

Comparison of Several Methods of Transmission Line Inspection

—Analysis of Advantage of Unmanned Helicopter Inspection

Minxiang Yang¹, Wei Song¹, Xuesong Zhao¹, Guoliang Zhang¹, Yang Liu², Dawei Yang³, Ting Mao¹, Xinchang Huo²

¹State Grid Jibei Maintenance Company, Beijing

²State Grid Material Limited Company, Beijing

³State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing

Email: yymx142622@163.com

Received: Jun. 9th, 2015; accepted: Jun. 27th, 2015; published: Jun. 30th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Now, artificial inspection takes up resources of humans. This method of inspection is inefficient and takes long times. Meanwhile, manned helicopter has been used for inspection in some areas. Although this inspection method is more efficient than the first one in single inspection, its inspection efficiency in one year is very low. It is because of high cost, low attendance and so on. Unmanned patrol helicopter has advantages of high mobility, low cost and high attendance. In this paper, by means of analyzing technology, economics, efficiency, policy, management and other aspects, the advantages and the disadvantages of these forms of transmission line inspection are introduced. For rational allocation of resources and improvement of the inspection efficiency, the transmission line inspection program of “unmanned helicopter-based inspection, supplemented by manual inspection” is put forward.

Keywords

Artificial Inspection, Transmission Line Inspection, Helicopter Inspection, Unmanned Helicopter Inspection, Inspection, Comparison of Advantages

几种输电线路巡检方式的比较

——浅析无人直升机巡检的优势

杨敏祥¹, 宋 巍¹, 赵雪松¹, 张国亮¹, 刘 阳², 杨大伟³, 毛 婷¹, 霍新长²

¹国网冀北检修公司, 北京

²国网物资有限公司, 北京

³国网冀北电力有限公司, 北京

Email: yymx142622@163.com

收稿日期: 2015年6月9日; 录用日期: 2015年6月27日; 发布日期: 2015年6月30日

摘要

目前电力系统中普遍采用的人工巡检方式人员劳动量大、巡检周期长、效率低下, 部分地区采用的载人直升机巡检虽然单次巡检效率较高, 但因成本高昂、出勤率低等因素, 致使其年巡检效率不高, 无人直升机巡检具有机动性强、成本低、出勤率高等优势, 本文从技术、经济、效率、政策与管理等多个层面分析了这几种输电线路巡检方式的优缺点, 提出了“以无人直升机巡检为主, 人工巡检为辅”的输电线路巡检方案, 以期合理配置资源、提高巡检效率。

关键词

人工巡检, 线路巡检, 直升机巡检, 无人直升机巡检, 巡检, 优势比较

1. 引言

近年来, 我国国民经济的高速发展对我国电力工业提出了越来越高的要求, 截至 2008 年 110 kV 以上输电线路已达到近 51.4 万 km [1], 未来特高压电网也将覆盖全国[2]。由于输电线路分布点多、面广, 绝大部分远离城镇, 所处地形复杂, 自然环境恶劣, 且电力线及杆塔附件长期暴露于野外, 会持续地受到机械张力、电气闪络、材料老化的影响而产生断股、磨损、腐蚀等损伤; 输电线路走廊的树木生长情况、是否有违章建筑等情况也必须及时掌握。因此, 对输电线路进行定期巡视检查, 随时掌握和了解输电线路的运行情况以及线路周围环境和线路保护区的变化情况, 是供电部门一项繁重的日常工作。

目前我国普遍的输电线路巡检方式均为人工巡检, 由巡检人员通过目视或者登塔作业对输配电线路进行巡检, 这种巡检方式在一些条件恶劣如跨江跨河或高山峻岭地区难度很大, 不仅劳动强度大、工作条件艰苦[3], 而且由于人员素质参差不齐, 漏检误检事件时有发生, 使得巡检效率极其低下。在过去的十年中, 我国的部分供电部门开展了载人直升机巡检项目[4] [5], 这种巡检方式迅速快捷、工作效率高、不受地域影响、巡视质量高、巡视安全性高[6], 但由于民用航空空域使用权协调困难[6], 使我国目前载人直升机巡检出勤率较低, 致使年巡检效率低下, 很难达到电力部门 12 次/年的巡检要求[7], 昂贵的直升机使用、维护成本和飞行之前复杂的审批程序等诸多问题限制了这一巡检方式的大力推广。因此, 电力部门急需一种成本低、周期短、机动性强、效率高的巡检方式, 无人驾驶直升飞机(简称无人直升机)进入了人们的视野。

