



输电线路 无人机巡检技术

何健 审
李婷 张涛 编

UAV Inspection Technology
For Transmission Line



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

输电线路 无人机巡检技术

输电线路巡检是保障电网安全运行的重要方式，无人机巡检是一种高效、智能、全新的输电线路巡检模式，代表了智能电网输电线路巡检的发展方向。本书结合国网宜昌供电公司检修分公司输电运检室在无人机巡检领域中的一系列科技创新成果，对无人机改进和人机结合的现场技术经验系统总结编写而成。

本书共6章，包含输电线路巡检技术概述、输电线路特征及常见缺陷、无人机多传感器数据采集技术、无人机巡检作业、无人机巡检技术改进及无人机巡检技术展望。全书内容丰富，指导性强，可作为供电企业输电线路工作人员的培训教学用书，对于推动无人机输电线路巡检技术发展进步具有重要意义。



中国电力出版社官方微信



掌上电力书屋



上架建议：电力工程

ISBN 978-7-5123-9967-9



9 787512 399679 >

定价：40.00 元

输电线路 无人机巡检技术

何健 审

李婷 张涛 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

输电线路巡检是保障电网安全运行的重要方式,无人机巡检是一种高效、智能、全新的输电线路巡检模式,代表了智能电网输电线路巡检的发展方向。本书结合国网宜昌供电公司检修分公司输电运检室在无人机巡检领域中的一系列科技创新成果,对无人机改进和人机结合的现场技术经验系统总结编写而成。

本书共6章,包含输电线路巡检技术概述、输电线路特征及常见缺陷、无人机多传感器数据采集技术、无人机巡检作业、无人机巡检技术改进及无人机巡检技术展望。全书内容丰富,指导性强,可作为供电企业输电线路工作人员的培训教学用书,对于推动无人机输电线路巡检技术发展进步具有重要意义。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路无人机巡检技术 / 李婷, 张涛编; 何健审. — 北京: 中国电力出版社, 2016.11

ISBN 978-7-5123-9967-9

I. ①输… II. ①李… ②张… ③何… III. ①无人驾驶飞机—应用—输电线路—巡回检测 IV. ① TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 253606 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 11 月第一版 2016 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 6.75 印张 85 千字

印数 0001—2500 册 定价 40.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

Preface

输电线路巡检是保障电网安全运行的重要方式，无人机巡检是一种高效、智能、全新的输电线路巡检模式，有别于传统的人工巡检和其他巡检模式，代表了智能电网输电线路巡检的发展方向。随着无人机巡检技术的发展进步，电力巡检已逐步过渡到“机巡为主、人机协调”的巡检模式，本书结合国网宜昌供电公司检修分公司输电运检室在无人机巡检领域中的一系列科技创新成果，对无人机改进和人机结合的现场技术经验系统总结编写而成。

本书共 6 章，包含输电线路巡检技术概述、输电线路特征及常见缺陷、无人机多传感器数据采集技术、无人机巡检作业、无人机巡检技术改进及无人机巡检技术展望。全书内容丰富，指导性强，以无人机巡检现场的可操作性、可指导性和实用性为目的，对无人机巡检的相关专业知识进行阐述，可作为供电企业输电线路工作人员的培训教学用书，也可用作输电线路运维人员培训教材，对于推动无人机输电线路巡检技术发展进步具有重要意义。

本书编写过程中得到了各级领导、专家的指导和帮助，在此表示由衷的感谢。由于时间仓促，本书难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2016 年 8 月

目 录

Contents

前 言

第 1 章 输电线路巡检技术概述 1

第 2 章 输电线路特征及常见缺陷 5

第 3 章 无人机多传感器数据采集技术..... 25

第 4 章 无人机巡检作业 41

第 5 章 无人机巡检技术改进 53

第 6 章 无人机巡检技术展望 79

附录 A 无人机班组管理工作标准 83

附录 B 架空输电线路无人机巡检作业考核标准及附表 89

参考文献..... 99

第 1 章

输电线路巡检技术概述

1.1 输电线路巡检重要性

电力是国民经济的命脉，服务千家万户。电力系统是迄今为止最复杂的人造系统之一。目前，中国的电网规模已居世界第一位，且拥有世界最高的交、直流输送电压等级以及世界上输送容量最大、送电距离最远的特高压输电工程。作为国家的重要基础设施，电网安全直接关系到国家安全。

