

# The New Fault Location Method through Traveling Wave for the B Type Submarine Cable-Overhead Line Hybrid Line

Hui Liu<sup>1</sup>, Boxue Tan<sup>1\*</sup>, Yijun Sun<sup>1</sup>, Pengfei Ren<sup>1</sup>, Chao Meng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong

<sup>2</sup>Linyi Zhengxin Engineering Survey and Design Co. Ltd., Linyi Shandong

Email: \*tanboxue@sdut.edu.cn, liuhuiniutou@163.com

Received: Sep. 5<sup>th</sup>, 2016; accepted: Oct. 7<sup>th</sup>, 2016; published: Oct. 10<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

After analyzing the propagation characteristics of the traveling wave after the failure of the submarine cable-overhead line hybrid line, a fault location method through traveling wave for the hybrid transmission line is proposed. First, the original B type hybrid transmission line is decomposed into two hybrid transmission lines of type A. Then the time difference between the two monitoring device located in the endpoints of each A type hybrid line is used to make a preliminary judgment of the fault section. Finally an accurate fault location result is made according to the principle of single-end method. This method eliminates the difficult problem of the identification of the second wave heads in the single-end fault location method, and it also eliminates the influence of the out-sync of time and the influence of the line length which is given of the two double-end fault location method. PSCAD simulation experiments show that the presented the Fault Location Method through Traveling Wave for the Submarine Cable-Overhead Line Hybrid Line is reliable, and the accuracy of fault location has been effectively improved.

## Keywords

Submarine Cable, Overhead Line, Hybrid Transmission Line, Fault Location, PSCAD

---

\*通讯作者。

# 海底电缆 - 架空线B型混合线路行波故障测距新方法

刘 辉<sup>1</sup>, 谭博学<sup>1\*</sup>, 孙懿君<sup>1</sup>, 任鹏飞<sup>1</sup>, 孟 超<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博

<sup>2</sup>临沂正信工程勘察设计有限公司, 山东 临沂

Email: \*tanboxue@sdut.edu.cn, liuhuiniutou@163.com

收稿日期: 2016年9月5日; 录用日期: 2016年10月7日; 发布日期: 2016年10月10日

## 摘 要

分析了海底电缆 - 架空线混合线路发生故障以后行波的传播特性, 并提出了一种针对海底电缆 - 架空线 B 型混合输电线路的行波测距方法。首先把原有的 B 型三段混合输电线路分解组合成两段 A 型混合输电线路, 先利用每段 A 型混合线路两端监测装置监测到的故障初始行波浪涌到达监测点的时间差与整定时间进行比较, 对故障区段初步判断, 依据监测点接收行波的时间再根据单端原理得出准确的测距结果。此方法不但可以消除单端测距方法故障区段判别中对第二个波头性质的识别的难题, 并且可消除双端测距方法计算故障距离时两端间不能精确同步和线路长度对测距结果的影响。PSCAD 仿真实验表明, 本文所提出的关于海底电缆 - 架空线混合输电线路故障行波测距方法是可靠的, 且测距精度得到了有效提高。

## 关键词

海底电缆, 架空线, 混合输电线路, 故障测距, PSCAD

## 1. 引言

随着现代社会的快速发展、经济持续增长与工业的迅猛发展, 对电力需求的增长也在持续走高, 这对电力供应是严峻的挑战。同时, 随着对海洋资源的开发, 向海上钻井平台供电、跨海峡的区域电网互联和各国电网跨海域互联技术等区别于一般输电工程的出现, 使得海底电缆 - 架空线混合输电线路而到了快速发展。因此, 当海底电缆 - 架空线混合输电线路发生故障时, 由于海底电缆的特殊性, 对障点快速、准确的定位对于提高供电可靠性的和减少经济损失有着重要的现实意义[1]。

