

基于离散随机电池模型的功率管理策略

齐咏生, 方滨

(北京工业大学 电子信息和控制工程学院, 北京 100022)

摘要: 依据离散马尔可夫电池模型理论, 模拟出跟踪电池基本行为的离散过程, 仿真结果显示模拟过程与理论推导相吻合. 基于电池的放电模拟过程, 分析了恢复效应对电池寿命和释放能量的影响, 得出在脉冲式放电的情况下可大幅度延长电池使用寿命的结论. 在此基础上总结并提出了几种电池的功率管理策略, 通过仿真比较了每种优化策略的优势与不足. 进而针对不同系统的性能要求, 给出了电池功率管理策略的备选方案.

关键词: 电池模型; 功率管理; 脉冲放电

中图分类号: TP15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2006)01 - 0046 - 06

Battery Power Management Strategy Based on Discrete Stochastic Battery Model

Q I Yong-sheng, FANG Bin

(Electronic Information and Control Engineering School, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Based on the theory of the discrete - Markov battery model, the fundamental behavior of the battery is simulated. The result shows that the simulated process is consistent with the deduction. Based on this, the effect of the battery recovery on the battery lifetime and power supply is analyzed. The conclusion is that battery lifetime can be greatly extended by means of pulsed discharge. Then several power management strategies of battery are put forward and their advantages and disadvantages are analyzed according to diverse applications.

Key words: battery model; power management; pulsed discharge

0 引言

许多便携式设备、无线通讯设备常常依赖于电池来供电. 显而易见, 对于这些设备总是希望电池拥有以下特征: 寿命长、重量轻、尺寸小. 然而由于电池工艺的瓶颈, 即在处理器功率消耗的快速增长和相应电池容量的提高之间存在“电池沟 (battery gap) 现象^[1], 因而针对电池寿命的电池功率管理已成为系统设计中必不可少的问题.

在文献 [2][3][6] 中, 当使用脉冲电流代替恒定电流放电时, 电池的使用寿命会显著延长, 因为在电池放电空闲期发生了电池恢复效应. 在文献 [4~6] 中, 作者把电池行为描述为一个离散马尔可夫过程, 通过对这一过程的概率推导和公式计算建立了电池随机离散数学模型, 并验证了电池模型的正确性. 特别在 [5] 中作者将马尔可夫模型和业界公认的电化学模型做了比较, 结果显示由两个模型在同样的条件下获得的放电曲线基本重合, 从而更加有力地证明了马尔可夫模型的正确性. 然而, 这种模型推导过程很复杂、计算量大、运算时间长, 同时它不能直观地反映出电池放电的中间变化过程. 为此, 本文依据这种马尔可夫电池模型理论, 提出了一种模拟电池基本行为并跟踪其放电全过程的随机模型. 也就是说, 描述每一个单位时间 (slot) 里电池的基本行为, 通过大量这样的基本行为的叠加来表征电池的整个放电过程. 相比之

收稿日期: 2005 - 01 - 11.

第一作者简介: 齐咏生 (1975. 12 ~), 男, 硕士研究生. 主要研究方向: 模式识别与智能控制.

E - mail: qiyongsheng1219@sohu.com

下, 本文所建立的模型更为简单、直观, 而且从中捕捉到了电池恢复效应的发生. 通过与文献 [4~6] 所给出概率模型所获得曲线进行比较, 验证了本文模拟电池行为过程的正确性. 仿真结果清晰地显示了整个放电过程恢复效应的发生, 以及在脉冲式放电下电池实际提供容量的提高.

依据对电池放电的这种行为描述过程, 本文探讨了几种电池的功率管理的优化策略. 根据任务的延迟性, 将电池功率管理的优化策略分为两类: 一类是有延迟优化; 一类是无延迟优化. 对于有延迟优化策略, 如在 [4][6] 中, 作者曾提出在无线移动设备中, 使用队列理论方法作为电池功率管理的策略并称之为 leaky bucket 算法, 这种算法能够使电池提供的容量达到理论容量, 但付出的代价大大增加了能量供给的延迟, 降低了系统的性能. 为此, 本文提出了一种折衷的算法, 以平衡二者关系, 使系统性能得到了一定的提升. 针对那些对延迟有严格限制的系统, 本文也提出了一种阈值 + timeout 的算法, 这种算法限定了能量供给的最大延迟. 对于无延迟优化策略, 主要是采用双电池或多电池供电, 通过电池间的切换使电池的恢复效应发生. 本文给出几种双电池调度优化策略^[5,7,8], 比较了它们的优势与不足.

