

发展中国航空物探技术有关问题的思考

熊盛青

(中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083)

提要:本文概要介绍了中国航空物探(航磁、航空电磁、航空重力、航空伽马能谱)技术现状,近年来在仪器研制、测量技术、数据处理、解释方法与软件研发等方面的最新进展,分析了中国航空物探技术发展存在的主要问题。对中国航空物探技术的发展趋势进行了探讨,预测航空物探技术将向提高对探测目标的分辨能力和探测深度的方向发展,航空重力测量技术将得到广泛的应用。提出了以国家需求为导向,重点发展航磁多参数测量方法技术、航空重力测量和重力梯度测量技术、大探测深度时间域航空电磁测量技术,突破高温超导探测器研制的关键技术,发展航空重、磁、电的各种反演技术与三维可视化技术,建立物探仪器重点实验室,完善航空物探动态试验场,加快标准化建设,加快发展与航空物探相关行业(如通用航空)等建议。

关键词:航空物探;技术发展;战略思考

中图分类号:P631 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2009)06-1366-09

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,其实质是将航空飞行器作为运载工具,装载地球物理探测仪器在空中完成地球物理信息采集的方法,是一种快速获取并研究地球岩石圈、特别是与地壳有关的多种地球物理场信息(如磁场、电磁场、重力场、放射性场)的方法。目前常用的航空物探方法有磁、电磁、重力和伽马能谱测量,构成对地探测技术的重要组成部分。航空物探是军民两用技术。

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。

经过五十多年的发展,已形成具有中国特色的航空物探技术体系(方法理论—仪器研制—系统集

成—数据采集—数据处理—数据解释与应用),形成了从海洋到高原全地域覆盖的航空物探作业能力。中国航空物探技术水平总体上与国际先进水平差距不大。

“十一五”以来,随着矿产资源供需矛盾的突出,进口石油和铁铜等国家急需的大宗矿产品持续不断的大幅度提价,国内兴起了矿产勘查热,利用航空物探方法寻找矿产资源,尤其是铁矿资源的工作又得到蓬勃发展,国家和社会对航空物探的需求迅速增大。在不少地区开展了大规模的高精度航空物探测量工作,同时加大了对航空物探异常的查证力度,异常查证取得了突破性进展,相继发现了一批在全国产生重大影响的铁矿,如辽宁桥头铁矿和弓长岭铁矿、河北迁安铁矿、山东济宁铁矿、安徽泥河铁矿、河南新蔡铁矿、山西呼延庆铁矿、西藏尼雄铁矿、新疆松湖南铁矿和坎苏西铁矿等。

一方面,需求的激增刺激了航空物探技术的快速发展。另一方面,航空物探的勘查能力受多种因素

收稿日期:2009-03-12;改回日期:2009-06-08

基金项目:863 计划(2006AA06A208)课题资助。

作者简介:熊盛青,男,1963 年生,博士,教授级高级工程师,博士生导师,长期从事航空物探和遥感技术研究和管理工作;

E-mail:xsq@agr.cn。

的限制,尤其是高分辨率、大探测深度的航空物探技术难以满足社会的需求。国家 863 计划重大项目“航空地球物理勘查技术系统”等的实施,在航空物探测量系统研制和集成、测量方法和信息处理技术、成果解释应用等方面取得了许多创新性成果,促进了中国航空物探技术进步。然而,随着研究工作的不断深入,先进实用的航空物探测量系统的研制所遇到的技术难题比预期的大,发展中国航空物探技术任重道远,还有待国家的持续支持。

本文拟简要介绍国际航空物探技术现状与中国取得的最新成果,分析中国航空物探技术发展中存在的主要问题,探讨中国航空物探技术发展的趋势,并提出发展中国航空物探技术的建议。

1 近年来航空物探技术的主要进展

1.1 国际航空物探技术的最新进展

近年来,随着国际矿业的复苏,航空物探得到了快速发展,主要表现在如下几方面。

1) 高分辨率、超高分辨率航空物探技术得到快速发展,在直接找矿尤其是寻找隐伏矿产方面取得了良好的效果^[1,2]。

在澳大利亚、加拿大和美国等发达国家开发出了直接为找矿和环境监测服务的高分辨率、超高分辨率航空物探技术。其方法要点主要包括高灵敏度测量仪器组成的测量系统、大比例尺高精度航空勘查技术、精细的数据处理和解释方法等。通常采用直升机、无人机、飞艇为运载工具,可以实现低空飞行,飞行高度一般为几十米,甚至 10 m;采用高灵敏度磁力仪、电磁仪和伽马能谱仪器组成的测量系统,采样间距一般为几米;采用差分 GPS 精确定位,定位精度可达米级,甚至十几厘米;测量线距 200~10 m。由于时间和空间分辨率的提高,采集的信息丰富,解释技术的改进,其解决地质找矿问题的能力大大提高,应用于找矿时可根据对异常定量解释的结果直接布钻,从而可降低成本,缩短找矿周期。在许多地方可替代地面物探工作。

