

# 星载感应式空心磁芯磁传感器的研究\*

王言章<sup>1,2</sup>, 黄文雪<sup>1,2</sup>, 时洪宇<sup>1,2</sup>

(1. 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:**优化设计了频率带宽为1 Hz~10 kHz的空心磁芯感应式磁传感器。首先提出空心结构的磁芯,分析空心磁芯的退磁因数和有效磁导率,并仿真、实测空心磁芯感应线圈的磁通,得出一定壁厚的空心磁芯感应线圈的磁通可以等于相同长径比棒状磁芯感应线圈的磁通。然后分析空心磁芯感应式磁传感器的灵敏度与噪声,通过数学算法优化噪声公式达到要求的噪声指标和较低重量。为验证理论分析,设计空心磁芯感应式磁传感器,在屏蔽室对空心磁芯感应式磁传感器的性能进行测试,频率高于400 Hz时灵敏度为0.73 V/nT。100 Hz时噪声为0.06 pT/Hz<sup>1/2</sup>,总重量为80 g。实测的空心磁芯感应式磁传感器的灵敏度与噪声和理论分析一致。空心磁芯感应式磁传感器与THEMIS相比具有噪声低、重量轻的优点,能够满足空间电磁探测的实用条件。

**关键词:**重量轻;空心磁芯;灵敏度;噪声

中图分类号: TP212.13 TH76 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.99

## Inductive magnetic sensor with hollow core for space applications

Wang Yanzhang<sup>1,2</sup>, Huang Wenxue<sup>1,2</sup>, Shi Hongyu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Geophysical Instrumentation of Ministry of Education, Changchun 130026, China;

2. College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

**Abstract:** This paper optimally designs a hollow-core inductive sensor with bandwidth range from 1 Hz to 10 kHz. Firstly, we utilize a magnetic core with hollow structure, and analyze demagnetizing factor and efficient magnetic permeability of hollow core. The magnetic flux of hollow core sensor coil is simulated and measured, and is found equal to the one of rod core sensor coil with the same ratio of length and diameter. Then, sensitivity and noise of inductive magnetic sensor with hollow core are analyzed and the performances of low noise and low weight are achieved by optimizing the noise formula using mathematic algorithm. To verify the theoretical analysis, this paper designs an inductive magnetic sensor with hollow core and tests the performance of the inductive magnetic sensor with hollow core in shielded environment yielding sensitivity of 0.73 V/nT corresponding the frequency higher than 400 Hz and noise of 0.06 pT/Hz<sup>1/2</sup> at frequency of 100 Hz. Under this condition, the whole configuration weighs 80 g. The process is consistent with the theoretical analysis. Compared with THEMIS, the inductive magnetic sensor with hollow core has merits of low noise and light weight, and can satisfy the needs of Space Electromagnetic Science.

**Keywords:** light weight; hollow core; sensitivity; noise

## 0 引言

感应式磁传感器因其具有灵敏度高<sup>[1]</sup>、稳定性好<sup>[2]</sup>的优点而被广泛应用于大地电磁测深<sup>[3]</sup>、空间物理学<sup>[4]</sup>、

地球物理学<sup>[5]</sup>、生物医学<sup>[6]</sup>等。近些年,在提高感应式磁传感器的灵敏度和降低噪声方面有很大进步<sup>[7-9]</sup>。然而,在空间电磁探测中,感应式磁传感器作为星载磁力仪存在体积大、重量沉的缺陷,所以在空间电磁探测中,减轻感应式磁传感器的体积和重量变成研究重点。

在优化星载感应式磁传感器的方面,国外如法国2005年的 DEMETER<sup>[10]</sup>,磁芯由坡莫合金细丝组成长方体,长170 mm,10 Hz 时噪声为1 pT/Hz<sup>1/2</sup>,磁传感器的总重量为450 g;2006年的 THEMIS<sup>[11]</sup>,磁芯形状为棒状长170 mm,频率10 Hz 时噪声为0.85 pT/Hz<sup>1/2</sup>,总重量为568 g;2014年的 Bepi Colombo<sup>[12]</sup>,磁芯形状为“空竹”长100 mm,频率10 Hz 时噪声为2 pT/Hz<sup>1/2</sup>。以上在降低感应式磁传感器重量的同时也相应提高了磁传感器的等效磁场噪声。在单体感应式磁传感器中如以色列 Paperno E 等人<sup>[13]</sup>研制的小型低功耗感应式磁传感器在体积和性能上接近于磁通门传感器,磁芯为棒状,总重量为210 g,其频带为20 mHz ~ 2 kHz,噪声为300 fT/Hz<sup>1/2</sup>在1 kHz,功耗为5 mW。在此基础上 Grosz A 等人<sup>[14]</sup>研制的将放大电路和电池安置在磁芯内部,将磁芯本身作为静电屏蔽来减少感应式磁传感器的体积和重量,并通过磁芯和线圈的优化设计实现了在相同频带上噪声为600 fT/Hz<sup>1/2</sup>在1 kHz。但以上两种感应式磁传感器高频段频带窄,噪声较大,在空间电磁探测的信号微弱处无法检测到电磁信号。国内如吉林大学邵英秋等人<sup>[15]</sup>采用叠片式长方体磁芯,并在磁芯两侧各加磁通收集器来提高磁芯中央位置的有效磁导率,降低了磁芯的体积和重量,但相对于空心磁芯其总体重量还可以进一步减低。

