

苏联高等学校教学用书

地電原理

上 冊

克 拉 耶 夫 著

地質出版社

地 电 原 理

上 册

克拉耶夫著

苏联高等教育部审定作为国立大学教学用书

地质出版社

1956·北京

“地电原理”(ОСНОВЫ ГЕОЭЛЕКТРИКИ)原書为苏联克拉耶夫(А.П.КРАЕВ)所著,經苏联高等教育部審定作为國立大学的教材。原書共有兩篇:

第一篇“地球天然电場及恒定人为場”。其主要內容为:

- 1.地电学發展簡史的概論。
- 2.地殼岩石的电性研究。
- 3.地球一般电磁性狀的描述。
- 4.区域天然电場和局部电場的事实及理論的叙述,以及它們在实际中之应用。
- 5.地球恒定人为場的探測用于地电測繪。

第二篇尚未出版。其主要內容是“波动地电学”。研究对象是:

- 1.地球的准靜态及非靜态作用的过程在不同瞬态状态的描述及研究。
- 2.地質电法勘探中之交变場的现有方法及研究方法的理論。

本書由地質部編譯室張可迁、陈培光、張志誠、顧燕庭、汪盛輝等同志根据苏联國立技術理論書籍出版社(Государственноиздательство технико-теоретической литературы) 1951年版譯出。本書为原書之一部分,主要偏重于理論的叙述,可作为工業大学地球物理探礦系及地質系高年級学生或研究生的教材,并可供从事地球物理工作的同志作参考。

地电原理 上册

300,000字

著 者 克 拉 耶 夫

譯 者 中 央 地 質 部 編 譯 室

出版者 地 質 出 版 社

北京宣武門外永光寺西街3号

北京市書刊出版業營業許可證出字第零伍零号

發行者 新 華 書 店

印刷者 地 質 印 刷 厂

北京廣安門內教子胡同甲32号

印数(京)3001—4020册 一九五四年八月北京第一版

定价(10)2.40元 一九五六年七月第二次印刷

开本31×43¹/₃₂ 印張 15 ⁹/₃₂ 插頁1

由生動的直觀到抽象的思維！
由抽象的思維再到實踐——這就是
認識真理、認識客觀現實的辯證過
程。

烏·伊·列寧：哲學筆記。

1947.146—147頁。

目 錄

原序	3
緒言	5
A. 地球的天然電場	
§1. 基本原理及方程式	13
第一章 地殼之電特性及電參數	24
§2. 岩石的電學分類	25
§3. 單一礦物的、兩種成分的和複雜岩石的電參數	23
§4. 電磁場中岩石電特性的變化	40
§5. 岩石的 γ 和 ϵ 的物理性質	46
§6. 岩石電參數的測量方法	62
第二章 地球的一般電磁狀態	100
§7. 地球層圈及其電性	100
§8. 地球大氣圈的電場	121
§9. 地球的磁場	123
§10. 地球的交變電磁場	140
第三章 地球區域電場	150
§11. 地電場的構造和暫態	150
§12. 地電場性質的問題	156
§13. 地電場之觀測方法及資料之整理	160
§14. 用大地電流法作地球的電測繪	164
§15. 地球上的無線電波場	175
第四章 局部自然電場	192
§16. 一般原理	192
§17. 金屬礦床的電場	205
§18. 岩層接觸電場	216
§19. 河流電場	223

