

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.08.014

基于三维GIS的无人机巡检航迹规划研究

冯智慧^{1,2}, 张雪峰^{1,2}, 方书博^{1,2}, 龚浩^{1,2}, 刘春翔^{1,2}

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 南京 211106; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: 目前多旋翼无人机已在电力系统巡线中得到了广泛应用,结合无人机航迹规划研究现状,提出基于工频电磁场干扰研究的三维GIS无人机巡检航迹规划系统,通过建立导线对无人机工频电场和工频磁场干扰仿真模型,计算工频电磁场对无人机机身及机载设备影响,确定了安全飞行最小安全距离,并以确定的最小安全距离、线路杆塔三维模型及巡检任务相关信息实现在三维GIS上的无人机巡线路径规划、航迹跟踪和手动导航等功能,通过现场实际应用验证了航迹规划对巡检工作的重要性。

关键词: 无人机; 工频电场; 工频磁场; 航迹规划; 三维GIS

Three-dimensional GIS-based Trajectory Planning for UAV

FENG Zhihui^{1,2}, ZHANG Xuefeng^{1,2}, FANG Shubo^{1,2}, GONG Hao^{1,2}, LIU Chunxiang^{1,2}

(1. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: The multi-rotor unmanned aerial vehicles(UAVs)have been widely used in the power system patrol inspection. In this study,a 3D GIS-based patrol trajectory planning system of UAV was proposed based on the electromagnetic field interference researches.The influences of the power frequency electromagnetic field on the UAV fuselage and airborne equipment were calculated,and the minimum safe flight distance was determined. The minimum safe distance,the 3D line tower model and the patrol task related information were used to realize 3D GIS-based UAV patrol trajectory planning,trajectory tracking,and manual navigation.Practical application verified the importance of the trajectory planning to the patrol inspection.

Key words: unmanned aerial vehicle(UAV); power frequency electric field; power frequency magnetic field; trajectory planning; 3D GIS

0 引言

中国幅员辽阔、地形类型及山脉走向多样,输电线路作为电网的重要组成部分,途径地理位置复杂多变,且近年来受厄尔尼诺现象影响及全球气候变暖,各种自然灾害频发给输电运行维护工作带来极大的不便。传统的人工巡检方式由于受人员自身素质、外部自然环境等多重因素影响,存在巡检效率低、易发生人身事故、仅能在线路下方巡检发现缺陷等弊端。为了提高输电线路巡检工作效率和水平,随着科技水平的发展,无人机作为新兴的巡检

手段,已广泛引入到输电线路日常巡检工作中。目前,无人机巡检主要包括大中型无人机、固定翼无人机和多旋翼无人机,由于多旋翼无人机具备空中定点悬停、价格便宜、起降场地要求较低、运行风险低、易操控、携带方便等特点,已作为新的巡检方法与手段得到大规模应用^[1-2]。

无人机巡检作为智能化机器巡检的重要技术手段,已在电力系统开展了较多应用,但目前多旋翼无人机巡检的精细化水平不高,巡检的实用性和适应性还有较大的提升空间,现场巡检时航迹规划和路径跟踪大多仅基于杆塔经纬度进行人工经验判断和飞行,极易造成无人机碰线、撞塔等安全事

收稿日期:2017-03-02; 修回日期:2017-05-15

基金项目:2014年国家电网公司发展项目(169)。

Project Supported by 2014 Development Project of National Grid(169).

故。文中结合目前无人机航迹规划和路径跟踪现状,通过对典型线路建模分析工频电磁场对无人机影像分布情况,结合实际飞行经验,提出以三维GIS为载体的无人机最小安全距离路径规划方法和系统,为多旋翼无人机在电力线路巡视和小范围通道巡查提供了有力的辅助工具^[3-4]。

1 国内外研究现状

在无人机航迹规划研究方面,美国处于世界领先水平,典型的有美国自动航迹规划模块(ARM),在对无人机输入相关参数后实现航迹的规划以及姿态分析。波音公司开发了航迹规划与任务载荷集成在一起的任务规划系统,具有任务、载荷、数据的分析和处理以及图像采集和分析等多种功能。目前这些无人机航迹规划成果已广泛应用于不同领域。除美国以外,英国、法国等发达国家也形成了完善的任务航迹规划系统。国外在无人机航迹规划研究方面已积累了大量的经验,航迹规划系统能够实现特定任务及规定时间内航迹预判、规划^[5-6]。

