

1 000 kV 特高压交流输电线路直升机平台法 带电作业侵入路径

刘 超¹, 阮江军¹, 廖才波¹, 杜志叶¹, 周涛涛¹, 彭 勇²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中国电力科学研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 基于 MD500 直升机和国内 1 000 kV 三角形排布输电线路的实际参数, 建立了直升机带电作业平台 (HLLWP) 模型。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, 通过有限元方法计算了直升机带电作业平台和操作人员身体表面的电场强度。考虑操作人员的人身安全, 提出了直升机带电作业平台靠近不同相导线时的侵入路径。

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.1006-6047.2015.06.010

0 引言

随着国内首条 1 000 kV 特高压交流输电线路 (晋东南—荆门试验示范工程线路) 的建设、调试和运行, 学者们对特高压交流输电线路带电作业也进行了相关研究。国网电力科学研究院对 1 000 kV 特高压交流输电线路带电作业的电场强度测量、人体表面电场、安全防护、组合间隙放电机理以及安全距离等内容进行了试验研究, 得出了具有指导意义的结论, 并对带电作业的发展提出了一些展望^[1-10]。清华大学的学者利用直升机缩比模型研究了直升机对交流导线周围空间电场畸变的影响^[11-12]。

国外学者对直升机带电作业的研究相对早于国内。直升机带电作业可分为平台法和吊篮法, 美国主要采用平台法, 而法国则主要采用吊篮法。1981 年, Michael Kurtgis 使用 Bell206 型直升机在沙特实现了世界上首次直升机与 300 kV 线路等电位连接, 随后成立专门从事电力作业服务的直升机公司 Airmobile。1983 年, 美国 Haverfield 直升机公司将 MD500 型直升机与 500 kV 线路进行等电位连接, 开始了直升机带电作业服务。1991 年, 美国电科院通过大量试验研究了最高线电压为 800 kV 时, 进行中相和边相直升机带电作业的最小安全距离^[13-14]。近年来, 直升机带电检修技术在我国也得到了广泛应用。2007 年, 北京超高压公司采用 Bell206 型直升机平台作业法, 进行了 500 kV 交流输电线路边相的直升机带电作业试验。2010 年, 湖北超高压输变电公司采用 MD500E 型直升机, 在双玉一回 494 号和 495 号杆塔之间进行了地线防振锤安装和更换、标志球安装和更换等项目的带电作业。作业过程中, 直升机不仅在地线之间和导、地线之间穿行, 而且还飞入

水平布局结构的中相进行带电作业^[15-18]。

综上所述, 虽然目前对 1 000 kV 交流输电线路带电检修技术的研究已较为深入, 对 800 kV 交流输电线路直升机带电作业安全距离也有了一些研究, 但是对直升机带电作业侵入导线路径方面的研究尚未开展。随着 1 000 kV 特高压交流输电线路的投运, 这方面的研究十分有必要。本文针对直升机平台法带电作业, 通过计算直升机平台及附近空间电场分布的方法, 综合考虑各方面因素, 选择最优侵入路径, 并通过试验验证了该方法的可靠性。

1 直升机带电作业平台模型

1.1 有限元模型

分析直升机带电作业平台 (HLLWP) 在侵入导线路径上的电场, 实质等同于分析空间悬浮电位对导线周围电场畸变程度的影响^[19], 这个问题可通过计算电磁场有限元解决。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、大地及周围的整个剩余空间。

考虑到计算量的问题, 原本在无限远处的 0 电位边界面被截断至与直升机带电作业平台前、后、左、右以及上方各相距 100 m 的平面处, 上述 5 个面以及地面在内的 6 个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 0 电位边界条件, 与导线垂直的 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操作人员可视作等势体, 耦合其电位自由度作为约束条件。

1.2 直升机计算模型

目前, 国际上在直升机带电作业中普遍采用的机型主要有 Bell206 系列和 MD500 系列, 这 2 种机型都通过了国际上的 500 kV 等电位试验认证; 其中 MD500 系列机型更为小巧, 更加适合特高压线路的

收稿日期: 2014-05-13; 修回日期: 2015-02-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (2011CB209404)

