

电力光缆网分布式综合量测统一平台开发研究

李代刚¹, 徐立坤¹, 张旭辉¹, 韦国歆²

(1. 南方电网调峰调频发电有限公司, 广州 510630;

2. 南京南瑞信息通信科技有限公司, 南京 210003)

摘要: 电力光纤通信作为电力系统的重要组成部分, 其本身的可靠运行对整个电力系统安全稳定的生产运行有着重大的意义; 与公用通信网络相比, 电力通信网络的可靠性要求更高; 电力光缆通常与输配电线路共用同一线廊, 如 OPGW 和 OPPC 中的光缆直接反映出线路的温度, 应力等; 结合影响电力光缆网的各种关键因素, 介绍了主要监测参量的坚持原理, 结合不同场景分析不同的监测方式, 以综合监测平台为主线, 提供了分布式综合量测平台开发的工程建设和开发思路, 对监测结果进行归一化处理, 并开发系统原型, 在南方电网试点成功应用。

关键词: 电力光缆网; 综合量测; 统一平台; 数据归一化处理

Development and Research of Distributed Integrated Measurement Platform for Power Optical Cable Network

Li Daigang¹, Xu Likun¹, Zhang Xuhui¹, Wei Guoxin²

(1. China Southern Power Grid Peak Load Regulation FM Power Generation Co., Ltd., Guangzhou 510630, China;

2. Nanjing Nari Information Communication Technology Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: Power fiber optic cable network is related to the safety of power production and operation. Compared with the public communication fiber network, the reliability requirement of power communication network is higher. Power optical cables usually share the same route with transmission and distribution lines, such as OPGW and OPPC. They directly reflect the temperature and stress of the line. Combining with the key factors affecting power optical cable network, introduces the persistent principle of main monitoring parameters, analyses different monitoring modes according to different scenarios, provides the construction and development ideas of distributed integrated measurement platform development, normalizes the monitoring results, and develops the system prototype, which has been successfully applied in South China Power Grid.

Keywords: power optical cable network; integrated measurement; unified platform; data normalization processing

0 引言

电力光缆网的监测参量主要有光功率监测、温度监测、应力监测等, 对各类型参量的量测通常由各个单一功能的仪器或设备单独进行。对多参量同时在线量测、智能化手段方面自动化水平较低, 而影响电力光缆网络的各种因素通常不是孤立存在^[1]。电力光缆网软件监测平台通常是针对单一功能的进行开发, 无法做到对温度、应力、舞动、振动、线路故障等状态参量的综合感知和分析, 无法满足电力系统对多种状态参量感知的需求。多参量传感设备监测, 可使量测的范围扩展至整个光通信网络, 能有效地降低运行成本。采用多种传感器来增加监测参量, 电力光缆网的监测成本会急剧上升, 进而从根本上阻碍光纤传感器在电力行业中的推广应用^[2-3]。为了有效支撑复杂环境下的通信保障、重大活动保障, 在电力光缆网的多参量监测、超长距离监测、量测控制、配网监测、故障诊断分析等方面都提出了很多新需求。同时随着“大云物移智”等信通

新技术的不断发展, 物联网产业快速增长, 多参量光纤传感技术实时感知整个光路运行状态, 同时的反应了对应的输电线路的运行状态。因此, 集成多种参量监测功能设备对光缆进行量测很有必要。目前, 对光缆的监测是通过对光缆内某一根光纤或是几根光纤的监测来实现整个条光缆的间接监测。根据被监测光纤的使用状态可以分为: 在线监测、备纤监测、离线监测、混合监测四种监测方式。目前电力光缆网的监测主要采用光时域反射仪, 对光纤通信线路进行有效的故障识别和定位, 但是, 测量参量单一难以满足多参量和广域量测的需求。因此, 从电力光缆网状态监测的实际需求出发研究多参量分布式光纤传感机理和量测控制技术, 融合分布式光纤瑞利散射传感、布里渊散射传感和拉曼散射传感、光纤光栅传感技术等, 整合光纤传感器的硬件结构, 在通用架构的基础上兼容或扩充特征功能模块实现多参量传感和量测控制, 并拓展其智能巡线量测功能, 从而实现一台传感设备覆盖一个变电站内几乎所有光缆线路的监测能力, 降低系统部署复杂度。为电力光缆网监测提供可广域监测的、高可靠性、低成本且具有市场推广价值的监测设备, 具有重要的理论意义和工程实用价值。

