

DAXINGWURENJI
DIANLIXIANLUXUNJIANZUOYE
JIZHINENGZHENDUANJISHU

大型无人机

电力线路巡检作业 及智能诊断技术

彭向阳 陈 驰 饶章权 编著

DAXINGWURENJI
DIANLIXIANLUXUNJIANZUOYE
JIZHINENGZHENDUANJI SHU

大型无人机

电力线路巡检作业 及智能诊断技术

彭向阳 陈 驰 饶章权 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

电力线路巡检是保障电网安全运行的重要方式,无人机电力线路巡检是一种高效、智能、全新的电力线路巡检模式,有别于传统的人工巡检和其他巡检模式,代表了智能电网电力线路巡检的发展方向。本书结合中国南方电网有限责任公司“大型无人机电力线路巡检智能诊断系统”等一批重点科技项目,系统研究和总结编写而成。

本书共10章,包含电力线路巡检技术概述、无人机多传感器数据采集技术、无人机电力线路巡检作业、激光点云数据获取与智能诊断、可见光影像数据获取与智能诊断、红外影像数据获取与智能诊断、紫外影像数据获取与智能诊断、巡检专家诊断及三维可视化、大型无人机电力线路巡检应用和无人机电力线路巡检及智能诊断技术展望。全书内容新颖,指导性强,对于推动我国无人机电力线路巡检技术发展及进步具有重要意义。

本书可供从事电力安全生产和电力线路运行维护、无人机电力线路巡检应用、测绘遥感信息工程等方面的专业技术人员和管理人员使用,也可作为高等学校相关专业本科生和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大型无人机电力线路巡检作业及智能诊断技术/彭向阳,陈驰,饶章权编著. —北京:中国电力出版社,2015.10

ISBN 978-7-5123-7158-3

I. ①大… II. ①彭…②陈…③饶… III. ①无人驾驶飞机-应用-电力线路-巡回检测 IV. ①V279②TM75

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第223320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

*

2015年10月第一版 2015年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13印张 285千字

印数0001—2000册 定价78.00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

本书编写人员

彭向阳 陈 驰 饶章权 杨晓东 杨必胜

王 柯 麦晓明 王 锐 许志海 钱金菊

徐文学 胡平波 杨维顺 刘正军 刘 刚



前 言



电力线路巡检是保障电网安全的重要手段，随着电网规模增大、自动化程度提高以及电网结构升级、超/特高压电网发展，电力走廊环境更趋复杂，电力线路巡检难度加大。特别是近年自然灾害频发、电网运行环境变差，巡检压力也随之增大，电网的发展对传统人工巡检方式提出了巨大挑战。

人工巡检具有劳动强度大、工作效率低、无法满足电网规模快速发展的缺点，载人直升机巡检成本高、存在机载作业人员安全风险等问题。无人机电力线路巡检是一种高效、智能、全新的电力线路巡检模式，高度集中了无人机、计算机、无线通信、高级传感、定位导航、测绘遥感、地理信息等诸多前沿成果，代表着智能电网电力线路巡检的发展方向。总体来说，电力线路巡检的发展趋势是由目前的人巡为主，逐步过渡到“机巡为主、人机协调”的巡检模式。近年国内外相关技术的发展为无人机电力线路巡检提供了条件，特别是国产无人机平台安全性和荷载能力的提高，高性能、轻小型机载传感器的出现，以及导航定位、测控通信技术的进步等，都极大的促进了无人机电力线路巡检技术的发展。

2011年以来，广东电网有限责任公司电力科学研究院瞄准新形势下电力线路安全巡检、应急处置、重要保供电等重大业务需求，联合产学研相关单位，在国内率先开展大型无人直升机多传感器电力线路全自动巡检技术研究和规模应用，取得了显著成绩。先后完成“基于遥感技术的电力线路安全巡检系统”“大型无人机电力线路巡检智能诊断系统”等中国南方电网有限责任公司重点科技项目，在国内首创大型无人直升机按航迹规划全自动飞行、任务设备按计划全自动执行精细检测任务的全自动、高效智能巡检模式，并实现了基于多种传感器的多源数据同步获取、融合处理及线路缺陷隐患智能诊断技术，全方位、多角度对电力线路安全状态望闻问切，解决了制约大型无人机电力线路巡检系列技术问题。

本书系统研究和总结了电力线路巡检模式及作业方式，大型无人机多传感器数据采集技术，输电设备及通道可见光、激光、红外、紫外智能诊断技术，无人机电力线路巡检三维可视化技术及无人机在电网巡检中的应用技术，对于推动我国无人机电力线路巡检技术发展进步具有重要意义。

