

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.12.010

脉冲强磁场测量技术研究

李振华^{1,2}, 李秋惠², 李春燕², 陶 渊², 李振兴², 李红斌³

(1. 湖北省微电网工程技术研究中心, 三峡大学, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;
3. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074)

摘要: 目前, 如何准确测量磁场是强磁场研究的难点。文中概述了目前脉冲强磁场测量的几种方法, 对各种方法的原理和特点进行了对比分析, 并对各种方法存在的问题进行了阐述。最后针对存在的问题, 展望了今后脉冲强磁场测量技术的发展方向。

关键词: 脉冲强磁场; 测量; 电磁感应法; 磁光效应; 霍尔效应

Measurement Techniques of Strong Pulsed Magnetic Field: A Review

LI Zhenhua^{1,2}, LI Qiuhui², LI Chunyan², TAO Yuan², LI Zhenxing², LI Hongbin³

(1. Hubei Provincial Research Center on Microgrid Engineering Technology, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. China Three Gorges University College of Electrical Engineering & New Energy, Hubei Yichang 443002, China; 3. SEEE of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Accurately measuring magnetic field is difficult in the study of strong magnetic field. This paper summarizes several measurement techniques for strong pulsed magnetic field, comparatively analyzes their working principles and characteristics, and discusses the problems existing in these techniques. In addition, according to the existing problems, this paper forecasts future development direction of the measurement techniques for strong pulsed magnetic field.

Key words: strong pulsed magnetic field; measurement; electromagnetic induction; magneto-optical effect; Hall effect

0 引言

作为科学研究的极端条件, 脉冲强磁场是现代物理学研究中最有效的工具之一。随着磁场应用范围的不断拓展, 一些科学研究对磁场的要求越来越高。随着恒稳磁场, 间隙磁场, 不均匀磁场以及脉冲强磁场的应用, 磁场测量技术受到越来越多的关注。随着科学研究的进一步发展, 恒稳磁场的磁场强度远不能满足科学研究的需要。同时相比恒稳磁场, 采用脉冲磁场技术产生相同强度的磁场更容易实现。因此, 脉冲强磁场技术得到了更广泛的应用。

迄今为止, 磁场测量的强度范围已经达到 $10^{-15} \sim 10^3$ T, 磁场的测量方法也日益多样化, 从恒稳磁场测量方法向交变磁场和脉冲磁场测量方法发展; 随

着测量精度要求越来越高, 磁场测量装置也向着高精度、高分辨率、小型化、数字化、电子设备智能化兼容的方向发展。

文中分析总结了脉冲强磁场与一般磁场相比具有的显著特点及测量方法, 其次就电磁感应法、磁光效应、霍尔效应等测量方法进行了分析和研究, 并对各种方法的优缺点进行了对比, 并展望了今后脉冲强磁场测量方法的研究方向^[1-4]。

1 脉冲强磁场产生来源及显著特点

1.1 脉冲强磁场显著特点

脉冲强磁场波形见图1, 由图1可见, 脉冲强磁场具有诸多优点: ①场强高。稳态情况下, 强磁场强度极限为45 T, 而脉冲强磁场强度通常能够达到80 ~ 100 T, 最高可达1 000 T, 脉冲强磁场磁场强度

收稿日期: 2019-06-06; 修回日期: 2019-08-21

基金项目: 国家自然科学基金自助项目(51507091)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51507091).

范围在 $10^{-3}\sim 10^3\text{T}$;②电压高。脉冲强磁场形成过程中,储能电容器电压能够升至上万伏特,放电时线路和磁体上的电流也可能升至数万安培;③脉冲窄。脉冲强磁场放电为一个瞬时过程,时间由数秒至几十毫秒不等;④探测空间小。由于磁体应力和温升的影响,使得脉冲磁体的中心内孔较小,为中心磁场的探测带来了限制。综合考虑这些影响,因此对于脉冲强磁场的测量系统需要高精度、宽量程指标,以及快速响应能力和高抗干扰性,并且要求磁场传感器体积小,易恢复。世界上主要脉冲强磁场实验室的磁场参数见表1。

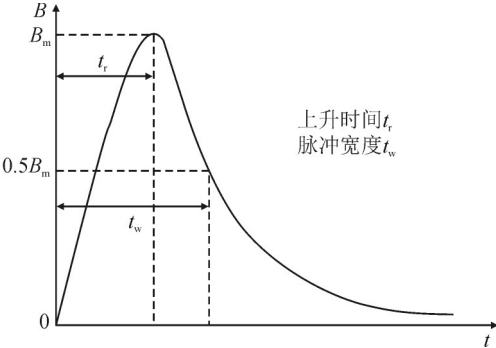


图1 脉冲强磁场波形图

Fig. 1 Waveform of strong pulsed magnetic field

表1 世界主要脉冲强磁场实验室的磁场参数

Table 1 Magnetic field parameters of the world's major pulsed high magnetic field laboratory							
参数	能量/MJ	电源		实验磁场		时间	
		电压/kV	电流/kA	磁场/T	孔径/mm	上升时间/ms	脉宽/ms
Cambridge	2.100	4	150	65	13	3.4	7.3
Dresden	1.250	10	50	50	24	9.5	13.0
Leuven	0.475	5	25	55	18	7.0	20.0
	1.200	10	50	70	10	2.3	8.0
Los-Alamos	1.600	10	50	60	15	6.0	35.0
Kurchatov	0.180	5	35	55	15	4.2	9.5
Osaka	1.500	20	1 000	60	18	3.0	7.0
Oxford	0.800	7	20	60	12	2.0	10.0
Parma	1.100	3	300	60	27	12.0	60.0
Sydney	0.800	7	60	60	22	10.0	25.0
Toulouse	14.000	24	30	61	11	27.0	150.0

