

磁 测 量 文 集

国家仪器仪表
工业总局 哈 尔 滨 电 工 仪 表 研 究 所
情 报 室

1 9 8 0 年 6 月

前 言

磁测技术有着悠久的发展历史，特别是近卅年来，由于电子技术、精密电测技术的迅速发展，更加速了磁测技术的发展。从工业用软磁材料的测量到高能加速器和热核聚变装置的磁场测量；从生物磁场的测量到探潜、探矿以及天体磁场的测量，形成了宽广的测量领域。与此相应地出现了不同原理和多种测量方法，并制造各种仪器仪表和装置，因此扩大了磁测量技术的应用范围。

世界上工业发达的国家，都对磁测技术进行大量的研究工作，研制生产很多新型的磁测仪器，发表了许多文章。我国在这方面的、工作已有很大发展，并取得了很大成绩，但仍不能满足国家科研和生产的需要。目前我国磁测技术和仪器与国际水平相比还有一定差距。为了促进磁测技术和磁测仪器的发展，以满足四化的需要，我们编了这本文集，供从事磁测量仪器研制、设计和使用等有关技术人员、工人和领导参考。

为使读者了解国内情况，我们还汇集了由本所编辑出版的期刊“电测与仪表”刊登的磁测量文章题录和全国性专业会议的磁测量论文题录，列表附后，以供查阅。

由于我们业务能力有限，收集到的文献不够全面，难免还要有不当之处，望读者给予批评指正。

以诚恳的谢意。

者

1980年6月

目 录

一 般 问 题

磁测量的方法和仪器	(1)
磁测量基本概念	(26)
磁测量设备的分类和术语	(36)
磁学量单位的复制及传递方法	(40)

磁 场 测 量 仪 器

磁通门磁强计的最近发展	(44)
晶体管快速磁强计	(51)
用于地磁测量的自激氦气磁强计	(55)
氦光泵磁强计的准确度	(60)
薄膜电感变化磁强计的新近发展	(72)
测量弱磁场时霍尔变换器工作的几个特点	(78)
弱磁场检测装置	(82)
脉冲霍尔器件高斯计	(84)
感应转矩磁强计	(91)
300 型力法磁强计	(95)
四极磁铁精密中心的确定法	(96)
核磁共振频率磁场数字变换器	(103)

磁 性 材 料 测 试 仪

磁性材料测量装置	(106)
磁性材料的测量仪器及测量试验装置	(134)
磁滞回线自动记录装置	(143)
适用于一般和标准使用的简易电子磁导计	(146)
运用运算放大器的磁滞回线描述器	(156)
硬磁材料特性测量装置	(163)
高矫顽力永磁材料开路特性测量装置	(165)
用霍尔变换器测量新型高矫顽力材料样品的矫顽力	(168)
导磁体损耗测量装置	(169)
稀土——钴永磁的测量方法	(173)
振动样品磁强计的设计与应用	(177)
研究磁性材料用的自动高灵敏度磁强计	(183)

铁氧体磁化线圈电感和 Q 值的同时直接读取装置	(185)
磁性薄膜用的万能微探针分析仪	(188)

磁 测 仪 器 的 应 用

西欧中心 μ 介子存贮环中的核磁共振系统	(192)
西欧中心 μ 介子存贮环中的 NMR 磁强计和磁场测量系统的绝对校验	(201)
用核磁共振研究铁磁化合物的超高频自旋回波波谱仪	(206)
人体心、脑与肺所产生磁场的测量	(210)
应用磁性薄膜的快速瞬变现象记录器	(220)
用三端电容法测量磁致伸缩	(227)
磁性非接触法检测温度的原理及其应用	(230)

器 件 与 其 他

高均匀性宽范围电磁铁的设计	(238)
$\Pi\phi 1$ 电磁铁的可调稳流器	(245)
超导量子干涉器件的低频应用	(247)
宽线核磁共振及电子自旋共振仪中的廉价相敏检波器	(264)
FET 边缘振荡器电路	(256)
用于非正弦低功率因数测量的电子瓦特表	(268)
苏联几种新型磁测仪器介绍	(273)
附录 1 期刊《电测与仪表》刊登有关磁测文章的题录	(278)
附录 2 全国性专业会议中有关磁测量的论文题录	(279)

磁测量的方法和仪器

李大明

一、引言

本世纪五十年代以来,磁测量技术有了很大的发展,磁测量不仅在尖端的工程技术中得到了广泛的应用,而且在人们的生活和各方面都引起了重视。磁现象包括:磁场的起源、磁化场和磁化物质等几方面的问题。为了描述磁性的现象和过程要求选择一定的物理量,并用一定的方法和量具完成对这些物理量的测量。例如,用磁矩表示磁场源的特性,用磁场强度和磁通表示磁化场的特点,用磁通密度表示磁化物质的特点。为了测量这些物理量要求建立相应的基准和标准以及测试设备。因此,磁测量成为研究磁现象和与磁现象有关的物理过程的不可缺少的手段和工具。

磁测量实质包括两个内容:其一是指对磁场和磁性材料的测量;其二是指研究物质的磁结构和物质在磁场中的效应,例如观测磁畴结构的各种方法,研究热磁、磁光、磁阻、磁滞伸缩、磁共振等各种磁效应的方法。各种形式的磁测量仪器一直影响着科学技术的发展和人类的进步。公元前一世纪我们的祖先就发明了磁罗盘并应用到航海方面。在十八世纪和十九世纪期间才将磁罗盘改善而成的精密的磁测量仪器。首次完成这种精密磁测量的人是高斯、(Gass)奥斯特(Oerster)和吉伯(Gilbert)并以他们的名字定义为磁通密度、磁场和磁动势的单位。随着生产的发展,新的物理定律的不断发现,磁测量在精度和测量范围方面都有很大提高。现在可以说,任何科学技术领域都离不开对磁性及其测量的认识;一部科学技术发展史、也正是一部磁学及磁测量的发展史。

近代的精密磁场测量技术是由于电子技术、计算技术、自动控制技术等的发展而不断发展的。同时,磁场测量技术的发展又进一步促进了上述技术的进步。现代的尖端工程技术的发展,在时间、空间及测量范围等方面对磁场测量技术都提出了许多新的要求。表1列出了在自然界及人为制造的磁场范围,表的下部给出了各种测量方法的大致范围。〔1〕

