

基于虚拟仪器的真空计参数自动测试系统

赵博文¹, 梁西银¹, 颜昌林², 谢凌菲¹, 马丽萍¹, 蔡坤辉¹

(1. 西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃兰州 730070;

2. 兰州真空设备有限责任公司华宇分公司, 甘肃兰州 730000)

摘要: 针对真空计参数测试过程中数据采集实时性差、自动化程度不高、测试点真空度调节困难等问题, 设计出一套真空计参数自动测试系统。以 LabVIEW 为软件开发平台, 采用 RS485 通信方式实现对真空计、气体质量流量控制器数据的实时自动采集; 采用自整定 PID 算法调节气体质量流量控制器的通气量, 实现对测试点真空度的自动调节。测试结果表明: 系统能够自动调节真空度并记录数据, 实现了真空计参数测试的自动化。

关键词: 真空计; LabVIEW; PID-自整定

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-1841(2020)06-0063-05

Automatic Measurement System of Vacuum Gauge Parameters Based on Virtual Instrument

ZHAO Bo-wen¹, LIANG Xi-yin¹, YAN Chang-lin², XIE Ling-fei¹, MA Li-ping¹, CAI Kun-hui¹

(1. College of Physics Electronic Engineering Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Lanzhou Vacuum Equipment Co., Ltd. Huayu Branch, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor real-time data acquisition, low degree of automation and difficult adjustment of vacuum degree at test points in the process of vacuum meter parameter testing, an automatic testing system for vacuum meter parameters was designed. Based on LabVIEW software development platform, the automatic data acquisition of vacuum gauge and gas mass flow controller were realized by RS485 communication mode, and the vacuum of test point was automatically adjusted by adjusting the air flow of gas mass flow controller with self-tuning PID algorithm. Tests show that the system can adjust the vacuum degree and record the data automatically, thus achieving vacuum gauge measurement automatic.

Keywords: vacuum gauge; LabVIEW; PID-self-tuning

0 引言

真空技术是 20 世纪初发展起来的一门新的学科技术。随着科技的进步, 真空技术作为一门实用的基础技术已广泛应用于航天、航空、高能物理、可控热核聚变、表面物理、半导体与微电子等尖端科学研究领域^[1]。真空计是用来测量绝压状态下大气压力的仪器, 其测量的准确性对真空环境下进行的科学研究、产品质量有直接影响^[2]。

在真空计准确性的测试过程中, 需要在校准室内不同量级真空度下, 均匀选取 3 个稳定测试点的真空度, 将参考真空计和待测真空计一同接到校准室上进行对比^[3]。测试点的真空度通常需要测试人员凭经验采取手工方式不断调节气体质量流量控制器的通

气量来获得, 调节不仅耗费时间而且不容易稳定在实验要求的真空度测试点, 导致测试的效率低下, 增加了实验难度。在测试过程中, 测试人员不仅需要手动调节气体质量流量控制器的参数, 还需要人工观察并手工记录实验数据。数据采集的实时性较差, 人为引入测量误差较多, 无法保证测量的准确性和可靠性。

针对上述问题, 设计了基于虚拟仪器的真空计参数自动测试系统, 实现了数据的采集、记录、计算与真空度调节的自动化。下面就测试校准室结构、测试过程、真空度控制算法、软件实现功能作以介绍, 最后对系统完成的测试结果进行分析。

1 校准室结构及测试过程

动态比较法是一种用于高真空和超高真空区间的真空计参数的测试方法^[4]。动态比较法采用真空校准室结构示意图如图 1 所示。图中 G_1 为参考真空计, G_2 为被测真空计; 图中 A 与 B 为气体流动互为对

基金项目: 甘肃省科技支撑计划项目(1304GKCA024); 甘肃省科技重大专项计划资助项目(1602GKDA015)