针对以上的不足,本文采用空心结构的磁芯。传统磁芯的形状为棒状或长方体,占据了感应式磁传感器重量的主要部分<sup>[16-17]</sup>。将空心结构的磁芯应用到感应式磁传感器中,在减轻感应式磁传感器重量的同时达到与 THEMIS 相似的噪声水平。空心磁芯感应式磁传感器铜漆包线直径为0.08 mm,线圈匝数为11 000,总重量80 g(单体),在100 Hz 时噪声为0.06 pT/Hz<sup>1/2</sup>低于 THEMIS 的0.08 pT/Hz<sup>1/2</sup>。

## 1 空心磁芯感应式磁传感器的原理分析

### 1.1 感应式磁传感器的灵敏度

如图1所示,感应式磁传感器由前端敏感元件和后端放大电路组成,其中, $R$ 为感应线圈的直流电阻, $C$ 为线圈间的分布电容, $L_p$ 为感应线圈的电感, $L_s$ 为反馈线圈的电感, $R_f$ 为反馈电阻, $G$ 为放大电路的放大倍数。若线圈的匝数为 $n$ ,磁感应强度为 $B$ ,磁芯的有效面积为 $S$ ,可得感应式磁传感器的灵敏度为式(1)。其中 $M$ 为感应线圈与反馈线圈之间的互感, $\mu_a$ 是磁芯的有效磁导率,由磁芯的初始磁导率和退磁因数决定。若在线圈与后端放大电路相同的情况下,感应式磁传感器的灵敏度主要由磁芯的横截面积 $S$ 和有效磁导率 $\mu_a$ 决定,若空

心磁芯的 $S_b \cdot \mu'_a$ 值与棒状磁芯的 $S_r \cdot \mu_a$ 值相同,即空心磁芯感应式磁传感器与棒状磁芯感应式磁传感器灵敏度相同,则可将空心磁芯应用到感应式磁传感器中来减轻重量。

$$\frac{V}{B} = \frac{-j\omega n S \mu_a G}{(1 - L_p C \omega^2) + j\omega(RC + GM/R_f)} \quad (1)$$

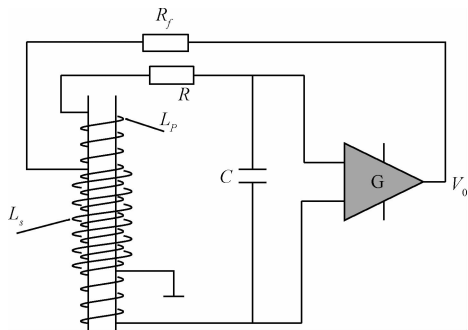


图1 感应式磁传感器原理

Fig. 1 Principle of induction magnetic sensor

### 1.2 空心磁芯的退磁因数

坡莫合金磁芯在外磁场中会被磁化,由于退磁场 $H_d$ 的存在使磁芯的有效磁导率 $\mu_a$ 要比磁芯的初始磁导率 $\mu_r$ 低很多。将磁芯内部的磁感应强度 $B_n$ 与外磁场的磁感应强度 $B_{ext}$ 比值定义为磁芯的有效磁导率 $\mu_a$ ,则有<sup>[18]</sup>:

$$\mu_a = \frac{B_n}{B_{ext}} = \frac{\mu_r}{1 + N_z(\mu_r - 1)} \quad (2)$$

式中: $N_z$ 为磁芯沿 $Z$ 轴方向的退磁因数,磁芯的形状为椭球体时其退磁因数是均匀的,关于椭球的退磁因数由 Osborn J. A. (1945) 理论推出<sup>[19]</sup>。空心磁芯的退磁因数 $N_z$ 可通过对贝塞尔函数进行数值积分或者展开成高阶超几何函数来求解,但计算较复杂不易实现。为便于计算将 $N_z$ 的表达式变成含有椭圆积分的形式,通过求解第一类完全椭圆积分来得出 $N_z$ 的值。