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

相间带电作业。因此本文以 MD500 型直升机作为侵入路径的研究对象,其几何参数如图 1 所示。

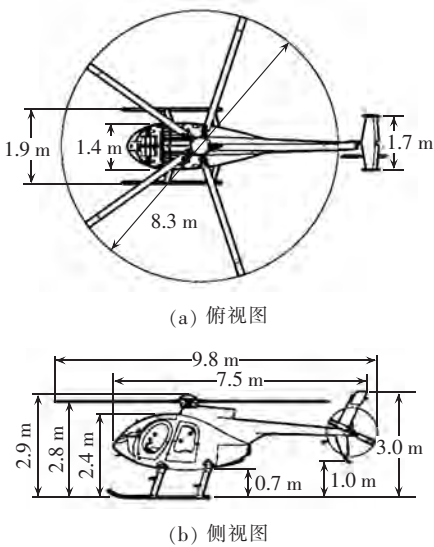


图 1 MD500 型直升机几何参数

Fig.1 Geometric parameters of MD500 helicopter

1.3 作业人员计算模型

研究直升机平台法带电作业侵入路径,需要建立相应的作业人员模型,并根据人体模型不同部位表面电场强度情况确定最优的侵入路径。不同操作人员的体型特征各不相同,因此需要参考 GB10000—88《中国成年人人体尺寸》中的统计数据^[20]。为了适当简化分析难度,根据标准中的统计数据,在建立模型时将人体模型尽量简化,其中人体头部采用球形模拟,上半身采用长方体模拟,肩部进行圆滑处理。同时,作业人员手臂和腿部的电场也是关注的重点之一,将手臂和腿部采用圆柱体模型模拟。考虑到作业人员在侵入导线过程中通常固定坐在平台上,因此建立的人体仿真模型也采用坐姿方式。最终确定作业人员的主要模型数据如表 1 所示。

表 1 成年男性坐姿模型参数

Table 1 Parameters of seated adult male model

项目		统计值/cm	最终确定值/cm
头部尺寸	长	18.4	球形,直径 22 cm
	宽	15.4	
	高	22.3	
上身尺寸	高	90.8	95
	宽	43.1	50
	厚	21.2	22
下身尺寸	高	41.3	42
	宽	55.4	55
	厚	21.2	22
身高		167.8	170

1.4 整体计算模型

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,即与导线成 0°、15°、30°、45° 和 60° 以及与导线距离 3 m、5 m 和 10 m 的情况下建模进行电场分析,不同路径下的计算位置选取如图 2 所示。

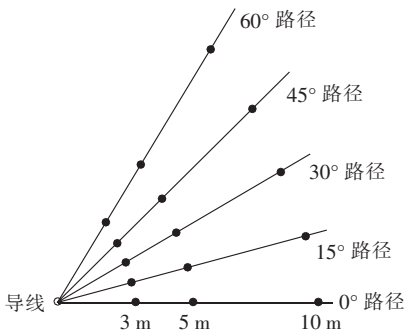


图 2 直升机带电作业平台不同角度侵入路径
Fig.2 HLLWP approaching path for different angles

1 000 kV 特高压交流输电线路模型根据实际运行线路参数建立,导线采用八分裂结构,分裂间距为 400 mm,子导线直径为 30 mm,三相导线呈三角形排布方式,导线线电压为 1 000 kV,线路相电压最大值为 816.5 kV。在直升机机身下侧建立与滑橇相连的操作平台,操作平台长 4.14 m,宽 1.05 m,固定于直升机滑橇后端,操作人员坐于操作平台外侧。直升机带电操作平台位于边相导线附近某位置时的计算模型如图 3 所示。

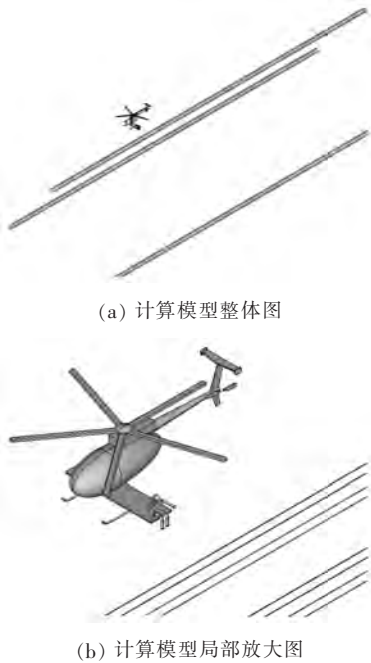


图 3 1 000 kV 交流输电线路直升机带电作业平台计算模型

Fig.3 Calculation model of HLLWP for 1 000 kV UHV AC transmission lines

2 直升机带电作业平台侵入路径分析

2.1 中相导线侵入路径分析

在直升机带电作业平台进行侵入导线、等电位作

业以及退出等电位的过程中,作业人员始终身着屏蔽服、屏蔽帽、屏蔽手套及脚套。因此在进行电场计算时,将人体表面当作导体来处理。通过电场计算可以得到平台整体及作业人员表面的电场分布结果,以 0° 路径侵入 1000 kV 特高压交流输电线路中相

