

文章编号: 1671-7449(2025)01-0001-06

基于光纤无线融合的监测通信一体化系统

张伟¹, 吴季航¹, 杜雨鑫¹, 谢洪平^{2,3*}, 林冬阳^{2,3}, 范舟^{2,3}

(1. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210000;
3. 国网江苏省电力有限公司 建设分公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 针对当前城市受限空间的监测难题, 旨在探索基于光纤无线融合的监测通信一体化系统, 通过融合微纳集成单元的通信供能一体化光缆及多参量监测应用, 提出了一种新型的能信共传解决方案。开展了三部分内容研究, 涵盖光纤长距离能信共传、光电转换、融合磁谐振无线供能等关键技术研究, 以及相关的系统集成与应用探索。通过深入研究高效率光电转换技术、基于磁谐振的短距无线供能技术、通信供能一体化光缆的设计与研制, 构建了一套完整的理论体系并实验验证, 为光纤与无线技术融合提供了新的研究方向和实践案例。研究成果不仅拓展了光纤通信和无线传感技术的应用领域, 而且为电网、城市基础设施监测等关键领域提供了创新的技术支撑和解决方案。

关键词: 光纤传能; 光纤通信; 无线充电; 能信共传

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025001

引用格式: 张伟, 吴季航, 杜雨鑫, 等. 基于光纤无线融合的监测通信一体化系统[J]. 测试技术学报, 2025, 39(1): 1-6.

ZHANG Wei, WU Jihang, DU Yuxin, et al. Integrated monitoring and communication system based on fiber wireless fusion[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(1): 1-6.

Integrated Monitoring and Communication System Based on Fiber Wireless Fusion

ZHANG Wei¹, WU Jihang¹, DU Yuxin¹, XIE Hongping^{2,3*}, LIN Dongyang^{2,3}, FAN Zhou^{2,3}

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China;
3. Construction Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Addressing the current monitoring challenges in urban confined spaces, this study aims to explore an integrated monitoring and communication system based on fiber-wireless convergence. By integrating micro-nano units into a unified optical cable for communication and power supply, and applying multi-parameter monitoring, a novel solution for simultaneous energy and signal transmission is proposed. The research consists of three main parts: long-distance fiber-optic energy and signal transmission, photoelectric conversion, and the integration of magnetic resonance wireless power transfer. Additionally, it includes system integration and application exploration of these key technologies. Through in-depth research on high-efficiency photoelectric conversion technology, short-distance wireless power transfer based on magnetic resonance, and the design and development of a unified optical cable for communication and power supply, this study constructs a comprehensive theoretical framework and provides experimental validation. This research offers new directions and practical cases for integrating of fiber-optic and wireless technologies. The outcomes expand the application

收稿日期: 2024-03-28

基金项目: 国家电网科技研究基金资助项目(5700-202318270A-1-1-ZN)

作者简介: 张伟(1989—), 男, 副教授, 博士, 主要从事光纤无线异构通信感知技术研究。E-mail: weizhang13@bupt.edu.cn.

* **通信作者:** 谢洪平(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事输变电工程建设、泛在电力物联网建设研究。E-mail: sg-support@126.com.

fields of fiber-optic communication and wireless sensing technologies and provide innovative technical support and solutions for critical areas such as power grids and urban infrastructure monitoring.

Key words: fiber energy transmission; fiber optic communication; wireless charging; energy and signal transmission

0 引言

在电网实际应用中,随着城市电网电缆化程度的提高,电力管廊、电缆沟及排管内部等电磁受限空间的监测显得尤为关键^[1]。为确保电网的安全运行,监测有害气体、电缆局部放电、振动、图像等多参数成为必要,这要求传感器系统要具备高可靠性和易于布设的供电通信方式。目前,尽管在线监测技术能实现风险的及时识别与定位,但传感器的高能耗和密集部署仍面临诸多挑战。在复杂环境下的布设难度大、维护成本高以及通信效率受限等问题仍然是制约其进一步发展的重要因素。随着技术的发展,对监测通信系统的灵活性、可维护性和效率提出了更高的要求。因此,探索更高效、更灵活的监测通信技术成为了当前研究的重要方向^[2]。

