

航空磁力測量和 它在地質普查工作中的經驗

A. A. 羅加契夫著

地質出版社

航空磁力測量和它在地質普查工作中的經驗

羅 加 契 夫 著

地質出版社

1955·北京

А. А. ЛОГАЧЕВ
ВОЗДУШНАЯ МАГНИТНАЯ СЪЕМКА И
ОПЫТ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ В ГЕОЛОГО-ПОИСКОВЫХ
РАБОТАХ

ГОСГЕОЛИЗДАТ МОСКВА 1947

本書可供航空磁力測量人員使用或地球物理勘探人員、地質測量人員和找礦人員參考。

航空磁力測量是一種在勘察地區、在飛機飛行的條件下研究地磁場的方法，廣泛應用於旨在闡明基性岩石大塊體的地質製圖上和用來普查鐵礦床。

書中描述了在飛機上用來測量地磁場垂直分量變異的儀器和航空磁力儀的工作方法。詳盡地闡述了野外工作法、已知鐵礦床上實驗性的尋察磁場的結果和尋找鐵礦的結果。附帶還提到航空磁力測量在解決地質製圖問題中的實際意義。

本書由地質部物理探礦管理局譯出，王敬端、蔡冬生校，顧燕庭覆校。

航空磁力測量和它在地質

書號0213 普查工作中的經驗 64千字

著者 羅 加 契 夫

譯者 地質部物理探礦管理局

出版者 地 質 出 版 社

北京宣武門外永光寺西街3號

北京市書刊出版業營業許可證出字第零伍零號

發行者 新 華 書 店

印刷者 地 質 印 刷 廠

北京廣安門內教子胡同甲32號

印數(京)1—1200冊 一九五五年十二月北京第一版

定價(8)0.42元 一九五五年十二月第一次印刷

開本31"×43" $\frac{1}{32}$ 印張2 $\frac{1}{4}$

目 錄

緒論	5
一、測量儀器與測量技術	9
二、誤差根源和可達測量精確度	26
三、普查對象及工作方法	34
1. 測綫的方向	38
2. 測綫的長度	39
3. 測綫間的間隔	40
4. 飛行的高度	42
四、在已知礦區若干試驗航空磁探工作的結果	45
1. 在“薩姆松”礦床上磁場的實驗測量	46
2. 在伊爾賓斯克鐵礦床的實驗工作	49
3. 在阿巴根鐵礦區的磁場	53
五、航空磁測普查工作的結果	58
結論	88
參考文獻	92

緒 論

磁力測量在地質製圖方面，特別在區域地質的研究方面的成就引起了磁力測量的工作量增大，因此旨在加速野外測量過程的一系列動議隨之產生。改善現有的和設計新的在單獨點上測量用的儀器並不能使工作速度發生根本的變化，因為測量時避免不了的間斷現象嚴重限制着加速的可能；所以在這方面，設計一種在運動過程中可以不間斷進行測量的儀器，這一動議是很有意義的。

1935年，中央地質勘探研究所（目前，它的工作由新定名的全蘇地質勘探研究所繼承）採納了作者關於擬定在運動過程中測量所用磁力儀構造的建議，包含兩個方案：一是利用特製的磁控管；一是使用旋轉的感應綫框。前一個方案指出要把在列寧格勒大學早已開始但未結束的工作（文獻2）繼續下去。由於在長期工作中讀數不穩定，用磁控管工作沒有得到預期的結果；因為在運動時的連續測量中達到這個要求是必須的，於是就不得不停止磁控管的工作而開始感應綫框的工作。用感應綫框在運動中進行磁測的經驗不曾有過，然而在固定裝置上使用它們，在許多情況下為大家所熟知：

（1）烏里揚寧感應磁力儀（文獻8）；（2）裘努埃感應羅盤（文獻10）；（3）施留姆別爾熱感應磁傾計（文獻3、9）。

在使用上述儀器的理論和實踐的基礎上，確定在運動過程中測量磁場所必需的要求，並製定儀器的構造。

1936年，造成了在運動時用作連續測量的第一個磁力儀模型。船在水上行進時對它作過試驗後，就在飛機上沿着已知的區域磁異常的諾夫戈羅德—瓦爾戴測綫進行了磁場測量的試驗工作（文獻4）。雖然試驗的結果令人滿意，把磁異常相

