

# 基于 PXI 平台的 MEMS 电场传感器自动测试系统的设计

胡欣宇<sup>1</sup> 陈博<sup>2</sup>

(山西农业大学软件学院 太谷 030801)<sup>1</sup> (中国科学院电子学研究所 北京 100190)<sup>2</sup>

**摘要** 针对 MEMS 电场传感器的传统测试系统复杂、测试效率低和兼容性差等问题,设计了一种新型电场传感器自动测试系统。该系统基于高度集成的 NI PXI 平台,采用 LabVIEW 图形化编程语言,构成了传感器自动测试系统虚拟仪器框架。系统采用集散控制理念,将控制器与操作站分离,实现了对标准电场发生装置的控制、传感器微弱信号的采集与处理、数据的分析与存储等;并且基于数字化相关解调技术,实现了电场传感器对直流电场和交流电场的高精度标定测试。通过实验验证了测试系统工作的稳定,传感器的测试精度小于 1%。

**关键词** PXI, MEMS, 电场传感器, LabVIEW

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A

## Design of MEMS Electric-field Sensor Test System Based on PXI

HU Xin-yu<sup>1</sup> CHEN Bo<sup>2</sup>

(Department of Software, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)<sup>1</sup>

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)<sup>2</sup>

**Abstract** The traditional electric-field sensor test systems have some disadvantages such as complexity, inefficiency and bad compatibility. This paper designed a new electric-field sensor test system. Based on NI PXI and LabVIEW, virtual instrument system architecture was given by this test system. Based on DCS, the controller and operation station are separated, the standard electric-field controlling, data acquisition and processing can be realized. Based on the technique of correlation detection, it can measure the calibration of electric-field sensor in static and alternating electric field. Through experiments, the test system has been proved to have strong stability and high measuring accuracy less than 1%.

**Keywords** PXI, MEMS, Electric-field sensor, LabVIEW

## 1 引言

电场探测在航空航天、智能电网、石油石化、气象研究等领域中都有着广泛的应用,尤其在航天飞行器发射保障方面,电场更是不可或缺的决策依据之一<sup>[1]</sup>。目前,基于 MEMS 技术的微型电场传感器具有体积小、功耗低、成本低等优点,已经成为电场探测传感器的发展方向和研究热点。

在电场传感器的研制生产过程中,工作参数、性能的测试标定精度和效率直接关系到传感器的测试精度和生产效率。现有的电场传感器测试系统,包括平行金属极板、高压电源、信号发生器、锁相放大器、数据采集卡等设备,仪器设备较多、搭建实验平台复杂、自动化程度低、兼容性差,严重影响传感器研制过程中的效率。本文采用计算机集散控制理念,设计了一种基于 PXI 平台的 MEMS 电场传感器标定测试系统,实现了电场传感器标定测试装置的集成化、小型化,提高了研制效率和系统的稳定性。

## 2 MEMS 电场传感器工作原理

MEMS 电场传感器主要由屏蔽电极、感应电极、激励梳齿和支撑梁等部分组成。屏蔽电极接地,感应电极与检测电

路相连。该传感器敏感结构采用电荷感应原理来检测外电场。工作时,在激励梳齿上加载一定的激励电压,从而驱动屏蔽电极在水平方向来回周期振动<sup>[2-3]</sup>。

根据高斯定理(见图 1),当感应电极完全暴露在外电场  $E$  的作用时,感应电极上的感应电荷量最大;当感应电极完全由上面的屏蔽电极遮蔽时,感应电极上的感应电荷量最小,从而在感应电极上产生与外电场成正比的交变电流。

$$i = \frac{dQ}{dt} = \epsilon_0 \frac{dA_e}{dt} \cdot E \quad (1)$$

其中,  $\epsilon_0$  为介电常数,  $A_e$  为电场感应的有效面积,  $Q$  为感应电极感应的电荷量,  $E$  为待测量外电场。通过合适的检测电路即可检测出感应电流的大小,从而实现电场探测的目的。

