

电池更换模式下电池管理系统的研究^①

温家鹏^② 姜久春^③ 张维戈 文 锋

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘 要 针对奥运会纯电动公交车更换电池的运行模式,提出了一种主从式结构的电池管理系统。此系统除了能在车载模式下实现电池状态监测、故障报警和整车通讯之外,还能完成电池分箱拆分后的充电、维护及重组等管理功能,与传统电池管理系统相比更具模块化和通用性特点。重点分析了这种模式下电池管理系统的系统构架、功能特点、状态估算等问题,提出了整车充电与分箱充电控制相结合、电池参数识别与电池重组相配合、电池状态自校正等多种特殊处理方法,较好配合了纯电动公交车的正常运行。

关键词 纯电动公交车, 电池更换模式, 电池管理系统(BMS), 配合充电, 参数识别, SOC 估算

0 引 言

制约纯电动汽车发展的瓶颈除了电池技术和成组应用技术之外,还包括电池的运行模式,即如何采用一种高效快速的充电方式提高电动汽车和车载电池的运行效率。在国外,多数利用停车场的小型充电设备对电动汽车进行充电,但是,存在场地面积有限、充电时间较长等缺点,不适用于大规模数量纯电动汽车的运营^[1-3]。北京奥运会纯电动公交车得到了推广使用,充电站正式投入运营。为解决充电站面积有限和充电时间长等制约性问题和减小车辆充电时间及电动汽车在场站内的滞留现象,纯电动公交车研发团队结合实际需要提出了一种新型运营模式——电池更换模式,即对进站车辆进行整车电池的分箱更换,达到快速进站充电、快速出站运行的目的。同时将换下的电池箱进行地面充电,以备使用。这种充电方式与传统的整车充电方式就有比较大的区别,本文分析并研究了适合这种特殊工况下电池管理系统的构架与功能,提出了一种主从式结构的电池管理系统,实现了整车在线监控、分箱充电、配组管理、参数识别、状态估算校准等功能,可满足实际需要。

1 电池更换模式的特点

电池更换即电池的重新配组。而影响成组电池

性能发挥的最重要因素是电池组的一致性。由于单体电池的制造工艺、配料不可能完全一致,加之电池包的分箱充电与维护,造成电池包之间存在个体差异。在整车电池更换过程中,很可能把性能不匹配的电池包组合在一起。容量低的电池更加容易出现过充电和过放电,使得容量衰退的速度更快,形成正反馈。而考虑到单体电池的充放电性能和安全性因素,如果一组电池中部分电池的特性变坏,在使用过程中很有可能影响其他电池的充放电过程,长期使用,就会导致整个串联电池组的性能变差,甚至出现安全隐患。因此,特性不同的电池包重新成组导致车辆性能下降,甚至带来安全隐患,严重影响电池使用寿命^[4-6]。

一般来说,为大功率电池成组应用场合配备的电池管理系统(battery management system, BMS)都是作为一个整体工作的。因此,只能通过主控模块实现与外界系统的数据交互、电池的监控报警、充电和维护控制。当整组电池组按箱拆分后,各电池箱则失去对单体电池的控制和保护,外界也无法得知包内单体电池的信息,很可能造成单体电池的过充和过放,最终使整包电池的性能变差,改变电池荷电状态(state of charge, SOC)和健康状态(state of health, SOH)。

电池在更换模式下工作时,重组后的电池箱之间可能存在较大的差异,而且状态参数也不尽相同,给 SOC 的估算带来困难,而且分箱充电模式是在离

① 863 计划(2007AA11A103)和北京市科技项目(Z07010400110703)资助。

② 男,1982 年生,博士生;研究方向:电动汽车电池管理系统及优化充电技术;联系人, E-mail:05117292@bjtu.edu.cn

③ 通讯作者 E-mail: jcyj@bjtu.edu.cn

(收稿日期:2009-04-27)

