

doi: 10. 6046/gtzyyg. 2019. 04. 01

引用格式: 金鼎坚,王建超,吴芳,等. 航空遥感技术及其在地质调查中的应用[J]. 国土资源遥感,2019,31(4):1-10. (Jin D J,Wang J C,Wu F,et al. Aerial remote sensing technology and its applications in geological survey[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2019,31(4):1-10.)

航空遥感技术及其在地质调查中的应用

金鼎坚^{1,2}, 王建超¹, 吴芳¹, 高子弘¹, 韩亚超¹, 李奇^{1,3}

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心,北京 100083; 2. 中国科学院
空天信息创新研究院,北京 100101; 3. 自然资源部航空
地球物理与遥感地质重点实验室,北京 100083)

摘要: 航空遥感技术是地质调查的重要手段之一。在阐述航空遥感概念的基础上,简要回顾了航空遥感技术的发展历史,系统总结了航空遥感平台、传感器和数据处理技术的发展现状,并以地质灾害调查、矿产资源勘查、海岸带地质调查、矿山监测和航空物探遥感综合勘查等为例介绍了航空遥感技术在地质调查中的典型应用。该研究可为从事航空遥感地质调查工作提供技术参考。

关键词: 航空遥感; 地质调查; 地质灾害; 矿物填图; 海岸带; 航空物探遥感综合勘查
中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2019)04-0001-10



0 引言

航空遥感作为地质调查的重要手段之一,在“遥感”这一术语产生之前,“航空地质调查”工作就已广泛开展^[1]。长期以来,航空遥感数据一直是地质调查工作中的主要遥感数据源。近年来,航空遥感技术在飞行平台、传感器和数据处理技术等方面都有了巨大进步。无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)遥感平台蓬勃发展,航空遥感传感器波谱覆盖范围进一步扩展,数据处理效率和自动化水平不断提升,使航空遥感数据获取与处理方法都发生了质的飞跃,并在地质灾害调查和矿山监测等诸多应用领域取得了明显的地质效果,进一步提高了航空遥感技术在地质调查中的应用广度与深度。

本文通过阐述航空遥感技术的概念,回顾了航空遥感技术的发展历程,总结了航空遥感飞行平台、传感器和数据处理技术的发展现状,介绍了航空遥感技术在地质灾害调查、矿产资源勘查、海岸带地质调查、矿山监测和航空物探遥感综合勘查等工作中的典型应用,以期航空遥感地质调查工作提供技术参考。

1 航空遥感概念

遥感,从字面理解即遥远感知的意思,是一种不接触被测地物,使用传感器接收、记录物体反射或发射的电磁波信息;通过对信息的处理分析与解译,获得地物几何特性与物理属性信息的一门科学和技术。在遥感数据获取过程中,遥感传感器可搭载在不同高度的遥感平台上(如地面三角架、气球、飞机、卫星和宇宙飞船等)。根据平台的高度不同,可将遥感技术分为地面遥感、航空遥感与航天遥感(或卫星遥感),三者共同构成完整的遥感对地观测体系。

航空遥感,即以飞机、UAV、飞艇和气球等航空飞行器作为搭载平台的遥感技术。航空遥感传感器主要有光学相机、高光谱成像仪、合成孔径雷达(synthetic aperture Radar, SAR)和激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)等。航空遥感按航空飞行平台的不同,可分为有人机航空遥感和 UAV 遥感;按传感器所使用的电磁波谱段不同,又可分为航空摄影、航空多光谱遥感、航空高光谱遥感、机载 SAR 遥感和机载 LiDAR 遥感等。

收稿日期: 2018-11-16; 修订日期: 2019-02-19
基金项目: 中国地质调查局项目“三峡库区航空遥感地质调查”(编号: DD20179601)、“渤海海岸带航空物探遥感调查及应用”(编号: DD20160150)、“天山—北山重要成矿区带遥感调查”(编号: DD20160150)、国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0602000)和自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室青年创新基金课题“集成机载 LiDAR 和航空重力反演数据的近海海底地形构建研究”(编号: 2016YELI5)共同资助。
第一作者: 金鼎坚(1985-),男,博士生,工程师,主要从事航空遥感地质应用研究。Email:jindingjian@uavrs.net。

航空遥感是遥感的一个重要分支,其本身具有广泛应用和不可替代的作用,同时又是卫星遥感发展的基础和补充。与卫星遥感技术相比,航空遥感具有精度高和机动灵活等特点。航空遥感通过探测物体与电磁波的相互作用识别地物,有别于探测地球物理场(重力、电磁、放射性和能谱)及弹性波等特性的地球物理方法^[2]。

2 航空遥感技术发展历程与现状

2.1 航空遥感技术发展历程

“遥感”作为一个专业术语由美国海军科学局普鲁依特在 20 世纪 50 年代中期提出^[3],并在 1962 年美国召开的“环境遥感讨论会”上被正式采用。虽然“遥感”概念的使用至今不到 60 a,但作为现代遥感技术起源的航空遥感却有着悠久的发展历史。

1826 年,法国人尼埃普斯成功拍摄了世界上第一张相片^[4]。1839 年,法国画家达盖尔发明了银版摄影法,为航空摄影相机的诞生奠定了基础。1855 年,法国人纳达尔提出了利用航空影像进行测绘的想法,并于 1858 年利用热气球进行了世界上首次航空摄影;不幸的是,纳达尔的早期相片并没有留存下来,现存最早的航空相片是美国人布莱克于 1860 年在热气球上拍摄的波士顿航空影像。19 世纪末,摄影技术取得快速发展,胶卷和各种轻便型的照相机开始出现,将照相机带上天空逐渐变得可行和容易。除热气球外,很多人还使用风筝、鸽子及火箭等携带照相机开展航空摄影。

1903 年,莱特兄弟发明了飞机,这是航空遥感发展史上的一个重要里程碑。自此以后,利用飞机开展航空遥感成为可能。1909 年,威布尔·莱特第一次从飞机上拍摄了航空相片。在第一次世界大战中,由于军事侦察的需要,航空摄影技术得到迅速发展。美国人费尔柴尔德发明了世界上第一台真正意义上专门用于飞机上的航空摄影仪,使航空影像质量得到了大幅度提升,并成为之后几十 a 中航摄仪的质量标准。第一次世界大战结束后,航摄仪开始转向非军事用途。1921 年,费尔柴尔德将设计的航摄仪用于地理测图,使用超过 100 张具有足够重叠的航空相片,生成了纽约市曼哈顿岛的镶嵌图。在其他国家,航空摄影也被广泛应用于地质、林业和农业等民用领域。在第二次世界大战中,航空遥感技术再次取得巨大进步,彩色摄影、多光谱摄影和雷达探测等技术得到快速发展,出现了工作在近红外和无线电波等非可见光电磁波谱段的传感器,飞行平台及影像判读、成图设备都有了较大发展。