架空线 - 电缆混合输电线路就结构组成来看, 包含 A 型混合输电线路和 B 型混合输电线路。A 型混合输电线路是由一段架空线和一段电缆线路组成的, 而 B 型混合输电线路则是由两边的两段架空线路和中间的电缆线路组成, 由于结构的复杂性, 所以对 B 型混合输电线路故障点的准确定位就显得尤为重要。阻抗测距法和行波测距法是目前对于输电线路的主要的测距方法, 其中, 阻抗法受故障电阻、电源阻抗、线路不对称(换位)的影响; 而行波法不但受上述因素的影响, 且与阻抗法相比行波法投资少, 可靠性高, 测距准确等优点, 行波测距是目前公认的电力线路测距最为精确、适用范围最广的一种故障测距方法[1]-[8]。而对于故障行波测距方法, 目前为止, 国内外专家学者已经提出了多种对于普通 A 型混合输电线路故障测距方法[9]-[14], 并且在工程应用中已经得到成功应用, 如已经成功应用到行波测距装置中的双端行波原理的架空线 - 电缆混合线路故障测距方法[9]。文献[9]采用的是双端行波

原理的架空线-电缆混合线路故障测距方法,但是因为采用的是双端测距法,测距精度会受到线路长度和线路两端监测装置不能精确同步的影响。文献[10]采用的是双端行波的到达时间中点的逐段搜索算法,但需要先确定线路的时间中点,而且混合输电线路架空线与电缆线路的参数有较大差异,此方法最终确定的是故障点的空间距离,测距精度有待进一步提高。文献[11]提出的是波速度归一算法,通过输电线路长度的折算,将架空线和电缆上的两种不同波速度折算为架空线的波速度或是电缆的波速度,将混合输电线路等效为单一线路进行测距,它采用的是双端测距原理,同样存在受到线路长度以及两端时间不能精确同步的问题。

上述几种测距方法主要是针对A型混合输电线路的测距方法,但工程中跨海峡输电线路多为B型混合输电线路,所以对海底电缆-架空线混合输电线路故障测距的研究很有现实意义。本文提出的一种基于海底电缆-架空线B型混合输电线路故障行波测距方法,在线路的端点M、N处和线缆连接点P、Q处分别装设故障行波监测装置,采用区段组合的形式。把原有的B型混合线路分解成两段A型混合线路,先对故障进行故障区段的判定,再根据单端测距原理计算出准确的行波测距结果。

## 2. 基于海底电缆-架空线混合线路行波测距方法

海底电缆-架空线混合输电线路某一点发生故障时,故障行波的折返射特性如图1所示,MP为架空线输电线路、PQ为海底电缆输电线路、QN为架空线输电线路,P、Q分别为架空线与海底电缆的连接点,如图A、B、C分别为MP、PQ、QN段线路的中点,F为故障点。架空线MP段线路长度为 $L_{O1}$ ,海底电缆PQ段线路长度为 $L_C$ ,架空线QN段线路长度为 $L_{O2}$ , $t_M$ 、 $t_P$ 、 $t_Q$ 和 $t_N$ 分别为发生故障后故障行波浪涌到达混合线路四个线路故障监测点M、P、Q和N点的绝对时刻,当混合线路发生故障后,各监测端接收到的第*i*个故障行波波头的时刻分别记为 $t_{Mi}$ 、 $t_{Pi}$ 、 $t_{Qi}$ 和 $t_{Ni}$ 。

## 3. 故障区段的判定及其故障测距结果的计算

本方法采用区段组合的形式,把原有的B型混合线路分解成两段A型混合线路,即架空线MP段与海底电缆PQ段组合,海底电缆PQ段与架空线QN段组合。先对故障进行故障区段的判定,判断出故障在那个区段,再根据该线路两 endpoint 接收到故障行波的时间差判断出故障点是在本段线路的中点前或是中点后,以选择出适合的测距方法。

设整定值 $\Delta T_1 = \frac{L_{O1}}{V_o} - \frac{L_C}{V_C}$ ,  $\Delta T_2 = \frac{L_C}{V_C} - \frac{L_{O2}}{V_o}$ ,式中 $V_o$ 、 $V_C$ 分别表示故障行波在架空线及海底电缆中的传播速度。令 $\Delta t_1 = t_{M1} - t_{Q1}$ ,  $\Delta t_2 = t_{P1} - t_{N1}$ ,具体的判别方法如下:

1) 当 $\Delta t_1 < \Delta T_1$ ,则可判断故障点在架空线MP段,此时进一步计算 $t_{M1} - t_{P1}$ :

