

超导量子干涉器件 在地球物理学中的应用

〔美〕 哈罗德·温斯托克 主编
小威廉·C·奥弗顿

地质出版社

超导量子干涉器件在地球物理学中的应用

P3-867

社

超导量子干涉器件 在地球物理学中的应用

1980年6月2日—4日在新墨西哥州
洛斯阿拉莫斯科学实验所召开的专题
讨论会论文集

〔美〕 哈罗德·温斯托克 主编
小威廉·C·奥弗顿

李 颖 刘希芳 译
申宁华 陈文升 校

地 质 出 版 社

SQUID APPLICATIONS
TO GEOPHYSICS

Proceedings of The Workshop Held 2—4 June 1980

at the

Los Alamos Scientific Laboratory

Los Alamos, New Mexico

Edited by HAROLD WEINSTOCK

WILLIAM C. OVERTON, Jr.

超导量子干涉器件在地球物理学中的应用

〔美〕 哈罗德·温斯托克 主编
小威廉·C·奥弗顿

李 颖 刘希芳 译

申宁华 陈文升 校

责任编辑：王文孝 曹 玉

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：787×1092¹/₁₆ 印张：14.875 字数：348,000

1988年8月北京第一版·1988年8月北京第一次印刷

印数：1—1,075册 国内定价：3.60元

ISBN 7-116-00236-7/P·212

前 言

1980年6月2日—4日在美国洛斯阿拉莫斯科学实验所 (Los Alamos Scientific Laboratory) 召开了“SQUID 在地球物理学中的应用”专题讨论会。此次讨论会的目的是增进低温物理学学者和地学学者之间的学术交流,内容包括:(1)SQUID 的性能和局限性;(2)当前常规地球物理测量中的技术水平;(3)目前应用了哪些SQUID 技术提高了地球物理勘探工作;(4)SQUID与其它超导技术的最新应用。

SQUID 为超导量子干涉器件(Superconducting QUantum Interference Device)的英文字头,它是以约瑟夫逊结为根据的一种十分灵敏的磁场测量传感器,一般它的灵敏度是最佳常规磁力仪灵敏度的10 000倍。在约瑟夫逊结中,电子对穿过夹在两个超导体中的薄绝缘阻挡层。布雷·约瑟夫逊(Brian Josephson)1962年预言了超导隧道结的电流-电压关系的量子特性和射频发射,他本人为此而获得了诺贝尔奖。在事后两年之内,这些预言就在实验室中得到了证实,并发展了SQUID概念。在过去的十年中,已有几家公司开始生产SQUID产品。在这次会上有两篇文章(Falco/Schuller与Clarke/Goldstein)介绍了约瑟夫逊效应如何导致ac和dc SQUID的演变,而其余大部分文章介绍了SQUID在有源电磁法(EM)、无源大地电磁法(MT)勘探中的应用,及其在重力研究和探测磁异常方面的应用。有一篇文章是涉及用常规质子磁力仪作古代村址考古探查的,我们收集了这篇文章是为了想说明,在这样小面积的勘探工作中若采用SQUID 梯度仪可能会得到更好的效果。

本论文集集中26篇文章大部分是具有指导性和评述性的,便于促进地学工作者和低温物理学者之间的交流。我们希望这些论文有助于两个领域中的学者评价SQUID在地球物理学中的应用的潜力与新开发的设想。

我们对主办单位纳瓦研究室(Office of Naval Research ONR)和洛斯阿拉莫斯科学实验所(LASL)所作的支持、赞助和经济上支援表示由衷的感激。没有他们,这次讨论会和论文集都不可能完成的。特别是ONR的地球与环境物理项目、LASL的物理所和基础与应用地学所提供的经济资助。我们特别要感谢ONR的杰克·希科克(Jack Heacock)先生不断地给予了关心和帮助;LASL的休·伍顿(Sue Wooten)、埃德·斯坦(Ed Stein)、弗洛伊德·阿丘利塔(Floyd Archuleta)先生做了大量的工作;尤其是我们杰出的会议主席乔治·V·凯勒(George V. Keller)、查尔斯·M·斯威夫特(Charles M. Swift)、约翰·C·惠特利(John C. Wheatley)、罗伯特·S·安德鲁斯(Robert S. Andrews)与格兰特·海克(Grant Heiken),他们既遵循了紧张的会议日程安排,又活跃了会议的气氛。

我们还要感谢我们的组织委员会内二位成员:科罗拉多矿业学院的乔治·V·凯勒和阿贡国立实验室(Argonne National Laboratory)的查尔斯·M·福尔科(Charles M. Falco)的极为宝贵的帮助。还承蒙乔治·凯勒主持了我们两次组织委员会的会议。最后,我们在此感谢SEG与我们的良好合作以及乐意承担出版这本论文集。

当这本论文集准备出版之际,东道主研究所的名称“洛斯阿拉莫斯科学实验所”,改为“洛斯阿拉莫斯国家实验所”(Los Alamos National Laboratory)。由于我们的许多

文章写在改名之前，所以我们决定许多文章中仍沿用旧名，不再作编辑改正。

纳瓦研究室

哈罗德·温斯托克*

洛斯阿拉莫斯科学实验所

小威廉·C·奥弗顿**

* Harold Weinstock, Office of Naval Research, Chicago, Illinois.

