

文章编号:1005-0523(2014)03-0124-06

基于半马尔科夫链的中小堤坝 WSN 节点能耗研究

汤文亮, 周长雨

(华东交通大学软件学院, 江西 南昌 330013)

摘要:无线传感器网络技术的引入,为中小型堤坝监测技术的发展提供了新思路。由于无线传感器网络节点采用电池供电,而堤坝环境中的数据监测条件比较苛刻,电源更换相对困难,无线传感器网络节点能耗的优化在延长整个无线传感器网络生命周期过程中显得尤为重要。本文介绍了无线传感器网络中节点能耗的主要分布,并提出了降低节点能量消耗的策略。借助半马尔科夫链理论建立了节点能耗的数学模型,分析了 WSN 节点的能耗情况,在保证正常数据通信的情况下,通过对节点状态的管理,延长节点的睡眠时间,从而达到降低整个网络能耗的目的。

关键词:中小型堤坝;无线传感器网络;节点能耗;半马尔科夫链理论

中图分类号:TP393

文献标志码:A

对于中小型堤坝的监测管理,长期以来都是以人工观测为主,很少有全天候监测的系统,只有少数大型水利工程应用了现代无线通信技术。随着近年来科学技术的不断发展,国内堤坝监测手段有了较大的变化,可以实现远程、全天候的对堤坝各项指标进行监测管理;通过对监测指标设定安全阈值,一旦有堤坝出现险情,无线传感器网络可以将险情迅速传向远程指挥中心,并且可以减少因现场人工监测而带来的安全隐患。

由于堤坝的监测环境比较复杂,无线传感器网络的能耗问题限制了其性能的发挥,为尽量减少电能更换等带来的管理成本。网络能耗作为无线传感器网络技术领域重要研究之一,国内外科研团队对此做了大量的研究,主要的研究方法包括基于 Supermodular 博弈的 WSN 功率控制,基于 Gibbs 采样的随机的 WSN 功率控制、基于演化博弈分簇的 WSN 数据传输控制和路由选择机制,以及基于马尔科夫链的 WSN 节点分析等,并取得了相应的成果。将对用于中小型堤坝监测的 WSN(无线传感器网络)节点能耗情况进行分析,基于半马尔科夫链的优化理论,建立相应能耗模型,对网络节点进行有效的管理控制,从而提高整个无线传感器网络的能量使用效率,更好的为堤坝监测质量体系服务。

分布在中小型堤坝内部、外部的无线传感器网络,在监测堤坝的渗流、扬压力、水位等环境参数的同时^[3],也要检测网络自身的能量变化情况。中小型堤坝无线传感器网络的埋设分布如图 1 所示,在堤坝内部的监测点通过设置传感器阵列对监测点的不同参数进行监测,并将监测数据通过 sink 节点发送到远程

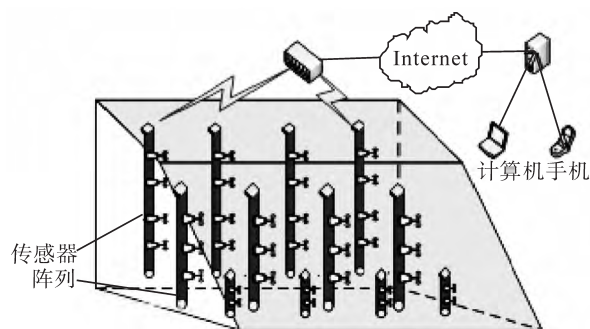


图1 堤坝无线传感器网络分布图

Fig.1 Distribution of WSN in dams

收稿日期:2014-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(1162001);江西省科技厅计划资助项目(20132BBF60083)

作者简介:汤文亮(1969—),男,教授,研究方向为无线传感器网络(WSN),信息安全。

服务器进行分析。在此过程中,包括传感器各参数数据的传输、处理,以及对网络的能耗监测。

1 无线传感器网络节点的能耗分析

传感器节点能量消耗的主要模块有:传感器模块、处理器模块和无线通信模块^[4]。传感器模块是由传感器及模数转换模块组成,其任务是采集被测控对象的信息并转换成相应的数字信号。感知节点一般集成了多种传感设备,可以采集温度、湿度、压力、声音等多种信息。传感器模块的能量消耗来自多个部分,包括信号采用以及模数信号的转换、信号调制等,传感器模块工作方式由具体的应用决定,可能为突发式或周期式,其消耗的能量为单次采样的能耗与采样次数的积^[5]。

