

基于 ZigBee 的 OPGW 短路试验无线温度测试系统

伏丽娜^{1,2}, 杨桂松¹, 郭毅², 于晶², 陈晓阳²

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 上海电缆研究所有限公司, 上海 200093)

摘要: 国内无线技术与光纤复合架空地线(OPGW)短路电流试验相结合的测试技术一直处于研究空白阶段。根据光功率计和双波长稳定光源的合理搭配, 组成满足试验要求的光衰减测试系统; 基于 ZigBee 无线测温技术和数据采集系统的有机结合, 组成适用于 OPGW-24B1-72 样品的短路试验测温系统; 通过光衰减测试系统与测温系统的组合, 建立一种 OPGW 短路试验无线温度测试系统并进行试验。试验中样品光缆的最高温度约为 161℃, 光纤永久最大衰减约为 0.01dB/fiber。试验结果证明: 基于 ZigBee 的 OPGW 短路试验无线温度测试系统不仅具有可操作性, 而且能大幅度缩短准备时间, 提高了在大电流试验现场设备和人员的安全系数, 并进一步简化了测试现场的线路布局。

关键词: ZigBee; OPGW; 短路; 无线

中图分类号: TN365 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)01-0042-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.01.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Wireless temperature test system for OPGW short circuit test based on ZigBee

FU Li'na^{1,2}, YANG Guisong¹, GUO Yi², YU Jing², CHEN Xiaoyang²

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: The test technology combining the domestic wireless technology with the optical composite overhead ground wire (OPGW) short-circuit current test has been in the research blank. According to the reasonable combination of the optical power meter and the dual-wavelength stable light source, a light attenuation test system that meets the test requirements is formed. Based on the organic combination of ZigBee-based wireless temperature measurement technology and data acquisition system, a short-circuit test temperature measurement system suitable for OPGW-24B1-72 samples is formed. Through the combination of the optical attenuation test system and the temperature measurement system, an OPGW short-circuit test wireless temperature test system is realized and established. After the test, the maximum temperature of the sample cable is about 161℃, and the permanent maximum attenuation of the fiber is about 0.01dB/fiber. The experiment results prove that the proposed system is operable and greatly shortens the preparation time, improves the equipment and personnel safety factor at the high-current test site, and simplifies the circuit layout of the test site.

Key words: ZigBee; OPGW; short-circuit; wireless

0 引言

光纤复合架空地线(OPGW)是在架空输电线路上

收稿日期: 2018-07-26。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0901200)资助。

作者简介: 伏丽娜(1990-), 女, 上海人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为无线传感器网络, 就职于上海电缆研究所有限公司, 就读于上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 从事光纤光缆及检测技术研究, 任国家能源电线电缆评定中心秘书处成员。负责并参与完成和即将完成的省部级、国家级项目 5 项。



使用的集通信光纤和架空地线功能为一体的电力光缆, 已在输电线路电力通信网络中得到广泛应用^[1]。在工程应用时, OPGW 受雷击损坏的情况时有发生, 雷击产生的大电流会使 OPGW 在短路条件下迅速升温, 导致光纤涂覆材料裂化从而降低光纤的传输性能和使用寿命, 这会直接影响电力部门通信网络的安全稳定运行。

目前, OPGW 短路电流试验技术采用的主要标准有: IEEE 1138^[2]标准、IEC 1396 标准的 CDV 文件^[3]和

机械行业标准 JB/T 8999-1999《光纤复合架空地线(OPGW)》^[4]等,但短路电流试验的测温技术仍以插拔式热电偶为主。有线插拔式热电偶测温技术虽有测量精准、测量范围宽和抗干扰能力强等优点,但使用不便,通常需要连接温控仪、屏蔽线等设备综合使用,且设备间各种型号需要逐一对应,适应性差。随着移动互联网、嵌入式计算和无线通信等技术的不断发展,将无线技术融入 OPGW 测试技术已成为未来发展趋势。国内外先后对 OPGW 运行状态的无线温度监测方法进行了研究,实现了红外诊断测温技术^[5,6]、布里渊时域反射法(BOTDR)^[7]和布里渊光纤时域分析方法(BOTDA)^[7,8]等在线温度监测技术的应用与推广,而短路电流试验在无线测温技术上却始终未有相关研究。为了进一步发展探索我国自主的光缆测试技术,针对插拔式热电偶使用繁琐、布线复杂、配套设备要求高和适应性差的问题,本文探索并尝试“OPGW+ZigBee”组合模式的短路电流试验方法,用 ZigBee 替代插拔式热电偶,拟建立一个 OPGW 短路试验无线温度测试系统,实现简化测试现场、减少试验布线、降低配件要求和提高试验工作效率的目的。