** William C. Overton, Jr., Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico.

目 录

仪器与分析

- 地球物理应用的磁力仪.....S·布赖纳 (1)
- SQUID及其用于地球物理的灵敏度.....C·M·法尔科 I·K·舒勒 (12)
- 梯度仪不平衡的原因和有效的平衡技术.....F·B·贾沃斯基 D·B·克鲁姆 (20)
- 以SQUID为基础的地球物理测量系统的信号处理和数据分析.....W·D·斯坦利 (28)
- 数字SQUID电子设备在地球物理学中的应用
..... J·伏尔巴 A·A·法尔夫 M·B·布尔班克 (34)

电磁法与大地电磁法

- 时间域电磁测深系统的设计.....G·V·凯勒 (39)
- 大地电磁测量..... J·克拉克 N·E·戈尔茨坦 (54)
- 在亚里桑那州和新墨西哥州使用SQUID磁力仪寻找干热型地热能的大地电磁勘探
..... M·E·安德 (69)
- 地磁和ELF活动性的近范围空间相关
..... J·E·洛肯 R·F·斯特罗克 R·H·库瓦哈拉 (76)
- 航磁梯度测量——金属矿勘探中的一种良好的地质填图工具.....P·胡德 (84)

低温系统与特定环境

- 供地球物理勘探SQUID 磁力仪用的制冷系统..... J·E·齐默尔曼 (93)
- 野外应用的低温技术.....W·S·戈利 (98)
- 深孔测井用SQUID系统的低温环境..... W·A·斯特耶特 W·C·奥弗顿 Jr (108)
- 海上环境中的 SQUIDR·J·迪杰 J·H·克拉斯森 S·A·沃尔夫 (115)

岩性与古地磁

- 古地磁用的岩石磁力仪应该多灵敏?J·L·基尔希文克 (127)
- SQUID磁力仪在岩石和古地磁中的应用.....M·富勒 (132)
- 实验室用SQUID磁力仪作岩石压磁实验.....T·L·亨耶 S·J·派克 (136)
- 大地构造磁性研究用的 SQUID 磁力仪..... S·P·伦德 T·L·亨耶 (146)

重力测量

- 常规重力勘探.....T·R·拉费尔 A·T·赫林 J·E·塞伯特 (155)
- 用超导重力仪作测量..... J·M·古德金德 (161)
- 具有SQUID读出的超导张量重力梯度仪.....H·J·塔克 (167)
- 超导重力梯度仪.....E·马波尔斯 (178)

SQUID 技术的新应用

- 可能应用SQUID NMR检测的NMR测井和裂缝测绘新技术.....J·A·杰克逊(183)
- 热干岩石地热提取系统的特性..... J·N·奥尔布赖特 C·A·牛顿(189)
- 用SQUID梯度仪探测薄层磁异常——确定流体裂隙方位的可能性
..... W·C·奥弗顿 Jr(196)
- 磁法勘探在考古遗址中的应用..... J·W·韦默思 R·哈金斯(217)

会议总结

- 会议总结.....H·温斯托克(227)
- 超导技术在地球物理学中的未来(结论)H·温斯托克(231)

仪器与分析

主席：乔治·V·凯勒
(George V·Keller)

地球物理应用的磁力仪*

S·布赖纳

摘 要

磁力仪用于各种地球物理测量，包括为航空、海洋、卫星和地面勘测用的移动式测量以及为磁性层与地下探查用的定点式监控测量。当前应用的主要仪器有：质子旋进磁力仪、光泵磁力仪、磁通门磁力仪和感应线圈磁力仪。本文把各种常规磁力仪及其灵敏度与性能作为一种基准来论述，反过来就证明SQUID磁力仪在这些应用中会有更多的优点。

一、引 言

本文中提到的地球物理应用的地磁场(或行星场)的测量，一般约为数十或高达 10^5 nT^{**} ($1 \text{ nT} = 1 \text{ 伽} = 10^{-5} \text{ Oe} \cong 10^{-5} \text{ Gs}$)。这里介绍了在这种地球物理应用中的常规磁力仪的性能，及与平常称为SQUID(超导量子干涉装置)的超导约瑟夫逊结型的磁力仪的对比。在介绍这些应用中的各种磁力仪的性能与灵敏度时，特别着重介绍与在各种地球物理应用中的SQUID相比所具有的优点和局限性。

为了突出它们的应用特点，分为定点式监控测量或移动式勘测测量来叙述。前者常常涉及记录被测对象随时间的变化，而后者是指随空间的变化，当然也有些实例观测的对象是两者皆有的。

目前地球物理应用所使用的各类磁力仪有：磁通门磁力仪、质子磁力仪、光泵磁力仪、感应磁力仪、机械磁力仪、SQUID磁力仪及其它混合型磁力仪。据粗略估计，在地球物理应用中利用上述各类仪器的百分比分别为：16%、60%、4%、12%、5%、1%和2%。

对于同样的应用，各种仪器具备的特点为灵敏度、价格、稳定性、灵活性、便于操作、频率响应、测量类型及动态范围。测量的性质可以是矢量的或是标量的；是变化的量或是绝对的量；是某点上的值或是差分值；是时间的变化率或是合成的。虽然SQUID已

* Sheldon Breiner (EG&G Geometrics, Sunnyvale, CA, USA); Magnetometers for Geophysics Applications.