设空心磁芯的外径为 $R_2$ ,内径 $R_1 = aR_2$ ,长径比 $\tau = L/2R_2$ ,当空心磁芯的壁厚较薄( $a \rightarrow 1$ )时,沿 $Z$ 轴方向的退磁因数 $N_z$ 的表达式如式(3)所示<sup>[20]</sup>。

$$N_z(a \rightarrow 1, \tau) = \frac{1-a}{2\pi\tau} \left[ \frac{3}{2} + \log 8 - \frac{1}{\tau} K\left(-\frac{1}{\tau^2}\right) - \log(1-a) \right] \quad (3)$$

式中: $K$ 为第一类完全椭圆积分, $L$ 为空心磁芯的长。当 $a \rightarrow 1$ 时有:

$$\frac{1}{\tau} K\left(-\frac{1}{\tau^2}\right) = \frac{1}{\sqrt{1+\tau^2}} K\left(\frac{1}{1+\tau^2}\right) \quad (4)$$

若 $L = 200$  mm, $R_2 = 7.5$  mm,则根据式(3)、(4)画出 $N_z$ 随 $a$ 的变化曲线如图2所示。

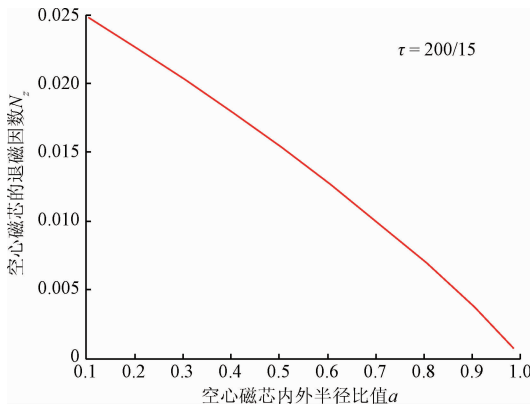


图 2 空心磁芯退磁因数的分布曲线

Fig. 2 Distribution curve of demagnetizing factor of hollow core

空心磁芯在外磁场中磁化时,沿  $Z$  轴方向的退磁因数  $N_d$  随着  $a(R_1/R_2)$  的增加而减小。由式(2)~(4)可分析出壁厚越薄的空心磁芯其有效磁导率  $\mu'_a$  越大。

### 1.3 空心磁芯的磁通参数

根据式(1)可知感应式磁传感器的灵敏度主要由  $\mu_a \cdot S$  (磁通) 决定。为研究不同壁厚的空心磁芯磁通参数,本文在 ANSOFT 有限元分析软件里对空心磁芯感应线圈和棒状磁芯感应线圈的磁通值进行对比仿真,两种磁芯上均匀缠绕相同匝数的感应线圈,以空心磁芯的壁厚  $t$  和初始磁导率  $\mu_r$  为变量,求棒状磁芯与空心磁芯感应线圈的磁通差,结果如图 3 所示。当磁芯的初始磁导率  $\mu_r$  足够高时,空心磁芯感应线圈的磁通可以等于相同长径比的棒状磁芯感应线圈的磁通,在两种磁芯感应线圈的磁通达到相等点之后,随着壁厚  $t$  的增加棒状磁芯与空心磁芯感应线圈的磁通差基本不变。而且磁芯的初始磁导率越高,相应的空心磁芯壁厚  $t$  值越小。例如,  $\mu_r = 80\ 000$  的空心磁芯,壁厚  $t = 0.5\ \text{mm}$  就能等于棒状磁芯感应线圈的磁通,而  $\mu_r = 20\ 000$  的空心磁芯,壁厚  $t = 3\ \text{mm}$  才能等于棒状磁芯感应线圈的磁通。所以选用  $\mu_r = 80\ 000, L = 200\ \text{mm}, D = 15\ \text{mm}, t = 0.5\ \text{mm}$  的空心磁芯应用到感应式磁传感器中,此时空心磁芯的灵敏度最大,重量也轻。