1 电池行为的模拟

如图 1, 电池的放电行为用一个离散马尔可夫过程^[4~6]来描述, 在这个随机过程中, 整个时间被分为一系列相等的间隔 (slot), 电池的状态被抽象为所剩电荷单元数量. 每个满电荷电池 ($V = V_{oc}$) 都有一个标称容量 N (即电池在恒流放电情况下, 从状态 N 到状态 0 , 共消耗 N 个电荷单元) 和一个理论容量 T (即电池所能提供的最大能量 T 个电荷单元), 实际电池所能提供的容量总是介于二者之间.

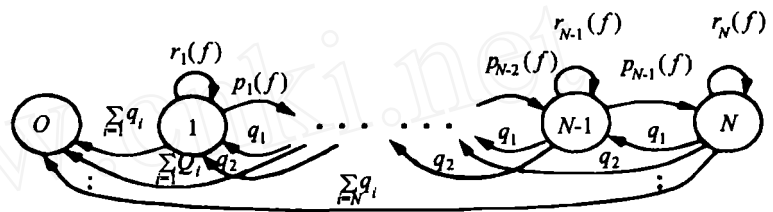


图1 描述电池行为的随机过程

Fig.1 Stochastic process representing the battery behavior

1.1 电池的基本行为描述

在每个时间间隔 (slot) 内, 电池必然发生如下三种行为之一:

1) 放电行为. 放电请求发生的概率为 q_i ($i > 0$), i 表示请求所需要的电荷单元数, 当请求被服务后 (假定每个放电请求服务的时间均为 1 个 slot) 则电荷的状态从 z 转移到了 $z - i$ ($0 < z - i < N$), 若 $z - i < 0$ 则到达 0 状态.

2) 恢复行为. 如果这个时间间隔是一个空闲期 (也就是说无电流消耗), 那么电池将以一定的概率恢复一个电荷单元 (由于电池的扩散效应^[11]), 而这个恢复概率是按照一个递减的指数函数来进行的. 由于随着电池所剩电荷数量的减少, 电池恢复能力会显著下降, 因而根据电池的恢复能力将整个放电过程分为不同的阶段 f 每个阶段 f ($f = 0, \dots, f_{max}$) 开始于电池刚好消耗了 d_f 个电荷单元, 结束于电池的电荷刚好消耗 d_{f+1} 个电荷单元. 在一个空闲时间间隔 (slot) 里, 电池处于状态 j 和阶段 f 下, 恢复一个电荷单元的概率如 (1) 式:

$$P_j(f) = \begin{cases} a_0 e^{-g_N(N-j-g_c(f))} & j = 1, L, N - 1; f = 0 \\ a_0 e^{-g_N(N-j-g_c(f))d_f} & j = 1, L, N - 1; f = 1, L, f_{max} \end{cases} \quad (1)$$

这里 a_0 为在这个间隔 slot 内无放电请求的概率, 如 (2) 式:

$$a_0 = 1 - \sum_{i=1}^N q_i \quad (2)$$

g_N 和 g_c 是依赖于电池恢复容量的参数. 特别地, 一个较小的 g_N 表示电池有一个较高的传导率, 反之表示电池有一个较高的内阻, 即电池有一个很陡的放电曲线. g_c 的值与放电过程中电池的电压降有关, 因而与放电电流有关. 我们假定 g_N 是一个常数, 而 g_c 是一个分段常值函数^[4], 是电池已经消耗的电荷数量的函数, 它的值与 d_f 相一致.

3) 保持行为. 在这个空闲时间间隔里, 电池仍保持原来的状态, 不发生恢复效应. 保持原来状态的概

率如 (3) 式:

$$\begin{cases} r_j(f) = a_0 - p_j(f) & j = 1, L, N - 1 \\ r_N(f) = a_0 \end{cases} \quad (3)$$

在整个放电过程中, 电池经过一系列状态转移从初始满电荷的状态 N 最终到达下面两个状态之一: (1) 0 状态即截止电压的状态; (2) 理论容量 T 被全部消耗掉的状态 (可能并不是 0 状态), 此时认为电池放电完毕.