1.2 脉冲强磁场测量方法

随着人们对磁场认识的加深,对磁场的分类更加细化。以时间或频率来分,磁场可分为恒定磁场、脉冲磁场、直流磁场、交流磁场,其中脉冲磁场是指由脉冲电流所激发的磁场;以磁场强度来分,有微弱磁场、弱磁场、中强磁场和超强磁场等^[5]。

脉冲强磁场产生来源示意图见图2。不同磁场的用处和测量方法都会有很大的差异,图2给出了脉冲强磁场几种常见的测量方法。

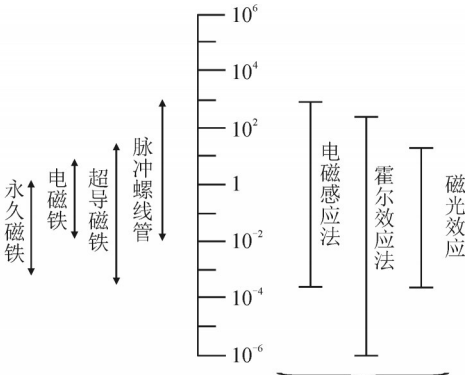


图2 脉冲强磁场产生及测量方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sources and measuring methods of strong pulsed magnetic field

2 基于电磁感应法的脉冲强磁场测量

基于法拉第电磁感应法的磁场测量方法,由于其测量范围广而被广泛应用。法拉第电磁感应原理是放入磁场中探测线圈的磁通量改变感应出电压,想要测量出不同类型的磁场强度,可以通过线圈的移动、转动以及振动等方式实现。最大的测量强度可到达 10^3T ,因此其可以用来测量脉冲强磁场^[6-9]。

2.1 测量原理

Faraday电磁感应定律见式(1)

$$\varepsilon = N \frac{d\phi}{dt} = N \frac{d(BS)}{dt} = NS \frac{dB}{dt} \tag{1}$$

将匝数为 N ,截面积为 S 的探测线圈放入脉冲强磁场中,当穿过线圈的磁通量发生改变时,线圈中会产生感应电压。式(1)中线圈匝数 N 与线圈截面积 S 乘积称为线圈常数,对于同一线圈而言,感应电压的大小只与被测磁场的磁感应强度变化率成

微分关系。因此,只需要对式(1)进行积分,就能得到被测磁场的磁感应强度

$$B = \frac{1}{NS} \int e dt \quad (2)$$

2.2 测量系统

探测线圈作为磁场传感器的一部份是影响测量系统准确度的重要因素之一。对于探测线圈的设计与改进,为了将磁场的内部值转化成点磁场值进行测量,文[10]提出了一种能够测量线圈中心强磁场的磁场传感器,圆柱形的结构保证了其内部平均场与几何中心场的磁场值相等,磁场传感器测量值与理论计算值进行比较,两者之间最大误差1.22%,能够实现对单点上磁场信号的准确测量。文[11]设计并制作了一种基于Faraday电磁感应法的磁探针,能够测量大部分的脉冲强磁场。该探头结构简单、制作简易、成本低廉、响应速度快。经过实验验证,得到的磁场值为19.28 T与理论计算得到的19.78 T基本相符。脉冲强磁场测量系统示意图见图3。

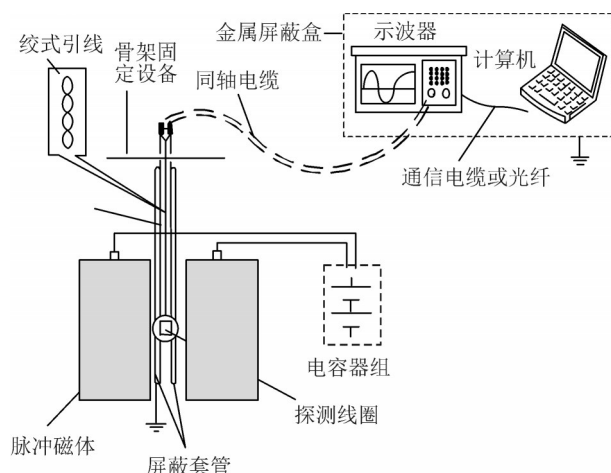


图3 脉冲强磁场测量系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sources and measuring methods of strong pulsed magnetic field

设计探测线圈的匝数,骨架形状、几何参数,骨架材料都能够影响测量精度。表1列举了不同材质的探测线圈特性比较。测量结果会受到线圈常数 NS 标定准确度的影响,因此在测量前需要对线圈进行校准。探测线圈见图4,探测线圈固定见图5。

图3中的脉冲磁场的测量系统采用电缆进行信号传输,然而置于强的脉冲电磁场环境会受到脉冲强磁场的干扰^[6]。为了解决抗电磁干扰,通常采用光纤传输,光纤与电缆不同,其对电磁场不敏感,非常适用于强脉冲电磁场的信号传输。文[12]中提到的脉冲强磁场测量系统包括小环天线、光发射机、光接收机、数字示波器、工控机等5部分构成。小环