收稿日期: 2019-04-11

称之处,两处压强相等;测试时通过真空泵组成的抽气系统向外抽气,通过气体质量流量控制器控制进气量的大小获取测试点真空度。当参考真空计的读数达到并稳定在指定真空度测试点时,记录被测真空计读数并计算测量误差。动态比较法的优点在于本身有较大的气体流动,所以真空容器及真空计本身的吸气、放气对真空系统的影响不大,可以忽略不计。

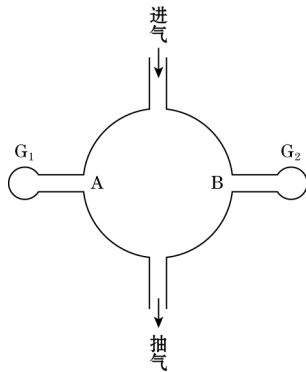
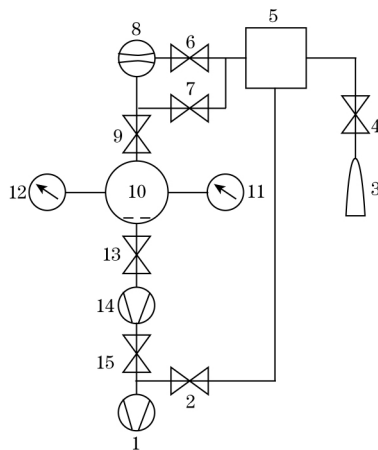


图1 真空校准室结构示意图

真空计测试系统组成如图2所示。在球形容器的赤道上均匀分布有待测真空计接口,以保证室内真空压力的均匀性,真空系统采用分子泵和机械泵组成,能够缩短测试所需的时间,并为真空计测试系统所需要的高真空环境。



1—前级泵; 2、4、6、7、9、13、15—真空阀门; 3—气源; 5—稳压室;
8—气体质量流量控制器; 10—校准室; 11—参考真空计;
12—被测真空计; 14—分子泵

图2 真空计测试系统结构图

开始测试前,通过阀门4、7、9向校准室10内输入约50 kPa的N₂后,再关闭上述阀门,将被测真空计安装在校准室赤道的接口上。随后通过前级泵1、阀门15、13和分子泵14组成的抽气系统将真空抽至极限真空以减少本底误差,然后可以开始测试,通过气源3和阀门4向稳压室5输入一定压力的N₂,关闭阀门4,然后打开测量控制软件,输入指定真空度,自动测试

软件采用PID算法调节气体质量流量控制器的通气量,将校准室真空度调节至测试点要求的真空度,等待参考真空计读数稳定后,记录参考真空计和测真空计的读数并计算误差。此过程需要依次在10⁻⁶~10⁻³ mbar (1 mbar=100 Pa)范围内的每一个量级下均匀测量3组数据样本。

2 软件设计

对于自动测试系统的开发平台有多种选择。其中,LabVIEW是一种基于G语言(graphics language,图形化编程语言)的虚拟仪器开发平台,具有可视化界面,是实现对设备的控制,数据的采集、存储、处理和显示的理想选择^[5-10]。自动测试系统程序采用模块化设计方法,不仅提高了开发效率,同时增强了可维护性,还为未来程序功能的扩展留下空间^[11-14]。下面对系统PID控制算法及实现、数据采集等关键VI模块予以说明。

2.1 控制算法

2.1.1 PID控制系统原理

PID控制算法简单、运行可靠且结构清晰、易于实现,对于特定的控制对象,具有很强的鲁棒性,是一种常见的控制器,其思路在于把采集到的数据和一个设定值进行比较,然后将误差通过比例、积分、微分算法处理计算出新的输出值,该值再输入给执行部件,使系统达到或保持在设定值^[14]。本系统采用PID算法实现对校准室内真空度的调节与控制,PID控制系统原理如图3所示。

