

Research on the Processing Method of Calibration Magnetic Field for Inductive Magnetic Sensor*

WAN Yunxia^{1,2}, WANG Yanzhang^{1,2}, CHENG Defu^{1,2*}

(1. Key Laboratory for Geophysical Instrumentation of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130026, China;
2. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: The magnetic field produced by the electriferous solenoid was regarded as even magnetic field in the sensitivity test of inductive magnetic sensor. But this presupposition will bring on a result that the metrical sensitivity is less than the real sensitivity. The non-uniformity of the magnetic field produced by the solenoid has been analyzed through the theoretics and the emulation experimentation. Then the mean method was put forward to process the non-uniformity. Compared the metrical sensitivity with the theoretical sensitivity, the conclusion was given: the error between the metrical sensitivity processed by mean method and the theoretics sensitivity is less than that of the unprocessed metrical sensitivity.

Key words: sensitivity; solenoid; non-uniformity; mean method

EEACC: 7230 doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2013.04.016

感应式磁传感器标定磁场处理方法研究*

万云霞^{1,2}, 王言章^{1,2}, 程德福^{1,2*}

(1. 吉林大学地球信息探测仪器教育部重点实验室, 长春 130026; 2. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 长春 130026)

摘要: 在感应式磁传感器灵敏度测试中将通电长直螺线管内部磁场近似为均匀恒定磁场的假设, 导致实测灵敏度曲线值低于真实值。对通电长直螺线管内部磁场分布的非均匀性进行理论论证与仿真实验, 提出采用均值法对标定磁场的非均匀性进行处理。将处理前后的实测灵敏度曲线与理论曲线进行对比后得出结论: 处理后的曲线更接近理论曲线。

关键词: 灵敏度; 通电螺线管; 非均匀性; 均值法

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)04-0520-05

磁传感器是将磁场信号转换成电信号的一种传感器。在对表征磁场信号的电信号进行处理之前, 必须将其还原成真实的磁场信号, 因此需要获取磁传感器对磁场信号在幅度及相位上的影响曲线, 即表征磁场与电信号关系的曲线, 称之为灵敏度曲线, 这个过程即传感器的标定。对于新研制的传感器进行标定, 其标定数据又可以作为改进传感器设计的一个重要依据。传感器使用、存储一段时间后, 也须对其主要技术指标进行复测, 称为校准(与标定本质上时一样的), 以确保其性能指标达到要求。

一个高精度的传感器, 如果标定方法不当, 很可能在实测中产生较大的误差; 反之, 一个精度不太高的传感器, 如果标定方法得当, 反而可能在实测中产

生较小的误差。所以, 传感器的标定对于其测量结果有着很大的影响^[1-2]。影响传感器标定精度的因素有很多, 如标定环境, 标定磁场, 测试设备精度, 数据处理方法等。本文就传感器的标定磁场问题提出了解决办法。传感器的标定需要标准的均匀磁场, 且磁场分布范围至少与传感器的体积相等。实际的磁场产生装置中, 只有通电的长直螺线管基本可以满足条件。很多实验者均将通电长直螺线管产生的磁场看作均匀磁场, 以此作为传感器标定磁场, 这样的假定使标定结果产生很大的误差。本文考虑了此磁场不均匀性的存在并对此进行理论论证, 采用均值法对传感器各点所处磁场进行分析计算, 降低了上述假定带来的误差, 在一定程度上提高了传感器的标定精度。

项目来源: 国家自然科学基金项目(41274183)

收稿日期: 2013-03-15 修改日期: 2013-04-17

1 理论标定曲线

1.1 传感器工作原理

磁传感器的磁敏感部分由磁芯和线圈组成,磁芯的作用是增加磁导率从而增加感应电压,绕制在磁芯周围的感应线圈与测量电路一起构成闭合回路。当线圈所处位置的磁通量发生变化时,在线圈的两端即产生感应电压。由于感应电压较小,需要经过放大电路放大后进行处理。传感器测量原理如图1所示^[3]。

