

基于COMSOL仿真和实验验证的耐热型OPLC结构优化方案

伏丽娜^{1,2}, 郭毅^{1,2}, 于晶^{1,2}

(1.上海电缆研究所有限公司,上海 200093;2.上海国缆检测股份有限公司,上海 200444)

摘要:针对光纤复合低压电缆(OPLC)在运行状态下发生的短暂高温对电缆中光纤的传输性能造成影响的问题,提出了耐热型OPLC结构优化方案。首先,优化改进OPLC结构、研究OPLC材料选型;然后,采用COMSOL多物理场仿真软件,实现耐热型OPLC三维模型的仿真建模,并根据电流热效应及温度对电阻的反作用原理对仿真模型进行修正,探索优化结构下仿真状态的线缆三维热场分布情况;最后,结合目前OPLC耐热试验要求,研究适用于耐热型OPLC的耐热和超载试验的测试方案。测试结果表明,高于电缆工作最高标准温度10%且持续时间15 min时,OPLC的光纤衰减损耗变化不超过0.15 dB/km。

关键词:光纤复合低压电缆;电力光纤到户;耐热

中图分类号:TN247 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)04-0056-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Structural optimization scheme of heat-resistant OPLC based on COMSOL simulation and experimental verification

FU Li'na^{1,2}, GUO Yi^{1,2}, YU Jing^{1,2}

(1. Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China;

2. Shanghai National Center of Testing and Inspection for Electric Cable and Wire Co., Ltd., Shanghai 200444, China)

Abstract: Aiming at the problem that the short-term high temperature of optical fiber composite low-voltage cable(OPLC) in operation affects the transmission performance of optical fiber in the cable, a heat-resistant OPLC structure optimization scheme is proposed. Firstly, the OPLC structure is optimized and improved, and the OPLC material selection is studied. Then, the COMSOL multi-physics field simulation software is used to realize the simulation modeling of the heat-resistant OPLC three-dimensional model, and the simulation model is modified according to the current thermal effect and the reaction principle of temperature on the resistance, so as to explore the three-dimensional thermal field distribution of the cable in the simulation state under the optimized structure. Finally, combined with the current OPLC heat resistance test requirements, the test scheme of heat resistance and overload test suitable for heat-resistant OPLC is studied. The test results show that the fiber attenuation loss of OPLC is less than 0.15dB/km when the temperature is 10% higher than the maximum standard temperature for 15 min.

Key words: optical fiber composite low-voltage cable, power fiber to home, heat-resistant

0 引言

光纤复合低压电缆(OPLC)依托电力天然管道资源,是电力光纤到户工程建设、电网和通信网基础设施深度融合的重要技术手段^[1]。OPLC的出现推动了电

力光纤到户网络的发展,为远程集成和电力用户双向互动的实现提供了技术条件^[2]。在多物理场的叠加效应下,长期工作的OPLC中光纤附件损耗会对通信能力和线缆的运行寿命造成负面影响。

针对短暂高温的实际电网问题,本文从电缆材料的选择和OPLC结构优化的角度分析和阐述耐热型OPLC结构优化方案,并通过仿真和试验对耐热型OPLC的耐热情况进行验证。

1 耐热型OPLC结构的优化方法

OPLC是由低压电缆与光传输单元复合而成^[3]且具有低压电力电缆和通信光缆双重功能的线缆^[4]。OPLC

收稿日期:2021-08-23。

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,硕士,工程师,毕业于上海理工大学,参与和承担了国家科技部项目、上海市科委项目、863计划项目及国家重点研发计划等共7项,已授权相关国家专利7项。主要研究方向为光纤光缆检测及应用研究,从事光纤光缆检测检验技术的研究工作。



既可以实现普通线缆的电传输功能, 也具备光缆传输光信号的特性, 故复合缆的设计、制造必须充分考虑电单元、光单元之间的影响作用及生产制造的差异。在实际电网运行时, 线缆为交流电压连续导通状态, 复合缆中各组件的介质损耗(如导体、绝缘、金属屏蔽及铠装等)均会导致线缆发热升温, 在短暂的升温后, 线缆温度逐渐趋于一个稳定温度值, 即线缆的稳定运行工作状态; 但是, 当复合缆发生短路或由于雷击通过很大的短路电流时, 电缆的温度会急剧升高^[9], 一方面危及电缆的线路安全, 另一方面对复合缆中光单元产生热影响从而造成其热变形, 可能导致传输损耗增大, 甚至会直接引发电网运行事故^[10]。

