

三分量磁通门传感器轴定向问题研究

周国华, 肖昌汉, 闫 辉, 刘胜道

(海军工程大学 电气与信息工程学院 电磁环境与防护工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要: 利用三分量磁通门传感器进行磁场测量时需知传感器的三个方向轴,而在传感器的安装工程中其三轴方向难于固定,这给磁场测量带来了不便。针对上述问题,从三分量磁通门传感器测量原理出发推导了传感器三轴定向计算公式和有背景干扰磁场时的轴定向误差计算公式;设计了三分量磁通门传感器三轴定向的仿真实验和物理实验,以实验数据为基础分析了背景磁场干扰源对磁通门传感器三轴定向的影响。研究表明:在高精度磁场测量中必须严格控制背景干扰磁场大小来减小传感器轴定向误差,所得结论对磁场测量有一定的实际指导意义。

关键词: 磁通门传感器; 三轴定向; 背景干扰磁场; 磁场测量

中图分类号: TP216 文献标识码: A 文章编号: 1000-9787(2007)09-0049-04

Study on orientation of triaxial magnetic flux gate sensors

ZHOU Guo-hua, XIAO Chang-han, YAN Hui, LIU Sheng-dao

(College of Electrical and Information Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract When magnetic signals are measured by triaxial magnetic flux gate sensors, its axes should be known beforehand. However, some difficulties are met in fixing the axes of sensors, so the axes of sensors can't be known in advance. These cause some trouble in magnetic field measurement. Focusing on this problem, a formula is given, from which orientations of the axes of triaxial magnetic flux gate sensors can be achieved. Also, an error formula is deduced when considering background magnetic noises. Then a simulation experiment and an actual experiment are designed to analyze the influences on orientations of the axes of triaxial magnetic flux gate sensors caused by background magnetic noises. The results show that background magnetic noises should be strictly controlled to reduce errors in the magnetic field measurement with high accuracy. Therefore this is instructive in the magnetic field measurement.

Key words: magnetic flux gate sensors; orientation of three axes; background magnetic noises; magnetic field measurement

0 引言

目前,应用于静态磁场测量的传感器较多,其中,三分量磁通门传感器的应用较为广泛,如,用于舰艇磁场测量、地磁导航中地磁场测量、磁性检测站的磁场测量、水下定点磁场探测、金属探测、磁探伤等场合^[1]。在许多实际的工程环境中,较容易的是利用地球重力使三分量磁通门传感器的 z 轴按设置要求垂直向下安置,而传感器的 x 轴和 y 轴定向安装难度较大,这就给磁场测量带来了不便。因此,必须基于磁场测量数据反演出传感器的 x 轴和 y 轴的方向。

在没有任何磁干扰源和不考虑仪器本身误差的理想情况下,由传感器的磁场测量值较易定出传感器的 x 轴和 y 轴方向,但有很多因素会对三分量磁通门传感器轴定向带来较大的误差,如,传感器中 3 个测量线圈的正交度、传

器的非线性误差、被定向传感器仪器本身的磁场测量精度以及背景干扰磁场等。文献 [2~4] 分别对 3 个测量线圈的正交度误差、传感器非线性误差、传感器噪声的影响作了分析研究,前 3 个因素的影响可以最终归结为传感器本身带来的影响,但背景干扰磁场属于外部干扰,对传感器的影响还没有相关文献涉及,本文将着重对其进行分析。

1 三分量磁通门传感器测量原理

在静磁场测量中,一般所关心的是全局坐标系下的磁场测量数据。如图 1 所示,在利用三分量磁通门传感器进行磁场测量时,传感器坐标系下磁场测量值与全局坐标系下测量值存在如下转换关系

$$\begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos & -\sin & 0 \\ \sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_{x_c} \\ H_{y_c} \\ H_z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 H_x, H_y 和 H_z 为全局坐标系下的三分量磁场测量值; H_{x_c}, H_{y_c} 和 H_{z_c} 为传感器坐标系下的三分量磁场测量值; α 为两坐标系 X 轴的夹角。图 1 中, X_a, Y_a 和 Z_a 为全局坐标系, X_c, Y_c 和 Z_c 为传感器坐标系, Z_a 和 Z_c 轴垂直纸面向里; H_d 为地磁场水平分量; β 为地磁场水平分量与全局坐标系 X 轴的夹角; φ 为传感器 X 轴和地磁场水平分量的夹角。

