

不同导线排列下 500 kV 输电线路直升机 带电作业平台侵入路径

刘超,阮江军,杜志叶,廖才波,龙明洋

(武汉大学电气工程学院,湖北武汉 430072)

摘要: 基于直升机和几种不同导线排列 500 kV 输电线路的实际参数,建立了直升机带电作业平台(HLLWP)靠近输电线路的模型。通过有限元方法计算了在不同的直升机带电作业平台的侵入角度和直升机带电作业平台与导线的距离下,操作人员屏蔽服和直升机作业平台表面的电场强度,基于计算结果给出了不同导线排布下,直升机带电作业平台靠近不同相导线时的最优侵入路径。

关键词: 特高压输电; 特高压交流输电; 直升机带电作业; 平台法; 侵入路径; 电场强度; 模型

中图分类号: TM 726

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.024

0 引言

500 kV 交流输电线路成为我国电力输送的主干网络,与之对应的带电作业和维护也成为了该领域的热点研究问题^[1]。除了针对常规带电作业项目的研究外,现有文献主要是对带电作业工具进行研制和应用,包括直升机应用与带电作业、带电作业机械手、带电水冲洗系统和新型的检测仪器及安全防护工具^[2]。其中,应用直升机带电作业已成为当前趋势,其主要应用于巡线、架线、输电线路快速安全检修及带电水冲洗。

国内对直升机带电作业开展的相关研究和应用始于 2000 年左右,直升机带电水冲洗于 2004 年在南方电网首次试点成功,随后国网也于 2006 年完成了带电水冲洗作业^[3-5]。2007 年,国网采用直平台作业法,通过一台 Bell206 型直升机进行了 500 kV 交流输电线路边相的带电作业试验。2010 年,湖北省电网公司采用 MD500E 型直升机,进行了地线防振锤、标志球的安装和更换等项目的带电作业^[6-10]。清华大学的学者利用直升机缩比模型试验研究了直升机对交流导线周围空间电场畸变的影响^[11-12]。武汉大学和中国电科院的研究人员展开合作,对三角形导线排列下的 1000 kV 输电线路直升机带电作业侵入路径进行了仿真研究,并最终通过实验测量的数据验证了该方法的可行性^[13]。

直升机带电作业的研究源于国外,通常可分为平台法和吊篮法。1981 年,Michael Kurtgis 在沙特实现了世界上首次直升机与 300 kV 输电线路等电位,采用的是 Bell206 型直升机。1983 年,美国一家

公司通过一台 MD500 型直升机与 500 kV 线路进行了等电位连接。1991 年,美国电科院通过大量的试验得出了在线电压 800 kV 的情况下,中相和边相直升机带电作业的最小安全距离^[14-15]。

综上所述,目前 500 kV 直升机带电作业已在各省电网得到了一定的应用,针对 1000 kV 特高压交流输电线路的直升机带电作业侵入路径等的相关研究也已初步展开。随着 500 kV 超高压输电线路成为我国的主干输电网络,关于其直升机带电作业侵入路径方面的细分研究显得很有必要。本文针对 500 kV 交流输电线路几种常见塔形对应的导线排列形式,建立了直升机平台和导线的计算模型,通过有限元电场仿真的方法,综合考虑各方面因素,对各导线排列方式下的直升机带电作业侵入路径提出了对应的参考方案。

1 建模对象

1.1 直升机及作业人员计算模型

目前,国际上通过了 500 kV 等电位试验认证的机型主要有 Bell206 型和 MD500 型。MD500 系列机型相对 Bell206 系列较为小巧,适合超高压线路的相间带电作业^[17]。本文以 MD500 型直升机为带电作业机型,其几何参数图详见文献^[13]中的图 1。

操作人员的模型主要参考 GB 10000—88《中国成年人人体尺寸》中的统计数据^[18]。在建模时需要进行适当的简化,模型的简化主要参考文献^[13]中的方法,最终确定作业人员的主要模型数据详见文献^[13]中的表 1。

