

DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2018.4.162

中图分类号:TP302.1

文献标志码:A

航空锂离子电池组过放电工作特性研究

王顺利¹, 胡宜芬²

(1.西南科技大学信息工程学院特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 绵阳 621010;

2.信阳职业技术学院汽车与机电工程学院, 信阳 454000)

摘要:航空锂离子电池组工作不同于通常动力锂离子电池组,是长时间搁置、间歇充电和瞬时大电流放电的工作状态,其过放电工作特性对能量管理和航空安全至关重要。基于反应机理分析和过放电实验研究,通过电池等效模型构建和状态空间描述,实现过放电过程分析,获得极限条件下的电池工作特性。通过使用7串45 Ah航空锂离子电池组进行测试验证该方法的可行性和精度。实验结果表明,在电池组过放电过程中,输出电压存在缓慢变化、快速变化和陡坡变化3个阶段,输出电压跟踪误差低于5%,确定放电截至电压(拐点)为20.14 V;通过宽温度范围工作特性的研究,确立最佳工作温度范围为5~35 ℃,基于加热片和散热器的方式实现了其最佳温度范围控制。该方法能够对过放电特性准确数学描述,有效分析航空锂离子电池组的工作特性,提供工作特征突变关键点监测方法,为航空安全的关键性突破奠定基础。

关键词:航空锂离子电池组;过放电;工作特性;状态估计;输出电压跟踪

Study on Operating Characteristics of Over-discharging Aero Lithium-ion Battery Packs

WANG Shunli¹, HU Yifen²

(1. Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. School of Automotive and Mechanical and Electrical Engineering, Xinyang Vocational and Technical College, Xinyang 454000, China)

Abstract: With the operating characteristics of long time abeyance, intermittent recharge and instantaneously large current discharge, the operation of aero lithium-ion battery packs is different from that of the conventional power lithium batteries. Therefore, its over-discharging characteristics are essential for the energy management and aviation security. In this paper, based on the analysis of reaction mechanism and the experimental study on over-discharge, the over-discharging process was analyzed through the establishment of a battery equivalent model and the description of state-space, and the operating characteristics of batteries under extreme conditions were obtained. The feasibility and accuracy of the proposed method were verified through tests on 45 Ah aero lithium-ion battery packs of 7 cells. Experimental results showed that, in the over-discharging process of battery packs, the output voltage was divided into three stages, i.e., slow, rapid and steep changes; the output voltage tracking error was less than 5%, and the discharge cut-off voltage (i.e., inflection point) was determined as 20.14 V; through studying the operating characteristics in a wide temperature range, the optimum operating temperature range was identified as 5~35 ℃, the control of which can be achieved by means of heater bands and radiators. This method can realize an accurate mathematical description of the over-discharging characteristics and an effective analysis of the operating characteristics of aero lithium-ion battery packs, which provides a monitoring method for key mutations in operating characteristics and lays a foundation for breakthroughs in aviation security.

收稿日期:2016-05-31;修回日期:2018-01-10

基金项目:四川省教育厅科研资助项目(17ZB0453);四川省科技厅资助项目(2017FZ0013);绵阳市科技计划资助项目(15G-03-3)

Project Supported by Scientific Research Fund of Sichuan Provincial Education Department(17ZB0453);Sichuan Science and Technology Department Project(2017FZ0013);Mianyang Science and Technology Project(15G-03-3)

Keywords: aero lithium-ion battery packs; over-discharge; operating characteristic; state estimation; output voltage tracking

航空蓄电池组主要用途为:①在发动机未启动且机外电源未上电的情况下,提供电源以进行开舱盖、数据下载等维护工作;②作为应急电源给机上关键负载供电;③机上电源转换时,覆盖一部分关键负载的电压瞬态;④地面或空中起动辅助动力装置供电;⑤用于关键仪器仪表检查和飞机点火的电力供应;⑥发电机电源不稳时应急供电和紧急迫降能量供应。锂离子电池具有工作电压高、容量大、自放电小、重量轻、体积小等优点,美国军用 A10、MQ-9、AH64 等战机和无人机于 2013 年已由镉镍电池全部转为锂离子电池(Eagle-Picher 公司供应),空运客机和国内军用飞机上的电池组也逐步使用锂离子电池组替代。

