

# 嵌入式系统功耗优化电池模型

吴琦, 熊光泽

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

**【摘要】**以锂电池为例,利用广义随机Petri网(GSPN)描述化学电池放电的极化和活性物质扩散过程,提出可同时反映化学电池电流相关和自恢复特性的高层抽象模型。该模型简单,仅包括反映活性物质分布、活性物质扩散速度和极化速度的四个简单的参数。恒流放电和脉冲放电实验显示该电池模型可以快速准确估算化学电池容量。

**关键词** 电池模型; 广义随机Petri网; 嵌入式; 功耗设计; 非理想电池  
中图分类号 TP316; TP311 文献标识码 A

## A GSPN Battery Model for Embedded System Energy Optimization

WU Qi, XIONG Guang-ze

(School of Computer Science and Engineering, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

**Abstract** Energy is the main constraint of embedded system design. In this paper, the General Stochastic Petri Net (GSPN) is used to describe the processes of electrochemical polarization and active substances diffusion in Li-ion batteries. A abstract high-level non-real battery model is presented which accurately characterized the rate-dependent and recovery feature of Li-ion batteries. The model simply adopts four easy-obtained parameters. Constant current discharge and pulse discharge experiment demonstrate that the lifetime of chemical battery could be fast and accurately estimated with this battery model.

**Key words** battery model; general. stochastic petri net; embedded system; energy optimization; non-real battery

感功计算(Power Aware Computing, PAC)是研究嵌入式系统功耗性能的新兴技术,它依靠动态电压调整、任务和设备调度等技术优化系统能量消耗。目前PAC往往以降低嵌入式系统总功率为优化目标。对于电池驱动的嵌入式系统(如手持移动设备)而言,这隐含着电池容量为常数的假设,也称为理想电池假设。化学电池是一个复杂的电化学系统,释放出来的实际容量与放电电流和工作温度诸多因素有关,具有电流相关性<sup>[1]</sup>和自恢复性<sup>[2]</sup>。PAC技术的研究需要相应的化学电池模型,能够描述电池放电过程的相关特性,快速估计非恒流放电情形下的电池寿命。

目前的化学电池模型大体分以下四类:经验模型、电化学模型、电路模型和抽象模型。经验模型是用经验常数和物理公式来描述化学电池放电特性。最先提出的是Peukert模型<sup>[3]</sup>,用公式 $C = TI^\alpha$ 描述电池容量 $C$ 、放电电流 $I$ 和工作时间 $T$ 之间的关

系,其中经验参数 $\alpha$ 反映电池的电流相关性,当 $\alpha = 1$ 时该公式就是描述理想电池的放电规律。后来有文献[4]提出电池效率因子 $\mu = f(I)$ 模型,文献[5]提出的Weibull失效模型。经验模型基于实验经验利用公式描述电流相关性,简单易用,但计算结果精度差,适用于粗糙的电池容量估计。与经验模型相反,电化学模型从电池放电机理出发描述电池放电规律。文献[1]提出等温电化学模型,利用溶解理论建立微分方程组,可求解电池内部离子浓度、电流密度和温度分布等精确的详细信息。但该模型需要大量有关结构和材料特征参数,方程求解复杂且耗时长,一般仅用于化学电池的设计优化。文献[6]对此进行了简化,仅考虑活性物质一维扩散过程,得到电池容量与放电电流的依赖关系,并将这一结果应用于嵌入式系统功耗优化算法研究,但该模型没有考虑放电过程的极化效应。电路模型是建立化学电池的等效电路,如文献[7]的PSpice模型、文献[8]

收稿日期:2005-07-21

基金项目:国家836计划资助项目(2003AA1Z2210)

作者简介:吴琦(1969-),男,博士,主要从事嵌入式实时系统的功耗管理技术方面的研究;熊光泽(1938-),男,教授,博士生导师,主要从事嵌入式实时系统技术方面的研究。

