

基于虚拟仪器的空间磁场分布检测装置设计^{*}

吕富勇 周瑞卿 阮世阳 解后攀 吴豪 唐迎川

(南京信息工程大学信息与控制学院 南京 210044)

摘要: 磁共振耦合无线电能传输技术利用高频磁共振耦合实现电能高效长距离传输,收发线圈间的互感耦合系数直接影响着系统的传输距离和效率。空间磁场强度同步检测是准确分析互感耦合系数的最直接的方法。基于虚拟仪器技术设计了一款分布式空间磁场检测系统,详细介绍了基于法拉第电磁感应的数字化磁传感器节点设计、传感器面阵的设计、上下位机通信协议设计及上位机软件开发。实验结果显示:该检测系统具有10 MHz以上的频带,其磁场传感器的灵敏度为530 V/T左右,且具有多点同步采集功能,可以满足磁共振耦合无线电能传输系统中磁场检测的要求。

关键词: 高频磁场;虚拟仪器;信号调理;电磁感应;同步采集

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

The design of spatial distribution of magnetic field detection device based on virtual instrument

Lü Fuyong Zhou Ruiqing Ruan Shiyang Xie Houshen Wu Hao Tang Yingchuan

(College of Information and Control, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Magnetic resonance coupling wireless power transmission technology enables power transmission by high-frequency magnetic resonance coupling efficiently and in long distance. Mutual coupling coefficient between coils transceiver affects the transmission efficiency and the transmission distance of the system directly. Space field strength synchronous detection is the most direct way to accurately analyze mutual coupling coefficient. In this paper, a spatial distribution of the magnetic field detection system has been designed based on Virtual Instrument. The design of a digitized magnetic field sensor based on Faraday's law of electromagnetic induction has been introduced in detail, as well as the design of a sensor array, the communication protocol between the upper computer and the lower computer, and the software for the upper computer. The experimental results showed that the detection system has more than 10 MHz bandwidth. The sensitivity of the magnetic field sensor is 530 V/T probably. What's more, the system has the function of multi-point synchronous acquisition. The platform can satisfy the requirements for magnetic field detection in magnetic resonance coupling wireless power transmission system.

Keywords: high frequency magnetic field; virtual instrument; signal conditioning; electromagnetic induction; synchronous acquisition

1 引言

当前几乎任何技术领域都离不开磁场测量。特别是在无线输电、人造卫星、高能加速器、大型谱仪、宇航等重大工程中无不涉及大量的磁场测量技术和需要大量的测磁仪器。高频磁场是磁共振耦合无线输电系统实现电能无线传输的媒介,收发谐振线圈之间的互感耦合系数是决定传输效率和传输距离的关键要素之一^[1-2]。现行的理论尚无法

为如何提高该系数提供理论支撑。提出了一种通过直接测量空间高频磁场分布获取磁共振耦合系统的互感耦合系数的方法,从而为构建高互感耦合系数谐振器模型奠定基础。该系统中的磁场具有高频、微弱的特性:频率在10 MHz左右,磁感应强度为 μT 量级。因此要求测磁系统具有灵敏度高、通频带宽和多点同步采集的特性。但是,目前详细介绍如何构建分布式高频微弱磁场检测系统的文献很少。

针对上述系统,设计了一种基于虚拟仪器的空间磁场

分布检测装置。该装置包括上、下位机两部分：下位机部分的传感器面阵负责空间多点磁场的同步采集；上位机部分基于 LabVIEW 开发了磁场测量的控制终端，具有通信设置与管理、节点管理与配置、数据采集与存储、磁场显示 4 大功能。该测试平台上、下位机通过 485 总线相连，通过自定义通信协议实现上位机与多个下位机的科学有序通信。实验结果显示该测磁系统的频带远超过 10 MHz，其磁场传感器的灵敏度为 530 V/T 左右，可以实现对空间 36 个点磁场的同步采集。

2 数字化磁场采集节点设计

2.1 磁场传感器设计

磁场传感器基于法拉第电磁感应定律工作。与霍尔传感器相比，该线圈传感器灵敏度较高，噪声较小，高频特性好；与磁通门传感器相比，本设计更适用于高频磁场测量，且具有设备成本低等优点；与巨磁阻传感器相比，本设计更成熟。

