

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206038

智能井盖无线监测节点的温差供电技术研究*

赵兴强^{1,2} 彭睿智² 戴志新² 张译文³ 蔡骏^{1,2,4} 周旺平^{1,2,4} 丁宇¹

(1. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044; 2. 南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 3. 南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044; 4. 江苏省气象能源利用与控制工程技术研究中心 南京 210044)

摘要:智能井盖作为较早提出的概念,其发展受制于远距离无线物联网通信发展和电池续航能力等问题。为此,本文提出了采集井盖热能的温差发电方案。为了提高井盖下表面附近的温差,增加了隔热层和散热器,使温度梯度提高了5℃~10℃。结合室外测试数据,搭建了温差发电模块测试环境,测试分析了温差发电片的性能,结果表明在13℃的温差环境下1h内产生7.92J的电能,平均功率2.2mW。基于NB-IOT技术,设计智能井盖监测节点,实现了对井盖倾斜角的监测。通过休眠待机方法,降低了节点系统的功耗,一次数据采集发射消耗0.185J电能,静态工作电流仅87.45μA。将自供电技术与低功耗技术结合,验证了利用温差发电可以满足智能井盖的供能需求。

关键词:智能井盖;温差发电;NB-IoT;自供电

中图分类号: TN86; TM913 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 480.5

Research on thermoelectric generator for a smart manhole cover wireless monitoring node

Zhao Xingqiang^{1,2} Peng Ruizhi² Dai Zhixin² Zhang Yiwen³ Cai Jun^{1,2,4} Zhou Wangping^{1,2,4} Ding Yu¹

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. School of Electronics & Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 4. Jiangsu Engineering Research Center on Meteorological Energy Using and Control, Nanjing 210044, China)

Abstract: Because of the limitations of wireless Internet of Things technology and battery life, the development of smart manhole cover technology is slow. In this paper, a self-powered smart manhole cover is proposed. Thermal power generation technology is used to convert the temperature energy under the manhole cover into electrical energy. To increase the temperature difference near the bottom of the manhole cover, the heat insulation layer and the radiator are added, and the temperature gradient is increased by 5℃~10℃. The experimental equipment of thermoelectric generator module was built, and the thermoelectric generator was tested and analyzed. The results show that the thermoelectric module generates 7.92 J electric energy with an average power of 2.2 mW under the temperature difference of 13℃ in one hour. Based on NB-IOT technology, smart manhole cover monitoring node is designed to monitor the tilt angle of manhole cover. Through the dormant standby method, the power consumption of the node system is reduced. The node acquires and transmits data once and consumes 0.185 J power. The node standby current consumption is only 87.45 μA. The combination of self-power generation and low power consumption Internet of Things has verified the feasibility of thermoelectric power generation as the energy supply of the smart manhole cover.

Keywords: smart manhole cover; thermoelectric power generation; NB-IoT; self-power

收稿日期: 2022-11-23 Received Date: 2022-11-23

* 基金项目: 国家自然科学基金(62105160)、江苏省自然科学基金(BK20211285)项目资助

0 引言

近年来,城市路面井盖种类和数量日趋繁多,井盖带来的安全隐患和问题也越来越多。井盖存在移位、倾斜、爆炸、丢失和损坏等风险,如不能及时发现并处理将会威胁人们的生命财产安全^[1-2]。随着物联网技术的发展,无线传感技术逐渐应用在井盖监测上,智能井盖的出现大大降低了井盖监测难度,提高了巡查效率。智能井盖在功能上不断完善,可以监测马路井盖是否丢失或破损;监测雨水污水管道内泥沙堆积状况;监测燃气管道内可燃气体浓度等方面^[3-4]。

