

doi: 10.11720/wtyht.2014.6.02

崔志强,胥值礼,孟庆敏.国内主要航空物探飞行平台特点及发展[J].物探与化探,2014,38(6):1107-1113.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.6.02>

Cui Z Q, Xu Z L, Meng Q M. The features of the main airborne geophysical flying-platforms in China and the development trend[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(6): 1107-1113. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.6.02>

国内主要航空物探飞行平台特点及发展

崔志强, 胥值礼, 孟庆敏

(中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

摘 要: 航空物探是将航空地球物理勘探仪器搭载在不同飞行器上,通过特定的飞行作业方式开展的地球物理勘查技术。航空物探的勘查效果同时受物探仪器性能和所采用的飞行平台及其飞行控制效果的双重影响。根据不同的需求,合理地选择并运用飞行器,是开展航空物探测量工作需要解决的首要任务。笔者在回顾国内航空物探发展的基础上,将主要使用的航空物探飞行器分为固定翼、直升机、无人机及其他等四类,分析每类飞行器作为航空物探搭载平台的优缺点,从持续服务地质勘查的需要出发,展望了航空物探及搭载平台的主要发展方向。

关键词: 航空物探;飞行平台;固定翼;直升机;无人机

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2014)06-1107-07

航空地球物理探测,简称航空物探,是地球物理勘探技术与航空技术相结合的一门高新技术。它是通过飞机(飞行器)上装备的专用物探仪器在航行过程中探测各种地球物理场的变化,研究和寻找地下地质构造和矿产的一种物探方法。目前常用的航空物探方法有:航空磁测、航空放射性测量、航空电磁测量(航空电法)以及航空重力调查等四类。

航空物探具有效率高、成本较低、便于大面积工作、探测深度较大等优点,是基础性和公益性地质调查、战略性矿产勘查的重要手段,是地质勘查现代化的标志之一。航空物探在国民经济建设中发挥着重要作用;可为矿产资源与油气资源调查评价、海洋地质调查、地下水勘查、工程地质和环境调查、基础地质与研究、军事与国防建设提供信息和解释成果^[1]。

在航空物探仪器性能不断提高的前提下,合理地选择及运用不同的飞行器,对航空物探测量工作的顺利开展并取得良好效果起到至关重要的作用。通过回顾国内的航空物探发展历程及取得的主要成果,不难发现,我国航空物探飞行平台基本以固定翼飞机为主,少量采用直升机。近年来随着通用航空产业的发展及户外极限运动的兴起,航空物探不断

尝试应用无人机、动力滑翔翼、热气球、飞艇等方式开展工作,也取得了一些成果。笔者将对这几类航空物探平台的主要优势及局限性等作简要介绍。

1 固定翼平台航空物探(磁、电、放、重)

使用固定翼飞机开展各种航空物探工作是该领域最广泛也是最成熟的。1936年前苏联第一次成功地应用航磁仪进行航空物探,1946年开始使用飞机进行地质勘探,1948年加拿大首次试验航空放射性法成功,1950年加拿大试验成功第一台航空电磁仪,1960年美国开始试验航空重力测量,各种航空物探方法相继迅速发展^[2-3]。我国的航空物探开始于1953年^[4],首先是应用航空磁法,此后陆续引进、发明并成功运用了航空放射性、航空电磁法,后来又引进了航空重力测量(尚未实现国产),不断有新的进展,这些航空物探都是首先从固定翼飞机选型开始的。国内迄今为止,在航空物探测量中选择的固定翼机型较多的有:运5(Y-5)、运8(Y-8)、运11(Y-11)、运12(Y-12)、赛斯纳208(Cessna-208)、安12(An-12)、奖状II(Citation-II)、双水獭6(Twin Otter-6)等。近年来运用运12(Y-12)机型开展的工作最多。

固定翼飞机作为多种航空物探技术的首选飞行平台,其优势主要表现在以下几方面。

第一,固定翼飞机具更大的有效载荷。航空物探不仅需要承载飞行员及空中仪器操作员、飞行必须的航空燃油等重量外,还需要搭载各种航空物探仪器。根据需要开展的航空物探方法不同,所集成的仪器或仪器组合也不同。航空物探系统仪器的重量从几公斤到几百公斤不等,现航磁仪最轻可达到 2 kg,而航空电磁、航空伽马能谱以及航空重力仪器通常在 200~400 kg 之间,而且为了同时得到多种地球物理参数,往往需要同时开展多参数测量,这就需