§20. 山地電場	232
§21. 觀測方法及整理	234

B. 地球之人爲電磁場

第五章 地電勘探的基本問題	237
§1. 恒定電場的基本方程式	237
§2. 電磁相似原則	244
§3. 勘探的基本問題	247
第六章 均勻岩體上的正常電場	252
§4. 雙電極測區的電場	252
§5. 彼得洛夫斯基測區的電場	256
§6. 帶電流的線路之電磁場	260
§7. 半偶極子線電極電場	274
第七章 金屬礦體的電場及其充電法	281
§8. 充電法的主要方法	281
§9. 金屬礦體的單電層	283
§10. 帶一種電荷的導電球體與導電圓柱體的電場	287
§11. 帶有一種電荷的導電橢圓體的電場	291
§12. 球與圓柱體的極化電荷	294
§13. 橢圓體的極化電荷	299
§14. 極化金屬礦體的特殊情況	302
第八章 地質構造之異常場及有效電阻法	306
§15. 有效電阻法的主要類型	303
§16. 兩種岩石的平面接觸	312
§17. 水平地層、井下電測	325
§18. 均勻各向異性的岩體及圓形電剖面	333
§19. 岩體的水平成層構造及其電測深	340
§20. 雙層岩體上線路的磁場	360
§21. 穹窿及背斜	367
§22. 地殼之電測繪問題	373

原 序

本書以作者對列寧格勒大學物理系、地球物理專業學生歷年的講稿為基礎。

在該專業範圍內，根據高等教育部的標準教學計劃，地電學也包括在專門地球物理教程裏，和地磁學及地震學一樣，同樣作為基礎部分。

地電學是地球物理學中最年輕的，也是研究得最少的一門科學。誠然，由於實際需要而出現了許多地電勘探手冊和內容豐富的文獻。但無論在國內或國外至今還沒有一本講述地球物理學中新的一部門——地電學的書籍。

要知道，在地電科學的發展和實用方面，哲科夫斯基（Джековский）、海蘭德（Хейланд）等的著作，是不能令人滿意的，因為這些著作的內容是對地球的複雜的電磁作用，僅作了形式邏輯的描述，並且是質量低劣的抄襲品。

早在1940年出版的地電方面的書（克拉耶夫[А. П. Краев]：地球物理學、電測篇、列寧格勒大學出版室），其缺點同樣在於公式主義，並且其中關於地電學的幾章，也並不能反映地電學目前的情況了。

其實，地電實用方面的蓬勃發展，主要就在我國，在蘇維埃時代，它不僅需要地電勘探方面的實用教本，而且也需要完整統一地敘述地球中地電作用方面的基本科學原理及綜述實際資料的書籍。

我們的任務是給予青年的專家們一種科學理論，並把它運用到社會主義實際工作中去。實際的地電理論，應當作為地球物理學家的武器。但不要認為我們在這本書中的目的只是描寫和研究地電學。

我們主要的目的在於獲得有效地控制自然的方法的科學原理，為了在社會主義生產中了解自然並利用自然，當然也敘述地電的目前狀況，地電學的理論及實踐，以及俄國和蘇聯的學者們對地電的研究。

“地電原理”一書共有兩篇。

第一篇——“地球的天然電場及恒定人爲電場”——包括：

(1) 地電學發展簡史的概論；

(2) 地殼岩石的電性研究；

(3) 地球一般電磁性狀的描述；

(4) 區域天然電場及局部電場之事實及理論的敘述，以及其在實際中之應用；

(5) 地球恒定人爲電場的探測用於地電次繪。

第二篇——“波動地電學”——將包括：

(1) 地球的準靜態及非靜態作用的過程在不同瞬時狀態的描述和研究；

(2) 爲地質方面用的電法勘探交變電場的現有方法和新方法的理論。

由於在地電方面的理論及對某些自然事實研究的不足；只能作比較簡要的敘述，並且在數學上也不够嚴格。野外操作方法和儀器也敘述得比較簡單，因爲這些在實用的手冊中已講得很多了。敘述多爲理論性質的。

作者感謝楊諾夫斯基(Б. М. Яновский)及謝苗諾夫(А. С. Семёнов)所提的寶貴指示。

今後對本書之改進所提的批評意見，作者將表示謝意。

克拉耶夫

1950年2月7日

緒 言

關於地球、地殼及潛藏在地下寶藏的科學，在我們蘇維埃時代裏，與人們的實際活動緊密地聯系着。在這門科學整個的發展道路上，過去是而將來仍然是一門最有價值的、最重要的自然科學。

