

出国参观考察
来华技术座谈 (五)

赴加拿大物化探 考察报告

(参加“勘探77”国际科学讨论会)

中华人民共和国赴加拿大参加“勘探77”讨论会代表团编
国家地质总局情报研究所出版

序 言

应加拿大地质理事会 (Canadian Geoscience Council) 的邀请, 经国务院批准, 国家地质总局派出代表团赴加拿大参加“勘探 77”讨论会 (金属矿物探化探国际讨论会) 和考察金属矿物探化探几项技术。代表团于一九七七年十月十一日启程, 十一月三日返抵北京。

这次大会由加拿大主办, 任务是回顾和总结十年来国际上金属矿物探化探发展情况, 有三十五国代表参加。在大会上提出论文的有加拿大、美国、英国、澳大利亚、新西兰、墨西哥、芬兰、挪威、波兰和南非的代表; 我国代表团在会上作了题为“中国金属矿物探化探概况”的报告, 受到与会者的热烈欢迎。大会宣读的论文共四十篇, 涉及到物探化探的综合评述、各个方法的技术状况和找矿实例等各方面。会议还举办了包括加、美、英、澳、瑞典和巴西等国共四十二家物化探仪器公司参加的仪器展览会。除了参加会议以外, 我国代表团还参观考察了加拿大联邦政府能源部所属地质调查局的资源物探化探处、阿普兰德 (Upland) 飞城座和贝尔斯考诺 (Bell's corner) 放射性标定基地, 以及该部的计算中心, 参观了多伦多大学物理系、地质系、麦基尔大学物理系和蒙特利尔工业学院, 参观考察了十四个公司, 其中有埃奈克斯 (Inax)、桑德尔 (Sander)、泰泰雷斯 (Geotrex)、邦达-克莱克斯 (Bander-clex)、原子能 (Atomic Energy of Canada Ltd.)、先达利 (Sciencetrex)、麦克发尔 (Mephax)、凤凰 (Phoenix)、巴休夫 (Barringer)、北路 (Northway)、肯亭 (Kentung)、克龙 (Crone)、瓦休 (Varian) 和迪吉赫 (Dighem) 等。此外, 还参加了在多伦多市科学中心举办的中加技术交流, 双方各宣读论文三篇, 并参观了凤凰公司专门为中国代表团在野外举办的物探新仪器表演。

根据地质总局批准的计划, 我们在专业上的任务是了解国际上金属物探化探技术现状和发展趋势, 并重点考察高精度磁力仪与航空磁测方法、化探的有关技术、核技术在地质中的应用、使用电子计算机进行数据处理和金属测井等。在考察中顺便了解了有关微发被化法和航空电磁法等的情况。带回技术资料二百多种及四十家公司的新产品广告。

会议论文集预计一九七八年夏季出版。代表团带回的会议论文摘要, 已译为中文并请印分发有关单位。

我们编写的这份技术考察报告首先综述所了解到的国际上金属物探化探现状和趋势, 然后分章叙述各个专业的考察收获, 着重 1975 年以后的新进展和今后发展物化探关系较大的内容。带来的技术资料清单附于报告之后, 供有关同志参考。在英明领袖华主席为首的党中央粉碎“四人帮”之后, 我国形势大好, 已经进入一个新的历史发展阶段。本着“洋为中用”的精神, 我们希望这份报告能在物化探赶超世界先进水平方面起到一些作用; 但是由于我们的水平不高, 整理材料的时间也有限, 报告中的错误不当之处在所难免, 希望有关领导 and 同志们予以指正。

目 录

序言	
国际上金属物探化探的现状与发展趋势概论	

第一章 磁法	
第一节 磁力仪	8
第二节 航空磁测	13
第二章 电法	15
第一节 航空电磁法迪吉赫系统简介	15
第二节 地面电阻法及电磁法	43
第三节 激发极化法	51
第三章 计算机的应用和物探数据处理	70
第一节 物探数据的计算机成图	70
第二节 物探数据的计算机处理与解释	73
第三节 加拿大地调局使用电子计算机的概况	76
第四章 其它物探方法及岩石电性测量	78
第一节 高分辨力地震勘探的发展概况	78
第二节 地质雷达和时域反射计	81
第三节 室内岩矿标本的电性测试及研究	87
第四节 金属矿综合测井及核测井	88
第五章 地球化学探矿	93
第一节 化探方法的新进展	93
第二节 区域化探	111
第三节 地球化学样品分析	115
第四节 地球化学数据系统	123
第六章 核技术在地质中的应用	129
第一节 放射性测量	129
第二节 核分析技术	150
建议	157

国际上金属物探、化探的现状 及发展趋势概况

有关国际上物探化探总的现状和发展趋势国内已有许多报导，这里不准备详谈。下面我们仅就会议所提供的部分资料和会后考察过程中的所闻所见从金属物化探的找矿效果，物化探应用中的某些问题以及金属物化探本身的发展等三个方面，作简单介绍。

第一节、金属物化探的找矿效果

在这次会议上，各国代表一致认为金属物化探的找矿效果是好的。

就化探而言，目前在世界上从冻土带到热带多种景观条件下都用的很广泛，并取得了明显的找矿效果。在十年来的化探回顾中，博伊尔（Boyle）博士引用了苏联的材料，他指出近20年来苏联化探共找到了约8万个地表晕及异常，发现了约220个矿床和900个远景地区，矿与异常之比近于0.3%。博伊尔估计，近十年来，在非洲、欧洲、亚洲、美洲及澳洲化探共圈出了约10万个异常，发现了约150个矿床。博伊尔还认为，进一步验证这些异常，在苏联及其它地区，还能发现近1000个矿体。在这些发现中，有名的矿有：美国内华达州卡林（Carlin）金矿（用Au、As作指示元素，在氧化带及残积土中取样）；苏联乌兹别克米朗滕（Muruntan）大金矿（用As作指示元素，在土壤及风化层中取样），新几内亚布干维尔（Bougainville）大斑岩铜矿（用Cu作指示元素，分散流及土壤取样）；澳大利亚南澳贝尔滕纳（Beltana）及阿鲁纳（Aroona）矽锌矿（分散流）、北方区麦克阿瑟河（McArthur）铅锌矿（土壤取样）、昆士兰莱迪洛雷塔（Lady Loretta）大铅锌矿（土壤取样）、新南威尔士伍德若（Woodlawn）铜—铅—锌矿（路边分散流普查及土壤取样）；加拿大育空地区的卡辛诺（Casino）铜钼矿床（分散流、水、岩石及土壤取样）、肯诺（Keno）山的铅锌银矿（地表钻及化探）、豪瓦兹帕斯（Howards Pass）锌铅矿带（分散流及土壤取样）、不列颠哥伦比亚的桑古西利（Sam Goosely）铜银钼矿（分散流及表土取样），不列颠哥伦比亚的布兰迪瓦因（Brandywine）金银铜铅锌矿（分散流及土壤取样），北威尔斯科迪布伦宁（Coedy-Brenin）斑岩铜矿（土壤取样）；爱尔兰的图奈夫（Tynaph）及其它一些铅锌铜矿体（土壤取样）。

