

基于三端式磁通门技术的磁力梯度仪

章志涛, 张松勇, 顾 伟

(上海海事大学 科学研究院, 上海 200135)

摘 要: 针对普通磁力仪测量磁场的梯度存在受背景磁场的影 响大, 从而导致测量精度低的问题, 采用三端式磁通门技术和双探头的结构型式, 试制 1 种三端式磁通门磁力梯度仪, 其对背景磁场和磁强梯度均实现闭环测量. 试验数据表明, 背景磁场的干扰得到有效的消除, 从而提高测量精度, 且电路的稳定性能良好.

关键词: 三端式磁通门; 磁力梯度仪; 背景磁场; 闭环测量

中图分类号: TM 937; O441. 5 **文献标志码:** A

Magnetic gradiometer based on technique of three-tip fluxgate

ZHANG Zh itao, ZHANG Songyong GU Wei

(Academy of Sci & Tech, Shanghai Maritime Univ, Shanghai 200135 China)

Abstract To the problem of the low precision of common magnetometers caused by the influence of the background magnetic field, a new fluxgate gradiometer which is based on the technique of the three-tip fluxgate and the structure-type of two sensors is developed. Its measuring systems of the background magnetic field and the magnetic grads are closed loops. It is showed by the experimental results that the influence of the background magnetic field is mostly eliminated, the precision is improved, and the stability of the gradiometer circuitry is good.

Key words three-tip fluxgate; magnetic gradiometer; background magnetic field; closed loop measurement

0 引 言

磁力梯度仪主要用于近磁场源周围磁场的测量, 如生物磁场的测量和地下铁磁性埋件的探测等. 目前, 除超导磁力仪可快速地在 1 点上同时获得几个方向的梯度, 迅速计算出总梯度矢量外, 现有梯度测量一般是将 2 个磁灵敏系统放在某个方向的固定距离上, 由此获得磁场的梯度值.^[1-3] 用普通磁力仪分别测定两点的磁场强度以求得磁强差值或梯度的

方法存在 2 个缺点^[4]: (1) 它们的背景磁场比差值大许多, 背景磁场的测量误差带入差值数据, 精度丧失殆尽; (2) 2 个磁强计结构参数不一致 (用 1 个磁强计先后测定两点的磁场强度时, 测量条件、方法和定向一致性等更难保证), 必定影响仪器的精度. 为克服上述缺点, 本文提出 1 种基于三端式磁通门技术、背景磁场和磁强梯度均实现闭环测量的双探头结构型式的梯度仪.

收稿日期: 2008-01-04 修回日期: 2008-03-05

作者简介: 章志涛 (1984-), 男, 浙江永康人, 硕士研究生, 研究方向为磁场测量, (E-mail) eric_75@163.com

1 三端式磁通门

1.1 探头结构

三端式磁通门探头见图 1 与传统的磁通门探头相比,其结构较为简单.激励、信号和反馈为同一个线圈,三位一体.激励从两端进入,中心抽头既是信号端,又是反馈端.探头磁路为闭合跑道形,相比环形探头,其对称性和方向性好,噪音小,更适合做磁力梯度仪.^[5]

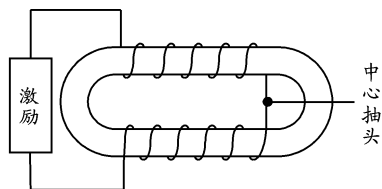


图 1 三端式磁通门探头

1.2 探头原理

与典型的磁通门探头一样,三端式磁通门探头也是利用高导磁铁芯在饱和交变励磁下选通调制铁芯中的直流磁场分量,并将直流磁场变为交流电压输出,进而达到测量磁场的目的.

对于上半轴铁芯,由于磁芯形成闭合磁路,若忽略铁芯的漏磁效应,则在激励磁场强度 $H = H_m \cos \omega t$ 的作用下,激励线圈产生与磁芯轴轴向平行的磁化磁场 $H_c = H_{e_1} + H_{e_2} = 2H = 2H_m \cos \omega t$ 该磁场与外磁场 H_0 的合成磁场为 $H = H_0 + H_c$. 设磁芯磁导率为 μ , 截面面积为 S , 感应线圈匝数为 N . 由于线圈直接缠绕在铁芯上,所以不存在铁芯的聚磁效应,但均存在退磁效应. 因此,磁芯内部的磁感应强度^[4]

$$B' = \frac{\mu}{1 + D(\mu - 1)/4\pi} H' = \mu' H' \quad (1)$$

式中: D 为退磁因数; μ' 为考虑退磁效应的铁芯磁导率.

