

无线传感器网络多轮任务调度算法

代亮, 沈中, 常义林, 张颖, 闫中江

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 为了充分地利用网络资源,提出了一种分群结构下的无线传感器网络多轮任务调度算法(WMTSA). WMTSA以可分负载理论为基础,根据各个群的任务处理速率按多轮方案将总任务从SINK节点下发给各个群.为了去除由节点间通信干扰导致的性能下降,SINK节点相继向各个群首发送每一轮的负载.每一轮各个群执行完数据采集任务并把数据融合后,也由群首将该轮数据相继向SINK节点报告,使得任务执行和通信更好地重叠,最终减少了整个应用的响应时间且提高了网络资源利用率.实验结果表明,WMTSA可合理地将总任务分配给网络中的各个节点,从而有效地减少了完成任务的耗时耗能.随着网络规模的增大,总任务完成时间可以减少40%.

关键词: 无线传感器网络;可分负载理论;多轮任务调度

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)06-0027-06

An Algorithm of Multi-Round Task Scheduling in Wireless Sensor Networks

DAI Liang, SHEN Zhong, CHANG Yilin, ZHANG Ying, YAN Zhongjiang

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A multi-round task scheduling algorithm (WMTSA) under clustering structure in wireless sensor networks is proposed to fully use the network resources. The WMTSA is based upon the divisible load theory and the tasks in SINK are distributed to every cluster head by multi-round according to the processing capacity of each cluster. The SINK sends tasks of each round to cluster head sequentially to remove performance degradation caused by communications interference. After each cluster finishing its tasks and fusing the data, the cluster heads send results of the round back to the SINK sequentially. The proposed algorithm could overlap the task-performing and the communication phase much better, reduce task completion time, and improve network resource utilization. Simulation results show that the algorithm enables tasks to be reasonably distributed to each node in wireless sensor networks, and effectively reduces both time-consuming and energy-consuming in completing tasks. It is found that with increasing size of networks, the task completion time is reduced by 40%.

Keywords: wireless sensor network; divisible load theory; multi-round task scheduling

由于无线传感器网络中的节点带有有限的能量,所以应该在最短的时间内完成系统任务.可分负载理论^[1]在无线传感器网络上的应用^[2-5]为其任务调度提供了一个有效的解决方案.与其他无线传感器网络任务调度问题的启发式解决方案^[6-7]不同,该

方案不仅可以得到最优解,而且可以得到解析解,从而保证了调度结果的一致性.

可分负载调度算法主要分为单轮调度算法^[2-5]和多轮调度算法^[8-9].单轮调度算法较为简单,但其计算和通信的重叠性比较差,额外的开销相对较大.

文献[2-5]中网络架构均为单层树结构,而在无线传感器网络中,与单层树型结构相比分群结构(即多层树形结构)具有很大优势^[10].多轮调度算法具有较好的计算和通信重叠性,较好地减少了调度的额外开销,但由于比较难以分析等原因,使得多轮调度算法的研究成果相对较少.已有的可分负载多轮调度算法都是基于集群计算环境设计的.

本文提出了一种分群结构下基于可分负载理论的无线传感器网络多轮任务调度算法(WMTSA),通过得到在网络中 SINK 节点给群首节点、群首节点给群内节点分配任务比例的最优解,使得 SINK 节点从分配任务到完全得到任务执行结果可在最优的轮数、最短的时间内执行完,并且能充分地利用网络资源.

1 问题描述

无线传感器网络在其生命周期里要进行多次分群,每次分群会有群建立和群稳定 2 个阶段. WMTSA 执行在群稳定阶段. 根据可分负载理论,为了去除通信的干扰和空闲导致的性能下降, SINK 节点相继向各个群首发送每一轮的负载. 每一轮各个群执行完数据采集任务并把数据融合后,也将该轮数据相继向 SINK 节点报告,即在每一时刻只允许 SINK 节点向一个群首发送负载,或一个群首向 SINK 节点返回融合后的数据. 为了保证负载在执行过程中的有序性,算法要求根据群任务处理速率来分配每轮的负载,以保证每轮各个群的负载执行时间相同.

