

低功耗接触网定位器无线传感器网络节点设计

谭平,卢从安,毛江峰,Tambominyi Eliasu,丁进

(浙江科技学院 自动化与电气工程学院,杭州 310023)

摘要:针对当前接触网定位器机械振动监测设备功耗普遍较高的问题,设计了一种低功耗定位器振动无线传感器网络终端节点。基于定位器机械振动监测需求,提出了“SPC1520+锂电池”组合供电方式,深入分析定位器振幅衰减时间特性,并且融合列车最短追踪间隔,研究实现终端节点休眠优化方案。试验结果表明,在其可靠性、状态监测功能符合工程应用和维护要求的前提下,终端节点低功耗的设计可减少节点每日31.12%的功耗,还能提升电池45.18%的使用寿命,从而极大地延长了节点的生命周期,并在某高铁线路上进行了应用验证。本方法可以有效提升定位器振动无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)终端节点的使用寿命,可为后续相关低功耗机械振动 WSN 节点设计提供参考。

关键词:机械振动监测;接触网;定位器;无线传感器网络;SPC1520;振幅衰减;低功耗

中图分类号: U225.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2022)01-0079-07

Low-power consumption node design for catenary steady arm wireless sensor network

TAN Ping, LU Cong'an, MAO Jiangfeng, Tambominyi Eliasu, DING Jin

(School of Automation and Electrical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: In response to the existing problem of high-power consumption inflicted on the mechanical vibration monitoring equipment of the catenary steady arm, a wireless sensor network (WSN) terminal node was devised, featuring low-power consumption steady arm vibration. In accordance with the mechanical vibration monitoring requirements of the steady arm, a combined power supply mode of “SPC1520+lithium battery” was proposed, and a sleep optimization scheme of the terminal node was explored by probing into the amplitude attenuation time characteristics of the steady arm, and integrating the minimum tracking interval of the train. The experimental results show that under the premise that its reliability and status monitoring functions meet the requirements of engineering applications and maintenance, the design of the low-power consumption terminal node reduces the daily power

收稿日期: 2021-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51677171);国家重点研发计划项目(2018YFB0606000, 2018YFB1702200)

通信作者: 谭平(1978—),男,江苏省如皋人,教授,博士,主要从事智能安全系统研究。E-mail: 115011@

consumption of the node by 31.12% and improves the service life of the battery by 45.18%, which has greatly extended the life cycle of the node, and has been verified by application on a high-speed railway line. This method can effectively improve the service life of the WSN terminal node of the steady arm vibration, and can provide a reference for the subsequent design of related WSN nodes with low-power consumption mechanical vibration.

Keywords: mechanical vibration monitoring; catenary; steady arm; WSN; SPC1520; amplitude attenuation; low-power consumption

截至 2020 年,全国铁路运营里程达到 14.63 万 km,其中,高速铁路运营里程达到 3.8 万 km,电气化率达到 72.8%^[1],在此背景下,实现高速铁路牵引供电系统综合检测监测显得愈加重要。作为高速铁路牵引供电系统重要组成部分之一的接触网定位器,能够保持接触线处于正确位置,保证列车在行进过程中受电弓的平滑受流,起到减少接触网硬点的作用^[2-3]。通过监测受电弓抬升量,可以判断当前弓-网系统的运行状态,从而有效指导弓-网系统的维修^[4]。

