**摘要**

在无线传感器网络中，由于传感器节点体积等因素的限制，节点携带的能量是非常有限的。虽然可以选择使用可充电电池，但是使用可充电电池有充电次数、充电技术和充电成本的限制。电荷重分布现象是电池工作过程中不可忽视的现象，结合电池重分布现象中的自恢复效应，有效安排传感器节点工作时间，可以有效延长传感器节点的工作时间，提高电池利用率。本文结合电池自恢复效应设计了一种改进的拓扑控制算法，该算法周期性选举主干集节点，由主干集节点负责数据转发工作，非主干集节点在没有数据发送的状态下可以选择进入休眠模式。在上一周期休眠过的节点会优先成为主干集节点，尽量避免节点长时间工作或者休眠，使得网络中各个传感器节点的能耗均匀，进而延长网络的工作时间，同时，引起大家对电池自恢复效应对无线传感器网络仿真影响的更多关注。

**Introduction**

近年来，无线传感器网络获得了学术界和工业界越来越多的关注，相关应用日益增多，例如生态环境监测、可穿戴设备、智能家居和军事领域等。由于传感器节点体积和成本等因素的限制，节点携带的能量是非常有限的，能源有限问题是限制无线传感器网络进一步普及的主要因素之一。通过设计节能的路由协议、MAC协议和拓扑控制算法，可以有效降低能耗。在Deborah Estrin在Mobicom 2002的特邀报告中发现TelosB节点中通信模块的能量消耗远高于传感器模块和处理器模块等其他模块。通信模块的额外开销主要表现在下面几个方面：

1. 空闲侦听：通信模块在没有数据包可接收的时候也一直处于工作状态；
2. 串听：节点接收了目的地址不是自己的数据包；
3. 通信控制开销：冗余的控制消息的发送和接收。

电池是一个复杂的电化学系统，除了电能的泄露问题[[[1]](#footnote-1)]，还受温度的影响[[[2]](#footnote-2)]，并且还呈现出两个重要的非线性物理特性[[3]](#endnote-1)：

1. 速率容量效应：Rate Capacity Effect[[4]](#endnote-2)，如果电池的放电电流大于额定放电电流，电池的有效电荷量会降低；
2. 自恢复效应：Recovery Effect2，如果电池在两次放电过程之间允许休息一段时间，电池的有效电荷量会增加。

Chau等人通过实验[[5]](#endnote-3)发现电池的自恢复效应可以延长电池实际工作时间最大至30% - 45%。

基于Wu等人在[[6]](#endnote-4)中提出的拓扑控制算法，结合电池自恢复效应，本文设计了一种改进的拓扑控制算法，该算法周期性选举主干集节点，由主干集节点进行数据转发工作，非主干集节点在没有数据发送的状态下可以选择进入休眠模式。在上一周期休眠过的节点会优先成为主干集节点，尽量避免节点长时间工作或者休眠，使得网络中各个传感器节点的能耗均匀，进而延长网络的工作时间。

**相关工作：**

电池模型是用来分析电池工作状态的，尤其在需要使用电池的仿真工作中特别重要。现在的电池模型一般分为四类[[7]](#endnote-5)：电化学模型、解析模型、电路模型和随机模型。

电化学模型是相对比较准确的电池模型，通过复杂的非线性差分等式来表示电池内部化学反应6。电化学模型不仅要求设计者对电池深入的解，还要求很高的计算能力和存储能力，并不适用于无线传感器网络场景。在文章[[8]](#endnote-6)中， Doyle等人提出的电化学模型预测电池的寿命需要几天的时间。KiBaM[[9]](#endnote-7)是典型的解析模型，KiBaM通过一组偏微分方程来模拟电池中电解液和电解质之间的化学动力学过程。虽然相对于电化学模型来说，KiBaM的复杂度已经降低很多，但是对于传感器节点来说，要求的计算能力和存储能力依旧很高，而且不能体现出电压和电流的时变特性。在文章[[10]](#endnote-8)中提出的解析模型是根据电流负载预测电池的寿命，只需要电池电荷量和活动电荷的运动速率两个参数。两个参数都是通过多次实验获得使得误差最小的一组值，但是这个模型的计算能力要求依旧很高。在文章[[11]](#endnote-9)中，Rahmé等人提供了8中提出模型公式的递归形式，降低了该模型的计算复杂度和空间复杂度。在文章[[12]](#endnote-10)中，Nataf等人在已有的WSN操作系统中实现了9中的电池模型。