** nT (纳[诺]特斯拉)，SI制——译注。

应用到大地电磁法装置中和在实验室测定岩石磁性,但它仍是相当新的,并正在发展之中,它在技术指标上是无双的,但操作维修比较复杂,因此,作为一种仪器而言,她正在地球物理学中寻求自己的位置。

定点监控应用至少有以下一些方面:磁性层的调查和测量、大地电磁法、长期变化、磁法勘探中基点站的基准、古地磁、压磁性、考古磁学等,也许还有其它方面未能提及。勘查应用包括:为勘探自然资源和地质研究获取地面、航空、海洋和井中勘查的地质信息;地球和行星磁性层填图和内部磁场源填图;地热研究用的居里点等温线填图;考古学和搜索勘测;大气层研究以及自然资源勘探和固体地球研究中天然和人工电流场的磁分量填图。但本文不包括尽管与之密切相关的警戒或军事上的应用,如反潜艇战、探测地雷、海港防卫与武器探测(如目前在飞机场所使用的),以及医药、生物研究方面测量心脏和其它器官的磁场。

二、磁力仪介绍

简要地描述一下各种磁力仪的基本性能有利于比较它们在各种应用中的指标。只打算论及目前在实际应用的各种型式和变型的仪器性能。所介绍的各种仪器的灵敏度是对内部探头而言,不包括附加的磁通收集和类似的增强装置,这些东西装在各种探头上也能增加灵敏度,但是降低了其它工作性能。在文献中可容易地找到任何一种仪器的较详细的说明。论述的顺序是按其发展的时间先后而排的,因为这样论述能突出它们的发展趋势,尽管这种发展是缓慢进行着的,老的仪器渐渐地淘汰了,越来越多地使用着较新的仪器。

1. 机械磁力仪

机械磁力仪在矿产勘探中差不多使用了400年之久,基本上都是水平地或垂直地悬挂在各种宝石上、扭丝上或机械轴承支撑上的磁偶极子,比较普遍的类型有:施密特(Schmidt)型、记录式磁变计、扭秤、QHM、磁倾计、赫奇基斯(Hotchkiss)超倾磁力仪以及其它特殊的类型,这些仪器通常由专门从事精密光学装置的公司研制和生产的。以其中最佳的技术指标来看,这些仪器都受温度影响,其灵敏度为几个nT到几十个或几百个nT,通常测量磁场矢量的水平分量或垂直分量。在地面勘测的点测中,常常放在稳定的三角架上读取数据;在磁观测站作连续观测记录时,通常置于墩上的专用罩中测量。在最近二十多年中,随着电子仪器和电动机械仪器的发展,这种仪器的使用大大减少,主要原因是这类仪器的灵敏度、精度和测量扫面速度比电子磁力仪低得多。

2. 感应线圈磁力仪

这里只是简要地介绍感应线圈磁力仪,主要是因为这个题目是本论文集之中其他人论文的主题,有些人把它定义为电磁仪,即,作为测量快速变化的天然信号与人工信号所用的磁分量探测器。通常是在空心或铁磁体或铁氧体上绕一千匝或匝数更多的一种感应线圈,它测量磁场相对于时间的变化率,特别是用于100Hz—1kHz、1Hz—100Hz、0.001Hz—10Hz频率范围中的磁场变化。而信号的幅值是直接随频率变化的,所以对于接近于直流的甚低频信号,测量的灵敏度非常低。如果人们要得到nT量级的测量数据,由于信号是时间的导数,必须在所需的时间内作积分。

感应线圈磁力仪主要用于大地电磁法、微脉动测量,以及用于寻找电子导电的块状硫

化物矿床等自然资源的航空、地面电磁法勘探中的磁测量。高灵敏度测量所用的感应线圈相当大而笨重，具有运动敏感性（因为它测量磁场的变化率，即使它在地球磁场中运动也会发生），它是一种矢量分量仪器，对所使用的频带范围之内要求有定向稳定性，它不是测量磁场的本身而是测量磁场的变化率。在0.001Hz、0.1Hz、10Hz和100Hz周期，使用铁氧体线圈得到的典型灵敏度分别为 10^{-1} nT/Hz、 5×10^{-4} nT/Hz、 7×10^{-5} nT/Hz及 10^{-4} nT/Hz。

3. 磁通门磁力仪

磁通门磁力仪是本世纪四十年代在反潜艇战争中开始发展起来的。第二次世界大战后不久，航空物探用它寻找自然资源。人们所熟悉的各种形式的磁通门磁力仪有：二次谐波式、环状铁心式、薄膜式及定向式等，通常都是在铁磁体心上有一系列的绕组构成，在绕组中的磁导率是磁场强度的函数。用一个ac激励信号来提高这种函数关系的灵敏性，ac激励信号使铁心环绕磁滞回线达到饱和。外磁场的影响在一个方向上加到感应场中去，在另一个方向上减去，从而在饱和的间隔上产生了差异，这种差异在两倍于激励频率上可测到。经检波后的信号与铁心轴向的磁场矢量分量成正比。用一个dc电流使仪器指零，外磁场为一些长周期不稳定的信号源，并且最近研制的仪器达到了0.05nT的灵敏度，一些航空和监测型仪器达0.1nT灵敏度，手持便携式仪器达到几个nT灵敏度。

