

自适应双参考磁场梯度探测原理

林春生, 向前, 龚沈光

(海军工程大学兵器工程系, 湖北武汉 430033)

摘要: 本文使用4个单分量磁探头构成双参考磁场梯度探测装置。4个探头组成3个磁场梯度传感器, 其中一个为信号传感器, 另两个为噪声传感器。以信号传感器输出作为原始输入, 噪声传感器输出作为参考输入, 采用自适应噪声抵消技术, 能有效消除因载体运动产生的涡流磁场及因磁探头方向相对地磁方向改变而引起的噪声输出。本文提出的双参考磁场梯度探测装置具有工艺性好, 灵敏度高, 虚警概率低的优点, 可在实际磁探系统中使用。

关键词: 磁场梯度; 探测; 自适应抵消

中图分类号: TN911.23; O441 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2004)03-0512-03

Principle of Adaptive Detection Using Dual Magnetic Field Gradient Inputs as Reference

LIN Chunsheng, XIANG Qian, GONG Shen2guang

(Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract: Four single component magnetic field sensors are used to make up of a detection device that has dual magnetic field gradient inputs as reference. The four single component sensors compose three magnetic field gradient sensors with one as signal sensor, the other as noise sensors. Let the output of signal sensor be the original input and those of noise sensors as reference inputs, then noise caused by the change of orientation of magnetic field sensor relative to geomagnetism orientation can be eliminated efficiently, as well as bow wave due to carrier movement. Practical application shows that the detection device presented in has good technic property, high sensitivity with low false alarm probability.

Key words: magnetic field gradient; signal detection; adaptive elimination

1 引言

在航空磁性探潜、磁性探矿、海底磁性调查以及水中兵器系统中, 可以使用磁场梯度探测技术。这种技术具有许多优点, 首先, 一般情况下, 被探测对象的磁场梯度信号的动态范围要远小于其磁场信号的动态范围, 这将大大降低仪器设备的设计难度; 其次, 采用磁场梯度探测, 可以克服因载体运动引起磁探头相对地磁方向改变而产生的干扰^[1]。当没有目标时, 磁探头输出的信号就是地磁场矢量在探头方向上的投影, 当探头方向改变时, 输出信号大小也改变, 这一变化信号就是运动噪声。而采用双梯度探测时, 因构成梯度传感器的两个磁探头平行放置, 电气性能基本一致, 而背景地磁场的梯度很小, 所以两个磁探头的运动噪声相同, 求梯度时可互相抵消。

但是, 普通磁场梯度探测装置的加工和安装难度较大。受实际工艺水平的限制, 构成梯度的两个探头不可能严格平行, 两探头的电气性能也很难完全保持对称, 若允许载体任意运动, 则0.1b的平行度误差或0.1%的灵敏度对称性误差最大可引起几十纳特的干扰输出^[2]。因此, 实际系统中要求限制载体的运动, 同时需要进行复杂的信号处理以便消除干扰信号。

此外, 普通梯度探测装置不便于消除载体运动时产生的涡流磁场干扰, 因为构成梯度的两个磁探头位于不同的位置,

所接收到的涡流磁场不同, 在求梯度运算时不能互相抵消, 由此形成涡流干扰。

本文提出的自适应双参考磁场梯度探测技术, 能够有效消除因两探头平行度误差和灵敏度对称性误差所引起的载体运动噪声及涡流干扰, 从而大大降低了对梯度探测装置加工和安装工艺的要求, 使磁场梯度探测设备的性能更加完善。

2 自适应双参考磁场梯度探测原理

如图1所示, 使用4个单分量磁探头, 平行安装在非磁性材料基座上, 构成3个磁场梯度接收器。假设探头轴向为Z轴方向, 4个磁探头输出分别为 B_{Z1} , B_{Z2} , B_{Z3} 和 B_{Z4} 。其中 B_{Z1} 与 B_{Z4} 构成信号梯度, 探头间距为 D ; B_{Z1} 与 B_{Z2} , B_{Z3} 与 B_{Z4} 构成两个噪声参考梯度, 探头间距为 d ; 双参考磁场梯度探测器结构尺寸满足 $D \gg d$ 。

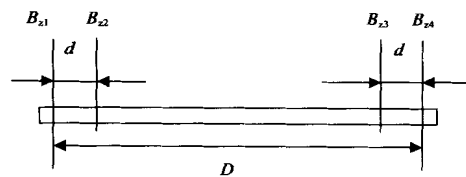


图1 双参考磁场梯度探测器结构原理

21.1 只考虑目标信号时梯度接收器的输出

假设在观测点处, 目标在 Z 方向上的磁场梯度为 $9B_z/9X$, 先不考虑噪声, 则信号梯度和第 1 及第 2 噪声参考梯度的输出量近似为

$$\begin{cases} \$ B_S = B_{Z4} - B_{Z1} = \frac{9B_z}{9X} \# D \\ \$ B_{r1} = B_{Z2} - B_{Z1} = \frac{9B_z}{9X} \# d \\ \$ B_{r2} = B_{Z4} - B_{Z3} = \frac{9B_z}{9X} \# d \end{cases} \quad (1)$$

