Self Localization of Fiber Optic Cable Breakpoints Based on GIS Maps and OTDR Instrument Monitoring Wavelength *

WANG Hongyan*, CHEN Shumin, CAO Gang, HUANG Hao
(Nanjing Suyi Industrial Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210008, China)

Abstract: Optical cable is usually buried underground or set up at high altitude, breakpoint outburst will make the reflected signal become weaker due to optical fiber loss, resulting in the decrease of the precision of optic cable break point localization during the measurement process affected by the distortion of the cable, the length of the impact, the measurement error. Therefore, a self-positioning method of fiber optic cable breakpoint based on GIS map and OTDR is proposed. The optical fiber optic cable basic data are stored in GIS, and the visual result of optical fiber optic cable routing is obtained by map matching algorithm based on hidden Markov model in GIS. The OTDR instrument is used to measure the breakpoint of the cable in the known routing path of the cable, and the measured value is corrected considering various deviation factors such as cable distortion and length, and the accurate distance between the breakpoint of the cable and the communication room is obtained. By combining the distance information obtained in the previous step with the geographic spatial data of GIS system, the automatic location of the cable breakpoint is realized, and the GIS system is visually displayed. The experimental results show that the proposed method achieves significant results in fiber optic cable breakpoint positioning, and the positioning results are consistent with the actual breakpoint position, indicating high positioning accuracy.

Key words: GIS geographic information system; OTDR instrument; hidden Markov model; self positioning of fiber optic cable break points; Viterbi algorithm
EEACC: 7220; 7320P **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.024

基于 GIS 地图和 OTDR 仪监测波长的光缆断点自定位 *

王宏延*, 陈抒珉, 曹 刚, 黄 浩
(南京苏逸实业有限公司, 江苏 南京 210008)

摘 要: 光缆通常埋设在地下或架设在高空, 断点的突发性会使得反射信号由于光纤损耗而变得较弱, 导致在测量过程中受光缆扭曲、长度影响, 出现测量误差, 使得光缆断点定位精度降低。为此, 提出基于 GIS 地图和 OTDR 仪监测波长的光缆断点自定位方法。将采集的光缆基础数据存储至 GIS 地理信息系统, 并在 GIS 上基于隐马尔可夫模型的地图匹配算法获取光缆路由轨迹可视化结果; 利用 OTDR 仪器在已知的光缆路由轨迹中对光缆断点进行测量, 并考虑各种光缆扭曲、长度等偏差因素对测量值展开修正, 获取准确的光缆断点至通信机房的距离; 通过结合前面步骤中获取的距离信息和 GIS 系统的地理空间数据, 实现对光缆断点的自动定位, 并在 GIS 系统上直观地展示出来。实验结果表明, 所提方法在光缆断点定位方面取得了显著成效, 定位结果与实际断点位置高度一致, 表明其定位精度高。

关键词: GIS 地理信息系统; OTDR 仪; 隐马尔可夫模型; 光缆断点自定位; Viterbi 算法
中图分类号: TP399 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0868-06

光缆作为信息传输的主要媒介, 其可靠性和维护效率变得尤为重要。然而, 光缆断点的突发性会影响网络的稳定性。当光缆发生断裂时, 断点处的反射信号会由于光纤损耗而变得较弱。这是因为光纤在传输过程中会有一定的损耗, 包括吸收损耗、散射损耗等, 这些损耗会随着光纤长度的增加而累积, 导致反射信号强度减弱。此外, 光缆的扭曲和长度增加也会影响反射信号的传播路径和时间, 从而影响断点定位的精度[1-2]。因此, 研究如何快速、准确地定位光缆断点成为了通信技术领域的一个重要课题。

