

引用本文: 阮易, 陈明锬, 杨肖, 等. 基于智能充电控制的光纤供能系统[J]. 光通信技术, 2023, 47(6): 42–47.

## 基于智能充电控制的光纤供能系统

阮 易, 陈明锬, 杨 肖, 陆云清, 王 瑾\*

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210000)

**摘要:** 为了进一步提高系统的能量利用率, 设计了一种基于智能充电控制的光纤供能系统。系统采用充电控制装置对后级负载稳定供能并灵活调控储能模块的充电方式, 实现对远端富余的能量快速存储和合理利用, 并基于反馈信号实现对系统工作状态的实时调控。实验结果表明: 所提系统在不同场景下能够根据远端的负载及器件的工作状态自动调整本地激光光源的输出功率, 从而保证供能系统的安全工作; 当光供能不足时, 所储存的能量可作为备用能源对传感器件或应用设备进行紧急供能。

**关键词:** 光纤供能; 光伏电池; 电源管理; 最大功率跟踪; 充电控制

**中图分类号:** TN929.1; TM910.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)06-0042-06

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.06.009

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Fiber optic energy supply system based on intelligent charging control

RUAN Yi, CHEN Mingkun, YANG Xiao, LU Yunqing, WANG Jin\*

(School of Communication and Information Engineering,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** In order to further improve the energy utilization rate of the system, a fiber optic energy supply system based on intelligent charging control is designed. The system uses a charging control device to stably supply energy to the rear load and flexibly regulate the charging mode of the energy storage module, so as to realize the rapid storage and rational utilization of the remote excess energy, and realize the real-time regulation of the system's working state based on the feedback signal. The experimental results show that the system can automatically adjust the output power of the local laser source according to the remote load and the working state of the device in different scenarios, so as to ensure the safe operation of the energy supply system. When the light energy supply is insufficient, the stored energy can be used as backup energy for emergency energy supply to the sensor or application equipment.

**Key words:** fiber optic power supply, photovoltaic cell, power management, maximum power point tracking, charging control

### 0 引言

传统的充电系统在恶劣条件下的供能安全性和效率存在严重问题, 且系统能量的供给也限制着充电系统的延伸和功能实现。例如, 在强电磁等恶劣环境下, 系统工作的电力供应存在困难; 在易燃易爆的环

境下, 电火花会引起灾难性后果。目前, 新型的无线电磁传能、声波传能、太阳能供电以及大容量电池供电等技术依然存在较大的局限性。例如, 电磁环境对无线电、声波会产生干扰, 太阳能受大气环境限制, 大容量电池存在寿命短、安全性能差等问题<sup>[1-2]</sup>。因此, 在这些特殊场合需要一种稳定、安全且抗电磁干扰的电力供应方式实现远程充电。

光纤供能(POF)技术作为一种新颖的供能方式, 在难以铺设传统电力线的场所, 通过光纤传输激光能量并由远端的光/电转换器转换为直流电, 为远端的各个器件或设备提供安全能源<sup>[3]</sup>。相比传统的电力线, 光纤的抗电磁干扰能力使其在多种极端恶劣的场合

收稿日期: 2023-03-26。

**作者简介:** 阮易(1997—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 目前就读于南京邮电大学通信与信息工程学院电子信息类专业。硕士期间从事光纤通信、光纤供能与传感技术及其系统的研究工作, 参与并完成了南方电网横项科技项目。

\* **通信作者:** 王瑾(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光纤通信与光纤传感。



实现能量供给,从而在电力及工业传感控制<sup>[4]</sup>、物联网<sup>[5]</sup>、海底测量<sup>[6]</sup>以及越来越多的特殊场合得到广泛应用。尽管光纤供能系统有了较为深入的研究与发展,但系统整体的能量利用率有待进一步提高<sup>[7]</sup>。尤其当光纤供能技术应用于远端充电系统时,光纤所供给的能量可能不足或超过远端的充电模块所需的能量,此时多余的能量会以热能等形式从光/电转换器或其它器件散去,导致系统器件性能和能量利用率降低,从而无法保证系统的安全性及可靠性。因此,本文提出一种基于智能充电控制的光纤供能系统。