20 世纪 50 年代以来,随着材料技术、电子技术、探测器技术和计算机技术的不断发展,陆续出现了各种新型传感器,进一步拓宽了航空遥感覆盖的电磁波谱段。1960 年,世界上第一部 SAR 问世^[5]。1969 年,贝尔实验室的博伊尔和史密斯发明了一种被称作电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)的元件,为数码相机的诞生奠定了基础。1983 年,美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)成功研制世界上第一台成像光谱仪^[6],使航空遥感技术在经历黑白摄影、彩色摄影和多光谱扫描成像之后,进入了高光谱遥感阶段。20 世纪 60 年代起,人类就开始开展 LiDAR 测距技术实验,并在 20 世纪 90 年代初出现了商用的机载 LiDAR 系统^[7]。2000 年 ISPRS 阿姆斯特丹大会上,航空数码相机开始出现,至今航空数码相机已完全取代传统胶片式航空相机。同时,陀螺稳定平台及高精度定位定向系统(position orientation system, POS)也取得了巨大进步。有人机航空遥感的传感器基本上都配备有三轴自动稳定平台(如 GSM 4000 和 PAV100 等),以保障传感器在获取数据时俯仰、翻滚和偏航等姿态角尽可能小。航空传感器也集成了 POS 系统,同步获取航空影像的外方位元素,减少了对地面控制点的需求,以便于航空影像数据处理与制图。

在传感器技术发展的同时,航空遥感平台也在不断进步,飞机的性能不断提升、种类不断增多,国内外适用于航空遥感的有人机平台数不胜数^[8]。近年来,UAV 技术的迅猛发展,则为航空遥感提供了一种崭新的平台。UAV 最早作为军事上的靶机应用,后来逐渐用于作战、侦察飞行平台。在 20 世纪 70 年代末,UAV 系统开始被引入摄影测量与遥感领域,用来对考古区域进行航空摄影^[9]。其后的几十 a 里,UAV 平台有了飞速发展,出现了各种形状、大小和动力方式的 UAV。UAV 的快速、准确、廉价等性能使其应用越来越广泛,而且安全性和可靠性也都得到了极大增强。与此同时,UAV 遥感传感器技术也得到快速发展^[10]。

在硬件设备迅速发展的同时,航空遥感数据处理与信息提取技术也逐步发展成熟,针对高空间分辨率、高光谱分辨率、LiDAR 以及 SAR 等航空遥感专题数据处理的算法在性能上得到了进一步完善,数据处理的自动化和智能化水平不断提高,进而促进了航空遥感技术在地质、测绘、农业、林业、水利、海洋、环境及灾害等领域中的应用不断拓展与深化。

2.2 航空遥感技术现状

2.2.1 航空遥感平台

航空遥感平台可分为有人机和 UAV 平台。有

人机航空遥感平台主要是固定翼飞机,在我国以国产的运系列飞机为主,引进的飞机包括奖状、大篷车、空中国王、大棕熊和 PC-6 等。目前,除 8 000 m 以上航高还主要使用奖状、里尔、运-8 和呼唤等飞机外,中空普通航摄已普遍使用国产的运-5、运-11 和运-12 等飞机。适应小面积、低空高空间分辨率航摄的轻小型有人驾驶航摄飞机有蜜蜂、海鸥和海燕等。近年来,UAV 遥感平台发展迅速,种类很多。据国际 UAV 组织在 UVS-INFO 网站发布的数据,目前世界范围内正在生产的 UAV 平台多达 2 000 余种。根据我国国家遥感中心建立的全国 UAV 遥感系统信息库统计,在用的遥感 UAV 按动力分类,燃油动力多于电池动力;按气动外形分类,多旋翼多于固定翼;按重量分类,30 kg 以下占绝大多数,也就是以轻小型 UAV 为主;按航时分类,大部分小于 1 h;按起降方式分类,垂直起降和滑跑起降方式占据主流^[11]。

2.2.2.2 航空遥感传感器

在航空遥感传感器中,数字航摄仪完全取代了传统胶片式航摄仪,多角度倾斜航空摄影系统逐渐成为实景三维建模的重要数据采集装备,机载 LiDAR 技术已成为地形测量和三维建模的重要手段,机载高光谱成像仪也已被广泛应用,各类 UAV 遥感传感器谱系逐渐完备。

2.2.2.1 数字航摄仪

数字航摄仪是目前应用最广泛的一种航空遥感传感器,主要工作在可见光和近红外波段,采用 CCD 对地面进行摄影,直接获得数字影像。通过后期数据处理,可生成数字高程模型(digital elevation model,DEM)、数字表面模型(digital surface model,DSM)、数字正射影像(digital orthophoto map,DOM)和数字线划图(digital line graphic,DLG)等产品。随着 CCD 等光电感应器件技术的进步,数字航摄仪技术得到了快速发展,以几何及辐射分辨率高、影像质量佳、多光谱(如蓝光、绿光、红光和红外波段)及直接数字化等优势,逐渐取代了传统胶片航摄仪。

现代大像幅航摄仪按成像原理主要可归纳为 3 类:①面阵框幅式航摄仪。这类航摄仪成像方式类似于传统胶片相机的框幅式成像,按组成面阵的方式又可以细分为 2 种,一种是依据中心投影原理将多幅小面阵相机的影像拼接成一幅大面阵影像,主要有 DMC II,ULTRACAM,DiMAC 以及国产的 SWDC 等相机;另一种是使用单个大面阵的 CCD 直接成像,以最新的 DMC III 相机为代表。②线阵推扫式航摄仪。依据三线立体扫描成像原理,3 个