针对上述电网存在的问题,目前一种有效的解决方法是光纤能信共传应用。光纤供电与传能是一种利用激光通过光纤为远程设备供电的同时回传信息。近年来,由于高功率光源的发展,该技术受到了越来越多的关注,它提供强抗电磁干扰能力,适应恶劣环境。利用光传递能量的想法最早由Glaser于1968年提出^[3],并得到了迅速的发展。2023年,Mei等^[4]提出并应用了一种基于光纤传能技术的输电铁塔气象监测系统,通过10.9 km单模光纤成功实现了传感器能量供应。然而,在满足地下电缆沟

等隧道安全要求的情况下,光纤传能过程中,光能转化为电能的环节仍存在电弧和短路等风险,给电力管廊带来了巨大的安全隐患。

针对目前电网隧道及光纤能信共传系统存在的难题,本文提出了一种基于光纤无线融合的监测通信一体化系统,旨在克服传统监测系统的限制,实现更高效、可靠、安全的电网监测。系统采用基于波分复用的单模光纤能信共传、高效率光电转换联合磁谐振无线供能方法等关键技术,解决了传统光纤系统中光转电能的安全问题,并实现了光能到无线电能的稳定传输。本文旨在为电网隧道监测系统提供一套完整的解决方案,以支持城市电网的持续稳定运行。

1 系统方案设计

在城市地下管廊等电磁受限空间中,亟需可靠的监测系统以实现对这些空间的长期监管。该系统必须保证长期运行的稳定性。光缆传输的光能在光缆内部通过光电转换生成电能,并通过磁谐振短距离无线充电为附着在光缆外部的传感器提供电能。传感器信息通过光纤回传至系统终端,实现数据的实时监测与可视化展示^[5]。

1.1 系统工作原理

基于光纤无线融合的监测通信一体化系统示意图如图1所示。

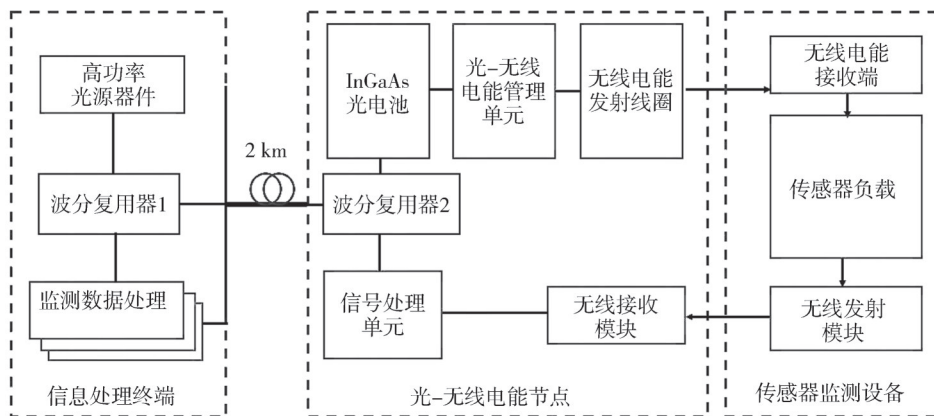


图1 光纤无线融合的监测通信一体化系统示意图

Fig. 1 Integrated monitoring and communication system for fiber-wireless convergence diagram

系统主要由信息处理终端、光-无线电能节点和传感器监测节点三部分组成。信息处理终端安装在管廊末端并连接数千米光缆铺设于电缆架中,传感器监测设备通过光缆内光-无线电能节点实现无线电能的供给。通过高效率单模光纤实现远端节点的能量供给及信息回传至信息处理终端^[6-7],同时利用磁谐振无线传输技术解决短距离内的布线及电气直连带来的安全难题。