法拉第电磁感应定律的基本内容是当闭合回路中的磁通量发生变化时，闭合回路中会产生感应电势。其大小可由式(1)表示：

$$e_{mf} = -N \cdot A \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

式中： B 为磁感应强度、 A 为线圈面积、 N 为线圈匝数。

线圈在感应电动势的激励下会产生感应电流 $i(t)$ 。实际情况下的线圈相当于不仅有自电阻 R_0 ，还有自电感 L_0 和自电容 C_0 [3]，求解在感应电动势激励下线圈感应电流的计算模型如图 1 所示。

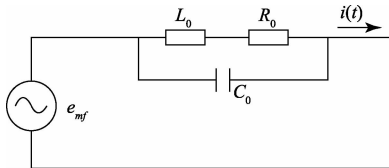


图 1 感应线圈模型

实际情况下线圈的自电容很小，由于电容“隔直通交”的特性，如果感应电动势的频率不是特高频，那么可以将电容忽略不计，视为断路。当电动势 e_{mf} 的角频率 ω 较大，从而使 $j\omega L_0 \gg R_0$ ，自电阻上的分压 $i(t) \cdot R_0$ 也可忽略不计。于是可得式(2)：

$$e_{mf} = -NA \frac{dB}{dt} = L_0 \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

进而得到式(3)所示关系：

$$B = -\frac{L_0}{NA} i(t) \quad (3)$$

可见，感应电流与线圈中磁场强度 B 成正比。基于此原

理，本设计通过在线圈两端串联小阻值的无感电阻 R 将电流信号转化为电压信号 [4]，送入后级信号处理电路，如图 2 所示。

磁场传感器线圈

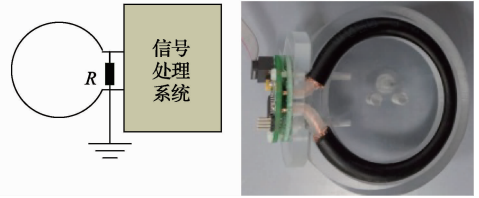


图 2 磁场传感器模型与实物

这样，测量磁场强度问题就转化为测量电阻 R 两端交变电压值的问题。

2.2 信号处理系统

信号处理系统的主要功能是对传感器线圈输出的高频正弦电信号进行采集、调理及传输。如图 3 所示，系统主要由输入缓冲级、可控增益放大电路、采样保持电路、A/D 转换电路、MCU、D/A 转换电路和通信接口电路组成。

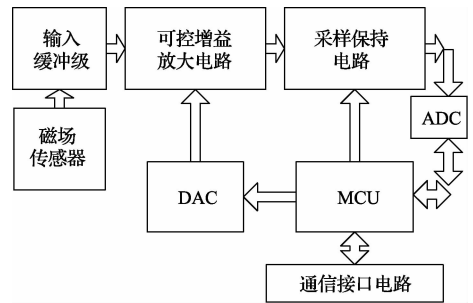


图 3 信号处理系统

2.2.1 可控增益放大电路设计

由磁场传感器设计指标可知，在其测量范围内输出信号幅值为毫伏级。为实现对信号的有效测量，应予以适当放大 [5]。本设计采用可控增益放大电路作为后级放大电路，增益可调范围在 $-20 \sim 60$ dB，且由软件控制实现增益自动变化 (AGC)。相比于一般固定倍数的放大电路而言，这样设计能够根据信号强弱调整放大倍数，不仅能够适当提高对微弱信号的检测精度，又不会造成对较强信号放大时的输出饱和，扩大了系统的检测范围。DAC 电路输出可控增益放大电路的增益控制电压。

如图 4 所示，可控增益放大电路由两级程控放大电路组成。该电路以 AD603 为核心器件。AD603 是 ADI 公司的一款压控放大器，它具有宽频带、低噪声、高增益精度等优点，适合于微弱高频信号检测。