就物探而言，各种方法都趋向于更加成熟，并在实践中得到了较好的应用。尤其是在覆盖地区，物探常常是唯一可行的找矿方法。

各种类型的空中、地面及井中电磁法，在寻找块状硫化矿时，效果都比较好。最简单的电磁法—甚低频法在加拿大魁北克省北部发现了勒萨德（Lessard）贱金属矿（1971年），在西北地区发现了伊楚克（Izok）湖硫化矿（1975年）。而在过去，不少人认为这种方法

即使在加拿大地盾区也不能用于直接找矿。

激发极化法及过渡场法在寻找浸染状硫化矿及在困难地区找矿（如热带及干旱地区）都取得了较好的效果。

磁法找磁铁矿以及找与磁铁矿或磁黄铁矿相伴生的贱金属矿都收到了较好的效果。找其他矿产时，多作辅助手段。重力法主要用来评价异常。

以伽玛射线能谱学为基础的放射性地球化学技术，是空中、地面及井中调查铀矿的直接手段，而用以指示空气及水中氡气含量的 α 粒子测量，则有增大放射性找矿深度的效果。

据统计，从1960年到1971年12年间，加拿大共发现了32个矿，其中一半是用物探方法找到的。据会上介绍联合国原子能总署1973年发表的材料，在21个国家中（不包括澳、加、美、苏、法及南非）共圈出了11284个放射性异常，找到了256个铀矿；美国西部各州圈出10万个放射性异常，找到了约700个矿体。

近年来，国外更加注意将物探与化探和地质找矿方法有机地结合起来，逐步形成合理的综合找矿方法，从而使物化探找矿的效果更加显著。

第二节、金属物化探应用中的某些问题

物探和化探作为地质领域的专门学科，它们的发展趋势，取决于地质工作的要求以及新技术所能达到的水平。现在，西方的地质工作对物化探提出了更高的要求。就我们了解，主要有以下四个方面：

第一 更加强调用物化探方法，特别是航空物探方法进行地质填图，配合遥感技术，大大加快区测工作。

西方一些物探学者认为：“贱金属勘探已从猎取个别异常发展到地质填图。”即物化探探索更多地用于地质填图，了解地质规律，以便较快而准确地圈出找矿远景地区。

航空磁测目前仍然是主要的填图手段，它是通过测量岩石的不同磁性实现填图的目的。加拿大截至1976年已完成全国面积的60%，出版了8250幅1:63360比例尺航磁图（线距0.8—1.6公里），1977年还出版了1:50万加拿大磁力异常图。美国截止1974年已完成40%，（线距1.6—8公里），预计85年完成。澳大利亚截止1974年完成了75%（线距1.5—3公里）。苏联截止1964年已完成了全国面积中等比例尺航磁测量工作（线距2公里）。航磁图既可作为研究程度图，又可用来说明主要地质构造形态，基底岩石的区域地质特征，还可以与其他物探和地质数据对比研究，有助于编制区域地质图。

为了提高航磁的填图质量，加拿大目前正在作高精度的航空磁测，等值线间隔为2 γ ，定位误差为 ± 25 米（用短程多普勒导航），研究低磁地区的精细构造。

由于出现了多频，多道航空电磁系统，能观测出广阔范围的导电率变化，因此又提出了利用航空电磁法进行地质填图的可能性。此项工作可分为性质不同的两个方面；其一是通过探测良导体物质填绘线性地质构造；其二是覆盖层的填图工作。

近年来，为了解决能源危机，西方正在兴起一个找铀热潮。有人估计，西方到2000年累计需要铀的数量为现在已有储量的三倍，今后10—15年内，每年要增加一个象加拿大丹尼森（Denison）铀矿那样的大矿（日产7000吨），才能满足需要。

因此，加拿大及美国等国均订有全国性找铀计划。加从1975年开始，到1985年止，要完成以地盾为主，占全国面积三分之二地区的航空放射性测量，线距为5公里，作铀、钍及钾的放射性填图。

西方估计，随着各种航空物探方法在地质填图方面作用的不增大，综合航空物探系统，即所谓“空中实验室”的发展将会受到日益普遍的重视。

关于地面物探方法，过去西方很少用于填图，现在开始注意这方面的工作。除重力法早有应用外（如美国已于1964年完成了全国1:250,000布格重力图，加拿大截止1976年完成了全国面积80%的小比例尺重力测量，澳大利亚已于1974年完成了全国的面积性重力测量工作，每50—130平方公里一点，苏联截止1975年完成了全国面积10%以上的中等比例尺重力测量工作）、地震法及交流电法等已开始用于填图。

此外，据了解，当前国外注意开展全国性的区域化探普查、研究地球化学省与成矿省的关系，以圈定找矿远景地区，并着手在分析岩石圈、土圈、水圈和生物圈物质中周期表上主要元素的基础上，以全国统一的网格编制出标准的区域地球化学图件。

第二、找深部矿

加拿大地盾区是加拿大主要金属矿产地。经过多年工作，近地表的矿虽然不能说绝对没有，但找到高品位大矿的机会相对减少。另一方面，根据诺兰达（Noranda）地区（该处六十年来共发现44个矿体，有含Cu、Pb、Zn等金属的矿石共1.17亿吨，占加拿大地盾区该类矿石总储量的20%）的经验，地表矿体虽不大，深部却有大量矿，而且找矿的前景很大。因此，加拿大的地质工作者们提出，过去是跑大面积找浅部矿，现在则是要在特定的一块不大的面积范围内（例如诺兰达地区85%的储量集中在主矿体周围十英里的十九个矿体，主矿体的矿石储量为6000万吨）到深部去找矿。

