

DAXINGWURENJI
DIANLIXIANLUXUNJIANSHUJUCAIJI
YUCHULIJISHU

大型无人机

电力线路巡检数据采集 与处理技术

刘正军 彭向阳 郭小龙 蔡艳辉 左志权 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DAXINGWURENJI

DIANLIXIANLUXUNJIANSHUJUCAIJI

YUCHULIJISHU

大型无人机

电力线路巡检数据采集 与处理技术

刘正军 彭向阳 郭小龙 蔡艳辉 左志权 编著



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

输电线路是电力系统的重要组成部分,其设施状态及通道环境的安全性对电网安全运行具有重要意义,如不能及时发现和消除输电线路安全隐患,则可能发展成各种故障甚至事故,对电力系统的安全和稳定构成威胁。利用无人机技术巡视检查能掌握线路运行状况及周围环境的变化,发现设备缺陷和危及线路安全的隐患。它是一项重要的输电线路安全保障技术,具有广阔的应用前景。

本书采用计算机、无人机、自动控制、遥感、测绘等多学科研究方法,对大型无人机电力线路安全巡检数据采集与处理的相关理论、方法与关键技术进行了深入研究,系统地总结了利用大型无人机及遥感、地理信息技术开展复杂环境区域电力线路巡检的整体方案、多种传感器数据采集与处理的方法和技术流程,重点论述了利用大型无人机开展电力线路安全巡检的载荷配置、多传感器系统集成、任务规划及任务控制、传感器检校、多传感器数据处理等相关的关键技术,并结合实践应用进行了介绍和讨论。相关内容对于促进无人机电力巡检技术的发展具有参考意义。

本书可供从事输电线路运行和维护、传感器技术、系统控制、测绘遥感等方面的专业技术人员和管理人员使用,也可作为高等学校有关专业本科生和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大型无人机电力线路巡检数据采集与处理技术/刘正军等编著. —北京:中国电力出版社,2015.12

ISBN 978-7-5123-7157-6

I. ①大… II. ①刘… III. ①无人驾驶飞机—应用—电力线路—巡回检测—数据采集 ②无人驾驶飞机—应用—电力线路—巡回检测—数据处理 IV. ①V279 ②TM75

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第260421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12月第一版 2015年12月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13印张 287千字

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

前言



电力线路巡检是电力系统运行维护与安全保障的一项重要工作，我国电网现行输电线路巡检主要通过运维人员依靠地面交通工具或徒步行走、借助手持仪器或肉眼来巡查和处理缺陷，不仅劳动强度大、工作条件艰苦，而且效率低下，已不能适应现代电网发展和安全运维需要。

随着航空航天、传感器及遥感遥测技术的发展进步，利用直升机、无人机搭载巡检人员和设备进行电力线路巡视检查，掌握线路运行状况及周围环境变化，发现设备缺陷和安全隐患，已成为一项电力行业越来越重视和关注的输电线路安全保障技术。高精度、智能化、集成化的电力巡检装备和应用系统已成为电力行业的紧迫需求。

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，联合中国测绘科学研究院、中国人民解放军总参谋部第60研究所、北京航空航天大学、武汉大学等产学研单位，在国内率先开展大型无人机电力线路巡检技术研究和规模应用，取得了显著成绩。

本书采用计算机、无人机、自动控制、遥感、测绘等多学科研究方法，对大型无人机电力线路安全巡检数据采集与处理的相关理论、方法与关键技术进行了深入研究，所涉及内容主要来自最新研究成果。全书系统论述了利用大型无人机开展超视距电力线路安全巡检的方案设计、载荷配置、多传感器系统集成与检校、数据采集与处理的方法、技术流程、关键技术及实践应用。本书写作力求客观、真实、完整地描述该项工作取得的进展和存在的问题。衷心希望该方面的研究讨论，对于推进当前电力线路巡检技术的快速发展具有一定的参考和借鉴作用。

全书共分10章。第1章论述了无人机电力线路巡检的优势、技术发展现状，总结分析了目前存在的主要问题。第2章针对大型无人机电力线路巡检的目标、作业任务需求，设计了大型无人机电力线路巡检的作业模式、数据采集系统主要组成及技术指标、数据处理系统的主要功能。第3章讨论了一种满足大型无人机电力线路巡检要求的多传感器电力线路巡检任务载荷的硬件集成方法和主要关键技术。第4章和第5章主要针对大型无人机电力线路巡检数据采集作业的任务规划及传感器控制等关键技术进行了重点介绍。第6章针对大型无人机电力线路巡检所集成的多传感器任务载荷，讨论了可见光、红外、紫外、激光等多种传感器的检校方法、技术和流程。第7章和第8章分别介绍了通道快速巡检采集的激光扫描数据及短焦光学影像的处理方法、流程和关键技术。第9章针对通道精细巡检采集的长焦光学影像、红外视频、紫外视频等的处理方法、流程和关键技术进行详细介绍和讨论。第10章详细介绍了利用大型无人机多传感器电力线路巡检系统开展实际巡检示范应用的实践。

参加本书撰写的人员主要有刘正军（第1章、第2章、第5章、第7章），彭向阳（第1章、第2章、第10章），左志权（第6章、第9章），蔡艳辉（第3章），郭小龙（第10章）、谢小伟（第4章、第5章），杜全叶（第8章）、杨维顺（第2章）。此外，参与本书编写的同志还有谢文寒、张永振、徐胜攀、张赓、陈亮、郑晓光、饶章权、麦晓明、王柯、虞海英、张金铎、罗智斌、刘刚、杨必胜等。本书的研究成果是各单位精诚合作与共同努力的结晶，在此一并致以衷心感谢。

