

408-424

中国电法勘探发展概况

张赛珍^① 王庆乙^② 罗延钟^③

① 中国科学院地球物理研究所, 北京 100101

② 中国有色工业总公司矿产地质所, 北京 100012

③ 中国地质大学, 武汉 430074

p618.208

摘 要

本文首先概述了新中国成立前电法勘探的雏形, 而后主要围绕金属矿地面电法, 从新方法新技术、岩(矿)石电性规律和激电效应机理、正(反)问题、地形改正、激电法和电磁类方法、以及电法勘探能力和实用效果等几个方面的发展事实, 论述了建国 45 年来, 我国电法勘探的巨大进展。

关键词 电法勘探, 进展, 概况, 中国。

金属矿床, 铁矿床
锡矿床

一、引 言

电法勘探是一门新兴的地球科学。从 19 世纪初 P. Fox 在硫化金属矿床上发现自然电场现象算起, 也只有 100 多年的历史。我国电法勘探始于 30 年代, 由当时北平研究院物理研究所的顾功叙先生所开创。开展的方法有自然电场法和电阻率法。采用的仪器是自制的电位计和英制 Magger 电阻率仪。三四十年代, 顾功叙、王子昌、丁毅等先生在安徽当涂、马鞍山, 贵州迤谟、水城、赫章, 云南东川汤丹、落雪、个旧、昭通、会泽、易门等地的一些铁矿、硫化金属矿床、锡矿、褐炭矿等矿区进行过自然电场法, 电阻率剖面法和电测深法, 取得了一些试验和实际效果。

当时, 正值抗日战争, 工作条件极其困难, 虽取得资料不多, 也是我国电法开创史的珍贵记录。

新中国成立后, 先后由重工业部、地质工作计划指导委员会、石油部等部门, 从全国各大学抽调多批物理系毕业生, 委托顾功叙、傅承义、翁文波、秦馨菱、孟尔盛等我国地球物理先驱们主持专业培训, 培训了一批地球物理技术骨干, 为我国物探事业的发展(包括电法)奠定了基础。不久, 设置有物探专业的多所地质高等院校和科研机构相继成立, 各部门并在各省(市)建立了物探专业队伍。一门新兴、先进的勘查地球物理学, 投入了国家大规模经济建设的行列。

回顾新中国建国 45 年以来, 我国电法勘探的开创与发展也与祖国的命运息息相关, 经历了艰苦创业带来的兴旺发达, 也承受了干扰与挫折。但基于电法工作者们的勤奋和坚韧不拔的事业心, 无论在基础理论、方法技术、应用范围、应用水平和应用效果等方

面都取得了巨大的进展。至今,我国已拥有当今世界上所有的物探方法和技术。其中某些方面已达到国际先进水平。在各种矿产资源、水文、工程地质等勘查方面、电法勘探已成为不可替代的最有效的勘查手段之一,在考古、环保、地质灾害等领域,电法也是有效的调查手段。电法种类繁多、应用领域广泛,限于篇幅,难以全面而准确地表达我国电法勘探的巨大进展。这里仅以金属矿地面电法为主,简述其它,以鸟瞰一斑。

二、新方法技术发展概况

从 50 年代初期到中期是新中国电法创业阶段,完善和发展了自然电场法,电阻率剖面法和电测深法,在一些矿产资源勘查中很快形成了生产力。自然电场法成为勘查浅埋

表 1 新方法发展概况

年 份	引进或开始研究的新方法 (具代表性的)	试验结果	试用效果	被生产采用情况	应用效果
50 年代初	自然电场法、电阻率剖面法、电测深法		好	广泛	好
1953—1957	等位线法		不好	未采用	
	高频感应法、强度法	尚可	不好	未采用	
	充电法	好	好	用于详细勘探	好
1957—1965	倾角法、振幅相位法	尚可	一般	少	不理想
	虚分量振幅法	较好	尚可	少	一般
	小功率瞬变电磁场法 (PEM)	较好	较好	少	尚好
	大地电流法		尚可	曾一度被采用	尚可
	甚低频法 (VLF)	较好	较好	较广	尚可
	地下电磁波法	很好	好	较广	好
	激发极化法 (IP)	很好	好	很广泛	好
1965—1970	电和磁偶源频率测深	好	好	尚广	较好
	MT、AMT	好	好、尚可	较广	较好、一般
	地质雷达	好	好	少	尚好
80 年代	SIP、CSAMT	好	好	极少 少	较好
	新源 TEM 等	好	好	少	较好

迄今,已投入一定规模的新老方法:自然电场、电剖面、电测深、充电、激发极化、VLF、地下电磁波、井-地 (中) IP、频率测深、MT、AMT。

今后有前景并投入生产的新方法:TEM (或 PEM)、CSAMT、SIP、虚分量振幅法等。

良导矿的快速而经济的普查手段;电测深法成为煤田等资源勘查的重要方法;同时,电阻率剖面法的各种装置也得到了广泛的试验,其中联合剖面装置成为确定各种电性体地面投影位置和产状要素等最有效的一种手段。

引进了高频感应法、强度法、直流等电位线法、充电法等方法技术和有关仪器设备。等电位线法在前苏联乌拉尔地区应用效果很好,在我国白银厂等地开展过上千平方公里

面积的普查工作,终因不适宜当地的地形地质条件而告失败.强度法、高频感应法也因应用效果不佳而被逐步淘汰.唯充电法效果好,得到了发展.

50年代中到60年代中是我国新方法技术全面发展和优胜劣汰时期.当时引进或开展研究的地面新方法技术主要有:倾角法、振幅相位法、虚分量振幅法,小功率瞬变脉冲电磁法(或称过渡场法),大地电流法、激发极化法等方法 and 相应仪器.

旨在勘查良导性金属矿床的4种电磁类方法,断续研究至今已30余年,在几十个已知金属矿床上试验反映良好^{①-⑥}.[1-5].但因种种原因,至今仍停留在试验阶段,“推而难广”.唯瞬变脉冲电磁法,因其具探测深度较大、分辨率高、效率高等特点,且近年引进新设备,并拓宽了应用领域,大有发展前景.

大地电流法主要从匈牙利引进,曾一度与直流电测深法平行,在一些地区勘查地质构造有一定效果.至70年代,逐渐停止使用,为大地电磁测深法(MT)所代替.

激发极化法(以下简称激电法或IP法)具有勘查致密和浸染状金属矿床以及区分离子导体、山地电场等干扰的特点.1957年我国开始研究IP法时,国外对方法前景尚有争议,方法技术问题也未解决.当时方法试验使用的仪器由自己拼制,但研究很快获得成功^[6,7],并迅速在全国范围内推广应用^[8,9],很快成为有色金属矿产勘查的主要手段之一.

60年代中至70年代是提高和发展阶段.此时期,除激电法、充电法和各种电阻率法等方法在理论、技术和应用领域等方面有较大提高和发展外,新引进和发展的方法有:电偶源和磁偶源频率测深、大地电磁测深(MT)、音频大地电磁测深(AMT)、甚低频(VLF)和地质雷达等方法 and 相应仪器.

电偶源和磁偶源频率测深法,分辨率高,效率高,优于直流电测深法.10多年来,发展较快,已有国产仪器,并开发了资料解释软件系统^{⑦-⑩}.[11-13].在煤田、水文和工程等地质勘查中,已取得良好应用效果.

