

文章编号:1005-4642(2023)06-0015-07

专
题



相移型磁通门实验仪

何 森

(中北大学 半导体与物理学院 物理系,山西 太原 030051)

摘 要:为测量弱磁场,设计制造了相型磁通门实验仪,实验仪选用频率为 32.768 kHz 的晶振、计数器 CD4060、运算放大器 AD708 和 OPA551、高速精密比较器 LM319、精密基准电源、高速 D 触发器 74HC74 等通用元件,安装了内、外 2 部分励磁线圈和均匀密绕长直螺线管. 仪器电路简单,测值对探头磁芯参数的变化不敏感,稳定性好,准确度高. 电路不需任何调节,仪器的测量精度优于 0.5%. 本仪器适宜在普通物理实验课程中开设磁通门实验,便于推广应用.

关键词:磁通门;相移;三角波;交流恒流励磁

中图分类号:O441.5

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.06.002

磁通门技术被广泛应用于武器侦察、材料无损探伤、地质勘探、地震预报研究、生物医学研究、人造卫星和导弹的姿态控制、星际空间磁场测量等领域. 几十年来,尽管测量磁场的新方法不断涌现,磁通门技术仍以其测量灵敏度高、稳定性好、方向性强、功耗低、使用灵活方便等显著优点,在弱磁场测量领域占据重要地位. 理工科院校有必要研制合适的磁通门实验仪,并在普通物理实验课程中开设磁通门实验,使学生了解磁通门工作的基本原理.

沿磁通门探头轴向有外磁场作用时,探头输出的脉冲会发生相移,输出信号的频谱中会出现偶次谐波,在多种情况下脉冲的幅值也会发生非对称的变化. 通过检测上述任何一种变化都可测量外磁场. 检测探头输出信号频谱中的二次谐波测量外磁场的方法,因为输出信号频谱中的基波远大于二次谐波,信号检测十分困难,使得电路以及检测和处理的方法都很复杂,不适宜用来开设普通物理实验. 用正弦电流给磁通门探头励磁,外磁场使探头输出脉冲的峰值发生非对称变化. 检测信号正、负脉冲峰值的差值也可以测量外磁场. 该方法灵敏度高,探头结构简单,制作容易,但其峰差与外磁场强度之间的关系复杂,很难用于定量测量,也不适宜开设普通物理实验.

1 相移型磁通门的工作原理

沿探头轴向作用的外磁场使探头输出的脉冲发生相移,检测这种相移也可以测量外磁场,这种磁通门也被称为相移型磁通门. 用波形稳定对称的交流三角波恒流电流给探头励磁,使探头磁芯周期性地双向交替过饱和磁化. 无外磁场作用时,探头磁芯内的磁场强度 $H(t)$ 的波形为稳定对称的三角波形,而磁芯内磁感应强度 $B_1(t)$ 的波形则近似为削顶的三角波,如图 1 所示^[1]. 此时 $B_1(t)$ 的波形正负对称,探头输出脉冲间的相位差为 π . 沿探头正轴向有外磁场 H_x 作用时,探头磁芯内的总磁场强度 $H(t)$ 的波形向上平移 H_x ,探头磁芯内的合磁感应强度 $B(t) = \mu_d H_x + B_1(t) = B_0 + B_1(t)$ 的图形向上平移 B_0 , $B_0 = \mu_d H_x$ 为外磁场 H_x 在探头磁芯内激发的磁感应强度. 从图 1 可以看出: $B(t)$ 从负值上升通过零值的时刻 t_1 与 $B_1(t)$ 比较超前 Δt , 正脉冲相位将相对超前 $\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi}{T}\Delta t$; $B(t)$ 从正值下降通过零值的时刻 t_2 相对滞后 Δt , 负脉冲的相位相对滞后 $\Delta\varphi_2 = \frac{2\pi}{T}\Delta t$. 于是,探头输出的正脉冲相对于其后的负脉冲产生的总相移 $\Delta\varphi = 2 \frac{2\pi}{T}\Delta t = \frac{2\pi}{T}\Delta\tau$, 其中 $\Delta\tau = 2\Delta t$.

