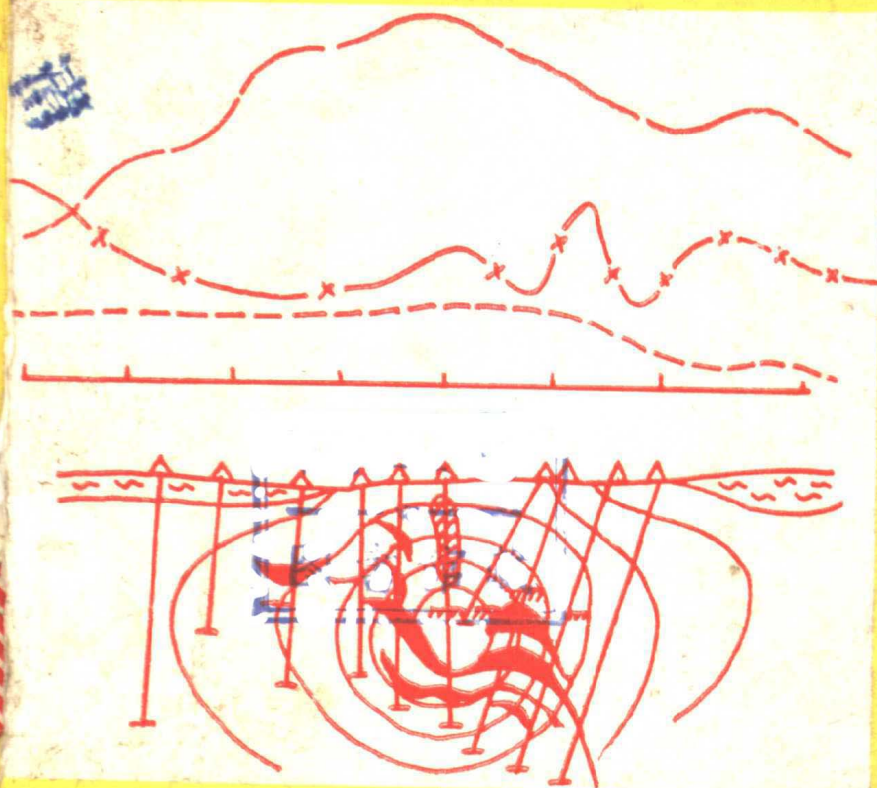


地球物理方法的 综合应用



地球物理方法的综合应用

〔苏〕 A·Г·塔尔霍夫 B·M·邦达连科 A·A·尼基京 著

曹 玉 姜 枚 译

李 方 锦 校

地 质 出 版 社

内 容 提 要

《地球物理方法的综合应用》一书共十一章，分为两个部分。第一部分叙述了地球物理方法综合应用的理论，调查目标的物理-地质模型的概念和建立，地球物理方法应用条件的评述，地球物理反问题解的非单值性问题，资料的综合解释方法，以及从地质-经济效益出发，选择合理的综合地球物理方法问题。第二部分列举大量实例论述综合地球物理方法在解决地质填图，普查和勘探石油、天然气、煤、金属与非金属矿产，水文地质和工程地质以及矿山开发等问题方面的实际应用。

