

感应法测量脉冲强磁场及其分布

曾 广 达

(华中工学院)

一、前 言

在现代科学技术领域中,强磁场得到了广泛的应用。通常,为了降低磁体的发热,提高供电系统的效应,大体积强磁场系统愈来愈多的采用脉冲强磁场,即在较短的作用时间内产生具有较大幅值的磁场。本文主要介绍感应法测量脉冲强磁场及其分布,并介绍我们自制的测量仪器(多道仪)的线路及实验结果。

二、原 理

许多与磁场有关的物理效应都可用于测量磁场。与其它方法比较起来,感应法测量脉冲强磁场具有使用方便、设备简单、测量范围宽等优点,它仍是目前测量脉冲强磁场的主要方法。

根据感应法原理研制成功的《多通道脉冲强磁场测量仪》(以下简称多道测场仪或多道仪),它由十六个通道组成,能同时测量空间十六个不同点处的脉冲磁场峰值。它能在一次放电的情况下测出某一空间或平面的磁感应强度及分布,并且在最不利的情况下,其误差仍在 $\pm 2\%$ 的范围内(未计及探头的定位误差)。

多道仪的每一通道实现测量的原理、线路和方法是这样的:当通过一个线圈的磁通量发生变化时,线圈里就产生出感应电动势。它的大小正比于磁通随时间的变化率,即:

$$e = -\frac{\partial \phi}{\partial t} \times 10^{-4}, \quad (1)$$

式中 e 是感应电动势,单位为伏特; ϕ 是线圈里通过的磁通量,单位为麦。在均匀磁场里或线圈截面很小因而线圈截面上各点磁感应强度可以近似为均匀时,或线圈截面各点磁场不均匀而取其平均磁感应强度进行分析时,上式可改写为:

$$e = -S \frac{\partial B}{\partial t} \times 10^{-8}, \quad (2)$$

式中 S 是线圈的截面积(垂直于磁场方向的面积),单位为平方厘米; B 是线圈截面上的磁感应强度,单位为高斯。如果测量磁场的线圈有许多匝,总的感应电势是各匝感应电动势的和,即:

$$e = -\sum_i S_i \frac{\partial B}{\partial t} \times 10^{-8}, \quad (3)$$

式中 S_i 是各匝的有效面积。令 $\sum_i S_i = NS$,

NS 又称作线圈的有效匝数面积,单位为匝·厘米²,则

$$e = -NS \frac{\partial B}{\partial t} \times 10^{-8}. \quad (4)$$

将式(4)从 0 到 t 对时间积分,便得到

$$B(t) - B(0) = -\frac{10^8}{NS} \int_0^t e dt. \quad (5)$$

式中 $B(t)$ 是时刻为 t 时的磁感应强度, $B(0)$ 是时刻为 0 时的磁感应强度。若 $B(0) = 0$,且积分时间从 0 到被测磁场出现峰值的时刻 t_m ,则可得到被测磁感应强度峰值 B_m 的关系为:

$$B_m = -\frac{10^8}{NS} \int_0^{t_m} e dt. \quad (6)$$

知道了 NS ,再设法测得感应电势 e 从 0 到

t_m 的积分值,便可以根据(6)式计算出 B_m 来。

在实际测量中,测量线圈安放在欲测的各个点上,使用线圈轴线与磁场方向平行。在脉冲磁场作用下,线圈输出端感应出如式(4)所示的电动势 e , 如果将该电势送进简单的 RC 积分器,如图 3 a 所示。若满足积分条件 $RC \gg t$, t 为要积分的时间,或是脉冲特征时间(约为脉冲宽度的 $\frac{1}{\pi}$),则根据 RC 积分器输出电压 u

与输入电压 u_{sr} (即电势 e) 的关系,有

$$u(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t u_{sr} dt = \frac{1}{RC} \int_0^t e dt. \quad (7)$$

求得积分器的输出电压为

$$u(t) = -\frac{NS}{RC} \cdot 10^8 B(t). \quad (8)$$

适当选择线圈的方向,负号可以去掉,有

$$B(t) = \frac{RC}{NS} \cdot 10^8 u(t). \quad (9)$$

也就是说,积分器输出电压的数值是与被测磁感应强度 $B(t)$ 成正比的。

将该积分器输出电压送到电子示波器上,就可以显示出被测脉冲磁场的波形。根据这个波形,就可以找出诸如上升时间、下降时间、脉冲宽度,脉冲峰值等一系列关于脉冲波的参数。多道测场仪设有积分输出端钮,供示波器观察,显示之用。

