

直升机 TEM 系统发展研究现状及应用前景

王卫平, 陈 斌

(中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘 要: 文章回顾了直升机 TEM 技术的发展历史, 阐述了发展直升机 TEM 系统的必然性; 根据国外直升机 TEM 系统的研制和应用现状, 对直升机 TEM 技术的系统特点进行了论述; 在综合分析的基础上, 指出了我国应该发展的直升机 TEM 系统类型, 以及在我国地质勘查中的应用前景。

关键词: 直升机 TEM 系统; 研究现状; 应用前景

中图分类号: P631.326 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2010)04-0286-06

的直升机航空 TEM 系统的类型和应用前景。

0 引言

航空电磁测量是寻找地下水、良导金属矿体, 以及地质填图等多种勘查任务的快速、有效的地质勘查方法。其中频率域固定翼航空电磁测量方法已在我国缓丘陵地区寻找浅层地下水和找矿中取得了良好的效果, 但一般只能解决勘探深度在 80 m 以内的地质问题, 而且也无法在地形起伏较大的地区工作。2003 年, 我国引进了吊舱式直升机频率域电磁系统, 基本可以进行地形较为复杂地区的地质勘查工作, 但勘探深度一般在 150 m 以内。由于我国为多山国家, 良导的覆盖屏蔽层分布广泛, 且所需勘探的淡水层或矿体深度有时在 200 m 以下, 虽然国际上常用的时间域固定翼电磁系统探测深度较大, 但因系统庞大, 难以在地形较为复杂的地区工作。通过分析国外有关文献, 了解到直升机航空 TEM 系统在某种程度上可以解决上述问题。近年来, 国外的直升机 TEM 技术发展很快, 特别是 2003 年以来, 直升机 TEM 技术日趋成熟。由于直升机 TEM 系统较为灵活, 且勘探深度较大, 在地质勘查中需求较大, 在国际上已逐步成为航空电磁测量中的主要方法。本文根据直升机 TEM 系统的发展历史、研究现状, 以及直升机 TEM 系统的优势, 并针对我国地质勘查中所面临的问题, 分析探讨了我国应该发展

1 发展历史

时间域航空电磁系统与地面时间域电磁系统的原理类似, 也是在一次场发射终止后开始测量二次场的衰变过程, 即相当于纯异常观测。随着航空电磁测量从 20 世纪 40 年代末产生以来, 时间域航空电磁系统也在地面时间域电磁技术的基础上, 于 20 世纪 50 年代中期开始研制, 当时用固定翼飞机作为运载工具, 定名为 INPUT 系统^[1]。1965 年, 随着 Mark V 的引入, INPUT 系统被进一步精炼, 并开始把它确定为固定翼时间域航空电磁系统。固定翼时间域航空电磁系统在固定翼飞机的头、尾和两翼上布设大回线作为发射线圈, 而接收线圈拖吊在飞机后下方的吊舱中。这种系统在随后几十年得到较快的发展: 80 年代的系统改进主要集中在增加带宽和多线圈接收方面; 90 年代, 固定翼时间域航空电磁技术已趋于成熟, 出现了 GEOTEM, QUESTEM, MEGATEM, TEMPEST 等系统^①, 并进入大规模的商业应用。目前上述系统已被加拿大、澳大利亚、美国等国家广泛应用于矿产、水资源, 以及农业等多种用途的勘查测量。这种系统一般勘探深度较大, 可达 300~600 m, 但因较大的发射线圈固定在飞机上, 加上长距离的拖吊吊舱, 造成系统

收稿日期: 2009-06-19

作者简介: 王卫平(1963-), 男, 教授级高级工程师, 长期从事航空物探成果解释和方法研究工作。通信地址: 北京市海淀区学院路 31 号, 航遥中心物探部; 邮政编码: 100083; E-mail: agrswwp@agrs.cn