井盖监测数据的远程传输技术需要兼顾低功耗和远距离等特点,目前常用的有 LoRa 和 NB-IOT。这两种通信技术传输距离可达数 km,工作电流 100 mA 以下。相比于 LoRa,NB-IOT 能够利用现有的移动通信网络,适合城市大范围的应用,因此在智能井盖上得到了广泛应用。李洪等^[5]设计的基于 NB-IOT 的智能井盖通信报警系统能满足低功耗要求的同时完成井盖故障问题的检测。井盖监测环境复杂,很难进行外部供电,一般采用锂电池为无线传感节点供电,其标称续航能力一般在 2~3 年,使用寿命短^[6]。城市井盖数量众多、分布散乱,锂电池供电成本高,体积大,更换电池难度大,回收不当会对环境造成污染。虽然可以通过控制电源的通断来减小电池的功耗从而延长电池寿命,但埋入式井盖监测装置或极端环境下监测装置的电池电量耗尽后无法进行更换,容易造成资源浪费^[7-8]。因此,研制一种能够取代锂电池并在低功耗电子设备中实现自供电的功能器件成为智能井盖发展过程中亟待解决的技术难题^[9-10]。

随着能量采集技术的快速发展,使其采集环境中的能量效率越来越高,能源源不断地为无线物联网节点提供电能^[11-12]。环境能量采集方法多样,路面交通环境中主要采集到的能量为太阳能和机械能^[13]。由于路面井盖容易被灰尘遮挡,不利于光能的采集,并且部分井盖位置偏僻,受限于车流量,采集到的机械能甚微,因此太阳能和机械能均不适合作为智能井盖自供电的能量来源。太阳能还包括有温差热能,利用温差发电技术能收集到路面太阳辐射产生的热能。温差发电是基于赛贝克效应实现的,没有运动结构,是一种可靠、环保的发电方式^[14-16]。低温环境下常用的温差发电材料为碲化铋(Bi_2Te_3)基半导体,其塞贝克效应显著,具有接近 1 的 ZT 值^[17-18]。目前温差发电技术凭借运行寿命长和无污染等优点逐渐应用在交通领域、工业废热余热回收及微型能量采集等领域^[19]。利用温差发电技术,李丽雅等^[20]设计了自供电的停车终端,吴晋蒙等^[21]设计一种可拆卸的锅炉管道余热回收温差发电装置,国外 Alptekin 等^[22]也利

用基于 Bi_2Te_3 的热电模块设计了一款燃烧驱动的热电住宅供暖系统。但是很少有利用自供电技术和能量收集技术来解决智能井盖的续航问题的研究。

经过长达一年的测量发现,井盖下有着稳定的温差热能,温差能够达到 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,非常适合使用温差发电技术来解决智能井盖电池的续航问题。因此,本文设计了低功耗的井盖无线监测节点,实验分析了井盖下温差发电性能,验证了温差发电技术在监测节点上应用的可能性。

1 智能井盖结构和工作原理

温差发电的井盖监测节点的框架如图 1 所示,主要包括传感器、控制器、无线通信模块和电源模块。电源模块的核心是温差发电片,将温差热能转换为电能,通过电源管理电路的升压、储能和稳压处理后储存在超级电容中,继而给井盖监测节点供电。在井盖的监测节点中,控制器采集传感器的数据,通过 NB-IOT 无线模块发送给云端。

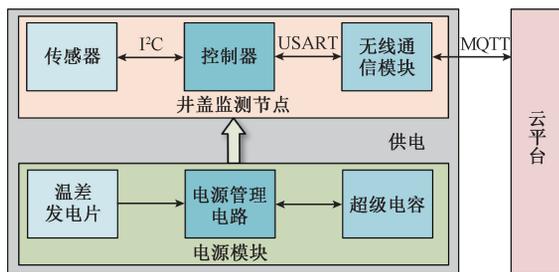


图 1 井盖监测系统结构框图

Fig. 1 Structure block diagram of the manhole cover monitoring system

1.1 电源模块

温差自发电装置结构如图 2 所示,从上往下依次为井盖、铝导热固定片、温差发电片、散热器,各层直接涂有导热胶。同时井盖下表面还贴有隔热层,以提高温差发电片上下表面温差梯度。

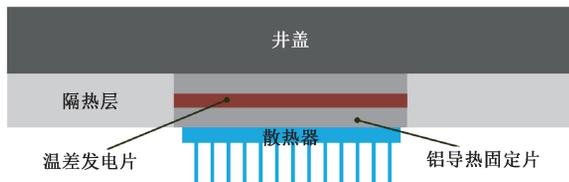


图 2 温差发电装置结构

Fig. 2 Structure of thermoelectric power generator

本文采用 TGM-287-1 型的温差发电片,具有 287 对 PN 热电偶,尺寸为 $55\text{ mm}\times 55\text{ mm}$,在温差达到 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时能

