

一种基于改进的动态能量管理的无线传感器节点节能技术研究

陈高杰^{1,2} 陈章位¹ 姚雪庭¹

(浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)¹ (总装工程兵科研一所 无锡 214035)²

摘要 针对无线传感器节点的结构特点,以动态能量管理技术为出发点,结合实际应用场合,提出了一种改进的动态能量管理节能模式,建立了不同工作模式下的无线传感器节点能耗模型,并对不同工作模式下的能耗进行了量化分析。分析结果表明,改进后的动态能量管理技术能够有效地降低无线传感器的能量损耗。分析结果为下一步无线传感器节点的节能改进设计打下了良好的基础。

关键词 动态能量管理,无线传感器节点,节能技术

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.10.032

Research on Power-saving Technology for Wireless Sensor Node Based on Improved Dynamic Power Management (DPM)

CHEN Gao-jie^{1,2} CHEN Zhang-wei¹ YAO Xue-ting¹

(The State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)¹

(The First Engineers Scientific Research Institute of the General Armaments Department, Wuxi 214035, China)²

Abstract According to structural characteristics of the wireless sensor node, and the technology for dynamic power management, an improved dynamic power management was presented with real working conditions. Then some energy consumption models were established in different working conditions, and then analyzed in measurable way. The results show that the energy consumption for the wireless sensor node is decreased effectively after using the improved dynamic power management, and the analyzed results can lay a good foundation for further improved design of real wireless sensor node in energy saving condition.

Keywords Dynamic power management (DPM), Wireless sensor node, Power-saving technology

1 引言

无线传感器网络主要由无线传感器节点、网关和软件等部分组成,是现代传感技术、微机电系统、通讯技术、嵌入式计算技术和分布式信息处理技术等综合交叉起来的一个研究领域^[1]。其由于具有体积小、集成度高、成本和功耗低、功能多样化以及环境适应能力强等特点,是当前工业、农业、军事、环境、医疗等领域的研究热点之一,具有极其广泛的应用前景。

无线传感器网络的核心是无线传感器节点,其集数据采集、处理、存储与无线传输为一体,是无线传感器网络研究的重点所在。由于无线传感器节点采用电池供电,电池容量限制了无线传感器节点的连续工作时间,而在一些特殊场合下,这往往还会决定无线传感器节点的寿命。因此,研究无线传感器节点节能技术是目前研究传感器的重点和难点之一。

无线传感器节点节能技术研究主要有3个方向:1)通过选取低功耗元器件实现无线传感器硬件的节能,如文献[2],元器件一旦选定,无线传感器节点硬件的能耗就基本上确定;2)通过利用无线传感器节点外部环境中存在潜在的能源进行

能量转化补给,达到节能的目的,如文献[3],这不仅需要有能够转化的环境能,而且需要满足一定的实现途径,具有一定的局限性;3)通过动态能量管理方式,切换无线传感器的工作状态,以达到节能的目的,如文献[4],在结合特定的工作模式前提下,通过动态能量管理方式来优化传感器的休眠状态,以最大限度地探索无线传感器节点节能的可能性,这是目前大多数研究者重点关注的节能方式,其研究对象往往是大量部署在某个监测区域内的无线传感器节点,借助动态能量管理方式对经过其监测区域中物体的监测路径以及监测节点工作模式进行优化,以延长无线传感器节点的寿命。但被监测物体运动方向和无线传感器节点所处工作环境的不确定性,给无线传感器节点的工作进程带来了不确定性,同时由于采集到的数据需经过多个转移点进行传递,极易造成数据传输过程中的丢包现象,因此,这类研究方式离实际应用还存在一定的距离。

本文以动态能量管理技术为出发点,结合无线传感器节点特定的应用背景,提出一种改进的动态能量管理,对所应用的无线传感器节点进行节能目标分析,以探索节能效果。

到稿日期:2013-12-18 返修日期:2014-03-09

陈高杰(1980—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:cgjie_seu@126.com;陈章位(1965—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为信号处理、振动控制等;姚雪庭(1982—),男,硕士生,主要研究方向为可靠性分析。