导线的情况下,直升机带电作业平台及作业人员身体表面的电场分布结果如图 4 所示。

分析图 4 可知,悬浮电位情况下,直升机离导线越远,直升机带电操作平台和作业人员表面的电场数值越小。当距离为 10 m、5 m 和 3 m 时,平台整体

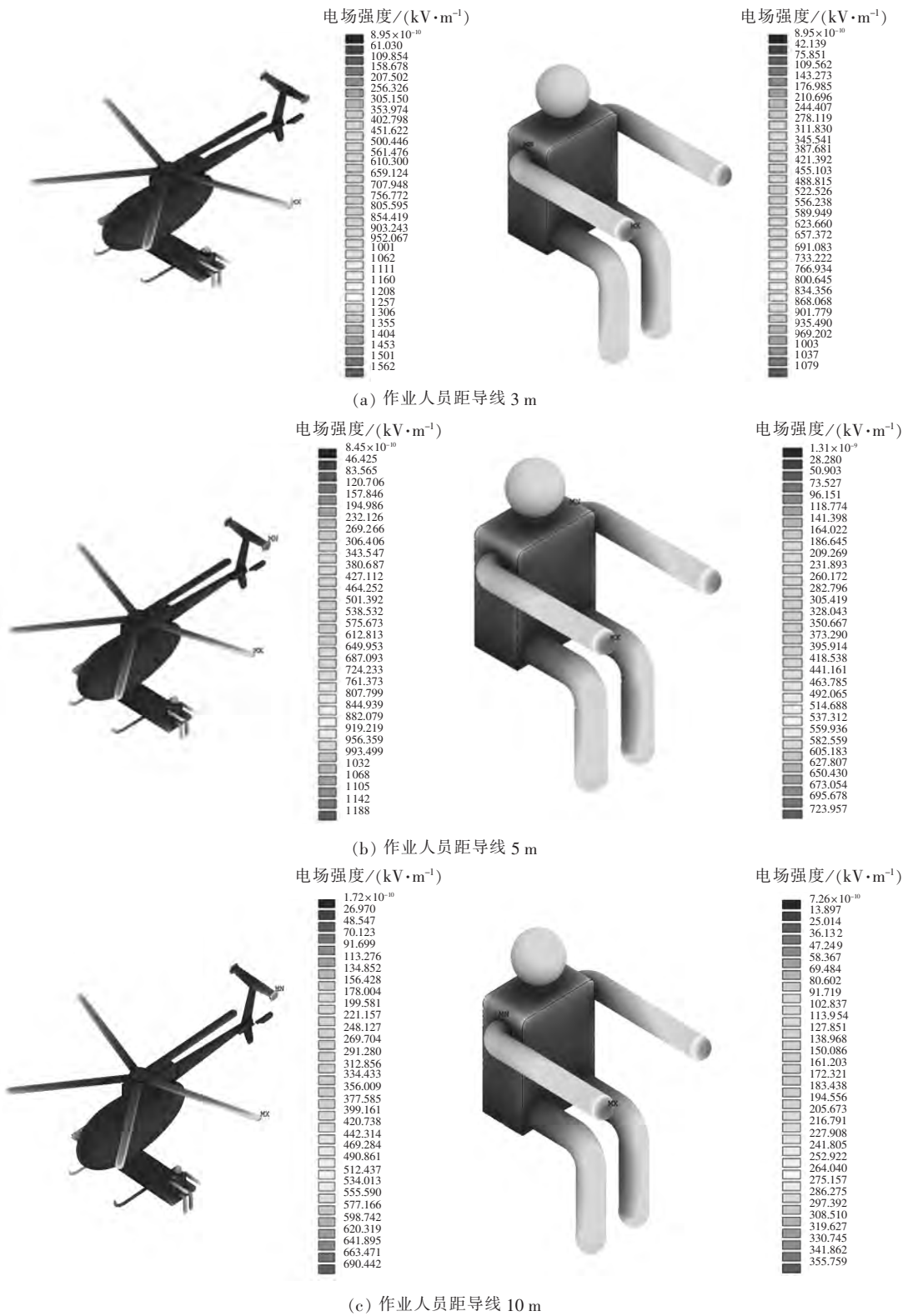


图 4 直升机带电作业平台以 0° 侵入中相导线时的电场分布

Fig.4 Electric field when HLLWP approaching angle to middle-phase conductor is 0°