所有的磁通门磁力仪都测量相对磁场值而不是绝对值，因此必须采用一些方式作标定，例如可以重新测量那些已测量过的点或以其它磁力仪所作的绝对测量值为标准。磁通门磁力仪在航空、卫星和一些地面勘探中应用很普遍。由于磁通门磁力仪测量磁场的矢量分量，测量时要求仪器对一些空间坐标系统定位，如在地面便携式测量时用垂直方向定向，在航空测量中沿地磁场方向自动地定向。定向的磁通门系统用一个遥控马达对三个互相垂直的磁通门探头连续定向，使其中两个探头测量的磁场为零，于是另一个探头便测到最大的矢量值，这就看作是总磁场强度。探头和电动定向系统的精度是影响灵敏度和分辨力的主要因素，尤其在快速运动平台上更是这样。在卫星、极少数航空研究测量飞机上和一些井中探头中使用了三个互相垂直的磁通门探头，它是以惯性或其它空间坐标系统定位，然后得出了磁场的矢量信息。

4. 质子磁力仪

质子磁力仪是五十年代中期发展起来的，它是研究核磁共振的产物。质子磁力仪也叫核子旋进磁力仪、质子旋进磁力仪或叫质子自由进动磁力仪。它是在含有氢原子的液体（如水、煤油等）外面缠绕一个线圈构成的。氢原子的质子或核子本身是一个自旋的磁偶极子，由于环绕样品的线圈中的直流电流产生的均匀磁场的瞬时作用可把磁偶极子极化，即按一定方向排列。在线圈中的电流突然终断以后，这些自旋质子便绕外磁场方向或地磁场方向进动，其进动频率与磁场强度成正比，而与探头方向或地磁场方向无关。进动的质子在极化线圈中产生了一个信号，通常为2kHz。由于极化通常大约在几秒钟内就衰减了，必须在两次测量之间重新极化，因而它所作的测量是不连续的，最大速率为每秒10次读数。

另一种质子磁力仪，如欧弗豪斯/阿伯雷根（Overhauser/Abragam）磁力仪，它用射频激励场，使一种含有自由原子团的有机液体极化，提供连续的进动和磁场的测量。尽管欧弗豪斯/阿伯雷根磁力仪具有连续测量的特点，但是激励磁场多少要影响地磁场绝对

值的测量。

任一种质子磁力仪的最高灵敏度一般为 0.01nT 。自由进动磁力仪的绝对精确度(以下称为精度——译注)大约为 0.1nT (主要受探头磁性、频率计数电路的准确度和已知原子常数的精度的限制),这类仪器是各类测量地磁场绝对值的常规磁力仪中最准确的一种。质子磁力仪在快速进动时间之内的频率响应从直流到至少几百 kHz 。然而,由于多数质子旋进磁力仪在一个极化循环中只得到一个测量值,频率响应受最大循环速率的限制(对于自由进动式为直流到低于 10Hz ;对于欧弗豪斯/阿伯雷根式来讲,接近于直流一直到几百 kHz)。现在正在使用的地面便携式磁力仪大多数是质子磁力仪,有些灵敏度可达 0.25nT ,绝对精度约为 1nT 。

质子磁力仪和光泵磁力仪一样,都利用了自旋进动的特性,从而使这两者是所有磁力仪中最适合在运动平台上作勘探应用的,例如飞机上、船舶上,这是因为它们都不装有任运动部件,无需定向就可作磁场测量(见图1)。它们测量的是总磁场强度标量值,多半与定向磁通门探头相似,但又不需要作定向或者使用惯性定位。质子磁力仪在梯度十分大的地区不能工作,所以在某些铁矿地层的地面勘探中的应用受到限制。

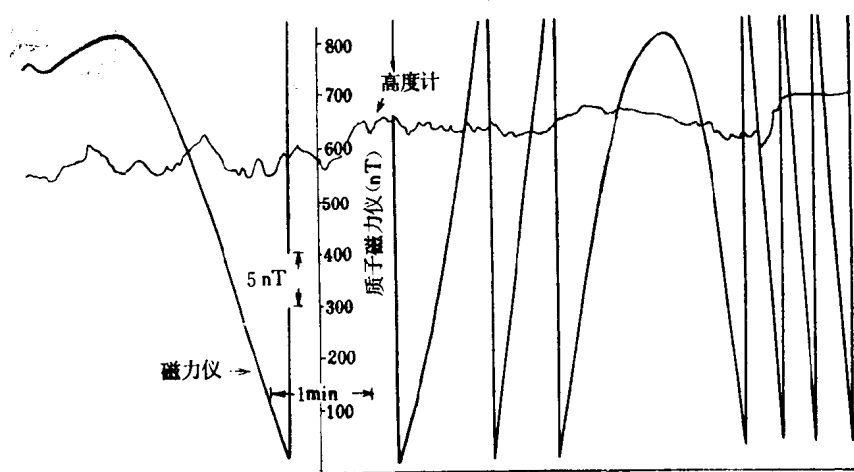


图 1 装在飞机尾刺上的质子磁力仪 (EG&G Geometrics G-813 航空磁力仪) 的航磁记录
(资料来源: Aerial Surveys Ltd)

但是,也能用自旋进动磁力仪取得矢量分量测量值。将探头放在设计好的线圈系统中操作,该线圈系统能在其中产生一个相当于所需的地磁场分量的补偿磁场。获得了电流大小与线圈几何结构方面的资料,就可把标量磁力仪作为矢量磁力仪应用了,现在这种方法通常在磁观测站系统中使用,还少量用于定向勘测飞机。

5. 光泵磁力仪

光泵磁力仪于1957年首次作地球物理测量应用。这种磁力仪利用光泵引起原子或电子的自旋进动,与核磁共振原理利用质子进动十分相象。光泵磁力仪利用碱金属蒸气如铷、铯(有时钾、钠)或亚稳态的氦中的电子集居数,得到磁场强度标量的连续测量值,其灵