开主机监控的条件下进行的,使得主控模块无法正确标定各箱电池的 SOC,难以满足整车 SOC 的估算精度。

综上所述,与传统模式相比,电池更换模式下的电池管理系统必须具有自适应能力和模块化的系统结构,这样才能正确反映电池的状态参数,实现电池的安全维护和管理。

2 系统结构

一般来说,电池管理系统结构分为主从式和集

中式两种。根据电池更换模式分散性强、电池箱相对独立等特点,本研究采用一主十从的结构与车辆搭配,实现电池管理系统在整车模式与分箱模式下均能正常工作,系统结构如图 1 所示。

为了能够满足电池管理的功能和通讯要求,主控模块通过内部总线 RS485 与从机交互信息,汇总电池数据,并通过 CAN 和 RS232 接口将信息传递给整车控制器、车载仪表、笔记本在线监控等,实现整车功率输出控制,同时完成整车充电。

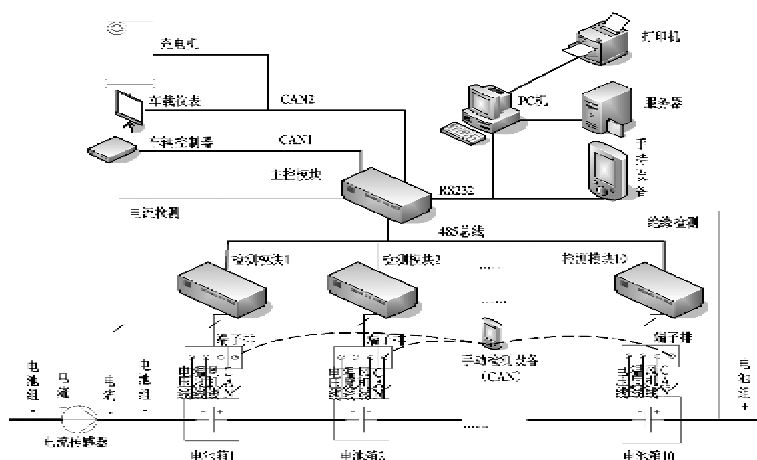


图 1 充电系统结构

3 网络构架

根据更换模式的特点,电池工作状态可分为车载模式和分箱模式。电池管理系统为了在这两种工作模式下都能时时监控电池输出特性,必须采用模块化和多通讯接口的网络结构(参见图 1)。

3.1 车载模式

主控模块是电池管理系统的控制中心。车辆运行过程中,主控通过内部总线 RS485 汇总所有电池数据,同时根据预先设定的电池类型和故障信息分析,将数据通过 CAN 接口和 RS232 接口传递给整车控制器、车载仪表、笔记本在线监控等,实现所有单体电池的在线检测和智能控制。充电过程中,主控通过 CAN 与充电维护设备实现数据交互,并根据电池的在线状态时时调整充电机的输出电流,实现安全充电。

3.2 分箱模式

从控模块通过独立的通讯接口与外界进行数据交互。由于电池更换模式是通过整车电池更换的方

法实现快速充电的,因此,大部分电池包是在地面完成充电后搁置于充电站内等待更换。考虑到搁置电池的容量差异和自放电,为了能够实时检测单个电池包的电池状态,从控模块的 CAN 接口专供与手动检测设备通讯,实现电池包在分散储存和放置时的检查和管理。同时,从机通过 RS485 接口与分箱充电机和维护设备配合充放电,保证电池的安全性和高效性。

4 测量功能

电池管理系统主要完成对电池电压、温度、电流、绝缘及电池剩余容量的测量与估算。

(1)电压测量:电压测量前端采用多路开关切换的方式,后级电阻分压,通过双积分 AD 对电压信号进行采样。

(2)温度测量:热控制方面,通过数字温度计测量电池极柱以及风扇通道的温度,并根据测量的温度高低控制风扇的开启或关闭。

(3)电流测量:采用分流器作为电流传感器,实现较高精度的测量。同时对 SOC 的 A-H 积分进行

计算,作为 SOC 估算的基础。

(4)绝缘测量:检测动力电池与车底盘之间的绝缘电阻,为人员安全提供保障。

5 分箱重组

在电池快速更换运行模式下,电池包的不一致性是造成串联电池组性能变坏的重要原因。因此,电池快速更换过程中,需要对各包电池的电池参数进行比较分析,判断匹配与否后才能组合,以便达到较好的一致性。

