

动力电池管理系统在混合动力机车上的应用

刘媛, 文健峰, 黄河, 刘进程, 王全

(湖南中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 以HXN6混合动力机车为载体, 电池管理系统为研究对象, 从方案设计、实际应用情况、特殊环境下的SOC(剩余电池电量)算法研究出发, 提出了一种基于充电状态下动态校准SOC策略。在宽电流范围采集精度不准的情况下, 解决了SOC估算偏差过大问题, 具有良好的工程应用前景。

关键词: 电池管理系统; SOC估算; 混合动力; HXN6型内燃机车

中图分类号: U267.1; U262; TN912

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.06.010

Application of Management System of Power Battery in Hybrid Diesel Locomotive

LIU Yuan, WEN Jianfeng, HUANG He, LIU Jincheng, WANG Quan

(Zhuzhou CRRC Times Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The battery management system of the HXN6 hybrid diesel locomotive was researched. From the plan design, practical application and the special circumstances of the SOC (remaining battery power) algorithm, a dynamic SOC calibration strategy based on charge stating was proposed. Under the condition of inaccurate acquisition accuracy in wide current range, the problem of too large estimation bias of SOC was solved, which had good engineering application prospect.

Keywords: battery management system; SOC estimation; hybrid power; HXN6 hybrid diesel locomotive

0 引言

混合动力机车具备多个能量源, 具有低油耗、低排放两大优势, 与同等工况下传统内燃机车相比, 一台载电量300 kW·h的混合动力机车全年可节省燃油 10^5 L, 节油效率高达60%, 是目前公认的新一轮内燃机车研发方向^[1-4]。电池管理系统作为动力电池系统的一项关键技术, 对保证整车安全稳定运行具有重要意义。

1 混合动力机车电池管理系统介绍

电池管理系统是动力电池与整车微机、车载仪表、上位机等进行信息交互的纽带, 其方案的选取主要取决于动力电池方案和外部交互设备。

1.1 动力电池选型及方案

相比铅酸、镍氢、镍镉等类型的蓄电池和超级电容, 磷酸铁锂动力电池能量密度高, 允许充放电电流大, 高温性能优异, 且安全可靠, 性价比高, 符合机车作业实际工况需求^[5]。据国内外研发的混合动力机车蓄电池选型来看, 多选用磷酸铁锂动力电池作为机车的储能装置。

HXN6 0001 机车使用磷酸铁锂电池, 电池系统设计输入与方案对比见表1。

表1 HXN6 电池系统设计输入与电池系统方案对比

项目	设计输入	电池系统方案	是否符合
电量/(kW·h)	1 500~1 600	1 500	符合
标称电压/V	1 400~1 500	1 408	符合
工作电压范围/V	1 200~1 600	1 232~1 606	符合
容量/Ah	≥ 1000	1 068	符合
系统成组方式	-	323P440S	-
电池箱数量	≤ 30	22	符合
工作环境温度(带加热)	-40~55 ℃	-40~55 ℃	符合

1.2 混合动力机车电池管理系统拓扑结构

HXN6 0001 机车电池箱数量多, 电池管理系统采用分布式拓扑结构, 共设计了 3 路高速 CAN 用于信息交互。为避免箱间低压通信线过长, 影响低压通信的可靠性及稳定性, 电池管理系统主板设计了 2 路带屏蔽 CAN 与子板进行信息交互, 设计了 1 路 CAN 用于整车微机、车载仪表通信, 并作为调试端口预留。根据电池系统方案, 电池管理系统使用了满量程 2 000 V 的电压传感器采集系统总压, 满量程 2 000 A 的电流传感器采集系统总电流。电池管理系统网络拓扑结构见图 1。

