

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.05.017

基于高频激励的高精度交流电桥测温系统研究

牛光星, 汤恩琼, 韩文法, 邱宏波

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要:为实现对原子气室温度的高精度测量,同时避免测温电路产生的直流磁场或低频磁场对原子自旋系综运动状态的影响,设计了一种基于高频激励的交流电桥温度测量方法。首先,建立了测温电路的数学模型,并对模型中各元件参数之间的内在联系进行了分析。其次,对测温电路进行了灵敏度分析。然后,针对力学环境微小扰动对测温电路中导线分布参数的影响,优化设计了测温电路中相关元件的参数。最后,实验数据表明,优化后的交流测温系统测温稳定性提升了1个数量级。

关键词:交流电桥;温度测量;分布参数

中图分类号:TN710

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2018)05-0101-06

Research on High Precision Temperature Measurement System Based on High Frequency AC Bridge

NIU Guang-xing, TANG En-qiong, HAN Wen-fa, QIU Hong-bo

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: To measure the temperature of the atomic cell accurately and to avoid the effect of low-frequency magnetic field from the circuit on the spin ensemble, a temperature measurement system based on AC bridge stimulated by high frequency signal is designed. First, we set up the mathematic model of temperature measurement circuit and analyse the relation between the components. Second, we analyse the sensitivity of the system. Third, we choose a better set of parameters for the circuit to minimize the mechanical environment disturbance which changes the distributed parameters of the wires. Last, the result of the experiment shows that the stability of the designed system is improved by an order of magnitude.

Key words: AC bridge; Temperature measurement; Distributed parameter

0 引言

近年来,随着原子操控技术的发展,核磁共振陀螺逐渐成为惯性技术领域的重点发展方向之一^[1]。原子气室是核磁共振陀螺的核心敏感单元^[2],需要通过加热的方式提高气室内碱金属原子密度以增加系统的信号强度^[3]。气室温度的稳定

性直接影响碱金属原子密度的稳定性,高精度温控系统是实现在高精度核磁共振陀螺的关键技术之一。

在温控过程中,原子气室对磁场也比较敏感^[4]。环境磁场会破坏原子气室中自旋系综敏感角运动的正常工作状态,需要对原子气室进行高精度无磁温控以避免温控系统产生的磁噪声降低陀螺精度。

高精度测温是高精度无磁温控系统的核心^[5]。

收稿日期:2017-11-11;修订日期:2018-03-30

基金项目:国家自然科学基金(61473268);国家自然科学基金(61503353)

作者简介:牛光星(1991-),男,硕士,主要从事温度控制方面的研究。E-mail:niu1260361901@163.com

红外热像测温 and 光纤测温是目前常见的无磁测温方法。其中,文献[6]分析了红外热像测温原理,并将其用于光学元件测温,测温精度优于 0.7°C ;文献[7]研制了一种铁氧体加速腔螺线管温控系统,设计采用的光纤测温技术实现精度优于 0.04°C 。以上两种测温技术虽然在测温时不产生磁场,但是测温精度相对较低、构成相对复杂,难以满足核磁共振陀螺对高精度和小体积测温技术的需求。

集成电路测温具有较高的精度和较小的体积。文献[8]设计了一种基于集成电路的直流测温方法,实现了 0.01°C 的测温精度。但是,上述测温电路中的温度敏感元件在工作过程中会产生直流磁场,对核磁共振陀螺的自旋系综造成影响。当测温电路的激励信号频率提高到远离磁共振频率和陀螺的动态范围时,气室内的自旋系综就难以响应测温系统产生的磁场噪声。因此,高频交流测温可以有效抑制磁场噪声引入的系统误差,较为精确地敏感气室温度变化,是实现原子气室高精度、小体积无磁测温的有效途径之一。电桥是一种经典的传感器电路,适合测量压敏电阻和热敏电阻的阻值^[9-11]。北京航空航天大学^[3]采用锁相放大器激励的交流电桥实现了原子气室的无磁温度测量,并达到了 0.2°C 的温控精度。

为了实现原子气室高精度无磁温度测量,本文设计了一种基于交流电桥的测温系统。该系统由低温漂精密电阻、热敏铂电阻、同轴电缆、锁相放大器组成,采用 100kHz 的交流信号对电桥进行激励。在实验过程中发现,力学环境微小扰动会通过改变导线分布电容的方式造成测温结果不规则变化。这种误差难以通过传统的滤波等信号调理方式抑制,成为制约测温精度提高的主要因素之一。

