

(内部资料)

电子测量仪器动态

(二)

黑龙江省电子测量仪器网

一九七七年五月

电子测量仪器动态

(二)

目 录

8	近25年来一些微波测试方法的发展	1
9	磁测量技术的最新发展和展望	5
10	交流集中参数测量仪器的发展	41
11	射频信号发生器的技术水平	63
12	日本的测量仪器目前水平	70
13	仪器应用技术	77

近 25 年来一些微波测试方法的发展^①

微波技术的发展很大程度上受能提供频率，亦即振荡管或半导体振荡器的影响。由于其用途（主要在定向通信和雷达方面）自 1948 年以来先局限于很少频率范围，故测试仪器开始也只研制了较窄的范围。但是到 50 年代末频率空档却被占满了。本文将讲述一些主要的测试仪器及方法，以便说明近年来测试可能性是如何变化的。

一、测试发生器

1948 年定向通信只到 500 兆赫，为满足当时的需要，测试发生器采用三板管和带重传输回路。船用雷达的频率用反射束调谐发生器。几年以后制造了采用密封三板管的发生器，它们可调谐在 1 至 2 千兆赫或 3 至 6 千兆赫的频率范围上。六十年代初期出现了调谐范围达一个倍频程的扫频发生器，一部分是电动机驱动调谐的束调谐发生器，另一部分是电子调谐的返波振荡器 (BWO)。这种扫频发生器的主要部件之一是 PLN 二极管调谐器，它可在 12 千兆赫以下使输出电平保持恒定。在 12 至 40 千兆赫的范围内则需要 BWO 的栅极调制作为电平调整。

七十年代初出现了第一批用半导体振荡器的扫频发生器。这里，调谐是通过改变钇铁石榴石滤波器 (YIG) 的偏磁来实现的。4 千兆赫以下用晶体管振荡器，至 18 千兆赫用耿氏二

① H. Groll: Die Entwicklung einiger Mikrowellen-Meßverfahren in den letzten 25 Jahren, NTZ, 26 (1973), 8, PP. 352~353.

极管。对于包括数个倍频程的扫频范围，或者用几个 BWO 自动切换调谐，或者用一个半导体振荡器加上倍频器和可切换的滤波器。为了提高发生器的频率稳定性，也有借助于相位调整回路使之与晶体振荡器的谐波同步。对于自动计值的扫频方法通常采用小间隔的频率步进电路。

二、测试接收机

在外差式测试接收机中，与测试发生器中相同的三极管发生器用作振荡器。它只是增加了一个点接触三极管的可调谐的混频回路和一个中频放大器。一般没有预选，较高频率时用振荡器的谐波来混频。五十年代后期出现了采用机械同步的预选滤波器接收机。1948年只有采用扫频范围约为 50 兆赫的束调管制成的频谱分析仪和用示波器显示频线的扫频接收机。六十年代中期才用 BWO 作为差频振荡器，扫频范围达 2 千兆赫，借助谐波混频可用到 40 千兆赫。这里出现的频率指示的多重性可通过同步的 YIG 输入滤波器得以消除。七十年代初，这里的 BWO 也被半导体扫频仪所代替。

三、功率测量

四十年代内唯一采用的，装在可调谐的插座内的丝状电阻。辐射测热计首先是大大缩小了体积，然后被球型热敏电阻所代替。五十年代，这种热敏电阻被装在常同轴插座或波导管内，它们在一个倍频程内不调谐就能达到匹配。同轴型目前用到 18 千兆赫。此外，大约自 1965 年以来还有一种热电功率计，这里热电偶是蒸发成薄膜，它同时起着吸收器的作用。其动态范围比热敏电阻约大 20 分贝。

指示用的桥路也是用外接热敏电阻来补偿环境温度的。温度漂移的大幅度减少是在六十年代中实现的，它是通过测量和补偿采用相同的热敏电阻和自校正的交流电桥达到的。最近几年来，人们又优先采用调整回路内应用附加的脉冲调制的直流电桥。热量功率计的应用仅局限于较大的功率和特殊的校验方法。