### 1.4 空心磁芯的有效磁导率

若空心磁芯的初始磁导率足够高,空心磁芯感应线圈的磁通可以等于同长径比棒状磁芯感应线圈的磁通,则两种磁芯感应线圈磁通值满足如下方程<sup>[15]</sup>。

$$\mu_a S_r = \mu'_a S_h \quad (5)$$

$$\mu'_a \frac{\pi}{4} D^2 = \mu_a \frac{\pi}{4} (D^2 - (D - 2t)^2) \quad (6)$$

$$u'_a = u_a \frac{D^2}{(D^2 - (D - 2t)^2)} \quad (7)$$

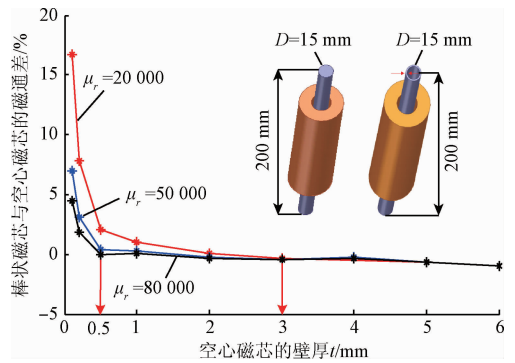


图 3 棒状磁芯与空心磁芯的磁通差

Fig. 3 Magnetic flux subtract between rod and hollow core

式中:  $D$  为磁芯的外径(棒状磁芯和空心磁芯有相同的外径),在空心磁芯中,  $\mu'_a/\mu_a > 1$ ,随着壁厚  $t$  减小,空心磁芯的有效磁导率增加,由空心磁芯的有效面积  $S_h$  小于棒状磁芯的有效面积  $S_r$  可知空心磁芯的有效磁导率一定大于棒状磁芯的有效磁导率。

为研究空心磁芯的有效磁导率  $\mu'_a$ ,根据式(2)在 ANSOFT 有限元分析软件里对其内部的磁感应强度  $B_a$  进行仿真,以空心磁芯的壁厚  $t$  为变量,磁芯长  $L = 200\ \text{mm}$ ,外磁场  $B_{\text{ext}} = 1\ \text{nT}$ ,不同壁厚的空心磁芯的有效磁导率如图 4 所示,在磁芯的中央位置,  $t = 0.5\ \text{mm}$  的空心磁芯其有效磁导率是相同长径比下棒状磁芯有效磁导率的 7 倍。而且空心磁芯的有效磁导随着磁芯壁厚的增加而减小,棒状磁芯若要达到和空心磁芯相同的有效磁导率则需要增大其自身的长径比,空心磁芯可以在不增加体积并且减轻重量的情况下达到和棒状磁芯一样的磁通。感应线圈要得到较大的磁通,则应该分布在磁芯的中央位置,以  $t = 0.5\ \text{mm}$  的空心磁芯为例,在距离中心  $33\ \text{mm}$  处,磁芯的有效磁导率与最大值相比下降 7%,所以空心磁芯与感应线圈的比例为 0.3,此时空心磁芯的有效磁导率最大。

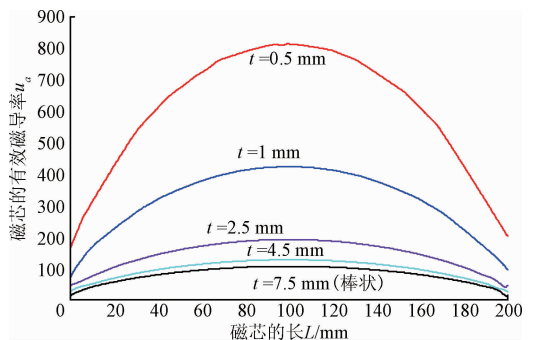


图 4 不同壁厚的磁芯有效磁导率分布

Fig. 4 Efficient magnetic permeability of hollow core with various thickness

### 1.5 空心磁芯线圈的磁通验证

为验证理论分析,将厚0.1 mm的坡莫合金薄片卷绕成 $L$ 为200 mm,外径 $D=15$  mm,壁厚 $t$ 分别为0.5、2.5、4.5 mm的3根空心磁芯,在磁芯上均匀缠绕190匝的感应线圈,如图5所示。

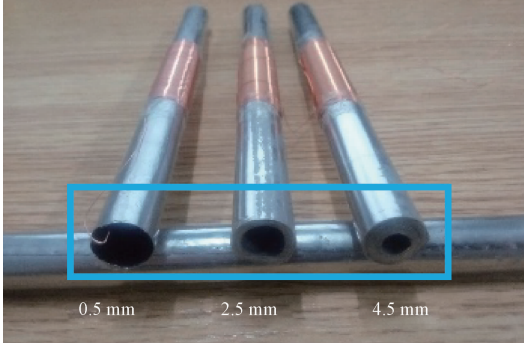


图5 敏感元件的实物

Fig. 5 Hardware of sensitive elements

在屏蔽室中进行3组敏感元件感应电压的测量,将敏感元件放入通电螺线管中,通电螺线管的信号由Keithley6621电流源提供产生1 nT的外磁场,输出接动态信号分析仪,测1~10 kHz带宽下感应线圈两端输出的感应电压,实验结果如图6所示,与之前空心磁芯感应线圈的仿真结果一致。另外在频率超过2 kHz时敏感元件的感应电压值比理论值小,由于空心磁芯在制作过程中表面绝缘处理工艺的问题,导致高频段有损耗,所以随着频率的升高,感应电压逐渐降低。

