

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209127

冗余策略下的机械振动 WSN 高效可靠传输方法*

黄 艺, 赵春华, 汤宝平, 付 豪, 邓 蕾

(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400030)

摘 要:针对大量机械振动无线传感器网络数据的传输过程中高延时和可靠性的问题,提出了冗余策略下的机械振动无线传感器网络高效可靠传输方法。首先分析对比了基于 IEEE 802.15.4 协议支持的 ACK 和 Non-ACK 的传输机制下的时间消耗,取消传输 ACK 应答帧带来的时间延时,保证大量机械振动数据的高效传输;然后提出了一种冗余策略下的数据可靠传输方法,采用部分冗余矩阵进行数据编码将机械振动原始数据在丢包率下进行数据扩展;最后,数据中心将收到的数据解码即可得到原始数据。实验结果表明,所提方法数据量经冗余编码后增加 25% 后,每轮传输延时可减少约 3 s,传输能量消耗可降低约 555 mJ,并能保证数据完整性。

关键词:机械振动监测;无线传感器网络;可靠传输;数据编码

中图分类号: TP393.1 TH17 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Efficient and reliable transmission method for mechanical vibration of WSN based on redundancy strategy

Huang Yi, Zhao Chunhua, Tang Baoping, Fu Hao, Deng Lei

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Aiming at the issue of high delay and reliability in the transmission of a large number of mechanical vibration wireless sensor networks, an efficient and reliable transmission method of mechanical vibration wireless sensor networks based on redundancy strategy is proposed. Firstly, the time consumption under ACK and Non-ACK transmission mechanism supported by IEEE 802.15.4 protocol is analyzed and compared, and the time delay caused by canceling transmitting ACK frame ensures the efficient transmission of a large number of mechanical vibration data; then, a reliable data transmission method based on redundancy strategy is proposed, which uses partial redundancy matrix for data coding to expand the original mechanical vibration data under packet loss rate; finally, the monitoring center decodes the received data to obtain the original data. The experimental results show that after the data size of the proposed method is increased by 25% after redundant coding, the transmission delay of each round can be reduced by about 3 s, the transmission energy consumption can be reduced by about 555 mJ, and the data integrity can be guaranteed.

Keywords: mechanical vibration monitoring; wireless sensor networks; reliable transmission; data encoding

0 引 言

装备智能运维是将装备运维和物联网技术、人工智能技术进行深度融合,通过物联网采集装备运行状态数据,大数据和人工智能技术预测装备未来运行状态。无线传感器网络^[1-3](wireless sensor networks, WSN)是由大量的静止或移动的传感器以自组织和多跳的方式构成的

无线网络,以协作地感知、采集、处理和传输网络覆盖地理区域内被感知对象的信息,作为物联网基础框架的重要组成部分,具有广阔的应用前景,已开始应用于装备智能运维领域^[4-6]。目前,机械振动无线传感器网络多是基于 IEEE 802.15.4 协议,该协议理论传输速度仅为 250 kbps,然而由于网络协议及处理器限制,传输带宽被限制在理论带宽的一半以下。而高精度机械振动无线传感器网络节点在短时间内会采集大量的原始数据,爆发

收稿日期:2022-01-03 Received Date: 2022-01-03

* 基金项目:重庆市自然科学基金重点项目(cstc2019jcyj-zdxmX0026)、国家自然科学基金(51675067)项目资助

式的数据对带宽有限的节点带来巨大压力,此外,局部网络数据包拥塞、冲突频繁等也增加数据传输时延。虽然高带宽的数据通信可以缓解数据传输压力^[7],数据链路受机械测试现场旋转密闭等电磁屏蔽环境的影响容易不稳定,严重影响数据传输的可靠性,现有的传输方法在传感器节点上仍表现明显的不足。

针对数据高效可靠传输,Samijayani 等^[8]设计了一款混合 Zigbee 和 WiFi 的农业 WSN 监测网关,通过一个高效传输的 WiFi 模块和高同步精度的 Zigbee 模块协同工作提高数据的传输速度,但是由于增加了一个高功耗的模块,将会增加节点的功耗降低节点的寿命;黄庆卿等^[9]通过对数据进行无损压缩减少数据量,但是该方法在现场环境较差时,容易产生丢包,而丢包后数据将无法恢复;在数据可靠传输方面,多是采用请求发送/清除发送方式^[10],当接收节点未收到数据包时,发送节点的定时器溢出后则从缓存中查找数据然后进行重传,直到接收节点发出成功收到数据包的指示。