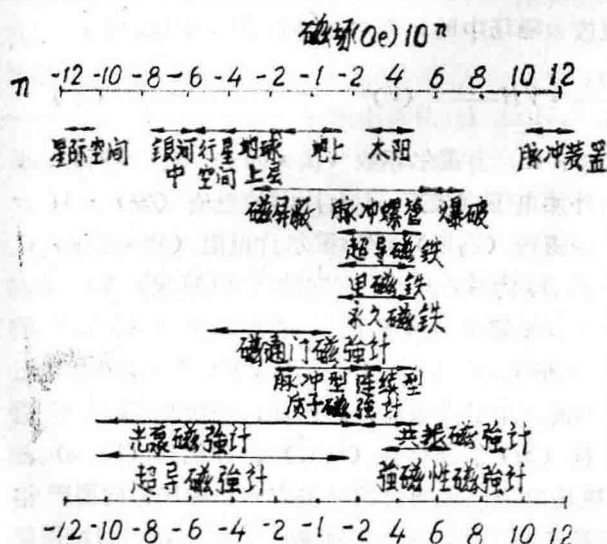


表1 磁场及测量方法

磁测量技术是人类认识自然和改造自然的重要手段。为了实现我国的“四个现代化”，我们必须发挥磁测量技术在各方面的重要作用。为此，曾介绍了磁测量技术的最近发展^[2]。本文综合对磁场的测量，磁性材料的测量，给予概要评述。由于磁效应和磁结构的研究主要是研究铁磁学的内容，本文故不多谈。本文使用的单位制仍然按习惯采用电磁单位制（CGS制），同时为和正在推行的国际单位制（SI制）相比较，表2列出的是两种单位制磁学量的符号及其换算关系。

表 2

磁学量	符 号	CGS 单 位	SI 单 位	换 算 $\frac{(SI)表示数}{(CGS)表示数}$
磁场强度	H	奥斯特 [Oe]	安/米 [A/m]	$10^3/4\pi$
磁 通	Φ	麦克斯韦 [Mx]	韦伯 [Wb]	10^{-8}
磁通密度	B	高 斯 [Gs]	特斯拉 [T]	10^{-4}
磁化强度	J	高 斯 [Gs]	特斯拉 [T]	10^{-4}
磁 动 势	E_m	吉 伯 [Gb]	安 匝 [A]	$10/4\pi$
磁 矩	Mm	电磁单位	安米 ² [Am ²]	10^{-3}
磁 阻	Rm	电磁单位	安匝/韦伯 [A/wb]	$109/4\pi$
磁 导 率	μ	电磁单位	安匝/米 [A/m]	$4\pi \times 10^{-7}$

【注】上表中磁通亦可表示成焦耳/安或伏·秒的形式。即它相当于在一匝导线中经1秒时间内感应1伏电动势的磁通。在CGS单位中真空磁导率 $\mu_0=1$ ，在SI单位制中 $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ 韦伯/安米。

二、磁 场 的 测 量

由于一些电磁效应的应用和电子技术的发展，磁测量的方法和仪器有了很大发展。目前，磁场测量的方法不下二十几种。自五十年代以来，测量磁场的综述性文章已包括在文献^[3-9]中，这些文章对测量磁场的各种方法作了广泛的总结。本文仅对几种应用较为广泛的方法作一概要评述。

1. 霍尔效应磁强计

1879年霍尔发现把载流导体片垂直放入磁场中时，在片的横向会产生电动势：

$$V_H = R I \frac{H}{l} = \frac{R_H}{l} \cdot V_H \frac{l_v}{l_i} \quad (1)$$

式中： R_H 为霍尔系数（伏·厘米/安·高斯）； V 为外加电压（伏）； I 为片中的电流（安）； H 为空间磁场（高斯）； P 为霍尔片电阻（欧·厘米）； l_H, l_i, l_v 为片在 H, I, V 方向的尺寸（厘米）见图1。为了以足够的灵敏度测量磁场，要求霍尔片的 R_H/ρ 值必须足够大和 ρ 值不太低（以便使外加电压 V 不致产生很大电流）。因此，一般金属已不适

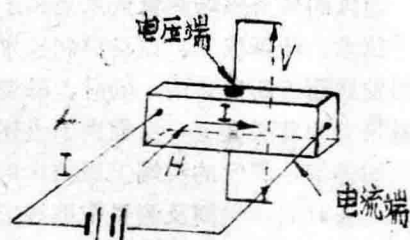


图 1 霍尔效应原理图

用，而使用半导体材料，如：锗（Ge）、硅（Si）、锑化铟（ $InSb$ ）、砷化铟（ $InAs$ ）、磷砷铟（ $InAsP$ ）等。用霍尔效应测量磁场时应注意通过的电流方向和磁场方向要严格垂直。同时，由于霍尔系数和电阻率随温度的变化，由于磁阻效应引起霍尔片电阻

霍尔系数变化造成的非线性, 以及由于不等位电势等造成的附加误差等, 都会使测量受到限制。但是, 自六十年代以来, 由于半导体工艺和材料的发展, 已经可能广泛使用霍尔效应测量直流的及交变的磁场(频率可达10KHz甚至更高)。使用砷化镓薄膜霍尔片提高了灵敏度和线性。用外延生长的GaAs作的霍尔片, 其灵敏度可提高到3000 (伏/安·高), 而比 $I_{n}As$ 和 $I_{n}AsP$ 等材料提高上千倍。特殊制作的霍尔探头可以在很低的温度(4.2K)和很高的温度(573K)下仍能有效的工作。霍尔探头可以做成小至 25×25 微米², 因而可能用其测量非均匀磁场。用霍尔效应一般可以测量1 (Oe) 到 10^5 (Oe) 的直流磁场, 以至毫秒~微秒的脉冲磁场, 其测量精度从1%到0.01%。最近报道可以将霍尔效应测量磁场的下限扩展到 10^{-4} (Oe)。

由于霍尔效应简单、廉价、有高的灵敏度和较好的线性, 并且探头可做得很小, 因此可做成一系列的通用仪器。图2为霍尔效应磁强计的简图。主要包括以下部分: 振荡器、霍尔探头、放大器、同步检波器以及显示仪表。因为交流电压放大较易, 故采用交流驱动。同步检波器可以显示磁场的极性。显示方式除指计式仪表外, 对于高精度的测量发展用数字仪表显示以及加BCD输出等。

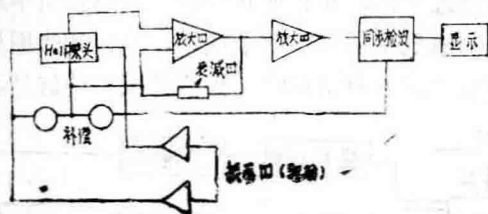


图2 霍尔效应磁强计方框图

这里说明几种霍尔效应磁强计的基本性能。国产的CST-1型数字高斯计, 使用砷化镓霍尔探头, 用文氏桥振荡器产生1 (KHz) 的正弦波电流驱动, 产生的交流霍尔电动势经放大和相敏检波后, 用数字仪表显示。可以分别使用绝对法、指零法或差值法进行测量。主要测量范围为500(Oe)~8 (KOe), 精度为