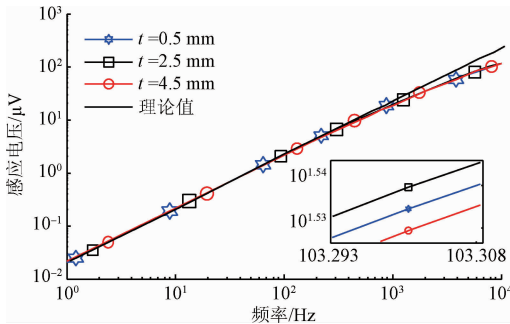


图6 敏感元件的感应电压实测结果

Fig. 6 Measurement results of induced voltage of sensitive unit

## 2 空心磁芯感应式磁传感器的噪声

感应式磁传感器的噪声来源于感应线圈电阻的热噪声以及前置放大电路的电压噪声和电流噪声。感应线圈的阻抗较高,前置采用JFET对管组成的差分放大电路进行放大,在频率大于10 Hz时,其电压噪声 $e_n=3$  nV/Hz<sup>1/2</sup>,电流噪声可忽略不计,感应线圈在均匀绕制时电阻公式为<sup>[21]</sup>:

$$R = \frac{4\rho n}{d_{cu}^2} \left( d_0 + \frac{nd_w^2}{l_w} \right) \quad (8)$$

式中: $\rho$ 为铜线的电阻率, $d_{cu}$ 为铜漆包线的直径, $d_w$ 为铜导线的直径, $d_0$ 为线圈骨架的内径, $l_w$ 为感应线圈的长。感应式磁传感器的等效磁场噪声由放大电路输入端的噪声除以磁传感器的灵敏度得到,感应线圈的等效电阻热噪声式(9)所示, $K$ 为玻尔兹曼常数, $T$ 为绝对温度。

$$B_R = \frac{\sqrt{4KTR}}{\omega \mu'_a n S} \quad (9)$$

放大电路的等效电压噪声公式为:

$$B_e = \frac{e_n \sqrt{(1 - L_p C \omega^2)^2 + (RC \omega^2)}}{\omega \mu'_a n S} \quad (10)$$

感应式磁传感器的等效磁场噪声为:

$$B_s = \frac{\sqrt{4KTR + e_n^2 ((1 - L_p C \omega^2)^2 + RC \omega^2)}}{\omega \mu'_a n S} \quad (11)$$

## 3 优化空心磁芯感应式磁传感器

空心磁芯感应式磁传感器的优化参数如表1所示。由表1和式(1)~(11)可以得出100 Hz时感应式磁传感器的等效磁场噪声如图7所示。

表1 空心磁芯感应式磁传感器的优化参数

Table 1 Optimal parameters of the inductive magnetic sensor with hollow core

参数	取值	参数	取值
$G$	3 120	$l/\text{mm}$	200
$e_n/(\text{nV} \cdot \text{Hz}^{-1/2})$	3	$l_w/\text{mm}$	67
$\rho/(\Omega \cdot \text{m})$	$1.72 \times 10^{-8}$	$\mu'_a$	789
$\mu_r$	80 000	$S/\text{mm}^2$	$22.77 \times 10^{-6}$
$\rho_{cu}/(\text{kg} \cdot \text{m}^3)$	$8.92 \times 10^3$	$D/\text{mm}$	15
$d_0/\text{mm}$	19	$t/\text{mm}$	0.5

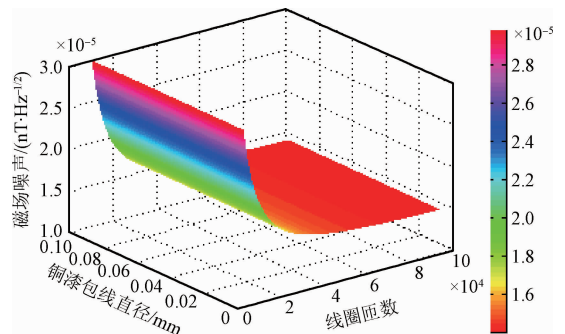


图7 空心磁芯感应式磁传感器的噪声

Fig. 7 Noise of the inductive magnetic sensor with hollow core

在铜漆包线直径为定值时,随着线圈匝数的增加磁场噪声增加,线圈匝数为定值时,随着铜漆包线直径的增加等效磁场噪声减小,即可得到最佳的线圈匝数和铜漆包线直径使空心磁芯感应式磁传感器的等效磁场噪声在 100 Hz 时  $B_0 = 0.06 \text{ pT/Hz}$ 。在空间电磁探测中,重量也是磁传感器设计的重要指标,所以需要确定铜漆包线线的直径  $d_{cu}$ ,线圈的匝数  $n$ 。铜漆包线直径  $d_{cu}$  也决定线圈的重量,如式(12)所示。

$$G_w = \rho_{cu} \cdot \frac{\pi^2 d_{cu}^2 n}{4} \left( d_0 + \frac{nd_w^2}{l_w} \right) \quad (12)$$

