

电动汽车锂电池组的新型双向均衡法

高金辉, 杜浩

(河南师范大学 电子与电气工程学院, 河南 新乡 453007)

摘要: 由于电池制造工艺的制约导致生产出的电池间存在一定的离散性, 多次充放电后不一致性更加严重, 因此有必要对电动汽车电池组进行均衡. 在分析了锂电池间不一致性的基础上建立了双向均衡结构, 采用粒子滤波 PF(Particle Filter)法估算电池初始剩余电量 SOC(State Of Charge), 提出了先让高 SOC 电池放电和先给低 SOC 电池充电的均衡法. 该方法相比传统基于充电电压的均衡法能更精确的反映电池能量状态. 实验结果表明, 对于要求低能耗的系统采用先让高 SOC 电池放电均衡至 $\pm 2\%$ 平均 SOC 界限范围; 对于要求均衡结果一致性较高的系统采用先给低 SOC 电池充电均衡至 $\pm 1\%$ 平均 SOC 界限范围. 该均衡方法有效改善了电池组间的不一致性, 对于提高电动汽车锂离子电池的使用寿命和续航里程具有实际意义.

关键词: 锂电池; 不一致性; 双向均衡; SOC 估算; 均衡法

中图分类号: TM912

文献标志码: A

电动汽车因其独特的节能环保优势被人们广泛使用, 电动汽车用锂电池因其不同的生产制造过程和运行环境, 多次充放电^[1]后产生严重的不一致性^[2], 使其使用寿命^[3]降低, 因此需要均衡消除锂电池组间的不一致性. 本文在分析了电池间不一致性的基础上建立双向均衡结构, 提出两种新型均衡方法, 并分别均衡到不同 SOC 界限范围进行具体的比较分析.

1 锂电池间不一致性分析

由于电池个体之间内部特性的差异, 若干次充、放电后, 电池组会失衡, 导致电池组整体特性的急剧衰退和部分电池的加速损坏, 严重影响电动汽车的效率与安全, 因此在锂电池组使用时需要解决单体电池间不一致的问题.

均衡方法可分为两类: 基于电池充电电压的均衡法^[4]和基于剩余电量 SOC 的均衡法^[5]. 实验中选取由环宇赛尔新能源科技有限公司生产的电动大巴用 EV-HPPF70173248 型号的磷酸铁锂动力电池 (3.2 V, 18.8 Ah), 将 10 节单体电池串联组成一个小电池组, 如图 1 所示.

10 节串联电池的充电电压在充电过程中各不相同, 充电电流的变化会引起电压的急剧变化, 因此基于电池充电电压的均衡方法容易导致过度均衡, 由于锂电池的非线性充放电曲线, 在充放电的平台期微小的电压变化可能会伴随较大的容量变化, 因此基于 SOC 的均衡法需要精确的电池剩余容量和 SOC 估算, 更适用于锂离子电池.

2 双向均衡结构和基于 PF 的 SOC 估算法

2.1 双向均衡结构

收稿日期: 2016-08-27; 修回日期: 2016-10-09.

基金项目: 河南省重点科技攻关项目(132102210043)

第 1 作者简介: 高金辉(1962-), 男, 河南南阳人, 河南师范大学教授、高级工程师, 研究方向为电路系统设计及新能源研究, E-mail: gjh@htu.cn.

通信作者: 杜浩(1992-), 女, 河南焦作人, 河南师范大学硕士研究生, 研究方向为电路系统设计及新能源研究, E-mail: 992592416@qq.com.

电动汽车管理系统中,均衡模块用于将高 SOC 电池单体的能量转移到电池组、将电池组的能量转移到低 SOC 电池单体,从而扩展充电范围,避免电池组因小容量单体过充过放的失效而引起电池组提前失效。