敏度优于 10^{-3}nT 。一般的光泵磁力仪使用装有碱金属或氢的灯，灯光通过装有同样元素蒸气的玻璃吸收室，并聚焦于蒸气室另一侧的光探测器上。由一个放大器把光探测器的输出端与环绕蒸气室的一个线圈连结起来。该电-光系统通过能量的共振吸收和再辐射，构成一个振荡器，其频率直接与磁场强度的标量值成正比，与质子旋进磁力仪十分类似。然而，光泵磁力仪可在相当高的频率段获取连续信号，对于碱金属其频率在几百kHz，对于氢其频率为2MHz。

一般光泵磁力仪如铯磁力仪，在0.1Hz—10Hz带宽上其灵敏度已达 $5 \times 10^{-4}\text{nT}$ ，在 10^{-3} — 10^3Hz 范围内可达 10^{-3}nT （见图2）。常规光泵磁力仪的绝对精度一般为1—几个nT，这是由于仪器运转的共振线的复杂性的影响，这些共振线是地磁场的方向、激励灯和放大器的某些工作特性的函数。所有光泵磁力仪的频率响应都超过几个MHz，因为与场变化相对应的进动频率比进动一周还要短得多。

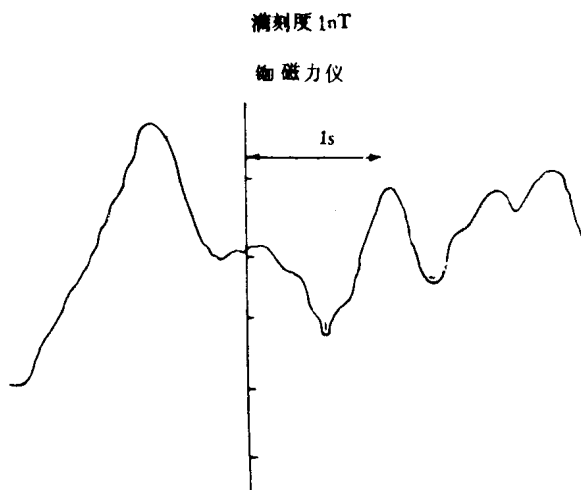


图2 光泵铯磁力仪在某点日变站的记录
(资料来源: Varian Associates)

6. SQUID磁力仪

SQUID磁力仪的性能、应用及局限性在本文集中其它论文都要作论述，本文主要介绍常规磁力仪故省略这部分内容。

三、差分磁力仪的结构

许多常规磁力仪通常都以差分结构形式应用，这就是我们所说的差分磁力仪或称梯度仪。准确地讲，一个差分磁力仪就是用两个特性相同的磁力仪来测量它们信号中的差异。另一方面，一个磁力梯度仪可以认为是一个差分磁力仪，只是两个探头之间的距离是固定的，其间距离与被测场源的距离相比是很小的。即使在这些常规磁力仪的探讨中，差分磁力仪的应用也会具有特别的意义，因为本文的目的是建立一个基准，也就是说，把目前使用的和现有的标准与SQUID磁力仪应用的现状作比较。因为SQUID磁力仪有许多应用都采用差分或梯度结构，这对于考察同样结构的常规磁力仪测量结果是很有用的。

常用的差分磁力仪是由共模抑制消除相关噪声，这些噪声来源于仪器或是测量环境。用差分磁力仪作测量所用的单位仍定为nT，因为它只是从一个探头所得的磁场值中减去另一个探头的测量值。而作为梯度仪使用时，测量值是磁场强度的差值与两探头之间距离的比值，所以用 nT/m 或类似的梯度单位来表示。

磁力梯度仪可消除时间上相关的噪声，例如由于远源造成的时间变化。梯度仪也可用

于消除空间的一些相关噪声源，即指离梯度仪距离较远的，例如，较深部赋存的地质场源或区域梯度。后者的应用可以看作是一个距离滤波器，而前者则是一个时间变化滤波器。距离滤波器也可看成为消除远距离场源而增强了本地场源。尤其是异常按一变化率随距离增大而减弱时，利用梯度仪测量比用磁力仪可高出一个数量级。这点可参见本文集中胡德（Hood）写的介绍梯度仪应用的文章。

梯度仪第三种应用是能够在活动平台上作有用矢量（即标量场强的梯度）的精确填图，其精度比直接测量矢量分量的各种方法的精度都高。标量场强的梯度本身是一个矢量，它在解释中与磁场的矢量分量一样具有同样的有用的特征。而且矢量探头上角度的变化（如磁通门磁力仪），与使用光泵或质子旋进磁力仪作标量梯度测量时按同样大小的方向变化相比，前者引起的地球物理异常的变化比后者高出几个数量级。

我们可以看一下，例如，在50,000nT的磁场中有由地下3000m深处产生的总磁场异常为100nT（ 7×10^{-2} nT/m的垂直梯度异常）。若矢量探头方向上变化1°，在测到的场强中将引起900nT的误差，这个数值比异常本身大9倍。而用垂直梯度仪测量总场强的梯度，在仪器的方向上同样也变化1°，引起异常的误差为 10^{-3} nT/m，误差只占梯度异常的