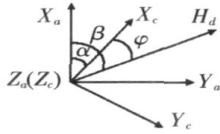


图 1 全局坐标系与磁传感器坐标系关系图

Fig 1 Relationship diagram of world coordinates and sensor local coordinates

由式 (1) 可知, 为了求得全局坐标系下的磁场, 首先, 必须知道 α 角。通常建立的全局坐标系和地磁场关系是已知的, 即认为 β 已知, 所以, 只要求出 α 即可求得 β 。因此, 在全局坐标系下进行磁场测量时必须先对传感器进行轴定向, 即先求出传感器 X 轴与地磁场水平分量的夹角 φ , 再得到传感器的 X 轴和 Y 轴方向。

2 理想条件下传感器的定向

所谓的理想条件就是指不考虑产生误差的诸多因素和传感器本身的误差, 所有测量条件都在理论上进行。在没有任何磁场干扰源影响的情况下, 传感器的磁场测量值是地球磁场分别在传感器 X 轴、 Y 轴和 Z 轴上的投影, 如图 2 所示。各物理量的意义为: Z_d 表示地磁场垂向分量, H_d 表示地磁场水平分量, H_{x_c} 表示传感器 X 轴测量值, H_{y_c} 表示传感器 Y 轴测量值, H_{z_c} 表示传感器 Z 轴测量值, φ 表示地磁场水平分量 H_d 与传感器 X 轴方向的夹角。

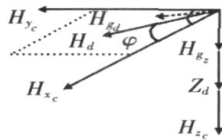


图 2 磁传感器测量示意图

Fig 2 Schematic diagram of measurement of magnetic flux gate sensors

由图 2 可以得到

$$\begin{cases} H_{x_c} = H_d \cos \varphi \\ H_{y_c} = H_d \sin \varphi \\ H_{z_c} = Z_d \cos \alpha \end{cases} \quad (2)$$

根据地磁图或地球磁场模式组可以得到传感器安装所处位置地磁场, 即可认为 H_d 和 Z_d 已知, 所以, 根据式 (2) 可以得到三分量磁通门传感器的轴定向公式

$$\alpha = \arctan(H_{y_c} / H_{x_c}) \quad (3)$$

由上式解出 α , 就可以确定三分量磁通门传感器的 X

轴和 Y 轴方向。

3 背景干扰磁场下传感器的定向

背景干扰磁场下传感器的轴定向与理想情况下的轴定向原理相同。如果背景干扰磁场大小和方向都为已知量, 那么, 根据理想情况下的定向公式也可以比较容易得到传感器的 X 轴和 Y 轴方向。如图 2 所示, H_{g_d} 为背景干扰磁场的水平分量, H_{g_z} 为背景干扰磁场的垂向分量, θ 为背景干扰磁场水平分量与传感器 X 轴的夹角。

由图 2 可以得到

$$\begin{cases} H_{x_c} = H_d \cos \varphi + H_{g_d} \cos \theta \\ H_{y_c} = H_d \sin \varphi + H_{g_d} \sin \theta \\ H_{z_c} = Z_d + H_{g_z} \end{cases} \quad (4)$$

由于地磁场和背景干扰磁场都是已知量, 所以, 可求得三分量磁通门传感器的轴定向公式

$$\theta = \arctan \frac{H_{y_c} - H_d \sin \varphi}{H_{x_c} - H_d \cos \varphi} \quad (5)$$

但是, 在实际问题中背景干扰磁场的大小和方向都很难知道, 利用公式 (5) 就无法对三分量磁通门传感器进行轴定向。一般情况下, 静态磁场测量环境都是低磁环境, 与地磁场相比可认为背景干扰磁场较小, 这样, 就可以忽略背景干扰磁场, 用式 (3) 直接对三分量磁通门传感器进行轴定向, 但必定引入了轴定向误差, 其误差大小直接影响到磁场测量的准确性。

4 传感器轴定向的误差分析

4.1 理论误差分析

为了使问题分析简单, 利用地球重力对三分量磁通门传感器的 Z 轴较易定向, 本文仅考虑传感器的 X 轴和 Y 轴的定向误差分析。如图 3 所示, H 为地磁场水平分量和背景干扰磁场水平分量矢量合。

