

磁 场 测 量

毛 振 珑 主 编
毛振珑 杨成林 何有余 编写

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本书系统地介绍了近十种常用的空间磁场测量方法的原理、磁强计的结构、性能及其应用等。全书共分九章。第一章绪论概述磁场测量技术的发展及其应用，从第二章至第九章依次介绍磁共振法、霍尔效应法、电磁感应法、磁通门法、光泵法、磁光效应法、磁膜测磁法及超导量子干涉器件法。

本书可供从事空间磁场测量工作的科学技术人员及大学有关专业的师生参考。

磁 场 测 量

毛振珑 主编

毛振珑 杨成林 何有余 编写

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售



开本787×1092 1/32 ·印张11 1/4 ·字数243千字

1985年5月第一版·1985年5月第一次印刷

印数1—4,600·统一书号:15175·581

定价:2.30元

目 录

前言

第一章 绪 论	(1)
第二章 磁共振法	(10)
第一节 磁共振原理	(11)
一、核子的自旋运动与磁性	(11)
二、共振条件	(12)
三、能量吸收	(14)
四、弛豫过程	(16)
五、共振线的宽度	(17)
第二节 磁共振信号	(18)
一、磁共振信号的获得	(18)
二、核磁共振信号的检测	(21)
三、噪声的分析和抑制	(27)
第三节 核磁共振磁强计	(32)
一、核磁共振磁强计原理	(32)
二、探头及核样品管	(33)
三、射频线圈	(34)
四、调场线圈	(34)
五、边缘振荡器	(35)
六、射频放大	(39)
七、检波和音频放大	(39)
八、供电电源	(39)

九、自动跟踪核磁共振磁强计	(40)
第四节 电子顺磁共振磁强计	(46)
第五节 仪器的分辨率	(48)
第六节 测量误差的分析	(49)
第七节 小结	(53)
第三章 霍尔效应法	(55)
第一节 霍尔效应的简单原理	(56)
第二节 用霍尔效应测磁的情况	(57)
第三节 霍尔系数及灵敏度	(60)
第四节 霍尔元件的温度特性及其补偿问题	(61)
一、温度对元件内阻的影响	(62)
二、温度对霍尔输出的影响	(62)
三、温度补偿问题	(63)
第五节 霍尔元件测量磁场的精度问题	(67)
一、霍尔发生器的稳定性问题	(68)
二、霍尔发生器的空间分辨率	(70)
第六节 微型霍尔探头	(71)
第七节 霍尔元件测量不均匀交、直流磁场	(72)
一、霍尔探头位于电流流经圆截面导线的非均匀磁场中	(73)
二、霍尔探头位于不均匀振幅和相位的交变磁场中	(75)
第八节 霍尔效应高斯计的设计	(79)
一、霍尔元件的选择	(79)
二、霍尔探头与恒温控制器	(80)
三、霍尔元件几何尺寸的选择	(83)
四、控制电路的设计	(84)
五、补偿电路的设计	(86)
六、校准电路的设计	(87)

第九节 霍尔效应高斯计	(88)
一、国产CT-3型高斯计及CST-1型高斯计	(88)
二、多霍尔探头系统高斯计	(93)
第十节 小结	(95)
第四章 电磁感应法	(97)
第一节 冲击电流计和格拉索特磁通计	(98)
一、工作原理	(98)
二、冲击电流计	(99)
1. 基本原理	(99)
2. 冲击电流计冲击常数的测定	(102)
3. 冲击电流计的灵敏度	(104)
三、格拉索特磁通计	(108)
1. 基本原理	(108)
2. 电量灵敏度的提高	(110)
3. 总电阻对磁通计的影响	(111)
4. 磁通计线圈运动速度与输入电压的关系	(112)
5. 磁通计常数的确定	(112)
四、冲击电流计和格拉索特磁通计磁场测量电路	(113)
1. 磁通绝对测量法	(113)
2. 差值法和零值法(平衡法)	(115)
五、探测线圈	(120)
1. 球形探测线圈	(121)
2. 圆柱形探测线圈	(125)
3. 探测线圈的校正	(128)
第二节 电子磁通计	(129)
一、基本原理	(129)
二、积分器的误差分析	(131)