爲要知道地球的構造，並了解地球裏存在些甚麼，事實上必須認識地球的過去和現在，且找出它的發展規律。這就是說要解決巨大的科學的根本問題，從而保證實際問題的解決，保證我們的科學和技術現在和將來的發展。

顯然，正確地與更詳細地得出地球內部“狀態”的情況及其性狀是一個重大的基本問題。研究解決這一問題的有一系列的自然科學——地質學、地球物理學、地球化學等。

顯而易見，求得這一問題的解決，不是經常用某些科學的特殊方法直接研究對象就可以作到的。而必須運用研究地球的各種間接方法來解決，甚至要把這些研究所得的資料應用數學方法加以推斷。

這樣，根據地球表面精確的測量，確定地球本身的形狀非常接近於略微壓扁的旋轉橢圓體。

其次，根據地球物理學的研究，認爲地球本身，或換言之，“剛性的”地球是由三個主要的閉合層圈（地殼、岩石層圈和金屬礦物層圈）及地心所組成是最爲合理的。以一定的可靠程度編繪地球分帶地質圖及化學成分圖，實質上即是地質科學、地球化學及地球物理學的外推資料。

費爾斯曼（А. Е. Ферсман）的地質假說區別出“剛性的”地球裏的花崗玄武岩圈、橄欖岩圈、金屬礦物圈和金屬地心。小於“剛體”地球的平均密度（5.5）的花崗玄武岩圈和橄欖岩圈常常連在一起，總稱爲岩石圈，而密度大於5.5的金屬礦物圈及地心，稱爲重圈。修斯（Зюсс）的地球化學假說給予相應於那些化學礦物佔多數的各種地層的名稱，亦即矽鋁、矽鎂、鎳鐵—矽鎂、鎳鐵。

很難確定地球大氣圈的大小和形狀，因在現有情況下，暫時不能直接測量。所以只能假定的說，大氣圈的物理邊界高達 1,000 公里。

根據地球物理的（航空地質的及無線電波的）觀察，亦在地球大氣圈中又發現了很多層圈，它們依其本身的物理特性各不相同，對流大氣層及同溫層——成層圈。

對於上面所說的應當加以補充。地球氣層和“剛性”圈的物理構造及物理狀態的可靠推測多少是存在的。但是構造特別複雜和不均衡的就是地殼和對流大氣層。假設地殼有厚度較小的個別的層圈，它們不是連貫的，而是輻射狀地斷裂，且具有不同的厚度。在地殼中主要地顯示有太陽能和放射性原子的分解能，並發展着主要的化學作用——變化、化學礦物的活動及分解。僅在該層（100公里以下）下的“剛性”地球，顯然是由均勻的同心層圈所組成的，這些層圈物理及化學的性質只是依着輻射方向而改變。在對流大氣層中類似地發生及發展着各種不同的氣象現象，利用着絕大部分的太陽能。

不管其構造如何複雜，地殼和對流大氣層是最為熟知的。反之，深處的地球層圈却很少知道；它們的物理狀態我們還不了解，大概是與物質一般結合狀態有根本的區別。在深處的和超深處的壓力下，由分子和原子的不同組合形成的各種結合狀態可能存在，以致，林克（Линк）認為，由於地表地中心壓力的增加，判斷出物質狀態如下列次序：分子的組合，簡單的分子，原子的組合及簡單的原子。

關於地球內部構造的各種假設我們不擬列入討論，要注意的是在關於地球層圈的非常有限的知識中，幾乎沒有關於地球內部的電狀態及其作用的可靠的瞭解。在多多少少對流經過地殼表層的電作用有所熟識的同時，關於深處電作用則僅有假說而已，這些假說暫時還沒有可靠的理論及實踐基礎。

這樣一來，地球物理學，除了有其他的基本問題之外，還面臨着一個重大而難於解決的“電”的問題。這一問題獨有的科學意義暫且不談，就單利用新的地電方法來解決這一問題來說，就可能提供補充地球物

