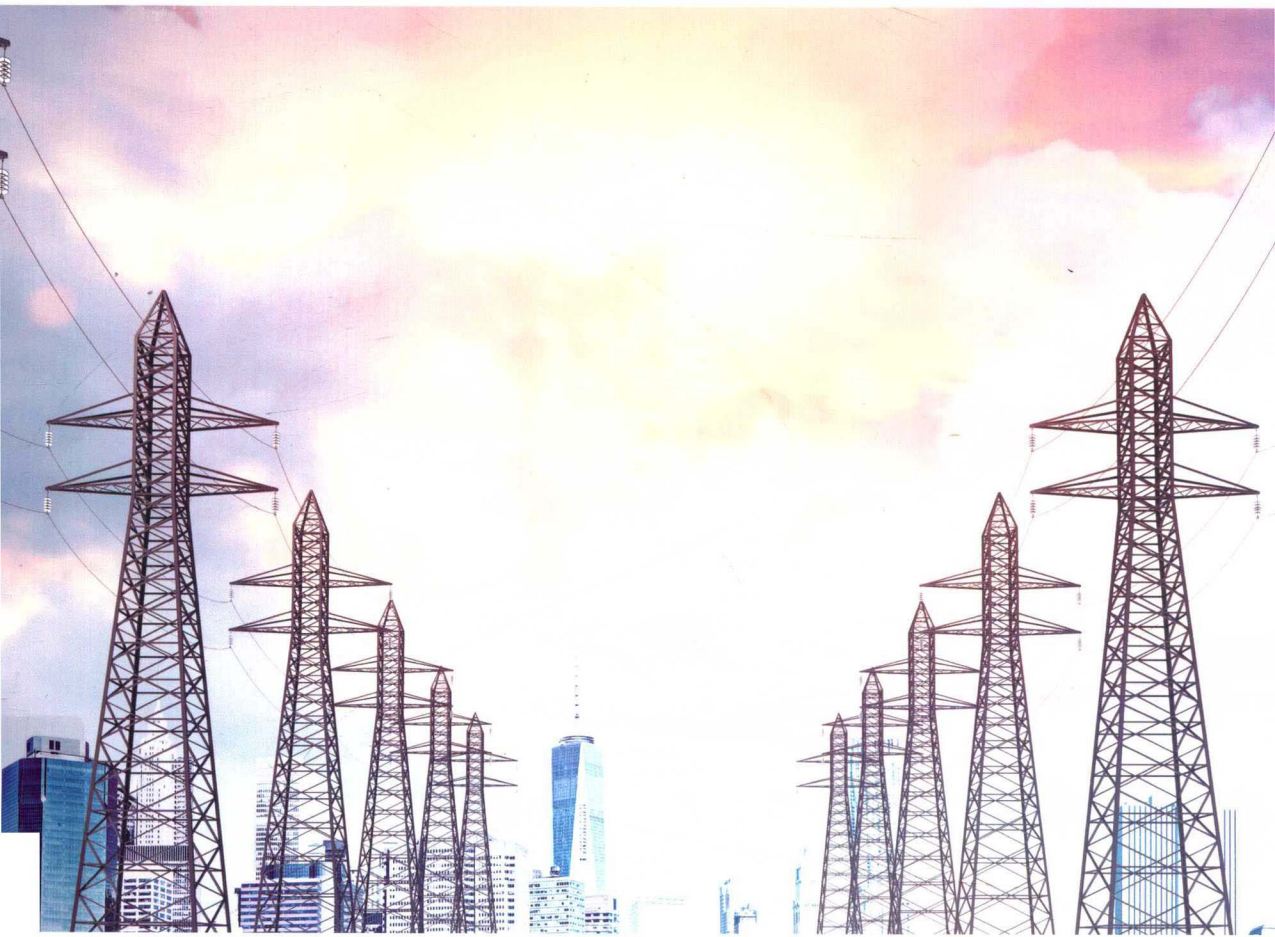


三维激光在输电线路运维 工作中的应用

贵州电网有限责任公司输电运行检修分公司
中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司 组编



任公司科技创新系列丛书

三维激光在输电线路 运维工作中的应用

贵州电网有限责任公司输电运行检修分公司
中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司 组编



中国标准出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

三维激光在输电线路运维工作中的应用/贵州电网有限责任公司输电运行检修分公司, 中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司组编. —北京: 中国标准出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-5066-8886-4

I. ①三… II. ①贵… ②中… III. ①三维—激光技术—应用—输电线路—电力系统运行
②三维—激光技术—应用—输电线路—维修 IV. ①TN209 ②TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 252771 号

