

# 同走廊多回特高压直流线路对在建线路的 感应电影响研究

李彪<sup>1</sup>, 张杰<sup>2</sup>, 俞磊<sup>1</sup>, 汪晶毅<sup>3</sup>, 王衍东<sup>3</sup>

(1. 国家电网公司直流建设分公司, 北京 100052; 2. 四川电力送变电建设有限公司, 成都 610051;  
3. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的]多回电力线路同走廊架设可以避免对土地资源的分割,降低对地方规划和发展的影响,但是同走廊内先期运行的线路会在后建线路导地线架设时产生感应电,影响施工安全。[方法]针对同走廊内多回特高压直流线路对一在建的直流线路上产生的感应电进行了理论分析和仿真研究,对影响因素包括直流运行方式、线间距离、放线长度等进行了分析。[结果]仿真结果表明:相邻直流线路在在建线路上产生了较高的静电感应电压,且受运行方式影响显著;线间距减小时,静电感应电压迅速增加;带电线路的离子流通过施工设备产生的电流对人体基本无影响;施工架线时相邻带电线路产生的感应电压需要特别关注,并对导线和设备做良好接地。[结论]研究成果对电力线路邻近带电线路施工架线具有指导意义。

**关键词:** 特高压直流; 静电感应电压; 离子流; 线间距离; 运行方式

中图分类号: TM7; TM75

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)02-0064-06

## Influence Research on Induced Voltage of Multi UHVDC Transmission Lines to the Power Line Under Construction in the Same Corridor

LI Biao<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, YU Lei<sup>1</sup>, WANG Jingyi<sup>3</sup>, WANG Yandong<sup>3</sup>

(1. State Grid DC Construction Company, Beijing 100052, China;

2. Sichuan Electric Power Transmission & Transformation Construction Co., Ltd., Chengdu 610051, China;

3. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] Multi power transmission lines arranged in the same corridor could avoid the land division and reduce the adverse effect on the local planning and development, but the personal safety of operators in the process of towers and conductors erection of subsequent power lines should be seriously considered as a result of induced voltage of the previous energized transmission lines. [Method] One DC transmission line under construction was taken as an example, electrostatic induced voltage generated from multi UHVDC transmission lines nearby in the same corridor were studied and calculated. The influence factors including the operating mode of UHVDC lines, line spacing from the energized power lines and length of stringing conductors were analyzed at the same time. [Result] The results show that the induced voltage got significantly high from adjacent UHVDC lines, and operation mode of energized lines played an important part; the less line spacing reduce, the higher induced voltage reach; the steady-state current from ion current density generated by UHVDC lines flowing through construction equipments have nearly less impact to constructors. Induced voltage of the stringing conductors will be paid much attention to when stringing and conductors and equipments should be grounded effectively. [Conclusion] The research results also have guiding significance to power lines' construction which be adjacent to live lines.

**Key words:** UHVDC transmission lines; electrostatic induced voltage; ion current density; line spacing; operation mode

为了节约宝贵的土地资源,避免对地块的分割和包夹,在输电线路路径选择时根据地方规划和城市发展,采用与已有电力线路同走廊架设是目前电力建设中常采用的方法。在同走廊内建设新线路时,

已运行线路会在新建线路导、地线及施工设备上产生感应电压、电流, 影响施工安全, 有必要开展相应的研究。从文献调研来看, 目前国内外研究主要侧重于同塔多回线路的感应电压电流, 以确定两端变电站的接地开关选型<sup>[1-4]</sup>, 对同走廊多回线路平行走线时, 运行线路对新建线路上的感应电压、电流影响还缺少相应的报道。由于影响因素众多, 如放线长度、线间距离、已运行线路的运行方式等不同, 都会影响在建线路上的感应电压、电流, 因此需要结合工程实际开展研究工作, 以复核和评估在建线路的施工接地方案。文献[5]对同走廊内交流线路对在建线路的感应电压电流影响进行了分析, 但同走廊内直流线路对在建线路的影响则缺少研究。

本文以一在建的特高压直流线路施工架线为例, 对同走廊内平行的特高压直流  $\pm 800$  kV 线路在在建线路上产生的感应电进行了计算, 并分析特高压直流线路运行方式、在建线路与相邻线路的线间距离、施工时张力放线长度等多种因素的影响。研究成果对指导线路的施工和组织实施、确保后建线路在施工架线时的安全可靠具有指导意义。