由于无人机电力巡检是一项新兴、蓬勃发展的技术，一些原理和技术方法还在不断探索，加之作者水平有限、时间仓促，本书在编写过程中难免会存在疏漏和不妥之处，欢迎广大读者批评和指正。此外，在本书编写过程中，为丰富书中内容，增加知识面，多处引用了互联网或者其他来源的部分参考资料，特向原作者表示感谢。

编 者

2015年10月28日

目 录



前言

1 绪论	1
1.1 引言.....	1
1.2 无人机电力线路巡检技术的优势.....	2
1.3 无人机电力线路巡检技术发展现状.....	3
1.4 本书的主要内容.....	11
2 大型无人机多传感器电力线路巡检总体技术设计	13
2.1 概述.....	13
2.2 电力线路安全巡检数据来源及传感器选型需求.....	13
2.3 大型无人机电力线路巡检系统作业模式设计.....	17
2.4 大型无人机电力线路巡检系统指标设计.....	20
2.5 无人机电力线路安全巡检系统总体框架.....	25
2.6 主要分系统组成.....	26
3 电力线路巡检多传感器吊舱系统集成	38
3.1 概述.....	38
3.2 无人机多传感器数据获取系统集成.....	39
3.3 无人机多传感器数据吊舱系统集成.....	56
3.4 无人机多传感器吊舱实时差分定位系统集成.....	60
3.5 吊舱系统集成测试.....	62
4 无人机电力线路巡检多传感器任务规划	77
4.1 概述.....	77
4.2 无人机航线布设技术.....	78
4.3 多传感器多目标任务布设技术.....	84
5 无人机电力线路巡检多传感器控制与管理	90
5.1 概述.....	90
5.2 机载多传感器控制与管理系统的组成与控制流程.....	91
5.3 地面多传感器控制与管理系统的组成与功能.....	96
5.4 关键技术.....	101

6 无人机多传感器电力线路巡检系统集成检校	105
6.1 概述	105
6.2 激光雷达系统集成检校	106
6.3 光学数码相机标定与集成检校	110
6.4 红外热像仪标定与检校	116
6.5 紫外成像仪标定与检校	118
7 无人机激光雷达数据处理	121
7.1 概述	121
7.2 坐标系定义	122
7.3 无人机激光雷达对地定位模型	124
7.4 无人机激光雷达点云解算	126
7.5 激光点云数据滤波	129
7.6 电力线路目标提取与通道安全检测	134
8 无人机光学影像几何处理	138
8.1 概述	138
8.2 无人机光学影像几何处理流程	140
8.3 无人机光学影像几何处理关键技术	142
8.4 无人机光学影像几何处理系统基本功能组成与试验	158
9 无人机多传感器数据联合处理	165
9.1 概述	165
9.2 无人机多传感器数据整体处理流程	166
9.3 长焦光学照片预处理技术	167
9.4 红外及紫外视频数据预处理技术	169
9.5 多传感器数据互配准技术	177
10 大型无人机多传感器电力线路巡检应用实践	182
10.1 概述	182
10.2 大型无人机电力线路巡检数据采集作业流程	183
10.3 大型无人机电力线路巡检数据处理作业流程	185
10.4 实际巡检案例分析	189
10.5 试验数据分析与应用	192
参考文献	196



绪 论

1.1 引 言

输电线路是电力系统的重要组成部分，由于其长期暴露在自然环境中，不仅要承受正常的机械张力、材料老化和电力负荷等内部压力，还要经受污秽、雷击、强风、洪水、滑坡、沉陷、地震和鸟害等外界因素的伤害。上述因素会促使线路上各元件老化、疲劳，如不及时发现和消除隐患则可能发展成各种故障甚至事故，对电力系统的安全和稳定构成威胁。

线路巡检是有效保证输电线路及其设备安全的一项基础工作。通过巡视检查能掌握线路运行状况及周围环境的变化，发现设备缺陷和危及线路安全的隐患，在此基础上有针对性地提出具体检修意见，以便及时消除缺陷、预防事故发生或将事故限制在最小影响范围内，从而保证输电线路安全和电力系统稳定。

我国电网现行高压输电线路运维模式和巡检方式主要是通过维护人员依靠地面交通工具或徒步行走、借助手持仪器（如望远镜、数码相机、红外热像仪等）或肉眼来巡查和处理缺陷，不仅劳动强度大、工作条件艰苦，而且劳动效率低，已不能适应现代化电网的发展和运行需要，超、特高压电网急需高效、安全、先进、科学的电力线路巡检方式。

20 世纪 50 年代以来，欧美各国和我国部分地区相继开展了利用直升机巡检作业的试验和应用^[1-9]。直升机巡检技术是在直升机上使用可见光及红外等巡视设备对输电线路进行巡视检查。采用直升机巡检能发现通道、铁塔、金具、导地线、绝缘子等缺陷；判断接头过热、异常电晕、导地线内部损伤和劣质绝缘子等缺陷；直升机巡检主要采用目测、仪器观察和仪器自动检测相结合的方式，如采用计算机处理数据，还可以生成设备缺陷清单和缺陷处理意见^[8]。