中国标准出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100029)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: (010) 68533533 发行中心: (010) 51780238

读者服务部: (010) 68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 9.5 字数 202 千字

2018 年 11 月第一版 2018 年 11 月第一次印刷

*

定价: 39.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010)68510107

编 委 会

主 编 邬 韬

副主编 杨 立 任 曦 刘 锐

参 编 徐志聘 彭 赤 张 伟 时 磊

徐梁刚 刘文明 王 迪 伍思睿

胡 伟 余江顺 李颜均 刘 奇

方 伟 杨 洋 张 辉 吴绍华

吴 亮 黄 良 杨 磊 陈凤翔

杨 渊 史洪云 周小红

前 言

架空输电线路作为电能输送的载体，它的安全稳定运行直接关系到社会稳定、经济发展和人民的正常生活。由于输电线路常年暴露于野外，输电线路的巡检运维工作对于电网的正常运行至关重要。

传统的人工巡检方式依靠地面交通工具或徒步行走，利用普通仪器或肉眼来巡查设施，处理设备缺陷。然而，很多长距离输电线路分布在地形陡峭、自然环境恶劣的崇山峻岭、广袤森林之中，这导致传统的人工巡线强度大、工作条件艰苦、效率低、复巡周期长、巡检数据准确率不高。已有的直升机人工巡线中，利用直升机作为运载工具搭载运维人员，采用红外摄影仪、数码摄像机、高分辨率望远镜等设备检测存在于输电线路上的热致故障隐患和外部缺陷，但无论是多光谱还是热红外技术，空间定位的测量精度均不高，很难精确判断线路走廊地物到线路的距离，降低了巡线的可靠性。如何寻求更优的输电线路运维方式，成了国内外输电线路运维人员共同面临的一大难题。

近年来，随着激光雷达技术和无人机技术的日益发展与成熟应用，机载激光雷达技术能同时获取输电线路走廊影像及三维空间坐标信息，且具有测量精度高、全三维、自动化程度高、效率高、定位准确的特点。贵州电网公司输电运行检修分公司和中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司长期以来积极研究基于机载激光雷达技术的三维激光在输电线路运维工作中的应用，在无人机设备与激光雷达设备选型与评估、输电线路激光 LiDAR 数据采集、输电线路激光 LiDAR 数据处理与分析技术等方面做了大量的技术研究和工程实践，取得了丰富的成果和宝贵的经验。

为了加强输电运维人员对基于机载激光雷达技术的输电线路运维方式的认识和掌握，进一步规范基于机载激光雷达技术的输电线路运维工作流程，提高输电运维人员对机载激光雷达的操纵能力和对激光 LiDAR 数据的分析处理能力，推广基于机载激光雷达技术的输电线路运维方式，指导基于机载激光雷达技术的输电线路运维工作的开展，编写组在总结近年来基于机载激光雷达技术的输电线路运维工作经验的基础上，借鉴国内外先进激光雷达技术、国家电网公司/南方电网公司基于三维激光的输电运维

工作经验，组织编写了《三维激光在输电线路运维工作中的应用》一书，使基于三维激光技术的输电线路运维更具有先进性、系统性、新颖性、典型性，在技术推广方面更具有普及性，可操作性更强，对于整个电网运维单位开展相类似的输电线路运维工作均有指导意义，对提升电网的运维管控能力具有重要的实际意义。

在本书编写过程中，得到了贵州电网公司生产设备部、贵州电网公司输电运行检修分公司、中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司的大力指导和帮助，特别是得到了贵州电网公司输电运行检修分公司各个运行检修所工作人员的积极配合，在此，对他们表示诚挚的感谢！

由于我们的编写水平有限，若有不当之处，敬请读者不吝指正。

编 者

2018 年 11 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 输电线路运维工作概述	1
1.2 激光雷达发展历程	2
1.3 激光雷达在输电线路运维工作中的应用发展	5
第 2 章 无人机设备与激光雷达设备选型与评估	7
2.1 无人机设备选型与评估	7
2.2 激光雷达设备选型与评估	16
第 3 章 输电线路激光 LiDAR 数据采集	20
3.1 外业数据采集	20
3.2 外业数据预处理	26
第 4 章 输电线路激光 LiDAR 数据处理与分析技术	29
4.1 LiDAR 点云数据降噪处理技术	29
4.2 LiDAR 点云数据误差平差处理技术	34
4.3 LiDAR 点云数据分类技术	38
4.4 基于 LiDAR 点云数据的输电线路运维应用技术	59
第 5 章 输电线路运维四维空间仿真管理平台研发	82
5.1 平台需求调研	82
5.2 平台框架设计	84
5.3 平台功能实现	89
5.4 平台测试及试运行	116