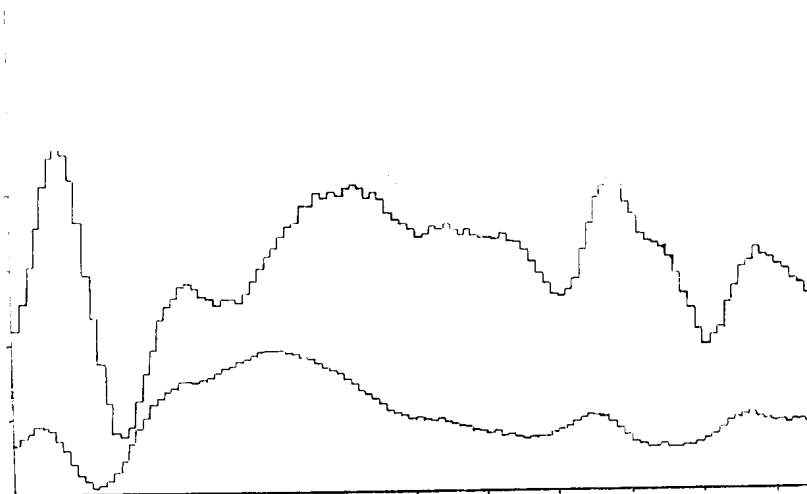


图 3 海洋磁力仪和磁力梯度仪（两个质子磁力仪相距500英尺同线拖曳）的记录

（资料来源：EG&G Geometrics）

总磁场（只用主探头）（图中下面的曲线）

灵敏度：0.25nT

采样率：6s

分辨率：0.1%—250nT(f/s)

梯度场（从属/主差分）（图中上方的曲线）

灵敏度： 16.4×10^{-4} nT/m(5.0×10^{-4} nT/ft)

采样率：6s

分辨率：0.34%—0.66nT(0.2nT/ft)

一般参数

记录仪类型：Hewlett-Packard, 7130A型（双道）

记录仪速度：2.54cm/min(1.0inch/min)

船速：8n mile/h

1%。

梯度仪另外的应用是利用梯度与总磁场异常的数学关系，根据需要来确定某些参数，如：场源深度、场源方向，以及判定场源的特征，如磁矩、磁化率等等。

地球物理测量中经常应用磁力梯度仪，特别是用光泵磁力仪构成垂直梯度仪，在飞机上作上述的测量；用质子磁力仪构成纵向梯度仪，在海上用来消除磁场的时变化，并得到总磁场强度（图3）；还有在飞机两个翼尖上装上质子磁力仪构成横向梯度仪作二维平面的磁场填图效果很好。现在已有三架飞机安装了这种横向梯度仪，分别是加拿大地调局、芬兰和美国所拥有的飞机，有一台的时间是1970年，其它两台时间更晚一些。美国的这架是在尾刺上安装了第三个探头，它具备上述所有梯度仪的优点（见图4）。感应线圈、磁通门、质子和光泵梯度仪与差分磁力仪都在大地电磁法测量和古地磁及其它物探工作中得到应用。

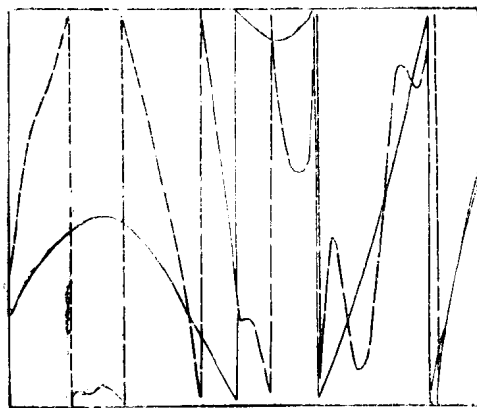


图4 航空光泵铯磁力仪和垂直梯度仪记录（吊舱式），较平缓曲线是磁力仪记录，满刻度为100nT；其它曲线满刻度为 3×10^{-2} nT/m($10^{-2} \gamma/f$)

（资料来源：Aero Service Corp.）

四、磁力仪的有关性能

1. 灵敏度

以地球物理应用有意义的宽频率范围来看，在0—10Hz之中，光泵磁力仪的灵敏度为 5×10^{-4} nT，比其它常规磁力仪高1—2个数量级。在100—1000Hz频率范围内，测量磁场的时变化率时，一个大的或铁心的感应线圈灵敏度可与光泵磁力仪相媲美。（注意：在比较磁力仪灵敏度时，要考虑到所用的频带是很重要的，因为有些仪器在特殊的频段上由于使用了增强信号或抑制噪声的方法，其灵敏度就明显地好得多，例如，感应线圈在1000Hz时，以及质子磁力仪对于直流都是属于这种情况。）

为了评价特殊用途磁力仪的有效灵敏度，必须把非仪器噪声和环境误差的实际影响考虑在内（见下节）。在三个频带中各种仪器的相对灵敏度见图5。

2. 频率响应

一台磁力仪所要求的频率响应，当然应该是由能满意地分辨出异常的最高频率和最低频率（包括零和直流）所形成的波段。在这个频带中信号总是能够获得或者受实时或连续滤波所增强。在这些常规磁力仪中，光泵磁力仪的频率响应也许是最宽的，从0—几个MHz；其次就是磁通门磁力仪，它接近于0（受温度影响的限制）至几百Hz，或再高些（见图6）。与这两种磁力仪相比，感应线圈磁力仪在几kHz以上有较好的高频响应，但是在 10^{-3} Hz时就差得多了。质子磁力仪有极好的低频（如直流）响应，故成为绝对值磁力仪。质子磁力仪如果在每个读数循环中工作，能对几百kHz作出响应，但是作为一个连续