通常在测量中,经常要求准确测量脉冲的峰值。显然,由上面的分析可知,若积分器输出电压的峰值能够被“捉住”,则被测脉冲磁场的峰值就可以根据下式算出:

$$B_m = \frac{RC}{NS} U_m \cdot 10^8, \quad (10)$$

式中 RC 为积分器的时间常数,单位为秒;其中 R 的单位为欧姆,电容 C 的单位取法拉。 U_m 为积分器输出电压的峰值,单位为伏; 10^8 为单位换算关系所引进的常量。其它各量的意义和单位同前。

三、仪器各部件简介

根据上面的道理,该仪器的每一通道应该

有这样几个部件:(1)将变化磁感应强度转化为电压讯号的测量线圈,或称探头。(2)将被测磁感应强度的微商讯号还原为被测磁感应强度的积分器。(3)“捕捉”脉冲磁场峰值的峰值存储器、或显示被测磁场讯号的示波器。(4)显示峰值讯号的直流电压表。(5)供电直流电源。其原理性方框图如图 1 所示。

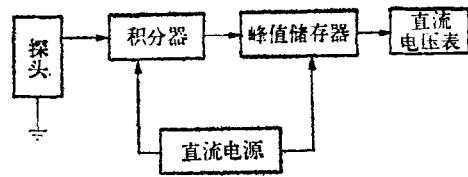


图 1 多道仪每一通道电原理方框图

现将主要部件简单介绍于下:

1. 测量线圈

由于所测磁感应强度是空间各点的点函数,被测磁场往往不可能是均匀分布的,因此测量线圈所交链的磁通被线圈有效截面积相除之后,得到的是这个面上法线方向上的平均磁感应强度。在许多情况下,为了准确测出空间某点的磁感应强度,就要求测量线圈的分辨力要好,即“点”性要好。如果线圈截面不能太小时,就采用了一种圆柱形结构的“点线圈”(图 2)作为取样元件。所谓“点”线圈就是指线圈截面的平均磁感应强度 B_{av} 等于线圈轴线中点处的磁感应强度 B_0 的这样一种线圈。事实上,磁感应强度的空间分布可以在线圈中心点展开成台劳级数,而一般测量线圈所测得的是该线圈内的平均磁感应强度 B_{av} :

$$B_{av} = \frac{\phi}{NS}, \quad (11)$$

即为台劳级数展开式的一次近似结果。式中 ϕ 是线圈所交链的全磁通。而圆柱形“点线圈”正是设计得使 B_{av} 为台劳级数展开的二级近似结果¹⁾。计算表明:圆柱形线圈的内径 D_1 、外径 D_2 、高度 h 、匝数 N 之间满足下述关系时:

1) 可参阅西安交通大学电物理装置教研组编:《电磁技术》,1965年2月。

$$\frac{D_2^3 - D_1^3}{9} h^2 - \frac{D_2^2 - D_1^2}{20} = 0.$$

即

$$\frac{h}{D_2} = \sqrt{\frac{9}{20} \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^3 \right] / \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]}, \quad (12)$$

及

$$NS = \frac{\pi}{12} N(D_1^2 + D_1 D_2 + D_2^2), \quad (13)$$

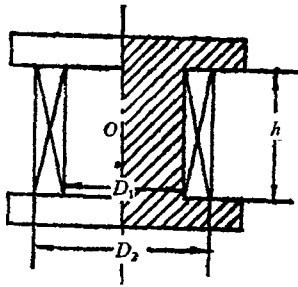


图2 圆柱形点线圈结构图

这种线圈即有较高的灵敏度,又有高的分辨力;能够准确地测出线圈中心点处的磁感应强度。

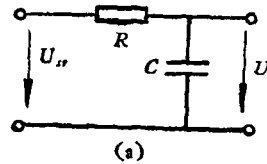
按照上述关系我们设计的一组圆柱形“点线圈”,其参数为: D_2 为 7 毫米, D_1 为 4 毫米, h 为 5 毫米,匝数 N 为 575 匝,则 NS 约为 140 匝·厘米²。测得电阻 r 约为 20 欧姆左右,自感系数 L 约为 1 毫亨。

2. 积分器

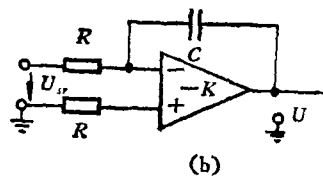
还原被测磁感应强度微商讯号的积分器,既可以采用简单的 RC 积分器(图 3(a)),也可以采用由运算放大器组成的积分器(图 3(b))。