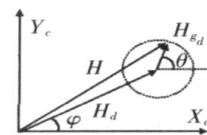


图 3 背景干扰磁场误差分析矢量图

Fig 3 Vector diagram of error analysis caused by background magnetic noise

由图 4 可以得到

$$\begin{cases} H_{x_c} = H_d \cos \varphi + H_{g_d} \cos \theta \\ H_{y_c} = H_d \sin \varphi + H_{g_d} \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

方程中未知数为 H_{g_d}, θ , 但只有 2 个方程, 理论上不可能得到方程的解。在有背景干扰磁场的情况下, 利用式 (3) 近似得到的 α 带有一定的误差, 不妨记为 α' , 利用三角公式

$$\tan(\alpha - \alpha') = (\tan \alpha - \tan \alpha') / (1 + \tan \alpha \tan \alpha')$$

经推导可以得到背景干扰磁场给传感器轴定向带来的误差公式

$$= - \frac{H_{g_d} [\sin \varphi - \cos \varphi \tan \theta]}{H_d \cos \varphi + H_{g_d} \cos \theta + (H_d \sin \varphi + H_{g_d} \sin \theta) \tan \theta} \quad (7)$$

在传感器轴定向误差分析中,最为关心的是背景干扰磁场所引起的轴定向最大误差。为此,设计了仿真实验,对传感器的轴定向误差进行了计算机仿真,分别对背景干扰磁场大小、传感器初始角、背景干扰磁场水平分量角和传感器所处地磁场大小所引起的传感器轴定向最大误差进行了研究分析。

4.2 仿真实验

1)当分析三分量磁通门传感器的轴定向最大误差与背景干扰磁场的水平分量 H_{g_d} 的关系时,仿真参数设置为: $H_d = 39\,680\text{ nT}$, 分别取 $0^\circ, 30^\circ$ 和 60° ; H_{g_d} 在 $100 \sim 1\,000\text{ nT}$ 中变化,取在 $0 \sim 360$ 中的轴定向误差最大值。由图 4 所示,三分量磁通门传感器的轴定向误差最大值与背景干扰磁场的水平分量近似成线性关系,且斜率为正。当地磁场水平分量不超过 $40\,000\text{ nT}$ 和背景干扰磁场水平分量大小不超过 $1\,000\text{ nT}$ 时,传感器轴定向最大误差约为 1.440° ;此时,由 $\varphi = 0^\circ$ 可知,的误差也约为 1.440° ;当不考虑测量误差的影响时,由式 (1) 可以计算 H_{x_c} 与 H_{y_c} 在 $[-1\,000\text{ nT}, 1\,000\text{ nT}]$ 范围时给全局坐标系下磁场测量值 H_x 与 H_y 带来的误差在 40 nT 以内。

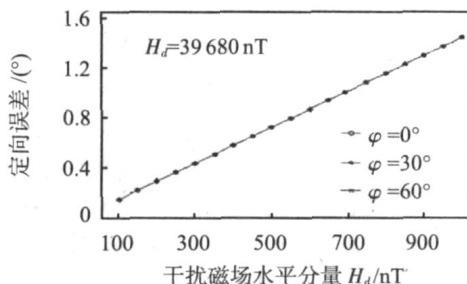


图 4 背景干扰磁场水平分量变化引起的误差曲线

Fig 4 Error curves caused by horizontal component of background magnetic noise

2)当分析三分量磁通门传感器的轴定向最大误差与传感器 x 轴所安装的初始角度的关系时,仿真参数如下设置 $H_{g_d} = 1\,000\text{ nT}, H_d = 39\,680\text{ nT}$, 在 $0 \sim 360$ 间变化,取在 $0 \sim 360$ 中的轴定向误差最大值。由图 5 所示,三分量磁通门传感器的轴定向误差与传感器 x 轴所安装的初始角度几乎无关,即传感器轴定向最大误差在一个圆周内具有相对恒定性。

3)当分析三分量磁通门传感器的轴定向最大误差与干扰磁场水平分量角度的关系时,仿真参数设置为: $H_{g_d} = 1\,000\text{ nT}, H_d = 39\,680\text{ nT}, \varphi = 0^\circ$; 在 $0 \sim 360$ 中变化。由图 6 所示,三分量磁通门传感器的轴定向误差与 θ 近似