因此,针对大量数据的传输过程速率低和可靠性差的问题,提出了一种冗余策略下的机械振动 WSN 高效可靠传输方法,通过减少帧间确认的时间减少传输过程的时间消耗,而将机械振动原始数据通过冗余变换得到高冗余度数据,并上传至数据中心,实现机械振动无线传感器网络数据的高效可靠传输。

1 Non-ACK 的机械振动 WSN 高效传输

IEEE 802.15.4 协议^[11]定义帧间间隔(inter-frame space, IFS)保障媒体访问控制层(media access control, MAC)处理物理层接收数据的时间间隔,因此当一个设备连续发送多帧数据时,每个数据帧之间都存在 IFS。此外,传感器节点通信时帧的类型还包括应答帧(acknowledge, ACK)、命令帧等,即使上述帧在短时间内并不是连续发送,在这些帧后面也必须存在 IFS 保证数据处理的连续性。根据数据包 aMaxSifsFrameSize 的负载大小,IFS 可分为短帧间间隔(short inter-frame space, SIFS)和长帧间间隔(long inter-frame space, LIFS),即当数据包负载长度不超过 18 Bytes 时为 SIFS,否则为 LIFS,其中 LIFS 占用 40 symbols, SIFS 占用 16 symbols(每个 symbols 需要 16 μs)。考虑到采集到的机械振动数据的数据量通常很大,每帧数据满载可减少总的数据包量,因此对于数据帧后的 IFS 均为 LIFS。

IEEE 802.15.4 协议定义数据传输的确认机制(ACK 机制),面对温度、压力和光照等低频采集参量的应用场景,数据可实时传输至监控中心,常采用该方式保障数据的可靠传输,如图 1 所示。当数据中心收到传感器节点发送的数据帧时,其立即向下发送 ACK 帧指示已

经成功收到节点发送的数据帧。另外,在 ACK 机制下,丢包重传机制是一种有效的方法保证数据可靠传输,如果长时间未收到监控中心的 ACK 帧,数据将重新发送,直到接收到监控中心的 ACK 帧或者达到最大重传次数(macMaxFrameRetries)。

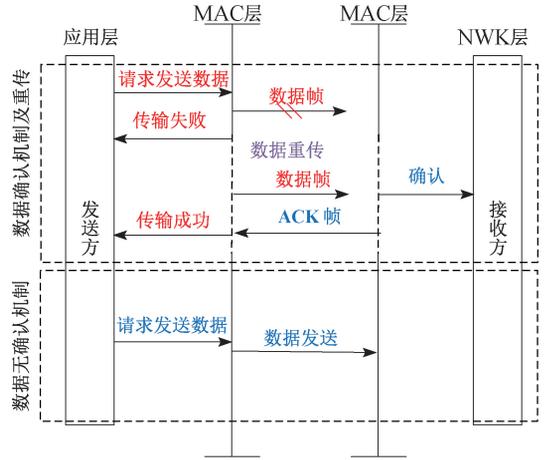


图 1 两种传输机制流程

Fig. 1 The processes of two transmission mechanisms

1.1 两种机制时间对比分析

在充分利用数据负载的情况下,数据帧有效长度为 127 bytes,其中有 100 bytes 的机械振动数据,其它字节被帧格式占用,而在 2.4 GHz 下传输,传输 1 byte 需要的时间为 2 symbols。ACK 帧为固定格式,占用长度为 11 bytes。由于 ACK 帧长度是小于 aMaxSifsFrameSize,因此 T_{ACK} 等于 SIFS 即 12 symbols。

ACK 机制虽然可保证数据的可靠传输,但是由于 ACK 机制中每个数据帧后存在 T_{ACK} 和 T_{df} ,如图 2 所示,在数据量较小时,可忽略这些时间的影响,然而高精度机械振动数据将产生大量的数据帧,这些时间带来的延时不可忽略。与 ACK 机制相反,采用数据无确认(Non-ACK)机制时发送方无需接收方确认数据,总是假设数据成功被接收,如图 3 所示,两种方式除了是否存在 ACK 帧的区别外,对于 Non-ACK 机制时发送方的射频接收器并不需要来回切换发送和接收模式,此过程消耗典型值为 12 symbols。此外,由于载波侦听多路访问(carrier sense multiple access, CSMA),节点退避时间约为 1.56 ms^[12]。