## 1 研究内容

### 1.1 线路布置情况

在原有密集和拥挤的线路走廊内需要新建一特高压直流线路, 与已有  $\pm 800$  kV 特高压直流线路平行走线, 线路布置方式和平行线间距主要如图 1、图 2 所示, 其中图 1 示意的为两线平行走线段, 偏严重考虑, 在建线路与  $\pm 800$  kV 线路 1 的线间距取实际的最小线间距 75 m; 图 2 示意的为三线平行走线段, 在建线路与  $\pm 800$  kV 线路 1、线路 2 的线间距分别为 180 m 和 100 m。

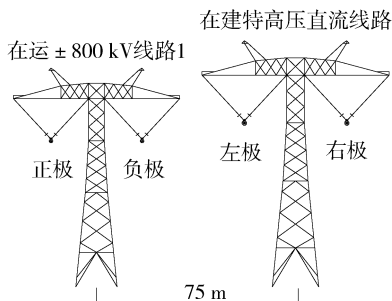


图 1 同走廊线路布置示意图一

Fig. 1 Diagram of overhead transmission lines in the same corridor(1)

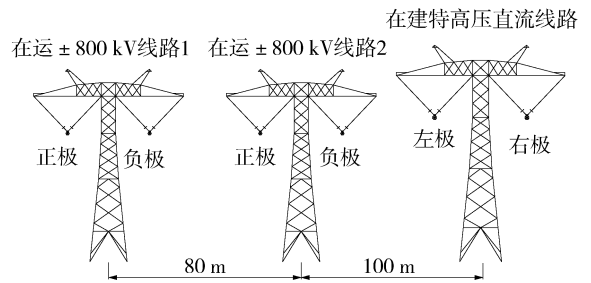


图 2 同走廊线路布置示意图二

Fig. 2 Diagram of overhead transmission lines in the same corridor(2)

### 1.2 导、地线布置

同走廊内各条线路导、地线空间位置和极性布置如表 1 所示。

表 1 导、地线和极性布置

Tab. 1 Arrangement of conductors and shielding wires and polarity sequence

线路名称	$\pm 800$ kV 线路 1	$\pm 800$ kV 线路 2	在建直流线路
导线型号	$6 \times \text{JL}/\text{G3A}$ -1 000/45	$6 \times \text{JL}/\text{G2A}$ -1 250/70	$8 \times \text{JL}/\text{G3A}$ -1 250/70
分裂间距/m	0.45	0.5	0.55
导线间距/m	22	22	30
地线型号	JLB20A-150	JLB20A-150	JLB20A-240
地线间距/m	24	24	32.4
导线平均高/m	28	28	43.3
地线平均高/m	47.2	47.2	67.8
极性布置	左“+”右“-”	左“+”右“-”	左“+”右“-”

### 1.3 研究内容

根据本工程与相邻特高压直流线路平行走线的实际情况, 本文重点研究了不同平行走线段下的感应电压, 并对线间距的影响进行了研究。当在运特高压直流线路的运行方式发生变化时, 尤其是与两条特高压直流线路平行走线段, 对在建线路上产生的感应电压影响将有明显差别, 本文对在运线路的运行方式影响进行了理论分析, 并对最严重工况下的感应电压影响进行了计算。同时, 本文对在运直流线路离子流的影响进行了分析。

## 2 研究方法

对同走廊内的直流线路来说, 在相邻的在建线路上产生的主要是静电感应电压, 稳态的直流电流不会产生电磁感应电流。由静电感应产生的静电感应电流则幅值很小, 在非暂态电击情况下一般不会

对施工人员产生影响。目前对于感应电压电流的计算主要有理论公式法和程序仿真法两种。理论公式法详见文献[5]。

对同走廊内的多条线路,线路间感应电压、电流作用复杂,线路极序和架设方式也多种多样,采用理论公式进行计算较为困难。本文采用电磁暂态计算程序 ATP-EMTP<sup>[6-8]</sup>按照表1参数进行线路建模开展静电感应电压的研究。

直流线路下方的离子流采用有限元法求解<sup>[9]</sup>,主要方程有:

泊松方程:

$$\nabla^2 \Phi = -(\rho^+ - \rho^-) / \epsilon_0 \quad (1)$$

正、负电流密度方程:

$$J^+ = \rho^+ (-k^+ \nabla \Phi + W) \quad (2)$$

$$J^- = \rho^- (-k^- \nabla \Phi + W) \quad (3)$$

电流连续性方程:

$$\nabla \cdot J^+ = -R\rho^+ \rho^- / e \quad (4)$$

$$\nabla \cdot J^- = R\rho^+ \rho^- / e \quad (5)$$

式中: $\Phi$ 为电势(V); $\rho^+$ 、 $\rho^-$ 为正、负空间电荷密度( $C/m^3$ ); $J^+$ 、 $J^-$ 为正、负离子电流密度( $A/m^2$ ); $k^+$ 、 $k^-$ 为正、负离子迁移率( $m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ ); $W$ 为风速(m/s); $e$ 为电子电量, $1.602 \times 10^{-19} C$ ;  $R$ 为离子复合系数( $m^3/s$ )。

计算时假设:忽略导线表面电晕放电形成的电离层厚度;正、负离子迁移率 $k^+$ 、 $k^-$ 为常数;忽略空间电荷的扩散效应;导线起晕后表面电场强度维持在起晕场强。

### 3 结果分析

根据线路路径走向布置,在建线路与在运行路平行走线段可分为两线平行走线段和三线平行走线段(如1.1节图1和图2所示),由于在运线路的线间距离、运行状态等均会显著影响在建线路上的感应电压,因此分别进行研究。

#### 3.1 两线平行走线段

在运 $\pm 800$  kV线路1在不同运行方式下(双极运行、正极运行、负极运行)对在建线路产生的静电感应电压如图3所示。可以看出,由于在建线路左极更靠近带电线路,故左极上的静电感应电压显著大于右极。在运线路的运行方式对在建线路的感应电压影响显著,当采用双极正常运行时,由于正负极有一定的互相抵消作用,因此在建线路左极感

应电压较小约为30 kV;当远离在建线路的正极单极运行时,左极静电感应电压最小约为26 kV;当靠近在建线路的负极单极运行时,左极静电感应电压大大增加,超过了50 kV。

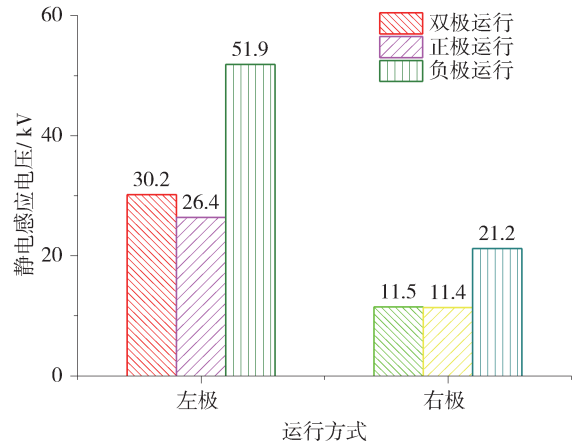


图3 线路1运行方式对在建线路的静电感应电压的影响

Fig. 3 Operation mode influence of energized lines 1 on induced voltage of power line under construction

在建线路上的静电感应电压与放线长度基本无关,这是因为当在建线路两端悬空、未接地时,静电感应电压主要由在运线路运行电压值和耦合电容值决定,在导、地线空间位置确定的情况下,静电感应电压与线路长度无关。不同放线长度下的静电感应电压计算结果如表2所示,也证明了上述理论分析。

表2 放线长度对在建线路静电感应电压的影响

Tab. 2 Influence of stringing length on induced voltage of power line under construction kV

线路1 运行方式	放线长度			
	3 km	5 km	7 km	9 km
双极运行	29.7	30.0	30.1	30.2
正极单极运行	25.0	25.6	26.0	26.4
负极单极运行	50.1	50.9	51.4	51.9

线间距对静电感应电压的影响如图4所示。可知由于本线路距在运线路较近,当考虑风偏摆动、线间距减小后,静电感应电压会迅速上升,当中心线间距仅为45 m时,在建线路左极的静电感应电压从30.2 kV迅速增加到120 kV以上(在运线路负极单极运行)。即使是在运线路双极正常运行时,在建线路左极的静电感应电压也超过了80 kV。因此在本线路施工架线时,要重点关注天气变化,避免导线

