

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221373

# 基于行波互相关法的电力电缆故障定位技术及应用

宋 柯<sup>1,2</sup>, 王乐宁<sup>1,2</sup>, 唐 诗<sup>1,2</sup>, 邱 华<sup>1,2</sup>, 刘 育<sup>2</sup>

(1. 国能大渡河猴子岩发电有限公司, 四川 甘孜 626100; 2. 国能大渡河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 水电站电缆距离长、地下敷设的隐蔽性导致电缆故障查找困难, 目前常用冲击高压闪络法等进行电缆故障测距, 其接线简单, 但波形分析难度较大, 需有丰富波形分析经验的人员才能较准确定位。对此, 通过研究冲击高压闪络法电缆故障定位原理及波形分析方法, 建立了一种行波互相关法的电缆故障定位模型, 仿真结果表明该模型能有效实现电缆故障的自动定位, 并将该模型应用于大渡河猴子岩水电站生产实践中进行验证, 实现了 10 kV 电缆故障点高精度定位, 减少了电缆故障查找工作量及时长, 提高了电缆故障定位效率。

**关键词:** 电力电缆; 互相关法; 行波; 故障定位

中图分类号: TM247

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0213-05

## 1 引言

在电缆发生故障后, 快速、精确查找故障位置, 快速恢复可靠供电, 不仅有效缩减故障停电时间, 还能降低经济损失<sup>[1]</sup>。由于建设成本、电缆通道条件、供电电源、准确性与可靠性等因素, 电缆在线监测及故障定位技术尚未全面实施应用, 现仍主要以离线测试方式进行电缆故障定位<sup>[2]</sup>。电缆故障按照故障性质及绝缘电阻大小可分为开路故障、低阻故障、高阻故障, 其中低阻故障和高阻故障相对较多, 且不易发现、故障排查耗时费力, 是电缆故障定位分析的重点。电缆故障定位方法可归纳为故障回路阻抗法、行波法等, 阻抗法对高阻故障、断线故障测量效果不佳<sup>[3-5]</sup>。行波法可细分为低压脉冲法、冲击高压闪络法(简称“冲闪法”), 低压脉冲法适用于电缆的低阻故障及开路故障, 冲闪法可应用于高阻故障、低阻短路故障和断线故障等, 适用范围更广<sup>[6]</sup>。冲闪法信号取样可采取电压取样法和电流取样法两种, 电压取样法存在直接耦合高压, 对设备和人员安全均存在风险; 电流取样后的波形分析高度依赖检修人员, 容易产生主观定位误差<sup>[7]</sup>。鉴此, 本文通过分析电力电缆故障定位的原理和波形方法, 建立一种行波互相关法的电缆故障定位模型, 自动分析检测波形, 计算故障距离, 降低对人员经验的依赖,

对于指导现场分析电缆故障位置, 降低电缆故障查找难度、快速恢复供电具有重要意义。

## 2 基于互相关法电缆故障定位方法

### 2.1 冲闪法系统建模

冲闪法是通过在故障电缆一端施加一冲击电压, 使电缆故障点发生闪络放电, 确定故障击穿点反射波在故障点和测量点的往返时间, 从而计算故障点距离的方法。冲闪法采用线性电流耦合器进行电流取样。

冲闪法系统仿真模型由高压信号发生器模型、电缆模型及线性电流耦合器模型构成, 见图 1 (图中各字母含义见文献[8])。高压信号发生器由脉冲电容器经过球隙放电施加冲击电压至被试电缆, 实际应用时通过调节球隙距离调节施加在被试品上的冲击电压大小, 仿真时采用压控开关

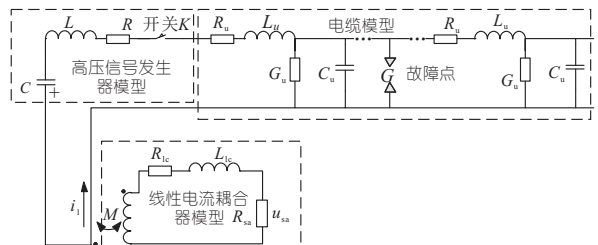


图 1 冲闪法系统模型

Fig. 1 Schematic diagram of impulse high-voltage flashover method (current sampling)

收稿日期: 2022-07-05, 修回日期: 2022-09-27

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(524625180023); 国家能源集团科技创新项目(GJNY-19-69)