电路模型是用等价的电路来模拟抽象电池内部的物理现象，但是研究初期的部分电路模型没有考虑电池的非线性物理特性[[13]](#endnote-11)。在文章[[14]](#endnote-12)中，Bahramipanah等人提出用于模拟锂电池的等价RC电路模型，其中把电池的非线性物理特性等价成一个虚拟的内部电源。但是该模型要求的计算能力和存储能力也很高，可以借鉴文章10的思路，把积分量化为求和，把连续的负载电流离散化。

随机模型比上述三类模型要求的计算能力和存储能力低很多，适用于无线传感器网络场景。Chau等人在文章4中提出的随机模型考虑到了一个重要的电池现象：电池存在一个阈值，当距离上一放电结束的时间超过之后，电池的自恢复效应对电池电荷量的影响基本可以忽略。在文章4中，用三元组表示当前电池的状态，三个变量分别表示当前的可用能量，最大可用能量和距离上次放电过程已经休息的时间。该模型把电池容量量化为电池在每个时隙可以恢复的能量。在文章[[15]](#endnote-13)中，Panigrahi等人设计的随机模型把电池容量量化为最小的放电容量。分别表示电池额定容量和最大容量。电池模型一共有个状态，并把时间时隙化。在时刻，如果电池消耗了单位的能量，电池从状态转移到，否则电池的自恢复效应会使得电池从状态转移到大于等于的某个状态。当电池处于状态或者是消耗的能量达到最大容量时电池停止放电。该模型把电池的自恢复效应表示为一个降指数函数，电池的恢复能力跟当前的放电电流和已经消耗的电荷量有关。该文章还提出了把电池的速率容量效应考虑在内的加强版模型，通过一个表格存储实际需要的电荷量和仿真需要的电荷量。如果实际的放电电流大于额定电流，电池使用效率会变为，那么在仿真的过程中，我们可以认为实际的电流是。虽然该模型同时考虑了电池的速率容量效应，但是如果运用在无线传感器网络环境中，需要传感器节点各个部件精准的连续电流曲线，而且没有考虑文章4中的。

在文章[[16]](#endnote-14)中，Stamatescu等人介绍了用于室内监测场景的预测传感器节点能量的简单模型， 在文章[[17]](#endnote-15)中，Landsiedel等人根据预先测量Mica2传感器节点各个部件的工作电流来预测电池的能量消耗，上述两个模型都没有考虑电池的非线性物理特性。

在上述四种电池模型中，随机模型无疑是用于无线传感器网络相关研究的最佳选择。电池模型最直接的应用是利用电池模型来预测电池的剩余工作时间、剩余能量1014，进一步影响并改善路由协议、MAC协议和应用层相关应用的设计和管理。Chau等人在4中利用电池的自恢复效应设计了一个简单的分布式的占空比调度策略，并分析了数据延迟和占空比之间的折衷。Fu等人使用4中的电池模型，把电池的自恢复效应运用到网络覆盖问题研究，根据节点的工作时间和休息时间选择活动节点，仿真结果显示网络工作时间最大可增加43.52 %。在文章8中，Rakhmatov等人利用提出的电池模型在嵌入式系统中进行带有电压调节的任务调度来延长电池的工作时间，而且会在任务调度中插入空闲时隙让电池主动休息。

无线传感器网络的拓扑控制研究目前已比较成熟，拓扑控制可以分为部署控制、功率控制和层次型拓扑控制。因为在功率控制中各个节点一直处于活跃状态，也就是电池一直处于工作状态，不能利用电池非线性特性中的自恢复效应，所以我们在此不再赘述功率控制相关的算法，而是主要介绍层次型拓扑控制的相关算法。层次型拓扑控制的算法的目的就是将整个网络划分为一个个连通的区域，因此，这类算法一般被称为分簇算法[[18]](#endnote-16)。在分簇算法中，簇头节点可以进行数据融合减少数据通信量，方便进行分布式管理，增加网络的可扩展性。