2 动态能量管理的提出

2.1 无线传感器节点的构成

无线传感器节点硬件系统^[5]如图1所示,一般由传感采集模块、微处理模块、无线发射模块,以及电源管理模块等部分组成。各组成模块在正常工作情况下的能量消耗是不一样的,且在实际工作时,往往会出现1个或多个模块长时间处于闲置状态的情况,这对采用电池供电模式来说,是一种极大的能量浪费。若能够根据实际需要,在工作模块处于闲置状态时将其关闭,可有效地节省无线传感器节点能量损耗。无线传感器节点能量节省分布如图2所示,无线通信模块在各组成模块中消耗能量最多。除了通过关闭处于闲置状态的模块外,DVS^[6]实际是最有效的节能方式,它是通过改变工作模块的工作电压来改变其工作频率,进而达到节能的目的。

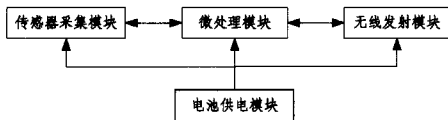


图1 无线传感器节点构成

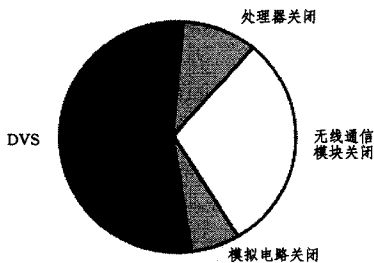


图2 无线传感器节点能量节省分布图

如何根据无线传感器节点工作进程,动态地将以上各节能状态进行优化组合,以最大限度地实现节点节能,这是动态能量管理所要研究的重点所在。

2.2 动态能量管理的基本内涵

动态能量管理^[7,8]是结合无线传感器节点的工作进程,根据无线传感器所处于的工作、闲置或休眠等状态,将其工作模式划分为5种休眠状态S0—S4,如表1所列^[9],相应地规定了5种不同休眠状态下功能模块的工作状态。随着睡眠模式的加深,无线传感器节点的休眠状态从S0到S4能耗逐渐降低,但切换到正常工作状态的时间也越来越长。传感器节点根据实际的工作状况以及对工作状态趋势的预测,动态切换到最佳休眠状态,从而达到了节能的目的。

表1 无线传感器睡眠状态表

状态	各模块耗能模式		
	传感器	微处理器	射频器
S0	开启	开启	收发
S1	开启	开启	接收
S2	待命	开启	接收
S3	休眠	开启	关闭
S4	关闭	关闭	关闭

无线传感器节点工作时的触发类型包括事件触发型和命令控制型两种^[10]。事件触发型是指无线传感器节点检测到相关事件时自主地将信息发送到基站中完成检测;命令控制型是在基站完成初始化后,无线传感器节点再将相应检测数据发送回基站以完成检测。

目前对于无线传感器节点节能技术研究的热点主要集中在事件触发型,这种基于事件触发型传感器节点在实际工作中若选择进入S4休眠状态,会遇到以下两方面问题:1)在整个布设的传感器网中该节点所检测的空间区域有足够多的、能够覆盖其工作范围的无线传感器节点,采用轮流工作模式实现节能,这种处理方式会非常复杂,也难以实现;2)通过概率统计和预测事件可能发展趋势切换到S4休眠状态来实现节能的目的,由于事件的随机性很强,采用这种方法会存在数据丢失的可能,离实际应用还有一定距离。

而对于命令控制型无线传感器节点,由于其对事物的检测规律是可控的,能够在检测前预先规范其工作状态,亦可在工作过程中中断或改变休眠状态,这种作业方式,能够将所研究的能量管理模式直接应用到实际的无线传感器节点中。

本文是对用于振动信号无线检测的传感器节点进行节能技术研究,该节点属于命令控制型,易于通过动态能量管理的方式实现节能,但需要对现有的动态能量进行改进设计,以达到进一步节能的目的。