作者简介: 宋柯(1969-), 男, 高级工程师, 研究方向为水电站技术与管理, E-mail: 943209834@qq.com

替代球隙间隔。高压信号发生器模型采用计及高频杂散参数影响的 RLC 串联模型,电感  $L$ 、电阻  $R$  采用 RLC 电路欠阻尼放电实测方法获取<sup>[8]</sup>,其参数见表 1; 电缆模型采用经典的频变参数 JMarti 模型,在高频暂态条件下具备较高的精度和稳定性<sup>[8]</sup>,按照 YJV22-8.7/15kV-3×70 电缆型号设置电缆参数。线性电流耦合器采用计及线圈互感  $M$ 、自感  $L_{lc}$ 、自阻  $R_{lc}$  及其集肤效应的线性电流耦合器模型,其参数量化方法见文献[9]。本文采用 ATP-EMTP 软件仿真,仿真电压  $u_{sa}$  和实测信号比较,二次电压峰峰值平均相对误差不超过 6.8%,波形吻合度高,显示该模型具有较高精度,并通过该模型可设置不同故障距离,开展电缆故障定位仿真研究。

表 1 高压信号发生器参数

Tab. 1 Parameters of the high-voltage signal generator

参数	单位	值	参数	单位	值
脉冲电容 $C$	$\mu\text{F}$	2	杂散电感 $L$	$\mu\text{H}$	10.53
放电回路电阻 $R$	$\Omega$	0.21			

### 2.2 冲闪法下行波过程分析

故障行波的传播过程可利用行波网络图进行分析,见图 2(图 2 中  $\rho$  为反射系数,  $\tau$  为故障点到测量点行波传播时间,  $S_f$ 、 $S_b$  分别为正向行波、反向行波)。当开关快速合闸将冲击电压突然施加到故障电缆上时,在电缆中会先出现电容放电行波  $-e(t)$ ,由于绝缘击穿需一定过程<sup>[10]</sup>,因此行波到达故障点需延迟一段时间才能将故障点击穿,设故障点击穿时间为  $t_d$ 。

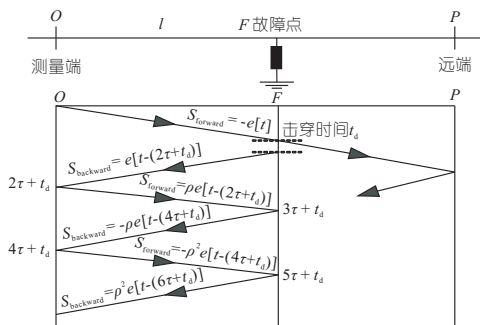


图 2 冲闪法行波过程

Fig. 2 Flash method of traveling wave process

根据图 2,在故障点击穿后,正向行波和反向行波满足下式(即对于正向行波从第一个故障行波开始,之后任一行波冲击,在反向行波中对应的反射行波冲击与其具有延时负相关的特征,延时时为  $2\tau$ ):

$$S_f(t) = -S_b(t - 2\tau) \quad (1)$$

### 2.3 冲闪法故障测距原理

传输线路电报方程<sup>[11]</sup>为:

$$\begin{cases} u(x, t) = S_f(t - x/v) + S_b(t + x/v) \\ i(x, t) = [S_f(t - x/v) - S_b(t + x/v)] / Z \end{cases} \quad (2)$$

其中  $Z = \sqrt{L_u/C_u}$

式中,  $u$ 、 $i$  分别为电缆线路上任意点电压、电流值;  $v$  为行波传播速度;  $Z$  为电缆线路波阻抗。

根据式(2),可用电缆线路电压、电流计算出正向行波和反向行波方程为:

$$\begin{cases} u(x, t) + Zi(x, t) = 2S_f(t - x/v) \\ u(x, t) - Zi(x, t) = 2S_b(t + x/v) \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)可知,通过正向行波找出其相似性最高的方向行波,即可计算出  $\tau$  值,采用互相关函数  $\varphi(n)$  为:

$$\varphi(n) = \frac{\sum_{i=1}^N S_f(i)S_b(i+n)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N S_f^2(i)S_b^2(i+n)}} \quad n=0,1,2,\dots \quad (4)$$

式中,  $N$  为选取计算相关系数的窗口长度;  $n$  为时延因子,当在某时延因子下,  $\varphi(n)$  取最大值时,时延因子记为  $n_{\varphi_{max}}$ 。

