

文章编号: 1000-8241(2021)01-0039-05

# 短路故障下输电线路接地网对埋地管道的影响

王绍杰<sup>1</sup> 胡元潮<sup>1</sup> 赵文龙<sup>2</sup> 李勋<sup>3</sup> 井栋<sup>1</sup>

1. 山东理工大学电气与电子工程学院; 2. 空军研究院战略预警研究所; 3. 深圳供电局有限公司

**摘要:** 为了研究输电线路故障运行时,接地点短路电流对管道的电磁干扰程度,利用防雷接地分析软件 CDEGS 建立了输电线路杆塔接地网与埋地管道模型,计算分析了不同短路电流幅值、土壤电阻率、管道间距下管道冲击电压的变化规律。提出了两种新型管道防护措施:①通过改变#形和方框射线形接地网形状参数,计算分析了管道冲击电压的变化规律,其表明接地网形状对接地电阻影响很大,接地电阻越大,管道冲击电压越小;②沿管道敷设非金属屏蔽线(柔性石墨复合接地材料),对管道进行过电压防护,可以有效降低管道冲击电压,对管道起到保护作用。研究结果可为油气管道设计施工及安全防护提供参考。(图8,表2,参20)

**关键词:** 交流输电线路; 石墨复合接地网; CDEGS; 柔性石墨复合接地材料

中图分类号: TE83

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.01.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Effect of grounding grid of power transmission line on buried pipeline under short circuit fault

WANG Shaojie<sup>1</sup>, HU Yuanchao<sup>1</sup>, ZHAO Wenlong<sup>2</sup>, LI Xun<sup>3</sup>, JING Dong<sup>1</sup>

1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology;

2. Institute of Strategic Early Warning, Air Force Research Institute of PLA; 3. Shenzhen Power Supply Co. Ltd.

**Abstract:** In order to study the electromagnetic interference of the short-circuit current of grounding point when power transmission line is in fault operation, a model for grounding grid of transmission line towers and buried pipelines was established with the lightning protection and grounding analysis software CDEGS. In the model, the variation rules of pipeline surge voltage were analyzed at different short-circuit current, soil resistivity and pipeline spacing. Two new protective measures for pipelines were proposed. ① The variation rules of pipeline surge voltage were calculated and analyzed by changing shape parameters of grounding grid with shapes of # and square ray. The shape of grounding grid has great influence on grounding resistance, i.e., the bigger the grounding resistance, the smaller the surge voltage. ② Non-metallic shielded wire (flexible graphite composite grounding material) was buried along pipelines to protect pipelines with over voltage. The results show that non-metallic shielded wire could effectively reduce the surge voltage and protect pipelines. The research results could provide reference for design, construction and safety protection of oil and gas pipelines. (8 Figures, 2 Tables, 20 References)

**Key words:** AC transmission line, graphite composite grounding grid, CDEGS, flexible graphite composite grounding material

随着国民经济的不断发展,电力、燃油、天然气等能源需求日益增长,国家战略能源通道建设也在飞速发展<sup>[1]</sup>。由于中国资源分布不均匀、地形复杂、建设用地紧张,电力设施与管道设施在建设选址原则上十分相近,因此会不可避免地出现高压输电线路与埋地金属管道的“公共走廊”<sup>[2-4]</sup>,高压交流输电线路与管道间的电磁干扰问题日益突出<sup>[5-6]</sup>。

当交流输电线路发生接地故障时(其中单相接地

故障占70%)<sup>[7-8]</sup>,故障电流一部分经架空地线回流,另一部分经杆塔接地装置流入大地<sup>[9-11]</sup>。由于故障电流幅值是正常相线电流的数倍,因此一部分故障电流会在其周围空间产生一个巨大的交变磁场,在管道上产生感应电压<sup>[12-13]</sup>;另一部分故障电流经杆塔接地装置流入大地,在土壤中向无穷远处扩散,使附近地电位抬高,对管道产生阻性耦合干扰<sup>[14-16]</sup>。两者共同作用造成了管道附近区域管地电位的变化,在管道涂层两