电场强度最大值分别为 690 kV/m、1 188 kV/m 和 1 562 kV/m,出现位置均为靠近导线侧的机翼末端;作业人员身体表面电场强度最大值分别为 355 kV/m、724 kV/m 和 1 079 kV/m,均出现在操作人员手尖。

针对不同的侵入角度,对直升机带电作业平台进行电场分析,得到不同路径下电场强度最大值和距离的关系如表 2 所示。

表 2 直升机带电作业平台以不同角度侵入中相导线时的电场强度最大值
Table 2 Maximum electric field intensity of HLLWP for different HLLWP approaching angles to middle-phase conductor

与导线距离/m	侵入角度/(°)	电场强度最大值/(kV·m ⁻¹)	最大值出现位置
3	0	1 562	螺旋桨
	15	1 275	螺旋桨
	30	1 020	作业人员手尖
	45	875	作业人员手尖
	60	678	作业人员脚尖
5	0	1 188	螺旋桨
	15	976	螺旋桨
	30	741	螺旋桨
	45	573	螺旋桨
	60	414	螺旋桨
10	0	690	螺旋桨
	15	576	螺旋桨
	30	425	螺旋桨
	45	302	螺旋桨
	60	188	螺旋桨

表 2 所示结果表明,直升机带电作业平台整体电场强度最大值随侵入角度增大呈减小的趋势,在侵入角度为 0° 和 15° 时,电场强度最大值出现在近导线侧的螺旋桨末端,当侵入角度增大至 30° 以后,电场强度最大值出现在作业人员的手尖、脚尖和远离导线侧的螺旋桨末端。从直升机安全角度进行考虑,60° 是最可靠的入侵角度。

为了得到最优的导线侵入路径,除了要考虑直升机带电作业平台整体在不同路径下的表面电场情况,作业人员的表面电场情况也必须作为考量因素。作业人员身体表面各部位电场强度最大值与侵入路径的关系如图 5 所示。

图 5 表明,侵入角度越大,则作业人员手尖、头部和胸前表面电场强度最大值越小,而作业人员脚尖电场强度在 0° 和 60° 侵入角度时均较小。综合考虑直升机作业平台整体和作业人员的分析结果,应该选择 60° 作为侵入角度。但是由于侵入角度为 60° 时的作业难度较大,因此实际操作过程中建议选取 45° 作为侵入角度。

2.2 边相导线侵入路径分析

2.1 节研究了中相悬浮电位情况下 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。由于边相和中相附近空间电场分布的