本书对我国地球物理、地质人员在如何更合理和有效地综合应用各种地球物理方法方面会有所启迪。本书也可供地质院校物探、地质专业师生阅读参考。

本书第一至第六章由曹玉翻译，第七至第十一章由姜枚翻译。全书由李方锦校对。

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

А. Г. ТАРХОВ

В. М. БОНДАРЕНКО

А. А. НИКИТИН

Москва «НЕДРА» 1982

地球物理方法的综合应用

А.Г.塔尔霍夫 В.М.邦达连科 А.А.尼基京 著

曹 玉 姜 枚 译

李方锦 校

责任编辑：张怀素

地质出版社出版发行

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

开本：850×1168^{1/32} 印张：9 字数：231,000

1988年3月北京第一版·1988年3月北京第一次印刷

印数：1—2,100册 国内定价：2.60元

ISBN 7-116-00136-0/P·120

统一书号 13038·新521

前 言

在苏联，地球物理工作从一开始就具有综合性质。1918年，具有历史意义的有关研究库尔斯克磁异常（KMA）的列宁法令就已经规定，要求使用当时已有的全部地质勘探手段，首先是各种地球物理方法。实际上，应用地球物理学基本上沿两个方向发展：(1)改进已有的地球物理方法和制定新的地球物理方法；(2)拟定解决具体地质问题（各种矿产的普查和勘探，地质填图，工程地质调查，矿山工作等）的合理的综合方法。

О. Ю. 施密特、Г. А. 甘布尔采夫、А. И. 扎博罗夫斯基、В. В. 费丁斯基、А. Г. 塔尔霍夫、Л. Я. 涅斯捷罗夫、А. А. 洛加乔夫、И. Г. 克卢申、Н. Я. 库宁、Г. С. 瓦赫罗麦耶夫、В. В. 勃罗多沃依等苏联科学家，在研究地质勘探方法的综合应用问题中起了杰出的作用。目前在苏联，大多数地质勘探问题是通过综合应用各种地球物理方法来解决的。在国外，综合应用的思想也得到公认（虽然比苏联要迟些），特别是在加拿大，为了普查金属矿床而进行地面、海洋和航空测量时，总是协同应用地质、地球化学和地球物理方法。

苏联综合地球物理调查卓有成效的发展应归功于在全苏范围内有计划的地质研究。与此同时，这一过程要求培养专门的地球物理干部。建立起“地球物理方法综合应用”新学科，是苏联地球物理工作者的功绩。Л. Я. 涅斯捷罗夫在列宁格勒矿业学院首先讲授了这门课程，而后从1955年起，А. Г. 塔尔霍夫在莫斯科地质勘探学院（МГРИ）开设了该课。目前，它已被列入所有的培养勘探地球物理专门人才的大学的教学计划。

在上述课程的基础上，并考虑到苏联及其他国家在综合应用方面的成就，在莫斯科地质勘探学院由А. Г. 塔尔霍夫倡议设立并讲授了“勘探地球物理学中综合应用的原理”这门新课程，重点

是综合应用的理论基础。1972年, B. M. 邦达连科在奥斯曼大学地球物理中心(印度海得拉巴)讲授了这一课程, 从1978年起在莫斯科地质勘探学院地球物理系由A. A. 尼基京讲授该课。在B. B. 邦达连科给莫斯科地质勘探学院地质系学生讲授的“普查和勘探地球物理方法”课程中也阐述了综合应用的基本原理。

本书是在上述课程讲义和1977年由“Недра”出版社出版的我们的同名专著的基础上写成的。内容包括两部分。第一部分阐述综合应用的理论; 研究对象的物理-地质模型的建立, 地球物理方法应用条件的评述, 地球物理反问题解的非单值性问题, 资料的综合解释方法, 以及合理的综合地球物理方法的选择及其地质-经济效益的评价。第二部分叙述具有现代技术和专门用途的综合地球物理方法, 用于解决地质填图, 可燃性矿产、金属和非金属矿产的普查和勘探, 水文地质, 工程地质, 工程技术和矿业等方面的问题。其中“地质填图”部分是由莫斯科地质勘探学院的讲师Г. В. 杰穆拉编写的。

本书是“地球物理方法的综合应用”课程的第一本教科书, 作者衷心地感谢读者们提出批评和意见, 来信请寄103912, Москва, ГСП-3 проспект Маркса, 18, МГРИ, Геофизический факультет或者103663, Москва, ГСП-3, Третьяковский проезд, 1/19, издательство «Недра»。