电网由输电网和配电网组成。发电厂、输电网、配电网和用电设备连接起来组成为一个集成的整体，这个整体被称为电力系统。输电线路是电力系统的重要组成部分，它的安全可靠运行直接关系到一个国家经济的稳定发展。输电线路由于长期暴露在自然环境中，不仅要承受正常机械载荷和电力负荷的内部压力，还要经受污秽、雷击、强风、滑坡、沉陷及鸟害等外界侵害，这些因素将会促使线路上各元件的老化，如不及时发现和消除，就可能发展成为各种故障，对于电力

系统的安全和稳定运行构成严重的威胁。因此，输电线路巡检是有效保障线路及其设备安全的一项基础性工作，通过对输电线路的巡视检查来掌握线路运行状况及周围环境的变化，及时发现设备缺陷和危及线路安全的隐患，提出具体检修意见，以便及时消除缺陷，预防事故发生，从而保证输电线路安全和电力系统稳定。

1.2 输电线路巡检方式的发展

为了随时掌握输电线路运行情况、线路周围环境和线路保护区的变化情况，电力部门会对输电线路进行定期巡视检查。随着输电线路长度的增加，输电线路巡检成为电力部门一项繁重的日常工作。

以宜昌电网为例，该电网位于湖北电网的首端，是三峡水电外送的起点，是西电东送的通道，主要承担宜昌地区五县、三市、五个城区的电网建设与供电任务，担负着三峡大坝、葛洲坝、隔河岩、高坝洲、水布垭等大型水电厂的电力外送任务，保障宜昌境内输电线路安全，事关湖北电网乃至全国电网的安全稳定运行，责任十分重大。

截至 2016 年 3 月底，国网宜昌供电公司检修分公司输电运检室所辖 35kV 及以上电压等级线路 281 条，共计 6705.031km，其中 500kV 属地化输电线路共 42 条，长度 3255.753km，杆塔 7212 基，占全省 500kV 输电线路总量的四分之一；500kV 换流站站用线路共 7 条，长度 60.032km，杆塔 196 基；220kV 输电线路 79 条，长度 1680.773km，杆塔 4438 基（其中 9 条为共管线路）；110kV 输电线路 138 条，长度 1616.231km，杆塔 5706 基；35kV 输电线路 15 条，长度 92.242km，杆塔 377 基。

架空输电线路覆盖范围区域越来越广，输电运维任务成倍增加，220kV 及以下



线路长度达 3300 多千米, 杆塔 10594 基, 加之 500kV 输电线路通道运维属地化管理工作, 共 41 条线路, 总长 3251.525km, 杆塔 7111 基, 任务艰巨。而运维人员数量基本不变, 加之所辖设备巡视验收、日常检修、消缺、防外破等工作压力不断增大, 宜昌电网运行维护线路里程的快速增长与电网运行维护人员数量相对不足之间的矛盾逐渐显现, 人工巡检不仅劳动强度大、工作条件艰苦, 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, 因此, 电力部门急需一种成本低、周期短、效率高的巡检方式, 无人机进入了人们的视野。

宜昌地形复杂, 传统的人工巡检方式, 一名巡线工一天一般只能检查 6~10 基杆塔, 如果遇到地形复杂或恶劣天气, 巡视杆塔数则会更少, 而无人机只需 20 多分钟便可完成人工一天的巡检量, 大幅提升巡检效率。利用无人机自身独特的空中检测优势, 从不同角度拍摄图像, 使运检数据资料更加完整, 并能及时将现场情况传回地面控制中心。因此国网宜昌供电公司检修分公司输电运检室尝试借助无人机技术, 以无人机巡视、故障点在线监控、状态巡视为基础, 形成“三位一体”立体运检模式。

“三位一体”立体运检模式, 是通过地面作业人员控制无人机上的摄像设备, 近距离巡视了解导线、杆塔、金具、绝缘子等部件的健康动态, 同时记录线路走廊的树木生长、地理环境、线路交叉跨越等情况, 它是对状态巡视的有效补充, 能大大提高输电维护和检修的效率, 减轻输电线路巡线工作的强度, 降低输电线路的运行维护成本, 提高输电线路智能化巡线水平。

1.3 无人机输电线路巡检

采用无人机进行线路巡检成为近年来研究的热点问题。无人机具有作业速度

快，测量精度高、测量数据量大、自动化程度高等特点，不仅重量轻、体积较小，便于携带，而且成本低、能自动飞行，灵活性好；支持多种巡检模式，可以进行高效、非接触式、全方位的检查。无人机与各种可见光和红外探测设备搭配执行巡线任务，可以全面了解输电线路运行状况。无人机按照固定的航线自主飞行巡检或者人为操控巡检，采集图像或者视频来反映输电线路状态和周围的环境变化。无人机可以携带多种传感器对输电线路进行巡视，工作人员可以通过分析无人机对输电线路拍摄的影音资料（红外、紫外、可见光），得到输电线路存在的缺陷，尽早发现并消除可能出现的隐患。无人机巡检可以降低巡检成本，最大限度地减少线路故障造成的损失，保障输电线路正常运行。