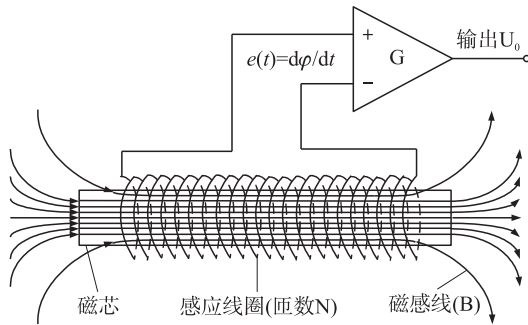


图1 传感器测量原理图

1.2 感应线圈等效模型

要确立感应电压与磁场的关系,必须建立感应线圈的等效模型。在线圈基本模型中,线圈电感、直流电阻及分布电容组成的二阶网络如图2所示^[4-7]。图中, R_L 为线圈的直流电阻, C 为分布电容, L_p 为电感, e 为感应电动势, u_0 为线圈输出电压。

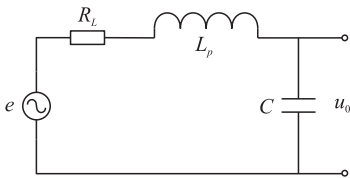


图2 线圈基本模型等效电路

由传感器的初始灵敏度公式 $e/B = j\omega NS\mu_{app}$ ^[8-9] 可得,当角频率为 ω 时,输出电压 u_0 为

$$U_0 = \frac{e}{1 - \omega^2 CL_p + j\omega R_L C} = \frac{j\omega NS\mu_{app} B}{1 - \omega^2 CL_p + j\omega R_L C} \quad (1)$$

其中, μ_{app} 为磁芯的有效磁导率, B 为线圈所处磁场的磁感应强度, N 为线圈单位长度的匝数, S 为磁芯横截面积, j 为虚数单位。由式(1)可以得到传感器灵敏度公式为

$$\frac{U_0}{B} = \frac{j\omega NS\mu_{app}}{1 - \omega^2 CL_p + j\omega R_L C} \quad (2)$$

1.3 理论灵敏度曲线

将式(2)中各参数的具体数值代入公式中,可以得到传感器的幅频、相频特性曲线。如图3所示,其频带范围为 10^{-4} Hz ~ 10^4 Hz。

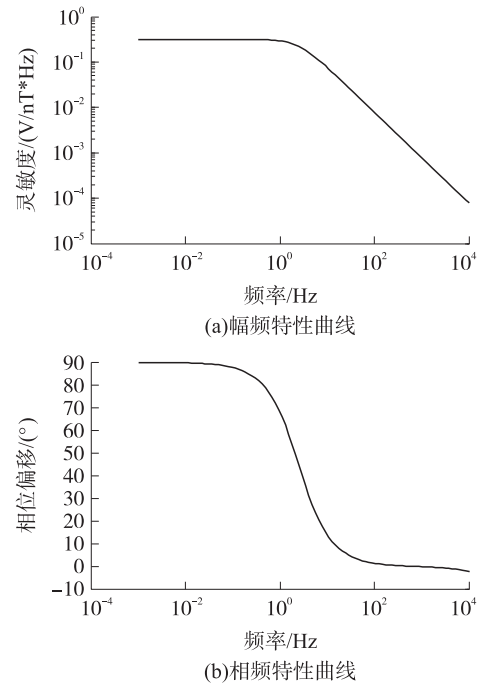


图3 理论计算传感器灵敏度曲线

2 标定磁场均值法处理

传感器的标定需要标准的均匀磁场,且磁场分布范围至少要与传感器体积相等。通电长直螺线管内部轴线上的磁场可近似认为是均匀磁场,并可通过改变螺线管长度和直径来改变磁场分布范围,被广泛应用于磁传感器标定中作为标准磁场。但严格来讲,传感器各部位所处磁场会有细微差别,尤其是边缘部分差别较大。对于这一差别的忽略,表现在标定结果中即造成了标定结果误差的增大,且比真实值偏小。为了解决标定磁场给标定结果带来的误差,必须正视标定磁场不均匀性的存在,并对其进行合理有效地处理。

省略推导过程,直接给出通电长直螺线管内部磁场的磁感应强度与场点的关系式^[10-13](以螺线管轴线中点为原点)。

$$B_\rho = \frac{\mu_0 n I a}{2\pi} \int_0^\pi \left[\frac{\cos\phi}{\sqrt{(z-L)^2 + a^2 + \rho^2 - 2a\rho\cos\phi}} - \frac{\cos\phi}{\sqrt{(z+L)^2 + a^2 + \rho^2 - 2a\rho\cos\phi}} \right] d\phi \quad (3)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 n I}{2\pi} \int_0^\pi \frac{a^2 - a\rho\cos\phi}{a^2 + \rho^2 - 2a\rho\cos\phi} \left[\frac{z+L}{\sqrt{(z+L)^2 + a^2 + \rho^2 - 2a\rho\cos\phi}} - \frac{z-L}{\sqrt{(z-L)^2 + a^2 + \rho^2 - 2a\rho\cos\phi}} \right] d\phi \quad (4)$$

