

# 铅酸电池机理模型的简化求解

吕 超<sup>1</sup>, 葛腾飞<sup>1</sup>, 丛 巍<sup>1</sup>, 于洪海<sup>2</sup>, 赖庆智<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 国网黑龙江省电力有限公司检修公司, 哈尔滨 150090)

**摘要:** 为了更加准确便捷地估计铅酸电池的充放电性能和健康状态, 提出了一种简化的机理模型。首先, 基于经典的铅酸电池机理模型, 对电极动力学过程、开路电势和固相电势平衡过程进行了近似处理; 然后, 针对简化模型的控制方程, 采用伽辽金法进行求解, 选取余弦函数作为试函数。最后, 针对不同工况进行仿真验证, 实验结果证明该模型具有很高的仿真精度。简化模型的提出使得铅酸电池机理模型兼顾了精确度和复杂程度, 为机理模型用于电池端电压行为的在线仿真和健康状态的评估提供了一定的理论基础。

**关键词:** 铅酸电池; 机理模型; 伽辽金法

## Simplification and Solution of Mechanism Model for Lead-acid Battery

LYU Chao<sup>1</sup>, GE Tengfei<sup>1</sup>, CONG Wei<sup>1</sup>, YU Honghai<sup>2</sup>, LAI Qingzhi<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;  
2. Maintenance Branch, State Grid Heilongjiang Electric Power Company, Harbin 150090, China)

**Abstract:** To estimate the charging-discharging performance and the health status of a lead-acid battery more accurately and conveniently, a simplified mechanism model was put forward. First, the electrode kinetics, open circuit potential, and solid-phase potential equilibrium were approximated based on the classical mechanism model of lead-acid battery. Then, aiming at the control equations in the simplified model, Galerkin Method was applied to solve the governing equations, and cosine function was selected as the shape function. Finally, the model was verified under different operation conditions. Experimental results showed that the model had a high simulation precision. The simplified model takes both accuracy and complexity into account, which provides a theoretical basis for the mechanism model to be applied to the online simulation and health status evaluation on the terminal voltage profiles of a battery.

**Keywords:** lead-acid battery; mechanism model; Galerkin method

铅酸电池广泛应用于汽车、通讯、电力、铁路等领域, 是目前应用最为广泛的化学电源, 其中阀控式密封铅酸 VRLA (valve-controlled lead acid) 电池由于具有高温性能好、浮充寿命长、自放电性能好、价格相对低廉等优点而占据了较大份额的市场。电池的广泛应用对其使用和维护提出了更高的要求。更精确地仿真电池端电压行为和评估电池性能对于最大限度地发挥电池的作用必不可少, 而这对电池

模型提出了较高的要求。

目前铅酸电池的模型主要有等效电路模型、神经网络模型、机理模型等<sup>[1]</sup>。等效电路模型根据电化学阻抗谱应用电学元件近似表示电池内部的物理化学过程, 具有结构简单、参数少等特点<sup>[2]</sup>, 但是该模型精度较低且参数的物理意义不够明确, 用于电池健康状态评估时参考价值不大; 神经网络模型不用考虑电池内部细节, 但是需要大量训练样本数据对网络进行训练, 且误差受训练数据和训练方法的影响较大<sup>[3]</sup>; 机理模型建立在传质理论和电化学反应

应上<sup>[4]</sup>,对电池端电压行为的仿真有很好的精确度,并且其模型参数具有明确的物理意义,能够更加明确地用于电池健康状态的评估。因而,本文对铅酸电池机理模型进行简化,并采用伽辽金法(Galerkin method)实现对模型的求解。最后针对不同工况仿真电池端电压行为及内部状态量,验证了模型简化和求解的正确性和精确度。

## 1 机理模型的简化

对于 VRLA 电池,充放电过程中其内部各个变量和电化学反应在高度和宽度上近乎均匀分布,因此只考虑极板厚度方向,其机理模型原理如图 1 所示,包括正负极集流体、正负极极板和隔膜,其中用下标 p、s、n 分别表示正极、隔膜和负极。为对模型做出化简,以兼顾模型的复杂度和精确度,做出如下假设:①忽略析气过程和其他副反应;②忽略固相电势在极板厚度方向上的分布;③忽略模型中各参数随温度和荷电状态的变化。