由于编者的水平、时间以及本书的篇幅有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2015年4月



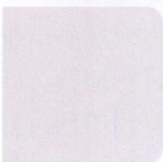
目 录



前言

1	电力线路巡检技术概述	1
1.1	电力线路巡检重要性	1
1.2	电力线路巡检技术发展	2
1.3	无人机电力线路巡检	4
1.4	无人机电力线路巡检优势	8
1.5	本书内容概要	9
2	无人机多传感器数据采集技术	11
2.1	无人机系统及技术简介	11
2.2	无人机巡检数据	22
3	无人机电力线路巡检作业	39
3.1	无人机巡检飞行平台	39
3.2	无人机与多传感器集成耦合	45
3.3	线路巡检通信与运输保障	47
3.4	安全巡检雷达避障	54
3.5	无人机巡检作业要求	55
3.6	巡检作业模式和内容	57
3.7	巡检作业方式和方法	60
3.8	无人机巡检作业方案	62
4	激光点云数据获取与智能诊断	66
4.1	数据采集原理及过程	66
4.2	激光点云数据后处理技术	70
4.3	电力线路巡检激光点云数据智能诊断	74
5	可见光影像数据获取与智能诊断	84
5.1	数据采集原理及过程	84
5.2	可见光数据处理技术	85

5.3	电力线路巡检可见光数据智能诊断	86
6	红外影像数据获取与智能诊断	106
6.1	数据采集原理及过程	106
6.2	红外数据处理技术	110
6.3	电力线路巡检红外数据智能诊断	117
7	紫外影像数据获取与智能诊断	127
7.1	紫外成像原理与过程	127
7.2	紫外数据处理技术	130
7.3	紫外数据诊断应用	142
8	巡检专家诊断及三维可视化	146
8.1	概述	146
8.2	基于多源数据融合的线路安全诊断	147
8.3	三维可视化应用	154
9	大型无人机电力线路巡检应用	160
9.1	巡检试验概况	160
9.2	巡检试验实施	164
9.3	无人机巡检应用	170
9.4	无人机应急巡检	181
9.5	无人机巡检安全	192
10	无人机电力线路巡检及智能诊断技术展望	194
	参考文献	196



电力线路巡检技术概述

1.1 电力线路巡检重要性

电力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。电力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构成严重的威胁。因此，电力线路的巡检是有效保证电力线路及其设备安全的一项基础工作，通过对输配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。

2003年8月14日发生了举世震惊的美加大停电，在美国东北部部分地区以及加拿大东部地区出现了大范围停电，受影响地区大约有24000km²。事后调查结果显示，14日下午3时6分，俄亥俄州北部三条超高压电力线路突然发生树闪故障，由于警报系统失灵，控制人员没有发现并采取有效措施，导致输电系统出现连锁反应，并在一个小时之内蔓延到纽约及加拿大的多伦多。2009年11月10日发生了巴西大停电事故，将近半个巴西和邻国巴拉圭几乎全国陷入一片黑暗，这次停电事故波及到巴西18个州。这次事故的主要原因是当天晚上的强降雨和雷电造成了这一地区的三条主要电力线路同时发生故障。2013年9月3日，委内瑞拉发生大面积停电事故，全国超过一半的地区受到影响。该次事故是由委内瑞拉中部地区一个变电站的防护网脱落掉在电线上，加之因为降雨，空气湿度高造成的电线短路形成的。从上述事件中可以看出，即便是在发达国家和地区，电力系统的安全性问题仍然是电力系统关注的重要问题。当前，我国的电力系统还比较脆弱，系统还不够成熟和完善。如何解决电力系统的安全性问题，保障安全可靠的供电对我国电力事业来说具有非常重要的意义。

电力线路分布点多面广，导地线、绝缘子及杆塔塔材等长期暴露在自然环境中，受材料老化、雷击放电、人为外力破坏等的影响而产生腐蚀、损坏、缺失等问题，必须及时修复或更换。与此同时，超高压大容量电力线路走廊穿越的地理环境更加复杂，其一般都经过大面积的水域和崇山峻岭，给电力线路维护和巡检带来很多困难。此外，冰

灾、地震等自然灾害频发，给电力线路巡检带来新的挑战，对数据获取和处理的时效性和稳定性也提出了更高的要求。

为了防止电力线路事故发生，电网运行维护部门每年都要投入大量的人力、物力和财力对电力线路进行巡检。我国电网现行的高压电力线路巡检方式是通过维护人员依靠地面交通工具，利用手持仪器或肉眼来巡查设施处理缺陷，其劳动强度大，工作条件艰苦，劳动效率低，并且难以管理，已不能适应现代化电网的发展和运行需要，超/特高压电网急需安全、先进、高效的电力线路巡检方式^[1]。20世纪末，国内外应用的巡检新技术——载人直升机电力线路巡检，具有巡检灵活机动和不受河流高山深谷限制等独特优势，巡检手段及观察角度多，能够发现一些人工巡视难以发现的隐蔽性设备缺陷，极大地提高巡检的效率。目前我国载人直升机电力巡检基本达到实用化水平，取得了较好的经验和成果。尽管载人直升机巡检极大地提高了巡检效率，但是由于我国空中资源管理严格，依靠传统载人固定翼飞机或直升机对电力线路巡检，飞行前需要飞行员培训、飞行申请等大量准备工作，调机、停机需要费用和时间，实现定期巡视的运营成本较高；巡检受气象、地理条件的限制较多，需考虑飞行安全，特别是在恶劣环境下对人员安全是极大挑战；同时航线管制、飞行线路、加油地点、休息地点、多方通信等都是直升机巡检面临的困难。