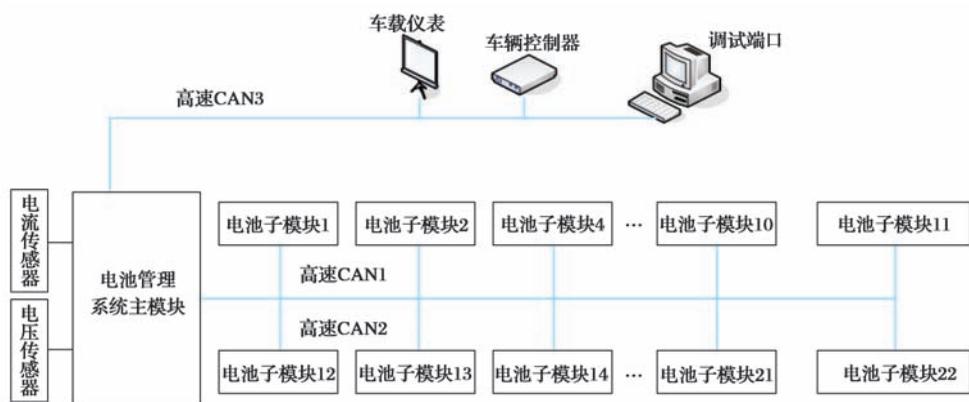


图 1 HXN6 0001 机车电池管理系统拓扑结构

1.3 混合动力机车电池管理系统构成

HXN6 0001 机车电池管理系统主要由主板、从板及显示系统等构成。主板主要进行总电流和总电压采集、电池剩余电量 (SOC) 估算、电池系统充放电控制、制动能量回收控制、与整车微机及子板进行通信等功能。子板主要采集电池单体电压、温度等信息并传送至主板。显示系统主要由上位机和车载仪表组成。机车电池管理系统主要构成见图 2 所示。

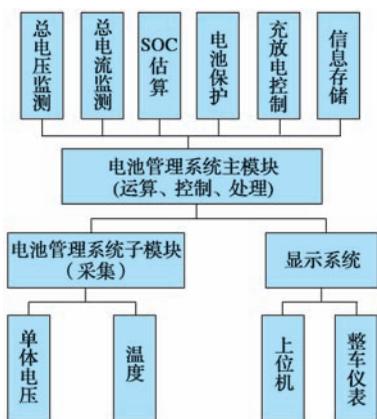


图 2 HXN6 0001 机车电池管理系统主要构成

2 混合动力机车电池管理系统应用研究

2.1 混合动力机车电池系统工作工况

动力电池系统有充电、放电 2 种工作状态。

1) 充电状态

①柴油机发电充电。车载柴油机通过发电机向动力电池充电, 在机车静置状态下可启动, 或在机车调车模式下, SOC 低于 40% 时可自启动。

②制动能量回收充电。机车制动情况下, 柴油机组停机, 利用再生制动装置为动力电池充电。

③地面充电桩充电。机车静置, 地面充电桩通过电网向动力电池充电。

2) 放电状态

①机车牵引加速状态放电。机车同时使用柴油发电机组电能和动力电池电能驱动牵引电机, 随着牵引负荷的变化, 动力电池放电电流起伏波动大^[6]。

②机车发车状态放电。为降低车站内噪声, 在车站发车时仅使用动力电池电能启动。

③均速牵引状态放电。在电量充足情况下, 仅使用动力电池电能平稳放电。

④静态小电流状态放电。在机车停车和惰行时, 由动力电池提供车上服务用电, 放电电流范围 10~50 A。

2.2 SOC 估算算法原理

针对实际工程应用, SOC 估算算法选用安时积分法^[7]:

$$\text{SOC} = \text{SOC}_0 - \frac{1}{C_A} \int_{t_0}^t I_t dt \quad (1)$$

式中: SOC_0 是初始 SOC; C_A 为电池可用容量, 电流符号在放电时为正, 充电时为负。

2.3 SOC 估算难点分析

安时积分法工程应用广泛, 一般结合使用开路电压法对 SOC 估算值进行修正校准。考虑 HXN6 0001 机车电池系统工作工况, 以下分析 SOC 估算难点。

2.3.1 获取精准初始值 SOC_0 难度大

电流积分法是一种开环预测方法, 不能对初始误差和累计误差进行消除, 单纯使用安时积分法的直接后果是导致 SOC 的累计误差越来越大。由于磷酸铁锂电池本身的固有特性, 其端电压在充放电平台区变化微小, 使用开路电压法对 SOC_0 进行静态修正校准, 要求静置时间长 (1~2 h 不等), 工程应用上难以达到此条件^[8]。

2.3.2 存在静态小电流放电工况

精确的电流采样值 I_t 对于安时积分法至关重要。HXN6 0001 机车选用量程 2 000 A 的电流传感器, 实际采样精度为 $\pm 2\% \text{FSR}$, 电流采样值存在 $\pm 40 \text{ A}$ 的采样误差。HXN6 0001 机车在停车和惰行工况下, 存在长时间静态小电流放电 (10~50 A) 工况, 此时电流采样值是影响 SOC 估算准确的重大因素。