笨重、难以在地形起伏较大的地区作业。

为了克服固定翼时间域电磁系统的弱点, 直升机时间域航空电磁系统于 20 世纪 70 年代开始研制, 目的是增加系统的灵活性, 并相对直升机频率域电磁系统具有较大的勘探深度。1982 年, Questor Surveys 公司研制了具有 6 道、用 8 根圆柱子支撑在 Bell 205 A-1 直升机上的圆形 z 轴发射线圈的时间域电磁系统, 定名为直升机 INPUT 4 和 INPUT 5 型系统^[1]。这种系统的发射线圈形状类似于蜘蛛网, 系统较为庞大, 且发射线圈受直升机本身的影响较大, 噪声较强。这种系统接收线圈位于直升机下方 106 m 处, 较大的收发距降低了系统的灵活性, 致使系统记录的数据是不对称的, 且信号较弱。由于这种系统在设计上存在难以弥补的缺陷, 已于 20 世纪 80 年代中期停止研制。与此同时, World Geoscience 公司也曾研制过升级电子装置的直升机时间域电磁系统——HELI-QUESTEM^[1]; 另外, 在 80 年代初期, 在 Berkeley 的加利福尼亚大学发展了 UNICOIL^[1] 低温超导直升机系统, 供给发射机和接收机的超导 UNICOIL 工作为 40 Hz, 得到了较大的勘探深度。这种系统采用单个线圈作为发射和接收线圈, 特点是在良导环境中能够得到最大的目标物响应值。由于维持对超导线圈提供液体氦较为困难, 使这个系统不适合实际工作, 20 世纪 90 年代初期该系统停止研制; 1982—1986 年, Aerodat 公司也开始研制另一种装置的时间域直升机航空电磁系统, 发射和接收线圈被拖吊在直升机下方 30 m 处, 发射线圈是具有 2 个大的同心轴 x 和 z 轴线圈, 接收线圈被安装在发射线圈的中部, 由 3 个相互正交的 x , y , z 轴线圈组成。由于 Aerodat 公司于 1997 年破产, 因此停止了该项研究工作。值得说明的是, 上述这些系统在当时都属于实验产品。

20 世纪 90 年代初期, 各航空物探测量和仪器制造公司均集中精力发展直升机频率域航空电磁系统和固定翼时间域航空电磁系统技术。到 90 年代中期, 随着上述 2 种航空电磁技术的日趋成熟, 航空电磁科技人员已逐步意识到这 2 种系统均存在难以弥补的缺陷, 即时间域固定翼航空电磁系统虽勘探深度大, 但系统较为庞大、灵活性较差; 直升机频率域航空电磁系统虽较为灵活, 但勘探深度较小, 最大勘探深度在 150 m 以内。为了适应复杂地形及多领域勘查的需要, 应加快研究既灵活、又具有较大勘探深度的直升机时间域航空电磁系统。近年来多家西方地球物理公司和矿业公司加强了对直升机时间域

电磁系统的研究工作。90 年代, 直升机时间域航空电磁系统仍处于实验开发阶段, 该类系统的研究开发公司主要集中在加拿大、美国和澳大利亚。根据目前掌握的资料, 主要有 T. H. E. M 地球物理公司研制的 THEM 数字时间域直升机航空电磁系统, Geotech 和 Mcphar 公司研制的 Scorpion HeliDeep-Tem 系统, Anglo American Corporation 和 Ferra Dynamics Inc. 合作研制的 ExplorHEM 系统, 美国的 Newmont 公司正在研制的 NewTEM 时间域直升机航空电磁系统(已进行了试验测量); 另外, 原 High-sense 公司在兼并 Aerodat 公司后, 继续研制时间域直升机航空电磁系统(HeliTem), 但 High-sense 公司被 FUGRO 公司兼并后, 停止了研制工作。Aeroquest 公司继承了 Aerodat 公司的时间域直升机电磁技术, 研制了 AeroTEM 收发线圈同心装置的直升机电磁系统, 并在该领域处于领先地位。

此外, 为了获得更大的穿透深度, 在 90 年代初期, 澳大利亚 Elliott Geophysics International 公司开始研制一种半航空的直升机时间域电磁系统, 定名为 FLAIRTEM 系统, 据称其勘探深度可达千米级。其发射装置为布设在地面上的 $6\text{ km} \times 12\text{ km}$ 边长的回线, 并利用美国 Zonge 公司 25 kW 的发射机, 在回线中产生基频为 $1 \sim 32\text{ Hz}$ (一般为 8 Hz) 的方波脉冲电流。接收线圈位于轻型直升机拖吊的吊舱中, 吊舱位于直升机下方 60 m 处, 离地高度 40 m, 在回线范围内的测线上方, 测量发射电流断开后 25 ms 期间(共 31 道)的二次场 H_z 和 H_x 分量的衰减曲线。接收机使用 Zonge 公司的 GDP 32 接收机, 利用石英钟同步发射和接收。同时利用差分 GPS 和无线电高度计进行定位和测高。该系统已在澳大利亚、东南亚、太平洋岛屿、阿拉斯加等地进行了试验飞行, 取得了一定的效果。

