

机械振动 WSNs 最小二乘发射功率自适应控制方法^{*}

汤宝平, 赵春华, 邓 蕾, 肖 鑫, 黄 艺

(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆, 400030)

摘要 机械振动无线传感器节点为了保证数据传输的可靠性采用最大发射功率, 导致部分传感器节点传输能耗浪费。针对此问题, 提出了一种无线传感器节点最小二乘发射功率自适应控制方法。首先, 传感器节点在机械振动监测中进行簇内通信获得发射功率与链路质量的离散关系; 其次, 采用最小二乘法对离散数据进行线性拟合, 建立数据可靠、节能传输的最小二乘发射功率自适应数学模型; 最后, 结合链路质量指示阈值计算出节点间数据传输的最优发射功率。对比实验结果表明, 采用最小二乘发射功率自适应控制方法能有效降低机械振动无线传感器节点的传输功耗。

关键词 机械振动监测; 无线传感器网络; 发射功率; 自适应; 传输能耗

中图分类号 TH17; TP274.2

引 言

在机械振动无线传感器网络(wireless sensor networks, 简称 WSNs)监测应用中, 因传感器节点监测部署空间位置存在差异, 使节点间的通信链路质量因电磁干扰、通信距离及机械构件遮挡等因素而各不相同^[1-2]。传感器节点为了保证数据可靠传输, 传统方法采用最大发射功率, 导致传感器节点传输能耗浪费问题^[3], 特别是在机械振动监测应用中传输大量振动数据时表现尤为显著, 使得无线传感器网络节点固有能量受限问题更加严峻^[4-5]。降低发射功率可削弱无线传感器节点数据传输功耗, 是降低传感器节点能耗的重要方法^[6-7], 因此, 如何控制无线传感器节点发射功率是亟需解决的难题。

针对无线传感器节点发射功率控制方法, 国内外学者进行了相关研究^[8-10]。李小敏等^[11]提出了根据水稻生长周期、接收信号强度及平均丢包率等因素自动调整节点发射功率的能量自适应功耗调整机制, 提高了节点通信质量, 使平均丢包率在 5% 以下。这些方法虽然提高了数据传输的可靠性, 但是没有改善数据传输能耗。Kotian 等^[12]提出一种数据驱动的传输功率控制(data-driven transmission power control, 简称 DA-TPC)算法, 将数据丢包率控制在 2%, 单个节点平均传输能耗降低了 3.5%。

但是在机械振动无线监测应用中, 以上方法没有考虑电磁干扰、机械结构体遮挡等因素, 对机械振动监测大量数据可靠传输产生较大影响, 直接影响原始信号的有效性和状态分析结果的好坏。针对该问题, 阮啟东^[13]提出了分片与重组传输机制, 满足机械振动监测数据可靠传输需求, 但是该方法采用最大发射功率进行数据传输导致节点传输能耗浪费。因此, 笔者在前期满足数据可靠传输基础上, 对传感器节点进行簇内通信获取无线发射功率与链路质量指示(link quality indicator, 简称 LQI)离散关系数据, 提出机械振动无线传感器网络最小二乘发射功率自适应控制方法(least square adaptive transmission power control, 简称 LSATPC), 利用最小二乘法对离散关系进行线性拟合, 建立最小二乘发射功率自适应预测数学模型, 结合 LQI 阈值得出满足数据可靠传输的最优发射功率, 可动态调节发射功率满足机械振动无线传感器网络监测应用, 有效降低节点大量振动数据的传输能耗。

1 发射功率与 LQI 的关系

WSNs 在机械振动监测应用中, 由于传感器节点监测部署位置存在差异, 例如轴承座、齿轮箱等, 导致节点之间的链路质量也各不相同。如图 1 所示, 采集节点 B 和 C 与采集节点 D 和 E 局部通信

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51675067, 5177506)
收稿日期: 2017-05-21; 修回日期: 2017-11-29

环境不同,同时各个采集节点与网关节点通信距离不尽相同,使各个采集节点分别与网关节点A的链路质量不一致。IEEE 802.15.4标准中定义了链路质量指示LQI值,表示接收数据帧的质量。提高发射功率可改善节点间的通信质量^[14],发射功率的大小直接影响大量振动数据的传输功耗。因此,各个采集节点分别与网关节点A的LQI值不相同,它们在前期满足数据可靠传输基础上的最小发射功率也存在差异。