①若 $t_{M1} - t_{P1} < 0$ ,则可判断故障点在MA段,而且线路M端接收到的第二个故障行波信号为故障点反射波,则根据单端测距原理得到故障点F到母线端M侧的距离: $L = \frac{1}{2} \times V_o (t_{M2} - t_{M1})$ ;

②若 $t_{M1} - t_{P1} = 0$ ,则可判断故障点在MP段架空线路的中点A处,所以故障点到M端的距离为 $L = \frac{1}{2} L_{O1}$ ;

③若 $t_{M1} - t_{P1} > 0$ ,则可判断故障点在AP段,而且线路M端接收到的第二个故障行波信号为线缆连接点P的反射波,则根据单端测距原理得到故障点F到母线端M侧的距离: $L = L_{O1} - \frac{1}{2} \times V_o (t_{M2} - t_{M1})$ 。

2) 当 $\Delta t_1 = \Delta T_1$ ,则故障点在连接点P处,所以故障点到M端的距离为 $L = L_{O1}$ ;

3) 当 $\Delta t_1 > \Delta T_1$ ,而且 $\Delta t_2 < \Delta T_2$ ,则故障点在架空线PQ段,此时则进一步计算 $t_{M1} - t_{Q1}$ :

①若 $t_{P1} - t_{Q1} < 0$ ,则可判断故障点在PB段,而且线路M端接收到的第二个故障行波信号为故障点

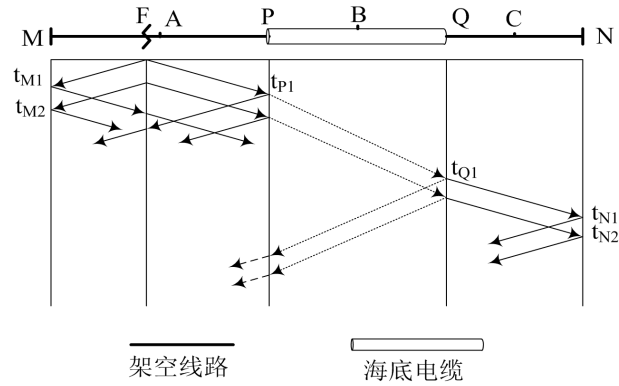


Figure 1. The sketch map of submarine cable-overhead Hybrid line fault traveling wave

图 1. 海底电缆 - 架空线混合线路故障行波传播示意图

反射波，则根据单端测距原理得到故障点 F 到母线端 M 侧的距离： $L = L_{O1} + \frac{1}{2} \times V_C (t_{M2} - t_{M1})$ ；

②若  $t_{P1} - t_{Q1} = 0$ ，则可判断故障点在 PQ 段海底电缆线路的中点 B 处，所以故障点到 M 端的距离为：

$$L = L_{O1} + \frac{1}{2} L_C ;$$

③若  $t_{P1} - t_{Q1} > 0$ ，则可判断故障点在 BQ 段，而且线路 M 端接收到的第二个故障行波信号为线缆连接点 P 的反射波，则根据单端测距原理得到故障点 F 到母线端 M 侧的距离： $L = L_{O1} + L_C - \frac{1}{2} \times V_C (t_{M2} - t_{M1})$ 。

4) 当  $\Delta t_1 > \Delta T_1$ ，且  $\Delta t_2 = \Delta T_2$ ，则故障点在连接点 Q 处，所以故障点到 M 端的距离为  $L = L_{O1} + L_C$ ；

5) 当  $\Delta t_1 > \Delta T_1$ ，且  $\Delta t_2 > \Delta T_2$ ，则故障点在架空线 QN 段，此时则进一步计算  $t_{Q1} - t_{N1}$ ：

①若  $t_{Q1} - t_{N1} < 0$ ，则可判断故障点在 QC 段，而且线路 M 端接收到的第二个故障行波信号为故障点反射波，则根据单端测距原理得到故障点 F 到母线端 M 侧的距离： $L = L_{O1} + L_C + \frac{1}{2} \times V_O (t_{M2} - t_{M1})$ ；