为了找深部矿，从物探方面而言，一方面是提高现有方法的仪器精度，在重点地区系统地作地面物探，对测得的数据用计算机加工处理，提取与深部矿有关的弱信息，另一方面是发展井中物探，将接收器放入井中，寻找井旁和井下盲矿体。例如克龙公司的过渡场法，可测井深最大为1000米，能探测钻井周围150米以内的块状硫化矿体。从化探方面而言，则是研究原生分带理论、地下水水化学和气体地球化学等技术方法。

第三、在困难地区找矿。

在困难地区找矿，主要是指在下述地区找矿：

在湖泊发育、冰碛覆盖的加拿大地盾区找矿；冰碛发育地区的找矿；热带及干旱地区的找矿；永久冻土带地区的找矿；高山地区找矿。

在北半球，近两百万年以来，多次受冰川作用。冰川作用地区包括北美北纬40°以北地区，欧洲北纬50°以北地区，亚洲大部分地区特别是北纬60°以北地区。这些地区的表土由冰碛及冰川作用的其他产物组成。在这种地区作化探与在残积土覆盖地区作化探，情况大不一样，有不少困难。特别是湖泊发育地区，地面物探又不能作，作化探也有方法上和理论上的困难。但近年来国外在湖泊地球化学、冰冻土区土壤地球化学等方面取得了一定的进展，特别是加拿大已基本解决了在这类地区的大面积地球化学普查的方法问题。

热带地区风化层厚，而且表层常为低电阻。干旱地区，由于蒸发量大于降雨量，地表严重盐碱化，形成低阻导电层。在地盾区使用有效的窄频电磁法、高频电磁波法及电激极化

法，在这些地区均无效果。

因此，不论空中或地面电磁法都面临一个问题：如何克服表层低电阻的干扰，以增大勘探深度。多频电磁法或宽频电磁法及磁激发极化法近年来在澳大利亚及非洲等地试验，都取得了一定的效果。

高山地区开展物化探的困难是：进行地面物化探，通行不易；进行航空物探，起伏飞行又有困难。目前加拿大在航磁方面，采用高精度的磁力仪（ $0.1 \sim 0.05\gamma$ ）在高山地区作高平飞。至于航电，直升飞机拖架系统曾在海拔 1700—3000 米的山区作过飞行，但尚未推广使用。

因此，如何在困难地区找矿，还需要作很多试验研究工作。

第四、用物化探方法验证根据地质理论提出的预测地区找矿。

西方地质界近年来重视用地质理论来指导找矿。重点提出来的与成矿有关的理论有两个，一是与火山作用有关的同生论，二是板块边缘成矿论。

这次大会第一个报告就是“地质学与矿床”。作者在报告中根据加拿大地盾 80% 矿产均赋存于太古代和元古代岩石接触带 100 英里的范围内以及世界各地矿产成带分布的现象，指出今后找矿的方法是：用板块构造的概念及其推论来选择特定的勘探地区，注意勘查在地表看不见的深部地壳断裂，并据此作成矿预测，然后用穿透深度大的物探方法和范围大而方法灵敏的化探方法去验证。

由于板块构造对地质学科各部分都有深远的影响，许多物探方法也用来研究有关这方面的问题。用得较多的是地面重力法及地震法。多伦多大学正在研制的一种电磁脉冲法（ $0.1 \sim 10$ 赫），探测深度可达 50 公里，一种磁大地电流法探测深度可达上地幔，采用三分量饱和式磁力仪，数字磁带纪录，适于研究大地构造历史。

第三节、金属物化探技术的发展现状

近年来，由于在物化探技术中不断引进物理学、核子物理学、计算数学、电子学和分析化学等学科的新成就，因而在仪器研制、数据收录、处理及解释推断等方面，都有了显著的进展，正在进入一个新的阶段。就我们所知，国外金属物化探技术的现状和主要发展趋势概述如下：

第一、小型计算机和微处理机的引入，日益改变着物化探仪器的面貌。

近十年来，由于广泛采用集成电路器件和印刷线路，物化探所用的仪器在小型化方面取得了较大的进展，而且精度也大为提高。

美国洛卡斯特（Locaste）公司已制成了微伽级弹簧式重力仪。地面磁力仪过去都用机械式的，近年来，西方已淘汰了这种仪器，而代之以精度高，操作方便，可提高工作效率一倍以上的质子旋进磁力仪及饱和式磁力仪。最近又试制成功了绝对精度为 0.5γ 的一人操作的便携式光泵磁力仪，连电池全重 11 公斤，将进一步扩大磁法的应用范围。

有一些地震法的仪器和电磁法的仪器，发射采用拟随机二进制编码信号（如米尼—索西地震系统等），接收采用相关及叠加技术，可大大提高仪器的信噪比。

但是，最值得我们重视的是在仪器中引入微处理机。物探仪器装上微处理机可以作到数字磁带记录，一机多用，提高观测数据的质量、操作方便并对接收到的数据作现场预处理。

这次会上会后我们见到的已装上微处理机的仪器有激发极化仪（如亨泰克M—4，索奎姆 swp—1，EDCON 地相位接收器）、脉冲电磁仪（如澳大利亚科学工业研究组织研制的 SiROTEM 脉冲电磁系统）、伽玛能谱仪、测井仪及电阻率仪（如英国 F.E.P 公司研制的 RHOMASTER）等。

化学分析仪器，因为使用小型计算机控制而高度自动化了。例如多伦多大学有一个实验室，装有 X 荧光仪一台及电子探针两台，过去是单独操作，不自动化，后安装 PDP11/10 小型计算机一台，控制这三台仪器，仪器的操作实现了全自动化。

因此，将微处理机及小型计算机引入物化探仪器，将是今后物化探仪器研制和革新的重要方向。

第二、扩大收录信息量，物探仪器向多参量、多频及多道发展。化探技术进入快速、灵敏和定量阶段。

这十年来，为了扩大物化探应用范围及提高物化探区分各种地质因素的能力，物化探收录的信息量大大增加。

以航空方法而论，十年以前，还没有综合航空物探系统，现在综合航空物探系统在加拿大已获推广（如先达利公司装在“单翼”飞机上的综合航空物探系统，麦克费尔公司装在 DC—3 上的综合航空物探系统，桑德尔公司和迪吉赫公司装在直升飞机上的综合系统，肯丁公司的数字测量系统等）并有进一步发展的趋势，预计随着巴林杰公司库特雷航电系统和空中微迹航化系统的研制成功将会出现综合航空物化探系统。