的网路模型、文献[9]的VHDL模型。电路模型可通过电路参数描述电池的电流相关性，但无法描述自恢复性，不能用于变化电流放电时的电池仿真。抽象模型借助抽象的数学模型工具描述电池的自恢复性和电流相关特性。文献[10]的Markov过程模型，用于研究网络通讯设备的功耗优化。该模型由于Markov性限制，假设电池容量始终可以完全恢复，因此不能描述化学电池放电过程活性物质的消耗。

本文以锂电池为例，基于锂电池放电的主要控制过程，提出可同时描述锂电池电流相关和自恢复特性的高层抽象模型。

## 1 电池模型

### 1.1 锂电池

锂电池具有高容量、高能量密度、无污染和循环寿命长等优点，成为移动通讯、便携式设备、空间系统等的常用能源。电池内部金属锂在电极表面放电将化学能转化为电池正负极两端的电能。随着放电进行，电极表面锂原子被逐渐消耗，当锂电池浓度低于一定值，电池不能继续使用，这时称放电完成。锂电池放电主要受锂原子在电极材料中的扩散和在电解质中的迁移过程的控制<sup>[11]</sup>，电极材料中扩散速度影响电池提供活性物质的总量，电解质中迁移速度决定放电过程浓差极化程度和电池能量的内部消耗。

### 1.2 模型描述

将锂电池简化为由平行相对的正极和负极构成，其间均匀充满电解质，如图1所示。图中锂电池放电过程：负极内的锂原子向反应界面均匀扩散，锂原子在电极表面均匀放电，放电产生的锂离子在电解质中均匀地向正极迁移，锂离子到达正极表面嵌入电极内部。

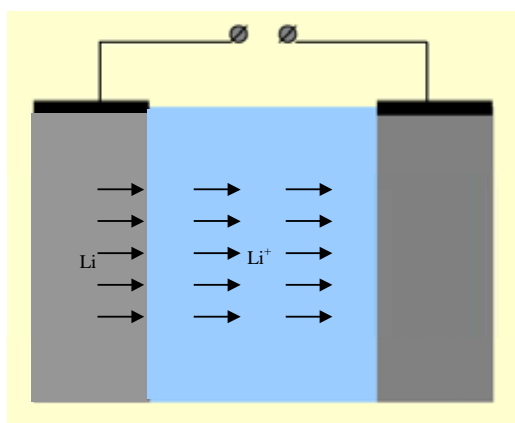


图1 锂电池结构简图

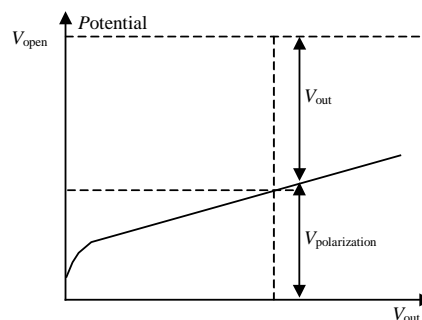


图2 电池放电极化曲线

电池开路时两极间电压称为开路电压  $V_{open}$ ， $V_{open}$  随电池放电程度变化。放电时两极间电压称为输出电压  $V_{out}$ ，由于电池的极化作用， $V_{out}$  总小于  $V_{open}$ 。定义极化指数  $p \triangleq V_{out}/V_{open}$  描述电池极化程度，它也描述活性物质消耗和输出功率之间的比例关系。当恒流放电时，电池内部的物质传输和反应速度达到平衡， $V_{out}$  相对稳定，这时参数  $p = P_i(I)$  称为电流  $I$  的平衡极化指数。电池放电极化曲线如图2所示。

