

文章编号: 1000-8152(2011)04-0596-05

无线传感器网络跳数和通信距离自适应差错控制策略

靳 勇¹, 乐德广¹, 白光伟², 常晋义¹

(1. 常熟理工学院 计算机科学与工程学院, 江苏 常熟 215500; 2. 南京工业大学 计算机科学与技术系, 江苏 南京 210009)

摘要: 无线传感器网络(WSNs)的动态信道特性、网络带宽和节点能量受限等特点, 使得在无线环境下为数据传输提供可靠性保证面临更大的挑战. 本文提出一种适用于WSNs的自适应链路层差错控制策略(AEC-Hops/RSSI), 以便改善WSNs的通信性能. 首先建立数学模型, 分析数据帧被转发所经历的跳数与能效的变化规律, 然后分析前向纠错(FEC)、自动重传请求(ARQ)和Chase合并的混合自动重传请求(HARQ)能效与数据帧的发送节点与下一跳接收节点之间的通信距离之间的规律, 最后根据跳数原则和通信距离原则建立一种自适应差错控制策略, 为数据帧选择最佳差错控制策略. 数学分析表明, 该策略有效地提高了WSNs中多媒体数据传输的可靠性同时保持高效.

关键词: 无线传感器网络; 接收的信号强度指示; 自适应差错控制; 误帧率; 性能评价

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

Adaptive error control scheme for wireless sensor networks based on hops and communication distance

JIN Yong¹, LE De-guang¹, BAI Guang-wei², CHANG Jin-yi¹

(1. Scholl of Computer Science and Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu Jiangsu 215500, China;

2. Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing Jiangsu 210009, China)

Abstract: The reliability guarantee of data delivery over wireless sensor networks(WSNs) is a big challenge due to the unreliable and dynamic characteristics of WSNs, limited bandwidth and battery power of sensor nodes. This paper proposes an adaptive error control mechanism for WSNs, called AEC-Hops/RSSI, in order to improve the communication performance of WSNs. First, based on the mathematical analysis model, the characteristics of the hops of link layer frames with the energy consumption is researched deeply. Second, the feature of communication distance between sending node of link layer frames and next-hop receiving node with the energy efficiency is discussed, which is between forward error correction(FEC), automatic repeat request(ARQ) and chase combing hybrid ARQ(HARQ). Finally, according to the above analytical results, an adaptive error control mechanism(AEC-Hops/RSSI) is proposed, which can improve the performance of WSNs communication by scheduling the optimal error control mechanisms. The mathematical analysis shows that the AEC-Hops/RSSI mechanism achieves better performance compared with FEC, ARQ and HARQ, in terms of communication reliability and energy efficiency in WSNs.

Key words: wireless sensor networks; received signal strength indicator; adaptive error control; frame error rate; performance evaluation

1 引言(Introduction)

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)的节点能量、处理能力、存储能力和通信能力都很有限, 节点生存周期取决于节点能量消耗, 这使得传感器节点不仅要有低功率的能耗, 能量高效的通信协议, 而且要有低能耗的差错控制策略以保证数据可靠传输.

随着WSNs差错控制策略研究的不断深入, 已经取得了一些成果^[1~3]. 文献[1]在星型单跳WSNs中, 基于轻量级传感器节点和能量充足的基站之间的非对称性提出了一种混合前向纠错/自动重传请求

(forward error correction/automatic repeat request, FEC/ARQ)策略, 不过并未深入研究数据帧被转发所经历跳数对于选择差错控制策略性能的影响. 文献[2]给出了多链路优于单链路策略的满足性条件, 指导传感器节点通过收集局部信道质量和邻居情况选择最佳的转发策略、链路数等, 优化网络性能; 但是ARQ通过重传数据包来纠正该数据包内几个字节甚至几个比特的错误, 降低了数据传输的能效. 文献[3]分析了ARQ和FEC的能效, 并证明了Chase合并混合自动请求重传HARQ策略可以满足WSNs的不同链路对差错控制策略的差异性要求, 但是在

收稿日期: 2010-03-15; 收修稿日期: 2010-08-23.

基金项目: 江苏省“六大人才高峰”资助项目(09-D); 常熟理工学院教师科研启动基金资助项目(KY2009024); 常熟理工学院青年教师科研启动基金资助项目(QZ0911); 国家自然科学基金资助项目(61073197); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2010548).