其中 B_z 为轴线方向的分量, B_ρ 为垂直于轴线方向的分量, a 为螺线管半径, ρ 为场点到轴线的距离, ϕ 为 a 与 ρ 的夹角, z 为场点在 z 轴上的投影, $2L$ 为螺

线管的长度, N 为螺线管单位长度的匝数, I 为螺线管的通电电流。

因传感器只能感应与其平行的磁场分量, 而传感器又平行放置在通电长直螺线管中进行标定, 所以, 本文只需讨论 B_z 分量。对于螺线管轴线上的点, $\rho=0$, 代入式(4)可得

$$B_z = \frac{\mu_0 n I}{2} \left[\frac{z+L}{\sqrt{(z+L)^2 + a^2}} - \frac{z-L}{\sqrt{(z-L)^2 + a^2}} \right] \quad (5)$$

式(5)即为大家常用的计算螺线管内部磁场的近似公式。非轴线上的磁感应强度计算公式由式(4)来获取。正常计算式(4)的积分有困难, 本文采用高精度的复合高斯求积公式对式(4)进行求解。为验证该方法的求解精度, 对式(4)中取 $\rho=0$ 进行计算, 与式(5)的直接计算结果进行对比, 其对比曲线如图4所示。

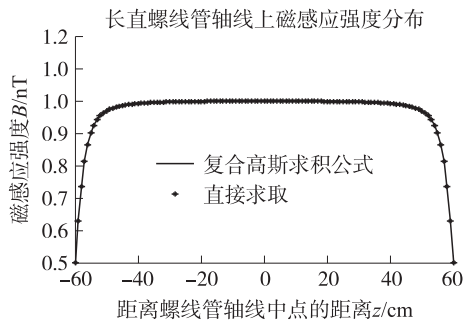


图4 两种方法求取的磁感应强度分布曲线对比

从图4结果可以看出, 两种方法得到的曲线基本吻合, 证明复合高斯求积公式可以用来求解式(3)和式(4)。

如图5所示, 为螺线管参数一定的情况下, 其内部距离中心轴线不同距离处的磁感应强度分布曲线。

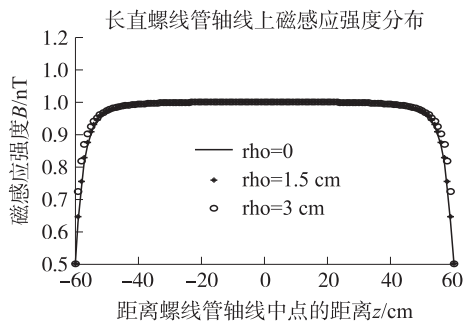


图5 螺线管内部轴向上距离轴线不同距离处的磁场分布曲线

从图5可以看出, 螺线管内部磁场在横向分布上是均匀的。但是, 在螺线管的两个端点处, 其磁感应强度值已经降低至50%, 并且下降区域占据了整个螺线管长度的1/3。在这种情况下, 将螺线管产生的磁场在整个区域看成是均匀一致的, 势必对计

算结果产生影响, 使得实测值比真实值偏小。在假定传感器在轴向上每个位置点处的灵敏度相等的前提下, 采用取平均值的方式处理螺线管内部磁场。

假定产生标定磁场的螺线管长度为66 cm, 则其内部与中心轴线相距为 ρ 的轴线上的磁感应强度值计算结果如表1所示。其中, l 为轴线距离。

表1 螺线管内部不同位置处的磁感应强度值

l/cm	B/nT			
	$\rho=0$	$\rho=(1/3)R$	$\rho=(2/3)R$	$\rho=R$
-33	0.502 6	0.502 6	0.502 6	0.502 6
-28	0.905 2	0.905 6	0.906 9	0.909 1
-23	0.973 6	0.973 7	0.973 9	0.974 2
-18	0.990 4	0.990 4	0.990 5	0.990 6
-13	0.996 5	0.996 5	0.996 6	0.996 6
-8	0.999 1	0.999 1	0.999 2	0.999 2
-3	1.000 2	1.000 2	1.000 2	1.000 2
0	1.000 3	1.000 3	1.000 3	1.000 3