1 OPGW 及其短路参数

OPGW 由数个光单元或多层单线组成^[9]。常见的 OPGW 结构如图 1 所示^[9]。光单元既可以容纳一定数量的光纤,也可以赋予光纤一定的保护,通常由金属管等具有防水功能的材料构成^[4,9]。OPGW 一经架设,既起到光纤通信传递信息的作用,又起到地线作用,一举两得。

电力地线作为架空线的一种,其绞丝主要为铝合金线和铝包钢线两类,且对于一个已完成结构设计的成品 OPGW,其短路电流试验的参数可通过各组件材

料参数进行计算。正常运行工作状况下(40℃~220℃),OPGW 单位时间内允许通过的最大电流可以通过成品缆各材料的截面积和单位时间内通过该面积的电流流量计算得到。在短路试验中,短路额定承载电流即为被测 OPGW 单位时间内允许通过的最大电流,可按式(1)计算^[9]:

$$I_{\text{thr}} = S_{\text{thrSt}} \times A_{\text{St}} + S_{\text{thrAl}} \times A_{\text{Al}} + S_{\text{thrAA}} \times A_{\text{AA}} \quad (1)$$

其中, I_{thr} 表示 1s 额定承载电流,即为 1s 内允许通过的最大电流; S_{thrSt} 、 S_{thrAl} 和 S_{thrAA} 分别表示钢、铝和铝合金的 1s 额定承载电流密度; A_{St} 、 A_{Al} 和 A_{AA} 分别表示铝包钢线中钢、铝和铝合金的横截面积。通常情况下,各材料 1s 额定承载电流密度 S_{thr} 指 1s 内通过被测 OPGW 中各材料截面积的电流流量,即由式(2)得出^[9]:

$$S_{\text{thr}} = K / (T_k^{0.5}) \quad (2)$$

其中, T_k 表示短路电流持续时间; K 为各材料的换算系数,该数值由各材料的特性决定,可由式(3)计算得到^[9]:

$$K = [(k_{20} \times c \times \rho) / a_{20}] \ln[(1 + a_{20} \times \theta_{e-20}) / (1 + a_{20} \times \theta_{b-20})] \quad (3)$$

其中, k_{20} 表示 20℃ 导电率, c 表示比热容, ρ 表示密度, a_{20} 表示温度系数, θ_e 表示短路终止温度, θ_b 表示短路初始温度, θ_{e-20} 和 θ_{b-20} 分别表示 θ_e 和 θ_b 与基准温度 20℃ 的差值。如果基准温度不是 20℃,应对 k_{20} 进行修正。根据 IEC 60865-1 标准规定, K 为导管受到机械应力下出现短路时最高的工作温度^[10];当导线为铜或其它实心金属材料时其基准温度为 200℃;钢材类材料的基准温度为 300℃;对绞合铝/钢、铝/铝包钢导线及其分别对应的铝合金/钢、铝合金/铝包钢导线, K 应为铝/铝合金的最高允许温度(200℃)。

短路电流容量(P_t)指一段时间内通过电流的平方值,可按式(4)计算^[9]:

$$P_t = I_{\text{thr}}^2 \times T_k \quad (4)$$

现以 JL/B 40-120 铝包钢绞线为例,已知该样品的铝截面 $A_{\text{Al}} = 75.15 \text{ mm}^2$,钢截面 $A_{\text{St}} = 46.06 \text{ mm}^2$,计算 $\theta_b = 25^\circ\text{C}$ 、 $\theta_e = 300^\circ\text{C}$ 和 $T_k = 1 \text{ s}$ 时产生的短路电流。由式(1)~式(4)计算得到的铝、钢材材料 K 值以及 JL/B 40-120 铝包钢绞线短路电流流量数值,结果如表 1 所示。

2 Zigbee 无线传感器温度采集系统

无线传感器网络(WSN)是一种可实现自知之明的无线网络系统,具有部署速度快、耗能和成本较低等优点^[11]。ZigBee^[12]是一种新兴的基于无线传感网络的网络通信技术,该技术具有定位功能,可用于距离较