就单项方法而言，航空放射性由十年前的一道发展到七十年代的四道，现在带微处理机的仪器最高的道数在一千以上。而且由于使用了方晶体，探测器所占机仓面积只是原来的 10%，重量只是原来的 50~60%。航空磁法原来是测总场 T 的。现在已试制成垂向梯度仪，既测总磁场又测梯度，目前正在试制三个方向的梯度仪。航空电法、吊仓系统七十年代初只用两个频率，现在发展到用 5 个频率（麦克费尔的夸特雷）；硬固系统原来用一个频率，现在发展到 3 个频率（先达利三频）；拖架系统，从一个放射线圈一个接收线圈发展到两个正交发射线圈和三个正交接收线圈（迪吉赫 II 型、Dighem II）。因普特航电系统六十年代初试制成功，现已发展到 III 型了。

就地面电法而言，交流电法向多频发展，特别是扩充低频领域，经典的地面电磁仪（如水平电磁法及土拉姆法）现在都有了五个频率。除此以外，近年来还出现了最高达 32 道的脉冲电磁法（如澳大利亚的 SiROTEM 脉冲电磁仪）。多频及低频的使用，增大了电磁法的穿透深度和区分地表干扰与深部导电体的能力。

激发极化法近年来也有了很大的发展出现了不少测激发极化相位的仪器；制出了磁激发极化仪，增大了方法克服地表高阻特别是低阻干扰的能力。电激发极化法目前正在研究测 10^{-3} 到 10^6 赫兹电阻率谱的方法，因而出现了用激发极化法区分黄铁矿化与石墨的前景及用激发极化法区分硫化矿的矿物成分的可能性。

在化探工作中，过去的分析技术一般只限于半定量，灵敏度低，目前国外使用最广泛的分析方法仍然是原子吸收和发射光谱。但无火焰原子化器，特别是用于发生原子及金属氢化物的电热装置和还原管的发展，使许多元素的检出限改进到 PPb 范围内，并把例如 As, Se, Te 和 Sn 等元素的检出限提高到可用于岩石地球化学调查的水平而扩大了原子吸收的应用范

属。以电子计算机为基础的原子吸收分光光度计、大型X荧光分析仪和多道直读光谱仪的出现更增强了化探分析工作的能力。为适应快速大面积普查,分析处理大量样品的需要,有的还配备了感应耦合射频等离子源直读光谱仪或激光等离子源直读光谱仪,如加拿大巴林杰公司为配合空中微迹和地表微迹等航空化探系统的需要,采用等离子源光谱仪每10—45秒可以完成一个样品中Ag、Al、As、Au、B、Ba、Be、Ca、Cd、Co、Cr、Cu、Eu、Fe、K、Mg、Mn、Mo、Na、Ni、P、Pb、Se、Si、Sn、Sr、Te、Ti、U、V、W和Zn,等32个元素的分析记录过程。

第三、物化探工作的各个环节正在日益广泛地使用计算机,使物化探工作高度机械化及自动化。

前已叙述,物探化探收录的数据非常庞大,这就要求收录系统,数据处理,解释技术以及绘图工作实现自动化。

另一方面由于印刷电路、小型计算机和微处理机的引入,国外基本上已实现了航空物探的数字化、部分地面物探和化探分析的数字化,结果均可以数字记录在磁带或纸带上,从而又进一步促进了计算机的广泛应用。

西方国家,物化探数据室内整理、解释和成图自动化程度很高。因此,野外工作结束后很快(2个月到半年)便可提出报告。

据报道国外利用半自动成图程序,每天平均可处理3000测线哩航磁数据并绘出等值线图。在数据分析和解释推断方面,也有了显著的进发。加拿大许多物探承包公司和有关单位都具有实现下述运算的软件和硬件设备:

1. 航磁数据

针对任意复杂模型计算综合异常以及人机联系模拟计算;
带通滤波、向上、向下延拓,垂直梯度,化到磁极,拟重力转换及磁化率填图。

2. 重力数据

与地质资料做更多的相关对比研究工作,迭代模拟计算及各种异常增强处理。

3. 脉冲瞬变磁法数据

利用计算机人机联系计算导电率—宽度积及埋深。

4. 能谱数据

确定背景,剥层、比值计算和估算铀、钍及钾的含量。

化探数据处理有比较成熟的软件系统。例如加拿大地调局的化探分析程序包(GAS)有下述功能:

数据组织和再组织、数据检查、数据转换、分布统计、快速分布统计、相关分析、简单回归分析、多元线性回归分析、因子分析、平面绘图、三变数绘图(平板绘图仪)、散点图(平板绘图仪)及用宽行打印机作三变量的三角图。此外还备有供其他统计分析和制图的程序。

利用这个程序包,每年可处理相当于30万平方公里的区域化探数据、绘制1/25万图件400张。

第四、建立网络系统和设置各类终端,既可方便用户,又可最大限度地发挥计算机能力。

据考察加拿大的物探公司均备有自用的小型计算机（如桑德尔公司有德克萨斯仪器公司的 98A 计算机一台，内存 32 K，字长 16；其他单位多为 PDP11 型计算机，内存 10K—32K，定点加法 50 万次/秒），作日常物化探数据处理，加工及控制自动绘图之用。为处理大量物化探数据或进行复杂的反演计算或出于商业考虑，他们一般均参加网络系统，可随时利用大型计算机。

设置终端和建立网络系统是当前计算机技术发展的重要阶段。这样做的结果，既可方便用户，又可最大限度地发挥计算机能力。

网络有大有小。例如加拿大能源部没有一个计算中心（有两台 Cyber74 计算机）在其所属各部门及全国各地设有终端，构成一个网络。还有跨国公司设置的跨国网络。例如凤凰（Phoenix）公司就参加了两个计算机网络。一个是加拿大的康皮尤特尔（Compu-tel）系统，该系统中心在渥太华有两台 IBM—370/168、一台 IBM—360/65、和一台 Univac1108 计算机。凤凰公司将它的软件存储在渥太华的 Univac1108 的主存储器中，这样凤凰公司的顾客可在加拿大各大城市通过电话利用它的软件作物探数据处理、加工及反演计算。一个是数据控制公司（Control Data）的赛伯伯特（Cyberent）系统、通过这个网络系统凤凰公司的顾客可从美国、加拿大及西欧任何一个城市通过电话利用该公司的软件。