1.2 导线排列模型

500 kV 输电线路存在多种杆塔类型,其对应着不同的导线排列形式:猫头型直线塔和干字型耐张塔的三相导线为三角形排列;酒杯型直线塔和门型塔的三相导线为水平排列;同塔双回直线塔每回的

收稿日期:2015-04-19;修回日期:2016-08-11

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB-209404)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2011CB209404)

三相导线为竖直排列^[19]。据此,500 kV 交流输电线路导线排布主要可以分为三角形排列、水平排列和竖直排列 3 种形式,其排列结构示意图见图 1。

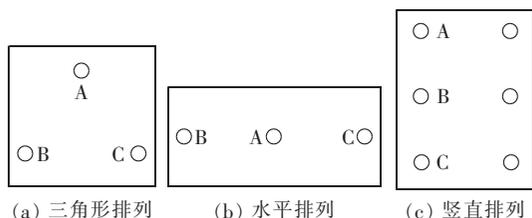


图 1 导线排列形式示意图

Fig.1 Schematic diagram of conductor arrangement patterns

500 kV 交流输电线路常用的导线为四分裂导线,故本文建模的对象为 LGJ-400/35 型导线,其子导线直径为 26.8 mm,分裂间距为 400 mm。各相导线之间及导线对地之间的距离依据实际的 500 kV 交流输电线路导线参数设定,具体如表 1 所示。

表 1 导线相间及对地距离

Table 1 Inter-conductor distances and conductor-ground distances

排列方式	各相对地高度			各相水平距离			各相垂直距离		
	A 相	B 相	C 相	AB	BC	CA	A 相	B 相	C 相
三角形	37	28	28	7.5	15	7.5	9	0	9
水平	28	28	28	11	22	11	0	0	0
竖直	58	46.4	36	2.4	1.8	0.6	11.6	10.4	22

2 有限元模型

直升机带电作业平台在侵入导线路径上的电场分析,实质等同于空间悬浮电位对导线周围电场畸变程度影响分析^[16],其可通过电磁场有限元计算解决。该有限元模型的计算域包括直升机带电作业平台、操作人员、三相导线、大地及周围整个剩余空间。

考虑到计算量的问题,原本在无限远处的零电位边界被截断至与直升机带电作业平台前、后、左、右以及上方相距 100 m 的平面处,这 5 个平面和地面共 6 个平面所包含的空间构成了近似的整体有限元计算域。上述 6 个平面即为计算域的边界面,与导线平行的 4 个平面为零电位边界条件,与导体垂直的 2 个平面为自然边界条件;三相导线在某一时刻的电位是确定的,可固定其电位自由度;直升机带电作业平台及作业人员可视作等势体,耦合其电位自由度作为约束条件。

根据 ANSI/IEEE Std 516—1995 有关直升机带电检修作业最小安全距离的要求,对于 500 kV 交流输电线路,直升机带电作业平台和相邻带电体之间的最小安全距离为 6.7 m^[20]。因此,在安全距离范围内的侵入路径研究更有意义。考虑到裕度问题,本文主要研究直升机带电作业平台与导线之间的距离

小于 8 m 时的直升机带电作业侵入路径。

在悬浮电位情况下,为了分析直升机带电作业平台在不同侵入路径下的操作平台及操作人员表面电场情况,分别对直升机带电作业平台处于空间不同位置,即与导线呈不同角度(分别为 0°、15°、30°、45° 和 60°)以及与导线距离不同(分别为 3 m、5 m 和 8 m)的情况建模进行电场分析,不同路径下的计算位置选取如图 2 所示。需要说明的是,直升机带电作业平台在侵入导线时,由于周围还存在邻相的导线,所以还要特别注意直升机不能触碰到邻相的导线,对于不同导线排列类型的输电线路,在实际操作过程中上述路径并不一定全部可行,这在后续的计算和分析中也会予以考虑。