由于构成信号梯度间的距离 D 远大于参考梯度间的距离 d, 因此, 当出现被测目标时有

$$\$ B_S \gg \$ B_{r1}, \$ B_S \gg \$ B_{r2} \quad (2)$$

从而式(1)可近似简化为

$$\begin{cases} \$ B_S = \frac{5 B_z}{5X} \# D \\ \$ B_{r1} = 0 \\ \$ B_{r2} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

21.2 载体运动时地磁信号在梯度接收器中的输出

当载体在地磁场中发生运动时, 由于加工与安装工艺的限制, 构成信号梯度的两个磁探头 B_{Z1} 与 B_{Z4} 不可能绝对平行, 电气性能也不可能完全对称, 因而信号梯度 $\$ B_S$ 有一个干扰输出. 其信号大小取决于载体的运动情况以及构成梯度的两个磁探头的平行度和对称性, 而与两探头间的距离 D 无关. 记信号梯度的干扰输出仍为 $\$ B_S$.

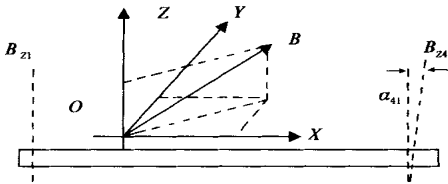


图 2 磁场梯度信号输出示意图

如图 2 所示, 不失一般性假设构成信号梯度 $\$ B_S$ 的 B_{Z1} 与 B_{Z4} 共面, 其夹角为 A_{41} (否则平移 B_{Z4} 使其与 B_{Z1} 共面, 在地磁场中平移不影响输出信号). 以 B_{Z1} 轴为坐标 Z 轴, $B_{Z1}OB_{Z4}$ 面与 XOZ 面重合, 在球坐标系中地磁矢量记为 (B, H, α_{41}) , 则探头 B_{Z1}, B_{Z4} 的输出信号为

$$\begin{cases} B_{Z1} = B \cos H \\ B_{Z4} = K_{41} (B \cos H \# \cos A_{41} + B \# \sin H \# \cos \alpha_{41} \# \sin A_{41}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: B_{Z1} 轴的灵敏度为 1; K_{41} 为 B_{Z4} 轴相对于 B_{Z1} 轴的灵敏度; H 为地球磁感应 B 相对于坐标 Z 轴的夹角; α_{41} 为 B 在水平面的投影 B_H 相对于 $B_{Z1}OB_{Z4}$ 面的夹角.

由 B_{Z1} 和 B_{Z4} 构成的信号梯度输出为

$$\begin{aligned} \$ B_S = B_{Z4} - B_{Z1} = & (K_{41} - 1) B \cos H + K_{41} B (\cos A_{41} - 1) \\ & \# \cos H + B K_{41} \sin H \# \sin A_{41} \# \cos \alpha_{41} \\ & + U C_{41} B \# \cos H + B A_{41} \# \sin H \# \cos \alpha_{41} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $C_{41} = K_{41} - 1$ 为两轴灵敏度的不对称度.

上式最后一个近似等式成立是因为 A_{41} 很小, $\sin A_{41} \approx A_{41}$,

且 $\cos A_{41} - 1$ 是二阶小量, 故可以忽略.

同样, 由 B_{Z1} 和 B_{Z2} 构成的第 1 参考梯度和由 B_{Z3} 和 B_{Z4} 构成的第 2 参考梯度的信号输出为

$$\$ B_{r1} = U C_{21} B \# \cos H + B A_{21} \# \sin H \# \cos \alpha_{21} \quad (6)$$

$$\$ B_{r2} = U C_{43} B \# \cos H + B A_{43} \# \sin H \# \cos \alpha_{43} \quad (7)$$

式中: C_{21} 和 C_{43} 为 B_{Z2} 相对于 B_{Z1} 和 B_{Z4} 相对于 B_{Z3} 的灵敏度不对称度; A_{21} 和 A_{43} 为 B_{Z2} 相对于 B_{Z1} 和相对于 B_{Z3} 的夹角; α_{21} 和 α_{43} 为 B 在水平面的投影 B_H 相对于 $B_{Z1}OB_{Z2}$ 面和 $B_{Z3}OB_{Z4}$ 面的夹角. 由梯度接收器的安装结构不难看出, 载体运动时, α_{21}, α_{41} 和 α_{43} 之间始终只相差一个固定值, 因此可令

$$\begin{cases} \alpha_{41} = \alpha \\ \alpha_{21} = \alpha_{10} + \alpha \\ \alpha_{43} = \alpha_{20} + \alpha \end{cases} \quad (8)$$