當清晰地記錄下來，但儀器構造的大小和重量顯然不適於裝置在我們首次試驗所用的 ПО-2 型輕便飛機上。我們認為下面一種型式的飛機用起來最方便：有三個機艙，速度為 100—120 公里/時；不大的着陸速度和輕的重量使利用相當小的平坦場地作為着陸場成為可能；每小時汽油消耗量約為 20 公斤。所以有必要改造儀器，使它適應於我們所選擇的機型。本來也可以不必改變儀器的大小和重量，而把它安裝在重型飛機上，可是，如這樣就會使野外工作在使用飛機方面造成巨大的浪費。

就在 1936 年，磁力儀新模型造成了，並在越過斯摩稜斯克省巴里亞亭和拉格涅金的磁異常的航綫上進行了試驗（文獻 5）。磁力儀模型和試驗結果都很好。1937 年我們建議參加舊魯薩區深層地質學的研究工作。然而地質界領導對我們的試驗工作表示懷疑，因此在 1937 年我們只獲得重複類似前一年作過的試驗的機會，試驗是在舊奧斯科爾地區的庫爾斯克磁異常上進行的。在這次測量中，我們還擔負了一個附帶的任務——在不同高度上測量磁場強度以計算磁體的產狀單位，特別是確定庫爾斯克磁異常含鐵石英岩的下部界限（文獻 6）。

同年，我們在水上用小船和輪船作了磁測的試驗，以後還用過汽車。所有這些試驗都表明，完全有可能用運動的乘具作測量，並達到相當大的準確度。也曾經用過懸於氣球上的磁力儀，沿垂直方向測量磁場的試驗。

1938 年，航空磁力測量還沒有用到地質製圖的工作上，然而西西伯利亞地質局主動向我們提出在西西伯利亞山區用航空磁力測量來探尋鐵礦床的工作，試驗工作在阿巴坎礦床上進行，其工作量不大。

在以不同的高度越過礦床時確定，鐵礦區的磁異常在高達 600 公尺也發現。據此決定，藉助於航空磁力測量可以直接探尋規模如同阿巴坎的巨大磁鐵礦床。用飛機探測鐵礦床的初次試驗性生產工作是在 1939 年在紹里亞山區中實現的。工作方法問題的沒有弄清楚和工作執行者的沒有經驗，使第一次的工作結果很成問題，主要是由於磁異常太多並缺少鐵礦床異常的有代表性的特點，以便藉以從一般的許多異常中把鐵礦床區分出來。

1940 年蘇聯人民委員會所屬地質事業委員會建議全蘇地質研究所組織三個隊去探尋遠東的鐵礦。

紹里亞山區的工作經驗不足以解決在遠東佈置工作所發生的一系列的問題。對離機場遠的工作的機型問題，關於在有不大於五十萬分之一比例尺的地圖時測綫的敷設和連接的方法問題，關於飛行高度和測綫密度問題都沒有弄清楚。既然這些問題都要在工作過程中求得解決，那末 1940 年的工作在相當大的程度上也是試驗性的。

1941 年根據蘇聯人民委員會所屬地質事業委員會的決議，在全蘇地質研究所下面成立航空磁測隊和航空磁測研究室，其任務為組織 1941 年在遠東、紹里亞山區和巴爾哈什附近的工作。對於巴爾哈什產生了新的問題，主要由於地區方位標不夠，連接測綫有困難。在解決工作方法問題上我們已取得一些經驗，特別是外貝加爾那個隊的工作所取得的經驗，因為在那裡試驗工作是已知的巴列金礦床上進行的。

從 1942 年起航空磁測工作只在西西伯利亞地質局所轄的西西伯利亞進行着。考慮到前些年工作的缺點，即航空測量所發現的大多數異常尚未加以檢查，西西伯利亞地質局在航空磁測隊下成立了地質隊，其主要任務為檢查並確定航空測