侧产生电位差,当电位差超过涂层冲击电压时,会击穿涂层,加速管道腐蚀,严重时会引起管道爆炸<sup>[17-19]</sup>。

以下通过电力系统防雷接地仿真计算软件CDEGS,计算输电线路发生单相接地故障时邻近管道在不同条件下产生的冲击电压。通过改变接地装置参数、敷设柔性石墨复合接地材料<sup>[20]</sup>,研究交流输电线路对管道干扰的缓解效果。

## 1 模型设置

### 1.1 输电线路模型

以500 kV高压单回交流输电线路单相接地发生短路故障为例,正常相运行电流取1.5 kA,线路与管道平行长度5 km,线路档距400 m,短路故障点位于A相中点位置,单相短路电流15 kA。图1为500 kV交流输电线路A、B、C三相电流及短路点两侧线路电流分布图,图2为高压输电线路杆塔结构示意图。

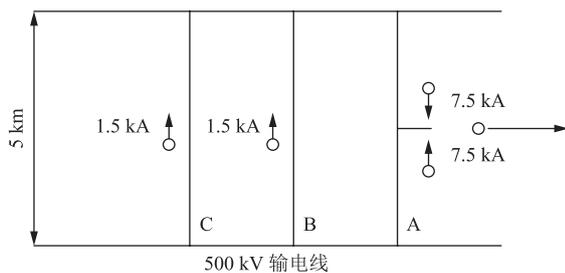


图1 500 kV 交流输电线路短路故障电流分布示意图

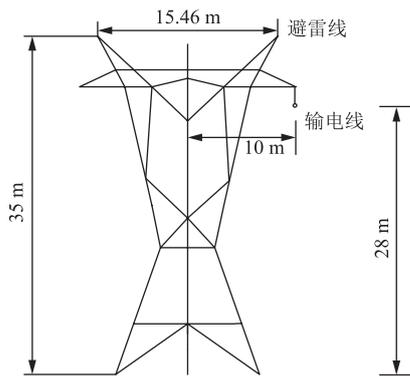


图2 高压输电线路杆塔结构示意图

### 1.2 管道及接地网模型

选取中国典型油气管道作为管道参数(表1)。输

表1 中国典型油气管道参数

外径/mm	壁厚/mm	埋深/m	防腐层厚度/mm
1 016	14.6	2	3
防腐层电阻系数/ ( $\Omega \cdot m$ )	相对电阻率 (相对于铜)	相对磁导率 (相对于真空)	
$1 \times 10^{13}$	10	300	

电线路杆塔接地网分别取常见的#形接地网(图3,  $D^{\#}$ 为#形接地网与油气管道间距,  $L_r^{\#}$ 为#形接地网方框长度,  $L_s^{\#}$ 为#形接地网射线长度)和方框射线形接地网(图4,  $D_f$ 为方框射线形接地网与油气管道间距,  $L_f$ 为方框射线形接地网方框长度,  $L_s$ 为方框射线形接地网射线长度,模型中射线与方框边缘成 $45^\circ$ 向外延伸),接地网采用直径28 mm的柔性石墨复合材料,其埋深1 m,由4根垂直引下线与杆塔连接。

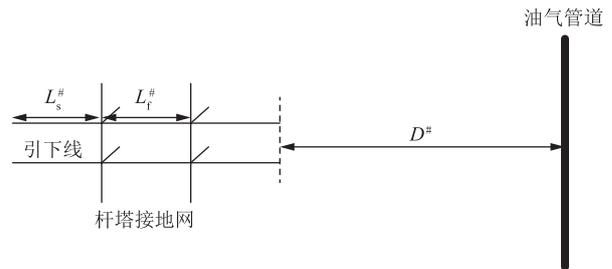


图3 #形接地网与管道间距示意图

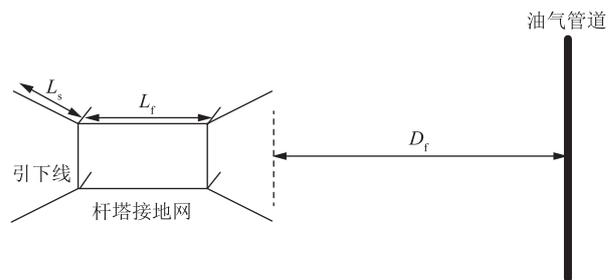


图4 方框射线形接地网与管道间距示意图

## 2 仿真与计算

采用#形接地网仿真模型进行计算,接地网方框长度 $L_r^{\#}=12$  m,接地网射线长度 $L_s^{\#}=10$  m,杆塔接地网与管道间距 $D^{\#}=50$  m,管道参数取表1数据。