耐热型 OPLC 结构的优化方法如下: 首先, 根据不同结构 OPLC 的光纤耐热特性, 在光单元原有结构上增加热隔离保护结构; 然后, 基于隔热材料选型与管状结构, 研究光单元结构设计, 降低热场环境对光单元的影响, 提升光单元耐热特性; 最后, 光单元增加耐热层结构, 延缓温度突变时光单元所受温度的影响。

1.1 耐热层材料选型

不同的材料对应的光纤温度如表 1 所示。其中, PU 为聚氨酯, PE 为聚烯烃, XLPE 为交联聚乙烯, TPE 为热塑性弹性体。可以看出, 导热系数低的材料导致光纤温度更低。耐热层为 TPE 材料的温度仿真结果如图 1 所示, 光纤的温度低于最初结构仿真得到的温度, 并低于其它材料作为耐热层仿真得到的光纤温度。

表 1 不同的材料对应光纤的温度

耐热层材料	导热系数 $/(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	光纤温度 $/^{\circ}C$
PU	1.700	81.610
PE	0.480	80.023
XLPE	0.285	79.927
TPE	0.180	79.908

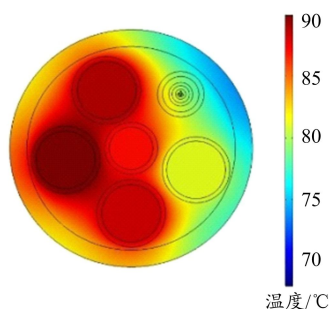


图 1 光单元耐热层为 TPE 材料时 OPLC 的温度分布

1.2 耐热层厚度设计

耐热层的厚度变化的相应光纤温度曲线如图 2 所示。可以看出, 光纤的温度随着光单元耐热层的厚度变化而变化。由于 OPLC 的尺寸限制, 当耐热层的厚度大于 1.5 mm 时, OPLC 内部不能同时放置导体和光单元。在厚度小于 1.5 mm 的情况下, 当耐热层的厚度增加到一定程度时, 由于其低导热率, 可以在一定程度上防止温度从高温部分扩散到低温部分。但是, 若厚度过大, 耐热层与通有电流的导体之间的距离减

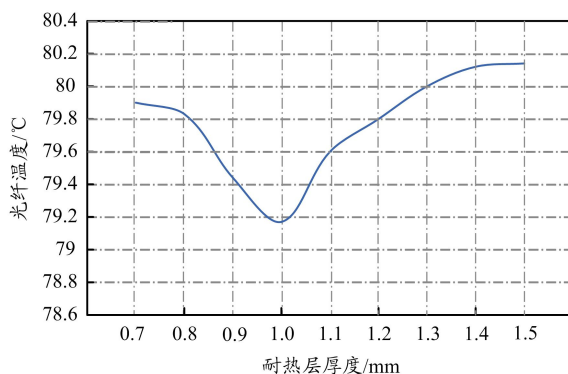


图 2 耐热层的厚度变化的相应光纤温度曲线

小, 且 OPLC 电缆中填充的阻热效果降低, 导致光单元的温度升高。因此, 当耐热层的厚度增加到 1 mm 时, 改变上述光单元的位置和耐热层的材料后, 对 OPLC 进行优化的效果更好。

OPLC 是将光单元与绝缘线芯进行同步绞合, 其成缆方式与普通电力电缆的成缆方式相同。但在成缆时对光单元的放线张力与同步退扭要求较高, 因此成缆工序为控制的重点工序。光单元或微管放置在成缆线芯的边侧, 并通过大量的试验证明, 此方案光单元受力最小, 可以保证光单元不发生形变, 最终满足关键性的压扁性能试验要求; 同时, 复合成缆时光单元采用主动同步放线方式, 消除光单元的扭转应力, 确保生产过程中光单元放线张力的稳定输出, 消除复合成缆过程中光单元内应力对光纤性能的影响, 降低光单元压扁、断纤和光纤衰减增大等现象。