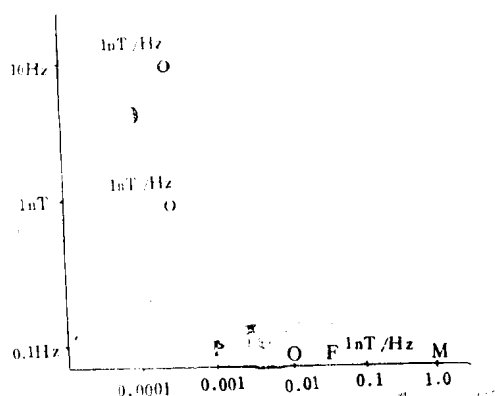


图 5 常规磁力仪的相对灵敏度与频率的关系

O 光泵磁力仪；I 感应线圈磁力仪；P 质子磁

力仪；F 磁通门磁力仪；M 机械磁力仪

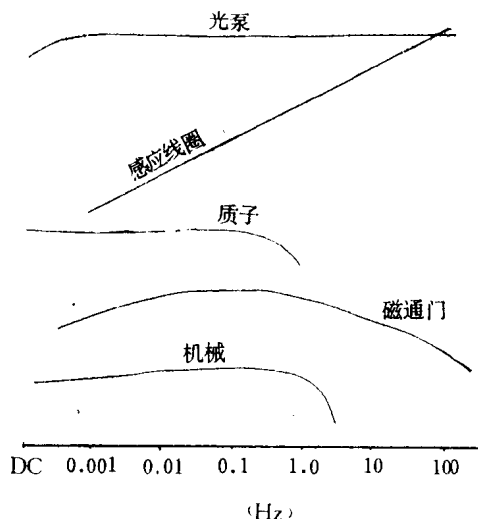


图 6 各种常规磁力仪的相对频率响应

磁力仪之用，该仪器一般限于分辨低于5或10Hz的信号。机械磁力仪的响应与质子磁力仪类似，但是因为它不是绝对值仪器，并与温度有关，故它对直流的响应不太理想。

3. 绝对精度

质子磁力仪，由于使用一个无磁探头和一个稳定的标准振荡器，精度与原子常数质子旋磁比有关，目前已知旋磁比精度达0.2ppm，其绝对精度约为0.1nT，目前认为这是地磁场测量的普遍基准。光泵磁力仪若按单共振线工作，再加上电子线路、光强度、温度的适当标定，其绝对精度一般为1nT。好几年来作为观测站基准使用的机械磁力仪，也约有几个nT的绝对精度。磁通门磁力仪、感应线圈磁力仪由于具备磁变计的特性，所以不存在绝对精度的指标。

4. 矢量与标量仪器

除了自旋型磁力仪以外，所有的磁力仪包括磁通门、感应线圈、机械磁力仪在内本来都是矢量分量仪器。自旋型仪器，即质子磁力仪和光泵磁力仪，正如前所述也能作矢量仪器使用。

质子磁力仪和光泵磁力仪本来就是标量仪器（总磁场强度矢量的幅值），而定向的磁通门磁力仪依靠它已改进的操作特点，成为标量仪器。要说明的是：在所有的地球物理应用中，尽管这些磁力仪基本上是标量仪器，但实际可作测定地磁场矢量分量的磁力仪使用。这一点只要在异常干扰相对于地磁场很小的情况下，把测量到的总磁场值作一张矢量图，就能看出来。

为了发挥活动平台上所用的磁通门磁力仪的简便与体积小优点，用三个互相垂直的磁通门探头组成一台标量仪器。每一个探头都在地磁场的不同方位上工作，对这三个场强分别平方之和再求其平方根，就得到总场强的值。但是，这就要求这三个探头都非常精确、互相垂直，还要求在0—10⁵nT磁场的全部范围内都保持同样的以及十分精确的线性度。但是，迄今为止，在这方面所作的努力的收效很有限。

5. 尺寸大小

各种磁力仪的基本传感元件的最小尺寸实际上是不定的。例如，磁通门探头体积能做成小于 1cm^3 。一个感应线圈即便是灵敏度很低的，也可能制成小于几个 cm^3 的，但是大部分的体积都在几千 cm^3 ；质子磁力仪、光泵磁力仪和机械磁力仪的探头体积都小于 100cm^3 。

仪器的外壳，要包括探头、必要的电子线路、机械支架在内就使仪器体积增加了许多。对于要求使用体积较小的磁力仪的工作环境，就应该考虑到所用仪器的整个系统与结构问题。

6. 功率要求

对于连续工作的磁通门、感应线圈、机械磁力仪来讲，功率要求一般小于几个 mW 。光泵磁力仪为几十或几百 mW ，而质子磁力仪平均功率在几 W 以上。

7. 成本与复杂性

包括磁力仪探头所用的支架设施在内，常规磁力仪按照仪器成本和复杂性由低至高排列的顺序为：感应线圈、机械式、磁通门、质子、光泵磁力仪。的确，把现代先进的仪器说成为较复杂的仪器是有些主观，但是也要考虑到一些因素如探头结构、使用繁多的光学、电子元件，以及需要进口材料等方面也是具有复杂性的。

五、环境和应用的局限性

在评价常规磁力仪所用的灵敏度、精度、频率响应的特点时，要考虑各种仪器的使用环境及其是作监控用还是勘测应用是十分重要的。甚至在评价性能最佳的磁力仪时，象SQUID磁力仪也要审核一下这些环境局限性是否在使用了SQUID以后能得到克服，或者是否这些因素是固有的，采用改进的仪器也只能得出一样的结果。