图4 探测线圈

Fig. 4 Coil probe

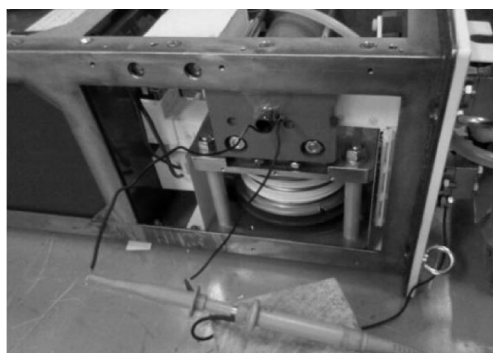


图5 探测线圈固定

Fig. 5 Fixing of detecting coil

天线测量到的电压信号经过光发射机转变成光信号,光信号经过多模光纤传输至光接收机,输出到示波器进行测量,最后在计算机中进行处理。为了防止电磁干扰,光发射机和光接收机都用金属屏蔽壳封装,其电磁屏蔽能力达到100 dB以上。但是光纤模拟量传输装置,对传输的信号会引入非线性失真,文[12]采用神经网络来校正光纤传输装置的非线性,校正后磁场的实际波形与理论波形吻合。探测线圈骨架材料特性对比见表2。

表2 探测线圈骨架材料特性对比

Table 2 Comparison of characteristics of framework

材质	化学 温度性	温度 系数	是否 耐低温	质地 坚硬度
有机玻璃	较好	小	是	偏软
聚四氟乙烯	好	小	是	偏硬
聚氯乙烯	好	小	是	适中

示波器中的采集信号波形为探测器中的感应电压的波形,因此,通过对感应电压 dB/dt 信号加权积分处理后获取磁场感应强度的波形。输入信号的积分方式同样能够影响测量系统测量精度,为对比不同的积分方式对输入信号还原能力的影响,文[13]分别在有源模拟积分、无源模拟积分及数字积分方式下模拟仿真,结果显示只有由数字积分器构

成的测试系统输入输出波形一致,另外两种方式的仿真结果有所缺陷。

当前,常用的数值积分算法包括高斯算法、牛顿科茨算法及龙贝格算法等,其中,高斯算法及牛顿科茨算法被国内外学者广泛研究,并成功在数字积分器中进行了应用,这其中包含的传递函数常涉及到梯形公式、矩形公式及 Simpson 公式等。文[5]利用推广的复合 Simpson 积分对测量 dB/dt 的信号进行积分、加权、还原处理,发现推广后的复合 Simpson 对区间的任意等分割有效,因而不受区间积分点数的限制,减小了算法上带来的截断误差。牛顿科茨算法、高斯算法的缺点主要是高频响应差,虽然科茨公式随着阶数的提高代数精度也有所提高,但是因此引入的传递函数也更加复杂,计算难度也大大增加。针对此,文[14]提出一种基于龙贝格公式的加权数字积分算法,并设计了一种结构简单、精度高的数字积分器,能够提高积分环节输出信号精度的同时降低传递函数的复杂程度。

2.3 存在的问题及研究方向

基于电磁感应法的脉冲强磁场测量优点在于灵敏度高、输出信号大、抗干扰性能好。缺点在于它的体积较大,不适合点磁场的测量^[15]。关于点磁场测量,学者们进行了如下研究。文[16]设计了一种基于 Faraday 电磁感应法的脉冲强磁场传感器,所设计的传感器可以测量点磁场。对中频率为 20~30 KHz,幅值约为 0.01~0.02 T 的磁场信号进行了测量,测量得到的结果基本与模拟一致。文[17]提出了一种基于三维磁场传感器的脉冲磁场测量方法,线圈分别在 x, y, z 方向上引起磁场变化,通过 3 维矢量合成的方法方便地测量空间任意极化方向的电磁脉,磁场测量系统的动态范围可达 $-10 \sim 10$ A/m。

为了提高电磁感应法的测量精度和抗干扰性能,今后的研究方向可以从两个方面去考虑,第一是测量精度问题,磁场传感技术可以采用空心线圈作为探测线圈;积分器的设计,旨在改进出高精度的数字积分算法^[14,18]。第二是提高测量系统的抗干扰性能。

3 磁光效应的脉冲强磁场测量方法

磁光效应大体上可以分为 3 种, Faraday 磁光效应,磁光 Kerr 效应与塞曼效应。Faraday 磁光效应是指产生磁光效应时光所通过的样品介质是透射的性质,而磁光 Kerr 效应(MOKE 效应)是指产生磁光效应时光所通过的样品是反射的性质。塞曼效应是指光在强磁场的作用下,谱线发生分裂的现象。Faraday 磁光效应法可测量磁场强度为 0.1~10 T,测

量偏差在 10^{-2} T 以内。MOKE 效应能够测量高达 100 T 的强磁场,测量的偏差为 3×10^{-2} T。塞曼效应可测量的磁场范围为 $10^{-3} \sim 20$ T,测量的偏差为 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ T。

限制塞曼效应测量范围的主要原因在于照明和光系统的焦距调整十分复杂,由于受分辨率的影响导致测量范围受到限制。

3.1 基于 Faraday 磁光效应的脉冲强磁场测量

英国物理学家 Michael Faraday 于 1845 年发现了 Faraday 磁光效应,正是由于这一现象的发现,光与磁的作用从此被揭示。Faraday 磁光效应指的是当偏振光通过各向异性介质,介质在磁场作用下电磁特性发生改变导致光的偏振面产生旋转的现象^[19~21]。法拉第磁光效应原理图见图 6。