图3中  $P_{IN}$  为活性物质在电极内部； $M_{IN}$  表示电极内部活性物质能释放的能量； $P_{SU}$  表示活性物质在反应界面层； $M_{SU}$  表示反应界面层活性物质能释放的能量； $P_{DIS}$  表示活性物质放电完成； $P_{Qi}$  表示放电请求功率为  $Q_i$ ； $P_{Fi}$  表示放电请求得到满足； $P_Q$  表示放电请求产生子系统； $P_{Pk}$ 、 $P_{Pi}$  表示电池放电极化指数为  $P_k$ 、 $P_i$ ； $T_{IN}$  表示活性物质由电极内部向反应界面层扩散； $T_{SU}$  表示活性物质由反应界面层向电极内部扩散； $T_{Dik}$  表示电池放电； $T_{ARi}$  表示放电请求到达； $T_{Fi}$  表示放电请求完成； $i = 0, 1, \dots, N$ ； $k, l = 0, 1, \dots, M$ 。

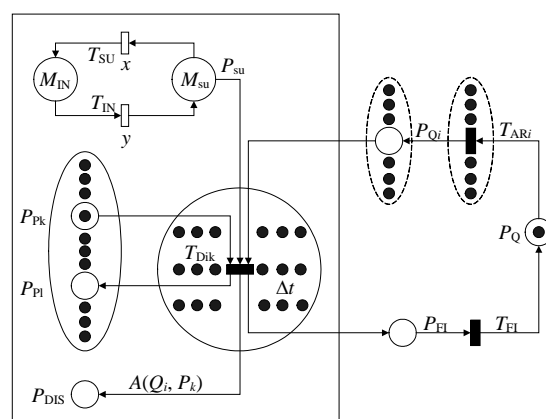


图3 广义随机Petri网

将电池放电极化指数离散分为  $N + 1$  个等级，由小到大表示为  $P_0, P_1, \dots, P_N$ ；将放电请求按功率大小离散分为  $M + 1$  个等级，由小到大表示为

$Q_0, Q_1, \dots, Q_M$ ; 将电池放电过程分割为长度为  $\Delta t$  的时间片, 假设每个时间片内极化指数和放电请求恒定。以上简化电池可以用图3所示广义随机Petri网(GSPN)系统描述, 主要变迁有指数变迁  $T_{IN}$ , 它代表活性物质由电极内部向反应界面层扩散; 数变迁  $T_{SU}$  指活性物质由反应界面层向电极内部扩散; 瞬时变迁  $T_{AR}$  指功率为  $Q_i$  的放电请求到达, 变迁的触发由放电请求发生子系统控制; 时间为  $\Delta t$  定时变迁  $T_{Dik}$  指当电池极化等级为  $P_k$  时, 有功率为  $Q_i$  的放电请求到达, 活性物质实现放电释放  $A(Q_i, P_k)$  电能, 电池极化程度也由  $P_k$  变为  $P_1 = P(Q_i, P_k)$ 。初始时  $P_{IN}$  和  $P_{SU}$  分别拥有令牌  $M_{IN0}$  和  $M_{SU0}$ ,  $P_Q$  和  $P_{P0}$  各拥有一个令牌。

根据以上GSPN电池模型, 第 $n$ 时间片开始时刻电池状态可用三元组  $\{IN_n, SU_n, PO_n\} (n=1, 2, \dots)$  表示,  $IN_n$ 、 $SU_n$ 、 $PO_n$  分别表示第 $n$ 时间片开始时电极内部活性物质剩余能量、反应界面层活性物质剩余能量和电池极化程度。设第 $n$ 时间片放电请求功率为  $WA_n$ , 电池状态转变规律为:

$$\begin{pmatrix} IN_{n+1} \\ SU_{n+1} \\ PO_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-\lambda(\Delta t))IN_n + \mu(\Delta t)SU_n \\ (1-\mu(\Delta t))SU_n + \lambda(\Delta t)IN_n - A(WA_n, PO_n) \\ P(WA_n, PO_n) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} IN_1 \\ SU_1 \\ PO_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{IN0} \\ M_{SU0} \\ P_N \end{pmatrix}$$

式中  $A(WA_n, PO_n) = WA_n \Delta t / PO_n$ ;

$P(WA_n, PO_n) = \lceil PO_n + \alpha(\Delta t) \{P_W(WA_n) - PO_n\} \rceil$ ;