理的材料，這些材料可以較為可靠地闡明地球內部構造的實際情形。

在地球上直接觀察自然事實而發現了許多自然作用的規律。這些規律使我們能够使大自然服務於人類。

可惜，我們不能直接看到地下的實際情況，我們曾想用各種儀器來直接觀察，但還沒有成功。

地質學是用觀察事實的方法來解決地質問題，但由於現代鑽探技術僅能達到深約五千公尺，因而地質學的觀察方法是無能為力的。

在研究地球的深處及超深處區域，主要要靠地球物理學——地球的物理學——較為年輕的，且迅速地在發展着的一門科學。地球物理學任務就是研究地面上的和地球內部的物理狀態及作用，並認識它們的發展規律。

現代地球物理學是一門關於地球及其狀態和作用的內容豐富而準確的物理科學，是配置着最好的和超靈敏度儀器的科學。地球物理學也是包括很多部分的科學：重力、地震、地熱、地磁、地電等。以理論的觀點來看，重力及地震歸於地力學，地熱歸於地球熱力學，地磁及地電歸於地電學。

地球物理科學的每一部分，都是實用地球物理學的相應部分的科學基礎，由於在地質研究、礦體的普查及勘探各方面所獲得的成就，實用地球物理學已舉世共知。如果說現代實用物理學是解決能量問題，則實用地球物理學是解決原料問題。

與其他任何科學一樣，地球物理學也有它的發展史。在本教程範圍內，我們需要簡略提到的僅是地電學這一方面的發展史。

廣泛地談到地球的電性作用（其中包括大氣圈電的現象），我們可在俄國天才學者羅蒙諾索夫（М. В. ломоносов）的著作中找到關於地電學說的來源。即在十八世紀中葉，羅蒙諾索夫和黎赫曼（Г. В. рихман）第一次開始進行大氣圈電現象（雷雨現象）的科學研究。

至於地殼中的電作用的觀念僅發生於十九世紀初。當時對於地磁場性質的解釋僅提供出達夫（Дэви）的幼稚假說，他認為地磁場是由於

在地殼內東西向電流的不斷循環所引起的，這個假設是沒有任何研究根據的，而只不過是捏造出來的而已。

到十九世紀中葉，隨着電報及電話通訊的發展，促使開始廣泛地系統地研究地殼中的電性作用。

具有科學實際意義的地殼中的電性作用特別發展在強烈的電磁暴之後(1859年)，世界所有的天文台都發覺了這次電磁暴。與這次電磁暴同時發生的有強烈的極光和地電流，地電流破壞了很多通訊工作。

順便，利用世界上很多天文台地磁場觀察（巴甫洛夫斯克[Павловск]巴黎、柏林、托爾托查[Тортоза]等）組成了在地殼中的所謂地電流電流場的連續觀察。

在實用地電學方面——電法勘探，1839年對金屬礦體天然電場進行了第一次野外觀測。誠然，這些研究及這方面的試驗是沒有勘探意義的。類似地，甚至在二十世紀初，外國人利用電阻法及測波法所進行的野外觀測，同樣也沒有勘探的實際意義。這是一個既沒有理論基礎，也沒有相當的儀器的非專業的創舉。

真正的地電科學及其實際應用——電法勘探——是開始發展於蘇維埃政權的初期^①。地電學在蘇聯出現了，地電學的誕生應歸功於著名的學者，俄國第一個地電學家彼得羅夫斯基（А. А. Петровский）的著作。

在彼得羅夫斯基的指導下，研究出了自然電流法、有效電阻法、測波法的理論、方法及儀器；在野外條件下，進行了很多的各種方法的試驗工作：1924年在阿爾泰山試用自然電流法及等量線法；而在後數年中在烏拉爾、伊列茨卡亞查施塔（Илецкая защита）、高加索及蘇聯的其他區域進行了試驗。彼得羅夫斯基和他學生的自然電流法的、有效電阻法的、測波法的理論著作，經常是我們地球物理學家的理論指導。