## 1 系统与主要器件

### 1.1 系统设计和工作原理

本文设计的基于智能充电控制的光纤供能系统框图如图1所示。该系统主要由本地基站、光纤链路和远端模块组成。本地基站位于能量不受限制的地方,主要包括高功率激光源、光接收单元、基站信号处理单元<sup>[8]</sup>;光纤链路包括传输激光能量的能量光纤和传输远端模块信息的数据光纤;远端模块主要包括光伏电池、电源管理模块、智能充电模块、锂电池储能模块、功率监测模块及光发送单元模块。在本地基站中,激光器为远端提供能量;光接收单元接收数据光纤的光信号,并将其转为电信号后传输至基站处理单元;基站处理单元基于远端模块的工作状态来实现对激光源输出光功率的调控。在远端模块中,光伏电池将激光能量转为直流电能量;电源管理模块从光伏电池获得最大的输出电功率<sup>[9]</sup>,并为充电管理模块、功率监测模块以及光发送单元提供稳定的电压和能量供应;充电管理模块实现对储能单元安全充电;储能(放电)单元将多余的能量进行存储,光供能不足时作为备用能源为后端负载供能;功率监测模块采集储能单元的工作状态信息并将信号发送给光发送单元;光发送单元完成工作状态信号的电/光转换,并经过数据光纤

将其发送至本地基站。

智能充电控制主要由采集储能单元工作数据的功率监测模块来实现。功率监测模块主要由采样电路和微处理器构成。采样电路实现对储能单元电压和电流值采样,而微处理器接收电压和电流采样信号并根据该采样信号预估储能单元的剩余能量。然后,根据这个剩余能量的评估值,微处理器生成一个反映远端模块工作状态的反馈信号。该反馈信号经过数据光纤回传至基站。基站处理单元根据反馈信号提供的信息判定远端模块的工作状态,并根据判定结果生成调控信号,以控制本地高功率激光源的输出光功率,从而实现光伏电池输出功率对负载功率的跟踪匹配。

### 1.2 系统主要器件

本文所提系统的主要器件包括工作波长为 808 nm 的可调激光源、光伏电池、带有电源管理的充电控制模块、功率监测模块、光收发模块以及基站处理单元。能量光纤和数据光纤分别采用芯径为 62.5  $\mu\text{m}$  的多模光纤和芯径为 9  $\mu\text{m}$  的单模光纤。基于智能充电控制的光纤供能系统的实物如图2所示。