$P_W(WA_n) = P_l(WA_n / PO_n V_{open} ((IN_n + SU_n) / (IN_1 + SU_1)))$ ;

$\lambda(\Delta t)$  为  $\Delta t$  时间内活性物质由电极内部向反应界面层扩散比例;  $\mu(\Delta t)$  为  $\Delta t$  时间内活性物质由反应界面层向电极内部扩散比例;  $\alpha(\Delta t)$  为  $\Delta t$  时间内极化形成比例;  $\lceil \cdot \rceil$  为相对于极化指数等级取整运算, 当

$P_l \lceil PO_n \rceil < P_{l+1}$ , 则  $\lceil PO_n \rceil = P_l$ 。

### 1.3 参数确定

电池特性参数受许多因素影响, 如制造工艺、工作温度和放电电流等, 准确测量或估计困难且耗时。嵌入式系统中, 电池放电电流及其变化范围相对较小, 工作温度主要受环境控制, 放电对温度影响微弱。因此本文假设电池工作于恒温环境, 特性参数与放电电流和放电程度无关。

$M_{IN0}$  和  $M_{SU0}$  反映电池内部活性物质的分布。当采用小电流放电时, 具有充分的扩散时间, 这时可假设电极内部全部活性物质参加放电; 当采用大电

流放电时, 因固相中扩散速度相对较小, 这时可假设仅反应界面层内活性物质参加放电。因此通过测量两种情况可以计算  $M_{IN0}$  和  $M_{SU0}$ 。

$\alpha(\Delta t)$  反映电池极化和去极化的动态特性, 可以查阅电池数据或测量脉冲放电的输出电压变化曲线获得。

$\lambda(\Delta t)$  和  $\mu(\Delta t)$  反映活性物质在电极内部的扩散速度。在电池放电之前, 两个方向的扩散速度达到平衡, 即存在关系  $\lambda(\Delta t) = \mu(\Delta t) M_{SU0} / M_{IN0}$ 。通过查阅或测量电池恒流放电曲线可获得  $\mu(\Delta t)$ 。

## 2 实验

为验证以上模型, 本文以PowerStream H083448锂电池为例, 在室温下进行了恒流放电和脉冲放电实验,  $\Delta t = 0.05$  s, 放电截止电压3.0 V。模型仿真数据采用Matlab计算。

### 2.1 参数测量

为消除放电程度等因素对模型参数的影响, 本文通过恒流放电实验测得不同放电电流下的电池容量数据, 然后通过仿真计算获得实验数据和计算数据取最小方差时的模型参数  $M_{IN0}$ 、 $M_{SU0}$  和  $\mu(\Delta t)$ 。由于  $\alpha(\Delta t)$  反映电池极化和去极化的动态特性, 恒流放电实验无法测量, 本文采用脉冲放电时电压时间曲线来计算  $\alpha(\Delta t)$ 。具体模型参数为:  $M_{IN0} = 894$  mAh、 $M_{SU0} = 361$  mAh、 $\alpha(\Delta t) = 53\%$ 、 $\mu(\Delta t) = 0.013\%$ 。

### 2.2 恒流放电

本文分别进行了300、600、900、1 200、1 800、2 400 mA恒流放电实验, 实验发现锂电池具有明显的极化现象, 在相同放电状态下电池输出电压随放电电流增加而减小。表1列出了恒流放电的电池实际放电容量。由表中数据可以发现电池实际容量与放电电流有关, 放电电流增大, 电池容量减少。模型计算数据表明本文提出的电池模型可以很好描述锂电池的这一特性, 可以用于恒流放电时的电池容量估算。

### 2.3 脉冲放电

本文分别进行了600、1 200、1 800 mA脉冲放电试验, 采用两种频率: 0.01 Hz和1 Hz, 占空比为50%。观察脉冲放电时电压变化曲线可以发现电池极化和去极化的形成都具有一个过程。比较表1和表2可以发现脉冲放电比恒流放电电池实际容量有不同程度提高。对于高频脉冲放电, 电池实际容量的增加可能与电池极化与去极化作用有关, 电池放电过程主要在低于平衡极化的阶段进行。对于低频脉

