

基于锂电池 SOC 的运载火箭供电 能源冗余管理研究

汪 灏¹, 沈川杰², 周恒保¹, 王雨果², 高 飞³, 徐 昕^{3,4}

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201100; 2. 上海空间电源研究所, 上海 201100;
3. 上海航天电子技术研究所, 上海 201100; 4. 南京航空航天大学 航天学院, 南京 210016)

摘要: 目前, 在运载火箭领域, 给箭上控制系统、测量系统和电磁阀火工品负载各提供一块电池供电, 电池故障会导致箭上电气系统工作异常, 严重时甚至导致任务失败等灾难性后果; 锂电池具有高能储存密度、使用寿命长等优点, 正在取代传统锌银电池应用于运载领域; 针对运载火箭领域电池电源无冗余的问题, 对锂电池故障诊断进行研究; 根据锂离子单体电池 SOC 估算结果作为电池故障诊断的依据; 采用 EKF 算法提高锂离子单体电池 SOC 估算的精度; 根据故障诊断结果通过电池组拓扑重构完成故障单体电池智能切换, 建立了运载火箭供电能源冗余管理系统; 经仿真测试满足工程应用要求, 提高了运载火箭领域电池的可靠性、安全性与容错能力, 对提高运载火箭可靠性安全性有重大意义。

关键词: 运载火箭; 锂电池; SOC 估算; 故障诊断; 冗余管理

Research on Power Supply Redundancy Management of Launch Vehicle Based on Lithium Battery SOC

WANG Hao¹, SHEN Chuanjie², ZHOU Hengbao¹, WANG Yuguo², GAO Fei³, XU Xin^{3,4}

(1. Shanghai Institute of Aerospace System Engineering, Shanghai 201100, China;

2. Shanghai Institute of Space Power-sources, Shanghai 201100, China;

3. Shanghai Institute of Aerospace Computer Technology, Shanghai 201100, China;

4. School of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Currently, the launch vehicle provides one battery pack to each of them to supply power for the control system, measurement system, electromagnetic valve and explosive device load. Battery pack failure will lead to the abnormal operation of the electrical system on the launch vehicle, and even lead to disastrous consequences such as mission failure in severe cases. Lithium battery pack is replacing traditional zinc-silver battery pack in launch vehicle fields, which has the advantages of high-energy storage density and long performance life. Aiming at the problem of no redundancy in battery power supply in launch vehicle fields, the fault diagnosis of lithium battery is studied. The estimated results of lithium battery state of charge (SOC) are used as the basis of battery fault diagnosis. The extended kalman filter (EKF) algorithm is used to improve the estimation accuracy of lithium-ion battery SOC; According to the fault diagnosis results, the intelligent switching of the failed single battery is completed through the topology reconfiguration of the battery pack, and the power supply redundant management system of launch vehicle is established. The simulation test meets the requirements of engineering application, and improves the reliability, safety and fault tolerance of the battery, which is of great significance for improving the reliability and safety of the launch vehicle.

Keywords: launch vehicle; lithium battery; SOC estimation; fault diagnosis; redundant management

0 引言

随着航天科技的发展, 锂离子电池正在取代传统锌银电池应用于运载火箭领域。与传统锌银电池对比, 锂电池具有高能储存密度、使用寿命长、充放电循环次数多、自放电率低、湿态贮存时间长、重量轻、体积小等优点。伴随航天高可靠的要求, 锂电池在应用过程中的可靠性、安全性成为必须关注的问题。

锂离子电池是能量的高密度载体, 本质上就存在不安全因素。不同的电化学体系、不同的容量、工艺参数、使用环境、使用程度等都对锂离子电池的安全性有较大的影响。关于锂离子电池在应用中的可靠性、安全性主要体现在^[1-3]: 1) 锂离子电池由高活性的正极材料和有机电解液组成, 在能量释放过程中, 当电池热量出现和累积速度大于散热速度时, 电池内部温度就会持续升高, 导致热失控, 引起燃烧、爆炸等剧烈的能量释放现象; 2) 锂电池在使用

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-04-22。

作者简介: 汪 灏(1991-), 男, 上海人, 硕士, 工程师, 主要从事运载火箭电气总体专业方向的研究。

引用格式: 汪 灏, 沈川杰, 周恒保, 等. 基于锂电池 SOC 的运载火箭供电能源冗余管理研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(8): 204-210.

过程中的过充电、过放电会给电池带来危害。锂电池过充会导致正极材料结构变化, 造成不可逆的容量损失, 其分解放氧与电解液会发生剧烈的化学反应, 最坏的结果会发生爆炸; 过放电会使锂电池内压升高, 正负极活性物质可逆性受到破坏, 充电只能部分恢复, 容量会明显衰减, 同时过放电还会使电池内部的锂离子金属化, 引起短路甚至爆炸; 3) 由于电池单体的差异性, 电池在电压、内阻、容量等方面的参数值往往不一致, 随着电池在使用过程中连续的充放电循环, 导致单体电池的不一致度在使用过程中逐步加大, 从而使某些单体电池性能加速衰减, 并最终引发电池组过早失效。

在运载火箭领域, 一般给箭上控制系统、测量系统和电磁阀火工品负载分别提供电池供电, 每个系统只采用一块电池供电, 无冗余。针对电池单体而言, 锂电池常见故障主要^[4-6]有电池过充、过放、高低温等因素诱发的单体电池短路、断路和电性能衰减等, 电池的故障会导致电气系统工作异常, 严重时甚至导致任务失败等灾难性的后果, 因此对锂电池的故障识别显得尤为重要。

