

# 超特高压交流紧凑型输电线路带电作业试验分析

彭勇,肖宾,雷兴列,刘凯,刘庭,吴田,苏梓铭,唐盼  
(中国电力科学研究院,湖北武汉 430074)

**摘要:**为保障超、特高压交流紧凑型输电线路带电作业安全、有效的开展,通过布置典型带电作业工况并进行操作冲击放电试验,对比分析了500 kV、750 kV和1 000 kV交流紧凑型线路带电作业间隙放电特性;分析了多种作业人员进入超、特高压交流紧凑型输电线路等电位的作业方式,通过试验提出采用塔上吊篮法为最优化进出等电位作业方式;研制了超、特高压交流紧凑型输电线路带电作业用保护间隙装置,推荐了相应电压等级线路的带电作业用保护间隙技术参数,并经试验验证保护间隙的安全可靠性。研究成果可为超、特高压交流紧凑型输电线路运行维护提供参考依据。

**关键词:**超、特高压输电线路;紧凑型;操作冲击放电特性;保护间隙

**Abstract:** In order to guarantee the safety and effectiveness of live-line working on EHV/UHV compact transmission line, the typical live-line working conditions of actual operation are arranged, and the gap discharge characteristics during live-line working on 500 kV, 750 kV and 1 000 kV AC compact transmission lines are compared and analyzed. Several methods of entering into equipotential area on EHV/UHV AC compact transmission line are discussed, and the optimal way of entering into/getting out equipotential area is proposed that is the basket method. In addition, the protective gap device is developed for live-line working on EHV/UHV AC compact transmission line, the technical parameters of the corresponding voltage level are recommended, and the reliability of the designed protective gap device is verified through the test. The research results can provide a reference for the operation and maintenance of EHV/UHV AC compact transmission lines.

**Key words:** EHV/UHV transmission line; compact line; switching impulsive discharge characteristic; protective gap

中图分类号: TM723 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-33-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.008

## 0 引言

带电作业是保障输电线路安全稳定运行的重要手段。中国超、特高压输电工程已广泛建设,在输电走廊紧张的地区,架设紧凑型的超、特高压输电线路成为一种优选方案,同时对带电作业工作提出了新的挑战。

超、特高压交流紧凑型输电线路与常规的单回或者双回超、特高压输电线路有较大区别,其三相导线紧凑布置在同一塔窗内;且相间无接地构件,塔窗内空气间隙较小,给线路带电检修工作造成一定的困难,因此有必要对超、特高压交流输电线路带电作业展开相应的研究,为中国超、特高压交流紧凑型输电线路的运行维护工作提供技术支持。

针对交流500 kV、750 kV及1 000 kV 3个电压等级的紧凑型输电线路,主要的研究内容包括:1)

结合超、特高压交流紧凑型线路带电作业典型工况,试验研究并对比分析不同电压等级紧凑型线路带电作业间隙操作冲击放电特性;2)分析多种进入超、特高压交流紧凑型输电线路等电位方法,并通过试验确定最优化作业方式;3)对超、特高压紧凑型线路带电作业用保护间隙展开研究,获取带电作业用保护间隙技术参数。

## 1 带电作业间隙操作冲击放电特性研究

### 1.1 试验方法

根据实际运行或规划设计的超、特高压紧凑型交流输电工程,结合导线参数、杆塔型式、绝缘子串型等准备试品开展带电作业操作冲击放电试验。相地试验中采用波前时间为250  $\mu\text{s}$ 的操作冲击波进行放电试验,相间操作冲击放电电压试验时,在构成放电间隙的两相分别施加+250/2 500  $\mu\text{s}$

波形操作波和 -250/2 500 μs 波形操作波, 波形系数  $\alpha = 0.33^{[1-6]}$ 。

IEC 60071-2-1996 推荐的空气间隙缓波前过电压绝缘特性由式(1)、式(2)给出。

$$U_{50} = KU_{50Rp} \quad (1)$$

$$U_{50Rp} = 500d^{0.6} \quad (2)$$

式中:  $U_{50}$  为间隙的操作冲击 50% 放电电压;  $d$  为空气间隙距离;  $K$  为间隙系数;  $U_{50Rp}$  为相应电压波形及间隙距离下棒-板间隙操作冲击 50% 放电电压。由式(1)、式(2)可确定不同空气间隙下的放电间隙系数。