2.3 动态能量管理的改进设计

基于WSN的无线检测系统的工作特点是区间性强,即无线传感器节点只需在关注时间段内连续进行数据的采集、处理、存储与发送,关注时间段一旦结束,无线传感器节点即可进入关闭状态。对于无线传感器节点来说,功耗最大的模块是无线发射模块,由于无线传感器在关注时间段内的工作连续性很强,此时若只采用传统的单个事件采集-处理-发射的循环模式,工作实时性很强,但此时无线传感器节点各模块均始终处于最大功耗状态,特别是无线发射模块,这大大影响了无线传感器节点的连续工作时间,且往往在很多情况下对无线检测系统的实时性要求并不是很高。为此,在满足实际使用前提下,为达到节能的目的,拟采用以下几种工作模式。

(1) 单个事件采集-处理-发射工作模式

传感器采集模块采集到的信息经微处理器模块采样处理后,在进行存储的同时,通过无线发射模块进行发射。在这种工作模式下,无线传感器节点工作实时性强,适合于信息采集实时性要求高的场所,但由于无线发射模块一直处于工作状态,无线传感器节点能耗相对较高。

(2) 定容量缓存、等时间间隔发送工作模式

微处理器模块采用定容量缓存方式对传感器采集模块采集到的数据进行存储,此时无线发射模块处于关闭状态,待存储单元满容量后,打开无线发射模块快速发射,而后转为关闭状态,同时,初始化存储单元以进行下一轮循环作业。在这种工作模式下,由于功耗最大的无线发射模块采用了定时工作方式,能够有效地降低无线传感器节点的能耗。

(3) 在工作模式(2)的基础上增加DVS调节

对微处理器模块供电电压进行可调设计,结合被测对象的工作特点,动态改变微处理器模块供电电压来改变其工作频率,以在满足实际测量需求的前提下,进一步降低其功耗。

(4) 关闭模式

无线传感器节点在完成关注时间段内检测任务后,立即进入关闭状态,以达到最佳节能模式。

对一些无线检测场合中的指定检测点来说,检测参数的种类往往会多于1个,这就要求传感器采集模块中设计多个传感器,如图3所示。为了便于实现,ADC往往是对传感器进行循环采样,这就使得当ADC对某个传感器采集数据采样

时,其他传感器处于无效工作模式,会严重影响到传感器采集模块的功耗。为此,在对传感器采集模块工作模式改进设计时,采用轮流开启模式,以进一步达到节能的目的。

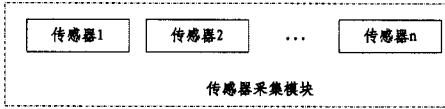


图3 传感器采集模块构成

根据以上分析,结合常规动态能量管理进行动态能量管理改进设计,如表2所列。

表2 改进后的无线传感器工作状态表

状态	各模块耗能模式		
	传感器n	微处理器	射频器
S0	定时开启	开启+存储	收发
S1	定时开启	开启+缓存	定时收发
S2	定时开启	开启+缓存+DVS	定时收发
S3	关闭	关闭	关闭

在进行无线检测前,首先对被测对象的工作特性进行分析,并制定相应的检测时间区间以及无线传感器节点的工作进程。当被测对象工作于敏感区且对数据检测实时性要求较高时,无线传感器节点进入S0,此时各工作模块均处于工作状态,此时无线传感器节点的功耗消耗较大;当被测对象工作于平缓区,且对数据检测实时性相对小时,无线传感器进入S1,此时数据经缓存后再定时发送,可有效地降低无线传感器节点的功耗;当被测对象工作于低变频区时,无线传感器节点进入S2,即在S1工作基础上,对微处理器模块进行DVS调节,此时根据被测对象的实时工作频率动态地调整ADC的采样频率、微处理器的工作频率以及射频器的开启频率,可最大限度地降低无线传感器节点的功耗;当检测时间达到预设的检测时间点时,无线传感器进入S4,此时所有模块均处于关闭状态,无线传感器节点的功耗为零。在实际无线检测任务中,被测对象往往是在实时性要求高的敏感区、实时性要求相对较低的平缓区以及低变频区间之间交替进行,因此,为最大限度地降低检测过程中的功耗,在实际检测过程中需要根据被测对象所处的工作状态,相应地将无线传感器的工作状态在S0—S3工作模式中动态地切换,直至完成检测任务后,切换到S4,其工作进程如图4所示。