夏猛等[3]获取光缆的布里渊频移跳变信息, 提取光缆的布里渊频移微特征, 基于获取信息实现光缆自断点定位。该方法在大量的布里渊频移数据中

项目来源: 国网江苏省电力有限公司省管产业单位科技项目(JC2024002)
收稿日期: 2024-06-14 **修改日期**: 2024-08-07

提取微特征需要复杂的算法和计算资源,不仅导致处理速度变慢,也增加了数据处理的难度,不利于实时故障定位。李灿等[4]利用分布式传感技术识别数据中的突变点,通过整合运维数据和接续杆塔的定位技术,锁定所有接续杆塔的具体位置,利用故障点位置定位方法,实现对光缆故障点的精准定位。该方法以接续杆塔作为新的参考点实行故障点定位,但在光缆路径复杂、接续杆塔分布不均等情况下,导致定位方法的精度受到限制。Judith 等[5]提出一种用于检测和定位 Y 形无屏蔽双绞线电缆软故障的方法,该方法结合了可观测性分析和时频域反射测量。通过比较电缆特性并利用滑动时间窗口内的最大归一化时频互相关函数进行故障检测,结合电缆传输速度和网络可观测性时间精确地定位故障。使用时频域反射测量和归一化时频互相关函数涉及复杂的计算,这会增加实时应用的难度,进而影响故障检测的可靠性。Guo 等[6]提出一种基于 Born 迭代法的电缆局部缺陷检测方法。通过格林函数计算阻抗谱,再利用 Born 迭代法将阻抗谱数据转化为对比度参数以定位缺陷。Born 迭代法依赖初始的模型或假设,如果初始模型与实际情况偏差较大,会影响最终的检测结果。

为了解决上述方法中存在的问题,提出基于 GIS 地图和 OTDR 仪监测波长的光缆断点自定位方法。通过结合 OTDR 测量得到的距离信息和 GIS 系统的地理空间数据,实现对光缆断点的自动定位,提高了光缆维护的效率和准确性。

1　光缆路由轨迹获取

光缆在铺设过程中较为扭曲,会导致光脉冲在光纤中的传播路径发生变化。这种变化使得反射信号的传播时间和强度发生偏差,从而影响断点定位的准确性。其中,光缆基础数据包括光缆的铺设路径、长度、维护记录等信息。这些数据是光缆管理和维护的基础,对于快速定位断点至关重要。因此,在光缆断点自定位之前,首先采集光缆基础数据存储至 GIS 地理信息系统内,并利用隐马尔可夫模型的地图匹配算法匹配光缆路由轨迹,以实现光缆路径的可视化[7-8]。

光缆路由由多段光缆组成,每段上标记有电杆、接头盒和标识等点资源,这些信息存储在 GIS 地理信息系统的属性数据库中[9]。而光缆点资源的具体位置则存储在空间数据库中。在复杂环境中,基于隐马尔可夫模型(Hidden Markov Model,HMM)的地图匹配算法可捕捉光缆的动态特性,确保轨迹连贯性并实现可视化。利用 GIS 地理信息系统,可获取道路信息和光缆路径轨迹序列数据。

光缆在埋设或架设过程中会受到外力作用而发生扭曲,增加了断点定位的难度。发射概率描述了给定一个隐状态(光缆路径的不同部分或类型,如直线段、弯道等)时,观察到特定输出(即 GPS 定位点)的概率。引入道路限速和测绘车的速度,计算发射概率即光信号从光缆断点反射回来的概率,其公式表达如下:

$$A(x_t \mid t_o)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\varepsilon_x}\mathrm{e}^{-\left(\frac{1}{\varepsilon_x}\right)^2}\times D(b_t,b_{\lim}) \tag{1}$$

式中:x_t 表示 t 时刻观察值,t_o 表示观察值的隐状态变量,D 表示相似度,b_t 表示车速,$b_{\lim}$ 表示道路限速,ε_x 表示测量误差的标准差。

转移概率用于衡量隐马尔可夫模型中不同隐状态之间转换的可能性。在光缆路由轨迹确定的上下文中,隐状态代表光缆经过的不同区域或类型(如直线段、弯道等),而转移概率则描述了光缆从这些区域或类型转移到其他区域或类型的概率。获取转移概率 A_z 公式表达如下:

$$A_z=\frac{1}{A(x_t \mid t_o)}\exp\left(-\frac{\sum_{o=1}^{n}(f_o+e_{\text{turn}}\times i_o)}{\chi}\right) \tag{2}$$

式中:f_o 表示第 o 个弯道距离,n 表示弯道总数,引入弯道的默认权重 e_{turn} 和定义权重 i_o,χ 表示转移系数。

利用转移概率和发射概率,Viterbi 算法可以评估不同断点位置序列的可能性。通过 Viterbi 算法,利用转移概率和发射概率来求解概率值最大的隐状态序列,即最可能的光缆路由轨迹。Viterbi 算法获取光缆路由轨迹步骤如下:

①为每个可能的初始隐状态计算初始概率,并初始化 Viterbi 表格。

②对于每个观察时间点,遍历所有可能的隐状态。使用发射概率和转移概率计算到达当前隐状态的概率。

③更新 Viterbi 表格,记录到达当前隐状态的最大概率路径及其对应的前一个隐状态。

④在处理完整个观察序列后,通过查看 Viterbi 表格中记录的前一个隐状态,回溯整个路径,直到到达初始隐状态。

⑤转换通过回溯得到的隐状态序列即为实际光缆路由轨迹[10]。

2　断点自定位

光缆所处的环境条件会导致其受到物理损伤,

如挤压或温度变化等。当光缆发生断裂时,断点处的光信号会因为反射和散射而发生改变,这些改变会被 Viterbi 算法捕捉到,但是由于光缆存在的扭曲现象,容易导致在定位光缆断点时容易产生误差,使得断点定位精度降低。因此,通过 OTDR 仪获取第 1 节中实际光缆路由轨迹的光缆断点,并考虑实际因素对光缆断点测量影响,对其展开修正处理,得到更准确的光缆断点距离;再结合 GIS 系统的地理空间数据,完成对光缆断点的自动定位,并展示在 GIS 系统上[11-12]。

2.1 基于 OTDR 的光缆断点距离计算

光缆跨越距离较长,因此,在获取的光缆路由轨迹范围内搜索光缆断点,仍然存在搜索空间较大的问题。通过计算断点距离,可以利用已知的光缆路由轨迹信息来辅助分析反射信号,减小搜索空间范围,从而提高断点定位的准确性。因此,在实际光缆路由轨迹中,考虑偏差,利用 OTDR 测量方法获取光缆断点至通信机房的距离[13]。基于 OTDR 的光缆断点获取示意如图 1 所示。

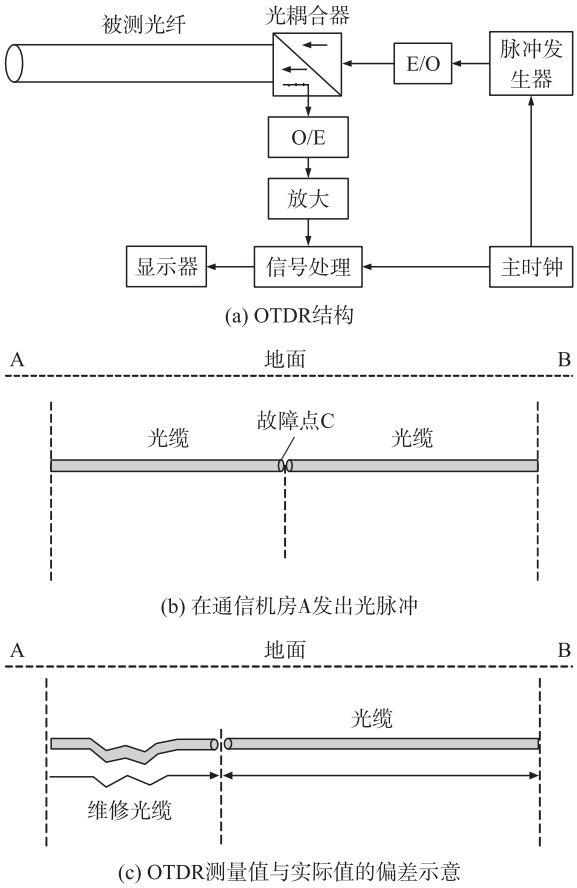


图 1 基于 OTDR 的光缆断点获取

设定两个通信机房 A 和 B,两者间距离为 F,两者之间连接光缆存在断点,在通信机房 A 发出光脉冲,其示意如图 1(b)所示。基于 OTDR,计算出断点至通信机房的距离 F 公式表达如下:

$$F=\frac{v\cdot t}{2\eta} \tag{3}$$

式中:t 表示发射信号到接收信号的时间,η 表示光缆材料的折射率,v 表示光的传播速率。

由于光纤损耗,光缆断点导致光信号反射变得较弱,而光缆的扭曲和弯曲等物理变化会影响光信号的传播速度和路径,从而导致 OTDR 测量的断点位置与实际断点之间存在较大偏差[14]。因此,考虑光缆的扭曲、长度增加以及新增光纤长度等因素,对 OTDR 的测量值进行修正处理,以更准确地定位断点。OTDR 测量值与实际值的偏差示意如图 1(c)所示。