附于光缆上的光-无线电能节点包括波分复用器、InGaAs 光电池、光-无线电能管理单元、无线电能发射线圈、信号处理单元以及无线信号的接收模块。光电池将激光能量转化为电能,光-无线电能单元采用最大功率点追踪技术联合无线电能频率自调节技术获取无线电能最大输出功率。无线接收模块处理传感器回传数据。光-无线电能节点的上述单元模块置于尼龙材料长方体外壳内,外壳开孔连接光缆,节点如图 2 所示。

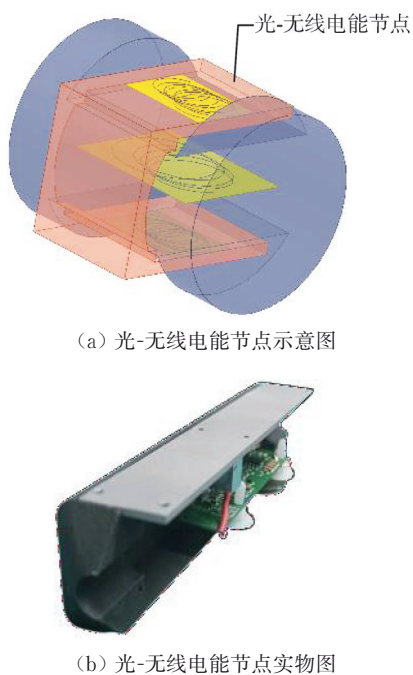


图 2 节点结构图

Fig. 2 Schematic diagram of the node structure

在传感器监测设备端,各类传感器如气体传感器、震动传感器在没有与光缆直接连接的情况下,通过无线电能接收端获取电能采集信号,依靠无线发射模块将采集信号回传至光缆节点内^[8-9]。其中,无线电能接收模块及信号发射模块内置于尼龙材料卡扣壳内,通过卡扣结构将其夹持在光缆光-无线电能节点上实现非电气直连的操作。卡扣结构如图 3 所示。

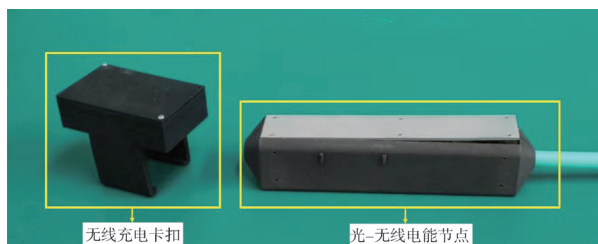


图 3 卡扣与节点实物图

Fig. 3 Buckle and node physical diagram

在信息处理终端侧,节点处采集到的电信号经信号处理单元转换为 1 310 nm 光信号,中心波长 1 310 nm 通过波分复用器 2 耦合,经过光纤传至信息处理终端侧的波分复用器 1 解复,并转为电信号实现可观测的监测数据^[10]。

2 系统关键技术

2.1 激光传输与光纤衰减

激光在远距离传输中存在传输损耗。该系统使用中心波长为 850 nm 的激光器进行能量传输。光纤传输损耗的计算公式为

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \frac{P_i}{P_o}, \quad (1)$$

式中: α 为衰减系数; P_i 为入射光功率; P_o 为光输出功率; L 为光纤长度。

系统中采用低损耗单模光纤,这种光纤在长距离传输中具备更低的衰减和更高的带宽,能够最大程度地保持激光信号的完整性。单模光纤通过减少模式色散,确保激光能量以最小的损失在远距离传输中进行传递^[11]。