要搭载两种甚至多种仪器,组合系统的仪器总质量往往在 200~500 kg 之间。固定翼飞机往往能有效地保证这些载荷。现今国内多参数航空物探测量开展得最多也最成熟的主要有航空磁、放勘查系统、航空电、磁勘查系统、航空电、磁、放勘查系统等。图 1 为中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所(以下简称物化探所)成功集成并应用的完全国产化的 Y-12 型航空物探电、磁、放综合勘查系统,系统仪器总质量约 500 kg,同时需要两名仪器操作员。该系统已在国内成功完成数 10 万 km 测线的勘查任务,取得了良好的应用效果。



图 1 Y-12 型航空物探(电、磁、放)综合勘查系统

第二,仪器安装及飞机改装较容易且方案多。固定翼飞机往往具有较大的内部空间,对安装航空物探仪器主机系统及相关仪器组件等较为灵活。除航空物探仪器主机外,探头(如航磁探头、航电发射和接收线圈、伽马能谱晶体等),雷达高度仪, GPS 导航天线等设备也需要安装在飞机主体外部,且需要避开飞行过程中产生的涡旋电磁干扰,如涡扇或桨扇等产生的电磁流。图 1 示出安装在飞机尾部向后伸出的航磁探头、机翼两端向外伸出的航空电磁发射和接收线圈,图 2 为物化探所最新研制成功的固定翼时间域航空电磁勘查系统外挂大磁距发射线圈,图 3 为中国国土资源航空物探遥感中心(以下简称航遥中心)最新集成的航磁全轴勘查系统两翼及尾部的四个航磁探头。

第三,飞行姿态稳定,飞行速度较低,适应低空飞行。无论针对何种类型的航空物探测量,保持飞行姿态稳定或缓慢流畅的变化对保证飞行质量都是至关重要的。而无论是涡扇或桨扇型的固定翼飞

机,其飞行姿态都较稳定,飞行中的俯仰、倾斜以及侧摆等姿态变化小且改变速度慢,这能有效地抑制



图 2 时间域固定翼航空电磁勘查系统



图3 航空磁法全轴梯度勘查系统

飞行突变引起的干扰。测量效率高是航空物探的特点,固定翼飞机在开展工作时其飞行速度多在 200~400 km/h 之间,某些较大型涡扇型飞机达到 600 km/h 左右,更适合大面积的快速勘查作业。由于在电磁、能谱及重力测量中,随着与被测量地质体距离的加大,测量信号呈三次方或二次方衰减,因此各类航空物探作业对飞行高度都具有严格的要求,如航空磁测通常要求离地 200 m 以内,航空电磁要求离地 100 m 以内,航空伽马能谱要求离地 150 m 以内等,而现今国内大面积开展的固定翼航空物探飞行高度多集中在 100~300 m 之间,高山区 500~1 000 m 之间,平原或沙漠地区最低可达到近地 30~50 m 的高度。

综合以上这些特点,不难看出为什么主要的航空物探类型及 90% 以上的勘查任务都采用固定翼飞机来开展工作。但也存在以下几点不足之处。

其一,飞行高度保持难度大。如在中低山区、高山区的离地飞行高度往往难以保持,降低飞行高度就意味着存在飞行隐患(近年来发生过机毁人亡的事故)。因此在这类地区往往只能开展对飞行高度要求较低的航空物探区域性概查工作,这不仅会降低所获取的数据质量,而且会造成大批重要的直接或间接找矿的局部异常遗失,使勘查效果大大降低。这也是制约该类地区地质找矿成果不突出的部分原因。

其二,固定翼飞机必须使用固定的、条件相对较好的机场作为基地。虽然固定翼飞机的航程相对较大,但对某些测区与机场距离相对较远的勘查任务,如我国西部的新疆、青海、西藏等地,现有的机场较少且分布不均匀。这就必须加大作业半径,测区到机场的多次往返不仅降低了飞行效率,也会造成大量不必要的飞行经费支出,如最近在内蒙古大兴安岭地区开展的 1:5 万航测工作,共完成有效测线约 25 万 km,累计飞行 1 882 h,其中测线飞行 1 108 h,