第 6 章 无人机+激光雷达运维输电线路的工程应用实例	128
6.1 工程应用实例中无人机、激光雷达性能参数	128
6.2 工程应用实例中激光 LiDAR 数据采集、处理与分析过程	129
6.3 工程应用效果	131
参考文献	137

第1章 绪 论

1.1 输电线路运维工作概述

架空输电线路是一个国家主干电网的重要组成部分，是一项重要的国家基础设施。近年来，伴随着我国电力发展步伐不断加快，电网系统也得到迅速发展，电网系统运行电压等级不断提高，网络规模也不断扩大，基本形成了完整的长距离输电网网架。截至 2010 年年底，我国电网规模跃居世界第一，其中，220kV 及上输电线路总长度达到 43 万千米。然而，输电线路故障却会给人们的日常生产生活和国民经济带来巨大损失，因此，为了防止和杜绝电网安全事故的发生，电网运行维护部门每年都需要投入大量人力、物力对输电线路进行巡检。电网的巡检和维护工作对于电网的正常运行至关重要。电力巡线是保障电力资源持续、稳定供给，保护电力设备等安全的重要技术；相关部门可以通过电力巡线提前发现潜在的隐患，及时消除隐患以防患于未然。

传统的人工巡检方式是依靠地面交通工具或徒步行走，利用普通仪器或肉眼来巡查设施，处理设备缺陷，然而，很多长距离输电线路分布在地形陡峭、自然环境恶劣的崇山峻岭、广袤森林之中，这导致传统的人工巡线劳动强度大、工作条件艰苦、效率低、复巡周期长、巡检数据准确率不高。我国从 20 世纪 80 年代开始进行直升机巡线和带电作业等方面的研究。从国际电力巡线的发展来看，输电线路采用直升飞机巡线等电力作业工作日益成为电力系统安全生产的迫切需求。已有的直升机巡线中，多采用红外摄影仪、数码摄像机、高分辨率望远镜、可见光录像机等设备作为观测工具。但无论是多光谱还是热红外技术，空间定位的测量精度均不高，很难精确判断线路走廊地物到线路的距离；而且获得的多源数据多分开处理，没有形成整体性，处理起来也比较繁琐，降低了巡线的效率和可靠性。近年来，由于机载激光雷达（LiDAR）测量技术能同时获取输电线路走廊影像及三维空间坐标信息，且具有测量精度高、全三维、自动化程度高、效率高、定位准确的特点；机载 LiDAR 电力巡线可以克服传统的工程测量电力巡线工作量大、危险性高、效率低下及直升机电力巡线空间定位精度低的缺点。机载 LiDAR 电力巡线技术在电力巡线中得到日益广泛的应用。同时，从平台的角度考虑，目前常用的电力线巡线平台有直升机，无人机两种。但载人直升机巡检存在一次性投资大、巡检成本高，机载人员安全风险高，对飞行员技术水平、心理承受力要求高以及高空域管制等问题，目前还不能完全满足不同电压等级、复杂地形条

件和各种特殊灾害条件下的巡检需求。

随着机载激光雷达技术的日益发展与应用，各级部门陆续发布了机载激光雷达技术在输电线路巡检工作中的相关规程规范。2015 年，国家发布了电力行业标准《直升机激光扫描输电线路作业技术规程》（DL/T 1346—2014）；2016 年，南方电网发布了《南方电网输电线路“机巡+人巡”协同巡检工作指导意见》；2017 年，贵州电网组织编制了《架空输电线路多旋翼无人机巡检作业技术导则（试行）》。这些相关文件的发布与相关项目的开展，印证着基于机载激光 LiDAR 技术的巡线方式已经成为南方电网公司、国家电网公司今后重点发展的输电线路巡线手段以及未来输电线路巡线技术的必然趋势。

无人机技术的发展为架空电力线路巡检提供了新的平台。利用无人机搭载激光雷达设备进行巡线，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电力线路进行巡检；（3）巡线速度快，每小时可达几十千米，可以大大减少人工巡线的工作量，减少点云数据的处理周期，减少对输电线路人员的专业要求，快速展示、分析输电线路 LiDAR 点云数据。工业级无人机如图 1-1 所示。