收稿日期: 2018-12-12; 修回日期: 2019-01-09。

作者简介: 李代刚(1972-), 男, 高级工程师, 主要从事光纤通信、电力电子和机房建设管理方向的研究。

1 分布式电力光缆网监测

光缆网监测的主要目的是保证通信网络的可靠运行, 对现有问题及时发现, 潜在的光缆故障提前预警, 对故障点进行精确定位, 为光缆网运维人员提供依据。而电力光缆由于本身结构的特殊性, 通常是随电力系统输电线路走廊直接敷设, 因此也间接反应了输电线路的状态, 包括振动、温度、应力等, 因此, 与传统的运营商光缆监测要求比较, 电力光缆量测的参数要求更多, 环境更复杂。电力光纤传感分为点式传感技术和分布式传感技术, 点式传感无法实现宽范围无盲区监测, 分布式光纤传感技术, 利用光纤本身可兼做传感器, 监测可以做到沿整条光纤无盲区覆盖, 电力特种光缆本身受外力破坏的可能性小, 不受电磁干扰, 而且光纤资源丰富, 可靠性高, 依托电力系统自身的线路走廊, 无需另开沟道或专门架设, 不受电磁干扰, 而且光纤资源丰富, 具有重要的工程应用价值^[4]。

电力光缆中, 传输网中的 OPGW 具有电力架空地线和通信特种光缆双重功能, 它既是输电线路防雷保护的避雷线, 又是传输信息的电力通信线。无需要单独立杆塔、不占线路走廊, 节约了投资, 提高了线路走廊的利用效率, 具有非常高的可靠性和安全度、同时使用寿命长。但是 OPGW 再野外, 跨距长、地理条件复杂, 在极端天气下, 沿途地形地貌、气象条件、环境因素对线路影响大。外界因素所可能会引起的长时间光缆振动、覆冰、舞动等现象, 最终导致光缆线路故障。2008 年冰灾, 由于线路覆冰, 当线路拉伸的应力超过耐张塔的承受范围, 导致耐张塔倒塌, 引起输电线路故障, 因此对电力光缆网的分布式监测, 同时也是间接反映了输电线路监测状态。另外, 雷击引起光缆断裂、短路电流引起光缆温升等事故也是影响电力光缆网故障的重要因素, 分布式光纤传感, 可对输电线路实现全范围无盲点监控。在电力系统中, 分布式光纤传感对在不同的场景中, 监测的参量需求重点不同, 因此, 需要一种综合量测统一平台, 实现对光缆线路的全面监测。分布式光缆传感原理如图 1 所示。

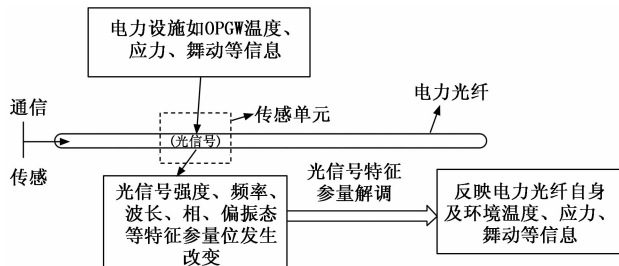


图 1 分布式电力光纤多参量综合量测

2 电力光缆网多参量量测设计

对于工程中实际应用的分布式光纤传感技术, 按照其传感原理有: 瑞利光时域散射、瑞利光频域散射、拉曼散射、自发布里渊散射、受激布里渊散射、Michelson 干涉、M-Z 干涉、Sagnac 干涉。基于光散射效应的分布式光纤传

感技术, 在电力行业, 普遍应用的有: OTDR, 主要用于电网通讯光缆的损伤点检测; ROTDR, 主要用于输电线路的温度监测, 进而扩展到输电线路基于温度的火灾和动态载流量监测技术; BOTDR 和 BOTDA, 主要应用于输电线路的温度和应变监测, 该技术在输电线路的弧垂、温度、应变变形同时监测方面具有很高的应用价值。对于瑞利光时域散射、瑞利光频域散射、拉曼散射、自发布里渊散射、受激布里渊散射五种光散射型分布式光纤传感技术, 充分利用了光纤一维空间连续分布监测的特点, 获得时间和线性空间上的二维信息分布, 对大型基础设施及设备表面的典型部位进行感知、远程监测, 不需构成回路或双路, 工程现场应用方便。本系统设计目的是以综合多种量测的功能设备上, 实现数据统一量测, 数据的统一处理, 工程上可以实现统一部署, 从而降低整个系统的开发工作量和工程安装成本。