2) 航空重力测量和重力梯度测量技术、时间域航空电磁测量技术发展较快,已形成实用化技术并在油气与固体矿产勘查方面取得良好的效果^[1-2,4-7]。

(1) 航空重力测量技术:航空重力测量的概念最早出现在 20 世纪 50 年代末,但是由于受当时重力仪、导航定位设备以及垂直加速度测量精度的影响,

当时得到的精度在 $10 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 以上,不能满足实际应用要求。直到 20 世纪 90 年代初期,由于动态差分 GPS 定位(DGPS)技术的发展,实现了高精度飞机导航定位,从而使航空重力测量所必需的垂直扰动加速度修正的精度和厄特渥斯改正的精度有可能达到 $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的量级,航空重力测量技术试验获得成功。在世纪之交,伴随着科学技术的不断进步以及某些军用技术转为民用,航空重力测量又得到了更加快速的发展,并成为勘探能源和矿产资源的最重要地球物理勘探技术之一。

就实用型的航空重力仪来说,国际上航空重力仪主要为三种类型:一种是二轴阻尼惯性稳定平台型航空重力仪,以 LaCoste&Rombert 公司的 II、III 型海/空重力仪为代表。另一种是三轴惯性稳定平台型航空重力仪,它属于惯导(INS)+GPS 组合型,以俄罗斯的 GT-1A 和 Sander 公司的 AIRGrav 重力仪为代表。它是 20 世纪 90 年代后期发展起来的新型航空重力仪,测量精度和分辨率较前一种重力仪有所提高。第三种是捷联式航空重力仪,它不用物理稳定平台,直接将惯性导航系统 INS 与 DGPS 结合在一起,构成一套新型的航空重力测量系统 SINS/GPS。加拿大的 SINS/DGPS 系统和德国的 SAGS 系统就是捷联式航空重力仪系统,俄罗斯也正在抓紧研制这种系统。它是近十年发展起来的新型航空重力仪,具有一定的发展潜力。另外,航空重力梯度测量系统的研制也取得重要进展,BHP Billiton 公司的 FalconTM 系统已应用于商业飞行,英国 ARKeX 地球物理公司已研制出 BlueQubeTM 系统样机,近期即将进行试验飞行。

目前,航空重力测量技术的服务领域涉及到基础地质研究、石油、天然气及固体矿产资源勘探、大地测量等方面。大部分测量精度达到 $(1\sim 2) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,分辨率好于 10 km。好的系统精度达到 $0.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,分辨率好于 2.5 km。

(2) 时间域航空电磁测量技术:20 世纪 90 年代末期时间域固定翼航空电磁勘查技术已逐渐成熟,先后有多家公司用于实际勘查,主要系统有:GeoTEM、TEMPEST、MegaTEM。这些系统已被广泛用于多金属勘探、水资源调查、地质填图,探测深度可达 500~800 m。21 世纪开始,吊舱式时间域直升机电磁勘查系统发展迅速,2003 年一些公司的系统已成熟,并开始用于商业勘查,如 Fugro 的 HeliGEOTEM 系统,

Geotech 公司的 VTEM 系统, Aeroquest 公司的 AeroTEM 系统, GPX 公司使用的 HoistEM 等等。到 2008 年, Geotech 公司已制造出数十套 VTEM 系统, 每年工作量数十万测线千米, 找矿效果和商业成就突出, 探测深度一般可达 300~500 m, 甚至更大。

总之, 国外航空重力测量、重力梯度测量和时间域航空电磁测量的技术发展正处于方兴未艾之势。相信在不久的将来会有性能更加优良、探测深度更大的测量系统问世, 并得到更广泛的应用。

此外, 超导技术在航空物探领域的应用研究发展快, 超导磁探测器、电磁探测器和重力梯度探测器的研制取得较大进展。定量解释和三维可视化技术发展迅速, 进一步提高了航空物探解决地质找矿问题的能力。

1.2 中国航空物探技术创新与进展

通过国家“十一五”863 计划“航空地球物理勘查技术系统”重大项目以及国家有关专项的实施, 中国航空物探技术取得了长足的进步。开发集成了新型的航磁总场测量系统、航磁梯度测量系统、航空伽马能谱测量系统、航空频率域电磁测量系统和航空重力测量系统, 与不同类型的运载飞机构成了各有特色的不同方法组合, 并且配套建立了包括磁日变、差分 GPS 等多参数的地面同步观测系统, 可承担中

国全域实施不同目标、不同尺度的航空物探任务, 每年工作量在 40~50 万 km。

1.2.1 自行研制和集成了具有国际先进水平的多种航空物探测量系统

(1) 航磁测量技术方面, 研制成功新一代数字式航空氦光泵磁力仪, 多通道实时软补偿、数字收录一体机, 航磁水平梯度仪、航磁全轴梯度仪等^[2,3,9]。此外, 还研制了新型磁化率仪和标准化的地面日变站测量系统。航磁三分量测量技术研究取得新的进展, 正在进行仪器的方案设计。