三、密勒(Miller)积分器	(132)
四、积分器输出电压显示方式	(136)
1. 示波器显示方式	(136)
2. 数字电压表显示方式	(142)
3. 电压-频率变换数字显示方式	(143)
五、探测线圈	(157)
1. 梯度线圈	(157)
2. 脉冲磁场感应探头	(161)
第三节 发电机原理法	(174)
一、单线圈测磁法	(174)
1. 旋转线圈测磁法	(174)
2. 振动线圈测磁法	(177)
二、双线圈测磁法	(178)
1. 旋转线圈测磁法	(178)
2. 振动线圈测磁法	(181)
三、旋转线圈磁强计	(185)
1. 旋转线圈磁强计的特点	(185)
2. 测量地磁场各分量的旋转线圈磁强计	(185)
3. 小旋转线圈磁强计	(188)
第四节 小结	(186)
第五章 磁通门法	(192)
第一节 磁通门磁强计的工作原理	(193)
第二节 影响磁通门磁强计测磁精度的因素	(199)
一、测量环节的影响	(200)
二、探头的影响	(202)
三、磁通门磁强计的温度补偿	(204)
第三节 磁通门磁强计的探头	(210)

一、横向励磁探头·····	(211)
二、纵向励磁探头·····	(212)
三、横向与纵向混合励磁探头·····	(215)
第四节 磁通门磁强计的典型结构及线路举例 ·····	(215)
一、二次谐波磁通门磁强计·····	(218)
二、非二次谐波磁通门磁强计·····	(222)
第五节 磁通门磁强计的应用及要求 ·····	(230)
一、测量空间弱磁场的高稳定性磁通门磁强计·····	(230)
二、特殊应用中的简单磁通门磁强计·····	(231)
第七节 小结 ·····	(233)
第六章 光泵法 ·····	(236)
第一节 工作原理 ·····	(237)
一、原子的能级、精细结构和超精细结构·····	(237)
二、光抽运过程·····	(238)
三、光泵法的测磁原理·····	(239)
第二节 工作物质 ·····	(241)
第三节 探头 ·····	(242)
第四节 光泵磁强计 ·····	(244)
一、氦气磁强计·····	(244)
二、碱金属蒸汽磁强计·····	(246)
第五节 小结 ·····	(255)
第七章 磁光效应法 ·····	(257)
第一节 工作原理 ·····	(257)
一、透射法·····	(258)
二、反射法·····	(260)
三、干涉法·····	(261)
第二节 探头的一般介绍 ·····	(263)

一、探头材料	(263)
二、探头对测量精度的影响	(265)
三、旋光介质的长度	(266)
第三节 磁光效应磁强计	(267)
一、测量180千高斯恒定磁场的直读式磁光效应磁强计	(267)
二、测量兆高斯级脉冲磁场的磁光效应磁强计	(270)
第四节 磁光效应磁强计的特点及其应用	(271)
一、兆高斯级磁场的测量	(272)
二、低温强磁场的测量	(273)
第五节 小结	(273)
第八章 磁膜测磁法	(274)
第一节 铁磁薄膜的磁特性	(274)
第二节 工作原理及类型	(276)
一、有源磁膜磁强计	(276)
二、无源磁膜磁强计	(294)
第三节 小结	(295)
第九章 超导量子干涉器件法	(297)
第一节 工作原理	(297)
一、磁通量子化	(299)
二、约瑟夫逊方程	(299)
第二节 直流超导干涉器件	(305)
一、dc SQUID的原理	(305)
二、dc SQUID的运行	(310)
三、dc SQUID的噪声问题	(313)
四、dc SQUID的制造及性能	(315)
第三节 射频超导干涉器件	(323)
一、rf SQUID的原理	(323)