根据法拉第电磁感应定律,当激励磁场随时间变化时,线圈两端将产生感应电势

$$e_1 = -10^{-8} \frac{d}{dt} (NSB'_1) \quad (2)$$

将式 (1) 代入式 (2) 得

$$e_1 = 10^{-8} \times NS \left[2\omega \mu'(t) H'_m \sin \omega t - 2 \frac{d\mu'(t)}{dt} H'_m \cos \omega t - \frac{d\mu'(t)}{dt} H'_0 - \mu'(t) \frac{dH'_0}{dt} \right] \quad (3)$$

一般情况下,环境磁场变化缓慢,可假定 $\frac{dH'_0}{dt} = 0$

0 上半轴线圈上的感应电势

$$e_1 = 10^{-8} \times NS \left[2\omega \mu'(t) H'_m \sin \omega t - 2 \frac{d\mu'(t)}{dt} H'_m \cos \omega t - \frac{d\mu'(t)}{dt} H'_0 \right] \quad (4)$$

为分析问题方便,通常用 1 个 3 次多项式 $B = aH - bH^3$ 来逼近磁芯的实际磁化特性曲线(磁滞曲线).^[6] 因此,上半轴线圈上的感应电动势

$$e_1 = 2 \times 10^{-8} NS \omega H'_m \left[(3H_0'^2 + 3bH_m'^2 - a) \sin \omega t + 6bH_0' H'_m \sin 2\omega t + 3bH_m'^2 \sin 3\omega t \right] \quad (5)$$

同理,假设上下磁芯轴及励磁线圈物理参数严格一致,则两边等效电阻 R 相等,电感和噪音也相等,则上述分析对于下半轴铁芯同样成立,只是激励磁场方向相反,故下半轴线圈感应电动势

$$e_2 = -2 \times 10^{-8} NS \omega H'_m \left[(3H_0'^2 + 3bH_m'^2 - a) \sin \omega t + 6bH_0' H'_m \sin 2\omega t + 3bH_m'^2 \sin 3\omega t \right] \quad (6)$$

从而可得信号输出的总感应电动势

$$e = e_1 + e_2 = 24 \times 10^{-8} NS \omega H_m'^2 H_0' \sin 2\omega t \quad (7)$$

由式 (7) 可得,信号中只有 2 次谐波分量与外磁场成 H_0 成正比,而奇次谐波干扰(包括基波分量)得到有效抑制. 因此,与传统的磁通门探头相比,三端式磁通门探头具有探头特性好、基波分量少的优点.

1.3 探头信号处理电路

由于激励、信号和反馈采用的是同一个线圈,从而电路不需要移相器. 因此,三端式磁通门电路不仅非常简单,而且可靠性高. 图 2 为其典型原理框图.^[2,4,5]

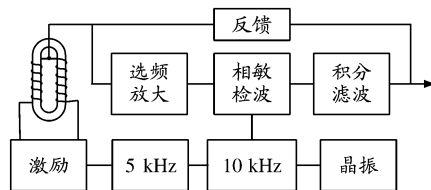


图 2 典型的三端式磁通门电路

励磁电路包括频率源、分频和功率放大等电路.

选频放大器实际上是一带通滤波放大器,其中心频率为励磁频率的 2 倍,使 2 次谐波信号获得放大并初步抑制 2 次谐波以外的信号. 应用四双向模拟开关组成的相敏检波器对 2 次谐波信号进行提取放大,而抑制其他与所需信号不同频、不同相的噪音信号. 积分滤波器将相敏检波器检波后脉动的 2 次谐波信号转换成平滑的直流信号,一方面送到后面的电路进行处理,另一方面通过反馈环节送到磁通门中,产生与被测磁场相反的磁场,使磁通门始终工作在近零磁场下.