为了提升上述交流测温系统的精度,对测温电路进行了优化设计。首先,从分布参数的角度建立了测温电路的数学模型,明确了各个参数与测温结果之间的关系。然后,通过电路仿真软件验证了模型的有效性。最后,根据该模型优化了电路参数。实验结果表明,当力学环境扰动导致分布电容变化约 2pF 时,优化后的测温系统稳定度提升了1个数量级,达到 0.01°C ,为高精度测温系统的研制提供了支撑。

1 交流测温系统建模

交流电桥由3个低温漂精密电阻和铂电阻组

成。金属铂化学性质稳定、不易老化变性、测温一致性好、体积小,适合作为原子气室测温系统的温度敏感元件。交流电桥的2路输出信号分别由2根同轴电缆传输给锁相放大器。进入锁相放大器后,2路信号首先由低噪声前置放大器进行差分放大,然后通过AD芯片转化为数字信号。DSP芯片将采集到的数字信号通过相敏检测等算法进行数字信号处理,最终得到表征温度的电桥输出电压,实现温度测量。交流测温系统的示意图如图1所示。

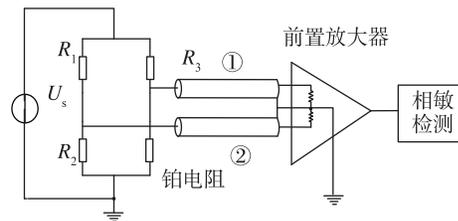


图1 交流测温系统示意图

Fig. 1 The sketch map of AC temperature measurement system

1.1 同轴电缆的数学模型

同轴电缆由内部导体、绝缘体、屏蔽导体层和外保护层构成^[12],如图2所示。

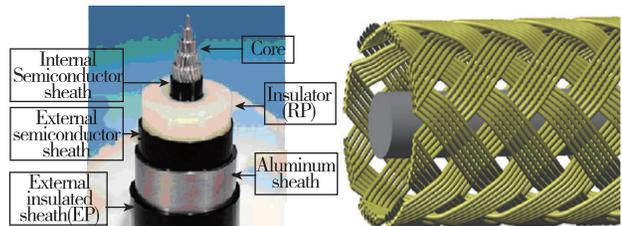


图2 同轴电缆示意图

Fig. 2 The sketch map of coaxial-cable

内部导体和屏蔽导体含有分布电阻和分布电感,它们之间含有分布电容,如图3所示。

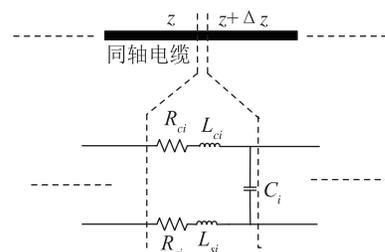


图3 同轴电缆数学模型

Fig. 3 The mathematical model of coaxial-cable

其中, i 代表第 i 个微元, R_{ci} 和 L_{ci} 为内部导体的分布电阻和分布电感, R_{si} 和 L_{si} 分别为屏蔽导体的分布电阻和分布电感, C_i 为两者之间的分布电容, 可以表示为^[13-14]

$$C_i = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{R_{s2}}{R_{s1}}\right)} \Delta z \quad (1)$$

其中, ϵ 为介电常数, R_{s2} 为屏蔽层到电缆轴心的距离, R_{s1} 为内部导体的半径。

1.2 精密电阻和铂电阻的数学模型

导体的直流电阻可以表示为^[15]

$$R_{DC} = \frac{\rho l}{S} \quad (2)$$

其中, ρ 为导体电阻率, l 为导体长度, S 为导体截面积。当电流频率较高时, 受趋肤效应影响, 导体的交流电阻将大于直流电阻, 可以表示为^[15]

$$R_{AC} = KR_{DC} \sqrt{f} \quad (3)$$

其中, R_{AC} 为交流电阻, K 为趋肤效应影响因子, f 为激励信号频率。系统中所用的金属薄膜精密电阻和铂电阻结构相似, 如图 4 所示。

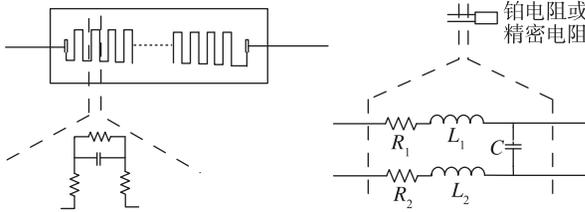


图 4 精密电阻 (铂电阻) 内部结构和引脚
Fig. 4 The structure and pins of precision resistor (platinum resistor)

