

双卡尔曼滤波法估计电动汽车电池健康状态

邓 涛^{1,2}, 罗卫兴¹, 李志飞¹, 罗俊林¹

(1. 重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学城市轨道交通车辆系统集成与控制重庆市重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 选用戴维南等效电路模型作为基础电池模型, 标定荷电状态(SOC)-开路电压(OCV) 曲线, 利用指数拟合法拟合等效电路模型中的电阻-电容电路(RC) 参数, 提出基于安时积分法使用拓展卡尔曼滤波法估计 SOC , 以及基于容量法使用卡尔曼滤波法估计电池健康状态(SOH) , 建立双卡尔曼滤波 SOH 估算方法。随机电流激励仿真结果表明: 该方法的估计值与真实值变化趋势一致, 且估计误差控制在 1% 以内。SOH 估算实验结果表明: 在开始阶段, SOH 估计值与真实值有一定的偏差, 之后变化趋势一致, 误差可控制在 1% 以内。

关键词: 电动汽车; 锂离子电池; 健康状态(SOH); 双卡尔曼滤波

中图分类号: TM912.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1579(2018)02-0095-05

Estimation state of health of electric vehicle battery by dual Kalman filter

DENG Tao^{1,2}, LUO Wei-xing¹, LI Zhi-fei¹, LUO Jun-lin¹

(1. School of Mechatronics & Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Key Laboratory of System Integration and Control for Urban Rail Transit Vehicle, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Thevenin equivalent circuit model was selected as the basic battery model, the state of charge(SOC) and open circuit voltage(OCV) curve were calibrated. The resistance-capacitance circuit(RC) parameters in the equivalent circuit model were fitted by exponential fitting. The extended Kalman filter method was proposed to estimate the SOC based on the time-integral method, and the Kalman filter was also adopted to estimate the state of health(SOH) based on the capacity method. The dual extended Kalman filter method for SOH estimation was established. The simulation results under random current excitation condition showed that the estimated value obtained by dual extended Kalman filter was consistent with the real value, the estimated error was within 1%. The test results of SOH estimation experiment showed that the estimated value was different from the real value at the beginning state, the following change trend could be consistent and the error could be controlled within 1%.

Key words: electric vehicle; Li-ion battery; state of health(SOH); dual extended Kalman filter

电池健康状态(SOH) 是电池管理系统(BMS) 的重要内容, 但有关 SOH 估计的研究, 落后于荷电状态(SOC) 和均衡控制。准确、实时地估计电池的 SOH , 对于均衡控制系统的
作用、延长电动汽车动力电池续航里程及保证电池安全, 具有重要意义。目前, SOH 估计的常用方法可主要分为离线估计和在线

作者简介:

邓 涛(1982 -) , 男, 江西人, 重庆交通大学机电与车辆工程学院教授, 硕士生导师, 研究方向: 电动汽车、智能网联汽车控制。本文联系人;

罗卫兴(1990 -) , 男, 湖北人, 重庆交通大学机电与车辆工程学院硕士生, 研究方向: 电动汽车动力电池健康状态估计;

李志飞(1992 -) , 男, 山东人, 重庆交通大学机电与车辆工程学院硕士生, 研究方向: 锂电池管理系统;

罗俊林(1991 -) , 男, 四川人, 重庆交通大学机电与车辆工程学院硕士生, 研究方向: 混合动力汽车能量管理。

基金项目: 国家自然科学基金(51305473) , 中国博士后科学基金(2014M552317) , 重庆市博士后研究人员科研项目(xm2014032)

估计两类。离线估计方法主要包括:容量法、内阻法^[1]、电化学阻抗法和双脉冲放电负载法^[2]。由于离线估计存在可操作性不理想和估算误差较大等缺陷,在线估计算法得到了迅速发展。在线估计主要包括卡尔曼滤波法、神经网络法、支持向量机法和模糊逻辑推理法^[3]等。模糊逻辑推理法虽然不需要准确的数学模型,但需要较强的经验且计算量大,通常不独立使用;支持向量机法对数目边界敏感度较高,损失函数复杂,一般不用于电动汽车电池 SOH 的估计;卡尔曼滤波法在线估计的精度较高,且与神经网络相比,需要处理的数据更少。

得到准确实时的 SOC 数据是实现 SOH 在线实时估计的前提条件,因此,本文作者提出采用双卡尔曼滤波法分别估计电池 SOC 和 SOH,从仿真和实验角度,验证双卡尔曼滤波法的估算效果。