### 2.1 土壤电阻率的影响

假定其他条件相同,求得土壤电阻率分别为 $300 \Omega \cdot m$ 、 $500 \Omega \cdot m$ 、 $1\ 000 \Omega \cdot m$ 时管道涂层的冲击电压(图5)。管道涂层冲击电压随着土壤电阻率的增

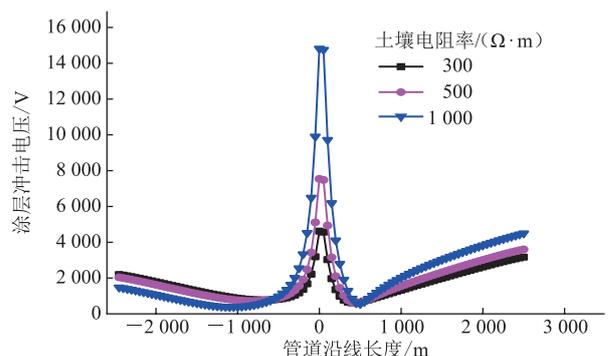


图5 不同土壤电阻率下管道涂层的冲击电压变化曲线

大而显著增大。这是由于故障电流在土壤中产生的磁场镜像位置随土壤电阻率的增大而加深,镜像电流产生的磁场对相电流产生的磁场的抵消作用减小,两者共同作用产生的综合磁场增大。同时,土壤电阻率越高,故障电流在土壤中散流的阻碍越大,电流在土壤中产生的电位梯度越大。相对而言,管道防腐层冲击电压增大。因此,在实际工程中,土壤电阻率较小的地区管道所受冲击电压的影响也相应减小。

### 2.2 输电线路与管道间距的影响

将输电线路与管道并行区域土壤电阻率设置为  $800 \Omega \cdot m$ ,求得输电线路与管道间距分别为 100 m、200 m、500 m 时管道涂层的冲击电压(图 6)。可见,当输电线路发生单相短路故障时,涂层冲击电压随着间距的增大而显著降低。因此,设计输电线路和埋地管道时,应当适当增大电力线路与管道的间距,可有效减小输电线路与管道间的电磁干扰。

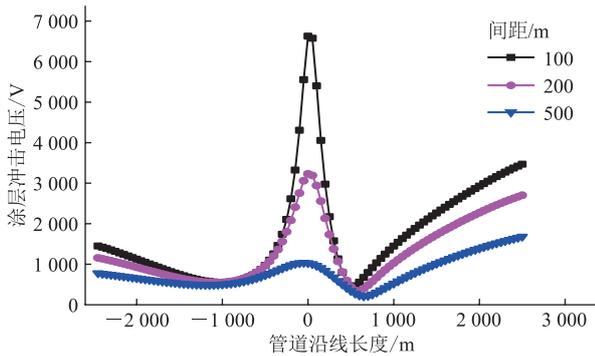


图 6 不同间距下管道涂层的冲击电压变化曲线

### 2.3 输电线路短路电流的影响

在 CDEGS 软件中设置土壤电阻率为  $500 \Omega \cdot m$ 、输电线路与管道间距为 100 m,求得短路电流分别为 9 kA、12 kA、15 kA 时管道涂层的冲击电压(图 7)。可见,涂层冲击电压随着短路电流的增大而显著增大。这是由于随着短路电流幅值的增大,其周围磁场强度增强,该磁场使邻近管道的感应电压增大,短路入地