目前定位器的监测主要有接触网几何参数测量仪监测和基于图像处理 and 深度学习等算法的定位器状态监测 2 种方法。其中,几何参数测量仪等监测是在列车非运行期间对定位器参数进行静态测量。该方法虽然能得到高精度和强稳定性的测量数据,但存在人工成本高、效率低,以及无法获得列车经过时的动态数据等缺点^[5-6]。而基于图像处理和深度学习等算法是通过在列车顶部安装光学传感器,采集定位器的状态,对其进行测量和分析。该方法虽然能有效提高效率,但只能获得列车经过时间段的定位器状态数据,而在其他时间段的数据获取有所缺失^[7-9]。与此同时,无线传感器网络技术(wireless sensor network, WSN)的快速发展,使得通过搭建定位器无线传感器网络来监测定位器实时状态具有可行性。李裕智^[10]提出了一种基于窄带物联网(narrow band internet of things, NB-IoT)来搭建的定位器状态监测无线传感系统,实现了对定位器状态的全天候实时监控。定位器机械振动监测所需的高采样频率、高数据传输速率等所产生的功耗,比监测其他缓慢变化物理量的无线传感器网络终端节点的功耗高^[11-12]。曾超等^[13]、舒云龙等^[14]虽然在硬件选型、存储方式等方面对机械振动无线传感器网络终端节点进行低功耗设计,但在具体的工作环境、传输方式和使用需求等方面与定位器振动无线传感器网络存在一定的差异,并不适用于对定位器振动无线传感器网络低功耗的设计。

在前人研究的基础上,本研究提出了一种低功耗定位器振动无线传感器网络终端节点设计方案,在保证节点高精度、高稳定性、高性能工作的前提下,进一步降低节点的功耗,延长节点的使用寿命。

1 系统结构设计

本研究采用具有高绕射能力、高穿透能力和远距离通信等特点的 433 MHz 频段 RF (radio frequency, 射频)无线通信技术组合 GPRS/4G 来构成定位器振动监测无线传感器网络,其框架如图 1 所示。

低功耗高铁接触网定位器振动无线传感器网络系统由终端节点、网关和远程数据中心等组成。其中终端节点采集当前定位器的实时状态,并按实时传输协议对数据进行组包,通过 433 MHz 频段传输至网关;网关与远程服务器选用 GPRS/4G 通信技术组成广域网,网关通过 GPRS/4G 链路将终端节点和远程数据中心相连接,将组包好的数据传输至远程数据中心;远程数据中心接收到终端节点的数据后,通过 GPRS/4G 对接触网现场的终端节点进行远程响应及下行命令配置等操作。

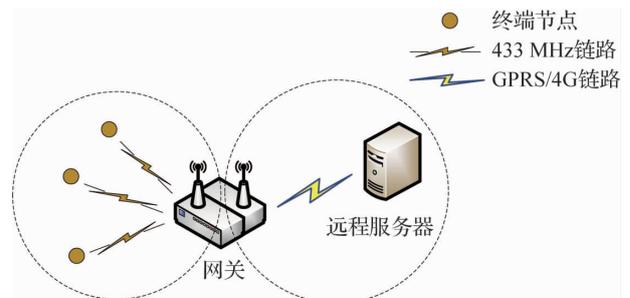


图 1 433 MHz 低功耗定位器振动无线传感器网络框架

Fig. 1 WSN framework for 433 MHz low-power consumption steady arm vibration

2 节点硬件设计

定位器无线传感器网络终端节点主要由微控制器(microcontroller unit,MCU)、数据采集、Si446x 收发器、天线增益和电源管理等功能模块组成,其硬件框架如图 2 所示。