1 等效电路建模与参数辨识

1.1 戴维南等效电路模型

常见的等效电路模型有 Rint 模型、戴维南等效电路模型、PNGV 模型和双 RC 模型等^[4]。戴维南模型与 Rint 模型相比具有更高的精度,且复杂程度要低于 PNGV 模型和双 RC 模型,因此,实验选择精度高、结构简单的戴维南等效电路模型。

由基尔霍夫电压、电流定律,可得到式(1)的状态方程。

$$\begin{cases} U_t = U_{OCV} - U_{b,t} - i_t \cdot R_{a,t} \\ i_t = \frac{U_{b,t}}{R_b} + C_b \frac{dU_{b,t}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: U_{OCV} 为t时刻电池的开路电压(OCV); $U_{b,t}$ 为并联 RC 回路上t时刻的电压降; i_t 为t时刻电池的充放电电流,充电为正值,放电为负值; $R_{a,t}$ 为t时刻电池的欧姆内阻; C_b 为t时刻的极化电容。

选择 SOC 作为状态变量,由安时积分法可得:

$$SOC_{k+1} = SOC_k + \int_0^t \frac{\eta \cdot i}{C_t} dt \quad (2)$$

式(2)中: SOC_{k+1} 为(k+1)时刻电池的 SOC 值; η 为电池充放电效率,该值通常情况下取为1; C_t 为电池的额定容量,与 SOH 直接相关。

联合式(1)和(2),可得式(3)的状态空间方程:

$$\begin{bmatrix} SOC \\ U_b \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{1}{R_b \cdot C_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC \\ U_b \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \frac{\eta}{C_t} \\ \frac{1}{C_b} \end{bmatrix} i_k + \begin{bmatrix} w_k \\ v_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中: w_k 、 v_k 均为方差为零的高斯白噪声,分别为系统的系统噪声和测量噪声。

1.2 模型参数辨识

使用 18650 型锂离子电池(东莞产),正、负极活性材料分别为镍钴铝三元材料和石墨,标称容量为 2.6 Ah,充电终止、放电截止电压分别为 4.2 V、3.0 V。

式(3)中,模型中的未知参数为 $U_{OCV} = f(SOC_k)$ 之间的

关系式,以及 R_a 、 R_b 和 C_b 。

为了得到模型中的未知变量关系式和参数值,采用快速法标定 SOC-OCV 关系曲线,如图 1 所示,利用端电压指数拟合法,得到 R_b 、 C_b 的值。

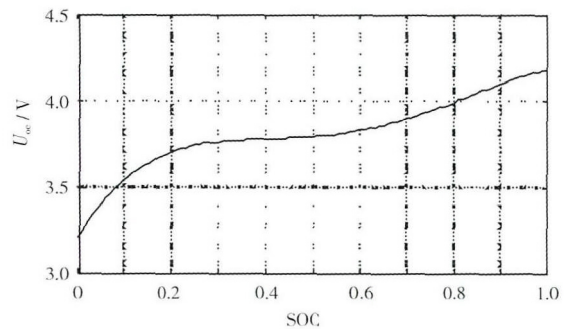


图 1 OCV-SOC 拟合曲线

Fig. 1 State of charge(SOC)-open circuit voltage(OCV) fitting curve

在对电池进行放电时,电流突然停止,电压会有一个突变回升的脉冲过程,该现象与电池的电阻和电容参数有关^[5]。电阻电容的辨识,可根据电池在突变激励条件下的外部响应得到。

实验使用端电压指数拟合法,辨识模型中的 R_a 、 R_b 和 C_b 。使用 BTS2000 电池性能测试仪(湖北产)对电池进行 1 C 恒流放电,当 SOC = 60% 时停止放电。通过对恢复阶段电压的实验数据进行拟合,得到需要辨识的阻容值。实验过程中,电压随时间变化的曲线如图 2 所示。