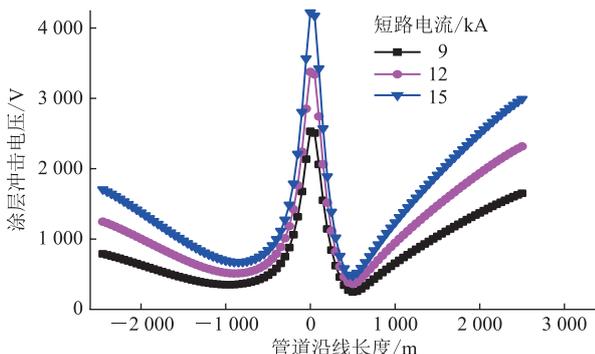


图 7 不同短路电流下管道涂层的冲击电压曲线

电流增大,阻性耦合作用增强,在管道上产生一定电位升,两者共同作用造成管道涂层冲击电压增大。

## 3 管道防护措施

目前,中国常采用改变杆塔接地电阻、沿管道敷设缓解线等方式来减少输电线路对管道的干扰。

### 3.1 不同外延射线长度对管道的电磁干扰

利用 CDEGS 软件,按照图 3 和图 4 建立仿真模型,土壤电阻率取  $300 \Omega \cdot m$ ,其他参数保持不变。表 2 列出了 # 形和方框射线形接地网不同外延射线长度对管道的故障干扰。为了对比相同间距条件下,两种类型接地网对管道的电磁干扰程度,方框射线形接地网射线长度取 # 形接地网射线长度的  $\sqrt{2}$  倍。

表 2 两种接地网不同外延射线长度下的涂层冲击电压

接地网类型	接地网方框长度/m	接地网射线长度/m	接地电阻/ $\Omega$	涂层冲击电压/V
# 形	12	10.00	6.611 231	4 617.061
	12	15.00	5.381 804	4 637.270
	12	20.00	4.569 394	4 664.349
方框射线形	12	14.14	6.795 612	4 627.026
	12	21.21	5.560 304	4 655.569
	12	28.28	4.730 879	4 700.430

随着接地网射线的增长,接地电阻随之减小,涂层冲击电压逐渐增大。这是由于经过接地网入地的故障电流随接地电阻的减小而增加,导致经由地线回流的电流减少,地线对相线的屏蔽效应减弱,增强了故障相中电流对管道的感性耦合作用。同时,由于经接地网的入地电流增加,输电线路对管道的阻性耦合作用增强。

### 3.2 敷设柔性石墨复合接地材料

目前,对管道强电防护的措施很多,国内外最常采用的方法是在输电线路与管道之间沿管道内侧敷设缓解线。考虑成本与腐蚀问题,常常采用柔性石墨复合接地材料作为缓解线代替裸铜线。采用方框射线形接地网仿真模型,射线长度 14.14 m,与管道间距 10 m,缓解线敷设在管道内侧 1 m 处。对于不同条件下的管道并行区域,缓解线长度应存在理论最佳值,可根据公式(1)进行估算:

$$L \ln \left( \frac{4r^2}{td_p} \right) = 2r \ln \left( \frac{L^2}{td_m} \right) \quad (1)$$

式中: $L$  为缓解线长度,m; $r$  为管道与输电线路间距,m; $t$  为管道埋深,m; $d_p$  为管道直径,m; $d_m$  为缓解线直径,m。

根据式(1)计算得到缓解线最佳长度为42 m。由管道敷设缓解线前后管道涂层冲击电压分布对比结果(图8)可见:当输电线路与管道间距较小时,敷设柔性石墨复合接地材料前后,管道涂层冲击电压由16 kV降至10 kV。这是由于柔性石墨复合接地材料具有良好的接地效果,管道相当于小电阻接地。当输电线路发生故障时,故障电流经接地网入地,地电位迅速升高,当石墨复合接地材料与管道连接后,部分故障电流经缓解线进入管道的阻抗减小,流经石墨复合接地材料进入管道的故障电流增多,经过大地回路的故障电流减小。这提高了管道电位,降低了管道表面地电位,管道涂层电位差减小,涂层冲击电压随之降低。可见,在管道内侧敷设石墨复合接地材料能够对管道起到防护作用。