冲放电, 电池实际容量的增加可能与电池活性物质迁移有关, 电池放电后的一段开路时间使电极内部活性物质得以向电极表面迁移, 体现为电池的自恢

复特性。模型计算数据表明本文提出的电池模型在非恒定电流放电时也可以准确估算电池实际容量。

表1 恒流放电电池实际容量实测和计算结果

放电电流/mA	300	600	900	1 200	1 800	2 400
实测数据/mA·h	1 235	1 199	1 151	1 104	1 020	878
计算数据/mA·h	1 218	1 187	1 169	1 091	1 037	903
计算偏差/(%)	1.4	1.0	1.6	0.8	1.7	2.8

表2 脉冲放电电池实际容量实测和计算结果

放电电流/mA	600		1 200		1 800	
频率/Hz	0.01	1	0.01	1	0.01	1
实测数据/mA·h	1 224	1 230	1 141	1 135	937	906
计算数据/mA·h	1 214	1 215	1 159	1 138	954	928
计算偏差/(%)	0.8	1.2	1.6	0.3	1.8	2.4

### 3 结 论

嵌入式系统功耗优化和管理主要体现为对放电电流的控制, 因此它要求电池模型能够反映放电电流, 特别是放电电流的变化, 对化学电池容量的影响。本文提出的GSPN非理想电池模型, 主要描述化学电池放电的极化和活性物质扩散过程, 可以同时反映化学电池与放电电流相关的两大特性: 电流相关性和自恢复性, 而且模型简单, 仅包括反映活性物质分布、活性物质扩散速度和极化速度的是四个简单易得的参数, 可以满足嵌入式系统功耗优化和管理的要求。

#### 参 考 文 献

- [1] DOYLE M, FULLER T F, NEWMAN J S. Modeling of galvanostatic charge and discharge of lithium/polymer/insertion cell[J]. *J Electrochem Soc*, 1993, 140: 1526-1533.
- [2] FULLER T F, DOYLE M, NEWMAN J S. Relaxation phenomena in lithium-ion insertion cells[J]. *J Electrochem Soc*, 1994, 141: 982-990.
- [3] LINDEN D, Reddy T. *Handbook of batteries*[M]. 2nd ed. McGraw-Hill, New York, USA: 1995.
- [4] PEDRAM M, WU Q. Design considerations for battery-powered electronics[C]// Proc. 36th ACM/ IEEE Design Automation Conf., NY, USA: Wilson Greatbatch Ltd, 1999.
- [5] SYRACUSE K C, CLARK W D K. A statistical approach to domain performance modeling for oxyhalide primary lithium batteries[C]//12th Annual Long Beach, CA, USA: IEEE PRESS, 1997.
- [6] RAKHMATOV D, VRUDHULA S, WALLACH D A. A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer[J]. *Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, IEEE Transactions, 2003. 11(6): 1019-1030.
- [7] GOLD S. A PSPICE macromodel for lithium-ion batteries[C]//12th Annual Battery Conference on Applications and Advances, Long Beach, CA, USA: IEEE Press, 1997.
- [8] BERGVELD H J, KRUIJT W S, NOTTEN P H L. Electronic-network modeling of rechargeable NiCd cells and its application to the design of battery management systems[J]. *J Power Sources*, 1999, 77(2): 143-158.
- [9] BENINI L, CASTELLI G, MACII A, et al. Discrete-time battery models for system-level low-power design[J]. *IEEE Trans VLSI Systems*, 2001, 9(5): 630-640.
- [10] CHIASSERINI C F, RAO R R. Improving battery performance by using traffic shaping techniques[J]. *IEEE J on Selected Areas of Communications*, 2001, 19(7): 1385-1394.
- [11] 唐致远, 薛建军, 李建刚, 等. 锂离子电池多孔嵌入电极的放电过程机理[J]. *化学通报*, 2001, 64: 5.

编 辑 刘文珍