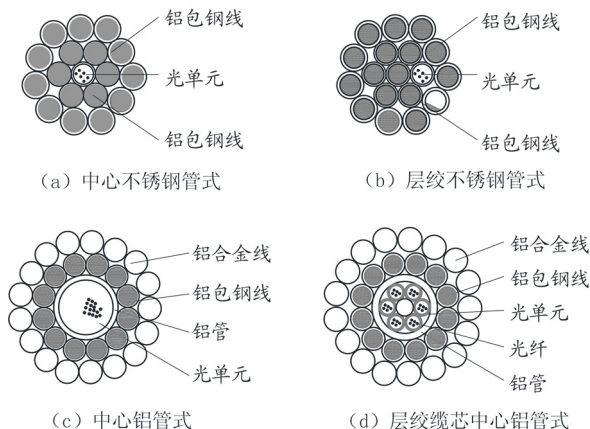


图 1 常见的 OPGW 结构

表 1 JL/B 40-120 铝包钢绞线材料参数值

参数	$k_{30}(1/(\Omega \cdot m))$	$c(J/(kg \cdot ^\circ C))$	$\rho(kg/m^3)$	α_{30}	K_{Al}	K_{St}	$A_{Al}(mm^2)$	$A_{St}(mm^2)$	$I_{th}(A)$	f_t
铝	34.8×10^6	910	2700	0.004	1.25×10^8	—	75.15	25	12.59	158.5
钢	7.25×10^6	480	7850	0.0045	—	6.94×10^7	—	25	—	—

近的无线网络之间的信息互联,通过其信息接力方式也可实现较远距离的数据传送^[13],具有低功耗、高容量且安全灵活等诸多优势^[14]。对于 IEEE 1138 的 OPGW 短路试验平台,由于标准要求的测试样品受试段长度仅为 10m,且明确要求测温装置和测光装置应分别测量两个不同样品,因此不仅需要达到简化现场布线的要求,也需考虑降低测试成本、提高使用效率,用 ZigBee 组成的无线网络取代有线网络是个较好的选择。

本文采用的 ZigBee 无线传感器温度采集系统结构图如图 2 所示。该系统采用了 3 层分布式结构,由包含测温传感器模块、Flash 存储和通信模块的 ZigBee 温度采集终端、无线温度监视仪和计算机监控工作站组成。传感器模块完成对被测对象及其余的温度测量,随后传感器将测量到的数值信息(即温度数据)通过 ZigBee 无线网络传给无线温度监视仪,无线温度监视仪把接收到的数值信息发送到总线网络中,通过将数据信息传送到计算机工作站上完成数据信息的进一步处理。在短路电流试验温度无线监测系统中,数据通信网络采用两种形式:ZigBee 无线通信网络和 RS485 总线网络。

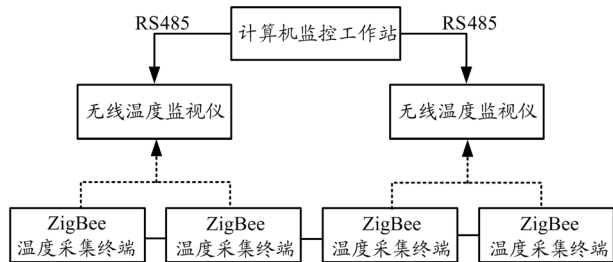


图 2 基于 ZigBee 的无线传感器温度采集系统的结构图

ZigBee 温度采集终端对时间控制要求比较高,因此程序的流程结构是基于时间出发的,编程利用了时间状态机方法。在无线检测系统中程序包含 3 个不同的应用任务,分别为温度采集、数据发送和休眠任务。在不同子程序运行前需要对系统进行初始化操作,随后将传感器模块测得的温度信息通过无线通信模块发送到监视仪,最后进入空闲模式完成休眠。在休眠 90ms 后重新唤醒系统,再次测量温度时将数据发送到无线温度监视仪中,随后完成循环。其中数据发送时间在 50ms 左右,包含系统唤醒时间 30ms、通信时间

10ms 和数据重发时间 10ms。ZigBee 温度采集终端的程序流程图如图 3 所示。

无线传感器温度采集系统中的各协调器节点自动联网构建星形拓扑网络。利用模块上的温度传感器模块采集温度,同时将采集的温度信息上传到协调器并进入休眠状态,以期实现低耗能运行,延长系统运行时间。网络中协调器节点主要任务是采集被测对象数据,同时将信息通过 RS485 串口发送到 PC 机,并完成数据信息的解析和显示。