终端设备可分为电话终端和人机联系终端。

第五、开展方法的基础和理论研究。

加拿大及西方国家重视对物化探技术方法的基础和理论的研究工作。我们认为这方面的工作起码应包括两项内容，其一是对物化探方法本身所包含的某些理论问题的研究（如对激发极化法机制问题的研究，对在各种内、外生条件下控制元素迁移的因素的研究等均属这一类课题）；其二是注意研究其他学科的新成就并将它们引进到物化探中来（超导技术、小型计算机、大规模集成电路、微处理机等物化探中的应用均属这一类）。

有关第二项内容本报告的有关章节将分别叙述，这里恕不赘述，有关第一项内容国外资料甚多为说明问题本文略举一二。加拿大和北欧等国家为适应在各种景观条件下进行化探工作的要求，系统地开发了湖泊地球化学、微量元素在冰碛土壤中扩散和集中机制的研究，从而制定出在这类地区开展区域测量和异常追踪的合理方法；为研制空中微迹和地表微迹等航空化探系统，加拿大巴林杰公司与有关科研单位和院校曾广泛地研究有机和无机气溶胶（大气微粒）的化学特性以及地表被膜形成的机制等。为区分矿与非矿激发极化异常和消除电磁耦合干扰，美国犹他大学、亚利桑那大学及其他单位正在研究从 10^{-3} 到 10^5 的复电阻率谱，并已取得初步成果。加拿大地调局电法物性实验室在研究岩石在宽频范围内（ 10^{-2} — 10^8 赫）的各种电学性质的基础上，提出了用地质雷达技术、超高频电磁法测土壤含水量的方法和仪器。为解决航空电磁法的解释问题，加拿大多伦多大学做了大量的室内模型试验，提出了最适宜的解釋模型并绘制了一套较完整的解釋图册。为了克服良导覆盖层对电激发极化法的影响，加拿大先达利公司曾从事 8 年秘密研究工作，最后研制成功了磁激发极化法，在澳大利亚等地取得了较好的地质效果等。

综上所述，可以看出，西方的物探和化探近年来有了较大的发展，取得了较好的效果。这显然和他们注意基础和理论研究，引进其他学科的最新成就以及大规模的野外实验分不开的。

解放以来,我国的物化探工作从无到有,从小到大,有了很大的发展。近年来,由于“四人帮”的干扰和破坏,我国的物化探工作与国外先进水平相比本已缩小了的差距又被拉大了。但是,我们坚信我国社会主义制度的无比优越性,在以华主席为首的党中央领导下,只要坚持自力更生,独立自主的原则,同时注意吸收国外的先进技术和经验,我们就一定能在本世纪末赶上和超过世界先进水平,为实现祖国四个现代化作出应有的贡献。

第一章 磁 法

第一节 磁 力 仪

一、加拿大磁力仪发展概况

加拿大有许多公司都研制和生产各种类型磁力仪。从工作原理上看主要有磁通门式(即饱和式)、质子旋进式和光泵式三种。

1. 地面磁力仪:三种工作原理的磁力仪都有,但以磁通门和质子旋进式为主。由于广泛使用集成电路,地面磁力仪在小型化、可靠性、低功耗等方面都有很大提高。目前机械式磁力仪已基本上为电子式磁力仪所取代。

当前加拿大使用的地面磁力仪有以下特点:(1)小型化:目前标准磁通门式磁力仪重量一般为1.5~4 kg,质子旋进式的重量为2.5~7 kg。在小型化方面由瓦林(Varian)公司生产的VIW-2302 A1型磁力仪和VIW-2302 C1型梯度仪/磁变仪/磁力仪可作为典型代表,这两种仪器连电池共重11 kg,灵敏度为0.1伽玛,绝对精度达 ± 0.5 伽玛,测量速率为11次/秒,充电一次可连续工作6小时。

(2)一机多用:许多地面磁力仪都备有专供模拟输出和二进制编码输出的插孔,便于作为基地监控站的测量仪用。

(3)操作简便:大部分仪器包括磁通门式磁力仪,都采用数字伽玛直读显示,探头无须严格定向,结构上考虑了便于单人操作。质子旋进式的探头可以固定在操作者的背部或直接与仪器联成一体用单手操作。

先达利公司制造的MP-2型质子旋进式磁力仪,采用最佳噪声抑制双线圈探头,能在梯度高达5000伽玛/米的磁场中正常工作,探头不定向。仪器的电子线路部分采用了最新的互补对称金属半导体氧化膜电路(Cos/Mos),所以重量轻,功耗低。显示采用发光二极管(LED),配合光学偏振反射器,因此甚至在明亮的阳光下读数照样清晰。当环境磁场的梯度或磁噪声以及电干扰噪声过大时,仪器用灯光指示报警。这种仪器备有数字和模拟输出插孔,可供地面基地使用。仪器总重(包括电池)为3.7 kg。

瓦林公司制造的VIW-2302 A1磁力仪和VIW-2302 C1梯度仪/磁变仪/磁力仪都是轻便型光泵磁力仪。VIW-2302 A1测量总磁场强度值,量程为20,000—100,000伽玛,每秒测11次,数字读数,显示时间为0.54秒,(可供选择的时间—0.27, 0.36, 0.45, 0.63或0.71

秒)。灵敏度 ± 0.1 伽玛。探头发出的正弦波形的连续输出,其频率与总磁场强度成比例关系,比例常数为 3.4986 赫/伽玛。探头的极限灵敏度为 ± 0.005 伽玛,绝对精度为 ± 0.5 伽玛,最高梯度容限为 50,000 伽玛/米。VIW-2302 C1 利用两个 Cs 磁力仪在相距 2 米的两点上测总磁场强度值,两个测得值相减便可得出总磁场强度的梯度值。梯度测量的灵敏度为 ± 0.1 伽玛/2 米,测程为 ± 9000 伽玛/2 米。如将一个 Cs 探头固定,而另一移动探头则通过一单芯共轴电缆与其相连。按着这一方式在一地区上可做极为详细的测量工作,其结果与地磁场随时间变化的分量无关(如日变、微脉动等),这种方式便称为磁变仪测量方式。这种方式的灵敏度为 ± 0.1 伽玛,测程为 ± 9000 伽玛。