近年来，随着传感器技术的发展以及遥感技术的不断进步，利用无人机多传感器获取多源数据已经成为可能，这为解决上述问题提供了新的思路和有利条件。无人机电力线路巡检是近年来国内外应用较为广泛的一项高新技术，可在不停电的情况下通过一次飞行直接获取电力线路走廊内的高分辨率影像、精确的空间三维信息以及红外紫外视频等多种数据。利用现代先进、高效的遥感技术、航空摄影测量技术以及计算机图像特征提取和分割技术，结合高分辨率遥感影像及机载激光扫描数据，进行全方位的缺陷、故障诊断，为电力线路提供了一种较之载人直升机巡检更为安全和经济的巡线、维护手段，对电网生产带来巨大的经济效益和社会效益^[2]。在这种背景下，世界各国均在研究利用摄影测量与遥感技术来辅助或取代传统的人工巡线工作的可能性。

1.2 电力线路巡检技术发展

传统的电力线路人工巡检方法的流程是工作人员亲自到现场巡视线路，主要是依靠地面的交通工具或者徒步行走，利用普通仪器或肉眼检查电力线路缺陷，巡视对象主要是杆塔、导地线、金具、绝缘子、间隔棒、线路避雷器等设备，以及接地装置、杆塔基础、线路走廊等附属设施，并以纸介质方式记录巡视情况，然后再人工录入到计算机中^[1-3]。

从20世纪50年代开始，美国、加拿大以及西欧各国等一些发达国家开始应用载人直升机搭载数码摄像机、红外热成像仪等，对电力线路进行巡检维护。随着中、重型直升机的陆续出现，尤其是美国、加拿大、德国以及法国等国家在载人直升机参与架空电力线路施工方面取得了巨大的进展。其中美国哥伦比亚直升机公司和美国电力公司合作已经迈入线路的带电作业领域，如应用载人直升机带电更换分裂导线间隔棒、在带电的

超高压线路上维修架空地线、修补导线等。经过数十年的实践探索以及经验总结，西方各国以及俄罗斯、以色列和日本等国家已较为全面地掌握了采用载人直升机对架空电力线路进行巡检、带电作业以及线路施工等各项技术，使得他们的架空电力线路建设和维修技术达到一个新的阶段。在 20 世纪 90 年代，载人直升机巡线、检修以及带电作业已在欧美澳等发达地区和国家得到广泛应用。

我国在线路检测巡视方面的技术装备和评价手段与国际先进水平存在一定差距，目前主要以人工巡视为主，直升机巡线工作有待进一步加强。20 世纪 80 年代，华北地区及河南省、湖北省都进行过直升机巡线的试飞。但是，由于受当时的技术条件和经济实力等多种因素所限，三地试飞后，此方面的工作一度搁浅，未得到大面积的应用研究和实践。随着我国经济实力的增强，超高压大容量电力线路规模逐年上升，线路走廊穿越的地理环境也随之复杂，再加上国内航空管理体制的开放，使得直升机巡检的应用不管从电网运行的客观需求还是可行性来看，都具备了较成熟的条件。2002 年国家电网公司与首都通用航空公司合作正式启动直升机电力线路巡线项目，到 2006 年共巡航 37000km 线路，飞行 2700h，发现线路各类缺陷 2017 项，其中可见光缺陷 1870 项，红外发热缺陷 147 项，有效的保障了国家电网安全稳定的运行。

在此基础上，2009 年以后国家电网公司开始大规模推广载人直升机带电作业，主要用于线路巡检、灾情勘察和应急抢险工作，巡检对象重点为特高压、跨区直流和 500kV 及以上线路，2013 年以来直升机巡检线路长度超过 20 万 km，发现缺陷隐患 36000 余项，其中紧急、重大缺陷 1000 余项。

在南方电网公司，云南电网自 2006 年、超高压公司自 2009 年正式开展载人直升机电力线路巡检工作，特别是 2014 年以来，南方电网公司在网、省公司两级组建机巡作业中心，全网全面开展直升机、无人机带电作业，2014 年直升机巡检线路长度超过 2 万 km，发现缺陷 2000 余项。

目前国内外电力线路直升机巡检主要携带的检测仪器包括红外热成像仪、可见光摄像机以及紫外成像仪等。以色列、南非等国研制了紫外、红外和可见光一体化检测的飞行吊舱，应用效果较好。我国国家电网公司相关单位也结合引进和自行开发研制了机载线路检测装备，正在试点应用。