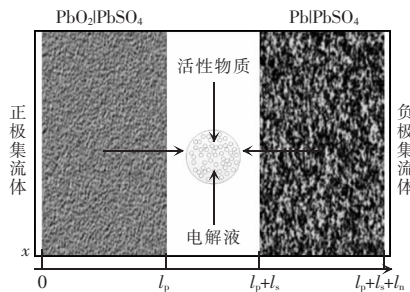


图 1 铅酸电池机理模型原理

Fig.1 Schematic of mechanism model of lead-acid battery

### 1.1 离子扩散与迁移

对于铅酸电池而言,正负离子均参与了充放电的反应,电解质为二元电解质( $H^+$ 和 $HSO_4^-$ ),其传输性能由所有离子的性质决定。离子在电解液中的传递通过扩散和迁移来完成,扩散过程遵循菲克扩散第二定律,而迁移过程主要与物质的淌度有关<sup>[6]</sup>。电解质的物质平衡方程描述为

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D^{\text{eff}} \nabla c) + a \frac{a_{\text{es}} j}{2F} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon$ 为电解质体积分数; $D^{\text{eff}}$ 为电解液有效扩散

系数;正极中 $a=3-2t_+$ ,负极中 $a=1-2t_+$ ,其中 $t_+$ 为 $H^+$ 的迁移系数; $a_{\text{es}}$ 为电极活性材料的比表面积; $j$ 为固相-液相界面处的反应电流密度; $F$ 为法拉第常数; $c$ 为电解液浓度; $\nabla$ 为散度运算符。

以正极为例,边界条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \\ D_p^{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=l_p} = D_p^{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=l_p'} \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2 电荷平衡与欧姆定律

考虑固相材料的高导电性<sup>[7]</sup>,认为固相电势在正极区域和负极区域均匀分布。根据 $i_s = -\sigma^{\text{eff}} \nabla \phi_s$ , $\phi_s$ 为固相电势,则固相电流为 0。

在正极、隔膜和负极的电解液中,液相电势由离子电流的欧姆定律与离子迁移电势构成<sup>[8]</sup>,即

$$i_e = -\kappa^{\text{eff}} \nabla \phi_e - \kappa_{\text{dl}}^{\text{eff}} \nabla c \quad (3)$$

式中: $\phi_e$ 为液相电势; $i_e$ 为液相电流密度; $\kappa^{\text{eff}}$ 为有效液相电导率; $\kappa_{\text{dl}}^{\text{eff}}$ 为有效扩散电解质电导率,用于描述因离子扩散引起的电荷转移。

以正极为例,边界条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \\ \left( \kappa_p^{\text{eff}} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} + \kappa_{\text{dl},p}^{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial x} \right) \Big|_{x=l_p} = \left( \kappa_s^{\text{eff}} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} + \kappa_{\text{dl},s}^{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial x} \right) \Big|_{x=l_p'} \end{cases} \quad (4)$$

由固相液相交界面处的电荷守恒得到

$$\nabla \cdot i_e = a_{\text{es}} j + i_{\text{dl}} \quad (5)$$

式中, $i_{\text{dl}}$ 为单位体积的双电层电流密度, $i_{\text{dl}} = C_{\text{dl}} \frac{\partial(\phi_s - \phi_e)}{\partial t}$ , $C_{\text{dl}}$ 为单位体积的双电层电容。

固相电流为 0,则液相电流等于外电流密度。根据正负极的电荷守恒可得

$$\begin{cases} \int_0^{l_p} A [a_{\text{es}} j + j_{\text{dl}}] dx = I(t) \\ \int_{l_p+l_s}^{l_p+l_s+l_n} A [a_{\text{es}} j + j_{\text{dl}}] dx = -I(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $l_p$ 、 $l_s$ 、 $l_n$ 分别为正极、隔膜和负极的厚度; $A$ 为极板有效面积。

### 1.3 电极动力学过程

电极动力学方程描述固相-液相界面处的反应离子流密度 $j$ 与其界面过电势 $\eta$ 的关系,反映界面

处电化学反应的快慢程度,遵循 Butler-Volmer 动力学<sup>[9]</sup>,可描述为

$$j = i_0 \left( \frac{c}{c_{\text{ref}}} \right)^\gamma \left[ \exp \left( \frac{\alpha_a F}{RT} \eta \right) - \exp \left( - \frac{\alpha_c F}{RT} \eta \right) \right] \quad (7)$$