二、rf SQUID的运行	(330)
三、rf SQUID的噪声问题	(331)
四、rf SQUID的制造及性能	(335)
第四节 SQUID在空间磁场测量中的应用	(339)
一、磁强计	(339)
二、磁场梯度计	(343)
第五节 小结	(346)

第一章 绪 论

磁场测量是人类观察和利用磁现象的一门历史悠久并不断发展的技术科学。早在两千多年前，我国就发明了指南针。指南针是利用磁铁在地球磁场中的南北指极性而制成的一种指向仪器。在不同的历史时期它有不同的形体，也有不同的名称，例如曾把它叫作司南、指南鱼等。最初的指南针是由磁石制成的，样子象勺，底圆，可在平滑的地盘上自由旋转，等它静止的时候，勺柄就指向南方，古人称它为“司南”。从我国秦、汉、六朝及隋、唐的古籍中，都可以找到不少关于“司南”的记载。“司南”可以说是世界上最早的指南针，也是最早的测磁仪器。它的发明是我国古代劳动人民在长期生产实践中集体智慧的结晶。指南针虽小，可是在当时的用处却很大，如旅行、航海、探险等都离不开它。随着社会生产力的不断发展，尤其是航海业的不断扩大，需要一种比“司南”更好的指南仪器。人们经过长期生产实践，终于掌握了人工磁化法，并制成了更高级的磁场指示仪器。北宋初年，由曾公亮主编的一部军事著作《武经总要》和由著名科学家沈括撰写的《梦溪笔谈》分别叙述了指南鱼和指南针。指南鱼是用薄铁片制成鱼形，然后利用地磁场使它磁化。在行军的时候，携带浮有指南鱼的盛水容器，指南鱼就能指南。指南针是用钢针与天然磁石摩擦使钢针磁化而制成的，同样也可以指南。远在北宋时代，我国人民已经在海船上使用指南针。直到公元十二世纪末至十三世纪初，指南针才传到阿拉伯和

欧洲一些国家。从发明指南针可以指出地磁场的方向时起，磁针就已被人们所了解。十六世纪它又用于一些研究磁性的科学测量仪器中，并完成了地球磁场特性的结构图，十八世纪所有对地磁场的观测都是通过测量磁偏差和磁倾角来完成的。1785年库仑(C. A. Coulomb)提出了一种测量磁场强度的新方法，这种方法是基于确定磁铁的自由振荡周期或带支点的磁针的原理。到十九世纪磁针发展成为研究地磁场的基本仪器。对地磁场随时间变动作基准测量的第一个国际协会就采用了高斯(C. F. Gauss)设计的磁针仪器。1832年高斯发表了《引入绝对测量地磁力的强度》一文，他指出在测量长度、质量和时间的基础上，对磁场强度作绝对测量的可能性，第一次提出了有关互换测量系统的问题，对度量衡学和物理学单位的研究产生了很大的影响，使磁场测量进入了新时期。二十世纪初，由于电工学的迅速发展，迫切需要创立新的磁场测量方法，如用电磁感应法测量电机、电器、电工仪表等气隙内的磁感应强度及磁通量等。在第二次世界大战期间，由于雷达技术发展的结果，促使电子技术的迅速发展，在这段时期，人们提出了不少测量空间磁场的方法，并且出现了许多基于这些新测量原理而制成的仪器。自1931年劳伦斯(E. O. Lawrence)建成世界上第一台回旋加速器以来，加速器技术得到了迅速的发展。由于加速器内带电粒子的运动需要磁场诱导，因此要求我们了解磁场强度的大小和精确度，以保证粒子顺利地被加速到设计能量。随着电子感应加速器以及质子和电子同步加速器的出现，碰到了随空间和时间变化的磁场测量问题。为了满足所需的测量精确度，除已有的适用于时间变化的磁场测量技术之外，还发展了一些特殊的新技术。近十年来，由于物理学中一些物理现