$\pm 0.5\%$ 。美国的RFL公司生产一系列霍尔效应磁强计产品, 其中750DR型磁强计可以测量直流磁场及其变化, 测量范围从0.01 (Oe) 到100 (KOe); 同时可以测量交变磁场, 从10(Hz)到800 (Hz), 精度为 $\pm 0.2\%$, 用数字显示和BCD输出。LCJ公司和BeeI公司也生产一系列霍尔效应磁强计, 日本的电子磁气工业株式会社的霍尔效应磁强计系列, 使用高温环境的产品温度可达 $50^{\circ}C$, 量程为30 (Oe) ~30 (KOe), 精度为 $\pm (2 \sim 5)\%$, 测量交变磁场的频率可达100 (KHz)。法国PeII公司的240型霍尔效应磁强计, 量程为0.001~30000 (Oe), 精度为 $\pm 0.01\%$ 。

2. 核磁共振磁强计和电子顺磁共振磁强计

自从1946年由Purcell和Bloch等分别提出核磁共振的吸收法和感应法并用于磁场的精密测量以来^[18], 核磁共振的测场技术和对物质结构的研究已经得到了非常广泛的发展。目前核磁共振法已发展成为各种形式的专用和通用仪器。

任何形式的共振磁强计都是基于原子或分子系统的共振效应而工作的。由任何带电粒子和电子、质子等组成的系统中, 粒子都具有磁矩 m 和动量矩 p , 其比值 r 为粒子的旋磁比:

$$m = r p \quad (2)$$

根据量子力学原理, 在磁场强度为 H 时, 粒子的自旋轴向只能取向与 H 平行或反平行的

状态,这两种状态相应的能量变化为 $2mH$ 。粒子每次跃迁都伴随着发射或吸收与两状态能量之差相同的能量辐射。若以 f 和 ω 分别表示辐射的频率和角频率,用 h 表示普朗克常数,并且动量矩 $p = h/4\pi$,则吸收或发射的能量等于:

$$\Delta E = hf = \hbar\omega/2\pi = 2mH \quad (3)$$

所以

$$\omega = \gamma H$$

$$H = \frac{\omega}{\gamma} = \frac{f}{\gamma'} \quad (4)$$

$$\gamma' = \frac{\gamma}{2\pi}$$

核磁共振的测量设备主要包括产生共振频率为 f 的设备和检测能量交换的设备两部份。检测的方法可分别采用吸收法或感应法。图3为吸收法的原理方框图。它是由探头、振荡器、放大器、显示及频率校正等部分组成。校正频率使用晶体振荡器,共振的高频线圈是包围在试样的外部,线圈轴线垂直于待测磁场 H 。吸收法是检测共振时线圈阻抗的变化,它是利用可调电容 C 与线圈组成 LC 振荡器,其振幅取决于正反馈的大小。为提高灵敏度和防止饱和通常采用边缘振荡器。为把共振信号在示波器上显示出来,而加一小的低频调制磁场,使总磁场在待测磁场附近变化,在交变磁场的正半周或负半周有两个地方发生共振。用感应法时,使用与待测磁场相垂直的两个线圈,其检测线圈与发射线圈相垂直,以便减少感应耦合,检测出粒子回到平衡状态时能级跃迁发生的信号。

核磁共振探头的试样可采用已知旋磁比的核,如 H^+ 、 H^{2+} 、 ^{27}Al 、 2Li 等,通常使用纯水提供必要的质子。对于水,其 $\gamma' = 4257.602$ (Hz/Oe),其测量范围约从100 (Oe) 到100 (KOe) 没有一定极限。例如,使用 7Li 探头测量上限可

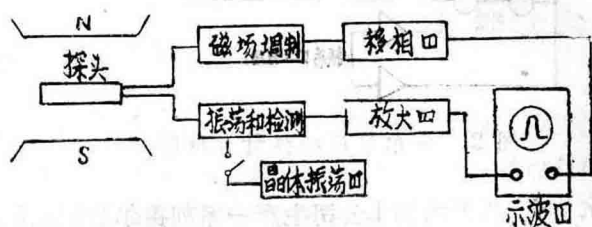


图3 核磁共振磁强计方框图。

到73(KOe),使用 H^{+2} 探头测量上限可到80(KOe),而向低场扩展时,因讯号变小,存在一定困难。应用质子自由进动磁强计可以测量较弱的磁场达1~10 (Oe),甚至更低。由于质子旋磁比的测量精度可达 10^{-6} ,测量频率的仪器精度也可以很高,因此,用简单的设备就容易达到0.01%的精度,如果采用精密测量,精度可提高到0.0001%。核磁共振的测量精度主要受被测磁场的均匀度、稳定性和噪声等限制。为了改进核磁共振仪的性能,用适当的线路抑制噪声,对较高次谐波使用鉴频器,可使信号/噪声比提高5~50倍。为了避免共振饱和,通常在纯水加入少量的顺磁离子,如 Fe^{3+} 等,以便缩短弛豫时间,保证共振吸收。利用核磁共振测量磁场时,一般要求磁场的不均匀度小于20 (Oe/厘米),对于梯度较大磁场的测量,可采用较小的探头和增加补偿等措施,如在[22]中对梯度为1000—3000(Oe/厘米)的四极磁场进行了测量。

利用核磁共振磁强计可以自动跟踪范围可达100~1600 (Oe) [23-26]。在同步回旋加速器中,还利用核磁共振仪测量加速器的上升磁场,其扫描速率可达15 (KOe/秒)。这时因瞬变效应将使信号的分辨力有所降低。由于对给定的试样核磁共振的频率仅与外介的磁场成正比而与外介其它参量无关,因此不但可用其测量磁场,而且可将它联接在

控制绕组电流的伺服回路上来稳定电磁铁的磁场。Cumond在1952年详细分析了核磁共振用于低至35 (Oe) 的磁场来稳定 β 射线谱仪的磁铁。Thomas等又提出了稳场的其它电路^[27-23]。在^[29-32]中叙述了用于加速器的稳场和测场的核磁共振仪器，其测量范围可达1~68 (KOe)，稳场的稳定度可达 1×10^{-6} 。

电子顺磁共振是在两个磁场作用下产生，其中一个固定，另一个与其垂直并以共振频率而变化时，由顺磁性物质电子的能量变化而引起电磁波幅射或吸收的现象。电子顺磁共振的原理与核磁共振相近似，只是引起共振的机理是原子的电子系统而不是核子系统。由于电子的旋磁比比质子的旋磁比约大660倍，因此对同一频率共振磁场约小660倍，所以可用其测量非常弱的磁场。电子顺磁共振的测量范围大部份与核磁共振法重迭。如果用微波技术（如3厘米波）其上限可以测量3.5 (KOe) 的磁场。由于最近亚毫米波和高能量短波的发展，用莱塞作光源时，可用于测量高达900 (KOe) 的磁场，而测量大于1000 (KOe) 的磁场用此法则很困难^[34]。用电子顺磁共振时，因为电子与邻近电子有很强的吸引力，使驰豫时间变短，共振线变宽，精度有所下降；在典型条件下其测量精度约为0.1%。