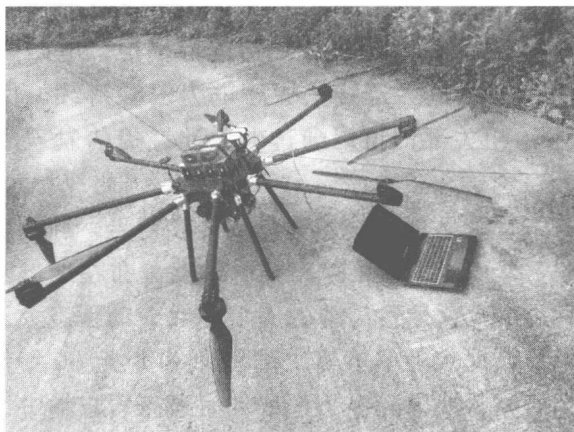


图 1-1 工业级无人机

1.2 激光雷达发展历程

机载激光雷达（LiDAR, Light Detection and Ranging）是近些年来发展的新的探测技术，是激光测距技术、计算机技术、高精度动态载体姿态测量技术（INS）和高精度动态 GPS 差分定位技术迅速发展的集中体现，它代表了对地观测领域的一个新发展方向，为快速高效获取被测区三维信息提供了强有力的技术支撑。它可以快速、主动、实时、直接获得大范围地表及地物密集采样点的三维信息，是一种新型快速的三维空间信息获取技术。机载激光雷达测量技术作为一种新兴的空间对地观测技术，在三维

空间信息的实时获取方面产生了重大突破。激光雷达设备如图 1-2 所示。

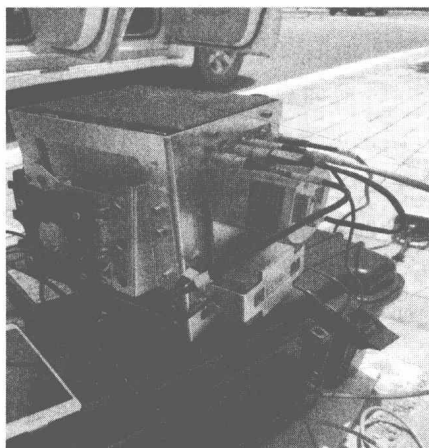


图 1-2 激光雷达设备

1.2.1 LiDAR 设备

20 世纪 60 年代，人类就开始了利用激光作为遥感设备的探索。美国早在 20 世纪 70 年代阿波罗登月计划中就应用了 LiDAR 技术。20 世纪 80 年代，LiDAR 硬件设备和技术得到了迅速发展，以 NASA 为代表的欧美国家开始了一系列的机载激光雷达测量系统和项目的研制，包括当时美国 NASA 研制的大气海洋 LiDAR 系统以及机载地形测量设备系统等。2003 年 1 月 13 号，NASA 发射星载激光测高卫星，该卫星的主要用途有：测量两极冰面地形及其随时间的变化，为预测未来两极冰盖变化趋势以及海平面变化提供基础数据，进行全球气候变化的研究；应用于大气科学研究，研究大气层的结构、构成成分等，从而为研究整个大气圈的变化和中长期的气候变迁提供准确、科学的数据；用于测绘地形图，进行全球植被覆盖率的调查和动态监测，获取全球的较高精度的数字高程模型。美国还开发研制了机载激光植被成像传感器系统，该设备可以对森林地区的植被进行监测和测量，可用于资源调查和管理。对于后期的数据处理，可以直接推算植被参数和森林垂直结构，如树高、树冠直径、树木密度、植被生长情况、木材量、树种等。

美国其他部门如美军使用的一种独具特色的激光扫描水下地形测量系统，它采用激光雷达技术实施远距离测量浅海深度并测绘海岸地带的地形，监测海岸侵蚀等。该系统作业结果表明，机载激光雷达测量海域的深度数据是一种经济有效的技术手段。美国的激光雷达地形测量系统，于 1994 年做了飞行试验，最终产品的飞行高度预计为 1600~1700m，采用扫描激光测距方式，利用 GPS 定位及惯性导航系统进行数据位置解算。据了解，这种系统标称能“隔夜”提供 DEM，其 DEM 获取速度比常规方法要快若干倍，效率将比现有信息获取技术提高约几十倍。

20 世纪 80 年代就有研究者从事机载激光地形测量的研究；德国斯图加特大学摄影测量学院在 1988 年开始研究机载地形断面测量系统，目前在 LiDAR 数据的地物分类

