

基于马尔可夫的锂电池组充电均衡控制研究

程方晓, 王旭, 李腾飞

(长春工业大学 电气与电子工程学院, 长春 130012)

摘要: 针对动力锂离子电池组充电后期过程中因单体电池性能差异而造成的可用容量不均衡、使用寿命缩短等问题, 改进了一种结构较为简单、能量转移灵活的无损能量转移型均衡电路; 提出了基于马尔可夫决策算法的动力锂电池组充电均衡控制方案, 对单体电池间能量转移方向进行预测, 决策出最优转移路径; 通过实验结果分析, 均衡效率、均衡效果均明显提高, 实现了动力锂离子电池组充电后期过程中的充电均衡, 证明了该均衡电路及均衡控制方案的可行性。

关键词: 锂离子电池组; 均衡电路; 马尔可夫决策算法

Study of Balanced Control of Charging Lithium Batteries Based on Markov

Cheng Fangxiao, Wang Xu, Li Tengfei

(Institute of Electrical and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: A lossless energy transfer equalizer circuit which was relatively simple and flexible was improved, aimed at the problems such as the unbalanced available capacity and the shorten service life caused by the different monomer battery performance during the latter part of lithium-ion battery pack charging. What's more, the power lithium-ion battery pack charging balance control program was proposed based on Markov decision algorithm. Use the program to predict the direction of energy transfer to between the cells and make the optimal migration path. The analysis of the experimental results indicate that the balance efficiency and the balance results were significantly improved, and charging equalizer during the latter part of lithium-ion battery pack charging was achieved. Finally, the study proved the feasibility of the equalization circuit and balance control program.

Key words: Lithium-ion battery pack; equalizer circuit; Markov decision algorithm

0 引言

随着能源与环境问题的日益严峻, 电动汽车越来越得到人们的青睐。然而尚不成熟的电池技术成为制约电动汽车普及化的最大瓶颈, 尤其是电池组容量不均衡性容易造成整体能量不能充分利用和充电过程中出现过充现象, 从而严重影响其动力性能和寿命^[1-2]。为了使电池组发挥最大效能, 降低不均衡性对电池组的影响, 均衡充电技术是解决该问题的有效方法。

均衡技术研究主要集中在两个方面: 均衡电路研究和均衡策略研究。对于均衡充电技术, 国内外学者进行了许多研究。Hong-Sun Park 等人采用多副边隔离变压器对电池组进行充电, 虽然防止了大电流对电池组的冲击, 但是受变压器的副边数限制, 缺乏对电池个数调整的灵活性^[3]。张金龙等人设计了一种均衡模块分组的均衡电路, 一定程度上提高了电池的充电接受能力, 也加快了电池组的均衡速度, 然而电路器件多, 线路复杂, 并且单体电池能量转移方向的灵活性受限, 不易于能量转移路径的优化^[4]。

综上所述, 提出一种改进的动力锂电池组能量转移的均衡电路, 该电路可以实现每一个单体电池能量根据需求, 灵活控

制能量的转移方向。此外, 运用马尔可夫算法选择能量转移过程中的最优均衡决策, 提高充电效率, 实现电池组充电均衡。

1 动力锂电池组无损均衡电路原理

与能量耗散型均衡方法相比, 能量无损均衡方法因其节约能源和提高效率的优点受到了广泛重视。本文电池组均衡结构如图 1 所示。控制器通过控制采集模块采集电池电压、电流、温度信息, 对均衡模块发送命令, 调节能量转移方向, 完成电池间的能量均衡。

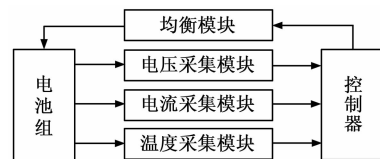


图 1 电池组均衡结构框图

动力电池组无损均衡电路如图 2 所示。均衡模块电路由一个小电感 L 、一个能量转移电容 C 、多个受控 MOSFET 管组成。其中, 加入小电感 L 的目的是防止电路导通时产生较大电流, 对电容 C 起到保护的作用。