推导  $\tau$  的计算式为:

$$\tau = n_{\varphi_{max}} \Delta t / 2 \quad (5)$$

式中,  $\Delta t$  为采用间隔时间。

根据经典单端故障定位公式计算电缆故障距离  $d$  为:

$$d = v\tau \quad (6)$$

## 3 电缆故障自动定位技术

### 3.1 方向行波的构建

根据式(3)可知,电压方向行波可由电缆线路任意点电压、电流计算,但采用冲闪法进行电缆故障定位时,由于电压取样存在高压耦合及互感器阻抗特性匹配等问题,因此目前一般仅采用电流取样方式。对此,采用并联非故障相方式,对故障相和非故障相同时加压,并采用线性电流耦合器测量故障相和非故障相电流,并用故障相和非故障相电流构造方向行波,原理见图 3。

对于三相电缆故障线路,三相电缆长度和波阻抗基本一致,因此非故障相反射波到达测量点的时间总是小于故障点反射波到达测量点的时间,在非故障相反射波到达测量点之前,结合式(2)  $u_b$  满足下式:

$$u_b = Zi_b \quad (7)$$

因此根据式(3)、(7),可构造电压方向行波为:

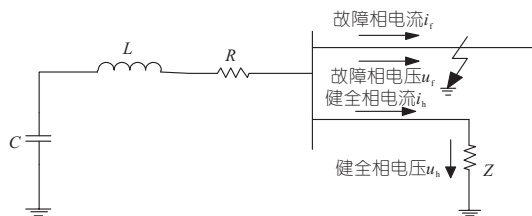


图 3 并联健全相测量端等效电路

Fig. 3 Parallel and perfect phase measurement end equivalent circuit

$$\begin{cases} S_f = (u_f + Zi_f)/2 = Z(i_h + i_f)/2 \\ S_b = (u_f - Zi_f)/2 = Z(i_h - i_f)/2 \end{cases} \quad (8)$$

### 3.2 相关窗口起始点和长度选择

根据式(4)可知,计算方向行波相关系数时,首先需选择长度为  $N$  的正向电压行波窗口,存在两个关键问题,一是窗口的起始点;二是窗口的时间长度,即  $N$  值。采用高压信号发生器同时向故障相和非故障相施加高压信号方式,当故障相击穿后,非故障相和故障相的电流发生明显变化,因此可以选择故障击穿时间点作为相关窗口的起始点。

选择窗口过短会漏掉特征信息,增大测距误差,而选择窗口过长,尤其是超过正常相反射波到达时间,相似性特征不再成立<sup>[12]</sup>,因此可选取线路全长行波传输时间长度作为时间窗长度。测量时可将非故障相在远端短接,如 A 为故障相,B、C 相为非故障相,将 B、C 相在远端短接,那么非故障相长度为故障相长度的两倍,也能保证即使 A 相在远端故障时,非故障相的反射波也迟于故障相反射波到达时间,相似性特征还能继续成立。

## 4 仿真分析

为评估提出的故障定位方法的可行性,采用 EMTP-ATP 进行建模仿真,仿真简化原理见图 4。高压信号发生器模型中 RLC 参数见表 1,电缆仍选用 JMarti 模型,假设电缆全长为 4 km,电缆型号为 YJV22-8.7/15kV-3×70,故障设置在 A 相上,并采用压控开关模拟故障点击穿,故障距离分别设置为 100、500、1 000、2 000、3 000、4 000 m。正常相 B、C 两相在远端短接,波速取  $v=173 \text{ m}/\mu\text{s}$ 。

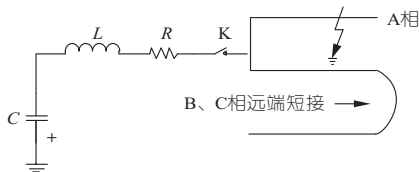


图 4 仿真原理图

Fig. 4 Simulation schematics

图 5 为耦合电流互感器输出的故障相和非故障相信号,即图 1 中的  $u_{sa}$  值,从图 5 中可以看出故障点击穿前,故障相和非故障相输出信号接近,

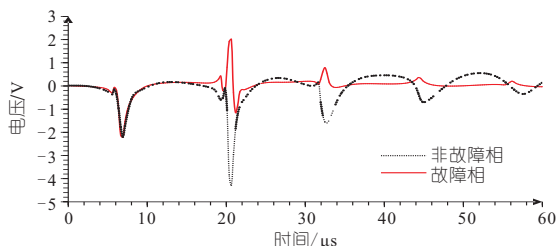


图 5 耦合电流互感器输出信号 ( $l=1\ 000 \text{ m}$ )