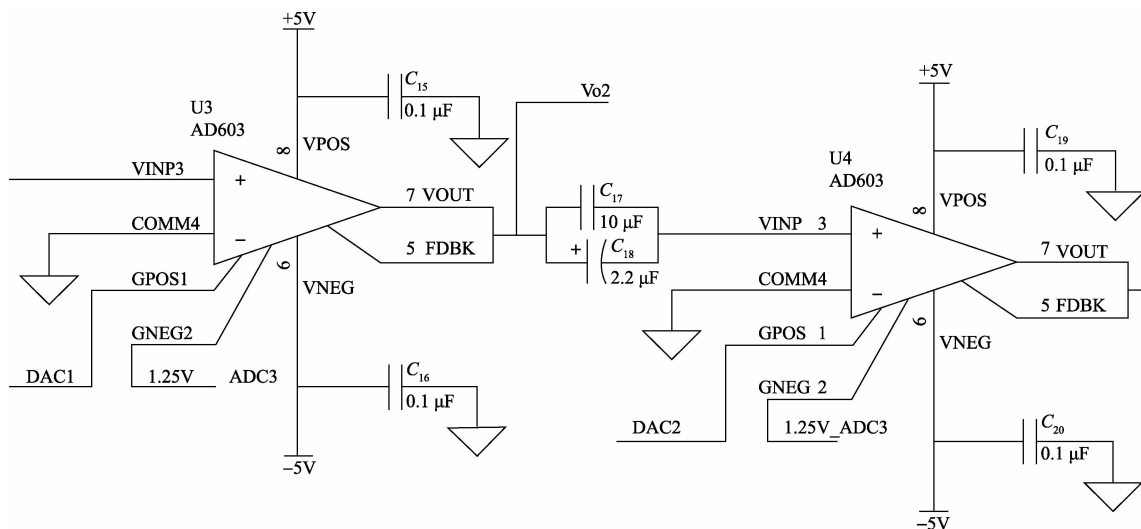


图 4 两级程控放大电路

AD603 增益控制电压输入端阻抗高达 50 MΩ, 在输入电流很小的情况下, 片内控制电路对提供增益控制电压的外电路的影响很小, 因此它可提供精确的、由引脚控制的

增益。其增益控制电压电路如图 5 所示。AD603 正电压控制端(1 管脚)与 12 位高精度 DAC 电路 LTC2631 相连; 负电压控制端(2 管脚)与高精度稳压管 REF1112 相连。

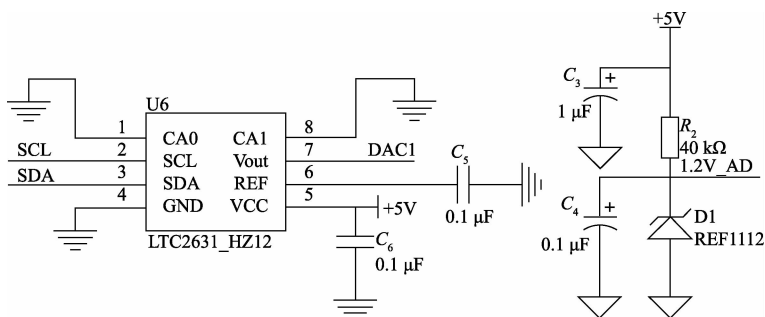


图 5 增益控制电压电路

单级 AD603 的反馈端(5 管脚)与运放输出端(7 管脚)短接, 此时单级运放的带宽为 90 MHz, 增益与控制电压的关系如式(4)所示:

$$A_u = 40 \times (DAC_i - 1.25) + 10 = 40 \times DAC_i - 40 \quad (4)$$

式中: A_u 表示运放增益(dB), DAC_i ($i = 1$ 或 2) 表示 DAC1 或 DAC2 的输出电压。

因此两级运放的增益可表示为式(5):

$$A_u = 40 \times (DAC_1 + DAC_2) - 80 \quad (5)$$

AD603 增益控制端压差在 ± 0.5 V 之间, 故:

$$-0.5 \leq DAC_i - 1.25 \leq +0.5 \quad (6)$$

因此两级 AD603 的增益范围是 $-20 \sim 60$ dB。由于两级运放幅频特性相同, 串联前各级带宽为 90 MHz, 串联后总的 3 dB 带宽应对应单级放大电路 1.5 dB 的带宽, 根

据幅频特性曲线可知级联后的总的带宽为 60 MHz, 满足设计要求。

2.2.2 输入缓冲级设计

考虑到磁场为高频信号, 硬件电路的频带要宽于 10 MHz。为使传感器的输出信号尽可能多的降落到信号处理电路的输入端, 设计使用输入缓冲级作为前级电路, 与传感器的输出阻抗进行匹配。再者, 由于 AD603 的输入电阻仅为 100 Ω, 需要在其前级加上输入缓冲级来提高输入阻抗。