量所查明的磁異常的地質原因，同時企圖在廣大面積上更廣泛地比較磁測資料和地質資料。西西伯利亞地質局這一措施是十分正確的；由於地球物理人員和地質人員1942—1943年協同工作的結果確定，航空磁力圖首先給繪製地質圖提供出非常有價值的資料；如果有探尋鐵礦床的地質標準，航空測量的磁力圖加上現有的地質資料便可保證在最有利的地質條件下圈出探尋礦床的地段。假若具備一定的飛行條件，巨大的鐵礦床便直接地反映在航空測量的磁力圖上。

最近幾年探尋鐵礦床所進行的工作的結果使我們確信在設計航空磁力儀時和用飛機進行最初的試驗測量後說明的原理，亦即：航空磁測是地質製圖極其重要的方法，因而應首先把它用於這方面。使用航空磁測探尋鐵礦床是部分的任務，正如用它探尋與一定地質條件有關的某些其他礦產一樣。

1944年底蘇聯人民委員會所屬地質事業委員會組織了專門的航空地質隊，該隊能進行航空攝影測量、航空磁測和空中目測以便解決地質任務。1945年在烏拉爾和卡累利阿芬蘭蘇維埃社會主義共和國境內完成了航空磁測工作；西西伯利亞地質局的工作仍然繼續着。

改進航空磁測儀器和測量方法的工作由全蘇地球物理勘探研究所（在列寧格勒）繼續進行，該研究所於1945年是在全蘇地質研究所地球物理部分的基礎上成立的。

一、測量儀器與測量技術

有着整流子的以角速度 ω 旋轉的感應綫框電路中的平均電流強度 i_m 示如公式(1):

$$i_m = \frac{2NS\omega}{\pi R} [(Z\cos B - H\sin B\cos A)\cos\beta + H\sin A\sin\beta], \dots (1),$$

式中 N 為圈數， S 為綫框截面積； Z 與 H 分別為磁場垂直分量和水平分量， B 為綫圈旋轉軸的傾角， A 為綫圈旋轉軸的磁方位角， β 為電刷與電流的標準反向面間的夾角（假如反向發生在綫框面垂直於通過綫框旋轉的鉛直平面時，此反向面稱為標準反向面）。

欲測量 i_m ，須達到下列要求：

- (1) 將電刷裝在標準反向面上，即 $\beta=0$ ；
- (2) 把旋轉軸安裝得水平，即 $B=0$ ；
- (3) 以常速（即 ω =常數）不停地旋轉；
- (4) 為了測量電流強度的平均值，採用其週期比旋轉綫框週期大若干倍的檢流計。

在上述條件下：

$$i_m = \frac{2NS\omega}{\pi R} Z = QZ,$$

因為 Q =常數，所以 i_m 與 Z 成比例。將基本公式對 B 與 β 微分，確定前兩個條件不準確的影響。注意角 B 與 β 很小，得：

$$\delta i_m = QH (\cos A \delta B + \sin A \delta \beta)$$

或

$$\frac{\delta i_m}{i_m} = \frac{H}{Z} (\cos A \delta B + \sin A \delta \beta).$$

在列寧格勒認為 $H:Z=0.3$ ，我們發現當 B 與 β 的誤差是 1° 時，確定 i_m 的相對誤差將不大於 0.5% ，而且 δB 與 $\delta\beta$ 的影響依綫框旋轉軸的方位角而改變。利用這個關係可找出電刷的位置，並使軸水平。

近似水平地裝置綫框旋轉軸，而在標準反向面附近裝置電刷。磁場 Z 儘量為電流或磁鐵的磁場全部地抵消，剩下的部分表以 ΔZ 。先把旋轉軸調得水平，為此把旋轉軸置於磁子午面內，即 $A=0$ 。那末

$$i_1 = Q (\Delta Z \cos B - H \sin B) \cos \beta.$$

使綫框繞垂直軸旋轉 180° ，那末

$$i_2 = Q (\Delta Z \cos B + H \sin B) \cos \beta.$$

將靈敏檢流計接在感應綫框電路中，測量感應綫框在這個和那個位置上的電流強度。電流強度的平均值應與條件 $B=0$ 相應。因而，為了找到這個軸的位置，應當逐漸地使軸平衡，直到檢流計指針指出電流強度的平均值為止。實際上這是用逐漸近似來達到的。