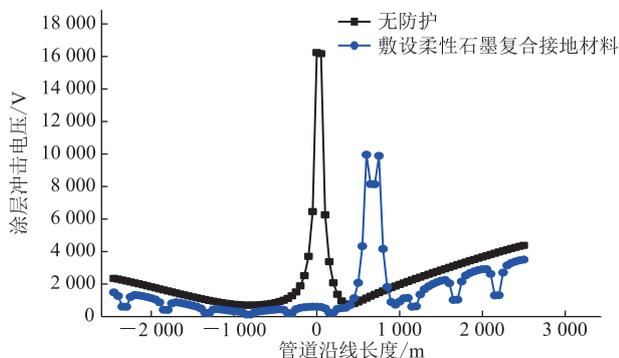


图8 敷设柔性石墨复合接地材料前后管道涂层冲击电压分布情况

## 4 结论

(1)管道涂层冲击电压随着土壤电阻率的增大而显著增大,因此在实际工程中,应尽量选择土壤电阻率小的地区敷设管道。

(2)管道涂层冲击电压随着管道与输电线路间距的增大而减小,在输电线路与埋地管道施工设计时,应适当加大电力线路与管道的间距。

(3)管道涂层冲击电压随着短路电流的增大而增大。

(4)两种类型接地网增加射线长度均可降低接地电阻,管道涂层冲击电压随着接地电阻的增大而减小,但考虑到防雷要求,不应大范围增大杆塔接地电阻。

(5)采用柔性石墨复合接地材料代替裸铜线,有效降低了管道涂层冲击电压,能够对管道起到防护作用,可为输电线路附近管道的过电压防护提供参考。

### 参考文献:

[1] 郭剑,曹玉杰,胡士信,陆家榆. 交流输电线路对输油输气管道

电磁影响的限值[J]. 电网技术,2008,32(2):17-20.

GUO J, CAO Y J, HU S X, LU J Y. Limit values of electromagnetic influence of adjacent AC transmission lines on oil/gas pipelines[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 17-20.

[2] 王帅华. 高压输电线路对埋地管道耦合干扰规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东),2009:22-25.

WANG S H. High-voltage transmission lines on buried pipelines coupling disturbance study[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009: 22-25.

[3] 王爱玲. 750 kV 高压交流输电线路对埋地管道的干扰规律研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东),2013:33-35.

WANG A L. 750 kV high-voltage AC transmission lines on buried pipelines disturbance study[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2013: 33-35.

[4] 蒋俊. 交流线路正常运行时对平行敷设油气管道的电磁影响[J]. 电网技术,2008,32(2):78-80,92.

JIANG J. Electromagnetic influence of normally operating AC power transmission line on gas/oil pipeline parallel to transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 78-80, 92.

[5] 祝贺,胡艺阳. 高压输电线路对管道稳态电磁干扰的仿真研究[J]. 电力学报,2017,37(3):83-89.

ZHU H, HU Y Y. Simulation and research on steady state electromagnetic interference on pipelines caused by high voltage transmission lines[J]. Journal of Electric Power, 2017, 37(3): 83-89.

[6] 谢辉春,宋晓兵. 交流输电线路对埋地金属管道稳态干扰的影响规律[J]. 电网与清洁能源,2010,26(5):22-26.

XIE H C, SONG X B. Influences of steady interference on buried metallic pipelines due to AC transmission lines[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(5): 22-26.

[7] 蒋俊,郭剑,陆家榆. 交流输电线路单相接地故障对输油输气管道的电磁影响与线路参数的关系[J]. 电网技术,2010,34(6):10-13.

JIANG J, GUO J, LU J Y. Relation between transmission line parameters and electromagnetic impact on petroleum/gas pipelines due to single-phase earth fault in AC transmission line[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 10-13.

[8] 周国雨. 新建交流输电线路对埋地金属管道电磁影响研究[D]. 北京: 华北电力大学,2017:40-42.

ZHOU G Y. Research on electromagnetic effect of new-built AC transmission lines on petroleum & gas pipelines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 40-42.