提取、城市建模等方面有一定的研究成果；德国汉诺威大学制图与地理信息学院在建筑物轮廓自动提取与三维重建方面成果也较为突出。德国联邦政府测绘局 1994 年开始研究利用激光雷达技术获取数字地形模型，进而进行数据处理获取地面的真正射影像，通过对数据进行滤波和分类，将地面点跟建筑物或植被点分开。现在德国已有几个州的 MA 部门进行了用激光数据生成高质量 DTM 的试验，结果都很理想，特别是在森林区域，所获得的数据精度甚至优于摄影测量立体编辑法获得的精度。芬兰已经用 LiDAR 技术成功进行了森林管理研究；荷兰测量部门自 1988 年就开始从事利用激光扫描测量技术提取地形信息的可行性研究，其中荷兰 Delft 技术大学地球观测与空间系在 LiDAR 数据植被及建筑物的快速自动识别与分类以及道路的半自动提取等方面取得了初步成果。

加拿大卡尔加里大学 1988 年进行了机载系统的集成与试验，设计了一个机载 LiDAR 三维数据获取系统，并进行了一定规模的试验，取得了理想的结果；日本东京大学 1999 年进行了地面固定激光扫描系统的集成与试验。20 世纪 90 年代，随着相关技术的不断成熟，机载 LiDAR 技术得到了蓬勃发展，欧美等发达国家先后研制出多种机载 LiDAR 系统，目前，商业 LiDAR 生产厂商有很多，主要有瑞士的 Leica 公司，美国的 3D DIGITAL 公司、Polhemus 公司，奥地利的 RIGEL 公司，日本的 Minolta 公司，瑞典的 TopEye 公司、法国的 MENSI 公司，加拿大的 Optech 公司，澳大利亚的 I-SITE 公司等。

国内方面，中国科学院遥感应用研究所李树楷教授等研究的机载三维成像系统于 1996 年完成该系统原理样机的研制，该系统还有别于目前国际上流行的机载激光扫描测高系统，它将激光测距仪与多光谱扫描成像仪共用一套光学系统，通过硬件实现了 DEM 和遥感影像的精确匹配，直接获取地学编码影像，但由于国内目前尚无法生产高精度 IMU 和激光扫描装置，以至于该系统激光点密度很低，平面和高程精度无法达到大比例尺成图要求。武汉大学李清泉教授等开发研制了地面激光扫描测量系统，但还没有将定位定向系统集成到一起，目前主要用于堆积测量。华中科技大学在“八五”期间成功地研制出了我国第一套机载激光海洋探测试验系统。中国科学院上海光机所研制了我国新一代机载激光测深系统，目标最大测深能力 50m。由于我国目前还没有高精度的 INS 系统以及性能可靠的激光扫描测距装置，机载激光扫描测距系统还不够成熟。2007 年，我国的嫦娥一号卫星也搭载了由我国自主研发的激光高度计，配合 CCD 相机，获得了精确的月球表面三维数字高程信息，得到了清晰的月球立体图像和月球两极地区的表面特征。

1.2.2 商业 LiDAR 的处理软件

LiDAR 的快速发展主要是在近 20 年，目前有关处理软件主要有 Quick Terrain Modeler、Terrasolid Suite、Scop++、MARS、Innovmetric Polyworks、Fledermaus、Matlab（二次开发）、LViz、Surfer 以及 Tiffs 软件等。Terrasolid Suite 是目前最常用、最成功的商业软件，它可以进行几乎 LiDAR 点云数据处理的所有操作，其后处理和分

析功能非常强大，也是目前市场上作业软件的代表。这个软件由 Terrain Modeler, TerraScan, TerraPhoto and TerraMatch 等模块组成，Terrasolid 系列软件能够快速地载入 LiDAR 点云数据，在足够内存支持下，处理效率非常高，目前有很大的市场占有率。

1.3 激光雷达在输电线路运维工作中的应用发展

1.3.1 电力巡线

电力巡线是电网运营维护管理部门需要进行的一项工作。其目的是查找线路中的安全隐患和故障，并进行检修，通过定期对线路进行巡检，以尽最大程度地避免事故的发生，或以最高的效率恢复线路的正常运行，确保电网的安全运行。譬如，线下植被的生长，树木顶端至线路的安全距离不够、抑或是居民在线下新盖了房子、线路之间的交叉跨越距离不安全、弧垂对地安全距离不满足、杆塔倾斜、电力设施的鸟巢等障碍物、螺栓缺失、绝缘子串损害等，都是一些可能存在的安全隐患。许多电力线远离城镇、在人迹罕至的原始森林或者深沟峡谷中穿出穿入，穿越的地理环境越来越复杂，而且存在人工不能到达的“盲区”，或者因设备、树木遮栏阻挡巡线员的视线，当遇到异常极端天气或者电网紧急故障时候，巡线员必须到达现场去排查问题，有些地方只能通过徒步到达、这些都给维护工作带来极大的困难。