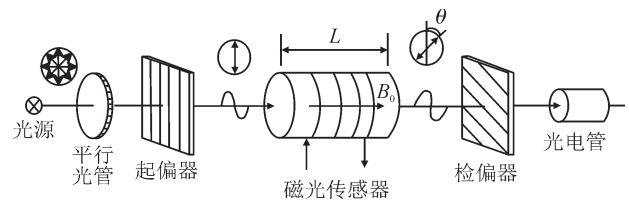


图6 法拉第磁光效应原理图

Fig. 6 Principle diagram of Faraday magneto-optical effect

在磁感应强度为 B_0 的磁场中放置有透射率良好的磁光材料,当一束光经过平行管变成平行光,再经过起偏器后变成偏振光。假设磁场方向与偏振光传播方向一致,那么在磁场作用下,光的偏振面将发生旋转。式(3)中表明了光的偏振面旋转角度 θ 与光穿过介质样品的光程 l 和磁感应强度 B_0 之间的关系。

$$\theta = \rho l B_0 \quad (3)$$

式(3)中, ρ 称为 Verdet 常数,当光源和温度确定不变, ρ 值不变。因此,如果能确定光程和旋转角度就能得到磁感应强度的值。

文[22]提出一种基于有机晶体(PMMA)的脉冲强磁场传感器,并用于测量螺旋磁通压缩发生器(HMGG)产生的脉冲强磁场。研究了用 PMMA 制成的传感元件的磁光学特性,固有线性双折射已经被退火处理抑制。退火处理后的 PMMA 制成的传感器测量高达 2.7 T 的脉冲强磁场,并将其与通过感应探头测量的传感器进行比较,在 $\pm 1.5\%$ 内是一致的。此装置可以测量的脉冲强磁场最高可达 4.5 T。脉冲强磁场测量的装置原理图见图 7,实验装置图见图 8。基于 Faraday 磁光效应的无源光纤磁场传感器以绝缘性能好,响应速度快得到了迅速发展,应用领域也越来越广泛。对于 Faraday 磁旋光效应而言,首先光学器件和器件之间的粘结工艺要求比较高,

其次对光源的稳定性要求较高,最关键的一点是磁光传感器的性能是直接影响整个测量系统准确度的最主要因素。影响磁光传感器的性能有:磁光材料的选取,对于脉冲强磁场的测量应该选取 Verder 常数较小的磁光材料;外界干扰如温度变化对传感头的影响,安装过程中受到外力振动及内部应力影响等等。要想将基于 Faraday 磁光效应的脉冲高磁场传感器推向实用化进程,这些是今后需要研究和解决的问题。

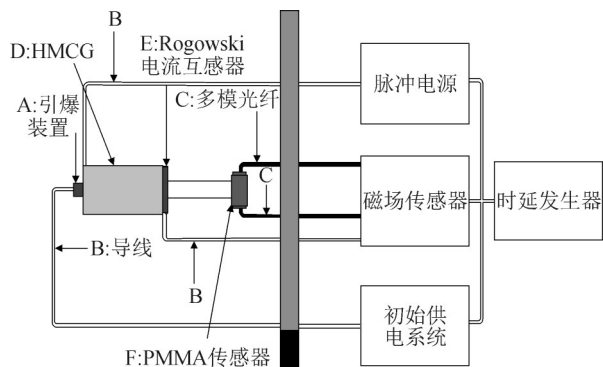


图7 HMCg 测试的装置原理图

Fig. 7 Schematic diagram of the device for HMCg testing

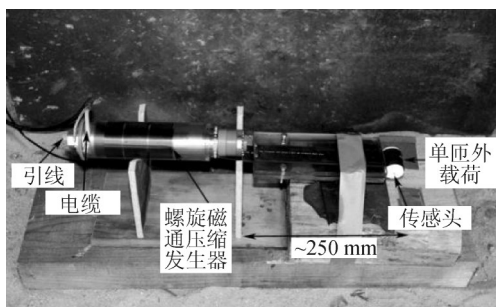


图8 HMCg 测试的实验装置

Fig. 8 The experimental setup for HMCg tests

3.2 基于 MOKE 效应的脉冲强磁场测量

在 Faraday 磁光效应的启发下, John Kerr 于 1877 年发现了磁光克尔效应 magneto-optical Kerr effect (MOKE)。随后的一个多世纪,越来越多的磁光效应被发现。MOKE 效应是指入射的线性偏振光在磁场作用下的介质表面反射,光的振动面发生旋转的现象。根据介质磁化方向垂直、平行于介质表面或者入射面的情况,MOKE 效应可以被分为以下 3 种:①极向 Kerr 效应;②纵向 Kerr 效应;③横向 Kerr 效应。以上 3 种效应具有不同的特点,其中极向 Kerr 效应的信号最大^[23-25]。

MOKE 效应的原理图见图 9,以极向 Kerr 效应为例。如图 9 所示,当光源发出的光经起偏器后变成线性偏振光,线性偏振光垂直入射到介质表面后被反射,发生极向 Kerr 效应。此时反射光将在平行与垂直于入射面的方向上产生电场分量,分别记为 E_p' 和 E_s' 。电场分量 E_s' 和 E_p' 的比值记为 Kerr 旋转