2.3.3 充放电电流波动范围大时采集精度问题

机车在牵引工况时, 充放电电流跨度范围大且采集精度有限。HXN6 0001 样车在某次牵引工况下的电流 -SOC 变化曲线图见图 3。图中电池系统频繁在充放电状态切换, 电流在 -500~800 A 之间, 在此过程中电

流值存在采样时间差和精度误差。据图 3 中数据统计, 8 000 个采样点中, ± 50 A 以内的采样点达 511 个, 占比 6.39%, 按比例换算, 机车每牵引 24 h, 有 1.53 h 处于采样不准的小电流状态, 对 SOC 估算存在重要影响。

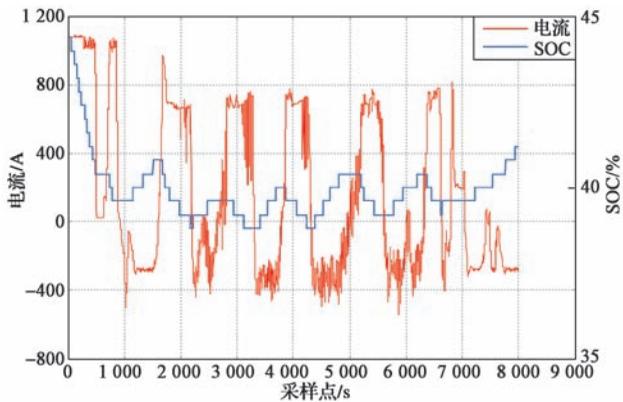


图 3 机车牵引状态下电流 -SOC 变化曲线图

2.3.4 存在 2 种不同倍率的补电方式

机车动力电池在静置条件下由柴油机补电, 当 SOC < 85% 时, 0.7C~0.8C 充电, 末端再逐步降流使电池系统达到满充。HXN6 0001 机车某次柴油机补电电流 -SOC 曲线图见图 4。制动回收电流在 SOC < 80% 时高达 1.5C, 在 SOC < 90% 时为 0.6C 左右。机车在实际使用中, 存在长时间 (10~30 min 不等) 制动能量回收情况。HXN6 0001 机车某次制动能量回收电流 -SOC 曲线图见图 5。

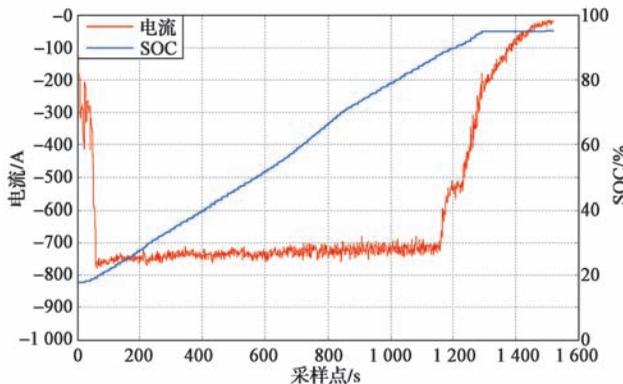


图 4 机车静置条件下柴油机补电

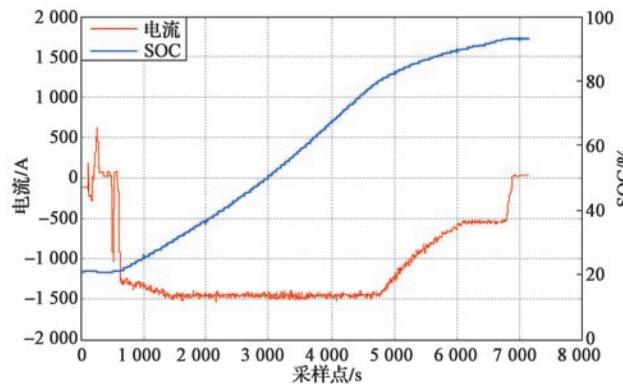


图 5 机车制动能量回收补电

从图 4、图 5 可看出, 电池系统存在 2 种不同倍率的充电方式, 且都能使电池系统达到满充状态。在充

电状态下对 SOC 进行估算校准时, 不同倍率电流值会影响关键校准参数的设置, 增加了对 SOC 的估算难度。

2.4 充电状态下 SOC 动态校准策略

针对 SOC 估算难点, 本文提出了一种基于充电状态下动态校准 SOC 的策略。机车在经过长时间使用后, SOC 由于累计误差, 会出现虚高或偏低 2 种情况, 该策略可在充电条件下通过动态校准消除 SOC 累计误差。