象的发现，以及电子学和半导体技术的发展，使磁场测量技术获得了迅速的发展。在现代大型粒子加速器中，要求精确地测量随空间和时间变化的磁场，特别是由于宇航学、物理学的其他一些分支(如等离子体物理学、生物医学)的迅速发展以及国防工业的需要对磁场测量提出了新的要求。目前，磁场测量技术的应用十分广泛，它几乎涉及到所有的电测量方法和各种电磁现象。磁场测量技术将以很快的步伐进入现代科学技术的各个领域，其重要性已日益为人们所认识。

磁场测量技术所涉及的范围很广，从被测磁场强度范围看，它可以由 10^{-11} 至 10^7 高斯以上；从其频率看，它包括直流、工频、高频及各种脉冲；从测量技术所应用原理看，它涉及到电磁效应、光磁效应、压磁效应、热磁效应等各种效应；从测量中使用的技术看，它包括指针仪表、数字仪表直至电子计算机的系统测量。原则上，凡是与磁场有关的现象都可利用来测量磁场。磁场测量方法是在电磁理论、电子技术和物理学的基础上建立起来的。目前，磁场测量的方法不下几十种，由于本书篇幅所限，我们只叙述一些重要的、常用的并有发展前途的一些方法。

本书的第二章介绍了磁共振法。自1946年珀赛尔(E. M. Purcell)和布洛奇(F. Bloch)等人分别提出了核磁共振的吸收法和感应法并用于磁场的精密测量以来，磁共振的测量技术得到了非常广泛的发展，目前已发展成为各种形式的专用仪器及通用仪器。磁共振法常用于均匀磁场的绝对测量。在用核磁共振法测量磁场时，用简单的装备能很容易达到 1×10^{-4} 的精度；若用精密的设备并采用一定的措施后，就可达到 10^{-5} 以上的精度。用核磁共振法测量的最低磁场强度约为1高斯，用电子注入动态极化法可使这一最低极限

达到 10^{-7} 高斯。用电子顺磁共振法测量磁场时，可用咔唑(carbazole)这类探头材料，由于它的共振线窄、稳定度高和吸收强度大，在测量弱磁场时，可把精度提高一个数量级。目前在磁场绝对测量方法中精度最高的是核磁共振法。用核磁共振磁强计可检验和校准其他类型的磁强计。近年来，正在发展一种自动跟踪慢变化磁场的质子共振磁强计。用磁共振测量磁场的主要缺点是在整个测量范围内要更换好几种不同共振频率的探头，因而不便于进行连续测量，而其测量精度还与磁场的均匀度有关。

第三章介绍霍尔(Hall)效应法。六十年代由于半导体技术的发展以及一些新的半导体材料的出现，使霍尔发生器广泛地用于测量恒定磁场和随时间变化的磁场。霍尔效应测磁仪器目前能在极低温度(4.2 K)和极高温度(573 K)下有效地工作，探头尺寸能做到 25×25 平方微米，甚至更小，可以用此法相当精确地测量非均匀磁场。霍尔效应法测量磁场强度的范围从1高斯至 10^5 高斯左右，精度能达到 10^{-1} 。由于霍尔发生器在很宽的温度范围内都有非常好的稳定性，且有灵敏度高、线性度好、探头体积小等优点，因此它已成为一种引人注目的测量磁场方法。当然，要提高霍尔发生器测量磁场的精度还必须解决霍尔发生器固有的一些问题，如零位误差、霍尔电势和内阻存在一定的温度系数，并且受控制输入电流的影响，以及霍尔元件尺寸在测量不均匀磁场时带来的误差等。在制造霍尔元件时，应考虑克服不等位电势、感应零电势和自激场零电势的措施。

