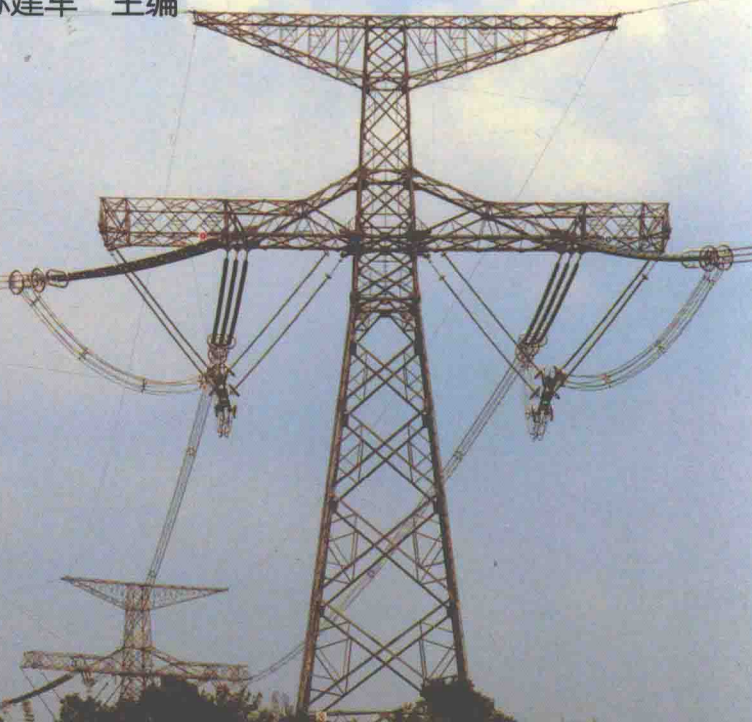




架空输电线路 无人机巡检技术

JIAKONG SHUDIAN XIANLU
WURENJI XUNJIAN JISHU

张祥全 苏建军 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

架空输电线路 无人机巡检技术

JIAKONG SHUDIAN XIANLU
WURENJI XUNJIAN JISHU

张祥全 苏建军 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

随着架空输电线路规模的不断扩大,线路走廊地理环境日益复杂,传统线路巡检方式已逐渐不能满足当今输电线路运行维护要求。无人机巡检具有受地形限制小、塔头巡检效果好、操作简单、可快速部署、巡检成本低等优点,在巡检范围、内容和频次上是人工巡检和直升机巡检的有效补充。本书紧密结合现场实际、全面系统、实用性强,对提高技术人员关于无人机巡检技术的认知具有重要意义。

本书共有九章,分别为无人机系统概述,无人机飞行原理与操控,架空输电线路无人机巡检系统,无人机巡检作业技术,无人机巡检系统检验检测,无人机巡检系统技能培训,无人机巡检系统维修保养,直升机、无人机和人工协同巡检以及展望。

本书主要适用于直接从事无人机巡检的技术人员和生产管理人员,也可供相关专业及管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

架空输电线路无人机巡检技术 / 张祥全, 苏建军主编. —北京: 中国电力出版社, 2016.6

ISBN 978-7-5123-9201-4

I. ①架… II. ①张… ②苏… III. ①无人驾驶飞机—应用—架空线路—输电线路—巡回检测 IV. ①V279②TM726.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 073488 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>)

万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 6 月第一版 2016 年 6 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 10.75 印张 196 千字