2.2 光电转换的最大功率点追踪

InGaAs 光电转换单元的输出特性曲线如图 4 所示。

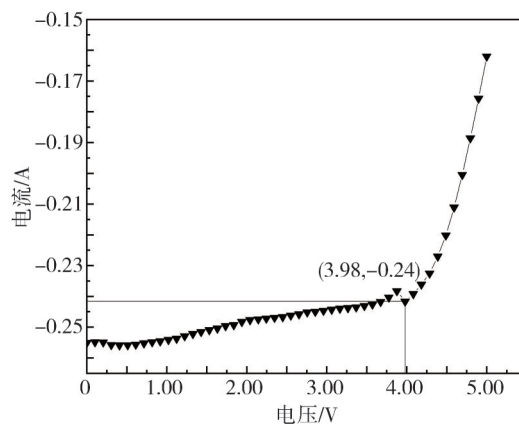


图 4 光电池 I-U 特性

Fig. 4 I-U characteristics of photocells

因此,最大功率点跟踪点设置为3.98 V,确保光电转换单元能够在不同环境条件下始终保持最大功率点操作,从而提高整体系统的能量转换效率。

由于终端激光器所处不同的环境,为确保光电池能够在不同条件下始终保持最大功率点操作,该系统通过单片机引入最大功率点追踪技术,通过不断检测光电池的输出电压和电流,使用单片机PWM(Pulse Width Modulation)驱动信号来调节占空比,从而实现电路中的实时调节,确保光电池始终工作在最大功率输出状态,原理框图如图5所示。

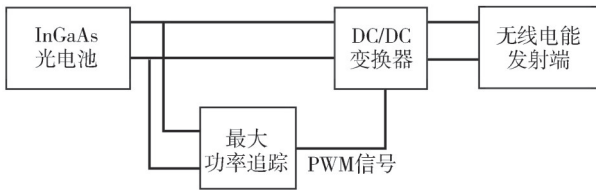


图5 最大功率点追踪原理框图

Fig. 5 Optical-radio energy management unit

实现最大功率点的持续追踪采用扰动观察法,算法通过微小地调节输入电压,实时测量输出功率的变化。具体而言,当电压扰动导致输出功率增加时,系统继续在相同方向上调整;当输出功率降低时,则改变调节方向,直到系统接近最大功率点,公式为

$$\begin{cases} \frac{dP}{dU} > 0: U = U + \Delta U, \\ \frac{dP}{dU} = 0: U = U_m, \\ \frac{dP}{dU} < 0: U = U - \Delta U, \end{cases} \quad (2)$$

式中: P 和 U 分别为工作功率和工作电压。当 $dP > dU$ 时,工作点在最大功率点左边,需要增加工作电压,反之则减少工作电压。

2.3 无线电能传输模块

在光电转换后,系统需要将产生的电能通过无线传输技术传递至负载端,从而实现高效、安全的能量传递。无线充电模块的核心技术基于磁耦合谐振。

光电池输出的直流电能通过DC/DC变换器调节为稳定的电压后供给无线充电模块。无线电能传输基本原理是利用磁场耦合,在发射端和接收端之间建立磁场链路,通过电感之间的相互耦合将能量以非接触的方式传递。具体实现时,系