我国开展MT法,始自1965年,采用自制仪器.进入80年代,各单位引进了不少进口设备.由于仪器质量显著提高以及数据处理解释软件的发展^[14-18],现在MT法已是地壳深部地球物理调查和油气田深部构造勘查的一个重要手段.

AMT法是MT法的一个分支,它和VLF法都比较轻便,在一些地质填图、水文工程等地质调查中受到欢迎.但AMT法干扰较多,VLF法近年有所发展^[19,20].

① 冶金部北京地质研究所物探室,多频振幅-相位法试验研究工作经验初步总结,1968.

② 地质科学院交流电法组,FX-1振幅比相位差探矿仪试制总结,1976.

③ 蒋邦远,偶极低频电磁倾角法研究总结,物化探研究报导,12期.

④ 岑久根,多频振幅相位法工作手册,冶金部地质研究所交流资料.

⑤ 武汉地质学院电磁法科研组,无参考线圈虚分量仪,偶极场基本理论,地质科技资料,1期,1979.

⑥ 牛之璠,电磁法文集,交流资料,1982.

⑦ 李杰彬,MPC-78A型频率测深仪,西安煤田地质所,交流资料,1981.

⑧ PC-76型频率测深仪试制报告,河北地质局物探大队,交流资料,1981.

⑨ 煤炭部地质勘探研究所频率电磁测深方法组,频率电磁测深法若干问题的研究,1978.

地质雷达的研制工作始自 1966 年, 1976 年研制成生产样机, 但未能坚持到实用阶段。近年有进口仪器, 应用效果较好。

80 年代是再提高、再发展时期。我国金属矿的找矿主体进入勘查深部隐伏矿的新阶段, 要求电法勘探向深部进军并具有区分常规电法干扰的能力。此时期, 针对这个要求, 除对上述已开展的方法技术作相应的深入研究外, 引进的新方法技术有: 可控源音频大地电磁法 (CSAMT)、新颖时域瞬变脉冲电磁法 (TEM) 和电磁测深法 (DEEPEM)、宽频谱激电法 (SIP) 等方法及它们的相应仪器设备 (SIROTEM、EM-37、TPV-3、V-4、V-5)。

CSAMT 法和 TEM 法近年使用效果明显^①、^[21-23]发展很快。

SIP 法的方法技术和理论, 在我国得到了较大进展^[24-30, 32], 但因其生产效率太低, 目前还只有个别队伍进行试验性生产工作, 但已初见成效^[31], 展示了应用前景。

以上是地面电法, 关于空中和地下电法, 我国也早在 60 年代就开始了研究 (制) 工作。

60 年代, 先后研制过天然音频、甚低频、瞬变脉冲等航空电磁系统^②、^[33]。最后, HDY-301 型双频航电系统得到实际应用。近 10 多年, 飞行 11 万余测线公里, 有一定效果, 但仪器系统和方法技术都有待进一步完善。

地下电磁波法在我国有较系统的开发和发展, 不同的发展阶段都形成了相应的实用技术和实用效果。最早的仪器是 50 年代末仿制的。1960 年在关门山铅锌矿坑道中进行了首次试验。其后, 各单位研 (仿) 制并批量生产了多种坑道和钻孔无线电波法仪器, 方法技术和解释方法也得到了初步发展^③、^[34]; 在近百个煤田、金属矿区得到应用^④, 并在解决各类水文地质和工程地质问题 (包括探测岩溶) 中也取得较好效果。近十余年, 发展了方法理论, 并较早较好地与计算技术相结合, 研制成功程控、宽带、跳频扫描电磁波收录系统 (JW-4)^[35]和数据处理解释软件包^[36, 37]以及地下电磁波法层析技术^[38, 39], 形成了较完整的工作系统, 达到了当代国际先进水平。

此外, 各种电测井 (自电、电极电位、电阻率测井等) 则早已在油田、煤田等勘探中作为常规测井被采用。60 年代, 在有色金属矿产勘探中发展了井中和井下激电法, 它和井中无线电波法、井中三分量磁测被当时人们誉为井下物探三朵花。

方法与仪器休戚相关, 每个方法的发展都伴随着相关仪器的发展。我国仪器的发展是从仿制逐步走向自行设计研制的。40 多年来, 从国外引进的电法仪器近 40 种, 仿 (研) 制的各类电法仪器约百余种, 但性能可靠、投入批量生产和应用时间较长的为数不多, 公认的有: 电子自动补偿仪 (DDC-2), 微机时间域激电仪 (DWJ 和 DJS 系列)、双

① 马瑞文, TEM、CSAMT 法在阿舍勒铜矿区的应用效果, 新疆物化探科技情报, 总第 5 期, 1991。

② 关永清, 脉冲航电仪的现状与发展, 长春地质学院, 交流资料, 1981。

③ 吴以仁, 廖兴昌, 刘延中, 1964 年钻孔无线电波透视法方法技术实验结果, 物探化探研究报导 (内部资料), 9, 1965。

④ 煤炭部重庆煤研所, 坑道无线电波透视法在煤矿地质中的应用, 煤炭部重庆煤研所, 交流资料, 1979。

频激电仪 (S-2), 频率测深仪 (MPC-78A, PC-76), 无线电波透视仪 (JW-3, JW-4) 等。

电法种类繁多, 每种方法仪器都有本身的发展史, 这里不可能一一述及, 但一般都是经过机械式—电子管—晶体管—集成电路—微机控制等几个阶段。当今的电法仪器, 采用了现代电子新技术和微处理机, 自动化程度高, 精度、稳定度、抗干扰能力等指标都有极大幅度的提高。

表 2 列出了电阻率法——激电法仪器 (仅列出有代表性的) 发展概况, 可作为一个侧面示其一般。

综上, 建国以来, 我国几乎从无到有, 从空中到地下, 发 (开) 展了当今电法中所有的有效方法技术和仪器。当然, 某些方面, 特别是电子技术和工艺上, 与国际上某些先进电法仪相比, 还有相当差距, 尚需继续努力。

表 2 电阻率法及激电法仪器发展概况

年 代	仪 器	仿制情况	器件与读数方式	性 能	投产情况	使用时间	使用效果
1953	电阻率仪	仿英制 Magger 仪	指针式模拟读数	不稳	少量	很短	不好
50 年代中	补偿式电位计	仿苏制 ЭП-1 电位计	机械式, 模拟读数	尚可, 输入阻抗低	批量	不长	尚可
50 年代末	光点示波仪	仿苏制 ЭП-5 示波仪	机械式, 模拟读数	不太稳, 输入阻抗低	批量	不长	不理想
50 年代末— 60 年代中	电子自动 补偿仪: DDC-1 DDC-2	仿苏制 ЭСК-1 型电子自动 补偿仪	电子管, 模拟读数 电子管, 模拟读数	不稳 很好, 输入 阻抗大	批量 大量	不长 较长期为 传导类电 法 (含 IP) 主导仪器	不好 很好
60 年代初	补偿式激电仪	参考原苏联 有关线路	电子管, 模拟读数	稳, 笨重, 操作繁	批量	不长	一般
70 年代	各类激电仪, 含远点启动式 时域激电仪和 频域激电仪	参考西方 相关仪器	晶体管或集成电 路, 模拟或数字 显示	欠佳	少或 未投产	短	不理想
80 年代初 90 年代初	DWJ-1 激电仪 DWJ-2	参考加拿大 IPR -8, IPR-11 等 仪器自行设计	集成电路, 数字 显示, 微处理器 控制	较好	批量	至今 使用者	较好
80 年代	S-2 和 SBJ-1 双频道激电仪 抗耦频域激电仪	自行设计	集成电路, 数字显示	较好	批量	至今 使用者	较好