根据 GB/T 16927.1-2011 《高电压试验技术》的试验方法 在本试验中采用升降法求取空气间隙操作冲击 50% 放电电压 操作冲击加压 40 次, 试验结果依据标准进行气象修正。每次试验前后对温度、湿度和气压 3 个参数进行测量 取各参数的平均值作为本试验数据的气象条件。

### 1.2 试验布置

1 000 kV 特高压紧凑型线路目前没有实际工程 根据前期研究成果, 考虑采用  $10 \times 500 \text{ mm}^2$  导线, 分裂间距取 400 mm; 750 kV 电压等级参考西北电网 750 kV 紧凑型线路设计参数, 考虑采用  $8 \times 400 \text{ mm}^2$  导线, 分裂间距取 400 mm; 500 kV 电压等级以河南辛汭线 500 kV 紧凑型线路为例, 采用  $6 \times 240 \text{ mm}^2$  导线, 分裂间距取 375 mm。试验中模拟导线采用不锈钢管加工成硬质导线, 分别模拟 6 分裂、8 分裂、10 分裂导线, 长度为 20 m。根据不同塔窗设计参数, 采用 1:1 模拟真型塔窗。试验用模拟人由铝合金制成。

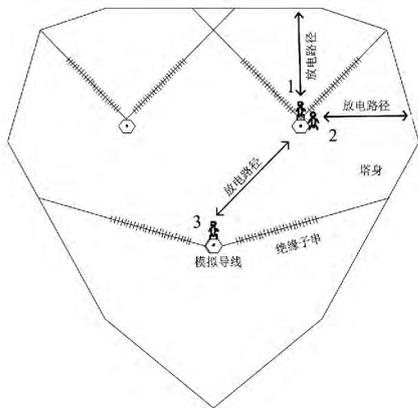


图1 等电位工况试验布置示意图

根据国内外大量带电作业研究经验, 超、特高压输电线路带电作业典型作业工况中, 等电位作业工况的间隙放电电压比地电位工况小<sup>[7-8]</sup>。从严考

虑, 重点比较各电压等级线路下典型等电位作业工况, 试验布置如图1所示。

图1中工况1表示作业人骑于上相导线, 此时主要可能发生等电位人头顶对杆塔上横担放电; 工况2表示等电位人在导线侧方, 此时可能发生人体对塔架侧身放电; 工况3表示人骑于下相导线, 此时可能发生等电位人头顶对上相导线放电。