印数 0001—6500 册 定价 75.00 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

编 委 会

主 编 张祥全 苏建军

副 主 编 任志刚 刘 凯 周宏宇

刘洪正 慕世友

编写人员 刘 佺 王滨海 王万国 雍 军 邵瑰玮

宋海涛 王 淼 任 杰 李茂华 傅孟潮

付 晶 魏传虎 杨 波 孙晓斌 孟海磊

李建祥 赵金龙 刘 辉 段玉兵 刘 嵘

周 洋 金阿龙 贾会永 袁海燕 张 皓

主 审 李超英

序

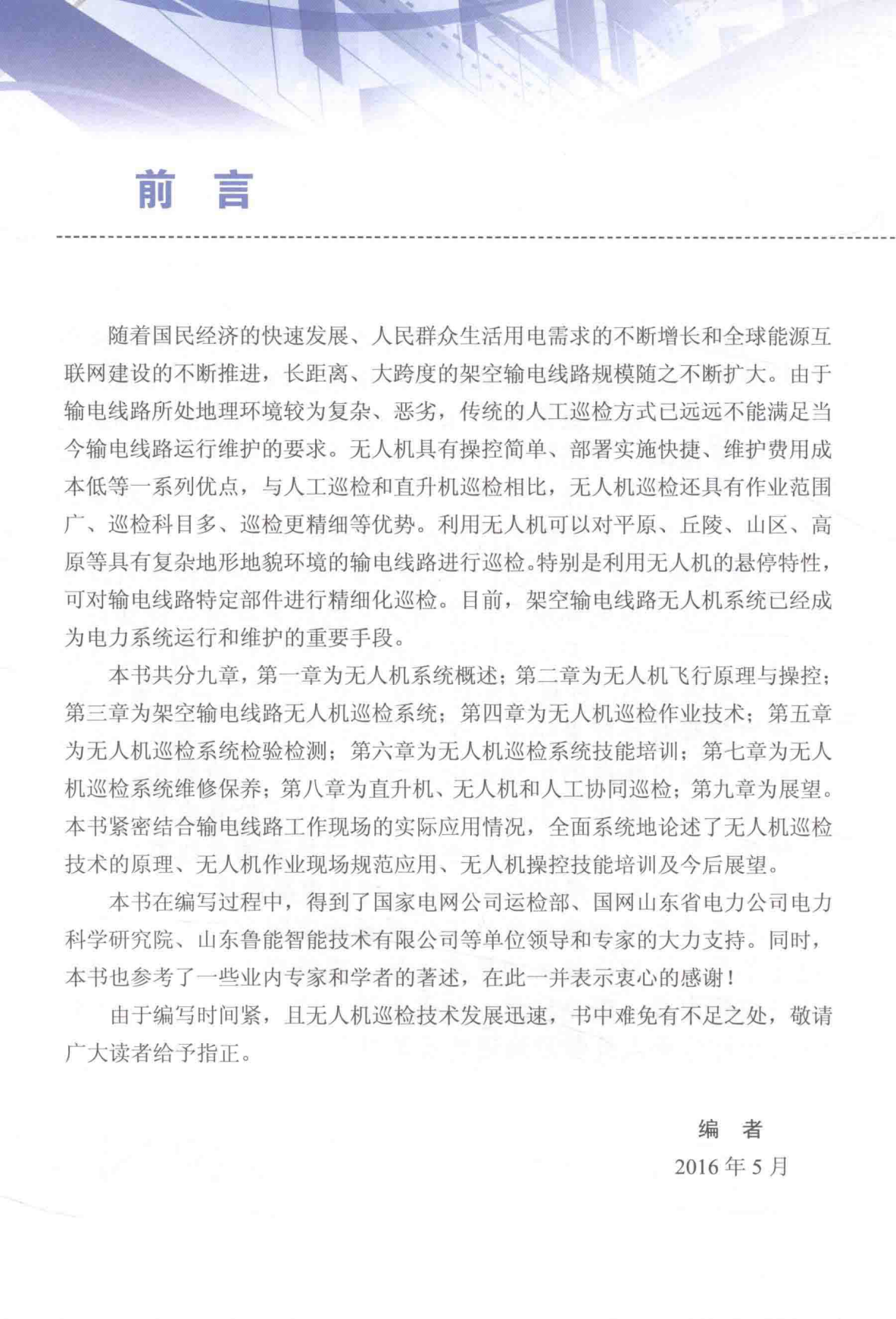
随着我国特高压电网的飞速发展和全球能源互联网跨州际输电网的不断建设和实践，特高压架空输电线路的规模也在不断扩大。输电线路要跨越高山森林、江河湖海、沙漠戈壁、草原湿地、污染环境、危险场地等复杂地理环境，传统的人工和半自动化线路巡检方式，已不能满足当今大功率、长距离、大跨度架空输电线路巡检运维的要求。