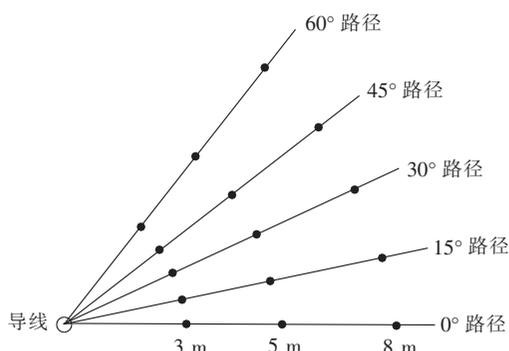


图 2 直升机带电作业平台不同角度侵入路径
Fig.2 Different approaching angles of HLLWP

在直升机机身下侧建立与滑撬相连的操作平台,具体模型参考文献[13]。直升机带电作业平台位于边相导线附近某位置时的计算模型如图 3 所示。

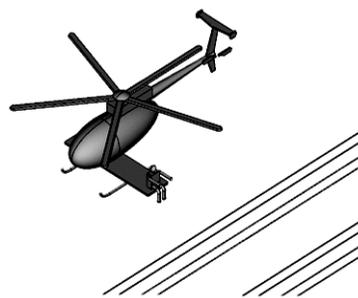


图 3 500 kV 交流输电线路直升机带电作业平台计算模型
Fig.3 Calculation model of HLLWP for 500 kV AC transmission lines

3 直升机带电作业平台侵入路径分析

3.1 水平排列电场仿真分析

带电作业过程中,作业人员身着屏蔽服、屏蔽帽、屏蔽手套及脚套,需对人体表面进行导体处理。从 0° 路径侵入 500 kV 交流输电线路边相时,直升机带电作业平台及作业人员表面的电场如图 4 所示。