分析FEC能效时, 采用了BCH编码算法, 然而RS编码^[4]非常适合于数据帧的丢失或出错进行差错控制^[5].

针对以上不足, 本文深入分析和研究WSNs协议机制和分层次的网络体系结构的特点, 主要做了以下几方面工作:

- 1) 通过数学模型分析了数据帧所经历跳数对于WSNs能耗的影响得到跳数原则;
- 2) 通过数学模型分析了不同差错控制策略与发送节点与下一跳接收节点之间的通信距离的关系, 得到通信距离原则;
- 3) 依据1)和2)的分析结论, 提出了一种自适应差错控制策略(AEC-Hops/RSSI), 并通过数学分析证明了该策略的高能效和高可靠性.

2 跳数和通信距离原则(Principle of hops and communication distance)

2.1 跳数原则(Principle of hops)

图1给出了一种WSNs拓扑结构. 传感器节点 N_1 向节点 N_N 发送一个数据帧记为LLF.

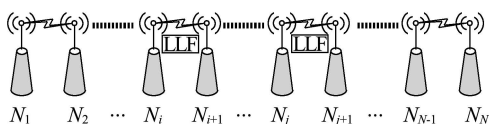


图1 一种WSN拓扑结构
Fig. 1 Topology of a WSN

从节点 N_1 到 N_x (LLF(x))传输LLF的总能耗如公式(1)所示.

$$E_{total}(LLF(x)) = \sum_{p=1}^{x-1} E_{hop-p}, \quad 2 \leq x \leq N, \quad (1)$$

其中 E_{hop-p} 是从节点 N_p 到节点 N_{p+1} 传输LLF的能耗.

如果LLF在节点 N_i, N_j 之后丢失, 为了从节点 N_1 到 N_i (LLF(i)), N_j (LLF(j))传输LLF而消耗的能量分别为 $E_{total}(LLF(i))$ 和 $E_{total}(LLF(j))$. 假设 $j \geq i$, 则根据公式(1)可以得到

$$E_{total}(LLF(j)) - E_{total}(LLF(i)) = \sum_{p=i}^{j-1} E_{hop-p} \geq 0.$$

可以看出, LLF(j)的能耗大于LLF(i)的能耗. 表明在WSNs中, 数据帧被转发所经历跳数越多其消耗的能量越多. 如果该数据帧丢失则应为其选择一种高可靠性的差错控制策略以保证该数据帧能够正确到达接收端, 避免过多能量的浪费. 因此, 应该根据被转发所经历跳数为不同的数据帧选择不同的差错控制策略即跳数原则.

2.2 通信距离原则(Principle of communication distance)

ARQ和HARQ的能效参照文献[3]所述. 分析FEC能效时, 主要考虑传感器节点发送和接收数据帧的能耗, 以及传感器节点启动能耗和使用RS编码算法对数据帧的解码能耗. RS编码算法的编码能耗相对于解码能耗而言很小, 所以被忽略^[6].

因此, FEC能效可表示如下:

$$\eta = (E_{eff}^{FEC} / E^{FEC})(1 - P_{FEC}), \quad (2)$$

$$E_{eff}^{FEC} = (I_{tr} I_{re}) V_{radio} (\ln k / \log 2) T_{tr}, \quad (3)$$

$$E^{FEC} = E_{start} + (I_{tr} I_{re}) V_{radio} (\log n / \log 2 + \alpha) T_{tr} + E_{dec}, \quad (4)$$

其中: E_{start} 表示传感器节点启动能耗, 而 E_{dec} 表示RS(n, v)编码算法解码能耗^[7], FEC的误帧率 P_{FEC} 为

$$P_{FEC} = 1 - \sum_{l=k}^n \binom{n}{l} (1 - p_b)^l p_b^{n-l}. \quad (5)$$

根据上文分析, 得到FEC, ARQ和HARQ的能效变化趋势如图2所示. 其仿真环境和参数设置详见第4节.