5.1 SOC 匹配识别^[7,8]

SOC 是电池的重要特性参数,也是判定电池状态的标准之一。判别电池包是否匹配,首先应该判断当前各个电池包的 SOC 是否一致,避免容量高的电池与容量低的电池混用,降低整组电池的可用容量。电池特性曲线中,电池的剩余电量和单体电池开路电压存在着一定关系,见图 2。而且在 SOC 接

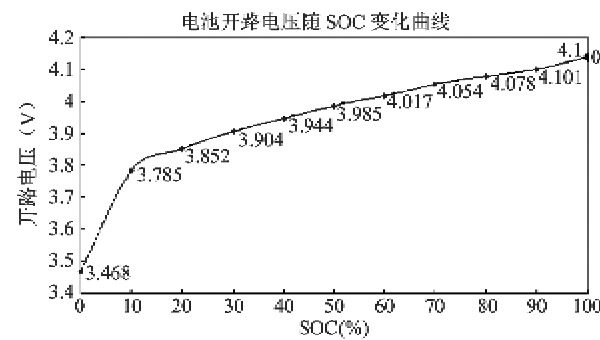


图 2 电池开路电压随 SOC 变化曲线

近 100% 时曲线斜率较大,换言之,电池箱在充满电或接近充满电的情况下,电压差值引起的容量差异较小。因此,可以根据电池开路电压作为电池容量的判断依据。

由于同一电池箱内的各个单体打包前精心筛选配组而成,而且都在相同的环境和工况下工作,个体差异较小,因此我们对包内所有单体电压平均后得到整包平均电压,作为判断各包电池 SOC 的判定基准。然而,由于电池的浮充电压包含了内阻和极化作用,而且极化作用的建立和消除都需一定时间的静置,因此,电池端电压与内电压存在一个差值。为了根据可靠的开路电压得到电池内电势,通常需要静置 2h 以上。为了保证车辆快速充电快速离站,整车充电模式无法完成电池的充分静置。然而,在电池更换模式下,电池包在完成地面充电后放置于充

电站内等待更换,这就为电池的充分静置创造了条件。电池管理系统正是根据电池充分静置完成电池组的开路电压(open circuit voltage, OCV)与 SOC 的准确识别。

一组电池静置后各箱电池的平均端电压分布情况见图 3。可以看到,虽然存在差异,但根据开路电压与 SOC 的曲线图可以知道,开路电压在 4.10 ~ 4.15V 之间时, SOC 在 95% ~ 100% 范围内。换言之,这样一组电池重组后使用最多只能降低 5% 的容量利用率,对于纯电动汽车而言,95% 的容量利用空间可以满足实际工况需求,除去电压测量误差的影响,可以认定重新配组的各箱电池容量基本相同,匹配程度较好。

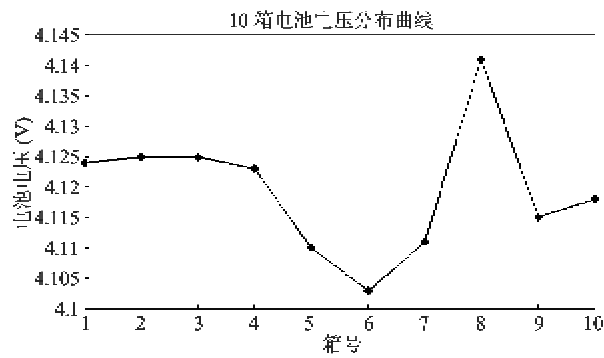


图 3 电池箱平均电压曲线分布图

5.2 直流内阻匹配识别

内阻检测是目前能最可靠地反映蓄电池性能状况的测试方式之一,而蓄电池的不同失效模式对内阻的反映情况也不一样,了解蓄电池的内阻和各种失效模式的关系,有利于更好地对蓄电池进行检测和维护。虽然可以在电池出厂时测试得到,然而它随着电池的使用而变化,采用固定的参数必将导致电池性能评价(包括 SOC 和 SOH 等)的误差越来越