处理器模块节点的功能控制模块和数据处理中心,是由嵌入式系统组成,包括微处理器、存储器、操作系统等,负责控制传感器,执行通信协议及处理感知数据等算法,处理模块功能复杂与其他子系统密切相连。一般的微处理器都支持睡眠、空闲、工作多种工作模式,不同模式下能耗也大不相同,适当的模式切换有利于能耗的节约。

无线通信模块包括基带部分和RF部分,负责节点间数据的接收和发送。无线收发采用的调制模式、数据率、发射功率和操作频率不同将导致通信系统能量消耗的不同。随着集成电路工艺的进步,处理器和传感器模块的功耗变得很低,研究表明,处理器节点传输1比特信息100 m距离需要的能量大约相当于执行3 000条计算指令消耗的能量^[6],因此,绝大部分的能量消耗在无线通信模块上。

2 降低WSN节点通信能耗的策略

2.1 增加WSN节点的休眠时间

无线通信模块的工作状态主要分为发送、接收、空闲、睡眠4种状态。由图2可知,在无线模块工作的过程中,发送数据的能耗最高,接收数据和空闲状态下能耗比较接近,略少于发送状态的能耗,而睡眠状态下的能耗最少。无线通信模块处于空闲状态时会一直侦听无线信道的使用情况,检查是否有数据传输,因而能量消耗较大;处于睡眠状态时则会关闭通信模块。因此,在保证无线传感器网络通信效率的情况下,减少节点对冗余数据的转发和接收,以及在无需通信时及时进入睡眠状态,这是降低WSN节点能耗的一个重要策略。

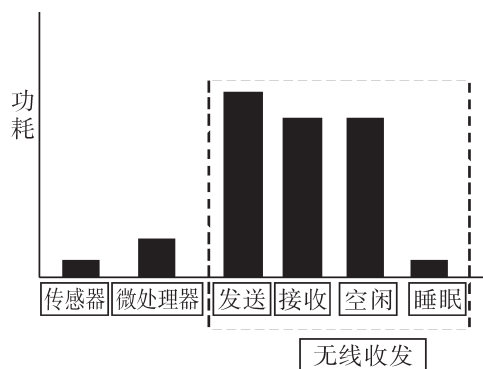


图2 传感器节点能耗分布

Fig.2 Energy consumption model of sensor nodes

由于节点状态的转变存在一定的离散性和随机性,且节点的下一状态只与当前状态有关,这一特点满足半马尔科夫链理论。通过半马尔科夫链理论建立节点状态转变的概率模型,可以有效的分析节点状态的变化过程,当无线传感器网络稳定工作后,节点状态变化的概率将会维持在某个稳定状态,通过稳定状态可以分析出当前哪些节点处于空闲状态,并根据算法将处于空闲状态的节点关闭,只保留32K晶振用来唤醒模块。这样就可以减少节点的空闲状态,从而降低整个网络的能耗,提高了电能的有效利用率。

2.2 采用多跳短距离无线通信方式

在无线通信过程中,能量消耗与通信距离的关系为 $E=kd^n$,其中 E 为能耗; k 为能耗系数; d 为距离;参数 n 满足关系式 $2<n<4$ 。由于 n 为传播衰减指数^[7],其取值与周围环境有很大关系,当网络环境平坦且没有障碍物时,取值为2;当在建筑物和植被茂密的区域进行远距离传输时,取值为3~5。随着通信距离的扩大,能耗会急剧的增加,因此在满足通信速率的前提下,应尽量减少单跳通信的距离。在对堤坝进行监测的实际过程中,由于采用的是传感器阵列,每个传感器阵列中的传感器距离相对较短,而且负责数据交

互的传感器距离相对较近,满足传感器节点的通信半径要求,因此可以暂不考虑单跳通信模式带来能耗影响^[8]。如果要进行监测堤坝体积较大,传感器节点相对距离超过了单跳通信的有效范围,再考虑采用多跳短距离的无线通信模式^[9]。

3 降低WSN节点能耗的算法研究

3.1 半马尔科夫链理论

根据上文的背景知识可以知道,无线传感器节点从加入网络中到能量耗尽一共有4种状态转换。这4种状态的转换是随机的,因此可以用随机变量来表示。在某一时刻,节点在某一状态下发生的概率,则为状态转换概率;而对于节点在状态转换过程中同样符合随机变量的特征,把节点不同状态的时间转换的概率称为状态转移概率。