2. 技术分析

正常巡视是输电线路日常运行维护最为主要的工作, 按规程规定, 正常巡视一般每月一次, 除此之外, 还有特殊巡视、夜间巡视、故障巡视, 有些单位在迎峰度夏等特殊时间还增加巡视次数[5]。

2.1. 人工巡检方式

人工巡检方式是一种传统的巡检方式, 是目前输电线路巡检的主要方式, 巡检人员行进于线路走廊

内，到达杆位后在杆塔下使用望远镜和手持红外检测仪器，自下而上地对杆塔进行巡视，或者登上铁塔采用电场检测仪等设备对绝缘子进行检测[8]。

优点：巡检人员到达现场，可以对输电线路隐患和缺陷进行近距离观察，能够得到输电线路的准确运行状态；比较容易发现杆塔塔基缺陷、塔材丢失等隐患[8]；在城市、乡镇、公路等人员、车辆容易到达的地区，输电线路人工巡检方式是发现缺陷、保障输电线路安全运行的主要手段。

缺点：这种巡检方式存在着不能保证巡检人员到位及对缺陷的描述不准确或不规范等问题[9]。由于输电线路走廊地形环境复杂，沿线部分区段几乎没有巡视道路，传统的人工巡检方式，随着电压等级的提高、输电线路的增长，其巡检时间、巡视费用和劳动强度必将大幅度增加，但巡检效率得不到明显改善。从文献[10]的报道中便可看到人工巡检的艰辛和面临的巨大挑战。

2.2. 载人直升机巡检方式

直升机巡检是指巡检人员利用直升机作为平台，使用可见光及红外热像仪等巡检设备对输电线路进行巡视检查的一种全新巡检技术[11]。

从国内外的直升机巡检应用情况来看，主要技术优势有以下几点[6] [11]-[13]。

(1) 迅速快捷、工作效率高。正常的直升机巡检速度在 20~40 km/h，是人工效率的几十倍，即使在夏季迎峰度夏前、冬季污闪前的集中巡视和故障巡视下进行的精细作业方式，直升机巡视速度也有 6~8 km/h，因此直升机巡检方式具有迅速快捷、工作效率高的特点。

(2) 不受地域影响。直升机可以方便地穿山越岭，跨林区沼泽湖泊，在输电线路的巡视路线上不受地域限制。

(3) 巡检质量高。目前直升机上都配备了先进的巡检设备，并且可以近距离地接近输电线路，这样就可以方便有效地发现输电线路导线断股断线、金具松动发热、绝缘子损坏等缺陷；另外还可以利用先进的三维扫描仪进行输电线路走廊的三维扫描，全面地观察线路走廊内妨碍输电线路运行的一些障碍物，为输电线路的设计和运行维护提供重要参考。

(4) 巡检安全性高。输电线路杆塔高度一般都在几十米，特高压杆塔高度达到一百米以上，人工登杆近距离观察危险性很高，直升机巡视可以避免这种登高作业。而且目前巡检用的轻型直升机可靠性很高，国外应用很广泛，事故发生率极低。

虽然载人直升机是一种优良的空中平台，但在技术方面也存在一定问题。

(1) 直升机电力巡检是超低空贴近杆塔及导线的精确慢速飞行，飞行区域属常规回避飞行区域[12] [14]。在机载人员对输电线路进行巡检时，为了获得良好的巡检效果，直升机距离导线或杆塔的距离一般应在 15~25 m 之间[4] [12] [14]。这对飞行员来说无论是技术上还是心理上都会形成巨大的心理压力，同时也为输电线路安全运行埋下了隐患。

(2) 目前电力巡检使用的载人直升机续航能力在 500~600 km，加上来回航程和工作油耗，巡检半径在 200 km 左右，对于特高压线路的长度来说，这是远远不够，而输电线路一般距离机场较远，因此需要在输电线路附近设立临时起降点[12]。

(3) 就直升机的带电作业性能来讲，目前国际权威机构认可，通过等电位充电试验和过电压工频闪络放电试验，可以进行带电作业的机型只有贝尔 206 系列和 MD500E 系列[12] [13]，可带电作业机型的选择范围有一定的局限性。

2.3. 无人直升机巡检方式

无人直升机巡检是空气动力学、机械设计、飞行控制、目标识别、高电压技术、电磁兼容、遥感、

遥测等多学科相互交叉的一种新型巡检技术，虽然目前还处于试验和探索阶段，但已有多家单位开始进行有益的尝试。最早利用无人直升机巡检的是英国威尔士大学和英国 EA 电力咨询公司[15] [16]，日本中国电力公司和 HILOBO 公司及千叶大学野波研究室于 2005 年共同开发了“利用无人驾驶直升飞机的输电线巡检系统”[17]，国内近年来也陆续开展了无人巡检直升机的相关研究，福建省电力公司、青海省电力公司等单位已相继开展了无人直升机巡检的相关实验研究并积累了宝贵的经验[18]-[21]。