LEACH[[19]](#endnote-17)协议是基于概率的算法，分为簇头选取阶段和数据通信阶段。每一个节点在簇头选举阶段按照一定的概率确定自己是否是簇头。LEACH协议不能保证簇头节点均匀分布在整个网络中，HEAD算法[[20]](#endnote-18)对这一问题进行了改进，节点以不同的初始概率发送竞争消息，使得簇头节点均匀分布在整个网络。GAF[[21]](#endnote-19)算法是基于地理位置的分簇算法，在GAF算法中，作者没有考虑能量问题。在文章[[22]](#endnote-20)中，Santi等人提出了GAF的改进算法，提出了完全性簇头选择机制和随机型簇头选择机制。TopDisc[[23]](#endnote-21)算法是基于图论中最小主干集问题的经典算法，TopDisc算法利用颜色来区分簇头节点和非簇头节点，提出了两种颜色标记算法：三色算法和四色算法。Wu等人在[[24]](#endnote-22)中提出了基于主干集节点的能量感知拓扑控制算法，在保证网络连通性的基础上，通过两个规则选出主干集节点，其主干集的选取算法时间复杂度相比其他算法要低。

上述拓扑控制的方法都没有考虑电池自恢复特性，虽然拓扑控制可以显著提高网络的通信效率，有效延长网络工作时间，但是如果在拓扑控制的过程中有效利用电池的自恢复效应，提高电池可用电荷量，则可以进一步有效延长网络工作时间。

|  |  |
| --- | --- |
| 符号标记 | 符号含义 |
| u,v,w | 传感器节点 |
|  | 工作电流 |
|  | 休眠电流 |
| RC(t) | 电池休眠t秒时的恢复电流值 |
| NS(v,) | 节点v在第i个周期的状态，T表示节点v是主干集节点，F表示节点v是非主干集节点 |
| Nei(v) | 节点v的一跳邻居节点 |
| Nei[v] |  |
| hasRelaxed(v,) | 节点v在第i个周期的休息状态，T表示节点v在第i个周期休息过，F表示没有休息过 |
| El(v) | 节点v的能量等级 |
| Nd(v) | 节点v的节点度 |
| Id(v) | 节点v的id |
|  | 第i个周期 |

**简单电池模型设计：**

受4中实验结果的启发，本文根据其实验数据重新拟合得到曲线1，4中实验获得不同占空比下网络的工作时间。曲线1的横坐标表示节点每一个周期中的休息时间，纵轴表示网络生存时间延长的百分比。根据曲线1计算出电池在休眠后每一秒的等价恢复电流，见曲线2，记为，表示休息秒时的恢复电流。

 

我们设计的电池模型的状态转移图，三元组所代表的含义跟4中一致：

工作过程：

休眠过程:

拓扑控制算法设计：

在文章21中，Wu等人提出的算法中，如果一个主干集节点能够被它的两个邻居主干集节点取代，则主干集节点就会直接退出主干集。对此，我们稍微做了一点改进，只有在节点的剩余能量在三个节点中是最低的情况下，节点v才会退出主干集。这样能量较低的两个节点可能被其他节点替代而退出主干集，可以恢复部分能量，或者不会过早停止工作。

电池的自恢复效应的拓扑控制分布式算法

本文提出的拓扑控制算法周期性选举主干集节点。每一个节点独立决定自己的状态。每一个周期的开始经历三个步骤，其中Step1和Step2是主干集的构建过程，Step3是主干集的筛选过程。

Step 1：

Step 2：采用在文中21中提出的方法，

Step 3:

Rule1:对于节点v和其邻居节点u，如果，而且节点v和节点u满足下面规则之一，则节点v停止选举工作，且置：

Rule2：对于节点v和其邻居节点u和w，如果三个节点的关系满足下面的几个条件之一，则节点v停止选举工作，且：

1. :
2. :

使用Step 3 中的Rule1判定节点u和节点v的状态；

1. :
2. ;

筛选过程的总的原则是最大化整个网络的恢复的电荷量，让在上一个周期休息过的节点优先成为主干集节点，而在上一周期工作过的节点尽量退出主干集，除非该节点是关键节点，关键节点A是指节点A的退出会导致其两个节点不能直接相连。