向在运线路一侧出现大幅度的风偏摆动。

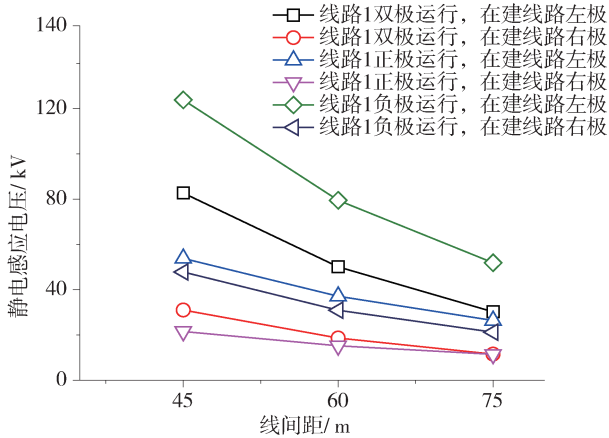


图4 与线路1的线间距对在建线路静电感应电压的影响

Fig. 4 Influence of line spacing from energized line 1 on induced voltage of power line under construction

研究计算还表明, 当在运线路采用单极运行方式时, 由于两极导线的距离大大小于与在建线路极导线之间的距离, 其停运极的静电感应电压超过 120 kV, 在进行带电作业和检修时需要加以特别注意。

### 3.2 三线平行走线段

在三线平行走线段, 考虑两条在运特高压  $\pm 800$  kV 线路 1、2 均有双极正常运行、正极运行、负极运行、双极停运四种运行工况, 合计共有  $4 \times 4 = 16$  种运行工况。3.1 节两线平行走线段的静电感应电压分析表明, 当在运线路靠近在建线路的负极单极运行时, 在建线路上的感应电压最为严重。线路 1、2 的极性布置一致, 均为面向受端左“+”右“-”, 故在三线平行段, 当直流线路 1、2 均采用负极单极运行时, 在建线路上的感应电压最为严重, 仅需针对该运行工况做研究, 此时在建线路上的感应电压如图 5 所示。在建线路与在运线路 2 的线间距减小后的感应电压同样如图 5 所示。

与图 3 相比, 两线平行走线段在建线路左极导线静电感应电压约在 50 kV 左右, 大于三线平行走线段的感应电压, 其主要原因是因为两线平行段的最小中心线间距为 75 m, 三线平行段在运线路与在建线路的线间距较大。另外, 三线平行段由于线路 1 与在建线路距离较远 (180 m), 所以在运线路 1 的运行状态对在建线路的感应电压影响不显著。

总的来说, 在建线路与运行的  $\pm 800$  kV 线路长

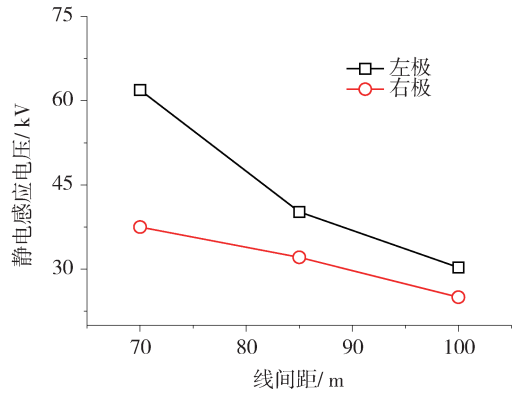


图5 与线路2的线间距对在建线路静电感应电压的影响 (线路1、2均为负极运行, 线间距为80 m)

Fig. 5 Influence of line spacing from energized line 2 on induced voltage of power line under construction (energized line 1 and 2 are both negative monopole operation, and line spacing between line 1 and 2 is 80 m)

距离平行走线, 且线间距较小, 静电感应电压值大, 当导线出现风偏摆动后静电感应值增加更为显著, 在施工架线时要特别注意做好接地工作, 避免暂态电击对施工人员的伤害。

### 3.3 离子流影响的初步分析

相邻直流线路运行时, 空间中的离子流在施工设备上产生电荷, 当人体直接接触设备时, 可能会有稳定的电流从人体流过, 产生电击, 有必要评估这种电击对人体影响的大小。文献[10]给出了不同类型下的电击电流水平, 如表3所示。