式中: $\rho_{cu}$ 为铜的体密度,则感应线圈的重量如图 8 所示。

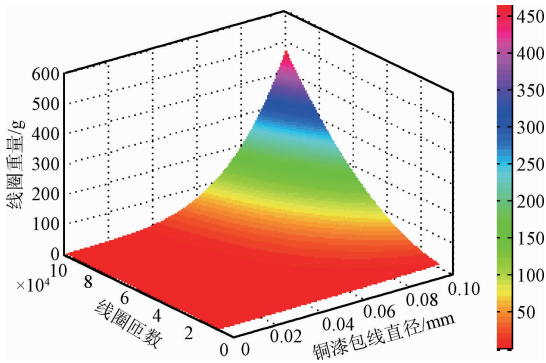


图 8 空心磁芯感应线圈的重量

Fig. 8 Weight of inductive coil with hollow core

当铜漆包线直径小于 0.06 mm 时,随着线圈匝数的增加,重量基本不变,大于 0.06 mm 时,随着线圈匝数的增加重量增大,优化设计的目标是达到要求的等效磁场噪声和较低的线圈重量,即设计满足方程(13),由方程(13)求偏微分方程(14)找出最佳的  $d_{cu}$  与  $n$ 。

$$\begin{cases} \text{Min}G_w(d_{cu}, n) \\ B_s(d_{cu}, n) = B_0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \text{Min}G_w(d_{cu}, n) = 0 \\ \frac{\partial (B_s - B_0)^2}{\partial n} = 0 \\ \frac{\partial (B_s - B_0)^2}{\partial n} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)和图 7、8 得出铜漆包线直径  $d_{cu} = 0.08 \text{ mm}$ 。线圈匝数  $N = 11\ 000$ ,100 Hz 时等效磁场噪声  $B_0 = 0.06 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ ,线圈重量  $G_w = 30 \text{ g}$ 。

在弱磁测量中,线圈本身的输出电压较小,需要对感应信号进行放大处理。由于感应线圈的源阻抗比较大,普通的集成运算放大无法足要求,所以本文的前置放大电路由前级并联 JFET 场效应管和后接低噪声的运算放大器 LT1352 构成,分立的搭建器件,可有效降低噪声。部分电路如图 9 所示。

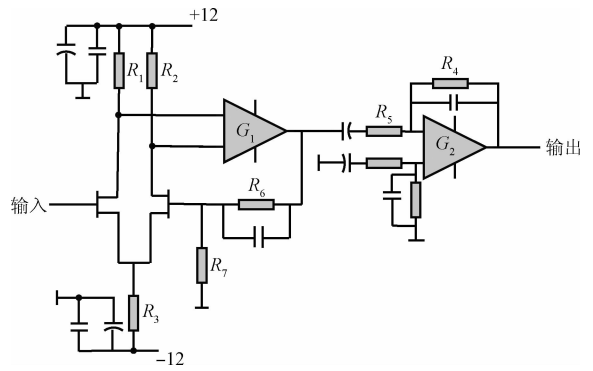


图 9 前置放大电路原理

Fig. 9 Schematic of preamplifier circuit

电阻  $R_3$  为 JFET 提供电流源,使其工作在饱和区,通过调节电阻  $R_3$  的大小来减小前级输入端的电压噪声。LT1352 的噪声较小,对于整个电路来说可忽略不计。输入端的主要噪声来源于场效应管低频段的  $1/f$  噪声,可以通过增加电流源或者并联多对 JFET 来降低输入端的电压噪声,根据感应线圈的电阻热噪声以及空间电磁探测的需求,本实验的放大电路已满足设计要求,第 1 级的放大增益为  $R_6/R_7$ 。电容  $C_2$  消除电路中的直流分量。第 2 级的放大为反比例放大器,采用同相输入端与反相输入端对称设计来消除输入端偏置电流带来的影响,信号的进一步放大增益为  $R_4/R_5$ 。

