,刘海鸥. 重型汽车 AMT 电控气动坡起辅助[J]. 山东大学学报(工学版),2009,39(5):79-83.
- [7] 王子平. 串联锂离子电池组的主动均衡控制研究[J]. 中小企业管理与科技, 2015(8): 313-314.
- [8] 夏小东. 带有升降压变换器的飞渡电容式电池组均衡技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
- [9] 席裕庚,李德伟,林姝. 模型预测控制—现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.
- [10] 邵玉龙. 电动汽车 BMS 关键技术研究及硬件在环测试系统构建[D]. 长春:吉林大学, 2018.
- [11] 陈虹. 模型预测控制[M]. 北京:科学出版社,2013:6-7.
- [12] 谢承义. 数学建模中线性规划与目标规划的比较[J]. 科技创业月刊, 2011, 24(16): 128-130.
- [13] 郭志军. 线性规划模型的建立及 Mathematica 求解[J]. 长沙大学学报, 2010, 24(5): 17-19.
- [14] 曾梅清,田大纲. 线性规划问题的算法综述[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(1): 152-159.
- [15] 盛仲飙. 基于 Matlab 的线性规划问题求解[J]. 计算机与数字工程, 2012, 40(10): 26-27.
- [16] 孙忠潇. Simulink 仿真及代码生成技术入门到精通[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2015:116.

(上接第 11 页)