有 1.5 V 以上的电压输出。

井盖下温度梯度小,发电片输出不足 1 V,无法满足节点 3.3 V 电源要求。需要设计电源管理电路,对转换而来的电能进行升压、储能和稳压等处理。根据温差换能器输出低电压、高电流的直流电的特点采用 BQ25570 芯片作为直流升压芯片。BQ25570 是一款专门应用在微能量采集领域的低功耗升压芯片,冷启动电压为 330 mV,最低可以收集 100 mV 的电压,可给锂电池、薄膜电池、超大电容器充电,其可调的稳压输出,可对温差发电片实现最大功率点跟踪。本文采用 LIB1840 型号的超级电容器储能,额定电压 4 V,容量 1 100 F,具有尺寸小、能量密度高,放电电流大、充放电次数多、漏电小等优势。

1.2 智能井盖监测节点

井盖监测节点主要对井盖移位,井下温度、水位、气体和定位防盗等参数进行监测,以确保交通、通信、电力和城市排水排污管道正常运行。本文仅以井盖的倾斜检测验证自发电技术在智能井盖上应用的可行性。设计采用超低功耗 MEMS 加速度计 ADXL345 测量重力加速度的三轴分量,其分辨率高达 13 位,在测量模式下功耗只有 23 μA ,待机模式下功耗为 0.1 μA ^[23]。由超低功耗的单片机 STM32L053 计算井盖的倾斜角,通过 NB-IoT 无线通信模块 BC20,将监测结果上传云端。BC20 支持中国电信 IoT、阿里云 IoT 以及中国移动 OneNET 等物联网平台,搭载通信运营商平台降低了组网的难度和成本^[24]。

低功耗对于智能井盖监测节点来说至关重要。表 1 给出了节点核心器件不同模式下的功耗电流,可以看出只有在工作模式时,节点功耗较高,主要原因是 BC20 在无线通信时发射电流大,最大可达到 119 mA。实际上对于井盖的监测不需要时刻发送数据到云平台,通常一天发送两次数据即可,每次发送时间大概为 100 ms,监测节点大部分时间处于休眠或待机模式,平均功耗低。

表 1 功耗参数

Table 1 Power consumption (μA)

| 器件 | 工作模式 | 休眠模式 |
|-------------|-----------------------------|------|
| STM32L053C8 | 88 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ | 0.27 |
| ADXL345 | 23 | 0.1 |
| BC20 | 119 mA | 3.8 |

2 实验验证

2.1 样机

图 3 为智能井盖监测节点样机。井盖下面粘贴一层铝箔丁晴橡胶复合隔热层,开出一个矩形窗安装温差发电电源。将 4 块温差发电片平铺两层,每层两个,串联连接,安装在散热器与井盖下表面之间。将温差发电片采

用堆叠,平铺式串联形成温差换能器,堆叠的方式降低热量向下方传递的速度,平铺式串联可以增加输出电压。温差散热器上表面之所以窄下宽,是为了解决温差散热器顶部热源热量传递过多,导致散热器无法及时将热量散失掉的问题。再将 3D 外壳固定井盖上,管理电路、超级电容、监测节点都置于 3D 打印的外壳内。