收稿日期:2022-09-23;修改日期:2022-11-11

作者简介:何 森(1976—),女,湖南醴陵人,中北大学半导体与物理学院物理系高级实验师,硕士,研究方向为大学物理实验仪研制. E-mail:ph_youxiang@126.com

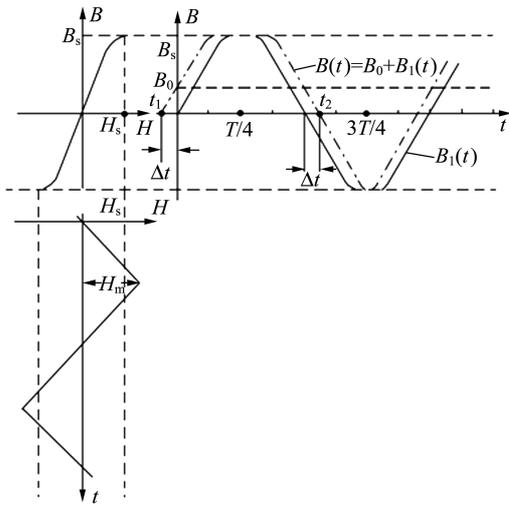


图 1 相移型磁通门调相原理示意图

从图 1 可知:

$$\frac{B_0}{\Delta t} = \left. \frac{dB}{dt} \right|_{t=0} = \left(\frac{dB}{dH} \times \frac{dH}{dt} \right) \Big|_{t=0} = \mu_d \left. \frac{dH}{dt} \right|_{t=0} = \frac{4\mu_d H_m}{T}, \quad (1)$$

其中, $\left. \frac{dB}{dt} \right|_{t=0}$ 为 $B(t)$ 曲线在零值附近的斜率; μ_d 是探头磁芯的动态磁导率, 在式(1)中特指探头磁芯的饱和磁化曲线上非饱和直线段的斜率; H_m 为励磁磁场强度的幅值. 于是,

$$B_0 = \mu_d H_x = \frac{4\mu_d H_m}{T} \Delta t = \frac{2\mu_d H_m}{T} \Delta \tau = \frac{\mu_d H_m}{\pi} \Delta \varphi, \quad (2)$$

所以

$$H_x = \frac{2H_m}{T} \Delta \tau = \frac{H_m}{\pi} \Delta \varphi, \quad (3)$$

$$B_x = \mu_0 H_x = \mu_0 \frac{2H_m}{T} \Delta \tau = \frac{\mu_0 H_m}{\pi} \Delta \varphi, \quad (4)$$

可知沿探头轴向作用的外磁场强度与探头输出脉冲间的总相移 $\Delta \varphi$ 成比例.

探头输出信号放大后, 经相位差检测电路输出的相位差脉冲的宽度 τ 与探头输出脉冲间的相位差成比例. 有外磁场作用时, 测出脉冲宽度为 τ , 无外磁场作用时, 脉冲宽度为 $\frac{T}{2}$, 则 $\Delta \tau = \tau - \frac{T}{2}$, $H_x = \frac{2H_m}{T} \Delta \tau$, 于是

$$B_x = \mu_0 H_x = \mu_0 \frac{2H_m}{T} \Delta \tau = k \Delta \tau. \quad (5)$$

式中 $k = 2\mu_0 H_m / T$ 为磁通门常量. 若 H_m 和 T 已

知, 可根据式(5)标定磁通门求出 k , 再测出 $\Delta \tau$ 即可求出 B_x . 测量结果对探头磁芯参数的变化不敏感, 稳定性好, 探头的互换性也较好.

该磁通门测量结果的准确度, 主要取决于探头磁芯内 $H(t)$ 的频率和幅值的稳定性和准确度, 以及 $H(t)$ 波形的对称性及其斜边的线性度. 励磁线圈内有磁芯, 励磁线圈的阻抗不仅随励磁电压的频率而变, 同时还随励磁电压的大小而变. 文献[2-4]报道的方案用对称的交流电压励磁, 其励磁电流 $i(t)$ 和磁芯内 $H(t)$ 的波形会发生难以控制的变化, 会给测量结果带来显著的误差. 为使 $H(t)$ 的波形能为稳定对称的三角波, 需要用波形稳定对称的三角波恒流电流励磁.