#### 4 空心磁芯感应式磁传感器灵敏度标定与噪声测试

优化的空心磁芯感应式磁传感器如图 10 所示。

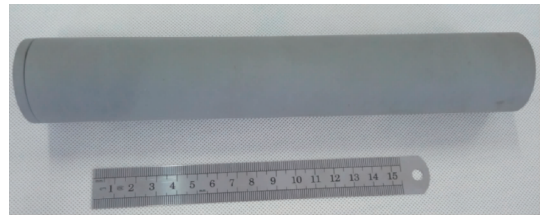


图 10 空心磁芯感应式磁传感器实物

Fig. 10 Experimental model of the inductive magnetic sensor

为了消除工频干扰,空心磁芯感应式磁传感器的灵敏度标定与噪声测试都是在屏蔽室的屏蔽筒中完成的。激励磁场由通电螺线管产生,将空心磁芯感应式磁传感器接上后级放大电路放到通电螺线管的中间位置,通电螺线管通入正弦波电流信号,灵敏度标定结果如图 11 所示。空心磁芯感应式磁传感器在 1 ~ 100 Hz 范围内灵敏度呈线性为  $5.2 \text{ mV/nT} @ 1 \text{ Hz}$ ,平坦部分的灵敏度为  $0.73 \text{ V/nT}$ 。等效磁场噪声如图 12 所示。



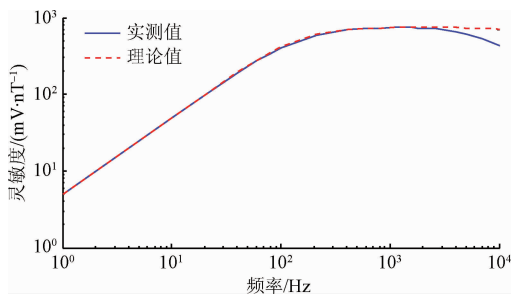


图 11 空心磁芯感应式磁传感器的灵敏度标定

Fig. 11 Sensitivity calibration of inductive magnetic sensors with hollow magnetic core

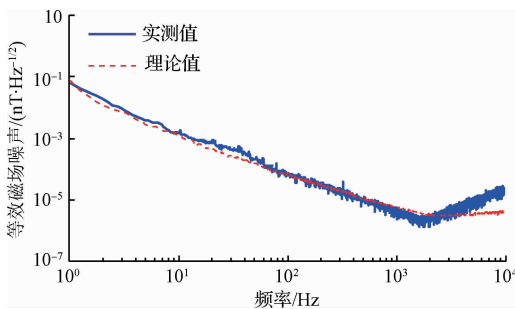


图 12 空心磁芯感应式磁传感器的等效磁场噪声

Fig. 12 Results of equivalent magnetic field noise of hollow core inductive magnetic sensor

实测的等效磁场噪声与理论分析一致,100 Hz 时噪声为  $0.06 \text{ pT/Hz}^{1/2}$  满足设计指标。空心磁芯感应式磁传感器与 THEMIS 感应式磁传感器的对比如表 2 所示,可以看出空心磁芯感应式磁传感器的噪声要小于 THEMIS,并且重量更轻。

表 2 感应式磁传感器的对比

Table 2 Comparison of inductive magnetic sensor

参数	THEMIS	自制
磁芯长度/mm	170	200
噪声/100 Hz	$0.06 \text{ pT/Hz}^{1/2}$	$0.08 \text{ pT/Hz}^{1/2}$
重量/g	568	80(单体)

## 5 结 论

本文首先分析空心磁芯的退磁因数  $N_z$ ,发现空心结构的磁芯可以减小其内部的退磁因数。进而对空心磁芯线圈与棒状磁芯线圈磁通参数的仿真找出两种磁芯感应线圈磁通相等时空心磁芯的壁厚  $t$  和磁芯长  $L$ 。然后分析空心磁芯感应式磁传感器等效磁场噪声,通过数学算法的优化得到最佳的参数,铜漆包线直径  $d_{cu} = 0.08 \text{ mm}$ ,

线圈匝数  $N = 11\ 000$ ,线圈重量  $G_w = 30 \text{ g}$ ,磁传感器的总重量为  $80 \text{ g}$ ,等效磁场噪声在  $100 \text{ Hz}$  时,  $B_s = 0.06 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ 。为验证理论分析和仿真,实测不同壁厚的空心磁芯感应线圈的磁通,得到的实测结果与仿真结果一致。根据优化的参数设计空心磁芯感应式磁传感器并在屏蔽室进行灵敏度的标定和等效磁场噪声的测试,实测结果与优化分析一致,空心磁芯感应式磁传感器与 THEMIS 相比具有噪声低、重量轻的优点。