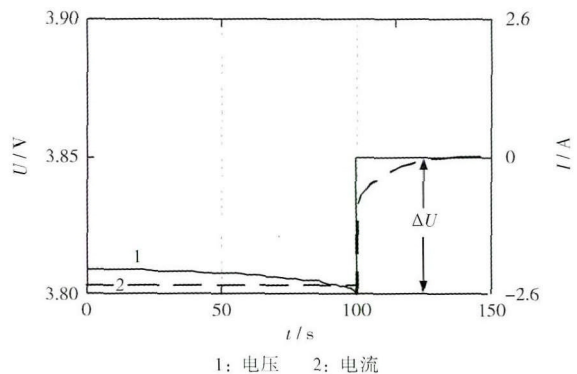


图 2 停止放电实验部分数据

Fig. 2 Stop discharge experimental data

通过拟合,得到常数 $k_0 = 3.851$, $k_1 = 0.019$, $\lambda_1 = 6.328$ 。 ΔU 为电压恢复阶段电压的反冲量,从图 2 可知为 0.763 V,反推得到阻容计算关系式为:

$$\begin{cases} R_b = k_1 / i \\ C_b = 1 / \lambda_1 \cdot R_b \\ R_a = \Delta U / i \end{cases} \quad (4)$$

2 基于双卡尔曼滤波法估计 SOC 和 SOH

卡尔曼滤波法本身是对线性系统的一种最优估计方法,当被估计的系统为非线性系统时,需要先对系统进行线性化处理,从而应用扩展卡尔曼滤波法(EKF)^[6]。

2.1 基于EKF估计SOC

根据锂离子电池等效模型的状态方程可知,准确估计SOC是实现SOH估计的必要条件。SOC是非线性变化的,因此采用拓展卡尔曼滤波法对选定电池的SOC进行估计。系统状态方程和测量方程为:

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k, \mu_k) + w_k \\ y_k = g(x_k, \mu_k) + v_k \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: x_{k+1} 表示系统当前的状态向量; $f(x_k, \mu_k)$ 、 $g(x_k, \mu_k)$ 是系统的非线性方程表达式; u_k 表示系统在k时刻的输入量; y_k 是系统k时刻的输出量。

根据戴维南等效模型,得到的SOC估计的矩阵方程为:

$$\begin{cases} f(x_k, \mu_k) = A_{k-1}x_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} \\ g(x_k, \mu_k) = U_{OC,k} + U_{b,k} + i_k \cdot R_{a,k} \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} A_k = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x=x_k^+} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - 1/(R_b \cdot C_b) \end{bmatrix} \\ B_k = \begin{bmatrix} \eta \Delta t / C(k) \\ 1/C_b \end{bmatrix} \\ H_k = \frac{\partial g}{\partial x} \Big|_{x=x_k^+} = \left[\frac{d(U_{OC,k-1})}{d(\text{SOC}_{k-1})} + 1 \right] \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、(7)中: A_{k-1} 、 B_{k-1} 分别表示系统的状态转移矩阵以及观测矩阵; $U_{b,k}$ 表示k时刻电阻与电容的电压; H_k 表示k时刻的测量雅克比矩阵; $U_{OC,k}$ 表示K时刻系统的OCV。

利用EKF估计SOC步骤见式(8)~(10)。

初始化:

$$\begin{cases} \hat{x}_0^+ = E(x_0) \\ P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T] \\ W_0 = E(w \times w^T) \\ V_0 = E(v \times v^T) \end{cases} \quad (8)$$

时间更新:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1}^+ = A_k \hat{x}_k + B_k i_k \\ P_{k+1}^- = A_k P_k A_k^T + W_k \end{cases} \quad (9)$$

测量更新方程为:

$$\begin{cases} K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + V_k)^{-1} \\ \hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - g(\hat{x}_k^-, \mu_k)) \\ P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \end{cases} \quad (10)$$

式(8)~(10)中: \hat{x}_k^+ 为k时刻系统状态; P_k 为k时刻系统状态的协方差矩阵; W_k 为k时刻系统噪声协方差矩阵; P_{k+1}^- 为(k+1)时刻系统状态协方差矩阵的估计值; V_k 为k时刻系统测量噪声协方差矩阵; K_k 为k时刻卡尔曼增益; $E(\cdot)$ 为期望。

2.2 基于EKF估计SOH

SOH估计的前提是准确估计当前时刻的最大可放电容

量。由于容量是一个缓变量,可认为在较短时间内容量是一个定值,容量变化可以表示为:

$$C_{k+1} = C_k + r_k \quad (11)$$

结合安时法整理,可得到表达式:

$$d_{k+1} = z_{k+1} - z_k + \frac{\eta_k \Delta t}{C_k} + e_k \quad (12)$$

式(11)、(12)中, C_{k+1} 为电池k+1时刻的实际容量; C_k 为k时刻电池的实际容量; z_k 为k时刻SOC的估计值; z_{k+1} 为k+1时刻SOC估计值; Δt 为采样时间间隔; d_{k+1} 为观测参数; e_k 、 r_k 分别为均值都为0的高斯白噪声,表示电池容量模型的噪声。