式中: $i_0$  为交换电流密度; $c_{\text{ref}}$  为电解液参考浓度; $\gamma$  为方程指数; $\alpha_a$  和  $\alpha_c$  分别为阳极和阴极转移系数,  $\alpha_a + \alpha_c = n = 2$ ,  $n$  为反应中的电子数量; $R$  为摩尔气体常数; $T$  为电池温度。

在过电势  $\eta_0=0$  附近对其进行一阶泰勒展开,即

$$j(\eta) = f(0) + f'(0)\eta = i_0 \left( \frac{c}{c_{\text{ref}}} \right)^\gamma \frac{(\alpha_a + \alpha_c)F}{RT} \eta = \frac{1}{a_{\text{cs}} R_{\text{ct}}} \eta \quad (8)$$

式中, $R_{\text{ct}}$  为电荷转移电阻,  $\frac{1}{R_{\text{ct}}} = a_{\text{cs}} i_0 \left( \frac{c}{c_{\text{ref}}} \right)^\gamma \frac{(\alpha_a + \alpha_c)F}{RT}$ 。

过电势  $\eta$ 、固相电势  $\phi_s$ 、液相电势  $\phi_e$  的关系为

$$\eta = \begin{cases} \phi_{\text{sp}} - \phi_e - \Delta U_{\text{PbO}_2} & \text{PbO}_2 \text{ 电极} \\ 0 & \text{隔膜} \\ \phi_{\text{sn}} - \phi_e & \text{Pb 电极} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\phi_{\text{sp}}$ 、 $\phi_{\text{sn}}$  为正、负极固相电势; $\Delta U_{\text{PbO}_2}$  为与电解液浓度有关的电池开路电势,等于  $\text{PbO}_2$  电极平衡电势与电极平衡电势之差<sup>[10]</sup>。其中, $\text{PbO}_2$  电极的平衡电势为

$$U_{\text{PbO}_2} = 1.628\ 194 + 0.073\ 924 \ln m + 0.033\ 120 \ln^2 m + 0.043\ 220 \ln^3 m + 0.021\ 567 \ln^4 m \quad (10)$$

Pb 电极的平衡电势为

$$U_{\text{Pb}} = -0.294\ 606 - 0.073\ 551 \ln m - 0.030\ 432 \ln^2 m - 0.030\ 552 \ln^3 m - 0.012\ 045 \ln^4 m \quad (11)$$

式中, $m$  为电解液的摩尔质量,  $m = 1.003\ 22 \times 10^3 c + 3.55 \times 10^4 c^2 + 2.17 \times 10^6 c^3 + 2.06 \times 10^8 c^4$ 。

开路电势与电解液浓度  $c$  之间的关系如图 2 所示。由图 2 可见,在  $1 < c < 8 \text{ mol/L}$  的条件下,开路电势  $\Delta U_{\text{PbO}_2}$  与  $c$  具有较好的线性相关度,即

$$\Delta U_{\text{PbO}_2} = \bar{U}_{\text{PbO}_2} + \tilde{U}_{\text{PbO}_2} c \quad (12)$$

其中: $\bar{U}_{\text{PbO}_2} = 1.863\ 4 \text{ V}$ ;  $\tilde{U}_{\text{PbO}_2} = 0.054\ 3 \text{ V}/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$ 。

正负极集流体连接到电极的末端区域( $x=0$  和

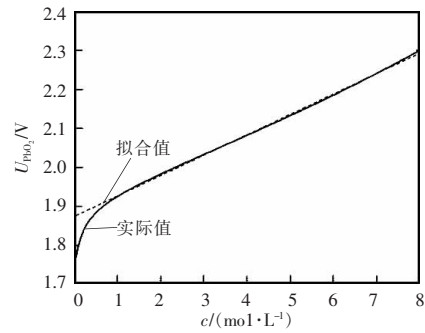


图 2 开路电势与电解液浓度  $c$  之间的关系

Fig.2 Relationship between open circuit potential and electrolyte concentration  $c$