从技术角度看，无人直升机用于输电线路巡检具有如下优势：

(1) 无人直升机与载人直升机一样，能够向任意方向飞行，可悬停对预定目标进行定点监视，具有迅速快捷、工作效率高，不受地域影响的优点。

(2) 在巡检安全性方面，无人直升机不仅避免了登高作业，还避免了人员飞上高空，避免因飞机故障造成的人员安全事故[22]。

(3) 机动性和灵活性强，无人直升机对起飞着陆场地要求低，不用专门设立临时起降点，基本可以随处起飞、随处降落，地面设备简单，架设和撤收时间短。

(4) 随着飞行控制技术和定位技术的不断发展，无人直升机可以实现自动驾驶和空中定点悬停，能够按照预先规划对复杂线路进行沿线巡检，对疑似故障点进行定点检测。

(5) 机型选择范围广，巡检部门可以根据不同重量的巡检设备和巡检范围，选择不同载重量和续航时间的无人直升机机型；

无人直升机由于机体的限制，一般续航能力在 1~1.5 h，载重量在 10~30 kg 不等，但这并不影响它优越的技术性能。

3. 经济及效率分析

除了技术上满足要求，经济性能是评价巡检方式实用性的一个重要指标。本文对几种巡检方式所做的经济分析，只包含人工成本及飞机使用费用，而不包括便携式或机载检测设备的费用，见表 1。

3.1. 人工巡检

以 500 kV 为例，目前我国常规人工巡检方式 12 次/a 的分摊费用约 0.5 万元/km [23]，该费用额随地区略有差异，1000 km 线路的年运行维护费约 600 万元，在效率方面，人工巡检需要动用大量的人力物力，巡检周期长、效率低。

3.2. 载人直升机

按照国内几家从事直升机电力作业的航空公司的综合平均报价，直升机巡检费用 1 万元/h，另加电力部门工作费用 0.1 万元/h，共计 1.1 万元/h [23]。按每年细致巡检一次、航速 8 km/h，正常巡检 11 次、航速 30 km/h，巡检总费用约 540 万元/(1000 km·a)，比常规巡检降低费用 60 多万元[6]。然而，并不是所有的地区都有能够提供这种服务的航空公司，若租用外地的直升飞机，费用将会增加很多。如果采用电力部门自购直升机的方式，购买、维护、保养以及驾驶员聘用又将是一大笔巨大的开支。可见，载人直升机在经济性方面的优势并不是十分突出。

而在效率方面，载人直升机巡检的优势是十分明显的，直升机上可以搭载多种监测设备，除飞行驾驶员以外，只需要 2~3 名技术人员便可进行输电线路巡检；但它在出勤效率方面却很难令人满意，如华北电网 2002 年使用载人直升机巡检姜顺线、绥姜线时，一年中仅巡视了 4 次[5]。

3.3. 无人直升机

无人直升机巡检由于载重量的限制，不能像载人直升机一样搭载多种巡检设备，发现疑似故障点时，

Table 1. Comparison of economy and efficiency

表 1. 经济性与效率对比表

巡检方式	成本[万元/(1000 km·a)]			巡检效率			直升机所有权
	人员成本	直升机成本	总成本	单次巡检效率	出勤率	年巡检效率	
人工巡检	600	—	600	低	高	低	—
载人直升机巡检	59	491	540	高	低	低	航空公司
无人直升机巡检	300	34.6	334.6	高	高	高	电力部门

可能需要降落直升机，更换其他设备进行复检；从人员配置上来看，同样需要 3~4 人，但无需专业的直升机驾驶员，人员培训费用将大大降低。无人直升机由于良好的机动性和灵活性，使其出勤率远高于载人直升机，只要天气条件允许，随时可以升空巡检。

一架机身 2 m 长左右的小型无人巡检直升机，按照 8 元/L 的油价、4 L 的油箱计算，采用细致巡检 8 km/h 的航速，每箱油巡检半径 4 km、巡检时间 1 h，1000 km 的油耗成本为 0.8 万元，加上电力部门工作费用 0.1 万元/h，巡检总成本为 309.6 万元/(1000 km·a)，计及无人直升机 25 万左右成本之后，无人直升机直接消耗的费用仍远低于载人直升机。

电力部门无人直升机的持有成本远低于载人直升机，人员培训、设备维护方面的优势为将来无人直升机在电力系统中的大规模配置提供了可能。这一点是载人直升机无法比拟的巨大优势。