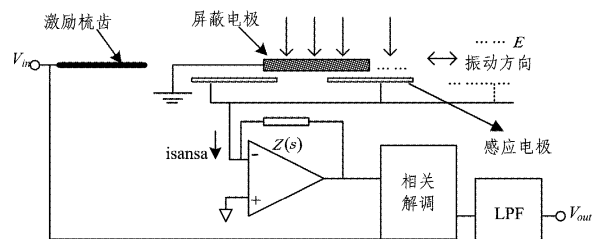


图 1 传感器工作原理图

本文受山西农业大学科技创新基金项目(2015YJ09)资助。

胡欣宇(1986—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为物联网, E-mail: huxinyu109@126.com; 陈博 硕士,助理研究员,主要研究方向为电场传感器。

### 3 系统硬件设计

传统的电场传感器测试系统包括平行金属极板、高压电源、信号发生器、锁相放大器、数据采集卡等设备,仪器设备较多,接线复杂很容易出错,自动化程度低,多数都是手动或半自动,兼容性差,一般只能对单一传感器产品进行静电场环境下的标定测试。本系统在硬件设计上基于 PXI 总线、集成控制器和各种功能板卡来实现系统的高度集成化和自动化。

PXI (PCI extensions for Instrumentation) 是一种由美国国家仪器公司发布的坚固的基于 PC 的测量和自动化平台。PXI 结合了 PCI(Peripheral Component Interconnection) 的电气总线特性与 Compact PCI 的坚固性,模块化的特性发展成了适用于试验、测量与数据采集场合的机械、电气和软件规范。制订 PXI 规范的目的是为了将台式 PC 的性能价格比优势与 PCI 总线面向仪器领域的必要扩展完美地结合起来,形成一种主流的虚拟仪器测试平台。这使它成为了测量和自动化系统的高性能、低成本运载平台<sup>[4-5]</sup>。

测试系统的工作原理如图 1 所示,为保证电场传感器测试过程的安全稳定,本系统采用计算机集散控制理念。集散控制系统(Distributed Control System, DCS)就是以微处理器为基础的对生产过程进行集中监视、操作、管理和分散控制的集中分散控制系统。该系统将若干台微机分散应用于过程控制,全部信息通过通信网络由上位管理计算机监控,实现最优化控制,整个装置继承了常规仪表分散控制和计算机集中控制的优点,弥补了常规仪表功能单一、人机联系差以及单台微型计算机控制系统危险性高度集中的缺陷,既实现了在管理、操作和显示三方面集中,又实现了在功能、负荷和危险性三方面的分散。DCS 系统在现代化生产过程控制中起着重要的作用,它综合了计算机的通信、显示和控制等技术,其基本思想是分散控制、集中操作、分级管理、配置灵活以及组态方便。

电场传感器测试系统的总体结构如图 2 所示。本系统分为上位机和下位机两部分,两部分之间通过 TCP/IP 协议通信,这样的设计既可以避免测试过程对传感器的干扰,又可以保障高压电源给测试人员带来的危险。上位机由 PC 机构成,负责测试参数的设定、测试结果的显示、数据的分析处理等;下位机由 NI PXIe 机箱搭配控制器、信号发生采集等板卡组成,负责仪器设备的控制、传感器的激励、信号的采集等。

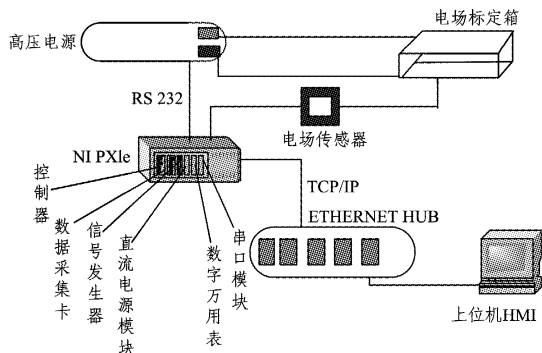


图 2 电场传感器测试系统的总体结构图

上位机通过 TCP/IP 协议将测试参数设定给 NI PXIe 控制平台,控制器通过 RS232 串口控制高压电源产生相应的电场,并且给传感器施加载激励信号、采集传感器的输出信号,通过独立线性度算法给出输入输出信号的拟合曲线,把标定