$x=L$ ),集流体处电压等于该位置处的固相电势。电池的输出电压为正、负极集流体之间的电势差正负极固相电势之差,即

$$V(t) = \phi_{\text{sp}} - \phi_{\text{sn}} \quad (13)$$

## 2 简化模型的求解

从系统的角度来看,电池本质上是一个单输入单输出系统,即输入电流、输出电压。为了求解模型必须对偏微分方程组进行离散化得到常微分方程组。由于伽辽金法精度较高,而且巧妙地运用了偏微分方程的弱形式,计算量不大<sup>[11,12]</sup>。本文采用此法对模型进行求解。

考虑到集流体处零通量的边界条件( $x=0$  和  $x=L$ ,  $L=l_p+l_s+l_n$ ),试函数选取  $\Psi_m(x) = \cos(\frac{m\pi}{L}x)$ ,则电解液浓度和液相电势分别可表示为

$$\begin{cases} c(x,t) = \sum_{m=0}^{N-1} \Psi_m(x) c_m(t) \\ \phi_e(x,t) = \sum_{m=1}^{N-1} \Psi_m(x) \phi_m(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $c_m(t)$  和  $\phi_m(t)$  分别为电解液浓度和液相电势的伽辽金系数; $N$  为伽辽金阶数。

权函数选取与试函数保持一致,取  $\Psi_n(x) = \cos(\frac{n\pi}{L}x)$ ,对式(1)的域内剩余与权函数做内积,可以得到

$$\begin{aligned}
 & \int_0^{l_p+l_n} \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \left( \sum_{m=0}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}_m(x) \dot{c}_m(t) \right) dx = - \int_0^{l_p+l_n} D^{\text{eff}} \boldsymbol{\Psi}'_n(x) \left( \sum_{m=0}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}'_m(x) c_m(t) \right) dx - \\
 & \int_0^{l_p} \frac{a}{2F} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \tilde{U}_{\text{PbO}_2} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \left( \sum_{m=0}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}_m(x) c_m(t) \right) dx - \int_0^{l_p} \frac{a}{2F} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \left( \sum_{m=1}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}_m(x) \phi_m(t) \right) dx - \\
 & \int_{l_p+l_n} \frac{a}{2F} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \left( \sum_{m=1}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}_m(x) \phi_m(t) \right) dx + \int_0^{l_p} \frac{a}{2F} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \phi_{\text{sp}} dx + \int_{l_p+l_n} \frac{a}{2F} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \phi_{\text{sn}} dx - \\
 & \int_0^{l_p} \frac{a}{2F} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \bar{U}_{\text{PbO}_2} dx
 \end{aligned} \tag{15}$$

将其转换为矩阵形式,即

$$\mathbf{M}_c \dot{\mathbf{c}} = \mathbf{K}_c \mathbf{c} + \mathbf{K}_{\text{ce}} \boldsymbol{\varphi}_e + \mathbf{K}_{\text{cs}} \boldsymbol{\varphi}_s + \mathbf{B}_c \mathbf{u} \tag{16}$$

其中:  $\mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_0(t) \\ c_1(t) \\ \vdots \\ c_{N-1}(t) \end{bmatrix}; \boldsymbol{\varphi}_e = \begin{bmatrix} \varphi_{e,1}(t) \\ \varphi_{e,2}(t) \\ \vdots \\ \varphi_{e,N-1}(t) \end{bmatrix}; \boldsymbol{\varphi}_s = \begin{bmatrix} \varphi_{\text{sp}}(t) \\ \varphi_{\text{sn}}(t) \end{bmatrix};$