国内对于无人机航迹规划的研究工作起步较晚,主要集中在科研院所和高校研究,包括北京航空航天大学、西北工业大学等,已经取得了一定的成果。目前国内具有代表性的航迹规划软件有北京大学开发的“航空遥感任务规划、检测与评估一体化系统”、西北工业大学无人机特种技术国家重点实验室开发的航迹规划与导航监控于一体的无人机导航监控系统、大连理工大学开发的具有航迹规划、数据回放以及监控多种功能的无人机导航监控系统^[6]。

由于目前研究的无人机航迹规划算法大多应用于军事领域,面临战场环境十分复杂,约束条件多,主要包括数学归纳法、遗传算法、蚁群算法、A*算法等,这些算法对于电力系统巡线的多旋翼无人机航迹规划来说过于复杂、参数较多、约束条件繁多。由于输电线路巡检无人机主要作业对象为高压输电线路及其沿途杆塔,虽不存在无人机隐蔽性需求,但需要在满足安全距离的前提下,尽可能地贴近输电线路兴趣点进行观察作业。因此需要研究适用于电力巡检的多旋翼无人机航迹规划方法,满足在安全距离条件下,最大程度的通过无人机可见光、红外等机载设备发现线路缺陷和故障隐患点,在确保无人机巡检作业安全的同时下保证巡线效果的最大化^[6-7]。

2 电磁干扰仿真模型计算分析

2.1 仿真模型参数

1)无人机参数。选取一款高压输电线路巡检最

常用的六旋翼无人机,翼长为950 mm,旋翼沿圆周面均匀分布;电机轴距为950 mm;机身高度为300 mm;机身直径为760 mm,使用Ansys建立二维俯视截面模型见图1。

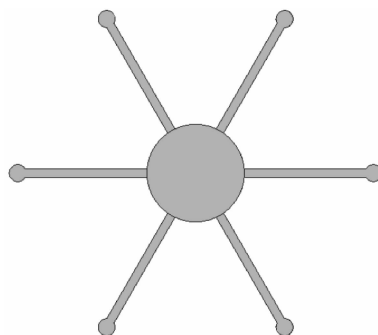


图1 六旋翼无人机飞行俯视平面图

Fig. 1 The six rotor UAV flight plan view

2)导线参数。选取500 kV交流输电线路常用4分裂导线,型号LGJ-630/45,分裂半径400 mm,子导线正四边形排列,分裂导线等效半径101.5 mm,仿真导线长度6.7 m,为了防止导线端部电场畸变,在端部加均压球,导线与无人机俯视平面平齐,两者位置关系见图2。

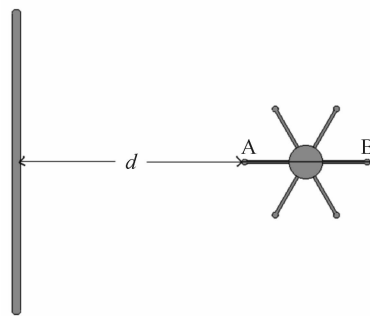


图2 无人机与等效单根导线位置关系图

Fig. 2 The relationship between UAV and the equivalent single conductor location

2.2 电场仿真

按照最严重的情况加载电压激励,即边相导线加载幅值 $1.05 \times 500 \times \sqrt{2} / \sqrt{3}$ kV,初相位为 0° ,无人机机身采用电压耦合方法处理,左侧靠近杆塔外包空气加载0电位,其余加载无限远处电位,调节无人机飞行时距离导线的距离分别为3、5、7、10 m,计算结果见表1。由于几种距离下仿真结果相似,选取 d 为5 m时的电磁场分布云图及曲线。无人机机身及近层外包空气仿真结果见图3、4^[8-9],沿图2中A→B路径电场分布曲线见图5,电场随距离变化曲线见图6。