為了安置電刷，將旋轉軸置於 $A=90^\circ$ 的位置，而後使 $A=270^\circ$ 。分別得到數值：

$$i_3 = Q (\Delta Z \cos \beta + H \sin \beta).$$

$$i_4 = Q (\Delta Z \cos \beta - H \sin \beta).$$

$\beta=0$ 是等式 $i_3=i_4$ 的條件式，由此得出結論，用同樣方法不難把電刷置於需要位置。

必須注意，嚴格地將電刷裝在標準反向面內不會得到預期的效應，因為感應綫框有一個自感係數 L ，因此電流的相角較電動勢的相角落後一個角度，此角度的正切與 L 成正比，與綫框旋轉的週期及電路中的電阻成反比。所以求得的電刷位置僅對一定的旋轉速度是正確的；當旋轉速度改變時電刷

的位置亦應改變。

在準確地調整電刷與旋轉軸時，電流強度圖形應有圖 1 上所表示的形式，在圖上左面畫着由分量 Z 產生的電流強度圖形，而右面是分量 H 所產生的。在把擺動週期相當大的檢流計接入電路時，指針僅反映由分量 Z 產生的平均電流強度。

我們來作感應綫框的計算。設綫框作半徑為 r 的圓形。電阻 R 由內阻 R_1 與外阻 R_2 組成；應這樣取 R_2 ，使 $R_1 = R_2$ ，那末 $R = 2R_1 = 2R_2$ 。用 ϱ 表示長 1 公分的導綫電阻，並注意， $\omega = \frac{\pi}{T}$ ，這裡 T 為旋轉半週期，由公式 (1) 得：

$$i_m = \frac{1}{2} \frac{r}{T \varrho} Z \cdot 10^{-8} \text{ 安培。}$$

令綫框在 $Z = 0.5$ 奧斯特的磁場內以 1200 轉/分的速度旋轉，則 $T = \frac{1}{40}$ ，於是

$$i_m = 10 \frac{r}{\varrho} 10^{-8} \text{ 安培，}$$

即在給定數值下，平均電流強度僅決定於環形綫框的半徑與導綫單位長度的電阻。

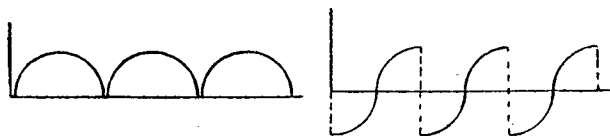


圖 1. 反向後電流的曲綫

我們選用相當大的導綫內阻，以減小在電刷整流子上的過渡電阻變化的影響，減少自感係數對電流相位移的影響。

若有電阻為 700—800 歐姆的指針式檢流計，取綫框的內電阻與檢流計的電阻大小相同。利用直徑為 0.2 公厘，1 公

分長的、電阻爲0.0054歐姆的漆包綫繞製綫捲時，確定出需要導綫1400公尺。若綫圈的半徑取爲10公分，那末大約需2300圈。在這種情況下

$$i_m = 185 \cdot 10^{-6} \text{ 安培.}$$

“地質勘探”工廠及“物理勘探研究所”工廠出產的具有上述電阻的指針式檢流計有着每一度近於 $0.2 \cdot 10^{-6}$ 安培電流的靈敏度。因而，在上述條件下，磁場 Z 變化50—60伽偶就使檢流計指針偏轉 1° 。對運動時測量來說，這樣的靈敏度可說是足夠的了。假如認爲還不夠，則在製造儀器時，擴大綫圈的面積或改變導綫的截面便可提高靈敏度，而對製就的儀器，可改變旋轉速度。測定感應綫框電路中的電流強度可用不同的方法來實現。我們採用了如下所述的零點法。大部分磁場 Z 在綫框旋轉範圍內，被永久磁鐵的磁場抵消，其餘部分，即大約等於在研究範圍內 Z_a 可能的負異常，被通過磁力儀架子上固定着的綫圈的電流的磁場抵消。電流強度以及磁場強度可用變阻器來調節。知道迴路中的電流強度及綫框的常數，就能夠算出補償磁場。當電動勢不變時，可記錄的僅是電路中的電阻。可用零點儀器作爲磁場完全補償的指示器；當指針由零移開時，變阻器滑動子便移動到指針將重新返回零點的位置。