续表 2

年 代	仪 器	仿制情况	器件与读数方式	性 能	投产情况	使用时间	使用效果
80 年代末	CMOS 激电仪	参考加拿大制 IPV-3 仪自行 设计	集成电路, 数字 显示, 微处理器 控制, 时域频域 合一	较好	少量	短(正试 用中)	尚好

三、若干重要进展

1. 方法理论

在电法理论方面, 开展过大量研究, 取得了一批有价值的成果, 为电法理论的发展作出了重要贡献。下面只举几项较有影响的进展。

(1) 岩(矿)石电性规律和激电效应机理

岩(矿)石或地质体的电性受控因素及其作用规律和激电效应的机理是电法勘探的理论基础。我国学者十分重视这方面的研究和电性数据的积累。基本上搞清了湿度、温度、压力等因素对岩石、矿物的电阻率的影响规律^[40-41]、岩(矿)石或地质体的充放电时间特性规律^①、^[42-44]和非线性效应特征^[45-46]等; 60 年代初和 80 年代初, 先后对影响岩(矿)石极化率和频谱激电特性的主要因素和作用机制进行了系统研究, 搞清了溶液湿度、浓度、成份及导电矿物成份、体积含量、岩(矿)石微结构构造等因素对(谱)激电效应的作用规律^[25, 47-51], 打破了激电效应主要受导电矿物含量控制以及谱激电效应与导电矿物成份无关的观念。

我国自电法发现大型斑岩铜矿的事实, 促进了对浸染型硫化矿中自电现象的机理的探讨与认识^[52, 53]。

人们对电子导体的激电效应的机理, 虽有认识, 但较浮浅, 我国学者结合实践与电化学理论, 对机理的探讨深化了^[30, 54]。同时, 对谱激电效应的物理模型是否符合 Cole-Cole 模型的问题也从理论和实验上作了充分论证^[26, 28, 30, 55, 56]。

同时, 在广泛实践中, 积累了大量各类岩石、矿石、岩层、矿体的电性基础数据, 并总结了一套行之有效的电性测定装置和技术, 列入了电法工作规范。

上述某些成果在研究深度和系统性方面我国是领先的, 也有独创的, 使(激)电法基础理论和异常评价水平跃上一个新台阶。

(2) 正(反)问题的研究

电(磁)场的正(反)问题是方法理论的重要组成部分。早期, 对一些简单的地电模型, 常是用简单的运算工具进行繁琐的计算工作, 绘制或补充国外一些理论曲线量板; 对一些稍复杂的地电模型, 用物理模拟的方法求得正问题的解, 其中部分成果曾编成了

① 张乃昌, 激电衰减曲线的解释及其规律的探讨, 河南地质局物探队, 1980。

图册①—④, [57—58]。与此同时,也发展了一些简单易行的物理模拟技术,如薄水层、导电纸、电阻网络等模拟技术[59—62]。

以上初级阶段的研究,当时对提高各类电法资料的定性定量推断解释水平和进行地形改正等起过极其重要的作用。至今,仍在继续起着作用。

物理模拟受精度、效率等限制。随着电子计算机和电算技术的发展,促使人们利用数值模拟技术和电算技术。我国电法勘探中采用电算技术起步较晚,但从70年代中期以后,发展十分迅速。

首先开展电算的是水平层传导类电测深资料的计算机正反演自动解释[63]。到80年代中期,发展了各种最优化法和直接法等分层解释方法以及确定高阻基岩深度和电性参数的快速电算方法[64—67]。目前,传导类电测深资料的电算解释,在我国已经普及。在此基础上,电磁类测深法(MT, CSAMT, DEEPEM, 频率测深)的正反演方法和电算程序也得到了开发和发展[13, 15—17]。

电法正问题中的数值模拟技术,最早是在电阻率横向电测井的资料解释中实现的[68]。以后逐步移植到地面电法,并发展了有限差分法、有限元法和积分方程法(包括边界无法)等多种数值模拟技术[69—94]。在三角形与矩形网络相结合的网格剖分技术,二维构造三维场源模型计算时其波数选择和反傅氏变换算法以及非各向同性围岩条件下三维电磁模拟和边界元法解决电阻率法三维地改等方面,都取得了创新成果。

此外,利用电算技术对电法数据作静态校正[65—67]、近场校正[80, 89]、电磁耦合效应的分离和提取[80—94]等数据处理方面,我国也发展了一系列独特方法。

可以说,现在我国已基本形成一套以电子计算机为手段的电法资料处理和解释方法,并正在研制功能更齐全的综合解释工作站。

2. 地形改正

我国山区面积约占国土三分之二,除激电法外,地形对电法干扰十分严重。因此,从60年代始,就对地形影响直流电场分布的规律和改正办法进行了一系列研究。

60年代,采用多种物理模拟方法①, [59—62],对地形异常的特征和规律进行了剖析,从理论上提出了“比值法”和“域转换法”[95, 96]两种地形校正方法。其中“比值法”,原需要通过物理模拟求取纯地形影响系数。70年代,在解决了角域地形解析解②, [97]后,采用多角域叠加,近似拟合野外实际地形[98, 99],克服了用物理模拟求地改系数费时和精度低的缺陷。以后,还发展了一些简单地形单元的多项式快速计算方法[100, 101]。“比值法”在

① 地质部物探所编,电法勘探“激发极化曲线册”上、下册,1982。

② 云南省有色局物探队,模型实验总结报告,1966。

③ 阎如,低频偶极虚分量法模型实验图册,冶金部物探公司,交流资料,1981。

④ 牛之珪,地面脉冲瞬变电磁法模型实验图册,冶金部物探二大队,交流资料,1983。

⑤ 地质矿产部第一综合物探大队104队,用电阻网模拟简单地形下有限电性体电测探 ρ 异常特征的初步解释,1983。

⑥ 成都地质学院,斜触层点源场位论与电阻率法地形改正,1977。

直流电法地改中曾被广泛采用, 并取得了良好效果。但“比值法”对同时存在电性体与地形的叠加异常进行地改时, 只有一级近似性, 对此, 我国学者也作了有意义的研究^[102,103], 使地改后异常解释更合理。

“域转换法”基于保角映射原理, 将野外起伏地形下的实测结果, 转换为水平地面上的结果。这种“域转换法”考虑了地形和电性体的相互影响, 是一种完全的地改方法, 可用导电纸简便物理模拟技术来实施。

从 80 年代初开始, 开展了数值模拟技术用于地改的研究, 用多种数值模拟方法先后编制了直流电法地改和 MT 等方法地改的计算程序^[71,78,104-106]。值得一提的是, 相对有限元等数值方法, 边界元法用于地改, 可大大节省内存, 加快计算速度, 原来一些内存量很大, 难以实用和普及的算题, 如直流电法三维地改问题, 采用边界元法后, 可在微机上实现。

3. 激电法进展

激电法是我国应用最广, 效果甚好的一种电法。从 50 年代末开始研究并取得成效以来, 已有 30 多年的发展历史。

在方法技术上, 时域激电由长脉冲发展到短脉冲激电和相应仪器^[42,111], 发展了轻便的频域激电技术^[107-109]; 由多频分别供电发展到双频同时供电同时接收技术和相应仪器^[110]; 对各种电极装置的适用性等方法技术的研究; 这些, 都使数据质量和工作效率明显提高。目前已分别形成技术上较先进的时域激电和频域激电的快速普查系统。