式中: α_{10} 和 α_{20} 为定值. 联合式(5)~(8)得

$$\begin{cases} \$ B_S = U C_{41} B \# \cos H + B A_{41} \# \sin H \# \cos \alpha \\ \$ B_{r1} = U C_{21} B \# \cos H + B A_{21} \# \sin H \# \cos(\alpha_{10} + \alpha) \\ \$ B_{r2} = U C_{43} B \# \cos H + B A_{43} \# \sin H \# \cos(\alpha_{20} + \alpha) \end{cases} \quad (9)$$

当载体运动时只有 H 和 α 在不断地变化, 式(9)说明地磁信号在三个梯度接收器中的输出具有相似的运动规律, 因而具有很强的相关性. 传感器安装时, 不难调整各探头的倾斜方向, 使得 α_{10} 和 α_{20} 足够小, 且容易使 α_{10} 和 α_{20} 的符号相反, 此时信号梯度输出可近似用两个参考梯度的线性组合来表示.

21.3 梯度接收器涡流噪声

对于金属载体而言, 当地磁场发生转动时, 切割地磁场会产生涡流电流, 进而产生涡流磁场, 使得各磁探头传感器有干扰信号输出. 其信号大小取决于载体转动时切割地磁场磁力线的情况, 而与两探头间的距离 D 无关. 记信号梯度的涡流输出为

$$\$ B_S = n_{ws}(t) \quad (10)$$

同样, 由于载体的转动, 参考梯度 $\$ B_{r1}$ 和 $\$ B_{r2}$ 也有一个涡流干扰信号输出, 其输出大小也与两探头间的距离 d 无关. 记

$$\$ B_{r1} = n_{w1}(t), \$ B_{r2}(t) = n_{w2}(t) \quad (11)$$

各探头涡流磁场的大小均取决于载体在地磁场中的转动, 当不考虑平行度误差的影响时, 构成梯度探头的各分量彼此平行, 因此各探头同步运动. 若在载体内没有铁磁物体, 各分量探头均没有受到磁屏蔽, 且使探头 B_{Z1} 与 B_{Z4}, B_{Z2} 与 B_{Z3} 的安装位置在运动载体中基本对称, 由此可知, 三个梯度接收器的涡流输出 $n_{ws}(t), n_{w1}(t)$ 和 $n_{w2}(t)$ 具有相似的信号波形, 即 $n_{ws}(t), n_{w1}(t)$ 和 $n_{w2}(t)$ 彼此之间具有很强的相关性.

21.4 自适应双参考磁场梯度探测原理

根据前面的结论, 结合式(3), (9)~(11), 可将运动载体中三个磁场梯度探头的输出信号表示为

$$\begin{cases} \$ B_S = \frac{5 B_z}{5X} \# D + n_s(t) \\ \$ B_{r1} = n_{w1}(t) \\ \$ B_{r2} = n_{w2}(t) \end{cases} \quad (12)$$

其中:

$$\begin{cases} n_s(t) = U C_{41} B \# \cos H + B A_{41} \# \sin H \# \cos \alpha + n_{ws}(t) \\ n_1(t) = U C_{21} B \# \cos H + B A_{21} \# \sin H \# \cos(\alpha_{10} + \alpha) + n_{w1}(t) \\ n_2(t) = U C_{43} B \# \cos H + B A_{43} \# \sin H \# \cos(\alpha_{20} + \alpha) + n_{w2}(t) \end{cases} \quad (13)$$

前面的理论推导与本文研究过程中的实际测量结果均表明, $n_{ws}(t)$, $n_{w1}(t)$ 和 $n_{w2}(t)$ 彼此之间具有很强的相关性, 在载体摆动不大的条件下, 噪声 $n_{ws}(t)$ 可以表达成 $n_{w1}(t)$ 和 $n_{w2}(t)$ 以及其延时样本的线性组合. 如果以信号梯度作为原始输入, 两个噪声梯度作为参考输入构成自适应噪声抵消器, 则噪声抵消器的正常工作条件^[3]将得到很好的满足, 由此可推知, 本节给出的自适应双参考磁场梯度探测装置将具有良好的性能. 自适应噪声抵消器原理见图 3.