锂离子电池已在各大领域中得到探索性使用,由于反应过程的复杂性,需要完善的电池管理系统,其中电池工作特性研究和输出电压跟踪至关重要。围绕锂离子电池应用中的状态估算和输出跟踪问题,科研工作者做了大量研究工作,有效提高了使用过程中的安全性和能量利用效率。2014 年邓磊等^[1]对基于改进 PNGV 模型的动力锂电池快速充电优化展开研究;2015 年德国亚琛工业大学的 Farmann 等^[2]对锂离子电池在线容量估计方法进行了总结和思考;2015 年北京理工大学的 Gao 等^[3]基于赤池信息准则和一阶 RC 电池模型构建了 SOC 估计器,实现 SOC 最大估计误差为 1%;2015 年清华大学的何志超等^[4]基于恒流外特性和 SOC 提出了电池直流内阻测试方法;美国美敦力能源及元件中心的 Hu 等^[5]于 2015 年基于粒子群优化算法对 SOC 估算进行了探索性研究,提高了估算过程的鲁棒性;2015 年美国内布加斯拉大学的 Kim 等^[6]提出了基于等效模型的电池状态监测方法;毛华夫、Pattipati、尚丽平、Waag 等等各团队针对锂离子电池状态估算与监测做了大量研究工作^[7-16]。

本文针对航空锂离子电池组应用中等效模型构建和输出电压跟踪问题,基于等效电路分析,对锂离子电池组的内部结构进行模拟。通过分析所构

建模型不同条件下的反应,实现对其工作特性分析,为航空锂离子电池组的应用提供安全保障。

1 理论研究

1.1 航空锂离子电池组工作特性分析

航空锂离子电池组及其管理为飞机控制系统的子系统之一,其工作模式为:①在发动机正常工作时,切断电池组供电,由发电机供电整个控制系统;②在电池管理系统监测到变压整流器电压波动异常时,导通电池组供电并切断发电机供电;③电池管理系统监测到电池组电量低时,控制发电机在给整个控制供电的同时,给电池组间歇补充电。航空锂离子电池组基本工作特征为:①机载时大多数时间处于搁置和间歇小电流充电工作状态;②动力供电时需要 1C 甚至更高的大电流输出;③安全性要求高,需要时刻明确显示表征其真正剩余电量的 SOC 值,描述所具有的应急返航能力,作为继续飞行、应急返航或跳伞依据。航空锂离子电池组不同工况时段工作过程如图 1 所示。

图中,各符号的物理意义如下所述:搁置 S (shelve),仪表检查 IC (instrument check),点火 I (ignition),补充电 R (recharge),自放电 SD (self-discharge),应急动力输出 EPO (emergency power output),放电区域 DA (discharge area),充电区域 CA (charge area)。基于特殊工况需求,航空锂离子电池组 SOC 估算存在的问题主要有:①设备检查和点火过程中,电流波动剧烈,带来估算误差;②频繁搁

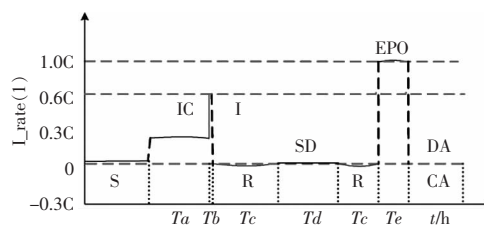


图1 航空锂离子电池组特殊工况分析

Fig.1 Analysis of special working conditions for aero lithium-ion battery packs

置、间歇小电流充电的过程中,电流检测误差大,存在估算过程累积误差;③应急大电流波动输出时,需得到准确 SOC 作为应急处理依据,工作过程表征存在平台效应,对估算准确性造成影响;④成组工作 SOC 估算过程中,单体间不平衡影响估算精度;⑤现用安时积分法忽略电流波动、自放电及平衡状态等因素影响,估算结果不精确,依赖于定期地面维护。