四、衰减测量

找寻衰减器用作替代法测量中的比较标准，其基本形式早在1948年已被采用。适宜的屏蔽和激励电极的适当形状可减少基本衰减器的影响特性。六十年代内，通过将替代法移到中频范围改进了测试方法。精密的、精确确定或可切换的同轴衰减器也是在六十年代通过陶瓷基片上的薄膜电阻材料的引入才发展起来的。对于波导技术而言，在相同的时间内出现了所谓的旋转衰减器，其优点是，衰减可变化到零、良好的匹配、相位变化小以及相当高的精度。

五、匹配及阻抗测量

到五十年代中，测量复数阻抗和四端网络参数最常用的仪器是探头可移动式的测量线，大部分是制成直线形，但也有环形的，并带有电动机驱动旋转的探头。由于每次只能测量一个频率和较为繁琐的计值，许多用户放弃了相位信息，并借助定向耦合器取反射系数的绝对值测量。目前，定向耦合器既有同轴型的，也有波导型的，它们在一个倍频程的范围内具有恒定的耦合衰减。若与BWO扫频发生器联用，则便可在示波器上显示出各种频率时的反射系数和透射系数。复数阻抗的直接表示，由于相位信息需要变换到中频范围，用定向耦合器也只能

在一个频率上进行。直到六十年代末，才有可能用一个很短的脉冲产生一个极大的频谱，以便在测试频率迅速扫频的情况下仍能在高至12千兆赫下构成一个中频，并通过脉冲频率的微调使其恒定。借助此种变频方法，可在反射系数图中以圆圈的形式表示复数阻抗。通过新型的、非均匀变化的耦合段的同轴定向耦合器，耦合衰减可在几个倍频程的范围内保持恒定，从而可能例如在2至12千兆赫的范围内表示出一个圆圈。借助于一台数字计算机用预定的定向耦合器误差矢量作测试值的自动校正，测试精度可以3%提高到0.1%。

研究阻抗情况和确定较大末端网络的反射位置的另一种方法可用脉冲反射计进行。它由一个产生很陡前沿的阶跃函数发生器和一台取样示波器组成。1960年左右的第一批取样示波器的上限频率约为1千兆赫，六十年代中期它已达12千兆赫。这样，用40微微秒的上升时间就能分辨小于1厘米的反射位置。用一个阶跃函数不可能研究具有带通特性的被测件，例如波导线路，但最近通过调频测试方法，类似于调频雷达，使这种测试亦有了可能。

磁测量技术的最新发展和展望

近年来，磁测量技术以很快的步伐进入到现代科学技术的各个领域，其重要性已经为人们所认识。为了适应工农业、国防等国民经济发展的需要，更快地发展我国的磁测量技术，就要按照毛主席的指示“自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验”这条正确的路线作指针，研究磁测量技术的国内、外现状和发展，从中吸取经验，指明方向，有的放矢，这是当前的迫切任务。

本文就以下四个方面讨论上述问题：（一）磁现象、磁测量及其应用；（二）我国磁测量技术的现状及发展；（三）磁测量技术的最新发展；（四）对磁测量的展望。

一、磁现象、磁测量及其应用

现代科学技术的发展，使磁现象不仅在许多尖端技术中而且在日常生活中也被人们所重视。研究磁现象物理学的重要意义，一方面是由于研究磁现象可以为物质的研究开辟广阔的科学前景，另一方面是由于磁性材料和磁性器件对现代技术的重要作用以及磁方法在其他技术中应用的推广。物质磁性的普遍性，已使磁现象的应用涉及到自然科学和技术科学中的各个领域，并成为不可分割的关系。例如，在“原子磁性”中对基本粒子、原子核、孤立原子、离子、分子等磁性的研究，在“宇宙磁性”中对地球、行星、太阳、星际空间磁场的发生和变化

规律的研究，在宇宙航行、地球物理、化学、生物学、医学领域中磁现象都得到了很多应用。在人们的生活中，磁和电一样，已经成为必需品。

磁现象这一学科包括磁场的起源、磁化场和磁化物质等方面的问題。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。