1)可调激光源。本文采用的可调激光源额定输出光功率为 2 W、最大输出光功率为 3 W,并可通过接收

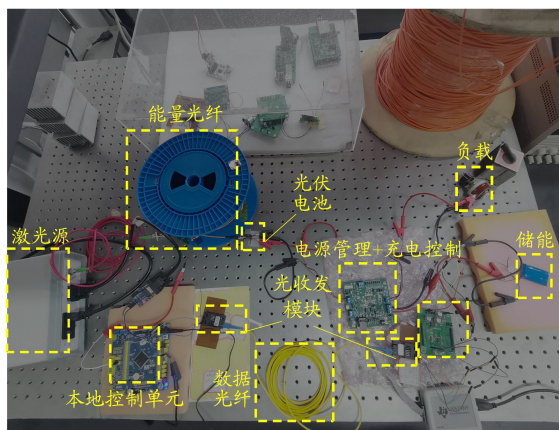


图2 基于智能充电控制的光纤供能系统实物图

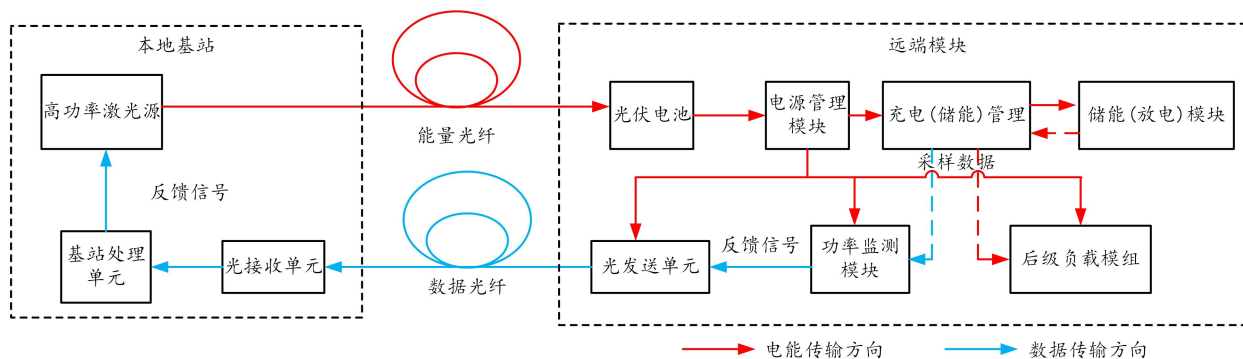


图1 基于智能充电控制的光纤供能系统框图

阮易,陈明锟,杨肖,等:基于智能充电控制的光纤供能系统

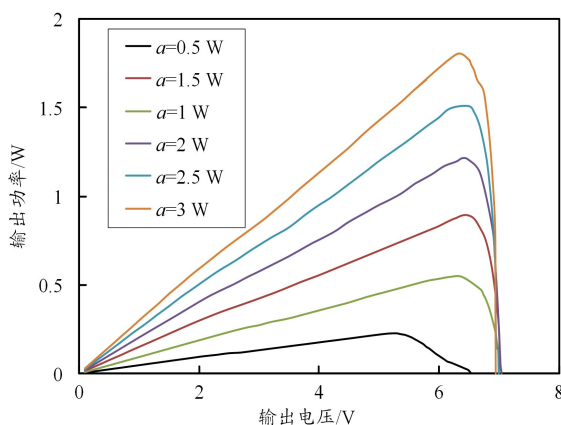
基站处理单元的数据指令而调整输出光功率。该激光源的工作电压为 220 V,内部使用驱动电路来控制交流电流的波形以实现激光输出光功率的精细控制和调节。经测试,当激光器输出光功率低于 2 W 时,输出光功率与偏置电流之间存在线性关系,即增加偏置电流可以使输出光功率按线性方式增加。但是,加大偏置电流使激光器的输出光功率高于 2 W 后,输出光功率不再以线性方式增加,而是逐渐进入饱和状态。

2) 光伏电池。光伏电池作为光纤供能系统的核心器件,其光/电转换效率直接影响整个系统的工作效率<sup>[9]</sup>。系统采用了具备较大的能隙且在不同温度下具有高耐受性的 GaAs 材料制备光伏电池,其实物如图 3 所示。在工作波长为 808 nm 的激光驱动下光伏电池的光电特性如图 4 所示。可以看出,在不同强度的入射光功率  $a$  下,光伏电池的输出功率呈非线性变化。由于光伏电池的开路电压基本不变,所以短路电流会随着入射光功率的增加而变大。在入射光强度一定时,光伏电池在某一特定电压下有着最佳工作点,此时的光/电转换效率达到最高和输出功率达到最大。所制备的光伏电池在 3 W 的入射光功率下的最佳工作点电压是 6.32 V,光/电转换效率为 56%,输出电功率接近 1.7 W。但是,随着光纤供能系统负载设备的变化,光伏电池的最佳工作点也会产生相应的变化。因此,需要使用电源管理模块确保光伏电池始终工作在最大功率点附近。

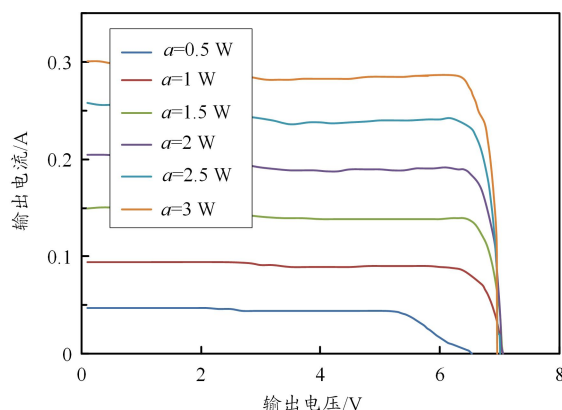


图 3 光伏电池实物图

3) 电源管理模块。本文针对该光伏电池的输出特性设计了具有最大功率点跟踪(MPPT)功能的电源管



(a) 电压-功率曲线



(b) 电压-电流曲线

图 4 光伏电池光电特性

理模块,其方案如图 5 所示。为了实时调整光伏电池的工作点,该方案采用了基于升降压直流转直流

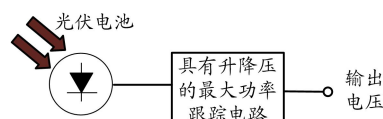


图 5 电源管理模块设计方案

(DC-DC)技术的最大功率跟踪电路。当光伏电池连接至该模块,模块的等效内阻可以自动调节,以尽可能地匹配光伏电池的阻抗。在阻抗匹配时,光伏电池输出电压可以保持在其最佳工作点电压附近,从而使得光伏电池工作在最大功率点附近<sup>[11,13,16]</sup>。