1.2 电池等效模拟与参数辨识

相关研究工作者通过研究电池的内部机理,构建了各种电化学模型,用于电池工作过程模拟。为了降低电池等效模型复杂度和提高模拟精度,以下 3 种简化的电化学模型得到广泛应用:①Shepherd 模型, $y_k = E_0 - Ri_k - K_1/x_k$; ②Unnerwehr universal 模型, $y_k = E_0 - Ri_k - K_2x_k$; ③Nernst 模型, $y_k = E_0 - Ri_k - K_1 \ln x_k + K_2 \ln(1-x_k)$ 。其中, y_k 为 k 时刻电池端电压, E_0 为电池 SOC=1 时的电池电动势, R 为电池的放电内阻或充电内阻。为了提高模型的精度,结合以上 3 个模型,可以得到组合模型: $y_k = E_0 - Ri_k - K_1/x_k - K_2x_k - K_3 \cdot \ln x_k + K_4 \ln(1-x_k)$ 。

针对锂离子电池成组工作特殊情况,通过 1C₅A(国标规定的 5 小时放完电量时,所用的标准电流)放电实验法分析发现,原组合模型无法得到准确拟合,通过不同组合测试发现,去掉最后项 $K_4 \ln(1-x_k)$ 可以得到较好的曲线拟合。因此,针对性优化原组合模型,采用曲线拟合的目标状态空间方程为

$$y_k = E_0 - Ri_k - K_1/x_k - K_2x_k + K_3 \ln x_k \quad (k=0, 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中: i 为随时间变化的电流; k 为对应的时刻。针对该模型参数确立目标,分析非线性曲线拟合特点,采用最小二乘法实现参数辨识过程,其基本原理如下所述。设定实验结果数据为 (x_k, y_k) ($k=0, 1, 2, \dots, m$), 求自变量 x 与因变量 y 的函数关系式 $y = S(x; E_0, R, K_1, K_2, K_3)$, 其中, E_0, R, K_1, K_2, K_3 为待定参数。由于观测数据存在误差,且待定参数的数量为 5, 比给定数据点的数量 m 要少,因此该问题不要求 $y = S(x) = S(x; E_0, R, K_1, K_2, K_3)$ 通过点 (x_k, y_k)

($k=0, 1, 2, \dots, m$), 只要求在给定点 x_k 上的误差平方和最小。

根据所确立的电池模型状态空间方程,设 $\varphi_0(X), \varphi_1(X), \dots, \varphi_n(X)$ 是区间 $C[a, b]$ 上线性无关函数族,在 $\varphi = \text{span}\{\varphi_0(X), \varphi_1(X), \dots, \varphi_n(X)\}$ 中找到一个函数 $S(x)$, 使得误差平方和最小,即

$$\|\delta\|^2 = \sum_{k=0}^m \delta_k^2 = \sum_{k=0}^m [S(x_k) - y_k]^2 = \min_{S(x)=\varphi} \sum_{k=0}^m [S(x_k) - y_k]^2 \quad (2)$$

其中, $S(x) = a_0\varphi_0(X) + a_1\varphi_1(X) + \dots + a_n\varphi_n(X)$, 基于最小二乘法的函数曲线拟合,得到的拟合曲线 $S(x)$ 。在估算过程中,通过使用均方根误差 RMSE (root mean square error) 最小作为判断依据,达到最优估计效果。RMSE 是观测值与真值的偏差的平方和再与观测次数 n 比值的平方根,即

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (X_{\text{obs},k} - X_{\text{model},k})^2}{n}} \quad (3)$$

式中: $X_{\text{obs},k}$ 为 k 时刻的测量值; $X_{\text{model},k}$ 为 k 时刻的真值。

在实际测量中,观测次数 n 总是有限的,真值只能用最可信赖(最佳)值来代替。均方根误差对一组测量中的特大或特小误差反应非常敏感,所以,均方根误差能够很好地反映出测量的精密度。当对某一量进行多次测量时,取这一测量值列真误差的均方根差(即真误差平方的算术平均值再开方),称为标准偏差,以 σ 表示。 σ 反映了测量数据偏离真实值的程度, σ 越小,表示测量精度越高,因此可用 σ 作为评定这一测量过程精度的标准。