低阻覆盖区的电磁耦合 (EM) 效应对频域激电的干扰较为严重, 但 BM 同时也是有用信息, 如前述, 我国学者已发展了多种校正、分离和利用 EM 效应的方法。近年, 宽频激电 (SIP) 技术的引进和发展, 为分离和利用 EM 效应提供了更有效手段。但当前的 SIP 技术工作效率低, 一时还难以普及。值得指出的是, 最近我国学者经理论和物理模拟论证提出的“对双频信号进行方波相干并进行模拟积分测量”的技术方案和相应仪器^[94], 有可能直接提取到几乎不含 EM 效应的 IP 效应和含很弱 IP 效应的 EM 效应, 此方案易于推广应用, 将来有可能使频域激电数据质量和 EM 信息的利用率明显提高。

在对异常体的产状要素、埋藏深度等推断解释方面, 经历了通过物理模拟和少量简单形体的理论计算来认识激电场的分布规律; 研究和提出各种半定量推断方法, 如特征点法^[112]、固定源法、电磁类比法^[113-115]等; 进一步理论计算和物理模拟来弄清一些稍复杂条件下 (如高低阻覆盖、围岩导电性不同^[54,116]、矿化晕^[117]、地形起伏^[118]等等) 简单形体的激电场的分布规律以改进推断质量; 采用现代数值模拟技术和电算技术对一维、二维、甚至三维形体异常进行正 (反) 演自动而快速定量推断等几个发展阶段。其中某些半定量推断方法, 如电测深特征点求矿体埋深的方法, 因其简便有效, 至今, 仍为基层单位, 广泛采用。

炭化地层和黄铁矿化地层上的激电异常常与矿异常难以区分。为解决这个关键问题, 除采用综合物化探方法外, 还需从激电法本身挖掘潜力。对此, 进行了大量研究。如: 各种岩 (矿) 石激电效应强弱的机理^[47,48]、非线性激电效应^[45,46]、正负极化效应^[119]、(非) 接触极化曲线法^[120,121]、频谱激电 (SIP) 法^[30]等等研究。其中岩 (矿) 石激电效应的强度与导电矿物含量间的关系严重受岩 (矿) 石微结构构造控制的成果对评价异常体

的性质具有重要作用;近年,频域 SIP 法野外工作方法技术、实际应用^[31]和求真参数和计算方法^[30,122]以及时域 SIP 理论和技术的发展^[43,44],为评价激电异常体的性质,提供了一个有望手段;最近,又从理论和物理模拟上,证实了在发送双频电流情况下,相位谱曲线会出现锯齿状非线性特征,对硫化矿,出现这种非线性特征的电流密度比供单种波形时明显减小^[46],这为今后在实际中利用非线性效应来评价异常体的性质跨进了重要一步。

此外,对激电负效应^[123]、①、磁激电法^[124-126]等基础理论问题也进行过较系统研究,有重要进展。

在应用领域方面,初期的激电法主要用于勘查硫化金属矿床,后来发展到诸多领域,如氧化矿床,非金属矿床(石膏、粘土、铝土矿、水、油气资源等),工程地质问题等。

激电找水效果十分显著,但其机理,一直未能被深入弄清,近年通过稍系统研究^[127-129],认识上有所提高。

关于激电找油的机理,原来一直停留在地化理论的设想上,对其实用效果也是怀疑的。我国学者通过对典型油气田的深入而系统的研究^[130,131],证实了油气向上微渗漏作用和与其作用有关的上覆地层中次生黄铁矿物的存在及分布状况,并通过大量实例^[132]证实了这类黄铁矿化地层在地表能产生虽弱但明显的激电异常。从而为激电找油打下了理论基础。

上述成果,大都是从实践中提出问题,经过理论论证,研究实践,发展了理论又用之于实际的,因此发展很快,实用效果很好,具有我国自己特色,不少方面已达到当今国际先进水平。

4. 电磁类电法进展趋势

30 多年来,我国各类电磁法(EM)的进展也是十分显著的。

在方法技术上,从频域测—二次场叠加的总和场方法发展到探测深度较深、分辨率较高、地形干扰较小的测纯二次场的方法,即频域中虚分量振幅法和时域中脉冲瞬变电磁法。在方法理论方面,除早期对一些简单形体的电磁场规律所进行的系统研究外^[58,133],80 年代始,对一些复杂条件下的 EM 场的规律进行了研究,运用积分方程法解决了导电覆盖层下导电围岩中三维体的数值解问题^[82,83],对虚分量电磁法、TEM 法、频率测深法、VLF 法和 MT 法的理论作了系统总结,出版了专著^[1,5,12,14,19]。在应用领域方面,由早期只着眼寻找“大、浅、富”矿,发展到地质填图、水文工程地质调查、煤田地质、油气构造和深部构造勘查等诸领域。应用领域的拓宽,使各类电磁法得到了较快发展。特别是近年来,对 80 年代末引进的 CSAMT 法和新 TEM 法的数据处理方法作了较大改进后,已在不少矿区取得前所未有的地质效果,大有冲破多年来地面 EM 法“推而不广”之势,有望一跃成为找深部金属矿床和勘查石油构造等有效手段。

此外,地下无线电波透视法等方法的理论、技术和实用效果也都有很大进展,不再

① 武汉地质学院北京研究生部,多层介质激电测深法理论量板及激电负效应的研究,国家重点攻关项目成果报告,1985。

详述。

除以上几个方面的进展外, 还值得一提的是, 一些老电法的理论和技术也有较大发展。对国外学者某些错误理论作了订正, 如: 浸染状矿体上自电异常的机制探讨^[52]、磁电勘探理论的订正^[134, 135]等。

四、电法勘查能力和应用效果的发展

1. 勘查能力的提高

建国初期, 电法勘探解决实际问题的能力较低。50 年代中期以后, 随着新老方法技术和仪器的发展, 方法理论的深入, 实践经验的积累, 电法勘探在解决各类地质问题的广度、深入程度、准确度、探测深度以及解决各类疑难地质问题的强度上都有极大提高和发展。下面可以通过一些应用效果和实例略见概貌。

2. 找“矿”效果和若干应用实例

50 年代, 主要靠几种常规电法(电剖面、电测深、自电、充电等法)找矿。当时大批地区属未被勘查过的“处女地”, 一大批早期著名矿产资源的发现或查明都与电法勘探密切相关。如云南个旧锡矿, 辽宁红透山铜矿, 吉林红旗岭大型铜镍矿, 甘肃白家咀子铜镍矿, 青海红沟铜矿, 果洛铜矿, 黑龙江团结结构金矿, 甘肃龙头山特大型铅锌矿等等矿床的发现或查明, 常规电法都起过重要作用。

以后, 除常规电法外, 随着新方法技术的发展, 找矿能力的提高和应用范围的扩大, 导致更多矿产资源被更快地查明。至今, 以电法为主, 配合其它物化探方法和地质手段查明的大小矿产资源和解决的各类地质问题的数量之多, 已难计其数。这里不可能一一列举。下面仅就提高找矿能力后所找到的矿产资源中举几个典型实例以示一般。