2 梯度仪结构型式

被测磁场强度的恒定分量称为背景磁场^[4], 一般不是磁力梯度仪的测量参数. 背景磁场越大, 差值就大, 梯度测量精度就越低. 为抵消 2 个探头处的背景磁场, 除严格保证 2 探头轴线平行外, 本梯度仪在信号处理电路上, 采用背景磁场和磁强梯度均实现闭环测量的双探头结构型式, 见图 3

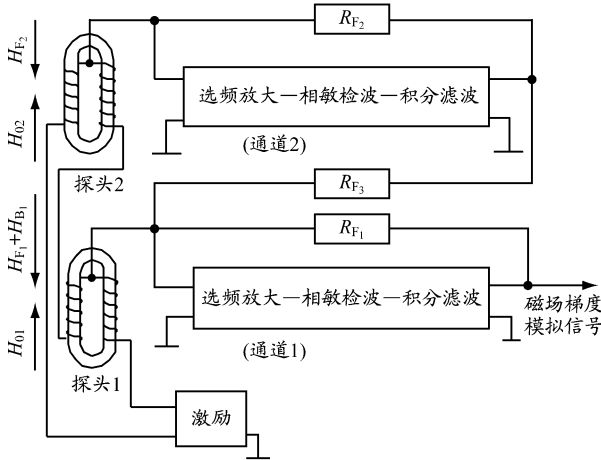


图 3 梯度仪结构型式

用于测量背景磁强梯度的系统采用闭环形式, 即图 3 中的通道 2 部分, 其反馈磁场为

$$H_{F_2} = -H'_{02} \quad (8)$$

由于积分器并不纯粹, 特别是前向通道各个环节存在灵敏阈, 反馈磁场不等于经探头退磁后的被测磁场, 因而实际闭环系统的前向通道稳态总增益 K'_1 就不能被视为 ∞ . 故反馈磁场 H_{F_2} 与经探头退磁后被测磁场 H'_{02} 的关系式为

$$H_{F_2} = -\frac{K'_1 F}{1 + K'_1 F} H'_{02} \quad (9)$$

背景磁场经反馈电阻 R_{F_3} 串接到通道 1 的反馈回路中, 取 $R_{F_2} = R_{F_3}$, 假设 2 组线圈结构工艺基本相同, 则产生的补偿磁场

$$H_{B_1} = H_{F_3} = H_{F_2} \quad (10)$$

在通道 1 开环的情况下, 测得的磁场强度

$$\Delta H = H'_{01} + H_{B_1} = H'_{01} - H'_{02} \quad (11)$$

得磁强梯度模拟信号

$$E_1 = H'_{K_1} (H'_{01} - H_{B_1}) = K'_{K_1} (H'_{01} - \frac{K'_2 F_2}{1 + K'_2 F_2} H'_{02}) \quad (12)$$

式中, K'_{K_1} 为开环系统总增益.

上述结果在通道 1 开环下获得, 当改为闭环系统后, 输出的磁强梯度模拟信号

$$E_1 = \frac{K'_{1_1} F_1}{1 + K'_{1_1} F_1} (H'_{01} - \frac{K'_{2_2} F_2}{1 + K'_{2_2} F_2} H'_{02}) \quad (13)$$

3 试验数据与分析

为分析原理样机的实际性能, 建立如下测试环境: (1) 筛选 2 个性能基本一致的探头, 并轴平行固定于一直板上, 间距为 300 mm; (2) 绕制 2 个参数一致的长直螺线管线圈, 将其轴平行置于磁屏蔽筒中; (3) 裁剪直板宽度, 使直板置于螺线管中时, 探头轴线与螺线管轴线重合, 调整两螺线管的水平距离, 使两探头分别置于两螺线管线圈的中心处; (4) 根据长直螺线管线圈的特性, 当往线圈中通电流时, 其内部产生 1 个方向相同、大小相等的恒定磁场. 因此, 若两线圈中的电流相等, 调整两探头的位置, 使其输出值相等, 且其值等于线圈所产生的恒定磁场强度值, 则可假定两探头轴线平行, 并重合于两螺线管轴线; (5) 改变两线圈电流值. 当电流大小不一致时, 其产生的恒定磁场大小也不一致, 从而可以得到任意大小的磁场差值, 即磁强梯度. 此处设定磁强梯度为 100 nT. 图 4 中, 曲线 1 为用 2 个磁力仪测得的输出电压差曲线, 曲线 2 为原理样机所测得的输出电压差曲线. 曲线 1 随背景磁场的增大呈上升趋势, 而曲线 2 则保持在一定范围内. 由此可知, 采用本文提出的梯度仪, 能将背景磁场产生的影响基本消除, 提高仪器精度.