电网运行维护部门每年都需要投入大量的财力、人力和物力对输电线路进行巡检，但目前常规的巡线方式，其劳动强度大、工作条件艰苦，劳动效率低、难以管理。因此，现行的输电线路维护管理模式和常规作业方法已不能适应现代化电网的管理与发展的需求，超高压电网和特高压电网需要一种全新的电力线巡线方式，能高效经济地解决问题，把人从繁重的工作中解脱出来。

机载激光雷达测量系统可以很好地解决空间定位和测量精度等问题，通过在飞机上搭载激光雷达设备，可以直接采集线路走廊高精度三维激光点云和高分辨率航空数码影像，进而获取高精度三维线路走廊地形、地貌、地物和线路设施设备空间信息，包括塔杆、挂线点位置、电线垂弧等。以实现输电线路数据的全自动精细化巡检，包括树高房高、塔杆倾斜、电力弧垂及交叉跨越的测量及分析，并输出检测分析报告，使运维人员及时提前发现潜在的安全隐患、及时消除隐患以防患于未然。具体包括以下几点：

(1) 机载激光雷达数据能够快速获取线路走廊高精度的三维空间信息及高分辨率的真彩色影像信息，可实现线路交叉跨越高度、树高、房高、线路与周边地物空间距离的高精度实时测量等。

(2) 借助影像可识别电力设施的鸟巢等障碍物、螺栓缺失、绝缘子串损害等排查。

(3) 通过多次数据的对比分析，可识别线路长时间运行后杆塔有无倾斜、倾斜角

度多大、有无偏移。

(4) 通过对周期性获取的线路走廊植被点云的分析,可动态监测植物的生长情况,模拟植被生长状态,预先获取线路净空内树木的超高量,以满足安全运行要求。

(5) 净空排查:主要对通道环境中违章建筑、建筑物、树木及交叉线路与导线之间的安全距离实施检测。

1.3.2 架空送电线路优化选线

在国内的 330kV 以上及部分、220kV 架空送电线路工程的勘测设计中,通常采用传统航空摄影测量技术进行架空送电线路路径优化选线以及平断面内业测图。利用机载激光雷达技术进行架空送电线路优化选线的方法大致如下:首先可将激光点云数据以及航空数码影像数据进一步处理为 DEM 和 DOM 数据,其次利用 DEM 叠加 DOM 构建线路走廊三维场景,设计人员即可在三维场景中进行优化选线作业。至于内业平断面测图,作业人员可直接在三维场景中进行平面地物以及风偏、危险点的采集,对于诸如房高、树高以及塔高等信息则借助激光点云数据进行提取,而断面数据则可直接从 DEM 数据中进行提取。

与传统航空摄影测量技术相比,采用机载激光雷达技术进行架空送电线路路径优化选线具有如下优势:(1) 平断面数据精度高;(2) 作业周期短。无须进行航外像控测量,同时航外测绘工作量减少,内业平断面测图效率提高 75% 左右;(3) 数据处理自动化程度高;(4) 选线过程中的辅助信息丰富。借助激光点云数据,在优化选线过程中可方便地向设计人员提供诸如房高、树高、塔高等信息;(5) 由于省去了航外像控测量,野外测绘工作量亦大大减少,作业成本自然降低。同时,从长远来看,采用机载激光雷达技术进行架空送电线路优化选线,有利于业主单位未来实现数字电网,并可节约一大笔投资。

1.3.3 数字电网建设

数字化电网是数字化时代的必然产物,它利用先进的信息和网络技术在虚拟世界中对电网进行全信息仿真,人们可以清楚地掌握电力系统的运行方式、电网潮流,可以随时查看区域内输电线路经过的路径、地形地貌山川河流、铁路公路并统计区域内的线路个数、杆塔数。同时可以在电脑上清楚地找到电网所处的鸟害区、雷害区、污闪区以及所选输电线路走廊中的距离测量、净空排查、线路走廊植被生长情况分析等功能。

数字电网建设的一项重要内容是进行三维建模。利用机载激光雷达技术可方便实现线路走廊地形以及线路的三维建模。线路走廊地形可通过将机载激光雷达数据处理为 DEM 和 DOM 来实现,而线路的三维建模则可通过高密度激光点云数据进行提取,包括杆塔等。随着数字电网建设的逐步开展,相信机载激光雷达技术将发挥重要的作用。