2.1 光衰量测

光时域反射技术利用向光纤中发送光脉冲, 同时在同步时钟的控制下通过测量探测光脉冲的背向瑞利散射信号功率的变化从而判断光纤沿线的事件如弯曲、熔接点、接头、断裂处等。本方案在电力系统中应用最多的一种监测方案, 在广州市电力公司、成都电力公司、江苏省电力公司得到了广泛应用。其原理是利用同步时钟记录探测光信号在光纤中的往返时间, 由于每个时间点对应光脉冲在光纤中传播的位置, 从而实现了对光纤沿线故障点的识别和定位。光时域反射仪的测量过程如图 2 所示。

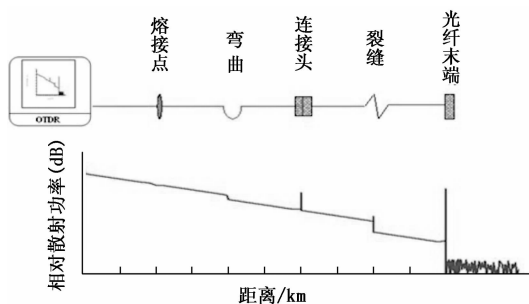


图 2 光时域反射仪光衰监测方案

2.2 温度和应力量测

布里渊散射是指光源发出的光波与介质内的弹性声波发生相互作用而产生的光散射现象^[5]。光纤温度量测是近年利用布里渊散射原理发展起来的长距离分布式光纤传感技术, 主要实现对温度和应变进行量测, 对应的监测设备可分为环路测量的布里渊光时域分析仪 BOTDA 以及单端测量的布里渊光时域反射计 BOTDR。BOTDR 进行量测时, 采用单端输入探测光方法, 利用探测光在传输过程中的布里渊散射来感知各位置的温度变化, 其优点是施工方便, 只需单端施工, 但随着距离增长, 返回的布里渊光强度会变弱, 信号检测难度大。而 BOTDA 进行量测时候, 需要使用两根纤芯, 使光纤形成回路, 优点是精度更高, 需要对端连接, 形成回路。布里渊原理实现的光纤温度量测是

通常采用单模光纤，实现长距离分布式温度和应变监测，测量精度、空间分辨率等指标更优，可以实现全程 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、1 m 的测温性能。基于布里渊散射效应的分布式光纤传感系统原理如图 3 所示。

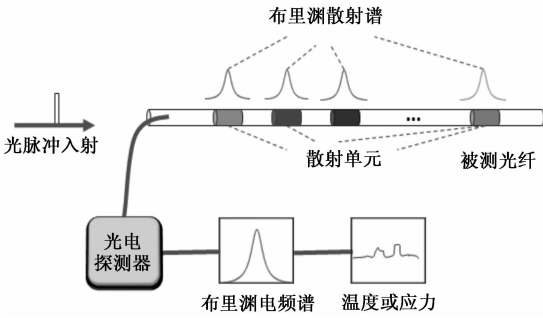


图 3 基于布里渊散射效应的分布式光纤传感器方案

另一种常用的分布式光纤测温技术是基于拉曼散射的原理，该方法也是一种常用的分布式光纤传感技术，其原理是基于光纤拉曼散射。利用光纤的拉曼散射对温度有敏感特点实现温度监测。在脉冲光在光纤中传输时，散射信号是连续，利用 OTDR 计算散射点位置，从而得到光纤沿线的温度分布^[6-7]。