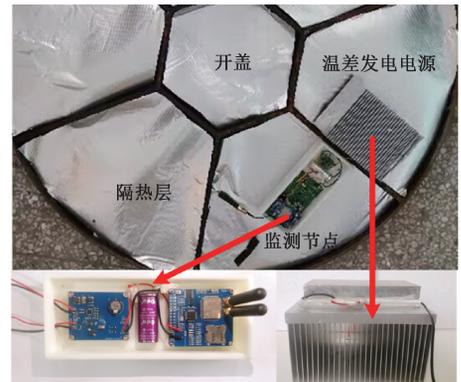


图 3 智能井盖监测节点样机

Fig. 3 Prototype of the smart manhole cover monitoring node

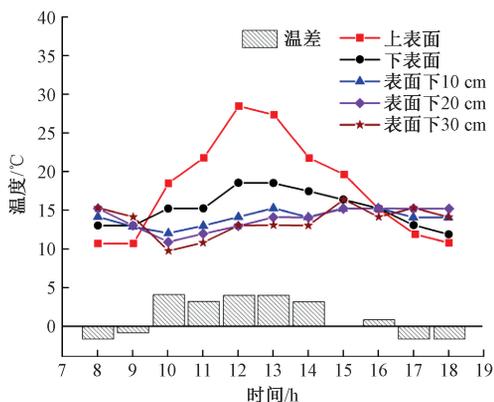
2.2 井盖下温度环境

图 4 为阳光照射下的铁质井盖的温度对比测试结果,图中温差为井盖下表面与井盖表面下 30 cm 处的温度差。照射时间从上午 8 点~晚上 18 点,天气晴朗,最高气温 15 $^{\circ}\text{C}$ 。从图 4(a)可以看出,井盖上下表面温差较大,最大值在 9 $^{\circ}\text{C}$ 左右。井盖下方 10~30 cm 出温度变化不大。井盖下表面和下方 30 cm 处的温差最大 5 $^{\circ}\text{C}$,维持 5 h 左右,其他时间温差较小,晚上甚至出现负温差。

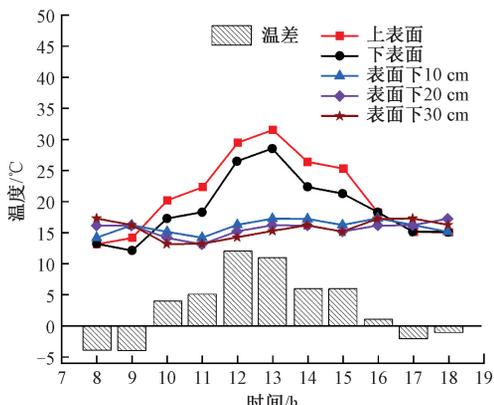
井盖上下表面温差较大,说明井盖整体的热量很大部分和下方的冷空气交换而损失掉。为此,在井盖下表面设置隔热层,减弱井盖与冷空气的热交换,减小热损失。图 5 为添加隔热层前后的温度纵向分布,结合图 4(b)可以看出,添加隔热层后,井盖上下表面最大温差缩小到 4 $^{\circ}\text{C}$,井盖下表面与井盖下方 30 cm 处的温差增加到 13 $^{\circ}\text{C}$,可维持 2 h 10 $^{\circ}\text{C}$ 以上的温差,5 $^{\circ}\text{C}$ 以上的温差可以保持 5 h。加上隔热层后,显著增加了井盖下的温差梯度。

按照季节,选择 1、4、7、10 月的典型天气测量了南京市某地铁质井盖下表面与井盖下表面 30 cm 处温度分布情况,如图 6 所示。结果表明在 7 月份的时候,温差大,持续时间长,能够维持 9 h 10 $^{\circ}\text{C}$ 以上的温差,20 $^{\circ}\text{C}$ 以上温差能维持 4 h,最大温差达到 27 $^{\circ}\text{C}$ 。4 月份和 10 月份温差环境类似,能够维持 6 h 10 $^{\circ}\text{C}$ 以上温差。在 1 月份只能维持不到 2 h 10 $^{\circ}\text{C}$ 以上温差。

上述的调研结果可以看出,井盖下温差较大,是一个



(a) 无隔热层
(a) Without insulation layer



(b) 有隔热层
(b) With insulation layer

图 4 井盖下温度曲线

Fig. 4 Temperature under the manhole cover

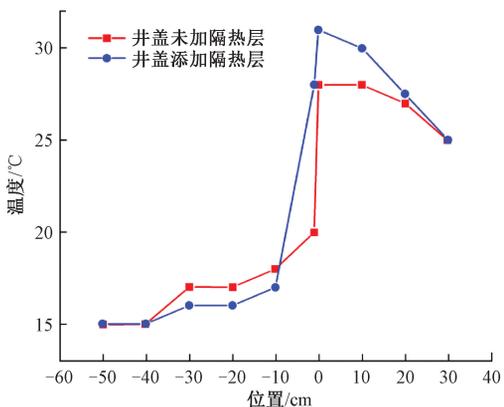


图 5 加隔热层前后井盖内外温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of the manhole