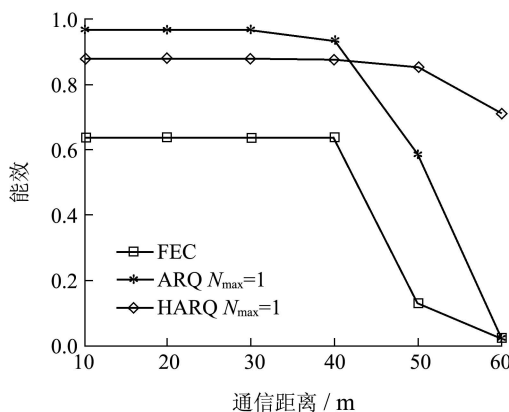


图2 FEC, ARQ和HARQ能效分析, 数据帧长为640字节
Fig. 2 Energy efficiency of FEC, ARQ and HARQ length of frame is 640bytes

分析图2, 发现在数据帧长为640字节时, 当一跳通信距离小于40 m时, ARQ为最优的差错控制策略. 当一跳通信距离大于40 m时, ARQ, FEC和HARQ的能效都开始下降. 而对于HARQ, 能效虽有所下降, 但在通信距离较大时仍然保持了比较好的性能. 数据帧长为1280字节时ARQ, FEC和HARQ的能效随通信距离的变化分析结论与图2相同.

综上所述, 一跳通信距离不同时, 应为丢失的数据帧选择不同的差错控制策略以便在提高可靠性的同时保持高能效即通信距离原则.

3 WSNs自适应链路层差错控制策略(Link layer adaptive error control mechanism for WSNs)

为了能够测量发送节点和接收节点之间一跳通信距离, 本文引入接收信号强度指示器(received signal strength indicator, RSSI)测距技术. 根据文献[8]可以得到采用RSSI测距技术得到的发送节点和接收节点间一跳通信距离RSSI(dc):

$$\text{RSSI}(dc) = P_T - P_L(dc_0) - 10n \log_{10}(dc/dc_0) + X_\sigma, \quad (6)$$

其中: P_T 表示传输能耗, $P_L(dc)$ 表示经过距离 dc 后的路径损耗(dbm), 为参考距离: dc_0 是平均值为0的高斯分布随机变数, 其标准差 $X_\sigma = N(0, \sigma^2)$, 取4-10.

在RSSI测距技术和第2节中的两个原则基础上, 本节提出一种适用于WSNs的自适应地为每一个数据帧选择最佳差错控制策略. 图3给出了WSNs中一个传感器节点的AEC-Hops/RSSI的体系结构, 在AEC中包括了3种差错控制策略, 即FEC, ARQ和HARQ.

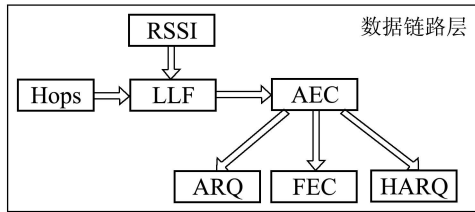


图3 AEC-Hops/RSSI的体系结构

Fig. 3 Architecture for AEC-Hops/RSSI

AEC-Hops/RSSI控制策略算法描述如下:

步骤1 监听信道, 判断当前发送的LLF是否丢失; 若未丢失, 继续发送缓冲队列中的LLF; 否则, 启用AEC-Hops/RSSI控制策略, 且该丢失的数据帧记为Lost_LLF;

步骤2 启用Hops模块统计Lost_LLF经历跳数记为hop_count(Lost_LLF), RSSI模块测量发送Lost_LLF的节点与下一跳接收节点之间一跳通信距离记为RSSI(Lost_LLF);

步骤3 设置阈值 θ_1 和 θ_2 ;

步骤4 启用LLF模块, 根据当前网络状态分析得到hop_count(Lost_LLF)和RSSI(Lost_LLF)的值, 并据此为Lost_LLF自适应地选择一种最佳的差错控制策略;

步骤5 如果hop_count(Lost_LLF) $\in (0, \theta_1)$, 则为Lost_LLF选择FEC策略; 如果hop_count(Lost_LLF) 大于 θ_2 , 则选择HARQ策略; 如果hop_count(Lost_LLF) $\in (\theta_1, \theta_2)$ 且RSSI(Lost_LLF)大于40, 则选择HARQ策略, 否则选择ARQ策略;

步骤6 输出最优解, 发送该Lost_LLF, 然后转至步骤1.