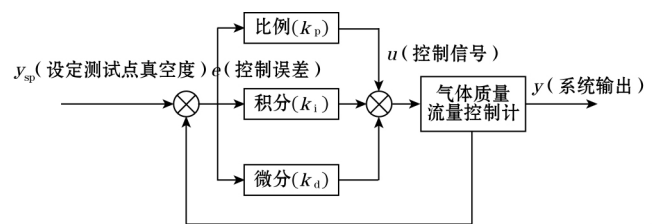


图3 PID控制系统原理图

图3中y_{sp}为设定值,即测试点目标真空度;y为系统输出,即通过PID控制气体质量流量控制器调节后的实际真空度;e为控制误差 e=y_{sp}-y,即设定真空度值与实际测量真空度值的差;u为控制信号,通过PID控制器计算出控制气体质量流量控制器阀门开度的大小值。PID控制器的表达式为

$$u = k_p e + k_i \int_0^1 e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中:u为系统控制输出;k_p为比例调节系数;k_i为积分调节系数;k_d为微分调节系数。

式(1)中比例环节,即成比例地反映控制系统的

偏差,用以减小系统偏差;积分环节主要用于消除系统静差,提高系统的无差度;微分环节主要反映偏差信号的变化趋势,并能在偏差值变得太大之前,在系统中引入一个有效的早期修正信号,从而加快系统动作速度,减少调节时间。

为了便于程序的实现,将 PID 离散化后可得

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) + k_d [e(k) - e(k-1)] \quad (2)$$

式中: $u(k)$ 和 $e(k)$ 分别为第 k 次采样的计算机输出值和误差值,本系统的采样周期取 1 s。

2.1.2 继电器反馈 PID 自整定方法

PID 控制器能否实现较好的控制效果与 PID 的参数值的选取有很大关系。其参数的取值将影响 PID 控制器的性能,参数整定不当不但会影响控制的精度,还可能导致系统不稳定。由于真空计测试系统存在诸多不确定性,是一个动态平衡的系统,设备、环境对其影响较大,在本测试过程中由于测试点的不同会导致系统环境发生改变,就需要对参数重新进行整定。传统的 PID 控制器的整定方法往往依靠经验,为了提高 PID 整定参数的准确性,PID 控制自整定技术便应运而生^[15]。

本系统采用继电器反馈 PID 自整定方法计算 PID 控制器的参数。自整定控制系统原理如图 4 所示。该系统有 2 种模式:控制模式和自整定模式。在自整定模式下,闭环控制回路中加入继电器特性的非线性控制,使被控过程产生极限环振荡,并由极限环振荡曲线得到系统的特征参数,临界比例 K_u 和临界振荡周期 T_u ,再利用 Z-N 临界比例度 PID 参数整定表计算对应的 PID 参数;在控制模式下,利用自整定模式下求得的控制参数进行 PID 控制。如果系统的测试条件发生变化,需要重新回到自整定模式进行参数整定,整定结束后再回到控制模式。相较于传统的 PID 参数自整定技术,耗时少且易于使用,全程只需要确定一个参数就可以自动整定计算出 PID 的控制器的参数^[16]。

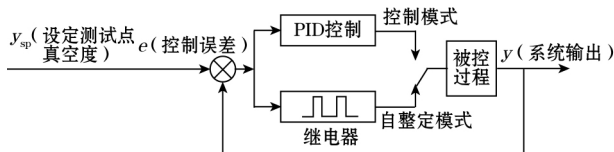


图 4 自整定控制系统原理

利用描述函数法对系统进行分析可以确定临界增益和临界振荡周期。当系统处于等幅值振荡,非线性环节输入一个正弦信号 $e(t) = A \sin \omega t$,在标准继电器情况下,继电器输出 $u(t)$ 的周期为 T_u ,幅值为 M 的方波

信号,用傅里叶级数表示为

$$u(t) = \frac{4M}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin [(2k-1)\omega t]}{2k-1} \quad (3)$$