从表1可以看出, 在螺线管的中间一段区域, 螺线管横向和轴向的磁场分布都很均匀, 在接近接近两端处, 磁场强度急速下降, 且不同的轴向上的磁场值也有一些差别。在实际计算时, 如果对这种非均匀性不做处理, 标定结果就会产生误差。利用均值法对其进行处理, 得到的螺线管的平均磁感应强度值为0.951 9 nT, 与中间值的相对误差约为5.1%。

3 传感器室内标定实验

本文提到的感应式磁传感器属于弱磁传感器, 对交变的磁信号比较敏感, 在室内标定时由于存在很强的工频干扰等电磁干扰, 会使传感器输出达到饱和。而绝对的“零磁”空间国内只有中国地震局有, 为了满足传感器的标定要求, 只能在现有的屏蔽室的屏蔽筒中对传感器进行标定。采集系统采用超低频动态信号分析仪, 信号源由超低频信号发生器提供。实验中, 给定激励信号, 在螺线管中心轴线上中间位置处产生磁感应强度为1 nT的稳定磁场, 测量不同频率时的感应电压输出。实验测得的传感器感应电压与频率的关系如表2所示。

图6、图7所示为均值法处理前后的实测灵敏度曲线与理论灵敏度曲线的对比。从图6、图7可以看出, 处理后的曲线与理论曲线重合的很好, 尤其是在低频段有所改善。但是在1 kHz到10 kHz的高频段, 理论计算值明显高于实测值。这是由于实

际电路中存在一个低通滤波器对高频段的数据产生了影响。另外,理论曲线由于在全频段都采用一个有效磁导率,而用来制作磁芯的坡莫合金材料在低频段有很高的磁导率,在高频段磁导率有所下降,从而导致实测曲线与理论曲线在高频段无法重合的现象。本文暂不对理论曲线的修正方法进行介绍。

表2 传感器感应电压与频率的关系

频率 f/Hz	感应电压 U/V	频率 f/Hz	感应电压 U/V
0.100 00	0.036 605	46.416 00	0.891 259
0.146 78	0.052 521	68.130 00	0.891 259
0.215 44	0.076 394	100.000 00	0.891 259
0.316 23	0.108 224	146.780 00	0.891 259
0.464 16	0.159 153	215.450 00	0.891 259
0.681 30	0.229 181	316.230 00	0.891 259
1.000 00	0.318 307	464.170 00	0.891 259
1.467 80	0.445 629	681.300 00	0.875 343
2.154 40	0.533 164	1 000.000 00	0.779 851
3.162 30	0.652 529	1 467.800 00	0.700 275
4.641 60	0.716 190	2 154.500 00	0.604 783
6.813 00	0.748 021	3 162.300 00	0.509 291
10.000 00	0.779 851	4 641.700 00	0.413 799
14.678 00	0.795 767	6 813.000 00	0.270 561
21.545 00	0.811 682	10 000.000 00	0.198 942
31.623 00	0.891 259		