由图3、4可知,无人机本体电场最大值出现在最靠近导线侧的旋翼末端与空气接触处,最大值为

表 1 几种距离下无人机表面最大电场计算值

Table 1 Calculation of the maximum electric field of the UAV under some distance

距离/m	电场强度/(kV·m ⁻¹)
3	36.256
5	25.856
7	19.418
10	12.536

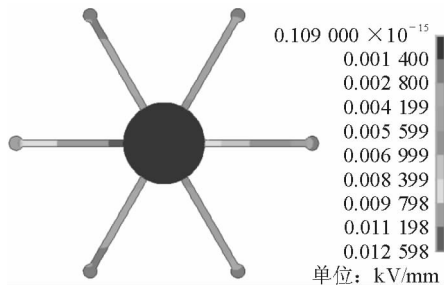


图 3 无人机本体电场分布

Fig. 3 The distribution of the electric field of UAV

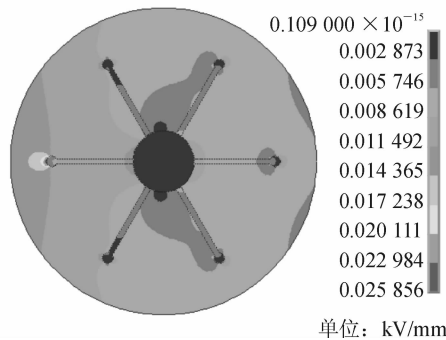


图 4 无人机及近层外包空气电场分布图

Fig. 4 UAV and air electric field distribution chart of the near layer

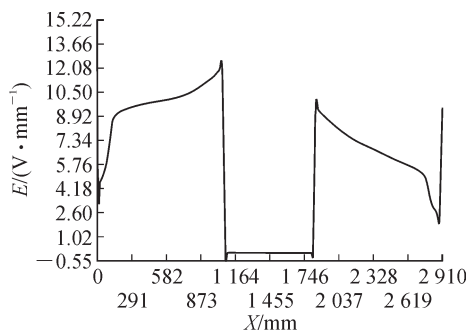


图 5 沿图 2 中 A→B 路径电场分布曲线

Fig. 5 The electric field distribution curves of A→B in the Fig. 2

25.85 kV/m。沿 A→B 直线路径上,旋翼与空气、本体连接处电场发生畸变,主要是材料的介电常数不同和接触处形状变化造成,畸变处电场最大值为 15.22 kV/m。当无人机飞行范围内电场强度阈值确定后,可由图 6 所示曲线确定无人机初步安全飞行距离。

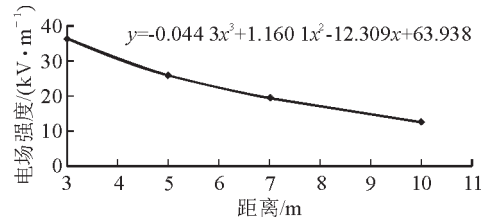


图 6 电场随距离变化曲线

Fig. 6 Variation curve of power frequency electric field

经计算分析,导线表面的起晕电场约为 25 kV/cm,远大于无人机表面的最大电场强度值,因此输电线路对无人机机身及机载设备工频电场干扰可忽略不计^[6-7]。

2.3 磁场仿真

按照铝绞线最大负荷利用小时数 5 000 h 以上,对导线加载经济电流密度激励 0.9 A/mm²,最外层外包空气加载无限远处磁位标志。几种距离下无人机表面最大磁场计算值见表 2,无人机本体及近层外包空气仿真结果见图 7、8,沿图 2 中 A→B 路径磁场分布曲线见图 9,磁场随距离变化曲线见图 10。

表 2 几种距离下无人机表面最大磁场计算值

Table 2 Calculation of the maximum magnetic field of the UAV under some distance

距离/m	磁场强度/(A·m ⁻¹)
1	161.931
2	111.881
3	76.184
5	37.951
7	27.448
10	20.419

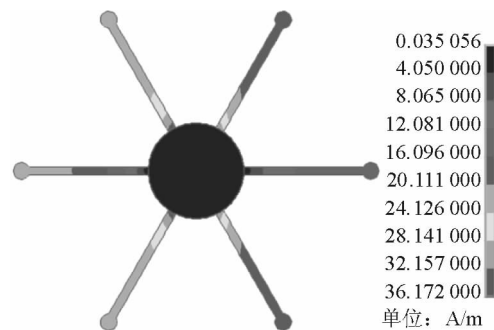


图 7 无人机本体磁场分布图

Fig. 7 The distribution of the magnetic field of UAV

由图 7、8 可知,磁场强度主要分布在无人机机身周围,最大值为 37.951 A/m。沿 A→B 直线路径上,磁场强度在旋翼与本体接触处发生畸变,主要是两者材料的磁导率差别较大,本体为导磁性材料,通量较大。当无人机飞行范围内磁场强度阈值