2 耐热型 OPLC 结构的三维仿真模型

由于 OPLC 是由低压电缆和光传输单元两部分组成^[3], 因此在对结构特性进行分析时, 不仅需要从复合缆整体布置结构进行讨论, 还要分别对电缆部分与光单元部分进行分析; 同时, 需要考虑两部分之间的相互作用, 尤其需要分析电缆部分发热时对光传输单元产生的影响。

本文选用 3 种试制样品结构的 OPLC 在 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件中进行三维仿真。3 种试制样品结构如图 3 所示。

试制样品结构 1 的 OPLC 型号为 OPLC-WDZ-YJY-0.6/1kV-3×10+GQ-2B6a, 该样品含有的 2 根主线芯和 1 根中性线芯皆为铜芯, 绝缘材料为 XLPE, 外护套材料为 PE; 光单元为蝶形光传输单元, 由 2 根光纤组成。

试制样品结构 2 的 OPLC 型号为 OPLC-WDZ-

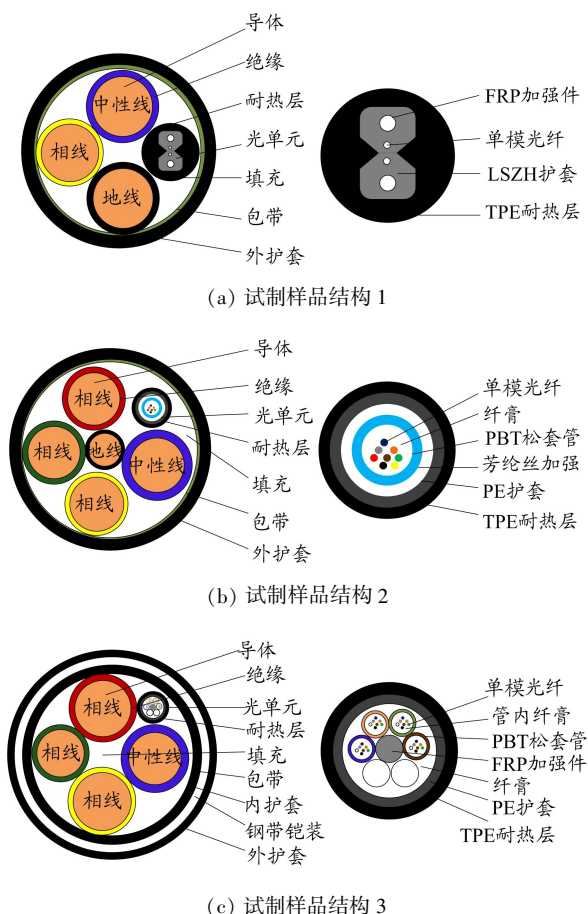


图 3 3 种试制样品结构的 OPLC

YJY-0.6/1 4×50+1×25+GXT-8B1, 该样品含有 4 根主线芯和 1 根中性线芯皆为铜芯, 绝缘材料为 XLPE, 外护套材料为 PE; 光单元为层绞填充式光传输单元, 由 8 根光纤组成。

试制样品结构 3 的 OPLC 型号为 OPLC-ZC-YJV22-0.6/1 4×240+GT-24B1, 该样品含有 4 根主线芯和 1 根中性线芯皆为铜芯, 绝缘材料为 XLPE, 外护套材料为聚氯乙烯 (PVC); 光单元为中心管填充式光传输单元, 由 24 根光纤组成。

在仿真准备过程中, 首先在软件中要正确选择试制样品结构的 OPLC 模型的维度。由于需要研究三维情况下试制样品 OPLC 缆中的运行情况, 故需要选择三维的空间维度来进行仿真。仿真参数及材料设置分别如表 2 和表 3 所示。3 种结构的三维温度分布图如图 4 所示, 模拟了耐热型 OPLC 在耐热条件下当导体温度达到 90℃时其它各组件的温度分布情况。图中各结构的光单元温度分布位置均最接近于蓝色低温区域, 初步验证了耐热型结构中耐热层对光单元隔热降温的有效性, 为后续实践测试中测温传感器的选择提供支撑。

表 2 耐热型 OPLC 三维仿真参数设置

结构类型	参数			
	终端电流/A	热源形成方式	热通量	温度初始值/℃
结构 1	76.5	总功率 损耗密度增加	自然对流 传热	20
结构 2	373.5	总功率 损耗密度增加	自然对流 传热	20
结构 3	1129.0	总功率 损耗密度增加	自然对流 传热	20