2.4.1 SOC 虚高动态校准策略

电池管理系统 SOC 虚高情况一般出现在长时间静态小电流工况后, 电流采样精度无法保证, 导致电池系统实际放出电量大于 SOC 减少值。HXN6 0001 机车某次 SOC 虚高电压 - 电流曲线图见图 6。在电池系统充电末端, SOC 率先到达充电截止条件, 电流降为 0, 但电池最高单体电压小于 3.65 V, 电池系统实际未充满, SOC 虚高。

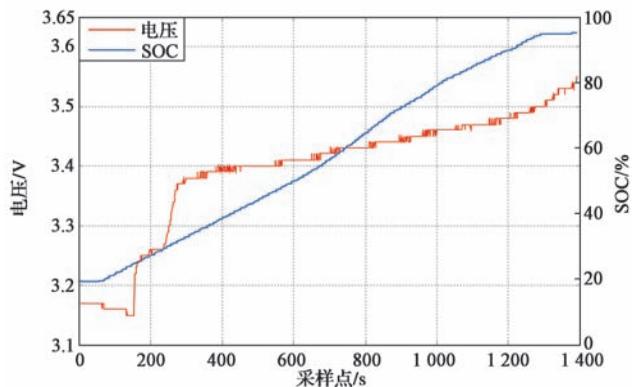


图 6 充电状态 SOC 虚高电压 -SOC 曲线图

针对此种情况, 当 SOC 到达截止条件时, 电池管理系统还需同时判断电池最高单体电压是否到达 3.65 V。HXN6 0001 机车某次 SOC 虚高校准电压 - 电流曲线图见图 7。在电池系统充电末端 (竖线标识处), SOC 已到达截止条件, 但最高单体电压小于 3.65 V, 此时充电不停止, 电池系统实际充电电流仍有 100 A 左右, 而 SOC 计算校准电流在 5 A 左右, 维持此状态, 直至电池最高单体电压到达 3.65 V 停止充电。

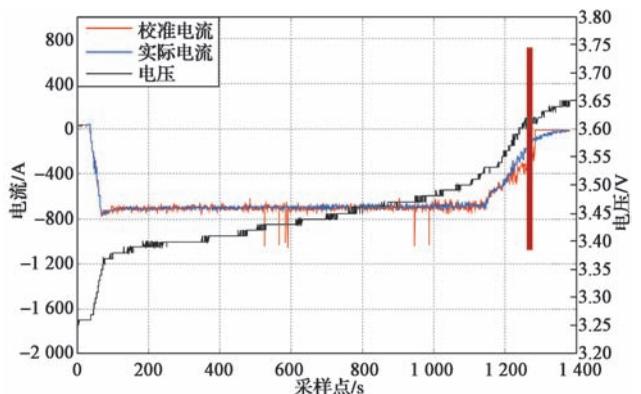


图 7 充电状态 SOC 虚高校准电压 - 电流曲线图

2.4.2 SOC 偏低动态校准策略

电池管理系统 SOC 偏低情况, 一般出现在机车长时间牵引工况后, 采样精度和初始累计误差导致 SOC

偏低。HXN6 0001 机车某次 SOC 偏低电压 -SOC 曲线图见图 8。电池系统充电末端，最高单体电压值已达到 3.67 V，SOC 显示仅 80%，此时充电电流仍有 0.5C 左右，SOC 明显偏低导致电池系统出现过充现象。

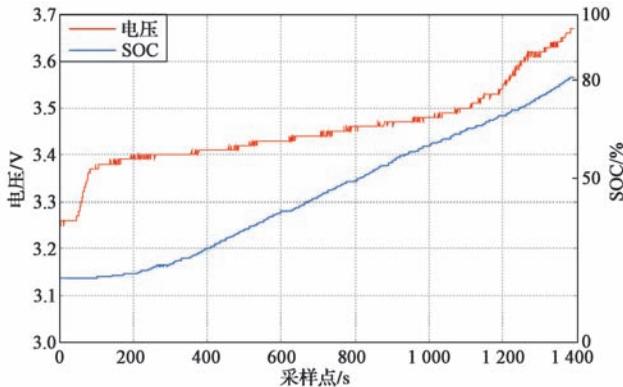


图 8 充电状态 SOC 偏低电压 -SOC 曲线图

针对此种情况，若停止充电，则 SOC 累积偏差增大，不利于 SOC 使用。若不停止充电，则电池系统过充，可能导致安全问题。解决 SOC 偏低问题，需提前对 SOC 进行校准修正。