定义 α_i 是群首节点分配给群内普通节点 n_i 的负载比例. 假设某个群有 k 个节点,则由定义可知

$$\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1 \quad (1)$$

若 s_i 是第 i ($i=1, \dots, k$) 个节点的数据采集速率,即单位时间内完成的采集任务数, b_i 是第 i 个节点到群首的链路通信速率,即单位时间内传送的任务数,则群中第 i 个节点 n_i 采集相应负载耗时为 α_i/s_i ,向群首报告结果耗时为 α_i/b_i .

群内节点接收到相应的负载后,同时开始采集数据. 假设群内节点共享同一信道,为了去除通信的干扰和空闲导致的性能下降,群内节点相继向群首报告采集结果,如图 1 所示.

对群首所得的负载最优的分配方案表示如下

$$\alpha_{i-1}/s_{i-1} = \alpha_i/s_i + \alpha_i/b_i, \quad i = 2, 3, \dots, k \quad (2)$$

令

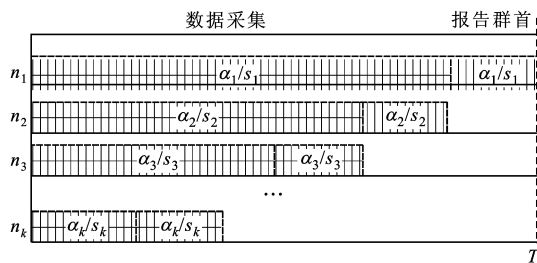


图1 群内节点任务处理时序图

$h_i = (1/s_{i-1})/(1/s_i + 1/b_i), \quad i = 2, 3, \dots, k \quad (3)$
可得到以上递归等式的通用表达式

$$\alpha_i = h_i \alpha_{i-1} \quad (4)$$

由图 1 及式(1)、式(4)可获得负载最多的节点的负载比例为

$$\alpha_1 = 1/(1 + \sum_{j=2}^k \prod_{i=2}^j h_i) \quad (5)$$

由式(4)可得其他节点获得的负载比例为

$$\alpha_i = \prod_{i=2}^j (h_i) / (1 + \sum_{j=2}^k \prod_{i=2}^j h_i) \quad (6)$$

该群完成数据采集和数据报告任务的时间为

$$T = (1/s_1 + 1/b_1) / (1 + \sum_{j=2}^k \prod_{i=2}^j h_i) \quad (7)$$

该群的任务处理速率为

$$S = (1 + \sum_{j=2}^k \prod_{i=2}^j h_i) / (1/s_1 + 1/b_1) \quad (8)$$

由此不难看出在同构网络环境下,各个群及群中节点的参数相同,其群任务处理速率为

$$S = (1 - h^k) / (1/s + 1/b)(1 - h) \quad (9)$$

式中: $h = (1/s)/(1/s + 1/b)$.

本文进行理论分析和仿真均是采用 LEACH 族协议^[11]. 对于多跳网络来说,多跳结构即多层树结构,可以在树中每个父节点进行文中式(2)~式(8)的计算. 以可分负载理论为原则,计算出无冲突情况下的各个父节点调度策略,可节省能量,延长网络寿命.

在无线传感器网络分群结构下,群首节点负责 SINK 节点和群内节点的数据交互. 为了减少冗余数据的传输耗能,降低延迟,延长网络的生存期,在群首节点需要进行数据融合^[12]. 在本文中,引入一种新的数据融合估算方法——信息效用常量^[5],该方法基于信息正确性估计技术,通过信息正确性估计,群首节点可以知道近似的数据融合比例.

2 调度策略

本文定义: W_{total} 为总负载大小(假设一个任务

代表一个单位负载); W_{ji} 为第 j 轮调度分配给第 i 个群的任务数; R_i 为第 i 个群的任务处理速率,即单位时间内处理的任务数; B_i 为 SINK 节点到第 i 个群首的下行链路的通信速率, B'_i 为第 i 个群首到 SINK 节点的上行链路的通信速率,即单位时间内传送的任务数; t_j 为第 j 轮调度的处理时间; W_j 为第 j 轮调度分配的总负载量; ϕ_i 为第 i 个群首进行数据融合的信息效用常量. 在第 j 轮,第 i 个群处理群内任务的时间为 W_{ji}/R_i ,SINK 节点给第 i 个群发送负载的时间为 W_{ji}/B_i ,第 i 个群给 SINK 节点发送融合后的数据的时间为 $\phi_i W_{ji}/B'_i$.