设计输入缓冲级以 TI 公司的 OPA842 为核心器件, 其低噪声的特性能够有效减少前级电路对整个电路的影响, 很适合作为前级隔离电路。

如图 6 所示, 将 OPA842 设计为电压跟随器。由于 OPA842 的增益带宽积高达 200 MHz, 故电路的带宽可以满足要求。

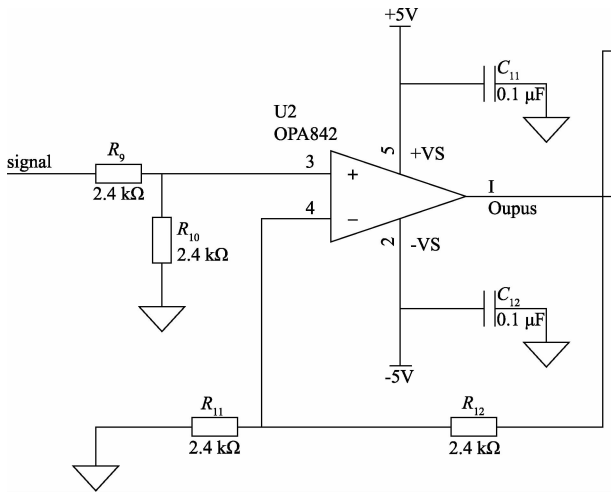


图 6 输入缓冲级电路

2.2.3 采样保持器设计

目标信号的最大频率可达 10 MHz,对于多数 A/D 转换器的采样速度和主控芯片的处理速度而言频率太高,因此采用采样保持器作为 A/D 转换的前级电路。这样不仅能够保证在 A/D 采样期间电压不会出现明显变化,又能够实现多节点间的同步采集。如图 7 所示,本文采用 TI 公司的 OPA615 构建高速采样保持器。

OPA615 内部集成有宽带跨导运算放大器 OTA 以及快速精准的采样跨导运算放大器 SOTA。OTA 和 SOTA 分别具有 710 MHz 与 730 MHz 的带宽,满足电路设计需求。

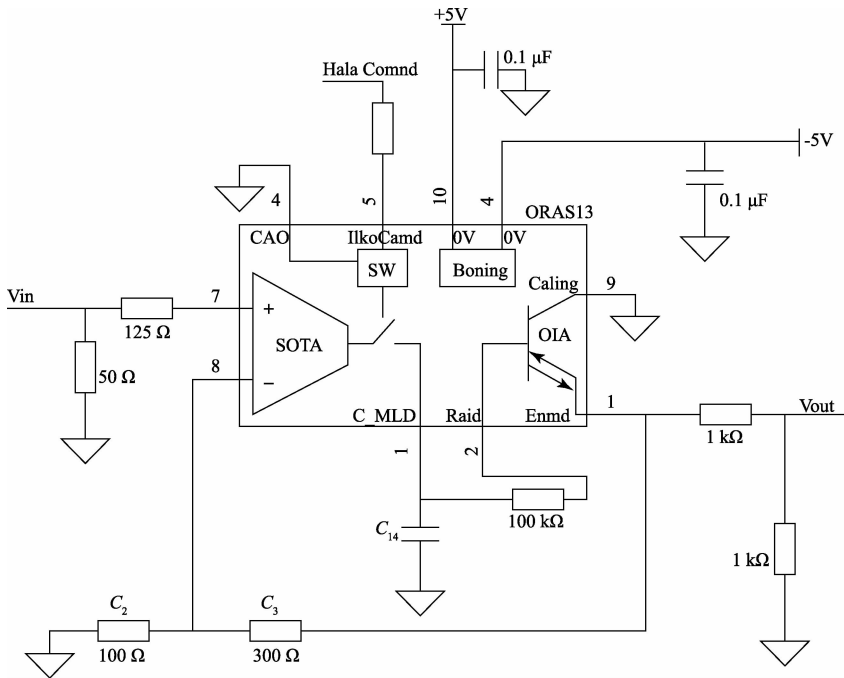


图 7 采样保持器电路

3 空间磁场同步检测技术研究

3.1 传感器面阵设计

由于磁场分布于三维空间中,为实现多点同步采集,本文设计了一种传感器面阵。如图 8 所示,在一个矩形面上均匀安装多个采集节点,采集到的磁场信号的数据先暂存于各采集节点的 MCU 内,之后通过 485 总线上传到上位机终端。