目前，直升机巡检作为一种相对成熟的电力线路巡检技术，已在国内外电网得到一定程度的推广和应用。

然而，通过对载人直升机巡线耗费成本的分析发现，载人直升机巡线的经济成本较高，约为 1 万元/km^[10]，且基于直升机的电力线路巡线飞行技术属于精确飞行的范畴，它要求直升机必须沿着输电线路的走向，随着导线弧垂的起伏，保持相对稳定的间距进行飞行，对飞行员和巡检人员的技术水平、心理素质要求较高。因此，作业人员人身安全始终是直升机巡线无法解决的潜在隐患。此外，由于空域申请、使用便捷性、作业效率、劳动强度等多方面的原因，载人直升机巡线还不能完全满足大规模电网输电线路常规化作业的要求。

随着无人机技术的发展，利用无人机开展电力线路安全巡检已得到越来越多的重视，成为当前电网巡检技术的一个重要发展趋势。

无人机电力线路巡检技术是将现代航空平台、计算机、通信、测控、遥感等技术有机结合，通过自动化飞行控制和传感器检测技术对输电线路导线、金具、绝缘子、铁塔等设备运行状态以及通道环境进行快速或细致检测。无人机电力线路巡检具有设备投资小、巡检成本低、自动化、智能化的特点，具有明显的技术、经济优势和电力线路巡检特色，且不存在由于误操作或恶劣地理和天气因素造成的人身安全问题，能够较大程度上解决载人机巡检和复杂地理条件下人工巡检的安全性、技术要求高，劳动强度大等问题，其成熟应用后的直接和潜在经济效益较为可观，可大大提升电网电力线路管理的技术水平和效率。

1.2 无人机电力线路巡检技术的优势

无人机巡检相对目前人工巡检和直升机巡检具有以下几方面的优势：

(1) 无人机搭载平台多样，可根据不同巡检目标灵活配置巡检设备。电力线路巡检无人机系统可采用无人飞行器安装数码摄像机、数码相机、红外热像仪、紫外成像仪、激光扫描仪等传感器进行低空飞行和故障巡视，具有平台灵活、自动化程度高的特点。其中固定翼无人机由于航速较快，航高相对较高，适合进行电力线路通道长距离快速巡视和应急巡视。多旋翼无人机航程短、负载能力较弱，适合于对单个杆塔或近距离的巡检和故障诊断。无人直升机由于具有低空、低速、可悬停、负载能力较强的特点，在输电线路巡检中既可用于中长距离快速巡视、也可用于精细巡检和线路故障诊断。

(2) 无人机多种传感器集成开展线路巡检，可全方位诊断线路状态。以无人机为载体，通过集成高分辨率数码相机、红外热像仪、紫外成像仪、激光扫描仪、惯性导航系统（简称惯导）及全球定位系统（Global Positioning System, GPS），突破自主飞行控制、高精度定位、多传感器目标自动跟踪及数据自动获取、多传感器数据融合处理等关键技术，能形成一个一体化多传感器电力线路巡检平台，弥补单一传感器信息不全，提供一种全面、高效的输电线路数据获取与信息提取手段。

利用获取的激光点云数据和影像，可实现输电线路自动识别，并实现输电通道环境及安全距离的量测和分析判断，及时发现线路走廊超高树木、交叉跨越、违章建筑、水土流失等多种隐患。基于无人机高分辨率可见光影像、热红外影像、紫外影像，可全方位检测输电线路导线、金具、绝缘子、杆塔的安全状况，及时发现和消除线路本体安

全隐患、缺陷和故障，满足输电线路定期巡视、特殊巡视、应急巡视等多种需求。同时，多种信息的同时获取还可相互验证，提高故障诊断的准确性和可靠性。

(3) 无人机起降条件低、准备周期短、巡检效率高、成本低。与人工巡检、直升机巡检相比，无人机巡检不需要深入杆塔附近，也不需要具备直升机所需的严格起降条件，免去了调机、停机的费用和时间；多次作业可连续进行；可以对多种电压等级的输电线路进行巡线而不必任何改动。此外，无人机巡检作业设备运输方便，小型无人机可单人携带，大型无人机只要一辆车就可以运输。因此，无人机的巡检速度、效率是人工巡检、直升机巡检数倍至数十倍。由于作业所需的人员少、设备成本和损耗较低，相对于其他方式，具有更经济的作业成本。

(4) 无人机受气象、地理条件的影响较小。高性能的无人机巡检平台通过无人驾驶和操作，生存能力强，机动性能好，使用方便，效率高，可适应更激烈的机动和更加恶劣的飞行环境，更适于执行特殊时期危险性高的任务，不会有人员伤亡风险；不受高压输电线路地处高山峡谷、河流草甸、无路无人区，跨度大等的影响，也不受当地复杂气候条件如冰灾、雷击、暴雨、洪水、台风、雾、冰雹、污染等影响，更不受变化多样的地质地理环境如地震、塌方、泥石流、水浸、火灾、树林生长、风刮物等影响^[11]。

(5) 无人机不仅是一种巡检平台，而且是一种高效的电力线路资产数据获取与建模手段。采用多传感器无人机电力线路巡检平台，可直接获取线路走廊高精度激光(LiDAR)点云数据和高分辨率数码影像，可用于进行线路走廊地形、线路以及电塔的三维建模。同时，获取的高精度定位信息、设备属性信息除可用于电力线路的安全巡检外，还可用于更新、维护线路设备台账信息，提高电网运行管理的信息化水平。