载人直升机巡线可分为目视巡线和红外发热检测，目视巡线主要是靠巡线人员用眼睛进行观察，必要时用防抖望远镜给予确认，确认后用数码相机拍照记录，用语音说明情况，如图 1-1 所示。红外发热检测通过人工操作载有高分辨率红外成像仪的光电吊舱，对电力线路的电气部分进行全线扫描，寻找异常发热的部位^[3-4]，将可能发生的事消灭在萌芽状态^[3-4]。

数据处理和管理系统方面，葡萄牙的 Power Line Maintenance Inspection (PLMI) 系统、美国的 Transmission Inspection and Maintenance System (TIMS) 系统以及德国的 Integrated Helicopter Corridor Mapping (IHCM) 等都是基于遥感技术的电力线路巡检系统。但是当前的直升机巡线空间定位的量测精度均不高，且获取的多源数据大多分开处理，没有集成为一个整体，处理起来也比较繁琐^[5]。针对上述问题，基于激光扫描



图 1-1 载人直升机巡线

仪测量技术的电力线路巡检方式则具有无可比拟的优势。机载激光扫描仪测量技术自动化程度高且定位准确，作业周期短。利用获取的高精度点云和航空数码影像，可以生成高精度的数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）、数字正射影像（Digital Orthophoto Map, DOM），进而快速获得高精度三维线路走廊地形地貌、线路设施设备以及走廊地物的精确三维空间信息和三维模型，从而精确、快速地量测线路走廊地物（特别是树木、房屋、交叉跨越）到导地线的距离、导线间的距离等^{[3][6]}。为电网设计和管理的精

细化、科学化、高效化提供快速的空间数据获取支持。但是，当前激光点云数据处理多集中于建筑物提取和数据滤波方面的研究，将激光扫描仪技术运用于电力线路巡检的并不多，还有待于进一步的研究和发展^[7]。

1.3 无人机电力线路巡检

虽然利用载人直升机进行电力线路巡检受地理环境因素影响小、巡检周期短、单次巡检效率高，但是由于我国目前载人直升机出勤率较低，使得年巡检效率较低，同时工作人员的安全问题、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^[8]。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，无人机便由此进入了人们的视野^[9]。采用无人机进行电力线路巡检，能够提高机载传感器使用的灵活性，减少人员伤亡风险，降低巡线成本，可在飞行中获取大量电类及非电类数据，为电网管理和维护提供更多数据支持。

无人机（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）是一种由无线电遥控设备或自身程序控制装置操纵的无人驾驶飞行器^[1]。无人机技术跨越多个高科技专业，起步早，更新快，根据应用领域不同，在规格、功能和复杂度上有较大的差别。图 1-2 所示的无人机是用于短距离电力线路巡检无人直升机系统，功能和结构均较为简单。而诸如全球鹰这种用于军事侦察目的的无人机系统，其复杂度和技术水平堪比最先进的载人飞行器。

无人机诞生于军事活动，最早的军用无人飞行器出现在 1849 年，当时奥地利使用装有炸药的无载人气球袭击威尼斯城。这种“无人机”的概念与现在的有较大的不同。以飞机为基础的无人机概念在 20 世纪 10 年代开始出现。1917 年皮特·库柏（Peter Cooper）和埃尔默·A·斯佩里（Elmer A. Sperry）发明了第一台自动陀螺稳定器并应用在美国海军的 Curtiss N-9 型水上飞机上（见



图 1-2 中型无人直升机数据采集系统

图 1-3), 使其成为首架无线电控制的无人机。飞机通过弹射起飞或者从水面起飞, 爬升至指定高度, 按照指定的航线和指定的距离飞行, 或投下炸弹, 或直接撞向地面, 是一种一次性使用的攻击型无人机, 但尚未投入到战争中。

1935 年, HD-82B Queen Bee 型飞机使用了一种无线电控制装置, 使飞机可以返回起飞点重复使用, 飞机的外观如图 1-4 所示。1940 年, 量产型无线电遥控无人机 OQ-2 Radioplane 问世, 该型号飞机主要用于训练防空炮手, 飞机的外形如图 1-5 所示。1955 年, Teledgne Ryan Firebee 号飞机首次试飞, 是世界上首台喷气推动的无人机, 飞机外观如图 1-6 所示。这一时期的无人机多用作飞行炸弹 (Flying bomb) 和靶机, 无人机的外形也逐渐变得小巧并取消了飞行员座舱。