由于电子顺磁共振的电子总是成对存在的，其总磁矩为零，所以必须使用不成对电子的材料作探头。DPPH材料刚好有不成对的电子和尖锐的共振线，线宽约2 (Oe)，曾是测量磁场的最好材料。现已有更好的材料，如溶于液氮中的碱金属溶液等，其共振线宽小于0.1 (Oe)，这样可以把测量的精度再提高一个数量级。同时，由于电子顺磁共振的驰豫时间短，试样尺寸小，因此可用其测量随时间变化的磁场和不均匀磁场，测量电路与核磁共振吸收法相同。在^[33]中提供的电子顺磁共振装置中，其测量范围约为2 (KOe)，相对精度约为0.1%~0.005%。

3. 旋转线圈磁强计和振动线圈磁强计

旋转线圈和振动线圈都是利用电磁感应的原理，可以简单快速地测量磁场。如果被测的是交变的正弦磁场，则在磁场通过的静止线圈内将会感应出交变电压，并且可用交流毫伏表直接测量。如果被测的是恒定的磁场，则可用电动机带动线圈连续匀速旋转，由于不断切割磁力线，而在线圈内感应电压

$$V = \frac{N}{10^8} \cdot \frac{d\phi}{dt} = \frac{N S \omega}{10^8} H \cos \omega t \quad (5)$$

其中：NS 转为旋线圈的线圈常数（厘米²匝）， $\omega = 2\pi f$ 为线圈的角速度（弧度/秒），H为待测的恒定磁场强度（Oe）。对于旋转速度稳定的线圈，感应的电压幅值与待测的恒定磁场强度成正比，即（12）式可改为

$$H = \frac{10^8}{NS\omega} V_m \quad (6)$$

上式 V_m 为V的幅值。线圈的感应电压可通过滑环并借助机械整流器接到高灵敏度的毫伏表显示出来。如果不使用整流器，也可用平均值交流电压表显示（为克服由旋转不均匀造成的波形失真，而不使用峰值或均方值仪表）。

旋转线圈磁强计可以通过增大测量线圈常数、提高转速以及把电压放大等方式提高测量的灵敏度。旋转线圈有较好的线性和不受温度的影响，同时亦不受磁场均匀性的限制，其测量范围很宽，可从 10^{-4} (Oe) 到 10^5 (Oe) 以上。根据不同的需要，可以制作

不同结构探头的旋转线圈,例如美国Lush公司的旋转线圈磁强计系列产品,具有探头直径从1(毫米)到10(毫米)、精度从 $\pm 10\%$ 到 $\pm 0.01\%$ 的各种范围线圈,可以测量轴向的或纵向的磁场,也可以兼测两种场的合成磁场。同时还备有测量低温下磁场的探头,在显示方式上也开始使用数字仪表以及PCD输出、模拟输出等^[34-36]。

提高旋转线圈精度的途径是:为校正频率的不稳定,使感应电压通过一个增益与频率 ω 成反比的放大器;用同步方法使驱动马达转速稳定;利用精密电位计或数字仪表提高测量电压的精度。为克服电刷磨擦产生的噪音,采用耦合变压器结构,其初级线圈与旋转线圈相连接,并同它一起旋转,其次级线圈固定不动并与测量设备相连接。耦合变压器用磁屏蔽封闭,以避免与旋转线圈相耦合。

为提高旋转线圈磁强计的精度,必须采用双线圈的结构^[37]如图4所示,置于待测磁场中的线圈和置于标准磁场中的参考线圈R,由马达带动这两个固定在同一轴上的线圈旋转,而得到最佳同步。这时待测磁场相对参考磁场而被确定。对于恒定的参考磁场(如标准电磁铁),用精密电位计使两线圈的电压平衡指零,并从电位计的调节盘上读出待测的磁场值。如果待测的及参考的线圈常数分别为 $(S_F N_F)$ 和 $(S_R N_R)$,旋转频率 $\omega_F = \omega_R = \omega$,若电位计平衡时的分压电阻为 r_1 ,参考的标准磁场为 H_R ,则待测磁场为:

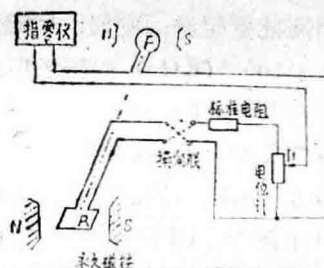


图4 双线圈旋转线圈原理图

$$H_F = H_R \frac{S_R N_R \omega_R}{S_F N_F \omega_F} r_1 = C r_1 \quad (7)$$

其中 $C = \frac{S_R N_R}{S_F N_F}$ 为常数,则由 r_1 即可确定待测磁场之值。这时,由于正流器触头调正、滑环的电阻、电阻的温度系数、电源的波动、电机转速的不稳定等因素的影响在上式的平衡下都从读数中消除了。因此,用这种办法可以把旋转线圈的精度提高到 $0.01\% \sim 0.001\%$ 。

由于旋转线圈磁强计具有灵敏度高、线性好、精度高、测量范围宽等优点,目前从低至小于地磁场到高达 10^5 (Ce)的超强磁场的测量中都得到了广泛的应用^[38-41]。

振动线圈法与转动线圈法相似,是将线圈平面平行于磁场放置,并使线圈绕垂直于磁场的轴线做小角度的摆动,则线圈的感应电压与磁场及摆动的频率、振幅成正比。如果线圈在自身平面的前后振动,则线圈内感应的电压与磁场的梯度、振动频率和振幅成正比。与旋转线圈相似,用双线圈系统可消除线圈的频率和幅度起伏的影响。用零平衡技术,线圈可以3 (Hz) 的频率绕轴线成 3° 角摆动,将有0.1%的分辨力。在文献^[42]中用线圈常数为 2×10^{-5} (厘米²匝)的线圈以60 (MHz) 的频率振动测量小体积内的磁场,具有 10^{-5} (伏/高)的灵敏度,

振动线圈磁强计的精度一般为2~3%左右。振动线圈法主要用于电子显微镜及核装置中的磁透镜的磁场及梯度的测量。

4. 磁阻效应磁强计

磁阻效应是某些金属和半导体材料在磁场中电阻发生变化的现象。利用这一效应可

以通过测量电阻而间接测量磁场。最先利用这一效应制作的是所谓铋螺线，它在12(KOe)的磁场中电阻可增大1.5倍。但这种材料与外部接触电阻大，受应力、温度影响大（如在液氮下比室温时电阻大20倍），因此现在已很少使用。现在发现较好的磁阻材料是砷化铟(InAs)，磷砷铟InAp以及锡化铟和锡化镍的共晶体InSn—NiSn等，它们在3(KOe)磁场中电阻会增大3倍。

利用磁阻效应测量磁场的优点是：测量方便，有较好的重复性。但是测量受非线性和温度的依赖性所限制，为此要采取逐点校正和恒温措施。磁阻效应法最适于在低温和较强的磁场中使用，如在 $10^3 \sim 10^5$ (KOe)的磁场中，采取适当措施后可能达到0.1%以上的精度[44]。