与其它较现代的常规磁力仪相比，机械磁力仪几乎在各种应用中都存在严重的局限性。其中主要的缺点是：灵敏度低、信息显示方式落后、必须作环境校正和固定。磁通门磁力仪主要用于地面便携式工作、三轴地面记录形式和航空测量。但在后两种应用中温度漂移、灵敏度和标定方面是主要的缺点。

感应线圈主要限于 $0.001\text{—}1\text{Hz}$ 频率范围内的高灵敏度测量，这是受信噪比低、附属设备体积大、运动灵敏度及响应频带有限的影响（可参见本文集中凯勒（G. V. Keller）的文章）。这也说明它只能在频率范围为 $1\text{—}100\text{Hz}$ 的大地电磁法中应用，而不适宜为寻找良导矿体勘探深度较深的航空电磁系统中应用。

质子旋进磁力仪在快速移动平台上作测量时，例如海上拖舱探头、航空吊舱探头，它受侧滚、俯仰、偏航运动的影响。这些噪声是接收线圈在其他情况下（假设接收线圈是静止的）在旋进质子周围旋转而产生的，有时也称为多普勒进动误差（Doppler-precession error）。该误差值与探头在地磁场方向上旋转速率的分量成正比，每旋转 0.04Hz 时，最大误差为 1nT 。这种效应是这样的，以致于在探头作拖吊使用时，取决于它的稳定性大小，这种噪声可能只有零点几个 nT 。

光泵磁力仪由于探头的方位相关性限制在某些应用中，这种相关性限制了它的绝对精度，以及产生了一些与位置有关的误差，该仪器作地面便携式仪器使用时及在航空吊舱和海上拖曳测量中，无需作定向操作。对于单室或双室的光泵磁力仪，转动一个 360° 其方位

误差约为0.1—1nT, 对于典型的拖曳探头运动, 方位噪声约为0.1nT。光泵磁力仪与质子磁力仪一样具有与速率有关的多普勒旋进误差, 但其幅值比质子磁力仪小2—3个量级。

任何一种探头安装在飞机机翼(吊舱)中, 机翼是不断地摆动着, 又由于翼的外形是符合空气动力学的, 还按其自然摆动周期作旋转。还要在比未受干扰的垂直梯度0.02nT/m和南北水平梯度0.04nT/m大10倍或10倍以上的地磁场梯度环境中, 从一个位置移动到另一个位置。

为了航空测量的需要, 把探头安装在飞机刚性尾刺上或翼尖上可以减少质子和光泵磁力仪中固有的与运动、方位和位置有关的误差。飞机实际需要的磁补偿(对于永久磁化和感应磁化、涡流的)最大局限在转动360°约为0.5nT—1nT, 因此, 典型的偏航方向变化会引起0.1nT或再大一些的方向误差。这些综合影响的结果, 对于航空测量应用来讲, 应用现在的磁补偿技术在整个测量过程中, 一台磁力仪一般最大灵敏度始终不超过0.1nT。

在海上测量工作中, 探头运动的情况与航空测量中是相似的, 只是由于良导的海水运动穿过地磁场而产生了电动势, 因而海浪产生了一个磁场扰动。在大风浪状况下, 它产生的噪声相当于十分之几的nT到几个nT。使用一台灵敏度为0.1nT的磁力仪工作时, 几乎经常能观测到这种情况。

平台和探头的位置误差给应用带来了附加的限制, 特别在需作较高灵敏度测量时更是如此。位置误差值乘三个方向上任一梯度是很容易估算出来的, 并且在磁场值方面与地图或航线上通常假设或隐含的比较显示出有较大的出入, 因为后者位置问题不那么重要。

微脉动、日变以及其它时间变化的影响, 当它们不是作为信号而作为噪声对待时, 这也表示测量信息中的缺陷, 不过它取决于有无消除这些影响的能力。这种与时间变化的相关性决定于离测点的距离、地下电导率的均一性、磁场活动性的相对状态、磁性层中电流系统诸如极光效应、赤道电喷流电流系统和其它随时间变化的磁场噪声源。

本文对各种噪声源和环境影响不花笔墨讨论。但是必须确信, 在各种常规磁力仪应用中, 决不是由于仪器成为成功地测量的主要限制, 应该讲条件扩展了仪器的应用。

六、结 论

本文通篇中称作的“常规磁力仪”是为把地球物理应用的专用磁力仪与SQUID磁力仪区别开。但是用“常规”这个词并不意味着这种仪器不属于要被淘汰的仪器, 或因为它们用于地球物理就保证不再进一步发展了。文中有意地强调这些常规仪器的许多缺点, 是为本论文集集中涉及SQUID磁力仪的论文及将来的工作奠定基础的。应该鼓励人们去探索解决磁力仪在地球物理应用中遗留的许多问题, 象解释中的多解性、扩大矢量在测量和监测中的应用, 及它在系统噪声源与非系统噪声源校正中的应用。采用带计算机处理数据支持的SQUID磁力仪就有可能解决上述问题。

参 考 文 献

- Breiner, S., 1966, Ocean Magnetic Measurements, Proceedings of IEEE Ocean Electronics Symposium, P. 285-301.
- Breiner, S., 1973, Applications Manual for Portable Magnetometers.