《架空输电线路无人机巡检技术》一书，全面科学系统地论述了在复杂地理环境下，使用无人机对架空输电线路进行巡检的技术问题。无人机对输电线路进行巡检，具有受复杂地理环境限制小、杆塔顶部巡检效果好、远程操控简单可靠、常规巡检和特检部署快捷、巡检成本低等优点。并且，无人机巡检在输电线路的巡检范围、巡检项目、巡检频次、巡检效果等方面，都比人工巡检和有人直升机巡检具有更加明显的优势。所以，无人机巡检技术应用对提高输电线路的巡检质量，保障输电线路安全运维具有特别重要的意义。

本书紧密结合输电线路工作现场的实际情况，详细论述了无人机巡检技术的原理认知、现场规范应用、操控技能培训等内容，理论科学，技术先进，实用性强，是无人机巡检操控作业人员学习培训的重要教材。

国网山东省电力公司总经理：





前 言

随着国民经济的快速发展、人民群众生活用电需求的不断增长和全球能源互联网建设的不断推进，长距离、大跨度的架空输电线路规模随之不断扩大。由于输电线路所处地理环境较为复杂、恶劣，传统的人工巡检方式已远远不能满足当今输电线路运行维护的要求。无人机具有操控简单、部署实施快捷、维护费用成本低等一系列优点，与人工巡检和直升机巡检相比，无人机巡检还具有作业范围广、巡检科目多、巡检更精细等优势。利用无人机可以对平原、丘陵、山区、高原等具有复杂地形地貌环境的输电线路进行巡检。特别是利用无人机的悬停特性，可对输电线路特定部件进行精细化巡检。目前，架空输电线路无人机系统已经成为电力系统运行和维护的重要手段。

本书共分九章，第一章为无人机系统概述；第二章为无人机飞行原理与操控；第三章为架空输电线路无人机巡检系统；第四章为无人机巡检作业技术；第五章为无人机巡检系统检验检测；第六章为无人机巡检系统技能培训；第七章为无人机巡检系统维修保养；第八章为直升机、无人机和人工协同巡检；第九章为展望。本书紧密结合输电线路工作现场的实际应用情况，全面系统地论述了无人机巡检技术的原理、无人机作业现场规范应用、无人机操控技能培训及今后展望。

本书在编写过程中，得到了国家电网公司运检部、国网山东省电力公司电力科学研究院、山东鲁能智能技术有限公司等单位领导和专家的大力支持。同时，本书也参考了一些业内专家和学者的著述，在此一并表示衷心的感谢！

由于编写时间紧，且无人机巡检技术发展迅速，书中难免有不足之处，敬请广大读者给予指正。

编 者

2016年5月

目 录

序 前言

第一章 无人机系统概述	1
第一节 无人机的定义与分类	1
第二节 无人机的发展与现状	3
第三节 架空输电线路巡检现状	9
第二章 无人机飞行原理与操控	18
第一节 无人机基本结构	18
第二节 飞行原理	24
第三节 无人机飞行操控	28
第三章 架空输电线路无人机巡检系统	35
第一节 电力无人机巡检系统	35
第二节 无人机巡检系统关键技术	42
第四章 无人机巡检作业技术	75
第一节 无人机作业流程	75
第二节 无人机直升机作业技术	77
第三节 固定翼无人机作业技术	86
第四节 无人机巡检典型应用	92
第五章 无人机巡检系统检验检测	100
第一节 检验检测介绍	100
第二节 无人机巡检系统检验检测实例	101
第六章 无人机巡检系统技能培训	111
第一节 无人机培训现状	111
第二节 资质培训	113

