

超导体产生的强磁场 如何测量?

张 钟 华*

一、超导体能产生强磁场

自1911年荷兰科学家昂内斯发现超导现象以后,许多大科学家绞尽脑汁设法从理论上解开这一奇妙现象之谜。经过了漫长的努力,超导现象终于在1958年为三个美国科学家巴丁、库珀、施莱弗联合提出的一项理论(即著名的BCS理论)所基本解释,这三位科学家也因此荣获了诺贝尔物理学奖。六十年代以来,由于第二类超导体的制造工艺日益进步,超导技术已逐步取得了不少实际应用。数年前发现的高温超导现象,已成为家喻户晓的事实了。

超导现象的应用是多种多样的。但大部分应用都与超导体能产生极强的磁场有关。譬如用于探查癌肿瘤的核磁共振成像技术及可与飞机速度相媲美的磁悬浮列车,均是利用了超导线圈能产生强磁场这一特性的。

人们最早发现和应用的磁现象应属我们祖先的四大发明之一——磁罗盘。这是巧妙地利用地球磁场成南北指向这一特点,地球磁场约为50微特斯拉(0.5高斯),而目前由超导线圈产生的强磁场的世界纪录为19.3特斯拉(19万3千高斯),要比地球磁场强40万倍。这类强大的磁场已能托起几十吨重的磁悬浮列车使它在轨道上方飞驰,实在是一件了不起的事情。

二、用核磁共振法测量强磁场

超导线圈产生的强磁场是人们在历史上从未遇到过的,简直令人目瞪口呆。当然,人们想到的第一件事情是要测量这种磁场究竟有多强,可是一些常规的测量手段要对付这样强的磁场已无能为力,于是测量学家就请原子物理学家来帮忙。现代测量强磁场的最有力手段就是核磁共振法。

核磁共振的原理不难理解,每个原子核具有一定的磁矩 m ,当把原子核置于外磁场 B 中时,就如一个磁性陀螺, m 矢量的端点会围绕外磁场转动起来,如图1所示,这种现象称为“进动”。在日常生活中,孩

子们玩的陀螺在地面上旋转时,其旋转轴也会围绕垂直方向(重力方向)旋转进动,这是和图1中的现象十分相似。

原子核磁矩围绕外磁场方向旋转进动的角频率 ω_0 。与外磁场 B 成简单的正比关系。比例系数 γ 称为原子核的旋磁比。 γ 是一个只取决于原子核特性的常数。所以人们只要测出进动角频率 ω_0 ,就可求得磁场 B 的数值。

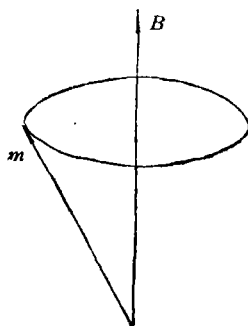


图1 核磁共振现象的简单图解

们玩的陀螺在地面上旋转时,其旋转轴也会围绕垂直方向(重力方向)旋转进动,这是和图1中的现象十分相似。原子核磁矩围绕外磁场方向旋转进动的角频率 ω_0 。与外磁场 B 成简单的正比关系。比例系数 γ 称为原子核的旋磁比。 γ 是一个只取决于原子核特性的常数。所以人们只要测出进动角频率 ω_0 ,就可求得磁场 B 的数值。为了测得进动角频率 ω_0 ,一般采用如图2所示的振荡吸收法装置。原子核样品制成圆柱状,外面绕上线圈,放在一个射频振荡器的振荡回路中。这样,在外磁场 B 中进动的原子核同时受到一个射频磁场的作

用。当射频场的角频率 ω 正好等于进动角频率 ω_0 时,就发生共振现象,原子核将强烈吸收射频场的能量,导致线圈的品质因素下降,射频振荡的幅度降低。共振时的射频场角频率就是我们要测的核磁共振角频率,这样也就不难得到待测磁场值。用核磁共振法测量磁场很容易达到 $10^{-3} \sim 10^{-8}$ 量级的准确度。除原子核常数 γ 有关外,其他的温度、湿度、气压等诸多环境因素对测量过程不起作用,因而无需考虑这些环境因素的影响。正是由于这些明显的优点,核磁共振法已成为当代高精度磁场测量技术中的主流。

尽管核磁共振法的优点很多,但用于测量低温下的超导强磁场时却遇到了困难,原因是超导线圈必须放入接近绝对零度的低温容器中,为了防止辐射热的影响,低温容器要有比较长的“颈部”。这样,图2中