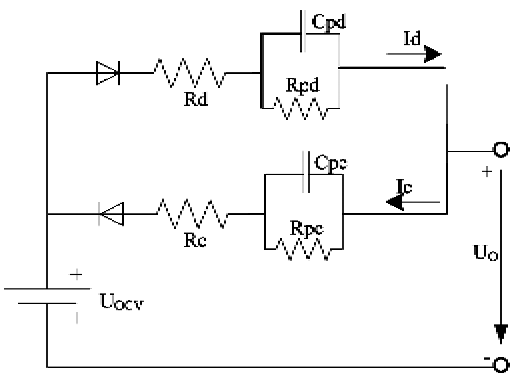


图 4 电池简单模型

大。因此,整组电池中各电池箱内阻能否匹配,尤其决定着电池的使用寿命和车辆的动态性能。

根据锂电池简单模型^[9]可知(图 4),通过电池管理系统(BMS)与充电机在充电过程中通讯,BMS 可以根据自己的需要,调整充电机的输出电流,实现对电池模型的充电直流内阻 R_c 及 R_d 的识别。

处于恒流充电的电池突然停充电,测试电池的瞬时电压跌落。直流内阻的测试机理见图 5。

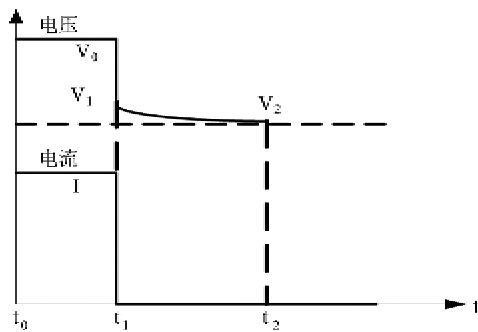


图 5 内阻识别法测试原理图

由图 5 可推出直流内阻计算公式为

$$R_d \approx R_c = (V_0 - V_1)/I \quad (1)$$

由(1)式可得到电池直流内阻的计算公式为

$$R_d \approx R_c = (V_2 - V_1)/(I_1 - I_2) \quad (2)$$

通过电池管理系统记录的数据,跟踪一组电池中的四箱初始状态(时刻 T) 和运行数月后状态(时刻 $T + \Delta t$),对其直流内阻进行识别并作对比。

通过表 1 和表 2 比较可以看出,4 箱电池内阻存在一定差异。而且随着电池的循环使用,直流内阻增加了近 1 倍。内阻的变化证明电池组的容量发生衰退,SOH 状态发生变化,直流内阻的变化在一定

表 1 T 时刻电池箱内阻

	$V_1(V)$	$V_2(V)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$	$R(\Omega)$
1 箱	3.84	3.91	-19.3	-111.5	0.00077
2 箱	3.84	3.90	-19.3	-111.5	0.00064
3 箱	3.85	3.91	-19.3	-111.5	0.00067
4 箱	3.86	3.93	-19.3	-111.5	0.00069

表 2 $T + \Delta t$ 时刻电池箱内阻

	$V_1(V)$	$V_2(V)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$	$R/(\Omega)$
1 箱	3.925	4.026	0	-101.1	0.00100
2 箱	3.921	4.035	0	-101.1	0.00112
3 箱	3.925	4.028	0	-101.1	0.00101
4 箱	3.938	4.041	0	-101.1	0.00101

程度上反映了电池寿命的衰退。因此,不同内阻的电池(SOH 状态也不同)进行串联使用,势必导致整组电池寿命加速下降。因此,在重新配组前必须对各个电池箱的平均内阻比较分析,避免将电池健康状况不一致的电池包组合使用,影响整车动态性能。内阻识别具体软件实现流程见图 6。