我們寧肯用上述的測量方法，而不用在類似電測上廣泛使用的電位測量法，所持的理由是，在上述方法中，綫框總是在 $Z=0$ 的磁場中旋轉，因此綫框旋轉速度的變化僅改變儀器的靈敏度和稍許影響電流相移的值；當綫框旋轉速變化不大時，實際上我們發現不到檢流計指針明顯地離開零點。

補償綫路中的電阻歸根結底確定着 Z 的變異值，爲了連

續記錄該電阻，將鉛筆固定在變阻器滑動子上，於是鉛筆便沿運動着的紙帶滑動。那末我們就得到觀測員所經路途中變異的連續記錄。

在這種儀器構造中，感應綫框以均勻速度連續旋轉是必須的。為達此目的，可用電動機。電動機的恒定磁場對我們是沒有意義的，因為任務却是磁場的變異的測量，在開動和在改變電動機的負荷時磁場的變化是不大的，在一定條件下，這個不大的磁場變化不會影響測量的結果。我們總是謹慎地運用轉動感應綫框的電動機，亦即：最初的試驗在把電動機與感應綫框隔着一個很大的距離（從一公尺開始）裝在同一水平面內，並用傳動帶使綫框旋轉；然後將電動機置在同一轉動的感應綫框下面，最後直接連接綫框和馬達的軸。在所有情況下，可看到同一個事實：在所採用的儀器的靈敏度範圍內，電動機的磁場是恒定的，並且對相對測量的結果不發生顯著的影響。

第一個感應綫框作圓形，直徑為20公分，兩個部分的圈數為2400，漆包綫直徑為0.2公厘，電阻為750歐姆。感應綫框電路中的電流指示器是物理勘探研究所的零點儀器，其電阻為746歐姆，標尺上的每度值為 $0.17 \cdot 10^{-6}$ 安培。電壓110伏功率155瓦的電動機使綫框以900轉/分的速度連續旋轉；電源是由40個電池組成的CH-1蓄電池組，它供給50伏的電壓，足以保證上述的旋轉速度。在實驗室的試驗中，磁場Z用直徑為300公分馬克士威環消去。在上述條件下，磁場Z變化70伽瑪使零點儀指針偏轉1度，即所觀測的偏轉與所計算的完全符合。後來抵償磁場的方法有了變更——用永久磁鐵的磁場代替馬克士威環的均勻磁場；所得結果相同。

爲了闡明旋轉速度變化的影響，在速度從 900 到 500 轉/分的漸變中進行觀測；這就使檢流計的指針離開零點約 $5-6^\circ$ 。保持到 10% 的轉速精確度是沒有任何困難的；因此，假若不考慮其他誤差的來源，零點檢流計指針保持在零點位置是容易保證的。

在選擇電刷與整流子最合適的結合材料上曾化費了很長時間，在長期實驗的基礎上，在製造實驗用的電刷與整流子時，我們曾用過以下結合：整流子片由純銀製成，電刷由石墨製成。“地質勘探”工廠製造第一批儀器時，該工廠採用在磁傾計上試驗過的另一種結合材料：整流子片用銅，電刷用含銅石墨製成。

在實驗室的試驗中，熱電流出現的可能性給予很大的注意，然而在實際上它的出現是觀察不到的，正如所預料的那樣：在銀炭接觸處，溫度 100° 時，產生 0.4 毫伏的電動勢；當綫路中的電阻爲 1500 歐姆時，電流將小於 0.3 微安，這就可有 2 格的偏轉。在我們的試驗中，並未發現摩擦部分顯著的加熱，因而打消了熱電流有害影響的顧慮。

磁力儀的第一個模型曾在加夫戈洛夫斯克湖水面上在人造異常上面用行進中的船作試驗，人造異常是由散佈在湖底的大量磁鐵造成。其後這個模型又在諾夫戈羅德城區內在飛機上試驗，試驗的結果很好，但是整個儀器的大小與重量不適宜在 ПО-2 型飛機上工作。爲了在船上記錄，利用了電測井設備的記錄儀器，由“地質勘探”工廠製造，牌號爲 ПКА—3，在儀器中電位計用 99 歐姆的跳動變阻器代替。但是這種記錄器對飛機是太笨重了，因此在諾夫戈羅德區空測時，我們不得不把它留在飛機場上，每隔 30 秒作一次記錄用眼睛把變阻器滑動子的位置讀出。第一次在飛機上測量試驗之