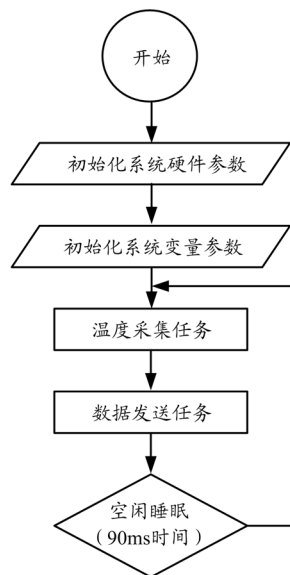


图 3 ZigBee 温度采集终端程序流程图

3 短路电流试验测试方法

OPGW 作为一种复合线,不仅可以进行通信、图像传输和对架空线路继电保护,而且还能担负普通架空地线的重任。因为 OPGW 温升主要是由电网中故障短路电流引起的,所以 OPGW 进行短路电流试验的结果合格与否是确定其能否安全运行的重要参考指标。

OPGW 短路试验无线温度测试系统示意图如图 4 所示。本测试方案采用两根 OPGW 试样搭建测试平台,其中一根(试样 A)作为测温样品,一根(试样 B)作为测光样品,采用适当光缆金具对样品两端进行固定。试样 A 和试样 B 均从同一盘待测成品缆上截取,从而保证两根样品各材料参数的一致性,以确保安全有效地对被测样品施加额定电流并产生不低于 95% 额定短路电流容量的实际容量。作为测温样品的试样 A,其长度为 8m,样品两端无光测装置,但在该试样表面、光单元外表面上和光单元里面分别放置多个 ZigBee 测温传感器以测量短路试验时的瞬时温度;作为测光样品的试样 B,其长度为 32m,各层材料上均无测温传感装置,但在该试样光单元中的所有光纤均被接环成一路,并与试样 B 一侧的光源和光功率计相连接以实现光衰减的实时测量。