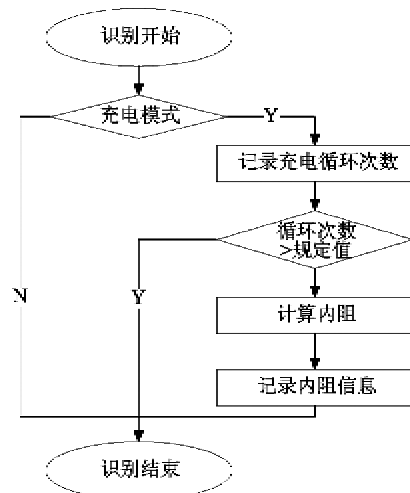


图 6 内阻识别软件流程

在纯电动工况下,内阻变化是长期过程。因此,电池内阻的计算时间间隔设定为每隔一定次数循环之后进行。因此,在电池箱重新组合过程中,主控模块将从控模块中记录电池内阻的相关信息统计后分析,即可知道各箱电池内阻是否匹配。

6 分箱充电

电池更换模式下的充电分为分箱充电和整车充电。其中分箱充电模式^[10]的基本结构见图 7。

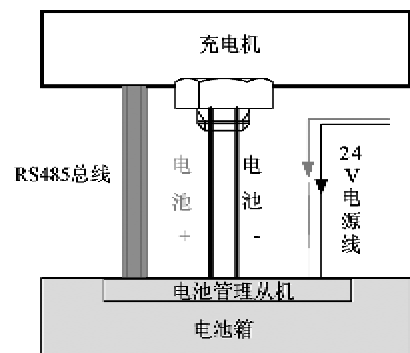


图 7 分箱充电模式

当对单箱电池充电时,BMS 从机通过通讯线

(RS485)与充电机建立数据链路,调节充电机的输出电流。当 BMS 从机接收到充电机的充电请求后,依据电池当前状态和故障信息对能否充电进行判断,确认可以充电后,返回允许充电信息,充电开始。充电过程中,BMS 从机实时地将电池的当前状态和分析结果传送到充电机,当 BMS 从机检测到电池出现过充电时,即会通知充电机降低充电电流。当充电电流低于设置的停止电流时,充电结束,保证所有电池不出现过充电现象,保障了电池的寿命。当 BMS 从机检测到电池故障时,会立即通知充电机紧急停机,防止电池在故障情况下持续充电而导致安全隐患。

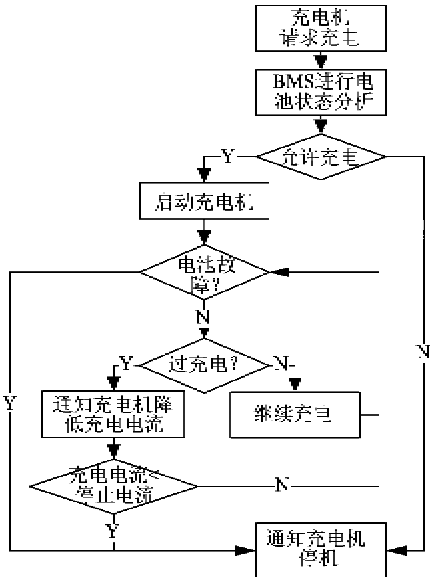


图 8 BMS 从机与充电机配合充电流程图

纯电动汽车传统的充电模式为整车充电,即充电过程是受主控模块控制完成,电池类型和阈值信息全部记录在主控模块中。而在电池更换模式下,主控模块与车辆捆绑使用,从控模块与电池箱配合使用,充电过程脱离了主控模块的监控,而且主控模块也无法得知重组后新电池的基本信息。因此,作为“电池能源包”的记录装置,从控模块需要记录对应电池箱编号、电池类型、控制参数和报警阈值信息。当整车运行或充电时,车辆在更换电池箱之后,主控模块需要自动识别当前电池组信息并记录,为整车运行和充电提供基础数据。在充电过程中,也可以通过识别信息控制充电电流,完成充电过程,具体流程与分箱充电模式相同。