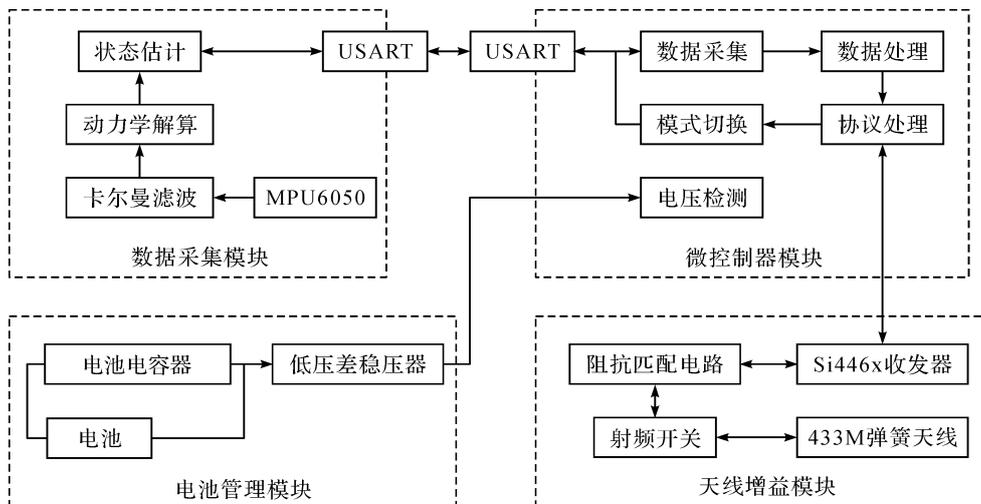


图 2 定位器无线传感器网络节点硬件框架

Fig. 2 Hardware frame diagram of steady arm WSN node

终端节点采用较节能的 32 位 MCU,在非工作期内设置为低电流模式,以降低节点功耗;同时 MCU 也能够实现对采集数据的滤波、解算,并将处理后的数据按给定的通信协议组包,通过 Si446x 收发器传输至网关。数据采集模块利用集成陀螺仪加速度计 MPU6050 来检测当前定位器的状态,获取加速度、角速度的数据,利用串口通信(universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter, USART)以 200 Hz 的回传速率将测得的定位器状态数据传输至 MCU,由 MCU 解算出抬升量、频率等数据。

电池管理模块采用锂亚硫酰氯电池(Li/SOCl₂)作为终端节点供电电源。为了较大程度延长电池的使用寿命,建立阻值为 100 Ω 的负载电阻、频率为 0.1 Hz 的脉冲放电仿真模型。仿真验证电池在电池电容器作用下的电气特性,得到不同电路下的电池放电电流对比图,如图 3(a)所示。由于电池电容器的介入,电池 2 和并联的电池电容器共同放电,在同一负载电阻下的实际电流低于使用电池电容器的电池 1;而在长周期使用中(如图 3(b)所示),虽然电池 2 在对电池电容器进行充电时的电流要远高于电池 1,但在电池电容器完全介入放电后,电池 2 的荷电状态(state of charge, SOC)在 2 144 s 后高于电池 1。因此,在使用电池电容器后,其高功率和高能量密度等特性延长了电池的使用寿命。