图1-9表示两个周期时间内主干集的选举过程，灰色节点表示非主干集节点，黑色节点表示主干集节点，斜条纹节点表示节点在上一个周期休眠过，节点内的数字表示节点id和能量值，3(5)表示节点的id是3和剩余能量值是5。图1是网络的开始阶段，由于网络部署完成后，没有节点休眠过，直接进行Step2，结果为图2，对于只有一个邻居节点的节点1来说，我们也会标记它为主干集节点。使用Step3的Rule1，节点1和8都退出主干集，得到图3；使用Step3的Rule2，节点5退出主干集，得到图4。至此，本周期内的主干集构造完成。经过一个周期，节点1、3、5、8、9在没有数据发送的情况下按概率选择了休眠，而节点6一直处于工作状态，最后的能量状态如图5显示。在下一个周期开始，经过Step1，所有在上一个周期休眠过的节点1、3、5、8、9都标记为主干集节点。如图6，经过Step2，节点2、4、7又标记自己为主干集节点，如图7，因为它们都有两个邻居不能直接相连。使用Step3的Rule1后，节点3退出主干集节点，如图8，使用Step3的Rule2后，节点4退出主干集，如图9，因为节点4的所有邻居可以被节点2和节点5同时覆盖，并且节点4是三个节点中能量最小的一个。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 图1 | 图2 | 图3 |
|  |  |  |
| 图4 | 图5 | 图6 |
|  |  |  |
| 图7 | 图8 | 图9 |

**实验结果：**

本文采用基于C++的离散仿真环境，并对仿真环境作如下假设：

1. 传感器节点在非休眠状态时，无论是否有数据包发送或者接收，所有节点模块都处于工作状态。
2. 根据TelosB的参数表[[25]](#endnote-23)，可知TelosB节点的工作电流是，在休眠状态的电流是。我们假定工作电流、休眠电流或者恢复电流是恒定不变的。
3. 数据链路层不会发生数据冲突，是完美的。
4. 网络中10%的节点能源耗尽意味着网络停止工作。

我们实现了21中的拓扑控制算法，并考虑了电池的自恢复效应，作为对比算法，记为BT。在BT算法的基础上，在主干集的构造和筛选过程中，考虑电池的休息状态，优先让在上一周期休息过的节点成为主干集节点，记为算法BT&CC。在算法BT&CC的基础上，改进主干集在Step3中Rule2中A条件，记为算法BT&CC&DN。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图10 | 图11 |

图10、图11的参数设置分别为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 参数名称 | 图10 | 图11 |
| 仿真半径（圆形） | - | 500 |
| 节点数目 | 100 | - |
| 通信半径 | 90 | 200 |
| 更新周期 | 15s | 15s |
| 节点密度 | - | - |
| 休眠概率 | 0.5 | 0.5 |
|  |  |  |

通过仿真结果发现，在选择主干集的过程中考虑电池自恢复效应可以有效延长网络工作时间。作者发现，本文改进的算法选出的主干集节点规模比21文中算法直接选出的主干集规模大。这样可以平衡节点之间的剩余能量，不会使得一个关键节点因为一直工作导致节点电池能量耗尽，进而导致网络连通性失败的场景。

**结束语：**

本文主要改进了21中无线传感器网络的拓扑控制算法，提出一种结合电池的自恢复效应的拓扑控制算法，在选择主干集节点时考虑电池的自恢复效应，使得网络中节点的能耗尽量平衡，并提高整个网络中电池的电荷恢复量。通过利用电池自恢复效应的特点：休息达到阈值之后，电荷量的恢复量趋于0，基于提出的拓扑控制算法，我们合理安排节点的工作周期，让休眠过的节点优先成为主干集节点，让剩余能量低的节点优先休息。实验结果表明合理使用电池的自恢复效应，可以有效延长网络工作时间。同时，本文也指出在传感器网络的仿真工作中，电池的自恢复效应是不容忽视的，考虑电池的自恢复效应可以使相关仿真工作跟切近实际。