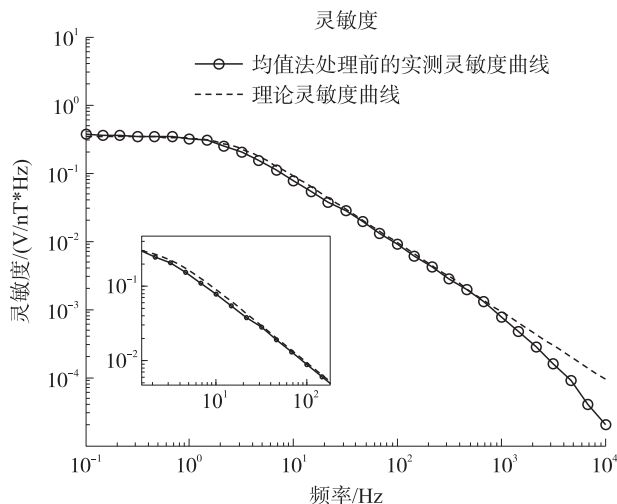


图6 均值法处理前的实测灵敏度曲线与理论灵敏度曲线对比

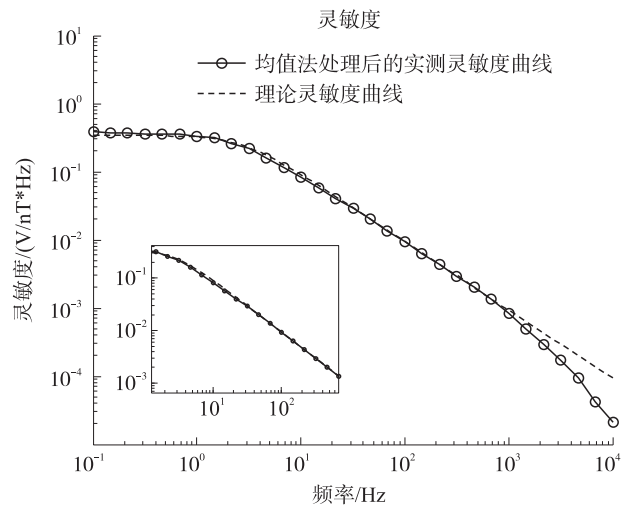


图7 均值法处理后的实测灵敏度曲线与理论灵敏度曲线对比

4 结论

针对传感器标定中标定磁场的均匀性问题,提出了一种基于均值法的标定磁场处理方法。通过传感器灵敏度理论曲线的计算及实测曲线处理后的对比结果可以看出,该方法对于提高传感器灵敏度的计算精度效果显著。但该方法在计算时没有考虑磁芯磁导率分布不均匀、线圈绕制不均匀及传感器与骨架间空隙对结果的影响,导致处理结果与传感器真实曲线存在一定差别。下一步工作将着重分析以上因素的影响,以便获取更真实的结果,使传感器在实际工作时更准确地表征磁场信息。

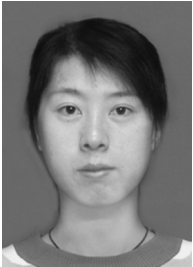
参考文献:

- [1] 蒋安林,周德华,张晓兵,等. 感应式磁传感器的设计[J]. 航电技术,2011,31(12):35-37.
- [2] 谢石林,陈胜来,张希农,等. 传感器标定的神经网络杂交建模方法[J]. 机械工程学报,2010,46(22):6-15.
- [3] 邵英秋. 宽频带感应式磁传感器的研制[D]. 吉林大学,2012.
- [4] 沈幼文,陈文华,李锡银. YDC-1 型音频大地电磁仪的设计和研制[J]. 河北地质学院学报,1982:1-16.
- [5] 耿胜利,赵庆安. MC-01 超低铁芯磁探头的研制[J]. 传感器世界,2002(4):13-15.
- [6] 洪泽宏,何乃明,王占辉,等. 关于磁传感器设计中的技术问题[J]. 海军工程大学学报,2005(5):76-81.
- [7] 耿胜利. GCI-1A 型磁感应传感器的铁芯工艺研究[J]. 仪表技术与传感器,1988(5):21-25.
- [8] 邵英秋,王言章,程德福,等. 基于磁反馈的宽频带磁传感器的研制[J]. 仪器仪表学报,2010,31(11):2461-2466.
- [9] 邵英秋,程德福,王言章,等. 高灵敏度感应式磁传感器的研究[J]. 仪器仪表学报,2012,33(2):349-355.
- [10] 刘耀康. 螺线管磁场的数值解[J]. 高师理科学刊,2008,28(1):60-64.

- [11] 赵春旺,王克勋,刘前.有限长螺线管磁场的数值计算与分析[J].工科物理,1997(4):14-17.
- [12] 张星辉.圆电流磁感线的分布及磁感应强度的函数表达式

[J].大学物理,2006,25(1):32-37.

- [13] 丁健.载流有限长密绕螺线管的磁场分布[J].大学物理,2009,28(8):28-34.



万云霞(1980-),女,2005年于吉林大学获得学士学位,2007年于吉林大学获得硕士学位,现为吉林大学博士研究生,主要研究方向为频率域电磁探测信号处理,wanyx@jlu.edu.cn;



程德福(1959-),男,1983年于长春地质学院获学士学位,1988年于长春地质学院获硕士学位,2002年于吉林大学获博士学位,现为吉林大学教授、博士生导师,主要研究方向为弱信号检测、地下信息探测仪器,chengdefu@jlu.edu.cn。