近年来，已成功地应用了一种利用磁膜磁阻效应的磁强计，它可以探测 10^{-7} (Oe)的微小磁场，并在磁泡记忆的非破坏读出中得到应用[45-47]。

5. 磁膜磁强计

磁膜磁强计是利用铁磁薄膜的单轴各向异性来测量磁场的仪器。这种铁磁薄膜厚度为200~2000 (埃)，利用在磁场下真空喷镀合金而成。由于磁膜磁强计具有灵敏度高、功耗小、结构简单等优点，因此是弱磁场测量中有发展前途的方法。可以利用各种电磁效应而制成不同类型的薄膜磁强计。以下仅介绍一种性能较好的磁膜磁强计——电感变化磁膜磁强计。

磁膜磁强计主要是由传感器和测量线路两部分构成。磁膜传感器是由数十匝扁线圈和在其内的厚度约2000 (埃)的几片磁膜迭加而成。磁膜的难磁化轴与线圈的轴向一致，而易磁化轴与待测的磁场方向一致。同时在磁膜两旁加偏置磁铁（如用直径0.8毫米的铜镍铁棒），然后用环氧树脂封闭。在磁场中的传感器线圈的电感不仅与线圈的结构有关，而且与磁膜的磁性有关。在[48]中给出了这一关系：

$$L = L_A \left(1 + \frac{H_D}{H_K + H_B + H_X} \right) \tag{8}$$

其中： L_A 为没有磁膜时的“空气”电感； H_K 为磁膜的各向异性磁场； H_B 为外加的偏置磁场； H_X 为待测的磁场； $H_D = K H_K / L_A$ 为传感器常数； K 为常数。注意 H_D 的意义是：偏置磁场加上磁膜影响电感等于空气电感时的磁膜各向异性场值。由于磁膜磁化矢量旋转角度小，为提高灵敏度，必须增加线圈匝数或提高频率。如果兼顾二者，一般选择频率为10至20 (MHz)，传感器Q值为50左右。

上述传感器的电感变化要求很灵敏的测量出来。在早期设计中采用的是对谐振电路的斜率检测方法[49-50]。这种方法比较灵敏、能得到较好的线性。缺点是要求调谐调正，要求使用价格较贵和易损的元件做成的振荡器。目前使用了双膜传感器，弥补了上述的不足。

[51-52]其电路如图5所示。两个传感器由于方向相反的易向偏置，并用于自激科尔皮兹

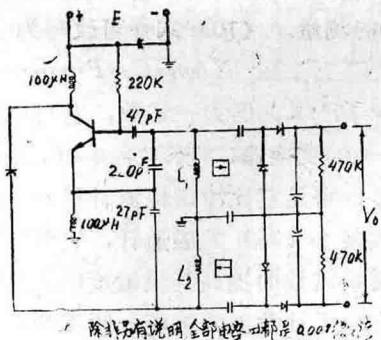


图5 双膜磁强计

振荡器中。二个线圈相串联，分别正流后反向迭加输出。输出电压的大小和方向与待测磁场的大小和极性有关。

双膜传感器磁强计在测量较小磁场时有较好的线性，当磁场增大时其灵敏度亦增加，并且其输出与频率无关。为克服平衡的噪音，可通过磁反馈来解决。电感变化磁膜磁强计特别适合检测通频带从0.01 (Hz) 到10 (KHz) 和幅度从零点几个伽马 (γ) 到几个 (Oe) 的磁场变化。例如，传感器尺寸为16 (毫米) 的矩形磁膜 (6片)，具有0.1r 的分辨力，量程可达 ± 1.5 (Oe)，功耗为3 (毫瓦) 左右。这种磁强计具有灵敏度高，结构简单、功耗小等优点，在军事上有许多应用。

6. 数字磁通计 (直流数字测磁仪)

近十年来发展了利用模—数转换技术实现直流磁性数字测量的工作。它是将感应的电压加到V—f变换器，而在V—f变换器输出一系列的脉冲，脉冲的数目正比于感应电压的积分 $\int e dt$ 。这些脉冲在计数器中被累加起来而得到磁通的变化值。再通过数—模转换器而用数字仪表读出或通过打印机给出。

利用V—f变换器的数字测量装置，具有直观 (用数字读出)、精度高 (可达 $\pm 10^{-3} \sim \pm 10^{-4}$ 数量级)、易于实现磁化曲线和磁滞回线的测量特点，特别是它可以彻底解决漂移的问题，更是检流计、光电磁通计、全电子积分器等法所无与伦比的。在测量速度上，也比其他方法要快得多。因此，这种方法引起了国内外的测磁工作者的重视，而不惜使用电压—频率—计数—数—模转换这样一个复杂系统来代替一个简单的模拟积分器^[58]。现将这种方法简介如下。

如果探测圈的匝数为N，则利用V—f变换器可以把线圈的感应电压e转换成与其成正比频率f，即

$$f = ke \dots\dots\dots (9)$$

其中K为常数，通过电子计数器累计后，得到脉冲数

$$\begin{aligned} P &= \int f dt = K \int e dt = NK \int d\varphi \times 10^{-8} \\ &= NK \Delta\varphi \times 10^{-8} \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

其中 $\Delta\varphi$ 为磁通的变化 (M_x)。这就说明，通过与 $N\Delta\varphi$ 成正比的计数器的数字P可以实现对磁通 φ 的测量。(10)式亦可改写为

$$N\Delta\varphi = C_F \cdot P \dots\dots\dots (11)$$

式中 $C_F = 10^8/K$ ，仍为一常数，它可以象征测量的灵敏度。例如，如果使用5毫伏变换为100千赫的变换器，则 $K = f/e = 0.2 \times 10^8$ ，因此 $C_F = 5 M_x/1$ 字，若以 $25 M_x/5$ 字代表其灵敏度，可见它比冲击检流计提高一个数量级。如果 $NS = 5$ 时，这套系统即可构成一台每字代表1 (高) 的磁通计，它可以测量软磁和硬磁材料。这种方法的主要困难是如何提高转换常数而提高其灵敏度的问题。

带有电子计数器的电压—频率变换器是一种理想的积分器，如果采用电子技术控制磁通的变化速度使感应电压接近常数，那么它就可以作磁通计实现磁化曲线的数值测量或图示记录。磁场强度可利用霍尔探头和带打印机的采样—保持式数字电压表进行测量，在予先选取的一定的磁通变化间隔之后，此电压表通过予置计数器接受电压—频率

变换器的指令。数字计数器可装置二进编码的十进输出，把结果记录在磁带或穿孔卡片上，并可把数据直接送入一台已定程序的联用计算机，完成数据处理。同时在数字记录的同时使用X—Y记录仪画出磁化曲线和磁滞回线。