在现实的无线传感器网络环境下,通信时延和群内数据处理前的初始化工作是不可避免的,仿射成本^[7,12]参数 γ_i 表示第 i 个群的计算延迟即初始化计算所需的时间, β_i 和 β'_i 分别表示 SINK 节点和第 i 个群首间的相互链路通信延时.

本文假定群稳定阶段网络中一共有 n 个群,其中 $C_i(i=1,\cdots,n)$ 表示各个群.图 2 描述了多轮任务调度算法的调度过程.

由于第 j 轮调度中各个群的计算代价相同,所以有

$$\gamma_i + W_{ji}/R_i = t_j, j = 1, \cdots, M-1 \tag{10}$$

式中:第 j 轮调度的处理时间 t_j 只与调度轮数 j 有关; M 是最优的调度轮数.

第 j 轮调度时,所有群的负载之和等于第 j 轮调度分配的负载量

$$W_j = \sum_{i=1}^n W_{ji} \tag{11}$$

由式(10)、式(11)式可得

$$W_{ji} = a_i W_j + b_i \tag{12}$$

式中: $a_i = R_i / \sum_{k=1}^n R_k$; $b_i = (R_i / \sum_{k=1}^n R_k) \sum_{k=1}^n (R_k \gamma_i) -$

$R_i \gamma_i$.

如图 2 所示,为了更充分地利用链路带宽,避免不同轮调度之间出现群之间的等待现象,SINK 节点必须在第 n 个群完成其第 j 轮调度分配任务前,向所有群发送完第 $j+1$ 轮调度的负载块,并接收由所有 n 个群首返回的第 j 轮调度所融合的数据.当第 j 轮调度的群内节点处理时间正好等于 SINK 节点第 $j+1$ 轮调度向所有群发送负载块的通信时间与接收所有群首返回第 j 轮的融合后数据所需的通信时间之和,则可以取得最高的带宽利用率,这时有

$$\sum_{i=1}^n [(W_{j+1,i}/B_i) + \beta_i + (\phi_i W_{j,i}/B'_i) + \beta'_i] = t_j \tag{13}$$

由式(10)、(12)和式(13)可以得到

$$W_{j+1} = W_j * \frac{1 - \phi_i \sum_{i=1}^n (R_i/B'_i)}{\sum_{i=1}^n (R_i/B_i)} + \frac{\sum_{i=1}^n (R_i \gamma_i)}{\sum_{i=1}^n R_i \sum_{i=1}^n (\gamma_i/B_i)} - \frac{\sum_{i=1}^n (\beta_i + b_i/B_i + \beta'_i \phi_i b_i/B'_i)}{\sum_{i=1}^n (\gamma_i/B_i)} \tag{14}$$

简化式(14)可得

$$W_j = \theta^j (W_0 - \eta) + \eta \tag{15}$$

式中

$$\theta = [1 - \phi_i \sum_{i=1}^n (R_i/B'_i)] / \sum_{i=1}^n (R_i/B_i) \\ \eta = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i \gamma_i)}{[\sum_{i=1}^n (R_i/B_i) + \phi_i \sum_{i=1}^n (R_i/B'_i)] - 1}$$

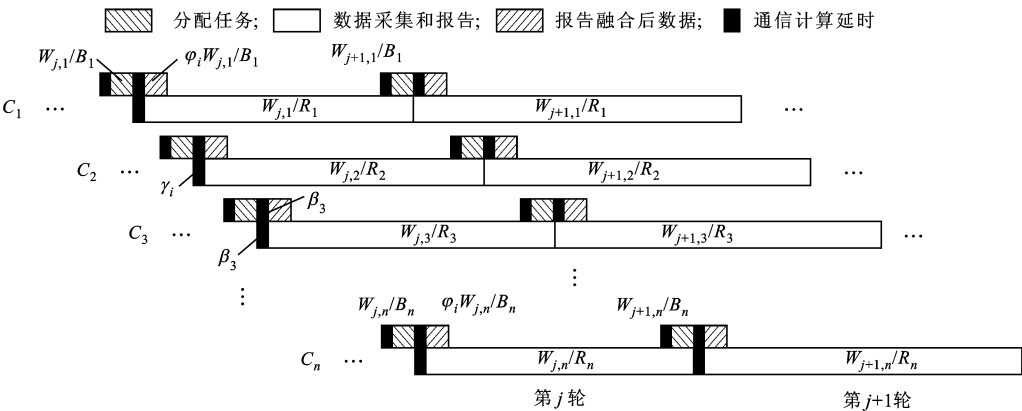


图 2 多轮任务调度算法的调度过程

$$\frac{\sum_{i=1}^n R_i \sum_{i=1}^n (\beta_i + b_i/B_i + \beta'_i \phi_i b_i/B'_i)}{[\sum_{i=1}^n (R_i/B_i) + \phi_i \sum_{i=1}^n (R_i/B'_i)] - 1}$$