精密电阻的复阻抗可以用交流电阻与电容并联的形式表示为

$$z = \frac{1}{\frac{1}{kR_{DC} \sqrt{f}} + j\omega C} \quad (4)$$

其中, k 为趋肤效应影响因子, R_{DC} 为直流电阻, f 为激励信号频率, ω 为角频率, C 为电阻的寄生电容与引脚、引线分布电容之和。

1.3 交流测温系统的数学模型

基于上述模型对交流测温系统进行化简, 根据电路仿真验证, 精密电阻和铂电阻可以等效成为 1 个电阻并联 1 个电容, 同轴电缆可以等效成为 1 个电容跨接在内部导体和屏蔽导体之间。根据实验

经验, 测温结果对电阻引脚和同轴电缆的分布电感和分布电阻不敏感, 并且这两项数值较小, 所以在模型中可以忽略。据此, 交流测温系统可以进行化简^[16-17], 如图 5 所示。

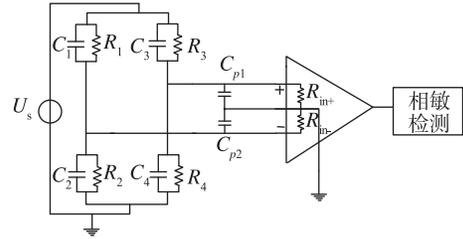


图 5 测温系统示意图

Fig. 5 The sketch map of temperature measurement system

前置放大器的输入电阻比较大, 可以看成开路。电缆分布电容 C_{p1} 和 C_{p2} 从电气结构上可以并入 C_3 和 C_4 。据此, 系统可以再次进行简化, 如图 6 所示。

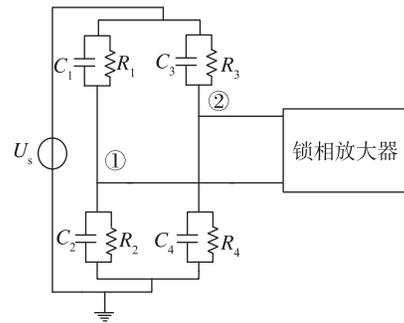


图 6 测温系统简化图

Fig. 6 The simplification of temperature measurement system

锁相放大器输出 X 为

$$X = (Re[v_2] - Re[v_1])U_s \quad (5)$$

其中, Re 代表取实部, U_s 代表电桥激励电压, v_1, v_2 分别为图 6 中①和②点电压, 具体表示为:

$$v_1 = \frac{z_2}{z_1 + z_2}, \quad v_2 = \frac{z_4}{z_4 + z_3} \quad (6)$$

其中:

$$z_i = \frac{1}{\frac{1}{R_i} + j\omega C_i}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

针对图 6 中左半个电桥, R_2 分得的电压为

$$v_2 = U_s \frac{z_2}{z_1 + z_2} = U_s \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2}}{\frac{1}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1} + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2}} =$$

$$U_s \frac{R_2(1+j\omega C_1 R_1)[(R_1+R_2)-j\omega R_1 R_2(C_1+C_2)]}{(R_1+R_2)^2 + [\omega R_1 R_2(C_1+C_2)]^2} \quad (8)$$

取实部

$$Re[v_2] = U_s \frac{R_2(R_1+R_2) + R_1\omega^2 C_1 R_2 R_1 R_2(C_1+C_2)}{(R_1+R_2)^2 + [\omega R_1 R_2(C_1+C_2)]^2} \quad (9)$$

求偏导

$$\frac{dX}{dR_2} = -\frac{d(Re[v_2])}{dR_2} = -U_s \left(\frac{k_1((R_1+R_2)^2 + [\omega R_1 R_2(C_1+C_2)]^2)}{((R_1+R_2)^2 + [\omega R_1 R_2(C_1+C_2)]^2)^2} - \frac{k_2(R_2(R_1+R_2) + R_1\omega C_1 R_2 R_1 R_2(C_1+C_2))}{((R_1+R_2)^2 + [\omega R_1 R_2(C_1+C_2)]^2)^2} \right) \quad (10)$$