作为例子，图6为一种简单的变换器的V—f数字磁通计的方块图〔54〕。由

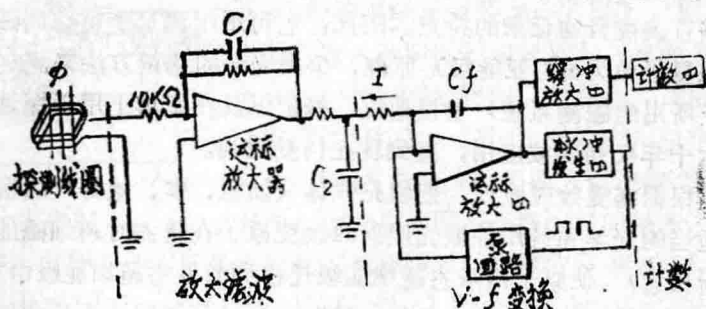


图6 数字磁通计的方块图

磁通 ϕ 产生的感应电压被放大器放大，并为使其平滑而进行滤波，然后经V—f变换器将电压变成频率，再经缓冲放大器放大，最后到计数器累计。

图7为此数字磁通计的V—f变换器的实际电路，它由运算放大器构成的积分电路和由电压控制的脉冲发生器以及将每个脉冲以一定的电量 ΔQ 给予积分回路的泵回路所组成。由于输入电压的作用，积分电路的输出达到某一电压时，脉冲发生器工作而驱动泵回路。因而在运算放大器里输入某讯号时，则电量 ΔQ 被反馈到积分回路。如果 ΔQ 与输入信号相反，则积分器输出变为零，脉冲发生器停止工作。由于输入电压的作用，积分电路的输出电压再次上升。上述过程反复进行，在平衡状态下，输入信号电流 I 的电量和泵回路的供给电量相等，则：

$$It = \Delta Q P \dots \dots \dots (12)$$

这里 p 为在时间内的脉冲数。因此频率为

$$f = P/t = I/\Delta Q \dots \dots \dots (13)$$

脉冲发生器采用变形的多谐振荡器，由积分器的输出电压控制此发生器的频率。泵回路由场效应晶体管 Q_1 和 Q_2 对电容器 C 按基准电压 V_{ref} 充电或放电，并将电流反馈到运算放大器， $\Delta Q = CV_{ref}$ 用此种磁通计的V—f变换器很简单，稳定性和直线性都比较好。如：日本东英工业株式会社生产的TDF—2型数字磁通计，测量范围为100~999900(M_x)，分辨率为100 M_x ，精度为0.1%±1字，瞬时最大输入 $10^6 M_x$ /秒，它具有高分辨率、低漂移、校正容易、操作简便等特点。

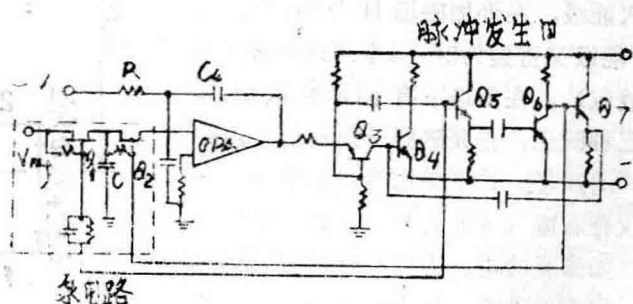


图7 V—f变换器

7. 光泵磁强计

光泵——光抽运或光注入——即是用光（红外线或可见光）照射物质，把粒子由低能级升高到高能级的过程。光泵磁强计是利用原子的塞曼效应（原子在磁场中能级分裂

具有灵敏度高（最高可达 10^{-9}Oe ）、可以连续测量和绝对测量、体积小（可晶体管化）并能够直读或自动记录的特点。因此，它可用于测量宇宙空间磁场（如美国的“水手”飞为磁量子数为 m 的亚能级）原理，采用光泵测量方法来测定磁场的仪器。光泵磁强计船上所用的磁测系统）预报地震、探矿以及在军事上用于探潜、排弹等等。这种磁强计在六十年代初即被应用，直到现在仍受重视。

根据塞曼效应原理，把填充气体（如氦、铷、铯等）的密封容器放在静磁场中，经过适当的光学系统用偏振光照射而改变原子在基态时超细能级中的玻尔兹曼分布（热平衡状态），使原子由基态超细能级迁移到激发态超细能级中去，完成了由低到高的能级跃迁，从而减少了光的吸收量。这时，通过高频线圈再给相当塞曼超细能级之差的频率的电磁场，则塞曼超细能级的原子数变成大致相等，因而再次产生光的吸收，并使吸收室变暗。所以，当改变高频的频率，则通过吸收室的光最小时的频率就相当于塞曼超细能级的间隔，它和磁场强度成正比：

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{g\beta}{h}H = \frac{\gamma}{2\pi}H \dots\dots\dots (14)$$

其中： g 为朗德因子， β 为玻尔磁子， h 为普朗克常数， γ 为原子的旋磁比。由于旋磁比 γ 可以准确知道，频率 ν 可以准确测量，因此按(14)式可以准确地完成对磁场的绝对测量。

作为例子，图8给出铷 ^{87}Rb 的能级以及能量和磁场 H_0 的关系^[55]。 $5^2\text{S}_{1/2}$ 为基态， $5^2\text{P}_{1/2}$ 为激发态。总电子量子数 $J=1/2$ ，核自旋 $I=3/2$ ，两者的交换作用使每个能级劈裂成 $F=1$ 和 $F=2$ 的两个次能级。在外加磁场 H_0 作用下，每个 F 能级又劈裂为 $2F+1$ 个超细能级（塞曼效应）。在低场下有图示的 α 、 β 、 δ 的三种跃迁。光泵磁强计是利用上述的 α 和 δ 的跃迁。如果采用适当光学系统，仅仅把右旋（或左旋）的偏振光给予原子，如果光的进行方向和磁场方向相同时，只有按选择定则 $\Delta m = +1$ （左旋 $\Delta m = -1$ ）的跃迁才有可能，（如 δ 的跃迁），在激发态的原子再由于自发辐射按选择定则 $\Delta m = 0, \pm 1$ 又回到基态，因此完成了原子由低的超细能级到高的超细能级的抽运，而使原子系统处于高能态（左旋时为低能态）再给予相当超细能级之差的频率的电磁波后，如 α ，使平衡状态破坏，而再次产生了光的吸收。