4) 充电管理电路模块。本文采用容量为 1 000 mAh 的锂电池作为本地供能充足时系统中的储能单元,本地供能不足时则充当备用能源对后端负载供能。

本文以现场可编程门阵列(FPGA)为核心设计了充电管理电路模块,该模块根据输入功率大小自主分配功率至储能模块和后级负载,对工作电压不同的多级负载稳定供能,实现对储能模块充电方式的调控。充电管理电路模块具有 2 种工作模式:一种是在本地所供给的能量远高于远端所需能量时,该模块能够支持负载正常工作,同时对储能模块进行充能,将电能存储至储能模块;另一种是在本地供能不足以支持远端的负载正常工作时,充电模块不再对储能模块充电,而是同本地基站对后级负载供能,以保证负载正常工作。

5) 智能充电模块。智能充电模块的主控芯片采用了德州仪器的 BQ25792 芯片,其外围电路主要有输入和充电检测电路、升降压变换器的回路补偿电路。充电管理模块输入电压的范围为 3.6~24 V,最大输入电流为 3.3 A,充电电流分辨率为 10 mA,同时具备多种充电接口,既适应 USB Type-C、USB 供电和 1~4 节锂

电池供电,也可以对大部分电子产品进行智能充电。此外,基于该芯片的智能充电模块使用具有4个开关的金属-氧化物半导体场效应管(MOSFET)构成了升降压拓扑结构,实现升降压变换以满足不同场景负载的需求,给负载提供稳定的、可选的电压。

6)功率监测模块。功率监测模块实现对储能模块工作信息的采集,由电压-电流采样电路及其它外围控制电路实现,其设计方案如图6所示。电压-电流采样电路基于INA226采样芯片读取储能单元工作电压和电流。该芯片的采样电压范围为0~36 V,采样电流范围为0~5 A,可满足绝大多数场景的采样需求。单片机处理电路采用了STM32L151C8T6作为主控芯片,通过PC接口与采样电路通信,并基于采样信号生成反映远端的模块工作状态的反馈信号。



图6 功率监测模块设计方案

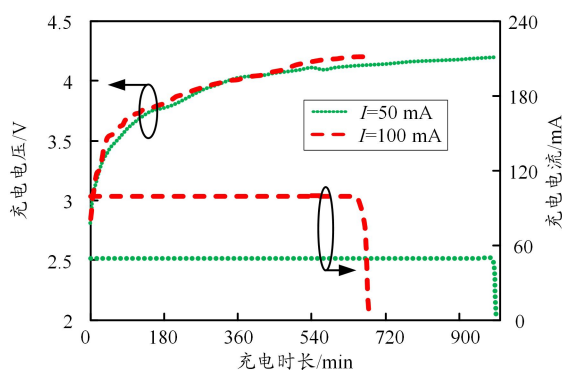
7)光收发模块。本文采用工作波长为1310 nm、数据传输速率为28.8 kb/s的光收发模块将反馈信号回传至基站。该模块支持多元协议封装,接口为SC接口,同时光接收和光发送部分相互独立,能够满足本系统低速率稳定通信的要求。

8)基站信号处理单元。基站信号处理单元对本地激光器出射光功率进行调控。该单元由STM32F103ZET6芯片及外围电路构成。基站信号处理单元接收远端的反馈信号,根据该信号判断系统是否适合以当前状态持续运行。后向基站光源发送可识别的程序指令,实现对本地激光源输出功率的实时调整。