无论是分箱充电或整车充电,由于 BMS 都能有效监测到每个电池单体的电压变化,并通知充电机

改变充电电流,使得所有单体电池的电压不超过限定值(本车为 4.23V),保证了充电的安全性(图 9)。

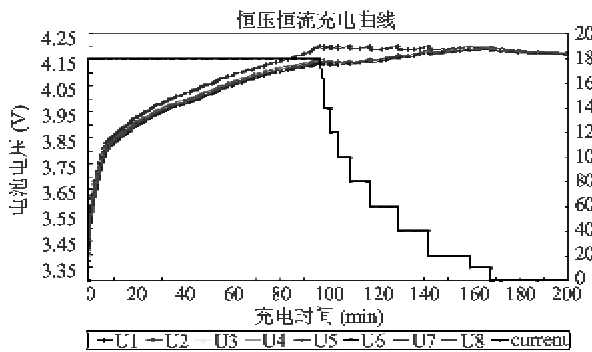


图 9 电池充电曲线

7 SOC 的测量和校准

SOC 测量方法:电流积分是测量 SOC 的基本方法,本设计通过电池组的电流测量,利用如下公式

$$SOC(t) = SOC_0 + \frac{1}{C_{NOC}} \int_{t_0}^t I(\tau) d\tau \quad (3)$$

通过精确测量在 K 至 $K-1$ 时刻流经电池组的电流 ($i(t)$), 可以计算该时间段内电流积分值 ($\int_{K-1}^K i(t) dt$), 加上充电效率或放电倍率 (η) 的修正,与电池组初始状态相加(假定充电电流方向为正,放电电流方向为负),一般取放电倍率 $\eta = 1$,计算放电过程中的电流积分值,即为电池组的初始 SOC 值。

SOC 满标定:对于纯电动汽车而言,考虑到蓄电池可能工作在略微过充或深度放电的状态下,电池荷电状态的计算可以借助这两个过程完成自动校准,因此,单独使用电流积分就可以保证 SOC 计算的精确性。对于实际车辆而言,为了提高电池组的可用容量,一般充电过程分为恒流充电和恒压充电,在恒压充电完成时电池的状态基本是相对稳定值(90%以上)。采用该方法计算 SOC 可以获得比较好的效果。每一个充放电周期的累计误差在下次充电完成时基本可以消除。

SOC 静置标定:图 10 所示为电池在充电 80%后静置 2h,极化电压随时间的静置曲线。可以看出,经过一定时间的静置,电池端电压基本保持稳定。对于电池剩余容量而言,开路电压与 SOC 之间存在一定函数关系(见图 2)。