(2) 航空重力测量技术方面, 集成了具有国际先进水平的航空重力测量系统并具备实际勘查能力, 研究工作取得一定进展^[3,9]。在对当今国际上各种先进的航空重力测量系统综合考察研究的基础上, 引进并集成了基于 GT-1A 的航空重力勘查系统。通过在某海域约 120 000 km 的试生产, 获得了高精度的实测航空重力测量资料, 重力场信息丰富、异常细节明显, 且与高精度地面重力测量结果非常吻合。航空重力测量系统的内符合精度能够达到 $0.612 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 飞行速度为 50 m/s 时, 异常半波长分辨率为 2.5 km。试生产结果表明, 中国航空重力测量技术的应用已形成了实际生产能力, 测量精度好于 $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 接近国际先进水平(图 1~2)。

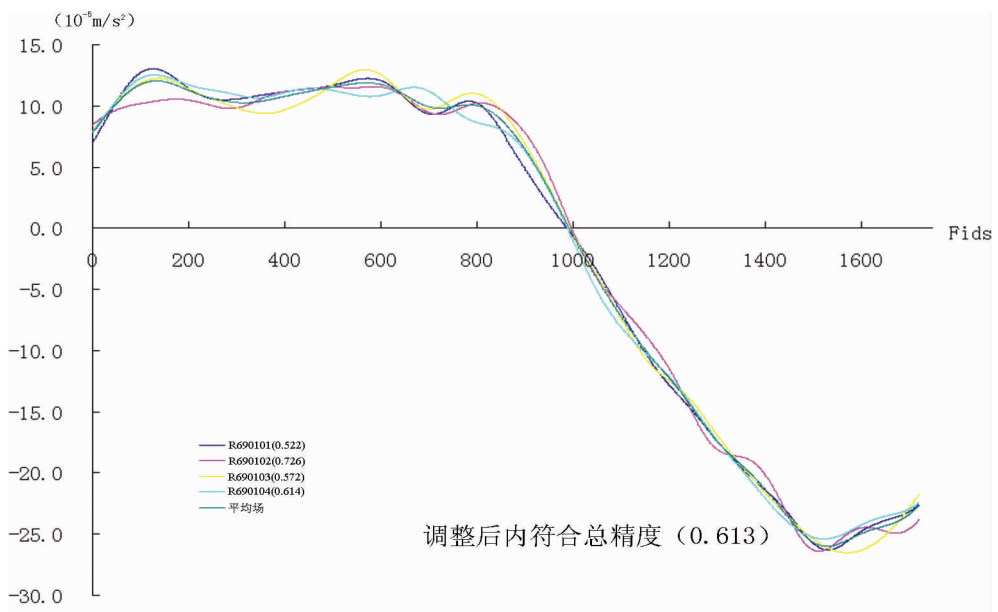


图 1 GT-1A 航空重力测量系统重复线测量对比图

Fig.1 Comparison of repeated flight lines of the GT-1A airborne gravimeter system

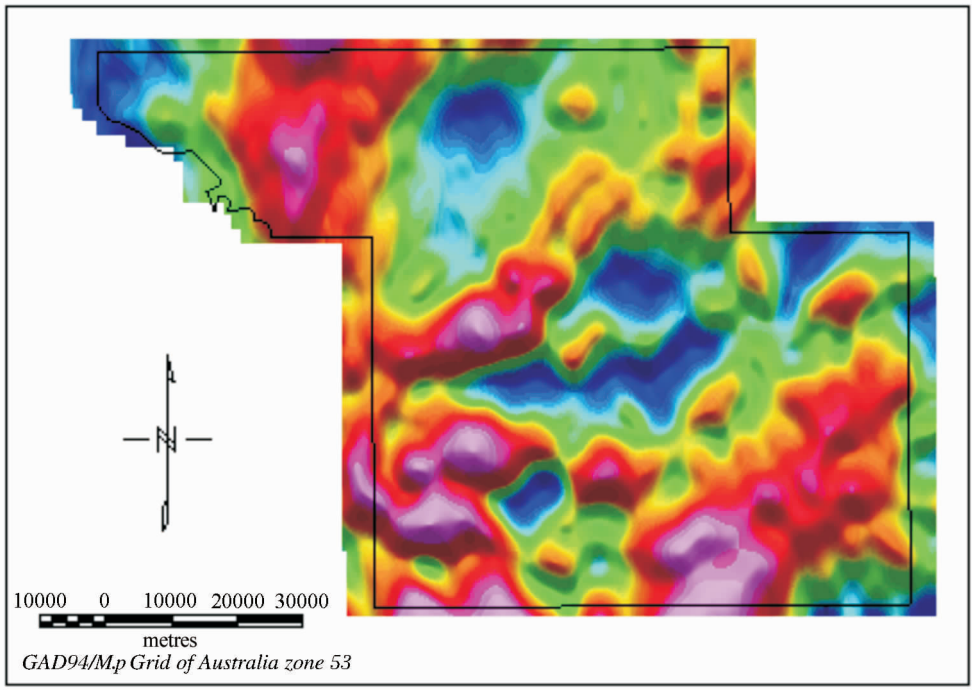


图 2 某地区航空布格重力异常图

Fig.2 Airborne Bouguer gravity anomaly map of a certain area

与此同时,开展了平台式和捷联式航空重力测量原理、数据处理方法的理论研究,已取得阶段性成果。开展了航空重力梯度关键技术研究,进一步明确了主攻技术方向。

(3)航空电磁测量技术方面,完成了 IMPULSE 直升机六频航空电磁测量系统的引进与消化吸收,全面掌握了直升机航空电磁测量与解释技术,编制了相应的技术规程,通过国际合作、863 课题和地质调查项目的实施已形成了实际生产能力,并成功应用于矿产勘查和地下煤火探测^[10](图 3)。