1.3 无人机电力线路巡检技术发展现状

1.3.1 传统巡检技术发展概况

传统输电线路的巡检主要采用地面人工目测法和直升机航测法。

人工目测法巡检是目前主要采用的方法，但存在巡检精度低、劳动强度大，且有巡检盲区。

直升机航测法是在直升机上应用红外热像和可见光录像技术对高压输电线路进行巡视检测。欧美各国在 20 世纪 50 年代开始研究并使用直升机完成巡线、带电作业和线路施工。目前，主要采用的仪器设备包括高速摄像机、红外热像仪、紫外电晕探测仪、X 射线探测仪、绝缘子检测仪、激光扫描仪等。比较典型的巡线平台主要有葡萄牙 Albatroz Engineering 公司的电力线路维护检测系统 (Power Line Maintenance Inspection, PLMI)、美国的集成植被管理系统 (Integrated Vegetation Management, IVM)、德国 TOPOSYS 公司与 ESRI 德国分公司等联合开发的集成直升机廊道制图系统 (Integrated Helicopter Corridor Mapping, IHCM) 等。

20 世纪 80 年代开始，我国也开始研究利用直升机巡线的技术，近年来，我国在有



图 1-1 直升机电力线路巡检

人飞机巡线方面进行了较为广泛的研究，并取得了长足的进步。浙江、云南、黑龙江、北京、江苏、四川、福建等多个省份均开展了相关的应用试验（见图 1-1）。

目前，已实现了长期、稳定的电力巡线作业的主要有国家电网公司东北分部、国家电网公司华北分部，他们分别于 2001 年、2002 年与中国飞龙专业航空公司、北京首都通用航空有限公司合作，正式开展了直升机电力巡线项目。2009 年 12 月，国网通用航空有限公司成立，它现在是

国家电网公司系统内唯一一家具有通用航空经营资质的专业直升机电力作业公司，已具有美国贝尔 206B3 型、206L-4 型、407 型、法国欧直 EC-120B 型等系列航空器，年均飞行 500 h/架。可独立完成直升机巡线、带电作业、水冲洗、放线施工等多种电力作业项目，其在直升机巡航作业、带电水冲洗绝缘子、带电检修、展放导引绳、3D 激光扫描和高海拔作业等方面已积累了丰富的经验。此外，中国南方电网有限责任公司也于 2013 年开始在其所属公司内部推广应用直升机电力线路巡检技术。

尽管载人机巡检技术越来越得到电力部门的重视，但由于载人直升机巡检也存在一次性投资大、巡检成本高、对飞行员及作业员技术水平和心理承受力要求高、机载人员安全和空域管制等问题，还不能完全满足复杂地形和其他特殊灾害条件下的巡检需求^[12]。有研究指出，载人直升机适宜完成跨区电网、网省公司重要线路通道的年度巡视作业；各省一级电网公司范围内专业化的季度或月度航巡作业适宜由大型无人机完成；小型工具化无人机则适宜配备给一线班组、甚至是巡线小组，辅助完成每周、每天的正常巡视和特巡任务^[13]。

1.3.2 无人机巡检技术发展概况

近年来，随着自动控制技术的发展，巡线机器人和无人飞行器技术有效克服了传统巡检技术的缺陷，已成为电力巡线领域一个研究热点。

移动巡线机器人可以沿电力线自主行走、跨越障碍并进行线路巡检。巡线机器人能够带电工作，以一定的速度沿输电线路爬行，并能跨越防振锤、耐张线夹、悬垂线夹、杆塔等障碍，利用携带的传感仪器对杆塔、导线及避雷线、绝缘子、线路金具、线路通道等实施接近检测。缺点是巡检速度相对较慢。

电力线路巡检无人机系统则采用无人飞行器携带线路检测所需的各种传感器进行低空飞行和故障巡视，具有效率高、智能化程度高的特点。其中固定翼无人机由于航速较快，航高相对较高，不适宜进行精细化巡检。多旋翼无人机航程短、负载能力较弱，适合于对单个杆塔或近距离线路巡检。无人直升机由于具有低空、低速、可悬停、负载能力较强的特点，在输电线路中远距离巡检应用中得到重视。

近年来，英国、德国、澳大利亚、西班牙和日本先后开展了无人直升机电力线路巡检的相关技术研究，由于各种原因，现在主要还是处于实验水平，并未应用于实际生产

中。其中，最早利用无人直升机巡线的是英国威尔士大学和英国 EA 著名的电力咨询公司 EA Technology 公司^[14]。西班牙马德里理工大学的 Mejias 等利用视频图像数据处理算法和跟踪技术，在 GPS 的辅助下实现无人直升机的巡线导航。这套导航系统能够自动测定无人机相对于参照物的位置和速度，跟踪电力线路，并且能测出无人机相对于线路的位置和运动姿态。日本关西电力公司联合千叶大学共同开发了具有故障自动检测和三维图像监测功能的无人直升机输电线路巡线系统。系统能自动实时保存三维图像和 GPS 坐标，比载人直升机巡线节约近一半的成本。英国 Bangor 大学的 Jones 及 Golightly 等^[15]人则致力于研发一种新型的专门用于巡线的垂直起降式无人机，这种无人机结构加大了抗风能力，减少了飞行时候的噪声，增加了机体的安全性能。澳大利亚联邦科学与工业研究组织（Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, CSIRO）信息与通信技术中心（ICT Center）2009 年基于无人直升机平台研制出集三维激光扫描仪、数码相机、摄像机的无人机数据获取平台，用于电力线路巡检研究，有效载荷为 5kg，实现了 50h 无故障飞行作业。但上述平台目前仍为试验系统，还没有形成稳定、可靠的产品。此外，有报道称奥地利西贝尔公司的 CAMCOPTER S-100 型无人直升机可搭载可见光视频摄像机、红外成像仪进行电力线路巡检等多种民用、商用以及军事用途^[16]。