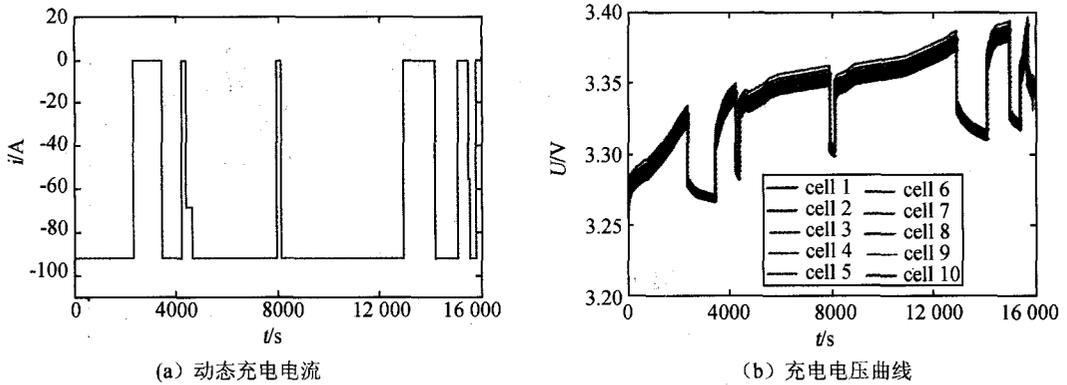


图1 10节单体电池组成的电池组充电实验

图2为均衡结构框图,图3为双向均衡电路,该电路可实现电池单体到组、电池组到单体的双向均衡^[6]。在电池单体到组的均衡中,若某电池 SOC 高于上限临界值(高于电池组中 10 个电池单体的平均剩余电量 $\langle S \rangle$ 2% 或 1%, S 表示电池 SOC),则该电池单体开始放电;电池组到单体的均衡中,若某电池 SOC 低于下限临界值(低于 $\langle S \rangle$ 2% 或 1%),则该电池单体就开始被充电。

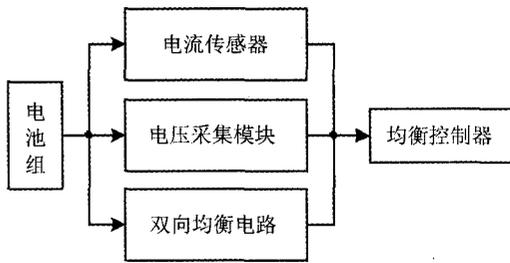


图2 均衡结构框图

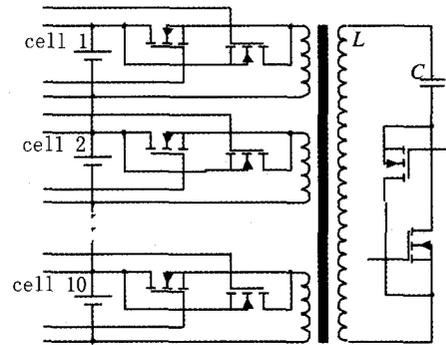


图3 双向均衡电路

无论是电池单体到组还是电池组到单体的均衡,都需要准确的电池 SOC 估计^[7]。定义

$$S(t) = S(t_0) + \eta_c \int_{t_0}^t [i(\tau) + i_E(\tau)] d\tau / Q_{rated}, \tag{1}$$

其中, $i(\tau)$ 表示 τ 时刻的电流, i_E 表示均衡电流, η_c 表示库仑效率(磷酸铁锂电池的库仑效率 $\eta_c \approx 1$), Q_{rated} 表示额定电量。该模型中开路电压 OCV(Open Circuit Voltage)

$$U_{ocv}(t) = E(t) + [i(t) + i_E(t)]R = E_0 - K_0 S(t) - K_1 / S(t) + K_2 \ln[S(t)] + K_3 \ln[1 - S(t)], \tag{2}$$

其中, $E(t)$ 表示 t 时刻的端电压, R 表示内阻抗, $i(t)$ 表示 t 时刻的电流, E_0 表示初始状态下的开路电压值, K_0, K_1, K_2, K_3 表示模型参数。

2.2 基于 PF 的 SOC 估算法

根据离散化方程(1)、(2),离散时间状态空间方程如下:

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, i_{k-1}) + w_{k-1}, \\ y_k = g(x_k, i_k) + v_k. \\ S_k = S_{k-1} + (i_{k-1} + i_{E,k-1})\Delta t / Q_{rated} + w_{k-1}, \\ E_k = E_0 - K_0 S_k - K_1 / S_k + K_2 \ln S_k + K_3 \ln(1 - S_k) - (i_{k-1} + i_{E,k-1})R + v_k, \end{cases}$$

其中, x 表示状态变量, y 表示观察到的变量, i 表示模型的输入量, Δt 是样本周期, $\{w\}$ 和 $\{v\}$ 分别表示协方差为 Q_w 和 Q_v 的系统噪声和观测噪声,其中测量噪声在 SOC 估算中是不可避免的,用 PF 算法^[9]估算 SOC

的具体过程如下.