其中:

$$\begin{aligned} k_1 &= 2R_2 + R_1 + 2(R_1 R_2) R_2 C_1 (C_2 + C_1) \omega \approx 3R_0 \\ k_2 &= 2(R_1 + R_2) + 2[\omega R_1 R_2(C_1 + C_2)] \omega R_1 (C_1 + C_2) \\ &\approx 4R_0 \end{aligned} \quad (11)$$

所以,

$$\frac{dX}{dR_1} \approx -U_s \frac{1}{4R_0} \quad (12)$$

从式(12)可以看出,锁相放大器的输出对铂电阻阻值变化的灵敏度与电桥激励电压成正比,与精密电阻的阻值成反比。由于温度变化时,铂电阻主要是电阻率发生变化,所以铂电阻的阻值可以表示为

$$R_{pt} = \rho(T) \frac{l}{S} \quad (13)$$

其中, ρ 为铂电阻电阻率,是温度 T 的函数, l 为铂电阻丝长度, S 为铂电阻丝截面积。当温度为 T_0 时

$$\frac{dR_{pt}}{dT} = k_{T_0} \frac{l}{S} \quad (14)$$

其中

$$k_{T_0} = \frac{d\rho(T_0)}{dT} \quad (15)$$

所以,当温度变化 ΔT 时,锁相放大器的输出变化为

$$\begin{aligned} \Delta X &= -U_s \frac{1}{4R_0} \Delta R_2 = -U_s \frac{1}{4\rho(T_0)} \frac{l}{S} \frac{dR_2}{dT} \Delta T \\ &= -U_s \frac{1}{4\rho(T_0)} \frac{l}{S} k_{T_0} \frac{l}{S} \Delta T \\ &= -U_s \frac{1}{4\rho(T_0)} k_{T_0} \Delta T = -U_s k_s \Delta T \end{aligned} \quad (16)$$

其中, U_s 为激励电压幅值, k_s 为比例系数,与精密电阻阻值无关。从式(16)可以看出,锁相放大器的输出对于温度变化的灵敏度是一个与精密电阻阻值 R_0 无关的常量,仅仅与铂电阻的材料或电阻率有关。易知,当 $R_1=R_2$ 且 $R_3=R_4=R_0$ 时,电桥可以获得最大的测温灵敏度。

2 交流测温系统优化设计

2.1 测温结果变化的机理分析与建模

被绝缘体分割的2个导体会形成1个电容 C ,电容的大小取决于导体的形状、相互位置和方向以及绝缘体的介电常数。当空间电荷 Q 聚集在此,2个导体之间就存在电压

$$V = \frac{Q}{C} \quad (17)$$

如果由于机械原因导致2个导体的互相位置发生变化,则电容 C 发生变化 ΔC ,电容两端的电压也相应变化 ΔV ,它们之间存在关系

$$\Delta V = -\frac{Q}{C^2} \Delta C \quad (18)$$

当测温系统受到力学环境扰动时,由于同轴电缆形状发生改变,屏蔽层到轴心的距离会发生变化,进而导致同轴电缆分布电容改变^[12]。测量结果的变化由此产生。

根据戴维南定理,把左半桥中除了 C_2 的其他元件看成电压源 U_n 串联一个等效电阻 R_s 。其中:

$$U_n \approx 0.5U_s \quad (19)$$

$$R_s = \frac{1}{\frac{1}{z_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{R_3 R_4 (R_3 + R_4 - j\omega R_4 R_3 C_1)}{(R_3 + R_4)^2 + (C_1 R_4 R_3 \omega)^2} \approx 0.5R_0 \quad (20)$$

根据分压公式为

$$v_2 = U_n \frac{\frac{1}{j\omega C_4}}{\frac{1}{j\omega C_4} + R_s} = U_n \frac{1 - j\omega R_s C_4}{1 + (\omega R_s C_4)^2} \quad (21)$$