**未来的工作：**

本文提出的简单电池模型的参数是跟电池材料相关的，通用性不强，未来需要设计一个适用于无限传感器网络并与电池材料无关的复杂度比较低的电池模型。

**参考文献：**

1. 电池放置不用时其有效容量也会逐渐降低。 [↑](#footnote-ref-1)
2. 温度过低时，电池的放电容量降低，充电效率也会降低。 [↑](#footnote-ref-2)
3. Bahramipanah M, Torregrossa D, Cherkaoui R, et al. Enhanced Electrical Model of Lithium - Based Batteries Accounting the Charge Redistribution Effect[J]. [↑](#endnote-ref-1)
4. Panigrahi T, Panigrahi D, Chiasserini C, et al. Battery life estimation of mobile embedded systems[C]//VLSI Design, 2001. Fourteenth International Conference on. IEEE, 2001: 57-63. [↑](#endnote-ref-2)
5. Chau C, Qin F, Sayed S, et al. Harnessing Battery Recovery Effect in Wireless Sensor Networks: Experiments and Analysis[J]. Selected Areas in Communications IEEE Journal on, 2010, 28(7):1222 - 1232. [↑](#endnote-ref-3)
6. Wu, Jie, et al. "On calculating power-aware connected dominating sets for efficient routing in ad hoc wireless networks." Communications and Networks, Journal of 4.1 (2002): 59-70. [↑](#endnote-ref-4)
7. Jongerden, M. R., and B. R. Haverkort. "Battery modeling." (2008). [↑](#endnote-ref-5)
8. Doyle M, Fuller T F, Newman J. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993, 140(6): 1526-1533. [↑](#endnote-ref-6)
9. Manwell J F, McGowan J G. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems[J]. Solar Energy, 1993, 50(5):399–405. [↑](#endnote-ref-7)
10. Rakhmatov D, Vrudhula S. Energy management for battery-powered embedded systems[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS), 2003, 2(3): 277-324. [↑](#endnote-ref-8)
11. Rahmé J, Fourty N, Al Agha K, et al. A recursive battery model for nodes lifetime estimation in wireless sensor networks[C]//Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2010 IEEE. IEEE, 2010: 1-6. [↑](#endnote-ref-9)
12. Nataf E, Festor O. Online Estimation of Battery Lifetime for Wireless Sensors Network[J]. arXiv preprint arXiv:1209.2234, 2012. [↑](#endnote-ref-10)
13. Bahramipanah M, Torregrossa D, Cherkaoui R, et al. Enhanced Electrical Model of Lithium - Based Batteries Accounting the Charge Redistribution Effect[J]. [↑](#endnote-ref-11)
14. Bahramipanah M, Torregrossa D, Cherkaoui R, et al. Enhanced Electrical Model of Lithium - Based Batteries Accounting the Charge Redistribution Effect[J]. [↑](#endnote-ref-12)
15. Panigrahi T, Panigrahi D, Chiasserini C, et al. Battery life estimation of mobile embedded systems[C]//VLSI Design, 2001. Fourteenth International Conference on. IEEE, 2001: 57-63. [↑](#endnote-ref-13)
16. Stamatescu G, Chitu C, Vasile C, et al. Analytical and Experimental Sensor Node Energy Modeling in Ambient Monitoring[J]. IEEE Conference on Industrial Electronics & Applications, 2014:1615 - 1620. [↑](#endnote-ref-14)
17. Landsiedel, Olaf, Klaus Wehrle, and Stefan Götz. "Accurate prediction of power consumption in sensor networks." Proc. of the Second Workshop on Embedded Networked Sensors. 2005. [↑](#endnote-ref-15)
18. 孙利民. 无线传感器网络. 清华大学出版社有限公司, 2005. [↑](#endnote-ref-16)
19. Heinzelman, Wendi B., Anantha P. Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. "An application - specific protocol architecture for wireless microsensor networks."Wireless Communications, IEEE Transactions on 1.4 (2002): 660-670. [↑](#endnote-ref-17)
20. Younis, Ossama, and Sonia Fahmy. "Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: A hybrid, energy-efficient approach." INFOCOM 2004. Twenty-third AnnualJoint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Vol. 1. IEEE, 2004. [↑](#endnote-ref-18)
21. Xu, Ya, John Heidemann, and Deborah Estrin. "Geography-informed energy conservation for ad hoc routing." Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM, 2001. [↑](#endnote-ref-19)
22. Santi, Paolo, and Janos Simon. "Silence is golden with high probability: Maintaining a connected backbone in wireless sensor networks." Wireless Sensor Networks. Springer Berlin Heidelberg, 2004. 106-121. [↑](#endnote-ref-20)
23. Deb, Budhaditya, Sudeept Bhatnagar, and Badri Nath. "A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management." (2002). [↑](#endnote-ref-21)
24. Wu, Jie, et al. "On calculating power-aware connected dominating sets for efficient routing in ad hoc wireless networks." Communications and Networks, Journal of 4.1 (2002): 59-70. [↑](#endnote-ref-22)
25. Moteiv Corporation. Datasheet Telos Rev B (Low Power Wireless Sensor Module), May 2004 [↑](#endnote-ref-23)