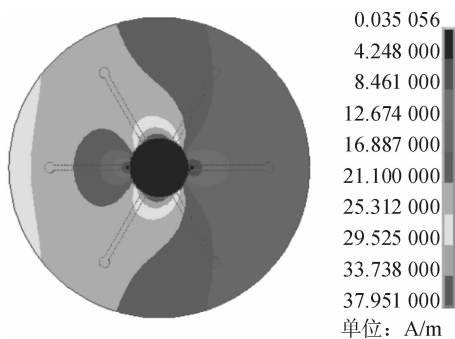


图8 无人机及近层外包空气磁场分布图

Fig. 8 UAV and air magnetic field distribution chart of the near layer

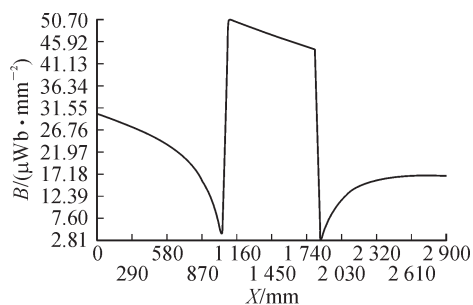


图9 沿图2中A→B路径磁场分布曲线

Fig. 9 The magnetic field distribution curves of A→B in the Fig. 2

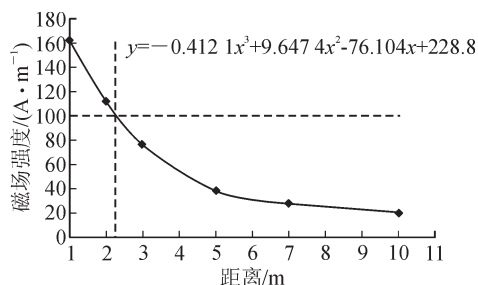


图10 磁场随距离变化曲线

Fig. 10 Variation curve of power frequency magnetic field

确定后,可由图10所示曲线确定无人机初步安全飞行距离。根据电磁场距离的最小值确定安全飞行距离^[10-13]。

按照 GB/T 17626.8—1998《电磁兼容 试验和测量技术 工频磁场抗干扰试验》中要求规定:磁场强度 100 A/m,设备能正常工作。结合工频磁场仿真模型计算,当磁场强度 $H=100$ A/m 时,无人机距离导线距离 $x \approx 2.25$ m,因此考虑到工频磁场对无人机干扰的影响,其最小距离应保持在 2.25 m 高度飞行。

由于无人机巡检工作中容易受外界风速、降雨等环境影响,会造成机体的抖动、偏移等现象,为了确保飞行的安全性,需在计算确定的最小安全距离基础上设置一定的高度裕度 Δx (取值范围为 3~8 m)^[14-15]。

3 基于三维 GIS 的航迹规划

3.1 基于三维 GIS 的线路建模

线路和杆塔的三维建模为无人机航迹规划的基础,在航迹规划前需要根据杆塔类型、杆塔相关信息(塔高、高程、经度、纬度)来建立杆塔的三维模型,根据线路的电压等级等标准来建立线路的三维模型。

输电线路杆塔三维模型构建包括模型解析、塔身模型建立、数据标准化以及精细化杆塔模型。

1)模型解析。通过读取杆塔相关信息数据,对数据进行解析处理计算,并转换存储塔身模型建立所需要的数据。

2)塔身模型建立。根据模型解析获取的数据构建三维杆塔塔身模型,并可对塔身模型进行编辑处理。

3)数据标准化。将解析出的模型数据存储为特定、标准化类型的数据,用于三维 GIS 平台对三维杆塔模型的加载和处理。

4)精细化杆塔模型。精细化模型主要是通过前三步建立的初步模型配置高低腿和组装杆塔模型,通过对杆塔的塔腿的长度进行设置,将解析建立的杆塔的塔身模型和塔腿模型进行组装形成完整的杆塔模型,见图 11、12 所示的双回直线塔三维模型、双回耐张塔三维模型^[15-17]。