国内关于无人机巡线研究的报道相对较少。近年来，主要有西安供电局2008年底利用DXA900型无人直升机在220kV周洋线开展了多次巡线试飞工作，通过增稳吊舱及高清长焦摄像机对线路环境进行拍摄，验证了无人机及机载巡检设备的性能和特点^[17]；国家电网公司电力机器人实验室采用小型无人直升机搭载轻型光电吊舱开展巡线研究，能够实现多基杆塔及线路走廊巡检^[18]；国家电网公司及南方电网下属公司利用多旋翼无人机开展了杆塔故障诊断、导线严重覆冰监测等的应用^[19-20]。此外，福建电网与总参谋部第60研究所及国内相关光电吊舱研制单位合作利用Z3、Z5无人直升机开展搭载光电吊舱巡线的尝试（如图1-2所示），能够实现无人机自主飞行及地面测控条件下人工操控吊舱进行巡检作业^[21]。

在理论和方法研究方面，汤明文等^[22]探讨了无人机在电力线路巡检中的选型原则、巡检模式，概括了电力线路巡检作业中无人直升机和固定翼飞机的应用特点，同时对无人机飞行方式、通信链路系统中继模式、无人机巡检模式及各种不同巡检模式的应用特点及应用特性进行了探讨，可为不同情况下无人机巡检方式的选择提供指导。

1.3.3 电力线路巡检吊舱及传感器技术发展概况

机载电力线路巡检主要采用乘员目测巡检和挂载光学吊舱巡检两种方式。目测巡检通过乘员携带望远镜、红外热像仪、数码相机、激光测距仪等仪器设备进行检测，适合



图 1-2 福建电网 Z-3 无人机电力线路
精确巡检



图 1-3 典型电力线路巡检用光电吊舱系统

载人直升机电力线路巡检。目测巡检存在检测效率低、巡检人员易发生疲劳和晕机而导致漏检和误判等缺点。

光电吊舱是一种应用了陀螺稳定技术的光学设备,主要由陀螺稳定框架、传感器成像系统、伺服控制系统及减震支架等组成。它通常包括红外热像仪、可见光摄像机、数码相机、紫外成像仪和激光测距仪等一种或多种光学传感器,并具有隔离载体运动保持瞄准线在惯性空间角度稳定的功能。光电吊舱可搭载于直升机、固定翼飞机、无人机、舰船和车辆等各种运载平台,可用于侦察、瞄准、导弹制导等军事领域,也可用于监控、导航、搜救、缉私、安全、环境监测、森林防火、电力巡线、空中摄影等民用领域。图 1-3 为典型的电力线路巡检用光电吊舱系统。

无人机电力线路巡检主要采用的方式为无人机搭载光电吊舱系统。无人机电力巡线光电吊舱系统可安装在固定翼无人机、无人直升机、无人旋翼机等飞行平台上,通过陀螺稳定平台框架中的光学传感器对高压架空输电线路进行近距离巡查,直观监测高压架空输电线路运行状况,快速、有效地发现架空输电线路隐患和故障,并提供稳定的图像信息;可部分减轻人员巡线劳动强度,提高线路巡查质量^[23]。

在国外光电吊舱研制方面,美国的第一代军用瞄准光电吊舱于 20 世纪 80 年代投入使用,如美国空军 F-16、F-15E 所挂载的蓝盾(LANTIRN)、海军 F/A-18 所挂载的夜鹰(NIREHAWK)吊舱,其中以蓝盾最为典型^[24-25]。目前,最主要的瞄准吊舱分别是诺思罗普·格鲁曼公司的 Litening 吊舱、雷神公司(Raytheon)的 ATFLIR 吊舱以及洛克西德·马丁(Lockheed Martin)公司的 Sniper XR 吊舱^[26-27]。警用直升机光电吊舱应用方面,目前国外主要的光电吊舱有:①瑞典 POLYTECH 公司 WhiteStar 275 I 执法监视系统;②美国 FLIR 公司机载吊舱系列,典型的如 Ultra 7500、Ultra 8500;③以色列飞机工业公司生产的“插入式光学有效负载”吊舱 POP200,稳定平台可视情况搭载多种插入式传感器(如前视红外装置、CCD 摄像机、激光测距仪等)组合^[28]。

在国内光电吊舱研制方面,中科院长春光学精密机械与物理研究所从 20 世纪 80 年代末开始机载吊舱和稳定平台的研制。其研制的轻型陀螺稳定平台的稳定精度为 0.3 mrad;双轴稳定平台稳定精度 97 μ rad,在保精度范围内,电视跟踪精度 0.87 mrad,红外跟踪精度 1.2 mrad^[29]。