第三节 巡检技术培训	120
第七章 无人机巡检系统维修保养	126
第一节 维修保养概述	126
第二节 维修保养的工作流程	130
第三节 报修流程与记录	142
第八章 直升机、无人机和人工协同巡检	145
第一节 协同巡检试点工作	145
第二节 巡检效果评估	145
第三节 协同巡检作业成效	156
第九章 展望	159
附录 目前执行的无人机巡检相关文件和标准	161
参考文献	162

第一章



无人机系统概述

第一节 无人机的定义与分类

无人驾驶航空器（Unmanned Aircraft, UA）是利用无线电遥控设备和自备的程序控制装置操纵的无人机平台，简称无人机，如图 1-1 所示。



图 1-1 MQ-9 型无人机

无人机系统主要由无人机平台、控制站、通信系统以及保障设备四部分组成。

（1）无人机平台。首先，无人机平台需要有足够的载重能力，以保证能够携带控制模块、信息采集系统和任务设备；其次，外形设计应合理，以保证飞行稳定并较好的适应各种气流；第三，无人机平台应能完成特定的任务，如输电线路巡检、农林植保等。

（2）控制站（GCS）。控制站是无人机系统的重要组成部分，它提供系统操控人员的工作环境、人机接口。主要负责数据采集、控制计算、航线控制、任务的执行和管理、紧急情况处理、起飞降落等重要飞行任务的执行。因此，控制站的性能直接影响到飞行任务是否能够完成。

（3）通信系统。通信系统连接控制站与无人机平台，完成从控制站到无人机平台间的控制信息、任务载荷信息、无人机状态信息及其他数据信息的传输。数

据信息主要包括图像和视频,通过机载的图像采集设备采集信息,将标准复合视频信号传输给无线传输模块发射端进行发射,在地面站完成接收并进行显示或者储存。

(4) 保障设备。包括维修和运输等设备,一般包括指挥控制车、发射运输车 and 加油车等大量的地面保障车辆以满足主要靠公路实现转场的要求。

无人机系统包含多种无人机平台,以便完成不同要求的任务。由于无人机系统的多样性、用途的广泛性,使得无人机平台在飞行高度、飞行速度、航程、航时、飞行高度、尺寸、质量及用途等方面有较大差异。随着技术的发展,分类定义也在不停的变化,各类无人机之间的边界变得模糊。

按飞行高度分类,无人机可以分为超高空无人机、高空无人机、中空无人机、低空无人机和超低空无人机。超高空无人机飞行高度一般在 15000m 以上,可以完成远程(横跨地球)侦查监视任务。高空无人机飞行高度在 5000~15000m,中空无人机飞行高度一般在 1000~5000m,低空无人机飞行高度一般在 100~1000m,超低空无人机飞行高度一般在 100m 以下。

按活动半径分类,无人机可以分为高空长航时无人机、中空长航时无人机、中程无人机、近程无人机、小型无人机、超近程无人机。高空长航时无人机的活动半径可达 3000km,中空长航时无人机活动半径一般在 500km 以上,中程无人机活动半径一般在 100~300km,近程无人机的活动半径可达 100km,小型无人机活动半径一般在 30km 左右,超近程无人机活动半径在 15km 以内。

按质量进行分类,无人机可以分为大型无人机、小型无人机、轻型无人机和微型无人机。大型无人机,指空机质量大于 5700kg 的无人机。小型无人机,指空机质量小于或等于 5700kg 的无人机,但微型无人机与轻型无人机除外。轻型无人机指空机质量大于 7kg,但小于等于 116kg 的无人机,且全马力飞行中,校正空速小于 100km/h,升限小于 3000m。微型无人机,指空机质量小于等于 7kg 的无人机。

按飞行平台分类,无人机大体可以分为固定翼无人机、旋翼无人机、无人飞艇、伞翼无人机、扑翼无人机等。

按用途分类,无人机可分为军用无人机和民用无人机两大类。军用无人机可分为靶机、校靶机、侦查监视机、攻击机、电子战无人机、通信中继无人机等。民用无人机分为巡查/监视无人机、农用无人机、气象无人机、勘探无人机以及测绘无人机。