4. 政策与管理分析

4.1. 人工巡检

人工巡检是电力部门长期以来使用的一种输电线路巡检方式，由于人员流动量大、人员素质参差不齐，不仅管理费用高，而且管理不便。目前我国大部分地区，人工巡检仍然是最主要的巡检方式，在未来，即使大规模普及了直升机、机器人巡检，人工干预以及人工现场复检都是不可或缺的。

4.2. 载人直升机巡检

经过华北、东北、西南等地区载人直升机巡检输电线路的长期摸索，我国在载人直升机巡检管理方面取得了很大进展。

华北电网公司提出了飞行巡线作业方法和作业流程、安全问题、飞行气象条件和限制等诸多方面的要求[4] [5]；云南电网公司提出了《直升机电力巡线导则》、《直升机电力巡线管理办法》、《直升机电力巡线作业指导书》、《直升机电力巡线作业警示引导标志牌制作安装标准》、《直升机巡线设备管理制度》、《直升机巡线人员管理制度》、《直升机巡线资料管理办法》等一系列的直升机巡检的管理制度[12] [13]，为载人直升机巡检的科学管理和安全高效运行提供了制度保障。

然而，一个制约直升机巡检迅速普及的因素不得不提，即空域权的问题。首先，载人直升机巡检属于通用航空飞行的范畴[24]，而且是超低空飞行，由于低空领域是受国家管制的，这种巡检方式必须获得飞行管制区管制部门的批准[4] [24]，而且每次巡检都要预先提出申请，批准后方可实施[25] [26]；由于输电线路错综复杂，如果出现待巡检输电线路穿越不同的飞行管制区间时，就需要中国人民解放军空军部门的批准[24]。低空领域的管制和繁杂的审批程序增大了这一巡检方案的实施难度。

近年来，随着各个领域通用航空需求的旺盛，国家相关部门正在积极推进开放低空空域的进程，但就目前来看，我国低空空域的彻底开放还有很长的路要走[27] [28]。

Table 2. Advantages and disadvantages comparison of several methods of transmission line inspection
表 2. 几种输电线路巡检方式的优缺点比较

巡检方式	巡检准确性	巡检成本	巡视安全风险	单次巡检效率	出勤率	年巡检效率	政策约束
人工巡检	高	高	低	低	高	低	无约束
载人直升机巡检	低	高	高	高	低	低	较强
无人直升机巡检	低	低	低	高	高	高	适中

4.3. 无人直升机巡检

无人直升机由于体型较小、携带方便，电力部门对于它的管理和使用完全可以借鉴普通巡检设备和载人直升机的有关规定，另外再针对无人驾驶的特殊性，对飞行高度、与输变电设备的距离、操作注意事项等方面形成制度化的管理模式。前已述及我国多家电力部门开始探索无人直升机巡检，管理模式探索也在不断深入。

与载人直升机相比，无人直升机巡检在低空空域权问题上有着绝对的优势。小型无人直升机属于航空模型的范畴，根据航空体育运动管理办法的有关规定，航空模型飞机的飞行高度和空域与其他航空器的飞行活动有关联时，主持航空模型活动的单位或个人应同机场当局或当地飞行管制部门取得联系，划定航空模型的飞行高度和区域[29]。而输电线路走廊属常规回避飞行的特殊区域，其他航空器几乎不可能近距离接触，无人直升机巡检时一般会在输电线路沿线侧上方几十米处，不会对其他航空器的飞行活动有关联，因此无人直升机巡检输电线路不需要有关航空管理部门的审批，这使无人直升机巡检具有很强的机动性，供电部门可以根据自己的年度检修计划适时的安排无人直升机巡检。

这几种输电线路巡检方式的优缺点比较见表 2。

5. 结论

人工巡检方式在很长一段时间内仍将是输电线路巡检的主要方式，技术人员的实地检测仍将在输电线路隐患确定、事故分析中发挥不可替代的作用。

载人直升机巡检单次巡检效率高，但由于受到驾驶员技术水平、我国航空管制政策等多方面的制约，致使其年巡检效率不高，且费用偏高，该巡检方式的大规模普及有待进一步的探讨。

无人直升机虽然无法一次携带众多检测设备，但无人直升机巡检以其灵活性、机动性强，价格低廉，无需航空部门审批，便于携带和运输等诸多优点，越来越受到供电部门的重视。

综合以上讨论，供电部门应该充分发挥无人直升机巡检的优势，在由无人直升机确定了疑似故障点和疑似隐患点后，技术人员远程分析故障和隐患情况，在分析不便时，技术人员再有针对性的前往现场进行故障隐患原因分析，以此减少大规模人工巡检的工作量和工作强度，合理配置资源，提高巡检效率。