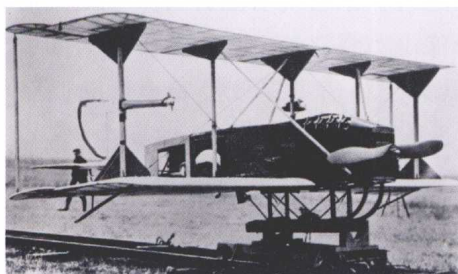


图 1-3 改造后的 Curtiss N-9 型水上飞机



图 1-4 HD-82B Queen Bee 型无人机



图 1-5 OQ-2A Radioplane 型无人机



图 1-6 Teledyne Ryan Firebee 型无人机

20 世纪 60~70 年代越南战争期间, 美国大量应用无人机取代载人机从事深入敌方的高危军事侦查活动, 以减少飞行员伤亡, 无人机的用途开始发生变化。1973 年第四次中东战争期间, 以色列为了对抗埃及和叙利亚对本国战斗机造成的巨大威胁, 研发了具备实时监控、电子战和诱导能力的无人机, 被认为是第一架现代无人机。

无人无人机 (亦被称作旋翼无人机) 出现相对较晚。在 20 世纪 50 年代, 美国海军将一种单人驾驶的微型直升机改装为 QH-50 舰载无人直升机, 主要用于反潜, 但因为失事率很高, 到 1970 年后该型无人直升机发展计划甚至被取消, 无人直升机发展因此进入低谷。在伊拉克战争时期, 因武装直升机遭到各种反美武装的击落, 使得美国军方重启了无人机 (特别是适合作为舰载机使用的无人直升机) 的研发工作, 并在 21 世纪初期, 成功开发了可用作战斗直升机的 MQ-8B, 大量投入使用。到目前为止, 无人机的发展已经呈现百花齐放的势态。

国内无人机技术虽然起步较晚, 但在最近几年的国内航展上, 大量的国产无人机不

断涌现出来，这些无人机在外观、规格、有效载荷、飞行速度、飞行时间、飞行距离以及功能复杂程度等方面均有很大的不同。部分低成本的无人机开始承担诸如国土资源勘探、气象探测、城市安防、山火监测、运输、科研、灾害灾情调查、搜救、电力线路巡检和输油管线巡检等非军事任务。

近年来，随着传感器技术的发展以及遥感技术的不断进步，利用大型无人直升机多传感器获取多源数据已经成为可能，在多源数据的基础上建立无人机电力线路走廊安全巡检与三维可视化系统，为电力线路安全巡检提供了新的途径。

大型无人直升机电力线路走廊安全巡检与三维可视化系统基于无人机的红外影像、紫外影像、可见光影像、激光点云数据等，通过独立与融合处理可以稳健检测电力设施安全状况，及时发现安全隐患，保障线路的安全运行。该系统可划分为基于三维激光扫描仪的电力线路信息提取及安全诊断、可见光影像电力线路信息提取及安全诊断、红外影像电力线路信息提取及安全诊断、紫外视频电力线路信息提取及安全诊断四个子系统。其系统结构及系统界面分别如图 1-7 和图 1-8 所示。

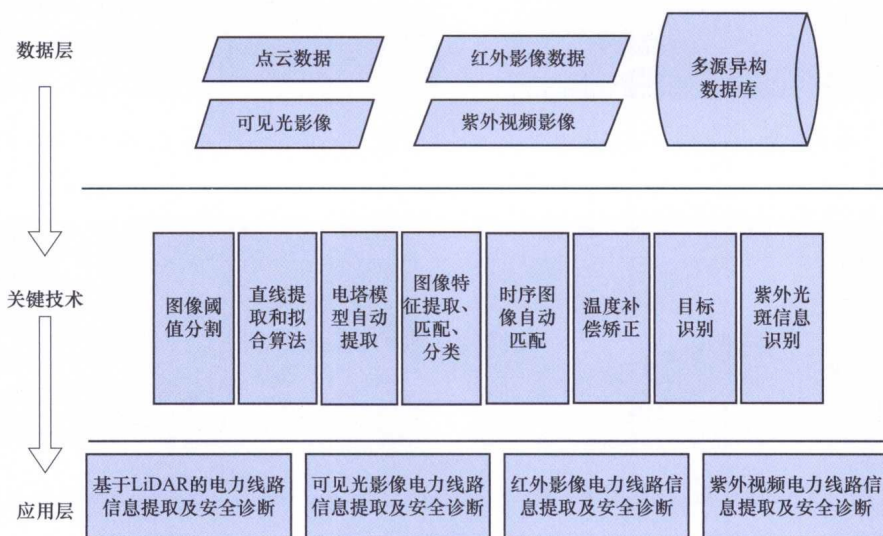


图 1-7 电力线路走廊安全巡检与三维可视化系统总体结构

采用无人机载激光扫描仪技术可直接获取线路走廊内的大量高精度激光点云数据，从大量无序的激光点云数据中提取电力线矢量数据以及杆塔信息是解决激光扫描仪电力线路巡检的一项关键工作。由于激光点云数据相对于其他数据有精准的位置信息，因此，对激光点云的数据处理并和其他数据源进行融合，有助于线路故障的精确确认及定位，从而方便用户进行故障场景可视化及判别诊断，因此成为其他判别手段的前提和基础；同时，由于导地线以及杆塔矢量数据是线路走廊三维重建的基础数据之一，基于机载激光点云数据的电力线路信息提取子系统旨在完成自动化的导地线、杆塔提取方案，生成精准的导地线矢量模型以及杆塔位置信息，并基于获取数据进行线路安全诊断，实现安全预警，为电力线路走廊安全巡检与三维可视化系统完成危险地物检测、悬垂度分析等功能。基于机载激光点云数据可进行线路走廊地形、线路以及杆塔的三维建模，从