第四章介绍电磁感应法，将着重介绍冲击电流计、格拉索特(Grassot)磁通计、电子磁通计和发电机原理法。电磁感应法是一种基于法拉第定律的经典而又简单的测磁方法。

感应电压与磁场强度成正比，它能直接测量与探测线圈交链的磁通变化，因此，能测得线圈体积内平均的磁场强度值。如将探测线圈做得很小，制成能消除磁通展开式中二次项的形状，则能测得线圈中心位置上的点磁场强度值。虽然目前发展了许多新的测磁方法，但电磁感应法仍是十分有用的。测量时，如探测线圈的旋转角和旋转时间的重复性良好，则直读式磁场测量仪器的精度能达到 10^{-3} 。用平衡法能使冲击电流计或磁通计的测量精度达到 10^{-4} 。如用适当形状的线圈，此法也能测量不均匀磁场。测量磁场强度范围可以从零到可能的最高值。电子积分器是耦合感应系统的一种基本组件。如需测量随时间变化的磁场，并要知道任一瞬间的磁场值，则感应电压必须迅速被积分，常用的有密勒（Miller）积分仪。电子积分器能连续而高精度地测量高能加速器磁铁的动态脉冲磁场，其测量精度较高。用平衡法达到的精度可优于 10^{-3} ，测量所得的磁场值是整个线圈面积上的平均值，但用适当形状的线圈也能测出不均匀磁场的点值。测量磁场范围约从0.01高斯到可能的最高磁场强度值。利用电压-频率变换器测定磁通变化量的数字磁通计其准确度为 5×10^{-3} 至 1×10^{-3} ，最高达 1×10^{-1} ，它不仅准确度高，而且漂移小，测量结果可直接以数字显示或打印指示，并且能进行自校。发电机原理法用于磁场测量主要有旋转线圈法和振动线圈法。这两种方法的特点是能测量畸形的磁场，它的测量范围宽，线性度好，能对恒定磁场进行点测量，能测量高至 10^5 高斯的磁场，测量精度可达 10^{-4} 以上。

第五章介绍磁通门法。磁通门磁强计是利用在交、直流磁场同时作用下磁芯具有饱和特性的原理而制成的一种磁场测量装置。用高导磁率、高矩形比和无磁致伸缩的软磁合金

(如坡莫合金)作成的磁芯具有磁通可以迅速饱和的特点。这种测量装置的优点是灵敏度高、结构简单、牢靠,可以做得小巧。因此,它问世不久就被广泛应用于各种目的的弱磁场测量。用这种方法可以测量100高斯以内的磁场,精度为 10^{-3} ,但主要用于测量小于10高斯的弱磁场,其分辨率可达到 10^{-14} 高斯至 10^{-15} 高斯。

第六章介绍光泵法,即塞曼效应法。光泵磁强计是利用原子的塞曼效应,即在磁场中原子能级分裂为磁量子数为 m 的亚能级的原理而制成。光泵测磁法的优点是灵敏度高(最高可达 10^{-10} 高斯)、体积小,可连续测量和绝对测量,并具有直读或自动记录的特点。这种仪器主要用在测量0.05至10高斯范围的磁场,它从六十年代起即被应用,直到现在仍受到重视。

第七章介绍磁光效应法。磁光效应即法拉第效应,专用于测量等离子体的磁场,这种效应对温度环境的变化不灵敏,所以很适用于测量超导磁体中的强磁场。此法测量磁场的范围可达 10^5 高斯以上。

第八章介绍磁膜测磁法。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。磁膜厚度约为200至5000埃。这种方法具有灵敏度高、功耗小、结构简单等优点,因此是有发展前途的一种磁场测量方法。双膜传感器磁强计在测量弱磁场时有较好的线性,当磁场增大时其灵敏度亦增加,其输出与频率无关。它具有 10^{-5} 高斯的分辨率,这种磁强计在国防和军事方面有较多的应用。