表 3 耐热型 OPLC 三维仿真材料设置

光缆组成	结构材料		
	结构 1	结构 2	结构 3
线芯	铜	铜	铜
绝缘	XLPE	XLPE	XLPE
光纤	二氧化硅	二氧化硅	二氧化硅
耐热层	热塑性弹性体	热塑性弹性体	热塑性弹性体
填充	阻燃填充绳	阻燃填充绳	PP
包带	玻纤带	玻纤带	CPP
内护套	—	—	聚氯乙烯
钢带铠装	—	—	双层镀锌钢带
外护套	WDZ-H-3 护套	WDZ-H-3 护套	PVC
管内纤膏	—	—	纤膏
松套管	—	PBT	PBT
加强件	FRP	芳纶丝	FRP
纤膏	—	纤膏	纤膏
护套	LSZH	PE	PE

3 耐热型 OPLC 的耐热特性测试

耐热型 OPLC 除满足基本 GB/T 29839-2013 标准要求外, 其耐热特性还应满足在高于电缆工作最高标准温度 10% 且维持 15 min 时间状态下的 OPLC 衰减损耗最大变化量 ≤ 0.15 dB/km。针对该指标, 耐热型 OPLC 应增加超载试验并提高耐热试验的判定要求。

本文的超载试验采用电加热法。首先, 从样品光电复合缆上截取一段不小于 10 m 长的线缆, 将样品光电复合缆导体外表面的其它组件去除 (例如绝缘、护套等其它覆盖物), 或者仅将样品与试验设备相连

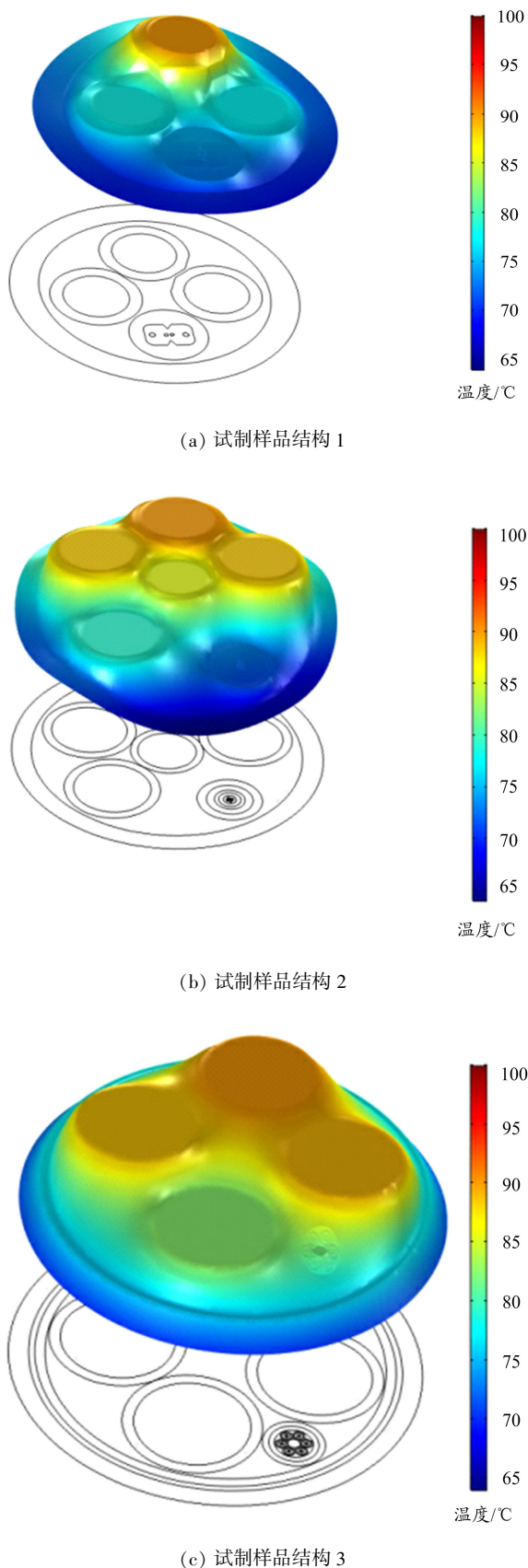
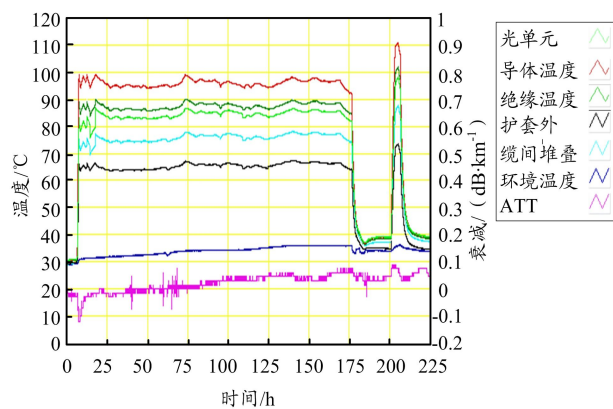