根据光缆链路的总损耗 Z,评估光缆的性能和可能存在的问题,推出接头数 M_j,公式表达如下:

$$M_j=\frac{Z-F\cdot a-V\times M_v}{D} \tag{4}$$

式中:a 表示光缆平均衰减率,D 表示光缆熔接损耗,M_v 表示连接口数量,V 表示接头损耗。

计算会使光缆长度增加的光缆维修接头数 M_{jm},其公式表达如下:

$$M_{\mathrm{jm}}=M_j-|F| \tag{5}$$

OTDR 的测量是基于光纤的折射率和光脉冲的传播速度的,而这些参数在接头中与光纤本身不同,没有被计算在内,从而导致 OTDR 测量的光缆长度与实际光缆长度之间存在偏差。设定每次维修的光缆长度为 Q,每次维修需要增加两个维修接头,计算出因维修而增加的光缆长度 M,公式表达如下:

$$M=\frac{M_{\mathrm{jm}}\cdot Q}{2} \tag{6}$$

根据 OTDR 的测量原理,此时获取的光缆长度 M 即为 OTDR 测量值与实际值的偏差,由此得到光缆断点距离通信机房的距离 F',公式表达如下:

$$F'=F-M \tag{7}$$

2.2 断点自定位

光缆断点处的反射信号强度会因为光纤损耗而减弱。而 GIS 可以通过整合地理空间数据和实际光缆路由轨迹信息,提供一个平台来辅助断点定位。即使反射信号较弱,GIS 系统也可以利用已知的光缆路径和断点至通信机房的距离,通过空间分析来自定位断点的位置。因此,基于获取的光缆断点至通信机房距离结果,在 GIS 系统上实现光缆断点自定位[15]。

在确定光缆断点与通信机房的距离后,光缆断点自定位的步骤如下:

①获取光缆断点距离通信机房的距离 F'。

②查询 GIS 地理信息系统的属性数据库,筛选出那些到通信机房的距离大于或等于 F' 的点资源记录,选取符合条件 $\min\{|F'-F|\}$ 的点资源 R_M 作为参考点,记录该参考点的坐标为(X_M,Y_M),其到通信机房的距离为 F_M。

③计算断点坐标。

A. 当 $F'>F_M$ 时,得到点资源 T_{M+1},此时断点定位坐标(X_g,Y_g)公式表达如下:

$$\begin{cases} X_g=\dfrac{X_{M+1}-X_M}{F_{M+1}-F_M}\times(F'-F_M) \\ Y_g=\dfrac{Y_{M+1}-Y_M}{F_{M+1}-F_M}\times(F'-F_M) \end{cases} \tag{8}$$

B. 当 $F'=F_M$ 时,点资源 R_M 坐标(X_M,Y_M)即为光缆断点位置。

C. 当 $F'<F_M$ 时,找出前一个点资源 R_{M-1},记录其坐标(X_{M-1},Y_{M-1}),此时光缆断点坐标(X_g,Y_g)公式表达如下:

$$\begin{cases} X_g=\dfrac{X_M-X_{M-1}}{F_M-F_{M-1}}\times(F'-F_{M-1}) \\ Y_g=\dfrac{Y_M-Y_{M-1}}{F_M-F_{M-1}}\times(F'-F_{M-1}) \end{cases} \tag{9}$$

D. 获取断点坐标后,将其关联到 GIS 地理信息系统的空间数据库上,即可实现断点在地图上的显示。

通过 OTDR 仪器精确测量光缆断点,并综合考虑光缆扭曲与长度偏差进行修正,从而准确计算断点至通信机房的距离。结合 GIS 系统的地理空间数据,实现了光缆断点的自动定位与直观展示,为光缆故障的快速定位与修复提供了有效工具。

3　实验与分析

为了验证基于 GIS 地图和 OTDR 仪监测波长的光缆断点自定位的有效性,对其完成如下测试。准备一台装有 GIS 地图软件的计算机或服务器,用于显示光缆线路和断点位置。为确保能够准确测量光缆中的光信号反射和衰减,选择并校准一台波长为 1 625 nm、动态范围为 28 dB、脉冲宽度为 5 ns~20 000 ns 以及采样分辨率为 0.04~5 的 MAX-730C 型号 OTDR 仪器,实验现场如图 2 所示。

选取 10 km 远的主干光缆线路作为实验对象,该线路无主要分支,但存在几个小的光缆接入点。距离起点 2 km 处,位于地下隧道中,弯曲半径约 50 m,距离起点 6.5 km 处,因道路交叉而架设在空中,弯曲半径约 80 m。

图 2　实验现场图

在 GIS 地图上绘制光缆线路的详细布局,包括所有分支和连接点。

采用文献[3]的布里渊频移微特征方法、文献[4]的分布式传感方法、文献[5]的时频域反射测量方法和所提方法分别从光缆路由轨迹可视化效果、断点距离通信机房距离计算和光缆断点定位效果三方面验证所提方法的效果。