2 设计方案

获得波形稳定对称的交流三角波恒流励磁电流是设计方案的关键. 可先获得波形稳定对称的交流三角波电压信号, 再经压控恒流源电路获得波形稳定对称的交流三角波恒流电流. 产生三角波电压信号的方法很多^[5-8], 但难以达到波形稳定对称的要求. 少数能基本达到要求的方法^[9-10], 其核心元件较贵, 电路较复杂, 主要参量还需要通过外部电路进行精细调节, 且容易受温度变化的影响.

中北大学实验室的教师在研制“钢丝绳断丝无损检测仪”时研制的磁通门, 可用于检测钢丝绳的漏磁来检测断丝, 效果良好. 之后研制了相移型磁通门实验仪, 在大学物理实验课程中开设了磁通门实验. 文献[1]比较全面地介绍了这批实验仪的工作原理和具体实施的技术路线. 在实验仪更新时, 新一批实验仪采用单片机、DAC0800 数模转换加滤波产生交流三角波电压信号, 再经过压控恒流源电路获得波形相似的交流三角波恒流电流给磁通门探头励磁, 使探头磁芯内 $H(t)$ 的波形与励磁电流的波形相似. 因为 8 位 D/A 的分辨率较低, 产生的阶梯形三角波粗糙, 采用滤波很难既使三角波的斜边变得光滑而又保证线性度不过度降低, 因此斜边上总会残留一系列的曲折. 探头输出信号与 $dH(t)/dt$ 密切相关, 磁芯内 $H(t)$ 的波形与上述三角波的波形相似, $H(t)$ 曲线上的一系列微小的曲折经过微分就会变成一串串的毛刺, 给相位差检测造成干扰, 使得实验仪的测值不稳定. 因而研制简单又实用的三角波信号发生

器电路至关重要。

2.1 研制波形稳定对称的交流矩形波发生器

如图 2 所示,用频率为 32.768 kHz 的晶振和 CD4060 组成矩形波发生器,其输出频率的基本偏差率 $<2 \times 10^{-5}$,其温漂率 $<4 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,频率准确而且稳定。CD4060 的功耗低,用 2 个精密基准电源 LM4040A25I 为 CD4060 提供稳定的 $\pm 2.5 \text{ V}$ 的双电源供电,其输出电压的基本偏差率 $<0.1\%$,温漂率 $\leq 2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,输出电压稳定、准确。利用 CD4060 本身具有的输出特性,在输出电流不超过额定值的情况下,输出电压信号

的高电平为 2.45 V(低于 VDD 电压 0.05 V),低电平为 -2.45 V (高于 VSS 电压 0.05 V),使输出的交流矩形波的正、负幅值相等而且稳定。再经过 CD4060 内部多级数字二分频电路分频,使得输出交流矩形波的正负矩形脉冲宽度相等。因此从 CD4060 可输出多种频率的交流矩形波电压信号,频率稳定准确,且正负矩形脉冲的幅值相等、宽度相等而且稳定,波形稳定对称。分别选用 128 Hz 和 256 Hz 的交流矩形波信号制作了 2 台样机。图 3 为其中 1 台样机的照片(磁通门探头已插入载流直螺线管中)。