根据以上描述, 本文模拟电池在每个时间间隔 (slot) 中的基本行为, 并将这些基本行为叠加, 最终获得了电池放电的全过程. 考虑放电请求是分别按照贝努里 (Bernoulli) 和泊松 (poisson) 过程到达的: (1) 贝努里过程如图 2(a), 贝努里参数为 q (平均请求到达比率), 则 $q_i = q, a_0 = 1 - q$ 图 2(a) 是 $T = 100, N = 25$. 基于不同 q 值的电池放电过程曲线, $q = 0.3$ 时, 实际放电达到理论容量 $T, q = 0.6$ 时, 实际放电 54 个电荷单元; (2) 泊松过程如图 2(b), 泊松过程参数为 q (平均请求到达比率), 则 $q_i = \frac{q \cdot e^{-q}}{i!}$. 图 2(b) 是 $T = 100, N = 25$ 基于不同的 q 值的电池放电过程曲线, $q = 0.3$ 时, 实际放电达到理论容量 $T, q = 0.6$ 时, 实际放电 68 个电荷单元. 显然由于恢复效应的存在, 在脉冲式放电的情况下, 电池提供容量大大超过了标称容量 N , 而标称容量正是在恒流放电下电池所提供的容量.

1.2 电池模型的确认

图 3(a)、(b) 为根据文献 [4][6] 中的概率公式推导的在不同 q 值下电池所释放的能量比率 G_d 与本文在相同条件下模拟电池行为过程并求其 500 次平均值得到的电池能量比率 G_d 的对比图, 其中 G_d 表示实际放电容量与理论容量 T 的比值. 从图中可看出, 两条曲线基本吻合. 证明了本文模拟电池的基本行为过程与文献中理论推导的离散马尔可夫模型是相一致的, 从而间接地证明了模拟电池行为过程的正确性.

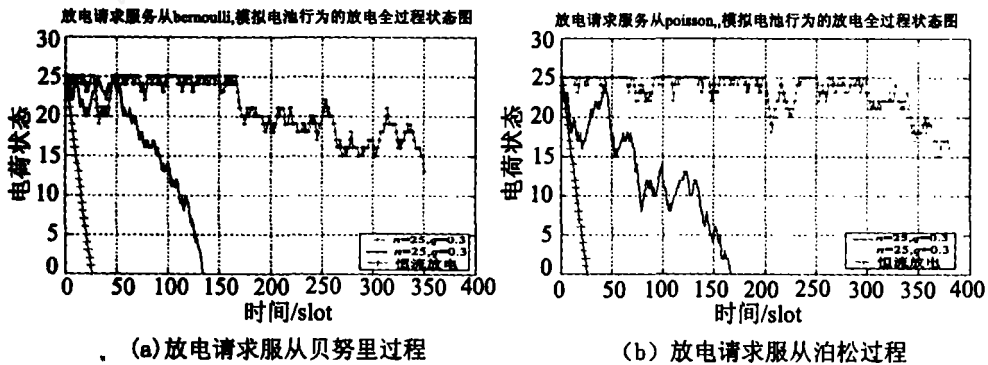


图2 模拟电池放电全过程状态图
Fig.2 Overall state diagram of simulation battery discharge

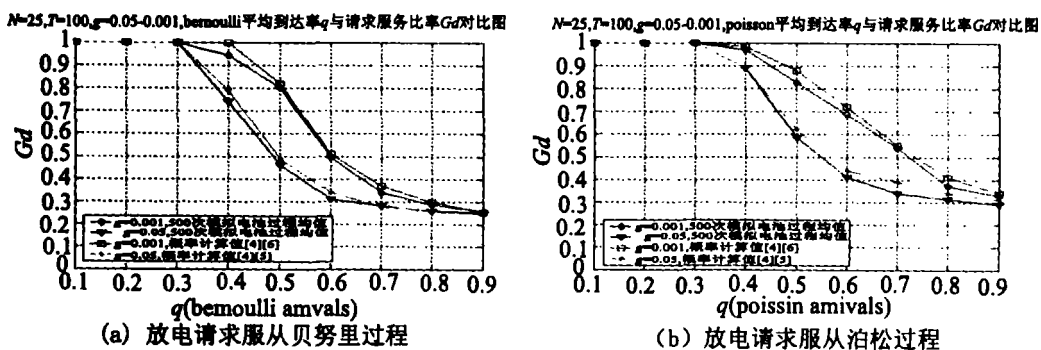


图3 电池放电行为的概率推导和模拟过程对比图
Fig.3 Contrast of deduction and simulation of discharge behavior of battery