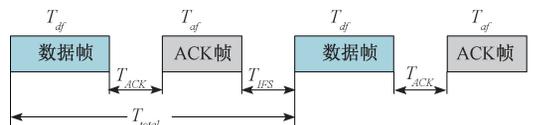


图 2 ACK 机制下的传输时间

Fig. 2 Time consuming of ACK mechanism

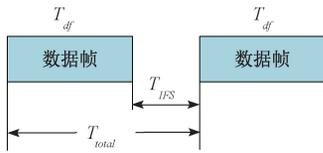


图3 Non-ACK 机制下的传输时间

Fig. 3 Time consuming of Non-ACK mechanism

在数据确认机制下,传输时间等于:

$$T_{total} = T_{df} + T_{ACK} + T_{df} + T_{IFS} + T_{CSMA} \quad (1)$$

其中:

$$T_{df} = 127 \times 2 \times 16 = 4\,064 \mu\text{s}$$

$$T_{ACK} = 12 \times 16 = 192 \mu\text{s}$$

$$T_{df} = 11 \times 2 \times 16 = 352 \mu\text{s}$$

$$T_{IFS} = 40 \times 16 = 640 \mu\text{s}$$

而对于数据无确认机制,传输时间等于:

$$T_{total} = T_{df} + T_{IFS} + T_{CSMA} \quad (2)$$

在机械振动无线传感器网络中,为确保基本的命令能够到达并确认,除了数据传输过程都采用 ACK 机制进行通信,而在传输过程中,巨大的数据量即使在每帧数据都满载的情况下,采用 ACK 机制会产生大量的 ACK 帧,而传输过程中若遇到环境干扰等,数据发送方未收到 ACK 帧将会重复发送当前数据包,造成更多的数据延时。在 Non-ACK 机制中取消 ACK 帧,虽然能减少整体数据的传输时间,但是节点不知道数据发送成功与否,数据传输的可靠性大大降低,为此提出冗余策略下的可靠传输方法。

2 冗余策略下的可靠传输方法

节点采集完数据之后,即对数据进行冗余编码。冗余编码属于线性组合,即将原始数据进行线性组合变换为冗余数据块。冗余数据块会增加原始数据的长度,但是在丢包率以下,该长度可以忽略。假设原始长度为 N ,丢包率为 r_{loss} (在机械现场环境中测试得到一般为 10%),如前文所述,每个数据帧对于数据的有效负载为 100 bytes,而在 100 bytes 中,负载中数据包号和节点号等信息固定为保证数据中心收到的数据不会错乱,其占用 4 bytes,因此每次发送数据帧中真正有效数据只有 96 bytes,用 k 表示,其中数据矩阵大小为 $r \times k$ 。其编码计算过程如图 4 所示,冗余矩阵的设计将在后文进行描述。

由于机械设备现场电磁等环境干扰,传感器节点在传输过程中,存在数据丢包的现象。采用上一节所述数据无确认机制时,接收方数据并不能完全收到发送方发送的所有数据,但是在接收到的数据矩阵中,只要满足接收到的数据行数大于等于原来的数据行数,通过矩阵逆运算即可获得原始数据。由于总数据量根据丢包率放

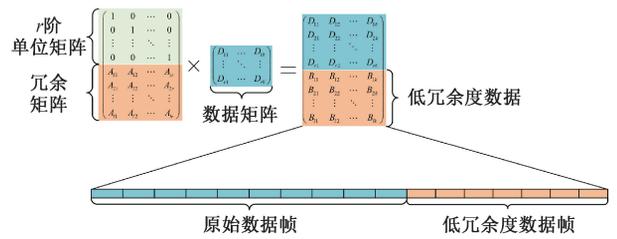


图4 冗余编码

Fig. 4 Redundant coding

大,因此接收到的数据包总数恒大于 r ,后文也将进行详细阐述。

2.1 冗余矩阵的设计

在数据存储中,纠错码技术^[13]是一种数据保护方法,将数据分割为多个数据块,将数据块通过冗余扩展和编码,使得即使某些块数据损坏,也可完整无损地恢复数据。而其中核心就是冗余矩阵的设计,常采用一个 n 阶方阵和纠错矩阵(如范德蒙生成矩阵、柯西生成矩阵、柯西改进矩阵等矩阵)结合的方式设计出冗余矩阵,但是由于纠错矩阵的元素都大于等于 1,通过与原始数据线性计算后得到的数据很容易造成数据溢出。