又由总负载 W_{total} 等于所有调度轮次所处理的负载量之和

$$\sum_{j=0}^{M-1} W_j = W_{\text{total}} \quad (16)$$

可以得到以下的约束关系

$$G(M, W_0) = (W_0 - \eta)(1 - \theta^M)/(1 - \theta) + M\eta - W_{\text{total}} = 0 \quad (17)$$

由此可以得到调度算法关于最小化总任务完成时间^[7]的问题描述如下

$$EX(M, W_0) = \sum_{j=0}^{M-1} t_j + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [(W_{0,i}/B_i) + \beta_i + (\phi_i W_{M-1,i}/B'_i) + \beta'_i] \quad (18)$$

上述最小化问题可通过拉格朗日数乘法求解, $W_0 = (1 - \theta)/(1 - \theta^M)(W_{\text{total}} - M\eta) + \eta$, 求解出 W_0 和 M 以后, 可以通过式(12)、式(15)求得所有的负载块 $W_{j,i}$ 的大小。

3 能量消耗模型

本文提出了分群结构无线传感器网络中群内节点的能量消耗模型, 采用基于 LEACH 协议的一阶无线电模型来构造能量消耗模型。定义网络中节点采集、报告单位数据所消耗的能量分别为 e_s 、 e_{tx} , 报告和发送节点间的距离均为 d 。

根据一阶无线电模型, 可得第 i 个群中第 j 个节点的能量消耗为

$$E_{i,j} = \alpha_{i,j}(e_s + e_{tx}d^2), i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, n_i \quad (19)$$

4 仿真分析

本文采用 NS2 对传感器节点采集速度、节点间通信速度、计算延时和通信延时这 4 个系统参数在同构网络环境下, 对任务调度轮数, 总任务完成时间和群内节点能耗的影响进行了仿真分析。

在仿真中, 能量消耗参数如下所示: 在单位距离报告单位数据所消耗的能量为 $e_{tx} = 200$ nJ; 采集单位数据所消耗的能量为 $e_s = 100$ nJ; 报告、接收节点间的距离均为 $d = 100$ m, 每个群中有 20 个节点。

仿真中假设 SINK 节点和群首节点之间相互的链路通信延时相同, 即 $\beta = \beta'$ 。通信延时和群初始化延时对总任务最优调度轮数的影响如图 3 所示。从图中可以看出, 由于当通信延时和计算延时增大时, 每轮所分配的负载需要增大, 以满足第 2 节所述充分利用带宽的条件, 所以轮数会减少。

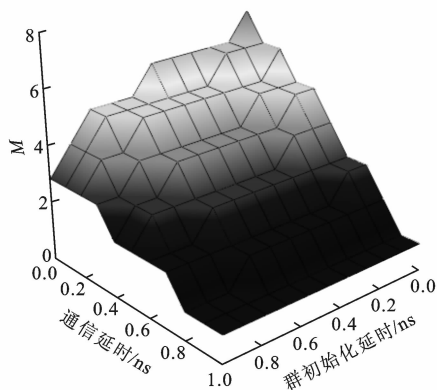
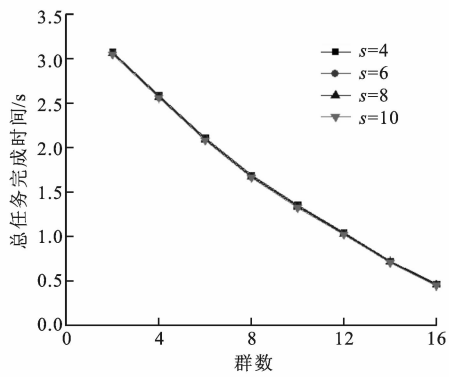