较为客观的能源,可以为智能井盖监测节点提供稳定且充足的电能。

2.3 温差发电片输出测试

室外井盖下环境复杂,温度变化缓慢,受天气影响明

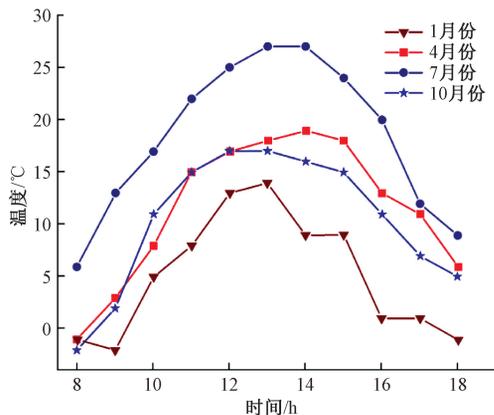


图 6 不同季节井盖下的温差

Fig. 6 Temperature differences under manhole covers in different seasons

显,无法实时测量井盖下方温差发电装置的冷热端温度、输出电压以及温差发电片的输出功率。为了方便测试,搭建了温差发电测试装置,如图 7 所示。温差发电片热端接加热台,冷端通过散热片置于流动的冷水中,冷热端都有温度传感器测试温差,温差发电片产生的电能输出后,输出电压由万用表测量。

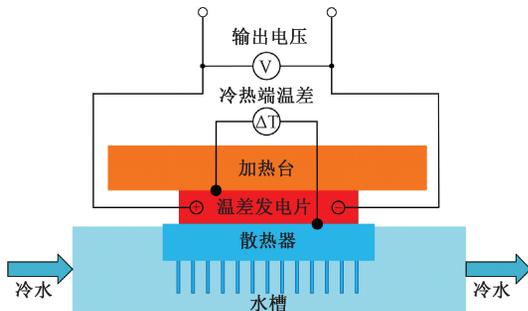


图 7 温差发电实验平台示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the experiment platform

将一个可调电阻接温差发电片输出端,其阻值在 2~100 Ω 范围内变化,图 8 为温差为 10 °C 和 20 °C 时温差发电片输出电压和功率随着负载的变化,10 °C 温差时开路输出电压为 404 mV。从图中可以看到,输出电压随着负载阻值的增加而增加,在负载阻值达到 40 Ω 之后趋于平缓。负载则是功率先增大后减小,温差为 10 °C 时,在负载阻值为 10 Ω 处达到最大值 5.47 mW。测试发现,随着温差提高,发电片性能显著增加。当温差为 20 °C 时,负载阻值为 13.6 Ω 处输出功率达到最大值 18.53 mW。

将温差发电模块置于室外井盖下,外接测试管理电路和超级电容。为了便于观测效果,在中午最高温差 13 °C 时测试 1 h,同时换用容量为 20 F 的小电容,测试结果如图 9 所示。可以看出,1 h 后超级电容存储了 7.92 J