(1) 激电法勘查浸染型硫化金属矿床

激电法投入生产后, 与其它物化探方法配合, 除良导性矿床外, 还发现或查明或追索扩大一大批其它电法难以查明的大中小型浸染状硫化矿床。如陕西略阳煎茶岭大型镍矿、河南灵宝银家沟大型多金属矿, 辽宁兰家沟大型钼矿, 内蒙白乃庙铜矿, 河北蔡家营大型铅锌矿, 湖南花垣鱼塘大型铅锌矿, 吉林大黑山特大型斑岩钼矿床西南的长岗岭辉钼矿, 内蒙赤峰红花沟金矿, 河南铜柏山围山域金银多金属矿等一批大(中)型金属矿床^①, 都是以 IP 法为主, 配合其它物化探方法或发现、或查明、或追踪扩大的。其中不少矿床, 曾几上几下, 其它方法效果不佳, 投入 IP 法后才逐步取得效果的。如赤峰红花沟金矿, 全区 80% 地区为厚层黄土覆盖, 地质化探工作困难, 电阻率法等效果不好。直至 1950 年投入 IP 法后, 据 IP 结果布钻 11 个, 10 个孔见到了矿脉或矿化脉, 仅一孔落空。于是打开了找金局面。又如陕西煎茶岭大型镍矿, 1958 年就发现矿点, 但几上几下都无进展。1969 年据 IP 法在深部打到了厚层镍矿, 从此揭开找镍帷幕。以后勘查表明, 以 IP 法为主的综合异常, 皆为镍矿体引起。

(2) 复杂条件下电法找矿实例

① 金属矿电法找矿实例汇编(内部资料), 冶金工业部地球物理探矿所, 1982。

1 云南个旧锡矿

个旧锡矿是世界著名的大型锡、铜、钨矿田,是在复杂条件下,应用电阻率法找到深部大矿的一个杰出实例^{①②}。

个旧锡矿赋存在燕山期黑云母花岗岩体的突起和舌状凹陷部位,而花岗岩体又隐伏在 200—1000m 的深部。该区地形起伏和岩性变化较大,在这样复杂条件下,电阻率法在开始阶段未能奏效。后来,解决了地形、横向电性不均、中间层电性变化校正等关键问题后,至 1957 年,电测深曲线能较正确地反映 500m 深处岩体起伏形态。至 1967 年,可圈定岩体突起的等深线达 800—1000m;查明了更深部岩体的起伏情况,在突起部位找到了锡矿体。其中,仅竹林地区的异常由钻探查明就获锡铜金属储量几十万吨。

2 古老地层推覆体下找煤

淮北煤田传统的找煤模式是第四系覆盖层下找二迭系煤系地层。80 年代,在推覆构造地质理论指导下,人们开始重视在古老地层推覆体下找煤。由于致密坚硬的古老地层形成高弹性波速和高电阻率的屏蔽层,当其较厚时,地震法和直流电测法都不能探测到其下界的地层。近年,开展 CSAMT 法在推覆体下找煤的试验工作,用改进的近场校正法对数据作了校正,成功地解决了古老推覆体下的找煤问题。经钻探验证,在安徽西寺坡成功地找到了推覆体下的煤系地层。

3. 深部找矿实例——新疆阿尔泰可可塔勒等铅锌矿床^[21]

良导性矿床赋存在变质沉积凝灰岩中。常规物化探方法指示了矿区内铅锌矿体的大致分布部位,不能指示深部情况和富矿部位。用瞬变电磁法(TEM)工作后,发现 3 处 TEM 异常。经推断,认为其中 T_1 异常反映的矿体最厚最富,经钻探查证,在 T_1 异常中心深 300m 处,打到了厚百余米高品位的铅锌矿体。据 TEM 结果,还在其它地段打到了富矿,使可可塔勒矿产储量成倍增长,已成为大型铅锌矿床。

4. 频谱激电法(SIP)评价其它电法异常性质的前景

试用 SIP 法表明,由于其信息量丰富,在评价异常体性质和找较深部矿床方面有特色。1983 年江苏磐龙岗经 IP 法普查^[21],发现一约 280m×1100m 的东西向 IP 异常带。但异常性质不明。后来用 SIP 剖面进行检查评价后, τ 等参数反映,IP 异常乃浸染型硫化矿体所引起。经两孔查证,基本相符,见到了含工业品位铜、钼的黄铁矿化带。

5. 电法找水

早期,勘查水资源的物探方法主要采用电阻率法。至 60 年代初,在国外学者(Victor Vacquier 等,1957)提出的用激电二次场衰减速度找水的思想和其实验结果的启示下,我国也开展了有关研究,取得成功^[137]。后来,把激电场衰减速度具体化为半衰时、衰减度、激发比等特征参数。经大量实践,发现应用这些参数,不仅能较准确地找到各种类型的水资源,且可在同一水文地质单元内,预报涌水量大小。此外,还可利用 IP 法圈出高矿化水范围,保障人民安全。至今,电法(电阻率法和 IP 法)找水队伍已普及全国各基层单位,形成了群众性的电法找水队伍。为全国各地解决了难以计数的各种类型的大小水

① 李治华,杨尔煦,个旧锡矿区综合地球物理勘探工作,物化探经验汇编,冶金部地球物理勘探总队编印,1963。

② 金属矿电法找矿实例汇编(内部资料),冶金工业部地球物理探矿公司编,1982。

资源问题，成绩十分突出。

在上述基础上，近年还发展了二次时差法^[138]，差异激电法探测地下水，有初步效果。

6. 激电找油

1978 年我国曾在华北任丘等油田开展过激电找油的试验工作，取得初步效果^[139]。

80 年代，在激电找油机理和实用可能性方面取得系统研究成果^[130,132]的基础上，在新疆准噶尔^[140]、华北大港^[141]、河南中原等地开展了较大面积（数千平方公里）的 IP 找油工作，取得了较明显的地质效果。在圈定油气藏大致平面分布范围、富集中心、评价构造含油性和发现新油气田等方面，IP 法均发挥了作用。其中如：准噶尔盆地东南缘，在一个近 80km² 的 IP 异常范围内打的近 20 个钻孔，都见到工业油气层。其中只有二个见油孔是在 IP 工作前一年打的（当时认为构造不好，未被重视）。这块地段目前已成为一中型油气田。

五、结 论

40 多年来，我国的电法勘探经历了开创、发展和壮大的阶段。无论在应用领域还是理论领域，都取得丰硕的果实。是广大电法工作者艰苦奋斗和辛勤劳动的结果。

我国是一个人口众多、幅员辽阔的发展中国家，工业化的重任还远未完成。它要求能源、金属原材料等基础工业有较大的发展。众所周知，随着勘查工作程度的提高，资源大量地被开采，要求电法勘探向深度和广度进军，难度很大，电法面临着严峻的挑战。作为资源快速预测的航空电磁系统，尚未构成有效的生产力；常规地面电法勘探深度过浅；新方法投入太少；基层生产队伍中，仪器装备未能及时更新，严重地制约了方法的发展。未来的电法勘探研究任务，包括基础理论研究和技术研究，依然是十分艰巨的。