1. 初始化: $k = 0$ 时,对于 SOC 随机生成 n 个初始粒子 $x_0^i (i = 1, 2, \dots, n)$.

2. $k = 1, 2, \dots$ 时, SOC 的状态估计:

① 重要性采样粒子权值 $w_k^i = \exp\left[-\frac{1}{2R}(y_k - y_k^i)\right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi R}}$;

② 归一化 $q_k^i = w_k^i / \sum_{i=1}^n w_k^i$;

③ 判断阈值 $N_{eff} = 1 / \sum_{i=1}^n (q_k^i)^2$;

④ $S_k = \sum_{i=1}^n q_k^i x_k^i$.

采用最小二乘法拟合可得到模型参数.

3 仿真实验验证与分析

基于电池的 SOC 提出两种均衡法:先给低 SOC 电池充电和先让高 SOC 电池放电的均衡法. 先给低 SOC 电池充电的均衡法首先将电池组的能量转移到较低 SOC 的电池中,在低能量电池都达到 $\langle S \rangle$ 下界(低于 $\langle S \rangle 2\%$ 或 1%)之后,能量再从充电最多的电池转移到电池组;先让高 SOC 电池放电的均衡法首先让高能量电池的能量转移到电池组,当高能量电池都下降到 $\langle S \rangle$ 上界(高于 $\langle S \rangle 2\%$ 或 1%)之后,再将电池组的能量转移到低 SOC 电池中.

如图 4 所示电池被充到 3.4 V 左右停止充电 30 min. 根据实验测量的 SOC-OCV 曲线可得到 10 个电池的 SOC 初始值,并计算得到初始的平均剩余电量 $\langle S \rangle$. 图 5 表示先给低 SOC 电池充电的均衡法分别将 10 个电池单体均衡到 $\langle S \rangle \pm 2\%$ 和 $\pm 1\%$ 界限范围;图 6 表示先让高 SOC 电池放电的均衡法分别将 10 个电池单体均衡到 $\langle S \rangle \pm 2\%$ 和 $\pm 1\%$ 界限范围.

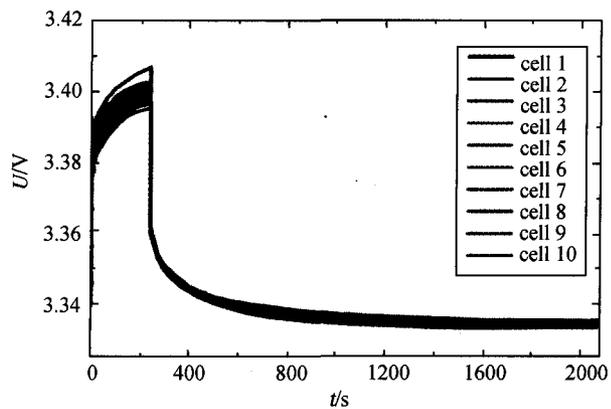
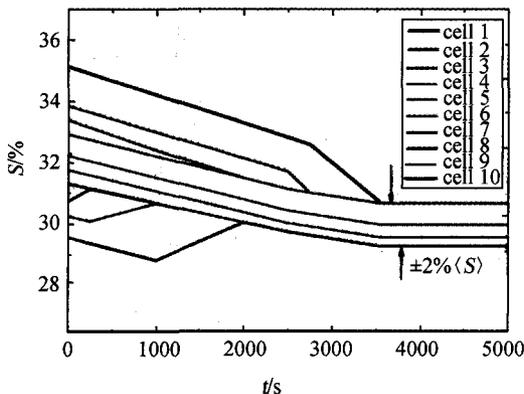
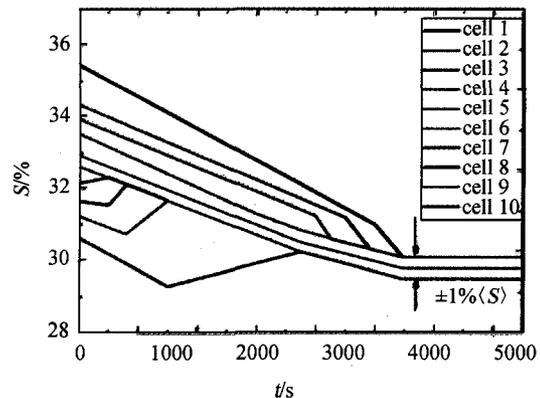