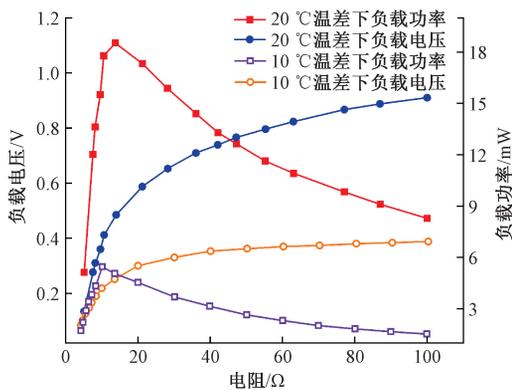


图8 10℃和20℃温差下功率、电压与负载电阻的关系

Fig. 8 The power and voltage at 10℃ and 20℃ temperature difference

的电,平均功率超过 2.2 mW,最大功率超过 2.3 mW。实现了小温差下大功率输出的设计要求。

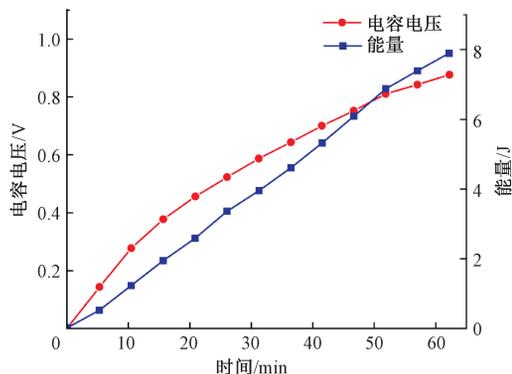


图9 温差发电片井盖下充电性能

Fig. 9 Charging performance of the thermogenerator under manhole cover

2.4 监测节点测试

为了测试监测节点可行性,用 RTC 设置 1 min 读取一次传感器信号,NB-IOT 支持 MQTT 协议,故通过 MQTT 协议将倾斜角传输给阿里云,图 10 为云端显示的倾斜角结果。验证了节点功能是可行的,后续将丰富监测参数,加入温湿度、定位等。

进一步测试节点的功耗,BC20 首先进行入网通信,BC20 发送信号时电流 50 mA。BC20 完成入网后,系统开始采集数据上传,数据采集阶段系统功耗为 18 mA 左右。数据上传完成后进入待机模式,待机模式下系统功耗只有 87.45 μ A。根据图 11 可以得出:终端节点待机模式下功耗为 87.45 μ A,待机状态一天消耗电能 25.36 J,工作模式下平均功耗 20.07 mA,完成单次信息采集上报消耗电能 0.185 J。

| 服务 | 数据详情 | 时间 |
|-----|-------------------------------------|-------------------------------|
| acc | {"pitch_roll_yaw": "-01 +037 -001"} | 2022/10/18 17:22:24 GMT+08:00 |
| acc | {"pitch_roll_yaw": "-01 +035 -001"} | 2022/10/18 17:22:24 GMT+08:00 |
| acc | {"pitch_roll_yaw": "+00 +000 +001"} | 2022/10/18 17:22:22 GMT+08:00 |
| acc | {"pitch_roll_yaw": "+07 +003 +001"} | 2022/10/18 17:22:22 GMT+08:00 |

图 10 云端显示倾斜角结果

Fig. 10 The cloud platform displays the tilt angle result

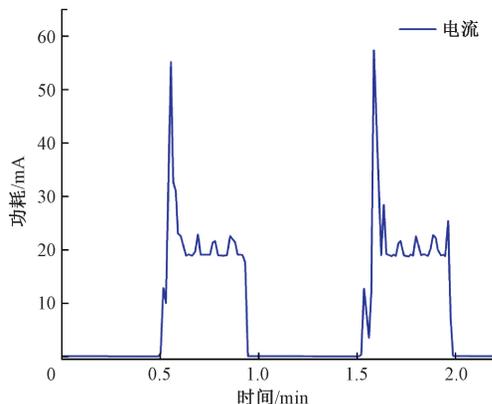


图 11 系统运行与待机模式下功耗

Fig. 11 Power consumption during system running and standby mode

2.5 电能供需分析

设计井盖一天进行两次信息采集上报,终端节点待机状态下一天消耗电能 25.36 J,两次信息采集上报消耗能量为 0.37 J,故整个监测节点一天消耗的电能 26 J。在春、秋两个季节中一天中使温差保持在 13℃ 以上的时间要超过在 5 h,而温差发电片在温差为 13℃ 情况下仅需 5 h 就能产生 39.6 J 的电能,能够满足井盖监测节点一天的自供电。虽然冬季温差在 13℃ 情况下大概仅能保持 2 h,产生的电能为 15.84 J,无法满足监测节点一天的能耗,但夏季温差大,持续时间长,在气温高于 25℃ 晴天情况下一天至少产生电能 60 J 的电能,实现节点自供电工作的同时能够给电容充电。夏季储存的电能要大于冬季消耗的电能。综上,整个系统能够实现长期的自供电。