Fig. 5 Output signal of coupling current transformer

而故障点击穿后两者产生明显差异。图 6 为采用测量故障相和非故障相电流构造的正反向电压行波,图 7 为正反向行波相关系数曲线,从图 7 中可以看到相关系数最大为 0.98,对应的故障距离为 1 008.7 m,误差为 8.7 m。

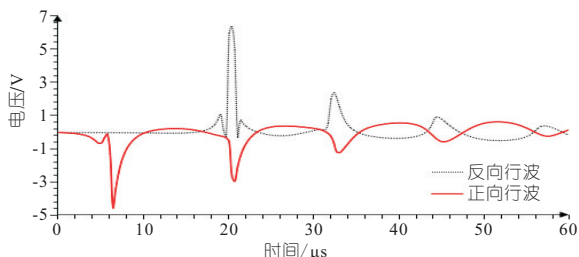


图 6 方向行波波形 ( $l=1\ 000 \text{ m}$ )

Fig. 5 Directional traveling waveform ( $l=1\ 000 \text{ m}$ )

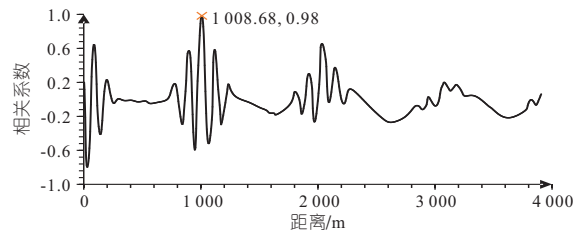


图 7 故障测距相关系数曲线 ( $l=1\ 000 \text{ m}$ )

Fig. 7 Correlation coefficient curve ( $l=1\ 000 \text{ m}$ )

依据同样的方法设置不同故障距离,仿真结果见表 2,相对误差平均值约 0.73%,验证了本方法进行电缆故障定位的可行性。

表 2 仿真测距结果

Tab. 2 Simulation ranging results

故障距离/m	仿真结果/m	绝对误差/m	相对误差/%	故障距离/m	仿真结果/m	绝对误差/m	相对误差/%
100	101.50	1.50	1.50	2 000	2 012.30	12.30	0.61
500	502.10	2.10	0.42	3 000	3 014.50	14.50	0.48
1 000	1 008.70	8.70	0.87	4 000	4 020.40	20.40	0.51

## 5 实例应用

大渡河猴子岩水电站位于甘孜州康定市,总装机容量为  $4 \times 425 \text{ MW}$ ,站内应用了低压、高压及超高压多种电缆,由于水电站电缆长期运行于潮湿环境且负荷波动变化较大,随着运行时间增长电缆故障时有发生,电缆发生故障后查找定位耗时费力,对大渡河猴子岩水电站生产运行造成了一定影响。

2021 年 8 月某日,某 10 kV 馈线柜出线电缆发生接地跳闸事件。查阅故障电缆资料得知,该段电缆型号为 YJV22-8.7/15kV-3×70,总长 1 156 m,中间有 1 处接头,2 个月前曾发生过一起跳闸事件,未做处理重合闸后送电成功。此次该电缆故障发生后,首先对该故障电缆进行绝缘电阻试验和导通试验,试验数据见表 3。表 3 中, $R_{AE}$ 、 $R_{BE}$ 、 $R_{CE}$  分别为故障电缆相对地绝缘电阻; $R_{AB}$ 、 $R_{AC}$ 、 $R_{BC}$  分别为故障电缆相间绝缘电阻; $R_{A+B}$ 、 $R_{A+C}$ 、 $R_{B+C}$  分别为故障电缆两相导体电阻。

表 3 绝缘电阻测试及导通试验结果

Tab. 3 The experiment results

绝缘电阻试验/MΩ		导通试验/Ω			
$R_{AE}$	∞	$R_{AB}$	∞	$R_{A+B}$	0
$R_{BE}$	2	$R_{AC}$	∞	$R_{A+C}$	0
$R_{CE}$	∞	$R_{BC}$	∞	$R_{B+C}$	0

分析表 3 试验结果,故障电缆 B 相绝缘电阻明显偏低,且属高阻故障,宜采用冲击闪法进行高阻故障测距。为验证本文故障自动定位方法的精度,首先采用传统冲闪仪检测,经判断故障点距馈线柜出线处约 590 m。图 8 为冲闪法传统测试试验波形。