2 研究现状

自 2000 年以来, 特别是 2003 年以后, 直升机时间域电磁法发展很快, 主要的系统有南非 Spectrem Air 公司的 ExplorHEM (1997); 加拿大 T. H. E. M. Geophysics Inc. 的 THEM-EMOSQUITO (1998); 美国 Newmont Mining Corporation 的 NewTEM (1998); 澳大利亚 Normandy Exploration 的 HOISTEM (1998); 加拿大 Aeroquest International 的 AeroTEM (1999); 加拿大 Geotech Ltd. 的

VTEM (2002); 加拿大 McPhar Geophysics Pty., Ltd. 的 SCORPION (2002); 加拿大 Fugro 的 HELIGEOTEM (2005); 丹麦 SkyTEM Aps 公司的 SkyTEM(2003); 美国 Oak Ridge National Laboratory 的 ORAGS-TEM(2003)。

主要直升机航空 TEM 系统的技术指标见表 1。

表 1 目前国际上主要直升机时间域航空电磁系统的技术指标

Table 1 Technical indexes of the main helicopter TEM systems in the world at present

系统名称	AeroTEM IV	VTEM	HoisTEM II	SCORPION	HeligeoTEM
发射线圈面积/ m ²	113	531	375	314	95
发射线圈匝数	7	4	1	4	2
偶极矩峰值/ NIA	395000	500000	120000	250000	230000
发射电流/ A	500	300	320		1210
基频/ Hz	25/ 30	25/ 30	25	25/ 30	30
发射方向	z	z	z	z	z
接收分量	x, z	z	z	x, z	x, y, z
是否全波形记录	是	计划中	否	是	是
接收带宽	30/ 90~ 23040	25/ 30~ 25000	25~ 19722		30~ 11520
发射波形	三角	梯形	方形	三角	半正弦
发射脉冲时间/ ms	5	4. 5	5	4	4

系统名称	NewTEM	THEM EMOSQUITO	ExplorHEM	SkyTEM	ORAGSTEM
发射线圈面积/ m ²	300	105	36	283	36
发射线圈匝数	1	2	8	4	4
偶极矩峰值/ NIA	80000	250000	25600	45000	4320
发射电流/ A	265	1400	200	83	30
基频/ Hz	25/ 30	30	75	25	90/ 270
发射方向	z	z	z	z	z
接收分量	x, y, z	x, y, z	x, y, z	x, z	z 和垂向梯度
是否全波形记录	否	是	是	否	否
接收带宽	25/ 30~ 100000	30~ 30720	75~ 19200		90/ 270~ 5400
发射波形	方形	半正弦	方形	长斜波梯形	方形
发射脉冲时间/ ms		4	3. 33	10	2. 8

国际上的直升机航空 TEM 系统依据装置类型可分为收发线圈同心装置和偶极装置, 其中偶极装置又可分为收发线圈上下偶极和收发线圈前后偶极装置两种类型。目前收发线圈同心装置(VTEM, Aero TEM) 和上下偶极装置系统(如 HELIGEO TEM, New TEM 系统) 的技术已经趋于成熟, 并已经开始了大量的商业飞行测量。现按直升机航空 TEM 系统的收发装置类型介绍评述如下。

2.1 收发线圈同心装置系统

包括 VTEM (图 1), Aero TEM, HoisTEM 和 SCORPION 系统。

(1) VTEM^[4] 系统的特点是接收线圈和发射线圈水平同心, 发射线圈直径 26 m, 发射磁矩 500 000 NIA, 标准发射波形为梯形波(可选), 基频 25/ 30~ 25, 000 Hz(可调), 可接收二次异常响应的 z 分量在通电和断电时间内测量 dB/ dt 和 B。由于收发线圈位置相对固定, 可以避免异常的变形, 相对其他装置