这些单体电池故障一般通过单体电池特征参数进行识别。在现有工业条件下, 能够测量到的单体电池外部特征参数有电池电压、电流、温度 3 种。针对这 3 种参数直接设定阈值, 只能识别诸如过压、过流、超温等显著故障。但电池是个非线性系统, 很多故障具有隐蔽性和演化性, 这就需要有一个能表征电池运行状态的参数。荷电状态 (SOC, state of change) 就是这么一个参数, 也是支撑锂离子电池故障诊断的基础数据。SOC 含义^[7-8]是电池剩余可用电量占总容量的百分比, 是表征电池复杂电化学过程的综合变量, 可作为电池工作是否正常的判断依据。

航天及工业领域用锂离子电池一般是由多个单体电池组成的电池组, SOC 也是就单体锂电池而言的。电池 SOC 无法直接测量, 只能基于电池外特性参数 (如电压、电流、温度等) 通过数学变换间接估算, 对此, 我国学者在电池 SOC 预测、估算等^[9-10]方面进行了深入研究。林伟钦等基于锂电池充电过程中的实际数据, 建立多元线性回归模型, 预测研究了锂电池开始充电到结束充电过程中 SOC 值。文献 [10] 以混合的电化学模型为基础, 对按时积分法进行修正, 降低了充放电倍率、温度等因素的影响, 以参数修正过的按时积分法的方程为状态方程, 利用改进过的 EKF 进行 SOC 估算, 提高了 SOC 估算效果。由于电池自身的强非线性特征和使用工况的复杂性, SOC 估算精度^[11]会受到其自身极化特性、运行温度、充放电倍率、循环寿命、自放电、实际工况等诸多因素影响; 由于电池运行工况的电压、电流、温度等传感器测量精度有限, 增加了 SOC 准确估算的难度。如何在现有传感器精度水平下, 通过充分挖掘电池特性和使用工况的数学规律, 借助新理论、新方法设计出高精度、快响应和适用广泛的 SOC 估算算法, 是摆在电池管理系统研发人员面前的急待解决的问题。

国内外在航空、汽车等领域有大量关于通过箭上采集锂电池电压、电流、温度等数据估算锂电池 SOC^[12] (state

of change, 荷电状态), 分析当前电池的工作状态, 完成电池能源管理的研究。对于 SOC 估算, 国内外主要有按时计量法、开路电压法、内阻测量法、模糊控制法、神经网络法、卡尔曼滤波法等几种方法。

通过 SOC 估算完成锂离子单体电池故障识别, 在诊断单体电池故障后对锂离子电池组拓扑结构^[13-14]采用重构方式, 隔离故障单体, 完成冗余控制。

本文首次提出基于锂离子单体电池 SOC 估算的运载火箭供电能源冗余管理系统, 该系统可准确判断通过电池组拓扑重构切换隔离故障电池单体, 解决了运载火箭供电能源冗余管理问题, 提高了运载火箭领域电池电源的可靠性、安全性与容错能力。

1 锂电池故障与识别

在运载火箭领域电池供电无冗余, 因此当电池出现故障时, 电气系统工作会受到致命的影响, 正确识别电池的故障模式对完成电池故障诊断与冗余管理至关重要。本文的故障识别主要就单体电池而言。

以某运载火箭型号 8 串单体的 20 Ah 锂离子电池组为例, 对锂离子电池组故障模式进行识别。得出电池组的故障模式^[15-16]主要有电池短路、开路和电性能异常衰减等 3 种。电池内部传输线路的短路和开路故障主要由电池内部结构冗余设计保证, 电池组中串联的单体电池不冗余。

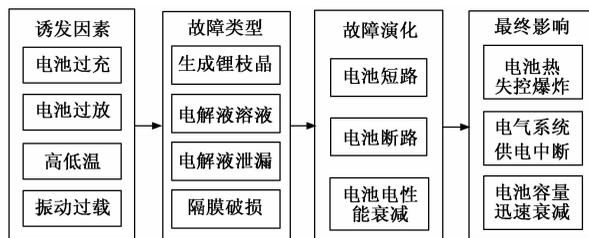


图 1 锂电池故障模式

单体电池的电池短路、开路和电性能异常衰减 3 种故障可根据电池电压、电流、温度和 SOC (电池荷电状态) 进行判别。

1.1 短路故障分析与诊断

锂离子单体电池短路故障主要表现为瞬间大电流放电, 放出大量的热, 造成电池单体过热以及线路烧毁等现象。主要原因有: 电池内部多余物破坏隔膜; 在过充电或低温充电过程中形成锂枝晶而刺破隔膜; 在过放电过程中负极集流体铜氧化, 在隔膜和正极表面还原形成金属铜造成电池短路。