图4 均衡之前电池电压充放电曲线

表 1 所示为图 5、图 6 的实验数值结果,其中均衡时间参数反映均衡的快慢程度,标准差参数反映均衡结果的一致性, $\langle S \rangle$ 损耗反映均衡过程中能量损耗的大小.



(a) 均衡至 $\pm 2\% \langle S \rangle$ 界限



(b) 均衡至 $\pm 1\% \langle S \rangle$ 界限

图5 先给低SOC电池充电的均衡法

由表1中各均衡参数结果可以得出以下结论:1)均衡到同一界限范围的情况下,先让高SOC电池放电均衡法的执行时间较短、损耗较低,而先给低SOC电池充电均衡法的均衡结果一致性较好;2)执行同一均衡方法的情况下,均衡到 $\pm 2\%$ 界限范围的均衡时间较短、损耗较低,而均衡到 $\pm 1\%$ 界限范围的一致性较好。

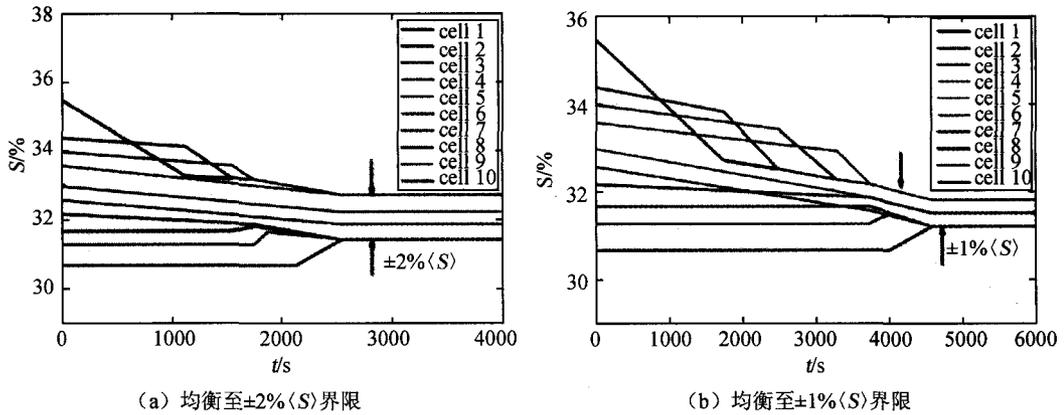


图6 先让高SOC电池放电的均衡法

表1 两种均衡法在 $\pm 2\%$ 界限比较

	均衡时间/s	S的标准差	$\langle S \rangle$ 损耗/%
先给低SOC电池充电	3560	0.53	1.87
先让高SOC电池放电	2540	0.62	0.78

表2 两种均衡法在 $\pm 1\%$ 界限的比较

	均衡时间/s	S的标准差	$\langle S \rangle$ 损耗/%
先给低SOC电池充电	5470	0.25	3.05
先让高SOC电池放电	4590	0.31	1.37

4 结论

在分析了锂离子电池间不一致性的基础上建立了双向均衡结构,在PF法估算SOC的基础上提出了新型的均衡方法,实验结果表明,对要求低能耗的系统采用先让高SOC电池放电均衡至 $\pm 2\%$ 界限范围,要求均衡结果一致性较高的系统采用先给低SOC电池充电均衡至 $\pm 1\%$ 界限范围,其均衡效果较为理想。该方法相比传统的均衡方法更能精确地反映出电池能量状态,对提高电动汽车的运行可靠性和续航里程具有一定的实际意义。