对地质体的分辨率较高。目前有 8 套该类系统在世界各地作业, 另有 2 个系统正在开发。自 2000 年以来, VTEM 系统已经完成了 11. 6 万测线 km 的勘查测量, 并发现或扩大了多处隐伏矿床^[3] (如加拿大 Abitibi 铜钴矿床、Macdonald 铜矿、McWatters 镍矿体) 和一些重要的找矿目标(如加拿大的 South Billiton 和 Saskatchewan)。

(2) Aero TEM^[2] 系统线圈直径 12 m, 最大磁矩 395 000 NIA, 发射波形为三角波、基频 25/ 30(可调), 同样可接收二次异常响应的 x 和 z 分量在通电和断电时间内测量 dB/ dt 和 B。目前, 已经完成了约 10 万测线 km 的勘查测量, 并在加拿大的 Mesamax 和 Explo- Ungava 等成矿带发现或扩大了铜镍矿体。

(3) HOISTEM^[2], SCORPION^[2] 系统与 VTEM 和 Aero TEM 系统装置相同, 系统性能和特点类似, 仅系统发射磁矩、波形和带宽有所差异(表 1)。



图 1 VTEM 吊舱式直升机 TEM 系统图片

Fig. 1 The VTEM towered helicopter TEM system
图中拖吊线框为发射线圈, 线圈中心为接收线圈, 直升机到发射线圈的电缆长度为 60 m, 电缆中部为磁探头

2.2 发线圈上下偶极装置系统

包括 HELIGEO TEM, New TEM 和 THEM_EMOSQUITO 系统。

(1) HeliGEO TEM^[2] 系统采用了固定翼时间域电磁系统(GEOTEM/MEGA TEM 系统)的许多成熟技术。但 HeliGEO TEM 的配置与固定翼 GEOTEM/MEGA TEM 不同, 直升机到发射机的电缆长度为 60 m, 用作电源的发电机和发射脉冲发生器安装在回线中央。接收机(包括磁探头)在直升机之下 20 m, 在发射回线之前约 20 m。HeliGEO TEM 可接收二次异常响应的 3 个分量 x, y, z 在通电和断电时间内测量 dB/dt 和 B 。在 HeliGEO TEM 系统中, 接收机与发射回线中心之间的水平距离约 20 m, 相比之下, 固定翼 GEOTEM 系统的相应距离约 130 m, 因而 HeliGEO TEM 的水平分辨力较高。值得说明的是, HeliGEO TEM 于 2006 年在加拿大 The iso 和 New insco 矿发现了新的铜锌矿体。

(2) NEW TEM 系统发射线圈直径 20 m, 发射磁矩 80 000 NIA。发射电流为方波, 基本频率 30 Hz, 通电时间与断电时间相等, 关断时间 0.1 ms。100 kHz 快速取样, 在断电时间内测量 x, y 和 z 分量。

(3) THEM_EMOSQUITO 系统的研制开始于 1998 年, 为收发线圈前后偶极装置系统(当时定名为 THEM 系统), 发射线圈悬吊在直升机下 40~60

m 处, 而在发射线圈后面 65 m 处拖吊着接收装置, 接收装置看起来像个充气飞艇, 该系统当时由于收发距较大, 系统灵活性较差。2003 年以后, THEM 系统开始改进为收发线圈上下偶极装置系统(收发距离 24 m), 并定名为 THEM_EMOSQUITO 系统, 发射回线直径 6 m, 发射磁矩 250 000 NIA, 发射电流为半正弦波, 基本频率 30 Hz, 可测量 x, y, z 3 个分量。据报道该系统在加拿大 Gogmga 对块状硫化矿床有较好的显示。

2.3 收发线圈前后偶极装置系统

ExploreHEM 系统收发线圈采用前后硬架固定, 探头长度 20 m, 发射线圈(呈棱形, 面积 36 m²)位于探头前部, 接收线圈位于探头后部(收发距 10.5 m), 可测量 x, y, z 3 个分量。该系统磁矩较小, 勘探深度相对较小。

2.4 其他收发线圈装置系统

SkyTEM 系统发射线圈为方形, 边长 12.5 m, 发射磁矩 45 000 NIA。接收线圈被硬架安装在发射线圈的后部, 并与发射线圈有 1.5 m 的垂直距离。发射电流为梯形, 基频率 25。据报道该系统已在丹麦的地下水勘查中取得了较好的效果^[5]。