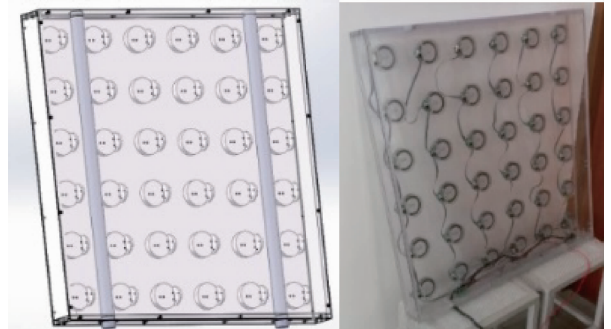


图 8 传感器面阵结构设计 with 实物

3.2 上下位机通信总线设计

由于所测磁场空间范围较大、传感器阵列采集到的数据量大,故数据传输时需要考虑通信方式的速率以及抗干扰能力^[6]。RS485的最高数据传输速率为10 Mbit/s;此外,485接口采用平衡驱动器和差分接收器的组合,抗共模干扰能力强、抗噪声干扰性好,因而通信距离远。设计构建的RS485通信网络如图9所示。

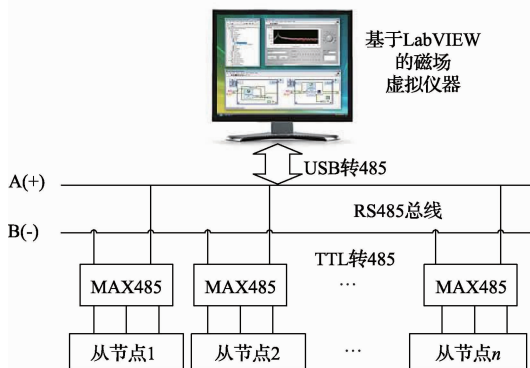


图9 上、下位机通信总线示意

图8所示面阵上均匀分布了 $6 \times 6 = 36$ 个磁场采集节点,所以图9所示485总线上共挂载36个从节点,通信主节点为上位机LabVIEW终端(PC)。通信采用“一主多从”模式,从传感器面阵引出的只有RS485总线,这样设计可将数据线与磁场之间的相互干扰降到最低。

3.3 多点同步采集设计

为了实现对空间多点磁场强度的同步采集,本设计采用图10所示的多通道结构。图中,B表示某一点的磁场信号;S/H表示采样保持器,其具体电路设计在1.2.3节已详细介绍。测磁系统运行时通过上位机LabVIEW发送一个同步采集信号,让每个磁场采集节点上的S/H都处于保持状态,并使每个节点上的A/D采集此时的磁场强度,再依次通过总线上传到上位机,如此实现对空间多点磁场的同步采集。

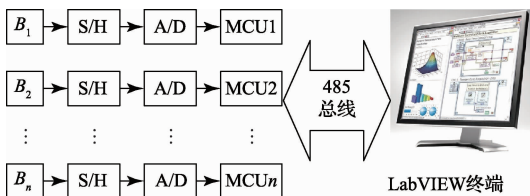


图10 磁场信号多点采集示意

4 系统软件设计

4.1 上、下位机通信协议设计简介

基于虚拟仪器的空间磁场分布检测平台分为上、下位

机两部分:面阵上每一个采集节点都是一个下位机;上位机终端基于LabVIEW平台开发。“一主多从”通信时将会存在以下2个问题^[7-8]:①通信对象不明确;②通信数据流的起始和结束的判断问题。

为了解决上述问题,且为了便于程序的开发与调试,本文自定义通信协议,规避“一主多从”通信过程中可能出现的通信错误。通信协议概要如下表所示:本协议规范通信帧格式。将上下位机通信的每一帧字符串严格划分为表1所示的6部分。

表1 通信帧解析

序号	通信帧部分
1	帧头
2	地址字节
3	命令字节
4	数据体
5	校验字节
6	帧尾

通信时以“帧头”、“帧尾”来区分数据流的起始、结束;通过“地址字节”来确定上位机与哪个下位机通信;通过“命令字节”来确定下位机的具体任务;通过“数据体”来存放有效数据。“校验字节”的设立是用于检验一帧数据传输过程中是否发生错误。

4.2 上位机软件开发

上位机软件基于美国NI公司的LabVIEW平台进行开发。针对磁共振耦合无线电能传输系统中的场检测,该上位机终端采用LabVIEW中的“状态机结构”与“事件结构”^[9]作为软件的整体框架,具体如图11所示。