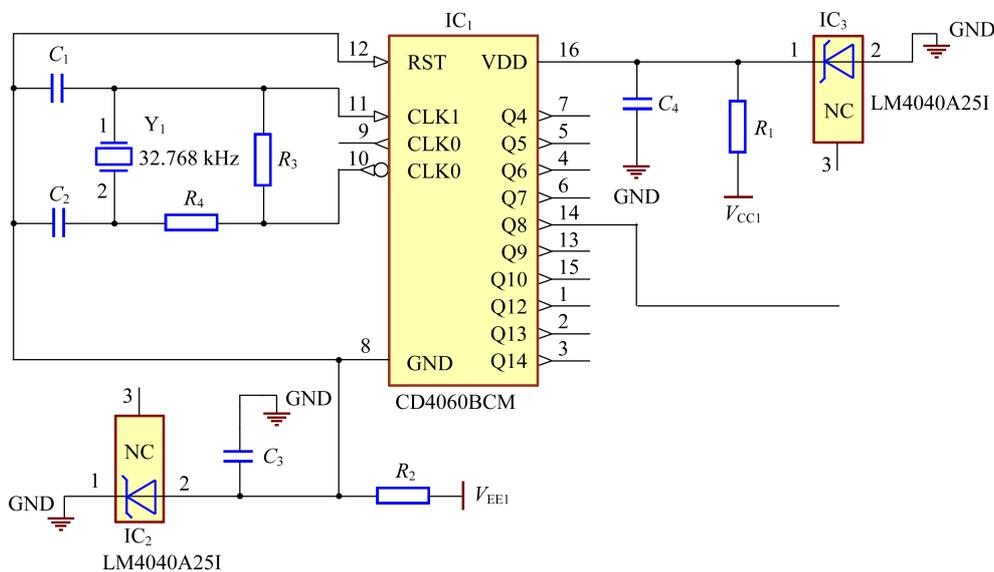


图 2 交流矩形波发生器的原理电路图



图 3 相移型磁通门实验仪样机照片

2.2 设计制作线性度更高的积分器

如图 4 所示,用开环增益 $A \geq 5 \times 10^6$ 、失调很小(失调电压典型值 $15 \mu\text{V}$,最大 $50 \mu\text{V}$)的运算

放大器 AD708 组成反相积分器。

当输入为一阶跃电压 U 时,其输出电压 $u_0 = Ut$,实际输出电压的线性度偏差率 $\eta < \frac{t}{2ARC}$,其中 t 为积分的时间长度,此处为 128 Hz 矩形脉冲的宽度,即 $t \approx 3.906 \times 10^{-3} \text{ s}$;积分器的积分时间常量 $RC = 2.2 \times 10^{-3} \text{ s}$,可得 $\eta < 1.776 \times 10^{-7}$,输出电压信号的线性度极好。对上述交流矩形波电压信号积分,能得到高品质的交流三角波电压信号,频率稳定、准确,幅值稳定,波形稳定对称,斜边线性度好。电路结构简单,工作稳定,元件价格便宜,电路无需进行任何调整,安装和使用方便。其各项性能都优于实验室以往的 2 批产品,更优于采用 MAX038 精密函数发生器的方案。

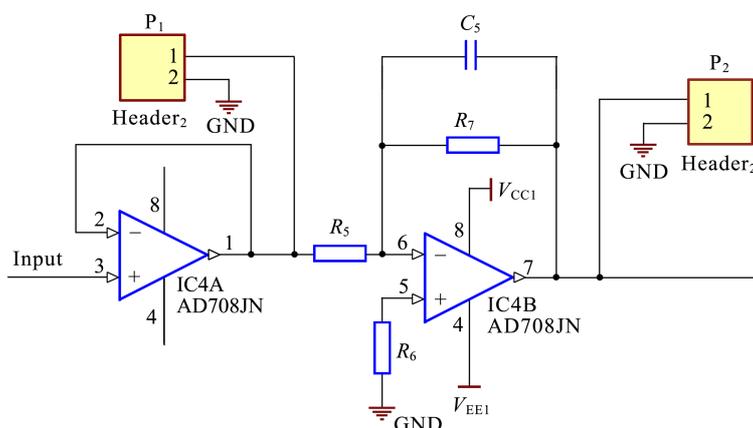


图 4 电压跟随器和积分器的原理电路图

2.3 设计交流恒流励磁电路

如图 5 所示,用输出电流较大、失调较小的运算放大器 OPA551 组成压控恒流源电路,将上述波形稳定对称、斜边线性度较好的交流三角波电压信号转换成波形稳定对称、斜边线性度较好的交流三角波恒流电流给磁通门探头励磁,使探头磁芯内 $H(t)$ 的波形不受励磁线圈阻抗变化的影响。无外磁场作用时, $H(t)$ 的波形为稳定对称的三角波形。有外磁场 H_x 作用时, $H(t)$ 的波形只随 H_x 沿 H 轴平移。