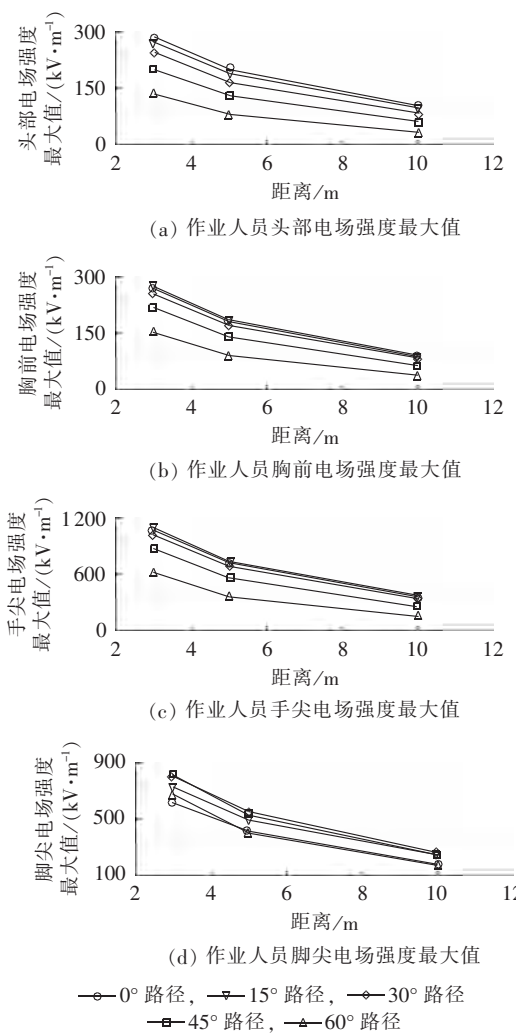


图 5 直升机带电作业平台以不同角度侵入中相导线时,操作人员身体表面电场强度最大值
Fig.5 Maximum electric field intensity of operator for different HLLWP approaching angles to middle-phase conductor

差异性,因此也有必要对边相导线侵入路径进行分析。

针对不同的侵入角度,对直升机带电作业平台进行电场分析,得到不同路径下电场强度最大值和距离的关系如表 3 所示。

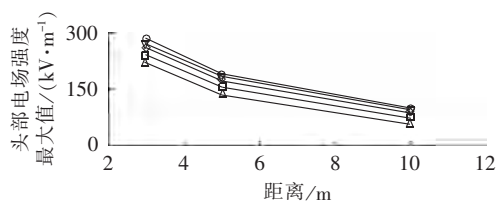
计算结果表明,随着侵入角度增大,直升机带电作业平台电场强度最大值没有呈现单一减小的趋势。从 0° 到 30° 的变化过程中,直升机带电作业平台场强最大值呈现减小的趋势;从 30° 到 60° 的变化过程中,直升机带电作业平台场强最大值呈现增大的趋势。若以直升机作业平台场强为参考依据,应选择 15°~30° 侵入比较好。分析其原因,从边相悬浮电位侵入时,随着侵入角度的增大,直升机与中相的距离变小,此时直升机带电作业平台的场强是边相导线与中相导线共同作用的结果,这与从中相侵入时的情况是不同的。

作业人员身体表面及各部分电场强度最大值与侵入角度及距离的关系如图 6 所示。

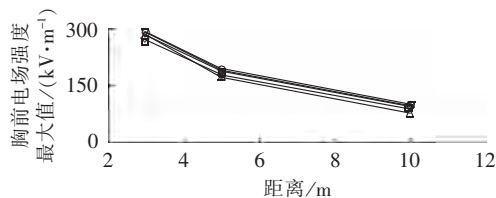
表 3 直升机带电作业平台以不同角度
侵入边相导线时的电场强度最大值

Table 3 Maximum electric field intensity of HLLWP
for different HLLWP approaching angles to
side-phase conductor

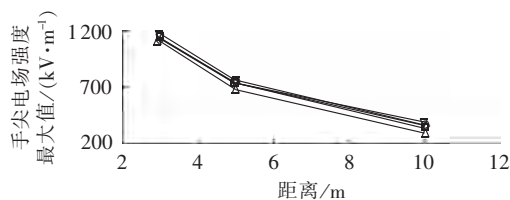
与导线 距离/m	侵入 角度/(°)	电场强度最大值/ (kV·m ⁻¹)	最大值出现位置
3	0	1401	螺旋桨
	15	1134	作业人员手尖
	30	1176	作业人员手尖
	45	1176	作业人员脚尖
	60	1309	作业人员脚尖
5	0	1033	螺旋桨
	15	816	螺旋桨
	30	765	作业人员手尖
	45	784	作业人员脚尖
	60	854	作业人员脚尖
10	0	551	螺旋桨
	15	440	螺旋桨
	30	371	螺旋桨
	45	398	作业人员脚尖
	60	410	作业人员脚尖



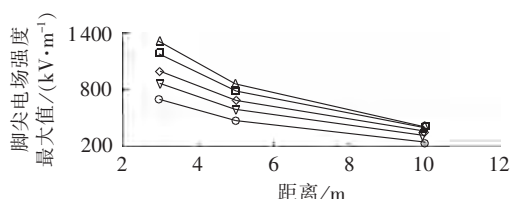
(a) 作业人员头部电场强度最大值



(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,
操作人员身体表面电场强度最大值

Fig.6 Maximum electric field intensity of operator
for different HLLWP approaching angles to
side-phase conductor