统主要包括发射线圈和接收线圈,二者以一定频率的谐振来增强能量的传输效率^[12-14],完成整个系统能量传输的主体线路。

3 试验与分析

为验证所设计的基于光纤无线融合的监测通信一体化系统,搭建了一套综合通信监测系统,并通过此系统进行模拟测试。测试原理如图6所示,系统测试实验现场如图7所示。

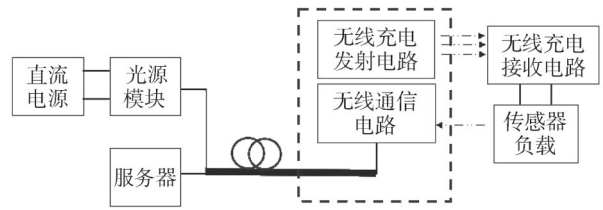


图6 系统测试原理框图

Fig. 6 System test block diagram

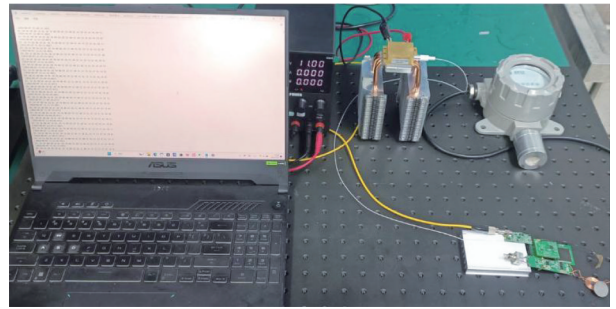


图7 系统测试实验

Fig. 7 System test experiment

3.1 系统能量传输测试

为验证所设计系统在光纤无线传能中的供能能力,分别测试长距离光纤的能量衰减情况、光电池的转换效率以及无线充电的转换效率,以确保系统能够支持传感器的正常运行。

在测试长距离光功率衰减时,使用波长为850 nm的光源,通过多模光纤进行传输。在起点处,激光器输入5 W的光功率,并分别在光纤长度为0.5、1、2和3 km处使用光功率计测试输出光功率。测得的光能量衰减程度如表1所示。经过计算,850 nm波长的光每千米功率衰减约为3 dB。

对无线充电在当前磁谐振下的充电效率进行实验测试,使用电子负载模拟传感器负载。发射和接收线圈完全对准,并通过万用表测量输出功率。结果表明,最大传输效率达到71.44%,稳定

传输效率超过 65%。测试环境如图 8 所示,测试效率结果如表 2 所示。

表 1 光纤衰减实验数据

Tab. 1 Optical fiber attenuation experimental data

光纤长度/km	输入功率/W	输出功率/W	衰减/dB
0.5	5	3.57	1.46
1	5	2.53	2.96
2	5	1.21	6.16
3	5	0.57	9.43

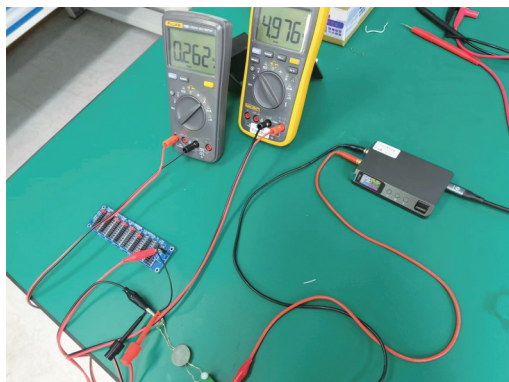


图 8 系统无线充电效率测试

Fig. 8 System wireless charging efficiency test

表 2 无线充电效率测试

Tab. 2 Wireless charging efficiency test

输入功率/W	负载功率/V	负载电流/A	效率/%
1.69	3.54	0.32	67.0%
1.78	3.87	0.32	69.57
1.90	4.19	0.32	70.57
1.99	4.51	0.30	67.99
2.09	4.83	0.30	69.33
2.03	4.94	0.29	70.57
1.94	4.95	0.28	71.44
1.85	4.95	0.26	69.57
1.76	4.95	0.25	70.31

实现 1 W 的功率输出有效支撑了后续传感器及无线通信的功率需求。

3.2 系统功能测试

为验证本文所述系统运行有效性,对 3 组不同传感器进行了测试,包括温湿度传感器、气体检测传感器和振动传感器。传感器通过无线充电供电,实际隧道安装测试情况如图 9 所示。传感器被设置为不同的监测频率,数据通过无线通信和光纤回传至终端服务器,信息反馈情况见表 3。

表 3 传感器信息回传测试数据

Tab. 3 Sensor information feedback test data

传感器	检测频次/(s·次 ⁻¹)	测试数据量/次	离群值/%
温湿度	600	586	0.2
气体监测	30	6 109	0.9
震动监测	30	6 679	1.7

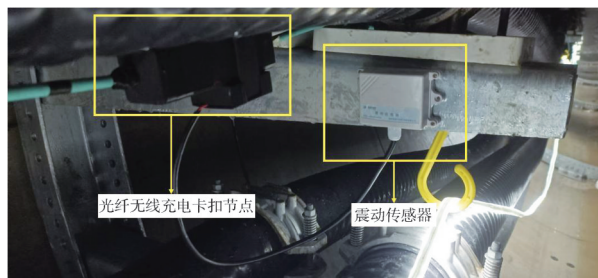


图 9 实际隧道测试实验

Fig. 9 Actual tunnel test experiment

实验结果证明系统能够稳定有效地支撑传感器运行并获取受限空间中的相关数据。

4 结 论

本文提出了一种基于光纤能信共传技术的无线融合监测通信一体化系统设计。针对传统通信系统在布设和维护方面的挑战,采用高效的光电转换单模光纤能信共传技术。该技术能够解决部分环境下通信受限和布设困难的问题,通过节点内嵌式光缆实现便捷布设,有效突破电磁干扰受限的空间,从而显著提升系统的布设灵活性和通信效率。