②若  $t_{Q1} - t_{N1} = 0$ ，则可判断故障点在 QN 段架空线路的中点 C 处，所以故障点到 M 端的距离为：

$$L = L_{O1} + L_C + \frac{1}{2} L_{O2} ;$$

③若  $t_{Q1} - t_{N1} > 0$ ，则可判断故障点在 CN 段，而且线路 M 端接收到的第二个故障行波信号为线缆连接点 P 的反射波，则根据单端测距原理得到故障点 F 到母线端 M 侧的距离：

$$L = L_{O1} + L_C + L_{O2} - \frac{1}{2} \times V_O (t_{M2} - t_{M1}) 。$$

## 4. 仿真实验

### 4.1. 仿真模型的搭建及参数设置

本文选用的线路模型为海南联网工程的线缆混合输电线路，其主要参数有，电压等级为 500 kV，线路 M、N 端的系统电抗均设置为  $0.0314 \Omega$ ，混合线路的长度分别为广东湛江侧 124.411 km 的 500 kV 架空线路，中间是长度为 31.4 km 的海底电缆线路，海南福山站至林诗岛终端站架空线约为 13.468 km，海南联网工程是一条典型的海底电缆 - 架空线混合输电线路。本文选用的是 PSCAD 电磁暂态仿真软件，主要设置了四个故障点，分别为故障点 F1 距离线路首端 M 的距离为 30 km，故障点 F2 距离线路首端 M 的距离为 139.411 km，故障点 F3 距离线路首端 M 的距离为 155.811 km，故障点 F4 距离线路首端 M 的距离为 163.811 km。为了提高仿真精度，设置仿真频率为 10 MHz，搭建的仿真模型如图 2。

仿真模型中故障行波在海底电缆中的传播速度根据电缆的依频特性参数可求得为 189 km/ms，根据架空线的参数特征求得行波在架空线中的波速度为 300 km/ms。根据线路的参数可求得整定值  $\Delta T_1 = 248.6 \mu\text{s}$ ， $\Delta T_2 = 121.2 \mu\text{s}$ 。

### 4.2. 线路故障点的设置

故障点仿真：假设在  $t = 0$  时刻，在 F1 点发生 A 相接地短路故障。故障初始角设置为  $30^\circ$ ，海底电缆 - 架空线混合线路的四个监测点第一次接收到故障行波波形图如图 3 所示。

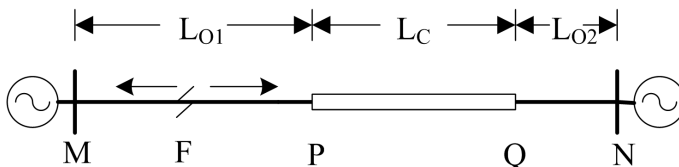


Figure 2. 500 kV Submarine cable-overhead line hybrid simulation model of transmission line