图 4 3 种结构的三维温度分布图

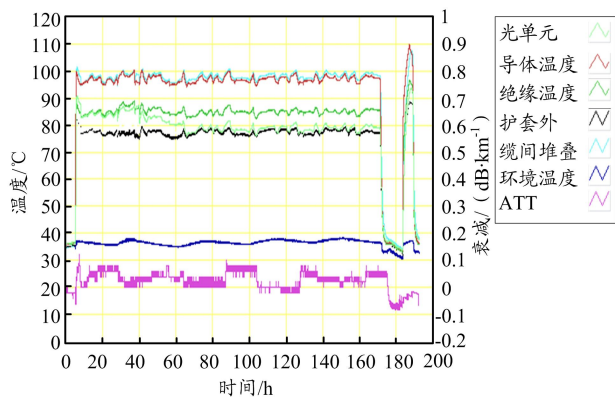
端部的覆盖物除去并露出导体^[7]。然后,串联熔接样品光电复合缆中的多根光纤形成光学测试回路,将样品光电复合缆中主绝缘线芯首尾串联形成电流回路^[8]。最后,在 OPLC 的导体、绝缘、光单元和护套等位置放置温度传感器测量温度^[8],在试验链路中加载电流,加热导体直至达到稳定温度,此温度应保持在电缆正常运行时导体最高温度的 118%~122%。样品的主绝缘线芯的导体应均有加热电流通过^[8],待导体温升达到规定的值稳定后持续至少 2 h,随后自然降温至环境温度,即完成一个循环,共需完成至少 3 个循环。按照以上方法试验后,OPLC 的外护套在目力所及范围内应没有损伤,缆上各标记应完整清晰,且光纤的光损耗变化量应 ≤ 0.15 dB/km。

同样地,本文对上述型号的 3 种试制耐热型样品结构的 OPLC 进行耐热试验和超载试验。试验中,前 180 h 为耐热试验,在完成耐热试验后,等样品温度降至常温后继续开始升温进行 2 h 的超载试验。光纤衰减测试在耐热试验与超载试验过程中持续不间断进行,以便更好地了解耐热型 OPLC 传输特性随温度的变化情况。3 种试制耐热型样品的 POLC 耐热和超载试验曲线图如图 5 所示。由图 5(a)可知,耐热试验和超载试验全过程中,试制样品结构 1 的附加衰减变化最大分别为 0.122 dB/km 和 0.090 dB/km。由图 5(b)可知,耐热试验和超载试验全过程中,试制样品结构 2 的附加衰减变化最大分别为 0.120 dB/km 和 0.084 dB/km。由图 5(c)可知,耐热试验和超载试验全过程中,试制样品结构 3 的附加衰减变化最大分别为 0.074 dB/km 和 0.086 dB/km。

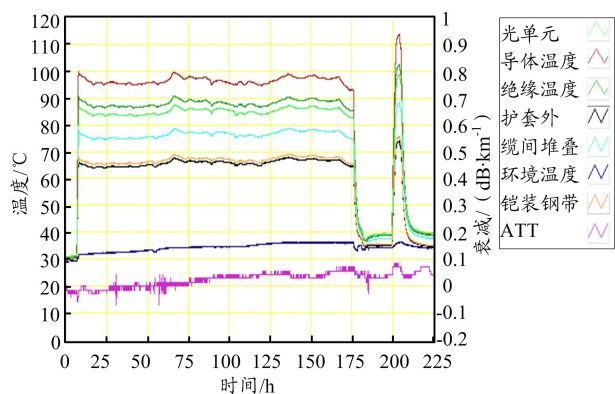
上述试验结果满足 GB/T 29839 标准测试要求,且优于指标,验证了耐热型 OPLC 结构优化方案的有效性和可行性。