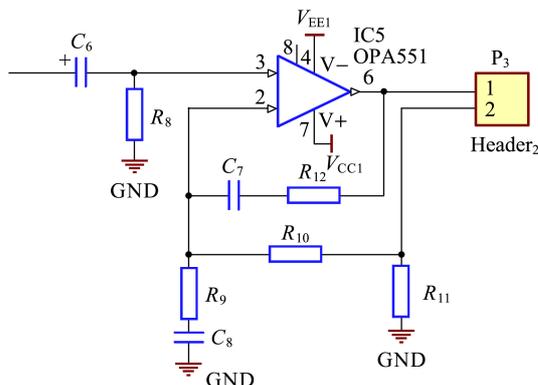


图 5 交流压控恒流源电路的原理电路图

2.4 设计信噪比更高的探头励磁线圈结构

将磁通门探头励磁线圈分成内、外线圈 2 部分,感应线圈(分 4 层绕制共 280 匝)绕在二者之间,如图 6 所示。内线圈匝数(分 4 层绕制共 280 匝)是外线圈匝数(分 2 层绕制共 140 匝)的 2 倍,外线圈的截面积是内线圈截面积的 2 倍。将 2 个励磁线圈反向串联,使励磁电流产生的(穿过内线圈的)磁通量有可能全部通过外线圈的内部返

回^[11]。实验表明,用同样的电流励磁,2 个线圈反向串联时探头输出脉冲的幅值比 2 个线圈同向串联时探头输出脉冲的幅值要高,可显著提高探头输出信号的信噪比。图 7 为磁通门探头照片,塑料管内的桔黄色直螺线管(外径 2.8 mm)是磁通门探头。塑料管上的刻度是米尺刻度,塑料管内装有探头与实验仪连接的四芯导线。

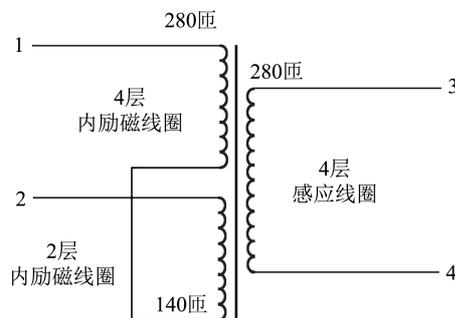


图 6 探头线圈连接方式示意图



图 7 磁通门探头照片图

2.5 设计相位差测量电路

用波形稳定对称、斜边线性度好的三角波恒流电流励磁,使得外磁场只改变探头输出脉冲间的相位差,不改变脉冲本身的大小和形状,使探头输出脉冲信号的波形稳定、幅值较大、前后沿陡峭

光滑,如图 8 和图 9 所示,使相位差检测电路输出的矩形脉冲的宽度稳定.

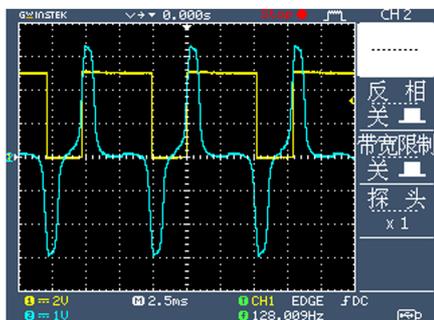


图 8 外磁场方向与探头正轴向同向时的波形

如图 10 所示,用高速精密双比较器 LM319 和 2 个精密基准电源组成正负双向电压比较电路;用高速 D 触发器 74HC74 组成双稳态电路,

两者结合组成正负脉冲间相位差检测电路. 用显示电路单元中单片机的定时器/计数器测量相位差,检测电路输出的相位差矩形脉冲的宽度,测量结果显示在数码显示器上. 相位差测量电路结构简单,工作稳定可靠.