3 结论

本文基于温差发电技术,结合井盖下的温度环境调研结果,从而设计智能井盖终端节点的结构,所添加的隔热层与散热片,将温差发电装置两侧温度梯度提高了 5℃~10℃,确保井盖下温度环境能够给智能井盖提供充足能量。通过定时休眠待机的方法,对智能井盖监测节点控制器、传感器和无线通信模块进行低功耗配置,降

低智能井盖终端节点的功耗,实现了井盖倾斜角信息的监测,并通过 NB-IOT 技术将监测数据上传至云端。最后实验测试终端节点待机功耗 87.45 μ A,工作状态平均功耗 23.56 mA,一天消耗电能 26 J,验证了自发电技术在智能井盖上应用的可行性,为后续智能井盖自供电技术研究提供新的思路和方向。

参考文献

- [1] KADDOURA K, ZAYED T. Defect-and component-based assessment model for manholes [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82: 380-393.
- [2] 李岩. 基于物联网的智能井盖安全监测系统的研究[D]. 聊城: 聊城大学, 2018.
LI Y. The research of intelligent manhole cover safety monitoring system based on internet of things [D]. Liaocheng: Liaocheng University, 2018.
- [3] 郑丰收, 孙柏, 陈宇辉, 等. 城市排水智能井盖监管系统介绍[J]. 给水排水, 2015, 51(S1): 365-368.
ZHENG F SH, SUN B, CHEN Y H, et al. Introduction of urban drainage intelligent manhole cover supervision system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51(S1): 365-368.
- [4] 沈忠新. 智能井盖系统监管平台的设计与实现[J]. 信息通信, 2019(1): 108-111.
SHEN ZH X. Design and implementation of intelligent manhole cover system supervision platform [J]. Information and Communications, 2019(1): 108-111.
- [5] 李洪, 张雪凡, 徐俊超. NB-IOT 智能井盖通信机制的低功耗分析 [J]. 电子测量技术, 2019, 42(10): 141-145.
LI H, ZHANG X F, XU J CH. Low power analysis of NB-IOT intelligent manhole cover communication mechanism [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(10): 141-145.
- [6] 吉喆. 基于环境能量采集的传感器自供电技术研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
JI ZH. Research of self-powered technology on sensor based on ambient energy harvesting [D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.
- [7] 杨超, 杨帆, 庞佑兵, 等. 一种超低功耗智能井盖监测系统设计[J]. 科技视界, 2021(7): 1-3.
YANG CH, YANG F, PANG Y B, et al. Design of an ultra-low power intelligent manhole cover monitoring system [J]. Science & Technology Vision, 2021(7): 1-3.
- [8] 杜荣华, 朱胜亿, 魏克湘, 等. 交通环境能量采集及自供能交通设施健康状态监测研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 3-23.
DU R H, ZHU SH Y, WEI K X, et al. Research progress of energy harvesting in transportation environment and self-powered transportation infrastructure health monitoring [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 3-23.
- [9] 朱强国, 王光庆, 刘周龙, 等. 非线性压电振动能量采集器与非线性接口转换电路的耦合动力学特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 178-192.
ZHU Q G, WANG G Q, LIU ZH L. Harmonic analysis of coupling dynamics between the nonlinear piezoelectric vibration energy harvester and the nonlinear power extraction circuits [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 178-192.
- [10] 李春龙, 黄辉, 梁云, 等. 面向电力传感器的环境能量收集技术发展趋势及面临的挑战[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 27-35.
LIN CH L, HUANG H, LIANG Y, et al. Power sensor-oriented development and challenges of environmental energy harvesting technologies [J]. Electric Power, 2021, 54(2): 27-35.
- [11] 张允, 王战江, 蒋淑兰, 等. 振动能量收集技术的研究现状与展望[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(7): 985-1018.
ZHANG Y, WANG ZH J, JIANG SH L, et al. Retrospectives and perspectives of vibration energy harvest technologies [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(7): 985-1018.
- [12] SONG C, YI H, ZHOU J, et al. A high-efficiency broadband rectenna for ambient wireless energy harvesting [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(8): 3486-3495.
- [13] PEI J, GUO F, ZHUANG J, et al. Review and analysis of energy harvesting technologies in roadway transportation [J]. Journal of Cleaner Production, 2020: 125338.
- [14] SUN P, WEI B, ZHANG J, et al. Large Seebeck effect by charge-mobility engineering [J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 7475.
- [15] SUN P, STEGLICH F. Nernst effect as a probe of local kondo scattering in heavy fermions [J]. Physical Review Letters, 2013, 110(21): 216408.
- [16] 红兰. 温差发电原理与温差发电装置的设计研究[J]. 呼伦贝尔学院学报, 2021, 29(5): 110-113.
HONG L. Research on the principle of thermoelectric power generation based on the design of thermoelectric power generation device [J]. Journal of Hulunbuir