今后应该结合中国的实情，研究中、长期的发展战略目标，从根本上推动电法的发展。

21 世纪的到来，中国的电法将从发展、壮大进入自主开拓的新纪元，赶上和超过世界先进行列。回首过去，展望未来，愿中国电法勘探蓬勃发展。

在撰稿过程中，陈云升、吴以仁、徐世浙、何继善、许洪海、牛之璉，王式铭等同志为本文提供了有关素材，傅良魁、李金铭、张桂青等同志对本文提出了宝贵的意见，特此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 许洪海、王守垣，虚分量电磁法，北京：地质出版社，1987。
- [2] 牛之璉主编，脉冲瞬变电磁法及应用，长沙：中南工业大学出版社，1986。
- [3] 蒋邦远、曹毓英，DCM-1 型电磁脉冲系统在某地应用实例及其实用性详述，物探与化探，5，4—10，1981。
- [4] 地质科学研究所地球物理探矿研究所，地面电磁法实例，北京：地质出版社，1975。
- [5] 牛之璉，时域瞬变电磁法原理，长沙：中南工业大学出版社，1993。
- [6] 张赛珍，激发电位法研究结果（一）（二），地球物理勘探，12，6—11，1959，1，24—28，（连载）1960。

- [7] 地质部地球物理探矿局地球物理探矿研究室编, 激发极化法工作参考手册, 北京: 中国工业出版社, 1962.
- [8] 张赛珍, 1959—1961 年全国激发极化法工作开展情况总结, 全国激发极化法推广应用交流会上报告, 杭州, 1962.
- [9] 张赛珍, 激发极化法工作中若干技术问题, 全国激发极化法推广应用交流会上报告, 杭州, 1962.
- [10] 何裕盛、夏万芳, 充电法, 北京: 地质出版社, 1978.
- [11] 刘振铎、石维熊, 垂直磁偶极子电磁频率测深法, 物探与化探, 5, 22—32, 6, 16—22, (连载) 1980.
- [12] 刘振铎主编, 磁偶源频率测深法, 北京: 地质出版社, 1985.
- [13] 陈明生、陈琳、周江, 频率测深资料数字解释, 物探与化探, 11, 374—381, 1987.
- [14] 刘国栋, 大地电磁测深法, 北京: 地震出版社, 1987.
- [15] 陈乐寿, 大地电磁测深资料的二维正反演问题, 大地电磁研究, 北京: 地震出版社, 1983.
- [16] 陈明生、陈乐寿、王天生, 用改进广义逆矩阵法解释大地电磁测深及电测深资料, 地球物理学报, 26, 390—400, 1983.
- [17] 王家映, Douglas Oldenbury, Shlomo Leoy, 大地电磁模拟地震解释法, 石油地球物理勘探, 1, 66—79, 1985.
- [18] 徐世浙, 赵生凯, 二维各向异性地电剖面大地电磁场的有限元解法, 地震学报, 1, 80—90, 1985.
- [19] 史保连主编, 甚低频电磁法, 北京: 地质出版社, 1987.
- [20] 史保连, 甚低频电磁法及其在岩溶地区的应用, 物探与化探, 6, 237—246, 1982.
- [21] 虞景毓, 瞬变电磁法在深部找矿中的应用, 地质与勘探, 27 (8), 39—43, 1991.
- [22] 牛之琰、李爱华, 瞬变电磁法在铅锌金矿床上的找矿效果, 地质与勘探, 27, 11, 41—43, 1991.
- [23] 牛之琰, 瞬变电磁测深法对导电层的探测能力, 地质与勘探, 28 (1), 42—47, (7), 37—40, 1992.
- [24] 傅良魁, 复电阻率异常的频谱及空间分布规律, 地质与勘探, 17 (2), 46—53, 1981.
- [25] 张赛珍、王式铭、李英贤等, 我国几个金属矿区岩(矿)石的低频电相位频率特性及其影响因素, 地球物理学报, 27, 176—189, 1984.
- [26] 张赛珍, 岩(矿)石低频电相位频率特性的物理模型及其拟合方法, 物化探计算技术, 6, 51—53, 1984.
- [27] Liu Song K. Vozoff, The complex resistivity spectra of models consisting of two polarizable media of different intrinsic properties, *Geophysical Prospecting*, 33, 1029—1062, 1985.
- [28] 王庆乙、蒋彬、傅建中等, 频谱微分数学模型, 地质与勘探, 22 (1), 46—51, 1986.
- [29] 刘崧, 计算视复电阻率的新的近似公式, 地球物理学报, 31, 687—694, 1988.
- [30] 罗延钟、张桂青, 频率域激电法原理, 北京: 地质出版社, 1988.
- [31] 吴之训, 频谱激电法在几个金属矿区的应用效果, 物探与化探, 11, 281—290, 1987.
- [32] 王庆乙、朱家宝、黄利贤, 有限面极化体界面的极化特性及其复电阻率异常奇异性, 地质与勘探, 26 (1), 36—43, 1990.
- [33] 曹孝廉、王延良, 脉冲式航电仪及其在地质填图和找矿中应用, 长春地质学院学报, 3, 1—9, 1979.
- [34] 吴以仁、邢凤桐主编, 钻孔电磁波法, 北京: 地质出版社, 1981.
- [35] 瞿兴昌、高文利、周鹤鸣, JW-4 地下电磁波法仪, 计算技术在地学中的应用国际讨论会论文摘要, 324—327, 北京: 地质矿产部计算中心.
- [36] 长春地质学院、地质矿产部北京计算中心电波法协作组, 钻孔电磁波法扩大应用后资料的处理和解释问题, 物探与化探, 4, 17—32, 84—97, 167—177, (连载) 1982.
- [37] 张子玲、钱樟树、朱瑞、吴以仁, 地下电磁波法处理解释工作站, 计算技术在地学中的应用国际讨论会论文摘要, 318—324, 北京: 地矿部计算中心.
- [38] 张子玲, 在钻孔电磁波法资料处理、解释系统中的 CT 方法, 测井与井中物探, (2), 1989.
- [39] Wu Yi-ren, Li Xiao-quang, Tang Yu-ming, A new interpretation way to the method of underground electromagnetic waves—The establishment of recognizing patterns, Oral Presentation, Ground Penetrating Radar II, 54th EAEG Meeting and Technical Exhibition, Paris, 1992.
- [40] 郭才华、宋瑞卿、姜秀兰, 高温高压下花岗岩与角闪岩的电导率测量, 中国地球物理学会岩石和矿物物理性质论文集, 195—203, 北京: 地震出版社, 1988.