①光缆路由轨迹可视化效果

对比实际光缆路由轨迹与 GIS 系统上的可视化轨迹,验证 GIS 对光缆路由轨迹的可视化效果和准确性。实地勘察光缆路由,记录详细的路由轨迹信息,包括转折点、障碍物、交叉点等,将实地勘察的光缆路由数据导入 GIS 系统,利用所提方法实现光缆路由轨迹可视化,生成光缆路由轨迹图,记录两者轨迹对比如图 3 所示。

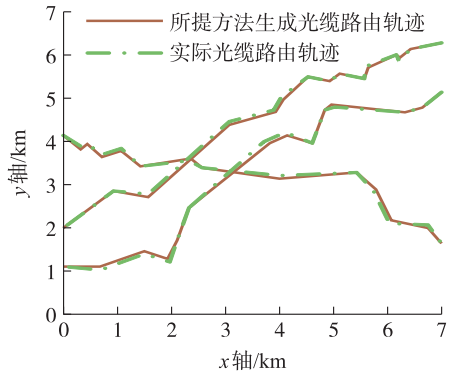


图 3　光缆路由轨迹对比

分析图 3 可知,所提方法生成的光缆路由轨迹与实际光缆路由轨迹几乎一致,偏差较小,表明所提的生成光缆路由轨迹的有效性及准确性,为后续光缆断点定位提供了可靠的支持。

②断点距离通信机房距离计算

在实际应用中,由于光缆受到自然环境、铺设方式、光缆老化等多种因素的影响,导致 OTDR 仪器直接测量的结果与实际断点位置之间存在偏差。所提方法通过考虑光缆的平均衰减、熔接损耗、接头损耗

以及连接口数目等因素,计算出光缆链路的总损耗,从而得出因维修而增加的光缆长度,修正了光缆断点至通信机房的距离计算。选取 30 个已知光缆断点作为实验对象,通过所提方法计算光缆断点至通信机房的距离,记录经所提方法获取的距离结果和直接通过 OTDR 获取的距离结果,如图 4 所示。

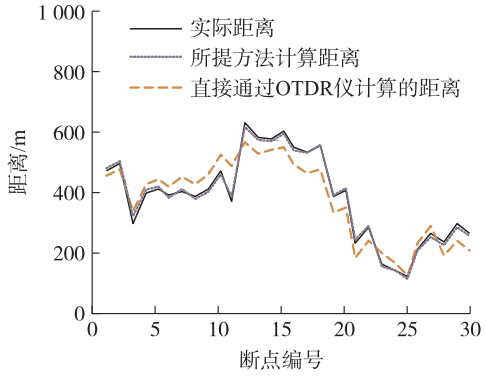


图 4 断点距离通信机房距离计算

分析图 4 可知,利用 OTDR 仪器测得的光缆断点至通信机房的距离与实际距离平均偏差为 15.3 m,而采用所提方法计算得出的距离与实际距离的平均偏差仅为 3.8 m。由实验结果可知,所提方法显著减少了误差,提高了光缆故障定位的准确性,能够为光缆故障定位提供有力的支持。

③光缆断点定位效果

在实现光缆路由路径的 GIS 系统可视化后,采用所提方法、布里渊频移微特征方法、分布式传感方法以及时频域反射测量方法完成光缆断点自定位,记录 4 种方法的定位结果,如图 5 所示。

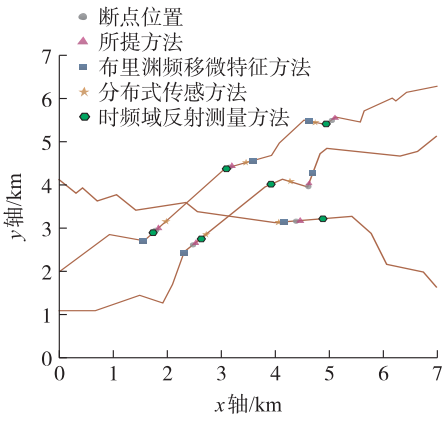


图 5 三种方法的断点定位情况对比

分析图 5 的结果,通过比较所提方法、布里渊频移微特征方法、分布式传感方法以及时频域反射测量方法四种定位方法的实际偏差,发现所提方法平均偏差为±3.2 m,布里渊频移微特征方法平均偏差为±7.8 m,分布式传感方法平均偏差为±6.5 m,时频域反射测量方法平均偏差为±5.4 m。显而易见,所提方法定位误差较其他三种方法均明显降低,且稳定性较高。这表明所提方法在光缆断点定位中的精度与可靠性均优于其他方法,有助于提高光缆故障定位的准确性和效率。这是因为所提方法综合了光缆在 GIS 的显示结果和断点距离通信机房的距离结果,准确地在地图上定位出光缆断点位置,提高了光缆断点定位精度,获取了更好的光缆定位效果。