无人机不能与航模、靶机混淆,无线电遥控航模飞机仅用于体育活动,其飞行需要在操控员的视线内,通常只能控制航模爬升、下降、左转、右转等。靶机要求能在操控员的视线外飞行,但没有任何智能,只是按照预先规划的任务和航

线飞行并返回地面，它没有通信功能，无法获得任务信息，如照相等，只能等其返回地面后才能获得所拍摄的照片。

第二节 无人机的发展与现状

随着无人机相关技术的迅速发展成熟，无人机被应用到各个领域，用于完成异难地形地貌、污染、危险、隐蔽跟踪、科学研究等任务，以达到保证人员安全、节约成本、快速完成任务的目的。

一、军用无人机

随着现代信息化技术的发展，军用无人机需求日益增强。海军方面：如尾随敌方军舰、获取电子情报、通过发射特定假信号诱骗导弹、无线电通信中继、防护港口，避免海上攻击、放置和检测声呐浮标及其他反潜作战；陆军方面：如侦查、监视敌方活动、核生化（NBC）污染监控、电子情报、目标指示及检测、地雷定位及摧毁；空军方面：如远程高空监视、干扰和攻击雷达系统、电子情报、机场安全、机场损伤评估、未爆炸弹拆除等。现代化信息对抗战，对无人机提出了新的需求，也为无人机的研制提供了更广阔的空间。

与有人战斗机相比，无人战斗机具有以下优点：①因机上无驾驶员，无人战斗机比有人战斗机做得尺寸更小，隐身性更好；②无人机不受驾驶员生理条件的限制，因此具有较大的性能包线，以及较长的续航时间；③制造成本费用低，使用寿命周期长，维护人员少。

二、民用无人机

透过无人机的发展历程可以看出，无人机发展历史上的每次重大事件均是伴随着军事领域的迫切需求而诞生。由于其成本低，效费比好，无人员伤亡风险，生存能力强，机动性能好，使用方便等特点，使得无人机在民用领域也具有十分广泛的用途，如大地测量、气象观测、城市环境监测、地球资源勘探、森林防火、航空摄影、搜寻与营救、海岸巡逻、海界标检测、污染及土地状况监测等。长航时无人飞行器可以满足农业精耕细作的需要，中、短航程的无人飞行器则能用于输电线路和管道巡线等方面。美国、欧洲为了使无人飞行器安全地在民用空域中飞行，针对机场、空中交通管制、飞行安全等方面可能出现的新问题，成立了专门的机构，并开展了相关政策法规、技术、执行、模拟、验证等方面的研究。

在通航领域，我国与国际水平差距较大，但在民用无人机领域，中国邮政、国家电网公司等国内大型企业早已开始了对无人机的应用和开发。

现在投入使用的无人机主要如下。

（1）自主研发的 U8 无人直升机。最大起飞质量为 230kg，任务载荷可达 40kg，

续航时间为 4h，可航行至 3000m 高空，巡航时速可达 150km/h。U8 无人直升机如图 1-2 所示，主要用于反恐防暴、缉私缉毒、海事侦查、搜索救援、警务执法、交通疏导、空中指挥、农业作业、大气监测、森林防火、电力传输线路检测等民用领域。



图 1-2 U8 无人直升机

(2) XH-4 无人直升机。无人直升机机体由韩国原装进口，配备自主研发的自动控制驾驶飞行系统。其主要特点是载荷大，高稳定性，高精度控制。机身长 3.5m，宽度为 0.66m，最大起飞质量为 100kg，载荷可达到 25kg。最大飞行时速为 75km/h，最大飞行时间为 70min。XH-4 如图 1-3 所示，在韩国运营 10 余年时间，系统非常稳定，是一款非常成熟稳定的无人直升机。同时可以装载专用的云台、摄像机、专业巡检红外设备等，可实现空中动态侦查、安全监控、电力巡线等多用途功能。