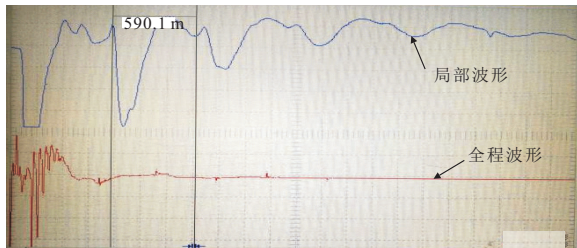


图 8 传统法现场测试波形图

Fig. 8 Field test waveform by traditional method

为验证本文方法现场应用的可行性,将 A、C 相在远端短接,对 A、B 相利用冲闪测试系统同时施加同一冲击电压,线性电流耦合器实测输出电压信号,见图 9,并根据实测数据构造正反向电压行波,见图 10。最后采用式(4)计算正反向电压行波相关系数曲线,见图 11,结果表明在 592.35 m 处相关系数最大,为 0.97。

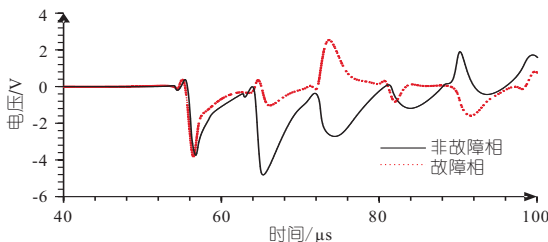


图 9 线性电流耦合器实测输出信号

Fig. 9 Output signal of the linear current coupler

最后结合故障电力电缆敷设路径等基本信息,再次开展冲击高压闪络试验,在测距故障点位

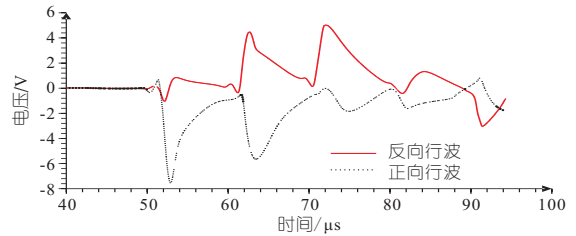


图 10 构造电压方向行波

Fig. 10 Output signal of the linear current coupler

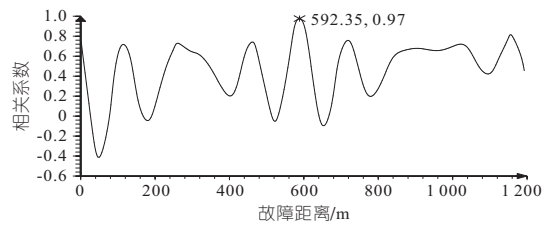


图 11 故障测距相关系数曲线

Fig. 11 Failure ranging correlation coefficient curve

置附近,依据声测法定位原理进行精确定位,最终确定故障点位于线路 595 m 处,相比本文定位的距离差约为 2.65 m,定位精度高,满足实际运维要求。打开故障点电缆沟盖板后,发现故障电缆泡于水中且外绝缘有明显损伤。初步分析为电缆敷设施工时造成的损伤,电缆绝缘受损后致使绝缘电阻下降,由于长时间在高湿度环境运行,出现闪络性高阻接地故障后跳闸。为避免再次出现跳闸故障,截断受损处电缆并安装电缆头后,再次进行绝缘电阻及耐压测试,试验结果均正常,随后一次性恢复送电成功。

此次大渡河猴子岩水电站电缆故障,从发现电缆故障到确定故障位置,仅用时 50 min,大幅压缩了电缆故障查找工作量及时长,为电力电缆故障迅速排除、抢修处理赢得了宝贵时间,最大程度上减少了停电损失。

## 6 结论

a. 建立了冲闪法系统模型,提出了行波互相关法的电缆故障自动定位方法,为避免高压耦合,采用并联非故障相方式,利用故障相和非故障相电流构造方向行波,基于冲闪法系统模型的仿真测试数据进行验证,验证表明该方法故障定位相对误差平均值约 0.73%,具有较高的准确性。

b. 以大渡河猴子岩水电站 10 kV 电力电缆 595 m 处高阻故障为例,验证了行波互相关法电缆故障自动定位方法的可行性,经测试该方法误差为 2.65 m,为电缆故障自动定位提供了一种解决途径。