出的传感器工作参数和测试结果传递给上位机。上位机把标定参数直接写入传感器,并且存储在本机数据库中,可以直接打印测试报表。

电场传感器自动测试系统按照功能模块划分为主控制器、波形发生及激励模块、数据采集模块、状态检测模块等。硬件主要板卡选用了 NI 公司的产品,各模块在电气、结构等方面符合 PXI 总线规范。

系统主控制器采用 NI PXIe-8135 四核 PXI Express 控制器,具有高达 8GB/s 的系统带宽和 2GB/s 的插槽带宽,保证了采集系统运行的快速性和稳定性。传感器的激励信号由 NI PXI-4132 直流电源模块和 NI PXI-5421 任意波形发生器叠加提供。系统配有 NI PXI-4462 数据采集卡,采样率高达 204.8kS/s,精度为 24bit,可同时对 4 路传感器信号进行高速采集。电场的发生部分通过在平行金属基板上加载直流或者交流电压产生。本系统通过 RS232 串口控制 KEITHLEY 2410 直流源表或者 YOKOGAWA 2558A 交流电源产生交直流电场,并且可以通过 NI PXI-4071 数字万用表对电压进行监测。MEMS 电场传感器自动标定测试系统实物如图 3 所示。

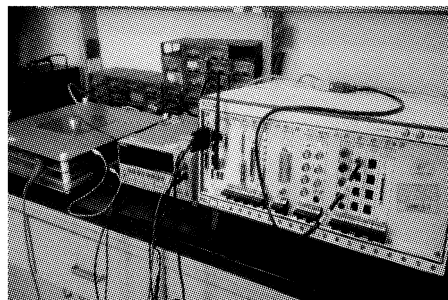


图 3 MEMS 电场传感器自动标定测试系统实物图

### 4 系统软件设计

#### 4.1 整体设计

电场传感器测试系统软件采用 LabVIEW,结合各板卡的驱动工具包开发。LabVIEW 是美国国家仪器公司研制开发的一种图形化编辑语言。LabVIEW 可充分发挥计算机的能力,有强大的数据处理功能,能提高工作效率;具有良好的平台一致性;易用性强,所编程序可在不同机器上运行,而不需要安装相应的开发环境<sup>[6-7]</sup>。

整个测试软件包括以下几个功能:控制交直流电源、采集测试数据并显示、进行相关的数据处理、数据库存储与管理、报表打印、系统报警等,其流程图如图 4 所示。

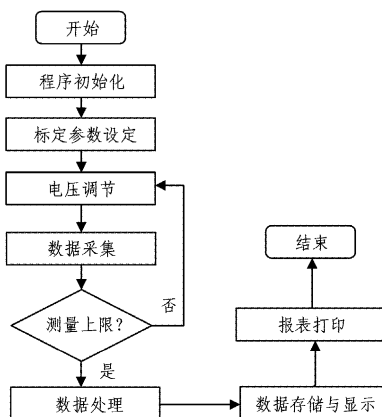


图 4 测试系统软件流程图

### 4.2 设备驱动

本系统 PXI 机箱中的板卡驱动都提供了 LabVIEW 接口的模块化驱动,可以在程序中直接调用,使用非常方便,只有直流电源的驱动需要开发者根据测试的要求自己编程实现,KEITHLEY 2410 直流源表的控制通过 RS232 通信,使用的协议是 SCPI 协议,实现高压电源的启动停止、电压输出、量程选择、错误提示等功能。

SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments),即程控仪器(可编程仪器)标准命令集。它采用一套树状分层结构的命令集,提出了一个具有普遍性的通用仪器模型,采用面向信号的测量;它的助记符产生规则简单、明确,且易于记忆,增强了系统的兼容性和扩展性。

### 4.3 系统状态检测与数据库管理

本系统为了保证测试人员的安全,对高压源进行安全检测,通过数字万用表板卡模块对标定箱中上下极板间的电压进行监测。由于在研发传感器过程中,测试设备需要不同的接线方式,偶尔会出现高压电源接线遗忘或者接错的情况,本系统的状态监测避免了这种现象带来的危险,若监测电压与控制产生的电压有较大偏差,则系统报警、停止测试、关闭仪器设备,以确保测试过程的安全稳定。