图 1-3 XH-4 无人直升机

(3) KC1600 智能鸟无人机。KC1600 是一款小型电动固定翼无人机,采用双电机驱动设计提升可靠性,倒开伞设计更能保护相机镜头不受损害,舵机全内置设计,舵面转轴为整体穿轴式,可靠性高。整个机身只有两个螺丝,拆装方便;发射方式为皮筋弹射,操作简单。机身长 1m,翼展可达 1.64m,空机重 3kg,有效载荷为 0.5kg,平均飞行速度为 60~72km/h,如图 1-4。由于体积轻巧安全性高,在城市里的飞行任务也能出色的完成,在农村土地确权和高精度小范围测绘方面,也显现出特有的优势。



图 1-4 KC1600 智能鸟无人机

1. 农业应用

无人机低空施药技术是利用轻小型无人机为载体,在飞行器上搭载农药喷雾设备,通过将 GPS 系统引入无人机施药作业中,实现精准化作业,为农作物种植实现低空低量航空施药提供技术支持,为提高我国农业生产信息化和数字化水平提供技术支撑。相比传统的地面施药和有人驾驶飞机施药,无人机有其独特的优势,不仅适用于平原地区作物,在丘陵山区、连片梯田等特殊地区进行农业病虫害防治以及灭蝗、卫生防疫等作业中也发挥着不可替代的作用。

日本雅马哈植保无人机有近 30 年的技术积累并持续改进,成为全球行业的标杆。其中最具有代表性的机型是 YAMAHA MOTOR 公司生产的 R 系列无人直升机,如图 1-5 所示。美国是世界上农业航空最发达的国家之一,农业生产高度规模化,图 1-6 是美国 AUH 型农用无人喷药直升机。该型无人直升机自身质量 76kg,可负载 20kg 左右的农药进行喷洒作业,作业效率 10km²/h。配备有 GPS 导航系统,并采用了电子伺服系统和陀螺增稳系统,提高了整个飞控系统自动化程度,能实现精确喷洒。

我国的农用无人机技术发展较晚,但是随着投入研究力量的加大,近年来我国农用无人机的研究也步入了新的阶段,目前国内生产无人植保飞机的厂家已经超过 10 家,并呈快速增长趋势。国内某款电动无人低空喷药直升机,该机载药量

8kg，作业效率 $3.33\text{km}^2/\text{h}$ 左右，在实地试验中取得了不错的效果。国产无人机喷洒农药现场如图 1-7 所示。



图 1-5 雅马哈 R 系列无人直升机



图 1-6 美国 AUH 型农用无人喷药直升机

2. 环保领域

无人机在环保领域的应用，大致可分为三种类型：①环境监测，观测空气、土壤、植被和水质状况，可以实时跟踪和监测突发环境污染事件的发展；②环境执法，环境监测部门利用搭载了采集与分析设备的无人机在特定区域巡航，监测企业工厂的废气与废水排放，寻找污染源；③环境治理，与无人机喷农药的工作原理一样，利用携带了催化剂和气象探测设备的固定翼无人机在空中进行喷撒，可在一定区域内消除雾霾。



图 1-7 无人直升机喷洒农药

无人机可以开展航拍，持久性强，还可采用红外夜拍等模式，实现全天候监测。同时，无人机执法不受空间与地形限制，时效性强、机动性好、巡查范围广，尤其是在雾霾严重的京津冀地区，使得执法人员可及时排查到污染源，一定程度上减缓雾霾的污染程度。图 1-8 所示为济南市历下区环保局引进的用来监测环境污染的迷你无人机。