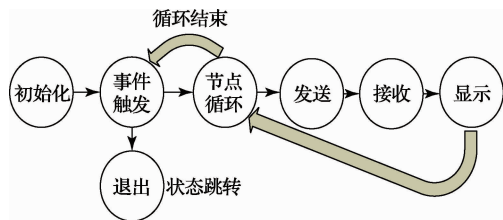


图11 上位机软件框架设计

本测控系统中LabVIEW终端作为主控平台,负责通信设置与管理、节点管理与配置、数据采集与存储、磁场显示^[10]。可见,上位机终端处于主控地位,且任务繁重。采用图11中所示的状态跳转流程,将主节点LabVIEW与任何单个下位机通信的过程规范为图示的几个典型状态。如此可以大大简化上位机软件的代码冗余,提高了程序的运行效率与可读性。最终开发出来的上位机终端如图12所示。

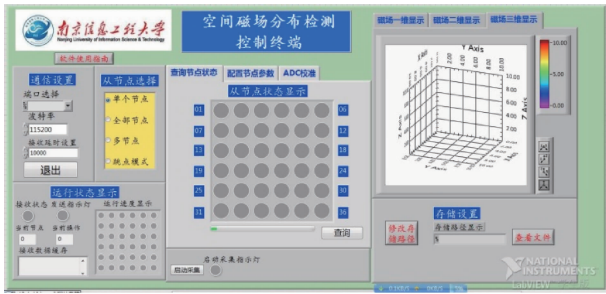


图12 上位机软件界面

5 实验结果分析

为验证文章分析的正确性,首先对单个磁场采集节点进行了实验验证,测试系统如图13所示。

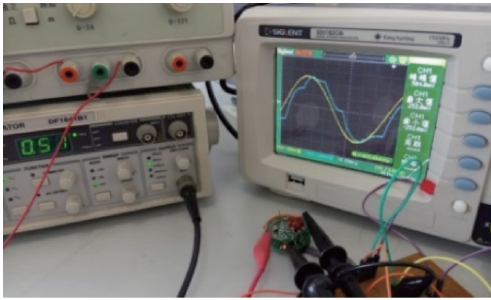


图13 实验验证测试系统

通过实验实测发现,该磁场传感器能够测量 10 MHz 的高频信号,且使信号不失真。两级程控放大电路可以实现 $-20 \sim 60$ dB 的连续增益变化,因此可测量的磁场强度的范围也较大。该线圈传感器的灵敏度实测结果在 530 V/T 左右。后级调理电路能够对传感器输出的信号进行有效调理。

之后对整套传感器面阵进行测试,实验结果表明上位机终端可以有效控制面阵上的 36 个节点;上位机的同步触发信号可以使所有采集节点的采样保持器处于保持状态,进而实现了空间多点磁场强度的同步采集,满足了磁谐振耦合无线电能传输系统中磁场检测的要求。

6 结论

针对磁谐振耦合无线电能传输系统,设计了一套空间

高频磁场分布检测平台。该平台分为上、下位机两部分:下位机设计制作了一个传感器面阵;上位机基于 LabVIEW 开发了磁场测量的终端软件。该测控平台上、下位机由 485 总线相连。实验证明该测控系统成功应用于磁耦合无线电能传输系统中的高频微弱磁场强度的检测,且可实现空间多点同步采集。

参考文献

- [1] 杜秀. 磁谐振耦合无线能量传输机理及实验装置研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.
- [2] 杨国明. 电磁谐振耦合无线电能传输技术的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2013.
- [3] 史仰伟. 变电站瞬态磁场测量系统的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2010.
- [4] 梁可道,米彦,李成祥,等. ns 级脉冲磁场传感器的研制[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1994-1999.
- [5] 曾繁政,黄河. 基于 AD603 的可控直流宽带放大器[J]. 大众科技, 2010(4): 36-37.
- [6] 易茂祥,陶金,吴友杰,等. 一种基于电力线的现场总线设计与仿真[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(2): 2580-264.
- [7] 尹静,贺良国,王洪波. 基于 LabVIEW 的三维静磁场计微弱信号检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2011, (6): 93-95.
- [8] 胡颖,丁天怀,王鹏. 多路微小平面线圈信号检测系统的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 327-331.
- [9] 赵弘,苏鑫,黄涵宇. 基于虚拟仪器的清管器内检地图标测试系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1): 69-73.
- [10] 张持健,陈航,李辉,等. 分布式仪器终端和虚拟仪器技术集成的智能测量分析控制系统[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(10): 76-82.

作者简介

吕富勇, 1974 年出生, 工学博士。主要研究方向为无线电能传输、智能测控、功率逆变技术。

E-mail: lvfuyong@nuist.edu.cn

周瑞卿, 在读研究生。主要研究方向为智能测控。

阮世阳, 在读本科生。主要研究方向为智能测控。