### 1.3 试验结果与分析

试验中调整各工况下带电作业间隙距离, 施加标准操作冲击电压, 获取不同间隙距离的 50% 放电电压值并进行数据拟合, 获取放电特性曲线如图2~图4所示。

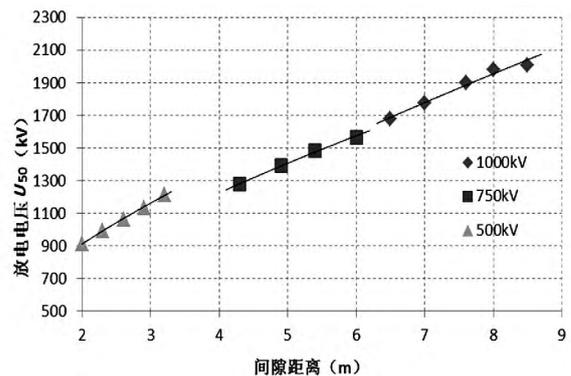


图2 工况1放电特性曲线

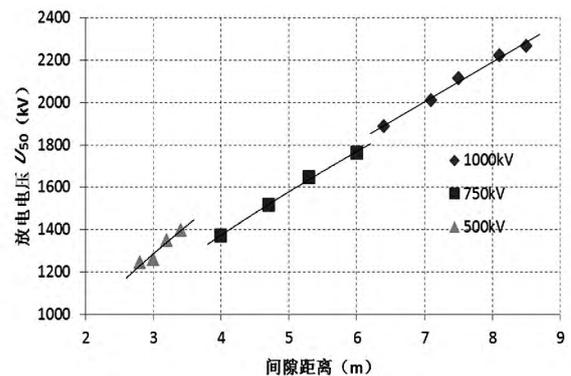


图3 工况2放电特性曲线

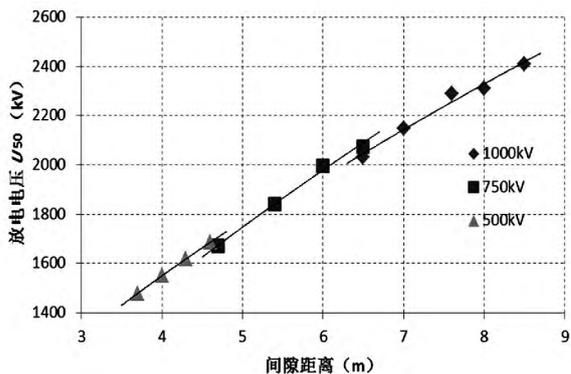


图4 工况3放电特性曲线

由不同工况的间隙操作冲击放电特性曲线趋势可以看出,在工况1、工况2以及间隙距离相同的条件下,500 kV紧凑型线路带电作业间隙操作冲击放电电压比750 kV、1 000 kV紧凑型线路大;在工况3下,3种电压等级紧凑型线路的带电作业间隙操作冲击放电特性曲线趋向一致。

间隙形状的不同会直接影响放电特性,需用间隙系数来反映间隙形状对放电电压的影响。一般来说,在同一间隙长度下棒-板结构的放电电压最低,其间隙系数 $K$ 为1。根据试验曲线拟合,计算出3种作业工况下的放电间隙在不同电压等级下的最小间隙系数 $K$ ,如表1所示。

表1 间隙系数值

作业工况	1 000 kV	750 kV	500 kV
工况1	1.09	1.06	1.20
工况2	1.23	1.19	1.34
工况3	1.32	1.32	1.35

由表1可知,在作业工况1、工况2下,500 kV电压等级的间隙系数比750 kV及1 000 kV大9%~13%,750 kV与1 000 kV的间隙系数相差不大;在作业工况3下,3种电压等级的间隙系数基本一致。

工况1、工况2放电间隙结构分别为“人头顶-上横担”和“人后背-侧面塔身”,类似于“棒-板”电极结构模型,其电极间隙构成的电场类型为极不均匀电场。工况3放电间隙结构类似于“棒-棒”电极架构,为稍不均匀场。因此,工况1、工况2较工况3放电电压更低,比较3种电压等级线路,工况3的间隙系数均比工况1和工况2大。

工况1和工况2间隙试验的板电极分别为塔上方横担和塔侧身构架。500 kV紧凑型杆塔上方横担以及塔侧身构架尺寸比750 kV、1 000 kV紧凑型杆塔明显较小,根据塔身宽度对间隙放电电压的影响<sup>[9]</sup>,杆塔上方横担及塔侧身构架尺寸减小时,对应作业工况1、工况2的放电电压增大。因此,500 kV紧凑型线路带电作业工况的放电间隙系数均为最大。

## 2 进入等电位方式

输电线路进入直线塔等电位的常用方法包括塔

上吊篮法、塔上软梯法、滑轨吊椅法、地面吊篮法、绝缘硬梯法等<sup>[10-12]</sup>。

根据图1作业工况可知,超、特高压紧凑型输电线路带电作业进入等电位包括进入上相等电位和进入下相等电位两种情况。由于超、特高压线路绝缘子串较长,采用塔上软梯法时,作业人员沿软梯进入等电位的路径长,作业人员劳动强度太大;采用滑轨吊椅法时,由于杆塔横担长,相应的滑轨等硬质工具尺寸、重量加大,不利于工器具的使用、运输以及传递等;采用地面吊篮法时,超、特高压杆塔、线路离地较高,地面辅助人员传递作业人员进入等电位的路径长,劳动强度大。考虑到上述因素,超、特高压带电作业进入上相等电位推荐采用塔上吊篮法,进入方式如图5所示。



图5 塔上吊篮法进入上相等电位

超、特高压输电线路进入下相等电位除了可以采用塔上吊篮法外,还可根据各塔形结构尝试采取其他不同的方法。500 kV紧凑型线路杆塔高度相对较小,下相进入等电位可采用从塔窗架下方爬硬质绝缘梯斜向进入等电位,如图6所示。750 kV、1 000 kV紧凑型线路可采取从下相导线下方塔架沿绝缘软梯进入等电位,如图7所示。