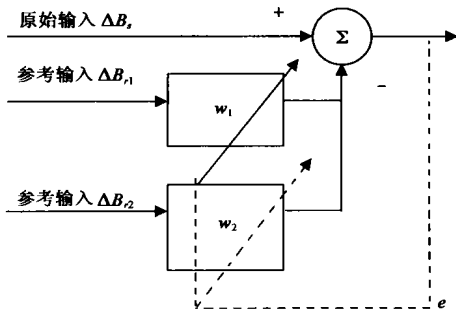


图 3 双参考自适应抵消器原理框图

3 双参考自适应抵消器的 LMS 算法

用 LMS 算法实现双参考自适应抵消器与普通自适应抵消器的算法相近, 只需将两组权系数和两个输入矢量进行组合即可. 设两组滤波器系数为:

$$W_1 = (w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1L})^T \quad (14)$$

$$W_2 = (w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2K})^T \quad (15)$$

对应的参考输入矢量为

$$\$ B_{r1} = (\$ B_{r1}(n), \$ B_{r1}(n-1), \dots, \$ B_{r1}(n-L+1))^T \quad (16)$$

$$\$ B_{r2} = (\$ B_{r2}(n), \$ B_{r2}(n-1), \dots, \$ B_{r2}(n-K+1))^T \quad (17)$$

重新构造滤波器权系数 W 和输入矢量 X 如下:

$$W = (W_1^T, W_2^T)^T = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T \quad (18)$$

$$X = (\$ B_{r1}^T, \$ B_{r2}^T)^T = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T \quad (19)$$

其中: $N = L + K$. 则图 3 等效为图 4, 从而可以用 LMS 迭代算法实现^[3,4]. 所不同的是, 每一步迭代时, 必须分别更新 $\$ B_{r1}$ 和 $\$ B_{r2}$ 两个输入矢量, 再根据式(19)更新输入矢量 X .

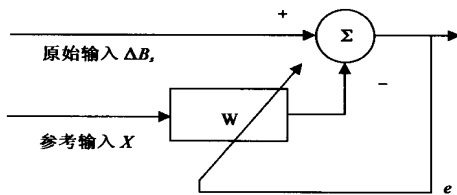


图 4 等效自适应抵消器框图

4 试验结果与讨论

根据前面给出的原理, 本文作者曾调试了 6 套手持式自适应双参考磁场梯度探测棒, 用于水下磁性体探测, 探测棒中信号梯度间隔 $D = 50\text{cm}$, 参考梯度间隔 $d = 3\text{cm}$. 探测器中的 4 个分量探头首先进行电气性能匹配, 然后按图 1 安装后进行

平行度和倾斜方向调整, 探测门限设定为 1nT . 手持梯度探测棒作平缓移动时不会引起虚警. 在同样安装条件和移动条件下, 未进行双参考自适应抵消的梯度探测器的工作门限高达 $100 \sim 200\text{nT}$, 这也是目前某些实用产品的性能指标. 如果探测器的 4 个分量探头一次安装使用, 不进行平行度和倾斜方向调整, 则在同样移动条件下不产生虚警的自适应双参考梯度探测器的工作门限为 $3 \sim 5\text{nT}$, 也远小于经全面调整的普通梯度探测器的工作门限.

前面的理论分析以及 6 套样机的试验结果均表明, 本文给出的自适应双参考磁场梯度探测技术具有良好的性能, 一方面能有效抵消载体的运动噪声, 同时可大大降低对梯度探测器加工与安装的工艺要求, 降低设备成本, 在磁性探测领域将具有良好的应用前景.

参考文献:

- [1] 叶平贤, 龚沈光. 舰船物理场 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992. 40- 53.
- [2] 林春生. 舰船磁场信号检测与磁性目标定位 [D]. 武汉: 海军工程学院兵器工程系, 1996.
- [3] WIDROW B, et al. Stationary and nonstationary learning characteristics of the LMS adaptive filter [J]. Proc of the IEEE, 1976, 64(5): 1151-1162.
- [4] 吴兆熊, 黄振兴, 黄顺吉. 数字信号处理(下册) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985. 52- 77.

作者简介:



林春生 男, 1961 年 11 月出生于广东惠东县, 1983 年毕业于海军工程学院, 1996 年获工学博士学位, 现为海军工程大学教授, 博士生导师, 主要从事数字信号处理、人工智能、传感器技术方面的研究工作.



向前 男, 1978 年 11 月出生于湖北恩施, 2000 年毕业于海军工程大学, 现为海军工程大学博士生, 主要研究方向为微弱信号检测与估计, 神经网络, 小波分析等, E2mail: brainmaker@163.com



龚沈光 男, 1939 年出生于江苏启东市, 现为海军工程大学教授、博士生导师, 获国家科技进步奖、军队科技进步奖、全国科学大会奖等各类奖项共 14 项, 主要研究方向为舰船物理场, 非触发引信, 现代信号处理等.