角,见式(4),式(4)用极坐标形式表示

$$\theta_k = \frac{E_p'}{E_s'} = \theta_k' + i\theta_k'' \quad (4)$$

式(4)中: θ_k' 为反射光在平行于入射面方向与垂直与入射面方向上的分量绝对值之比; θ_k'' 则表示相位变化之比。由于 θ_k 与磁化强度 M 成线性关系,在实际应用中,光的旋转角不好测量。因此可以转化为测量光强,进一步得到磁化强度 M 的相对值。

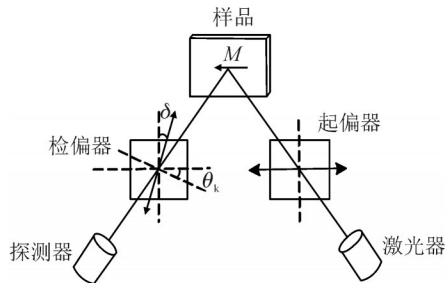


图9 MOKE 效应原理图

Fig. 9 Principle diagram of magneto-optical Kerr effect

相对于基于 Faraday 磁旋光效应而言,基于 MOKE 效应的磁场测量装置测量磁场强度更高,但是需要的光学器件以及加工工艺的要求与前者没什么区别,仍然对温度等环境因素较为敏感,很难保证长期稳定的运行。另外,在实际测量过程中,存在起偏棱镜和检偏棱镜的偏振方向并不完全垂直的问题,文[26]研制了一种基于纵向表面 MOKE 效应的测量系统,利用增大入射角,提高纵向 Kerr 信号强度的原理,采用增加聚焦透镜的方法,减小了测量的误差。

3.3 基于塞曼效应的脉冲强磁场测量

1896 年,荷兰物理学家塞曼发现了又一个磁光效应,被命名为塞曼效应。与前两个磁光效应不同的是,塞曼效应是光源在磁场作用下,一条谱线分裂成几条谱线的现象。

脉冲磁场中的塞曼分裂现象是瞬息即逝的,其时间之短为一般扫描光谱仪所不能响应。为此,学者研制出了一种快速扫描光谱仪,光学原理见图 10。

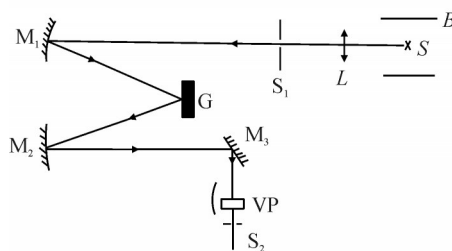


图10 光学原理图

Fig. 10 Optical principle diagram

工作原理简述如下:旋转光栅 G,将它置于需要观察的谱线位置上,当置于外磁场中的光源发出的光线进入狭缝 S_1 ,经 M_1 准直, G 分光, M_2 聚焦成

象, M_3 反射, 通过快速振动的石英平板时, 在 S_2 处即可以接收到分裂后的谱线。

$$\Delta\lambda_2 = 4.668 \times 10^{-9} \Delta(M_J g) \lambda^2 B \left(\text{\AA} \right) \quad (5)$$

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (6)$$

式(5)、(6)中: λ 为分裂前的谱线波长; B 为磁感应强度; g 为朗德 g 因子, M_J 为磁量子数, $M_J = J, J-1, \dots, -J$ 。共取 $(2J+1)$ 个值, 且必须满足选择定则 $\Delta M_J = 0, \pm 1$ 。

如果能观测到某一谱线在外磁场作用下的裂距 $\Delta\lambda_2$, 则从式(5)可得到磁感应强度 B 。

由于在强场和弱场的作用下, 谱线的分裂规律是不一样的。而对于不同元素, 其强场与弱场的区分是不同的。因此, 利用塞曼效应测量磁场, 正确区分强场和弱场, 同时还应避免使用强弱场交替的区域。为了避免强弱场问题通常选用单重线^[27]。

3.4 基于磁光效应测量脉冲强磁场原理存在的问题

磁光效应的优点在于, 磁光介质的固有响应时间小于 1 ns, 因此传感器的响应时间短。但是磁光效应的应用困难在于是测量系统复杂, 难实现。首先, 传感器需要一个大型辅助设备、高性能光源(如 He-Ne 激光器)、起偏器、检偏器等。第二, 测量仪器成本的增加给系统带来了很大的成本负担。再次, 脉冲磁场的实验, 测量仪器会有不同程度的损伤。

4 基于霍尔效应的脉冲强磁场测量

基于霍尔效应法测量磁场应用最广, 它可以测量 $10^{-7} \sim 60$ T 范围内的恒定磁场, 测量的误差为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ T, 对小间隙空间内的磁场测量有显著的优越性。

1879 年, E.H.Hall 研究磁场中的载流导体受力性质发现了霍尔效应。霍尔效应作为一种电磁现象, 揭示了磁场与感应电压之间的关系。霍尔效应测量磁场的范围在 $10^{-7} \sim 60$ T, 测量偏差为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ T, 虽然霍尔效应可以用于测量脉冲强磁场, 但是对于小间隙磁场的测量有更大的优势。