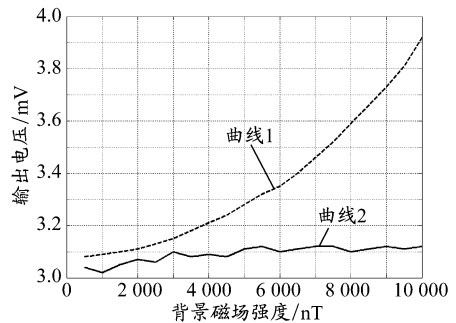


图 4 背景磁场强度与输出电压关系曲线

图 5 为在磁屏蔽筒中连续监测梯度仪的噪声监测结果.

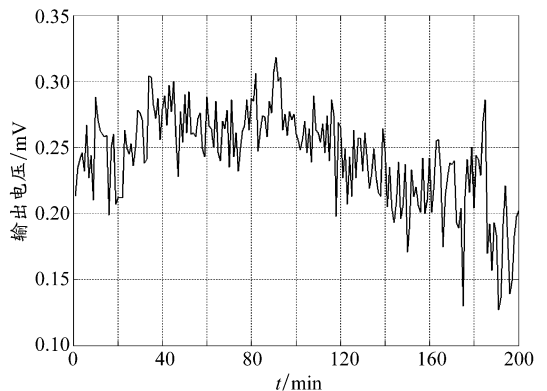


图 5 实验梯度仪噪声监测结果

由此可知,所研制的梯度仪在线性区的输出电压噪声为 0.2 mV ,意味着磁力仪的分辨率已达到 6 nT ,系统稳定性能良好。

4 结束语

磁力梯度仪本质上是扣除背景磁场强度,只提供差值模拟信号的 1 种弱磁场或微弱磁场测量仪器。本文采用的三端式磁通门探头与传统的磁通门探头相比,结构简单、探头特性好、基波分量小,而且不需要移相器,因此电路特别稳定。再加上利用反馈的形式,将一探头测得的背景磁场反馈到另一探头中,形成 1 个等效的差值磁场,从而直接得到磁场强

度差值的模拟信号,有效地解决背景磁场的干扰,使磁力梯度仪具备较高的灵敏度和精度。

磁力梯度仪的测量精度也与其构造型式有关。除选用恰当组合型式外,还应采取下列技术措施:

(1)严格保证各探头轴线平行,并平行于测量杆的基准轴;(2)磁通门系统各部分均应尽可能保证 1 个磁力梯度仪上几个系统的参数一致;(3)磁通门探头的设计、加工和装配要严格保证质量;(4)磁通门电路的设计和调试也要严格保证质量;(5)提高积分器特性、减小前向通道各个环节的灵敏度阈值并保持各系统反馈系统的一致性。

参考文献:

- [1] RIIKA P. Review of fluxgate sensors[J]. *Sensors & Actuators A: Phys* 1992(3): 129-141.
- [2] RIIKA P. Advances in fluxgate sensors[J]. *Sensors & Actuators A: Phys* 2003(1): 8-14.
- [3] ROBBES D. Highly sensitive magnetometers—a review[J]. *Sensors & Actuators A: Phys* 2006(1): 86-93.
- [4] 张学孚,陆怡良. 磁通门技术[M]. 北京:国防工业出版社,1995
- [5] 邬佳,隋厚堂. 磁通门磁力仪和探头研制的最新进展[J]. *地球物理学进展*, 2004 19(4): 743-745
- [6] 李江. 磁通门磁力仪自动补偿与传感器小型化设计[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2002

(编辑 王文婧)

中科院院士钟万勰教授访问上海海事大学并作报告

2008年5月12日,应上海海事大学(以下简称海大)杂志总社《计算机辅助工程》编辑部(以下简称《计辅》)和上海CAE技术公共服务平台邀请,大连理工大学钟万勰院士访问海大,参观临港新校区并作学术报告。钟院士以“力、功、能量与辛数学”为题,从1根弹簧的虎克定律谈起,引经据典,深入浅出地剖析力、功、能量与辛数学的关系,揭开辛数学的神秘面纱。报告中,钟院士反复强调,做学问要注重基础及新兴学科间的交叉与渗透,要有所畏惧的创新精神。报告会由海大杂志总社社长袁林新编审主持,著名力学家、力学教育家嵇醒教授,《计辅》编委、上海CAE技术公共服务平台副主任陆仲绩高工,《计辅》副主编、同济大学航空航天与力学学院郑百林副教授,以及海大杂志总社副社长、《计辅》副主编楼进副教授等一同参加报告会,海大近200名师生与会聆听报告。