在时间域航空电磁测量技术方面,全面开展了时间域航空电磁测量系统的研制,目前已完成系统的整体设计,着手发射子系统和接收子系统的研制,已初步攻克了提高发射功率的技术难关。

(4)航空伽马能谱测量技术方面,在引进 GR-820 航空多道伽马能谱仪的基础上,集成高灵敏度航空伽马能谱测量系统并形成勘查能力,在环境放射性调查和地质填图等方面取得了很好的应用效果。已完成具有自主知识产权的 AGS-863 航空多道伽马能谱仪研制工作的总体设计,初步完成电路研制工作,预计在 2009 年下半年研制出科研样机,“十一五”末期基本达到实用化。

1.2.2 航空物探解释方法技术研究取得可喜进展^[11-18]

在位场数据转换计算处理方面:进一步完善了低磁纬度变倾角化极软件,解决了大数据量快速处理问题,计算网格数据量可达 16384×16384 点;研制了离散数据光滑插值网格化方法与软件,该方法适用于离散随机数据的网格化计算,对测线数据的方向性不敏感;研制完成了剖面测线位场异常空间域非线性多频道带通滤波计算软件(空间域非线性曲率滤波方法通常还用于剖面数据区域和剩余异常的计算);完成起伏高度位场重磁异常的曲化平和曲面延拓问题研究及软件的开发,采用空间域积分迭代方法实现曲线或曲面延拓计算,对下延计算的干扰压制效果比常规频率域 FFT 方法要好许多。图 4 是航空磁测结果曲面延拓到地表的 ΔT 磁场与同测量比例尺的地面高精度 ΔT 磁场对比图,由图可见两者磁场总体面貌相近,正负异常中心基本吻合。

在场源位置及深度反演计算方面:完成航空 ΔT 异常及其梯度反演解释处理软件系统的研制,主要包括:WINDOWS 系统下剖面测线 ΔT 异常总导数法自动计算磁源深度;基于 MAPGIS 的航磁异常切线法人机交互深度计算;利用平面网格磁异常梯度模极值圈定磁性体边界的方法研究及软件研