受纠错码和压缩感知^[14]中测量矩阵设计的启发,冗余矩阵被设计为一个 r 阶方阵和部分稀疏随机冗余矩阵的结合。而线性计算会导致数据溢出,此时虽然提出的稀疏随机冗余矩阵不能防止数据溢出,但可根据设计减少数据溢出量。考虑节点的计算量,稀疏随机冗余矩阵中每行存在‘1’的数目固定为 255 并且为随机分布。

2.2 冗余矩阵的可靠性分析

假设每次采集得到的数据按照信标负载大小分块后为 l 。由于存在数据溢出,通过稀疏随机冗余矩阵变换后的数据的范围为 0~65 535,因此根据冗余矩阵得到的溢出数据由一帧数据变为两帧数据,设变换矩阵中为 x 行,此时冗余编码后的数据则多出 $2x$ 。根据丢包率即可建立以下等式:

$$\begin{cases} (l+x) - (l+2x) \times 0.1 \geq l \\ x \geq 0.1l \end{cases} \quad (3)$$

此时,对于溢出数据部分存在两种丢包情况:

- 1) 丢包数据中溢出数据的两帧数据均丢失。
- 2) 溢出数据的两帧数据其中一帧丢失,此时另外一帧数据也认为无效数据,与情况 1) 相同。

由于按照总丢包率将原始数据冗余扩展,即使两帧数据中其中一帧或者同时丢包,在丢包率范围内,并不影响后续的数据恢复。

设数据失败恢复的概率为 $P(F)$,而数据恢复失败的主要原因是丢失数据后的矩阵为奇异矩阵,有两种情况:1) 丢失后的数据矩阵中,稀疏随机矩阵中存在两行元

素相同;2) 丢失后的数据矩阵中,在方阵中存在元素与稀疏随机矩阵线性相关。两种情况的概率分别用 P_1 和 P_2 表示。节点在传输大量数据时,数据丢失过程被认为是独立的随机过程,因此可用重复独立事件的概率来计算。

$$P(F) \leq P_1 + P_2 \quad (4)$$

$$\text{其中, } P_1(s) = \frac{\binom{n}{l} \binom{s}{2}}{\binom{r}{m} \binom{r}{m}}, 2 \leq s \leq x, P_1 = \sum_2^x P_1(s),$$

$\binom{a}{b}$ 表示在 a 中随机的选择 b 个元素。而第 2 种情况中:

$$P_2(s) = \frac{\binom{n}{l} \binom{l-s}{1}}{\binom{s}{m} \binom{l}{m}}, l-x < s < l, P_2 = \sum_{l-x}^l P_2(s)。$$

因此,当确定了数据矩阵和冗余矩阵的大小之后,即确定了参数 n, l, r, m 以及 x 的值,即可得到数据失败的概率。

3 实验验证

为了验证本文所提冗余策略下的高效可靠传输方法的性能,将该方法部署在实验室自研的机械振动无线传感器网络节点 WSN G5 上进行测试。采集节点由双核心架构组成,其中 STM32F405 微控制器负责数据采集、存储和处理等任务,CC2530 负责网络管理和数据传输等任务,高精度 24 bits 模数转换器提高对微弱信号提取的能力,节点支持 IEPE 驱动,可搭载 IEPE 传感器拾取机械振动信号,并搭载 8 G 内存保证数据临时缓存。实验测试平台如图 5 所示,动力传动故障综合实验台 (drivetrain diagnostics simulator, DDS) 模拟实际机械现场,将节点放置靠近电机端模拟现场的干扰。

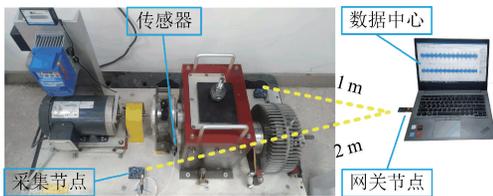


图 5 实验测试布置图

Fig. 5 The setup of experiments

实验中设置两个节点采集分别采集 DDS 的中间轴和输出轴振动数据,其中节点 1 放置靠近网关约 1 m 距离,中间无任何遮挡;节点 2 放置齿轮箱后,距离网关约 2 m 距离。实验中分别采用 ACK 机制下的丢包重传和本文提出的冗余机制下的高效可靠传输方法进行实验对比。各节点分别采集 81 920 个数据点并上传至数据中心。