2.3 振动量测

光缆分布式振动量测常用的是基于相位敏感 OTDR 技术的原理？当由声音或物体振动产生的压力施加于传感光缆时，将会同时引起光纤的振动，由于介质中应力波的存在可改变介质的介电常数或光折射率，影响光在介质中的传播，导致传感光纤振动处的光纤折射率发生变化，因而引起传感光缆中传输光的相位改变^[8-9]。将光纤作为相位调制元件，根据光学原理，由于外界的振动同时引起光纤振动，光纤中散射光的相位将会发生变化，通过监测光纤返回的瑞利散射信号的变化，对同一监测点上的不同时刻的返回信号特征值进行分析监测，实现整段光缆振动信息进行实时监测，再通过 OTDR 技术，将对应的各采样点返回的时间来换算成距离，实现振动位置的准确定位，也可通过测量注入的脉冲与接收信号之间的时间延迟计算振动位置^[11-12]。

2.4 多参量量测平台开发关键技术

依照系统实际需求，系统中集成三种测试模块，OTDR 模块量测光衰，BOTDR 测试模块量测应力和温度， Φ -OTDR 测试模块量测振动，集成该三种量测模块的一体化设备，可以实现对电力光缆线路的主要参数的全覆盖监测，从而实现光缆线路的全方位感知，将量测结果进行归一化处理，存入数据库中，方便后期的调用分析。该量测平台同时可以接入其它类型的量测系统的总体结构如图 4 所示。

本系统中，传感单元包括电缆光纤线路的备用光纤，电缆光纤本身作为一个传感器单元，实现光纤线路的分步式量测，其它传感单元将采用外置式，通过网络接入综合处理中心，综合监测设备实现分布式光纤传感，数据经过简单的处理实现归一化后，传输到数据处理中心，并实现

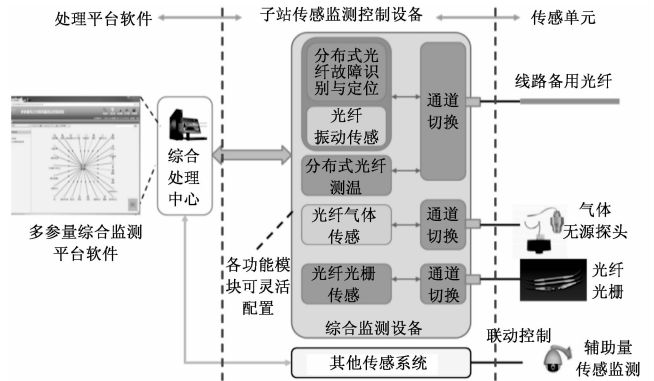


图 4 多参量量测平台系统总体架构

数据的存档，多参量综合监测平台软件主要实现数据的集中展示，并实现策略定制，GIS 展示等^[13-14]。

2.5 工程施工方案

在硬件设计上，主要是实现现有的传感设备集成，通过光开关实现不同参量的量测功能和被测线路切换，通过处理平台软件实现轮询测试、手工测试、事件触发测试等，OTDR 光衰量测设置轮询测试的周期为 12 小时，对与参考曲线进行后台对比，当数据出现奇异点，对该数据存储。BOTDR 模块实现温度和应力监测，温度和应力监测相对变化较慢，可以在线路空闲时候切换到 BOTDR 模块，实现温度监测。振动监测通常发生时间比较短，在电力系统中，通常出现电力认为破坏的主要因素为城市施工，因此，对振动监测主要集中在白天。该结构设计可以在一根纤芯上实现多种功能量测。方案如图 5 所示。

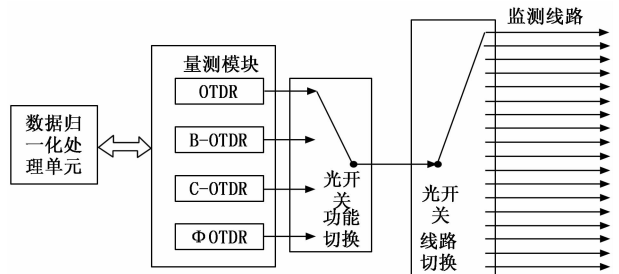


图 5 多参量监测工程实施方案示意图

该方案兼顾到了多个参量监测的灵活切换，同时又兼顾到了监测线路覆盖，通过两级独立的光开关级联，每个光开关独立控制，能够很好完成监测任务。接触结果在后台做统一的归一化处理，后后台应用系统分析使用^[15-16]。