4 结束语

光缆断点自定位一直是通信网络领域研究的重点问题之一,故提出基于 GIS 地图和 OTDR 仪监测波长的光缆断点自定位方法。基于隐马尔可夫模型的地图匹配算法生成光缆路由轨迹,精确地实现了光缆地图可视化;综合考虑光缆的扭曲、长度增加以及新增光纤长度等因素,对 OTDR 的测量值进行修正处理,从而能够更准确地定位断点距离通信机房的距离,提高了光缆定位准确性,完成光缆自定位。

参考文献:

[1] 张涛,曹文琛,罗仁泽,等. 油气长输管道伴行光缆状态监测及断点精确定位技术综述[J]. 电讯技术,2022,62(2):275-280.

[2] 胡传胜,张海宾. 用于下线间无线序光缆割接的旧路由光缆法[J]. 光纤与电缆及其应用技术,2012(1):41-44.

[3] 夏猛,汤晓惠,王颖,等. 基于布里渊频移特征的 OPGW 光缆接续杆塔与断纤定位方法[J]. 光学学报,2021,41(19):81-88.

[4] 李灿,王颖,宁云潇,等. 面向电力 OPGW 光缆的故障精准快速定位方法[J]. 北京邮电大学学报,2022,45(3):32-37.

[5] Idellette Judith H S, Cocquempot V, Degardin V. Fault Detection and Localization in Unshielded Twisted Pair Cable Based on Observability Analysis and Reflectometry Experimental Measurements[J]. Measurement Science & Technology,2024,35(1):015034.

[6] Guo L,Nie Z,Liu G. A Detection Method for Cable Local Defects Based on Born Iteration[J]. Electric Power Systems Research,2024,226:109956.

[7] 李冠运,刘松涛. 基于 GIS 技术的雷达地形遮挡盲区高度快速计算方法[Z]. 中国电子科学研究院学报,2022,17(7):646-650.

[8] 赵月平,王兴举,赵琳,等. 基于 BIM+GIS 的公路工程施工预算三维地理信息管理系统[J]. 公路,2021,66(12):309-312.

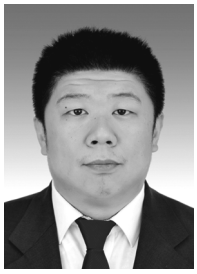
[9] 康得军,温儒杰,邱福杰,等. 基于 SWMM 和 GIS 的城

市内涝 4D 可视化研究[J]. 中国给水排水,2023,39(13):133-138.
[10] 林圣淘,王子南,熊吉,等. 光纤瑞利散射传感抗干涉衰落技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(13):96-114.
[11] Zhang Y, Teoh B K, Zhang L. Integrated Bayesian Networks with GIS for Electric Vehicles Charging Site Selection [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 344:131049.
[12] 刘旭,刘波,饶云江. 基于单光子探测的光子计数光时域反射仪研究进展[J]. 光学精密工程,2023,31(2):168-182.
[13] 何如龙,隗小斐. 基于 φ-OTDR 和 BP 神经网络的海光缆扰动监测[J]. 海军工程大学学报,2022,34(2):69-74.
[14] Wu H,Guo N,Zhong Z,et al. High-Performance Distributed Dynamic Strain Sensing by Synthesizing φ-OTDR and BOTDR. [J]. Optics Express, 2023, 31 (11): 18098-18108.
[15] Zhao L J,Zhang X Z,Xu Z N. A High-Fidelity Numerical Model of Coherent Φ-OTDR [J]. Measurement, 2024, 230:114526.

王宏延(1977—),男,汉族,江苏南京人,硕士,高级工程师,研究方向:电力系统及其自动化,why565253@126.com;

陈抒珉(1998—),女,汉族,江苏南京人,本科,初级工程师,研究方向:电力系统控制与分析;

曹　刚(1987—),男,汉族,江苏沭阳人,本科,中级工程师,研究方向:通信技术及人工智能识别算法;



黄　浩(1976—),男,汉族,江苏南京人,本科,高级工程师,研究方向:电力系统及其自动化。