磁测量实质上包括两个内容：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（法拉第磁光法、电子显微术法、中子衍射法、各种磁共振法、穆斯保尔效应法等）、研究铁磁磁光、磁阻、磁滞伸缩、磁共振等各种磁效应的方法。同时，由于磁测量向各技术科学领域的渗透，和不同的学科相结合而形成一些边缘科学，这些边缘科学即构成所谓“非磁量的磁测量”。例如，磁测量在化学中的应用形成磁化学，磁测量在地球物理学中的应用形成磁法勘探，磁测量在生物学中的应用形成磁生物学，磁测量在医学中的应用形成磁医疗法，等等。这些新学科具有无限的前途。

因此，磁测量的重要任务之一就是精密测量磁性材料的磁性。由于磁性材料有铁磁、亚铁磁、弱磁、矩磁、旋磁等之分，铁磁材料中又有软磁和硬磁之分，它们在精密仪表制造、自动控制、计算技术和通信技术等方面有广泛的应用，因此对不同的使用条件和不同的材料，要求使用不同的测量方法和测

式不同的磁性参量。例如，对硅钢板，要求测量磁化曲线 $H = f(B_{max})$ (H 为磁场强度有效值， B_{max} 为磁感应强度最大值)，以及在 50 赫和 400 兆赫下的比损耗，对在交变场中使用的永磁导率白金，要求测量初始磁导率、最大磁导率、矫顽力等，矩形的永磁导率白金还要求测量磁滞回线的矩形系数；对不同频率下的铁氧体，要求测量不同频率 (1—100 千赫—100 兆赫) 下的磁导率、损耗角正切与磁导率的比 $\tan \delta / \mu$ ，在 $-60—+125^{\circ}\text{C}$ 下磁导率的温度系数等等；对一般的硬磁材料，要求测量静态下的剩余磁感 B_r 、矫顽力 H_c 、最大磁能积 $(HB)_{max}$ 等等。因此，要求建立磁性材料的磁性测试标准 (国家标准) 和技术条件，并且规定相应的测试方法和设备。

磁测量的另一任务——磁场的精密测量，不只是磁测量本身所必须而且在其他技术中得到普遍的应用。例如，在地球物理学中根据连续测量磁异常探测基岩的构造而探知矿藏，测定岩石的“自然性”而探测近地表面处形成的油层和天然气等；根据测量玄武岩与火山岩的磁性 (热剩磁) 而系统测量不同年龄岩石形成的磁场方向来研究地磁形成的历史；在地震科学的研究中表明 (1, 2) 任何形成的地震，可能是声频的或超声频类型的，都会暂时破坏形成地壳的磁铁矿或岩石的磁状态，并导致磁场强度的减小。对大地震，有从 2γ ($1\gamma = 10^{-5}$ 高) 到 $(5 \sim 10)\gamma$ 的变化。另外，由于火山喷发前地下温度的上升，在超过居里温度时将使岩石失去磁性，即会使局部磁场发生变化。因此，通过磁测量可以预报地震和火山的喷发。这是地震预报的一种重要方法。在原子核物理中，根据测量磁场梯度等研究原子核衰变时形成粒子的能量 (即光谱学) 以及研究带电粒子加速器的磁场分布等。在宇宙工程学中，根据测量月球和其他星体的磁场以及地球周围的磁场及其变化，对于宇宙

航行、研究星体磁场的形成和星际间介质的性质以及残存火箭、导弹等都有重要的意义。这些都要求精密地测量比地磁场还要小得多的磁场，这可以藉助于核磁共振、顺磁共振、光泵、磁共振仪、超导电感测量技术来实现。同时，这些方法还在军事上用于引爆、扫雷、排弹、探雷、导航等技术中。

现代磁测量技术在磁生物学、磁医疗、磁化学等方面都有重要应用。例如，测量 10^{-3} 国际单位数量级的血清磁化率的变化率，有助于对患有癌、霍乱等严重疾病的患者作早期诊断。利用超导电感强计观测人的心磁图，可以对患者作简单而准确的诊断(3)。最近又提出的用钐钴等永磁合金对治疗关节炎、气管炎、高血压等疾病具有特殊的疗效。在磁化学中，利用磁秤、振动样品磁强计等方法测量物质的磁化率等参量，用于研究物质结构、研究蛋白质的磁性等，可以鉴别矿物和研究催化剂等，对于采矿和炼油等工业有重要应用。