当 d_{k+1} 为零时,式(12)等价于SOC估计中的状态方程。据此,可以联合式(11)、(12),应用拓展卡尔曼估计得到额定容量的估计值,如式(13),其中 $A_k = 1$ 。

$$H_k = \frac{\partial g(x_k, \mu_k)}{\partial C_k} \Big|_{C_k = \hat{C}_k} = \frac{\eta_{k-1} \Delta t}{(\hat{C}_k)^2} \quad (13)$$

2.3 基于双卡尔曼滤波法算法的SOH估计

根据上述估计过程分析可知,估计SOH的前提条件是明确SOC_k、 $U_{b,k}$,而这些值在估计SOH的过程中都是预先无法明确的。利用双拓展卡尔曼滤波法,能够较好地解决这些问题。

上述建立的SOC和SOH估计模型均为非线性方程,实验使用双拓展卡尔曼滤波法同时估计SOC和SOH,其中一个拓展卡尔曼滤波器估计SOC称为参数估计,另外一个估计当前时刻的额定容量,最终通过容量定义公式,计算得到当前时刻的SOH。

假设电池的当前时刻可用容量为缓变参数,根据式(5)、(6)和(11),基于戴维南等效电路模型,可得到式(14)所示的双卡尔曼滤波估计模型。

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k C_{k+1} = C_k + r_k \\ y_k = U_{OC,k} + U_{b,k} + i_k \cdot R_{a,k} + v_k = g(x_k, \mu_k) + v_k \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中: $x_k = [\text{SOC}_k \ U_{b,k}]$ 为k时刻的系统状态; v_k 与 r_k 相互独立。

由参数辨识过程可知,基于双卡尔曼滤波的SOH估计过程与SOC的估计是同步进行的,即每估计一次SOC,就估计一次电池当前时刻的最大放电容量。

双卡尔曼滤波的具体步骤与SOC估计过程相同,也是分为初始化参数、时间更新和测量更新等3步。循环运行时间更新和测量更新的过程,可以得到SOC和SOH的实时估计值。

3 仿真分析

仿真过程使用随机生成电流激励曲线作为输入量,包含电池安全放电范围内的所有值,激励电流曲线如图3所示,电流的正负分别表示充放电。

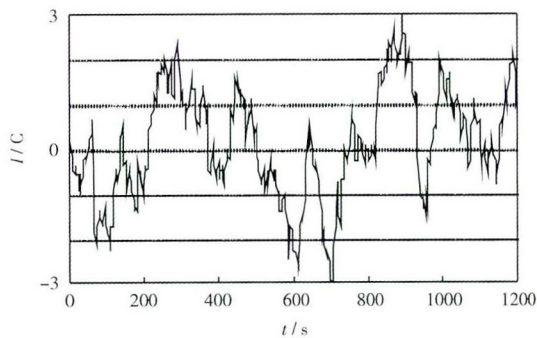
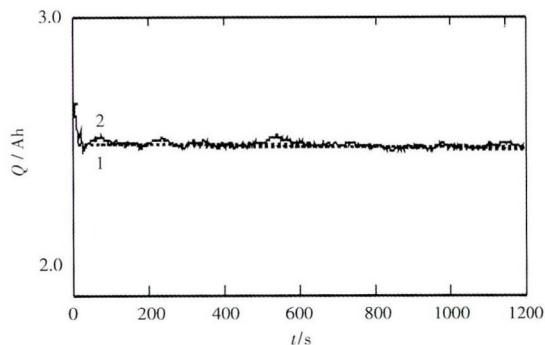