目 录

前言

缩略语一览表

绪论	1
第一部分 综合应用的原则	6
第一章 基本概念	6
第一节 地球物理调查的目的和任务	6
第二节 物理-地质模型	9
第三节 正常场、异常和干扰	15
第四节 地球物理方法合理综合的概念	18
第二章 地球物理方法的应用条件	23
第一节 岩石物理性质的差异 (对比度)	23
第二节 引起异常的目标的几何参数	32
第三节 干扰的影响	36
第三章 反问题解的非单值性	46
第一节 地球物理异常性质的确定	46
第二节 地球物理反问题的定量解	51
第三节 非单值解范围的缩小	59
第四章 地球物理测量的观测精度和测网	67
第一节 观测精度的设计	67
第二节 观测网点的选择和计算	71
第五章 地球物理资料的处理和解释	83
第一节 地球物理异常的划分及解释	84
第二节 具有地质目标先验信息时的综合解释	89
第三节 按自学原则的地质目标分类	97
第四节 地球物理资料综合解释的定量方法	102
第五节 综合地球物理资料的地质解释原则	109

第六章	选择地球物理综合方法的可能途径	113
第一节	选择合理的地球物理综合方法的基本原则	113
第二节	地球物理方法的地质效果	119
第三节	地球物理方法的经济效益	127
第四节	在评价地质-经济效益的基础上选择地球物理的综合方法	132
第二部分	解决实际问题时地球物理方法的综合应用	144
第七章	地质填图	145
第一节	区域性地质填图	145
第二节	大比例尺和详细地质填图	151
第三节	水文地质和工程地质测量	162
第八章	主要成因类型矿床的普查	167
第一节	外生矿床	168
第二节	内生(岩浆成因)矿床	188
第三节	变质成因矿床	202
第九章	可燃性矿产的直接普查与勘探	205
第一节	油田和天然气田的直接普查	205
第二节	油田和天然气田的勘探	208
第三节	煤田和油页岩的勘探	214
第十章	金属与非金属矿产的直接普查与勘探	222
第一节	黑色金属	222
第二节	有色金属	227
第三节	贵金属元素、稀有元素和放射性元素	233
第四节	非金属矿产	242
第十一章	地球物理在水文地质、工程地质、工程技术和矿业中的应用	252
第一节	地下水的普查和勘探	252
第二节	建筑物地基的勘测	258
第三节	多年冻结岩石的研究	270
参考文献		275

绪 论

苏联建设共产主义的物质-技术基础，要求各种矿物原料给经济发展以充分的保证。要提高矿床普查和勘探的效果，应当在地质勘探过程中广泛地应用地球物理方法。

现代勘探地球物理学在其锦囊中备有许多种方法，但在解决任何实际问题时，除地球物理调查外，地质和地球化学调查也具有很大意义。

勘探地球物理学 这是一门应用科学，其方法用于研究地壳的结构，目的是普查和勘探矿床和解决多种多样的工程地质、矿山开采以及其它问题。

表1列出了以B.B.费丁斯基分类法为基础、按所测物理场的性质和类型对现代地球物理方法所作的分类。

勘探地球物理学按应用范围可划分为区域的、油气田的、金属矿的和工程的。前两类常常统称为构造地球物理学。

根据测量物理场的场所和所解决问题的特点，又可划分出一些勘探地球物理学的分支，如卫星的、航空的、地面的、海洋的、井中的（测井）和地下的等地球物理学。地下地球物理学与测井不同的是它研究的岩石较远离钻孔和坑道。

地球物理方法的优点在客观上保证它们能广泛地用于实际地质勘探工作，这些优点是：（1）有可能研究未出露地表的地质目标；（2）由地质目标产生的物理场信息是客观的和大量的；（3）成本较低而效率很高。