理想继电器特性 $N(A)$ 用描述函数表示,可以简化成 $u(t)$ 的基波成分与输入正弦曲线的幅度之比,即 $N(A) = \frac{4M}{\pi A}$,式中 M 是继电器特性幅值, A 是振荡曲线的幅值。闭环系统产生极限环振荡的条件为

$$1 + N(A) G_p(j\omega) = 0 \quad (4)$$

式中 $G_p(j\omega)$ 为被控过程。

Z-N 临界比例度公式的参数 K_u 和 T_u 可以通过以下方程表示:

$$K_u = -\frac{1}{G_p(j\omega)} = \frac{4M}{\pi A} \quad (5)$$

$$T_u = (T_{\max} - T_{\min}) \times 2 \quad (6)$$

式中: K_u 为继电器特性在传输幅度为等幅振荡的正弦信号时的等价临界振荡比例增益; T_u 为临界振荡周期; A 为幅值,可依据图 5 所示的基于继电器特性的 PID 参数自整定算法的控制过程曲线计算,

$$A = \frac{y_{\min} - y_{\max}}{2} \quad (7)$$

式中: y_{\max} 和 y_{\min} 分别为自整定过程中系统进入稳定的等幅振荡后系统输出最大值和最小值; T_{\max} 和 T_{\min} 为其对应的时间。

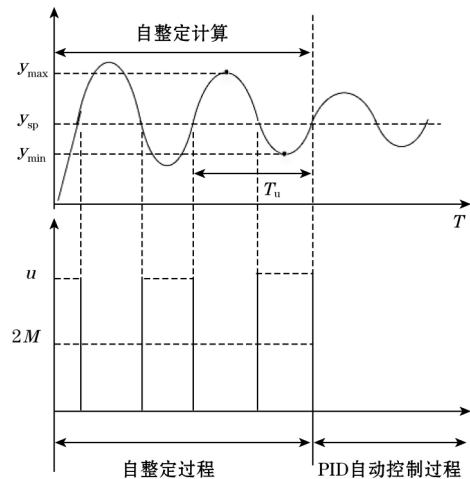


图 5 继电器振荡自整定过程曲线

当自整定过程达到等幅振荡之后,结合式(5)~式(7)计算临界增益 K_u 和振荡周期 T_u ,再由 Z-N 临界比例度 PID 参数表表 1 计算 PID 控制器的参数。

表 1 临界比例度 PID 参数整定

控制器类型	K_p	T_i	T_d
P	$0.500K_u$	∞	0
PI	$0.450K_u$	$0.850T_u$	0
PID	$0.600K_u$	$0.500T_u$	$0.125T_u$

2.1.3 PID 控制程序的实现

利用 LabVIEW 提供的 PID 自整定模块可以快速实现 PID 控制,该模块提供 PID 的基本算法,不仅可以手动对 PID 参数进行调节,还可以利用自整定向导对参数进行自动的整定。开发者只需要对 PID 自整定模块的接线定义进行相应的接线即可。PID 控制程序如图 6 所示。设定值是指被控过程变量的目标值,即测试过程中所要获得的目标真空度值;过程变量指被控变量的测量值,即测试过程中真空计所采集的实时真空度值,根据实际情况,气体质量流量计的最小和最大开度范围为 0~100%。

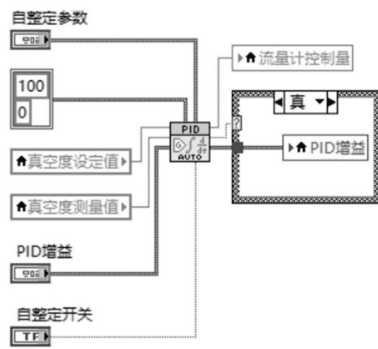


图 6 PID 控制程序

当设定值或测试条件发生变化后,需要对 PID 参数进行及时的整定。自整定向导开启参数整定效果如图 7 所示,可以根据实际需要选择不同的控制类型,改变继电器振幅等获得更好的控制效果。