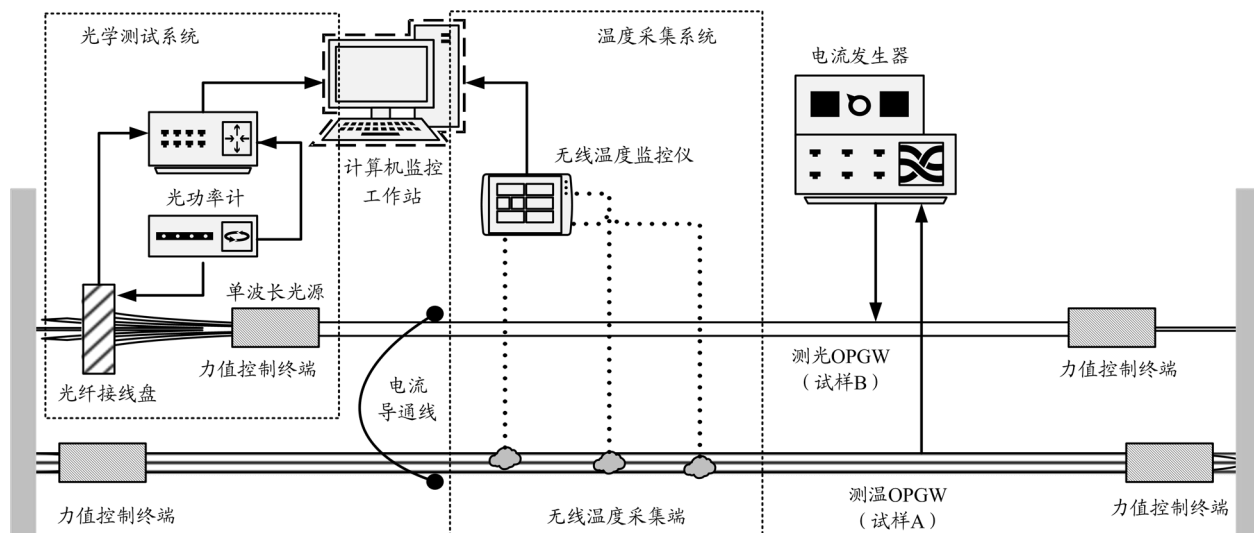


图4 OPGW 短路试验无线温度测试系统示意图

测温样品(试样 A)上的温度数据采集终端的结构设计基于简化的原则,仅由一个 CC2530 模块、闪存装置和数字温度传感器组成,无信标网络中的终端设备即为该组成初始化后的各个终端节点。上位机监控界面可以用来监控温度传感器模块的工作状态,在监控界面上通过读取所有温度采集节点的地址以及它们的温度数据来预判温度走势。完成系统搭建后,用张力装置分别对试样 A 和试样 B 同时施加 15% 的 OPGW 额定拉断力,并采用施加电流的方法使试样 A 的初始温度达到 $40^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。按试样设计的额定电流量和持续时间对样品施加 5 次脉冲电流,每次脉冲的短路电流和持续时间可以与设计值不同,但必须达到短路电流容量 I_t 水平,且任意一次脉冲电流容量不低于设计容量的 95%^[15],即可得到短路电流试验数据,实现基于 ZigBee 的 OPGW 短路试验无线温度测试系统。

4 试验测试结果

根据 IEEE 1138-2009 标准要求,本文以示例 OPGW-24B1(24 芯 G.652 光纤)-72(金属绞线承载截面积为 72mm^2)结构为被测样品,其设计短路持续时间为 1s,短路额定承载电流为 5.3kA,短路电流容量约为 $28.1\text{kA}^2\cdot\text{s}$,光缆的额定拉断力为 70.56kN。试验时,将被测样品的 24 芯光纤全部环接成一路,并施加 10.6kN 张力,短路脉冲 5 次后的衰减和温度测试曲线分别如图 5 和图 6 所示。

图 5 中的数据已经通过将实测数值减去基准光路实测值的方法,排除了由光源自身稳定性造成的衰减变化。从图 5 可以看出,试验过程中,光纤最大衰减变化量出现在第 94~100min 段,最大变化量绝对值为

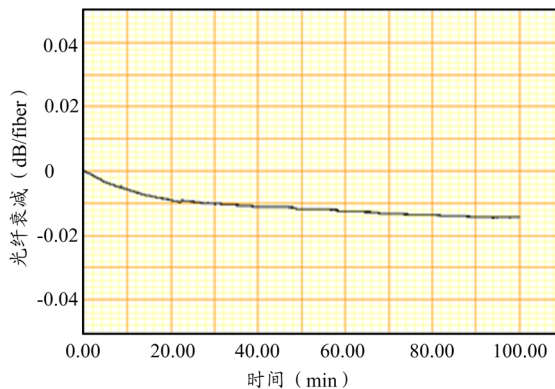


图5 短路电流试验衰减曲线图

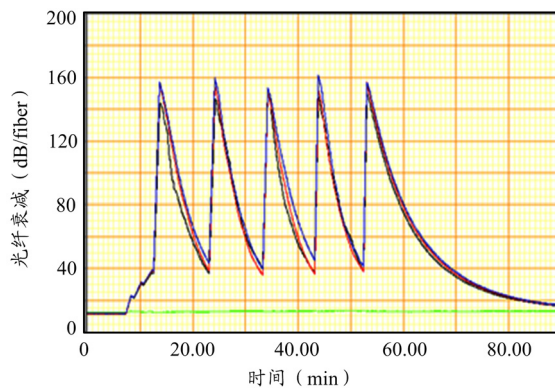


图6 短路电流试验温度曲线图

0.014dB/fiber; 试验结束后,整个试验耗时 100min,光纤残余衰减变化量最大绝对值为 0.014dB/fiber。

图6中,绿色曲线为环境温度测量值,蓝色曲线为光缆表面温度传感器测量值,红色曲线为光缆的缆间温度传感器测量值,黑色曲线为光缆中心管内温度传感器测量值。由图 6 可知,试验过程中,光缆表面最高温度为 161.4°C ,光缆的缆间最高温度为 157.0°C ,光缆