无人机技术的发展为架空输电线路的巡检提供了新的移动平台。利用无人机搭载巡检设备进行巡线，有着传统巡线方式无法比拟的优势：

（1）无人驾驶，不会造成人员伤亡，安全性高；

（2）不受地理条件及自然条件的限制，即使遇到地震、洪涝等自然灾害，依然能够对受灾区域的输电线路进行巡检；

（3）巡线速度快，每小时可达几十千米。

将无人机这项技术应用于输电线路巡检，融合了电子、通信、图像识别等多个技术领域，形成一整套的无人机巡线系统，可以大大减轻电力巡线的人力投入，同时又能快速、安全地对线路实施巡检。

从上述无人机巡检的优势可以得出，无人机输电线路巡检具有良好的发展前景和重要的实用价值。

第 2 章

输电线路特征及常见缺陷

输电线路作为电力系统的重要组成部分，它担负着从电源向电力负荷中心输送电能的任务，其运行状态和安全性对于整个电力系统的稳定都有着重要影响。输电线路按结构可分为架空输电线路和电缆线路。架空输电线路作为电力系统中的一种重要输电线路，与电缆线路相比，具有投资省、易于发现故障、便于维修等优点，所以远距离输电多采用架空输电线路。输电线路按电流性质，又可分为交流输电线路和直流输电线路。虽然直流输电具有线路造价低、节省线路走廊、线路损耗小、不存在系统稳定问题、易于限制短路电流、调节快速、运行可靠等优点，但是考虑到电网整体运行维护和线路造价等因素，交流输电在世界范围内仍占绝大多数，本书主要以交流输电线路为例进行介绍。



2.1 架空电力线路的构成

架空电力线路构成的主要元件有导线、架空地线（简称地线）、绝缘子、金具、拉线、杆塔基础。

它们的作用分述如下：

（1）导线用来传导电流，输送电能；

（2）架空地线是当雷击线路时把雷电流引入大地，以保护线路绝缘免遭大气过电压的破坏；

（3）杆塔用来支撑导线和地线，并使导线和导线之间，导线和地线之间，导线和杆塔之间以及导线和大地、公路、铁轨、水面、通信线路等被跨越物之间，保持一定的安全距离；

（4）绝缘子是用来固定导线，并使导线与杆塔之间保持绝缘状态；

（5）金具在架空输电线路中主要用于固定、连接、接续、调节及保护作用；

（6）拉线是用来加强杆塔的强度，承担外部荷载的作用力，以减少杆塔的材料消耗量，降低杆塔的造价；

（7）杆塔基础是将杆塔固定于地下，以保护杆塔不发生倾斜、下沉、上拔及倒塌。

下文将对导线、架空地线、杆塔及绝缘子作具体介绍。

（1）导线。导线应具备以下特性：

1) 导电率高，以减少线路的电能损耗和电压降；

2) 耐热性能高，以提高输送容量；

3) 具有良好的耐振性能；

4) 机械强度高、弹性系数大、有一定柔软性、容易弯曲，以便于加工制造；



- 5) 耐腐蚀性强，能够适应自然环境条件和一定的污秽环境，使用寿命长；
- 6) 质量轻、性能稳定，耐磨、价格低廉。

常用的导线材料有铜、铝、铝镁合金和钢。这些材料的物理特性如表 2-1 所示。

表 2-1 导线材料的物理性能

材料	20℃时的电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	密度 (g/cm^3)	抗拉强度 (MPa)	腐蚀性能及其他
铜	0.0185	8.9	390	表面易形成氧化膜，抗腐蚀能力强
铝	0.029	2.7	160	表面氧化膜可防继续氧化，但易受酸碱盐的腐蚀
钢	0.103	7.85	1200	在空气中易锈蚀，须镀锌防锈
铝镁合金	0.033	2.7	300	抗腐蚀性能好，受振动时易损坏