$$\mathbf{u} = \left[ \frac{I}{U_{\text{PbO}_2}} \right]$$

对式(3)和式(5)的域内剩余与权函数做内积,可得

$$\begin{aligned}
 & \int_0^{l_p} C_{\text{dl}} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \left( \sum_{m=1}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}_m(x) \dot{\phi}_m(t) \right) dx + \int_{l_p+l_n} C_{\text{dl}} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \left( \sum_{m=1}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}_m(x) \dot{\phi}_m(t) \right) dx - \int_0^{l_p} C_{\text{dl}} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \dot{\phi}_{\text{sp}} dx - \int_{l_p+l_n} C_{\text{dl}} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \dot{\phi}_{\text{sn}} dx = \\
 & - \int_0^{l_p+l_n} \boldsymbol{\kappa}_d^{\text{eff}} \boldsymbol{\Psi}'_n(x) \left( \sum_{m=0}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}'_m(x) c_m(t) \right) dx - \int_0^{l_p} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \tilde{U}_{\text{PbO}_2} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \left( \sum_{m=0}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}_m(x) c_m(t) \right) dx - \\
 & \int_0^{l_p+l_n} \boldsymbol{\kappa}^{\text{eff}} \boldsymbol{\Psi}'_n(x) \left( \sum_{m=1}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}'_m(x) \phi_m(t) \right) dx - \int_0^{l_p} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \left( \sum_{m=1}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}_m(x) \phi_m(t) \right) dx - \\
 & \int_{l_p+l_n} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \left( \sum_{m=1}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}_m(x) \phi_m(t) \right) dx + \int_0^{l_p} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \phi_{\text{sp}} dx + \int_{l_p+l_n} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \phi_{\text{sn}} dx - \int_0^{l_p} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \boldsymbol{\Psi}_n(x) \bar{U}_{\text{PbO}_2} dx
 \end{aligned} \tag{17}$$

将其转换为矩阵形式,即

$$\mathbf{M}_e \dot{\boldsymbol{\varphi}}_e + \mathbf{M}_s \dot{\boldsymbol{\varphi}}_s = \mathbf{K}_{\text{ec}} \mathbf{c} + \mathbf{K}_e \boldsymbol{\varphi}_e + \mathbf{K}_{\text{es}} \boldsymbol{\varphi}_s + \mathbf{B}_e \mathbf{u} \tag{18}$$

对式(6)的域内剩余与权函数做内积,可得

$$\begin{aligned}
 & - \int_0^{l_p} C_{\text{dl}} \dot{\phi}_{\text{sp}} dx + \int_0^{l_p} C_{\text{dl}} \left( \sum_{m=1}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}_m(x) \dot{\phi}_m(t) \right) dx = - \int_0^{l_p} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \tilde{U}_{\text{PbO}_2} \left( \sum_{m=1}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}_m(x) c_m(t) \right) dx - \int_0^{l_p} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \left( \sum_{m=1}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}_m(x) \phi_m(t) \right) dx + \\
 & \int_0^{l_p} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \phi_{\text{sp}} dx - \int_0^{l_p} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \bar{U}_{\text{PbO}_2} dx - \frac{I(t)}{A} - \int_{l_p+l_n} C_{\text{dl}} \dot{\phi}_{\text{sn}}(t) dx + \int_{l_p+l_n} C_{\text{dl}} \left( \sum_{m=1}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}_m(x) \dot{\phi}_m(t) \right) dx = \\
 & - \int_{l_p+l_n} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \left( \sum_{m=1}^{N-1} \boldsymbol{\Psi}_m(x) \phi_m(t) \right) dx + \int_{l_p+l_n} \frac{1}{R_{\text{ct}}} \phi_{\text{sn}} dx + \frac{I(t)}{A}
 \end{aligned} \tag{19}$$

将其转换为矩阵形式,即

$$\mathbf{M}_s \dot{\boldsymbol{\varphi}}_s + \mathbf{M}_{\text{se}} \dot{\boldsymbol{\varphi}}_e = \mathbf{K}_{\text{sc}} \mathbf{c} + \mathbf{K}_{\text{se}} \boldsymbol{\varphi}_e + \mathbf{K}_s \boldsymbol{\varphi}_s + \mathbf{B}_s \mathbf{u} \tag{20}$$

其中:  $\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_c & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_e & \mathbf{M}_{\text{es}} \\ 0 & \mathbf{M}_{\text{se}} & \mathbf{M}_s \end{bmatrix}, \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_c & \mathbf{K}_{\text{ce}} & \mathbf{K}_{\text{cs}} \\ \mathbf{K}_{\text{ec}} & \mathbf{K}_e & \mathbf{K}_{\text{es}} \\ \mathbf{K}_{\text{sc}} & \mathbf{K}_{\text{se}} & \mathbf{K}_s \end{bmatrix},$

将式(14)、式(16)、式(18)统一成状态空间方程的形式,即

$$\mathbf{M}_3 \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{M}_2 \mathbf{x} + \mathbf{M}_3 \mathbf{u} \tag{21}$$

$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_c \\ \mathbf{B}_e \\ \mathbf{B}_s \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{c} \\ \boldsymbol{\varphi}_e \\ \boldsymbol{\varphi}_s \end{bmatrix}$ 。将式(19)转换为标准形式,即可