锂离子单体电池短路故障诊断可通过单体电池电压、电流, 温度和 SOC 变化判定, 表现为单体电压接近于 0, 电流增大, 温度升高, SOC 接近于 0。

1.2 开路故障分析与诊断

锂离子电池组开路故障主要故障现象为电池组充放电回路断开, 造成电池组开路失效。主要原因为电池单体壳体裂开, 造成电解液泄露, 电池干涸, 电阻变大, 电池组

开路。

锂离子电池组单体电池开路故障诊断可通过单体电池电压、电流和 SOC 变化判定, 表现为单体电压异常, 电流接近于 0, SOC 计算结果异常。

1.3 电性能衰减故障分析

锂离子蓄电池电性能异常衰减主要表现为电池单体电性能异常衰减, 主要原因为隔膜缺陷造成微短路、电极缺陷造成微短路、内部存在多余物、密封破坏导致电解液缓慢泄漏。性能衰减后的蓄电池单体的容量变小, 内阻变大, 直接影响到整个蓄电池组的供电能力。

锂离子电池组电性能异常衰减可通过单体电池电压、电流、温度和 SOC 变化判定, 表现为单体电压异常减小, 电流异常变化, 温度升高, SOC 异常减小。

通过上述分析可知, 锂离子电池单体电池开路和短路故障的主要原因是电池隔膜破裂、电池电解液泄漏。在故障发生早期, 故障特征远未如此剧烈, 具有演化性。长时间的电池隔膜破裂会引起自放电及局部温度上升, 短路程度逐渐增大, 最终发展成为电池单体短路并引发热失控。长时间的电池电解液泄漏会导致电池逐渐干涸, 电阻变大, 最终发展成为电池单体开路。电性能异常衰减的故障模式正是电池短路与开路故障的初期特性。

因此在锂离子电池故障初期对单体电池电压、电流、温度和 SOC 的监测和判断, 可以及时识别电池的故障, 有利于及时对电池采取冗余管理措施。

1.4 锂电池特性参数获取

以某运载火箭型号 8 串单体的 20 Ah 锂离子电池组为例, 对锂离子电池组电压、电流、温度和 SOC 等特性参数进行分析。

锂电池故障模式基本为单体电池故障, 且单体电池是个复杂的非线性系统。对单体电池电压、电流、温度 3 种参数直接设定阈值, 只能识别诸如过压、过流、超温等显著故障, 无法对单体电池的运行特征进行表征。

电池 SOC^[17] (荷电状态) 是准备表征电池非线性工作运行的重要参数, 其含义是电池本时刻剩余可用电量占总容量的百分比。

$$SOC = \frac{Q_t}{Q_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, Q_t 表示电池在计算时刻的剩余电量, Q_0 表示电池在当前环境条件下的实际总容量。

由式 (1) 可知, SOC 为电池当前电量与总容量的百分比。单体电池充电至截止电压时被视为完全充电状态, 此时 SOC 被定义为 100%; 单体电池放电至截止电压时被视为完全放电状态, 此时 SOC 被定义为 0%。

SOC 是表征电池复杂电化学过程的综合变量, 无法直接测量, 只能基于电池外特性参数通过数学变换间接估算。电池特性参数中电压参数可通过对电池端电压 AD 采样获得, 电流参数可通过霍尔传感器非接触测量, 温度参数可通过热敏电阻传感器测定, 电池 SOC 则通过上述测量参数

进行估算。

2 锂电池 SOC 估算

2.1 锂电池电路模型

锂电池内部是一个非线性工作系统, 为估算电池的 SOC 状态, 需要构建表征电池充放电动态的等值模型^[18], 为此国内学者做了大量的研究工作。从机理角度看, 电池充放电过程是一个受温度、充放电倍率、电池老化、自放电等因素影响的电化学反应, 直接测量电池内部状态难以实现。常用做法是建立等值电路, 通过电路电气量, 如电池开路电压、端电压及内电阻等参数描述电池状态。文献 [18] 提出了一个基于等效模型和多时间尺度的扩展卡尔曼滤波预测算法对 SOC 和最大可用容量分别在不同时间尺度上进行估算研究, 结果表明估算精度提高。本文在前人研究的基础上, 以当前某运载型号采用的 XXX20 单体电池为例建立电路模型。常用的等值电路模型有 Rint 模型、Thevenin 模型、PNGV 模型和 GNL 模型等。Thevenin 模型考虑了锂电池充放电过程中产生的极化电阻和极化电容, 描述锂电池的工作特征准确, 考虑模型结构、精度和运算量等综合因素, 本文选用 Thevenin 模型来描述锂离子单体电池的状态。

Thevenin 模型是由理想电压源 U_α 、欧姆电阻 R_o 、极化电阻 R_p 及极化电容 C_p 组成, 能很好地描述电池动态和静态特性, 如图 2 所示。

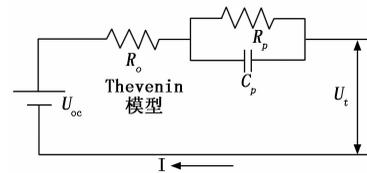


图 2 Thevenin 模型示意图

Thevenin 模型表达式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} U_t &= U_\alpha + U_p + IR_o \\ \frac{dU_p}{dt} &= \frac{I}{C_p} - \frac{U_p}{R_p C_p} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中, U_α 代表电池的电源电动势, R_o 为电池的欧姆电阻, 由电极材料、电解液及其它电阻组成, 极化电阻 R_p 和电容 C_p 并联模拟电池极化效应, U_p 为极化效应电动势。

2.2 电路模型参数辨识

针对 Thevenin 电路模型中的各参数值, 采用复合脉冲功率试验 (HPPC) 对电池参数进行辨识。试验电池采用当前某航天型号采用的 XXX20 单体电池, 容量 20 Ah, 试验环境温度为 25 °C。