中航工业集团公司第 618 所在 20 世纪 90 年代初期研制的机载陀螺稳定系统,稳定精度可以达到 0.1 mrad;中航工业集团公司第 613 所研制的某型号吊舱性能指标为:激光照射距离 > 10 km,测距距离 15 km,稳定/跟踪系统的瞄准线稳定精度 0.05 mrad,瞄准线跟踪精度 0.4 mrad^[30]。

此外,也有的商业公司研制了具有较高稳定精度的陀螺稳定红外/可见光机载吊舱系统^[31],其稳定精度可达 0.05 mrad,内置高性能的红外热像仪和可见光相机,通过可见光和红外线成像搜寻地面目标,可以很方便地安装在不同的空中平台上,如固定翼飞机、直升机、无人机、动力伞等,可用于电力巡线。

在电力巡线专用吊舱研制方面,国网福建电力公司^[21]研制了一种电力线路巡检无人

直升机专用光电吊舱，其包括机载部分与地面部分，机载部分包括位于上部的固定部、位于下部的转动部及伺服控制组件，转动部包括陀螺稳定转塔、固定部包括电子控制舱，电子控制舱与陀螺稳定转塔之间的电缆通过可支持陀螺稳定转塔 360° 旋转导电滑环连接，光电吊舱机载部分通过减振装置悬挂于无人直升机上、并与无人直升机的飞行控制系统通信连接。光电吊舱内部有一个由微处理器实现的光电任务载荷中心控制器，当吊舱的中心控制器接收到飞控计算机发送的控制指令后，经过指令译码分别控制可见光摄像机、照相机、伺服控制器的工作状态，实现指令要求的操作。其优点在于它是一款结构紧凑的高性能的光电任务载荷，可以满足远距离电力巡检的要求。

长春理工大学许金凯等^[23]与国网吉林省电力公司、国网辽宁省电力公司合作实现 500kV 架空输电线路自动化巡检，根据我国寒区电力线路巡检特点及任务设计制造了适合于高纬度寒区应用的载人直升机机载电力巡线光电稳定吊舱系统，主要由机载光电吊舱、人机操控系统、图像数据采集记录系统、稳定电子跟踪系统、供电电源等组成。光电吊舱搭载的多传感器主要包括高分辨率可见光相机、宽动态可见光相机、红外热像仪和 GPS。图像数据采集记录系统将传感器输出信号按一定序列记录，同时根据巡查需要对相机焦距、光圈等参数进行设置。图像数据采集记录系统在图像存储时采用高带宽高速磁盘阵列保存多通道图像信息，在设计中同时考虑了温度和飞行环境适应性，增加了温度控制装置和隔振装置。人机操控系统由力敏操作手柄和监视器组成。监视器负责将图像传感器信息、GPS 信息、设备当前状态信息等经综合处理后显示给操作人员。力敏操作手柄主要用于吊舱操控。

从机载光电吊舱技术近 30 年的发展来看，已经取得了很多突破性的成果，在军事、警用、民用等多领域得到了广泛应用。随着传感器技术及计算机技术、图像处理技术的发展，在今后的研究中机载光电吊舱技术将有望在以下方面取得进一步突破^[28]：

(1) 探测器性能不断提升，器件小型化趋势明显。吊舱的探测跟踪性能说到底取决于有效载荷即探测器的性能，如空间分辨率、有效探测距离、探测精度、抗恶劣环境的能力等。目前采用 CCD/CMOS 光学成像、红外、激光测距等技术在不断朝着高精度化、小型化、数字化方向发展，分辨率得到不断提高。例如，红外成像技术由 320×240 像素逐渐过渡到目前主流的 640×480 像素，国外甚至研制成功了 1024×1024 像素的红外探测器，且测温精度也得到进一步提高。

(2) 信号探测组合化。光电吊舱探测设备常常集可见光、微光、红外、激光等几种传感技术于一体。对光电吊舱系统的一般要求是尽量采用共同光学系统，进行综合稳定，采用共同的目标跟踪和影像运动补偿系统等，并降低重量、减小体积。然而，开发光电综合探测跟踪系统需要解决窗口材料、光学薄膜等相关技术问题。

(3) 有效载荷模块化。近年来，随着光电系统功能越来越强，其占机载系统的总成本比例稳步攀升，红外、激光、数字图像、定位导航等多种传感器、模块的引入，使系统体积越来越庞大。而机载陀螺稳定平台的空间是有限的，这就需要根据用户需要，能对有效载荷进行灵活的配置。采用插入式的光电有效载荷得到广泛欢迎，典型的如以色列 POP200，它能进行三种配置，即 FLIR+电视、FLIR+激光测距仪、FLIR+电视+激光指示器。今后的机载光电吊舱系统将朝着功能综合化、体积小、重量轻小型化的方向发

展^[26]。

(4) 信息传输与处理实时化。机载系统探测到的图像距离等信息,需要通信系统将其及时传送到地面指挥控制中心。机载通信系统一般采用空地无线电通信设备或卫星通信设备。传输数据量和实时性要求的矛盾日益突出,一方面要求通信链路拓宽频带和提高信息传输容量,并采用多种链路(如无线电通信结合卫星通信)提高通信质量和可靠性;另一方面要求吊舱系统在信号传输前做相应的前端处理,如数字图像信号压缩、信息提取、信息融合、综合处理等,以降低传输成本。