前期研究^[15]表明,通过建立各过程能耗数学模型,得到最优数据分块大小,能有效降低机械振动无线传感器网络节点的能耗;但是该方法为保证覆盖范围,各个节点采用最大无线发射功率,导致传感器节点在传输大量原始数据时造成能耗浪费。为此,传感器节点间进行簇内通信,各个采集节点分别将发射功率列表 $T_p\{tp_1, tp_2, \dots, tp_n\}$ 依次设置为实际发射功率值,通过TI CC2530无线通信模块向父节点A发送发射功率数据包,父节点A分别统计各个子采集节点LQI列表 $LQI\{LQI_1, LQI_2, \dots, LQI_n\}$,并以信标广播方式通知各个子采集节点,传感器节点在不同通信条件下获得对应的发射功率与LQI离散关系,如图2所示。当通信距离一定时,齿轮箱遮挡使LQI值减小,提高发射功率使LQI值逐渐增大;当无齿轮箱遮挡时,通信距离越远,LQI值减小,说明无线网络中节点在存在通信距离、遮挡条件等监测环境进行数据传输时,增大发射功率可以提高数据传输可靠性。

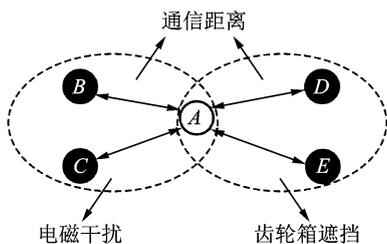


图1 不同通信条件的星型网络拓扑

Fig. 1 Star networks topology in different communication conditions

2 最小二乘发射功率自适应控制方法的实现

2.1 发射功率与LQI数学模型

机械设备在机械振动监测应用中,轴承座、齿轮箱等遮挡体和节点间通信距离会对通信链路质量造

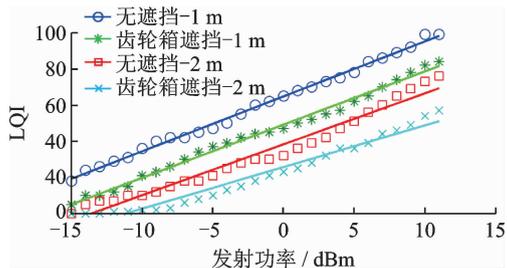


图2 不同通信条件下LQI与无线发射功率间的关系
Fig. 2 Relationship between LQI and wireless transmission power in different communication condition

成影响。为了使传感器节点自适应预测无线发射功率,建立最小二乘发射功率自适应预测模型,需得出发射功率与LQI数学模型的关系。由发射功率等级样本和LQI值的离散关系,通过最小二乘法对图2中各离散点进行线性拟合,最后构造数学函数模型。根据TI CC2530无线通信芯片数据手册中提供的发射功率范围为 $[-15\text{dBm}, 11\text{dBm}]$,并为其中的整数离散值,各离散点记为 $(tp_i, L_i(tp_i))$, $(i=1, 2, \dots, 27)$,假设满足一元线性回归模型

$$\begin{cases} L_i(tp_i) = a_i tp_i + b_i + \epsilon_i & (i=1, 2, \dots, 27) \\ \epsilon_i \sim N(0, \delta^2) & (i=1, 2, \dots, 27) \\ \text{Cov}(\epsilon_i, \epsilon_j) = 0, & (i \neq j, i, j=1, 2, \dots, 27) \end{cases} \quad (1)$$

其中: tp_i 为第*i*级发射功率; $L_i(tp_i)$ 为第*i*级发射功率对应的LQI值; a, b 为回归系数; ϵ_i 为残差。

在实际情况中,难以使各残差均取得最小值。因此,只能使

$$S^2 = \sum_{i=1}^{27} (L_i(tp_i) - atp_i - b)^2 \quad (2)$$

达到最小,等价于以下目标函数的优化问题

$$\min_{a, b} = \sum_{i=1}^{27} (L_i(tp_i) - atp_i - b)^2 \quad (3)$$

因此,回归系数*a*和*b*的估计值 \hat{a} 和 \hat{b} 为以下方程组的解

$$\begin{cases} \frac{\partial S^2}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^{27} tp_i (L_i(tp_i) - atp_i - b) = 0 \\ \frac{\partial S^2}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^{27} (L_i(tp_i) - atp_i - b) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