第九章介绍超导量子干涉器件法。超导量子干涉器件法也叫约瑟夫逊效应法,是迄今为止灵敏度最高的一种测磁方法。1962年发现了约瑟夫逊效应(即超导隧道效应),为超导

技术提供了许多应用。如果在两块超导体之间夹以10埃左右的绝缘层，就可构成超导电子隧道结。利用超导体内电子对隧道效应中，隧道电流是磁场的周期函数这一特性制成的超导磁强计，其分辨率可达到 10^{-10} 高斯，而且有希望达到 10^{-11} 高斯以上。由于它的灵敏度这样高，在弱磁场的测量中具有独特的优点，它必将在今后的许多领域中得到更多的应用。

磁场测量技术的应用已深入到工业、农业、国防，以及生物、医学、宇航、星际研究等各个部门。当前几乎任何技术领域都离不开磁场测量。磁场测量技术与不同的学科相结合形成了一些边缘学科，如磁场测量在强磁场中的应用形成强磁场物理学，磁场测量在化学中的应用形成磁化学，磁场测量在地质中的应用形成磁法勘探学，磁场测量在医学中的应用形成磁法医学，磁场测量在探伤中的应用形成磁探伤学。特别是在人造卫星，高能加速器，重离子加速器，工、农、医及国防应用的各种低能加速器，受控热核聚变装置，各种大型谱仪，大型物理实验仪器，电子显微镜，电子束及离子束加工装置，物理、化学用的各种大型电磁铁和超导磁体，宇航等重大工程中无不涉及到大量的磁场测量技术和需要大量的测磁仪器。在工业方面，如电动机、发电机、变压器、继电器、仪器仪表、电子计算机的研制，以及在自动控制、测量压力、探测地下管道、控制车辆、磁探伤，轴承等零件的剩磁测量、磁悬浮列车等方面的技术中都对磁场测量技术提出了更高更新的要求。在国防上，如磁性扫雷、船舰消磁、搜索武器、磁波通讯、磁探针、导弹磁导等以及水雷、地雷、炸弹探测器和磁导航等方面也都离不开磁场测量技术。磁场测量技术在医学方面的应用也非常广泛，目前不少国家正在研究超导磁体漏磁场对人体的影响。用磁场疗法治疗各

种疾病，测量人体组织含水量从而快速检查人体有无癌症。通过测量人的血清磁化率的变化率对癌症、霍乱等严重病症的患者作早期诊断。通过测量人体心脏跳动和头脑内部的磁场变化作出“心磁图”、“脑磁图”来代替过去靠电极接触人体的“心电图”、“脑电图”来诊断疾病。在生物学方面的应用，主要研究环境磁场对生物和人的作用，磁现象和生命现象的关系，磁场对细胞生命活动的促进、停止、再生等作用。研究用磁化水来促进农作物的生长，探索各种磁化场下磁化水的作用机理等。以上这些都要求对不同磁场进行精确的测量。总之，磁场测量技术在各个方面都有着广泛的应用，并在不断发展。

磁场测量技术以很快的步伐进入现代科学技术的各个领域，其重要性已逐渐为人们所认识。当前主要的技术发展趋势是：1. 要求研制一些特殊的测磁设备，如磁性导航仪、磁性损伤仪、强磁场磁强计、“心磁图”测试仪等；2. 要求对磁场测量领域提供一些先进的方法和装备，如高精度、高灵敏度的磁膜磁强计、磁通门磁强计、超导量子磁强计等；3. 要求磁场测量技术迅速向电子化、数字化、自动化的方向过渡，并利用电子技术采用传输法来实现复杂而迅速的测量。随着磁场测量技术的广泛应用，也不断地为“非磁量的测磁法”增添新的内容，如光泵磁强计、超导量子磁强计等已引起了人们的普遍重视，这些仪器在探矿、无损检测以及工、农、医、国防等部门有许多重要的应用。不言而喻，为适应日益发展的需要，对磁场测量技术中的一些理论问题和新的测磁方法必须进行探讨，对磁场测量仪器的测量范围、灵敏度、精确度和数字化、自动化等方面也必须进一步研究和提高。