考虑 2 种不同充电方式的兼容性及单一判断因子的不稳定性，在充电状态下设置了单体电压高端校准和平均单体电压高端校准 2 种策略并行，增强策略的兼容性和准确度。充电状态下 SOC 偏低主要校准策略见图 9。采用电流与电池实际容量的比值对关键校准参数进行数据补偿，在一定程度上消除了不同倍率充电电流的影响。

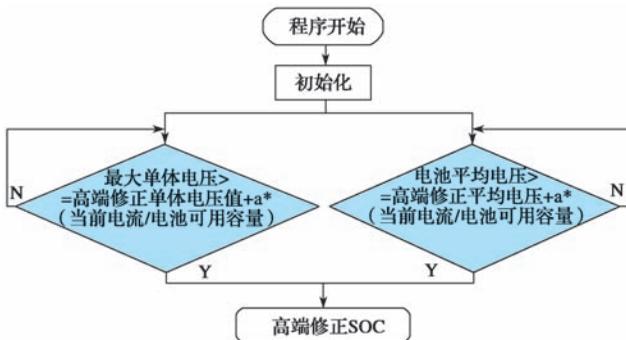


图 9 充电状态 SOC 偏低主要校准策略

HXN6 0001 机车某次 SOC 偏低校准电压 -SOC 曲线图见图 10。从图中可看出，在最高单体电压 3.5 V、平均单体电压 3.38 V 时，SOC 显示 60%（粗直线标识处），判断 SOC 偏低，通过增大 SOC 实际计算校准电流，使 SOC 快速进入向上校准阶段。

充电状态下动态校准 SOC 策略在 HXN6 0001 机车上运用良好，据不完全统计，在未使用此策略前，2016 年机车因 SOC 偏差导致的故障数多达 16 起，使

用此策略后，电池管理系统自动动态校准 SOC，减少了人工维护成本，保证了机车电池系统安全稳定运行。

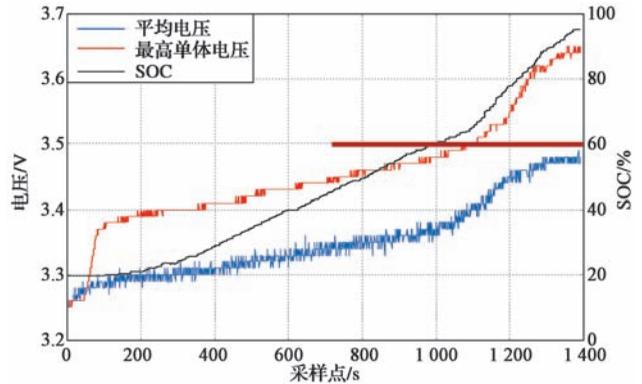


图 10 充电状态 SOC 偏低校准电压 -SOC 曲线图

3 结语

针对机车电池管理系统 SOC 估算难点，提出了一种基于充电状态下动态校准 SOC 策略。SOC 虚高情况下，通过判断最高单体电压是否到达截止条件来决定是否停止充电。SOC 偏低情况下，设置单体电压高端校准和平均单体电压高端校准 2 种策略并行校准。机车每次满充电时，即对 SOC 进行一次修正校准，消除累计误差。该方法兼容解决了 SOC 虚高和 SOC 偏低问题，在工程应用上，具有简单、稳定、可靠、适应性强等特点。

参考文献:

- [1] 田睿, 康铁男. 国内外混合动力机车的发展(下)[J]. 内燃机车, 2012(10): 1-4.
- [2] 王文乐, 阮航. CFH330 型窄轨油电混合动力机车的研发[J]. 铁路机车与动车, 2014(11): 14-16.
- [3] 张昕, 田毅, 张欣. 混合动力机车动力系统建模及能量管理研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(5): 20-25.
- [4] 田睿, 康铁男. 国内外混合动力机车的发展(上)[J]. 内燃机车, 2012(9): 1-4.
- [5] 叶顶康, 彭长福, 刘顺国. 混合动力牵引调车机车的研发[J]. 机车电传动, 2012(5): 17-20.
- [6] 王平华, 刘顺国. 新型混合动力交流传动地铁调车机车[J]. 铁路机车与动车, 2015(3): 9-13.
- [7] 黄文华, 韩晓东. 电动汽车 SOC 估算方法与电池管理系统的研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(3): 198-202.
- [8] 杜政平. 混合动力汽车车载电池 SOC 算法的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.

作者简介: 刘媛(1990-), 女, 硕士, 现从事储能系统的研发工作。