取实部

$$Re[v_2] = U_n \frac{1}{1 + (\omega R_s C_4)^2} \quad (22)$$

求偏导

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dC_4} &= -\frac{d(Re[v_2])}{dC_4} = U_n \frac{2(\omega R_s)^2 C_4}{[1 + (\omega R_s C_4)^2]^2} \\ &\approx U_s (\omega R_s)^2 C_4 = 0.25U_s (\omega R_0)^2 C_4 \end{aligned} \quad (23)$$

其中, R_0 为电桥精密电阻的阻值。此模型的使

用条件为:

$$\begin{aligned} (\omega CR_0)^2 &\ll 4 \\ \frac{1}{\omega C} &\ll R_m \end{aligned} \quad (24)$$

其中, R_m 为前置放大器的输入电阻。根据式 (23), 当同轴电缆分布电容变化 ΔC 时, 锁相放大器的输出会变化 $0.25U_s(\omega R_0)^2 C_4 \Delta C$, 造成测量结果的变化。可以看出, 测温系统的抗扰动能力与激励电压频率、精密电阻阻值和电缆分布电容有关。

2.2 仿真验证

用 Multisim 搭建系统模型进行仿真验证, 表 1 所示为在不同的 C_4 下, 分布电容变化 2pF 时, 锁相放大器的输出变化量。表 2 所示为在不同的 R_0 下, 分布电容变化 2pF 时, 锁相放大器的输出变化量。表 3 所示为在不同的 R_0 下, R_1 的阻值变化 0.1 Ω 时, 锁相放大器的输出变化量。

表 1 不同的 C_4 下抗扰动仿真验证

Tab. 1 The output variation of the lock-in amplifier in the emulation of anti-disturbance with different C_4

C_4/pF	$\Delta X/\text{mV}$ (仿真)	$\Delta X/\text{mV}$ (模型)
20	0.0169	0.0169
160	0.0764	0.0791
213	0.098	0.1026
427	0.1772	0.1977

表 2 不同的 R_0 下抗扰动仿真验证

Tab. 2 The output variation of the lock-in amplifier in the emulation of anti-disturbance with different R_0

R_0/Ω	$\Delta X/\text{mV}$ (仿真)	$\Delta X/\text{mV}$ (模型)
38	5.19×10^{-5}	4.56×10^{-5}
150	0.0008	0.0007
300	0.0032	0.0028
700	0.0175	0.0155
1500	0.0794	0.0711

表 3 锁相放大器的输出对 R_0 阻值灵敏度仿真验证

Tab. 3 The emulation of sensitivity of lock-in amplifier's output to the resistance of R_0

R_0/Ω	$\Delta X/\text{mV}$ (仿真)	$\Delta X/\text{mV}$ (模型)
38	0.6570	0.6579
150	0.1666	0.1667
300	0.0833	0.0833
700	0.0356	0.0357
1500	0.0164	0.0167

从仿真结果可以看出, 模型较为准确地反映了锁相放大器的输出与 R_0 、 ω 、 C_4 、 U_s 之间的关系, 为系统实际优化设计提供了依据。

2.3 测温系统优化设计方案

从式(21)可以得出以下结论:

1) 测量结果对分布电容变化的灵敏度与同轴电缆的分布电容和电桥激励电压幅值成正比, 降低分布电容和激励电压幅值有助于提升测温稳定性;

2) 测量结果对分布电容变化的灵敏度与精密电阻的阻值和激励频率的二次方成正比。降低电桥中精密电阻的阻值和激励频率有助于提升测温稳定性。

根据式(1), 选择不同粗细的电缆可以改变分布电容, 但是受对数函数特性的限制, 改变同轴电缆粗细并不能产生比较明显的效果; 降低激励频率会影响气室正常工作; 降低精密电阻的阻值可以降低测温系统对分布电容变化的灵敏度, 但是必须同时更换温度传感器; 降低电桥激励电压也可以降低力学环境的影响, 但是根据式(12), 这一措施同时也降低了电桥温度检测灵敏度。综合考虑上述情况, 减小电缆长度和降低精密电阻的阻值是比较可行的措施。