表3 电流对人的影响数据概要

类型	直流电流/mA		交流电流/mA		
	男人	妇女	男人	妇女	儿童
感觉电流 (50%的概率)	5.2	3.4	1.1	0.8	—
最小第二类电击电流 (50%的概率)	9	6	1.8	1.2	—
最小第一类电击电流 (0.5%的概率)	62	41	9	6	5
3 s心室颤动电流 (0.5%的概率)	500	500	100	100	35

由于空间中的离子流与气候、线路实际运行条件、设备位置、设备尺寸等关系密切, 难以做出准确的计算和模拟, 参考文献[10]介绍的方法对流过施工设备的离子流进行了简化估算。偏严格考虑, 施工设备距相邻  $\pm 800$  kV 线路中心线距离取为 40

m, 此处垂直方向上的例子流变化如图6所示。

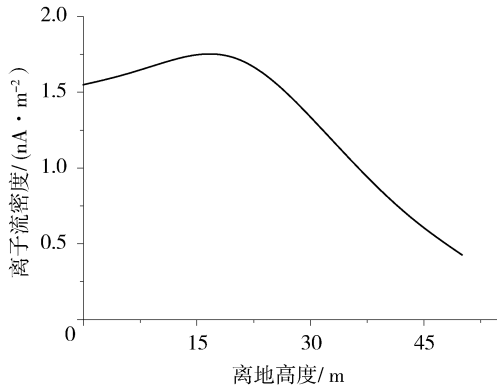


图6 施工设备处离子流密度与离地高度的关系

Fig. 6 Relationship between ion current density and height at the location of construction equipments

从图6可看出, 施工设备处垂直方向上的最大离子流密度约为  $1.8 \text{ nA/m}^2$ 。将施工设备如吊车等效为一长方体, 简化尺寸为  $100 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ , 则施工设备上的最大等效电流为  $1.4 \text{ }\mu\text{A}$ 。假设施工设备对地绝缘, 当人接触施工设备时, 稳定流过人体的电流也仅为  $\mu\text{A}$  级。根据表3中人体各类电击电流的数据, 上述估算出的电流值大大小于人体可感觉的直流电流。更严格考虑, 由于工程现场干旱少雨多风, 假设按施工设备处的最大离子流密度取  $100 \text{ nA/m}^2$ , 则施工设备上的最大等效电流为  $80 \text{ }\mu\text{A}$ , 也显著小于表3所示的电击电流水平。实际上, 施工设备对地不可能完全绝缘, 尤其是位于腐蚀性较高、土壤电阻率较低的盐碱地, 实际流过人体的电流仅为  $\mu\text{A} \sim \text{nA}$  级水平, 因此流过施工设备的离子流对人体基本无影响。

## 4 结论

1) 相邻直流线路的运行方式对在建线路的感应电压影响显著。对两线平行走线段, 在运线路采用双极正常运行时, 由于正负极的互相抵消效果, 在建线路左极感应电压较小约为  $30 \text{ kV}$ ; 当在运线路远离在建线路的正极单极运行时, 静电感应电压最小约为  $25 \text{ kV}$ ; 当靠近在建线路的负极单极运行时, 静电感应电压大大增加, 超过了  $50 \text{ kV}$ 。直流线路静电感应电压与放线长度基本无关。

2) 三线平行走线段, 当在运线路均采用负极单极运行时, 在建线路上的感应电压最为严重。由于三线平行段在建线路与相邻在运线路的线间距为

$100 \text{ m}$ , 大于两线平行段线间距  $75 \text{ m}$ , 因此静电感应电压值相对较小。三线平行段较远的在运线路由于距离较远, 其运行状态对在运线路的静电感应电压影响不显著。

3) 无论是两线平行走线段还是三线平行走线段, 当考虑风偏摆动、线间距减小后, 静电感应电压值会迅速上升。因此在本线路导地线施工架线时, 要重点关注天气变化, 避免向在运线路一侧出现大幅度的风偏摆动。