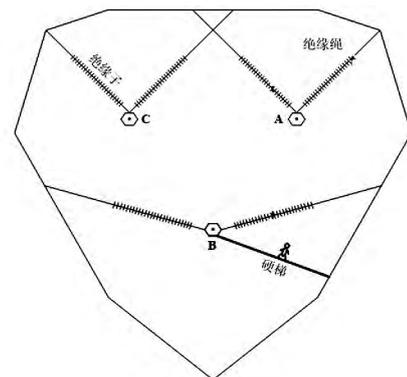


图6 硬梯法进入下相等电位

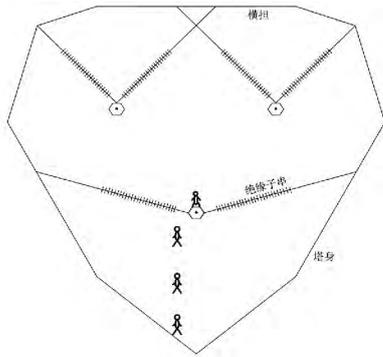


图7 软梯法进入下相等电位

经过大量试验证明,组合间隙最低放电位置均出现在模拟人距离导线0.4 m位置处。确定最低放电位置,开展不同方式下进入等电位的组合间隙放电试验,获取放电间隙系数如表2所示。

表2 进入等电位的放电间隙系数

进入方法	1 000 kV	750 kV	500 kV
吊篮法	1.22	1.19	1.23
软梯法	1.20	1.16	-
硬梯法	-	-	1.14

对比发现,采用软梯法或硬梯法时的放电间隙系数均比采用塔上吊篮法的间隙系数小,其间隙发生放电现象一般为沿绝缘工具表面发生的沿面闪络,放电电压比纯空气间隙低,即对应的组合间隙放电电压更低,意味着为保证等电位作业人员的安全,需要更大的组合间隙距离,因此,推荐进入超、特高压紧凑型输电线路上下相导线等电位时均采用塔上吊篮法。

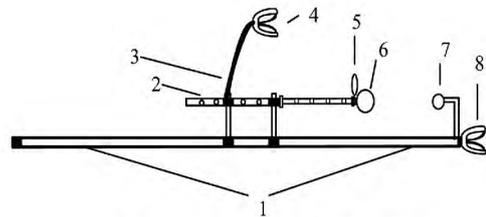
### 3 保护间隙研究

由于受到杆塔结构及导线布置型式的限制,超、特高压紧凑型塔窗内空气间隙距离有限;且带电作业过程中需考虑一定的人员活动范围,因此,紧凑型杆塔塔头空气间隙距离可能无法满足带电作业最小安全距离、最小组合间隙等技术参数的要求。为进一步确保超、特高压交流紧凑型线路带电作业的安全性,提出加装保护间隙的作业方式。

保护间隙的设计应满足:放电电压稳定、可重复、可恢复;保护间隙可调且轻巧,便于安装、操作;保护功能不受导线、杆塔等类型的影响等条件<sup>[13-15]</sup>。保护间隙的放电电压上限应低于作业间隙放电电压的下限,且在最高工作电压下不动作。

国内外保护间隙的相关研究表明,保护间隙采用接地端电极为Φ80 mm球电极、高压端为Φ35 mm球电极的电极结构较为合适。

所设计的便携式带电作业保护间隙由金属插夹、绝缘支杆、接地引流线、固定电极、可调电极等部分组成,如图8所示。保护间隙的整体重量不超过5 kg,单段长度不超过3 m,可方便地拆卸和组装,便于运输。