相较于传统光缆在受限空间内的应用局限,本文创新性地引入了磁谐振短距离无线技术。这一技术通过短距离无线能量传输及信息反馈,实现了非直接连接区域的高效供能。其可拆卸卡扣设计优化了监测设备的更换和维护过程,解决了传统内嵌式光缆在设备更换和维护方面的难题,满足了电网巡检在精度和速度要求上的高标准。

本文所开发的无线融合监测通信一体化系统,通过高效的光电转换技术与创新的磁谐振短距离无线通信方案,提供了一种对于传统监测通信系统布设和维护问题的有效解决策略,极大地增强了系统的灵活性和可维护性,为未来电网监测技术的发展提供了新的思路。

参考文献:

[1] 于晨龙,张作慧. 国内外城市地下综合管廊的发展历程及现状[J]. 建设科技, 2015(17): 49-51.
 YU Chenlong, ZHANG Zuohui. The development process and current situation of urban underground integrated pipe corridor at home and abroad[J]. Construction Science and Technology, 2015(17): 49-51. (in Chinese)

[2] 张东霞,苗新,刘雨平,等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 2-12.

- ZHANG Dongxia, MIAO Xin, LIU Liping, et al. Research on development strategy for smart grid big data[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 2-12. (in Chinese)
- [3] GLASER P E. Power from the Sun: its future [J]. Science, 1968, 162(3856): 857-861.
- [4] MEI Q, GU X, SHEN R, et al. Meteorological monitoring system for transmission line tower based on power-over-fiber [C]//2023 6th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), 2023: 37-41.
- [5] DIOUF C, QUINTARD V, GHISA L, et al. Design, characterization, and test of a versatile single-mode power-over-fiber and communication system for seafloor observatories [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 45(2): 656-664.
- [6] 杨海林, 刘丽娟, 彭迪, 等. 光纤信能共传技术研究进展 [J]. 光学学报, 2021, 41(11): 9-18.
YANG Hailin, LIU Lijuan, PENG Di, et al. Research progress of power-over-fiber technique applied to radio-over-fiber systems [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 9-18. (in Chinese)
- [7] 杨立伟, 易湘诚, 刘兆瑞, 等. 基于光纤传能的异构无源光网络研究 [J]. 光通信研究, 2022(1): 23-26.
YANG Liwei, YI Xiangcheng, LIU Zhaorui, et al. Heterogeneous passive optical network based on power over fiber [J]. Study on Optical Communications, 2022(1): 23-26. (in Chinese)
- [8] MATSUURA M. Power-over-fiber using double-clad fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(10): 3187-3196.
- [9] DIOUF C, GHISA L, QUINTARD V, et al. A bidirectional and versatile power-over-fiber system for seafloor observatories [C]//OCEANS 2017-Aberdeen, 2017: 1-4.
- [10] 尹龙. 基于光纤传能的视频图像信号远端采集、传输及处理系统的研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
- [11] LI Y, XIAO Z, ZHANG Z, et al. A novel remote multi-sensing energy management system based on power-over-fiber transmission [C]//4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), 2020: 125-129.
- [12] SONG B, CUI S, LI Y, et al. A fast and general method to calculate mutual inductance for EV dynamic wireless charging system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 2696-2709.
- [13] SONG K, YANG G, ZHANG H, et al. An impedance decoupling-based tuning scheme for wireless power transfer system under dual-side capacitance drift [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(7): 7526-7536.
- [14] CAI C, WANG J, FANG Z, et al. Design and optimization of load-independent magnetic resonant wireless charging system for electric vehicles [J]. IEEE Access, 2018, 6: 17264-17274.