参 考 文 献

- [1] 谢德明, 吴瑞峰, 蒋盛芳, 等. 电池充放电曲线基本变化特征的分析[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 107-111.
- [2] ZHENG Y, OUYANG M, LU L, et al. Cell state-of-charge inconsistency estimation for LiFePO₄ battery pack in hybrid electric vehicles using mean-difference model[J]. Applied Energy, 2013, 111: 571-580. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.05.048.
- [3] 高飞, 杨凯, 惠东, 等. 储能用磷酸铁锂电池循环寿命的能量分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 41-45.
- [4] ZHENG Y, LU L, HAN X, et al. LiFePO₄ battery pack capacity estimation for electric vehicles based on charging cell voltage curve transformation[J]. Journal of Power Sources, 2013, 226: 33-41. DOI:10.1016/j.jpowsour.2012.10.057.
- [5] ZHONG L, ZHANG C, HE Y, et al. A method for the estimation of the battery pack state of charge based on in-pack cells uniformity analysis[J]. Applied Energy, 2014, 113: 558-564. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.08.008.
- [6] 高金辉, 贾利锋, 顾学俊. 锂电池组非耗能双向均衡系统的设计[J]. 电源技术, 2010, 34(2): 131-133. DOI:10.3969/j.issn.1002-087X.2010.02.012.

Anti-control of Chaos for a Class of Linear Systems with Invariable Time-delay

LIU Na, ZHOU Qiong, SUN Junman

(College of Electric and Information, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: A class of linear systems with invariable time-delay is studied. By the use of Taylor's formula, an expression of the maximum Lyapunov exponent for the systems is obtained, and a judgement about the sensitivity to the initial conditions is derived. Additionally, based on the boundedness lemma for general functional differential equations, a suitable Lyapunov functional is constructed and then a criteria about the boundness of the systems is obtained. Combining the theoretical results above, a theorem about the chaotification for the time-delayed systems is derived. Finally, we cited some examples to demonstrate the effectiveness of the theoretical results by simulating the the maximum Lyapunov exponent which changes with time-delay parameters and corresponding phase diagrams.

Keywords: anti-control of chaos; the maximum Lyapunov exponent; invariable time-delayed linear system

(上接第56页)

- [7] 时 玮,姜久春,李索宇,等. 磷酸铁锂电池 SOC 估算方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(8): 769-774. DOI:10.3724/SP. J. 1187. 2010. 00769.
- [8] PLETT G L. Sigma-point Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 2: Simultaneous state and parameter estimation[J]. Journal of Power Sources, 2006, 161(2): 1356-1368.
- [9] YANG F, XING Y, WANG D, et al. A comparative study of three model-based algorithms for estimating state-of-charge of lithium-ion batteries under a new combined dynamic loading profile [J]. Applied Energy, 2016, 164: 387-399. DOI: 10.1016/j. apenergy, 2015. 11. 072.

A New Bidirection Equalization Method for Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles

GAO Jinhui, DU Hao

(College of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang, Henan, 453007, China)

Abstract: Cell inconsistency is inevitable due to manufacturing constraint, especially after repeated charging and discharging. Therefore, cell equalization is essentially required in electric vehicles. The bidirection equalization models are established based on the analysis of the inconsistency between the lithium-ion batteries. The PF (particle filter) method is employed to estimate the cell SOC (state of charge). The first high-SOC cell discharge and first low-SOC cell charge equalization algorithms are proposed. This method can reflect the state of battery power accurately when compared with the traditional balancing method based on the battery voltage. The first high-SOC cell discharge method is adopted in low energy system and is balanced to 2% SOC bounds. The first low-SOC cell charge method adopted in high consistency system and is balanced to 1% SOC bounds. The validation experiment results have shown that this method can improve the consistency of the battery effectively, and the proposed algorithm has a certain practical significance to improve the useful life and the mileage of the electric vehicle lithium-ion battery.

Keywords: Lithium-ion battery; cell inconsistency; bidirection equalization; SOC estimation; equalization method