由图 4 可以知道,当直升机接近导线时,直升机带电作业平台和作业人员表面的电场强度值都在

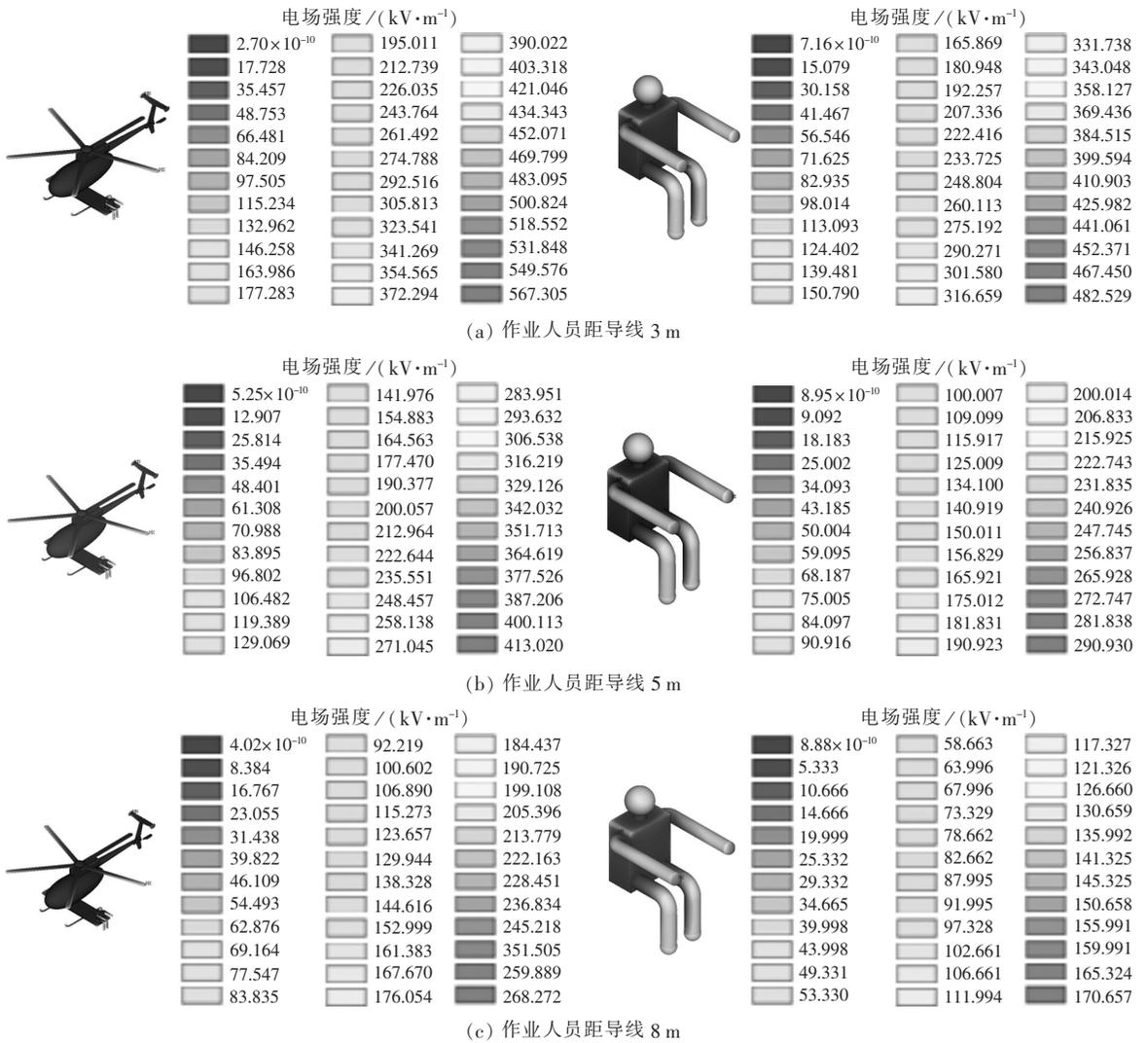


图 4 直升机带电作业平台以 0° 侵入边相导线时的电场分布

Fig.4 Electric fields when approaching angle of HLLWP to side-phase conductor is 0°

增大。当直升机带电作业平台与导线的距离分别为 3 m、5 m 和 8 m 时,整体电场强度的最大值分别约为 567 kV/m、413 kV/m 和 268 kV/m,位置均在靠近导线侧的机翼末端;作业人员电场强度的最大值分别约为 483 kV/m、291 kV/m 和 171 kV/m,位置均在作业人员的手尖。由于在分析侵入路径时,关注的是不同角度下的电场强度相对大小,所以对手和脚模型的端部进行了半球化的近似处理。这样的处理会影响不同角度下的绝对电场强度大小,但不会影响不同角度下的相对电场强度大小。由于模型上半球化的处理,作业人员的手尖出现电场强度最大值是因为与导线的距离近,而非尖端放电导致,这也排除了尖端放电对侵入路径分析的影响。

在不同的侵入角度下,分别对直升机带电作业平台进行电场分析,可得到不同侵入角度下的最大电场强度值如表 2 所示,其最大电场强度随侵入角度的变化曲线如图 5 所示。

从图 5 中可以明显看出,随着侵入角度的增大,

直升机带电作业平台电场强度最大值没有呈现单一

表 2 直升机带电作业平台以不同角度侵入边相导线时的电场强度最大值

Table 2 Maximum electric field intensities for different approaching angles of HLLWP to side-phase conductor