Oragstem 系统为将长方形发射线圈(3 m × 12 m)硬架安装在直升机下部的系统, 并有 2 个接收线圈位于发射线圈(2.7 m × 2.7 m 和 0.23 m × 0.6 m)的两侧, 该系统属于轻型系统, 主要用于环境和特殊行业的工程勘查(如探测小的废弃物或战争遗留未爆炸物等^[6]), 由于飞行高度低(通常 3~5 m), 因此探测小目标物的分辨率较高。

2.5 评述

通过以上分析, 认为目前直升机航空 TEM 系统具有如下特点:

(1) 直升机 TEM 技术主要来源于地面瞬变电磁技术和固定翼时间域电磁技术, 如 VTEM, Aero TEM 系统装置类似于地面 TEM 系统的中心回线装置, ExploreHEM 系统装置类似于地面 TEM 系统的偶极装置, 而 HELIGEO TEM, New TEM 系统大多采用了固定翼时间域电磁系统的技术。

(2) 发射磁矩增大, 有的可接近小型固定翼时间域电磁系统发射磁矩的水平, 基本频率降低并可调, 而且发射电流多采用方波波形, 因此系统频带很宽。另一方面, 由于采集、存储、处理(数字)数据的能力有了很大提高, 可记录叠加之前的大量数据, 经过适当的处理, 信噪比有很大提高, 因此系统的探测深度可达 300~500 m。

(3) 可在切断发射电流和通电时测量二次场, 这是时间域直升机航空电磁法观测方法的一个飞跃性进展。记录全数据带宽, 包括接通、断开时的高频信息, 可增强近地表构造的分辨能力; 全波形数据可转化为磁场响应, 简化剖面解释, 更容易发现良导体。

(4) 可测量多分量 x, y, z , 不仅测量 dB/dt , 而且还测量 B 。进行三分量测量有助于确定地下导体的形态特征、产出位置。同时, 可测量吊舱的位置变化使解释更准确。

(5) 数据处理和解释方法日趋完善, 可编制各时间道视电阻率平面图, 以及一维和二维半反演电阻率-深度断面, 并在三维反演解释方面取得了重要进展, 也就是说, 直升机时间域电磁解释正逐步向三维可视化方向发展。

(6) 应用领域广泛, 可用于矿产勘查、地下水勘查、地质填图和风化层填图、土壤盐渍化调查、大型工程基础调查, 以及寻找遗留未爆炸物等。

3 应用前景

根据国外直升机航空 TEM 系统的研究现状和特点可以看出, 直升机航空 TEM 系统在我国具有广泛的应用领域和发展前景; 结合国外比较成熟的直升机航空 TEM 系统装置类型和关键技术指标, 应当及时确定我国直升机航空 TEM 系统类型的发展目标, 有选择地制定我国直升机航空 TEM 系统的研制计划。

3.1 系统选型

(1) 装置类型。同心收发装置结构简单、轻便, 仪器分辨率较高, 接收和发射信号较为同步, 有利于数据处理和解释; 收发线圈偶极装置虽受一次场影响较小, 较易降低噪音水平, 但在不同飞行方向的测线上会出现人字形异常畸变, 致使观测结果解释复杂。其他装置类型的系统是较轻型的系统。由此可见, 为了使系统具有较好的灵活性和较高的分辨率, 最好选择收发线圈同心装置。

(2) 发射电流脉冲形式。目前, 国外时间域航空电磁系统所采用的发射电流脉冲形式有方波、梯形波、三角波和半正弦波 4 种。由它们的频谱分析可知, 当基频相同时, 方波包含的低频含量最大, 其次是梯形波、三角波, 而半正弦波低频含量最少。通常, 低频含量信号有利于产生大的穿透深度, 因此利用方波波形具有优势。波形的选择通常在仪器制作

(波形实现的难易程度) 和尽量获得低频含量的波形之间取得平衡。目前直升机航空 TEM 系统的发射波形可选择方波、梯型波或三角波。

(3) 发射电流脉冲的基频和脉冲延迟时间。关于基频的选择, 若从增大穿透深度考虑, 基频应选择得尽量低, 但这样可能会增加仪器的制作难度和系统重量, 影响系统的灵活性。因此, 根据不同的勘查目的和获取不同探测深度信息的需要, 也可以选择不同的基频。目前, 直升机航空 TEM 系统的基频多选择为 25、30 或 60 Hz。为了获得大的穿透深度和有利于寻找良导体, 脉冲延迟时间应选择得尽可能长, 但其长度受到噪音水平、直升机飞行速度的限制, 根据目前直升机航空 TEM 系统研究现状, 脉冲延迟时间一般选择 4~10 ms。