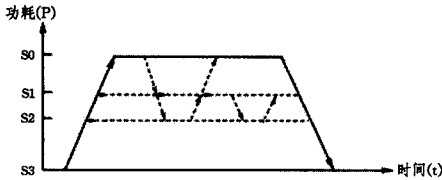


图4 无线传感器节点工作进程

基于以上分析,并结合表1可以看出,与常规动态能量管理模式相比,改进后的动态能量管理模式中最大的变化是减少了闲置与休眠两种睡眠状态,增加了多种正常工作模式,这是由命令控制型与事件触发型的特点所决定的。

3 基于动态能量管理节能模型建立

3.1 S0 工作状态下能耗模型

(1)传感器采集模块

假设无线传感器采集模块中含 n 个传感器,第 i 个传感器对应的额定功耗为 $P_{1,i}$ ($i=1,2,\dots,n$),在节点工作 t 小时

后,第 i 个传感器对应的工作时间为 t_i 。若 n 个传感器在 t 小时工作内任意时间点上始终保持单个传感器处于工作状态,则节点工作 t 小时后的传感器采集模块能量损耗表达式为:

$$E_{0,1} = \sum_{i=1}^n P_{1,i} \cdot t_i \quad (1)$$

$$s. t. t = \sum_{i=1}^n t_i \quad (2)$$

若传感器采集模块中所含的传感器均具有相同的额定功耗 P_1 ,则结合式(1)、式(2)可将节点 t 小时后的传感器采集模块能量损耗简化为:

$$E_{0,1} = P_1 \cdot t \quad (3)$$

(2)微处理模块

假设微处理模块的额定功耗为 P_2 ,额定工作时的采用频率为 f_1 ,从S0的工作过程来看,在 t 小时工作内,其始终处于额定状态,因此,其能量损耗表达式为:

$$E_{0,2} = P_2 \cdot t \quad (4)$$

(3)无线发射模块

假设无线发射模块发射时的额定功耗为 P_3 ,闲置时的额定功耗为 P_4 ,单次发射持续时间为 T_1 ,由于无线发射模块是在发射和闲置两种状态中转换,因此,在 t 小时工作内,其能量损耗为:

$$E_{0,3} = P_3 \cdot f_1 \cdot T_1 \cdot t + P_4 \cdot (1 - f_1 \cdot T_1) \cdot t \quad (5)$$

(4)总能耗

由式(3)一式(5)可知,无线传感器节点在S0工作模式下的总能耗为:

$$E_0 = [P_1 + P_2 + P_3 f_1 T_1 + P_4 (1 - f_1 T_1)] t \quad (6)$$

3.2 S1 工作状态下能耗模型

(1)传感器采集模块

由表2可知,无线传感器节点在S1工作状态下的能耗与S0相同,即:

$$E_{1,1} = E_{0,1} \quad (7)$$

(2)微处理模块

假设微处理模块的缓冲存储单元缓冲存储时间为 T_2 ,由表2可知,无线传感器节点在S1的工作状态与S0相似,此时有:

$$E_{1,2} = E_{0,2} \quad (8)$$

(3)无线发射模块

由于无线发射模块仅在发射时打开,其余时间处于关闭状态,因此,在 t 小时工作内,其能量损耗为:

$$E_{1,3} = P_3 \cdot \frac{t}{T_2} \cdot T_1 = \frac{P_3 \cdot T_1 \cdot t}{T_2} \quad (9)$$