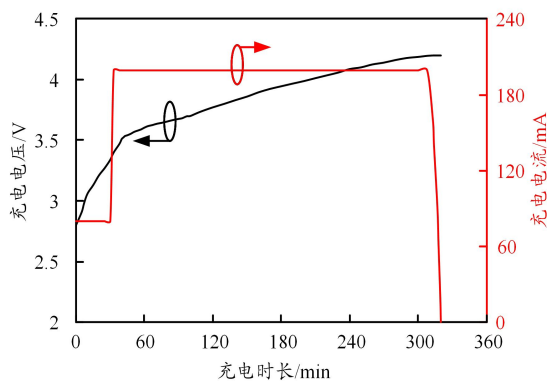
## 2 系统性能

### 2.1 充电性能测试

由于所提系统中充电模块仅对储能模块进行充电且无后级负载,因此本文对锂电池在不同的充电模块输入电流下的工作状态进行测试,其充电特性如图7所示。图7(a)中,充电模块的输入电流 $I$ 分别为50 mA和100 mA,智能充电模块采用相同的方式对锂电池安全充电。可以看出,充电初期电压上升较快,这个阶段锂电池容量随时间迅速增加;进入充电后期,电池能接纳的最大充电电流变小,充电电压缓慢接近4.2 V,原因是充电控制模块精确控制锂电池的充电终止电压,减少充电电流至零,防止电池发生过充而遭到损坏。显然,增大充电模块的输入电流能有效缩减锂电



(a) 输入电流  $I$  分别为 50 mA 和 100 mA



(b) 输入电流  $I$  为 200 mA

图7 电池充电特性曲线

池充满电的时长。

当本地所供给的能量远远高于远端所需能量时,系统中富余的能量将通过充电控制模块以化学能的形式存储在储能模块中。从储能模块的安全稳定性出发,充电控制模块需要采用不同于图7(a)的充电方式,而选择图7(b)的充电方式。充电控制模块在较大的输入电流下,储能模块充电分成3个阶段:第一阶段,充电控制模块以恒定电流为80 mA对锂电池充电30 min,电池电压随充电进程保持不变;第二阶段,完成预充电阶段并提高锂电池电压后,充电控制模块以最高的充电功率实现对锂电池恒流充电,直至电池两端电压上升至充电截至电压4.2 V;第三阶段,充电控制模块对锂电池恒压充电,直至电池的充电电流减小至0,完成充电。这种以小电流预充,再恒流后恒压的充电方式避免了初期大电流损坏电池,同时也将系统中富余的部分能量充分存储起来。

本文对远端搭载了负载模块的系统进行了多次性能测试,远端的光收发模块功耗稳定在85 mW,功率监测模块功耗约为90 mW。充电模块的负载输出电压设定为10.5 V,负载采用100  $\Omega$  的定值电阻,在不同的光伏电池输出电功率下,充电模块的功耗及储能模

阮易,陈明锟,杨肖,等:基于智能充电控制的光纤供能系统

块的充电功率变化如图8所示。当光伏电池输出功率低于1400 mW时,充电控制装置以第一种模式工作,锂电池此时作为备用能源对后级负载供电,充电模块功耗约为125 mW,负载正常工作且功耗不变,消耗的电功率约为1100 mW。当光伏电池输出功率增大至1400 mW以上时,充电控制模块调整工作模式,锂电池处于充能状态,此时充电模块功耗约为215 mW。在更大的光伏电池输出功率下,后级负载功耗稳定不变,维持在1100 mW,锂电池仍保持充能且充电功率会随着光伏电池的输出功率增大而增加。这种状态下,系统将光伏电池所提供的部分富余能量以化学能量的形式存储在储能单元。