为了满足还原性能好和测量误差小的要求,简单的 RC 积分器要求积分器的时间常数 $R \cdot C$ 要远大于要积分的时间 t , 否则测量误差很大¹⁾。从(7)式可看出,这时输入讯号经积分运算以后,其输出将大为衰减,成为一种所谓积分衰减器,给测量带来一些新的问题。而对由运算放大器组成的积分器(图 3(b))的要求是满足 $K_0 \cdot RC$ 要远大于被积分的时间 t 。其中 RC 意义与(9)式同,而 K_0 为运算放大器的开环电压放大倍数,通常它可达 $10^4 \sim 10^6$ 数量级。因此,对于图 3(b) 这种积分器而言, RC 可以选得比简单 RC 积分器的常数小得多。这样,输入讯号经积分运算之后可以不会衰减,甚至

还得放大,成为一种所谓积分放大器。在相同的 RC 值下,图 3(b) 积分器的积分运算误差



(a)
RC 积分器



由运算放大器组成的积分器

图3 积分器

只有图 3(a) 积分器的 $\frac{1}{K_0}$ 。多道测场仪采用了由

运算放大器组成的积分器。

3. 峰值储存器

为了方便测量和提高测量脉冲峰值的准确度,多道测场仪采用了峰值储存器以“捕捉”这个讯号峰值且加以较长时间的保持。为了能在被测讯号峰值出现时及时“捉”住这个峰值,就要求储存器的跟随性能要好;为了能在较长时间内保持住这个峰值,就要求储存器的储存性能要好;以及要求储存器在一定讯号幅值范围内的 1:1 电压传输,即线性要好。

最简单的峰值储存器为二极管-电容器检波电路(图 4(a)),利用二极管的单向导电性,当脉冲讯号从零上升时,电容器充电;充到峰值后,输入脉冲电压讯号下降,电容器开始放电,由于二极管反向电阻很大,放电进行得很慢,电容器基本上保持了这个峰值电压。再通过电压表测出这个峰值电压,就可以根据式(10)换算出被测的磁感应强度的峰值来。但由于充电时,二极管有个正向压降,使得电容器“捉”住的这个峰值电压的跟随性较差。加之二极管的反向电阻和测量仪表的内阻有限,这种电路的储存性能也是很理想的,为了提高峰值储存器的各项

1) 参阅清华大学编: 晶体管电路, 第一册 p. 497—499。

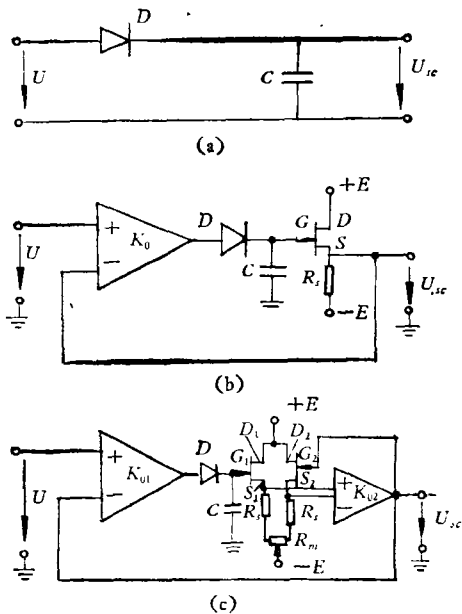


图4 峰值存储器电路图

性能，在检波电路前加一级由运算放大器组成的放大级以提高电路的跟随性能，后面加一级由输入电阻很高的场效应管组成的电压跟随器(图4(b))以提高储存性能，降低对显示仪表的内阻要求。但这种电路的1:1电压传输和线性较差，以及单管受温度的影响较大，为了提高这些性能，我们在检波电路后面引入一级由运算放大器和场效应差分对管为其输入的电压跟随器电路(图4(c))。这种电路无论从跟随性、储存性、线性以及对于温度的稳定性方面都比前两种电路要好。

多道测场仪每个通道的原理性电路如图5所示。

多道测场仪就是将这样的十六个通道通过一组继电器和开关进行组合、转换以实现多点测量的，外配一台直流数字电压表以显示读数。根据需要还可应用一台示波器以观察和拍摄波形。考虑到十六道读数、记录的时间要长一些，多道仪是采取讯号峰值储存以后立即断开储存电容器(即断开图5中的 KJ_3)来进一步保证储存性能的。根据分析和实验，该仪器当讯号电

压峰值(指积分器输出电压而言)为1伏时，积分器的总误差约为0.5—0.6%左右。对储存器而言，考虑线性度误差，以及从第一道到第十六道读数完毕按五分钟计算所造成的储存性误差，总误差约为0.8%。以及计及探头有效匝数面积的定标误差及仪表显示误差在内，整个多道仪的误差(不计及探头定位误差)约为±2%。若操作细心，配合得好，以及讯号电压取大一些，其误差还可以进一步减小。

该仪器可以测试上升时间大于或等于一毫秒的单脉冲磁场，在原理上也可用于测量交流稳态场和恒定磁场。如突然断开磁场的激磁电流或将取样线圈突然从磁场中抽出置于磁场为0的位置，即可实现对稳定场的测量。