(4)总能耗

由式(3)、式(4)及式(7)一式(9)可知,无线传感器节点在S1工作模式下的总能耗为:

$$E_1 = (P_1 + P_2 + \frac{T_1}{T_2} P_3) t \quad (10)$$

3.3 S2 工作状态下能耗模型

(1)传感器采集模块

由表2可知,无线传感器节点在S2工作状态下的能耗与S1相同,即:

$$E_{2,1} = E_{1,1} \quad (11)$$

(2)微处理模块

假设微处理模块负载电容为 C ,阈值电压为 V_t ,在工作电压为 V_i 时,其工作频率为 f_i ,此时,采用DVS^[11]后的能耗表达式为:

$$E_{2,2} = C \cdot V_i^2 f_i \cdot t \quad (12)$$

此时,缓冲存储单元的缓冲存储时间为:

$$T_3 = \frac{T_2 \cdot f_1}{f_i} \quad (13)$$

$$f_i = k \cdot \frac{(V_i - V_t)^2}{V_i} \quad (14)$$

式中, k 为常数。

(3) 无线发射模块

由表 2 可知,无线传感器节点在 S2 工作状态下的能耗表达式与 S1 类似,所不同的是缓冲存储时间发生了变化,此时有:

$$E_{2,3} = P_3 \cdot \frac{t}{T_3} \cdot T_1 = \frac{P_3 \cdot T_1 \cdot t}{T_3} \quad (15)$$

(4) 总能耗

由式(7)及式(11)~式(15)可知,无线传感器节点在 S2 工作模式下的总能耗为:

$$E_2 = [P_1 + k(CV_i^2 + \frac{T_1}{T_2 f_1} P_3) \frac{(V_i - V_t)^2}{V_i}] t \quad (16)$$

4 计算与结果分析

某采用三轴向 MEMS 加速度设计的无线加速度传感器节点的相关性能参数如表 3 所列。

表 3 无线传感器节点初始化性能参数

参量		参数值
传感器 (单个)	功耗	5mW
	频率响应	0~400Hz
	工作电压范围	0.9~2.2V
微处理器	最大工作频率	4kHz
	最大功耗	24mW
	发射时功耗	59.2mW
射频器	闲置时功耗	5.18mW
	发射持续时间	0.3 s

将以上参数代入式(1)~式(16),利用 Matlab^[12] 软件,计算基于改进的能量管理后的无线传感器节点的节能状态,结果如图 5 所示。

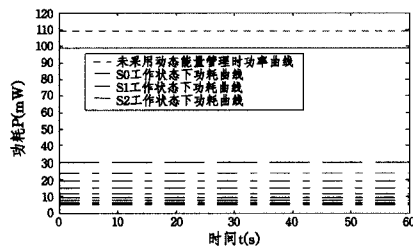
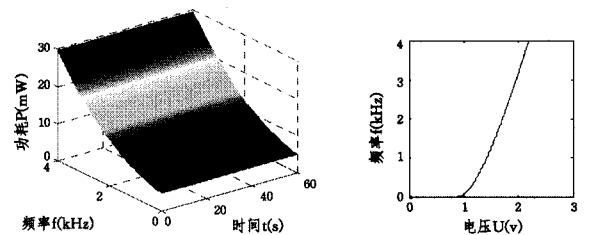


图 5 无线传感器节点不同工作状态下的功耗图

从图 5 可知,在未使用动态能量管理时,无线传感器节点功耗最大,达到了将近 110mW。采用动态能量管理后,随着工作模式的加深,其功耗得到了显著的降低,特别是在引进缓存概念后,如 S1 功耗曲线,其功耗能够从 100mW 左右迅速降低到 30mW 左右,节能效果显而易见。在 S2 工作状态下,由于微处理模块采用了 DVS 技术,可在满足实际需求的情况下,通过改变微处理模块的工作电压来改变其工作频率,以选择合适的功耗曲线,达到节能的目的。

无线传感器节点采用 DVS 技术时频率与功耗、电压与频率之间的关系曲线如图 6 所示。从图 6(a)中可看出,随着微处理模块工作频率的降低,其功耗也降低,因此,在实际测量作业过程中,可根据预先判断的被测对象的工作频率选取微

处理模块合适的工作频率,以达到最大化节能的目的。微处理模块的工作频率的改变可通过改变其工作电压来实现,如图 6(b)所示,根据微处理模块的工作频率需求,来调整相应的工作电压。