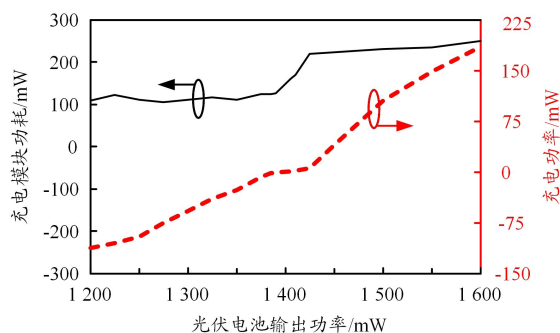


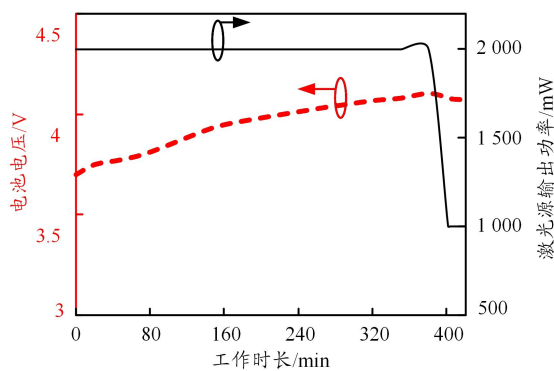
图8 在光伏电池不同输出功率下的充电模块功耗和锂电池充电功率

## 2.2 反馈回路功能及系统传能效率测试

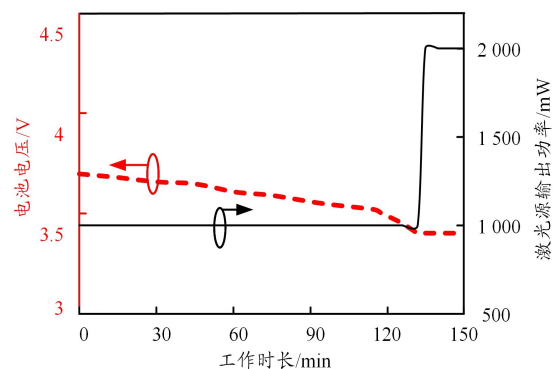
本文针对不同场景,对所提系统的性能进行实验。

场景一:远端的储能单元剩余容量为20%,智能充电模块的输出电压设定为7 V,负载采用98  $\Omega$  的定值电阻,激光源输出光功率为2 W,本地供给的能量高于远端模块各器件所需能量。该场景下的锂电池充电电压与激光源输出功率曲线如图9(a)所示。可以看出,远端的负载正常工作,并且对远端的储能单元持续充能,直至储能单元锂电池的充电电压接近4.1 V,而储能模块的储能容量超过90%。此时,本地基站信号处理单元接收到远端的反馈信号并向激光器发出减少光功率输出的调控指令,短时间内激光器的出射光功率由2 W调整至1 W。然而,由于激光器输出1 W时不足以支持远端的负载正常工作,远端的储能单元由充能转为放电,联合本地供给能量一同对负载进行供电,因此电池电压缓慢下降。

场景二:远端的储能模块剩余容量约为50%,充电控制模块的输出负载电压为3.7 V,负载采用的定制电阻为16.2  $\Omega$ ,激光器的输出光功率为1 W,本地供给的能量略低于远端各器件所需能量。这种场景下的锂电池充电电压与激光源输出功率曲线如图9(b)所示。



(a) 场景一



(b) 场景二

图9 锂电池充电电压与激光源输出功率曲线

示。由于锂电池与本地基站一同对负载稳定供电,电池电压缓慢降低,直至电池电压接近3.4 V,储能模块剩余容量接近20%时,本地基站接收到反馈信号后调整激光器的输出功率至2 W。本地所供给能量恰好能够支持远端负载正常工作,锂电池不再对后级负载供电,电池电压基本稳定不变。

为保证系统稳定运行,本文对系统远端各器件进行功耗测试。在场景一:激光器输出光功率为2 W时,经过200 m的多模光纤传输,光伏电池接收的光功率约为1710 mW(包括光纤损耗以及插入损耗),根据光伏电池的输出生特性曲线可知,此时光伏电池可输出的最大电功率约为1.02 W,经过电源管理和充电控制模块,实际输出电功率约为785 mW;电源管理模块和充电控制模块的联合转换效率约为76.5%,系统总效率为39.3%。在场景二:激光器的输出光功率为1 W时,激光能量经过多模光纤传至光伏电池后光功率将为850 mW,光伏电池实现光电转换后输出电功率约为472 mW,经电源管理模块和充电控制模块后实际输出电功率约为345 mW;储能模块与充电控制模块联合对负载供电,此时系统的总效率约为34.5%。