- University, 2021, 29(5): 110-113.
- [17] 杨家盛. 汽车尾气温差发电系统发电模块布置及内流场结构优化研究[D]. 镇江:江苏大学, 2022.
YANG J SH. Research on power generation module layout and internal flow field structure optimization of an automobile exhaust thermoelectric power generation system[D]. Zhenjiang:Jiangsu University, 2022.
- [18] 霍蒙, 吴舸, 袁宏, 等. 温差发电技术研究综述[J]. 科技与创新, 2020, 154(10): 94-95, 97.
HUO M, WU G, YUAN H, et al. Review of thermal power generation technology[J]. Science and Technology & Innovation, 2020, 154(10): 94-95, 97.
- [19] 吴利青, 徐德辉, 熊斌. 微型热电能量采集器的研究进展[J]. 半导体技术, 2015, 40(10): 721-729.
WU L Q, XU D H, XIONG B. Research progress of micro-thermoelectric generators [J]. Semiconductor Technology, 2015, 40(10): 721-729.
- [20] 李丽雅, 林涛, 韩凤琴, 等. 低功耗自供电终端模块的设计与测试[J]. 物联网技术, 2022, 12(8): 85-87.
LI L Y, LIN T, HAN F Q, et al. Design and test of low power self-powered terminal module [J]. Intelligent Processing and Application, 2022, 12(8): 85-87.
- [21] 吴晋蒙, 陈燕, 马春燕, 等. 锅炉余热回收温差发电装置设计与性能分析[J]. 电源技术, 2021, 45(2): 232-235.
WU J M, CHEN Y, MA CH Y, et al. Design and performance analysis of thermoelectric power generation device for boiler waste heat recovery[J]. Journal of Power Supply, 2021, 45(2): 232-235.
- [22] ALPTEKIN M, CALISIR T, BASKAYA S. Design and experimental investigation of a thermoelectric self-powered heating system [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 146: 244-252.
- [23] 吴晨杰, 徐云, 瞿耀辉. 基于阈值辨别技术的普通行人用计步器设计研究[J]. 自动化仪表, 2019, 40(1): 79-81, 85.
WU CH J, XU Y, QU Y H. Research and design of the pedometer based on threshold recognition technology for ordinary pedestrians [J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(1): 79-81, 85.
- [24] 任家豪. 基于NB-IOT技术的家庭智能监测系统[D]. 扬州:扬州大学, 2020.
REN J H. Home intelligent monitoring system based on NB-IOT technology [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.

作者简介



赵兴强, 2005年于重庆大学获得学士学位, 2008年于重庆大学获得硕士学位, 2014年于重庆大学获得博士学位, 现为南京信息工程大学副教授, 主要研究方向为能量收集、智能感知。

E-mail: zxq8562@163.com

Zhao Xingqiang received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2005, M. Sc. degree from Chongqing University in 2008 and Ph. D. degree from Chongqing University in 2014, respectively. Now he is an associate professor in Nanjing University of Information Science & Technology. His main research interests include harvesting and intelligence perception.



周旺平(通信作者), 2007年毕业于中国科学院研究生院, 获得天体物理专业博士学位, 主要研究方向为计算机与自动控制技术。

E-mail: wpzhou@nuist.edu.cn

Zhou Wangping (Corresponding author) received Ph. D. degree in astrophysics from Chinese Academy of Sciences in 2007. His research interest includes computer and automatic control technology.