2.6 软件开发

系统软件开发基于主流的 BS 架构，主要分为后台服务部分、数据库、浏览器。后台服务包含 3 个模块：通信服务模块、应用服务模块、GIS 服务模块，实现系统测试的总体调度与设备控制，接收外部告警，数据监测结果的采集比对，策略和监测规则定义、业务处理，数据解析等，同时在后台服务部分实现标准的 GIS 集成、对外提供标准的 WMS 服务，实现光学量测结果和空间精确定位的计算等。数据库包括业务数据库和基础地图数据的存储，业务数据

库存储测试路由光路相关信息, 量测结果, 测试参数等。基地地图数据库实现空间数据的储存以及空间计算。各模块的功能如图 6 所示。

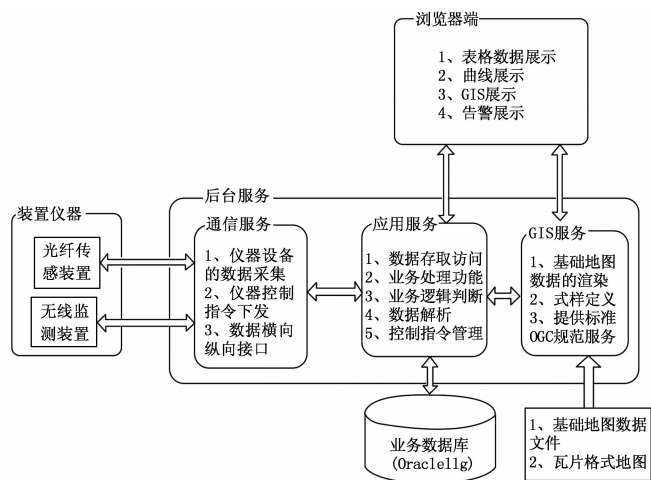


图 6 系统软件架构图

在功能独立的软件开发平台, 每个量测系统要求的功能不一样, 都有各自的系统的数据格式, 处理比较单一容易。但是在多参量传感中, 需要对多种量测结果数据进行处理, 一体化平台主要目的是实现多个量测参量的数据统一处理, 因此需提取各类型监测平台数据结果的共性, 将多个监测平台的监测结果在一个统一的平台处理展示^[17]。首先对数据进行一致化处理, 将结果序列化为统一的格式, 兼容第三方软件。该多平台系统中, 系统光功率和时间轴(对应的距离)二维数据, 反射信号和长度的对应, 最终结果是通过曲线以及对曲线的分析为主, 为保证不同参量平台的监测结果文件格式兼容, 又能结合电力系统特色的业务特点。文件结构设计如下: 数据目录块存储整个文件的模块信息, 包括每个块的大小, 标识; 通用信息块标识存储设备信息, 用于记录本次量测使用的设备模块, 以及对应的厂家信息; 量测参数块记录本次量测使用的量测参数; 事件块记录本次量测后分析的事件列表或对应的事件位置; 由于本系统实现对光路的连续监测, 因此连接模块记录对应的光路上对应的物理连接点; 数据点将采用 16 进制存储, 节约存储空间; 测试类型记录本次量测方法对应的传感类型等; 业务参数记录当前测试的光缆上当前所承载的业务类型, 等级等。本系统中使用的文件格式设计如表 1 所示。

通过表 1 的统一格式文件, 根据监测结果, 后台自动确定数据是否存储到数据库中, 并在后台解析完成后, 浏览器端展示效果如图 7 所示。

3 统一量测平台应用分析

统一量测平台与传统的监测平台相比, 采用全新的 BS 框架, 通过权限配置, 实现不同用户的对数据的分级数据浏览, 保证了用户数据和系统安全。本平台对物理资源和逻辑资源数据进行了统一的管理, 通过 监控, 测试路由, 光

表 1 监测结果数据模型

数据块名称	标记字符串	块数据说明
MapInf	Maps\0	目录信息
General Parameters	General\0	通用信息块
Fixed Parameters	FixedParm\0	量测参数块
Key Event	KeyEvent\0	事件信息数据块
Link Parameter	LinkParm\0	连接信息模块
Data Point	DataPoints\0	数据点模块
SensorType	SensorType\0	测试类型, (1: 光衰, 2: 温度 3: 应力 4: 振动)
Pipe Parameters	Router\0	测试路由所经管道路, 人井, 杆路光交接箱, 分纤箱等
BIZ Parameters	Business\0	当前测试路由所承载的业务信息或业务等级
Test Parameters	TestPara\0	当前测试参数
Time Server	Times\0	对应的时间服务器, 用于同步 OTDR 系统和设备事件
ExtendInfo	ExtendInfo\0	后期扩展信息
CkcInfo	CkcInfo\0	验证位