侵入角度/(°)	电场强度最大值/(kV·m ⁻¹)			电场强度最大值的位置		
	l=3 m	l=5 m	l=8 m	l=3 m	l=5 m	l=8 m
0	567	413	268	螺旋桨	螺旋桨	螺旋桨
7.5	487	360	238	螺旋桨	螺旋桨	螺旋桨
15	501	312	208	作业人员手尖	螺旋桨	螺旋桨
22.5	496	300	182	作业人员手尖	作业人员手尖	作业人员手尖
30	481	306	177	作业人员手尖	作业人员手尖	作业人员手尖
37.5	474	296	181	作业人员手尖	作业人员脚尖	作业人员脚尖
45	515	313	177	作业人员脚尖	作业人员脚尖	作业人员脚尖
52.5	521	326	191	作业人员脚尖	作业人员脚尖	作业人员脚尖
60	562	340	191	作业人员脚尖	作业人员脚尖	作业人员脚尖

注:l为直升机带电作业平台与导线的距离。

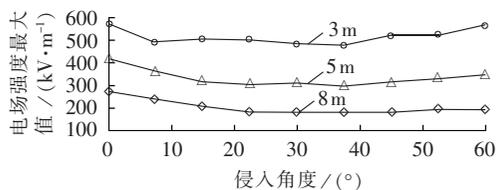
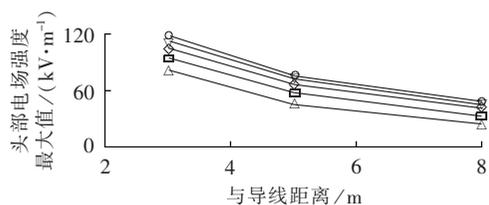


图 5 直升机带电作业平台最大场强随侵入角度的变化曲线

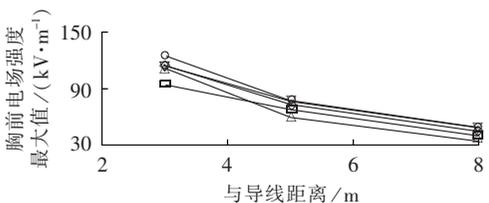
Fig.5 Curves of maximum electric field intensity of HLLWP vs. approaching angle to side-phase conductor

减小的趋势。直升机带电作业平台的电场强度最大值在侵入角度从 0° 变化到 37.5° 的过程中呈现减小的趋势,在侵入角度从 37.5° 变化到 60° 的过程中呈现增大的趋势。若以直升机作业平台场强为参考依据,应选择从 15° 到 37.5° 之间侵入比较好。

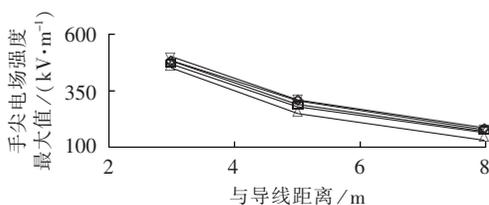
为寻找最优侵入路径,作业人员表面电场强度也要作为考量因素。作业人员各部位电场强度最大值与侵入路径的关系如图 6 所示。



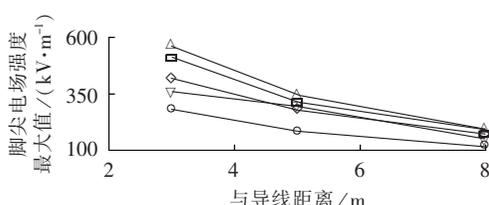
(a) 作业人员头部电场强度最大值



(b) 作业人员胸前电场强度最大值



(c) 作业人员指尖电场强度最大值



(d) 作业人员脚尖电场强度最大值

○— 0° 路径, ▽— 15° 路径, ◇— 30° 路径
■— 45° 路径, ▲— 60° 路径

图 6 直升机带电作业平台以不同角度侵入边相导线时, 作业员电场最大值

Fig.6 Curves of maximum electric field intensity of worker vs. approaching angle to side-phase conductor