求解以上方程组,得 \hat{a} 和 \hat{b}

$$\begin{cases} \hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^{27} (tp_i - \overline{tp})(L_i(tp_i) - \overline{L(tp)})}{\sum_{i=1}^{27} (tp_i - \overline{tp})^2} \\ \hat{b} = \overline{L(tp)} - \hat{a} \overline{tp} \end{cases} \quad (5)$$

结合阈值 LQI_{min} 、回归系数 \hat{a} 和 \hat{b} ,可计算得出最优的发射功率

$$tp = \frac{LQI_{min} - \hat{b}}{\hat{a}} \quad (6)$$

根据 TI CC2530 无线通信芯片数据手册提供的发射功率整数值的要求,采用式(7)向上取整的方法得到最优发射功率值,以保证数据传输可靠性

$$\begin{cases} tp_{min} & (tp < tp_{min}) \\ tp_j & (tp = tp_j) \\ tp_{j+1} & (tp_j < tp < tp_{j+1}) \\ tp_{max} & (tp > tp_{max}) \end{cases} \quad (7)$$

结合图 2 中的数据,根据多组机械振动无线网络可靠传输的通信质量进行统计分析,将阈值 LQI_{min} 的经验初值设置为 20。根据以上方法可得 \hat{a}, \hat{b} 的值见表 1。由表 1 可知,传感器节点通信条件不同,其回归系数均不相同,则每个子节点与父节点通信传输数据时的最优发射功率也不一致,从而实现传感器节点发射功率动态自适应调节,在传感器节点传输过程中降低能耗。

表 1 不同通信条件的回归系数

Tab. 1 Regression coefficients in different communication condition

回归系数	无遮挡		齿轮箱遮挡	
	1m	2m	1m	2m
\hat{a}	3.038	2.942	2.816	2.306
\hat{b}	64.780	49.181	38.300	25.687

2.2 数据传输可靠性

机械振动无线传感器网络电磁环境复杂,机械结构构件的遮挡会削弱链路通信质量,若节点工作环境发生变化,将导致数据发生丢失。基于 IEEE 802.15.4 协议的无线传感器网络支持应答数据传输模式如图 3 所示。在发送方与接收方的介质访问控制(media access control,简称 MAC)层间通信时,当数据帧或应答帧发生丢失,都将通知发送方网络层传输失败,发送方则进行数据重传机制。重传该数据帧将导致接收方收到发送方的重复握手请求,为此接收方进行数据帧序号连续性检测,当数据帧序号相同时应予以剔除。数据帧经过多次重传仍然失败,此时采集节点应停止数据传输,说明此刻通信链路质量变差,数据传输可靠性变差。发送方节点再次运用最小二乘发射功率自适应控制方法,得到此链路质量的回归系数估计值 \hat{a} 和 \hat{b} ,结合 LQI 阈值,利用式(6)、式(7)得到最优发射功率值 tp ,在下一个父节点信标到来时恢复数据传输,采集节点

则采用此发射功率进行数据可靠传输。

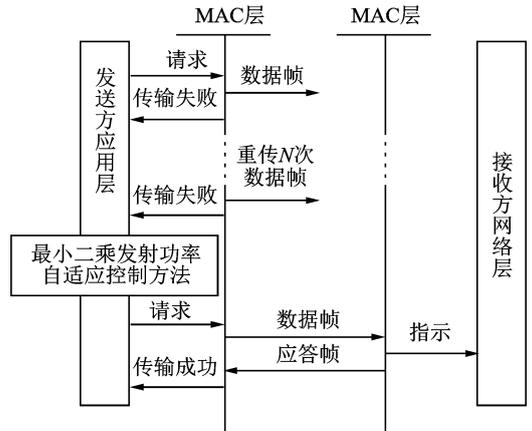


图 3 最小二乘发送功率自适应控制数据传输模式
Fig. 3 LSATPC data transmission mode

3 实验与结果分析

为验证笔者所提出的机械振动无线传感器网络最小二乘发射功率自适应控制方法的有效性,在实验室自主研发的无线传感器网络节点 WSN4 上进行实际的传输能耗测量对比实验。WSN4 采集节点采用双核架构,由 ARM Cortex M4 内核的 STM32F405 微控制器和无线通信模块 TI CC2530 组成。采集节点由两节 3.7V,1 200mAh 的可充电锂电池供电,TI CC2530 作为整个节点发射功率的控制核心,结合 CC2592 射频前端,节点支持 IEPE 传感器,可采用噪声较低的 IEPE 传感器采集机械振动信号,利用独立模数转换器实现机械振动信号的采集,分辨率为 16bits,最高采样频率可达 51.2 kHz。此外,采用容量为 128 Mbit 的 Flash 芯片作为外部存储设备存储大量原始采集数据,通过串行外设接口(serial peripheral interface,简称 SPI)与核心连接,实物如图 4 所示。