^① 關於電法勘探理論基礎方面的第一本著作是在1903年由拉果晉（Е. И. Рагозин）寫成。

在列寧格勒大學教授的直接領導下創造了交變電流法的(強度法、等位線法)理論、方法及儀器。進行了大量的電法勘探工作，基本上是在阿爾泰山、烏拉爾、哲茲卡茲甘(Джезказган)及蘇聯其他各區域的金屬礦區上進行的。在第一個斯大林五年計劃初期，列寧格勒的地球物理學家們開展了熱烈的生產活動，廣泛地且有成效地運用了直流電法來解釋地質構造的問題。

由於研究水力發電站的壩基，在額爾齊斯河(1931年)、伏爾加河、葉尼塞河(1932年)上進行的初次工作是值得提起的。

鑑於尋找煤礦(大頓巴斯的東部地區、遠東)及氣田(達格斯坦[Дагестан]、薩拉托夫[Саратов])利用電法解決了許多地質構造的問題。此後，研究了新的並大大改進了直流電法且應用金屬礦體(滑動接觸法、充電法、聯合剖面法)。

莫斯科地球物理學家廣泛地推廣應用電法勘探，探尋及勘探儲油構造。

應當指出，初次的石油電法勘探工作是根據卓越的地質採油工人，戈盧比亞特尼科夫(Д. В. Голубятников, 1929年)的提議而提出的。在這一地區，電法勘探立刻獲得了公眾的認許，且在以後幾年裏極其廣泛地應用着。

在野外工作的初期，在阿普歇倫半島(巴庫)上應用了電法勘探發現了許多儲油構造，使儲油量大大地增加。

測井的應用大大地增加了勘探的速度和質量並為石油工業節省了百億盧布。大規模的電法勘探工作亦在第二巴庫區域進行。

同時，不能不記起在蘇聯地球物理學發展初期的某些缺點；不能不記起不加批判地接受外國地球物理學家所提的金屬礦電法勘探的年代。

這些，實質上是由簡陋的儀器所提供的直接法的方法，在理論上是沒有根據的；在實踐中是缺乏經驗的。這些方法是外國公司用來作為勘探普查方法的吹噓而已。

在勘探金屬礦床的複雜艱巨的工作方面，盲目地搬到我們實際工作中的那些方法，僅是提供了許多不正確的異常；無論研究區域的真實物理地質情況，或金屬及非金屬異常的分類準則，所謂隆德別爾格（Лундберг）法及宋德別爾格（Зундберг）法等都沒有能解決。不但如此，一方面由於對這些方法的迷戀破壞了地質學家對地球物理勘探的信任；而另一方面，使我們的地球物理學家不去科學地實際地解決電學上及電法勘探上的重大的問題，從而阻止了地電學和電法勘探在我國的發展及運用。

在第三個斯大林五年計劃時期中，在甘布爾采夫（Г. А. Гамбургев）的指導下物理勘探法獲得了發展。

在列寧格勒大學著名蘇聯學者特維爾斯科依（П. Н. Тверской），是組織整個地球物理學科學部門發起人。

佛克（В. А. Фок）的地球準穩定電磁場的及井下電測的輝煌著作給地電學打下嚴格的理論基礎。

在第二個斯大林五年計劃年代，列寧格勒大學地電學家的活動更廣泛了。亦即：

（1）研究岩石的物理性質及對創造新的研究方法。

（2）在北部地區根據電法勘探新方法的試驗——不同頻率的感應法及電磁場梯度法，進行了科學實驗的考察，在阿爾泰山南部，根據局部電場及梯度法的研究也進行了科學實驗的考察；

（3）根據山地河流的山地地形和埃爾布魯斯克（Эльбрусский）地區的終年積雪地帶的局部電場的研究，進行了包括埃爾布魯斯綜合科學考察的探險。為要在永久積雪地帶確定冰的覆蓋層的厚度，在世界上第一次提出了電測深。