CCD 线阵分别排列在前视、下视和后视的相机焦平面上;在飞机飞行过程中,推扫成像,能够同时获取立体影像和彩色多光谱影像。以 Leica 公司的 ADS 系列相机为代表。我国高分辨率对地观测系统重大专项支持研制了首台国产机载大视场三线阵 CCD 相机 GFXJ^[12]。③步进幅式航摄仪(又可称为摆扫式航摄仪)。这类航摄仪在飞机飞行过程中,垂直于飞行方向摆动扫视成像,在一个扫视周期内获取多帧影像,以构成较大的旁向视场角(如国外的 A3 相机)。中国自然资源航空物探遥感中心(以下简称“航遥中心”)针对大比例尺航空物探遥感综合调查的需求,定制研发了 ASC1100 航空摆扫相机系统。

2.2.2.2 倾斜航摄仪

倾斜航摄仪与传统数字航摄仪垂直下视成像方式不同,相机镜头以一定的倾斜角度对地进行摄影成像。一般由多台数码相机组成,分别朝不同方向拍摄,从而获取地物多角度信息。通过后期数据处理,可生成精细实景三维模型、DSM 和真 DOM 等产品。利用实景三维模型,可对地物进行多角度解译,大大地提高了遥感地质解译的精度。目前主流的倾斜航摄仪有:国产的 AMC5100,SWDC-5,TOPDC-5 以及国外的 Leica RCD 30,UltraCam Osprey,IGI Quattro-DigiCAM 和 IDM1000 等。

2.2.2.3 机载 LiDAR

机载 LiDAR 是一种安装在飞机上的激光探测与测距系统,主要采用红外到紫外光谱波段。其工作原理是通过测量飞机的空间位置和姿态,以及飞机对地距离和扫描角度,获得地面扫描点的空间位置坐标。飞机的空间位置由全球定位系统确定,姿态由惯性测量单元确定,飞机对地距离由激光信号发射到接收之间的时间长短确定。由此获取地面的 DSM 或 DEM,而根据接收激光信号强弱可得到地物分类信息^[13]。机载 LiDAR 是一种主动遥感传感器,具有全天候、作业周期短、精度高等优点,而且能穿透稀疏的植被,是目前地形测量和三维建模的重要手段之一。

机载 LiDAR 系统按应用场景的不同,可分为地面地形测量系统和水深测量系统。机载 LiDAR 地面地形测量系统主要用于陆地地形测量。陆地 LiDAR 系统近年来发展迅速,除了最大测程、脉冲频率和测量精度等硬指标不断提高之外,回收回波信号的方式也在进一步改进。目前主流的机载 LiDAR 厂商有 Leica,Optech,Riegl 和 Trimble 等^[14]。传统机载 LiDAR 主要采用线性模式,近年来出现了一种

单光子雷达,采用与以往模式完全不同的光子计数工作模式,功耗更低、探测精度和效率更高,以 Leica 公司的 SPL100 为代表。机载激光水深测量系统,是一种利用激光测距技术获取水深信息的航空遥感传感器,其主要原理是借助红外和蓝绿激光,通过检测海表和海底回波实现测深。一般机载激光水深测量系统同时具有海底地形测量和海岸地形测量功能,可实现水陆一体化无缝测量^[15-16]。在“人下不去、船上不来”的浅海或岛礁(含暗礁)浅水海底地形和水深调查中具有巨大的优势。机载激光水深测量系统的研制难度较大,目前产品主要有 Optech 公司的 CZMIL,Leica 公司的龙眼(DragonEye)、蝙蝠 II(Chiroptera)和鹰眼 III(HawkEye),Fugro 公司的 LADS HD 以及 Riegl 公司的 VQ-880-G 等。

2.2.2.4 机载高光谱成像仪

机载高光谱成像仪又称成像光谱仪,主要工作在可见光、近红外和短波红外波段,在空间成像的同时,为每个像元提供数十至数百个窄波段的光谱信息;融合了成像技术和光谱技术,准实时地获取研究对象的影像和每个像元的光谱分布,可以大大提高遥感应用的量化水平^[6]。机载高光谱仪使航空遥感技术发生了质的飞跃,从地物鉴别(分类)发展到对地物的直接识别,从探测宏观地物发展到探测地物的组分乃至化学组成^[17]。目前国际上主流的机载高光谱仪有美国的 AVIRIS、澳大利亚的 HyMap、加拿大 Itres 公司的 CASI、SASI、TASI 以及我国上海技术物理研究所研制的 OMIS 和 PHI 等^[18]。中国地质调查局南京地质调查中心也研制成功了国产机载高光谱成像仪。

2.2.2.5 机载 SAR

机载 SAR 是一种主动式微波传感器,工作在电磁波谱的微波波段(波长 0.1~100 cm),通过向成像区域发射电磁波能量,然后记录来自目标物的返回信号。机载 SAR 不受光照和天气条件的限制,可全天时、全天候对地观测;在一定条件下,较长波长的微波还具有对地物的穿透性,其成像的立体效应增强了地形信息;这些优势使得 SAR 遥感技术在地质学中得到了广泛应用及深入发展^[5]。需要注意的是,机载 SAR 采用侧视成像方式,且使用人眼不可见的微波波段,因此获取的影像具有与光学影像不同的特征,对 SAR 影像的解译需要经过一定的专业训练。目前,典型机载 SAR 系统有美国的 AIR-SAR、加拿大的 CV-580 SAR、丹麦的 EMISAR、德国的 E-SAR 和巴西的 OrbiSAR 等^[19],这些 SAR 覆盖了 P、L、C 和 X 等波段,且一般都具有全极化和干涉

测量功能。我国于 20 世纪 70 年代开始开展机载 SAR 的研制,并已成功研制了多种型号的机载 SAR 系统。新的 CASMSAR 系统,可以获取 0.5~5 m 空间分辨率的多波段(X 和 P 波段)、多极化(HH, HV, VH 和 VV)干涉与立体 SAR 数据^[20]。

2.2.2.6 UAV 遥感传感器

随着电子、电池和芯片等技术的发展,一些体积、质量、功耗水平都足够低的 UAV 遥感传感器不断涌现^[21]。现在 UAV 上可搭载的遥感传感器除了常规的数码相机外,已出现了多光谱相机、高光谱相机、热红外相机、SAR 和 LiDAR 等几乎覆盖整个电磁波谱段的遥感设备。据 UVS-INFO 统计,目前世界上用于 UAV 上的遥感传感器达 400 多种。但目前在国内 UAV 遥感应用中,仍以光学相机为主,而高光谱相机、热红外相机、SAR 和 LiDAR 等实际应用中尚不普遍,这些设备在功能、性能及价格方面距离应用需求尚有一定距离。