勘探地球物理学的缺点是：（1）反问题解的多值性；（2）在寻找矿床时通常测量由间接找矿标志引起的物理场，而不是来自矿体的直接信号。

综合应用各种地球物理方法，可以大大减少地球物理调查成

1
11/12

一、表

地球物理方法		卫星地球物理(在宇宙中测量)			空中地球物理(航空物探)			地面地球物理(在地面测量)		
		天然场	人工场	天然场	人工场	天然场	人工场			
重力	卫星重力勘探	——	——	航空重力勘探	——	——	重力勘探	天然场	——	人工场
	卫星磁力勘探	——	——	航空磁力勘探	——	——	磁力勘探; 磁场短期变化法			
磁	无源无线电探测法	——	有源无线电探测法	——	感应法(感应剖面、旋转磁场、无限长导线、过渡过程); 无线电法; 有源无线电探测法	——	自然电场法; 大地电磁法, 交变天然场法	天然场	——	人工场
电	——	——	——	——	——	——	电阻率法(测深、对称剖面), 感应法和非稳定场法(低频感应法、激发电法、频率测深、建立场法、过渡过程法、电位梯度差法), 高频方			
地震	——	——	——	——	——	——	地震研究对比法	天然场	——	人工场
	——	——	——	——	——	——	法(无线电波透视法、无线电波法)、部分金属元素提取法、反射波(共深度点)法、折射波法、横波和体波法、可控定向接收法、深部地震探测法			
压电	——	——	——	——	——	——	压电剖面法	天然场	——	人工场
地热	——	——	——	——	——	——	伽马法, 中子法, 中子伽马法, 伽马-中子法			
放射线	——	——	——	——	——	——	伽马法, 中子法, 中子伽马法, 伽马-中子法	天然中子场法	——	人工场
核地球物理	——	——	——	——	——	——	伽马法, 中子法, 中子伽马法, 伽马-中子法			

重力	海洋重力勘探	—	重力测井	—	地下重力勘探	—
磁	水磁勘探	—	磁化率测井	核-磁测井	地下磁法勘探	—
电	自然电场法	电阻率法 (测深法, 剖面法)	自极化电位测井, 电位测井	电阻率法, 电流法, 激发极化法), 电磁测井 (感应法、电介质法)	自然电场法	电阻率法 (测深法、剖面法、充电法), 激发极化法, 感应法、过渡过程法和高频电波法 (无线电波透视法、无线电波法)、接触极化曲线法部分金属元素提取法
地震	—	反射波和折射波法, 深部地震测深	—	声波测井, 地震测井	研究岩体“噪声”的方法	反射波法, 折射波法, 垂直地震剖面法, 声波透视法
压地	—	—	—	—	—	压电剖面和压电透视法
电热	—	—	热测井, 红外测井	—	地热勘探 (温度和热流测量)	—
放射性测量和核地球物理法	海洋伽马测量	—	天然中子测井	伽马测井, 中子伽马测井, 伽马中子测井	μ -介子法	—

果解释的多值性。

综合应用的基本思想和目的是单值地解决所提出的问题。但是由于地球物理方法的多种多样，就产生了如何从中选取信息量最大的方法和确定其应用顺序，如何分配各种方法的经费以获取最大效果等问题，也就是如何降低开采每吨矿产的成本的问题。这样的效果只有将地球物理方法合理地（最佳地）综合应用才可能达到；可以认为，这就是从地质上和从经济上有充分论证地使地球物理方法与地质和地球化学调查相配合，以期最圆满地解决所提出的地质问题。这些使工作奏效的条件相互联系，在一定程度上又相互抵触。例如，在工作期限不变的情况下，要最充分地解决广泛的问题，就要求增加费用；在费用相同的情况下要缩短期限，通常就会降低工作的延续性和所得地质结果的可靠性，等等。

不论是整个地质勘探过程或是其各个阶段的最佳方案都应归纳为：（1）选择最佳数量的方法；（2）在这些方法之间最佳地分配费用和工时；（3）确定方法应用的最佳顺序。

在综合应用中产生的问题，只能借助于相应的数学工具来解决。

综合进行地质勘探工作和采取最佳方案的重要性和必要性是出于这样的事实：埋藏不深的，即容易发现的矿床储备目前实际上已经耗用殆尽。例如，加拿大在1961—1969年期间发现任何一种矿床的概率从0.01减小到0.001，而发现一吨矿产的费用在25年间（从1946到1971年）却成倍增长。