两种方法下时间消耗如表 1 所示,从表中数据明显看出本文方法可减少约 3 s 时间相比 ACK 机制下。由于节点 2 与网关节点之间存在齿轮箱遮挡,影响节点 2 的数据传输,因此在两种方法中,节点 2 的传输时间消耗较多相比节点 1 而言。由 1.1 节中的两种时间分析我们知道,理论上 Non-ACK 机制比 ACK 机制下的传输时间节省为 ACK 帧传输时间以及 ACK 帧后的 SIFS,通过计算可知,这段时间仅为 0.54 ms。由于 CC2530 搭载的增强型 8051 处理器处理速度不快,考虑其他环节的时间消耗,在实际平台上取消 ACK 帧后,每帧数据节省约为 1 ms,比理论时间消耗节省更多。

表 1 两种方法时间对比

Table 1 Comparison of time consumption between the two methods

节点编号	传输耗时		
	ACK 机制	本文方法	节省时间
节点 1	39.3	36.4	2.9
节点 2	41.8	38.6	3.2

本文所提方法中,由于在冗余编码时存在矩阵运算,STM32F405 支持数字信号处理 (digital signal processing, DSP),该库支持矩阵的乘法运算,但是实际运算过程中,所提方法中仅需要计算后部分的稀疏冗余数据,该部分只有元素 '0' 和 '1' 组成,DSP 库运算时元素 '0' 也参与计算过程,将会消耗大量的计算指令。为此,此部分的计算,只需要将元素 '1' 的位置的数据累加即可。实际上,数据是根据需要上传至数据中心,数据采集后即进行冗余编码,因此该部分消耗时间可忽略,不计入总消耗时间内。

采用文献[15]的方法计算节点能耗,传输阶段能耗对比如图 6 所示。从图 6 中可以看出,采用本文方法,节点传输能耗比 ACK 机制下的传输能耗低,这主要是因为传输时间上本文方法比 ACK 机制下消耗少,此外 ACK 机制下将对丢包数据进行重传,重传也会消耗更多的能耗,而本文方法不用重传丢失的数据包。虽然冗余编码过程中的时间可忽略,但在采集节点的生命周期内,冗余编码过程将消耗部分能量,由前面能耗对比可知,在数据传输过程中能耗将降低 1 502.2 mJ,而冗余编码时节点消耗能耗约为 947.2 mJ。因此总的来说,采用本文方法比 ACK 下的可靠传输能耗降低了约 555 mJ。

采集节点的 24 位高精度模数转换器单次采样 81 920 个点,根据数据长度以及信标负载大小,即可得到 l 为 $81\ 920 \times 3 / 96 = 2\ 560$;另取 r 为 2 560, m 为 255;由式(3)可得到 $x \geq 320$,因此数据包总数量最小为 $n = 2\ 560 + 2x = 3\ 200$,此时去除溢出数据后总数据包的量大于