## 参考文献

- [1] TAL N, MORAG Y, LEVRON Y. Increasing the sensitivity of search coil magnetometer by capacitive compensation[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(12):4671-4672.
- [2] HOSPODARSKY G B. Spaced - based search coil magnetometers[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2016, 121(12):12068-12079.
- [3] 黄朝,许鑫,刘敦歌,等. 基于多传感器的微弱磁异常信号提取方法研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(10):91-95.  
HUANG CH, XU X, LIU D G, et al. Research on extraction method of weak magnetic anomaly signals based on multi-sensor[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(10):91-95.
- [4] 符磊,林君,王言章,等. 磁通负反馈空心线圈传感器特性和噪声研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6):1312-1318.  
FU L, LIN J, WANG Y ZH, et al. Research on characteristics and noise of flux negative feedback hollow coil sensors[J]. Journal of Instrumentation, 2013, 34(6):1312-1318.
- [5] GROSZ A, PAPERNO E. Analytical optimization of low-frequency search coil magnetometers[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(8):2719-2723.
- [6] 郭旭东,严荣国. 消化道微诊疗装置的定位微粒群算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8):1687-1692.  
GUO X D, YAN R G. Gastrointestinal micro medical device positioning particle swarm algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8):1687-1692.
- [7] 尚新磊,王琳,林君,等. 低噪声宽带宽感应式磁传感[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2015, 46(9):3295-3301.  
SHANG X L, WANG L, LIN J, et al. Low noise wide-bandwidth induction magnetic sensor[J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2015, 46(9):3295-3301.
- [8] 邵英秋,宋克非. 宽频带感应式磁传感器线圈电感的

- 研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(7): 703-709.
- SHAO Y Q, SONG K F. Research on coil inductance of broad frequency induce type magnetic sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(7): 703-709.
- [9] 解伟男, 奚伯齐, 梁慧敏. 非晶材料磁传感器噪声分析[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11):2635-2640.
- JIE W N, XI B Q, LIANG H M. Noise analysis of amorphous material magnetic sensors[J]. Journal of Instruments and Meters, 2012, 33(11):2635-2640.
- [10] CORNILLEAU-WEHRLIN N, ALLEYNE H S, YEARBY K H, et al. The STAFF-DWP wave instrument on the DSP equatorial spacecraft: Description and first results[C]. Annales Geophysicae, 2005, 23(8): 2785-2801.
- [11] ROUX A, LEACONTEL O, COILLOT C, et al. The search coil magnetometer for THEMIS[J]. Space Science Reviews, 2008, 141(1-4):265-275.
- [12] COILLOT C, MOUTOUSSAMY J, LEROY P, et al. Improvements on the design of search coil magnetometer for space experiments[J]. Sensor Letters, 2007, 5(1): 167-170.
- [13] PAPERNO E, GROSZ A. A miniature and ultralow power search coil optimized for a 20 mHz to 2 kHz frequency range[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(7): 07E708.
- [14] GROSZ A, PAPERNO E, AMRUSI S, et al. Integration of the electronics and batteries inside the hollow core of a search coil[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(9): 09E703.
- [15] 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.
- SHAO Y Q, CHENG D F, WANG Y ZH, et al Research on high sensitivity magnetic sensors[J]. Journal of Instrumentation, 2012, 33(2):349-355.
- [16] GROSZ A, PAPERNO E, AMRUSI S, et al. A three-axial search coil magnetometer optimized for small size, low power, and low frequencies[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(4):1088-1094.
- [17] 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[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(11): 2461-2466.
- SHAO Y Q, WANG Y ZH, CHENG D F, et al. Development of broadband magnetic sensors based on magnetic feedback[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(11): 2461-2466.
- [18] LE CONTEL O, LEROY P, ROUX A, et al. The search-coil magnetometer for MMS[J]. Space Science Reviews, 2016, 199(1-4):257-282.
- [19] OSBORN J A. Demagnetizing factors of the general ellipsoid[J]. Physical Review, 1945, 67(11-12):351.
- [20] BELEGGIA M, VOKOUN D, DE GRAEF M. Demagnetization factors for cylindrical shells and related shapes[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2009, 321(9):1306-1315.
- [21] NOURMOHAMMADI A, ASTERAKI M H, FEIZ S M H, et al. A generalized study of coil-core-aspect ratio optimization for noise reduction and SNR enhancement in search coil magnetometers at low frequencies[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(11):6454-6459.

## 作者简介



王言章, 分别在 2002 年、2005 年和 2010 年于吉林大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为吉林大学教授, 主要研究方向为弱磁传感器、地球信息探测仪器。

E-mail: yanzhang@jlu.edu.cn

**Wang Yanzhang** received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Jilin University in 2002, 2005 and 2010, respectively. Now he is a professor in Jilin University. His main research interests include weak magnetic sensor and geo-information detecting apparatus.



黄文雪, 2015 年于长春大学获得学士学位, 现为吉林大学硕士研究生, 主要研究方向为感应式磁传感器。

E-mail: Huangwx15@mails.jlu.edu.cn

**Huang Wenxue** received her B. Sc. degree from Changchun University in 2015. She is currently a M. Sc. student in Jilin University. Her main research field is induction magnetometer.