HPPC 试验首先 1 C 电流放电 10 s, 然后静置 50 s; 再以 0.5 C 电流充 10 s, 然后静置 50 s, 再以 0.5 C 电流放电 12 min, 即放出 10% 的容量, 放完后进行 1 小时搁置; 再以如此为 1 个循环。试验从电池满充 (SOC=1) 状态开始共进行 10 个循环直到电池 SOC=0, 全过程中进行电压监测, HPPC 试验结果曲线如图 3 所示。

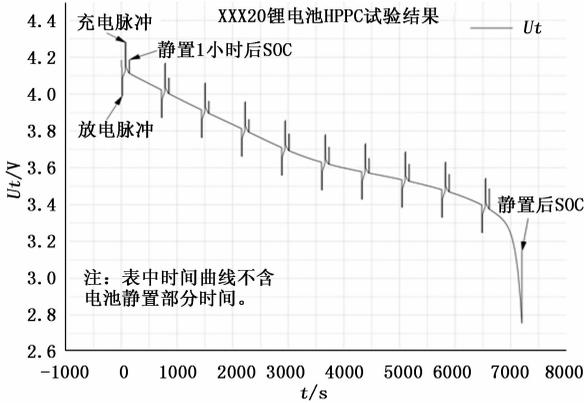


图 3 XXX20 锂电池 HPPC 试验结果

HPPC 试验中一次循环放出 10% 的容量, 放电后搁置, 目的是等待电池极化效应几乎完全消失, 此时测定开路电压值可作为该 SOC 下的开路电压 (OCV)。从锂电池 100% 容量放电至 0%, HPPC 试验共测定 11 个开路电压值。以 SOC 为横坐标, 开路电压 OCV 为纵坐标, 使用多项式进行拟合, 可得 SOC-OCV 关系拟合曲线如图 4 所示。

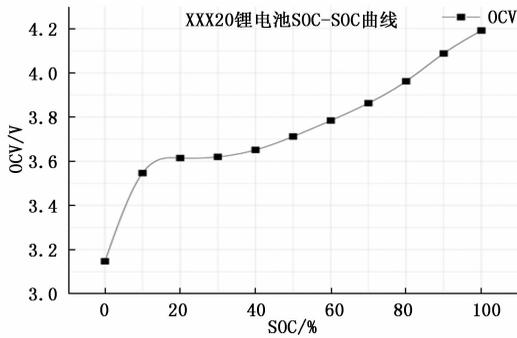


图 4 XXX20 锂电池 SOC-OCV 关系拟合曲线

图 4 中 SOC-OCV 多项式拟合结果为:

$$y = -0.00000000041607x^6 + 0.00000014119099x^5 - 0.000001892468753x^4 + 0.000126832521228x^3 - 0.004337167013906x^2 + 0.072392477832567x + 3.14726409627986 \quad (3)$$

其中: y 为开路电压 OCV, x 为电池 SOC。

图 5 为 HPPC 试验充放电脉冲段测试数据曲线, 其作用是测定电池动态特性, 可通过数据中电压电流变化情况计算电路模型中的欧姆电阻 R_o , 极化电阻 R_p 和极化电容 C_p 。

从图 5 中可知, $t_0 \sim t_1$ 时段电池静置; $t_1 \sim t_2 \sim t_3 \sim t_4$ 时段电池以 0.5 C 恒流放电, 电池电压在 $t_1 \sim t_2$ 时刻瞬间减少, 体现了电池的纯电阻特性, 可通过此计算电池的欧姆电阻; $t_2 \sim t_3$ 时段, 电池电压逐渐缓慢下降, 体现了电池的极化效应慢慢消失, 反映了电池的极化电容和电阻特征; $t_3 \sim t_4$ 时段电池 0.5 C 恒流放电结束, 电压瞬间增大, 也体现了电池的纯电阻特性; $t_4 \sim t_5$ 时段电池静置, 电压缓慢上升, 体现了电池的极化效应慢慢消失; 电池充电脉冲与放

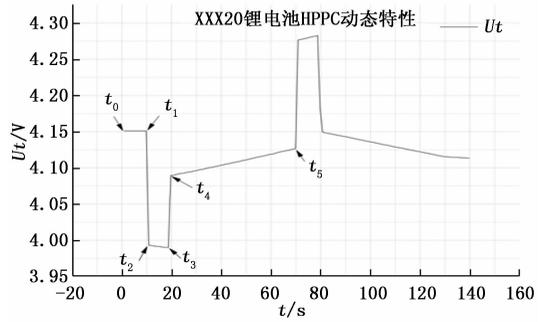


图 5 XXX20 锂电池 HPPC 动态特性

电脉冲原理一致。

通过 HPPC 试验可对 XXX20 电池 Thevenin 模型的参数进行辨识。在 25 °C 环境温度条件下, XXX20 电池的 Thevenin 模型参数如表 1。