(4) 发射磁矩和接收系统噪音水平。勘探深度与发射磁矩和噪声水平有很大关系, 即增大发射磁矩和降低噪声水平均可以提高系统的穿透能力。但为了使系统具有灵活性, 在技术条件允许的条件下, 应综合平衡发射电流强度、线框直径和匝数之间的关系, 以便获得最大的发射磁矩。在目前的技术条件下, 系统磁矩一般可以达到 300 000~500 000 $A \cdot m^2$ 。为了有效地提高穿透能力, 又不影响系统的灵活性, 降低噪声水平是最佳的选择。但因时间域电磁测量是广谱测量, 而且受直升机航行速度的限制, 因此从仪器制作角度来分析, 接收系统噪音水平降低到一定程度, 将会受到仪器制作技术水平的限制, 在目前的技术条件下, 接收系统噪音水平最好可以达到 25~10 pT。

根据以上的分析结果, 结合直升机航空 TEM 系统应该是既灵活、又具有一定勘探深度的原则, 我国应该发展的直升机航空 TEM 系统的首选方案应为收发线圈同心装置。其中: ①发射线圈直径 10~20 m, 接收线圈位于中心, 为水平和垂直接收线圈; ②发射磁矩 300 000~400 000 $A \cdot m^2$; ③发射波形三角波或方波, 脉冲长度 10 ms; ④基频 25 或 60 Hz, 90 或 180 Hz; ⑤噪声水平 20 pT。

3.2 应用前景

由于直升机航空 TEM 系统的灵活性与直升机频率域航空电磁系统相当, 且勘探深度可以接近固定翼时间域航空电磁系统的水平, 即直升机时间域航空 TEM 系统是即灵活、又具有一定勘探深度的电磁系统, 应用领域较为广泛, 因此越来越受到有关专家的重视, 并认为直升机航空 TEM 系统是今后航空电磁技术的发展方向。

我国为多山国家, 并且金属矿产和水资源多具有一定的埋藏深度, 因此, 今后发展直升机航空 TEM 系统是符合我国国情的。在我国的航空物探勘查中, 直升机频率域航空电磁系统虽较灵活, 且具有一定的应用潜力, 但其勘探深度相对较小, 尤其在西部各沙漠盆地找水应用时受到一定的限制。固定翼时间域航空电磁系统虽具有一定的勘探深度, 但仅适合于我国西部平缓和缓丘地区的地下水和矿产勘查。而直升机航空 TEM 系统在某种程度上可以弥补上述系统的不足, 其应用范围基本上是上述两种航空电磁系统的总和, 且应用领域较为广泛。

在西部水资源勘查中, 直升机航空 TEM 系统虽在沙漠腹地勘探深度有些偏浅, 但在其他地区均可了解咸水覆盖层 < 200 m 的淡水体分布情况。在东部非盐渍化地区, 直升机航空 TEM 系统可以了解 300 m 以内的淡水资源分布状况, 基本上可以满足当地水文地质勘查的需要。在我国西南岩溶地区, 直升机航空 TEM 系统可以勘查 600 m 以内岩溶水的分布情况, 基本可以满足西南地区勘查岩溶水的需要。由于西南岩溶地区地形复杂, 直升机航空 TEM 系统较地面物探具有灵活、快速的优势。

在矿产勘查中, 虽然直升机航空 TEM 系统的可勘查范围与直升机频率域航空电磁系统基本相当, 但其勘探深度可达 300 m 左右, 而且垂直分辨率较高, 可以解决许多矿产勘查问题, 尤其在具有一定厚度的良导覆盖层的情况下, 与直升机频率域航空电磁系统比较具有一定的优势。我国重要的矿产勘查区往往地形起伏较大, 固定翼时间域航空电磁系统难以开展工作, 而这些地区正好便于发挥直升机航空 TEM 系统的作用。

随着我国国民经济的发展和人民生活水平的提高, 水工环将逐步成为勘查工作的重点, 而且应用领域还会不断地扩大, 如工程勘查、土壤调查、人文环境污染调查等将逐步成为潜在的市场。由于直升机航空 TEM 系统具有勘探深度大、垂直分辨率较强等优势, 与直升机频率域航空电磁系统相比, 可以解