综合分析直升机带电作业平台和作业人员表面电场强度变化的规律,建议选取 15° 作为边相带电作业侵入角度。

上文已经研究了边相悬浮电位情况下 5 种不同侵入角度时的电场强度,并以此为依据给出了侵入路径的参考建议。由于水平导线排列方式下,两边相具有电气和结构上的对称性,只需要对某一边相进行研究。但对于中相而言,附近空间电场分布与边相具有差异性,因此有必要对中相导线侵入路径进行分析。

在中相导线侵入路径的选择上,需要注意的是中相和边相导线之间的距离为 11 m ,且在同一水平高度上,以 0° 和 15° 的角度侵入导线是不可行的,因此只能考虑 $30^\circ \sim 60^\circ$ 的侵入角。按照与边相相同的方法进行仿真分析,最终建议实际操作过程中以约 45° 的角度侵入。

3.2 其他导线排列方式下的侵入路径分析

对三角形排列形式下的导线进行侵入路径分析,与水平排列导线思路大体一致,都需要单独分析边相和中相时的侵入路径。不同之处在于,中相导线比边相导线高 9 m ,在对中相导线进行侵入路径分析时, $0^\circ \sim 60^\circ$ 的侵入角都是可行的。通过有限元电场分析,可以得到各路径点处的直升机带电作业平台及作业人员表面电场强度,具体的结果不再赘述。最终可以得到三角形排列形式下,边相导线的建议侵入角为 15° ,中相导线的建议侵入角为 30° 。

同塔双回杆塔情况下的竖直排列导线,其侵入路径初步分析如下。首先同塔双回杆塔具有对称结构,假设左右两回线路的相序排列一致,则只需要对某一侧进行研究即可。上相受到外侧上方地线的影响,直升机带电作业平台只能从导线内侧侵入。由于左右两回线路之间的距离较近,侵入角只能考虑 $30^\circ \sim 60^\circ$ 的情况。中相和下相外侧空间空旷,因此 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的侵入角都是可行的。通过有限元电场分析,可以得到各路径点处的直升机带电作业平台及作业人员的表面电场强度,具体的结果本文不再赘述。最终可以得到竖直排列形式下,上相导线的建议侵入角为 30° ,中相导线的建议侵入角为 15° ,下相导线的建议侵入角为 0° 。

将 3 种导线排列形式下的建议侵入路径分析结果进行汇总,如表 3 所示。

表 3 不同导线排列形式下的建议侵入路径

Table 3 Suggestive approaching paths of HLLWP for different conductor arrangements

排列方式	侵入角/ $^\circ$		
	A 相	B 相	C 相
三角形	30(中相)	15(边相)	15(边相)
水平	45(中相)	15(边相)	15(边相)
竖直	30(上相)	15(中相)	0(下相)

根据文献[13]中的实验及分析,通过建立直升机带电作业平台及作业人员有限元模型并进行电场仿真得到直升机带电作业平台及作业人员的表面电场强度是与实验测量方法所得结果相吻合的,从而证明了仿真模型的可靠性。本文的研究内容未直接开展验证试验,但是采用的人体及直升机带电作业平台模型与文献[13]一致,因此仿真的结果及对应的分析结论也是可靠的。

4 结论

本文建立了直升机带电作业平台侵入导线模型,并进行了电场仿真,根据仿真结果对3种不同导线排列方式下500 kV交流输电线路直升机平台带电作业侵入路径进行研究分析,最终给出了各相的建议侵入路径。

在对同塔双回竖排列导线侵入路径研究的过程中,给出了左右两回输电线路相序一致的假设条件。但实际过程中两回导线是相对独立的,且存在着换相,因此后续还需对两回不同相序排列情况下的侵入路径进行深入研究。

参考文献:

- [1] 舒印彪,胡毅. 特高压交流输电线路的运行维护与带电作业[J]. 高电压技术,2007,33(6):1-4.
SHU Yinbiao,HU Yi. Maintenance and live working technology for ultra high voltage transmission line[J]. High Voltage Engineering,2007,33(6):1-4.
- [2] 胡毅. 输配电线路带电作业技术的研究与发展[J]. 高电压技术,2006,32(11):1-10.
HU Yi. Research and development of live working technology on transmission and distribution lines[J]. High Voltage Engineering,2006,32(11):1-10.
- [3] 李国兴. 我国直升机电力作业的现状与发展[J]. 电力设备,2006,7(3):41-45.
LI Guoxing. Present situation and development of helicopter power job in China[J]. Electric Power Construction,2006,7(3):41-45.
- [4] 尚大伟. 华北电网直升机电力作业的现状与发展[J]. 电力设备,2007,8(4):33-35.
SHANG Dawei. Present situation and development of power job with helicopter in North China Power Grid[J]. Electric Power Construction,2007,8(4):33-35.
- [5] 汪骏,沈建,陈方东,等. 直升机水冲洗带电超高压输电线路绝缘子[J]. 电力建设,2007,28(7):36-39.
WANG Jun,SHEN Jian,CHEN Fangdong,et al. Live EHV transmission line insulator flush using helicopter[J]. Electric Power Construction,2007,28(7):36-39.
- [6] 李豫,李靖. 直升机带电作业方法及作业机型的比较分析[J]. 华中电力,2011,24(3):20-24.
LI Yu,LI Jing. Comparison research of working methods and platforms in helicopter live line maintenance[J]. Central China Electric Power,2011,24(3):20-24.
- [7] 李豫,李靖. 直升机带电作业的现状、技术难点和发展趋势[J]. 华中电力,2011,24(1):18-22.
LI Yu,LI Jing. Status quo,technical difficulties and development tendency of helicopter live-line maintenance[J]. Central China Electric Power,2011,24(1):18-22.
- [8] 于德明,沈建,汪骏. 直升机作业在电网运行维护中的研究与应
用[J]. 电网技术,2009,33(6):107-112.
YU Deming,SHEN Jian,WANG Jun. Research and application of helicopter in patrol and hotline operating maintenance of power lines[J]. Power System Technology,2009,33(6):107-112.
- [9] 张柯,李海峰,王伟. 浅议直升机作业在我国特高压电网中的应用[J]. 高电压技术,2006,32(6):45-46.
ZHANG Ke,LI Haifeng,WANG Wei. Analysis of helicopter patrol application prospect in China's UHV grid [J]. High Voltage Engineering,2006,32(6):45-46.
- [10] 肖庆初,邓华,赵维彦. 高海拔紧凑型500 kV线路直升机带电作业[J]. 云南电力技术,2012,40(2):50-51.
XIAO Qingchu,DENG Hua,ZHAO Weiyan. Helicopter live-line work to 500 kV transmission lines in high altitude region [J]. Yunnan Electric Power,2012,40(2):50-51.
- [11] YU Deming,WAN Shuwei,CHEN Fangdong. The effect of floating-potential conductors on the electric field near overhead transmission lines[J]. Journal of Electrostatics,2012,70(3):339-345.
- [12] HARRIS E L,RINDALL B D,TARKO N J,et al. The effect of a helicopter on DC fields and ions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1993,8(4):1837-1840.
- [13] 刘超,阮江军,廖才波,等. 1000 kV特高压交流输电线路直升机平台法带作业侵入路径[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):64-70.
LIU Chao,RUAN Jiangjun,LIAO Caibo,et al. Approaching paths of helicopter live-line work platform to 1000 kV UHV AC transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):64-70.
- [14] IEEE Task Force 15.07.05.05. Recommended practices for helicopter bonding procedures for live-line work[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(1):333-349.
- [15] IEEE Task Force 15.07.05.05. Helicopter operator qualifications for line work[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(1):326-332.
- [16] 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1998:15-22.
- [17] 汪骏,沈建,陈方东,等. 超高压输电线路直升机带电检修[J]. 电力设备,2008,9(11):41-44.
WANG Jun,SHEN Jian,CHEN Fangdong,et al. Helicopter live-line overhaul on EHV power transmission line[J]. Electrical Equipment,2008,9(11):41-44.
- [18] 国家技术监督局. 中国成年人人体尺寸:GB10000—88[S]. 北京:中国标准出版社,1988.
- [19] 沈建,尚大伟,刘伟东,等. 直升机电力作业对维修的特殊要求与应对措施[J]. 航空维修与工程,2010,17(6):47-50.