根据已经选用的元件参数，本仪器测量范围为五千至十万高斯。适当改变元件的参数，量程可以有很大变化，原则上可测高达几十万乃至上百万高斯的磁场。另外，如果用罗可夫斯基线圈代替“点线圈”，本仪器还可用于测量脉冲放电时的电流值。

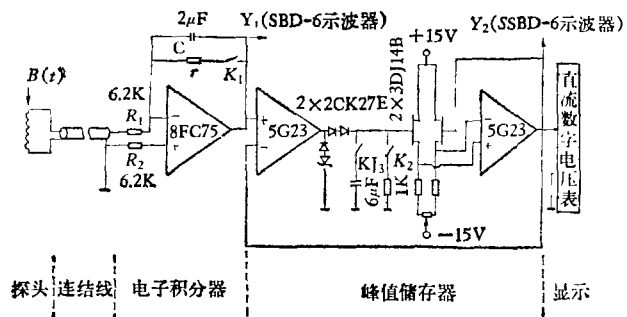


图5 脉冲强磁场测量仪器线路原理图

四、多道仪的现场测量实例

多道仪曾在脉冲环形磁体上进行过现场测量，分别测量了对应圆环中心场强为一万高斯左右和一万五千高斯左右两个等级的A-A、B'-B'、C-C三个面上、五个方位、十六个点处(图6)的脉冲磁场值及其磁场分布。脉冲磁场的上升时间约为30毫秒左右。正式测试中，三

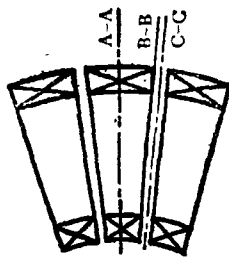


图6 测量三个平面位置示意图

个面上每个等级前后共测过廿七次。该脉冲环形磁体由十四饼线圈所组成。其中三个线饼及待测的三个平面位置如图6所示。

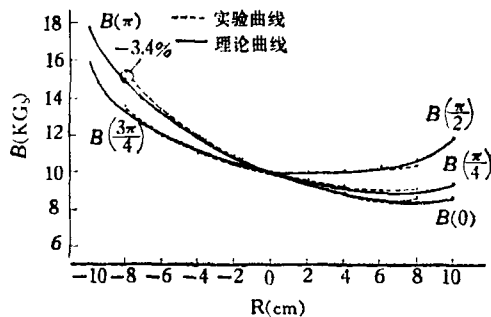


图7 A-A面一万高斯等级磁场分布的理论值与实验值的比较曲线

现场测量的结果表明：仪器的测量重复性比较好。对于被测平面中心场强值十分接近的不同测量次数，对应各通道的输出电压相当集中，其分散性误差 $\leq \pm 0.2\%$ 。此外，仪器有较好的鉴别力，能够较好的鉴别磁场分布的梯度值。

对比 A-A 面一万高斯等级的实验结果与

理论计算结果。对比是选用中心场强测量值极为接近中心场强理论计算值的前提下进行的。结果见表1。比较曲线见图7。对比结果表明：理论计算曲线与实验测量曲线的形态基本相符，且对应各点数值之间的最大相对误差约为 $\pm 4\%$ 。

表1 一万高斯等级实验中理论值与实验值的比较

A-A 面				
方位角 φ	距离 ρ (cm)	理论值 B_r (kGs)	实测值 B_c (kGs)	相对误差 (ϵ^*)
任意	0	10.066	10.038	修正后0%
0	4	8.920	9.056	-1.56%
	6	8.617	8.493	
	8	8.542	8.548	
$\frac{\pi}{4}$	4	9.241	9.371	
	6	9.042	9.017	
	8	9.070	9.142	
$\frac{\pi}{2}$	4	10.146	10.137	
	6	10.314	10.280	
	8	10.723	10.413	2.6%
$\frac{3\pi}{4}$	4	11.294	11.133	
	6	12.116	12.124	-2.3%
	8	13.283	13.579	
π	4	11.864	12.040	
	6	13.105	13.384	
	8	14.824	15.327	-3.4%

$$*\epsilon = \frac{B_r - B_c}{B_r} \times 100\%$$

(上接第144页)

在仪器研制，新方法的应用以及解决生产课题等方面都取得了显著的成果。已经有两种型号的激光全息光弹仪通过定型鉴定，并投入试产；法拉弟-铈玻璃旋光器已研制成功；三维全息光

弹的研究工作正在进行，并已取得了一些进展；动应力脉冲全息光弹性的研究也已着手进行。激光全息光弹性技术的发展和运用，必将对实现我国四个现代化作出它应有的贡献。