而对输电线路进行识别，对线间距离和地物至导线间的距离进行量测，也可对杆塔位置与设计是否相符进行判断。利用提取出的导线矢量数据建立电力线路数据库，可通过定制的地理信息系统（Geographic Information System, GIS）对其进行科学的管理与分析，提高管理运行效率，通过空间分析的方法探测到电力线路存在的安全隐患等，为电力线路维护和故障检修提供决策支持。

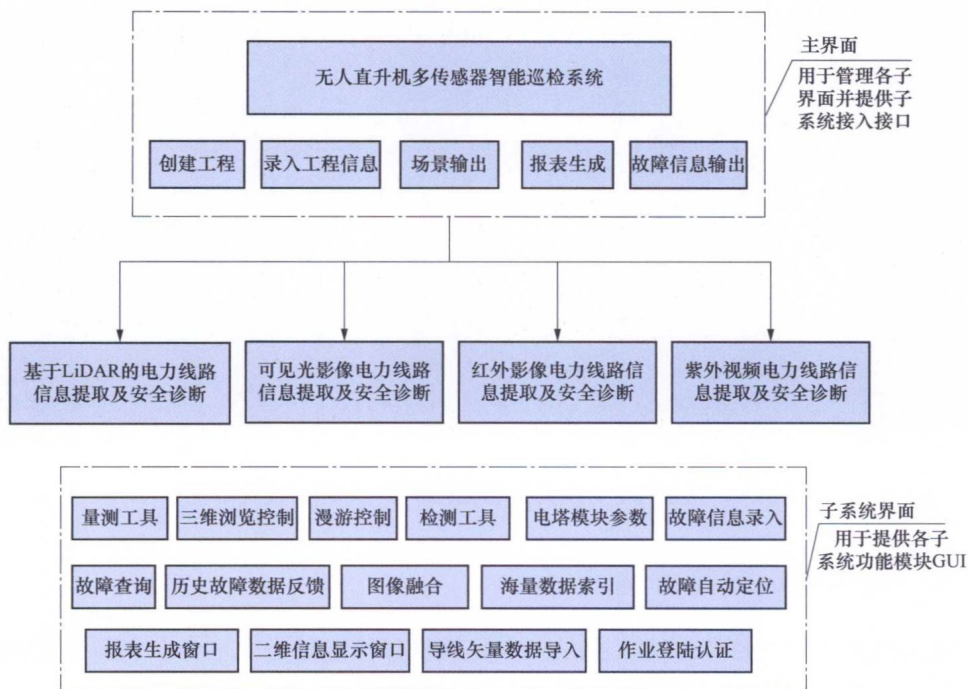


图 1-8 电力线路走廊安全巡检与三维可视化系统界面

采用无人机亦可同时获取高分辨率航空数码影像、热红外影像以及紫外影像。根据可见光数据丰富的纹理信息，利用成熟的图像处理手段包括图像特征提取、图像分类等技术，可完成导线提取、绝缘子的提取和定位、电力线路锈蚀缺陷图像识别，并进行导线覆冰检测；利用红外影像电力线路信息主要用来针对绝缘子进行热异常诊断；利用紫外视频电力线路信息检测电力线路中的电晕放电现象，进而对设备放电进行诊断。针对异源数据所各自拥有的不同特点，对不同的故障进行诊断，并同激光点云融合，得到精准的位置信息，将综合得到的结果反馈给用户。

无人机电力线路走廊安全巡检与三维可视化系统以无人机多传感器获取的高精度三维激光点云、高分辨率航空影像、红外视频及影像、紫外视频及影像为基础数据源，在多传感器数据源安全诊断方法的基础上集成开发，进行多源数据的独立与融合处理，利用异源数据各自所拥有的不同特点，对不同的故障进行诊断，并同激光点云融合，得到精准的位置信息，从而稳定检测电力设施的安全状况，及时发现和排除安全隐患，保障线路的安全运营。该系统可以为用户提供相对应的决策依据。同时，还能够提供相应位置的可视化模块及场景信息，方便用户直观进行故障判别，提高故障检测率，如图 1-9 所示。