根据上文AEC-Hops/RSSI算法描述, 给出AEC-Hops/RSSI能效公式, 如式(7)所示.

$$\eta_{\text{AEC-Hops/RSSI}} = \frac{(m \sum_{i=1}^x \eta_{\text{FEC}} + n \sum_{j=1}^y \eta_{\text{ARQ}} + p \sum_{K=1}^z \eta_{\text{HARQ}}) / (x + y + z), \quad (7)$$

其中:

$$m = \begin{cases} 1, & \text{hop_count(Lost_LLF)} \in (0, \theta_1), \\ 0, & \text{hop_count(Lost_LLF)} \notin (0, \theta_1), \end{cases}$$

$$n = \begin{cases} 1, & \text{hop_count(Lost_LLF)} \in (\theta_1, \theta_2), \\ & \text{和 RSSI(Lost_LLF)} \leq 40, \\ 0, & \text{hop_count(Lost_LLF)} \notin (\theta_1, \theta_2), \end{cases}$$

$$p = \begin{cases} 1, & \text{hop_count(Lost_LLF)} > \theta_2, \\ & \text{或 RSSI(Lost_LLF)} > 40, \\ 0, & \text{hop_count(Lost_LLF)} \leq \theta_2, \end{cases}$$

$\eta_{\text{AEC-Hops/RSSI}}$ 是AEC-Hops/RSSI能效, x, y, z 分别表示采用了FEC, ARQ和HARQ策略的数据帧数量.

4 性能分析与评价(Performance evaluation)

本节针对WSNs树型拓扑结构(如图4所示, θ_1 和 θ_2 分别取1和2), 其中有100个数据帧以平均概率在节点A到B, B到C和E到C之间一跳传输时出错或丢失. 假设传感器节点A和F分别向节点D发送500个数据帧, 以这100个丢失的数据帧为研究对象, 依据AEC-Hops/RSSI算法为其选择不同的差错控制策略, 统计并分析得到AEC-Hops/RSSI能效和误帧率, 然后与FEC, ARQ和HARQ能效和误帧率对比分析, 如图5和6所示.

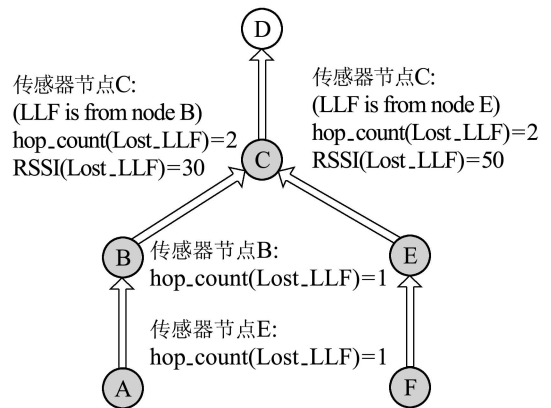


图4 AEC-Hops/RSSI体系结构

Fig. 4 Architecture for AEC-Hops/RSSI

数学分析中, ARQ, HARQ和AEC-Hops/RSSI最大重传次数 N_{max} 取1; FEC采用RS(255, 223)编码器. 所用到的仿真参数是基于Crossbow公司的基于

Atmega128L处理器^[9]和CC1000射频模块^[10]的Mica2型节点^[11]的WSNs平台^[12], 见表1.

表 1 参数设置
Table 1 Parameter settings

符号	名称	数值
l_{ACK}	ACK包长	7 byte
V_{radio}	CC1000电压	3 V
I_{tr}	CC1000发射端电流	8.5 mA
I_{re}	CC1000接收端电流	7 mA
E_{start}	传感器节点启动能耗	2.5 nJ/frame

图 5 给出了数据帧长为 640 字节时, FEC, ARQ, HARQ 和 AEC-Hops/RSSI 能效. AEC-Hops/RSSI 能够根据通信距离原则自适应地为丢失的数据帧选择最佳的差错控制策略, 所以数据帧长不同时, 随着通信距离的增大, AEC-Hops/RSSI能效与FEC, ARQ和HARQ相比始终保持最高. 数据帧长为1280字节时结论相同.