得到铅酸电池机理模型的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (22)$$

其中:  $A=M_1^{-1}M_2, B=M_1^{-1}M_3, C=[0, \dots, 0, 1, -1], D=[0, 0]$ 。

### 3 简化模型的参数辨识和仿真验证

选取哈尔滨光宇电源有限公司的 GFMG-100 阀控式密封铅酸蓄电池对模型进行验证,其额定电压 2 V, C10 时率下放电容量 100 Ah, 采用 Neware 电池测试系统对其进行充放电实验。模型求解采用 5 阶伽辽金近似解,未知参数采用遗传算法进行辨识得到<sup>[13,14]</sup>,辨识工况为 DST 工况,目标函数为模型仿真端电压与实测值的均方根误差,即

$$ObjF = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - \hat{U}_i)^2} \quad (23)$$

式中:  $U_i$  为代入一组参数后模型输出端电压;  $\hat{U}_i$  为电池实测端电压数据;  $N$  为数据采样点个数。

仿真程序采用 MATLAB 语言编写,基于英国谢菲尔德大学开发的遗传算法工具箱实现,算法参数设置如表 1 所示,待辨识参数采用实值编码,最终确定的模型参数如表 2 所示,其中前半部分为已知参数,后半部分为待辨识参数。

根据辨识得到的参数,结合机理模型及其伽辽金近似解,对模型和参数进行实验验证。

在环境温度 20 °C 条件下,对电池进行 5 A 恒流放电,放电时间 15 min,仿真结果如图 3 所示。由图(a)可以看出,仿真电压和实测电压几乎一致。不同时刻的电解液浓度分布如图 3(b)所示,在放电过程中,正负极都会消耗酸,而隔膜处的酸液不会消耗,而是向正负极扩散,式(1)中正极的系数  $a$  和活性材料比表面积  $a_s$  较大,故而正极中酸的消耗速度要比负极快,这与文献[10]中数据保持一致。而电池内部的其他状态量如极化过电势、反应离子流密度、固液相电势等分布也分别可求。

对电池进行某一特定的动态工况实验,不同的

表 1 遗传算法相关参数设定

Tab.1 Setting of related parameters in genetic algorithm

种群规模	遗传代数	代沟	变异率	插入率
50	200	0.8	0.1	0.8

表 2 铅酸电池机理模型参数

Tab.2 Parameters in the mechanism model of lead-acid battery

符号	物理意义	取值
$R/(J/(\text{mol} \cdot \text{K}))$	普适气体常数	8.314 3
$F/(C/\text{mol})$	法拉第常数	96 485
$T/\text{K}$	温度	298.15
$t_+$	$\text{H}^+$ 的迁移数	0.72
$C_{\text{ref}}/(\text{mol}/\text{cm}^3)$	电解液参考浓度	$4.885 4 \times 10^{-3}$
$\gamma$	Butler-Volmer 方程指数	0.3/0
$\alpha_a$	阳极转移系数	1.15/1.55
$\alpha_c$	阴极转移系数	0.85/0.45
$A/\text{cm}^2$	电池单体横截面积	1 006.5
$l_p/\text{cm}$	正极极板厚度	0.171 2
$l_s/\text{cm}$	隔膜厚度	0.292 8
$l_n/\text{cm}$	负极极板厚度	0.192 8
$\varepsilon$	电解质的体积分数	0.416 6(正极) 0.652 0(隔膜) 0.355 5(负极)
$D_{\text{diff}}/(\text{cm}^2/\text{s})$	扩散系数	$1.818 2 \times 10^{-6}$ (正极) $6.593 6 \times 10^{-5}$ (隔膜) $4.036 7 \times 10^{-6}$ (负极)
$a_s/(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$	电极材料的比表面积	$6.856 9 \times 10^5$ (正极) $3.485 2 \times 10^4$ (负极)
$\kappa^{\text{eff}}/(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$	固相有效电导率	0.262 8(正极) 0.172 2(隔膜) 0.304 6(负极)
$\kappa_{\text{d}}^{\text{eff}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^2/\text{mol})$	有效扩散电解质电导率	0.003 7(正极) $8.916 6 \times 10^{-4}$ (隔膜) $2.688 4 \times 10^{-4}$ (负极)
$i_0/(\text{A}/\text{cm}^2)$	交换电流密度	$5.353 4 \times 10^{-7}$ (正极) $6.262 7 \times 10^{-6}$ (负极)
$C_{\text{dl}}/(\text{F}/\text{cm}^3)$	双电层电容	$6.906 4 \times 10^4$ (正极) $4.612 1 \times 10^3$ (负极)