* 作者系中国计量科学研究院研究员。

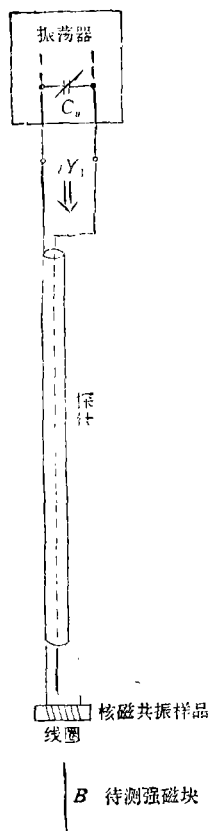


图2 用振荡吸收法观察核磁共振现象的装置

线圈覆盖 1—12 特斯拉 (1—12 万高斯) 的宽广范围, 探杆长度可达 1.7—4 m。核磁共振信号的搜索、锁定用单片微计算机控制进行, 这是世界上第一台高性能低温核磁共振测场仪, 各项技术指标居世界领先地位。该成果发表后, 受到国内外的广泛重视, 美国、墨西哥、波兰等国科学家纷纷来信要求提供详细资料; 著名的美国剑桥科学摘要杂志 (Cambridge Scientific Abstract) 把该装置列为 1987 年世界重要科技成果之一, 我国则已把该装置作为超导强磁场测试的标准装置。

三、DCZ 型低温磁阻效应特斯拉计

核磁共振测场仪尽管具有一

的探杆就要做得很长。对于现代大型杜瓦来说, 探杆需达到 1.7 m 甚至更长, 探杆的内外导体之间的分布电容就会变得很大, 限制了射频振荡器振荡频率的提高, 实际上也就是限制了可能测量的磁场值的上限。

这一长期困扰着测量学家的问题已在几年前为中国计量科学研究院的科学家们所解决。他们在长探杆与振荡器之间插入了一个“抑制网络”, 如图 3 所示。这个网络的特点是在低频下能量耗散很大, 而高频时则大大变小。这样, 各种频率较高的振荡就可被激发出来, 振荡器的振荡频率大大提高。目前已可做到用同一探头

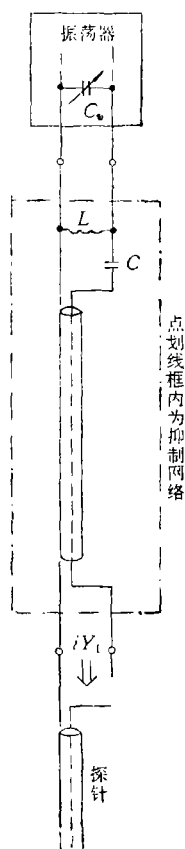


图 3

系列明显的优点, 但其结构复杂, 对操作者的要求较高。是否有更简易的方法测量呢? 对此中国计量科学研究院在数年努力的基础上发展了另一种超导强磁场的测试手段——DCZ 型低温磁阻效应特斯拉计。

磁阻效应的起源在于电子在磁场中运动时会受到磁场的作用力——洛仑兹力, 从而使其运动方向发生偏转。从宏观现象来看, 表现为导体处于磁场中时其电阻随磁场增加而变大, 这种效应也可用于测量超导强磁场。

利用磁阻效应测量磁场时, 有两个问题必须首先解决。其一是导线的电阻随磁场大小的变化规律要受到导线几何尺寸、材料成分、绕制方式等种种因素的影响。这些因素也很难精确控制, 只能在磁阻效应探头制作完毕后, 用核磁共振法对该探头进行标定, 画出探头的电阻——磁场曲线进行磁场测量时, 再从曲线上的电阻值求出磁场值。由于我国已建成低温核磁共振测场仪, 标定工作并不困难。另一个问题是导体电阻与磁场之间的关系并不是直线, 而是如图 4 所示的曲线, 依靠简单的校正手段很难将其校正为直线。但是利用可以装在仪器内部的单片微计算机, 完成这样的校正工作是轻而易举的。以上所述两点也就是 DCZ 型低温磁阻效应特斯拉计的设计和使用的基本原理。这种仪器的特点是使用方便, 不需任何额外操作即可把探头处的磁场用四位半数字直接显示出来。测量范围也是 1—12 特斯拉, 准确度可达 2×10^{-1} , 对于一般要求的测量工作, 已经足够。

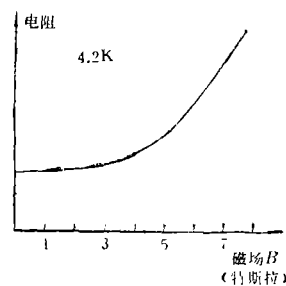


图4 铜导线在低温下的磁阻效应曲线

利用上面介绍的两种仪器, 中国已建立了一套完整的低温超导强磁场的测量手段, 为各种超导强磁场的研究和应用提供“武器”, 促进了我国此方面工作的发展。我们相信, 不会要很长时间, 中国的各大医院将配置国内研制的超导核磁共振成像装置为广大人民探查可怕的癌瘤, 在中国的大地上奔驰着时速 500 公里的磁悬浮列车的年代也已为期不远。