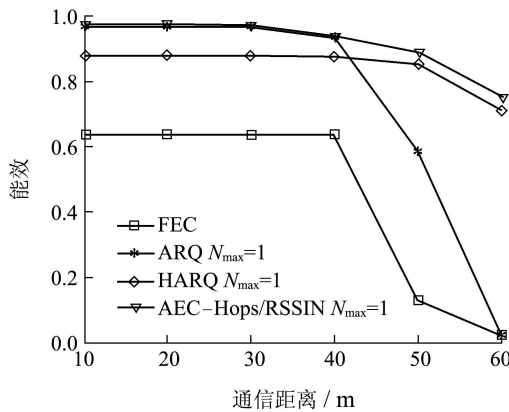
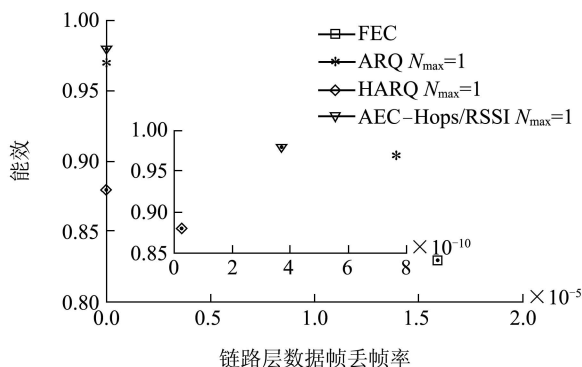


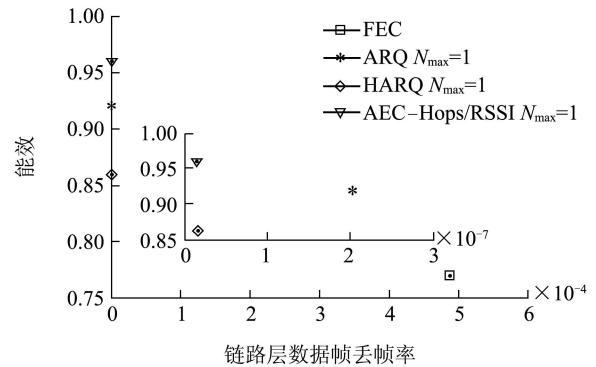
图 5 FEC, ARQ, HARQ和AEC-Hops/RSSI能效分析, 数据帧长为640字节

Fig. 5 Energy efficiency of FEC, ARQ, HARQ and AEC-Hops/RSSI, Length of frame is 640bytes

图6(a)和图6(b)表明AEC-Hops/RSSI与FEC, ARQ和HARQ相比, 在提供高可靠性的同时保持了高能效, 具有更好的性能. 图5和6综合表明, AEC-Hops/RSSI是整体最优的差错控制策略.



(a) 帧长为640 bytes, 通信距离为90 m



(b) 帧长为1280 bytes, 节点A和D间通信距离为120 m

图 6 ARQ, FEC, HARQ 和AEC-Hops/RSSI误帧率比较
Fig. 6 Comparisons of the energy efficiency and reliability between ARQ, FEC, HARQ and AEC-Hops/RSSI

5 结束语(Conclusions)

针对WSNs的数据传输, 本文分析了数据帧所经历跳数和通信距离两方面的特性, 并据此提出了一种AEC-Hops/RSSI策略为每一个丢失的数据帧选择最佳的差错控制策略. 在AEC-Hops/RSSI策略中, 可以根据当前WSNs网络状态选择跳数原则中的两个阈值, 适应动态变化的无线网络, 更好地为数据传输提高可靠性同时保证高能效. 数学分析表明该策略可以适应WSNs的动态变化特性, 自适应地选择最佳数据发送模式和差错控制策略.

下一步工作是针对不同的拓扑结构、最大重传数以及数据帧长对AEC-Hops/RSSI策略进行性能分析, 建立阈值 θ_1 和 θ_2 的动态选取机制, 并进一步优化各功能模块及其算法, 降低该策略总体计算复杂度, 提高其对于动态网络的适应能力以提高工作效率并保持低能耗.

参考文献(References):

- [1] DANIEL S, MATTHIAS B, NORBERT W. Error correction in single-hop wireless sensor networks-a case study[C] // *Proceedings of Design, Automation & Test in Europe*. New York: IEEE, 2009: 1296 – 1301.
- [2] 朱红松, 徐勇军, 李晓维. 传感器网络中基于ARQ的多链路转发模型分析[J]. *计算机研究与发展*, 2009, 46 (7): 1074 – 1085. (ZHU Hongsong, XU Yongjun, LI Xiaowei. Model analysis for ARQ based multi-link forwarding strategy in WSN[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2009, 46 (7): 1074 – 1085.)
- [3] 田真, 袁东风, 梁泉泉. 无线传感器网络差错控制技术的能效分析[J]. *通信学报*, 2008, 29(11): 77 – 83. (TIAN Zheng, YUAN Dongfeng, LIANG Quanquan. Comparison of error control schemes in wireless sensor networks[J]. *Journal on Communications*, 2008, 29 (11): 77 – 83.)
- [4] CHOCKALINGAM A, ZORZI M, RAO R R. Performance of TCP on wireless fading links with memory[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Communication*. New York: IEEE, 1998, 1: 595 – 600.
- [5] SANKARASUBRAMANIAM Y, AKYILDIZ I F, MCLAUGHLIN S W. Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks[C] // *Proceedings of the 1st IEEE International Work-*