图11 双回直线塔三维模型

Fig. 11 The 3D model of double circuit tangent tower

输电线路三维模型建立主要按照不同的电压等级和导线弧垂高度计算两两连接相邻杆塔,线路三维建模场景见图 13。

3.2 航迹规划

文中提出以三维地图为背景设计无人机地面导航监控软件,依据工频电磁场干扰对无人机的影响分析结果,通过确定的最小安全裕度,实现三维

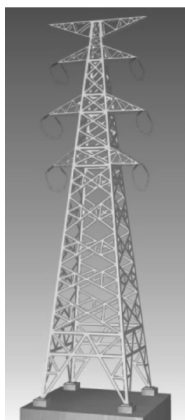


图 12 双回耐张塔三维模型

Fig. 12 The 3D model of double circuit strain tower



图 13 线路三维建模场景图

Fig. 13 The scene graph of line 3D model

航路的规划、生成和执行。

航迹规划是在综合考虑油量消耗、飞行区域、障碍物等因素的前提下,依据无人机机体参数、规划杆塔起点、杆塔终点信息,为无人机规划一条最优航迹,以保证无人机顺利、安全的完成线路巡检任务^[15,18-19]。

航迹规划功能模块主要包括:自动规划、航迹管理、地图展示、航迹跟踪和手动导航。

1)自动规划。自动规划主要是根据巡检线路的杆塔起点和终点三维坐标、无人机距导线的最小安全距离和安全裕度生成三维航线,以某 500 kV 11-13 号杆塔巡视为例,最小距离 2.25 m,安全高度裕度为 7.5 m,设置距离导线飞行高度为 9.75 m,航迹规划参数设置见图 14,三维 GIS 地图上自动生成的飞行航迹见图 15。

2)航迹管理。根据实际巡检任务、起终点位置、起飞区域、障碍物、关键航点等信息,结合自动规划路径可进行人工干预动态局部调整航迹,以确定最终航迹。

3)地图展示。实现加载基于虚拟视景的三维 GIS 地图,能够对电子地图进行缩放、空间测量、漫游、图层编辑、定位等功能。

4)航迹跟踪。无人机采集的飞行姿态和位置信



图 14 航迹规划参数设置

Fig. 14 The parameters of trajectory planning



图 15 自动生成航迹

Fig. 15 Automatic generation of trajectory planning

息,包括偏航角、俯仰角、经度、纬度、高度等信息,经过数据链路以预定格式发送给地面站,存储在数据库中,以航迹点形式展示在三维 GIS 地图上,实现实时航迹跟踪和历史航迹回放,实时航迹跟踪见图 16。

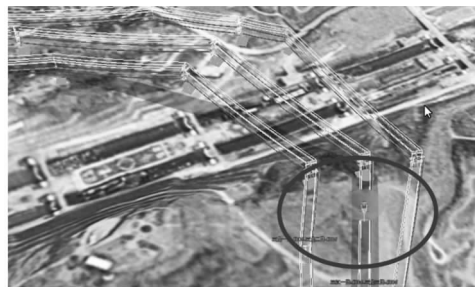


图 16 无人机航迹实时跟踪

Fig. 16 UAV track real-time tracking

5)手动导航。当无人机临时接收巡检任务或遇到突然障碍物时,地面人员可通过监控系统上的三维 GIS 地图进行航迹手动导航,控制无人机的自主飞行,从而确保巡检任务的安全性。

目前基于三维 GIS 的线路航迹规划系统已在国内某省运检公司应用,以最小安全距离、安全裕度、巡线任务信息等为基础信息构建的线路航迹规划为线路安全巡检提供了有力的支撑,大大减轻了无人机操控手的工作,应用效果良好。

4 结语

文中以某 500 kV 输电线路为例, 计算分析得到线路对无人机机身及机载设备工频电场干扰可忽略不计, 工频磁场存在一定的影响, 确定了无人机巡线时最小安全距离和裕度, 并通过对线路杆塔三维建模, 实现基于三维 GIS 的无人机航迹规划。文中仅对工频电场和工频磁场影响分析, 但后续需要依据天气、地理位置等多方面因素完善航迹规划方法。

参考文献:

- [1] 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]. Electrical Equipment, 2006, 7(3): 41-45.
- [2] 林志和. 超高压输电线路采用直升机巡线的探讨[J]. 福建电力与电工, 2004, 24(4): 16-18.
LIN Zhihe. The discuss of EHV electric power transmission line helicopter patrol inspection[J]. Fujian Power and Electrical Engineering, 2004, 24(4): 16-18.
- [3] 于德明, 武艺, 陈方东, 等. 直升机在特高压交流输电线路巡视中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 29-32.
YU Deming, WU Yi, CHEN Fangdong, et al. Application of helicopter patrol technology in UHV AC transmission line [J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 29-32.
- [4] 胡毅. 输电线路运行故障的分析与防治[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 1-8.
HU Yi. Analysis on operation faults of transmission line and countermeasures [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 1-8.
- [5] JONES D I. An experimental power pick-up mechanism for an electrically driven UAV[C]//Industrial Electronics. [S.l.]: IEEE Internation Symposium, 2007: 2033-2038.
- [6] YOO Changsun, AHN I. Low cost GPS/INS sensor fusion system for UAV navigation[C]//Proceeding of IEEE Digital Avionics Systems Conference. Indianapolis: IEEE, 2003: 11-19.
- [7] 张柯, 周朝阳, 李海峰, 等. 直升机作业在我国特高压电网中的应用前景分析[J]. 河南电力, 2006, 34(1): 18-19.
ZHANG Ke, ZHOU Chaoyang, LI Haifeng, et al. Analysis on helicopter patrol application prospect in China's UHV grid[J]. Henan Electric Power, 2006, 34(1): 18-19.
- [8] 张涛, 陈亚洲, 田庆民, 等. 某型无人机数据链系统超宽带辐照效应[J]. 高压电器, 2013, 49(8): 21-25.
ZHANG Tao, CHEN Yazhou, TIAN Qingmin, et al. UWB radiation effects on UAV data link system[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 21-25.
- [9] 许丹, 马星河, 王晨辉, 等. 500 kV 输电线路电场强度测量与计算分析[J]. 高压电器, 2013, 49(7): 25-28.
XU Dan, MA Xinghe, WANG Chenhui, et al. Electric field measurement and computational analysis on 500 kV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7): 25-28.
- [10] 程炜, 刘黎刚, 张艳芳, 等. 特高压输电线路工频电场的数值仿真研究[J]. 高压电器, 2012, 48(2): 1-6.
CHENG Wei, LIU Ligang, ZHANG Yanfang, et al. Numerical simulation study on power frequency electric field of UHV AC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2): 1-6.
- [11] 王尔申, 胡青, 张淑芳. 基于 GPRS 和 GPS 船载终端系统的电磁兼容设计[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(3): 524-529.
WANG Ershen, HU Qing, ZHANG Shufang. Electromagnetic compatibility design of terminal system for ship based on GPRS and GPS[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(3): 524-529.
- [12] 赵翌池, 宋祖勋. 无人机机载通信设备间的射频电磁兼容预测分析[J]. 计算机与现代化, 2012, 6(2): 5-8.
ZHAO Yichi, SONG Zuxun. Analysis of RF electromagnetic compatibility prediction among UAV airborne communication equipments[J]. Computer and Modernization, 2012, 6(2): 5-8.
- [13] 陈西光, 董昱, 王滨海, 等. 固定翼无人机巡检输电线路探讨[J]. 山东电力技术, 2011(5): 1-5.
CHEN Xiguang, DONG Gang, WANG Binhai, et al. Discussion on transmission line inspection with unmanned fixed-wings aircraft [J]. Shandong Electric Power, 2011(5): 1-5.
- [14] 林韩, 林朝辉, 汤明文, 等. 电力输电线路无人直升机巡视的应用[J]. 华东电力, 2011, 39(10): 1657-1660.
LIN Han, LIN Chaohui, TANG Mingwen, et al. Application of unmanned helicopter patrol to power transmission line [J]. East China Electric Power, 2011, 39(10): 1657-1660.
- [15] 刘莉, 于成龙, 王祝, 等. 小型无人机快速三维航迹规划方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(12): 2521-2526.
LIU Li, YU Chenglong, WANG Zhu, et al. Fast 3 droute planning method for small UAV [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(12): 2521-2526.
- [16] SAMAR R, KAMAL W A. Optimal path computation for autonomous aerial vehicles[J]. Cognitive Computation, 2012, 4(4): 515-525.
- [17] 汤明文, 戴礼豪, 林朝辉, 等. 无人机在电力线路巡视中的应用[J]. 中国电力, 2013, 46(3): 35-38.
TANG Mingwen, DAI Lihao, LIN Chaohui, et al. Application of unmanned aerial vehicle in inspecting transmission lines[J]. Electric Power, 2013, 46(3): 35-38.