图 4 WSN4 节点实物

Fig. 4 Prototype of the mechanical vibration wireless sensor network node

为测得节点传输能耗,采用如图 5 所示方法。在电源与节点间串联 1 Ω 电阻,将节点工作电流变化转换为电阻两端压降,再使用 NI 动态信号采集模块 NI 9234 以高采样频率采集并记录 WSNG4 节点在原始数据传输过程中电阻两端的电压变化情况,节点工作电流变化可通过电压除以电阻阻值得出。计算传输过程中的节点能耗,计算公式为

$$E = \int_{N_1}^{N_2} \frac{IU}{f_s} dN \quad (8)$$

其中: E 为节点传输能耗; I 为节点传输过程中的变化电流; U 为节点工作电压; f_s 为 NI9234 采样频率; N_1, N_2 分别对应于节点传输起始与传输结束时的点数。

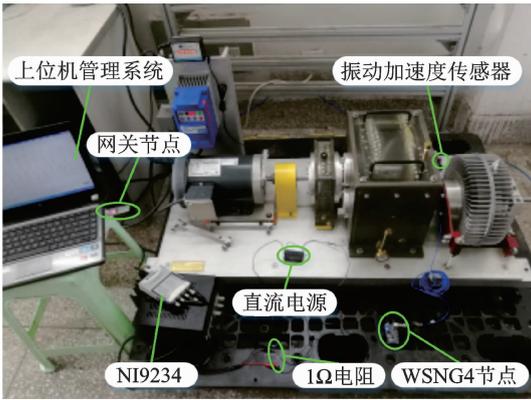


图 5 对比实验测试平台

Fig. 5 The photo of comparative experiment test platform

机械振动无线传感器网络节点间由于部署空间位置不同和通信条件不同,导致节点发射功率在运行过程中需要自适应控制,从而直接影响节点传输能耗。将 WSNG4 节点与网关节点组成单跳星型网络,实验 1~实验 4 中 WSNG4 节点采集动力传动故障诊断综合实验台第 2 级平行齿轮箱轴承信号,采样频率为 25.6kHz,采样长度从 10kB 逐渐增加到 250kB。由于无法提供电磁干扰环境,通过调节采集节点与网关节点的通信距离和采集节点的部署位置,采集节点到网关节点的实验方案可设计距离远近及有无齿轮箱的遮挡,设遮挡的数量为 1 时即为齿轮箱遮挡环境,并且在该测试平台上无其他有效性的遮挡构件,本实验通信条件如表 2 所示。每组实验中 a 方案表示发射功率自适应,b 方案表示固定的最大发射功率,即 11dBm。采集完毕后将原始数据通过无线网络传输至网关节点,并通过串口传输到监测中心,如图 5 所示。

表 2 实验 1,2,3,4 的通信条件对比

Tab. 2 Comparison of communication conditions in experiment 1, 2, 3, 4

实验编号	通信条件	
	距离/m	遮挡
1	1	无遮挡
2	2	无遮挡
3	1	齿轮箱遮挡
4	2	齿轮箱遮挡

在不同采样长度下,实验 1 与实验 2 的传输能耗值如表 3、表 4 所示,传输能耗优化值对比关系如图 6 所示。实验 3 与实验 4 的传输能耗值如表 5、表 6 所示,传输能耗优化值对比关系如图 7 所示。

表 3 实验 1 传输能耗对比

Tab. 3 Comparison of transmission energy consumption in experiment 1

采样长度/kB	节点传输能耗/mJ		传输能耗优化值/mJ	节约能耗百分比/%
	a 方案	b 方案		
10.24	92.31	102.47	10.16	9.92
51.20	505.82	548.07	42.25	7.71
102.40	1 033.17	1 115.70	82.53	7.40
153.60	1 535.19	1 667.72	132.53	7.95
204.80	2 022.79	2 211.42	188.63	8.53
256.00	2 509.37	2 746.52	237.15	8.63