综合地球物理方法首先决定于提出的具体地质（或技术）任务。因为地质目标是利用多种地球物理方法，根据地质目标所建立的地球物理场进行研究的，因此选择综合方法有助于建立地质目标的物理-地质模型（ФГМ）。在物理-地质模型的基础上选择预定的一套地球物理方法，然后查明这些方法的应用条件，研究单独使用每一种方法解决所提问题时可能的非单值性（定性问题要根据地球物理异常的地质性质，定量问题要根据调查目标的几

何参数)。在总结所有上述资料的基础上,根据地质-经济指标来选择最佳的综合方法及其应用顺序,同时要设计最佳测网和观测精度。

综合方法通常由在整个测区使用的基本方法和在局部范围内应用的辅助方法组成。基本方法应该轻便、高效和比较便宜。在进行包括详查和物探异常分类,确定激励体的大小、形状和产状要素等研究时,基本方法和辅助方法要同时应用。

用几种方法替代一种方法通常不会使费用成比例地增加,因为工作的组织、交通运输、生活条件和地形条件以及某些公共设施是共同的。

协同应用同一种地球物理方法中的不同变种,称为方法内的综合应用,它能扩大基本方法的能力。例如,电剖面和电测深相配合,既可以研究陡倾的界面,又可以研究平缓的界面。地面磁测和航空磁测相配合,折射波法和反射波法地震勘探相配合,重力勘探中使用重力仪和重力梯度仪相配合等都是方法内的综合应用的例子。

由于地质条件、研究的任务和工作比例尺多种多样,应在具体物理-地质条件下对于具体工作阶段,针对解决具体问题来选择综合地球物理方法。由此可见,方法的综合在空间上和时间上是变化的。在空间上,方法综合的变化是由于不同地质结构的地区的物理场一般是不同的,尽管是在同一调查阶段,解决的是同一个问题。研究断面的上部 and 深部,通常也要求使用不同的综合方法。在时间上的变化则牵涉到现有地球物理方法应用可能性的增长和新方法的出现,同一面积内的地质研究程度及其它因素。

地球物理方法最佳综合的选择只有在下述情况下才能实现:第一,研究者要认识到综合应用的必要性,并且无论对单个方法还是综合方法都能明确地提出任务;第二,要建立调查目标的物理-地质模型;第三,要对各种方法及其相互配合的地质-经济效益作出评价。

第一部分 综合应用的原则

第一章 基本概念

第一节 地球物理调查的目的和任务

地球物理调查的目的在于解决地质、水文地质、工程技术及矿业的具体问题。地球物理工作的主要工作量是用于矿床的普查和勘探。这时整个地质勘探过程可划分为成矿预测、地质填图、普查与勘探。

在苏联境内，矿产的普查与勘探按以下方案进行：

地质勘探过程阶段性方案：

第一阶段：区域调查

分阶段 1：1:1 000 000—1:500 000 比例尺的区域地球物理工作。

分阶段 2：1:200 000 比例尺的地质测量（填图）——1:200 000—1:100 000 的中比例尺地球物理填图。

分阶段 3：1:50 000—1:25 000 比例尺的地质测量（填图）——1:50 000—1:25 000 的大比例尺地球物理填图；（1）物探超前于地质测量；（2）物探与地质测量同时进行。

分阶段 4：深部地质填图——不同比例尺的地球物理调查

第二阶段：矿床普查

分阶段 1：1:50 000—1:25 000 比例尺的一般普查。

分阶段 2：1:10 000—1:5 000 比例尺的详细普查。

分阶段 3：1:10 000—1:5 000 比例尺的普查评价。

第三阶段：初步勘探

第四阶段：详细勘探

— 第五阶段：开发勘探

在比例尺为1:1 000 000和1:500 000的区域调查阶段，综合地球物理方法的主要任务是：研究该区的深部地质结构；从整个厚度上研究地壳；大地构造分区——划分深大断裂、地块、深成-岩浆建造；在研究矿产分布规律与深部结构特点间关系的基础上进行区域成矿预测，为今后工作划分有远景的地区。地质填图包括中比例尺（1:200 000）填图亚阶段（在地质结构复杂的地区内，比例尺为1:100 000）和大比例尺的填图，配合以1:50 000和1:25 000比例尺的一般普查。