SHEN Jian, SHANG Dawei, LIU Weidong, et al. The special maintenance requirements and measures of helicopter power network operation[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2010, 17(6):47-50.

[20] 韩昊, 陈达, 翁永春. 直升机带电作业的安全距离评估[J]. 湖北电力, 2010, 34(5):33-35.

HAN Hao, CHEN Da, WENG Yongchun. The safety distance assessment for helicopter live working[J]. Hubei Electric Power, 2010, 34(5):33-35.

作者简介:



刘 超

刘 超(1988—),男,河南新乡人,博士研究生,研究方向为电磁场数值计算及高压电工装备多物理场仿真研究(E-mail:lcnhalcnha@163.com);

阮江军(1968—),男,浙江绍兴人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为高电压与绝缘技术、电工理论与新技术。

Approaching paths of helicopter live-line work platform to 500 kV UHV AC transmission lines for different conductor arrangements

LIU Chao, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, LIAO Caibo, LONG Mingyang

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: An approaching path model of HLLWP(Helicopter Live-Line Work Platform) to 500 kV UHV AC transmission lines is established based on the actual parameters of helicopter and conductor arrangements of transmission lines. The finite element method is adopted to calculate the electric field intensities of HLLWP and worker's screening clothing for different approaching angles of HLLWP and different distances between HLLWP and conductor, based on which, the optimal approaching paths of HLLWP to different phase-conductors are given for different conductor arrangements.

Key words: UHV power transmission; UHV AC power transmission; helicopter live-line work; platform method; approaching path; electric field intensity; models

“多能协同综合能源系统”专题征稿启事

具有多能协同特征的综合能源系统是目前能源互联网发展的重要形态,通过冷、热、电、气等多能流综合规划、协调控制、智能调度与多元互动,能够显著提高能源综合利用效率与分布式可再生能源就地消纳能力。针对这一热点问题,《电力自动化设备》编辑部特别推出“多能协同综合能源系统”专题,并邀请清华大学郭庆来副教授与广州供电局刘育权教授级高工担任专题特约主编,组织本领域的优秀稿件,集中展现多能协同综合能源系统及相关技术的最新研究进展。现诚邀高等院校、科研院所及相关企业的专家、学者踊跃投稿。专题拟于2017年6月出版(正刊)。

一、征稿范围

征稿涵盖冷/热/电/气多能协同综合能源系统相关技术领域,包括但不限于以下方向:

- (1)多能网络融合建模方法;
- (2)综合能源系统规划技术;
- (3)多能流能量管理技术;
- (4)多能协同控制技术;
- (5)多能互补需求侧响应;
- (6)综合供能可靠性评价;

(7)综合能源系统运营技术;

(8)综合能源系统示范。

二、投稿截止日期

2017年3月1日。

三、投稿要求

(1)内容要求:所投稿件须是未公开发表的原创学术论文,具有较强的理论性、前瞻性和技术性,对实际应用有较高的参考价值;研究数据、过程、结果真实准确;无政治错误,无政治、军事和科学技术泄密情况。

(2)排版要求:论文格式按照《电力自动化设备》杂志论文模板编排(模板可在电力自动化设备杂志社官网 www.epae.cn 下载),全文以不超过7页为宜。

(3)署名及作者信息要求:须确认全体作者的署名及排序无争议。

四、投稿方式

请登录电力自动化设备杂志社官网 www.epae.cn 进行作者注册后在线投稿,投稿栏目请务必选择“多能协同综合能源系统专题”。