第2章 无人机设备与激光雷达设备 选型与评估

2.1 无人机设备选型与评估

2.1.1 无人机概述及系统组成

2.1.1.1 无人机的定义及分类

(1) 多旋翼无人机概述

多旋翼飞行器也称为多轴飞行器，是一种具有多旋翼轴的特殊直升机，它至少具有三个以上的旋翼。多旋翼的总距固定不变，而不能像传统直升机那样可变螺距，它是通过改变不同旋翼之间的扭力，或者改变不同旋翼之间的相对转速可以改变单轴推进力的大小，从而控制飞行器的升降、俯仰、旋转等运动。

它至少拥有三个或三个以上的独立动力系统来进行各种控制动作，动力系统包括电机、电调等部件。相比传统的单旋翼尾桨直升机而言，多旋翼机械结构精简，日常使用易于维护，操作简便，飞行稳定性高且携带方便，只需要协调电机之间的相对转速即可实现飞行轨迹控制。多旋翼飞行器的种类大致分为9种，如图2-1所示。常见的飞行器有：四旋翼，六旋翼和八旋翼，被广泛用于影视航拍、安全监控、农业植保、电力巡线等领域，具有非常广阔的使用前景和研究价值。多旋翼飞行器分类见图2-1。

(2) 固定翼无人机概述

固定翼无人机是由动力装置产生前进的推力或拉力，在大气层内飞行的重于空气的无人航空器。

固定翼无人机的工作原理为：上、下机翼空气流速产生的压力差，即为升力。固定翼机翼的翼型横截面是流线型的，一般上弧的长度大于下弧的长度。

根据伯努力的流体压力差关系，流速越快压强越小，所以，气流产生了一个向上的合力，这就是升力。

固定翼无人机作为无人机系统里三大飞行平台重点之一，针对不同的使用环境自然有不同的结构形态，我们选择的无人机类型自然也不同。当今有垂直起降无人机、弹射无人机、伞降无人机、滑跑无人机，不同布局的无人机在不同项目中应用不同。