通常地球物理工作的比例尺要大于地质测量的比例尺。例如，为编制1:50 000比例尺的地质图，要用1:25 000比例尺的地球物理工作资料；编制1:25 000比例尺的地质图，要用1:10 000比例尺的地球物理工作资料，等等。

在地质填图中地球物理工作的任务是：进行深部和体积填图，提供疏松沉积盖层已剥离的地质底图，为详细普查各种矿产划分有远景的地区。

中比例尺深部地质填图包括：（1）主要地质省的大地构造分区；（2）覆盖区沉积地层和褶皱区结晶基底的构造填图。

地质底图的准备包括以下内容：（1）疏松沉积盖层和沉积地层下基底岩石的岩性填图；（2）按不同成分对沉积岩剖面划分出含矿岩体和层位；（3）研究侵入体。

大比例尺地质填图包括：（1）确定疏松盖层的厚度和成分；（2）确定隐伏基底面的等深线和基岩风化壳的成分；（3）按岩性划分岩石；（4）研究侵入体的成分及形态；（5）划分最重要的构造要素及控矿构造。

在一般普查中，地球物理工作的主要任务除了寻找呈矿现象外，还包括寻找和研究含矿构造、建造、变质带、岩石的热液蚀变带和接触变质带以及其它间接的矿化标志。

在详查和普查评价工作中（比例尺1:10 000—1:5 000），地球物理方法用来研究在一般普查中查明的地区和地段的远景，以

及已知矿床发育区域内一些地区的远景,以达到发现矿化现象的目的。在详查中应对预测储量进行评价。普查评价工作的任务是选出可供初步勘探的矿床,并确定预测储量及部分C₂级储量。

在矿床勘探时,地球物理方法应用于划分矿体和研究矿体的产状、形态、结构,定性或定量地评价天然条件下的矿体。

初步勘探以1:5 000和1:2 000比例尺为主,详细勘探时比例尺放大1倍。用地球物理方法进行详查和勘探时,除了岩石的岩性分层、控矿构造及矿体形态的研究外,要解决的任务往往是直接寻找矿体和矿层,以及确定其中有用组份的含量。

上述普查和勘探方案的基本特点是:(1)从一般过渡到特殊,相应地放大测量比例尺和缩小调查面积;(2)在每一阶段都广泛地应用地球物理方法;(3)系统地积累有关调普目标的信息,这一点反映在编写越来越详细的地质成果报告中。在每一阶段和时期所取得的地质-地球物理信息包括三类资料:(1)地球物理平面图和断面图;(2)地质解释结果的概略图和平面图;(3)基于共同考虑地质-地球物理资料的地质平面图和断面图。

地球物理场(实测的和经过变换的)平面图、岩相图、地球物理和岩石物理断面图以及实际地质资料,组成整个地质编图工作的基础。随着调查比例尺的加大,地球物理方法的综合和所得地质-地球物理信息的特征一般也发生变化。

区域地球物理调查的成果表示为地壳深部构造图、大地构造分区图和构造地球物理图。在中比例尺地质填图时,基于所进行的地球物理工作,作出构造岩石概略平面图和断面图;在大比例尺填图和一般普查中,作出概略地质平面图及断面图;在详查中,作出含矿构造、矿田及矿化概略分布图;在勘探阶段,作出地质构造平面图和矿床、矿带及矿体断面图。

但是,由于在每一阶段利用地球物理方法对地质目标的研究是根据它们所产生的异常,因此,无论是选择个别地球物理方法或是选择综合方法,仅有地质信息是不够的。首先必须掌握有关岩石和矿石的物性资料,扰动体的形状、大小及产状的资料,疏