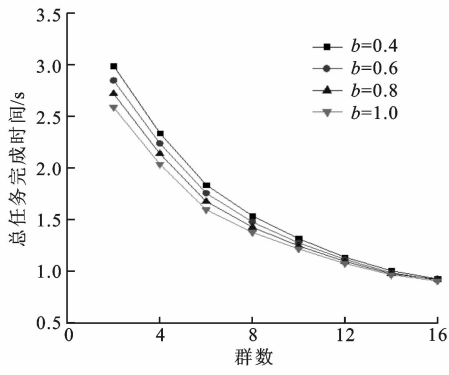
图3 通信与计算延时对最优调度轮数的影响

在仿真中, 假定所有节点间的链路通信速率相同, 即 $B = B' = b$ 。图 4 反映了随着群数目的增加, 传感器节点采集速度和通信速度对总任务完成时间的影响。在图 4a 中, 由于数据采集只占据了总任务完成时间的很小一部分, 所以传感器节点的数据采集速度的增大, 对系统完成时间的影响非常小。在图 4b 中, 随着群数目的增大, 系统的完成时间会减小, 节点间的通信速度越大, 系统完成时间减小的趋势越缓。图 5 反映了传感器节点采集速度和通信速度对群内节点能耗的影响。不失一般性, 在这里仅考虑网络中第 1 个群内节点的能耗情况。图 5a 表明, 群内节点采集数据的速度越大, 则群首可将负载更加均衡地分配给各个节点, 所以各个节点的能耗越小。图 5b 表明, 节点间的通信速度越大, 群内节点的能耗越小。

为了对异构网络环境下的调度算法进行仿真, 群内节点的采集速度(即归一化采集速度)取 $[4 \sim 10]$ 之间的随机数, 节点间的通信速度(即归一化通信速度)取 $[0.4 \sim 1.0]$ 之间的随机数。通过 8 次实验来分析异构网络环境下调度算法的性能, 图 6 反映了在异构网络环境下, 随着群数目的增加, 随机的节点采集速度和通信速度对总任务完成时间的影响, 图 7 反映了群内任务分配的节点序号。随机的采集速度和通信速度对群内节点能耗的影响。采集速度对总任务完成时间和能耗的影响比通信速度的影响小, 随着群数目的增大和群内任务分配节点序号数

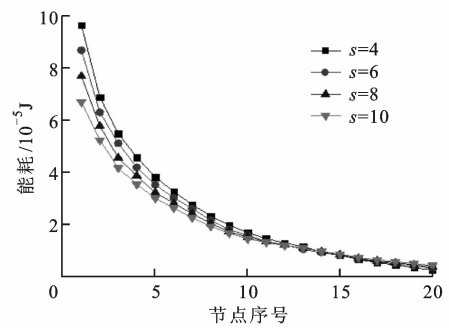


(a)采集速度的影响

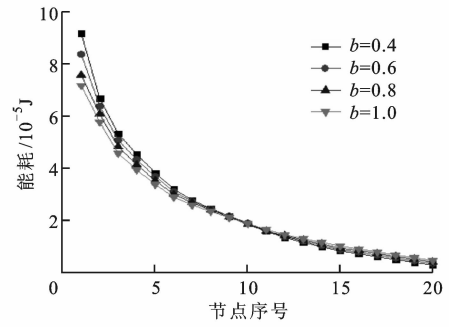


(b)带宽的影响

图 4 节点采集速度与带宽对总任务完成时间的影响



(a)采集速度的影响



(b)带宽的影响

图 5 节点采集速度与带宽对群内节点能耗的影响

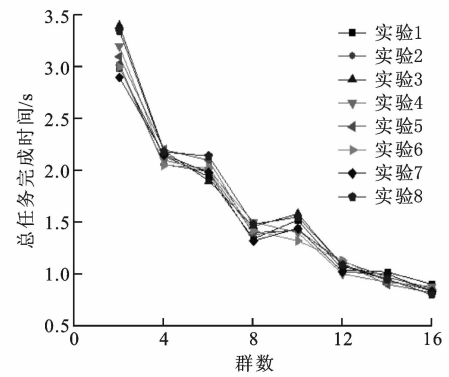


图 6 随机采集速度与带宽对总任务完成时间的影响

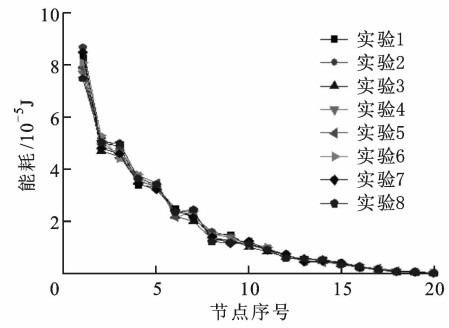


图 7 随机采集速度与带宽对能耗的影响

的增加,总任务完成时间和能耗均是递减.