2 电池的优化策略

根据任务的延迟性, 电池的优化策略可分为两类: 一类是有延迟优化通常是考虑单电池供电情况, 为了使电池的恢复效应发生从而使电池提供的能量尽可能接近于它的理论容量, 因而采用电池管理策略尽量使电池工作在脉冲式放电的情况下, 然而当放电请求到达率很高时, 就必然会导致延迟的发生; 另一类是无延迟优化通常考虑双电池或多电池供电的情况, 通过电池间的切换来使电池实现脉冲式放电。

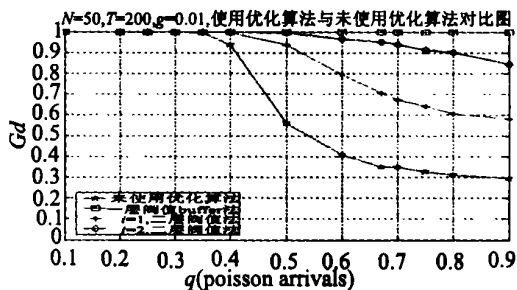
2.1 有延迟优化

leaky bucket 算法^{[4][6]}对于有延迟但提供能量最大的优化策略, 考虑如下的算法, 便携式设备通常都有一个缓存 (buffer) 用来存放服务请求, 无论何时当电池的电荷状态下降到一个事先设定的阈值 B 时, 则中断电池放电过程, 将放电请求放入缓存 (buffer) 队列中, 从而使电池的恢复效应发生 (假设在每个空闲时间间隔 (sbt) 里, 电池以一定概率恢复一个电荷单元)。当恢复了一个电荷单元而此时队列不空, 则队列中最先放入的请求将被服务。无论何时只要队列不空, 电荷的状态最多只能恢复到 $B + 1$ 。仿真结果如图 4 所示, 从图中可看出, 电池在任何放电请求到达率下都能提供最大容量 T , 然而随着到达率的增加, 放电请求平均延迟也越来越大, 使系统性能急剧下降 (图中阈值 $B = 40$)。我们以两个指标来衡量系统的性能: 吞吐量 (throughput): 在放电过程中实际消耗的电荷单元数量与整个放电持续时间的比率。平均延迟: 从放电请求到达被放入 buffer 开始到请求被服务为止的平均延迟时间。

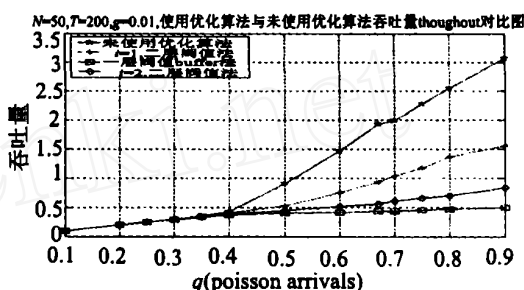
2.1.1 改进算法

针对包的到达过程服从泊松分布的系统, 考虑实际系统对性能的要求, 在 buffer 法的基础上本文提出下面一种系统延迟与能量供给的折衷算法。算法叙述如下: 在电池整个放电过程中, 事先设定两个阈值 B_1, B_2 , 当电荷状态下降到阈值 B_1 时, 则中断电池放电过程, 此时若有放电请求则放入 buffer 队列中, 直到恢复一个单位的电荷; 当电荷状态越过 B_1 , 下降到低于 B_1 高于 B_2 时, 中断电池放电过程, 此时若有放电请求则放入 buffer 队列中, 使电池按照下面两种情况发生恢复效应: 电池恢复到 B_1 状态需要的电荷数大于等于预先规定的最大恢复的电荷数 i 时, 只恢复 i 个电荷单元; 反之, 则恢复到 B_1 状态。当 情况发生后, 显然所处状态已低于阈值 B_1 , 如果状态仍能恢复到 B_1 , 则仍以 B_1 为阈值, 否则以 B_2 为阈值, B_2 的情况类同。图中两层阈值分别取 $B_1 = 40, B_2 = 35$, 其中 i 为最大允许恢复的电荷数, 仿真曲线中我们分别取 $i = 1$ 和 $i = 2$ 的情况。