在相同的导电性能和相同的抗张强度下，用铝制造导线，材料用量较省，加之铝的价格便宜，故采用铝导线最经济。

钢的导电率是最低的，但它的机械强度很高，且价格较有色金属低廉，在线路跨越山谷、江河等特大档距且电力负荷较小时可采用钢导线。钢线需要镀锌以防锈蚀。

若架空线路的输送功率大，导线截面大，对导线的机械强度要求高，而多股单金属铝绞线的机械强度仍不能满足要求时，则把铝和钢两种材料结合起来制成钢芯绞线，不仅有较好的机械强度，且有较高的电导率。由于交流电的趋肤效应，使铝线截面的截流作用得到充分利用，而其所承受的机械荷载则由钢芯和铝线共同负担。这样，既发挥了两种材料的各自优点，又补偿了它们各自的缺点。因此，钢芯铝线被广泛地应用在 35kV 及以上的线路中。

分裂导线由数根导线组成一组，每一根导线称为次导线，两根次导线间的距离称为次线间距离，一个档距中，一般每隔 30~80m 装一个间隔棒，使次导线间保



持次线间距离，两相邻间隔棒间的水平距离称为次档距。

在一些线路的特大跨越档距中，为了降低杆塔调度，要求导线具有很高的抗拉强度和耐振强度。

近年来，耐热铝合金导线、钢芯软铝绞线、碳纤维复合芯绞线等新型架空导线，由于有较多优越性能，在输电线路改造和新建中也得到应用。

(2) 架空地线。架空地线一般多采用钢绞线，但近年来，在超高压输电线路上有采用良导体作架空地线的趋势。架空地线一般都通过杆塔接地，但也有采用所谓的“绝缘地线”的。绝缘地线即采用带有放电间隙的绝缘子把地线和杆塔绝缘起来，雷击时利用放电间隙引雷电流入地。这样做对防雷作用毫无影响，而且还能利用架空地线作截流线；用于架空地线融冰；作为载波通信的通道；在线路检修时，可作为电动机的电源；此外还可对小功率用户供电等。绝缘地线还可减小地线中由感应电流而引起的附加电能损耗。

对超高压和特高压输电线路，为了减小其对邻近的通信线路的危险影响和干扰影响，以及降低超高压线路的潜供电流，常用铝包钢绞线或其他有色金属线作绝缘地线。

目前，对双地线架空线路，大多采用一根钢绞线，另一根复合光缆。复合光缆的外层铝合金绞线起到防雷保护，芯部的光导纤维起通信作用。

各级电压的输电线路，架设架空地线的要求有如下规定：

- 1) 500 ~ 750kV 输电线路应沿全线架设双地线；
- 2) 220 ~ 330kV 输电线路应沿全线架设地线。年平均雷暴日数不超过 15 的地区或运行经验证明雷电活动轻微的地区，可架设单地线，山区宜架设双地线；
- 3) 110kV 输电线路宜沿全线架设地线，在年平均雷暴日数不超过 15 或运行经验证明雷电活动轻微的地区，可不架设地线；



4) 660kV 线路，年平均雷暴日数为 30 日以上的地区，宜沿全线架设架空地线；

5) 35kV 线路及不沿全线架设架空地线的线路，宜在变电站或发电厂的进线段架设 1~2km 架空地线，以防护导线及变电站或发电厂的设备免遭直接雷击。

架空地线的型号一般配合导线截面进行选择，其配合表见表 2-2。

表 2-2 地线采用镀锌钢绞线时与导线的配合表

导线型号		LGJ-185/30 及以下	LGJ-185/45 ~ LGJ-400/50	LGJ-400/65 及以上
镀锌钢绞线最小标称截面 (mm ²)	无冰区	35	50	80
	覆冰区	50	80	100

500kV 及以上输电线路无冰区、覆冰区地线采用镀锌钢绞线时最小标称截面应分别不小于 80、100mm²。

(3) 杆塔。

1) 按用途分类。架空线路的杆塔，按其在线路上的用途可分为：悬垂型杆塔、耐张直线杆塔、耐张转角杆塔、耐张终端杆塔、跨越杆塔和换位杆塔等。

悬垂型杆塔（又称中间杆塔），一般位于线路的直线段，在架空线路中的数量最多，约占杆塔总数的 80% 左右。在线路正常运行的情况下，悬垂型杆塔不承受顺线路方向的张力，而仅承受导线、地线、绝缘子和金具等的质量和风压，所以其绝缘子串是垂直悬挂的，称做悬垂串，只有在杆塔两档距相差悬殊或一侧发生断线时，悬垂型杆塔才承受相邻两档导线的不平衡张力，悬垂型杆塔，一般不承受角度力，因此悬垂型杆塔对机械强度要求较低，造价也较低廉。

耐张直线杆塔（又称承力杆塔），一般也位于线路的直线段，有时兼作 5° 以下的小转角。在线路正常运行和断线事故情况下，均承受较大的顺线路方向的张力，因此，这种杆塔称耐张直线杆塔。在耐张直线杆塔上是用耐张绝缘子串和耐张