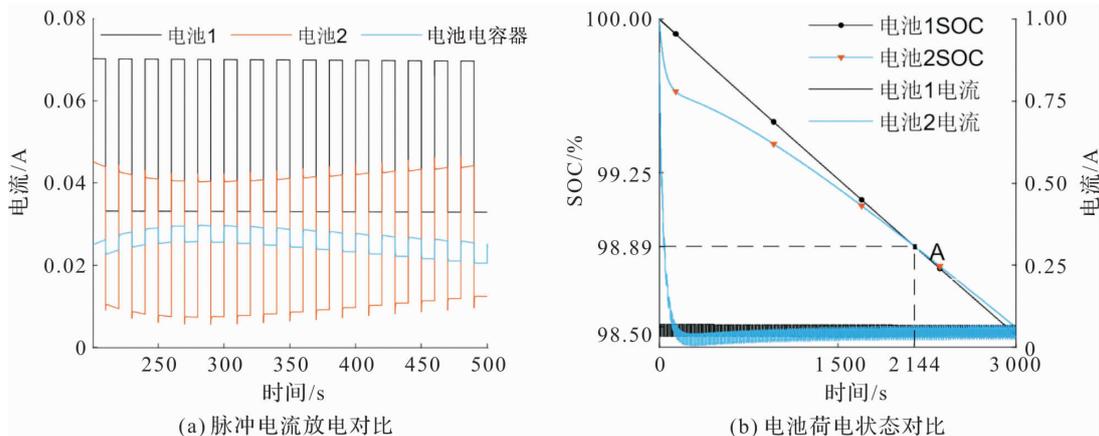


图 3 电池电容器对电池的影响

Fig. 3 Impacts of SPC supply on batteries

电池管理模块电路如图 4 所示。供电方式采用标称电压为 3.6 V、放电电流为 5 mA、电池容量为 17 A·h 的高容量 Li/SOCl₂ 电池。电源管理模块具有不小于 90 mA 的峰值电流输出。同时使用 5 节并联的 Li/SOCl₂ 电池,将终端节点所需的电流分散到每节电池上,从而降低单节电池在负载节点的耗电量,在每条分支电路上串联肖特基二极管,实现对电路的保护。采用低压差稳压器 NCP4682,可以使终端节点在工作模式中获得最低的静态电流。为了延长终端节点在实际接触网工作环境中的使用寿命,通过并联标称电压为 3.6 V、标称容量为 140 mA·h 的电池电容器 SPC1520,实现高功率和高能量密度的结合,并且可以确保电源提供大电流脉冲^[15]。终端节点对电池的低压监测功能由 MCU 内部 ADC(analog to digital converter,模拟数字转换器)转换通道(ADC0_CH1)来实现。

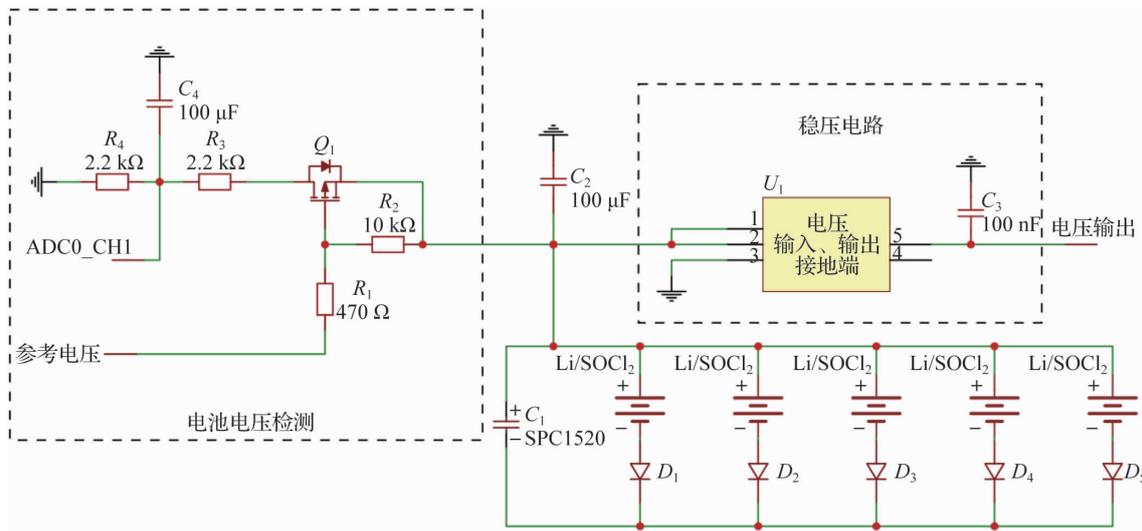


图 4 电池管理模块电路

Fig. 4 Circuit diagram of battery management module

3 节点系统软件设计

利用定位器振动无线传感器网络终端节点系统软件,来处理数据采集模块所传输的定位器状态数据。终端节点将采集到的状态数据按协议组包、发送,同时接收网关所发出的配置指令和模式切换指令等,主函数流程图如图 5 所示。响应报文解析函数对终端节点接收到的网关节点响应报文进行解析,可以对当前节点设备 ID、初始角度等初始参数设置。电池电压监测函数周期性对当前节点电池电压进行检测。数据采集处理函数通过 USART 来读取数据采集部分所上传的定位器状态数据,读取加速度和角度,利用角度来计算振幅、频率和抬升量。采用一阶滞后滤波算法进行滤波,计算加速度。将得到的新的倾角、加速度、频率、抬升量和电池电压按照协议进行组包,通过发送函数将完成组包的数据报文发送到网关。