表 1 XXX20 电池 Thevenin 模型参数

SOC	U_{ocv}/V	$R_o/m\Omega$	$R_p/m\Omega$	C_p/KF
1	4.192 0	2.456 3	1.115 8	2.979 6
0.9	4.087 8	2.733 8	1.383 3	2.467 8
0.8	3.962 0	2.446 8	1.303 9	3.238 6
0.7	3.862 9	2.427 8	1.357 6	3.209 1
0.6	3.784 2	2.408 9	1.322 0	3.197 1
0.5	3.712 2	2.427 9	1.137 9	3.338 3
0.4	3.651 44	2.668 0	1.041 8	3.589 3
0.3	3.619 9	2.557 8	1.011 2	3.409 3
0.2	3.614 6	2.421 3	1.096 97	2.843 6
0.1	3.546 8	2.647 8	1.008 3	2.638 6

2.3 基于 EKF 的锂电池 SOC 估算

EKF (扩展卡尔曼滤波算法) 是建立在线性卡尔曼滤波的基础上, 为解决非线性问题而提出的。其核心思想是将非线性函数在状态估计处 Taylor 展开并保留一阶展开项。本文使用 EKF 对电池 SOC 进行估算^[19]。首先需获得锂电池 SOC 估计空间模型的状态方程和观测方程。

根据锂电池 SOC 定义, 可得其递推公式如下:

$$SOC_{k+1} = SOC_k - i_k \Delta t / Q_k \quad (4)$$

在结合锂电池模型电路表达式, 得到离散化公式如下:

$$U_{k+1} = U_{ocv,k+1} - U_{p,k+1} - R_o i_{k+1} \quad (5)$$

$$U_{p,k+1} = U_{p,k} e^{-\Delta t / R_p C_p} + R_p i_k (1 - e^{-\Delta t / R_p C_p}) \quad (6)$$

根据式 (4) ~ (6), 得到锂电池 SOC 估计空间模型的状态方程和观测方程如下:

$$\begin{bmatrix} SOC_{k+1} \\ U_{p,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-\Delta t / R_p C_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_k \\ U_{p,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\Delta t}{Q_k} \\ 1 - e^{-\Delta t / R_p C_p} \end{bmatrix} i + \begin{bmatrix} w_{soc,k} \\ w_{U_{p,k}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$U_{k+1} = \begin{bmatrix} \frac{dU_{ocv,k+1}}{dSOC_{k+1}} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_{k+1} \\ U_{p,k+1} \end{bmatrix} - R_o i_{k+1} + v_{k+1} \quad (8)$$

式 (4) ~ 式 (8) 中, U_{ocv} 为开路电压, R_o 为欧姆电阻, R_p 极化电阻和 C_p 极化电容, 均为 XXX20 电池 Theve-

nin 模型参数, 已通过第 2.2 章试验结果获得。

结合式 (7) ~ (8) 可以得到状态转移矩阵 A_k :

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-\Delta t/R_k C_p} \end{bmatrix} \quad (9)$$

观测矩阵 C_k :

$$C_k = \begin{bmatrix} \frac{dU_{ocv,k+1}}{dSOC_{k+1}} & -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式 (8) 中, 欧姆内阻 R_0 作为该算法的输入量, 采用 EKF 滤波算法解决电池 SOC 估算的问题, 首先要处理的问题是开路电压 SOC 的数学拟合, 根据第 2.2 章节的 OCV-SOC 曲线的多项式拟合结果求导就可以得到观测矩阵 C_k 第一项。

获取到以上所有参数后, 可以根据 EKF 算法结合第 2.2 节 Thevenin 电路模型的辨识结果参数可在线估算电池 SOC。EKF 算法是利用上一拍数据对下一拍状态值和误差值进行预测, 并对状态转移矩阵、观测矩阵和协方差矩阵进行更新, 不断迭代得到准确的状态值, 算法具体实现步骤如下:

1) 启动算法, 输入初值向量 X_0 和协方差矩阵 P_0 ;

2) 状态值预测 $X_{k|k-1}$;

$$X_{k|k-1} = f(X_{k-1}, i_{k-1}) \quad (11)$$

3) 观测值预测 $U_{k|k-1}$;

$$U_{k|k-1} = h(X_{k-1}, i_{k-1}) \quad (12)$$

4) 计算在状态预测值 $X_{k|k-1}$ 处的状态转移矩阵;

$$A_k = \frac{\partial f(X_{k|k-1}, i_{k-1})}{\partial X_{k|k-1}} \quad (13)$$

5) 计算在状态预测值 $X_{k|k-1}$ 处的观测矩阵;

$$C_k = \frac{\partial h(X_{k|k-1}, i_{k-1})}{\partial X_{k|k-1}} \quad (14)$$

6) 协方差 $P_{k|k-1}$ 预测;

$$P_{k|k-1} = A_k P_{k-1} A_k^T + Q_{k-1} \quad (15)$$

7) 卡尔曼滤波增益 K_k 计算;

$$K_k = P_{k|k-1} C_k^T (C_k P_{k|k-1} C_k^T + R_{k-1})^{-1} \quad (16)$$

8) 测量误差值 e_k 更新;

$$e_k = U_k - U_{k|k-1} \quad (17)$$

9) 状态值 $X_{k|k-1}$ 更新;

$$X_k = X_{k|k-1} + K_k e_k \quad (18)$$

10) 协方差矩阵 P_k 更新;

$$P_k = (1 - K_k C_k) P_{k|k-1} \quad (19)$$

结合状态值更新 $X_{k|k-1}$ 和协方差更新 P_k 公式可以构建 EKF 算法估算电池 SOC 的模型。模型输入为该工况下电池电流、电压以及前述 Thevenin 电路模型的电池参数辨识结果, 输出为状态量中的第一项 SOC, 算法流程如图 6 所示。