### 3 结束语

本文设计并搭建了一套基于智能充电控制的光纤供能系统,该系统采用工作波长为 808 nm 高功率激光器,其产生的激光能量通过长度为 200 m、芯径为 62.5  $\mu\text{m}$  的多模光纤传输至光伏电池,光伏电池实现光/电转换并通过电源管理为充电控制装置、光发送模块以及功率监测模块供给能量;在远端加入的智能充电控制装置不仅对负载稳定供能,而且将通过光纤供给远端的部分能量进行存储,并实时监测储能模块的工作电压和电流。然后,将这些工作状态参数传输至本地控制单元。根据储能模块的工作状态参数,本地控制单元生成调控信号,以控制本地激光源的输出光功率。当本地供能的能量值发生变化时,远端实现了对负载稳定供能以及对储能模块充电方式的灵活调控,并合理地利用了远端富余的部分能量。最后,在不同场景下验证了系统的可行性。实验结果表明:当样机系统正常工作时,远端能将本地供给的部分能量进行存储;本地控制单元实现了对 200 m 外的负载稳定供能以及对系统实时工作状态的调控。此外,当光供能不足时,所储能的能量可作为备用能源对传感器件或应用设备进行紧急供能。在紧急供能时,系统故障或供能不足的信息将反馈给本地基站,保障光纤供能系统安全工作,提高了系统的使用寿命。

### 参考文献:

- [1] 严靖,王瑾,高晨,等. 物联网中的光纤供能传感系统设计与实现[J]. 光电子·激光, 2015, 26(8): 1513–1519.
- [2] QIU H, LI L, DUAN X, et al. Opt-electric transmission system of low power consumption for optically powered electronic current transformers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 72–76.
- [3] ROSOLEM J B, ROKA R. Power-over-fiber applications for telecommunications and for electric utilities [J]. Optical Fiber and Wireless Communications, 2017, 2: 255–278.
- [4] ISHIGAKI M, FAFARD S, MASSON D P, et al. A new optically-isolated power converter for 12 V gate drive power supplies applied to high voltage and high speed switching devices [C]//2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC2017), Mar 26–30, 2017, Tampa, USA. Piscataway: IEEE, 2017: 2312–2316.
- [5] LÓPEZ-CARDONA J D, DELGADO M, ALTUNA R, et al. Optimized power-over-fiber system to remotely feed smart nodes for low-power consumption applications [C]//2021 13th Spanish Conference on Electron Devices (CDE2021), June 9–11, 2021, Sevilla, Spain. Piscataway: IEEE, 2021: 41–44.
- [6] 张华勇,王向刚,李勇. 光纤供能水下摄像原型系统[J]. Journal of Sensor Technology and Application, 2021, 9(3): 183–187.
- [7] DUMKE M, HEISERICH G, FRANKE S, et al. Power transmission by optical fibers for component inherent communication [J]. Journal of Systems, Cybernetics and Informatics, 2010, 8(1): 55–60.
- [8] CHEN Y, SILVESTRI L, LEI X, et al. Optically powered gas monitoring system using single-mode fibre for underground coal mines[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2022, 9(2): 36–47.
- [9] LI Y, XIAO Z, ZHANG Z, et al. A novel remote multi-sensing energy management system based on power-over-fiber transmission [C]//2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE2021), September 24–26, 2021, Xi'an, China. Piscataway: IEEE, 2021: 125–129.
- [10] FAFARD S, MASSON D P. Perspective on photovoltaic optical power converters[J]. Journal of Applied Physics, 2021, 130(16): 160901–160901.
- [11] 杨永友,易卫东,卓国文. 动态充电电流调节方法在高效率太阳能锂电池系统中的应用[J]. 中国科学院大学学报, 2013, 30(3): 361–367.
- [12] 兰子林,邹喜华,白文林,等. 光载信息能量同传方案及其通信检测应用[J]. 电子学报, 2022, 50(4): 804–810.
- [13] 李勇,程汉湘,陈杏灿,等. 光伏电池输出特性及其最大功率跟踪研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(1): 70–75.
- [14] SHIKOSKI J, ARNAUDOV R, EFTIMOV T. Photonic powering of sensors with bidirectional communication along a single fiber[J]. Photonics Letters of Poland, 2020, 12(1): 7–9.
- [15] HELMERS H, ARMBRUSTER C, VON RAVENSTEIN M, et al. 6-W optical power link with integrated optical data transmission[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 7904–7909.
- [16] WEI P, LU S, HUANG H, et al. An energy management scheme based power-over-fiber system[J]. Optoelectronics Letters, 2019, 15: 420–423.