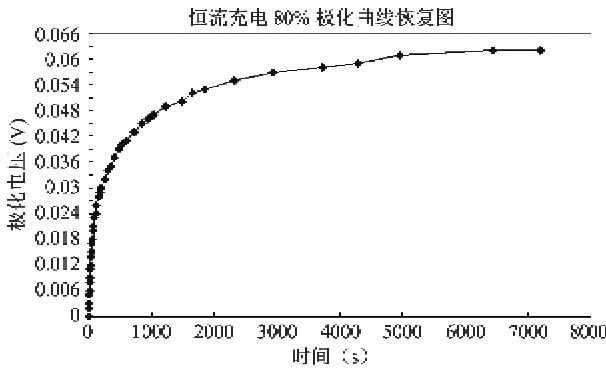


图 10 电池充电 80% 后端电压静置曲线

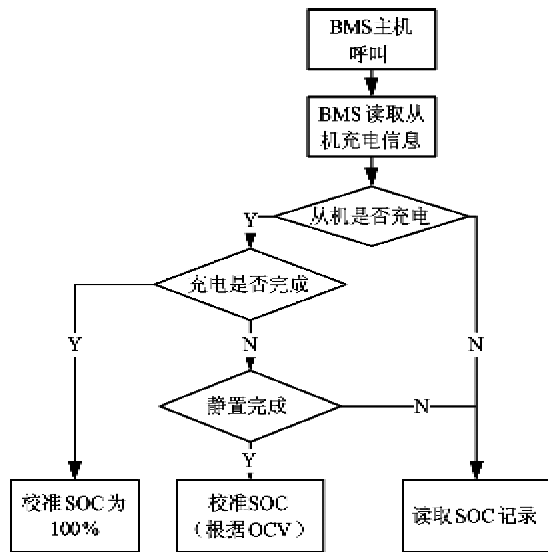


图 11 SOC 校准流程图

对于电池更换模式而言,待换电池充电完成后在充电站内放置。因此,在电池更换过程中,电池管理系统主控模块可以根据电池端电压得到整组电池的 SOC。通过这种方法,对充电已满(电池电压达到一定值)的电池 SOC 进行 100% 标定。整车模式充电时,一般通过对电池管理电流的 A-H 积分过程很容易实现 SOC 的标定。分箱充电时,由于从机没有电流检测和 SOC 估算,无法获得各箱电池的 SOC,因此,在软件中增加了电池 SOC 的修正和满标定功能,同时对充电过程进行记录,待重新配组装车后,主机可以根据从机充电记录和电池电压来标定整组电池的 SOC(见图 11)。

SOC 估算算法:为了校正电池长期搁置或长期未满足修正条件情况下产生的 SOC 累计误差,通过建立纯电动汽车用锂离子电池简单模型(见图 4),根据 Kalman 算法原理^[11,12],建立状态方程

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t I(\tau) d\tau + w(t) \quad (4)$$

和输出方程

$$V_o = f_{ocv-soc}(SOC) - I \times R + V_p + v(t) \quad (5)$$

其中 $f_{ocv-soc}$ 为开路电压(OCV)对 SOC 的函数关系式,根据图 2 曲线,为了便于计算,可将其定义分段函数:

$$f_{ocv-soc} = \begin{cases} H(0) \times soc + B(0); & 0 < soc \leq 10 \\ H(1) \times soc + B(1); & 10 < soc \leq 20 \\ \vdots & \vdots \\ H(8) \times soc + B(8); & 80 < soc \leq 90 \\ H(9) \times soc + B(9); & 90 < soc \leq 100 \end{cases} \quad (6)$$

由于在充电和放电过程中,电池的内阻存在差异,因此,内阻表示为

$$R = \begin{cases} R_d, & I > 0 \\ R_c, & I < 0 \end{cases} \quad (7)$$

考虑到电池极化的变化过程是一个复杂的函数,而且在计划电压建立后一定时间内,电池的极化电压几乎不变,因此,为了简化计算,将电池的极化作用表示为延迟函数,在充电一段时间或放电一定时间后为一个恒定值

$$V_p = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ -V_{con}, & t > t_0 \end{cases} \quad (8)$$

将方程(1)、(2)做离散化处理可得

$$\begin{aligned} soc(k)^- &= soc(k-1)^+ \\ &+ \frac{1}{C_N} \times i(k) \times \Delta t + w(k) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} V_o(k) &= f_{ocv-soc}(soc(k)^-) - i(k) \times R \\ &+ V_p + v(k) \end{aligned} \quad (10)$$

由 Kalman 算法递推式得:

$$L_k = \Sigma_{\hat{x},k}^- \times C_k \times [C_k \times \Sigma_{\hat{x},k}^- \times C_k + R_k]^{-1} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} soc(k)^+ &= soc(k)^- + L_k \times [V_o(k) \\ &- (f_{ocv-soc}(soc(k)^-) - I_k \times R + V_p)] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\Sigma_{\hat{x},k}^+ = (1 - L_k \times C_k) \times \Sigma_{\hat{x},k}^- \quad (13)$$

其中 $C_k = \frac{\partial f_{ocv-soc}(k)}{\partial soc(k)} = H(k)$, L_k 为 Kalman 增益, R_k 为过程控制协方差。