马尔科夫链理论是俄罗斯数学家安德烈·马尔科夫在1602年提出来的,用来描述事物存在状态转移过程中符合马尔科夫性质的数学模型。在描述这一离散时间随机过程中,要求满足离散性、随机性和无后效性3点。其中无后效性指的是在已知当前状态下,过去状态的发生概率对于预测将来状态的概率是不相关的。半马尔科夫链理论是在其马尔科夫链原有基础上进行的改进,具体区别就是在计算节点状态转移概率时,不同状态下的转移概率是不一样的^[10]。根据无线传感器工作性质,节点在不同状态下持续的时间肯定不会相同,而且在各个状态下,其状态转移的概率也不会相同;不同节点在状态转移过程中是随机事件,在时间上也有离散性,因此,无线传感器节点在能量消耗的过程中,完全满足半马尔科夫链理论的性质特征,可以通过建立半马尔科夫链模型准确的分析出无线传感器网络中各节点的能量消耗情况。

3.2 能耗模型的建立

在建立能耗模型的过程中,通过对无线传感器模块工作方式的分析,可以对MAC协议层进行一定的算法改进^[11],减少工作过程中空闲传感器模块的监听时间,增加其睡眠时间,从而达到减少整个模块的能耗。传感器在进入睡眠状态(S)的时候,只保留32K晶振用于唤醒整个节点,节点的其他部件全部关闭;节点被唤醒后,会进入3种不同的工作状态,即空闲状态(I),发送状态(T)和接收状态(R),节点进入 I 状态的时候,会继续侦听网络中的消息,等待任务命令,通过对MAC层协议的改进,当侦听时间超过一定时间后,没有侦听到其他工作任务,节点会转入睡眠状态。节点进入 S 状态后,会像其它节点发送数据缓冲区中的数据帧,在 R 状态下,接收信道传来的数据帧。在一定的时间段内,节点在四种状态下切换的概率是随机的,而且不同状态间转换的概率也不相同,这一点恰好满足半马尔科夫链现象成立的条件,因此可以利用该理论来进行建模。如图3传感器节点状态转换图,通过该有向图可以表现出节点各种状态间的相互转换,例如由 T 状态指向 S 状态,表示节点由 T 状态转到 S 状态,权值 $P(T \rightarrow S)$ 为状态转移的概率, $P(T)$ 则为节点在 T 状态的稳态概率。由于节点从 S 态不可能直接进入 T 态、 R 态,因此没有在图中指向 $P(S \rightarrow T)$ 与 $P(S \rightarrow R)$ 的概率为0。

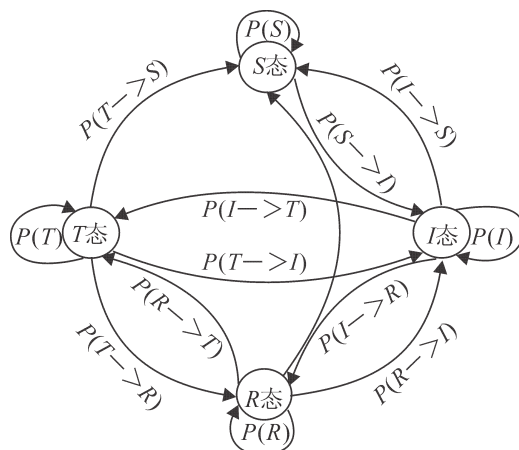


图3 传感器节点状态转换图

Fig.3 Diagram of sensor nodes state transition

根据传感器节点状态转换图描述,可以将其看作一个关于不同状态的有向图,因此,可以用矩阵来对各个状态的转移概率进行描述,假设 P 为节点的状态转移矩阵,状态 $I = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示,矩阵所有的状态,由不同状态下转移概率 P_{ij} 构成的矩阵表示为节点状态变换的概率矩阵。因此,在无线传感器节点状态转

移过程中,由4种状态所构成的节点状态转移矩阵有 $P = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & P_{1,3} & P_{1,4} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & P_{2,3} & P_{2,4} \\ P_{3,1} & P_{3,2} & P_{3,3} & P_{3,4} \\ P_{4,1} & P_{4,2} & P_{4,3} & P_{4,4} \end{bmatrix} \circ$

该矩阵具有以下两个性质:① $0 \leq p_{ij} \leq 1$; ② $\sum_{j=1}^N p_{ij} = 1, (N=4)$ 。 $P_{1,1}, P_{2,2}, P_{3,3}, P_{4,4}$ 为节点在 S, T, R, I 4种状态下的稳态概率,同时该四种状态的概率也可以说明,在无线传感器网络各个节点稳定在长时间运行的过程中,整个网络的节点获得该种状态概率。