仅占 58.87%,除去试飞、补偿飞行、仪器故障等飞行小时外,仍有近 600 h 的无效飞行,折合为飞行费约 700 万元。

其三,在针对大比例尺测量方面略显不足。受飞行高度、飞行速度和操控性等方面制约,固定翼平台航空物探工作通常用于中、小比例尺的调查工作。20 世纪以 1:20 万、1:10 万的小比例尺区域性概查工作为主,近年来主要在重点成矿区带上开展 1:5 万中等比例尺的普查工作为主,局部重要地段最高加密到 1:2.5 万,1:1 万甚至更大比例尺的详查任务较少,通常选择其他飞行平台开展工作。

2 直升机平台航空物探(磁、放、电)

以直升机为平台的航空物探从 20 世纪 80~90 年代开始运用,多开展小范围的航空单磁测量,少数重点地区开展过航放测量。近几年在开展重要成矿区带的中、大比例尺调查中多有使用。主要使用的直升机型有:贝尔(Bell)、Enstron480、米-8、R44、R22、蜂鸟(EC)、小松鼠(B2/B3)、超美洲豹(AS332L2)等。目前应用最多、最广泛的是欧直公司的 AS350-B3 型(小松鼠 B3)直升机,其有效载重(标准燃油量)近 500 kg,有效航程约 650 km、最大升限 6 km,适宜作为航空物探平台。

直升机平台的航空物探多以开展航磁测量和航空(磁、放)综合测量为主,航空电磁测量和航空(电、磁)综合测量也逐渐应用到实际生产中,直升机航空重力尚未出现。图 4 为 2013 年物化探所集成并成功实现大面积勘查任务的直升机航空(磁、放)综合站勘查系统,图 5 为航遥中心研制的直升机吊舱式时间域电磁勘查系统。



图4 直升机航空(磁、放)勘查系统

采用直升机作为航空物探平台的主要优点表现在以下几方面。

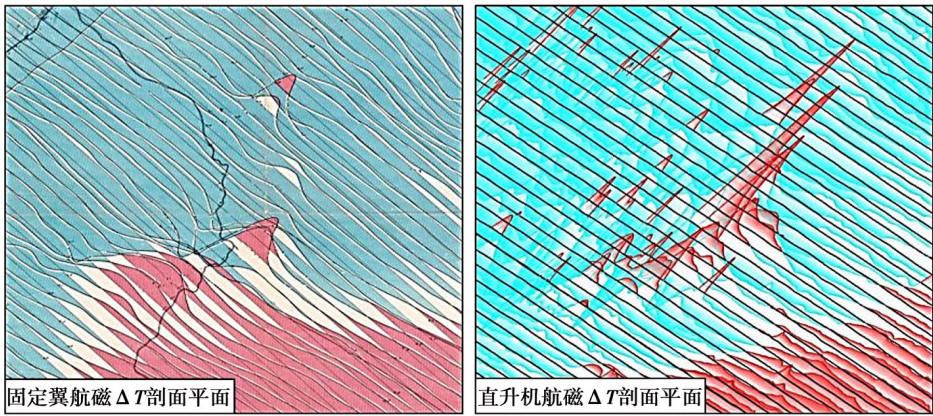
(1)具有灵活的机动性,能最大限度地控制航



图 5 直升机吊舱式时间域航空电磁勘查系统

速、离地高度等。对于目前已经具有的高精度航空物探仪器而言,如何实现大比例尺的高精度测量是航空物探需要面临的问题。直升机飞行时对空速、离地高度的有效控制恰恰能够满足这样的要求。在仪器的采样率相同的情况下(如航磁常见的 10 Hz),直升机能按要求降低空速,严格保证飞行高度,这对提高勘查效果起到了至关重要的作用,特别对于在中—低山以及丘陵地区开展的测量工作。如图 6 是南方某重点矿区早期固定翼型和近期直升机

型航磁勘查成果对比。从该航磁 ΔT 剖面平面对比图上,可以明显地看出采用直升机平台的航测成果所蕴含的地质及找矿信息更加丰富,表现在磁异常细节丰富,异常强度明显增大。而这一切都源于直升机的平均空速是 120 km/h,平均飞行高度能有效地控制在 90~110 m 之间,而固定翼飞机的平均空速是 240 km/h,平均飞行高度在 200 m 以上。因此,对于高精度航空物探来说,要获得高质量的数据,就必须降低空地速度和飞行高度。