每个 Cs 探头又均可用于测量总场,其技术指标与 VIW-2302 A1 相同。

除数字显示外,二者皆配备有音频输出,其频率与测得的梯度或总场值成比例关系,测总场时音频输出的灵敏度为 7 赫/伽玛,测梯度时灵敏度为 7 赫每伽玛/2 米。

两种仪器的重量(包括电池)大致皆为 10 公斤左右。



图 1.1-1 VIW-2302 A1
轻便磁自激式磁力仪

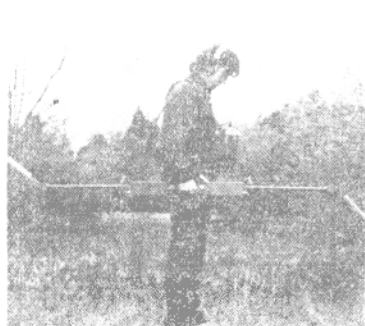


图 1.1-2 VIW-2302 C1
轻便磁自激式梯度仪/磁变仪/磁力仪

2. 航空磁力仪:加拿大生产了多种质子旋进式的航磁仪,灵敏度为 0.1 伽玛或更高,现在一般用它来作标准精度的航磁测量,测程为 20,000 伽玛—100,000 伽玛。国外航磁测量工作几乎 100% 实现了数字化(数字显示,磁带纪录),模拟纪录只供操作人员适时监控工作质量之用。例如桑得尔公司在云雀式直升飞机综合物探系统中(包括磁力仪、航电系统、伽玛能谱仪、控制设备及导航摄影机),便装有数字数据收录系统。

在航测用飞机和安装方式方面比较多样化,他们的物探飞机以小型机为主,各种仪器安装十分紧凑。磁力仪的安装趋于固定式,包括在直升机上的鼻锥安装方式和在固定翼飞机上的尾锥安装方式。研究加方的安装经验对如何利用我国现有机型装备航空物探仪器有一定参考意义。

二、加拿大地调局的航空磁力梯度仪

近年来随着磁力仪的灵敏度和导航定位准确度的不断提高,飞机磁干扰补偿技术的重大

进步, 以及物探任务的需要, 西方许多国家都已开始把光泵这一类高灵敏度磁力仪用于航空磁测并取得了明显的效果。在这方面加拿大地调局所进行的高灵敏度航磁测量和高分辨能力航空磁力梯度仪的研制工作, 在一定程度上代表了目前的国际水平。这套系统由安装在“空中女王”飞机上的两台自激式自定向伽蒸汽磁力仪组成, 同时测量总场和垂直梯度, 经过几年的努力这项工作取得了较大进展。每台仪器的灵敏度为 0.02 伽玛。

据介绍, 加地调局的航空磁力垂直梯度仪是针对加拿大前寒武纪地质区找垂直接触带而设计的, 为了确定需要的灵敏度而作如下假设:

- (1) 接触带一般是垂直的, 且接近于垂直磁化;
- (2) 接触带的深度 $Z = 1000$ 呎 (305 米);
- (3) 被探测对象的最小有效磁化率 $k_e = 500 \times 10^{-6} \text{ CGSM}$ 。

在接触带上 ΔT 的垂直梯度曲线如图 1.1-3 所示, 其最大值和最小值之差可用下式表示:

$$\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial Z} \right)_{\max} - \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial Z} \right)_{\min} \approx \frac{\partial I}{Z} \quad (1.1-1)$$

式中 I 为磁化强度, 且有

$$I = k_e T \quad (1.1-2)$$

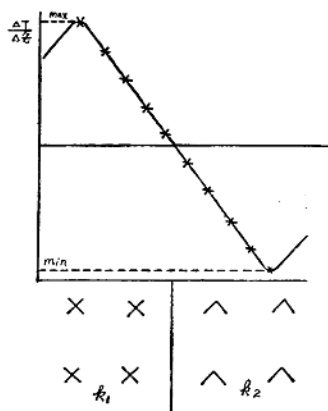


图 1.1-3 接触带的垂直梯度曲线

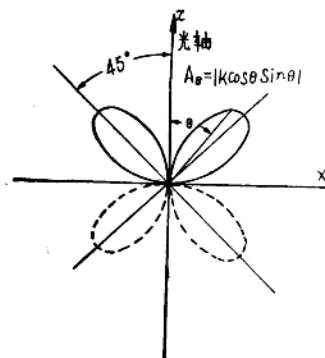


图 1.1-4 自激式光泵磁力仪振荡信号的幅度

而 $k_e = k_1 - k_2$ 为有效磁化率, 对加拿大地盾区已设 $k_e = 500 \times 10^{-6} \text{ CGSM}$, 此值约相当于含量为 0.2% 的磁铁矿。 T 为地磁总场强度, 设为 50000 伽玛。将已知数代入 (1.1-1) 式中得到磁场的垂直梯度值为:

$$\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial Z} \right)_{\max} - \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial Z} \right)_{\min} = \frac{2k_e T}{Z} = \frac{2 \times 500 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^4}{1000} = 0.05 \text{ 伽玛/呎}$$

考虑到在“空中女王”飞机上两个磁力仪探头之间的距离 $h = 6$ 呎, 则两探头间的磁场差值

为:

$$0.05(\text{伽玛/呎}) \times 6(\text{呎}) = 0.3(\text{伽玛})$$

但是仅仅考虑最大的磁场差还是不够的,为了准确地重现一条梯度曲线,在最大值和最小值之间至少要取 10 个点,所以每相邻两点的磁场绝对值差值为

$$\frac{0.3(\gamma)}{10} = 0.03(\text{伽玛})$$

这就是说为了完成在加拿大地盾区寻找垂直接触带的任务,磁力仪的灵敏度应为 0.03 伽玛或更高。

3. 自定向的原理:加地调局的航空磁力梯度仪使用了两台铷自激式磁力仪,有关铷自激式磁力仪的工作原理在此不作介绍,这里仅简要地介绍它所采用的自定向原理。

光泵磁力仪的探头存在一个定向问题,即无论采用哪一种光泵信号作成的磁力仪都存在一个信号死区。自激式光泵磁力仪振荡信号的幅度可表示为:

$$A_{\theta} = |K \cos \theta \sin| \quad (1.1-3)$$

上式可用图 1.1—4 表示,式中 K 为常数, θ 为光轴与地磁场 T 矢量间的夹角。显然当 $\theta = 90^\circ$ 或 0° 时 A_{θ} 将为 0,事实上当 θ 在接近 0° 或 90° 的某一范围时, A_{θ} 将变得很小,系统