1.3.4 电力线路巡检数据处理技术发展概况

由于电力线路地面常规巡检摄影、摄像设备逐渐从模拟技术过渡到数字技术,以及直升机巡检技术的发展和无人机巡检技术的兴起,其所记录的大量输电线路图像信息,包括数码照片、可见光视频信息、红外图像信息、紫外光子视频信息,包含了电力线路本体及运行状况、周边环境等的丰富信息,通过对这些图像进行处理、分析可得到输电线路的基本状况,发现设备缺陷和故障隐患。如果能够结合图像处理、模式识别、人工智能等技术采用半自动及自动化方法对电力巡检数据进行处理,不仅可克服传统人工判读、分析方式速度慢、主观随意性大的缺点,提高线路巡检的自动化水平、定量化程度并减少巡检作业人员数量,而且能够从整体上提高工作效率、检测精度及应急响应能力。

电力线路巡检数据处理技术大体可分为数据预处理、目标检测与识别、故障诊断与预测三个方面的内容。

(1) 数据预处理。由于电力巡检采集的图像、视频等原始数据往往存在不同程度的质量退化现象,数据预处理主要针对巡检获得的原始数据进行处理,提高数据质量,增强感兴趣目标信息。

造成数据质量退化的原因很多^[32],主要包括:①光学系统的像差、衍射、带宽有限等造成的图像失真;②太阳辐射、云层遮挡、大气湍流的扰动效应等造成的图像失真;③成像器件的拍摄姿态、光电转换器件的非线性等引起的图像几何失真;④平台震动、成像系统与拍摄目标之间的相对运动造成的图像模糊;⑤图像在成像、数字化、采集和处理过程中引入的噪声等。

目前已有一系列较成熟的电力巡检图像预处理方法可用于随机噪声图像的降噪处理,如基于傅里叶变换、小波分析、同态滤波等。高强等^[33]提出了一种基于独立分量分析法的红外图像去噪方法,使电力设备监测图像中温度场的显示更清晰。

为去除由运动引起的图像模糊,需要确定运动的速度及方向。由于速度和方向很难估计准确,常规的去模糊方法如维纳滤波法或有约束的最小平方滤波法很难达到去模糊的要求,但目前已有了自修正运动速度和运动方向的去模糊算法,应用效果良好。

(2) 目标检测与识别。为实现电力线路目标的故障诊断,首先需要根据输电设备的特征在图像中提取和识别各种输电设备并进行定位,这一过程可称为目标检测与识别。由于输电走廊的自然地理环境和地貌随时间不断演变,同时可能存在大量人工建筑或人为因素引起的地表变化,导致采集的巡检数据往往具有复杂的背景环境。此外,由于拍摄角度和视距的变化,同一目标的图像会呈现不同的形状或形式。这些因素都干扰了图

像、视频等电力线路巡检数据中输电设备信息的提取。使得复杂自然背景下目标图像的提取与识别成为输电线路故障自动诊断的一个重要技术瓶颈。围绕该方面的研究，国内外已取得一些初步的成果。

在电力线检测与识别方面，李朝阳等^[34]提出了一种基于 Radon 变换的电力线自动提取方法。该方法首先使用 Ratio 算子提取输电线像素点，然后采用分段 Radon 变换提取并连接各分段输电线，再利用类似卡尔曼滤波技术跟踪连接输电线的断裂部分，从而完成输电线的提取。Li 等^[35]提出一种基于知识的电力线提取方法，通过采用神经网络法滤除背景噪声后提取输电线。吴庆岗^[36]借鉴传统边缘检测算法的步骤，即阈值去噪和边缘连接，提出一种基于纹理特征的边缘检测算法(SWIFTS 算法)。实验结果表明，与 Ratio 算法相比，SWIFTS 算法可以更完整地提取输电线部件边缘，更有效地保留输电线断股处边缘的弯曲信息，具有更强的抑制噪声的能力。也有学者提出了基于三维激光点云数据进行电力线提取的方法，并取得了较理想的效果^[37-39]。此外，其他一些学者开展了使用其他类型传感器获取的数据如雷达和毫米波雷达图像^[40-41]、红外影像^[42]进行电力线检测的试验。

绝缘子自动检测与识别是电力线路设备识别的另一个复杂问题。由于航拍角度和视距的不同，图像和视频中绝缘子会呈现不同的形状，绝缘子识别时除需要考虑形状特征外，还需考虑纹理特征、颜色特征等。Zhang Jian 和 Yang Ruqing^[43]提出一种基于 SUSAN 边缘检测算法的尺度不变特征(SESIF)来提取绝缘子的方法。王伟和刘海国^[44]分析并比较了传统的基于梯度的边缘检测算子、LOG 算子、Canny 算子以及小波多尺度边缘检测算法，认为小波边缘检测方法对绝缘子的边缘提取效果最佳。孙晋^[45]从梯度的计算、滤波器的选择和阈值的确定三个方面出发，对原始的 Canny 边缘检测算子进行改进和优化，提出一种绝缘子边缘检测方法。唐良瑞^[46]利用模糊数学理论提出了基于关联熵系数和统计间隙隶属度函数分类判定的模糊边缘检测模型。马帅营^[47]结合颜色空间变换和最大类间方差法(简称 Otsu)等图像分割技术提出了两种分别针对航空影像中蓝色和黑色绝缘子的提取方法。黄宵宁和张真良^[48]基于最大熵阈值方法进行图像分割，并应用连通区域方法对绝缘子串进行提取和识别。葛玉敏^[49]提出了基于数学形态学的边缘检测方法，用于检测以绝缘子为代表的输电线路图像的边缘，该方法既能有效地滤除噪声，又可保留图像中的原有细节信息。吴庆岗^[50]提出基于半局部纹理特征分布的全局最小主动轮廓模型(STD-GMAC 模型)。该模型最小化求解时采用变分对偶规则技术，使得该模型能够快速收敛到全局极小值，可更好地解决不一致纹理目标的边缘检测问题。实验表明，在处理具有复杂背景的航空绝缘子图像时，STD-GMAC 模型能准确检测具有纹理不一致性绝缘子的边缘，取得较好的边缘检测结果，有效克服了传统主动轮廓模型的缺点。