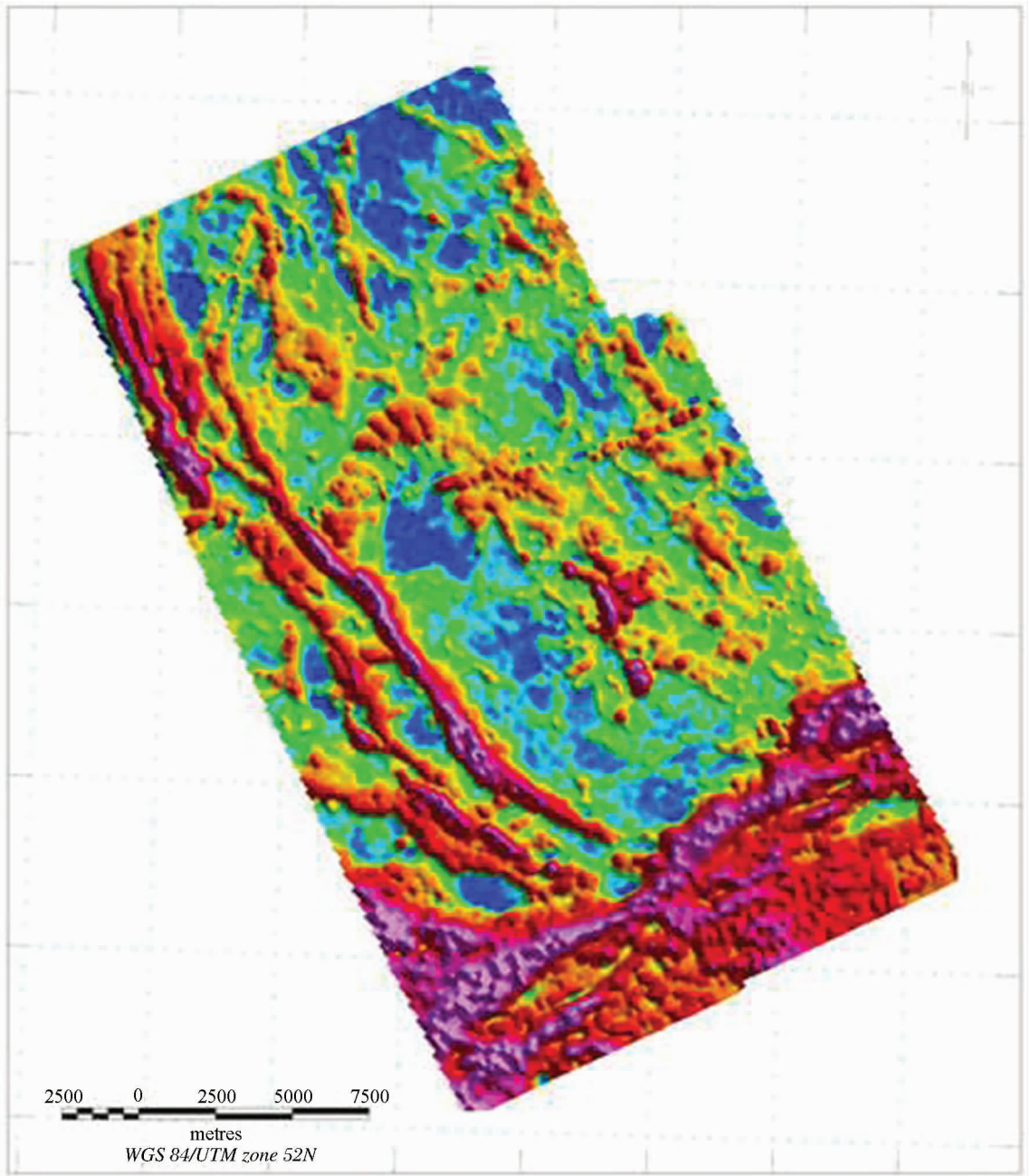


图 3 吉林某地区高分辨率航空电磁 930 Hz 转换视电导率平面图
 Fig.3 Converted apparent conductivity stacked map of the high resolution airborne EM survey at 930 Hz in a certain area of Jilin Province

制,主要实现了异常梯度带的连续搜索和追踪;平面网格及剖面磁异常欧拉(Euler)褶积反演磁源位置及深度的方法研究及软件研制,主要实现了极值异常位置、范围及构造指数的自动确定、异常位置及深度的连续搜索追踪反演计算;完成平面网格及剖面

磁异常梯度数据自动反演磁源参数(深度为主)的SPI(Source Parameter Imaging)及iSPI(improved Source Parameter Imaging)方法程序研制,主要实现了剖面异常场源构造指数、位置及深度的自动反演计算。

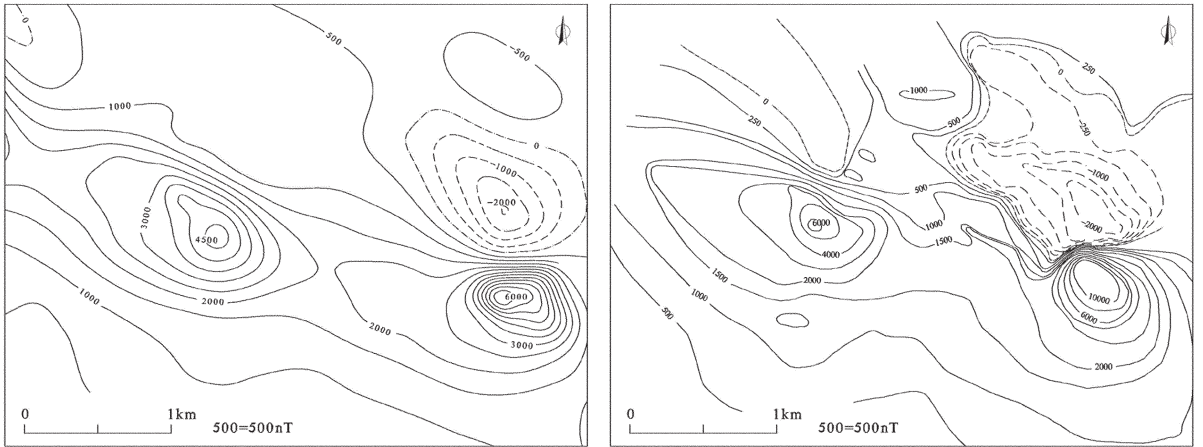


图 4 航磁曲面延拓到地表的 ΔT 等值线平面图(左)与地面高精度 ΔT 磁测等值线平面图(右)

Fig.4 ΔT contour map with upward continuation to the surface from the aeromagnetic curve surface (left) and high resolution ΔT ground magnetic contour map (right)

在重磁异常正反演可视化建模软件研制方面:开发了起伏地形剖面重磁异常半智能处理解释软件、重磁异常正反演可视化建模软件系统,并已逐步推广使用。

2 航空物探技术发展存在的主要问题

2.1 航空物探技术研发方面的问题

(1)航空物探仪器研发整体技术水平不高,技术难度大。除自主研发的航空氦光泵磁力仪及磁补偿仪等达到国际先进水平外,其他航空物探仪器的研发能力较差,技术研发难度很大。

(2)航空重力、时间域航空电磁测量等技术与国外差距大。国际上,航空重力测量技术已经成熟并实用化,航空重力梯度测量技术发展很快,国内则刚刚开展。时间域航空电磁测量方法与国外差距大,国内尚处于研究阶段,没有用于勘查的测量系统。航磁梯度测量和航磁三分量测量技术与国外也有一定差距。