(a) 不同频率调节下的功耗图 (b) 采用 DVS 时电压-频率的关系

图 6 无线传感器节点采用 DVS 技术时的功耗图

图 7 示出当电池容量为 800mWh 时,无线传感器节点在不同工作状态下能够连续工作的最长工作时间。从图中可以看出,在未采用能量管理时,连续工作时间最短,为 7.3h。当无线传感器节点工作在 S0-S2 模式时,其连续工作时间可提高到 8.1h 到 160h 之间。当然,S2 模式下最低能耗实际是不可能出现的,因为此时的微处理模块的工作频率为 0,但其可作为能耗的理论边界条件,对实际的能量损耗评估起到一定的现实借鉴作用。

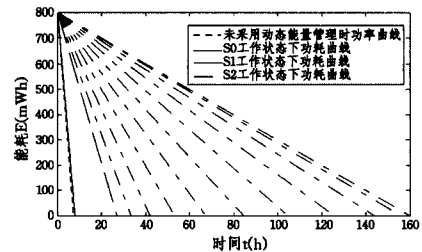


图 7 无线传感器节点不同工作状态下的能耗图

图 8 和图 9 分别示出了无线传感器节点在不同工作模式下基站接收数据时的迟滞情况。从图 8 中可以看出,无线传感器节点未使用能量管理和 S1 工作状态时,数据传输曲线最平滑(图中虚线与实际重合),这说明在这两种工作状态下的数据传输实时性最好,但结合两者的功耗和能耗曲线(如图 5、图 7)可知,S0 的工作状况更佳,因为在数据传输实时性相同的情况下,其功耗和能耗更低。当引入缓存概念后(如图 8 中的 S1 工作状态曲线图),如前所述,无线传感器节点的功耗得到了大幅度的降低,但随之带来的是其数据传输过程会出现迟滞现象,其部分数据随着缓存时间的增加而进一步延迟。从图 9 可知,无线传感器节点在 S2 工作模式下,当微处理模块工作频率从 4kHz 逐步降低到 1kHz 时,其数据传输的迟滞现象会越来越严重,这是因为当微处理模块中缓存模块容量一定时,随着微处理模块工作频率的降低,数据存储的时间也会变得越来越长。这说明 DVS 技术在降低无线传感器节点能耗的同时,也会使数据传输实时性变差。因此,对于 S2 工作模式,需要结合实际应用场合进行选用或约束:当实际应用场合对数据传输实时性要求比较低时,可直接选用即可满足实际使用要求;当实际应用场合对数据传输实时性要求较高时,需要对 S2 工作模式进行约束,即在满足最低数据传输速度要求的基础上,设定微处理器模块工作频率的下限,当 DVS 调节的频率高于微处理器模块工作频率下限时,按 DVS 所调节的频率进行工作,当 DVS 调节的频率低于微处理器模块工作频率下限时,则按微处理器模块工作频率下限值进行

工作,这样,能够在满足实际使用要求的前提下最大限度地降低无线传感器节点的功耗。

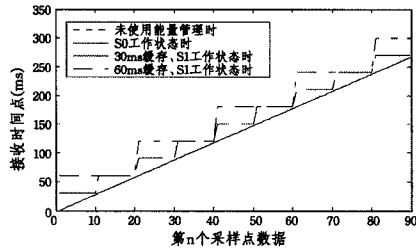


图8 不同工作状态下单向传感器采样数据接收时间点

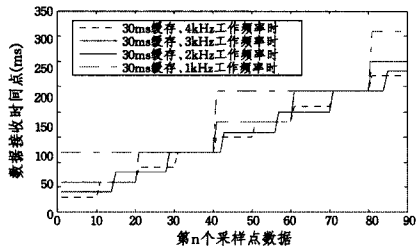


图9 S2工作状态和不同频率时单向传感器采样数据接收时间点

从以上分析可知:

(1)基于改进的动态能量管理后的无线传感器节点节能技术设计,能够有效地降低无线传感器节点的能耗,大大延长了无线传感器节点的连续工作时间;

(2)改进的能量管理将无线传感器节点的工作状态划分为3种不同的工作状态(关闭状态除外),这3种工作模式随着工作进程的加深,能耗降低,数据传输迟滞现象也越来越明显;