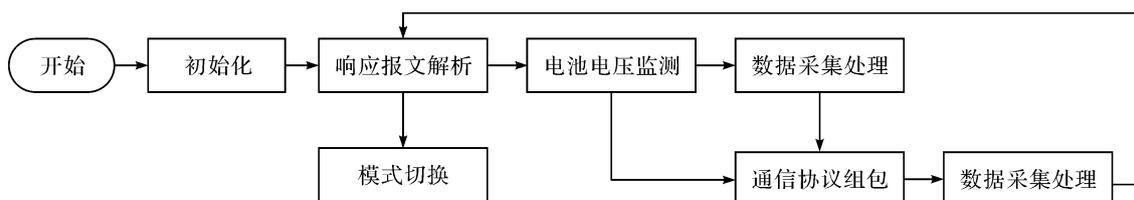


图 5 主函数流程图

Fig. 5 Main function flow chart

模式切换函数在终端节点解决低功耗问题中起着至关重要的作用。数据采集模块一直处于工作状态,但在长时间无列车通过时,采集数据的传感器一直工作会造成大量的功耗损失,故模式切换函数尽可能地在非必要的工作期间,极大程度地延长终端节点在低功耗模式的停留时间,利用定位器在列车经过

时产生非有效机械振动信号的 2 个时间段,即列车的夜间非运行时段和追踪间隔时段,来对节点进行休眠模式切换指令配置,关闭数据采集模块,并设置 MCU 进入低电流模式。终端节点的模式切换模式函数主要分为根据高铁垂直天窗设计的长休眠和追踪间隔的短休眠这 2 种情况。具体模式切换函数流程图如图 6 所示。

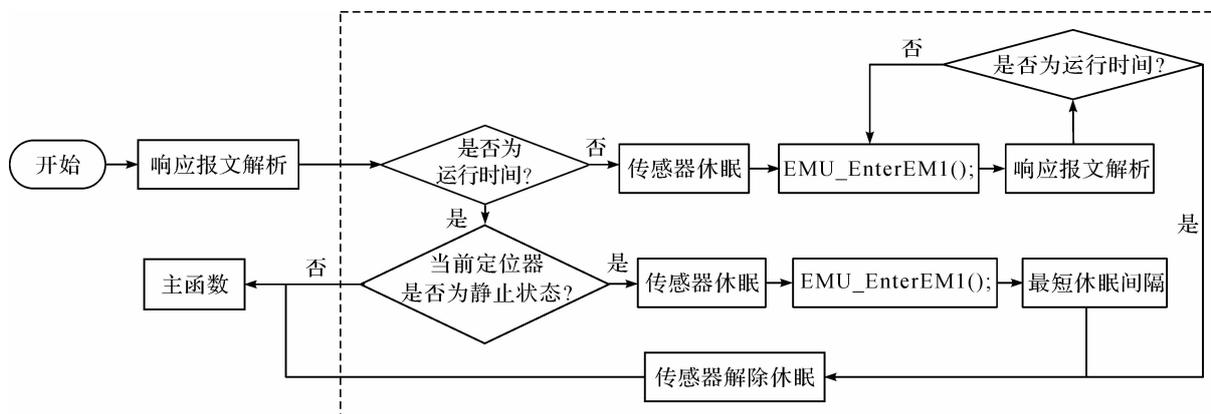


图 6 模式切换函数流程图

Fig. 6 Flow chart of mode switch function

模式切换函数的长休眠和短休眠具体过程如下。

1) 根据高铁垂直天窗设计的长休眠。国内高铁的垂直天窗一般在凌晨 0 点到 6 点之间,在此期间,线路处于停电检修状态,高铁在双方向上均没有任何列车通过。在垂直天窗期间,终端节点在收到远程数据中心发出的模式切换标志符后,使用传感器休眠函数来使数据采集模块断电,并使用 EMU_EnterEM1() 函数来使 MCU 进入低电流模式,同时周期性使用响应报文解析函数来询问当前高铁是否在垂直天窗期间。若是,则通过传感器解除休眠函数来唤醒数据采集模块,使其开始工作;否则,继续通过 EMU_EnterEM1() 函数进入低功耗模式,直到下次被唤醒。