当电池组第 k 节单体电池电压过高, 需要向第 m 节单体电池转移能量时, 在 MOSFET 管栅极加以 PWM 控制脉冲, 当 PWM 控制脉冲处于高电平时 MOSFET 管 M_{2k-1} 、 M_{2k} 开启。第 k 节电池向电容 C 进行充电; 之后, 关闭 MOSFET 管

收稿日期: 2014-03-17; 修回日期: 2014-04-26。

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20120362)。

作者简介: 程方晓(1969-), 女, 副教授, 工学博士, 主要从事测控技术与智能系统方向的研究。

M_{2k-1} 、 M_{2k} , 开启 MOSFET 管 M_{2m-1} 、 M_{2m} , 电容 C 向第 m 节电池充电, 完成能量转移, 实现电池组能量均衡。其中, $1 \leq k \leq m, 1 \leq m \leq n, k \neq m$ 。

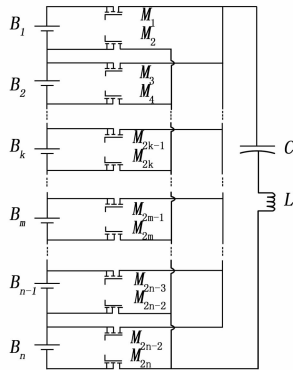


图 2 动力电池组无损均衡电路

2 均衡控制策略

2.1 均衡控制方案

系统充电开启, 均衡充电模块开始运行, 均衡控制程序流程如图 3 所示。对电池的电压、温度、电流进行检测, 然后对采集到的数据进行处理。由于电池处于充电后期时, 充电电流较小, 且电池端电压的分散性较大, 因此以电池端电压作为衡量电池状态标准较为合适^[5]。将温度、电流稳定在系统运行允许范围内, 以电池端电压数据判断电池组的均衡状态。当 SOC 大于 90% 时, 启用均衡模块, 直至各单体电池的差值达到允许误差范围, 否则周而复始地进行循环的均衡处理。

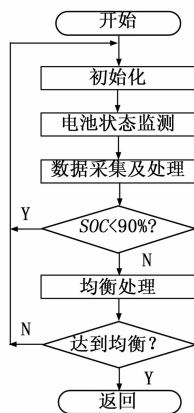


图 3 均衡控制程序流程图

2.2 马尔可夫决策算法

电池组充电均衡过程中, 单体电池间电量转移是一个离散时间的决策过程, 而某一状态下的电量转移仅仅与前一电量值有关, 从而充电均衡过程具有马尔可夫性。因此, 电池组充电均衡控制过程可以看作离散时间的马尔可夫决策过程^[6]。

马尔可夫决策过程包含 5 个元素: $\{S, (A(i), i \in S), P, R, V\}$ 。

(1) 可数非空状态集 S 的确定

$$S = \{U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_m\} \quad (1)$$

其中: U_i 为第 i 个单体电池的端电压, $1 < i < m$ 。

(2) 状态决策行为集合 $A(i)$ 的确定

$$A(i) = \{\Delta U_{i1}, \Delta U_{i2}, \dots, \Delta U_{ij}, \dots, \Delta U_{im}\} \quad (2)$$

其中: ΔU_{ij} 代表 ΔU_i 与 ΔU_j 之间的电压差, $1 < i < m, 1 < j < m$ 。

(3) 状态转移概率 P 的确定

任意 t 时刻, 系统处于状态 i , 决策行为 $A(i)$ 的条件下, 系统在 $t+1$ 时刻转移到状态 j 的概率, 称为一步状态转移概率, 其与时间 t 无关。在工程的预测应用中, 转移概率是通过统计得到的。故一步状态转移概率 P_{ij} 的公式如下:

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n n_{ij}} \quad (3)$$

其中: n_{ij} 代表一段统计时间内, 单体电池 i 将高出的部分能量转移给单体电池 j 的次数。

k 步状态转移概率为一步转移概率的 k 次方, 即:

$$P(k) = P_{ij}^k \quad (4)$$

第 k 步转移时, 电池间的电量转移由 $\Delta U_{ij}(k-1) \cdot P(k)$ 决定。

(4) 报酬函数 R 的确定

报酬函数与系统的历史过程无关, 即无论系统经过何种过程到达状态 i , 只要采取的决策行为 $A(i)$ 相同, 那么获得的报酬也相同。

$$R_{(i,A(i))}(x) = \frac{\Delta U_{ij}(x-1)}{2} \quad (5)$$

(5) 目标函数 V

均衡充电后期过程中, 目标函数 V 可用各个单体电池最终电压收益与平均电压收益的方差来表示, 结合报酬函数 R , 目标为期望各个单体电池电压值偏差最小。

$$V_{(i,A(i))} = \min_{j=1}^m \left[U_j + \sum_{x=1}^k R_{(i,A(i))}(x) - \frac{\sum_{j=1}^m (U_j + \sum_{x=1}^k R_{(i,A(i))}(x))^2}{m} \right] \quad (6)$$

3 实验结果

为了验证对基于马尔可夫的锂电池组均衡充电控制的可行性, 以 12 个单体电池串联组成电池组进行充电。具体实验过程中电池参数如表 1 所示。

表 1 实验过程中电池参数

参数名称	数值
额定容量	50 AH
充电截止电压	3.65 V
充电电流	15 A
温度	20 °C

电池组充电过程中, 当 $0\% < SOC < 90\%$ 时, 采用以电流大小为 15 A 进行恒流充电, 当 $90\% \leq SOC \leq 100\%$ 时, 改用恒压充电。充电时常为 7 200 s, 每 120 s 记录一次各单体电池电压值, 得到均衡充电过程各单体电压变化值, 然后将实验数据绘制图表, 如图 4 所示。最终得到均衡后各单体电池的电压值, 如图 5 所示。

4 结论

通过改进的锂电池组均衡电路, 选用元器件少, 结构简

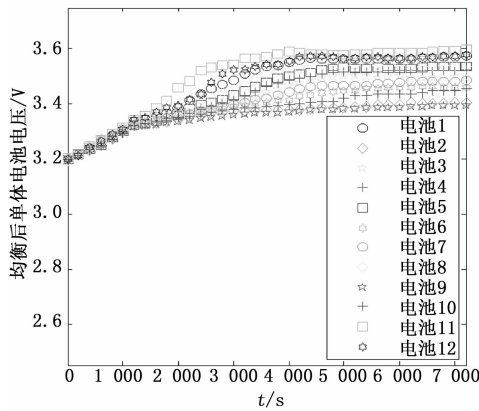


图 4 均衡后各单体电压变化值

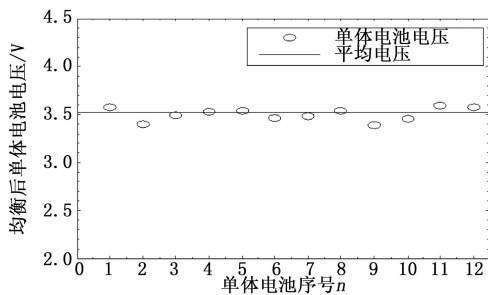


图 5 均衡后各单体电池的电压值

单, 能够灵活地控制能量的转移方向, 满足均衡的目的。同时, 运用马尔可夫决策算法, 对转移方向提前预测, 缩短了均衡时间。实验结果证明, 该均衡电路和均衡策略组成的均衡模块使电池组各单体电池间最大电压差明显减小, 均衡效果良好, 电池组容量得到很好的利用, 从而有利于电池组使用寿命的延长。但是均衡充电过程中, 均衡变量电池端电压的准确性直接影响马尔可夫算法预测转移方向的好坏, 所以如何保证均衡充电过程中电池端电压的精确度, 有待进一步研究。

参考文献:

[1] 谭晓军. 电动汽车动力电池管理系统设计 [M]. 广州: 中山大学出版社, 2011.
 [2] 韩广欣, 韩金东, 张秀军, 等. 锂离子电池组均衡充电的研究进展 [J]. 电池工业, 2009, 14 (1): 65-68.
 [3] Park H S, Kim C E, Moon G W. Charge equalization with series coupling of multiple primary windings for hybrid electric vehicle Li-ion battery system [J]. IEEE, 2007, (6): 266-271.
 [4] 张金龙, 夏超英. 双向无损蓄电池均衡系统的设计与实现 [J]. 电工电能新技术, 2012, 31 (2): 15-19.
 [5] 郭军, 刘和平, 徐伟, 等. 纯电动汽车动力电池均衡充电的研究 [J]. 电源技术, 2012, 36 (4): 479-482.
 [6] 刘克. 实用马尔可夫决策过程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

~~~~~  
 (上接第 1817 页)

表 1 监控记录数据结果

| 消息号 | 消息名称   | 发送地址      | 发送周期 (ms) | 终端地址      | 消息内容   |
|-----|--------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 1   | 除冰状态   | RT3.4     | 200       | BC.32     | 除冰工作启动 |
| 2   | 起落架状态  | RT7.2     | 200       | BC.25     | 起落架放下  |
| 3   | 防火状态   | BC.68     | 200       | RT1.8     | 防火启动   |
| 4   | 舱门状态   | RT1.6     | 200       | RT4.3     | 左舱门关闭  |
| 5   | 舱门状态   | RT11.9    | 200       | RT1.2     | 右舱门关闭  |
| 6   | 环控状态   | BC.56     | 200       | RT12.11   | 环控启动   |
| 7   | APU 状态 | RT4.4     | 200       | RT8.5     | APU 启动 |
| 8   | 刹车状态   | RT9.8     | 50        | BC.35     | 左刹停止   |
| 9   | 油温状态   | RT4.5     | 100       | RT3.1     | 油温正常   |
| 10  | 环控状态   | BC.3      | 200       | RT10.7    | 环控失效   |
| 11  | 刹车状态   | RT1.5     | 50        | RT3.6     | 右刹停止   |
| 12  | 气压状态   | HB6096.6  | 100       | HB6096.19 | 气压正常   |
| 13  | 舱门状态   | HB6096.2  | 100       | HB6096.7  | 驾驶舱门关闭 |
| 14  | 应急电源状态 | HB6096.15 | 100       | HB6096.3  | 应急电源启动 |
| 15  | 液压状态   | HB6096.9  | 100       | HB6096.11 | 液压启动   |
| 16  | 转速状态   | HB6096.4  | 100       | HB6096.8  | 转速正常   |
| 17  | 发动机状态  | NOC       | 200       | NULL      | 左发正常   |
| 18  | 发动机状态  | EEC       | 200       | NULL      | 右发正常   |
| 19  | 转速状态   | EEC       | 200       | NULL      | 转速正常   |
| 20  | APU 状态 | NSC       | 200       | NULL      | APU 启动 |
| 21  | 应急电源状态 | NSC       | 200       | NULL      | 应急电源关闭 |
| 22  | 气压状态   | TMC       | 200       | NULL      | 气压正常   |
| 23  | 油温状态   | TMC       | 200       | NULL      | 油温正常   |

4 实验结果

实验中, 外部接入 1 路双余度 1553B 总线、1 路双余度 CAN 总线、5 路单余度 CAN 总线和 22 路 HB6096 数据总线输入接口, 通过对监控记录数据的分析, 确定总线监控器的性能指标, 如表 1 所示。

5 结论

为了有效地提高飞机的健康监控性能, 国内外对机载记录仪的研究十分广泛, 但多数产品都受制于存储容量小、连续记录时间短及记录数据种类单一等限制。本文正基于此提出了一种新的航空机载高、复杂度大、容量多的总线监控器的设计及实现技术。总线监控器是一种在不干扰外部系统正常工作的前提下, 能实时主动地记录 1553B 总线、CAN 总线和 HB6096 总线的线上数据进行监控并记录到大容量电子盘中。总线监控器的设计, 极大地提高了飞机维护 and 保障性能。

参考文献:

[1] 周精华, 翟正军. 航电 1553B 总线监控系统的设计与实现 [J]. 测控技术, 2009, 28 (1): 58-61.  
 [2] 张晓斌, 李璨, 郑先成, 飞机分布式配电系统总线监控器的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (6): 1113-1115.  
 [3] 王黎明, 夏立, 邵英, CAN 现场总线系统的设计与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 25-108.  
 [4] 宁伟. 通用航空总线实时测试与分析技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.