磁测量在工农业生产中也有重要用途。例如，在电机、汽轮机、继电器等产品中要求测量间隙的磁场；在电视机、手表中要求测量“无磁钢”的磁性；在录音机、录像机、计算机中要求测量磁带和磁芯的磁性；……。近年来，还利用磁法成形技术改革了铸造工艺；利用永磁测定的原理提高机床的精度，将磁尺用于机床的精密测量和调整中，这对于精密加工和机床的自动控制具有重大的意义(4)。另外，由于磁性是金属或合金的成分和结构的敏感函数，因此磁测量可用来补充其他方法的不足并被认为是最好的方法。用磁性能精确测定合金的成分和相的组成(热磁分析)并有助于鉴定缺陷、应力和参杂等(5)。磁法探伤的应用，可以对轴承、钢管以及一些钢铁制件进行非破坏性检查(6、7)。例如，日本的“SAM 自动连续磁探伤装置”(8)，已根据将钢管磁化后由附具上的磁敏二级管进行检

测的原理，可以检查 $\phi 50 \sim 130$ 毫米的钢管在0.1毫米以内深处的缺陷，并且可以进行连续的自动的检验，速度为30~70吨/小时。在解决未来能源的受控热核反应中和在解决高速运行的磁浮列车中，对于超导强磁体的产生和测量都有特殊的意义。在农业中，利用磁化水灌溉水稻，向日葵、大豆、葱、葫萝卜等农作物，可使作物获得高产〔9〕。对于磁测量在农业中的应用，还有很多可以探讨的课题。

二、我国磁测量技术的现状及发展

磁测量是一个即古老而又年青的技术科学。远在公元前一千年的我们的祖先就知道了指南针具有极性，并将其制成罗盘（当时叫“司南”）用于长途旅行和航运。这固然是世界上第一个测磁仪器。冲击法等各种方法的出现则是十八世纪以后的事了。然而，由于近年来磁测量技术的广泛应用，大大丰富了磁测量的内容，它几乎包括了所有的电测量方法，利用了各种电磁现象，并且正在与电子技术和计算技术等相结合，而向电子化、数字化、自动化的目标迈进。

我国磁测量技术和测磁仪器是在旧中国“一穷二白”的基础上发展起来的。特别是经历了无产阶级文化大革命的战斗洗礼，各种磁测量技术的研究和新型测磁仪器的研制，如雨后春笋一样发展起来了。磁测量的科研和专业队伍、生产厂不断发展；磁测量工作的普遍开展，运用新技术和新元件的新型测磁仪器的不断涌现，标志着我国磁测量技术正在向赶超世界先进水平方向阔步前进。但是，这与磁性材料和器件的日新月异的增长以及科研、国防等方面应用技术的发展相比，磁测量还是远不能满足需要的。

1963年由哈表所试制了CC₂型直流冲击法测磁装置(现改CC₃型由哈表厂生产),初步解决了国内直流测磁的需要,后来在1974年的兰州会议上确定此法为某些永磁材料的测试(部颁)标准;同时对硅钢片的磁性测试作了研究,1958年试制了CH型硅钢片磁性试验装置,于1965年试制了CZ₁型硅钢片磁性检验装置(现由牡丹江电工仪器厂生产);此外,还于1965年研制了CB₁型磁量具比较装置(现由哈表厂生产),解决了直流磁参量标准的传递问题。在六十年代中期,上海第四电表厂生产了CL₁型直流磁性自动记录仪,采用了光电放大原理,可自动测绘直流磁化曲线和磁滞回线,为我国直流自动测磁仪器的发展迈出可喜的一步;同时,该厂还生产了CL₂型交流磁性自动记录仪,采用铁磁仪的原理,可在45赫~10⁴赫内自动测绘软磁材料的交流磁滞回线;近年来,又生产了基于霍尔效应原理的直流和交流磁场测量仪(即CT₂、CT₃和CT₅型高斯计)。73年来,哈表所研制了全晶体管式的CL₄型软磁音频磁性测量装置,也采用了光丑的电子积分技术和采样技术,可在50赫~10⁴赫的频带内自动测绘磁滞回线、磁化曲线、磁导率曲线以及在交直流同时磁化下测绘这些曲线;同时,还研制了CST-1型数字式高斯计,也是基于霍尔效应的原理并以数字显示,以较高的精度测试磁场强度。