图 2. 500 kV 海底电缆 - 架空线混合输电线路仿真模型

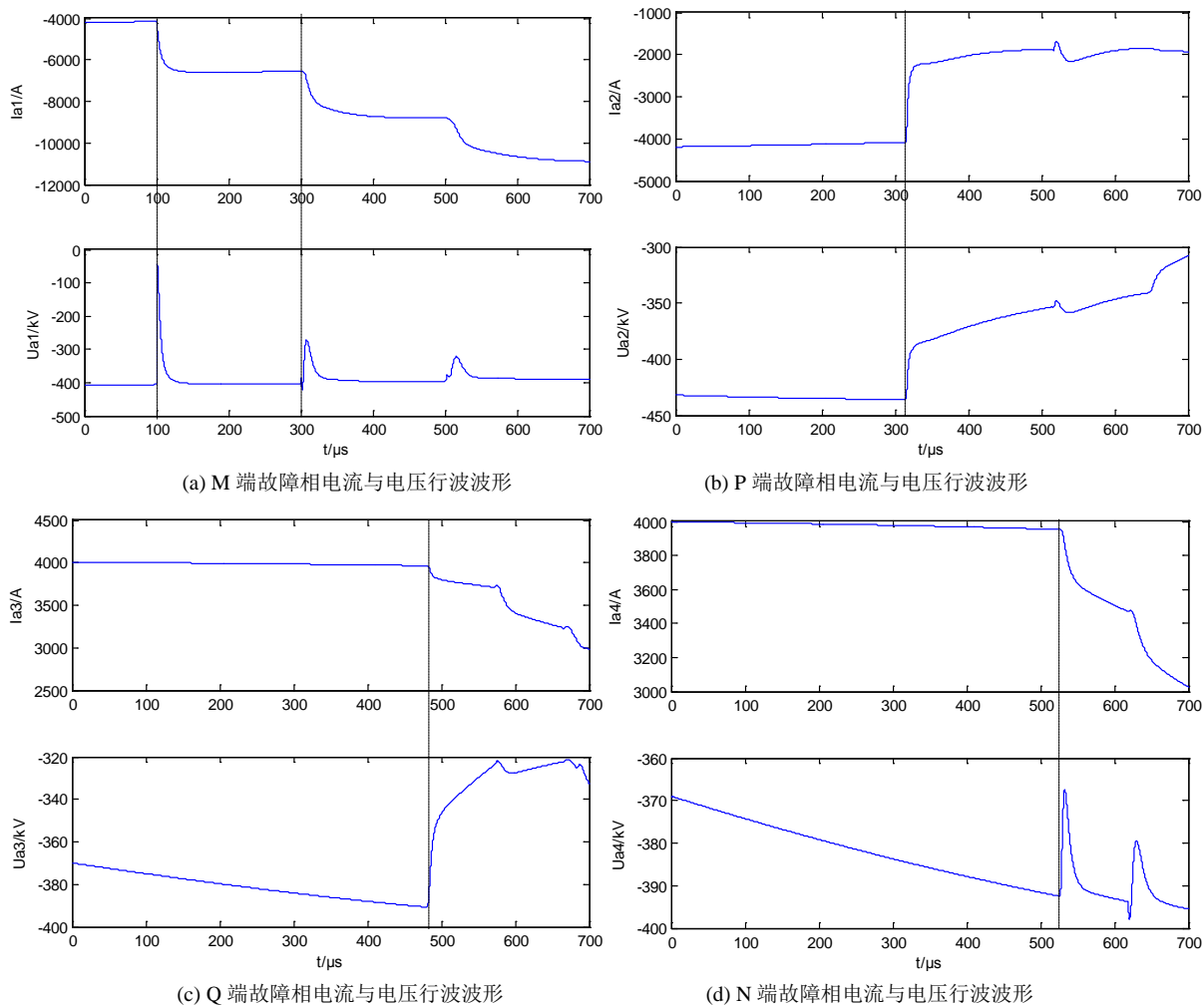


Figure 3. The current and voltage traveling wave line of each monitoring point when F1 points fault

图 3. F1 点故障时各监测点的电流和电压行波波形

**Table 1.** The PSCAD simulation results of 500 kV submarine cable-overhead hybrid line transmission lines ranging and comparison with other methods ranging**表 1.** 500 kV 海底电缆 - 架空线混合输电线路 PSCAD 仿真测距结果及与其他测距方法比较

序号	故障点距 M 端的实际距离 /km	故障区段	本文所提方法测距结果 /km	距离误差/m	波速度归一法测距结果 /km	测距误差/m	时间中点法测距结果 /km	测距误差/m
1	30	MA 段	30	0	29.99	10	30.105	105
2	90	MP 段	89.986	14	90.11	110	90.105	105
3	139.411	PB 段	139.427	16	139.373	38	139.370	41
4	160.811	QC 段	160.851	40	160.619	192	160.625	185

通过对各个监测点测得的故障行波暂态波形可知, M 端测得的故障行波浪涌第一次和第二次到达 M 端的时刻分别为  $t_{M1} = 100 \mu\text{s}$ ,  $t_{M2} = 300 \mu\text{s}$ ; P 端测得的故障行波浪涌第一次到达 P 端的时刻为  $t_{P1} = 314.8 \mu\text{s}$ ; Q 端测得的故障行波浪涌第一次到达 Q 端的时刻为  $t_{Q1} = 480.9 \mu\text{s}$ ; N 端测得的故障行波浪涌第一次到达 N 端的时刻为  $t_{N1} = 525.8 \mu\text{s}$ 。计算有  $\Delta t_1 = -380.9 \mu\text{s}$ ,  $\Delta t_2 = -211 \mu\text{s}$ 。因为  $\Delta t_1 < \Delta T_1$ , 所以可判断出故障点在混合线路的 MP 段, 又  $t_{M1} - t_{P1} = -214.8 \mu\text{s} < 0$ , 进一步判断出故障点在 MA 段, 得出故障点距离 M 端的距离为  $L = \frac{1}{2} \times V_0 (t_{M2} - t_{M1}) = 30 \text{ km}$ , 测距误差为 0m。同理, 计算得出故障点 F2、F3 和 F4 在不同的距离时的侧距结果, 如下表所示。