[9] 关添升. 交流输电线路短路故障时对输油输气管道的电磁影响

- 研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012: 35-37.
- GUAN T S. Electromagnetic influence of the AC transmission lines of grounding fault to the buried metal pipeline[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012: 35-37.
- [10] 王沛. 高压交流输电线路对穿越下方油气管道的电磁影响及防护措施研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2017: 43-46.
- WANG P. Research on electromagnetic influence and protective measures of high voltage AC transmission lines on crossing gas/oil pipelines[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017: 43-46.
- [11] 唐剑. 电力线路对邻近并行埋地金属管道电磁干扰影响的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2004: 8-11.
- TANG J. Research of electromagnetic interference from power lines to a nearby underground metallic pipeline[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2004: 8-11.
- [12] 董根生, 蒋剑, 相生荣, 孙海峰. 750 kV 交流线路对多条油气管道的电磁影响研究[J]. 中国电业(技术版), 2015(10): 16-22.
- DONG G S, JIANG J, XIANG S R, SUN H F. Study on electromagnetic influence of 750 kV AC power transmission lines on gas/oil pipelines[J]. China Electric Power (Technology Edition), 2015(10): 16-22.
- [13] 李勋, 张宏钊, 张欣, 刘顺桂, 姚森敬. 高压交流输电线路对埋地金属油气管道的电磁干扰腐蚀及其防护措施[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2017, 31(4): 65-70.
- LI X, ZHANG H Z, ZHANG X, LIU S G, YAO S J. Electromagnetic interference and corrosion on the buried metal oil and gas pipelines caused by the high voltage AC transmission lines and protection measures[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 31(4): 65-70.
- [14] 李勋, 黄荣辉, 伍国兴, 余骏阳, 王有元. 输电杆塔雷击接地模型对附近管道运行安全影响研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 25-30, 49.
- LI X, HUANG R H, WU G X, YU J Y, WANG Y Y. Research of lightning grounding model of transmission tower and its influence on safety operation of nearby pipeline[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 25-30, 49.
- [15] 孟晓波, 廖永力, 李锐海, 樊灵孟, 陈鹏, 曾嵘, 等. 金属管道受入地电流影响的抑制措施研究[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 62-67.
- MENG X B, LIAO Y L, LI R H, FAN L M, CHEN P, ZENG R, et al. Research on repressive measures of the influence of the ground return current on the metallic pipeline[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 62-67.
- [16] 章建栋. 埋地长输管道静态特性对交流稳态干扰的影响规律[J]. 中小企业管理与科技, 2017(7): 159-161.
- ZHANG J D. The influence rule of static characteristics of buried long pipeline on AC steady state interference[J]. Management & Technology of SME, 2017 (7): 159-161.
- [17] 黄河, 孔静, 王亚运, 任洁, 项佳宇, 孙海峰, 等.  $\pm 500$  kV 直流输电线路对埋地油气管道的电磁影响仿真计算[J]. 绝缘材料, 2015(8): 67-72.
- HUANG H, KONG J, WANG Y Y, REN J, XU J Y, SUN H F, et al. Simulation study of electromagnetic effects on underground oil/gas pipeline due to  $\pm 500$  kV DC transmission line[J]. Insulating Materials, 2015 (8): 67-72.
- [18] 邹军, 袁建生, 周宇坤, 马信山. 地下通信电缆外套金属管道与附近铺设屏蔽线屏蔽效果的比较[J]. 电网技术, 2000, 24(4): 16-18, 22.
- ZOU J, YUAN J S, ZHOU Y K, MA X S. Pipeline to its internal communication cables and metallic mitigation line to its nearby underground communication cables[J]. Power System Technology, 2000, 24(4): 16-18, 22.
- [19] 张四清, 谢辉春, 刘学, 孙魁. 交流输电线路对管道路由选择的影响及对策[J]. 江汉石油职工大学学报, 2015, 28(4): 58-61.
- ZHANG S Q, XIE H C, LIU X, SUN K. Solutions to the impact of alternating current transmission line on pipeline route selection[J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2015, 28(4): 58-61.
- [20] 胡元潮, 阮江军, 龚若涵, 刘振武, 吴泳聪, 文武. 柔性石墨复合接地材料及其在输电线路杆塔接地网中的应用[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2851-2857.
- HU Y C, RUAN J J, GONG R H, LIU Z W, WU Y C, WEN W. Flexible graphite composite electrical grounding material and its application in tower grounding grid of power transmission system[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2851-2857.
- (收稿日期: 2018-11-06; 修回日期: 2020-11-19; 编辑: 杜娟)
- 基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“空气间隙冲击火花放电路径动态特性研究”, 51807113。
- 作者简介:** 王绍杰, 男, 1994 年生, 助理工程师, 2020 年硕士毕业于山东理工大学电气工程专业, 现主要从事电力系统过电压、输电线路防雷与接地方向的研究工作。地址: 山东省淄博市张店区新村西路 266 号山东理工大学西校区, 255000。电话: 17852035005。Email: 597823531@qq.com