- [41] 陈大元、王丽华、陈峰等, 单轴压力下岩石电阻率的研究——电阻率的各向异性, 中国地球物理学会岩石和矿物物理性质论文集, 204—212, 北京: 地震出版社, 1988.
- [42] 张赛珍, 激发极化法双向短脉冲供电的工作方法技术在某铜矿区的研究, 中国地球物理学会勘探地球物理学学术讨论会(庐山)报告(附图册), 1965.
- [43] 傅良魁、史元盛, 论时域激电法电化学异常的时间谱, 地质与勘探, 16(8), 42—50, 1980.
- [44] 李金铭、陈亮洪, 埋藏极化体上时间域激电谱的理论研究, 桂林冶金地质学院学报, 7, 295—305, 1987.
- [45] 吕新友、傅良魁, 金属矿石的激发极化非线性谱特征, 物探与化探, 15, 358—364, 1991.
- [46] 李大庆, 频谱激电非线性效应研究, 博士学位论文, 中南工业大学地质系, 1991.
- [47] 张赛珍、王式铭, 影响矿化岩石和矿石极化率(η)值的因素及其作用规律, 地质学报, 1, 95—112, 1974.
- [48] 温佩琳, 围岩溶液对岩(矿)石的极化率和分解电位的影响, 中国地球物理学会第一届岩石物性学术讨论会论文报告, 上海, 1982.
- [49] 张充润, 谐变电流场岩、矿石的电性研究, 中国地球物理学会第一届岩石物性学术讨论会论文报告, 上海, 1982.
- [50] 王庆乙, 论含矿岩层的低频率介电性, 勘探地球物理北京(89)国际讨论会论文摘要, 193, 1989.
- [51] 海戴媛、张意珠, 赤铁矿的激发极化特性及其控制因素, 桂林冶金地质学院学报, 1, 69—80, 1981.
- [52] 邓海声, 金属硫化矿自然电场成因机理的多层模型, 桂林冶金地质学院学报, 1, 65—70, 1985.
- [53] 温佩琳、仇勇海著, 地电化学基础及其应用, 长沙: 中南工业大学出版社, 1991.
- [54] 傅良魁主编, 激发极化法, 北京: 地质出版社, 1982.
- [55] 王庆乙、蒋彬、黄利贤, 偏置频谱激电法(BSIP), 地质与勘探, 27(5), 34—42, 1991.
- [56] 罗延钟、方胜, 极化椭球体上频谱激电法的异常性态, 桂林冶金地质学院学报, 5, 49—63, 1985.
- [57] 陈福祥、于安良, 直立接触面视电阻率量板, 地质与勘探, 14(1), 73—80, 1978.
- [58] 地质部物探所交电组, 定源电磁法模型实验图册, 物探与化探, 3, 1—126, 1973.
- [59] 罗延钟、邢纪水, 薄水层直流电法的模型实验, 地质部电测面法规范, 附录二, 北京: 中国工业出版社, 1964.
- [60] 何裕盛、夏万芳, 导电纸模拟技术方法, 地质技术革新展览会技术资料选编, 北京: 中国工业出版社, 1971.
- [61] 何继善, 导电纸模拟实验的一些技术问题, 矿冶科技, 2, 1976.
- [62] 林崇远, 电测面法地形改正的模型实验方法, 地球物理学报, 1, 66—72, 1966.
- [63] 唐大荣、张文梁, 直流电测深的自动解释, 石油地球物理勘探, 5, 55—71, 1980.
- [64] 陈仲候、何昌礼, 电阻率测深的数字解释, 物探与化探, 4, 27—31, 1980.
- [65] T₁-59 计算机物化探程序汇编, 物化探计算技术, 增刊 3, 1984.
- [66] 罗延钟、张桂青, 电测深资料的一种快速电算解释方法, 物化探电子计算技术, 1, 1—13, 1983.
- [67] 徐世浙, 电阻率分层线性变化的水平层的点电源电场的数值解, 地球物理学报, 29, 84—90, 1986.
- [68] 复旦大学数学系, 电法测井的数学方法——有限元法的应用, 江汉石油技术情报, 1976.
- [69] 赵生凯、徐世浙, 有限元法计算良导嵌入二维模型的大地电磁测深曲线, 物探与化探计算技术, 1, 14—21, 1983.
- [70] 徐世浙、赵生凯、楼云南, 水平地形三维电场的边界单元解法, 物探与化探计算技术, (3), 53—60, 1984.
- [71] Xu Shi-zhe, Gao Zu-cheng, Zhao Sheng-kai, An integral formulation for three-dimensional terrain modeling for resistivity surveys, *Geophysics*, 53, 546—552, 1988.
- [72] 邹可善、张树楠, 任意形三度体激发极化参数的计算, 中国地球物理学会暨学术讨论会论文摘要汇编, 55, 中国地球物理学会学术会议筹委会, 1980.
- [73] 周熙襄、钟本善、严忠琼等, 点源二维电法正演的有限单元法, 物化探电子计算技术, 3, 19—40, 1983.
- [74] 罗延钟、孟永良, 关于用有限单元法计算二维构造点电源电场的几个问题, 地球物理学报, 29, 613—621, 1986.
- [75] 周熙襄、钟本善, 三维任意形体电法数值模拟的积分方程法, 物化探计算技术, 7, 125—135, 1985.
- [76] 王兴泰、曲增芳、沙树勋等, 直流电场中三维地电模型数值求解的面积分法, 物化探计算技术, 8, 89—100, 1986.
- [77] 周熙襄、钟本善编著, 电法勘探数值模拟技术, 成都: 四川科学技术出版社, 1986.
- [78] 田宪滨、黄兰珍、寸树苍, 点源场电阻率法三维地形改正的边界元法, 成都地质学院学报, 13, 170—175, 1986.

- [79] 罗延钟、张桂青, 电子计算机在电法勘探中的应用, 武汉: 武汉地质学院出版社, 1986.
- [80] 田宪谟、黄兰珍, 任意三维地电体 ρ_s 和 η_s 的边界元数值解, 第二届勘探地球物理学术讨论会论文(摘要)集, 北京: 学术期刊社, 1986.
- [81] 田宪谟、黄兰珍著, 电法勘探用边界单元法, 北京: 地质出版社, 1990.
- [82] 俞黎明、许洪海, 三维导电导体电磁响应的数值解, 地球物理学报, 29, 176—184, 1986.
- [83] Z. Xiang, Y. Luo, S. Wang, G. Wu, Induced polarization and electromagnetic modeling of a three-dimensional body buried in a two-layered anisotropic earth, *Geophysics*, 51, 2235—2246, 1986.
- [84] 李晓波、朴化荣, 两层大地中三维体的激发极化与电阻率响应的积分方程模拟, 地球物理学报, 31, 342—352, 1988.
- [85] 罗延钟、何展翔、马瑞伍, 可控源音频大地电磁法的静态效应校正, 物探与化探, 15, 196—202, 1991.
- [86] 何展翔, 相权静校正, 中国地球物理学会第二次全国大地电磁学术讨论会论文报告, 北京, 1991.
- [87] 周晋国、寇绳武、宋震炎等, 校正电磁频率测深“静态偏移”的有效方法, 物探与化探, 15, 471—474, 1991.
- [88] 王军、王庆乙, 层状大地有限长导线接地频域电磁响应的快速计算方法, 地质与勘探, 28, 30—38, 1992.
- [89] 罗延钟、周玉冰, 一种新的 CSAMT 资料近场校正方法, 中国地球物理学会年刊, 北京: 地震出版社, 1992.
- [90] 张振浩、罗延钟, 变频法电磁耦合的一种非线性近似校正方法, 物探与化探, 5, 78—81, 1981.
- [91] 战克、王继伦, 变频法中电磁耦合的近似校正方法, 地质与勘探, 17, 40—46, 1981.
- [92] Liu Song, A new IP decoupling scheme, *Exploration Geophysics*, 15, 99—112, 1984.
- [93] 何继善、鲍光淑, 抗耦频率域激电仪, 中国地球物理学会及中国仪器仪表学会电法仪器学术交流会(苏州)论文报告, 1983.
- [94] 王少武, 直接、同时、分别提取激电效应与电磁效应的研究, 博士学位论文, 长沙: 中南工业大学地质系, 1991.
- [95] 徐世渐, 二度地形对电阻率法的影响, 地球物理学报, 15, 73—82, 1966.
- [96] 王继伦, 座标网模拟转换法的理论基础, 冶金地质科技情报, 1974.
- [97] 屈超纯, 角域非均匀介电点源电位分布, 应用数学学报, 4, 300—311, 1978.
- [98] 葛为中, 视电阻率法的地形改正, 地球物理学报, 20, 299—311, 1977.
- [99] 葛为中, 电阻率法中近似组合规划及应用, 地质与勘探, 16, 46—52, 1980.
- [100] 何继善、曾宪明, 电阻率法地形改正的多项式快速计算方法, 物探与化探, 8, 27—33, 1984.
- [101] 葛为中、江征彪, 地形视电阻率快速算法的多项式系数, 桂林冶金地质学院学报, 4, 51—56, 1984.
- [102] 李治华, 起伏地形上电阻率法异常的解算, 物探与化探, 4, 22—26, 1980.
- [103] 何继善、周正秀, 点电源场地形影响的几个问题, 中南矿业学院学报, 2, 12—25, 1978.
- [104] 罗延钟、万乐, 二维地形不平条件下均匀外电场的有限差分模拟, 物化探计算技术, 6(4), 15—26, 1984.
- [105] 徐世渐, 三维地形均匀各向异性岩层点源电场的边界单元解法, 山东海洋学院学报, 2, 54—61, 1985.
- [106] 徐世渐、王庆乙、王军, 用边界单元法模拟二维地形对大地电磁场的影响, 地球物理学报, 35, 380—388, 1992.
- [107] 袁宏基, DBJ-1 型交流激发极化仪, 物探与化探, 3(5), 88—93, 1979.
- [108] 青海地质局物探队, 变频仪试验效果, 激发极化法和电磁法文集, 北京: 地质出版社, 1980.
- [109] 任通璋, 交流激电的一些试验结果, 激发极化法和电磁法文集, 北京: 地质出版社, 1980.
- [110] 何继善、鲍光淑, 频率域激发极化法中的双频道幅频观测, 物探与化探, 7, 182—192, 1983.
- [111] 物探所, DWJ-1 时域激电仪, 中国地球物理学会仪器与观测系统专业委员会、中国仪器仪表学会地质仪器学会电法仪器学术交流会(苏州)论文报告, 1983.
- [112] 张翼珍, 用激发极化测深估算激发体深度的一个实用方法, 地球物理学报, 13, 162—179, 1964.
- [113] 桂林地质所, 激发极化法异常定量计算的一个方法——类磁选择法, 激发极化法文集, 北京: 地质出版社, 1975.
- [114] 常守恩, 激发极化异常正演计算的类磁法, 物探与化探, 6, 178—190, 1982.
- [115] 罗延钟, 极化体与围岩导电性不同时激电(中梯)异常的电磁类比解释问题, 地质与勘探, 17(10), 51—54, 1981.