(3)航空物探解释处理技术有待进一步提高。航空物探数据处理、成图已形成自己的技术特色,但航空物探成果解释量化、自动化和三维反演、立体填图技术与国外差距大。

(4)航空物探技术研发基础较薄弱。航空物探仪器研发基础较差,尚未建立航空物探实验室,航空物探仪器校准基地和动态试验场建设刚刚起步;航空物探标准化建设滞后,影响了航空物探技术的推广应用。

2.2 与航空物探技术发展相关方面的问题

(1)航空物探技术的发展受到相关学科发展现

状和国外核心技术出口的限制。航空物探仪器研制所需的高性能元器件,在国内加工周期长,且受材料工艺等的影响其性能指标难以满足要求,但国外引进又多受到进口许可的限制。

(2)航空物探勘查能力的提高受到通用航空等相关行业发展现状的限制。目前,在国内航空物探的勘查能力不能完全满足国家和社会的需求,但其发展受到多种因素限制,其中主要是受通用航空业发展现状的限制。由于国内航空业的激烈竞争,通用航空公司普遍存在飞行员流失,飞机老化、机型少等问题,已经严重地影响了航空物探任务的完成。在经济较发达的中东部地区,还存在因空域繁忙而调配困难等问题。

(3)专业人才问题。航空物探专业单位学科带头人不足,特别是缺乏复合型学科带头人和高水平的地质解释人员。当前,由于航空物探勘查任务繁重,全国主要航空物探单位的技术骨干大多是身兼几个项目,疲于完成任务,无法潜心研究。地质院校、科研单位和地质仪器厂的航空物探研究力量流失,开展航空物探新方法新技术研究的环境和基础较薄弱。

2.3 航空物探技术推广与应用方面的问题

(1)航空物探技术尤其是数据处理与解释技术推广滞后,应用航空物探数据解决基础地质和找矿问题的水平有待提高。主要表现在两方面:一是在专业技术单位内部,许多新开发出来的方法、软件未能及时推广应用;二是在行业内航空物探资料的地质解释水平亟待提高,先进的方法软件未能有效地推

广应用,影响了航空物探效果的充分发挥。

(2)高精度航空物探资料的国土覆盖程度低,有待加快更新。全国大于等于 1:20 万比例尺高精度航磁覆盖面积仅 220.5 万 km²。在中国西部,目前还有 140 多万平方千米的地区仅进行了 1:50 万~1:100 万的航磁概查,由于测量比例尺太小,远远不能满足地质找矿的需求。航空电磁测量、高灵敏度航空伽玛能谱测量和航空重力测量覆盖面积均很小。

3 发展中国航空物探技术有关问题的思考

3.1 作好航空物探技术发展规划,实现可持续发展

(1)根据国家需求,做好“十二五”和中长期航空物探技术发展规划。进一步明确中国航空物探技术的发展思路与方向。中国将继续沿着自主研发与引进相结合、以自主研发为主,坚持有所为有所不为的思路发展航空物探技术。航空物探技术将向提高对探测目标的分辨能力和探测深度的方向发展。

(2)提高航空物探勘查能力,保持航空物探可持续发展。一方面,要根据社会需求的扩大,适当扩充航空物探的勘查能力。包括增加技术装备和人员;统筹国内的航空物探力量,避免重复测量和无序竞争;练好内功,提高测量和解释质量,加强航空物探资料的处理解释。另一方面,要积极引导社会需求,防止盲目发展。需注意的是:业内人士要客观评价其解决地质找矿问题的能力,不要夸大航空物探的作用。再者,不要盲目地重新测量,而要采用新的数据处理与解释技术,充分开发利用已有航空物探资料。整体上讲,航空物探资料在地质找矿中的应用潜力还远未发掘出来。近年来通过对已有航磁异常进行重新解释和地面查证,发现许多大型铁矿就是很好的证明。

(3)国家制定优惠政策扶持通用航空业的发展。航空物探的发展依赖于通用航空业的发展。而要发展通用航空,急需国家在政策上加以扶持,适当增加适合于航空物探测量的飞机,加快飞行员的培养,规范飞行员的流动制度。根据市场需求适当提高航空物探的价格标准,国内各航空物探单位也要改变过去一味地压低飞行价格的做法,使通用航空公司有合理的利润,引导其健康发展。加强空域调配,适当增加民航空域资源,逐步开放 600 m 以下的空域。

3.2 加强自主创新,结合业务需求与国情发展航空物探技术与方法

(1)开展地球物理传感器(探测器)的研制。目前,制约中国地球物理仪器发展的瓶颈是探测器的研制,但因基础差、难度非常大,需集中力量,通过长期攻关方能解决。重点突破高温超导探测器研制的关键技术。

(2)研发航空超导磁力仪,加快发展航磁多参数测量方法技术,开展航磁张量测量技术研究,实现高精度的梯度和分量测量,进一步提高对探测目标的分辨能力。

(3)加快发展航空重力测量和重力梯度测量技术,争取在“十二五”末期航空重力测量技术接近当时的国际先进水平,航空重力梯度测量技术初步实现实用化,为探明海洋油气资源和地面工作困难地区的矿产勘查服务。