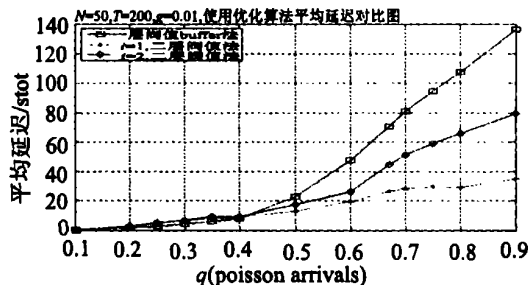
以上两种算法的仿真曲线如图 4(a)、(b)、(c) 所示。从图中可看出, 改进算法实际上是一种折衷算法, 平均延迟降低了, 但付出的代价是在放电请求到达率很高时, 电池所能提供的最大能量也相应的减少



(a) 使用优公与未使用优化算法的Gd对比图



(b) 使用优公与未使用优化算法的吞吐量对比图



(c) 使用优公与未使用优化算法的平无平延迟对比图

图4 leaky bucket算法和改进算法在Gd、吞吐量、平均延迟上的对比图

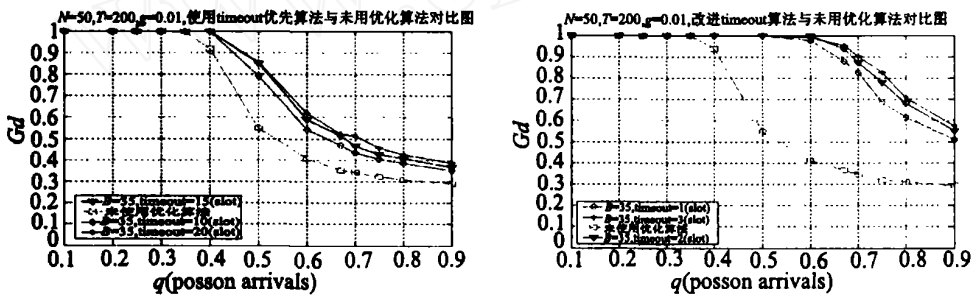
Fig.4 Contrast of LB algorithm and improved algorithm in Gd, throughput and average delay

了.在实际应用中,选用哪种算法应根据实际系统的性能要求来定,例如对延迟有一定要求,但放电请求不是特别频繁的系统,则第二种算法可能更适合.

2.1.2 阈值 + timeout 算法

有些系统对于延迟有严格的要求(例如无线网络中节点信息的传输),对于这种依赖于电池供电的系统,本文提出一种最大延迟的优化算法(阈值 + timeout).假定系统允许的最大延迟时间为 t ,将 timeout 的时间设定为 t ,在电池整个放电过程中,事先设定一个阈值 B ,当电荷状态低于 B 时,此时若有放电请求到来则中断电池放电过程,等待 timeout 的时间溢出,在等待过程中若又有放电请求到来,则将其放入到 buffer 中,同时记录其到达时间并开始计时(可记录它与上一个请求的时间差值),则同样等待设定为 t 的时间溢出后服务放电请求(假定每个放电请求的完成时间均为一个 slot,则可保证每个请求最大延时都不会超过 t).任何完成放电请求的时刻,只要电池状态大于 B ,则立刻服务下一个请求,而不进行时间等待或等待时间立刻停止.仿真曲线如图 5(a)所示.从图中可看出,这种优化算法效果要差一些,这是由于包的最大延迟被限定后,当放电请求到达率变大时,电池的空闲期相应地减少了,即恢复效应的发生机会减少了,而且随着电池状态的降低,恢复能力也下降了.

对于上面提到的网络中节点的通讯,考虑一种改进的阈值 + timeout 的优化算法,假定两节点一次的通讯或数据传送需要 n 个 slot 时间完成,在每个 slot 中转移一个状态,据此对模拟电池行为的模型作相应更改,之后应用如下改进算法.如果在通讯前,其中某一个节点的电池状态低于阈值 B ,则此次通讯或数据传送采用间断式通讯(类似于脉冲式放电):进行一个 slot 通讯则双方等待一个 timeout 的溢出,如果对方也为电池供电,则也同样等待恢复效应的发生(不论它是否低于阈值),仿真曲线如图 5(b).