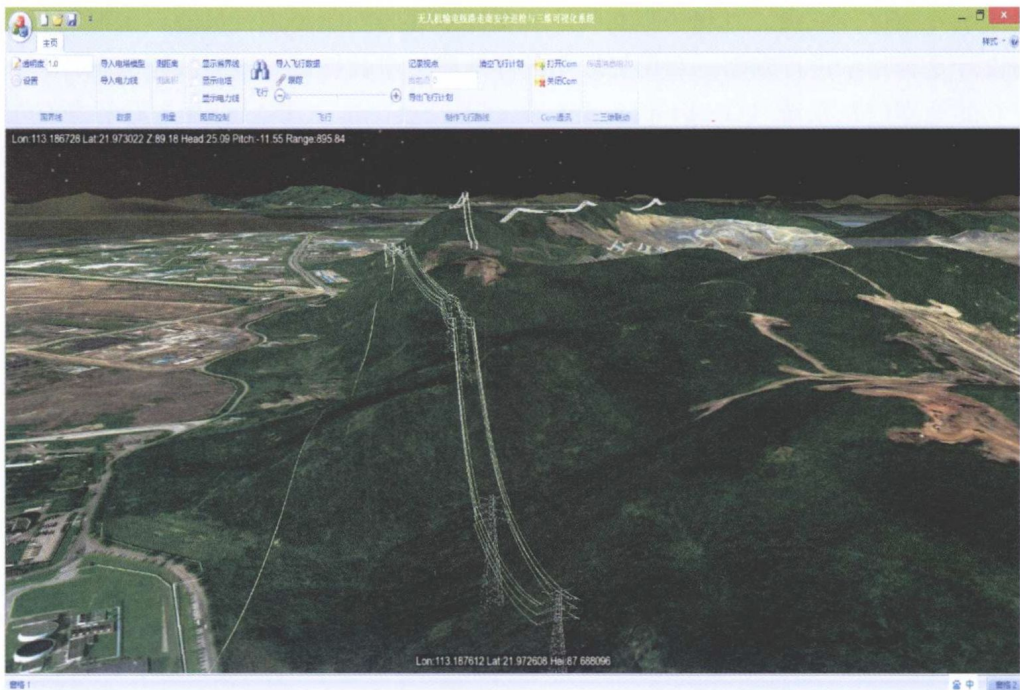


图 1-9 无人机电力线路走廊安全巡检与三维可视化系统

1.4 无人机电力线路巡检优势

在电力线路巡检工作中，无人机是一个具有优异性能的空中的平台，它可以搭载摄像机、照相机、激光扫描仪、红外热成像仪、紫外成像仪、GPS（Global Positioning System，全球定位系统）、IMU（Inertial Measurement Unit，惯性测量单元）等多种检测装置和传感器，实现远距离自主飞行，完成电力线路自动巡检。无人机作为先进的生产工具和作业手段，与传统的巡线方式相比较具有多方面的优势^{[1][10-12]}：

(1) 受地理条件的影响较小。无人机可深入巡检人员难以到达的地区，如架空电力线路所处的高山峡谷、河流草甸、无路无人区等，不受电力线路跨度大等的影响，也不受地质环境变化，如地震、塌方、泥石流、水灾、火灾等的影响。

(2) 机动性和灵活性强。无人机由于机型较小，起降场地选择难度较低。同时无人机结构相对简单，现场准备时间短，转场、撤场方便。

(3) 机型和传感器选择范围广。巡检部门可以根据不同重量的巡检设备和巡检范围，选择不同重量和续航时间的无人机机型^[11]，同时不受机载设备适航认证的限制，传感器可选种类多。

(4) 巡检人员在地面操作，无坠机伤亡风险。

(5) 自动驾驶和精确定位功能。随着智能控制技术和微电子技术的不断发展，无人机可以实现自动驾驶和空中定点悬停，能够对复杂线路进行沿线巡检，对疑似故障点进行定点检测^[10]。

(6) 巡线快速，巡检结果数字化。能够短时间内快速获取电力线路走廊内的影像资

料,效率高于人工巡检。巡检结果以电子文档形式保存,可随时复查比较,使得巡检不留死角。

(7)可以识别缺陷种类丰富,巡检效果较好。除了能有效检查架空输电线路塔身、导地线、绝缘子、防振锤、耐张线夹、悬垂线夹等较易产生缺陷的关键部位的情况,条件较好时还能够检查杆塔基础缺陷、放电、雷击、覆冰等情况。巡检视野优于人工巡检,传感器种类优于载人直升机,巡检效果较好。

(8)人员利用率高。一架无人机仅需要2~3人即可操控,并且运输方便,可迅速到达事故地点,有利于检修人员及时掌握事故现场第一手资料。

(9)培训、使用、维护费用较低,容易掌握。相比较于载人机,无人机操控手的培训费用要远远低于飞行员的培训费用,国内无人机操控手的培训也初具规模,培训费用也较低。由于无人机设备归属于自己单位,何时巡线可自由决定。另外,无人机零配件相比载人机要便宜得多,维护费用相对也比较低。