2) 根据列车受电弓经过定位器时的振动特性和线路的最短追踪间隔来设计的短休眠。设置终端节点在列车追踪间隔内,并且定位器在处于静止状态下的时间段内进行短休眠。根据线路的最短追踪间隔休眠,即在终端节点判断当前列车驶过后,定位器连续多次抬升量和频率同时低于所设定阈值时,则通过传感器休眠函数和 EMU_EnterEM1() 函数使节点进入低功耗模式。由远程数据中心配置指令,设定当前线路的最短休眠间隔函数 t 的值。在经过最短追踪间隔的短休眠后,唤醒数据采集模块,再次对当前定位器状态进行检测,并等待进入下次追踪间隔。最短休眠间隔函数的设定值根据当前线路的最短追踪间隔和接触网波动特性计算得出。在接触网波动中,定位器会随着接触线的波动而产生垂向振动,通过对定位器的加速度、抬升量和频率的监测可以描述当前列车通过接触网的波动现象^[16]。在受到列车通过带来的振动激励后,接触线的波动带动定位器进入自由振动状态,由于接触网系统阻尼比的存在,定位器会绕着初始角度位置做自由衰减振动。定位器自由衰减振动会导致定位器的抬升量不断衰减。定位器相邻抬升量之比为常数,即减缩因数 η ,通常用对数缩减率 Δ 来计算 η :

$$\Delta = \ln \eta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} = \zeta \omega_n T_d = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (1)$$

式(1)中: A_n 、 A_{n+1} 为相邻抬升量; ω_n 为角频率; T_d 为周期; ζ 为阻尼比。

n 次震荡后,定位器的抬升量比为

$$\frac{A_1}{A_{n+1}} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)\left(\frac{A_2}{A_3}\right)\cdots\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right) = \eta^n = e^{n\zeta\omega_n T_d} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)后,得到:

$$\Delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{A_1}{A_{n+1}} \right) \quad (3)$$

通过式(3)可以计算出从初始抬升量 A_1 到设定抬升量 A_{n+1} 的衰减周期 n 。

结合式(3)和当前线路主频计算出定位器衰减至设定抬升量的时间 t_1 。通过远程数据中心设置当前线路列车最高运行速度下最短间隔时间的 0.7 倍^[17], 作为节点的最短休眠时间 $t_2, t_2 = 0.7t_0$ 。最短休眠间隔函数的休眠时间 t 则由 $t = t_2 - t_1$ 得到。

采用模式切换函数能在非必要工作状态下, 最大限度地延长终端节点处于低功耗模式的时间, 能降低节点的功耗浪费, 有效延长节点的使用寿命。采用模式切换函数后定位器无线传感器网络节点时序如图 7 所示, 节点的短休眠和节点工作状态交叉存在, 每次短休眠间隔时间根据当前线路的最短追踪间隔休眠来设置, 一般以分钟(min)为单位, 而节点的长休眠是根据列车非运行时间来决定, 一般为凌晨 0 点至 6 点, 以小时(h)为单位。

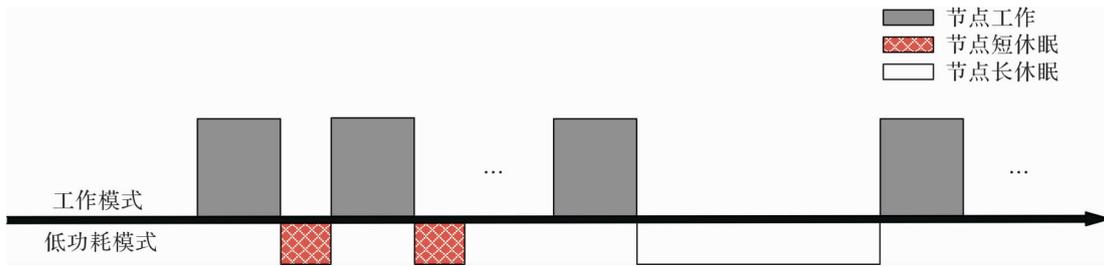


图 7 定位器无线传感器网络节点时序示意

Fig. 7 Sequence diagram of steady arm WSN node

4 节点测试和分析

搭建模拟接触网定位器机械振动试验平台以验证终端节点设计的可行性。通过对终端节点上传数据的汇总, 得出定位器坡度和抬升量的测试结果, 如图 8(a)所示, 这能较精确地反映定位器当前的状态。从测试结果可以看出, 从波峰到波谷的幅值变化为 3.8° , 与试验台模拟的摆动角度误差为 0.21° 。同时由图 8(a)可知, 在试验台的 2 次摆动过程内, 抬升量随坡度的变化而变化, 所测节点最大抬升量为 3 mm, 最小为 -73 mm, 与试验台的实际输出幅值相差 1.15 mm。试验台输出加速度和通过滤波处理后节点输出的加速度对比, 如图 8(b)所示, 测试结果验证了终端节点能够精准表述定位器在振动状态下的坡度和抬升量的变化。