(4)继续开展大探测深度的时间域航空电磁测量系统的研制,争取在“十二五”末期实现时间域航空电磁测量系统实用化,技术水平接近当时的国际先进水平,为深部找矿提供快速有效的勘查手段。

(5)加强航空物探解释技术研究,提高定性解释的可靠性和定量解释的准确性。重点发展复杂条件下航空重、磁、电的各种反演技术与三维可视化技术,并实现工程化应用。发展并行计算技术,提高处理大数据量的能力,更好地发掘各种解释方法的效能。开发功能更加强化的航空物探数据处理和成图系统、三维解释系统、基于 GIS 技术的自动化成果解释系统等。每种方法要有相应的解释系统。

(6)加强航空物探技术支撑体系建设。建立物探仪器重点实验室、试验基地和动态试验场。建立和完善中国航空物探标准化体系,包括航空电磁测量规范、航空重力测量规范、航空伽玛能谱测量规范、航空物探资料解释技术要求、航空物探异常地面查证技术规范等,以满足地质调查和矿产资源勘查等的需求。加快完善航空物探信息系统,提高对社会的航空物探数据服务能力,为航空物探资料的推广应用提供技术支撑。

(7)加强培训,加快航空物探解释技术的推广与应用。要充分发挥航空物探在地质找矿作用,除专业技术单位的努力外,还需提高全行业广大地质人员应用航空物探资料的水平,为此需采取措施,建立相应的机制,促进航空物探解释技术推广。在某种意义上说,技术推广与新技术开发同等重要,甚至更有实际意义。

3.3 扩大航空物探领域,不断提高应用效果

充分发挥航空物探在区域地质调查、深部找矿、重要矿产资源潜力评价、油气战略评价、海洋地质调查和国防建设中的作用,并在应用中发展相应的技术方法。

此外,继续发展高分辨率航空物探测量技术(航空磁、电磁测量、伽马能谱测量为主),发展航空物探遥感综合勘查技术,进一步推动相应的技术在找矿、地学研究以及深空探测中的应用也是航空物探技术的重要发展方向。

4 结语

经过几十年的发展,中国航空物探技术已建立了较为完整的技术体系,航空物探为中国地质找矿和国民经济建设做出了突出贡献。目前,国家和社会对航空物探的需求大,加快发展中国航空物探技术面临良好的发展机遇。但是,航空物探技术发展存在许多难题,需要国家的持续支持,建议国家“十二五”继续加大对航空物探技术研发的投入。相信通过广大技术人员的刻苦攻关,加强国际合作,调动国内航空物探及相关专业科技人员的积极性,中国航空物探技术将得到迅速发展,为国民经济建设做出更大贡献。

本文系根据笔者在国家“863计划”资源与环境领域办公室举办的“资源高技术论坛-2008”所做报告“发展我国航空物探技术问题的战略思考”的基础上补充、修改而成。限于篇幅和水平,仅对发展航空物探技术作了初步的论述,不对之处敬请读者批评指正。在论文撰写过程中郭志宏、周锡华、于长春、王卫平等同志提供了素材和帮助,在此深表谢意!

参考文献(References):

- [1] 熊盛青. 我国航空物探现状与展望[J]. 中国地质, 1999, (9):18-22.
Xiong Shengqing. The application status and development trend of technology in airborne geophysical survey in China [J]. Geology in China, 1999, (9):18-22(in Chinese with English abstract).
- [2] 熊盛青. 航空物探“九五”科技进展综述[J]. 物探与化探, 2002, 26(1):1-5.
Xiong Shengqing. The development summary of airborne geophysical survey in the period of “the Ninth Five Year Plan of National Economic Development” [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2002, 26(1): 1-5(in Chinese with English abstract).
- [3] 熊盛青. 我国航空重磁勘探技术现状与发展趋势 [J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1):113-117.