4) 当在运线路采用单极运行方式时, 其停运极的静电感应电压超过  $120 \text{ kV}$ , 在进行带电作业和检修时需要加以特别注意。

5) 简化估算表明, 在运线路离子流通过施工设备流过人体的稳态电流为  $\mu\text{A}$  级, 对人体基本无影响。

6) 在建线路与运行的  $\pm 800 \text{ kV}$  线路长距离平行走线, 且线间距较小, 静电感应电压值大, 当导地线出现风偏摆动后静电感应值增加更为显著, 在施工架线时要特别注意做好接地工作, 避免暂态电击对人体的伤害及由电击引起的二次伤害。

## 参考文献:

- [1] 蔡广林, 曹华珍, 王晓彤. 500 kV 同塔四回线路感应电压与感应电流分析 [J]. 南方电网技术, 2009, 3(增刊1): 141-144.  
CAI G L, CAO H Z, WANG X T. The analysis of induced voltage and induced current for 500 kV parallel-four-circuit transmission lines [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(Supp. 1): 141-144.
- [2] 麻敏华, 汪晶毅, 李志泰, 等. 500 kV 同塔四回线路电气不平衡度的研究 [J]. 中国电力, 2014, 47(1): 23-27.  
MA M H, WANG J Y, LI Z T, et al. Research on electric unbalance degree of 500 kV four circuits on the same tower [J]. Electric Power, 2014, 47(1): 23-27.
- [3] 麻敏华, 汪晶毅. 500 kV/220 kV 混压同塔四回路感应电压、感应电流的研究 [J]. 广东电力, 2012, 25(4): 30-35 +52.  
MA M H, WANG J Y. Research on induced voltage and current for 500 kV/220 kV mixed-voltage parallel-four-circuit transmission lines on the same tower [J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(4): 30-35 +52.
- [4] 刘俊勇, 颜天佑, 丁俊杰, 等. 同塔四回输电线路检修作业临时接地线挂接方式研究 [J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(1): 19-23.  
LIU J Y, YAN T Y, DING J J, et al. Research on the connection mode of temporary grounding wires during maintenance operation of transmission line of quadruple-circuit on one tower

- [J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(1): 19-23.
- [5] 邱国斌, 汪晶毅, 梁盼望, 等. 同走廊内多回交流线路对在建线路的感应电压电流影响研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(4): 76-81.  
 QIU G B, WANG J Y, LIANG P W, et al. Influence research on induced voltage and current of multi AC transmission lines to the power line under construction in the same corridor [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(4): 76-81.
- [6] DOMMEL H W. 电力系统电磁暂态理论 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [7] 王晓彤, 林集明, 班连庚, 等. 1 000 kV 同塔双回线路不平衡度及换位方式分析 [J]. 电网技术, 2009, 33(5): 1-5 +16.  
 WANG X T, LIN J M, BAN L G, et al. Analysis on unbalance factor and transposing modes for 1 000 kV double-circuit transmission lines on the same tower [J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 1-5 +16.
- [8] 王晓彤, 班连庚, 林集明, 等. 金昌—酒泉 750 kV 同塔双回路紧凑型线路换位方式分析 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 102-107.  
 WANG X T, BAN L G, LIN J M, et al. Comparative analysis on transposing modes for 750 kV compact double-circuit overhead transmission line on same tower from Jinchang to Ji-quan [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 102-107.
- [9] 尹晗, 郭剑, 张波, 等. 直流电晕笼中离子流场的计算 [J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 758-764.  
 YIN H, GUO J, ZHANG B, et al. Calculation of the ion flow field in the DC corona cage [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 758-764.
- [10] 粟福珩. 高压输电的环境保护 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.

## 作者简介:



LI B

## 李彪(通信作者)

1969-, 男, 河南安阳人, 高级工程师, 学士, 主要从事特高压直流建设管理工作(e-mail)1402245777@qq.com。

## 张杰

1977-, 男, 四川仁寿人, 工程师, 学士, 主要从事输电线路技术管理工作(e-mail)1044928280@qq.com。

## 俞磊

1977-, 男, 江苏无锡人, 高级工程师, 硕士, 主要从事特高压直流建设管理工作(e-mail)1280769369@qq.com。

## 汪晶毅

1981-, 男, 安徽舒城人, 高级工程师, 博士, 主要从事输电线路设计研究工作(e-mail)wangjingyi@gedi.com.cn。

## 王衍东

1976-, 男, 广西钦州人, 工程师, 硕士, 主要从事输电线路设计研究工作(e-mail)wangyandong2@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)