- [116] 傅良魁、史元盛, 金属导电因子对激电异常的作用, 物探与化探, 6, 270—278, 1982.
- [117] 何继善、曾宪明, 均匀电场中带浸染状球壳的球体的激电异常, 中国金属学会冶金物探学术会议(北戴河)论文报告, 1980.
- [118] 陈颖祥、梁鸿喜, 地伏地形条件下激电异常的定性分析和定量计算, 地质与勘探, 13 (1), 67—72, 1977.
- [119] 物探所激电组, 利用阴极阳极极化差异效应评价激电异常, 激电极化法和电磁法文集, 北京: 地质出版社, 1980.
- [120] 温佩琳, 接触极化曲线法原理及实验结果, 电法勘探文集, 北京: 地质出版社, 1986.
- [121] 戴仁寿、傅良魁, 非接触极化曲线法一些实验研究结果, 现代地质, 6, 354—363, 1992.
- [122] 王自力、张赛珍, 一种真复电阻率谱参数的求解方法, 地球物理学报, 33, 712—721, 1990.
- [123] 李金铭、赵改善, 水平层激电负效应和超正效应分布规律的研究, 物探与化探, 11, 364—373, 1987.
- [124] 物探所, 北京地质研究所、北京物探队, 磁激极化法在我国的初步试验结果, 北京地质科技情报, 2, 69—76, 1979.
- [125] 傅良魁, 磁激极化法探矿理论的几个问题, 地球物理学报, 22, 156—168, 1979.
- [126] 傅良魁, 磁激极化法中水平圆柱体上的一些研究结果, 地球物理学报, 23, 197—206, 1980.
- [127] 沈明性, 激电变场法找水问题探讨, 物探与化探, 3, 59—69, 1979.
- [128] 贺绍英, 含水岩石的几种极化机制的介电弛豫时间, 物探与化探, 5, 305—310, 1981.
- [129] 李金铭、程学栋、高杰, 激电找水应用基础研究, 物探与化探, 14, 266—275, 1990.
- [130] 张赛珍、聂零五、张树椿等, 激发极化法探测油气田——异常成因及其与油气藏关系的探讨, 地球物理学报, 29, 597—612, 1986.
- [131] 张赛珍, 激发极化法勘查油气藏的应用理论基础和应用效果, 中国科学技术协会 1988 年学术年会学术论文, 1—2, 1988.
- [132] 聂零五、张赛珍、周安昌, 激发极化法探测油气田——效果及异常模式探讨, 地球物理学报, 30, 412—422, 1987.
- [133] 朴化荣、沙树琴、王廷良, 均匀大地上空的时间域电磁响应, 地球物理学报, 23, 207—218, 1980.
- [134] 傅良魁, 评磁电勘探线积分法, 物探与化探, 7, 273—278, 1983.
- [135] 傅良魁, 论被动源磁电勘探理论, 地球物理学报, 25, 538—548, 1982.
- [136] 吴汉荣、谢婷婷、王式铭等主编, 勘查地球物理勘查地球化学文集, 第 3 集, 激发极化法专辑, 北京: 地质出版社, 1984.
- [137] 钟新维、陈居和, 找水新法, 北京: 水利出版社, 1987.
- [138] 谢明魁, 二次时差法探测地下水, 物化探计算技术, 9, 331—337, 1987.
- [139] 刘任, 应用激发极化法直接寻找油气研究, 石油地球物理勘探, 4, 50—54, 1980.
- [140] 张赛珍、石昆法、周季平¹等, 激发极化法勘查油气藏的应用基础和应用实例, 物探与化探, 13, 392—401, 1989.
- [141] 周安昌、杨冠鼎、王朝举, IP 找油在大港油田的应用, 物探与化探, 14, 339—345, 1990.

AN OVERVIEW ON THE DEVELOPMENT OF THE ELECTRICAL PROSPECTING METHOD IN CHINA

ZHANG SAI-ZHEN

(*Institute of Geophysics, Academia Sinica, Beijing 100101*)

WANG QIN-YI

(*Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, CNNC, Beijing 100012*)

LUO YAN-ZHONG

(*China University of Geosciences, Wuhan 430074*)

Abstract

The initial stage of the electrical prospecting method before the establishment of People's Republic of China is introduced at the beginning part. This paper mainly summarizes the great progress of the electrical prospecting method since the establishment of People's Republic of China for 45 years, but it centers on the development of the electrical method for metal ore deposits exploration according to the following items: the general case of the new methods and techniques, the behaviour and rules of the electrical property of rock or ore rock, the causal mechanism of the IP phenomenon, the positive (opposite) problem, the correction of terrain effect, the IP and EM methods, the practical capability and results on the exploration of electrical methods.

Key words Electrical exploration, Progress, Overview, China.