参考文献 (References)

- [1] 厉秉强, 王骞, 王滨海, 等 (2010) 利用无人直升机巡检输电线路. *山东电力技术*, **1**, 1-4.
- [2] 张文亮, 吴维宁, 胡毅 (2003) 特高压输电技术的研究与我国电网的发展. *高电压技术*, **9**, 16-18.
- [3] 张险峰, 陈功, 程正逢, 等 (2007) 激光雷达在直升机巡线中的应用. *华中电力*, **6**, 33-35, 39.
- [4] 赵鹏, 邓春, 袁亦超 (2002) 应用直升机巡检输电线路. *华北电力技术*, **10**, 1-3.
- [5] 邵允临, 曹晋恩, 尚大伟 (2003) 直升机巡检华北电网超高压输电线路. *中国电力*, **7**, 35-38.
- [6] 张柯, 李海峰, 王伟 (2006) 浅议直升机作业在我国特高压电网中的应用. *高电压技术*, **6**, 45-46, 55.
- [7] DL/T741—2001 《架空送电线运行规程》.

- [8] 于德明, 沈建, 汪骏, 等 (2008) 直升机与人工巡视效果对比分析. *中国电力*, **11**, 25-28.
- [9] 英晓勇 (2007) 浅析提高输电线路巡检质量的方法. *供用电*, **3**, 53-54.
- [10] 何伟 (2008) 冰雪无阻巡线工. *湖北电业*, **2**, 16-17.
- [11] 于德明, 沈建, 汪骏, 陈方东, 刘伟东 (2009) 直升机在电网运行维护中的研究与应用. *电网技术*, **6**, 107-112.
- [12] 沈光陞, 赵新波 (2008) 直升机电力巡线技术. *电力建设*, **10**, 35-37.
- [13] 沈光陞, 赵新波 (2008) 直升机电力巡线技术及发展趋势. *云南电业*, **7**, 39-41.
- [14] 冯奇, 李勇 (2009) 直升机巡线问题及解决方案——卫星监控指挥系统在直升机巡线中的应用. *科技资讯*, **14**, 232-233.
- [15] Jones, D.I. and Earp, G.K. (2001) Camera sightline pointing requirements for aerial inspection of over head power lines. *Electric Power Systems Research*, **57**, 73-82.
- [16] Williams, M., Jones, D.I. and Earp, G.K. (2001) Obstacle avoidance during aerial inspection of power lines. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, **73**, 472-479.
- [17] 卢文艳 (2005) 利用无人驾驶直升飞机的输电线路巡检系统. *国际电力*, **2**, 7.
- [18] 国家电网公司 (2009) 国家电网无人飞行巡检系统在福州试运成功.
<http://www.sasac.gov.cn/n86114/n326638/c607878/content.html>
- [19] 吴光于 (2010) 国产无人驾驶巡线直升机首次在青海试飞成功.
<http://mil.news.sina.com.cn/2010-01-16/1125580970.html>
- [20] 徐凯, 刘嘉, 陈丹妮 (2010) 无人直升机在景德镇完成全自动电网巡线飞行.
<http://www.jxcn.cn/2444/2010-4-13/30053@677602.htm>
- [21] 苏建红 (2010) 云南电网普洱供电局无人驾驶直升机巡线试飞成功[EB/OL].
<http://news.bjx.com.cn/html/20100630/251208.shtml>
- [22] 甄云卉, 路平 (2009) 无人机相关技术与发展趋势. *兵工自动化*, **1**, 14-16.
- [23] 陆宠惠, 万启发 (1999) 特高压输电的必要性. 中国电工技术学会第六届学术会议, 北京.
- [24] 通用航空飞行管制条例. 中华人民共和国国务院、中华人民共和国中央军事委员会, 北京, 2003.
- [25] 国务院、中央军委关于修改《中华人民共和国飞行基本规则》的决定. 中华人民共和国国务院、中华人民共和国中央军事委员会, 北京, 2007.
- [26] 中华人民共和国民用航空器适航管理条例. 中华人民共和国国务院, 北京, 1987.
- [27] 刘松, 王伟 (2010) 我国低空空域管理的现状与改革研究. *中国民用航空*, **3**, 37-39.
- [28] 温婷, 阮奇 (2010) 低空空域开放有望三季度破冰. *上海证券报*, 2010-7-9(封四).
- [29] 航空体育运动管理办法. 国家体育总局, 北京, 1991.