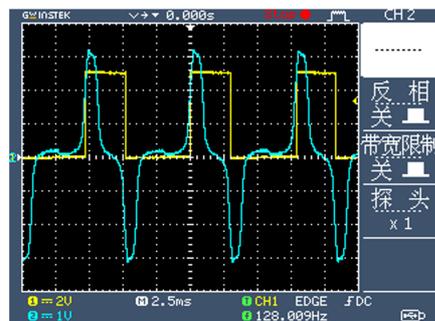


图 9 外磁场方向与探头正轴向反向时的波形

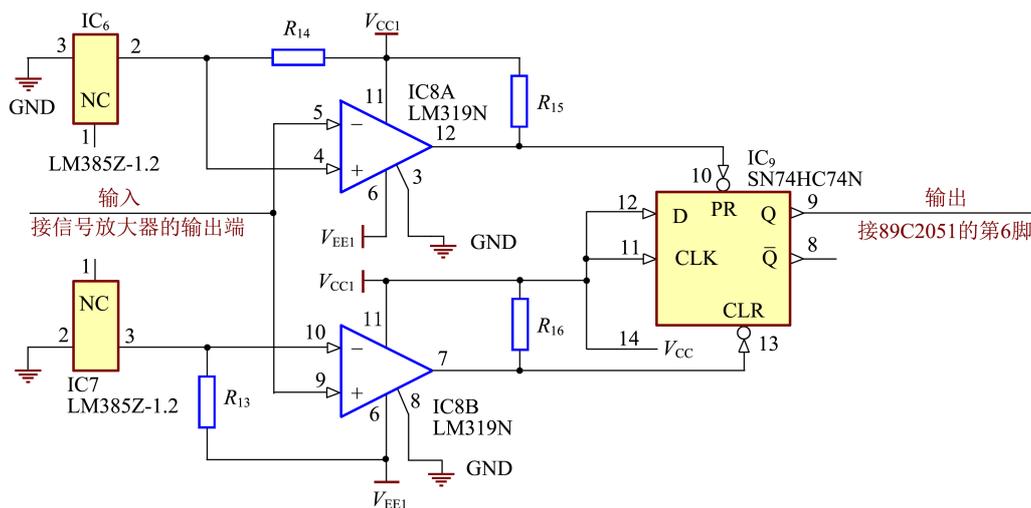


图 10 相位差检测电路的原理电路图

2.6 设计制作标定磁通门的简易装置

在每台样机的机箱上安装了均匀密绕长直螺线管,螺线管长 $L=(238.0 \pm 0.5)$ mm,螺线管平均直径 $D=(13.64 \pm 0.02)$ mm,1 号样机的螺线管线圈 1 365 匝,2 号样机的螺线管线圈 1 360 匝. 每台样机各安装了 1 套输出电流连续可调的直流恒流电源给螺线管供电;供电电流的数值显示在 0.2 级的数字电流表上. 电流在螺线管内中部轴向产生的磁场强度 $H = nI \cos \beta$, $\cos \beta = 0.998 \pm 0.001$. 1 号样机螺线管线圈的匝数密度 $n_1 = (5\ 735 \pm 12)$ m^{-1} ; 2 号样机螺线管线圈的匝数密度 $n_2 = (5\ 714 \pm 12)$ m^{-1} . 用这种标定装置标定磁通门,其标定的相对不确定度 $< 0.5\%$. 该

装置既可用于标定磁通门,又可用于测量电流在载流螺线管内轴向产生的磁感应强度,进行测量练习.

3 标定磁通门

将磁通门探头置于载流螺线管内中部,测出的 $H = nI \cos \beta + H_0$,其中 H_0 为环境磁场沿探头轴向的分量. 为消除 H_0 的影响,等间隔地改变载流螺线管的电流 i_L ,测出对应的相位差检测电路输出的相位差脉冲的宽度,相关数据如表 1 和表 2 所示.

图 11 为磁通门探头测量电流在载流螺线管内的中部产生的磁感应强度 B 的示意图.