图3 电流激励曲线

Fig. 3 Current excitation curve

真实值为通过电池测试仪实际测得的当前状况下该电池的 SOH 值。因为该实验循环次数较少,所以认为该值为定值。

设置初始电池容量为 2.7 Ah, SOH 为 95%, 仿真共进行了 1 200 s, 得到的容量估计曲线与实际测得容量真实值的对比, 见图 4。



1: 容量真实值 2: DEKF估计值

图4 容量估计结果与真实值

Fig. 4 Capacity estimate results and real values

从图 4 可知, 在仿真开始阶段, 设定的初始值与设备测得的容量真实值之间有一定的偏差, 经过约 60 s 的振荡后, 算法估计的结果很快收敛于实验测得的真实值附近。随着时间的逐步积累, 在卡尔曼增益的作用下, 估计误差逐渐减小, 最终测量容量值均处于 2.49 ~ 2.51 Ah, 与实验仪器测得的容量真实值 2.5 Ah 之间的误差控制在 1% 以内。这表明双卡尔曼滤波算法的准确度较高, 有较好的鲁棒性。此外, 文献 [7] 基于放电截止后, 将电压回升速率和交流阻抗相结合也可得到电池 SOH, 与之相比, 本实验虽然算法更复杂, 但精度有较明显的提升。

4 实验验证

设计以 MC9S12XS128 为主控芯片的 SOH 估计硬件电路。电路主要包含 SOH 估计模块、充放电电流采集电路、电压、温度测量电路、电源模块、显示模块、保护模块及通讯模块, 将采集的电流、电压信号传递到主控模块进行计算, 最终由显示模块输出液晶显示。实验通过 SOH 估计电路板进行实验, 来验证算法在实际使用过程中的准确性和稳定性。所

用实验设备介绍见表 1。

表 1 实验设备

Table 1 Experimental equipment

设备型号	设备名称	用途	产地
BTS2000	电池性能测试仪	电池充放电测试	湖北
TND-500VA	稳压恒流源	提供恒流、恒压电源	上海
LK-80G	恒温恒湿试验箱	提供恒温恒湿环境	东莞
TH1961	六位半电压表	测量开路电压	深圳

为了简化实验过程, 实验未对电池进行重新标定和辨识参数。根据上述电池参数实验辨识, 得到基础参数如下: $R_a = 28.805 \Omega$, $R_b = 7.271 \text{ m}\Omega$, $C_b = 21.734 \text{ F}$ 。实验时, 将电池置于恒温恒湿试验箱中, 设定的放电参数包括大电流充放电、恒定电流充放电和电流突变等多种情况, 充分模拟实车使用时的多工况电流变化, 电流时间曲线见图 5。

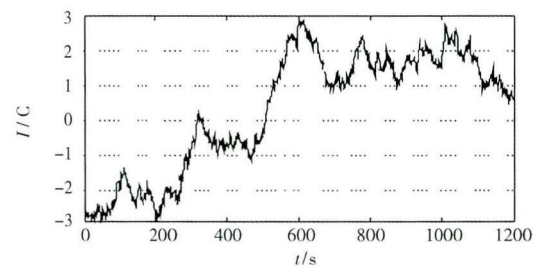


图5 实验的充放电电流曲线

Fig. 5 Charge-discharge current curve for experiment

实验步骤如下:

① 电池预处理, 将电池先以 1 C 恒流充电至截止电压 4.2 V, 转恒压充电至充电电流为 0, 再用 BTS2000 电池性能测试仪对电池当前时刻的 SOH 进行检测, 重复 10 次, 得到当前时刻的电池容量 $Q = 2 548 \text{ mAh}$, 此时 $\text{SOH} = 0.950$;

② 依据上述已有数据, 对 SOH 估计电路中的参数进行预设, 为检验算法的鲁棒性, 此处设置 $\text{SOH} = 1.000$;

③ 开始实验, 按图 5 对电池进行充放电实验, 电池从满电状态开始进行实验, 每次实验进行 1 200 s, 并记录数据。

实验过程中记录了 3 次实验过程中的各 10 组数据, 由于 SOH 为缓变参数, 因此将采样间隔取为 60 s, 实验过程中记录数据的平均值与 SOH 实测值的对比见图 6。

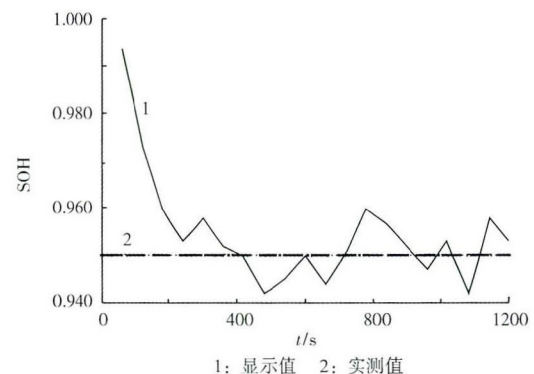


图6 SOH 估计值与实际值

Fig. 6 SOH estimates and actual values

从图6可知,在实验开始的约100 s内,SOH估计电路板显示数据与当前SOH真实测得值之间存在一定的偏差,经过约180 s的迭代以后,显示值处于0.94~0.96,即与实际测得真实值0.95之间差距较小,误差控制在1%以内,证明了该SOH估算电路及硬件、软件的稳定性和可行性。