(a)不同参数下阈值+timeout优化算法比较图 (b)改进型阈值+timeout优化算法比较图

图5 使用阈值+timeout优化算法得到的Gd对比图
Fig.5 Gd gain applying TT(threshold+timeout) algorithm

前两种优化策略更适合于一些便携式设备,可以使用智能电池包^[9]来监督电池的电荷状态(soc).当电池低于阈值时,将任务放入缓存中,使设备处于休眠状态直到电池恢复效应的发生.而后两种优化策略更适合于网络中通讯的节点,这些节点是靠电池来供电的.他们可以有效地限定通讯的延迟时间,确保系统的性能.而且后两种策略更易于实现那些无法获知 soc 的系统上.当电池的放电曲线比较陡时,可以取定电池的电压值作为电池状态的阈值,而定时器功能在大部分系统上是很易于实现的.

2.2 无延迟的优化策略

对于无延迟的优化算法,我们考虑双电池供电情况,有以下几种调度算法:

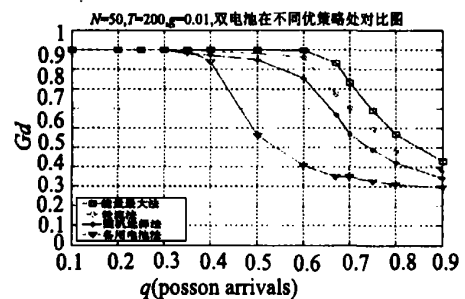


图6 使用不同的双电池调度策略得到的Gd对比图
Fig.6 Gd gain applying different policies of dual cells

1)备用电池法:系统有两个电池,一个电池处于工作状态,一个电池处于备用状态,只有当一个电池电量被放完或低于截止电压时,另一个电池才被启动;

2)随机选择算法:在每个放电请求到来时,随机的选取两个电池中的一个来提供能量,即每个电池为放电请求服务的概率为 $1/2$;

3)轮流算法:每个电池为每个到来的请求轮流提供能量,即开关在两个电池间规则的切换;

4)能量最大算法:在每个放电请求到来时,监控和比较两个电池的状态,选择所剩电荷最多的电池提供能量.

仿真曲线如图 6,从图中可看出能量最大法是最优的,然而它需要我们监督和比较电池电荷状态(SOC),因而增加了系统的复杂性,而且因此带来的间接延迟可能也不容忽视.

3 结 论

在模拟电池基本行为来实现电池模型的基础上,本文比较了几种优化策略.从上面的分析得出,综合考虑延迟和能量供给,双电池各种优化策略要优于单电池的策略,而且单电池优化策略同样适用于双电池,但是采用双电池供电又会使系统更为复杂,且增加了系统成本和运行开销,因而采用何种电池的优化策略应考虑系统的综合性能来选择.

参考文献:

- [1] LAHIRI K, RAGHUNATHAN A, DEY S, et al Battery driven system design: a new frontier in low power design[J]. In Proc ASP - DAC/ Int Conf VLSI Design, 2002 261 ~ 267.
- [2] CHASSERNIC F, RAO R R. A model for battery pulsed discharge with recovery effect[J]. WCNC 1999 - IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 1999, (1): 636 ~ 639.
- [3] CHASSERNIC F, RAO R R. Pulsed battery discharge in communication devices[J]. MobiCom 99, Seattle, 1999. 88 ~ 95.
- [4] CHASSERNIC F, RAO R R. A traffic control scheme to optimize the battery pulsed discharge[J]. Proc. of milcom 99, Atlantic city, NJ, Nov, 1999.
- [5] CHASSERNIC F, RAO R R. Energy Efficient Battery Management[J]. IEEE J. on Selected Areas in Communications, 2001, 19: 1235 ~ 1245.
- [6] CHASSERNIC F, RAO R R. Improving battery performance by using traffic shaping techniques[J]. IEEE J. on Selected Areas in Communications, 2001, 19: 1385 ~ 1394.
- [7] ADAMOUM, SARKAR S. A framework for optimal battery management for wireless nodes[J]. Technical Report Electrical Engineering Department University of Pennsylvania, 2001.
- [8] ADAMOUM, SARKAR S. Computationally simple battery management techniques for wireless nodes[J]. Proceedings of European Wireless, Florence, Italy 2002.
- [9] Intelligent batteries [EB/OL]. <http://www.cadex.com.cfm/index>