规定节点在 S, T, R, I 4种状态下的能耗分别为 J_S, J_T, J_R, J_I , 在单位时间 Δt 内,每个节点只能处于某一种状态下,并且假设节点在发送和接受数据包的时候,数据包大小固定,因此节点在不同状态下单位时间内消耗的能量近似相同。因此在一段时间 $t = n\Delta t$ 内,节点在单个状态下的满足 $(0,1)$ 概率分布,可以通过计算该时间段内各个状态下的期望值来计算该时间段的能耗,节点在 $t = n\Delta t$ 时间段内节点能耗 E_{node} 为:

$$E_{\text{node}} = \sum_{n=0}^{\infty} (\xi_S J_S + \xi_T J_T + \xi_R J_R + \xi_I J_I) \Delta t$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时,整个网络中节点状态趋于稳定状态,节点状态概率接近稳态概率,因此此时节点能耗为: $E_{\text{node}} = (P_{1,1} J_S + P_{2,2} J_T + P_{3,3} J_R + P_{4,4} J_I) t \circ$

4 基于算法模型的节点能耗仿真

在堤坝安全监测过程中,由于无线传感器布置相对固定,当网络稳定运行的时候,各个节点的能耗通过半马尔科夫模型能够较为准确的感知^[12]。在实际能耗的仿真过程中,无法实现时间无限增大,获取到整个网络中节点状态转移概率的期望值,只能在相对固定的时间内统计节点状态变化的次数,然后近似模拟出节点在稳态的转移概率,然后将该节点的能耗参数和传感器ID返回到sink节点,通过发送到远程的PC端进行处理,最后通过节点能耗模型和已知的能耗参数计算出节点的能耗,具体的能耗模型实现流程图如图4。

在建立能耗模型进行仿真的时候,首先要对各个节点的状态转移概率进行初始化,根据节点状态转移图3所示,对节点转移概率和稳态概率进行均值处理,首先对稳态进行均值处理,有 $P(S)=P(I)=P(T)=P(R)=1/4$, 然后对个状态的转移概率进行均值处理,结合上述节点状态转换图,对于节点 S 状态和 I 状态则有

$$P(S) = P(I \rightarrow S) = P(T \rightarrow S) = P(R \rightarrow S) = 1/4$$

$$P(I) = P(S \rightarrow I) = P(T \rightarrow I) = P(R \rightarrow I) = 1/4$$

对于 T 态和 R 态,由于 $P(T)、P(R)$ 已知,而 $P(S \rightarrow T) = P(S \rightarrow R) = 0$ 。因此,可以得到节点状态转

$$\text{移概率初始化矩阵 } P_{\text{init}} : P_{\text{init}} = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 \\ 0 & 1/4 & 3/8 & 3/8 \\ 0 & 3/8 & 1/4 & 3/8 \\ 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 \end{bmatrix} \circ$$

在无线传感器网络正常工作后,取一定时间段内,通过编写应用程序统计目标节点在该段时间内各种状态转变的次数,在传感器将统计数据传输到PC端时,计算出相应节点各状态下的稳态概率,然后将其输入到节点能耗模型中,计算出某一节点在该时段内的能耗值(见表1),然后通过对节点在不同时刻剩

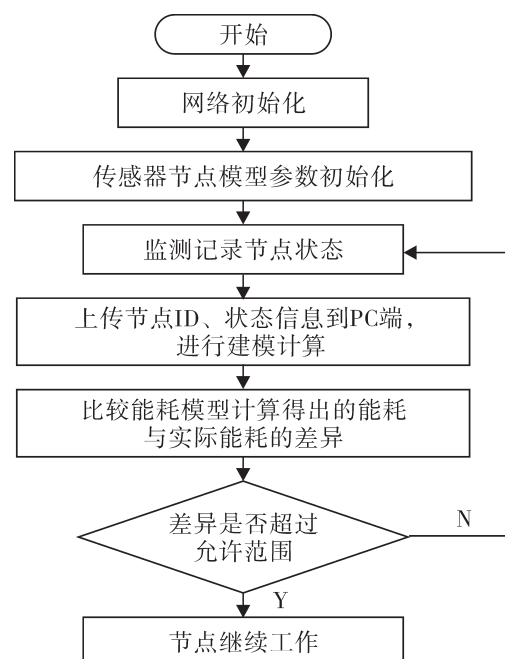


图4 节点能耗模型实现流程图

Fig.4 Flow chart of node energy consumption model

余能耗进行描点,可以得到节点在该时间段内能耗曲线。与此同时,将传感器自身能量信息同步读取出来(见表2),与通过模型估算出的节点能耗值进行对比,可以对同类型节点在不同时刻下能耗的估算值与监测数据的误差进行直观的对比。