通过最小均方根误差的条件约束,使得所构建电池组模型能够准确地反映电池组的输出电压特性。

2 实验与分析

2.1 电池组过放电实验研究

选取 7 只单体串联结构的航空锂离子蓄电池组为实验样本,主要由单体电池、加热模块、监控装置、

取样电阻、熔断器模块、温度传感器、跨接板、电连接器和组合壳盖等组成,其基本参数如表 1 所示。

表 1 航空锂离子电池组实验样本参数
Tab.1 Parameters of experimental samples of aero lithium-ion battery packs

参数	数值
最大外形尺寸/(mm×mm×mm)	270×255×185
最大重量/kg	19.5
额定容量/Ah	45
标称电压/V	25.9
工作温度范围/°C	-55~70
最大工作电流/A	300
环境温度/°C	25±10
相对湿度	≤80%

针对航空锂离子电池组应急供能动力输出工况时段情况,以 1C₅A(C₅表示用 5 h 将电池电量全部放完所能得到的容量)的恒流工况来测试该模型,实验结果如图 2 所示。

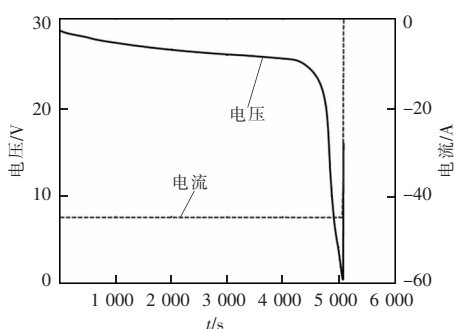


图 2 航空锂离子电池组过放电实验结果

Fig.2 Over-discharge experiment result of aero lithium-ion battery packs

2.2 过放电实验结果分析

为了放大恒流放电过程中电流微小变化情况,去掉起始位置电流为 0 的数据点(28.908, 0),即开路电压为 28.908 V。针对放电末端电压突变情况,去掉数据点(0.564, -42.252)、(0.491, -37.588)和(15.934, 0),其中最后一个数据点为电流为 0 时,电池组回升后的电压为 15.934 V。基于上述处理,获得放电过程中电压和电流的变化曲线,如图 3 所示。

由上述实验结果可知,航空锂离子电池组在放电过程中,电压随时间 t 变化特性为:在 $0 \leq t < 4000$ s

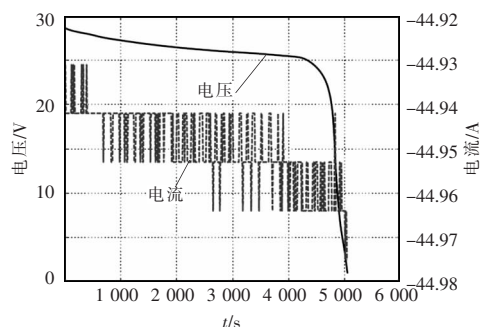


图 3 过放电过程分析

Fig.3 Analysis of over-discharging process

时,电压下降缓慢,总电压下降为 3.162 0 V,占总放出电压的比例为 11.43%;在 $4000 \leq t < 4800$ s(常态截至电压时间)时,电压下降迅速,总电压下降为 5.702 0 V,占总放出电压的比例为 20.60%;在 $4800 \leq t < 5080$ s 时,电压陡降,总电压下降为 18.812 0 V,占总放出电压的比例为 67.97%。同时,实验结果表明,在设定目标恒流放电时,随着电池 SOC 的降低,电池更容易达到目标放电电流;随着放电过程的持续,放电电流由最开始的 44.931 A 逐渐增加到 44.975 A,总变化量为 0.044 A,波动所占比例为 0.10%。

2.3 宽温度范围工作特性研究

由地面到高空过程中,考虑航空蓄电池工作温度变化的巨大差异,对航空锂离子电池组不同温度下的工作特性进行了研究,分析其不同放电倍率时所能放出的电量,实验结果如图 4 所示。