表 1 标定 1 号磁通门实验仪的测量数据
(探头励磁电流频率 $f=256$ Hz)

I_i/mA	$B_i/\mu\text{T}$	$\tau_i/\mu\text{s}$	$\Delta\tau_i/\mu\text{s}$
-180	-1 295±4	1 451	-501
-120	-863±3	1 618	-334
-60	-432±2	1 785	-167
0	0	1 952	0
60	432±2	2 119	167
120	863±3	2 286	334
180	1 295±4	2 453	501

注: $B_i = \mu_0 n I_i \cos \beta$, $\Delta\tau_i = \tau_i - \tau_0$, 下同.

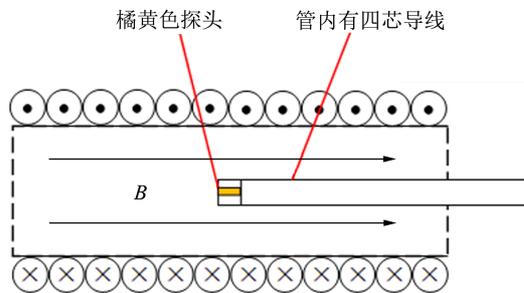


图 11 测电流在载流螺线管中部磁感应强度示意图

为消除环境磁场沿探头轴向分量 H_0 的影响, 取 $\Delta\tau_i = \tau_i - \tau_0$, 按 $B = k\Delta\tau$ 用最小二乘法拟合数据, 求得 $k = (2.5847 \pm 0.0004) \mu\text{T}/\mu\text{s}$.

表 2 标定 2 号磁通门实验仪的测量数据
(探头励磁电流频率 $f=128$ Hz)

I_i/mA	$B_i/\mu\text{T}$	$\tau_i/\mu\text{s}$	$\Delta\tau_i/\mu\text{s}$
-180	-1 290±4	3 023	-928
-120	-860±3	3 331	-620
-60	-430±2	3 640	-311
0	0	3 951	0
60	430±2	4 262	311
120	860±3	4 572	621
180	1 290±4	4 880	929

用最小二乘法拟合数据, 求得 $k = (1.3879 \pm 0.0009) \mu\text{T}/\mu\text{s}$.

4 实测效果

改变载流螺线管的电流, 分别测量电流在载流螺线管中部产生的磁感应强度. 测量数据如表 3 所示.

为消除环境磁场沿探头轴向分量 H_0 的影响, 取 $\Delta\tau_i = \tau_i - \tau_0$, 按 $B_{i\text{测}} = k\Delta\tau_i$ 计算电流在载流螺线管中部产生的磁感应强度 B , 测量值与理论值的偏差很小. 磁通门测量的线性度偏差率 $\lambda = \frac{\Delta B_{\text{max}}}{B_{\text{max}}} = \frac{3}{1075} \leq 0.3\%$, 该实验仪测量磁感应强度的线性度较好.

表 3 用 2 号磁通门实验仪测量电流在载流螺线管中部产生的磁感应强度的测量数据表

I_i/mA	$B_i/\mu\text{T}$	$\tau_i/\mu\text{T}$	$\Delta\tau_i/\mu\text{s}$	$B_{i\text{测}}/\mu\text{s}$	$\Delta B_i/\mu\text{T}$
-150	-1 075±4	3 177	-774	-1 074±4	1
-100	-717±3	3 433	-518	-718±3	-1
-50	-358±2	3 692	-259	-359±2	-1
0	0	3 951	0	0	0
50	358±2	4 211	260	361±2	3
100	717±3	4 469	518	718±3	1
150	1 075±4	4 726	775	1 075±4	0

5 展 望

如需将相移磁通门用作通用测量仪器, 可在现有电路的基础上稍加改进:

1) 现有电路输出的相位差脉冲的宽度稳定, 可在仪器内安装频率为 10 MHz 的计数器取代单片机的定时器/计数器来测量该脉冲的宽度, 可将仪器的测量分辨力提高 1 个数量级;

2) 绕制更长的载流螺线管并选用级别更高的

电流表组成新的标定磁通门装置, 以提高标定磁通门常量 k 的准确度.