霍尔传感器的原理图见图 11, 将一块宽度为 b , 厚度为 d 的导体放在磁感应强度为 B 的磁场中。假定在导体中通纵向电流, 导体中的带电粒子 q 在磁场中受到洛伦兹力 F_m , 会在导体中以 v_d 的速度运动。随着时间积累, 导体两端 A 、 A' 会分布有正负电荷, 此时新增的电场力 F_e 同时对带电粒子作用, 电场力 F_e 方向与洛伦兹力 F_m 相反。当 F_e 增大与 F_m 大小相等, 方向相反, 此时带电粒子受力平衡, 开始匀速运动, 这一现象就称为霍尔效应。

导体板两侧 A 、 A' 建立起来的霍尔电场 E_H , 与霍尔电压 U_H 之间的关系表示为

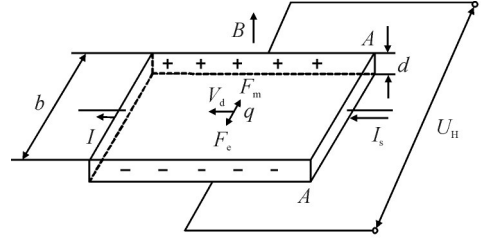


图 11 Hall 传感器的原理图

Fig. 11 Schematic diagram of Hall sensor

$$E_H = \frac{U_H}{b} \quad (7)$$

$$qE_H = qv_d B \quad (8)$$

$$\frac{U_H}{b} = v_d B \quad (9)$$

式(9)表明, 通过测量 v_d 及 b , 就能计算出被测磁场的磁感应强度 B 。在实际应用过程中, 带电粒子的运动速度 v_d 为变量, 难以测量出来。由于 v_d 与 I_s 之间存在一定的关系, 因此可以转化为测量电流 I_s 。 v_d 与 I_s 的关系为:

$$v_d = \frac{I_s}{qnbd} \quad (10)$$

$$U_H = \frac{I_s B}{nqd} = K_H I_s B \quad (11)$$

式(10)、(11)中: n 为载流子密度; K_H 为霍尔元件灵敏度, $K_H = R_H/d$, R_H 为霍尔系数, $R_H = 1/nq$ 。文[28]中指出只有, 磁场方向和霍尔元件法线相同时, 霍尔电压才能用式(11)所示。假如两者之间存在一定的角度时, 霍尔电压的表达式为

$$U_H = K_H I_s B \cos \theta \quad (12)$$

文[29]研制了一种精密霍尔特斯拉计, 可以测量 0.5~15 T 脉冲强磁场。特斯拉计的误差在 0.1~0.3% 范围内。精密特斯拉计的原理示意图见图 12, 该装置测量误差包括由于霍尔变换器供电电流精度的限制引起的误差、霍尔变换器供电电源引起的误差、霍尔变换器连接导线引起的误差, 以及当脉冲磁场作用于霍尔变换器时其灵敏度随供电电流大小、最大磁感应值和方向而变化引起的误差等。

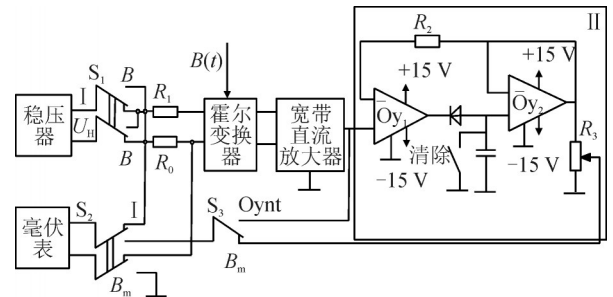


图 12 精密特斯拉计的原理示意图

Fig. 12 A schematic diagram of the principle of the precision Tesla meter

文[30]提出了一种基于InAs膜的霍尔效应器件用来测量脉冲强磁场。文献指出由于高 dB/dt 值,导致利用霍尔效应器件测量脉冲强磁场(SPMFs)的主要困难在于电流和信号线的电磁干扰,所进行的研究结果对霍尔效应器件测量SPMF的应用情况做出以下结论:①基于InAs膜的低灵敏度的霍尔效应器件确保信噪比情况下,足以测量高达 10^5 T/S的磁场变化率的SPMF,并且感应幅度高达60 T;②如果使用高灵敏度的基于InAs薄膜的霍尔效应器件的,测量更快速交替SPMFs显然是可能的。

5 脉冲强磁场测量技术的研究现状分析及未来发展趋势

随着科学研究的需要,脉冲强磁场技术的深入应用与发展成为必然趋势。因此,脉冲强磁场测量技术也应进一步完善。目前,测量技术面临的最大的挑战在于难以克服脉冲强磁场具有的4个显著的特点,今后的研究需要从这个方面入手考虑。学者普遍认为,未来脉冲强磁场检测中,高精度、宽量程、高抗干扰性和快速响应能力是检测技术创新的目标。

国外的测量技术研究相对较早,世界各地的脉冲强磁场研究中心使用基于电磁感应法的强磁场传感器用来测量破坏性极大的兆高斯脉冲强。比利时Leuven、法国Toulouse、澳大利亚Sydney等地的HPMF实验室,使用塞曼效应测量脉冲强磁场。国内的测量技术研究相对较晚,西北研究所的学者对在同一脉冲强磁场条件下,使用电磁感应法和Faraday磁光效应法两种方法进行对比。关于磁光效应测量系统的研究,学者研究出了一种脉冲强磁场光纤传感器,动态范围广,噪声等效磁通密度小,探测器灵敏度高。

经过多年的研究和探索,国内在脉冲强磁场测量技术的理论研究上取得了较大的进步,但在很多方面存在大量的问题函待解决。从国内外研究现状来看,脉冲强磁场测量技术仍然存在以下问题亟待解决:

1)电磁感应法要解决探测空间问题以及点磁场强测量问题。今后可以考虑选取Rogowski线圈作为探测线圈的磁场传感器来测量点磁场值,从而提高测量精度。

2)基于磁光效应法测量系统,温度和振动对磁场传感头影响较大,目前并没有对光学传感头在极端条件下进行长期稳定性和可靠性的试验手段,因此函需提出针对产品的长期稳定性和可靠性的有

效试验方法。

3)磁光玻璃在外力或者内部应力作用下,可使由各向同性介质变成各向异性介质,产生双折射现象。这将会影响传感器的测量精度及测量稳定性,通常需要从减小应力及温度变化引起的应力方面考虑,采取一定的温度或压力补偿,对测量进行校正。

6 结语

文中对各种脉冲强磁场测量的原理和方法进行了阐述,并对各种测量方法的优点和存在的问题进行了分析。基于霍尔效应法可以用来测量脉冲强磁场,但是更多用于恒定磁场测量与间隙磁场测量。基于电磁感应法灵敏度高、输出信号大、抗干扰性能好,基于Faraday磁光效应法制成的传感器体积小、暂态性能好成为目前脉冲强磁场测量的主要方法。基于MOKE效应由于其测量磁场强度高的优点,具有较好的发展前景,磁场传感器的性能研究与长期运行的稳定性,是今后要解决的问题。

参考文献:

- [1] SHI Jiangtao, HAN Xiaotao, XIE Jianfeng, et al. Analysis and design of a control system for the 100 T pulsed high magnetic field facility at WHMFC[J]. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2016, 26(4):4300604.
- [2] HAMASAKI A, TAKEUCHI Y, OZE S. Obtaining microscopic images under a high 20 T pulse magnetic field using an optimized coil[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017 (53):6500504.
- [3] PENG T. Design and test of a 90 T nondestructive magnet at the Wuhan national high magnetic field center[J]. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2014, 24(3):4300604.
- [4] 彭涛,李亮.脉冲强磁场技术发展现状与趋势[J]. 物理, 2016(1):11-18.
PENG Tao, LI Liang. The status and future development of pulsed high magnetic fields[J]. Physics, 2016(1):11-18.
- [5] 丁炜.脉冲强磁场测量系统的研究与实现[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.
DING Wei. Research and implementation on measurement system of high pulsed magnetic field[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [6] 韩小涛,宋志伟,谢剑锋,等.集成式脉冲强磁场装置控制系统的研制[J]. 高压电学, 2010, 36(3):716-721.
HAN Xiaotao, SONG Zhiwei, XIE Jianfeng, et al. Development of control system applied to compact pulsed high magnetic field facility[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3):716-721.

- [7] 韩小涛, 黄澜涛, 孙文文, 等. 基于PCB空心线圈和数字积分器的脉冲强磁场装置放电电流测量[J]. 电工技术学报, 2012(12):13-19.
HAN Xiaotao, HUANG Lantao, SUN Wenwen, et al. Discharge current measurement of pulsed high magnetic field facility based on PCB air-core coil and digital integrator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012(12): 13-19.
- [8] 徐嘉龙, 祝邴伟, 王晓宇, 等. 基于多层可级联PCB空心线圈的磁场测量单元设计[J]. 高压电器, 2016, 52(11):81-87.
XU Jialong, ZHU Liwei, WANG Xiaoyu, et al. Design of magnetic field measurement unit based on the multi-layer and cascade PCB air-core[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11):81-87.
- [9] 李 璿, 张传计, 吴士普, 等. 雷电流测量用PCB型 Rogowski线圈研究[J]. 高压电器, 2015, 51(10):158-162.
LI Xuan, ZHANG Chuanji, WU Shipu, et al. Research on PCB Rogowski coil for lightning current measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10):158-162.
- [10] 胡祥超, 罗飞路, 何赞泽, 等. 脉冲交变磁场测量技术缺陷识别与定量评估[J]. 机械工程学报, 2011, 47(4): 17-22.
HU Xiangchao, LUO Feilu, HE Yunze, et al. Pulsed alternating current field measurement technique for defect identification and quantification[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(4):17-22.
- [11] 王 锋, 米 东, 徐章遂, 等. 基于法拉第电磁感应法的脉冲强磁场测量方法[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 674-677.
WANG Feng, MI Dong, XU Zhangsui, et al. Measurement of high pulse magnetic field based on faraday electromagnetic induction[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 674-677.
- [12] 高 成, 陈 彬, 万海军, 等. 小型脉冲磁场屏蔽效能测试设备[J]. 高电压技术, 2002, 28(6):27-29.
GAO Cheng, CHEN Bin, WAN Haijun, et al. Portable magnetic shielding effectiveness measurement device[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6):27-29.
- [13] 刘 俊, 徐 雁. 脉冲强磁场测量系统的设计与仿真分析[J]. 电测与仪表, 2006(9):11-14.
LIU Jun, XU Yan. Design and simulation of high pulse magnetic field measurement system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006(9):11-14.
- [14] 李振华, 胡蔚中, 闫苏红, 等. 基于龙贝格算法的高精度数字积分算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 138-142.
LI Zhenhua, HU Weizhong, YAN Suhong, et al. High precision digital integral algorithm based on Romberg algorithm [J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(16): 138-142.
- [15] GIACCONE L, GIORDANO D, CROTTI G. Identification and correction of artifact in the measurement of pulsed magnetic fields[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(6):1260.
- [16] 杨 霄, 杨建华, 张慧博, 等. 一种高频脉冲磁场测量装置的制作与应用[J]. 微波学报, 2014(s1):433-436.
YANG Xiao, YANG Jianhua, ZHANG Huibo, et al. Development and application of a high frequency pulsed magnetic field measurement apparatus[J]. Journal of Microwaves, 2014(s1): 433-436.
- [17] 孔 旭, 谢彦召. 基于光纤技术的电磁脉冲3维电、磁场测量系统[J]. 高电压技术, 2015, 41(1):339-345.
KONG Xu, XIE Yanzhao. Electric field and magnetic field measuring system for EMP measurement based on fiber technology[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 339-345.
- [18] 李振华, 胡蔚中, 闫苏红, 等. 电子式电流互感器中的高精度数字积分器技术[J]. 高压电器, 2016, 52(2):42-49.
LI Zhenhua, HU Weizhong, YAN Suhong, et al. High accuracy digital integrator technology for electronic transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2):42-49.
- [19] 石 磊, 邱爱慈, 王永昌, 等. 法拉第磁光效应法测量强脉冲磁场[J]. 应用激光, 2000(1):7-9.
SHI Lei, QIU Aici, WANG Yongchang, et al. Pulsed-high magnetic field measurement with magneto-optical faraday effect method[J]. Applied Laser, 2000(1):7-9.
- [20] 王 玮, 徐丙垠, 王华广, 等. 基于光强调制原理的电流互感器设计方法[J]. 高压电器, 2016, 52(7):61-67.
WANG Wei, XU Bingyin, WANG Huaguang, et al. Design method of current transformer based on modulation of light intensity principle[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7):61-67.
- [21] 李振华, 闫苏红, 胡蔚中, 等. 光学电压互感器的研究及应用现状分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(10):3230-3236.
LI Zhenhua, YAN Suhong, HU Weizhong, et al. Research and application situation analysis of optical voltage transformers[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10):3230-3236.
- [22] HWANG E H, KIM B Y. Pulsed high magnetic field sensor using polymethyl methacrylate[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(7):2015-2021.
- [23] 金志强. 磁光克尔效应及其探测[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
JIN Zhiqiang. Magneto-optical Kerr effect and its detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [24] 王莉苓, 邱晓东, 张志友, 等. 磁光克尔效应中的光子自旋分裂[J]. 物理学报, 2015(17):125-130.
WANG Licen, QIU Xiaodong, ZHANG Zhiyou, et al. Photon spin splitting in magneto-optic Kerr effect[J]. Acta