1-绝缘支杆 2-定位销孔 3-接地线 4-接地夹  
5-电极调节环 6-可调电极 7-固定电极 8-导线插夹

图8 保护间隙结构图

保护间隙的试验包括工频耐压试验和标准操作冲击电压放电试验,试验结果如图9所示。

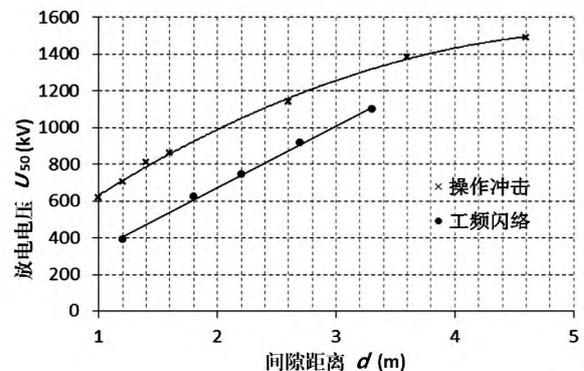


图9 保护间隙电气试验结果

设系统相电压幅值为 $U_{max}$ ,则系统正常运行时最大相对地电压为 $U_{max}/\sqrt{3}$ 。根据保护间隙的工频闪络特性曲线,可以确定保护间隙设定值的下限间隙值,如表3所示。按照对应电压等级的最大相地电压进行工频耐压试验30 min,保护间隙不发生闪络。

表3 保护间隙设定值下限值

电压等级/kV	500	750	1 000
间隙距离/m	1.1	1.6	2.0

表4 保护间隙整定值

电压等级/kV	500	750	1 000
间隙距离/m	1.3	2.3	3.6

根据保护间隙操作冲击放电曲线,可计算出最小间隙系数 $K$ 为1.3。考虑到保护间隙的设计要求,

表5 1 000 kV 特高压紧凑型线路等电位作业试验加装保护间隙的放电试验结果

试验结果	1 000 kV 保护间隙试验			
	作业间隙/m(上相)	保护间隙/m	作业间隙/m(下相)	保护间隙/m
	6.3	3.4	7.1	3.4
放电电压/kV	1 327.4		1 334.6	
变异系数/%	2.8		2.3	
放电次数	0	19	0	19
危险率/ $10^{-6}$	安装前	8.68		6.9
	安装后	0.069 7		0.070 1

当保护间隙的放电间隙系数大于表1和表2求出的带电作业间隙系数时,保护间隙的整定值应当根据带电作业危险率计算并要求留有一定的裕度;当保护间隙系数小于空气间隙系数时,相同间隙距离下遇到过电压时优先从保护间隙放电,此时保护间隙整定值略低于空气间隙最小值即可,推荐标准气象条件下的保护间隙距离整定值见表4。

在不同电压等级的紧凑型线路模拟杆塔上进行等电位作业试验中,将保护间隙垂直安装在杆塔横梁与导线之间,模拟人身穿屏蔽服,处于等电位作业位置。在导线上施加操作冲击电压,并观察放电路径和放电次数,以1 000 kV交流线路带电作业用保护间隙为例,试验结果如表5所示。

从试验结果可以看出,在不同的作业工况下,当出现过电压时,放电路径均经由保护间隙,避免了作业人员所在的等电位工况发生放电危险;且加装保护间隙后的危险率明显降低,证明保护间隙可有效保护作业人员的安全。

## 4 结 论

1) 通过操作冲击放电试验,500 kV紧凑型线路在上相导线等电位作业工况1和工况2的放电间隙系数比750 kV、1 000 kV大9%~13%,即相同间隙距离的放电电压更大。在下相等电位带电作业时,3种电压等级下工况3(等电位人头顶-上相导线)的间隙系数相差不大。