松沉积层的起伏和厚度等资料。因而，如果不建立调查目标的预定物理-地质模型，就不可能有论证地采用某种综合地球物理方案。

在选择综合地球物理方法来解决水文地质、工程地质、矿业和工程技术问题时，也有建立预定物理-地质模型的类似任务。

第二节 物理-地质模型

地球物理工作的设计是从提出任务和选择调查目标开始的。目的任务决定于地质勘探过程的具体阶段。调查目标的选择及其主要参数的确定以先验信息为依据。先验信息是从先前各阶段的工作中获得的。

为了完成所提出的任务，在分析各个地球物理方法的可能性和选择综合方法时，研究人员要对调查目标的具体性质加以抽象，这时要利用具有统计平均物理性质、形状和几何大小的某一目标模型。鉴于地质条件多种多样，制作模型就成为取得有关调查目标的综合资料的唯一方法，因为甚至同一矿结的同类型矿床，一般在形态、矿石的物质成分、产状、岩性、围岩蚀变程度等方面也是不同的。

为了有论证地设计地球物理工作和选择综合方法，引入了调查目标的“物理-地质模型”的概念，这是Г. С. 瓦赫罗麦耶夫为了普查任务首先提出和发展的。

物理-地质模型可以理解为抽象的扰动体，其总体大小、形状和物理性质的差异，在某种近似程度上接近于所要发现的实际目标。普查和勘探目标的物理-地质模型反映整组相似地质目标（例如，在具体地区的地质条件下一定的矿床成因类型）总体的和程式化的概念。在解决地质填图问题时，广泛地利用典型化和程式化的地质-地球物理断面作为物理-地质模型。制作物理-地质模型的基础是调查目标和围岩的物理性质、其它地质勘探方法的现有资料，以及在相似地质-地球物理条件下运用地球物理

方法积累的经验,对于不具备有用信息并且通常又会掩盖研究人员所关注的对象效应的信息源,也要建立类似的物理-地质模型。

“物理-地质模型”的概念在方法学上的意义不仅限于研究地球物理方法的可能性及综合方法的选择。物理-地质模型是数学模型的基础。以后者为基础,可以计算地球物理测量的最佳测网,确定为提取有用信号所必需的和足够的观测精度,选择异常和干扰的模型以进行场的滤波,解决各个方法的相对有效性问

题,互相考虑用不同方法测量的结果进行综合解释。

在制作物理-地质模型时,形态和物质成分复杂的地质体往往代之以物理性质稳定的、由平面或二次曲面限定的规则几何形体(球体、椭球体、圆柱体等等)组合。因此,可以运用足够简单的算法和程序以电子计算机来解反问题。除了利用几何形状规则的模型外,在每个具体情况下还必须考虑扰动物体的产状。例如,埋深较大的三维、二维和垂直延伸目标的物理场,其形态与球体、极线和柱体引起的异常相似。

物理-地质模型的明显特征是物理性质和几何

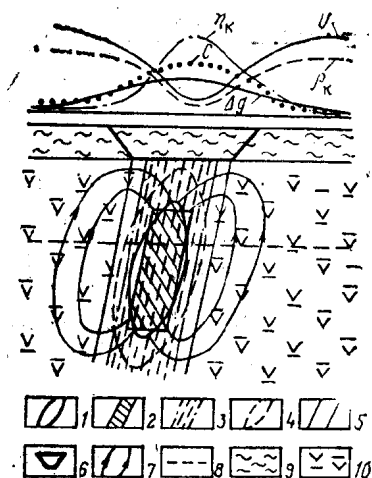


图 1 含铜黄铁矿透透镜体的物理-地质模型

(据Г. С. Вахрамеев, И. Н. Боровко)
1—有工业价值的矿体的轮廓; 2—倾斜的正剩余密度层(Δg 异常); 3—与岩石热液蚀变带对应的高电导率倾斜层(ρ_K 异常); 4—高极化率扁椭球体的轮廓(η_K 异常); 5—元素的原生分散量; 6—呈水平层状的元素次生分散量(异常C为铜含量); 7—自然电场的电流线(异常U); 8—地下水水位; 9—新生界沉积层; 10—矿体周围的火山岩