2.2.3 航空遥感数据处理技术

随着航空遥感传感器技术的进步和计算机技术的发展,航空遥感数据处理技术发生了重大变化,针对各类遥感数据涌现出了大量的成熟商业软件。

对于光学影像(含 UAV)的处理,各类软件层出不穷,主要有国外的 PixelFactory, Inpho, IPS, Pix4Dmapper, PhotoMOD, Correlator3D, Imagestation SSK, PIEnengineering 和国内的 VirtuoZo, DPGrid, Pixel-Grid, RTechPro, Godwork, MapMatrix, SVSDPA 等。一般都具有自动空三测量、DEM 生产、DOM 生产和影像匀光匀色等功能,但在处理效率和效果方面有所差异^[22-23]。

对于倾斜摄影数据实景三维建模,主要有国外的 ContextCapture Center, PhotoMesh, StreetFactory 和国产的 Mirage3D, DP-Smart, SVSDPO 等,能全自动地从二维数字影像生产实景三维模型。

对于 LiDAR 数据的处理,主要的商业软件有 TerraSolid, RealWorks, Cyclone, Pointools, Orbit Mobile Mapping, ENVI LiDAR, LP360 和 LiDAR360 等,以及国内科研院所和公司开发的一些工具软件^[24]。另外还有大量开源的点云数据处理软件,可完成点云滤波、分类、DEM 生成和可视化等处理。

高光谱图像处理与信息提取技术的研究主要包括数据降维、图像分类、混合像元分解和目标探测等方面^[25]。对于航空高光谱数据的处理,一般先使用硬件配套的处理软件完成数据预处理,再使用具有高光谱图像分类和目标探测能力的遥感软件如 ENVI, ERDAS, PCI 和国产的 HIPAS 等^[26-27]做进一步

处理和分析。通用的高光谱数据处理软件系统通常将高光谱图像处理算法、数据模型库、数据存取与可视化等技术进行整合,实现对海量高光谱数据的定性和定量处理与分析。

对于 SAR 数据的处理,目前主要软件有 ERDAS, ENVI, Gamma, ROI_PAC, PolSAR Pro, EarthView, Doris 和 StaMPS 等,这些软件在干涉处理、极化处理等能力上各有所长。我国多家单位合作,也研发了国产的 SAR 影像处理解译系统^[28]。

对于机载航空传感器集成的 POS 系统的数据解算,主要使用 POSpac 和 Inertial Explorer 等软件。

除了商业数据处理软件之外,许多单位和个人也开发了免费的遥感数据处理工具^[29]。维基百科详尽地列出了摄影测量和计算机视觉方面的软件^[30]。在这些开放的软件中,由传统摄影测量公司开发或发布的产品并不多,而由计算机公司、新兴的 UAV 公司、网络公司、土木工程和设计公司、社交媒体公司等开发的产品居多。开源软件中,有一些软件可以完成从影像到纹理模型的整个处理过程,有些软件则只完成其中的一个或几个中间流程。如果把从影像到模型的整个处理流水线分为运动重建、密集点云匹配、三维三角网构建和后处理(主要是纹理贴图)4个工序,那么每个软件可以或多或少地与其他1—3个软件相结合,完成整个处理流程。除了开源摄影测量软件,目前已有很多开源的激光扫描测量数据处理、浏览、分析软件,如 Quick Terrain Reader, BCAL LiDAR, FugroViewer, MARSFreeView, Points2Grid, LAStool 和 CloudCompare 等;还有许多开源的地理信息管理软件,如 GDAL, QGIS, SA-GAGIS, GRASSGIS, OSSIM, SharpMap, WorldWind, MapWindow GIS, GeoTool 和 uDig 等。

航空遥感数据处理技术的发展动态及趋势主要表现在以下几个方面^[31]: ①海量多源遥感数据处理一体化。采用通用算法系统处理各种海量多源航空航天影像、光学和雷达影像、激光测距点云数据,打破先前不同类型遥感数据采用不同专业模块进行处理的传统。②新型多 CCD 线阵、多镜头倾斜航空遥感数据处理技术发展迅速。非常规的大角度倾斜影像/大角度交会/宽基线影像自动配准、多角度影像的联合区域网平差、地面密集 DSM 自动匹配、三维建模及纹理映射方法都取得突破性进展^[32-33]。③遥感数据处理更加自动化、智能化。摄影测量与计算机视觉和人工智能逐步深入融合^[34-35],航空遥感影像高精度定位/空中三角测量、DSM/DEM 提取和 DOM 生成等算法迅速发展;结合计算机视觉方

法的倾斜或大交会角度影像高精度匹配算法取得巨大进展;在大数据时代背景下,有学者提出了“云控制”摄影测量的概念^[36];深度学习在图像立体匹配和作物分类提取中获得应用^[37-38]。④基于分布式、多核异构云计算的海量遥感数据处理技术得到运用。采用 CPU/GPU 多线程模式和基于高速局域网的多核 CPU/GPU 集群分布式并行数据处理方式,使得许多复杂的计算任务变为可能;通过云计算模型利用整个云网络中的计算资源,能够大大提高海量遥感数据处理的效率,形成强大的计算能力来满足遥感数据的实时处理^[39-40]。

3 航空遥感技术在地质调查中的典型应用

地质行业是航空遥感技术应用最早且发挥作用较为显著的行业之一。早在第一次世界大战结束后,国外就开始将航空摄影技术用于地质领域。在 20 世纪 50 年代中期,我国原地质部就将黑白航空相片应用于秦岭、柴达木及鄂尔多斯等地区的 1:20 万区域地质调查^[1,41]。1972 年,航遥中心的前身——原国家计委地质局航空物探大队成立了航空地质组,从德国引进了 RMK-A 型航空摄影相机,组建了我国第一支航空遥感地质飞行专业队伍,并首次在甘肃北山等地成功进行了面积性黑白航空摄影生产飞行。20 世纪 70 年代末,先后引进了适用于低空和高空作业的遥感飞机,购买了各种焦距的航摄仪、多光谱扫描仪、热红外扫描仪以及配套的地面处理设备。在尔后的几十 a 中,随着航空遥感技术的快速发展,航空遥感在区域地质调查、矿产资源勘查、水工环地质调查、矿山监测和地质灾害调查等领域获得广泛应用^[2,42-44]。