2.4 锂电池 SOC 估算验证与结果分析

在环境温度 25 °C 条件下, 用锂电池充放电平台将某运载型号 XXX20 单体电池, 按其控制系统放电曲线要求进行 3 000 s 放电试验。

根据充放电平台采集的电压电流数据, 采用 EKF 算法对 SOC 进行全程估算, 采用安时法算出电池单体每个时刻

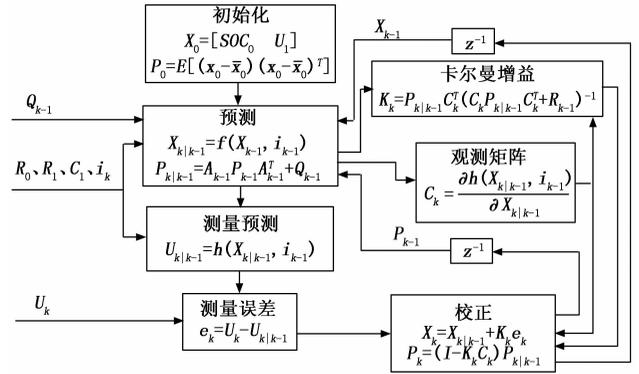
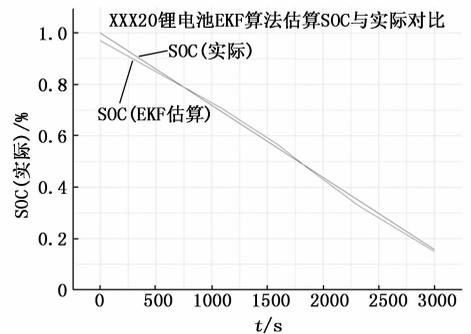


图 6 EKF 估算电池 SOC 算法流程

的实际 SOC, 将 EKF 算法 SOC 估计结果与电池实际 SOC 进行对比, 如图 7 所示。



注: 图中 SOC 曲线变化为放电曲线负载变化导致, EKF 算法估算 SOC 准确性高

图 7 XXX20 锂电池 EKF 估算 SOC 与实际对比

通过图 7 可见, 基于 EKF 算法对 SOC 估计的结果准确, SOC 估算精度在 95% 以上, 可以应用于后续研究。

3 供电能源冗余管理

3.1 冗余管理系统设计

基于上述对锂电池故障模式的识别与诊断的方法和锂电池 SOC 估算的研究, 本文提出了运载火箭供电能源冗余管理系统。该系统主要由携带冗余单体的锂离子电池组、能源管理控制器和配电器组成。通过能源管理控制器采集锂电池单体电压及电流在线估计锂离子电池组单体电池 SOC, 根据 SOC 计算结果和电池电压、电流、温度综合判断锂离子单体电池是否出现故障, 并智能实现能源切换, 完成电池组拓扑重构^[20-23]。

目前, 电池组拓扑重构方法分为 2 类: 1) 开关阵列型拓扑结构: 通过改变开关阵列的打开闭合方式动态实现电池组容错, 使电池组可以在串联、并联或串并联混合模式下工作; 2) 开关旁路型拓扑结构: 通过开关旁路的方法将失效电池旁路而不影响其他电池充放电。为满足电池单体智能故障隔离的使用要求, 并适应更多的故障工况, 使用开关阵列型拓扑重构方法。

以某运载型号为例介绍供电能源冗余管理系统的结构组成 (详见图 8), 该型号全箭电气系统采用 3 块 20 Ah 的

锂电池供电, 20 Ah 锂电池均为 8 个 XXX20 单体串联结构。以单个电池组为例, 使用冗余管理系统后, 在 8 个单体电池的基础上增加 2 个单体做冗余备份使用 (考虑电池高可靠性设置 2 个单体备份), 并且在电池结构中增加 10 组继电器及相关电路用于冗余切换, 其中 K1a~K8a 为常闭触点, K1b~K8b 为常开触点 (对应常规 8 个单体), K9a~K10a 为常开触点, K9b~K10b 为常闭触点 (对应冗余 2 个单体), 上述每个继电器触点都采用两组触点并联起到冗余作用 (图中只画出一个触点起示意作用), 继电器触点 K1a~K10a、K1b~K10b 都并联续流二极管在单体冗余切换过程中起续流作用。

能源管理控制器可对电池电压、温度和电池组电流进行采集, 并根据采集到的数据按第 2 章节方法进行电池 SOC 估算, 根据每个单体 SOC 估算结果结合电压、电流、温度组合判断电池单体是否故障, 进一步判断是否进行单体电池冗余切换, 并控制锂离子电池组中的继电器完成冗余切换。

配电器为电气系统的常规设备, 将锂电池的供电输出分配给箭上各单机。

如图 8 所示, 当单体电池 3 号出现故障时, 能源管理控制器通过 SOC 估算判断 3 号单体异常, 向锂电池发出冗余切换控制信号, 接通 K3 和 K9 的继电器线包, K3a 打开、K3b 闭合故障单体 3 号被隔离, K9a 闭合, K9b 打开冗余单体 1 号接入供电线路。在单体 3 号被隔离和冗余单体 1 号接入瞬间, 由于继电器触点状态瞬间发生转变, 续流二极管都起到了续流作用, 电池组拓扑完成切换重构。