观察图 6 可以发现,各角度侵入过程中,作业人员手尖和脚尖的电场强度相对较大,手尖最大电场受路径的影响很小,而脚尖最大电场则与路径有较大关系,因此应该以脚尖的电场为选择依据,侵入角度选为 0°~15° 较好。综合直升机带电作业平台和作业人员两方面的因素,实际操作过程中建议选取 15° 作为边相导线侵入角度。

3 直升机带电作业电场分析方法验证

3.1 试验测量

前文主要通过仿真方法,对直升机平台法带电作业在不同相和不同侵入路径的电场分布进行了研究。由于计算模型进行了适当的简化,同时考虑到 1 000 kV 直升机平台法带电作业电场分布研究在国际上尚属首次,因此有必要将仿真结果与试验结果进行对比,验证仿真方法的正确性。

将 MD500 型直升机固定于距离地面 12 m 高的实验平台上,实验平台的尺寸为 2.7 m×2.4 m×0.2 m。身着屏蔽服、屏蔽手套、屏蔽鞋和屏蔽帽的模拟人放置在直升机作业平台的右端,通过模型人手中的等电位转移棒与导线进行等电位连接。特高压试验导线采用八分裂线,距离转移棒端部 1.5 m,试验现场布置如图 7 所示。



图 7 1 000 kV 交流输电线路直升机
带电作业试验布置图

Fig.7 Arrangement diagram of helicopter live-line
work experiment for 1 000 kV UHV AC
transmission lines

试验过程中,将导线电压逐渐提升至线路的最高运行相电压 635 kV,通过导线对转移棒放电使得作业平台与导线处于等电位状态。实验人员在机舱内将电场测量探头置于模拟人头顶测量电场强度,其结果为 206 kV/m。

3.2 仿真方法验证

根据试验布置及加载条件建立相应的直升机带电作业仿真模型,计算得到整体试验模型及模型人身体表面电场分布结果如图 8 所示。

仿真结果表明,直升机螺旋桨末端的电场最大值为 3 207 kV/m;模型人身体表面的电场强度最大值为 976 kV/m,出现在模拟人的脚尖处。考虑到电场测量探头的厚度为 2 cm,在模拟人头顶高 2 cm 处

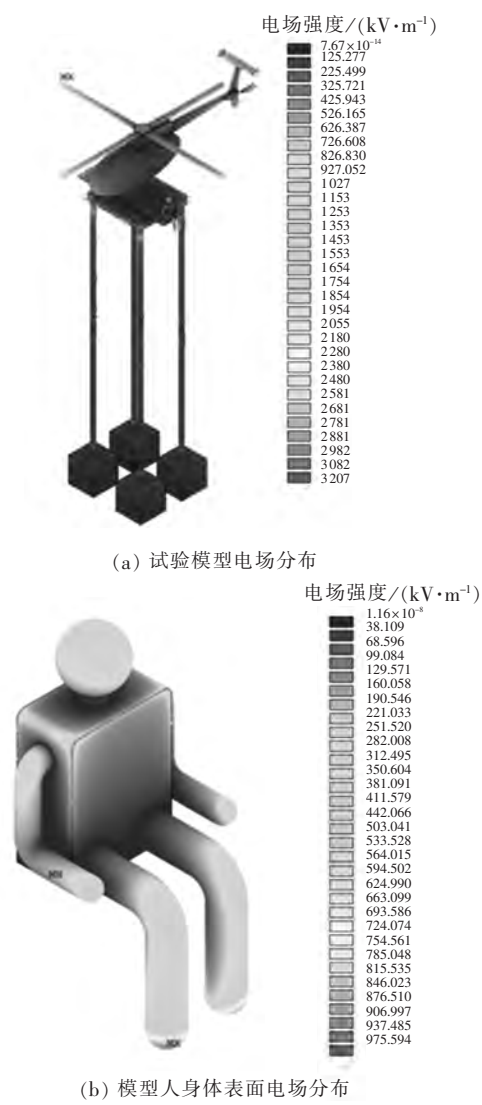


图 8 试验模型的电场仿真计算结果

Fig.8 Simulative results of electric field for test model

沿垂直导线方向选取路径观测点,绘制路径上电场分布曲线如图 9 所示。由图 9 可知,模拟人头顶正上方 2 cm 处电场计算结果为 216 kV/m,与实际测量结果较为接近。