3) 采用动态磁导率 μ_d 更高、饱和磁场强度 H_s 更低、矫顽力 H_c 更低的软磁材料作为磁芯. H_s 更低, 可减小探头励磁电流, 减小探头功耗, 同时降低了 H_m , 能提高探头测量的灵敏度; μ_d 越高, 可使探头输出脉冲的幅度越高, 前、后沿越陡峭, 使相位差检测电路输出的相位差脉冲的宽度越稳定, 可使探头测量的准确度越高.

6 结束语

按新的设计方案,选用性能稳定的通用元器件,设计制作的相移型磁通门实验仪,内部电路无需进行任何调节和精心匹配,实验仪测量磁感应强度的精度优于0.5%。实验仪结构简单,成本低,测值对探头磁芯参量的变化不敏感,性能稳定,探头互换性较高,测量准确,方向性强,使用方便。仪器设有励磁电流信号、探头输出信号和相位差检测输出信号的引出端。将磁通门探头放在载流螺线管内,改变螺线管的电流,可用示波器观察到探头输出脉冲的相位随电流变化,相位差检测电路输出的相位差矩形脉冲的宽度也随电流变化。这有助于学生理解相移型磁通门的工作原理,适宜用在普通物理实验课程中开设磁通门实验。

参考文献:

- [1] 何焱,吴武臣,丁广玉. 一种便于推广应用的磁通门技术[J]. 仪器仪表学报,2006,27(10):1279-1282.
- [2] 刘文君,许振丰,李申高,等. 磁通门传感器激励电路模型分析[J]. 兵工学报,2015,36(11):2111-2116.
- [3] 曾育锋,游艳琳,何金灵. 自制磁通门传感器测量弱磁场[J]. 实验室研究与探索,2011,30(6):48-51.
- [4] 张行,赵爱明,张文巨,等. 基于磁通门传感器的高精度地磁检测仪[J]. 新一代信息技术,2019,2(11):6-11.
- [5] 陈俐宏,蔡慧,张子省,等. 一种基于开关电容的新型三角波发生器[J]. 中国计量大学学报,2018,29(4):457-465.
- [6] 詹立春. 基于 NE555 的幅频可调发生器的设计[J]. 电子制作,2016(6):74-75.
- [7] 孙辰朔,金祖洋,刘山松,等. 基于 Howland 电流源产生更优线性度三角波的设计[J]. 电子器件,2014,37(3):560-564.
- [8] 张弛,黄昊翀,李子萱,等. 基于单片机的波形发生器[J]. 科技创新导报,2021(4):43-48.
- [9] 张权,姚骏,李斌. 一种基于 MAX038 的宽频程控波形发生器的设计[J]. 测控技术,2004,23(7):13-15.
- [10] 魏凤旗,李军红,洪镇南. 基于 8086 的波形发生器设计与 proteus 电路仿真[J]. 科技风,2017(19):159,161.
- [11] 毛振珑. 磁场测量[M]. 北京:原子能出版社,1985:220-221.

Phase shift fluxgate experimental instrument

HE Sen

(Department of Physics, School of Semiconductor and Physics,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The phase shift fluxgate experimental instrument was designed to measure weak magnetic fields. The general components including crystal oscillator with a frequency of 32.768 kHz, counter CD4060, operational amplifiers AD708 and OPA551, high speed precision comparator LM319, precision reference power supply and high speed D trigger 74HC74 were used in the instrument. The internal and external excitation coils and the uniformly tightly wound long straight solenoid were installed. The circuit was simple, and the measured value was insensitive to the change of the magnetic core parameters of the probe, so it was of good stability, high accuracy. Moreover, the circuit required no adjustments, and the instrument measurement accuracy was better than 0.5%. It was suitable for general physics experiment as a teaching instrument, and was convenient for application and for popularization.

Key words: fluxgate; phase shift; triangular wave; AC constant current excitation

[责任编辑:郭伟]