对实际锂电池样品进行车辆运行联邦城市行驶工况(FUDS)试验,通过上述算法估算电池的 SOC,得到估算曲线(图 12)。

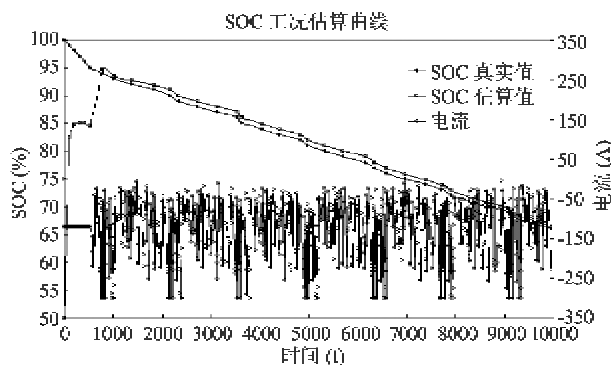


图 12 SOC 校准流程图

如图所示,假定电池 SOC 的初始误差为 50%,通过 Kalman 滤波算法的迭代运算,估算数值逐步逼近真实值,经过 600s 的估算后,误差小于 5%,满足 SOC 的精度要求。由此可见,通过纯电动汽车电池模型用 Kalman 算法估算 SOC,可以消除纯电动汽车 SOC 的累计误差,基本满足实际应用需求。

8 结 论

本文从电池更换模式对电池系统的要求出发,分析并提出了一主多从式模块化结构的电池管理系统,解决了电池应用问题:(1) 电池系统与车辆配合充电和放电;(2) 整车模式和分箱模式下配合充电;(3) 电池箱参数的自动识别和重组匹配;(4) 电池组 SOC 状态的估算与校正。

通过实际运行证明,电池更换模式下的电池管理系统完全满足整车对电池电量的监测和控制要求,较好地配合了电动公交车辆的正常运行,实现了车载电池组的“零故障”运行。

参考文献

- [1] 孙逢春. 德国和法国电动汽车的现状和发展. 科技潮, 2004, (8): 38-39
- [2] 陈宗璋, 吴振军. 电动汽车充电站建设. 大众机电, 2008, (6): 34-36
- [3] 陈清泉, 孙立泉. 电动汽车的现状和发展趋势. 科技导报, 2005, 23(4): 24-28
- [4] Buller S, Thele M, Doncker D, et al. Impedance-based simulation models of supercapacitors and Li-ion batteries for power electronic applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, 41(3): 742-747
- [5] Carter B, Matsumoto J, Prater A, et al. Lithium ion battery performance and charge control. In: *Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Washington, DC, 1996, 1: 363-368
- [6] Moo C S, Hsieh Y C, Tsai I S, et al. Dynamic charge equalisation for series-connected batteries. *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, 2003, 150(5): 501-505
- [7] Sabine P, Marion P, Andreas J. Methods for State-of-Charge determination and their applications. *Journal of Power Source*, 2001, 96: 113-120
- [8] Peng R, Massoud P. An analytical model for predicting the remaining battery capacity of lithium-ion batteries. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2006, 14(5): 441-451
- [9] Chen Q S, Lin C T. Summarization of studies on performance models of batteries for electric vehicle. *Automobile Technology*, 2005, 3: 1-5
- [10] 文锋, 姜久春, 张维戈等. 串联电池组充电模式的研究. 高技术通讯, 2008, 18(12): 1310-1314
- [11] Greg W, Gary B. *An Introduction to the Kalman Filter*. Chapel Hill: Department of Computer Science at the University of North Carolina, 2006
- [12] Plett G L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. *Journal of Power Sources*, 2004, 134: 262-276

A battery management system under the battery pack exchange mode

Wen Jiapeng, Jiang Jiuchun, Zhang Weige, Wen Feng

(School of Electrical Engineering of Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract

In order to meet the battery-exchange mode applied to pure electric buses in Olympic Games, this paper proposes a battery management system(BMS)with the master-slave structure. The BMS can work on the bus as a whole, also it can be applied to battery maintenance and charge when the series batteries are broken into battery packs. According to the battery-exchange mode, this paper analyzes the system architecture, the feature and the statue estimate of the BMS. Also it gives out the specific ways for the BMS to coordinate with the charger, recognize the parameters, recombine the battery packs, and calibrate the statue of battery packs for vehicle running.

Key words: pure electric bus, battery-exchange mode, battery management system(BMS), coordination charge, parameter identification, SOC calculation