後，當我們明白了空中工作的條件時，便製造出在飛機上工作專門使用的磁力儀的新模型。與前不同的新模型的重量和大小大大地減小了。感應綫框製成直角形，並放在以平行於旋轉軸為母綫的賽璐珞筒內。這樣一來，空氣的阻力變得最小，發電機的功率有10瓦就完全够了。爲了增加磁場記錄的精確度，在補償綫框上安兩個綫圈部分以便進行粗補償和細補償。整個磁力儀懸掛在一個帶有張綫的萬向接頭上，以張綫長度的變化來調整旋轉軸的水平位置，並確定電流的反方向。結構的大要在下述的一些模型中作較詳細的討論。

1938年爲了試驗製造出一個有着感應鐵心的感應綫框以增強磁通量的磁力儀。導綫繞在一個台球上，球上刻有放綫圈的槽和放鐵心的孔眼。由直徑0.16公厘的漆包綫繞的匝數爲7475，綫圈的電阻爲885歐姆。模型的試驗表明，由於有鐵心，電動勢增強近乎四倍。然而在試驗過程中表明，新模型很難調節，原因很可能是鐵心對相位移的影響太大，因此，即使在綫圈旋轉速度變化不大時，檢流計的讀數也有顯著的變化。把儀器調節到零點的必要穩定性的企圖沒有收到預期的結果，有鑑於此，用鐵心增大磁場的企圖被迫放棄。

1937—1938年，由於減小尺寸並使用鉛製導綫和架樞，製出分量極輕（1.6公斤）的磁力儀，並試驗了它；磁力儀被裝在汽球上，該磁力儀就用來測量當它隨氣球連續升高時的磁場。這個磁力儀在實驗室的試驗下得到良好的結果，而在汽球上的試驗表明進一步減小儀器的大小和重量的可能性。

由於全部空中測量工作都用來探尋鐵礦床，藉助於氣球測量磁場的工作便停止了。

以後由全蘇地質研究所地球物理工廠製造的模型是技術

上改進了的第二個磁力儀模型。

1940年春，“地質勘探”工廠第一批製造出六架磁力儀。圖2所示為其中之一。

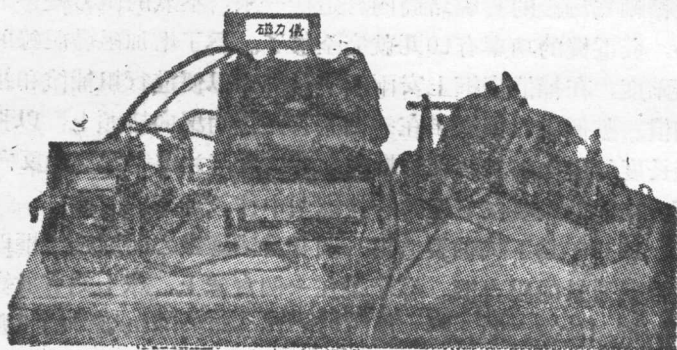


圖 2. 1940年“地質勘探”工廠出產的整套航空磁力儀

感應綫框（圖上右面）被裝配在堅固的底座上，底座由具有萬向接頭的張綫懸掛起來。感應綫框的大小為 16×16 公分，導綫匝數為2400，漆包綫的直徑是0.2公厘。

當一個轉換開關有從100到10000伽偶和從300到30000伽偶的兩個位置的時候，記錄器（圖上中央之後面）能測量100到30000伽偶的磁場變化。補償綫框大小為 149×217 公厘；粗補償部分的匝數是220，細補償部分的匝數是110。漆包綫的直徑為0.3公厘。沿一匝綫圈流過的1毫安電流在感應綫框旋轉部分產生的磁場是 $h = 2.7$ 伽偶（用試樣實驗式確定）；供電給粗補償和細補償綫圈的電池組的電壓為2.6—2.7伏。細補償變阻器的電阻是150歐姆。跳躍式地接通粗補償；當轉換開關在第一位置時，磁場強度在感應綫框旋轉部分的場強為2000、4000、6000和8000伽偶；在第二位置