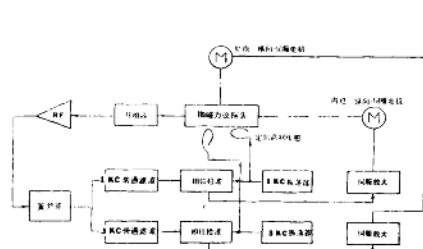


图 1.1—5 自定向磁力仪的原理框图



图 1.1—6 自定向磁力仪的探头

仍不能振荡,所以对单吸收室的自激式磁力仪而言,它的有效工作范围仅仅是在与地磁场成 45° 的某一圆锥内。如果考虑到当光轴与 T 矢量反向时输出信号的相移也将反转 180° 的话,单室自激式磁力仪的工作区域就将被限制在空间的某一半球的两个锥体之内。当光泵磁力仪用于飞机或船载时,这种现象将带来严重的问题。为此采取了许多方法以保证在运行中不论航向或飞机姿态为何,光泵磁力仪都能正常地工作。现在基本的方法有两种,一种是多光系系统,即是用两个、三个、四个甚至六个光系,使它们在空间按一定规律排列,构成一个互补系统,保证无论在任何空间位置状态下都有一个稳定的信号输出。这种办法没有机械运转部分,结构上简单。但是多光系探头电子线路复杂,功耗和体积都增大,而一致性又很难保证,仪器的精度也受影响。另一种方法是将光泵探头安装在一个常平架系统上,借助于一套伺服控制系统使磁力仪始终保持在相对于地磁场最佳的工作角度上。这样用单光系探头便可以在全球范围内使用,探头可以做得小一些,可靠性和精度高,而功耗较小。在这种方案中常平架的定向需要由另外的设备来提供,过去常常是用磁通门式磁力仪来作这种角度信息的

来源。由于光泵磁力仪是一种高灵敏度的仪器，用磁通门式铁芯安放在光泵探头的附近作为平台的传感器，势将严重影响仪器的工作性能。所以能否利用光泵现象本身与磁场夹角的关系来使光泵探头自定向，自然是一项使人们很感兴趣的课题。加地调局的梯度仪所采用的正是这种自定向原理。图 1.1—5 是自定向磁力仪的原理方框图。图 1.1—6 是平台和探头的照片。由照片可以看到，铷光泵探头被包在一个用玻璃钢加工制成的双层球壳内，每层外壳的表面都绕制了一组调制线圈，两组线圈互相垂直，两组线圈中分别送入 3 KC 和 1 KC 的交流电流，在光泵探头所在空间产生一个数百伽玛的调制场。这样被测的外磁场被该频率的磁场调制，在磁力仪射频放大器输出的信号中也就包括调制频率的信号，将该信号送入鉴频器和两个带通滤波器，分别检出相应的调制信号再加入到相位检波器，与由对应的低频振荡器来的参考电压进行相位比较，输出直流电压。若调制线圈的轴线与地磁场之间的夹角为 θ ，当 θ 改变时，该电压随 $\cos\theta$ 变化。把直流电压送入相应的伺服放大器进行变换放大来控制伺服电机，经传动杆和摩擦轮减速，带动磁力仪探头转动，直到调制磁场的方向与外磁场垂直为止，而这时磁力仪探头光系的方向恰好与地磁场成 45° ，处于最佳工作位置。当飞机姿态或航向发生变化时平台系统便会重复上述自动定向过程。根据现场表演来看，自定向跟踪系统的跟踪速度可达 1 弧度/秒，完全能满足运动状态下的要求。

下面简单介绍梯度仪探头的结构。参看图 1.1—6，整个铷探头、常平架系统和伺服电机组成一个刚性整体，探头与伺服电机组大约相距 60~70 cm。传动轴为胶木棒。常平架系统包括内外框和支撑叉架，外框的转轴与支撑叉架之间采用塑料滚珠轴承连接，轴的方向与飞机横轴平行，外框架的转动是靠固定在外框架的转盘（转盘的平面与飞机纵转方向一致）与传动轴摩擦传递来运转。内框架同时作为定向系统传感器的支架和磁力仪光系的外壳。内框架的转轴固定在外框架上并与外框架的转轴处于同一平面但相互垂直。内框架的转盘经过一个换向和减速的小转盘与传动轴相联系。整个探头支架的主要零部件均采用胶木材料制成。探头及常平架系统通过支撑叉架与飞机尾杆相连接，其间靠平板式减震器减震，而未采取别的减震措施。但引入尾部的部分导线（估计为高频馈线）在尾杆内均用泡沫塑料仔细包裹，看来也是为克服震动影响而采取的措施。内框架球壳的外径约为 10 cm。

关于 9 项补偿的一些情况：根据介绍，加地调局的梯度仪在实验过程中主要遇到了以下一些技术难点：（1）磁力仪的温度漂移；（2）飞机磁干扰的补偿。这方面的具体情况加方未作介绍，但从勘探 77 会议上皮特·胡德的报告来看，这些问题均获得了较好的解决。这次在参观“空中女王”飞机时看到了他们所使用的加拿大航空电子公司出产的 9 项补偿器的外形。9 项补偿器包括以下几部分：三个磁通门式磁力仪的探头、一个放大电源装置、一个控制单元以及安装在被补偿的磁力仪探头附近的补偿线圈。这种补偿器从原理上讲属于测地磁场补飞机干扰类型，是一种半自动补偿器。它可以补偿 3 项恒定场，5 项感应场和 8 项涡流场。恒定补偿场由直流电源供给产生，感应补偿场由三个磁通门式磁力仪提供，涡流补偿场是将三个磁通门式磁力仪的输出微分后产生。补偿线圈是螺旋管式的而不是赫姆茨线圈，这样整个磁力仪的探头可以做得比较小。他们在空中补偿的情况是：3 项补偿恒定场、1 项补偿感应场、5 项补偿涡流场。涡流场干扰影响较大，是值得注意的。在空中补偿时飞机按规定要求沿几个基本航向作机动飞行，操作人员调补偿器旋钮，补偿结果由模拟记录器上直接观察，直到由机动产生的干扰信号最小为止，所以补偿的方法比较简单和直观，不需要专