5 结论

与电池管理系统(BMS)中SOC估计、均衡控制系统相比,处于同地位的SOH估计研究相对落后。本文作者选定戴维南等效电路模型,基于双卡尔曼滤波法估计了电动汽车电池SOH。通过随机电流激励仿真与实际测得SOH结果进行对比,验证算法的可靠性,误差在1%以内。设计对应的硬件和软件电路,从实验的角度验证算法的鲁棒性,误差控制在1%以内,可较好地满足实际测量的需要。算法复杂性低,对相应拓展配套硬件成本要求低,具有较高实际应用价值。

参考文献:

[1] REZVANIZANIANI S M, LIU Z C, CHEN Y *et al.* Review and re

cent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility [J]. *J Power Sources* 2014 256(12): 110–124.

[2] COLEMAN M, HURLEY W G, LEE C K. An improved battery characterization method using a two-pulse load test [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2008 23(2): 708–713.

[3] 赵晓兵. 锂离子电池荷电状态在线估计技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学 2016.

[4] 周秀文. 电动汽车锂离子电池健康状态估计及寿命预测方法研究[D]. 长春: 吉林大学 2016.

[5] 张文圳, 张延华, 杨睿哲. 阀控式铅酸蓄电池的等效电路模型和参数辨识[J]. *电源技术* 2017 41(3): 460–463.

[6] Freedom CAR Battery Test Manual for Power Assist Hybrid Electric Vehicles [S].

[7] 黄伟昭, 李小平, 张栋省 *et al.* 基于开路电压回升速率和交流阻抗相结合的一种锂离子电池SOH算法[J]. *新能源进展*, 2014 2(1): 43–48.

收稿日期: 2017–10–11

虎头公司承办原电池国家标准编制工作会议

2018年3月28日,由广州市虎头电池集团有限公司承办的原电池GB/T 8897系列国家标准编制工作组成立及标准预编写工作会议在广州召开。这是2017年11月4日重新修订发布的《中华人民共和国标准化法》实施后,原电池国家标准编制方式尝试由企业牵头的创新之举,以确保新标准化法中程序规范及标准编制收费透明的要求。会议由全国原电池标准化技术委员会主任委员王敬忠同志主持,虎头公司总经理陈学甫致欢迎词,全国原电池标准技术委员会委员、虎头公司技术部刘煦经理与来自苏州化学电源研究所、南孚、中银双鹿、长虹、野马和永高等知名原电池企业、专业检测机构的24位委员代表参加了会议。

全国原电池标委会秘书处马扣祥研究员汇报了GB/T 8897.1–5原电池系列标准编制计划及报名情况,经研究讨论,决定成立5个标准编制组,确定22家企业成为GB/T 8897.1–5原电池系列标准编制组成员以及5项标准编制工作的牵头单位和负责人,按国标委要求的标准费用分担公开模式及时间节点开展相关工作。会上,与会委员代表对各项议程积极参与讨论,圆满完成了各项议程。

广州市虎头电池集团有限公司由于在行业的领头地位和对电池满足质量安全要求具有丰富的技术经验,继续以排名第一承担GB/T 8897.5《原电池 第5部分:水溶液电解质电池的安全要求》的编制工作并担任编制组组长。虎头公司是原电池国家标准编制方式创新后第一家业内承办标准编制会议的企业,与会委员们向虎头公司对会议的大力支持和热情周到的服务表示了衷心感谢。

会后,与会代表参观了虎头公司位于珠江新城的办公大楼,观看了虎头公司的宣传视频,了解了虎头公司目前的发展状况,共同感受虎头发展的成果,探讨了原电池未来发展的愿景。

此次会议的成功承办是广州市虎头电池集团有限公司注重标准技术创新和业内技术交流的重要体现,有利虎头公司持续提升企业形象和产品竞争力,为企业的健康发展打下良好基础。

一直以来,广州市虎头电池集团有限公司注重技术创新,积极参与原电池国家标准的编制工作。在电池满足质量与安全要求的技术实施方面,始终走在行业的前面,很好地为产品的销售保驾护航。(梁伟雄)