(a) 试制样品结构 1 试验曲线



(b) 试制样品结构 2 试验曲线



(c) 试制样品结构 3 试验曲线

图 5 3 种试制耐热型样品的 POLC 耐热和超载试验曲线图

4 结束语

本文基于不同结构 OPLC 缆中光纤耐热特性, 结合多物理场仿真模型, 提出了耐热型 OPLC 结构优化方案。通过在光单元原有结构上增加加热隔离保护结构, 基于隔热材料选型与管状结构, 改进光单元结构设计, 可降低热场环境对光单元的影响, 提升光单元耐热特性; 通过研究光单元在 OPLC 中的合理布放, 结合光单元结构设计, 且经过试验检测, 耐热型 OPLC 的耐热特性满足在高于电缆工作最高标准温度 10% 且持续时间 15 min 的光纤衰减变化不超过 0.15 dB/km。

耐热型 OPLC 产品的研制, 可为 OPLC 电力光纤到户技术的研制推广从理论到实践提供强有力的支撑, 将为电力光纤到户工程的建设提供坚实技术基础, 具有广阔的应用前景, 并产生显著的社会效益, 为智能用电和智慧城市建设做出贡献。

参考文献:

- [1] 陈玉, 姚凯, 孙冠姝, 等. 一种用于 OPLC 缆中光纤微弯损耗测试的装置及方法; 201910318212.7[P]. 2019-08-13.
- [2] 陈志佳, 林亦雷, 王小辉, 等. OPLC 光纤低压复合电缆的结构与应用分析[J]. 电子技术应用, 2014(21): 166-168.
- [3] 刘伟. 电力通信在电力系统中的应用[J]. 科技传播, 2014(18): 227-227, 231.
- [4] 郭毅, 徐晨, 葛维春, 等. 一种用于光纤复合低压电缆的拉伸装置及方法; 201910543906.0[P]. 2019-08-16.
- [5] 涂兴华, 倪彬, 李军博. 光纤复合低压电缆温度分布与光单元传输特性研究[J]. 量子电子学报, 2017, 34(1): 88-93.
- [6] 李军博. 异常工作状态下新型复合光电电缆的温场分布与光单元传输损耗指标的仿真与测试[D]. 南京: 南京邮电大学, 2014.
- [7] 谢红佳. 一种多芯电缆自动剥线机[J]. 广东建材, 2020, 36(12): 73-74.
- [8] 全国电线电缆标准化技术委员会. 额定电压 1kV ($U_m=1.2kV$) 及以下光纤复合低压电缆: GB/T 29839-2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 16.
- [9] 张涛, 虞踏峰, 钱子明. 气吹型光纤复合电缆优势解析[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2017(5): 42-43.
- [10] 钱子明, 马军, 林磊, 等. 光纤复合低压电缆(OPLC)的研制及应用[C]// 中国电机工程学会, 2010 年(苏州)电力电缆状态检修技术交流会论文集. 苏州: 中国电机工程学会, 2010: 259-264.
- [11] 黄烜. 电线电缆导体直流电阻测量与不确定度评定[J]. 湖北工业大学学报, 2013, 28(4): 41-43.
- [12] 陈灿, 张素香, 陈芳, 等. 电力光纤到户组网关键技术综述[J]. 电力信息与通信技术, 2017(10): 74-78.
- [13] 刘洪进, 杨红蕾, 韦祖国. 光纤复合低压电缆(OPLC)的试制与应用浅析[J]. 现代传输, 2011, 32(2): 52-54.
- [14] 陆春校, 徐眉, 魏学志. 光纤复合低压电缆前景展望与工艺结构探讨[J]. 电线电缆, 2011(2): 14-15.
- [15] 许刚, 解鹏飞, 郭昆亚, 等. OPLC 温度分布及光单元传输损耗特性研究分析[J]. 光通信研究, 2018, 209(5): 44-49.