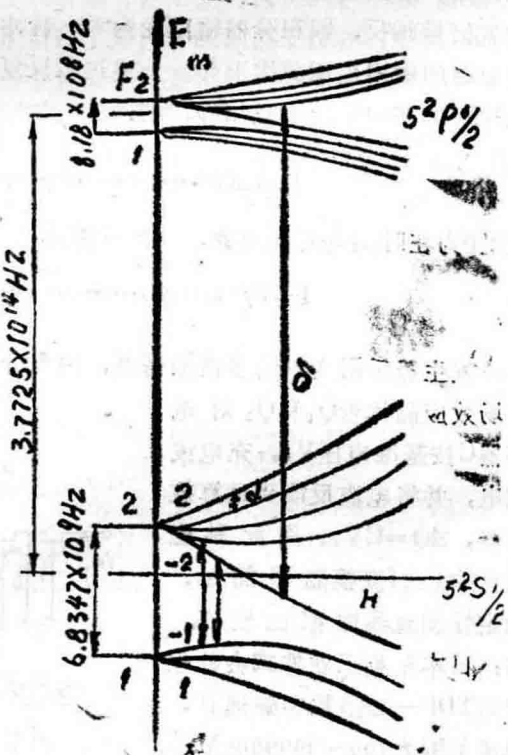


图8 ^{87}Rb 能级图

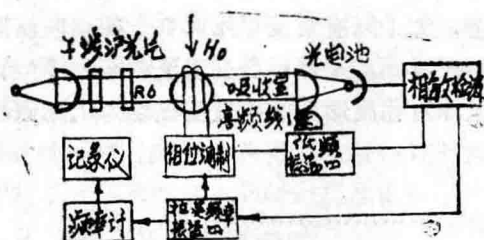


图9 光泵磁强计原理图

达到光电池的光再次减少时，此频率即与磁场成正比。光泵磁强计的吸收室可以采用铷 (^{85}Rb 或 ^{87}Rb)、氦 (^3He 或 ^4He)、铯 (s)、铈 (^{133}Ce) 等气体。氦的吸收线宽度比铷大，但是氦相当 1 (Oe) 的频率为 2.8 兆赫，它比铷要高得多 (^{87}Rb 为 700 千赫， ^{85}Rb 为 466 千赫)，所以处理要简单，同时氦的旋磁比可准确到 10^{-6} ，其能级跃迁易于区分，对绝对测量亦有利。光泵磁强计的精度由电路的信噪比以及吸收线的宽度决定。目前国外用 ^{87}Rb 的光泵磁强计分辨力为 10^{-9} (Oe)，用 He^4 的分辨力为 10^{-7} (Oe)，用 He^3 的分辨力为 10^{-6} (Oe) [5859]。因此，光泵磁强计具有灵敏度高、耐震性好、能够连续测量和绝对测量等特点，是测量弱磁场的一种有效方法。同时，用这种方法还适于作频率标准（原子钟——相当图 8 中的 β 的 0—0 跃迁，它与磁场无关），并且用其对小电流的精密测量和其他高精度测量领域的应用也在探索中。

8. 磁通门磁强计

磁通门磁强计是利用在交直流磁场同时作用下磁芯的饱和特性的原理而制作的磁场测量装置。用高磁导率、高矩形比和无磁滞伸缩的软磁合金（如坡莫合金）作磁芯，它具有磁通可以很快饱和的特点。将磁芯进行交流励磁后，磁通发生脉冲式的变化，而探测线圈中感应的电压在直流磁场存在和不存在时具有不同的形式。过去，用这种感应电压来测磁场通常是采用铁磁探针，即在一根细长的坡莫合金丝，在其中间绕探测线圈，两端绕激励线圈和补偿线圈。当不存在直流磁场时，探测线圈的感应电压呈对称的正负两个脉冲；而当存在直流磁场时，探测线圈感应的电压呈不对称的脉冲。此时，若在补偿线圈中通入直流电流产生反向的补偿磁场而使感应的电压又恢复到原来的对称形式，此时补偿磁场即等于待测磁场。补偿磁场可预先校准。用这种方法可以测量几千奥的磁场，具有 1 安匝/米的灵敏度和 0.1% 的精度。

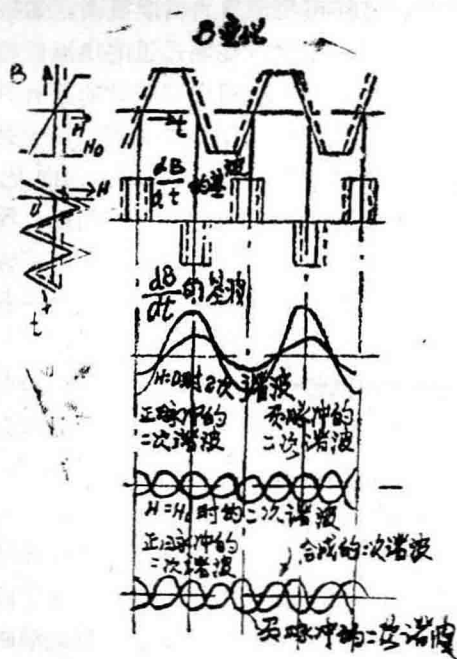


图10 饱和二次谐波发生原理

光泵磁强计的装置有三种形式 [56-57]：自动跟踪控制装置 (AFC)，原子振荡装置，谐振调制装置。图 9 是光泵磁强计的一种原理线路图。使用铷灯放射 D 谱线（红外线），经过干涉滤光片和圆偏振片，以 D_1 谱线的圆偏振光通过铷吸收室而达到光电池调节高频线圈的频率，使

达到光电池的光再次减少时，此频率即与磁场成正比。光泵磁强计的探测线圈的感应电压呈对称的正负两个脉冲；而当存在直流磁场时，探测线圈感应的电压呈不对称的脉冲。此时，若在补偿线圈中通入直流电流产生反向的补偿磁场而使感应的电压又恢复到原来的对称形式，此时补偿磁场即等于待测磁场。补偿磁场可预先校准。用这种方法可以测量几千奥的磁场，具有 1 安匝/米的灵敏度和 0.1% 的精度。

对于较弱场的测量，近来使用的是二次谐波法。图 10 为二次谐波法的原理波形图。在图中为简化而假设用三角形波励磁和假设无磁滞，图示了 B 、 $\frac{dB}{dt}$ 以及基波

和二次谐波在有无磁时的波形。对高导磁合金，如果只有交变场用，其作磁感应波形分解为付里叶级数时只含磁奇次谐波分量而不含有偶次谐波；当交直流磁场同时作用时。则存在偶次谐波分量，并且其波形移动呈非对称波形。如果直流磁场为 H_0 ，励磁场为 $H_1 \cos \omega t$ ，且 $H_0 \ll H_1$ 时，磁感应的二次谐波为^[60]：

$$B(t)_2 \approx \frac{4B_0}{\pi} \cdot \frac{H_0}{H_1} \cos 2\omega t \dots\dots\dots (15)$$

即 $\frac{dB_2}{dt} = V_2$ (感应电压) 和直流磁场成正比。因此，通过测量偶次谐波中最大的二次谐波电压的大小，便可确定待测的直流磁场的大小。这即是二次谐波法的原理。

为提高测量二次谐波的精度，消除奇次项，采用两根完全相同的探针，而其交流励磁彼此相反。因此探测线圈感应的电压只含有二次谐波。原理方框图如图11所示。用 $f=1\sim 10$ 千赫的振荡器对两平行的探针进行反向励磁，次级感应电压经同步放