线夹来固定导线的。

两相邻耐张杆塔间的一段线路称为一个耐张段；两相邻耐张杆塔间各档距的和称为耐张段的长度。当线路发生断线故障时，不平衡张力很大，这时悬垂型杆塔因顺线路方向的强度较差而可能逐个被拉倒。耐张杆塔强度大，可将倒杆事故限制在一个耐张段内。所以，耐张杆塔也有称做“锚型杆塔”或“断连杆塔”。

耐张转角杆塔位于线路转角处，线路转向内角的补角称为“线路转角”。耐张转角杆塔两侧导线的张力不在一条直线上，因而须承受角度合力。耐张转角杆塔除应承受垂直荷载和风压荷载以外，还应能承受较大的导线张力角度合力；角度合力决定于转角的大小和导线水平张力。

跨越杆塔位于线路与河流、山谷、铁路等交叉跨越的地方。跨越杆塔也分悬垂型和耐张型两种。当跨越档距很大时，就得采用特殊设计的耐张型跨越杆塔，其高度也较一般杆塔高得多。

耐张终端杆塔位于线路的首、末端，即变电站进线、出线的第一基杆塔。耐张终端杆塔是一种承受单侧张力的耐张杆塔。

换位杆塔是用来进行导线换位的。高压输电线路的换位杆塔分滚式换位用的悬垂型换位杆塔和耐张型换位杆塔两种。

2) 按材料分类。杆塔按使用的材料可分为：钢筋混凝土杆、钢管杆、角钢塔和钢管塔。

钢筋混凝土杆的混凝土和钢筋粘结牢固严为一体，且二者具有几乎相等的温度膨胀系数，不会因膨胀不等产生温度应力而破坏，混凝土又是钢筋的防锈保护层。所以，钢筋混凝土是制造虬枝的好材料。

混凝土的受拉强度较受压强度低得多，当电杆杆柱受力弯曲时，杆柱截面一侧受压另一侧受拉，虽然拉力主要由钢筋承受，但混凝土与钢筋一起伸长，这时混凝土



土的外层即受一拉应力而产生裂缝。裂缝较宽时就会使钢筋锈蚀, 缩短寿命。防止产生裂缝的最好方法, 就是在电杆浇筑时将钢筋施行预拉, 使混凝土在承载前就受到一个预压应力。这样, 当电杆承载时, 受拉区的混凝土所受的拉应力与此预压应力部分地抵消而不致产生裂缝。这种电杆叫做预应力钢筋混凝土电杆。

预应力钢筋混凝土杆能充分发挥高强度钢材的作用, 比普通钢筋混凝土杆可节约钢材 40% 左右, 同时水泥用量也减少, 电杆的质量也减轻了。由于它的抗裂性能好, 所以延长了电杆的使用寿命。

近年来, 城区线路广泛采用钢管杆。

目前生产的钢筋混凝土电杆 (或预应力、部分预应力钢筋混凝土电杆), 等径环形截面和拔梢环形截面两种。等径电杆的直径分别为 $\phi 300$ 、 $\phi 400$ 、 $\phi 500$ 、 $\phi 550\text{mm}$, 杆段长度有 3.0、4.5、6.0、9.0m 四种。

角钢塔是用角钢焊接或螺栓连接的 (个别有铆接的) 钢架, 钢管塔是用钢管由螺栓连接的钢架。它们的优点是坚固、可靠、使用期限长, 但钢材消耗量大, 造价高, 施工工艺较复杂, 维护工作量大。因此, 铁塔多用于交通不便和地形复杂的山区, 或一般地区的荷载较大的耐张终端、耐张直线、耐张转角、大跨越等特种杆塔。

(4) 线路绝缘子。架空线路的绝缘子, 是用来支持导线并使之与杆塔绝缘的。它应具有足够的绝缘强度和机械强度, 同时对化学杂质的侵蚀具有足够的抗御能力, 并能适应周围大气条件的变化, 如温度和湿度变化对它本身的影响等。

架空输电线路上所用的绝缘子有悬式、棒式和硅橡胶合成绝缘子等数种。

悬式绝缘子形状多为圆盘形, 故又称盘形绝缘子, 绝缘子以往都是陶瓷的, 所以又叫做瓷瓶。现在也有使用钢化玻璃悬式绝缘子, 这种绝缘子尺寸小、机械强度高、电气性能好、寿命长、不易老化、维护方便 (当绝缘子有缺陷时, 由于冷热剧变或机械过载, 即自行破碎, 巡线人员很容易用望远镜检查出来)。盘形悬式绝缘