此外，叶文^[51]提出了一种融合地理位置信息的电力杆塔检测方法。该方法基于无人机的 GPS 和电力杆塔坐标的测量误差成高斯分布的前提，发展了高斯椭球在机载相机中的成像模型，并预估电力杆塔的位置区域，以此为基础采用可变型部件模型的方法精确定位电力杆塔在图像中的位置，为下一步故障点的确定奠定了基础。

(3) 故障诊断与预测。电力线路故障诊断与预测是在输电设备目标检测与识别的基础上，对设备状态进行检查和诊断，发现设备故障或隐患，并对可能造成的影响进行预

测评估。由于输电线路巡检需要监测的设备种类多,故障类型多,故障诊断与预测过程需根据不同的设备和故障类型采用不同的检测方法。

在光学影像的绝缘子故障诊断方面,已经针对不同的故障类型发展了几种有效的检测方法。葛玉敏^[52]提出了一种在 RGB 空间利用模糊判据进行绝缘子表面污秽判断的方法。刘建友^[53]提出了一种基于航拍图像的绝缘子覆冰状态检测与诊断方法。该方法根据覆冰形成时绝缘子径向长度较未覆冰时有所增加、且会在绝缘子下形成长条冰柱的特点,首先采用改进的 Canny 算子和 Hough 变换提取绝缘子边缘轮廓,再通过行扫描计算绝缘子最大径向距离和实际绝缘子最大径向距离之间的关系,按照已知的比例将计算像素距离结果换算成实际尺寸,得到绝缘子覆冰厚度。全卫国^[32]发展了一种基于航拍图像颜色特征、形状特征、不变矩特征及小波特征等多特征量信息融合和径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络的绝缘子状态检测方法,实现了绝缘子状态的自动检测;通过基于绝缘子边缘的链码与形状数比较分析实现了绝缘子掉串检测;通过基于绝缘子局部纹理统计特征和基于连通域标记的裂纹长度与宽度检测算法实现了裂纹和表面污秽的诊断。金立军等^[54]提出了一种基于可见光图像识别间隔棒框架断裂故障的方法;该方法首先利用图像匹配和形态学运算从图像中提取出间隔棒,校正透视畸变后进行骨架提取,最后用加权的不变矩值进行形状度量,通过正常和框架断裂间隔棒加权不变矩值范围的差异来进行状态诊断。李安^[55]发展了一种基于目标模式匹配的输电线断股缺陷的检测和识别方法:首先提取图像中的输电线并确定输电线的方向;然后沿输电线的方向利用直线交叉点的结构特征检测输电线上的断股缺陷种子点(交叉点);最后使用输电线断股处的边缘点梯度和输电线像素点灰度信息进一步确认输电线是否存在断股缺陷。该方法在背景为天空的输电线断股图像中取得较好的效果。

张文峰等^[56-57]提出了一种基于无人机红外图像的电力设备异常发热检测缺陷的自动诊断和定位方法:首先从红外视频中抽取红外序列图像帧并对抽取的红外图像进行自动拼接和帧间差分,进而确定输电线的主方向,并对输电线区域进行定位;然后根据红外图像和输电线故障诊断标准对提取的输电线进行故障诊断,最终实现了输电线故障的定位和自动诊断。

李佐胜等^[58]提出了基于方差分析的红外热像特征选择方法:利用直方图均衡化增强原始热像图对比度,通过平滑后的绝缘子红外图像直方图包络线提取分割阈值,对阈值分割后的二值图像进行形态学滤波,得到绝缘子盘面图像和背景图像,提取两者的最高温度、最低温度、平均温度、温度分布方差以及盘面相对于背景的最大温升和平均温升共 10 个红外热像特征;应用单因素方差分析甄别特征优劣,实现特征选择。瓷绝缘子人工污秽试验结果表明红外热像特征选择方法和图像分割算法简单有效。

张文峰等^[56-57]提出了一种基于紫外放电视频数据中光斑聚类方法的高放电概率区域自动提取方法,可实现设备异常放电点的检测。

基于可见光进行线路巡检可以通过各种图像处理技术进行电力线和绝缘子的提取,以及绝缘子锈蚀识别检测,但是往往由于天气、光照影响及现有技术的局限性,容易出现绝缘子的漏检现象,且绝缘子故障往往难以从可见光影像中探测出来。相对而言,红外影像由于能探测物体向外辐射的长波红外能量大小,从而实现电力线和绝缘子的故障