目前,地质部门已形成强大的航空遥感数据获取能力,拥有各类框幅式和推扫式数字航摄仪、适用于物探飞行模式的宽角数字航摄仪、倾斜数字航摄仪、机载 LiDAR、机载高光谱成像仪、机载激光水深测量仪、遥感 UAV 以及完备的数据处理软件与硬件,开展了大量的航空遥感地质调查工作。本文以航空遥感技术在地质灾害调查、矿产资源勘查、海岸带地质调查、矿山监测和航空物探遥感综合勘查中的应用为例进行简要介绍。

3.1 地质灾害调查

3.1.1 2008 年汶川大地震灾害应急调查

2008 年“5·12”汶川大地震发生后,航遥中心采用当时国内最先进的航空遥感技术装备和技术手

段,开展了多平台、多传感器、多数据处理系统的航空遥感应急灾害调查,第一时间为国务院抗震救灾指挥部指挥抗震救灾、打通生命通道、防范次生地质灾害、开展灾后重建等工作做出了特殊贡献,成为科技抗震救灾的一个范例^[45-46]。

3.1.2 三峡库区航空遥感地质调查

三峡库区地质环境背景复杂,滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害频发,是我国地质灾害最严重的地区之一。航遥中心先后于 1984 年、2003 年、2009 年、2017 年多次开展三峡库区高精度航空遥感地质调查工作,查明三峡库区地质灾害分布及发生、发展规律,为库区地质灾害防治提供了航空遥感数据支撑与科学依据。尤其是在 2017 年开展的新一轮三峡库区航空遥感调查中,针对三峡水库周期性蓄降水造成的库岸再造以及消落带的剧烈变化,综合采用数字航空摄影(ADS100 和 UCXp-WA)、倾斜航空摄影(AMC5100)和低空 UAV 遥感等多种技术手段,获取了三峡水库 175 m 蓄水以来的最新高精度航空遥感数据,开展了地质灾害与地质环境遥感解译,为库区地质灾害防治、城市地质调查、区域地质灾害精细化调查及监测预警等工作提供了第一手翔实、准确的地质资料^[47]。

3.2 矿产资源勘查

从遥感数据中可以发现和提取成矿地质背景、成矿地质条件和成矿地质形迹等与成矿地质作用有关的成矿、控矿和找矿信息,建立遥感找矿模型。应用高光谱遥感技术,不仅可以直接识别与成矿作用密切相关的蚀变矿物,分析蚀变矿物组合,定量或半定量估计相对蚀变强度和蚀变矿物含量,评价地面化探异常,追索矿化热液蚀变中心,圈定找矿靶区,而且还可探测一些蚀变矿物和一些造岩矿物的成分及结构变异特征,用以分析蚀变带的空间分带特征、成矿成岩作用的温压条件、热动力过程和热液运移的时空演化^[48]。矿产资源勘查是高光谱遥感技术最成功、也是最能发挥优势的应用领域之一。航遥中心从“九五”开始,系统开展了高光谱矿物填图和应用研究,在主要岩矿反射光谱特征和影响因素、高光谱数据处理、矿物填图及其地质应用方面都进行了较系统的研究,使我国高光谱矿物填图技术迅速赶上并接近世界先进水平^[17]。近年来,航遥中心与核工业北京地质研究院、中国地质调查局西安地质调查中心、核工业航测遥感中心等单位合作,在我国西部重要成矿区带开展了航空高光谱遥感调查与找矿预测工作,形成了一套相对完整的航空高光谱遥感矿物填图技术体系,解决了航空高光谱数据在地

质工程化应用中所遇到的问题,在数据获取与预处理、矿物信息提取和区域找矿预测应用等方面均取得了一定创新和成果^[49-50]。

3.3 海岸带地质调查

海岸带地貌复杂,既有海洋水体,又有湿地、滩涂、海岸线以及陆地人文地物,通行困难,地面地质调查工作难以开展,更难以实现海陆统筹,目前潮间带和潮下带浅水海域地质调查仍基本处于空白。机载激光水深测量系统能够快速、高效地获取海岸带海陆一体的地形数据,解决浅海“人下不去,船上不来”导致的基础测绘地理信息缺失问题。机载高光谱技术可以提供丰富的海洋水色产品及相关成果,如悬浮泥沙浓度、叶绿素浓度、海岸侵蚀监测和水底底质分类等。航遥中心自 2016 年以来,采用数字航空摄影^[51]、UAV 遥感和机载激光水深测量等航空遥感技术以及航空物探技术开展我国海岸带航空物探遥感综合调查,为海岸带地质调查提供了重要技术支撑。其中,在 2018 年,使用 CZMIL Nova II 系统,在我国近海开展了首次面积性的机载激光雷达水深测量生产试验,获取了海岸带近岸海陆一体地形数据,为我国开展大面积的机载激光水深测量积累了丰富的经验。

3.4 矿山监测

遥感技术广泛应用于矿产资源开发利用状况、矿山地质环境(含矿山环境恢复治理)和矿产资源规划执行情况的调查与动态监测。矿山遥感监测已成为日常性地质调查工作。航空遥感技术作为遥感的重要分支,在矿山监测中发挥了重要作用。航遥中心自 2010 年开始进行 UAV 遥感业务能力建设,逐渐形成了较为完备的 UAV 遥感监测技术体系,并从 2012 年开始,先后在江西、吉林、山西、河北、新疆等全国多个地区开展了矿山 UAV 遥感监测工作,飞行面积超过 2 万 km²,为矿山监测提供了高精度的遥感数据^[42, 52-53]。航遥中心还利用机载 LiDAR 技术开展了矿山地面塌陷调查^[54];利用航空高光谱技术可以直接识别与矿山环境相关的污染物,定量分析其分布的范围及变化趋势^[55]。

3.5 航空物探遥感综合勘查

航空物探遥感综合勘查是指在同一架飞机上装载多种航空地球物理场测量设备、遥感传感器以及辅助设备,进行综合航空勘查的一种技术方法。该方法因具有一次飞行可获得综合性的物探遥感信息,有利于提高探测效率和效果,降低成本,实现多目标探测任务等优势,很早就受到重视。在国家 863 计划的资助下,航遥中心针对航空物探飞行模