放电倍率和时间交替,其验证工况和相应的端电压实测及仿真数据如图 4 所示,可以看出,端电压

的平均误差为 5.9 mV,相较于铅酸电池 2 V 的电压平台相对误差仅有 0.295%;在电流较大时,仿真误差相对较大,最大误差为 12.6 mV。分析原因是由于对电极动力学方程在过电势为零附近进行一阶泰勒展开所导致,在电流较大时线性化误差较大,从而端电压仿真误差较大。验证结果表明,提出的模型能够比较精确地仿真铅酸电池的端电压行为。

所设计的验证工况时间为 104 min,采样时间为 1 s,即共有 6 240 个点,仿真程序采用 MATLAB 语言编写,仿真环境为 Inter(R) Core(TM) i3 CPU 530 @ 2.93GHz and 2G RAM,仿真时间为 116.895 ms,这对于铅酸电池机理模型用于在线仿真提供了一定的可能性。

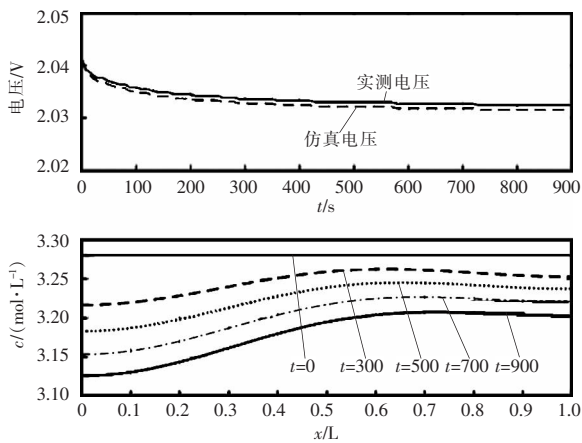


图 3 恒流放电工况下模型的仿真结果

Fig.3 Simulation results of the model under the operation condition of constant current discharge

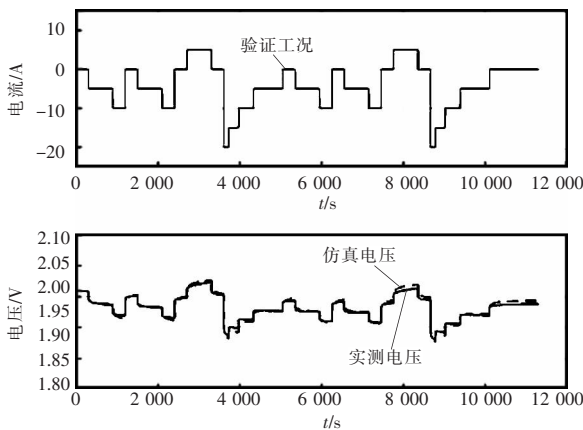


图 4 动态验证工况下电池模型的仿真结果

Fig.4 Simulation results of the model under operation condition of dynamic verification

## 4 结语

本文通过对铅酸电池机理模型的电极动力学过程和开路电势进行近似,忽略固相电势在正负极区域的分布,提出了一种简化的铅酸电池机理模型,同时采用伽辽金法并选取余弦函数作为试函数进行求解。经实验验证,模型能够较好地模拟电池的端电压行为,动态工况下其平均相对误差仅为 0.295%。模型具有较快的求解速度,这为机理模型应用于电池管理系统的在线仿真提供了一定的可能性,可以考虑将其应用于电动车的嵌入式系统中。相较于等效电路模型,机理模型内部参数具有明确的物理意义,后续的工作可以针对铅酸电池不同老化状态下的模型参数,结合老化机理选取表征电池健康状态的特征量,然后基于粒子滤波、支持向量机等算法对电池的健康退化趋势进行判断和预测。对于变电站和通讯基站的备用铅酸电池组而言,相较于传统的核对性充放电和内阻测量,该方法具有对电池损害小和检测时间短的特点,不失为铅酸电池健康状态评估的一种全新解决思路。