门训练的操作人员。补偿所需要的时间也大大缩短,一般补偿恒定场、感应场和涡流场只需要 30 到 45 分钟,在每次飞行中只需要花 5 分钟时间对恒定补偿场进行修正即可。补偿的结果用“品质因素”来衡量。当飞机沿东南西北四个航向作 10° 的横滚、 10° 的俯仰和 10° 的偏航飞行时,一共可得出 12 个异常信号,将这 12 个异常信号峰—峰的绝对值加在一起所得的值即定义为补偿的“品质因素”。地调局的航磁梯度仪空中补偿实际达到的品质因素为 0.82 伽玛,在空中某一方向作规定的机动飞行时最大的异常信号(峰—峰值)为 0.2 伽玛。这种补偿器适用于现有各种磁力仪和各种飞机。

另外地调局在安装航磁梯度仪时对“空中女王”飞机作了较大的改装,将尾舱的设备全都移出,除了少数几根操纵钢索外,没有别的磁性物质,这对保证高精度的航空磁测也是很重要的。

第二节 航 空 磁 测

按在考察中了解到的资料本文仅就高山地区航磁和航空磁力梯度测量以及加拿大磁力图作简要介绍。

一、高山地区航磁工作

加拿大在丘陵和平原地区是将航磁仪与航电和放射性能谱仪放在同一架飞机上作综合测量,所用磁力仪的灵敏度是 0.1 伽玛。但在高山地区则是用单一的高灵敏度(0.05 伽玛或更高)航磁仪在同一海拔高度上进行测量。例如桑得尔(Sander)公司就是用灵敏度为 0.05 伽玛的吊舱式核旋仪 MPM 5/2 为地调局承包高山航磁测量,飞行时吊舱距山峰是 300 呎。MPM 5/2 航磁仪的灵敏度能提高到 0.05 伽玛是由于在飞机上装了一个小计算机来自动操纵,使吊舱与飞机同步。

地调局在不列颠哥伦比亚的卡姆鲁卜斯山区用起伏飞行与水平飞行两种方法作过试验对比,当地地形起伏的最大高差为 4000 呎,结果证明二者对异常的分辨能力差别并不大。

为解决我国山区的航磁测量工作似乎可采用高灵敏度航磁仪高平飞的工作方法,因此加拿大的此项经验对我们有一定的参考价值。(参见 75 年总局物化探考察组赴加考察报告。)

二、航空磁力梯度测量

航空磁力梯度测量的优点在 1975 年赴加拿大考察报告中已作介绍,故不多述。

加拿大是世界上第一个实现了用航空垂直磁力梯度仪进行面积性测量的国家。在获得梯度测量结果的同时还可获得总场测量结果。结果证明,梯度比总场分辨能力强,有些总场异常从梯度剖面看出是由几个间隔很近的单独异常组成的,而且在梯度剖面上范围小的异常与范围大的异常相比,前者很灵敏地放大了,这种梯度异常是由浅部地质体引起的。此外,在面积性梯度图上有些很明显的异常,在总场图上则不显示或显示不明显,这是由于总场是地壳深部与浅部异常体的综合反映,而梯度突出地反映浅部异常体。因此,同时获得两种图件对综合分析地壳构造与填图是十分有用的。

图。另外，据加拿大航空磁力梯度测量的倡议人皮特·胡德介绍，在高纬度地区，垂直梯度等值线图的零值线能准确地划出陡倾斜接触带。这虽然对我国所处的中—低纬度地区不适用，但如果对这种地区的垂直梯度数据作化磁极的换算，是可以实现的。

在此特别指出，梯度测量可以自动消除日变影响，这使得在发生磁暴时测量的结果都可用。而在大面积内单独地进行高精度总场测量时，即使在不发生磁暴时也无法准确地改正日变影响。

我们从加拿大地调局获得了一套西经 $76^{\circ}00' - 76^{\circ}30'$ ，北纬 $45^{\circ}00' - 45^{\circ}15'$ 地区的航空磁垂直梯度和总场测量图，这是 1975 年 7 月为了试验梯度测量而进行的面积测量。梯度与总场是同时记录下来的，飞行高度在地面以上 150 公尺，平均测量间距 300 公尺，重复控制线间距为 12 公里。航空测量和数字成图是地调局区域物化探处进行的，在成图时将梯度数据作了数字滤波，除去了仪器的噪音。

鉴于梯度测量具有高分辨能力，看来用航空磁力梯度仪填图及向高山进军是一个方向。

三、加拿大的磁力异常图

我们获得了 1977 年出版的 1:50 万加拿大磁力异常图。它是根据联邦/省航空磁测计划的 1:63360 (1 呎 = 1 哩) 8250 幅标准总场航磁图编制成的，其标准测线间距是 0.5 哩 (0.8 公里)，离地高度是 1000 呎 (305 公尺)。

这张磁力异常图是从航磁图中减去了地核产生的磁场分量的结果，所利用的数值取自多米尼昂观测站 (Dominion Observatory) 的总场 (F) 图，并进行了年变归算。详细作图方法将发表于 Geol. Survey of Canada Paper 78—1 A，其作者是麦克格拉斯等 (Mc Grath et al)。

图上比较突出的特征是在很大区域内出现较一致的磁场特性，它反映了各种地质单元及其边界。线性特征反映大断层或地壳构造，而大规模的特征变化大体上反映地壳岩石中的岩相和 (或) 变质史，或是地球上硅铝层的厚度变化。当把异常图与地质图对比时，可以看出绿岩带及其等效变质作用与宽阔的低磁场明显地对应，而高磁场区与较广泛的花岗岩地区相关。

这张磁力图的一个缺陷是：由于不同测量没有联系在一个共同的基准参考磁场水平上，所以不知道在大面积内基准水平的区域性变化是否有地质意义，例如，把加拿大中部的区域性磁场高与东部沿海各省的区域性磁场低作对比，就没有地质意义。