决更多的环境和工程勘查问题。比如在进行地下水污染调查、山体滑坡、重大工程地基稳定性的问题上均可以发挥重要的作用。

4 结束语

(1) 国外的直升机 TEM 技术已经渐趋成熟, 由于直升机 TEM 系统既灵活、又具有较大的勘探深度, 是今后航空电磁技术的发展方向。

(2) 直升机 TEM 系统同心收发装置结构简单、轻便, 仪器分辨率较高, 是我国发展直升机航空 TEM 系统的首选方案。

(3) 直升机 TEM 系统在我国矿产、水工环勘查中具有广泛的应用前景。

注释:

①王卫平. 直升机航空 TEM 方法预研究报告, 2003.

参考文献:

- [1] David Fountain. Airborne electromagnetic systems—50 year of development[J]. Exploration Geophysics, 1998, 29: 1-11.
- [2] Sattel D. A brief discussion of Helicopter Time-Domain EM Systems[C] // AESC 2006, Melbourne, Australia, 2006: 1-5.
- [3] Fountain D, Smith R, Payne T, et al. A Helicopter Time-Domain EM System applied to mineral exploration: System and Data [J]. First Break, 2005, 23: 73-78.
- [4] Witherly K, Irvine R. The VTEM Hel+time Domain EM System—Four Case Studies[C] // AESC 2006, Melbourne, Australia, 2006: 1-4.
- [5] Kurt I. Sorensen, Esben Auken. SkyTEM—A new high resolution helicopter transient electromagnetic system[J]. Exploration Geophysics, 2004, 35: 191-199.
- [6] Beard L P, Doll W E, Gamey T J. Aspects of system design for airborne electromagnetic detection of unexploded ordnance[C] // Extended abstract, SAGEEP 2003, 2003: 1445-1454.

(下转第 295 页)

参考文献:

[1] 白万成, 臧忠淑. 基于 ArcView GIS 的矿床定位预测系统简介 [J]. 地质与勘探, 2004, 40(3) : 52-54.

[2] 赵鹏大, 胡望亮, 李紫金. 矿床统计预测 [M]. 北京: 地质出版社, 1983.

[3] 白万成, 董建乐. 全国金矿找矿远景统计预测 [J]. 地质找矿论丛, 2010, 25(1) : 1-4.

[4] 肖克炎, 张晓华, 李景朝, 等. 全国重要矿产总量预测方法 [J]. 地学前缘, 2007, 14(5) : 20-25.

STATISTIC PREDICTION OF POTENTIAL GOLD RESOURCE IN CHINA

BAI Wan-cheng DONG Jian-le

(Gold Headquarters of the Chinese Armed police force, Beijing, 100055, China)

Abstract: Based on the national basic geological database, such as China Regional Geochemical Survey Data Base etc., Statistic prediction of potential gold resource of China was carried out in term of gold metallogenic provinces. According to distribution of the information content anomaly, geotectonic background and the main ore-control factors, sixty four gold prospects were identified in China. Then information content transference method is adopted to estimate total gold resource of 43500 t and potential gold resource of 36 500 t respectively to depth of 1 000 m beneath the surface.

Key Words: China; Gold ore; gold ore prospect; total resource

(上接第 285 页)

DISCUSSION ON RELATION OF ION CRYSTAL FORM TO MEDIA

WANG Tie-jun

(Sinosteel Tianjin Geological Academy, Tianjin 300061, China)

Abstract: Conception of ion growth and molecule growth is introduced and pyrite and fluorite are taken as examples to discuss influence of different media on crystal form under the ion growth and molecule growth mechanisms.

Key Words: ion crystal; ion growth mechanism; molecule growth mechanism; polar surface; intermediate surface

(上接第 291 页)

CURRENT RESEARCH SITUATION AND APPLIED POTENTIAL OF THE HELICOPTER TEM SYSTEMS

WANG Wei-ping CHEN Bin

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

Abstract: Firstly, this paper reviews the developing history of helicopter TEM systems, and discusses the necessity for developing the helicopter TEM systems and describes its characteristics. Then based on the current development and applied situation in the world, this paper points out the helicopter TEM system types which should be developed at present and the applicable potential for geological survey in our country.

Key Words: helicopter TEM systems; the current research situation; the applicable potential