- Physica Sinica, 2015(17):125-130.
- [25] FOWLEY C, OUARDI S, KUBOTA T, et al. Direct measurement of the magnetic anisotropy field in Mn-Ga and Mn-Co-Ga Heusler films[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 2015, 48(16):2-10.
- [26] 顾培培, 马 斌, 张宗芝, 等. 一种新型大场纵向表面磁光克尔效应测量系统[J]. 复旦学报(自然科学版), 2009(4):485-492.
- GU Peipei, MA Bin, ZHANG Zongzhi, et al. A new measurement system of longitudinal surface magneto-optic Kerr effect in large magnetic field[J]. Journal of Fudan University(Natural Science), 2009(4):485-492.
- [27] 邵重明, 是度芳. 应用塞曼效应测量脉冲磁场[J]. 华中工学院学报, 1985(6):81-84.
- SHAO Chongming, SHI Dufang. Measurement of pulsed magnetic field by Zeeman effect[J]. Journal of Central China Institute of Technology, 1985(6):81-84.
- [28] 邢红宏, 张 勇. 霍尔效应磁场测量仪器的改进[J]. 实验技术与管理, 2016(5):78-81.
- XING Honghong, ZHANG Yong. Improvement of magnetic field measurement instruments based on Hall effect[J]. Experimental Technology and Management, 2016(5):78-81.
- [29] ЧЕБУРКОВ Д И. 测量 0.5 ~ 15 T 脉冲磁场的精密霍尔特斯拉计[J]. 国外计量, 1988(1):43-45.
- ЧЕБУРКОВ Д И. A precise Hall Tesla meter for measuring 0.5 ~ 15 T pulsed magnetic fields[J]. Foreign Measurement, 1988(1):43-45.
- [30] SOIKA A K, SOLOGUB I O. Measurements of strong pulsed magnetic fields by Hall effect devices[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2010, 53(1):122-123.
- 李振华(1986—), 男, 博士, 从事电子式互感器及其状态监测、电磁兼容方面的研究。
- 李秋惠(1994—), 女, 硕士研究生, 从事电气测量的研究。

《高压电器》2019年12期广告单位

彩色广告

封一: 西安高压电器研究院有限责任公司

封二: 莱茵技术(上海)有限公司

封三: 西安高压电器研究院有限责任公司(认证中心)

封四: 上海乐研电气有限公司

前插1: 北京京东方真空电器有限责任公司

前插2: 珠海思创电气有限公司

前插3: 浙江雅博自动化设备有限公司

前插4: 上海睿深科技有限公司

前插5: 陕西龙翔电器有限公司

前插6: 陕西斯瑞新材料股份有限公司

前插7: 攀时(上海)高性能材料有限公司

前插8: 西安高压电器研究院有限责任公司(业务)