综合以上各个因素,无人机巡检既克服了载人机飞行审批程序复杂、使用维护成本高等缺点,又避免了人工巡检方式漏检事件的发生,减小了巡检人员的工作强度,提高了电力线路巡检的工作效率,是一种高效便捷的电力线路巡检方式。同时,无人机巡线还可以提高巡检作业的质量和科学管理技术水平,增强电力生产自动化综合能力,创造更高的经济效益和社会效益。相信在不久的将来,随着无人机电力线路巡检各种实践内容的不断丰富,其优越性将越来越突出,在电力线路的巡视和维护工作中也将发挥更大的作用,做出更大的贡献,进而发展成为一种常规的电力线路巡检手段。

1.5 本书内容概要

针对我国高压、特高压电力线路日常安全维护和应急处置等业务需求,编者所在单位联合多家产学研用单位,在国内首次开展了大型无人直升机多传感器电力线路全自动巡检技术研究,实现了复杂环境下大型无人机超低空、超视距电力线路安全巡检,研制了电力巡检成套软硬件装备,完成了现场性能测试和适应性巡检试验,开展了省级电网规模化巡检和示范应用,推动了我国无人机电力巡检软硬件技术研发能力的提升,促进我国电网安全、高效巡检和能源应急保障技术的发展进步。本书较系统的研究了无人机电力线路安全巡检与三维可视化系统实现的关键技术,主要内容包括以下几个方面。

第1章电力线路巡检技术概述,首先阐述了电力线路巡检的研究背景和意义,然后简要介绍了电力线路巡检的研究现状及与其对应的几个发展阶段,最后对无人机电力线路安全巡检与三维可视化系统及其特点进行了分析。

第2章无人机多传感器数据采集技术,首先对无人机多传感器数据采集原理及其系统进行了介绍,然后简要叙述了无人机巡线获取的多种数据源,最后将无人机巡线与传统的巡线方式相比较,分析了无人机巡线所具有的多方面优势。

第3章通过对无人机架空输电线路不同模式作业中的无人机飞行平台、传感器平台的选型及其相关耦合技术的研究分析,提供了一套适应不同应用模式和作业区域的无人机和传感器耦合的技术方案,形成了满足电网不同应用需求作业的数据获取可行方案,

从而为无人机电力线路巡检诊断提供了基础技术保障，其提供的数据有利于决策分析。

第4章激光点云数据获取与智能诊断，介绍了机载激光扫描系统的组成及其进行数据采集的原理，根据机载激光扫描数据的特点及电力线路走廊目标的几何特征，提出了对电力线路进行巡检的数据处理流程，最后介绍了机载激光扫描数据在电网中的一些应用，如导地线、杆塔提取，断股及毛刺安全诊断，障碍物安全诊断等，在电力线路的安全巡检中发挥着重要的作用。

第5章可见光影像数据获取与智能诊断，首先介绍了可见光影像的采集原理及过程，然后根据可见光数据的特性，对利用可见光数据进行电力线路安全巡检的流程进行了分析，最后利用可见光影像进行导地线提取、绝缘子提取与定位以及电力线路覆冰厚度的检测，对电力线路的安全巡检具有重要的实际意义。

第6章红外影像数据获取与智能诊断，首先介绍了红外影像数据的采集原理及过程，然后根据红外数据的特性，详细介绍了利用红外数据进行电力线路安全巡检的处理方法，最后对基于红外数据的电力线路故障诊断进行了实验验证。

第7章紫外影像数据获取与智能诊断，首先分析了利用紫外影像进行电力线路安全巡检的原因，并介绍了紫外数据采集的原理与过程，然后根据紫外数据的特点，提出了利用紫外数据处理进行电力线路安全巡检的一系列流程，最后对紫外数据在用电设备检测上的应用进行了详细介绍，为高压线路的正常运行提供了可靠保障。

第8章巡检专家诊断及三维可视化，综合介绍了无人机线路走廊三维可视化的基本原理及其实现流程，基于多源、多时相数据融合可以通过信息互补，实现电力线路的安全诊断，提高故障检测的准确率和完整率，最后将电力线路走廊三维可视化系统分为海量点云数据可视化、地形可视化、杆塔/导线模型可视化和无人直升机实时三维飞行可视化四个子系统进行设计和介绍。

第9章介绍了采用大型无人机多传感器电力线路全自动巡检系统开展巡检试验和巡检应用的情况，检验了大型无人机电力线路智能巡检系统的可靠性及稳定性，进一步验证了采用无人机进行电力线路巡检的可行性，有利于推进无人机巡检系统在电力企业日常巡检等电力业务中的实用化发展。

第10章对大型无人机用于电力线路巡检技术进行了展望，指出了今后可能的发展方向，从而更好的建立符合我国智能电网巡检需求的无人机电力线路安全巡检技术体系。