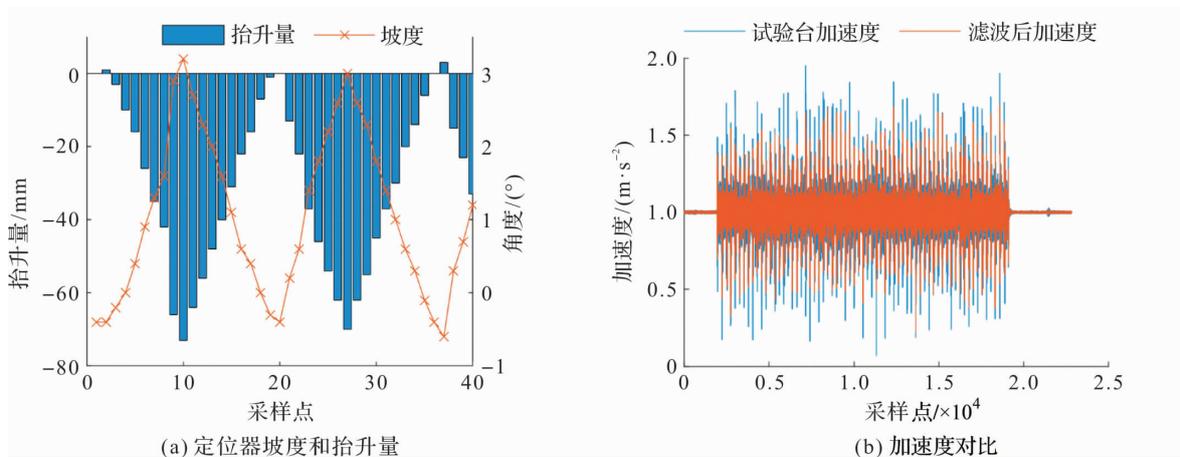


图 8 定位器无线传感器网络节点试验台测试数据汇总

Fig. 8 Data summary of laboratory bench test of steady arm WSN node

以定位器无线传感器网络节点实际使用线路温福铁路的某段为例来得出衰减时间。该线路的设计速度为 250 km/h, 在运行速度为 200 km/h 时线路主频为 1.32 Hz, 阻尼比为 0.003 6。该线路的最短列车追踪间隔为 5 min, 列车的受电弓通过定位器造成最大抬升量为 60 mm, 设定进入最短休眠期抬升量为

5 mm,通过式(3)可得定位器衰减振动的周期数为 109.856,结合主频 1.32 Hz,可以得出抬升量的衰减时间为 83.22 s,这与文献[18-19]中得出的实际衰减时间基本上吻合。测量某日 23 点到次日 6 点终端节点在不同模式下每小时所需功耗,如图 9 所示,在短休眠模式下,节点每小时需要的功耗比未采用短休眠模式时降低了 18.07%。定位器机械振动无线传感器网络实际应用 to 高铁接触网上后,远程设置节点的休眠周期为 20 min,0 点到 6 点无列车通过期间,由于 SPC1520 的作用,单节电池的电流持续下降,最高可以达到 1.69 mA,单节电池每小时损失的电容量持续降低,最高可以减少电池 77.12% 的功耗损失。这验证了节点在利用无列车经过定位器期间进行节点休眠,能够降低不必要的电池容量消耗,进一步延长了节点的使用寿命,降低了后期维护成本。