(3)根据实际测量对象特征,无线传感器设计的3种节能工作模式可调整为某一合适的工作模式,亦可动态地切换不同的工作模式,以在满足实际测量需要的同时,最大限度地节省能耗;

(4)根据实际被测对象对数据传输实时性要求的不同,选择合适的工作模式:当实时性要求高时,选择S0工作模式;当实时性要求不高时,可选择S1工作模式;当实时性要求不高,且被测对象特征频率较低时,可选择S2工作模式,并通过DVS技术将微处理模块的工作频率调整到与被测对象相一致,以提高无线传感器节点的环境适应性,最大限度地降低能耗。

结束语 本文从无线传感器节点各组成模块的能耗情况出发,分析了各组成模块节能的可能性,借鉴目前较多的基于事件触发型无线传感器节点的动态能量管理节能技术,将无线传感器节点各节能方式通过不同的节能组合模式,提出了基于命令控制型无线传感器节点的改进型动态能量管理技术,建立了无线传感器节点的能耗模型,并对不同工作模式下

的能耗进行量化分析。分析结果表明,提出的基于改进的动态能量管理的无线传感器节点节能技术能够有效地降低无线传感器的工作能耗,这为下一步无线传感器节点的节能改进设计打下了良好的基础。

当然,基于动态能量管理的无线传感器节点节能技术研究还可通过其他方式来实现,如,通过研究无线发射模块发射功率与距离的关系来动态地调整无线发射模块的发射功率,可进一步达到节能的目的,但此时需要引入定位技术,这也将增加无线传感器节点的耗能,且在某些场合由于无线传感器节点与基站的相对距离可能会相对固定,功率调整范围会相对较小,在这种情况下节能效果如何,还有待今后进一步研究。

参考文献

- [1] 杜晓通. 无线传感器网络技术与工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2010
- [2] 于凯,谢志军,金光,等. 低功耗无线传感器网络节点设计与实现[J]. 微电子学与计算,2012,29(9):157-159
- [3] Bhattacharjee D, Kumar S, Kumar A, et al. Design and Development of Wireless Sensor Node[J]. International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSSE), 2010, 2(7): 2431-2438
- [4] Sinha A. Dynamic power management in wireless sensor networks[J]. IEEE Design & Test of Computers, 2001(18): 62-74
- [5] 孙利明,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005
- [6] Li Xi, Zhang Hui. Dynamic Voltage Scaling in Wireless Sensor Networks[J]. Computer Simulation, 2008, 25(7)
- [7] Tian Feng-min, Chen Xiang-dong, Zhang Chuan-wu. ynamic power management in wireless sensor network[J]. Journal of Transducer Technology, 2005, 24(11)
- [8] Lin Chuan, He Yan-Xiang, Xiong Nai-xue. An Energy-Efficient Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks[C]// Fifth International Symposium on Parallel and Distributed Computing, 2006
- [9] Pantazis N A, Vergados D D. A Survey on Power Control Issues in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2007, 9(4): 86-107
- [10] 王雪. 无线传感器网络测量系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2007
- [11] Vasanth V, Michael F. Power Reduction Techniques for Micro-processor System[J]. ACM computing survey, 2005, 37(3): 195-237
- [12] 张志涌. 精通 MATLAB R2011a[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011

(上接第109页)

- [18] Li X, Lee T S, Liu Y. Hybrid generative-discriminative classification using posterior divergence [C]// 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011: 2713-2720
- [19] Wu Z, Li X, Zhao X, et al. Hybrid generative-discriminative recognition of human action in 3D joint space [C]// Proceedings of the 20th ACM international conference on Multimedia, 2012: 1081-1084
- [20] Rabiner L R. A tutorial on hidden Markov models and selected

applications in speech recognition [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(2): 257-286

- [21] Hu M, Ali S, Shah M. Learning motion patterns in crowded scenes using motion flow field [C]// Proceedings of the 19th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'08). Cite-seer, 2008
- [22] Cho M, MuLee K. Authority-shift clustering: Hierarchical clustering by authority seeking on graphs [C]// 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2010: 3193-3200