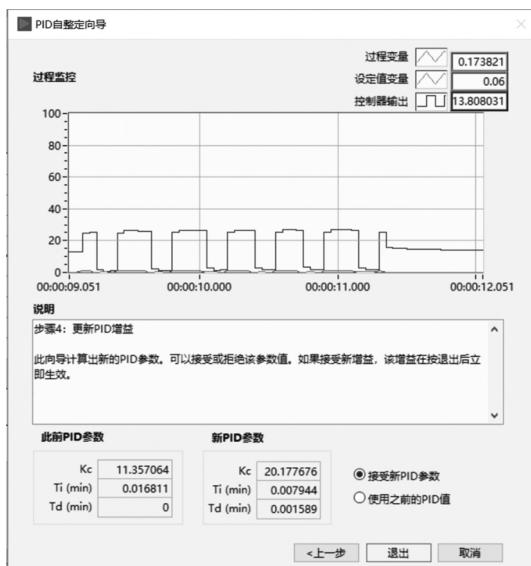


图 7 参数整定界面

2.2 仪表通信部分实现

本系统真空测量部分选用德国 Thyacont 全量程高精度真空计,该仪表测量范围为 1 000~10⁻⁸ mbar,能够覆盖实验所需的测试范围,进气控制系统部分选

用 CS200 型数字式气体质量流量控制器,该仪表能够提供 2.5、10 sccm(1 sccm=1.69 mPa·m³/s)等多种流量量程的气体质量流量控制器,能够满足不同量级真空度下校准室的供气需要,实现对真空计测试系统流量的测量和调节。两种仪器都提供 RS485 通信接口,通过串行通信方式实现对真空计和气体质量流量控制器的测量与控制。

LabVIEW 提供了完善的串口应用模块 VISA,是一组标准的 I/O 函数库及其相关规范的总称,可作为上位机和下位机之间的连接模块。本软件用到了 4 个串口操作函数,分别是 VISA Configure Serial Port 串口参数初始化函数,用于设置串口通信的波特率、数据位数、校验方式、停止位数等参数;VISA Write 串口写函数,向串口缓冲区写入数据;VISA Read 串口读函数,读取串口缓冲区中的数据;VISA Close 关闭串口函数,结束与指定串口资源之间的会话。流量计通信部分程序如图 8 所示。

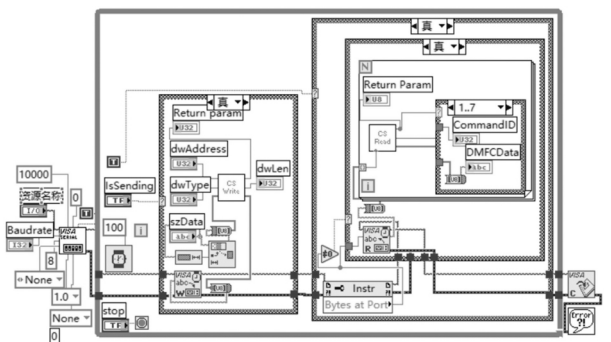


图 8 流量计通信程序

LabVIEW 提供了丰富的数据采集、字符截取和字符转换等功能的模块,以满足不同的数据处理需求。以真空计为例,上位机通过 RS485 串口与真空计通信,首先根据通信协议将数值读取指令发送给真空计,然后接收包含当前真空度信息的数据帧,返回的数据帧通常包含多种信息,为了方便数据的处理,需要对返回的数据帧进行处理。此部分主要用到“搜索/拆分字符串”函数,用于搜索特定字符串中的信息,并将匹配后的信息输出“分数/指数字符串至数值转换”函数,使科学计数法字符串转换为数字形式,方便后续程序之间的数据传输“写入文本文件”函数,将采集到的信息进行保存,方便日后数据的整理和查找。真空计数据采集与处理程序如图 9 所示。