表 4 实验 2 传输能耗对比

Tab. 4 Comparison of transmission energy consumption in experiment 2

采样长度/kB	节点传输能耗/mJ		传输能耗优化值/mJ	节约能耗百分比/%
	a 方案	b 方案		
10.24	96.49	104.79	8.30	7.92
51.20	516.17	541.24	25.07	4.63
102.40	1 055.76	1 123.95	68.19	6.07
153.60	1 576.96	1 665.37	88.41	5.31
204.80	2 081.75	2 226.09	144.34	6.48
256.00	2 576.36	2 750.89	174.53	6.34

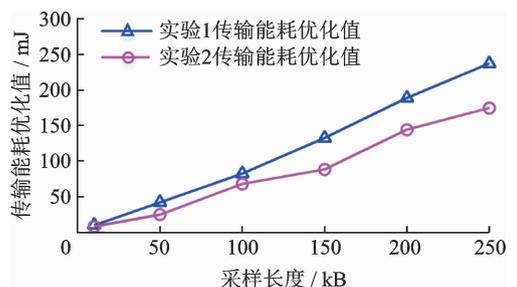


图 6 实验 1,2 传输能耗优化值与采样长度间关系对比
Fig. 6 Comparison relationship between transmission energy consumption optimization and sample length in experiment 1, 2

表 5 实验 3 传输能耗对比

Tab. 5 Comparison of transmission energy consumption in experiment 3

采样长度/kB	节点传输能耗/mJ		传输能耗优化值/mJ	节约能耗百分比/%
	a 方案	b 方案		
10.24	94.82	103.50	8.68	8.39
51.20	508.57	546.18	37.61	6.89
102.40	1 046.25	1 118.06	71.81	6.42
153.60	1 568.19	1 671.64	103.45	6.19
204.80	2 051.43	2 220.59	169.16	7.62
256.00	2 542.37	2 753.38	211.01	7.66

表 6 实验 4 传输能耗对比

Tab. 6 Comparison of transmission energy consumption in experiment 4

采样长度/kB	节点传输能耗/mJ		传输能耗优化值/mJ	节约能耗百分比/%
	a 方案	b 方案		
10.24	97.31	104.21	6.90	6.62
51.20	520.61	542.95	22.34	4.11
102.40	1 063.17	1 120.03	56.86	5.08
153.60	1 589.52	1 671.19	81.67	4.89
204.80	2 097.84	2 228.08	130.24	5.85
256.00	2 589.37	2 752.11	162.74	5.91

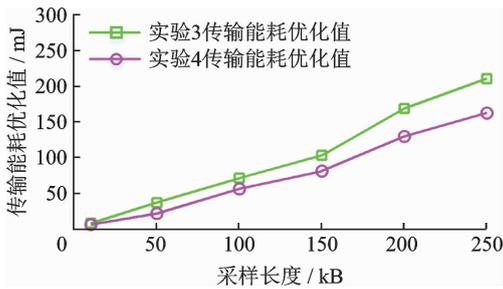


图 7 实验 3,4 传输能耗优化值与采样长度间关系对比

Fig. 7 Comparison relationship between transmission energy consumption optimization and sample length in experiment 3, 4

由表 3~表 6 可知,节点传输能耗均随着采样长度的增加而增加,但是每组实验中 a 方案比 b 方案的节点传输能耗增幅更低,并且在每组实验 b 方案中,相同采样长度对应的传输能耗基本一致。

由图 6、图 7 可知,随着采样长度逐渐增加,传输能耗优化值也不断增大,并且通信距离越短,节点传输能耗优化值越大。此外,在无齿轮箱遮挡通信条件下的传输能耗优化值比通信条件存在齿轮箱遮挡的传输能耗优化值更大。以上充分说明由于传感器节点部署空间位置不一致,导致与父节点的通信链路质量也不尽相同,在保证数据可靠传输的情况下,节点可自适应动态调节无线发射功率以降低传