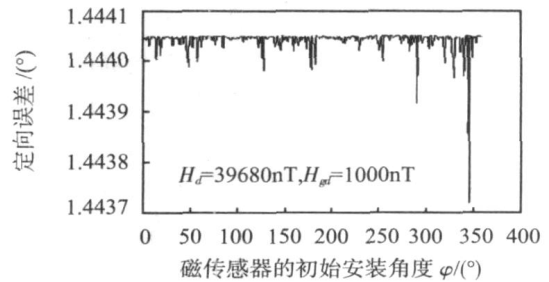


图 5 传感器安装初始角变化引起的误差曲线

Fig 5 Error curves caused by initial angle of magnetic flux gate sensor

成正弦关系。在地磁场水平分量和背景干扰磁场大小不变的前提下,当背景干扰磁场水平分量与传感器 x 轴垂直时,传感器轴定向误差最大。

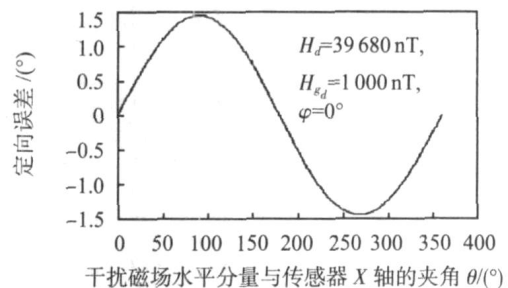


图 6 干扰磁场水平分量角度变化引起的误差曲线

Fig 6 Error curves caused by horizontal component angle of background magnetic noise

4)当分析三分量磁通门传感器的轴定向最大误差与地磁场水平分量 H_d 的关系时,仿真参数设置为: $H_{g_d} = 1\,000\text{ nT}, \varphi = 0^\circ, H_d$ 在 $34\,000 \sim 39\,680\text{ nT}$ 中变化,取在 $0 \sim 360$ 中的轴定向误差最大值。由图 7 所示,三分量磁通门传感器的轴定向误差与地磁场水平分量近似成线性关系,且斜率为负,即地磁场水平分量越大,其引起的轴定向误差最大值越小。

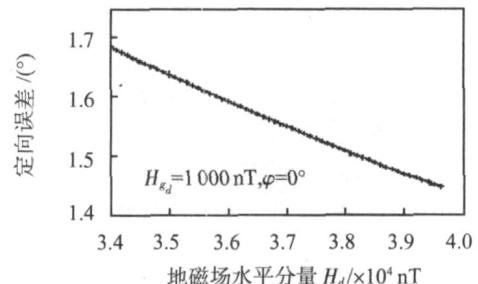


图 7 地磁场水平分量变化引起的误差曲线

Fig 7 Error curves caused by horizontal component of geomagnetic field

4.3 传感器轴定向物理实验

以 3 个三分量磁通门传感器为对象,分别设计了 3 种不同磁干扰源下的轴定向误差实验,操作步骤如下:

将 3 个三分量磁通门传感器置于仅存在地磁的空间中,在无磁干扰的情况下测量磁场,调整各传感器的 x 轴至地磁北方向即可得到传感器所处的地磁场值。为了使传感器轴定向误差研究具有一般性,将 3 只传感器的 x 轴与

地磁北成不同角度,在无磁干扰的情况下进行磁场测量,从测量数据中可以计算出传感器的 x 轴与地磁北的偏角,该偏角作为传感器 x 轴的真实偏角;然后,分别在磁干扰源 #, #, # 的情况下测量磁场,从中可以计算得到干扰磁场;按照公式 (7) 计算轴定向误差,得到的实验结果如表 1 所示,其中,各物理量的意义同上。由表 1 可知,3 号传感器在 # 磁干扰源情况下产生的定向误差最大,达到 1.7° ;分析其原因是 # 磁干扰源在 # 传感器处产生的背景干扰磁场水平分量达到了 1024 nT ,且其与传感器 x 轴的初始偏角接近 90° 。实验结果与理论分析及仿真实验具有很好的一致性,从而验证了理论分析与仿真实验的准确性,进一步说明了本文的分析方法可以应用于工程实际情况。

表 1 三分量磁通门传感器轴定向误差实验结果

Tab 1 Experiment result of orientation error of triaxial magnetic flux gate sensors

磁干扰源	传感器编号	$H_{gd}(\text{nT})$	$(^\circ)$	$(^\circ)$	误差 $(^\circ)$
#	1#	254	135.16	30.06	0.4191
	2#	224	131.02	118.98	0.0777
	3#	322	163.76	60.91	0.5332
#	1#	601	147.50	30.06	0.9181
	2#	802	154.30	118.98	0.7618
	3#	1024	158.95	60.91	1.7269
#	1#	76	147.36	30.06	0.1154
	2#	75	60.35	118.98	0.1068
	3#	120	160.06	60.91	0.2014