在第三個斯大林五年計劃初期，開始組織一個大型的地殼物理教學教研室。教研室包括地震實驗室、地磁實驗室和電測實驗室。在測電實驗室裏着手研究地殼深處電磁的低頻率測深法。列寧格勒大學提出了地殼超測深的問題。

偉大的衛國戰爭並沒有打斷地球物理學的計劃發展，很快地就進行了電法勘探的野外工作。

偉大的衛國戰爭勝利結束後，物理學的發展其中包括地電學，循着和平建設的軌道神速地發展着。

蘇聯科學院莫斯科理論地球物理研究所在吉洪諾夫(А. Н. Тихонов)的領導下勝利地創立了地殼中非穩定電性作用的理論和提出了卓越的實驗著作。蘇聯最大的地球物理科學中心——蘇聯科學院地球物理研究所(ГЕОФИАН)開始進行工作了。

在莫斯科大學的地球物理教研室和地球物理探礦教研室(費丁斯基[В. В. Федьинский])在勝利地工作着。教研室的科學工作與科學院地球物理研究所及石油工業部科學研究所(НИИ МНП)的重大問題的解決有着密切的聯繫。

在列寧格勒成長了全蘇勘探地球物理研究所(ВИРГ)。

在全蘇勘探地球物理探礦研究所的實驗室裏，研究着新的地球物理方法及設計着最新型的高靈敏度的地球物理儀器。

在列寧格勒大學正在研究調查地殼的新方法。

1947年，包括列寧格勒綜合研究機構的地球物理學家，試驗了河流偶極子電測深的新方法，並成功地作了湖泊的偶極子電測深的首次試驗。1948年，列寧格勒大學的地電學家，並有全蘇勘探地球物理研究所研究人員參加，克服了所有的技術上的困難，進行了世界第一次超深的電測深，超過以前的電測深之深度10倍。在全蘇勘探地球物理研究所機構中，和列寧格勒大學的地電學家共同研究了調查地殼表層的高頻率法的理論和儀器。

蘇聯科學技術的實力是這樣的增長了，以致可能着手解決過去地電方面，認為是完全不能解決的巨大問題。顯然，除了地震學外地電學也可以研究很深的地層了。

蘇聯的地球物理學，特別是地電學，並利用了強力的供電裝置，和高靈敏度的穩定有效的測量儀器也轉向實物的區域調查。蘇聯的地球

物理學，由於在科學和實用方面的廣泛而深刻的研究，已超過了資本主義的地球物理學。在這一方面，蘇聯的地球物理學獲得了顯著的成績，因為它積極地參加了社會主義建設。不僅如此，由於要完成我國偉大共產主義建設時期中擺在蘇聯地球物理學面前的任務，這些成績將不斷地增加。

A. 地球的天然電磁場

一個成為地電知識中心的主要科學問題，是述明地球的電磁性質和狀態，揭露電磁作用在地球中發生的規律和性狀。在理論上，首先是研究和發現在非均勻導體空間內的電磁場性狀和構造的地電動力學的問題。

因此，對地球來運用時，首先應十分清晰地瞭解電磁場的基本方程式。

§ 1. 基本原理及方程式

我們回憶電動力學的基本原則是：

電荷守恆定律，對任一體積可定量地以下式表示：

$$I = -\frac{\partial e}{\partial t} = -\dot{e},$$

式中 $I = -\oint_S j_n dS$ ——是從為表面 S 所限的體積 V 中流出的、電流密度為 j 的總電流，體積 V 所含之總電荷：

$$e = \int \delta dV,$$

或用體積元公式表示：

$$\operatorname{div} j = -\dot{\delta},$$

式中 j ——具有體積密度為 δ 的電荷之體積元內的電流密度，如運用已知的變換則由第一式可得上式：

$$\oint_S j_n dS = \int \operatorname{div} j dV = - \int \dot{\delta} dV.$$

① 為了以後不把電阻率 ρ 與體積密度 δ 混淆起來，在此我們不得不放棄常用的體積密度的符號 ρ 。