## 参考文献:

- [1] 张彦琴,郭凯,刘汉雨. 铅酸电池模型及参数辨识研究[J]. 蓄电池, 2013, 50 (3): 140-144.  
Zhang Yanqin, Guo Kai, Liu Hanyu. Research on equivalent model and its parameters identification of lead-acid batteries[J]. Chinesees Labat Man, 2013, 50 (3): 140-144 (in Chinese).
- [2] Chen Min, Rincon-Mora G A. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and IV performance[J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2006, 21 (2): 504-511.
- [3] Yuan Yuan, Sun Chengchen, Li Mengting, et al. Determination of optimal supercapacitor-lead-acid battery energy storage capacity for smoothing wind power using empirical mode decomposition and neural network[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 127: 323-331.
- [4] Newman J, Tiedemann W. Porous - electrode theory with

- battery applications[J]. AICHE Journal, 1975, 21(1): 25-41.
- [5] Hu Y, Yurkovich S, Guezennec Y, et al. Electro-thermal battery model identification for automotive applications[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(1): 449-457.
- [6] Esfahanian V, Ansari A B, Torabi F. Simulation of lead-acid battery using model order reduction[J]. Journal of Power Sources, 2015, 279: 294-305.
- [7] Gu W B, Wang C Y, Liaw B Y. Numerical modeling of coupled electrochemical and transport processes in lead-acid batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1997, 144(6): 2053-2061.
- [8] Rahn C D, Wang Chaoyang. Battery systems engineering [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [9] Gu W B, Wang G Q, Wang C Y. Modeling the overcharge process of VRLA batteries[J]. Journal of Power Sources, 2002, 108(1): 174-184.
- [10] Cugnet M, Laruelle S, Grugeon S, et al. A mathematical model for the simulation of new and aged automotive lead-acid batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2009, 156(12): A974-A985.
- [11] 老大中. 变分法基础[M]. 2版. 北京:国防工业出版社, 2007.
- [12] Shi Ying, Prasad G, Shen Zheng, et al. Discretization methods for battery systems modeling[C]//American Control Conference (ACC), 2011. San Francisco, CA, USA, 2011: 356-361.
- [13] Zhang Liqiang, Wang Lixin, Hinds G, et al. Multi-objective optimization of lithium-ion battery model using genetic algorithm approach[J]. Journal of Power Sources, 2014, 270(3): 367-378.
- [14] Blaifi S, Moulahoum S, Colak I, et al. An enhanced dynamic model of battery using genetic algorithm suitable for photovoltaic applications[J]. Applied Energy, 2016, 169: 888-898.



吕超

## 作者简介:

吕超(1978-),男,中国电源学会会员,通信作者,博士,副教授,研究方向:系统故障预测与健康管管理, E-mail:lu\_chao@hit.edu.cn。

葛腾飞(1992-),男,硕士,研究方向:电池建模与管理, E-mail:wufazhuce101@163.com。

丛巍(1991-),男,硕士,研究方向:电池阻抗谱, E-mail:773721730@qq.com。

于洪海(1978-),男,高级工程师,研究方向:电力系统运行与检修, E-mail:95611@qq.com。

赖庆智(1990-),男,硕士,研究方向:电池管理系统, E-mail:952079678@qq.com。

(上接第123页)

- [6] 王挺, 汤雨, 何耀华, 等. 多单元开关电感/开关电容有源网络变换器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6):832-838.  
Wang Ting, Tang Yu, He Yaohua, et al. Multicell switched-inductor/switched-capacitor active-network converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6):832-838(in Chinese)
- [7] 张士宇, 许建平, 杨平. 新型单开关高增益 boost 变换器研究[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(3):12-15.  
Zhang Shiyu, Xu Jianping, Yang Ping. Research on a new single-switch high gain Boost converter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(3): 12-15(in Chinese).



马智文

## 作者简介:

马智文(1992-),女,硕士研究生,研究方向:电力电子拓扑和控制研究, E-mail:120898376@qq.com。

曾怡达(1973-),男,博士,副教授,研究方向:功率开关变换器、软开关技术和电力系统信号分析, E-mail:hsqwenster@126.com。

杨辉金(1990-),男,硕士研究生,研究方向:电力电子拓扑和控制研究, E-mail:407251545@qq.com。