输能耗,充分阐明了笔者提出的机械振动无线传感器网络最小二乘发射功率自适应控制方法的有效性。

4 结束语

机械设备状态监测中最常采用的振动信号采集需要 5kHz~20kHz 甚至更高的采样频率,传输原始数据量大,节点间的通信链路质量受电磁干扰、通信距离及机械构件遮挡等因素影响。为了保证数据可靠传输,采用最大发射功率,导致部分传感器节点传输能耗浪费。笔者通过对传感器节点进行簇内通信获得发射功率与 LQI 离散关系,提出一种机械振动无线传感器网络最小二乘发射功率自适应控制方法。利用最小二乘法对离散关系进行线性拟合,建立最小二乘发射功率自适应预测数学模型,结合 LQI 阈值得出满足数据可靠传输的最优发射功率,可动态调节发射功率满足无线传感器网络机械振动监测应用,以此降低大量振动数据传输能耗。对比实验结果表明,依据该方法在实验 1~实验 4 中可分别计算出平均节约传输能耗为 8.36%,6.13%,7.20%和 5.41%,并且随着采样长度的增大,传输能耗优化值越大,这对于提高能量极度匮乏的机械振动无线传感器网络节点寿命具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 汤宝平,贺超,曹小佳. 面向机械振动监测的无线传感器网络结构[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(4): 357-361.
Tang Baoping, He Chao, Cao Xiaojia. Topology of wireless sensor networks for mechanical vibration monitoring[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(4):357-361. (in Chinese)

[2] Guo Peng, Jiang Tao, Zhang Kui. Novel 2-hop coloring algorithm for time-slot assignment of newly deployed sensor nodes without ID in wireless sensor and robot networks[J]. Computer Communications, 2012, 35(9):1125-1131.

[3] Raza M, Ahmed G, Khan N M. Experimental evaluation of transmission power control strategies in wireless sensor networks [C] // International Conference on Emerging Technologies. Islamabad, Pakista:IEEE, 2012:1-4.

[4] Meghji M, Habibi D. Transmission power control in multihop wireless sensor networks[C] // International Conference on Ubiquitous and Future Networks.

- Dalian, China;IEEE, 2011;25-30.
- [5] 汤宝平, 邓兵, 邓蕾, 等. 无线传感器网络多级融合的机械故障诊断方法[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(1):92-96.
Tang Baoping, Deng Bing, Deng Lei, et al. A mechanical fault diagnosis method based on multi-level fusion in wireless sensor networks [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(1): 92-96. (in Chinese)
- [6] Xu Lina, Delaney D T, Ohare G M P, et al. The Impact of transmission power control in wireless sensor networks[C]// IEEE International Symposium on Network Computing and Applications. Cambridge, MA, USA;IEEE, 2013;255-258.
- [7] Cotuk H, Bicakci K, Tavli B, et al. The impact of transmission power control strategies on lifetime of wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2014, 63(11):2866-2879.
- [8] Qiao Junfeng, Liu Sanyang, Qi Xiaogang, et al. Transmission power control in wireless sensor networks under the minimum connected average node degree constraint[J]. International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems, 2015, 8(1):801-821.
- [9] Hu Qian, Tang Zhenzho. ATPM: an energy efficient MAC Protocol with adaptive transmit power scheme for wireless sensor networks [J]. Journal of Multimedia, 2011, 6(6):122-128.
- [10] Fu Yong, Sha Mo, Hackmann G, et al. Practical control of transmission power for Wireless Sensor Networks [C] // IEEE International Conference on Network Protocols. Austin, TX, USA; IEEE Computer Society, 2012;1-10.
- [11] 李小敏, 臧英, 罗锡文, 等. 基于发射功率自适应的稻田无线传感器网络节点设计[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7):140-146.
Li Xiaomin, Zang Ying, Luo Xiwen, et al. Design of WSN node with adaptive transmitting power for rice field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7):140-146. (in Chinese)
- [12] Kotian R, Exarchakos G, Liotta A. Data driven transmission power control for wireless sensor networks [M]// Internet and Distributed Computing Systems. Windsor, UK: Springer International Publishing, 2015;75-87.
- [13] 阮晓东. 面向机械振动监测的无线传感器网络可靠传输协议的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [14] Shao Qike, Feng Shuna, Mao Keji. A dynamic adaptive fuzzy algorithm for power control in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors & Actuators, 2015, 28(4):563-571.
- [15] 曾超, 邓蕾, 张又进, 等. 机械振动无线传感器网络数据分块大小研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1556-1563.
Zeng Chao, Deng Lei, Zhang Youjin, et al. Research on the data block size of mechanical vibration wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7):1556-1563. (in Chinese)



第一作者简介:汤宝平,男,1971年9月生,教授、博士生导师。主要研究方向为无线传感器网络、机电装备安全服役与寿命预测、测试计量技术及仪器。曾发表《Fault diagnosis for wind turbine transmission system based on manifold learning and Shannon wavelet support vector machine》(《Renewable Energy》2014, Vol. 62, No. 9)等论文。
E-mail: bptang@cqu.edu.cn