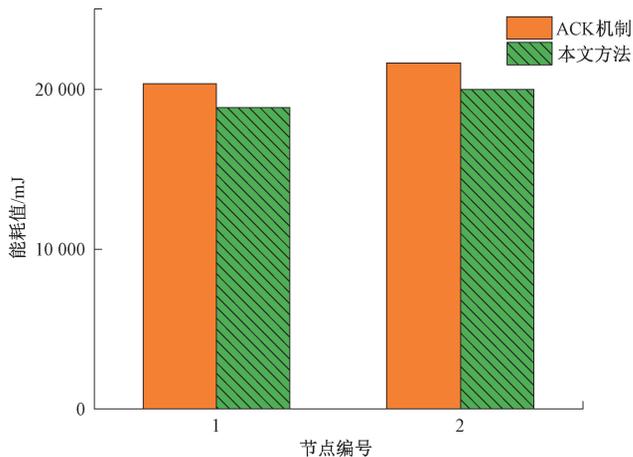


图6 两种方法下的传输能耗对比

Fig. 6 Comparison of energy consumption between the two methods

2 560, 通过矩阵运算后, 数据即可完整恢复。另外, 通过计算概率 P_1 和 P_2 也可得到数据恢复的可靠性, 而在概率 P_1 和 P_2 中均存在 $\binom{r}{m}$, 而将数值代入后得到值为无穷大, 计算后得到的 P_1 和 P_2 均可近似为 0, 因此可认为数据恢复失败的概率 $P(F)$ 为 0, 即通过冗余矩阵变换后在丢包率以下时, 数据可完整被恢复, 部分丢失数据如图 7 所示, 最终恢复数据如图 8 所示。而当监测环境发生变化引起传输链路的不稳定, 导致丢包率超过预设丢包率时, 即节点收到的数据包过少, 所提的方法则无法完整恢复数据, 需采用 ACK 机制重新上传数据, 而在大多数情况下, 节点周围环境不会引起太大变化, 因此节点的丢包率不会受到影响。

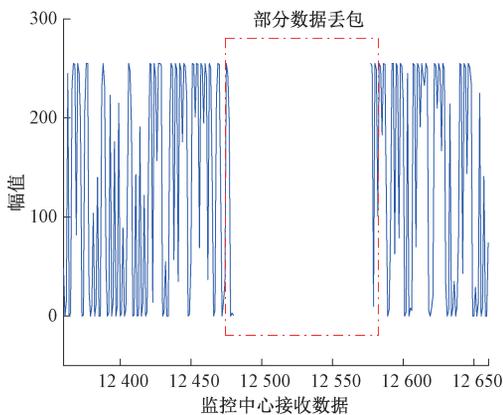


图7 部分丢失数据

Fig. 7 Partial loss of data

在 ACK 机制下丢包重传机制确保了数据上传的可靠性, 因此不存在数据丢包现象, 但是在丢包重传中, 数

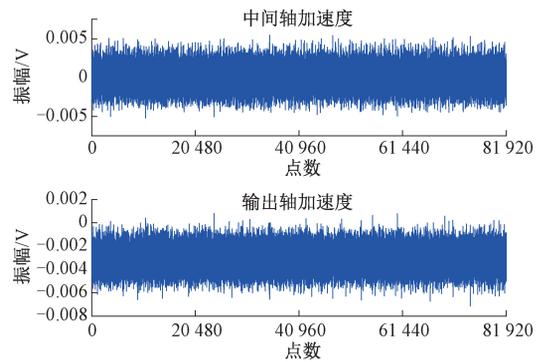


图8 数据中心恢复的数据

Fig. 8 Data recovered in data center

据因接收方未发送 ACK 指示, 发送方会重复发送当前数据包, 因此统计该方法下的丢包重传次数与本文方法中的丢包数量进行对比结果如表 2 所示。

表2 两种方法丢包对比

Table 2 Comparison of packet loss between two methods

	ACK 机制下重传次数	本文方法下的丢包数量
节点 1	806	294
节点 2	843	313

按照本文方法实际数据量增加了 25%, 相比丢包率 10% 增加了 15%。而从采用 ACK 机制后的丢包重传次数可以看出, 实际上数据包重传量大于本文方法中多出的数据量, 即使本文方法中将数据量扩增了 25%, 相比丢包重传次数而言传输总量实际减少了。

4 结 论

针对机械振动无线传感器网络大量数据传输时的高延时和传输可靠性问题, 本文提出并实现了一种低冗余度的机械振动无线传感器网络数据高效可靠传输方法。通过对比分析后取消 ACK 应答帧可以减少部分传输时延; 基于冗余编码的思想将原始数据在丢包率下扩展后传输至数据中心, 最后数据中心对所接收的数据进行解码即可恢复振动数据。实验测试表明, 本文提出的方法能有效降低传输时间和能耗, 此外, 冗余编码后的数据即使在部分数据丢失情况下也可完整被恢复。