5 结束语

本文提出了一种分群结构下基于可分负载理论的无线传感器网络多轮任务调度算法(WMTSA).通过得到在网络中 SINK 节点给群首节点、群首节点给群内节点分配任务比例的最优解,以使 SINK 节点从分配任务到完全得到任务执行结果在最优的轮数、最短的时间内执行完,并且能充分地利用网络资源.

参考文献:

[1] BHARADWAJ V, GHOSE D, ROBERTAZZI T G. Divisible load theory: a new paradigm for load scheduling in distributed systems [J]. Cluster Computing, 2003, 6(1): 7-18.

[2] MOGES M, ROBERTAZZI T G. Wireless sensor networks: scheduling for measurement and data reporting [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1):327-340.

[3] LIU Haoying, YUAN Xiaojing, MOGES M. An efficient task scheduling method for improved network delay in distributed sensor networks [C]// Proceedings of Trident Com 2007. Piscataway, NJ, USA: IEEE,

- 2007:1-8.
- [4] LIU Haoying, SHEN Jian, YUAN Xiaojing, et al. Performance analysis of data aggregation in wireless sensor Mesh networks[C]//Proceedings of Earth & Space 2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008:1-8.
- [5] CHOI K, ROBERTAZZI T G. Divisible load scheduling in wireless sensor networks with information utility performance [C] // Proceedings of IPCCC 2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008:9-17.
- [6] ZENG Zhiwen, LIU Anfeng, LI Deng, et al. A highly efficient DAG task scheduling algorithm for wireless sensor networks [C] // Proceedings of ICYCS2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 570-575.
- [7] LIN Jianyong, XIAO Wendong, LEWIS F L, et al. Energy-efficient distributed adaptive multisensor scheduling for target tracking in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(6):1886-1896.
- [8] YANG Yang, VAN DER RAADT K, CASANOVA H. Multiround algorithms for scheduling divisible loads[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2005,16(11):1092-1102.
- [9] 康雨,闫相国,郑崇勋,等. 任意可分负载的多轮调度算法[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(8):125-129.
- KANG Yu, YAN Xiangguo, ZHENG Chongxun, et al. A multi-round scheduling algorithm of data-collection for divisible workload [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(8): 125-129.
- [10] 王毅,张德运,梁涛涛. 无线传感器网络分区能耗均衡的非均匀分簇算法[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(4):389-394.
- WANG Yi, ZHANG Deyun, LIANG Taotao. Cell energy balanced uneven clustering hierarchy scheme for wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(4):389-394.
- [11] 王毅,张德运,陈海荣. 无线传感器网络汇聚节点动态功耗管理方法[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 138-142.
- WANG Yi, ZHANG Deyun, CHEN Hairong. Dynamic power management of sink node of wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(2):138-142.
- [12] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A. An application-specified protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4):660-670.

(编辑 刘杨)

我校姚学玲副教授获得“发明创业奖”特等奖

2010年4月22日,第四届“发明创业奖”颁奖大会在北京人民大会堂隆重开幕,全国人大常委会副委员长、中国工程院院士桑国卫在大会上讲话并为获奖者颁奖. 出席颁奖大会的还有中国发明协会理事长朱丽兰、科技部副部长张来武、国家知识产权局副局长鲍红等国家相关部门领导. 我校姚学玲副教授获得此次“发明创业奖”特等奖,并被授予“当代发明家”荣誉称号.

“发明创业奖”是经国家奖励办批准、由中国发明协会设立的科技奖励,主要奖励具有自主知识产权的重要技术发明和创新,以及在实际生产中应用和产业化方面做出突出贡献的发明人. 每届“发明创业奖”获奖人数不超过50名,其中特等奖获得者不超过10名.

(来源:西安交大科技在线 <http://www.xjtust.com>)