备注:实验所用三分量磁通门传感器测量精度为 1 nT

5 结束语

针对静态磁场测量中三分量传感器三轴难于固定的特

点,通过理论分析,给出了传感器轴定向计算公式和背景干扰磁场下传感器轴定向误差计算公式。借助计算机仿真,得到了背景干扰磁场对三分量磁通门传感器轴定向的影响规律。实验室三分量磁通门传感器轴定向误差实验有效地验证了理论分析和计算机仿真实验所得结论的准确性。结果表明:仅考虑背景干扰磁场对传感器轴定向影响时,引起误差的因素为:传感器所处地磁场水平分量大小 H_d 、背景干扰磁场水平分量的大小 H_{gd} 及方向角、传感器 x 轴与地磁场水平分量的夹角。在工程实际中,当传感器所处地磁场水平分量不超过 40000 nT 时,如果要把传感器轴定向误差最大值控制在 0.5 以内,则背景干扰磁场水平分量应该控制在 350 nT 以内。因此,本文分析提供了传感器安装环境的磁性要求,对实际工程有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 涂 疑,郭文生,曹大平.磁通门传感器的应用与发展[J].水雷战与舰船防护,2002(1):36-38.
- [2] 胡海滨,林春生,龚沈光.基于共轭次梯度法的非理想正交三轴磁传感器的修正[J].数据采集与处理,2003,18(1):88-91.
- [3] 郭志友,孙慧卿.磁传感器的非线性误差修正技术[J].传感器技术,2004,23(5):54-58.
- [4] Scouten D C. Sensor noise in low-level fluxgate magnetometer[J]. IEEE Trans Magn, 1972(8):223-231.

作者简介:

周国华(1981-),男,江苏丹阳人,博士研究生,研究方向为电磁环境与防护技术。

(上接第 44 页)

- [3] Svensson S E M J, Granqvist C G. Electrochromic tungsten oxide films for energy efficient windows [J]. Sol Energy Mater, 1984(11):29-34.
- [4] Cotton F A, Wilkinson G. Advances in organic chemistry [M]. 5th ed. Wiley: New York, 1968: 829.
- [5] Depero L E, Ferroni M, Guidi V, et al. Preparation and microstructural characterization of nanosized thin film of $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ as a novel material with high sensitivity towards NO_2 [J]. Sens Actuators B, 1996(36):381-383.
- [6] Wang Xusheng, Sakai G, Shimanoe K, et al. Spin-coated thin films of $\text{SiO}_2\text{-WO}_3$ composites for detection of sub-ppm NO_2 [J]. Sens Actuators B, 1997(45):141-146.
- [7] Ferroni M, Guidi V, Martinelli G, et al. Gas-sensing applications

of W-Ti-O-based nanosized thin films prepared by r.f. reactive sputtering [J]. Sens Actuators B, 1997(44):499-502.

- [8] Hoel A, Reyes L F, Saukko S, et al. Gas-sensing with films of nanocrystalline WO_3 and Pd made by advanced reactive gas deposition [J]. Sens and Actuators B, 2005(105):283-289.
- [9] 傅 刚,陈志雄,张进修. SnO_2 气敏元件烧制工艺与电性能关系的复阻抗分析 [J]. 无机材料学报, 2000(15):822-826.
- [10] Jiang Yong, Song Wulin, Xie Changsheng, et al. Electrical conductivity and gas sensitivity to VOCs of V-doped ZnFe_2O_4 nanoparticles [J]. Materials Letters, 2006(60):1374-1378.

作者简介:

罗世钧(1980-),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事纳米材料制备和气敏特性研究。

(上接第 48 页)

- [3] Ramkumar M, Memon N. HARPS: hashed random preloaded subset key distribution [D/OL]. Cryptology ePrint Archive, http://eprint.iacr.org/2003/170, 2006-05-17.
- [4] Du W, Deng J, Han Y S. A key management scheme for wireless

sensor networks using deployment knowledge [C]. Proceedings of the IEEE INFOCOM 2004, 2004: 586-597.

作者简介:

潘 康(1981-),男,山西万荣人,硕士,主要研究方向为无线传感器网络密钥管理,计算机网络安全。