参考文献

- [1] 肖鑫, 汤宝平, 邓蕾, 等. 机械振动无线传感器网络跨层同步采集累积误差控制方法 [J]. 机械工程学

- 报, 2019, 55(15): 202-207.
- XIAO X, TANG B P, DENG L, et al. Accumulated synchronous acquisition error control method based on cross-layer design for mechanical vibration wireless sensor networks [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(15): 202-207.
- [2] 高扬, 穆继亮, 何剑, 等. 煤机设备无线自供电状态监测系统 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(13): 41-49.
- GAO Y, MU J L, HE J, et al. Wireless self-powered condition monitoring system for coal machine equipment [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(13): 41-49.
- [3] UHLMANN E, LAGHMOUCHI A, GEISERT C, et al. Smart wireless sensor network and configuration of algorithms for condition monitoring applications [J]. *Journal of Machine Engineering*, 2017, 17: 45-55.
- [4] HAQUE M, ASIKUZZAMAN M, KHAN I U, et al. Comparative study of IoT-based topology maintenance protocol in a wireless sensor network for structural health monitoring [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2358.
- [5] 傅质馨, 骆阳, 袁越. 风电机组叶片状态监测系统构建方法研究 [J]. *太阳能学报*, 2019, 40(10): 2939-2945.
- FU Z X, LUO Y, YUAN Y. Research on construction method of condition monitoring system of wind turbine blade [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(10): 2939-2945.
- [6] 朱亮亮, 汤宝平, 黄艺, 等. 机械振动无线传感器网络大量数据传输发射功率优化控制方法 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(17): 275-280.
- ZHU L L, TANG B P, HUANG Y, et al. Transmit power optimization control method for a mechanical vibration wireless sensor network with a lot of transmission data [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(17): 275-280.
- [7] TOLANI M, SUNNY, SINGH R K, et al. Two-layer optimized railway monitoring system using Wi-Fi and ZigBee interfaced wireless sensor network [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(7): 2241-2248.
- [8] SAMIJAYANI O N, DARWIS R, RAHMATIA S, et al. Hybrid ZigBee and wifi wireless sensor networks for hydroponic monitoring [C]. 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering, 2020: 1-4.
- [9] 黄庆卿, 汤宝平, 邓蕾, 等. 机械振动无线传感网络数据分块无损压缩方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(7): 1605-1610.
- HUANG Q Q, TANG B P, DENG L, et al. Data block-based lossless compression for machine vibration wireless sensor networks [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(7): 1605-1610.
- [10] 曾超, 汤宝平, 邓蕾, 等. 基于混合拓扑的机械无线传感器网络多信道数据传输方法 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(4): 28-34.
- ZENG CH, TANG B P, DENG L, et al. Multi-channel data transmission method for mechanical wireless sensor networks based on hybrid topology [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(4): 28-34.
- [11] IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks [J]. IEEE Std 802154-2020 (Revision of IEEE Std 802154-2015), 2020: 1-800.
- [12] BURCHFIELD T R, VENKATESAN S, WEINER D. Maximizing throughput in ZigBee wireless networks through analysis, simulations and implementations [C]. Proc. Int. Workshop Localized Algor. Protocols WSNs. 2007: 15-29.
- [13] 程群, 陈为刚, 巩峰, 等. 基于纠错码的海洋无线传感器网络丢包恢复方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(11): 84-92.
- CHENG Q, CHEN W G, GONG F, et al. Packet loss recovery with erasure correction codes in marine wireless sensor networks [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(11): 84-92.
- [14] 侯明星, 亓慧, 黄斌科. 基于分布式压缩感知的无线传感器网络异常数据处理 [J]. *计算机科学*, 2020, 47(1): 276-280.
- HOU M X, QI H, HUANG B K. Data abnormality processing in wireless sensor networks based on distributed compressed sensing [J]. *Computer Science*,

2020, 47(1): 276-280.

- [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 C H, DENG L, ZHANG Y J, 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.

作者简介



黄艺, 2017 年于重庆大学获得学士学位, 现为重庆大学机械工程学院博士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络和振动获能。

E-mail: huang.y@cqu.edu.cn

Huang Yi received his B. Sc. degree in 2017 from Chongqing University. Now he is a Ph. D. candidate in Chongqing

University. His main research interest is wireless sensor networks and energy harvesting.



汤宝平 (通信作者), 1996 年于重庆大学获得硕士学位, 2003 年于重庆大学获得博士学位, 现任重庆大学机械工程学院教授、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。

E-mail: bptang@cqu.edu.cn

Tang Baoping (Corresponding author) received his M. Sc. degree in 1996 and Ph. D. degree in 2003 both from Chongqing University. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Chongqing University. His main research interests include wireless sensor networks, mechanical and electrical equipment security service and life prediction, and measurement technology and instruments.