(下转第 93 页)

- versity of Posts and Telecommunications, 2007(2):11-14.
- [10] 孙治伟, 孙汉旭, 贾庆轩, 等. 一种具有爬坡能力的球形机器人运动分析[J]. 机器人, 2012, 34(2): 152-158.
SUN Zhiwei, SUN Hanxu, JIA Qingxuan, et al. One kind of robot motion analysis of spherical robot with climbing ability[J]. Robot, 2012, 34(2): 152-158.
- [11] BUEHRINGER M, BERCHTOLD J, BUCHEL M, et al. Cable-crawler-robot for the inspection of high-voltage power lines that can passively roll over mast tops[J]. Industrial Robot-an International Journal, 2010, 37(3): 256-262.
- [12] ALUTEI A, TATAR M O, CIREBEA C. Model and test of a modular inspection robotic system[J]. Mechanika, 2010, 84(4): 58-61.
- [13] FUNG E, WONG Y K, ZHANG X Z, et al. Fuzzy logic control of a novel robotic hanger for garment inspection: Modeling, simulation and experimental implementation[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(8): 9924-9938.
- [14] 岳明, 邓宗全. 球形机器人爬坡状态下动力学建模及最优控制器设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 52-57.
YUE Ming, DENG Zongquan. Dynamic modeling and optimal controller design of spherical robot climbing state[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(11): 52-57.
- [15] 焦震, 高海波, 邓宗全, 等. 基于地面力学的月球车爬坡轮-地相互作用模型[J]. 机器人, 2010, 32(1): 70-76.
JIAO Zhen, GAO Haiibo, DENG Zongquan, et al. Ground interaction model of lunar rover climbing wheel based on ground mechanics[J]. Robot, 2010, 32(1): 70-76.
- [16] 朱兴龙, 王洪光, 房立金, 等. 输电线带电巡检机器人行走动力特性与位姿分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42(12): 143-150.
ZHU Xinglong, WANG Hongguang, FANG Lijin, et al. Dynamic characteristics and pose analysis of the walking force of the electric patrol robot for transmission line[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12): 143-150.
- [17] KATRASNIK J, PERCUS F, LIKAR B. A survey of Mobile robots for distribution power line inspection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 485-493.
- [18] 宋树伟, 阮毅, 李正. 基于多传感器的超高压输电线路巡检机器人越障控制[J]. 机床与液压, 2013(7): 51-54.
SONG Shuwei, RUAN Yi, LI Zheng. Based on multi sensor of EHV power transmission line inspection robot obstacle navigation control[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013(7): 51-54.
- [19] 姜生元, 任立敏, 焦宏章, 等. 吊臂式巡线机器人悬吊姿态自平衡机构的研究[J]. 机械设计, 2011, 28(1): 49-53.
JIANG Shengyuan, REN Limin, JIAO Hongzhang, et al. Research on the suspension attitude self balancing mechanism of the boom type patrol robot[J]. Mechanical Design, 2011, 28(1): 49-53.
- [20] 吴功平, 肖晓晖, 肖华, 等. 架空高压输电线路巡线机器人样机研制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 90-93.
WU Gongping, XIAO Xiaohui, XIAO Hua, et al. Development of aerial high voltage transmission line inspection robot prototype[J]. Power System Automation, 2006, 30(13): 90-93.

严宇(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为带电检修机器人。

牛捷(1970—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为带电作业方法。

(上接第 86 页)

- [18] 王振华, 黄宵宁, 梁焜, 等. 基于四旋翼无人机的输电线路巡检系统研究[J]. 中国电力, 2012, 45(10): 59-62.
WANG Zhenhua, HUANG Xiaoning, LIANG Kun, et al. Study on the transmission line inspection system based on quadrotor UAVs[J]. Electric Power, 2012, 45(10): 59-62.
- [19] MIURA J. Support vector path planning[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. [S.l.]: IEEE, 2006: 2894-2899.

冯智慧(1990—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事输电线路智能运维及电磁环境研究。