2) 通过试验分析,提出了采用塔上吊篮法进入超、特高压紧凑型输电线路,上相、下相导线等电位为最优化方案。

3) 研究设计了超、特高压紧凑型线路带电作业保护间隙装置,确定了相应电压等级保护间隙装置的技术参数,试验表明,加装保护间隙后放电路径只

经过保护间隙,保证了带电作业的安全性。

### 参考文献

- [1] 胡建勋,刘凯,刘庭,等. 500 kV高海拔紧凑型输电线路带电作业试验研究[J]. 高压电器, 2010, 46(4): 35-39.
- [2] 胡毅,聂定珍,王力农. 500 kV紧凑型双回线路的安全作业方式研究[J]. 高电压技术, 2001(6): 31-33.
- [3] 郝旭东,龚延兴. 500 kV紧凑型输电线路带电作业研究[J]. 电力设备, 2005, 6(2): 29-32.
- [4] 邓春,王珣,郝旭东,等. 500 kV紧凑型输电线路带电作业在高海拔地区适应性应用研究[J]. 中国电力, 2009(8): 24-26.
- [5] 肖宾,王力农,刘凯,等. 750 kV同塔双回紧凑型线路带电作业技术试验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2863-2868.
- [6] 徐涛,霍锋,万启发,等. 1 000 kV交流紧凑型输电线路相间空气间隙放电特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1850-1856.
- [7] 刘凯,胡毅,肖宾,等. 1 000 kV交流紧凑型输电线路带电作业安全距离试验分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1857-1861.
- [8] 王力农,胡毅,刘凯,等. 500 kV高海拔紧凑型输电线路带电作业研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 12-14.
- [9] 刘庭,胡毅,刘凯,等. 超高压交流/特高压直流同塔多回输电线路塔宽及离子流对带电作业间隙放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3261-3267.
- [10] 胡毅,聂定珍,王力农. 500 kV紧凑型双回线路的安全作业方式研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(6): 31-33.
- [11] 刘振,郭洁,项阳,等. 750 kV单回紧凑型线路带电作业方式试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2876-2880.

(下转第55页)

低压加压试验,检查阀侧末屏电压值正确,波形正常无畸变,阀侧加 10 kV 电压时保护所录波形如图 10 所示。



图 9 更换电压采集模块现场照片

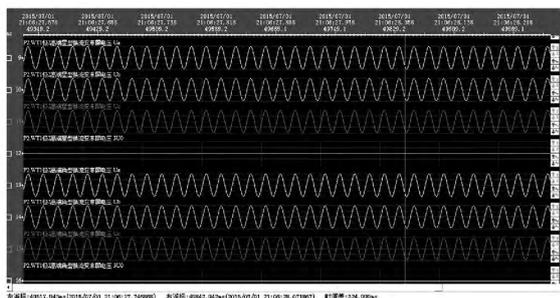


图 10 更换电压采集模块后阀侧加 10 kV 电压保护所录波形

## 5 总结

分析了许继电压采集变换模块上电压取量元件谐振,导致换流变压器阀侧电压测量异常事件,认为许继末屏电压互感器缺少必要的阻尼回路和补偿回路;当一次电压发生突变时,二次 PT 过励饱和、阻

抗下降,等效电容和等效电感在某个特定频率发生谐振,导致信号畸变,严重时测量电压会超出正常电压数倍,使二次 PT 铁心过载发热,甚至烧毁,因此建议改进末屏分压回路设计,增加阻尼和补偿回路,并通过仿真以避免谐振现象的产生,保障直流系统的稳定运行。

### 参考文献

[1] 刘耀,王明新. 高压直流输电系统保护装置冗余配置的可靠性分析[J]. 电网技术,2008,32(5):51-54.

[2] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,1990:122-136.

[3] 刘国福,张润丹. 电容式电压互感器故障分析[J]. 电力安全技术,2006(9):26-27.

[4] GB/T 4703-2007,电容式电压互感器[S]. 北京:中国标准出版社,2008:15-21.

[5] 陆晓春. 变压器状态检修技术方案的可靠性研究[J]. 上海电力学院学报,2003(2):26-32.

[6] 严璋. 高电压绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社,1998:231-255.

[7] 齐旭,曾德文,史大军,等. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J]. 电网技术,2006,30(2):1-6.

### 作者简介:

孙文(1980),工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

禹佳(1983),工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

陈伟(1991),助理工程师,研究方向为特高压直流输电技术。  
(收稿日期:2015-08-04)

(上接第 37 页)

[12] 肖宾,胡毅,刘凯,等. 1 000 kV 交流紧凑型输电线路等电位进入方式[J]. 高电压技术,2011,37(8):1868-1874.

[13] 舒印彪,胡毅,王力农. 500 kV 紧凑型线路带电作业保护间隙研究[J]. 中国电力,2003,36(5):51-53.

[14] 胡毅,王力农,舒印彪. 带电作业保护间隙的放电特

性研究[J]. 高电压技术,2002(11):17-18.

[15] 刘凯,胡毅,王力农,等. 1 000 kV 输电线路带电作业保护间隙的研究[J]. 高电压技术,2006(12):83-88.

### 作者简介:

彭勇(1984),硕士,工程师,主要从事输电线路运行维护、带电作业技术研究。  
(收稿日期:2015-09-22)