由图 4 实验结果可知:航空锂离子电池组在 0 °C 以下低温条件工作时,不同倍率放电过程中所

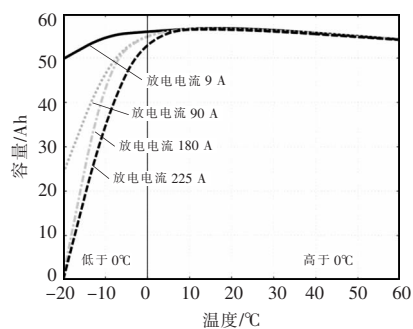


图 4 宽温度范围工作特性

Fig.4 Operating characteristics in a wide temperature range

放出的电量均有明显下降;在高于 40 °C 条件下,所放出电量亦有所下降,因此,在航空锂离子电池组工作过程中,配备有加热片和散热器,使得温度保持在 5~35 °C 范围内,以获得最佳的放出电量。

2.4 状态估计与输出跟踪实验与分析

根据放电过程曲线,基于所确立的简化电化学模型,采用偏最小二乘思想,实现电池等效模型的参数辨识。其参数辨识结果及其拟合优度如表 2 所示。表中,SSE 表示和方差,即误差平方和;R-square 表示确定系数;Adjusted R-square 表示调节自由度的确定系数。

根据参数辨识所确定系数,拟合出航空锂离子电池组工作电压输出曲线,拟合结果如图 5 所示。由图 5 分析可知,基于所构建电池等效模型的参数辨识具有较好的拟合结果。

通过状态方程和量测方程设计,达到模型输出电压跟踪目标,跟踪结果如图 6 所示。由图 6 分析可知,所构建模型对输出电压具有良好的跟踪效果,能够较好地反映输出电压的变化规律。在状态估算过程中,通过不断更新估计值,所获得结果得到更新。实验结果表明,所设计电池等效模型能够

表 2 电池等效模型参数辨识结果

Tab.2 Parameter identification results of battery equivalent model

参数	数值	参数	数值
E_0	0.342 2	SSE	1.466
K_1	0.858 3	R-square	0.998 2
K_2	-10.42	Adjusted R-square	0.998 2
K_3	-5.502	RMSE	0.055 74
R	-0.410 3		

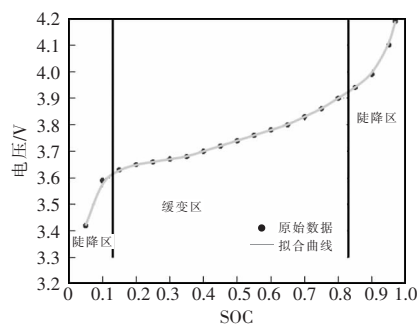


图 5 参数辨识曲线拟合结果

Fig.5 Curve fitting result of parameter identification

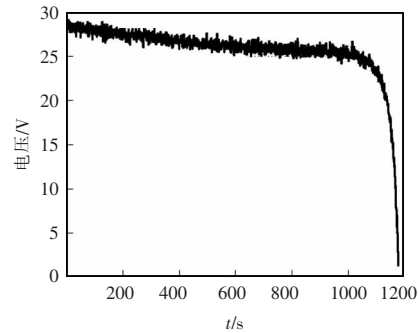


图 6 模型电压跟踪效果

Fig.6 Voltage tracking effect of the established model

反应航空锂离子电池组状态变化规律,基于电池等效模型构建的状态估算与输出电压跟踪方法能够取得良好的结果,较好地解决电池组输出电压跟踪问题。

3 结语

本文提出了一种航空锂离子电池组等效模型构建和输出电压跟踪方法。该方法通过对简化后电化学模型的有效模拟,实现对航空锂离子电池组过放电过程中电池特性的准确表征。基于此方法研究及其模型构建,航空锂离子电池组的工作状态和输出特性得到有效表征。该方法的提出对锂离子电池组工作过程分析和航空安全保障起到重要作用。

参考文献:

- [1] 邓磊,王立欣,葛腾飞,等. 基于改进 PNGV 模型的动力锂电池快速充电优化[J]. 电源学报, 2014, 12(4): 10-14.
Deng Lei, Wang Lixin, Ge Tengfei, et al. Multi-objective optimization of Li-ion battery quick charging based on improved PNGV model[J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(4): 10-14(in Chinese).
- [2] Farmann A, Waag W, Marongiu A, et al. Critical review of on-board capacity estimation techniques for lithium-ion batteries in electric and hybrid electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2015, 281: 114-130.
- [3] Gao Jianping, Zhang Yongzhi, He Hongwen. A real-time joint estimator for model parameters and state of charge of lithium-ion batteries in electric vehicles[J]. Energies, 2015, 8(8): 8594-8612.

- [4] 何志超, 杨耕, 卢兰光, 等. 基于恒流外特性和 SOC 的电池直流内阻测试方法[J]. 清华大学学报, 2015, 55(5): 532-537.
He Zhichao, Yang Geng, Lu Languang, et al. Battery DC internal resistance test method based on the constant current external characteristics and SOC[J]. Journal of Tsinghua University, 2015, 55(5): 532-537(in Chinese).
- [5] Hu Chao, Jain G, Schmidt C, et al. Online estimation of lithium-ion battery capacity using sparse Bayesian learning [J]. Journal of Power Sources, 2015(289): 105-113.
- [6] Kim T, Wang Yebin, Fang Huazhen, et al. Model-based condition monitoring for lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2015(295): 16-27.
- [7] 毛华夫, 万国春, 汪镭, 等. 基于卡尔曼滤波修正算法的电池 SOC 估算[J]. 电源技术, 2014, 38(2): 298-302.
Mao Huafu, Wan Guochun, Wang Lei, et al. Estimation of battery SOC based on Kalman filter correction algorithm[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(2): 298-302(in Chinese).
- [8] Pattipati B, Balasingam B, Avvari G V. Open circuit voltage characterization of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2014(269): 317-333.
- [9] 尚丽平, 王顺利, 李占锋, 等. 基于放电试验法的机载蓄电池 SOC 估计方法研究[J]. 电源学报, 2014, 12(1): 61-65.
Shang Liping, Wang Shunli, Li Zhanfeng, et al. Airborne battery SOC estimate method study based on discharge test method[J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(1): 61-65 (in Chinese).
- [10] Waag W, Sauer D U. Adaptive estimation of the electromotive force of the lithium-ion battery after current interruption for an accurate state-of-charge and capacity determination[J]. Applied Energy, 2013, 111(4): 416-427.
- [11] Wang Shunli, Shang Liping, Li Zhanfeng, et al. Lithium-ion battery security guaranteeing method study based on the state of charge estimation[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2015, 10(6): 5130-5151.
- [12] Wang Shunli, Shang Liping, Li Zhanfeng, et al. Online dynamic equalization adjustment of high-power lithium-ion battery packs based on the state of balance estimation[J]. Applied Energy, 2016(166): 44-58.
- [13] 王顺利, 李建超, 尚丽平, 等. 非四线制锂电池组实时电压检测校正方法研究[J]. 电源学报, 2016, 14(1): 80-85.
Wang Shunli, Li Jianchao, Shang Liping, et al. Non-four-wire lithium battery pack voltage detecting correction method study[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(1): 80-85 (in Chinese).
- [14] Huang Jianlong, Wang Zhongfeng, Guo Kunya, et al. The analysis of modeling of dual Kalman filter in Lithium battery SOC estimates[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 513(1): 4294-4297.
- [15] Xing Yinjiao, He Wei, Pecht M, et al. State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures[J]. Applied Energy, 2014, 113(1): 106-115.
- [16] Xu Jun, Mi C C, Cao Binggang, et al. The state of charge estimation of lithium-ion batteries based on a proportional-integral observer[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(4): 1614-1621.

作者简介:

王顺利(1985-),男,博士研究生,讲师,研究方向:电池状态检测与控制,E-mail:wangshunli@swust.edu.cn。

胡宜芬(1987-),女,通信作者,硕士,助教,研究方向:自动化控制,E-mail:huyifen@126.com。

王顺利