3 实验验证分析

实验验证系统主要包括: 锁相放大器 SR830、RG58 同轴电缆、4 个低温漂精密电阻组成的电桥。用低温漂精密电阻代替铂电阻有助于抑制温度对测温系统的影响。根据实验经验, 当同轴电缆形状发生改变时, 测温精度主要影响因素分布电容最大变化约 2pF。分别改变实验系统的电缆长度和电桥精密电阻阻值, 用手使电缆发生最大幅度的形变, 以模拟力学环境扰动, 记录锁相放大器的输出变化幅度, 结果如表 4 所示。

表 4 抗扰动实验数据

Tab. 4 The data of the experiment of anti-disturbance

R_0/Ω	200	1470
电缆长度/m		
1.5	5 μV	20 μV
3	20 μV	60 μV

实验结果表明, 通过减小电缆长度和降低精密电阻阻值可以显著提高测温系统的力学环境适应性。由于目前测温系统集成化程度有限, 所以继续

缩短同轴电缆的长度会影响实验正常进行;如果继续降低 R_0 , 电阻自热效应会在系统中引入较大的温度漂移。所以选择 1.5m 的同轴电缆长度和 200Ω 的精密电阻阻值是较为合适的选择。根据式(16)可以算出锁相放大器的输出约变化 0.6mV 对应温度变化 1°C , 所以, 经过优化设计, 当同轴电缆为 1.5m, 精密电阻阻值为 200Ω 时, 力学环境对测温结果的影响优于 0.01°C 。随着陀螺未来的进一步集成化发展, 测温电缆长度可以大幅降低, 上述测温系统具备进一步提升精度的潜力。

4 结论

本文设计了一种基于交流电桥的温度测量系统。将激励频率提升至 100kHz, 有效地减小了测温系统产生的磁场对原子气室的影响。对分布参数变化导致测温结果变化的机理进行了研究并建立了数学模型。研究表明, 测温结果变化幅度与电桥激励电压的幅值与频率、精密电阻阻值、传输线分布电容及其变化量等有关。根据模型对测温电路进行了优化设计。最后, 实验数据表明, 通过优化设计, 测温稳定度提高了 1 个数量级, 证明了设计的有效性, 支持了交流测温系统精度的提高。

参考文献

- [1] 程向红, 陈红梅, 周雨青, 等. 核磁共振陀螺仪分析及发展方向[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(6): 86-90.
- [2] 秦杰, 汪世林, 高溥泽, 等. 核磁共振陀螺技术研究进展[J]. 导航定位与授时, 2014, 1(2): 64-69.
- [3] 万双爱. 基于 ^{129}Xe -Cs 的 SERF 原子自旋陀螺仪原理实验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2014.
- [4] 秦杰. 基于 ^{129}Xe -Cs 的 SERF 原子自旋陀螺仪原理实验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.
- [5] 刘梦祥, 樊琦, 赵健, 等. MEMS 梳齿音叉陀螺温度漂移特性研究[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(3): 82-88.
- [6] 牟凡, 董攀, 代志勇. 铁氧体加速腔螺线圈温度测量[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4): 825-828.
- [7] 李云红, 孙晓刚, 原桂彬. 红外热像仪精确测温技术[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1337-1341.
- [8] 方益喜, 雷开卓, 屈健康, 等. 基于 PT1000 的高精度温度测量系统[J]. 电子设计工程, 2010, 18(10): 79-82.
- [9] 孟立凡, 蓝金辉. 传感器原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [10] Dutta M, Rakshit A, Bhattacharyya S N. Development and study of an automatic AC bridge for impedance measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2001, 2(5): 1048-1052.
- [11] Zhao J, Lu Y, He Q. A low noise preamplifier for AC bridges[C]//Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM). Washington DC, 2012: 594-595.
- [12] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [13] Otin R, Verpoorte J, Schippers H, et al. A finite element tool for the electromagnetic analysis of braided cable shields[J]. Computer Physics Communications, 2015, 191: 209-220.
- [14] Benato R, Paolucci A. Multiconductor cell analysis of skin effect in Milliken type cables[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 90(90): 99-106.
- [15] 杨良军, 董建树, 王蒙, 等. 基于 FPGA 的 V/F 转换电路温度补偿技术研究[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(6): 70-75.
- [16] 罗晖, 杨开勇, 汪之国, 等. 核磁共振陀螺中内嵌碱金属磁力仪研究[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(1): 85-88.
- [17] 郑大伟, 赵万良, 应俊, 等. 无温度传感器的金属振动陀螺温度补偿[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(2): 90-94.