- Xiong Shengqing. The present situation and development of airborne gravity and magnetic survey technique in China [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24 (1):113-117 (in Chinese with English abstract).
- [4] 张昌达. 几种新型的航空重力测量系统和航空重力梯度测量系统 [J]. 物探与化探, 2005, 29 (6):471-476.
Zhang Changda. Several new types of airborne gravimetric system and airborne gravity gradiometric system [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2005, 29 (6):471-476 (in Chinese with English abstract).
- [5] 舒晴, 周坚鑫, 尹航. 航空重力梯度仪研究现状及发展趋势[J]. 物探与化探, 2007, 31(6):485-488.
Shu Qing, Zhou Jianxin, Yin Hang. Present research situation and development trend of a airborne gravity gradiometer[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2007, 31(6):485-488(in Chinese with English abstract).
- [6] 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):1-8.
Zhang Hongrui, Fan Zhengguo. Recent advances in aerogeophysical techniques used abroad [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2007, 31(6):1-8(in Chinese with English abstract).
- [7] 张昌达. 航空时间域电磁法测量系统:回顾与前瞻[J]. 工程地球物理学报, 2006, 3(4):265-273.
Zhang Changda. Airborne time domain electromagnetic system: look back and ahead[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2006, 3(4):265-273(in Chinese with English abstract).
- [8] 熊盛青. “十五”以来我国航空物探进展与展望[J]. 物探与化探, 2007, 31(6):479-484.
Xiong Shengqing. The development and trends of airborne geophysical survey in China [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2007, 31 (6):479-484 (in Chinese with English abstract).
- [9] 郭志宏, 熊盛青, 周坚鑫, 等. 航空重力重复线测试数据质量评价方法研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5):1538-1543.
Guo Zhihong, Xiong Shengqing, Zhou Jianxin, et al. The research on quality evaluation method of test repeat lines in airborne gravity survey[J]. Chinese J. Geophys, 2008, 51 (5):1538-1543(in Chinese with English abstract).
- [10] 熊盛青, 陈斌, 于长春, 等. 地下煤层自燃遥感与地球物理探测技术[M]. 北京:地质出版社, 2006.
Xiong Shengqing, Chen Bin, Yu Changchun, et al. Remote Sensing and Geophysical Detection Technology of Underground Coal Spontaneous Combustion[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006(in Chinese with English abstract).
- [11] 熊盛青, 于长春, 王卫平, 等. 直升机大比例尺航空物探在深部找矿中的应用前景[J]. 地球科学进展, 2008, 23(3):270-275.
Xiong Shengqing, Yu Changchun, Wang Weiping, et al. Large scale aero geophysical survey with helicopter and its application to deep ore prospecting [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(3):

- 270-275(in Chinese with English abstract).
- [12] 郭志宏. 一种实用的等值线型数据网格化方法 [J]. 物探与化探, 2001, 25(3):203-208.
Guo Zhihong. A practical contour type data gridding technique[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2001, 25 (3):203-20(in Chinese with English abstract).
- [13] 郭志宏, 管志宁, 熊盛青. 长方体 ΔT 场及其梯度无解析奇点理论表达式[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6):1277-1285.
Guo Zhihong, Guan Zhining, Xiong Shengqing. Cuboid ΔT and its gradient forward thoretical expressions without analytic odd points[J]. Chinese J. Geophys., 2004, 47(6):1277-1285(in Chinese with English abstract).
- [14] 眭素文, 于长春, 熊盛青. 中高山区高精度航磁视磁化强度填图方法[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2):357-362.
Sui Suwen, Yu Changchun, Xiong Shengqing. Apparent magnetization mapping from high resolution aero magnetic data in the region of high topographic relief [J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(2):357-362(in Chinese with English abstract).
- [15] 刘浩军, 薛典军, 郭志宏, 等. 航空物探软件系统研制[J]. 物探与化探, 2003, 27(2):146-149.
Liu Haojun, Xue Dianjun, Guo Zhihong, et al. The development of the aerogeophysical software system [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2003, 27(2): 146-149(in Chinese with English abstract).
- [16] 眭素文, 于长春, 姚长利. 起伏地形剖面重磁异常半智能处理解释软件及其应用[J]. 物探与化探, 2004, 28(1):65-68.
Sui Suwen, Yu Changchun, Yao Changli. The semi-intelligent processing and interpretation software for gravity and magnetic anomalies along the profile of rolling topography and its application [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2004, 28 (1): 65-68 (in Chinese with English abstract).
- [17] 薛典军, 梁秀娟. 磁日变可视化编辑软件的开发[J]. 物探与化探, 2002, 26(2):148-151.
Xue Dianjun, Liang Xiujuan. The development of visualized editing software for magnetic diurnal variation [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2002, 26(2): 148-151(in Chinese with English abstract).
- [18] 于长春, 郭志宏, 眭素文. 航空物探领域的 GIS 开发与应用[J]. 物探化探计算技术, 2003, (1):39-44.
Yu Changchun, Guo Zhihong, Sui Suwen. Development and application of GIS on aero geophysical survey [J]. Computing Techniques for Geophysical & Geochemical Exploration, 2003, (1): 39-44(in Chinese with English abstract).

The strategic consideration of the development of China's airborne geophysical technology

XIONG Sheng-qing

(China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper has described the current development and application of China's airborne geophysical technologies (airborne magnetic survey, EM, gravity, and radiometric technology) and dealt with some practical progresses in such fields as the airborne geophysical instrument, survey technology, data processing and interpretation, and professional software. Nine main problems and the development trend of China's airborne technology are also analyzed. It is held that future development of airborne geophysics will be focused on high resolution and deep detection technology. Some suggestions have been put forward, which include the development of multiple-parameter aero magnetic survey, airborne gravimeter and gradiometer, deep detection TEM, the sensor of high temperature superconductor, some inversion and 3D visual technologies, the establishment of geophysical laboratories, the perfection of airborne geophysical test bases and dynamic test sites, and the acceleration of the technology standardization.

Key words: airborne geophysics; technology development; strategic consideration

About the author: XIONG Sheng-qing, male, born in 1963, doctor, senior engineer, professor and supervisor of doctor candidates, long engages in research and management of airborne geophysical exploration and remote sensing technology; E-mail: xsq@agr.cn.