程序中数据存储部分根据产品类型将测试原始数据及处理后的测试结果分类存入数据库,该部分程序调用了 LabVIEW 提供的 database 数据库工具包,数据库选用了 SQL Server 2005。系统提供历史数据查询功能,可以根据产品编号、测试人员或者测试日期进行查询。系统可提供报表打印功能,根据所查询编号的传感器,提供其测试的具体时间、测试参数、测试环境和测试结果,借助 LabVIEW 提供的 RGT 工具包,生成 PDF,WORD 或者 EXCEL 格式的报表文件。测试系统 HMI 软件界面如图 5 所示。

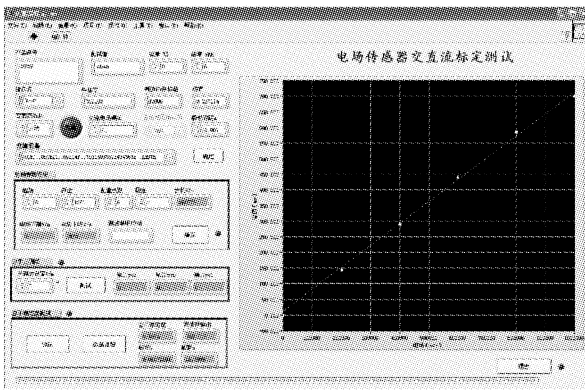


图 5 测试系统 HMI 软件界面

## 5 实验测试

应用本系统进行了 MEMS 电场传感器的标定测试,选用

MEMS 探空电场传感器,谐振频率为 3082Hz,温度为 21.6℃,湿度为 20%,测量范围为 0~50kV/m,进行 3 个正行程测试,测试结果如图 6 所示,测量传感器的总不确定度为 0.874%。

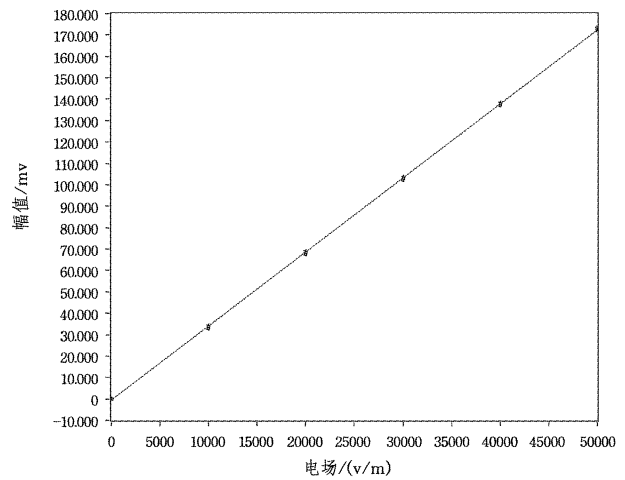


图 6 MEMS 电场传感器总不确定度测试结果

**结束语** 本文基于 PXI 平台设计了一套 MEMS 电场传感器标定测试系统,实现了系统的集成化,提高了系统的自动化程度、兼容性和扩展性。实验证明系统能够准确地测定传感器的标定参数和性能指标,能够很好地完成 MEMS 电场传感器研制生产过程中标定测试的需求。

### 参考文献

- [1] 罗福山. 肯尼迪航天中心的雷电防护系统[J]. 世界导弹与航天, 1991(3):43-46.
- [2] YANG P F, PENG C R, FANG D M, et al. Design, fabrication and application of an SOI-based resonant electric field microsensor with coplanar comb-shaped electrodes[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013, 23(5):266-285.
- [3] 杨鹏飞, 彭春荣, 张海岩, 等. SOI 微型电场传感器的设计与测试[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11):2771-2774.
- [4] 李进进, 苏理, 段静, 等. 基于 PXI 和 CompactRIO 平台构建列车传动控制单元测试环境[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12):106-112.
- [5] 尹禄高, 于航, 杨雪, 等. 基于 PXIE 的信号完整性测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(9):2942-2944.
- [6] 张海岩, 彭春荣, 刘世国, 等. 基于 Labview 的微型电场传感器自动标定系统[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(5):619-622.
- [7] 任东宇, 彭春荣, 夏善红. 基于 LabVIEW 和 MEMS 敏感结构的工频电场无线检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2014(1):53-56.