5 结 语

综合考虑硬件选型、电池管理电路设计、休眠优化方案等因素,我们设计了一种低功耗无线传感器网络终端节点,用于高铁接触网定位器机械振动的实时监测。本研究提出的方案,可实现对定位器工作状态的实时检测与传输,并且整个终端节点低功耗模式下的功耗低至 5.58 mW。使用休眠优化方案的研究设计,能够使终端节点电池日消耗量降低 31.12%,电池使用寿命提升 45.18%,节点理论生命周期达到 192.5 d。本研究在定位器无线传感器网络节点发射功率、无线传感器网络的拓扑结构等方面,仍有待进一步的功耗优化。

参考文献:

- [1] 国家铁路局. 2020 年铁道统计公报[EB/OL]. (2021-04-19)[2021-05-26]. https://www.mot.gov.cn/tongjishuju/tielu/202104/t20210419_3573713.html.
- [2] 罗健,白嵩峰,魏博. 高速铁路接触网定位器坡度问题的深化研究[J]. 铁道工程学报,2013,30(1):77.
- [3] 赵传. 高速铁路接触网定位器受力优化分析[J]. 电气化铁道,2019,30(增刊 1):161.
- [4] 孟祥奎,吴积钦. 受电弓和接触网运行状态定点监测装置[J]. 电气化铁道,2010,96(2):32.
- [5] 中华人民共和国铁道部. 接触网几何参数测量仪:TB/T 3227—2010[S]. 北京:中国铁道出版社,2010.
- [6] 韩丙虎. 新型激光接触网全参数检测仪的研制[J]. 铁道技术监督,2007,254(12):28.
- [7] 陈东杰,张文生,杨阳. 基于深度学习的高铁接触网定位器检测与识别[J]. 中国科学技术大学学报,2017,47(4):320.
- [8] 占栋,景德炎,吴命利,等. 电气化铁路接触网定位器坡度动态视觉测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(8):50.
- [9] 张城. 高铁接触网支持装置紧固件识别与定位的深度学习[J]. 工程数学学报,2020,37(3):261.
- [10] 李裕智. 基于 NB-IoT 通信技术的定位器监测模块关键技术研究[D]. 杭州:浙江科技学院,2019.
- [11] HSIAO S J, SUNG W T. Building a fish-vegetable coexistence system based on a wireless sensor network[J]. IEEE Access,2020,8:192119.
- [12] BOTERO-VALENCIA J S, CASTANO-LONDONO L, MARQUEZ-VILORIA D, et al. Data reduction in a low-cost environmental monitoring system based on LoRa for WSN[J]. IEEE Internet of Things Journal,2019,6(2):3024.
- [13] 曾超,汤宝平,肖鑫,等. 低功耗机械振动无线传感器网络节点结构设计[J]. 振动与冲击,2017,36(14):33.
- [14] 舒云龙. 机械振动无线传感器网络节点低功耗能量管理方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.
- [15] 卜芳,罗垂意,高冠雄,等. 高功率、高可靠性、长寿命脉冲电源[J]. 广东化工,2019,46(13):246.
- [16] 吴积钦. 受电弓-接触网系统电接触特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [17] 李夫忠,张卫华,周宁. 高速铁路接触网波动特征参数值及其变化规律的研究[J]. 高速铁路技术,2012,3(5):3.
- [18] 程宏波,张伟,伦利,等. 一种接触线振动在线监测方法[J]. 铁道标准设计,2019,63(12):159.
- [19] 吕青松. 接触网波动特性及其传播规律研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.

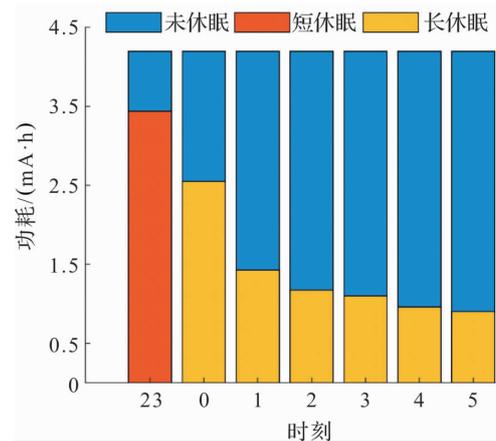


图9 终端节点在不同模式下每小时所需功耗
Fig. 9 Hourly power consumption of terminal node in different modes