中心管最高温度为 150.5℃,该被测光缆的最高温度出现在光缆表面位置。一般情况下,基于光缆结构和材料厚度等参数的不同,光缆的最高温度会出现在不同位置的测温数据中。例如,此次选择的被测样品 OPGW-24B1-72,由于该样品的光单元中心管为铝包钢管,即钢管(厚度 1.5mm)在铝管(厚度 2.75mm)内侧面而光纤置于钢管中央位置,铝管外层有 9 根 2.85mm 铝包钢单丝绞线保护,故根据金属导热系数和材料特性可知,当大电流通过整根 OPGW 样品时,铝层的电阻抗小于钢,铝材料单位时间内通过的电流大于钢材料,基于能量守恒原理,该样品 OPGW 的外层热传导更快更多,从而升温更高,这基本与本次短路试验的结果表征趋势是一致的。

5 结束语

本文提出并实现了基于 ZigBee 的 OPGW 短路试验无线温度测试系统,利用自行研制的测试系统,对 OPGW-24B1-72 光缆样品进行了短路电流测试。试验后该试验结果合理有效,验证了“OPGW+ZigBee”组合模式下短路电流试验方法的可行性,体现了简化测试现场的线路布局及增强设备、人员等在大电流试验现场安全系数的有效性。由于 ZigBee 测温模块本身具有测量温度的范围上下限,对于大电流试验的测温任务,需要根据被测样品的特性选择合理有效的测温模块,避免出现超量程超范围测量,必要时须调整设备的无线通信架构,但调整时间成本较高,如何增强“OPGW+ZigBee”组合模式下短路电流试验方法的通用性有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 张云鹏,季田,魏华勇. 复杂结构输电线路接地短路及光纤复合架空地线电流计算[J]. 电力系统自动化,2015(16):132-137.
- [2] Power System Communications Committee. Standard for Testing and Performance for Optical Ground Wire (OPGW) for Use on Electric Utility Power Lines, IEEE 1138-2009[S]. New York: IEEE-SA Standards Board, 2009.
- [3] 张强. 光纤复合地线光缆短路测试及热稳定性研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
- [4] 全国电线电缆标准化技术委员会. 光纤复合架空地线(OPGW),JB/T 8999-1999[S]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [5] FARHANGI H. The Path of the Smart Grid [J]. IEEE Power & Energy Magazine,2010,8(1):18-28.
- [6] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述 [J]. 电网技术,2009,33(8):1-7.
- [7] 冯奕军,翟柱新,邓艺娜. 基于拉曼散射的分布式 OPGW 温度测量 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2016,41(12):96-100.
- [8] 涂洁,李炼炼,范鹏,等. 基于受激布里渊散射的 OPGW 光纤测温研究[J]. 电子测量技术,2018,41(6):129-133.
- [9] 中国电力企业联合会. 光纤复合架空地线,DL/T 832-2016 [S]. 北京:中国电力出版社,2016.
- [10] International electrotechnical commission, Short-Circuit Currents Calculation of Effects-Part1: Definitions and Calculation Methods, IEC 60865-1 [S]. Switzerland: IEC Central Office, 2011.
- [11] 黄新波,罗兵,刘存孝. 采用 ZigBee 芯片的无线加速度传感器网络节点的实现[J]. 高电压技术,2010,36(8):1962-1969.
- [12] 梁湖辉,张峰,常冲. 基于 ZigBee 的变电站监测报警系统[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(12):121-124.
- [13] 周淦,马小敏,陈伟根,等. 基于 ZigBee 和零序电流增量法的配网单相接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(9):62-68.
- [14] 谢燕辉. 基于 ZigBee 技术的可再生能源测控网络设计[D]. 福建:福建师范大学,2014.
- [15] 林秀钦,付华军. 光纤复合架空地线(OPGW)短路电流试验[J]. 光通信研究,2004(2):59-60.

《中文核心期刊要目总览》2017 年版入编通知(节选)

《光通信技术》主编:

我们谨此郑重通知:依据文献计量学的原理和方法,经研究人员对相关文献的检索、统计和分析,以及学科专家评审,贵刊《光通信技术》入编《中文核心期刊要目总览》2017 年版(即第 8 版)之“无线电电子学、电信技术”类的核心期刊。该书由北京大学出版社出版。书中按《中国图书馆分类法》的学科体系,列出了 78 个学科的核心期刊表,并逐一对核心期刊进行了著录。著录项目包括:题名、并列题名、主办单位、创刊时间、出版周期、学科分类号、ISSN 号、CN 号、邮发代码、编辑部地址、邮政编码、电话、网址、电子邮箱、内容简介等。

《中文核心期刊要目总览》2017 年版编委会
2018 年 8 月