图 1-8 用于环境监测的迷你无人机

3. 国土测绘与监测

遥感无人机航测系统根据不同类型的遥感任务，研发相应的机载遥感设备、传感器、控制系统，根据遥感系统定位航摄点、摄影比例尺、重叠度等参数，通过飞行控制系统实时提供的飞行高度、飞行速度等数据，自动计算并自动控制遥感传感器，使获取的空间数据在精度、比例尺、重叠度等方面满足遥感监测的技术要求。相比较传统的测绘手段，无人机测绘能够凭借其机动、灵活等特点，在国土测绘领域发挥重要的作用。通过快速获取测绘无人机航拍数据，能够快速掌

握测区的详细情况，可应用于国土资源动态监测与调查、土地利用和覆盖图更新、土地利用动态变化监测、特征信息分析等工作任务中。高分辨率的航空影像还可应用于区域规划等，例如，贵州省国土资源厅利用无人机进行国土测绘，如图 1-9 所示。



图 1-9 利用无人机进行国土测绘

遥感无人机也可应用于洪涝监测、河道管理、河道污染监测等。无人机可根据地形和河流情况确定航线，并进行凌情应急监测、滩区洪水灾害监测和水污染等突发事件监测等。此外，遥感无人机还可以应用于海岸带调查，如填海造地、水产养殖、海岸带变迁等情况。

4. 应急救援

(1) 洪涝灾害监测。目前，洪涝灾害监测方法主要是通过地面上水文实测站点获取的水文数据分析整个流域的汛情。但由于这些点上的数据较为分散，难以形成完整的水文信息。利用无人机航空遥感系统拍摄的灾情信息比其他常规手段更加快速、客观和全面。

根据航拍结果，详细分析汛情的发展，研究汛情的变化情况，把握汛情现状和发展趋势；在航片上提取洪水范围，结合地形数据可以确定水位和水深，评估灾害损失情况。

(2) 森林防火检测。森林火灾发生时，火场上空能见度极低，即使是航护飞机能达到火场上空，观察员也无法详细观察到地面火场情况，而在这种情况下飞行又存在安全隐患。而无人机则可以全天候在空中对林区进行勘查，及时发现火情、报告火场位置。同时，无人机配备彩色 CCD 任务载荷，可按预定航迹对林区进行空中巡查，并将空中巡查获取的图像数据实时传回地面测控站，地面测控站

则将实时图像通过网络传给防火值班部门。对已出现火情的地区进行空中火情态势观察，使灭火指挥部门迅速有效地组织、部署灭火队伍，提高灭火作战效率，防止救火人员的伤亡。

第三节 架空输电线路巡检现状

针对架空输电线路的巡检，目前主要有人工巡检、有人直升机巡检和无人机巡检三种巡检模式，根据地理环境和杆塔的类型选择不同的巡检方式，或使用协同巡检模式来实现各种巡检模式间协同工作，配合完成架空输电线路的巡检任务。

一、架空输电线路分类

目前国内使用的架空输电线路杆塔依据功能可分为直线杆塔和承力杆塔，直线杆塔依据其作用主要有 4 种类型，如表 1-1 所示。承力杆塔依据其作用主要有 6 种类型，如表 1-2 所示。

表 1-1 直线杆塔类型与作用

杆塔类型	作 用
普通直线杆塔	用于导线、地线的正常支撑
直线换位杆塔	用于导线换位
直线跨越杆塔	用于跨越河流、道路、电力线路等设施
直线转角杆塔	功能类似于普通直线杆塔，但用于线路小转角处

表 1-2 承力杆塔的分类与作用

类型	作 用
耐张杆塔	用于线路分段控制，一般不超过 5°
转角杆塔	改变线路前进方向
终端杆塔	用于线路起止点，主要承受一侧张力
换位杆塔	用于导线换位
跨越杆塔	用于跨越河流、道路、电力线路等设施
分歧杆塔	用于线路分支线处

在实际应用中，根据杆塔的材质和形状分为单回直线铁塔、单回耐张铁塔、单回直线钢管、单回耐张钢管、双回直线铁塔、双回耐张铁塔、双回耐张钢管和双回直线钢管 8 类，其形状如图 1-10 所示。