左、右两图的平面比例尺和航磁 ΔT 纵向比例相同,航磁背景场水平不同

图 6 固定翼型与直升机型航磁勘查成果对比

(2) 直升机具有低速、大角度转弯以及空中悬停等特性,也是国内外广泛开展吊舱式时间域航空电磁法的主要考虑因素。与固定翼时间域航空电磁勘查系统相比,直升机时间域航空电磁系统对吊舱式接收或发射线圈的放与收操作显得更加灵活,操作性更强,同时也降低了飞行难度,提高了飞行安全系数。

(3) 直升机平台航空物探在作业基地的选择上较灵活。可在测区内或周围就地起降,不需要到固定的机场,能够根据工作进度不断的变换基地,减少

不必要的航程开销,提高效率。特别是在重点区域开展小面积的大比例尺高精度测量方面优势尤为明显。

但直升机平台也存在不足之处,如整体空间小、干扰强、高频震动剧烈等,发动机、主桨及尾桨的干扰基本覆盖了整个机身,可提供的仪器安装方案少,如航磁探头主要固定在向前伸出主桨范围的特殊硬质探杆前端,也有少数采用拖挂方式安装(多要求拖挂长度在 30 m 以上)。直升机型吊舱式时间域航空电磁系统的发射与接收线圈吊挂长度多要求在

50 m 以上,以减少发动机和主桨的干扰。此外,直升机的单次航程相对较短,在开展大面积勘查任务时,长距离测线往往需要分成几段多次完成。这些不足在测量数据上表现为数据噪声较大、数据处理及调平工作量加大等。

3 无人机平台航空物探(磁、放、电)

近年来,随着军用无人机的不断成熟,通用无人机技术也不断出现并逐渐发展成熟。由于具有重量轻、无人驾驶、耗资低等优势,无人机迅速广泛地应用到各行业当中。鉴于其无人员伤亡、费用低、效率高等特点,以及可预期的高精度数据、低噪声水平、高空间分辨率的优势,无人机航空物探系统的研发与应用日益受到广大航空地球物理从业者的关注,如英国 Magsurvey 公司于 2003 年研发了 PrionUAV 航空磁测系统,Fugro 公司于 2005 年成功试验了 Georanger 高精度无人机航空磁力测量系统等^[5-7]。

国内的无人机航空物探研究起步于 2010 年,最初应用的无人机为从航模演变而来的航模型无人

机,2013 年开始进入真正无人机航空物探综合站的研发与应用。目前较为常见的无人机航空物探主要为航空单磁测量,源于航磁设备重量轻、体积小、抗干扰能力强、受飞行高度影响小等特点,恰好能满足航模型无人机体积小、低载荷的要求。该类型无人机主要通过投射、弹射、滑行等方式起飞,通过拦网、伞降、滑翔等方式回收,但安全回收的成功率仍然不高,这势必会造成不可预期的成本风险变高,所有该类平台的航空物探至今尚未见到有成功运用的案例。因此,利用真正具有大载荷的无人机发展航空物探多参数测量,成为多家科研单位的目标。2013 年 9 月,由物化探所、核工业航测遥感中心联合中国航天空气动力技术研究院,先后攻克了无人机航空物探(磁、放)综合勘查系统的集成、飞机改装、超低空地形跟随飞控、夜航测量、远程实时控制等技术,成功研制了国内首套 CH-3 型航空(磁、放)综合勘查系统(图 7)。