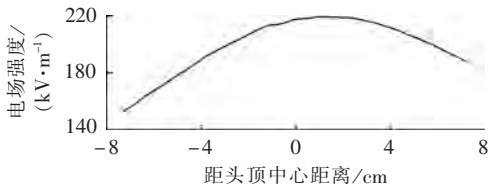


图 9 模型人头部的电场强度垂直分布

Fig.9 Vertical distribution of electric field intensity along model head

4 结论

本文对 1000 kV 特高压交流输电线路直升机平台带电作业侵入路径进行研究,得出以下结论:

a. 直升机带电作业平台对中相进行作业时,建议选择 45° 作为侵入角度;

b. 直升机带电作业平台对边相进行作业时,建议选择 15° 作为侵入角度;

c. 通过建立试验现场布置的仿真模型进行电场计算,并与试验现场测量电场数据进行对比,证明了仿真方法在进行直升机带电作业平台电场分析上的可行性。

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] 邵瑰玮,胡毅,王力农,等. 1000 kV 交流输电线路带电作业电场测量[J]. 高电压技术,2006,32(12):89-91.
SHAO Guiwei,HU Yi,WANG Linong,et al. Measurement of electric field intensity on human-body surface at live working for 1000 kV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering,2006,32(12):89-91.

[3] 胡毅,胡建勋,刘凯,等. 特高压交直流线路带电作业人员的体表场强[J]. 高电压技术,2010,36(1):13-18.
HU Yi,HU Jianxun,LIU Kai,et al. Field strength of body surface during the live working on the UHV AC and DC transmission lines[J]. High Voltage Engineering,2010,36(1):13-18.

[4] 胡毅,王力农,刘凯,等. 1000 kV 交流特高压输电线路带电作业安全防护研究[J]. 高电压技术,2006,32(12):74-77.
HU Yi,WANG Linong,LIU Kai,et al. Research of safety protection for live working on 1000 kV ultra high voltage transmission line[J]. High Voltage Engineering,2006,32(12):74-77.

[5] 王力农,胡毅,邵瑰玮,等. 1000 kV 输电线路带电作业安全距离研究[J]. 高电压技术,2006,32(12):78-81.
WANG Linong,HU Yi,SHAO Guiwei,et al. Research on minimum approach distance for live working on 1000 kV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering,2006,32(12):78-81.

[6] 王力农,胡毅,刘凯,等. 特高压输电线路带电作业组合间隙的放电机理[J]. 高电压技术,2011,37(5):1224-1231.
WANG Linong,HU Yi,LIU Kai,et al. Complex gap discharge mechanism of live working on ultra high voltage transmission lines[J]. High Voltage Engineering,2011,37(5):1224-1231.

[7] 胡毅,王力农,邵瑰玮,等. 750 kV 输电线路带电作业的试验研究[J]. 电网技术,2006,30(2):14-18.
HU Yi,WANG Linong,SHAO Guiwei,et al. An experimental investigation on live line work for 750 kV transmission line[J]. Power System Technology,2006,30(2):14-18.

[8] 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.

[9] 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 Engineering,2009,33(6):107-112.

[10] 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):50-51,60.
- ZHANG Ke,LI Haifeng,WANG Wei. Analysis of helicopter patrol application prospect in China's UHV grid[J]. High Voltage Engineering,2006,32(6):50-51,60.
- [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,2012,70:339-345.
- [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] 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.
- [14] IEEE Task Force 15.07.05.05. Helicopter operator qualifications for line work[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(1):326-332.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 王建国,译. 西安:西安电子科技大学出版社,1998:15-22.
- [20] 国家技术监督局. GB10000—88 中国成年人人体尺寸[S]. 北京:中国标准出版社,1988.

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设备多物理层耦合仿真分析(E-mail:lcnhah@163.com);

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

Approaching paths of helicopter live-line work platform to 1 000 kV UHV AC transmission lines

LIU Chao¹,RUAN Jiangjun¹,LIAO Caibo¹,DU Zhiye¹,ZHOU Taotao¹,PENG Yong²

(1. School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China;

2. China Electric Power Research Institute,Wuhan 430074,China)

Abstract: A HLLWP(Helicopter Live-Line Work Platform) model is established based on the actual parameters of MD500 helicopter and 1 000 kV UHV AC transmission lines with triangular arrangement. The finite element method is adopted to calculate the electric field intensity of HLLWP and operator for different approaching degrees of HLLWP and distances between HLLWP and conductor. The HLLWP approaching paths to the conductor of different phases are proposed with the consideration of operator safety.

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