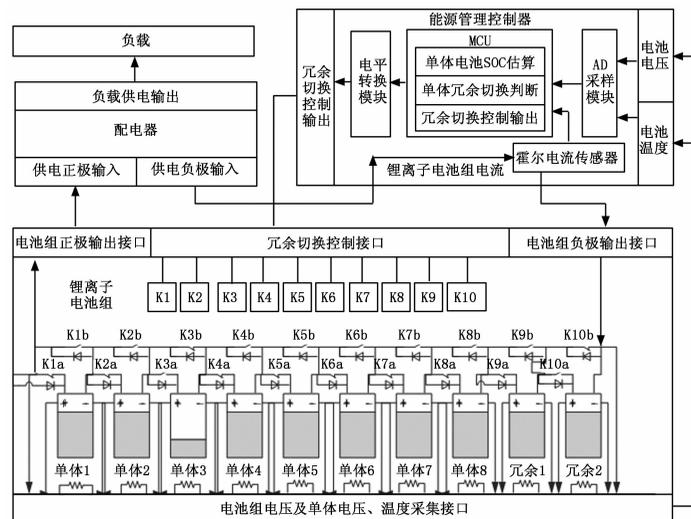


图 8 运载火箭供电能源冗余管理系统组成框图

系统的电压参数是通过将锂电池中电压测点引出至能源管理控制器采集; 电流参数是通过将锂离子电池组电流串联通过能源管理控制器, 使用能源管理控制器中的霍尔电流传感器进行测量; 温度参数是通过将锂电池中热敏电阻测点引出至能源管理控制器采集。

锂离子电池组中除增加继电器结构和 2 个单体电池外

并未增加复杂结构。能源管理控制器承担了参数采集, 电池 SOC 计算, 冗余切换判断和控制输出等大部分复杂功能。在运载火箭电气系统实际使用中, 能源管理控制器承担箭上全部锂电池的能源管理功能, 并且可以和其他电子单机集成, 组合成综合电子结构。

综上所述, 运载火箭供电能源冗余管理系统在实现电池冗余管理的同时, 并未增加过多的重量与成本, 对火箭运载能力影响有限。在实现高可靠的同时具有低成本, 高效益的作用。

3.2 冗余管理策略

运载火箭供电能源冗余管理系统使用锂离子单体电池 SOC, 电压, 温度和电池组电压、电流作为组合判断依据, 对锂离子电池组中的故障单体进行识别如图 9 所示。

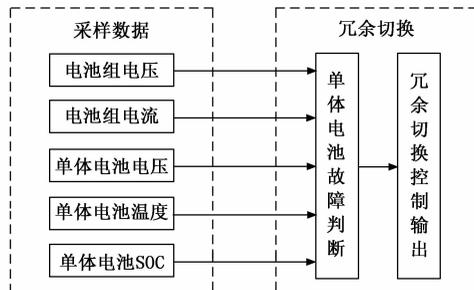


图 9 故障判断与冗余切换控制示意图

当锂离子电池组中出现故障单体时, 可通过故障判断结果对电池组进行切换重构, 旁路故障单体, 接入冗余电池使锂离子电池组继续工作。为实现故障切换的准确性, 需制定准确的冗余管理策略^[24-25]。

锂电池单体故障模式主要有短路、断路和电性能异常衰减 3 种, 对应电压, 电流, 温度, SOC 的故障模式有: 单体电池 SOC 异常偏大或偏小, 电池单体电压不在电压正常范围内, 电池单体温度异常升高 (因电池电流是干路电流无法判别哪个单体出现故障, 故不作判别依据)。

对某运载型号 8 串 XXX20 锂电池组按照电气系统放电曲线进行多轮放电试验。

对放电试验的数据进行统计如表 2 所示。

表 2 8 串 XXX20 锂电池组放电试验数据

序号	时间/s	SOC/%	电压/V	温度/℃
1	0	99.6~100	4.176~4.185	27~28
2	500	85.1~85.8	3.941~3.947	27~28
3	1 000	71.7~72.8	3.797~3.806	27~28
4	1 500	57.8~59.2	3.663~3.701	27~28
5	2 000	42.7~44.3	3.563~3.572	27~28
6	2 500	27.5~29.7	3.497~3.508	27~28
7	3 000	15.3~17.9	3.426~3.439	27~28

注: 表中范围为单体电池统计范围。

根据表 2 放电试验数据和 XXX20 单体电池特征参数表明: 1) 在放电全程每个电池单体的容量不会相对单体容量平均值偏大 15%; 2) 在放电全程每个电池单体的容量不会

相对单体容量平均值偏小 15%；3) 电池单体电压正常范围为 2.3~4.5 V (放大阈值后)；4) 电池单体温度超过 40 °C 判定为热失控。

按照试验结果, 对某运载型号 8 串 20 Ah 锂电池冗余判定要求如下:

1) 当本时刻常规 8 个电池单体中存在 1 个或 2 个单体容量相对其他单体容量平均值小 15%, 将该故障单体隔离, 并切换容量较高的冗余单体;

2) 当本时刻常规 8 个电池单体中存在 1 个或 2 个单体容量相对其他单体容量平均值大 15%, 将该故障单体隔离, 并切换容量较高的冗余单体;