运用该系统在某重点矿区完成了 200 km² 的飞行测量工作,其平均飞行高度 120 m,飞行速度 150



图 7 国内首套 CH-3 型无人机航空(磁、放)综合勘查系统

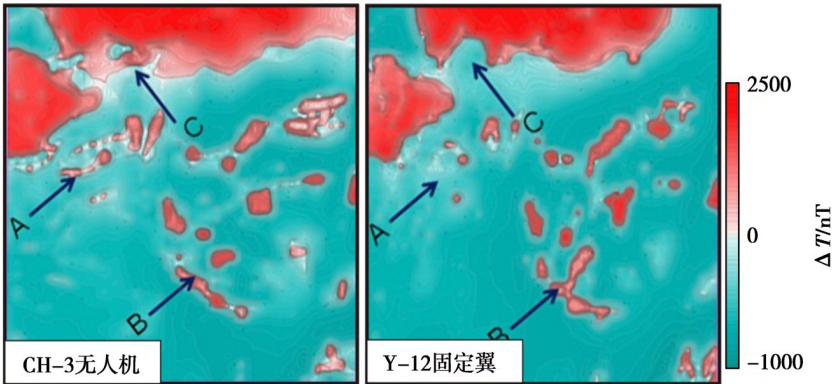


图 8 CH-3 无人机与 Y-12 固定翼航磁测量成果对比

km,测量比例尺为 1 : 1 万,航磁补偿精度为 0.054 nT,航测数据调平前总精度 2.5 nT(已满足现行规范小于 3 nT 的要求),调平后 1.77 nT。图 8 为在该矿区近期开展的 CH-3 无人机与 Y-12 固定翼航磁 ΔT 平面等值线对比,从数据质量来看,与同期开展的 Y-12 型固定翼航测成果相当,甚至更好,图中标注的 A、B、C 三处细节对比均表现出无人机航磁优于固定翼测量成果。本次无人机航空伽马能谱数据同样也取得了与固定翼测量相当的成果,并且本次勘查试验首次使用无人机进行了夜间飞行测量,降低了地面干扰。与固定翼相比,其沿设计测线飞行的导航定位能力更强,飞行姿态更加稳定,更适宜开展 1 : 1 万或更大比例尺的重点成矿区段的勘查任务。此次试验取得了良好的应用效果,标志着我国首次实现无人机航空物探面积性测量工作取得圆满成功。

无人机航空物探平台,特别是这种具有大载荷、长航时、智能化程度高的中、大型无人机,作为一种新的航空物探作业平台正不断受到重视。在此无人机航空磁、放综合测量取得成功的同时,结合研发成功的时间域航空电磁系统,也正在有针对性地开展适合无人机平台的小型化、智能化时间域航空电磁勘查系统研究,新系统将搭载在国产大型无人机上,实现无人机航空电磁勘查。

无人机航空物探之所以倍受青睐,主要是因为无人机平台具有安全性好、适应性强、经济高效、减少伤亡等优势。这种新的航测作业方式目前仅适用于开展小面积的大比例尺高精度测量工作,要开展大面积的勘查任务,尚需要在诸如障碍物自动规避、提高沿地形起伏的三维航线规划、链路通视分析、数据加密保护以及制定标准化的工作流程等方面进一步开展研究工作。

4 其他飞行平台航空物探(磁)

目前应用到航空物探领域的其他飞行平台还有动力滑翔机、飞艇、热气球等。目前以这些平台开展的航空物探研究工作主要为航磁测量。

应用得比较成功的是动力滑翔机航磁测量,这种从户外运动发展而来的航空物探飞行平台具有灵活轻便、飞行速度慢、飞行高度低、经济性好等特点,适宜于开展小面积大比例尺的航磁测量工作。2010 年北京地质矿产研究院就运用该方式成功完成了小面积的 1 : 1 万航磁测量工作(图 9),其航磁测量成果与地面磁测成果具有良好一致性^[8]。这种测量方式的缺点是宽大的硬架机翼受侧风干扰极大,飞

行过程中需要操作员对风向、风速具有良好的判断能力,飞行航迹难以保持,回收着陆过程也具有一定



图 9 动力滑翔机航磁勘查系统

的危险性。

目前诸如飞艇、热气球等其他平台的航空物探研究及应用,同样受气象干扰严重、控制难度大等因素的影响,尚未见有成功应用的案例。

5 发展及展望

随着地质找矿的不断深入,除青藏高原等部分地区外,普查、概查等基础性地质工作已基本完成,地表及近地表的主要多金属类矿床已大多被发现。航空物探由于其快速、高效的特点,所发挥的作用可谓功不可没,为地质找矿工作提供了一大批具有重要价值的找矿线索,贡献突出。