3 人机界面设计

LabVIEW 提供了诸多图形化控件,使得软件界面友好。按照实际需要,对软件添加实时曲线变化显示等功能,使得实验过程更加直观,便于人员现场进行

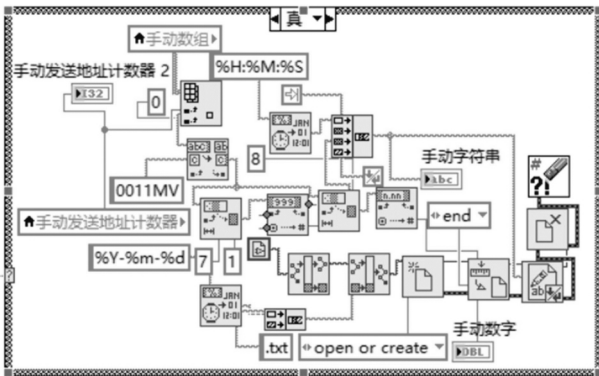


图 9 真空计数据采集与处理程序

观察。软件的主界面如图 9 所示。包括参考真空计设置、待测真空计、气体质量流量控制器和真空度控制 4 个部分。

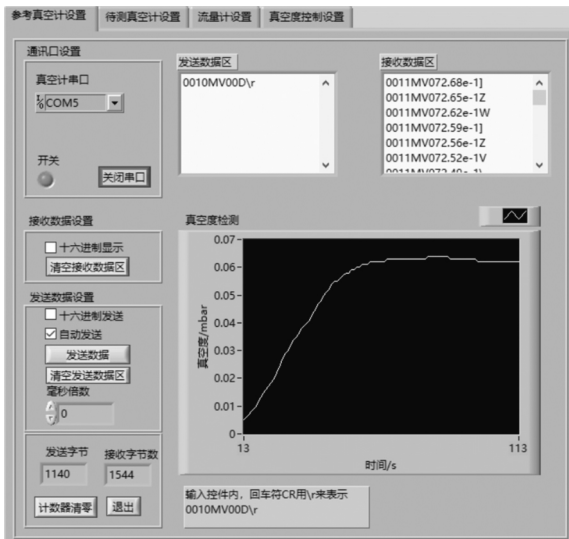


图 10 软件主界面

4 测试结果与分析

按照上述的实验流程在相同的实验环境下使用同一参考真空计,对同一台 Thyacont 真空计分别采用人工测试和软件自动测试两种方式进行测量,得到的测量结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 人工测试

参考真空计 /mbar	待测真空计 /mbar	误差 /%
3.3×10^{-6}	4.8×10^{-6}	45
6.1×10^{-6}	7.4×10^{-6}	21
8.9×10^{-6}	9.8×10^{-6}	10
3.0×10^{-5}	3.2×10^{-5}	6.7
6.2×10^{-5}	6.0×10^{-5}	3.2
9.2×10^{-5}	9.2×10^{-5}	0
3.1×10^{-4}	3.2×10^{-4}	3.2
6.1×10^{-4}	6.5×10^{-4}	6.6
9.1×10^{-4}	2.0×10^{-4}	9.9

表 3 自动测试

参考真空计 /mbar	待测真空计 /mbar	误差 /%
3.0×10^{-6}	4.5×10^{-6}	50
6.0×10^{-6}	7.2×10^{-6}	20
9.0×10^{-6}	9.9×10^{-6}	10
3.0×10^{-5}	3.2×10^{-5}	6.7
6.0×10^{-5}	5.8×10^{-5}	3.3
9.0×10^{-5}	8.7×10^{-5}	3.3
3.0×10^{-4}	3.1×10^{-4}	3.3
6.0×10^{-4}	6.4×10^{-4}	6.7
9.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	11.1

排除环境扰动和真空计本身的测试误差等因素后,分析表 2 和表 3 人工测试与自动测试数据的结果表明,自动测试结果与手动测试结果基本相同,能够代替手工对真空计测试。相较于手动测试,自动测试系统有如下优点:

(1) 系统采用图形化操作界面,实验人员操作方便,数据显示直观,易于观察。

(2) 数据采集稳定、准确,避免引入人为误差导致测量结果不准确。

(3) 在测试过程中,根据每个被检定仪器的技术指标动态的对每个测量点进行判断,实时显示该测量点数是否符合技术指标要求,免去人工计算、判断,降低测试人员工作强度。

(4) 具备数据存储和查询功能,可随时查阅已测仪器的测量数据与测量结果。

(5) 自动测试程序中加入了 PID 控制器,能够快速地将真空度调节至指定测试点真空度。测试时间从手工的 1~2 min 缩减至自动调节的 10 s 左右,节省了测试时间,提升了测试效率。

5 结束语

利用 LabVIEW 开发的真空计参数自动测试系统,界面友好,操作简单,使用过程中用户只需要对真空计、气体质量流量控制器和真空度的参数进行简单的设置便可自动完成测试。与手动测试的实验对比结果表明,应用该自动测试系统能够替代手工测试,实现数据记录与真空度调节的自动化,从而缩短了真空计参数的测试周期,减轻了测试人员的工作强度;同时消除了测试人员由于手工记录数据实时性不强而造成的实验误差,提高了测试精度;加入的 PID 控制算法使系统能快速达到测试点真空度,提高了测试系统的自动化程度;加入的继电型参数自整定提高了 PID 控制算法对系统的适应性;程序采(下转第 82 页)

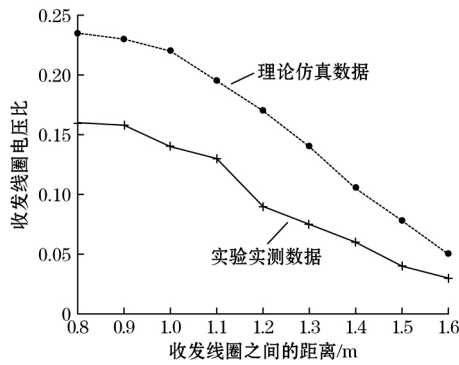


图5 不同通信距离下磁感应波导通信系统收发端电压比
波导通信系统信道理论模型,分析中继线圈偏离理想
预设位置时所引入的额外路径损耗。最后通过搭建
实验平台,通过分析采集接收线圈电压值,成功验证了磁
感应波导通信系统信号强度衰减模型。下一步研究目标
尝试将电磁波通信技术和磁感应波导通信技术的优势结
合起来,构建更为有效的混合通信模式。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, STUNTEBECK E P. Wireless underground sensor networks: research challenges [J]. *Ad Hoc Networks*, 2006, 4(6): 669-686.
- [2] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks: a survey [J]. *Computer Networks*, 2002, 45(2): 393-422.
- [3] VURAN M C, AKYILDIZ I F. Channel model and analysis for wireless underground sensor networks in soil medium [J]. *Physical Communication*, 2010, 3(4): 245-254.

- [4] SUN Z, AKYILDIZ I F. Underground wireless communication using magnetic induction [C]. *IEEE International Conference on Communications, Dresden 2009*: 1-5.
 - [5] SUN Z, AKYILDIZ I F. Magnetic induction communication for wireless underground sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(7): 2426-2435.
 - [6] LI L, VURAN M C, AKYILDIZ I F. Characteristics of underground channel for wireless underground sensor networks [C]. *Proc. Med-Hoc-Net'07*, 2010.
 - [7] SUN Z, AKYILDIZ I F. On capacity of magnetic induction-based wireless underground sensor networks [C]. *INFOCOM'12, Proceedings IEEE*, 2012: 370-378.
 - [8] JING H Z, WANG Y X. Capacity performance of an inductively coupled near field communication system [C]. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2008: 1-2.
 - [9] JACK N, SHENAI K. Magnetic induction IC for wireless communication in RF-impervious media [C]. *IEEE Workshop on Microelectronics and Electron Devices*, 2007: 47-48.
 - [10] SOJDEHEI J J, WRATHALL P N, DINN D F. Magneto-inductive (MI) communications [C]. *Oceans*, 2001: 513-519.
 - [11] TAN X, SUN Z, AKYILDIZ I F. Wireless underground sensor networks [M]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2015: 1-3.
 - [12] 孙彦景, 徐胜, 施文娟, 等. 无线地下磁感应通信系统研究与实现 [J]. *传感技术学报*, 2017, 32(6): 904-908.
- 作者简介: 高振江(1981—), 讲师, 硕士, 研究方向为嵌入式系统与网络。E-mail: 44699943@qq.com
通讯作者: 刘洲洲(1981—), 教授, 博士, 研究方向为传感器网络。E-mail: nazi2005@126.com