式(飞行高度低、沿地形起伏飞行、大速高比)对航空遥感提出的新要求,先后研制了宽视场角数字航空摄影相机和无人值守的五拼相机遥感成像系统,集成了先进实用的航空重磁遥综合勘查系统,并先后在内蒙古大井坡航空物探动态试验场和新疆哈密遥感地质试验场开展了示范应用,获得了一批高质量的测量数据,形成了工程化的勘查成果,显著提高了航空物探遥感综合探测能力和工作效率^[56-57]。

4 结论与建议

本文通过回顾航空遥感技术的发展历程,总结了航空遥感飞行平台、传感器和数据处理技术的发展现状;以地质灾害调查、矿产资源勘查、海岸带地质调查、矿山监测和航空物探遥感综合勘查为例介绍了航空遥感技术在地质调查中的典型应用,得出下述结论与建议:

- 1)航空遥感是遥感的一个重要分支,是卫星遥感发展的基础,在地质调查工作中有着长久而广泛的应用。随着平台技术、传感器技术、计算机技术及相关数学理论的发展,航空遥感技术也一直在持续发展中。近年来,航空遥感技术的发展日新月异,在航空遥感数据获取能力上有了巨大的进步。
- 2)相对而言,航空遥感数据快速处理能力和及时应用服务能力,离实际应用需求还有一定差距。因此,多源航空遥感数据一体化处理与集成分析、航空遥感数据的自动化与智能化快速处理以及航空遥感地质机理分析仍是未来需要进一步重点研究的方向。

志谢: 在本文撰写过程中,中国自然资源航空物探遥感中心的张宗贵教授等同志提供了资料和帮助,在此谨表诚挚谢意!

参考文献(References):

[1] 熊盛青. 国土资源遥感技术进展与展望[J]. 国土资源遥感, 2007, 19(4): 1-6. doi:10. 6046/gtzyyg. 2007. 04. 01.
Xiong S Q. The progress and development trend of the application of remote sensing to land and resources[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2007, 19(4): 1-6. doi:10. 6046/gtzyyg. 2007. 04. 01.

[2] 王润生,熊盛青,聂洪峰,等. 遥感地质勘查技术与应用研究[J]. 地质学报,2011, 85(11): 1699-1743.
Wang R S, Xiong S Q, Nie H F, et al. Remote sensing technology and its application in geological exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1699-1743.

[3] Rees W G. Physical Principles of Remote Sensing[M]. Cam-

bridge: Cambridge University Press, 2001.

[4] Khorram S, Koch F H, van der Wiele C F, et al. Remote Sensing[M]. New York: Springer, 2012.

[5] 郭华东. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Guo H D. Theories and Applications of Radar for Earth Observation[M]. Beijing: Science Press, 2000.

[6] 童庆禧,张兵,郑兰芬. 高光谱遥感——原理、技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Tong Q X, Zhang B, Zheng L F. Hyperspectral Remote Sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[7] 张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
Zhang X H. Theories and Methods of Airborne LiDAR Technology[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007.

[8] Toth C, Józkó G. Remote sensing platforms and sensors: A survey[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 115: 22-36.

[9] Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 92: 79-97.

[10] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505-513.
Li D R, Li M. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(5): 505-513.

[11] 廖小罕,周成虎,苏奋振,等. 无人机遥感众创时代[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(11): 1439-1447.
Liao X H, Zhou C H, Su F Z, et al. The mass innovation era of UAV remote sensing[J]. Journal of Geo-Information Science, 2016, 18(11): 1439-1447.

[12] 王涛,张艳,张永生,等. 国产机载大视场三线阵 CCD 相机 GNSS 偏心矢量和 IMU 视轴偏心角标定技术[J]. 测绘学报, 2018, 47(11): 1474-1486.
Wang T, Zhang Y, Zhang Y S, et al. Investigation on GNSS lever arms and IMU boresight misalignment calibration of domestic airborne wide-field three CCD camera[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(11): 1474-1486.

[13] 李德仁,王树根,周月琴. 摄影测量与遥感概论[M]. 北京: 测绘出版社, 2008.
Li D R, Wang S G, Zhou Y Q. An Introduction to Photogrammetry and Remote Sensing[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2008.

[14] 李增元,刘清旺,庞勇. 激光雷达森林参数反演研究进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1138-1150.
Li Z Y, Liu Q W, Pang Y. Review on forest parameters inversion using LiDAR[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 1138-1150.

[15] 翟国君,黄漠涛. 海洋测量技术研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1752-1759.
Zhai G J, Huang M T. The review of development of marine surveying technology[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1752-1759.