表1 节点能耗估算值

Tab. 1 Estimated value of node energy consumption

节点	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Sink 节点	9.83	9.17	8.71	7.89	7.25	6.37	5.43	4.89	4.65	3.88
路由节点	9.80	9.46	9.37	8.81	8.03	7.60	7.29	6.52	6.16	5.93
采集节点	9.90	9.85	9.67	9.56	9.41	9.27	9.07	8.91	8.66	8.32

表2 节点能耗监测值

Tab. 2 Monitoring value of node energy consumption

节点	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Sink 节点	9.81	9.37	8.91	7.84	7.16	6.41	5.62	4.96	4.87	3.98
路由节点	9.89	9.66	9.27	8.91	8.13	7.64	7.15	6.72	6.26	6.17
采集节点	9.93	9.87	9.79	9.65	9.49	9.32	9.06	8.87	8.66	8.43

由于堤坝在数据长期监测过程中要求的数据实时性较低,因此各个节点在大部分时间不需要进行工作,根据半马尔科夫理论,可以得到在某一时间段内节点处于空闲状态的概率,通过增加节点在空闲状态向睡眠状态的概率,可以在节点上设定相应的时钟,当节点处于空闲状态超过 t' 时,节点自动进入睡眠状态,直到有其它指令来唤醒,这样就可以使整个网络的能耗大大降低,从而提高堤坝上无线传感器网络的使用周期。

5 结论

通过对半马尔科夫链理论模型的研究,可以得出节点能耗模型分析与实际能量消耗情况大致相同,验证了半马尔科夫链在研究无线传感器网络过程中的准确性。其创新性就在于通过该算法的研究,可以清楚的了解到无线传感器网络节点在工作中的能量消耗情况,同时通过对网络节点中空闲状态的控制,通过减少空闲状态概率,提高节点在没有数据传输情况下,转入睡眠状态的概率,从而大大减少节点能耗,为整个网络的长期稳定运行提供了可能。

参考文献:

- [1] ZHU YONGFEL. Sensor network based DAM safety monitoring system[J]. International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering, 2010(10): 9-11.
- [2] KOHGO Y, ASANO I, HAYASHIDA Y, et al. On wireless pore water transducer for fill-type dams[C]//New Developments in Dam Engineering: Proceedings of the 4th International Conference on Dam Engineering, 18-20 October, Nanjing, China. Taylor & Francis, 2004: 441.
- [3] XINYING MIAO J C. Development of wireless sensor network for DAM monitoring[J]. Journal of Information & Computational Science, 2012, 9(6): 1609-1616.
- [4] 汪文勇. 无线传感器网络若干节能关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [5] 林蔚, 李波, 韩丽红. 基于二次灰色马尔科夫预测的WSN状态判定算法[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(8): 41-45.

- [6] IYER R, KLEIN L. QoS control for sensor network [C]// Los Angeles: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, 2003.
- [7] MIKHAYLOV K, TERVONEN J. Optimization of microcontroller hardware parameters for wireless sensor network node power consumption and lifetime improvement [C]// Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2010 International Congress on. IEEE, 2010: 1150–1156.
- [8] 韩磊, 曹欲晓. 无线传感器网络能量模型及节能策略研究[J]. 信息与电脑, 2010(8): 93–94.
- [9] 缪新颖, 褚金奎, 杜小文. 基于大坝监测的无线传感器网络结构的设计[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 100–103.
- [10] 孙翔. 基于半马尔可夫链的无线传感器网络能耗模型研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2011: 27–33.
- [11] 何剑, 白光伟. 无线传感器网络 S-MAC 协议性能研究[J]. Computer Engineering, 2010, 36(24): 87–89.
- [12] 胡晓辉, 姜浩, 曾雪娜. 无线传感器网络模型的形式化建模与分析方法[J]. 计算机应用, 2010(7): 1722–1724.

Research on Node Energy Consumption of WSN in Small and Medium-sized Dams Based on Semi-Markov Chain

Tang Wenliang, Zhou Changyu

(School of Software, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The wireless sensor network technology provides a new approach for the small and medium-sized dams' monitoring. Since WSN nodes are battery powered and updating batteries periodically in dam environments is difficult, it's very important to optimize the energy consumption of WSN nodes in order to extend the whole life-cycle of WSN. This paper describes energy consumption distribution and strategies to reduce the energy consumption of WSN nodes. In addition, the algebraic model of the node energy consumption has been set up based on semi-Markov chain theory. In order to ensure the whole network to survive as long as possible, the node sleeping time should be prolonged by managing their energy consumption so that the energy consumption of the whole WSN can be decreased accordingly.

Key words: small and medium-sized dams; wireless sensor network (WSN); node energy consumption; semi-Markov chain theory