- shop on Sensor Network Protocols and Applications*. New York: IEEE, 2003: 1 – 8.
- [6] GOEL M, SHANBHAG N R. Low-power channel coding via dynamic reconfiguration[C] // *Proceedings of International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*. New York: IEEE, 1999, 4: 1893 – 1896.
- [7] GOEL M, SHANBHAG N R. Low-power channel coding via dynamic reconfiguration[C] // *Proceedings of International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 1999, 4: 1893 – 1896.
- [8] GUO Z W, GUO Y, HONG F. Perpendicular intersection: locating wireless sensors with mobile beacon[C] // *Proceedings of The 29th IEEE Real-Time Systems Symposium*. Piscataway, N J: IEEE, 2008: 93 – 102.
- [9] ATMEL CORP. ATmega128 datasheet[EB/OL]. [2009-12-1], http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/8151S.pdf.
- [10] CHIPCON CORP. CC1000 datasheet[EB/OL]. [2009-12-1], <http://focus.ti.com/lit/ug/swru058/swru058.pdf>.
- [11] CROSSBOW CORP. Mica2 datasheet[EB/OL]. [2009-12-1], http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/6020-0043-01_A_MICA2DOT.pdf.
- [12] SHNAYDER V. Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications[C] // *Proceedings of 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. Baltimore, MD, USA: ACM Press, 2004: 188 – 200.

作者简介:

靳 勇 (1981—), 男, 硕士, 目前研究方向为多媒体网络、无线传感器网络、差错控制等, E-mail: jinyong@cslg.edu.cn;

乐德广 (1975—), 男, 博士, 教授, 目前研究方向为计算机网络安全与下一代互联网技术等, E-mail: ledeguang@gmail.com;

白光伟 (1961—), 男, 博士, 教授, 目前研究方向为网络体系结构和协议、性能分析与评价等, E-mail: guangweibai@yahoo.com.cn;

常晋义 (1955—), 男, 教授, 目前研究方向为空间决策支持系统、数据库安全技术等, E-mail: cji@cslg.edu.cn.

下 期 要 目

- 网络任务的脉冲响应模型与预测控制调度策略 陈迎迎, 李艳君, 吴铁军
- 采用幂次趋近律的滑模控制稳态误差界 李 鹏, 马建军, 郑志强
- 滑模动态递归模糊神经网络船电推进复合控制 张桂臣, 马 捷
- 基于半监督学习的变种群规模区间适应值交互式遗传算法 孙晓燕, 任 洁, 巩敦卫
- 应用阶数自学习自回归隐马尔可夫模型对控制过程异常数据的在线检测 刘 芳, 毛志忠
- 基于能效优化的两足机器人步态控制方法 王丽杨, 刘 治, 曾小杰, 章 云
- 基于 L_2 干扰抑制的水下机器人三维航迹跟踪控制 张利军, 贾鹤鸣, 边信黔, 严浙平, 程相勤
- 单相有源电力滤波器非线性统一控制策略 乐江源, 谢运祥, 公伟勇, 张 志
- 一类具有积分输入到状态稳定未建模动态的高阶非线性系统的状态反馈调节
..... 段 纳, 王 璐, 赵丛然
- 调速泵结构配置协调分解优化算法及实现 张贵军, 洪 榛, 俞 立, 郭海锋
- 一类非线性奇异摄动系统的近似最优控制 曹 宁, 张化光, 罗艳红, 冯德志, 刘 燕
- 噪声统计特性未知时的鲁棒卡尔曼滤波算法设计 王建文, 税海涛, 李 迅, 张 辉, 马宏绪
- 一类干扰有界约束非线性系统的鲁棒模型预测控制 秦伟伟, 马建军, 刘 刚, 郑志强