- [16] 翟国君,吴太旗,欧阳永忠,等. 机载激光测深技术研究进展[J]. 海洋测绘,2012,32(2):67-71.
Zhai G J, Wu T Q, Ouyang Y Z, et al. The development of airborne laser bathymetry[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2012, 32(2):67-71.
- [17] 王润生,甘甫平,闫柏琨,等. 高光谱矿物填图技术与应用研究[J]. 国土资源遥感,2010,22(1):1-13. doi:10.6046/gtzyyg.2010.01.01.
Wang R S, Gan F P, Yan B K, et al. Hyperspectral mineral mapping and its application[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2010, 22(1):1-13. doi:10.6046/gtzyyg.2010.01.01.
- [18] 张 兵. 当代遥感科技发展的现状与未来展望[J]. 中国科学院院刊,2017,32(7):774-784.
Zhang B. Current status and future prospects of remote sensing[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(7):774-784.
- [19] Reigher A, Scheiber R, Jager M, et al. Very-high-resolution airborne synthetic aperture Radar imaging: Signal processing and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(3):759-783.
- [20] 黄国满. 机载多波段多极化干涉 SAR 测图系统-CASMSAR[J]. 测绘科学,2014,39(8):111-115.
Huang G M. An airborne interferometric SAR mapping system with multi-band and multi-polarization-CASMSAR[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(8):111-115.
- [21] 廖小罕,周成虎. 轻小型无人机遥感发展报告[M]. 北京:科学出版社,2016.
Liao X H, Zhou C H. Development Report of Light and Small UAV Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [22] 金鼎坚,支晓栋,王建超,等. 面向地质灾害调查的无人机遥感影像处理软件比较[J]. 国土资源遥感,2016,28(1):183-189. doi:10.6046/gtzyyg.2016.01.27.
Jin D J, Zhi X D, Wang J C, et al. Comparison of UAV remote sensing imagery processing software for geological disasters monitoring[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28(1):183-189. doi:10.6046/gtzyyg.2016.01.27.
- [23] 黎治坤,郑史芳,刘 锐,等. 几种无人机正射影像处理软件的比较[J]. 测绘通报,2016(6):82-86.
Li Z K, Zheng S F, Liu R, et al. Comparison of several kinds of image processing software for unmanned aerial vehicle[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(6):82-86.
- [24] 杨必胜,梁福逊,黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J]. 测绘学报,2017,46(10):1509-1516.
Yang B S, Liang F X, Huang R G. Progress, challenges and perspectives of 3D LiDAR point cloud processing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10):1509-1516.
- [25] 张 兵. 高光谱图像处理与信息提取前沿[J]. 遥感学报,2016,20(5):1062-1090.
Zhang B. Advancement of hyperspectral image processing and information extraction[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5):1062-1090.
- [26] 陈静波,汪承义,孟 瑜,等. 新型航空遥感数据产品生产技术的生产[M]. 北京:化学工业出版社,2016.
Chen J B, Wang C Y, Meng Y, et al. Production Technology for Novel Aerial Remote Sensing Data Product[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- [27] 童庆禧,张 兵,张立福. 中国高光谱遥感的前沿进展[J]. 遥感学报,2016,20(5):689-707.
Tong Q X, Zhang B, Zhang L F. Current progress of hyperspectral remote sensing in China[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5):689-707.
- [28] 张继贤,黄国满,程春泉. 面向对象高可信 SAR 数据精确处理[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):1819-1831.
Zhang J X, Huang G M, Cheng C Q. Object-oriented accurate processing for SAR images[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12):1819-1831.
- [29] 单 杰. 从专业遥感到大众遥感[J]. 测绘学报,2017,46(10):1434-1446.
Shan J. Remote sensing: From trained professionals to general public[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10):1434-1446.
- [30] Comparison of photogrammetry software[EB/OL]. [2018-11-13]. https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_photogrammetry_software.
- [31] 中国测绘地理信息学会. 中国测绘学科发展蓝皮书(2015—2016 卷)[M]. 北京:测绘出版社,2016.
Chinese Society of Geodesy, Photogrammetry and Cartography. Blue Book on Geodesy, Photogrammetry and Cartography Development in China(2015—2016)[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2016.
- [32] 张 力,艾海滨,许 彪,等. 基于多视影像匹配模型的倾斜航空影像自动连接点提取及区域网平差方法[J]. 测绘学报,2017,46(5):554-564.
Zhang L, Ai H B, Xu B, et al. Automatic tie-point extraction based on multiple-image matching and bundle adjustment of large block of oblique aerial images[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(5):554-564.
- [33] Wu B, Xie L, Hu H, et al. Integration of aerial oblique imagery and terrestrial imagery for optimized 3D modeling in urban areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 139:119-132.
- [34] 龚健雅,季顺平. 从摄影测量到计算机视觉[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017,42(11):1518-1522,1615.
Gong J Y, Ji S P. From photogrammetry to computer vision[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(11):1518-1522,1615.
- [35] 张祖勋,吴 媛. 摄影测量的信息化与智能化[J]. 测绘地理信息,2015,40(4):1-5.
Zhang Z X, Wu Y. Informatization and intellectualization of photogrammetry[J]. Journal of Geomatics, 2015, 40(4):1-5.
- [36] 张祖勋,陶鹏杰. 谈大数据时代的“云控制”摄影测量[J]. 测绘学报,2017,46(10):1238-1248.
Zhang Z X, Tao P J. An overview on “cloud control” photogrammetry in big data era[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10):1238-1248.
- [37] 龚健雅,季顺平. 摄影测量与深度学习[J]. 测绘学报,2018,47(6):693-704.
Gong J Y, Ji S P. Photogrammetry and deep learning[J]. Acta

- Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(6): 693–704.
- [38] Mountrakis G, Li J, Lu X, et al. Deep learning for remotely sensed data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 145: 1–2.
- [39] 单杰. 光束法平差简史与概要[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1797–1810.
- Shan J. A brief history and essentials of bundle adjustment[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 1797–1810.
- [40] Zheng M, Zhou S, Xiong X, et al. A new GPU bundle adjustment method for large-scale data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2017, 83(9): 633–641.
- [41] 地矿部勘查技术司. 地矿部遥感地质工作的回顾与展望——庆祝地质矿产部成立40周年[J]. 国土资源遥感, 1992, 4(3): 5–8. doi:10.6046/gtzyyg. 1992. 03. 02.
- Department of Exploration Technology, Ministry of Geology and Mineral Resources. Review and prospect of remote sensing geology work of the ministry of geology and mineral resources: Celebrating the 40th anniversary of the establishment of the Ministry of Geology and Minerals[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 1992, 4(3): 5–8. doi:10.6046/gtzyyg. 1992. 03. 02.
- [42] 杨金中, 秦绪文, 聂洪峰, 等. 中国矿山遥感监测[M]. 北京: 测绘出版社, 2014.
- Yang J Z, Qin X W, Nie H F, et al. Remote Sensing Monitoring of Mine in China[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2014.
- [43] 王治华, 郭大海, 郑雄伟, 等. 贵州2010年6月28日关岭滑坡遥感应急调查[J]. 地质前缘, 2011, 18(3): 310–316.
- Wang Z H, Guo D H, Zheng X W, et al. Remote sensing interpretation on June 28, 2010 Guanling landslide, Guizhou Province, China[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(3): 310–316.
- [44] 童立强, 郭兆成. 典型滑坡遥感影像特征研究[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 86–92. doi:10.6046/gtzyyg. 2013. 01. 16.
- Tong L Q, Guo Z C. A study of remote sensing image features of typical landslides[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(1): 86–92. doi:10.6046/gtzyyg. 2013. 01. 16.
- [45] 王平, 王殿琦, 熊盛青, 等. 飞向汶川——5·12地震灾害航空遥感调查[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- Wang P, Wang D Q, Xiong S Q, et al. Flying to Wenchuan: Aerial Remote Sensing Survey of 5·12 Earthquake Disasters[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [46] 张祖勋, 郭大海, 柯涛, 等. 抗震救灾中航空摄影测量的应急响应[J]. 遥感学报, 2008, 12(6): 852–857.
- Zhang Z X, Guo D H, Ke T, et al. The use of aerial photogrammetry in the fast response for China earthquake rescue[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(6): 852–857.
- [47] 金鼎坚, 林健, 龚建华. 基于多视角遥感的三峡库区消落带数据融合与三维建模初探[C]//水利遥感应用创新论坛论文集. 广州, 2017.
- Jin D J, Lin J, Gong J H. Data fusion and 3D modeling of hydro-fluctuation belt in Three Gorges Reservoir Area based on multi view remote sensing[C]//Anthology of Hydrographic Remote Sensing Application Innovation Forum. Guangzhou, 2017.
- [48] 王润生, 杨苏明, 闫柏琨. 成像光谱矿物识别方法与识别模型评述[J]. 国土资源遥感, 2007, 19(1): 1–9. doi:10.6046/gtzyyg. 2007. 01. 01.
- Wang R S, Yang S M, Yan B K. A review of mineral spectral identification methods and models with imaging spectrometer[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2007, 19(1): 1–9. doi:10.6046/gtzyyg. 2007. 01. 01.
- [49] 韩亚超, 高子弘, 杨达昌, 等. HyMap-C机载高光谱仪定标方法与结果评价[J]. 地质调查与研究, 2017, 40(3): 226–230.
- Han Y C, Gao Z H, Yang D C, et al. Calibration method and results evaluation of HyMap-C airborne hyper-spectrometer[J]. Geological Survey and Research, 2017, 40(3): 226–230.
- [50] 闫柏琨, 董新丰, 王喆, 等. 航空高光谱遥感矿物信息提取技术及其应用进展——以中国西部成矿带调查为例[J]. 中国地质调查, 2016, 3(4): 55–62.
- Yan B K, Dong X F, Wang Z, et al. Mineral information extraction technology by airborne hyperspectral remote sensing and its application progress: An example of mineralization belts of western China[J]. Geological Survey of China, 2016, 3(4): 55–62.
- [51] 陈洁, 高子弘, 杜磊, 等. 海岸带数字航空摄影质量控制与评价[J]. 中国地质调查, 2018, 5(1): 66–72.
- Chen J, Gao Z H, Du L, et al. Quality control and valuation for digital aerial photography in coastal zone[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(1): 66–72.
- [52] 荆青青, 王晓栋, 汪洁, 等. 基于无人机技术的山西袁家村铁矿矿区矿山开发遥感调查[J]. 矿产勘查, 2015, 6(5): 621–626.
- Jing Q Q, Zhi X D, Wang J, et al. Remote sensing survey of iron mine exploitation using UAV technology in Yuanjiacun, Shanxi[J]. Mineral Exploration, 2015, 6(5): 621–626.
- [53] 李迁. 低空无人机遥感在矿山监测中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- Li Q. Application of Low-Altitude UAV Remote Sensing in Mine Monitoring[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [54] 肖春蕾, 郭兆成, 郑雄伟, 等. 机载LiDAR技术在地质调查领域中的几个典型应用[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(1): 136–143. doi:10.6046/gtzyyg. 2016. 01. 20.
- Xiao C L, Guo Z C, Zheng X W, et al. Typical applications of airborne LiDAR technique in geological investigation[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28(1): 136–143. doi:10.6046/gtzyyg. 2016. 01. 20.
- [55] 李万伦, 甘甫平. 矿山环境高光谱遥感监测研究进展[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(2): 1–7. doi:10.6046/gtzyyg. 2016. 02. 01.
- Li W L, Gan F P. Progress in hyperspectral research and monitoring in mine environment[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28(2): 1–7. doi:10.6046/gtzyyg. 2016. 02. 01.
- [56] 朱卫平, 熊盛青, 薛典军, 等. 航空物探遥感联合探测技术现状及应用前景[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2356–2363.
- Zhu W P, Xiong S Q, Xue D J, et al. Aerogeophysical jointly remote sensing detection technology present and prospect[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2356–2363.
- [57] 熊盛青. 航空地球物理综合探测理论技术方法装备应用[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- Xiong S Q. The Theories, Technologies, Methods, Equipment and Applications of Comprehensive Airborne Geophysical Survey[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.

Aerial remote sensing technology and its applications in geological survey

JIN Dingjian^{1,2}, WANG Jianchao¹, WU Fang¹, GAO Zihong¹, HAN Yachao¹, LI Qi^{1,3}

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Aerial remote sensing technology is an important means in geological survey. In this paper, the concept of aerial remote sensing was discussed, the history of aerial remote sensing technology was briefly reviewed, the development status of aerial remote sensing platforms, sensors and data processing technology were summarized, and the typical applications of aerial remote sensing technology in geological survey were described by taking geological disasters investigation, mineral resources exploration, coastal geological survey, mine monitoring, aero geophysical and remote sensing integrated exploration as examples. The research results would provide technical references for the work of aerial remote sensing geological survey.

Keywords: aerial remote sensing; geological survey; geological disasters; mineral mapping; coastal zone; integration of aero geophysics and remote sensing

(责任编辑: 陈 理)

=====

下 期 要 目

- 赵玉灵 基于层次分析法的矿山环境评价方法研究——以海南岛为例
- 李 奇 基于 CZMIL Nova 的中国海岸带机载激光雷达测深潜力研究
- 卢 晶 基于 SI - MSAVI 特征空间的河套灌区盐碱化遥感监测研究
- 程东亚 大气校正在山地流域 NDVI 反演误差上的地形梯度效应
- 罗红霞 海南岛植被覆盖变化驱动因子及相对作用评价
- 袁 辉 河南漯河郾城区冬小麦 LAI 反演结果的真实性检验研究
- 陈 啸 基于图像的玉米植株叶倾角概率密度函数提取方法研究
- 施益强 厦门市 MODIS 气溶胶光学厚度与空气质量指数的回归分析
- 韩海辉 协同处理方式在遥感蚀变异常成因分析中的应用——以北山方山口地区为例
- 朱 爽 时间序列低分影像修正中分遥感冬小麦分布研究
- 徐嘉昕 2000 - 2016 年三江源区植被 NDVI 变化及其对气候因子的响应
- 王 茹 城市新区不透水地表盖度与人为热的关系研究——以西咸新区为例
- 韩亚超 机载高光谱仪几何检校方法及其在海岸带航空遥感调查中的示范应用