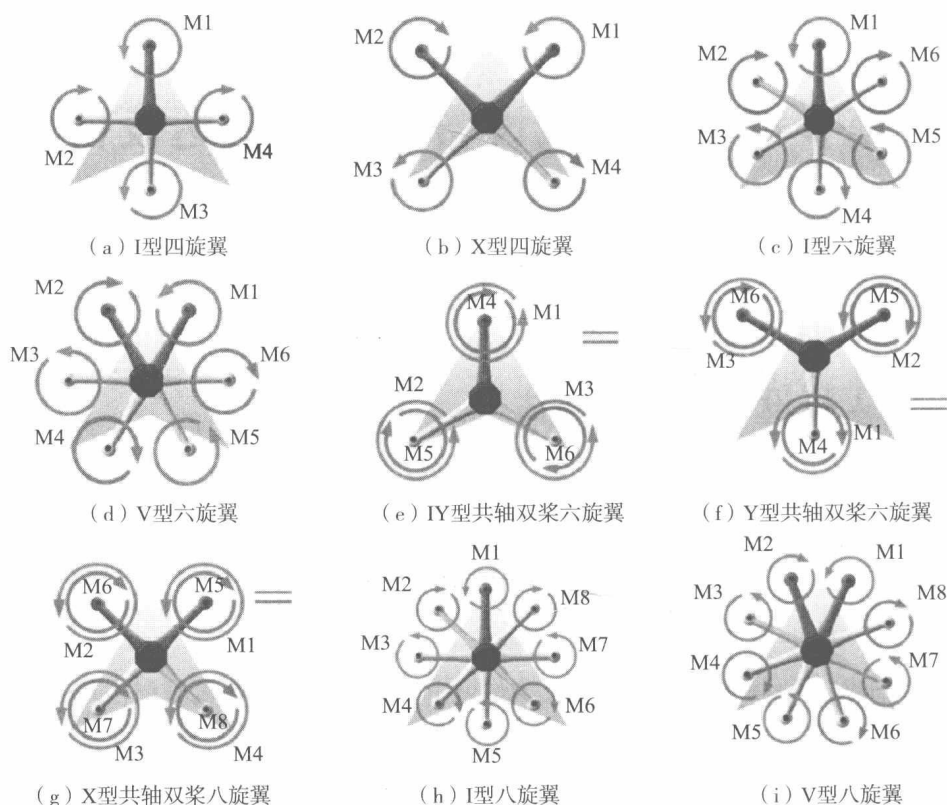


图 2-1 多旋翼飞行器分类

1) 常规布局

所谓常规布局就是我们经常看到的民航飞机布局。水平尾翼在主机翼之后，除了水平尾翼机垂尾的布局位置，主翼的位置不同也对飞机的布局产生影响：

①上单翼指主翼安装位置在机身中线的上方或者机身底部，这种布局具有较高的稳定性，但是机动性较差，不灵活，稳定航拍机型可以考虑。

②中单翼指主翼安装位置在机身中线中部，兼具机动性和稳定性。

③下单翼指主翼安装位置在机身下方，具有较高的机动性，极其灵活，但稳定性较差，一般应用于竞赛。

2) 鸭式布局

鸭式布局为水平尾翼位于机翼之前，如同我国自主研制的 J-10 战机，在大机动作下，具有较好的空气动力性能。

3) 无尾布局

只有机翼加机身一体，根据飞机本身应用环境，决定是否装有垂直尾翼，类似美国 B-2 轰炸机。

固定翼无人机多用于测绘行业，搭载正射相机，完成区域内的往返网状飞行采集数据，固定翼的无人机留空时间长，爬升高度较多旋翼无人机高，但是起降需要更大的场地，对飞机操作的要求也更高一些。

2.1.1.2 无人机系统组成

无人机系统是一个多传感器、多平台、多系统的集成体。固定翼和多旋翼的系统从组成上来说,有些部分如电机、电调、电池等具有一致性;而有些部分如机架机身、飞控系统是不大相同的。为了选择更好的无人机设备用来搭载任务负载,以下介绍无人机系统组成的重要部件。

(1) 机架机身

机架机身是指无人机飞行器的机身架构,是整个飞行系统的飞行承重载体。既要承担任务挂载的重量,又要肩负电机高转速带来的拉力及扭力。一般多旋翼无人机使用高强度但重量轻的材料,例如图2-2中的碳纤维、图2-3中的PA66+30GF等材料。而固定翼的机身采用框架结构,有复合、巴尔沙木、碳纤维、玻璃钢等材料的应用。机身结构的设计也与固定翼气动布局有关,固定翼的机身机架相比多旋翼种类较多,常见的为前拉常规布局固定翼如图2-4所示,特殊的有飞翼式布局固定翼如图2-5所示。

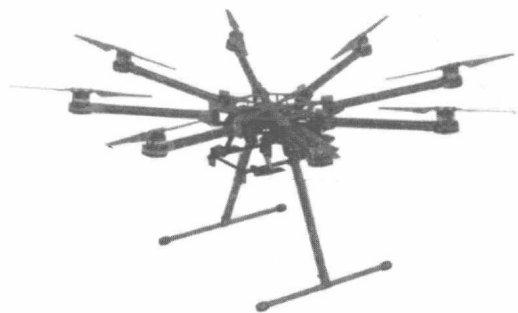


图2-2 筋斗云 S1000 (碳纤维)

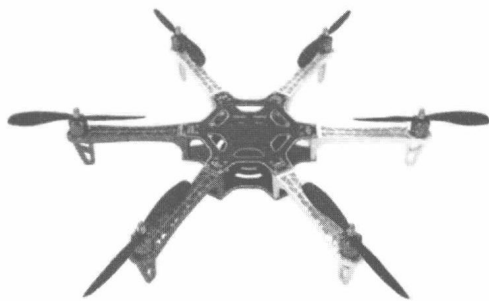


图2-3 风火轮 F550 (PA66+30GF)



图2-4 前拉常规布局固定翼

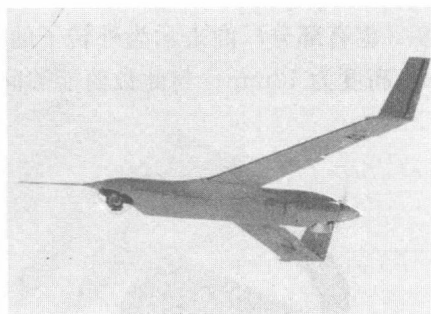


图2-5 飞翼式后推布局固定翼

(2) 飞控系统

飞控系统又称飞行控制系统,它集成了许多高精度的感应器元件,主要由陀螺仪(飞行姿态感知模块)、GPS定位模块、角速度计、高度气压计、加速度计、指南针模块,以及控制电路、信号电路等部件组成。飞控系统是多旋翼无人机的“大脑”,它不仅