下一步的地质矿产勘查工作将向攻深找盲、高分辨率详查方向前进。航空物探作为地质找矿先行者,其技术也将向着提高对探测目标的分辨能力和探测深度的方向发展^[1]。如大力开展大探测深度的时间域航空电磁测量和技术,加快发展航空重力测量、重力梯度测量和技术,加快推进航空超导磁力仪及航磁多参数测量和技术等。

飞行器作为航空物探的重要组成部分,选择一个好的飞行平台不仅可以提高勘查精度、飞行效率,节约飞行成本,还能确保飞行安全,对充分发挥航空物探勘查效果具有至关重要的作用。为了更好地服务于当前的地质找矿,针对不同的测量目标,航空物探平台的发展将向着两个主要方向发展。

(1)更加机动灵活、更加轻型化的飞行器。这些飞行器主要有机动灵活的无人机、小型直升机以及其他飞行平台。这类平台的航空物探主要以开展航磁工作为主。这些平台便于操控,对起降场所要求较低。可以在西部高山区、高原、荒漠无人区、中高山区以及需要开展大比例尺的小面积勘查区实现大比例尺、高分辨率、高精度的地质详查工作。由于其经济高效的特点,这类平台的航空物探,特别是技

术成熟的航磁勘查,正越来越多地被个人通过不同方式开展勘查应用,呈现出遍地开花的势头。

(2)性能优越的大型固定翼及直升机平台。为了获得埋藏更深的地质体的更高分辨率的地球物理场信息,就需要发展具有大勘查深度的航空物探技术,如航磁全轴梯度测量、大功率大磁距时间域航空电磁测量系统、航空重力系统等,而要搭载这些大型仪器设备就需要较大型的固定翼飞机或大型直升机为平台。这些勘查系统将主要应用在重点成矿区带上进一步开展第二空间或深部的地质找矿工作和地质研究工作的重点地区。航空物探的进一步发展,将为国民经济建设作出更大贡献。

参考文献:

[1] 熊盛青.发展中国航空物探技术有关问题的思考[J].中国地

质,2009,36(6):1366-1374.

[2] 郭良德.西方国家航空物探技术发展的若干问题[J].物探与化探,2000,24(5):340-345.
[3] 张洪瑞,范正国.2000年来西方国家航空物探技术的若干进展[J].物探与化探,2007,31(1):451-457.
[4] 杨光庆,石青云,于百川.中国航空物探的现状和发展[J].地球物理学报,1994,37(1):367-377.
[5] Christopher W.Lum, autonomous airborne geomagnetic surveying and target identification[EB/OL]. Infotech@ Aerospace, 26-29 September 2005, Arlington, Virginia.
[6] Partner R. Georanger aeromagnetic UAV; development to commercial survey[R].Fugro Explore,2006.
[7] Austin Development Corp.Austin's subsidiary, Universal Wing Geophysics Corp. completes Arctic survey, accepts mineral exploration contract, plans offshore oil survey test[R].Corporate SEDAR Release,2005.
[8] 王庆乙,行英弟,蒋彬,等.MAMSS-1 超低空高精度航磁系统的研制[J].物探与化探,2010,34(6):712-716.

The features of the main airborne geophysical flying-platforms in China and the development trend

CUI Zhi-Qiang, XU Zhi-Li, MENG Qing-Min

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: Airborne geophysical survey is a kind of special geophysical exploration technology based on various types of aircrafts equipped with airborne geophysical instruments, alying along the planned route. The aero-geophysical exploration result is not only affected by geophysical equipment performance but also controlled by the flight platform used and the flying control. Therefore, a reasonable choice and use of the aircraft is the primary task to carry out aero-geophysical survey work. Based on reviewing the development of the domestic aero-geophysical survey, the authors divide the main aero-geophysical aircrafts into four types, i.e., fixed-wing aircrafts, helicopters, unmanned aerial vehicles and other vehicles. The advantages and disadvantages of each type of aero-geophysical aircrafts are analyzed in this paper. Furthermore, the main development direction of the aero-geophysical survey and the flying platform are forecasted from the needs of the geological exploration.

Key words: airborne; geophysical survey; flying-platform; fixed-wing; helicopter; unmanned aerial vehicle (UAV)

作者简介: 崔志强(1981-),男,硕士,工程师,从事航空物探资料综合解释及研究工作。Email: cuizhiqiang@ igge.cn。