除此之外,计量科学研究院在73年来研制了直流磁性自动测量装置(10),采用光电放大和电子积分技术,其灵敏度为10马西/毫伏,准确度为1%,测量范围为10³~10⁸(马西),电源采用自动扫描调整,并有13速反馈,可自动测绘磁滞回线。最近,弱磁的测试和应用引起了人们的重视。沈阳仪器仪表研究所和北京地质仪器厂都研制了光泵磁强计(11),据报道其分辨率可达0.01 γ ,可用于地质探矿、地震预报、排弹等用途。

科学院物理所和吉林大学等单位还研制了振动样品磁强计(12、13)可用于准确测量磁矩及其与温度和磁场的关系。吉林大学研制的振动样品磁强计分辨力达 $2 \times 10^{-5} \text{ emu}$ (电磁单位磁矩)，精度不低于2%。近年来，一些单位研制了超导螺管用做强磁场设备，解决稀土钇永磁等的测试问题。由超导量子磁强计解决极弱磁场的测量问题，也引起人们的注意。作为高频的测磁电桥，除上海第四电表厂生产的Q51型测磁电桥外，一些单位正在研制先进的自动测磁电桥。对于铁氧体的磁性测量，大部份材料生产厂采用Q表法或电桥法。在一些单位还研制了一些简易、快速和自动分选的测磁设备。

现将近年来国内主要测磁仪器的产品及特性介绍如表1.1(45)。

由于磁性材料生产的发展和磁测量应用技术的推广，对磁测量技术提出了更多的要求。例如：超导强磁场设备和稀土钇永磁等测试仪器；磁钢稳定性测试仪器；不规则形状磁钢的测量、自动分选及快速测量仪器；铁氧体温度系数和恢复性能的测试设备；录音和录像用的磁带的测量仪器；硅钢片损耗的自动测试和连续检验仪器；用于地震预报等的弱磁场的测量设备；各种电机、发动机等的磁性测量仪器，……。并且，在无产阶级文化大革命的一派大好形势下，促进了生产的飞跃发展，因而、科研和生产对测磁仪器的要求更加迫切。因此，要求以更快的速度发展我国的磁测量技术和仪器，以适应国民经济发展的需要。

原书缺页

原书缺页

原书缺页

三、磁测量技术的最新发展

近年来,由于电子技术、计算技术等先进科学技术的发展使磁测量技术领域发生了深刻的变革,同时这种变革又为其他科学技术的发展创造了方便的条件。磁测量技术的最新发展显示了磁测量的无限生命力。这些新发展不但在其他技术中得到了应用,并且大大扩展了磁测量的技术领域。例如,现在可以完成 $10^{-7} \sim 10^{+7}$ (奥)范围内的磁场测量,并且由于超导量子磁强计的应用,还可望达到 10^{-12} (奥)的广度。以下介绍的几种测磁方法和仪器就是近年来磁测量技术发展的新成果。而对于霍尔效应法、核磁共振法以及一些特殊的测磁方法就不予介绍了。

(一) 直流磁特性自动记录装置

由于四十年代后期磁性材料的迅速发展,对磁测量在灵敏度、精确度和测量速度方面都提出了更高的要求;以往应用的冲击法因其过份费时费事,对现代工业生产已不适应。经过多年的探索,1950年P.P. Cioffi集其大成(16),把光电积分放大器应用到直流磁测量中,从而提高了磁通记录系统的灵敏度和准确度。近年来出现了各种直流磁化特性测量装置。(17,18)

近年来全电子积分放大器取代了光电积分放大器,并采用了全部晶体管和全部应用部分固体元件,同时发展了自动记录系统。它具有测量范围宽,灵敏度高和速度快的特点,因此在磁测领域内引起普遍重视。其测量原理如图1所示。它由磁化电源、磁化电流控制、磁通积分器、H运算器、B运算器和X-Y记录仪等部分组成。若样的初、次级匝数分别为 N_1 和 N_2 ,磁化电流为 I ,在线圈中产生磁场 H ,在样品中产生磁通 Φ ,则当磁通变化时在次级线圈感应的电压 C_2 为