故障点 F2 距离线路首端 M 的距离为 139.411 km, 故障点 F3 距离线路首端 M 的距离为 137.411 km, 故障点 F4 距离线路首端 M 的距离为 163.811 km。

表 1 给出了海底电缆 - 架空线混合输电线路 6 个不同故障点, 用本文所述方法得到的故障测距结果及测距误差。

从表 1 的测距结果分析中可以得到, 在电压等级为 500 kV 的海底电缆 - 架空线混合输电线路中, 采用这种把原有的 B 型混合线路分解成两段 A 型混合线路的行波测距方法, 误差一般在 50 m 以内, 且测距误差明显小于传统的测距方法。由此可以得出本文所提出的海底电缆 - 架空线混合输电线路行波测距方法是准确可靠的, 对于故障点定位的精确度高于单独的双端测距原理。

## 5. 结语

本文根据故障行波在混合输电线路中的折、返射的传播特性, 提出了一种海底电缆 - 架空线混合输电线路故障行波测距的新方法, 主要通过 PSCAD 进行分析仿真, 能够迅速准确的对故障点位置进行确定, 并且消除了两端时间不能精确同步以及线路长度的影响。通过对不同故障点的仿真分析, 验证了此种方法提高了测距精度, 能可靠的确定故障点位置, 具有良好的应用价值。

## 参考文献 (References)

- [1] 梁凤强, 陈平, 徐林, 韩铭雪. 架空线 - 海底电缆混合线路组合行波测距方法[J]. 电力系统及其自动化, 2016(2).
- [2] 任玲, 等. 一种新的架空线 - 电力电缆混合线路故障定位方法研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(28): 7211-7215.
- [3] Chui, K.L. and Wang, J.Z. (1992) On Compactly Supported Spline Wavelets and a Duality Principle. *Transactions of the American Mathematical Society*, **330**, 903-915. <http://dx.doi.org/10.1090/S0002-9947-1992-1076613-3>
- [4] 江涛, 周文斌, 马光松. 架空 - 电缆混合线路故障点的定位方法[J]. 中国水运, 2012, 12(8): 80-81.
- [5] 耿伟超. 电缆 - 架空线混合线路故障行波测距方法的研究[D]. 华北电力大学, 2011.
- [6] 于玉泽, 覃剑, 李功新, 等. 电缆 - 架空线混合线路故障测距方法综述[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 64-69.

- [7] 吴承恩, 邵能灵, 郁惟铺, 等. 超高压电缆 - 架空线混合线路故障测寻方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 26-30.
- [8] 束洪春, 孙涛. 电缆 - 架空线混合线路故障行波测距新方法[J]. 电力自动化, 2008, 28(10): 1-7.
- [9] 黄震, 江泰廷, 张维锡, 吴生赞, 陈平, 徐丙垠. 基于双端行波原理的高压架空线 - 电缆混合线路故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2010(14).
- [10] 许文杰, 蒋道宇, 黄小卫, 李亚会, 李录照. 基于时间中点法的 500kV 海底电缆 - 架空线混合线路行波测距技术研究及仿真. 中国科技纵横, 2013(19).
- [11] 徐善琛, 张建文, 王刚, 童伟. 基于波速度归一方法的电缆架空线路双端行波测距研究[A]. 第十八届全国煤矿自动化学术年会中国煤炭学会自动化专业委员会学术会议论文集[C]. 2008.
- [12] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62-65.
- [13] 王奎鑫, 唐毅, 陈平, 等. 基于组合行波原理的高压架空线 - 电缆混合线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 90-94.
- [14] 薛永端, 李乐, 俞恩科, 等. 基于分段补偿原理的电缆 - 架空线混合线路双端行波故障测距算法[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1953-1958.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [sg@hanspub.org](mailto:sg@hanspub.org)