3) 当本时刻常规 8 个电池单体中存在 1 个或 2 个单体电压超出 2.3~4.5 V 的正常范围, 则将该故障单体隔离, 并切换容量较高的冗余单体;

4) 当本时刻常规 8 个电池单体中存在 1 个或 2 个单体温度快速升高超过 40 °C 时, 将该故障单体隔离, 并切换容量较高的冗余单体;

5) 当本时刻常规 8 个电池单体容量均小于 15%, 将最低容量的 2 个单体切换至冗余单体, 保证负载常规供电。

4 结束语

本文针对当前运载火箭领域电池供电无冗余的现状, 提出了基于锂电池 SOC 的供电能源冗余管理系统方案及冗余管理策略, 提高了运载火箭领域的电池电源可靠性、安全性与容错能力。

采用 EKF 法对锂电池单体 SOC 估算, 并与实际 SOC 进行对比分析, 验证了该 SOC 估算方法的准确性。根据锂电池单体 SOC 估算结果和电压、电流、温度采样结果组合判断单体故障情况, 并对故障单体进行隔离控制并接入冗余单体, 完成电池组拓扑重构, 保障运载火箭电气系统正常工作。运载火箭供电能源冗余管理系统首次提出了运载火箭电池拓扑重构实现冗余的新概念, 对提高运载火箭可靠性安全性有重大意义。

参考文献:

- [1] WANG Z P, HONG J C, LIU P, et al. Voltage fault diagnosis and prognosis of battery systems based on entropy and Z-score for electric vehicles [J]. *Applied Energy*, 2017, 196: 289 - 302.
- [2] 苏伟, 钟国斌, 沈佳妮, 等. 锂离子电池故障诊断技术进展 [J]. *储能科学与技术*, 2019, 8 (2): 225 - 236.
- [3] LIU H Q, WEI Z B, HE W D, et al. Thermal issues about lithium batteries and recent progress in battery thermal management systems: a review [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 150: 304 - 330.
- [4] SUN Z Y, LIU P, WANG Z P. Real-time fault diagnosis method of battery system based on Shannon entropy [J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 2354 - 2359.
- [5] DEY S, BIRON Z A, TATIPAMULA S, et al. On-board thermal fault diagnosis of lithium-ion batteries for hybrid electric vehicle application [J]. *IFAC Papers-Online*, 2015, 48 (15): 389 - 394.
- [6] DEY S, BIRON Z A, TATIPAMULA S, et al. Model-based real-time thermal fault diagnosis of Lithium-ion batteries [J]. *Control Engineering Practice*, 2016, 56: 37 - 48.
- [7] 杨帆. 锂离子电池管理系统的设计与实现 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [8] WU C, ZHU C B, GE Y W, et al. A review on fault mechanism and diagnosis approach for Li-ion batteries [J]. *Journal of Nanomaterials*, 2015: 1 - 9.
- [9] 林伟钦, 汤平, 林旭, 等. 基于多元线性回归模型的锂电池充电 SOC 预测 [J]. *计算机测量与控制*, 2018, 26 (12): 145 - 149.
- [10] 李心成, 邱联奎, 常亮, 等. 基于 FFRLS 和 EKF 算法的磷酸铁锂电池 SOC 估算研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2019, 27 (1): 205 - 208, 258.
- [11] 徐智童. 航空蓄电池组能量均衡管理技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [12] 来鑫, 李云飞, 郑岳久, 等. 基于 SOC-OCV 优化曲线与 EKF 的锂离子电池荷电状态全局估计 [J]. *汽车工程*, 2021, 43 (1): 19 - 26.
- [13] 刘大同, 周建宝, 郭力萌, 等. 锂离子电池健康评估和寿命预测综述 [J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36 (1): 1 - 10.
- [14] BANDHAUER T M, GARIMELLA S, FULLER T F. A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2011, 158 (3): R1 - R25.
- [15] LIU Z T, HE H W. Sensor fault detection and isolation for a lithium-ion battery pack in electric vehicles using adaptive extended Kalman filter [J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 2033 - 2044.
- [16] DEY S, MOHON S, PISU P, et al. Sensor fault detection, isolation, and estimation in lithium-ion batteries [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24 (6): 2141 - 2149.
- [17] 何跃. 基于电池 SOC 和冗余管理的电池均衡输出技术 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [18] 陈冰, 鲁刚, 房红征, 等. 基于等效模型和多时间尺度扩展卡尔曼滤波的锂离子电池 SOC 预测 [J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25 (5): 67 - 70.
- [19] 冯光. 基于 EKF 的锂离子电池 SOC 估算的建模与仿真 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [20] 王友仁, 梁嘉弈, 黄薛, 等. 航空蓄电池能量均衡技术研究 [J]. *航空学报*, 2017, 38 (5): 216 - 225.
- [21] XIA B, SHANG Y L, NGUYEN T, et al. A correlation based fault detection method for short circuits in battery packs [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 337: 1 - 10.
- [22] 何耀. 动力锂电池组状态估计策略及管理系统技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [23] 陈修强. 锂电池智能管理系统研究与设计 [D]. 太原: 太原科技大学, 2013.
- [24] GOEBEL K, SAHA B, SAXENA A, et al. Prognostics in battery health management [J]. *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*, 2008, 11 (4): 33 - 40.
- [25] WANG Q S, PING P, ZHAO X J, et al. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 208: 210 - 224.