(上接第67页)用的模块化设计使得系统功能的扩展性、可维护性大大提高。

参考文献:

- [1] 卢耀文, 刘志宏, 闫荣鑫, 等. 一种下限为 10^{-10} Pa·m³/s 的正压漏孔校准装置 [J]. *真空科学与技术学报*, 2018, 38(12): 1019-1024.
- [2] 贾军伟, 张书锋, 王欢, 等. 基于虚拟仪器的真空计电参数检定系统 [J]. *宇航计测技术*, 2014, 34(3): 26-30.
- [3] 刘兴胜, 陈旭. 真空校准系统及真空计的校准 [J]. *计量与测试技术*, 2007(10): 1-2.
- [4] 俞宙, 李静, 魏亚峰, 等. 基于虚拟仪器的高速混合信号自动测试系统设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(S1): 94-101.
- [5] 叶海明, 周绍磊, 王昆平. 通用测试系统软件平台设计 [J]. *国外电子测量技术*, 2010, 29(2): 54-57.
- [6] 任献彬, 刘贤忠. 测试程序软件开发平台的设计与实现 [J]. *电子测量技术*, 2009, 31(2): 1-3.
- [7] LIU C, XU L, CAO Z. Measurement of nonuniform temperature and concentration distributions by combining line-of-sight tunable diode laser absorption spectroscopy with regularization methods [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(20): 4827.
- [8] WAGNER C, ARMENTA S, LENDL B. Developing automated analytical methods for scientific environments using LabVIEW [J]. *Talanta*, 2010, 80(3): 1081-1087.

- [9] 郭北涛, 柳洪义, 曹阳, 等. 基于虚拟仪器技术的电磁阀综合特性测控系统 [J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(2): 293-298.
 - [10] 孙屹博, 王晓东, 余东生, 等. 基于虚拟仪器的高载条件下 MEMS 动态测试系统 [J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(1): 29-34.
 - [11] 杨乐平, 李海涛, 杨磊. *LabVIEW 程序设计与应用* [M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2005: 88-89.
 - [12] 王晓, 张宝怀. 基于 LabVIEW 的换热器性能试验装置测控系统的开发 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(4): 309-312.
 - [13] 耿国磊, 别红霞. 基于 LabVIEW 的高阻自动测量系统 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2009, 23(3): 70-75.
 - [14] 杨清宇, 巨林仓. 一种非线性 PID 控制算法及其在玻璃窑炉液位控制上的应用 [J]. *工业仪表与自动化装置*, 2000(6): 42-45.
 - [15] 潘帅, 杨平. 基于继电器反馈的 PID 自整定控制技术进展 [J]. *上海电力学院学报*, 2008(2): 132-135.
 - [16] 杨智, 陈雨琴. 基于 LabVIEW 的 PID 自整定控制器设计 [J]. *化工自动化及仪表*, 2015, 42(11): 1188-1191.
- 作者简介: 赵博文(1991—), 硕士研究生, 主要从事控制工程, 计算机测量与控制方向等研究。
E-mail: 573171431@qq.com
梁西银(1971—), 高级实验师, 学士, 主要从事嵌入式系统及可编程逻辑器件设计, 计算机测量与控制的研究。E-mail: 569613663@qq.com