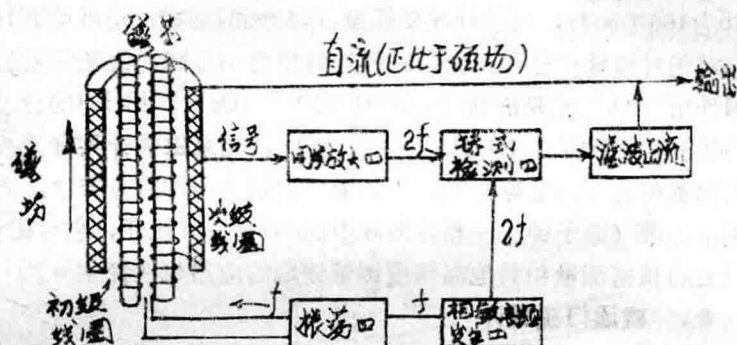


图11 磁通门磁强计原理图

大，输出频率为 $2f$ 的信号。由振荡器倍频为 $2f$ 的电压作同步检出，再经整流滤波，并把直流反馈到次级线圈。这样可使测量的精度提高。如果探针沿磁场的方向，则次级线圈通过的电流就与待测的磁场强度成正比。磁通门磁强计的探针具有多种形式^[6162]。上述的细丝作磁芯，由于是开磁路的，要求长度与直径之比为 10^3 ，因而尺寸相当大，使应用和工作点的测量都成问题。现在使用的探针多作成环形（如图12所示）。励磁线

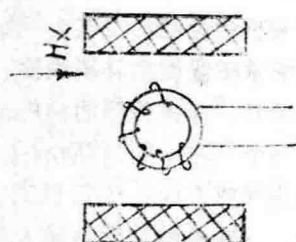


图12 磁通门磁强计的环形探头 线圈均匀地绕在环上，探测线圈和补偿线圈在整个环的外面。待测磁场的方向与探测线圈相垂直。

目前，磁通门磁强计的应用很广泛。它不但作为商品性的磁强计被用于测量微弱的杂散磁场、对材料作非破坏性试验、探测在墙壁和地下的管道和导线等等，而且作为专用的仪器被用于探测空间磁场、地磁场、探矿、探雷、导航等等^[63-65]。这种磁强计主要用于测量小于 $10(\text{Oe})$ 的弱磁场，其分辨力可达 $10^{-6}\sim 10^{-7}(\text{Oe})$ ，且体积不大、耐震性好，适于高速运动系统。例如，美国发射的阿波罗12、16飞船上用于测量月球磁场的便是此种仪器，另外在火箭和导弹上也均用此种仪器导航，并被用作探潜的主要手段。此外，美国RFL公司的101型磁强计便是一种商品性的磁强计，它为用于测量绝对磁场高达 $1(\text{Oe})$ ，或低至几个 γ ，可以观测像地磁场数量级的变化，精度为满刻度的 $\pm 3\%$ ，

左右，其主要元件采用了固体化的、集成化的，重量仅5.8公斤。另外西德的1104和1107型毫奥计也是此种类型的仪器。其最大灵敏度为 1×10^{-5} (Oe) (每格)，准确度为 $\pm 1\%$ ，仪器有五个探头，可用于测量磁场微变、测量磁带等录磁材料的相对磁场差以及选择磁各向异性薄带的易磁化方向等。这种方法在国内近年也引起重视，一些单位试制了专用的仪器。同时，二次谐波法还被用于作电压的精密测量等用途。

9. 超导量子磁强计

1911年荷兰物理学家卡麦林·翁那斯发现，某物质冷却到一定温度（临介温度）以后，直流电阻突然消失。他认为这种现象是由于物质转变为一种新的状态，称超导态。之后人们又发现，超导体在临介温度和临介磁场以下具有不同于一般物质的许多有趣性质，因此关于超导的研究一直是固体物理学中的一个很活跃的分支。由于超导磁体具有轻便、费用低、易于在大空间获得高均匀和高梯度磁场的优点，因此它在超导电机、超导输电、超导磁流体发电、核物理、超导磁浮列车、电子技术、空间技术等方面得到广泛的应用。特别是在1962年发现了约瑟夫逊 (B.D.Josephson) 效应（超导隧道效应）以后，为超导提供了许多新的应用。例如，用这种效应可以制作放大器、微波和亚毫米波辐射量子探测器、磁强计、电流计、电压标准、噪声温度计，在计算机中作存储器和测量元件（冷子管）以及在超导天线、通讯电缆等方面的应用，它们具有稳定、体积小、重量轻、噪音小、精度高等许多优点。因此，最近十几年来超导技术在许多技术领域中得到应用并为发展新技术提供许多崭新的远景^[66]。

约瑟夫逊效应的要点如下：

(1) 两个超导体处于“弱结合状态”下（即在两块超导体间有大约 10^{-8} A 多的绝缘层的“结”），通过某一小于临介值 (I_c) 的电流时而不存在电位降，称此现象为直流约瑟夫逊效应。

根据量子力学理论，两超导体间的电子对的相位差 φ 是依赖矢势 $\vec{A}$ 的，因此通过隧道结的电流密度 j 也依赖于矢势，

$$j = j_0 \sin \left(\varphi - \frac{2e}{hc/2\pi} \int \vec{A} \cdot d\vec{l} \right) \dots\dots\dots (16)$$

其中 e 为电子电荷， h 为普朗克常数。若磁场局限于厚度为 l 的绝缘层和两超导体的穿透深度 $z\lambda$ 内时，对于在结平面加有均匀磁场 H_0 的情形，上式变为：

$$j = j_0 \sin \left[\varphi - (2cd/\pi c) H_0 x \right] \dots\dots\dots (17)$$

x 沿结的长边 L 方向， $d = 2\lambda + l$ ，上式表示了直流约瑟夫逊电流对磁场的依赖关系。对于特定的结，若 $\varphi = \pi/2$ ，最大约瑟夫逊电流

$$I_{FC} = I_0 \left| \sin \left(\pi \Phi / \Phi_0 \right) / \left(\pi \Phi / \Phi_0 \right) \right| \dots\dots\dots (18)$$

即只要通过结的总通量是磁通量子 ($\Phi_0 = hc/2e$) 的整数倍，则通过结的最大直流

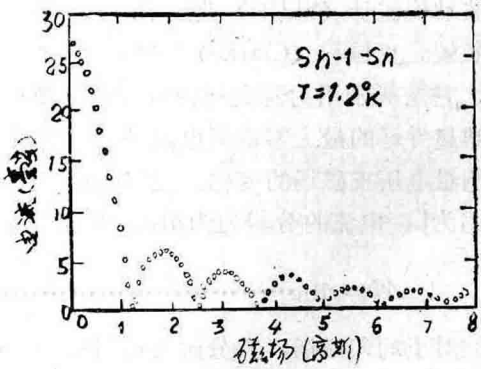


图13 最大直流约瑟夫逊电流
对外磁场的依赖关系