### 参考文献:

[1] 赵尊慧,孙廷玺,郑柒拾,等. 基于脉冲差分的高压电缆故障定位方法及设备研究[J]. 电测与仪表,

- 2020, 57(8): 64-69.
- [2] 梁栋, 徐丙垠, 刘洋, 等. 基于差分方向行波的脉冲电流电缆故障测距方法[J]. 电测与仪表, 2021, 58(7): 150-156.
- [3] 卢建序. 电力电缆故障预警与测距定位技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [4] 杨斌, 李明贞, 周承科. 基于泄漏电流的高压电缆线路故障测距方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 120-124.
- [5] 饶显杰, 周凯, 黄永禄, 等. 频域反射法中阻抗变化类型判断技术[J]. 电工技术学报, 2021, 36(16): 3457-3466.
- [6] 白晓斌. 低压脉冲法和冲闪法对电缆故障定位的分析[J]. 电线电缆, 2008(2): 41-44
- [7] 王恒. 冲闪法的电压取样与电流取样[J]. 高电压技术, 2004, 30(136): 56-57.
- [8] 孙中玉, 徐丙垠, 王玮, 等. 电缆故障脉冲电流测距系统建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 142-147.
- [9] 李嘉明, 陈曦, 郝一帆, 等. 电缆线路中操作过电压主导频率的确定方法[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2785-2794.
- [10] 罗向源. 电力电缆线性高阻击穿故障的特点及定位方法[J]. 电线电缆, 2007(5): 16-18.
- [11] REIS R L A, LOPES F V, NEVES W L A, et al. An improved single-ended correlation-based fault location technique using traveling waves[J]. International journal of electrical power and energy systems, 2021, 132(5): 1-10.
- [12] GONZALEZ-SANCHEZ V H, TORRES-GARCIA V, GUILLEN D. Fault location on transmission lines based on travelling waves using correlation and MODWT [J]. Electric power systems research, 2021, 197: 107308.

## Technology and Application for Cable Fault Location Based on Cross-correlation Function of Traveling Waves

SONG Ke<sup>1,2</sup>, WANG Le-ning<sup>1,2</sup>, TANG Shi<sup>1,2</sup>, QIU Hua<sup>1,2</sup>, LIU Yu<sup>2</sup>

(1. CHN Energy Dadu River Houziyan Power Generation Co., Ltd., Ganzhi 626100, China;

2. CHN Energy Dadu River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Long distance and concealment of underground cable in hydropower station result in difficulties in cable fault location. Due to the simple wiring, the impulse high-voltage flashover method is commonly used to locate cable faults, which needs technicians with rich waveform analysis experience to locate fault accurately. For the above situation, by studying the fault positioning principle and waveform analysis method of impact high voltage flashover, a cable fault location technology based on traveling wave cross-correlation method was proposed. The simulation analysis results show that the proposed method can effectively realize automatic cable fault location. Finally, the analysis steps and procedures of power cable fault location has been practiced in Houziyan Power Generation in Dadu River and realized high-precision positioning of 10 kV cable fault point, which reduced the cable fault locating workload and working hours while improving the efficiency of cable fault location.

**Key words:** power cable, cross-correlation function, traveling waves, fault location

(上接第 109 页)

- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城乡建设用地竖向规划规范: CJJ83-2016 [J]. 中国建筑工业出版社, 2016.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 居住绿地设计标准: CJJ/T 294-2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [5] 张迪. 龟背式地形地表排水模式数值模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准: GB 50014-2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑给水排水设计标准: GB 50015-2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [8] 北京市规划和自然资源委员会. 海绵城市雨水控制与利用工程设计规范: DB11/685-2021 [S].
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 车库建筑设计规范: JGJ 100-2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [10] 梁小光, 武治国, 任俊雯. 子汇水区分割对 SWMM 低影响开发模拟的影响研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(6): 1-5.

## Design Method for Flood Control in Urban Communities in the Northern Plains of China

LIU Jun-quan<sup>1</sup>, LU Xing-chao<sup>2</sup>, ZHAO Shu-qi<sup>1</sup>

(1. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In recent years, urban rainstorm disasters have occurred frequently in China. The community, as an important component of the city, is exposed to urban flooding. In view of the imperfection of the waterlogging prevention and control system, this paper briefly analyzes the characteristics and prevention methods of urban flooding, and summarizes the limitations of the current system. A waterlogging prevention system based on micro system, minor system and major system is constructed from a drainage perspective. The waterlogging prevention and control methods based on site elevation, terrain slope, and water-retaining measure is established. A design method system including design points, design process, design diagram, and key design parameters is formed, which provides reference for the planning and design of sponge communities in new era.

**Key words:** urban flooding prevention and control; community; design method; countermeasure; drainage model