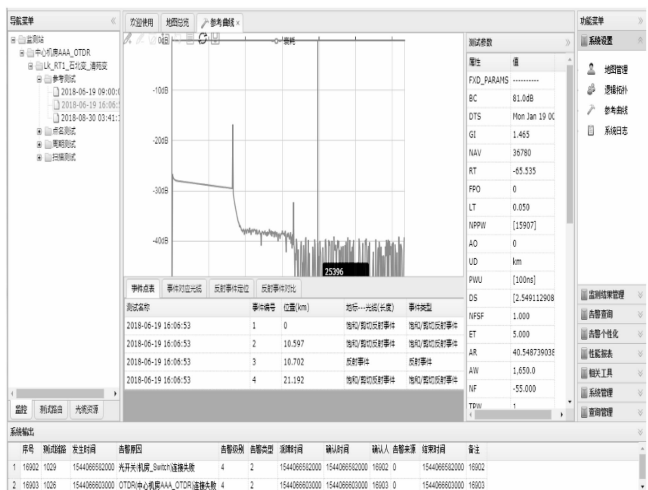


图 7 统一监测平台系统主界面

缆资源三个不同的资源树从不同的管理角度实现对资源分类分层, 所有的基础数据统一管理维护。光缆资源实现物理资源如机房、光缆段、交接箱、电力人井、杆塔等基础的录入, 测试路由实现逻辑资源如路由拓扑的建立, 监控实现节点上监测设备的录入。因此, 该系统的设计, 即减少了系统的基础数据的重复录入, 又为其它的监控系统提供扩展接口, 具有良好的扩展性^[18]。

4 结语

结合电力光缆网络监测参量的特殊要求, 分析并总结了电力光缆网监测系统的各种监测的主要原理, 以及各种监测的不同应用场景, 为便于施工方便, 降低施工成本, 设计了一套可行的多参量监测设备并实现对电力光缆的主要参量全方位监测, 在数据处理部分, 采用归一化数据处理方式, 实现对监测结果的统一存储和解析, 最后通过后

台处理和分析软件实现数据分析和结果的关联展示。本平台的开发思路可以为类似的监测平台开发提供思路。

参考文献:

- [1] 高卫东, 宋 斌. 电力光缆自动监测系统设计方案 [J]. 广东电力, 2012, 25 (2): 81-85.
- [2] 张增华. 电力光缆监测数据的共享存储改进研究 [J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14 (12): 95-100.
- [3] 杨 斌, 皋 魏, 席 刚. Φ -OTDR 分布式光纤传感系统的关键技术研究 [J]. 光通信研究, 2012 (8): 19-22.
- [4] 赵建青, 尹项根. 陈德树广东电网光纤保护方案的分析 [J]. 广东电力, 2012, 25 (2).
- [5] 王其富, 乔学光, 贾振安, 等. 布里渊散射分布式光纤传感技术的研究进展 [J]. 传感器与微系统, 2007, 26 (7): 7-9.
- [6] 张增华, 崔向阳. OPPC 分布式在线温度监测应用研究 [J]. 电力信息与通信技术, 2018 (5).
- [7] 黄燕新, 邹冬超, 刘 钢. DTS 在 110kV OPPC 线路温度监测中的应用研究 [J]. 电力系统通信, 2012, 33 (8): 1-5.
- [8] 徐拥军, 谢书鸿, 栗 鸣等. 基于 OPPC 的温度和应力光纤光栅传感技术 [J]. 供用电, 2013, 30 (2): 40-45.
- [9] 黄燕新, 邹冬超, 刘 钢. DTS 在 110kV OPPC 线路温度监测中的应用研究 [J]. 电力系统通信, 2012, 33 (8): 1-5.
- [10] 连纪文, 卓秀者. 基于 BOTDA 的 OPPC 温度和应力监测研究与应用 [J]. 光通信研究, 2016, 40 (1): 26-28.
- [11] 赵子岩, 刘建明, 吴 斌, 等. 电力通信网光缆监测系统的规划与设计 [J]. 电网技术, 2007, 31 (3): 24-28.
- [12] 李洪海, 丁爱国. 光缆自动监测的扩展应用 [J]. 科技信息, 2007 (31): 41-49.
- [13] 张增华, 奚后纬, 王 薇. 一种通用的光时域反射仪软件设计与实现 [J]. 电脑知识与技术, 2010, 31 (6): 8784-8786.
- [14] 高会生, 孙逸群, 冉静学. 电力光纤保护通道安全风险评价指标的研究 [J]. 继电器, 2007, 35 (3): 61-65.
- [15] 张士文, 夔国华. 基于 OTDR 的光纤参数自动测量系统 [J]. 光通信技术, 2005 (2): 56-57.
- [16] 李 强. 采用 OTDR 准确判断光缆线路故障点 [J]. 华北电力技术, 2005 (5): 61-64.
- [17] 高 鹏, 王萍萍. 电力通信信息化系统建设思路的探讨 [J]. 电力系统通信, 2011, 32 (2): 26-29.
- [18] 张增华, 张 刚. 电力通信资源管理系统中空间数据同步研究 [J]. 电力系统通信, 2010 (10): 55-58.
- [14] Wang X F, Chen J D, Liu C B, et al. Hybrid modeling of penicillin fermentation process based on least square support vector machine [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2010, 88 (4): 415-420.
- [15] Wang X, Chen J, Liu C, et al. Hybrid modeling of penicillin fermentation process based on least square support vector machine [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2010, 88 (4): 415-420.
- [16] 熊伟丽, 姚 乐, 徐保国. 混沌最小二乘支持向量机及其在发酵过程建模中的应用 [J]. 化工学报, 2013, 64 (12): 4585-4591.
- [17] Gorjaei R G, Songolzadeh R, Torkaman M, et al. A novel PSO-LSSVM model for predicting liquid rate of two phase flow through wellhead chokes [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2015, 24: 228-237.
- [18] Ahmadi M A, Lee M, Bahadori A. Prediction of a solid desiccant dehydrator performance using least squares support vector machines algorithm [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2015, 50: 115-122.
- [19] Yang X S, Gandomi A H. Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization [J]. Engineering Computations, 2012, 29 (5): 464-483.
- [20] 吴忠强, 杜春奇, 李 峰, 等. 基于蝙蝠算法的永磁同步电机健康状态监测 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38 (3): 695-702.
- [21] Heraguemi K E, Kamei N, Drias H. Association rule mining based on bat algorithm [J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2015, 12 (7): 1195-1200.
- [22] Sun W, Liu M, Liang Y. Wind Speed Forecasting Based on FEEMD and LSSVM Optimized by the Bat Algorithm [J]. Energies, 2015, 8 (7): 6585-6607.
- [23] Gupta S, Sharma K. Optimization of revenue generated by hydro power plant by Bat algorithm (BA) [A]. International Conference on Computing for Sustainable Global Development [C]. IEEE, 2016.
- [24] Liu Y B. Improved bat algorithm for reliability-redundancy allocation problems [J]. Journal of Security and its Applications, 2016, 10 (2): 1-12.
- [25] Yuan Y, Wu X, Wang P, et al. Application of improved bat algorithm in optimal power flow problem [J]. Applied Intelligence, 2017 (1): 1-11.
- [26] Suykens J A K, Vandewalle J. Least squares support vector machine classifiers [M]. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [27] 李金乐, 王华忠, 陈冬青. 基于改进蝙蝠算法的工业控制系统入侵检测 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2017, 43 (5): 662-668.
- [28] Fister I. Differential evolution strategies with random forest regression in the bat algorithm [A]. Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation [C]. ACM, 2013: 1703-1706.
- [29] Lin Y, Yan W. Study of soft sensor modeling based on deep learning [A]. American Control Conference [C]. IEEE, 2015: 5830-5835.
- [30] Torgashov A, Zmeu K. Identification of nonlinear soft sensor models of industrial distillation process under uncertainty [J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48 (28): 45-50.
- [31] 李 勇, 邵 诚. 一种新的灰关联分析算法在软测量中的应用 [J]. 自动化学报, 2006, 32 (2): 311-317.

(上接第 44 页)