

# 基于虚拟仪器的分子泵抽速自动测试软件设计

赵博文<sup>1,3</sup> 延峰<sup>2,3</sup> 杨传森<sup>2,3</sup> 卢耀文<sup>2,3</sup> 董云宁<sup>2,3</sup> 邵壮<sup>2,3</sup> 梁西银<sup>1\*</sup>  
(1. 西北师范大学物理与电子工程学院 兰州 730070; 2. 北京东方计量测试研究所 北京 100029;  
3. 北京市真空计量检测工程技术研究中心 北京 100029)

## Automatic Pumping Speed Measurement of Molecular Pump: An Instrumentation Study

Zhao Bowen<sup>1,3</sup>, Yan Feng<sup>2,3</sup>, Yang Chuansen<sup>2,3</sup>, Lu Yaowen<sup>2,3</sup>, Dong Yunning<sup>2,3</sup>, Shao Zhuang<sup>2,3</sup>, Liang Xiyin<sup>1\*</sup>  
(1. College of physics Electronic Engineering Northwest Normal University Lanzhou 730070, China;  
2. Beijing Orient Institute of Measurement and Test Beijing 100029, China;  
3. Beijing Engineering Technology Research Center of Vacuum Measurement and Test Beijing 100029, China)

**Abstract** The automatic pumping-speed measurement technique was developed for turbo molecular vacuum pump. The self-designed software was compiled on the basis of LabVIEW platform and the hardware included a host computer, a RS485 interface converter, a PID control circuit capable of controlling the pressure gauge, gas flow-rate and environment temperature. The new pumping-speed measurement scheme was tested with a typical molecular pump by pumping N<sub>2</sub> gas in the pressure range of interest. The test results show that when it comes to measurement of pumping speed in real time, the newly-developed automatic technique outperforms the conventional manual evaluation method because of higher precision, better automation, easier operation, greater stability/reliability, stronger robustness, faster measurement/analysis and less human impact. We suggest that the novel automatic pumping speed measurement scheme be of some technological interest in industrial application and/or automation of molecular vacuum pump.

**Keywords** Molecular Pump, Pumping Speed Testing, LabVIEW, Self-tuning of PID

**摘要** 针对当前分子泵抽速测试装置自动化程度低,压强实验点难以调节等问题,设计出一套分子泵抽速自动测试软件,以LabVIEW为软件开发平台,采用RS485通信实现对真空计、气体质量流量控制计、温度控制仪的数据采集和设备控制;采用PID控制方法调节气体质量流量控制计的通气量,实现对压强实验点的稳定控制;采用继电型PID参数自整定技术提高算法对系统的适应性,该软件提高了分子泵抽速测量工作中数据采集和压强调节的自动化程度,减少了人员操作对测量过程的影响,使测试过程更加科学规范,对分子泵抽速测试技术研究和应用具有一定参考价值。

**关键词** 分子泵 抽速测试 LabVIEW PID 自整定

中图分类号: TP242 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2020.07.05

分子泵作为提供真空环境的主要设备在电子、冶金、航空航天和原子能等领域有着广泛的应用。对分子泵抽速性能进行检测,能够为分子泵产品的研发、设计、生产、检验等提供重要依据<sup>[1]</sup>。目前国内很多分子泵研制生产企业尚未建立有关分子泵抽

速性能测试的测试系统,在针对分子泵产品出厂前的抽速性能指标难以做出准确全面且有效的检测,同时,现阶段国内的操作测试人员在测试前需要经过专业知识的培训和大量的实验操作训练才能胜任此项工作,并且由于现阶段采用的传统手动操作方

收稿日期: 2019-07-25

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(No. 61804005)

\* 联系人: Tel: 13519408136; E-mail: 569613663@qq.com

式,导致人为因素对测试精度影响较大<sup>[2]</sup>。

目前,分子泵测试需要同时开启真空计、气体质量流量控制计、温度控制仪的配套测试软件,实验人员对仪器参数进行调节的同时还需要兼顾测试数据的记录和整理,因此数据采集实时性不足,带来人为测试误差<sup>[3]</sup>;测试过程需要在被测压强范围内的每个量级选取三个均匀分布的实验点,并在每个实验点记录被测分子泵及真空室的状态参数,因此要求各压强实验点必须在读数记录中保持稳定<sup>[4]</sup>,而现阶段该点的调节和稳定主要由实验人员凭经验手动调节气体质量流量控制计的参数实现,不仅耗费时间长,而且很难控制稳定压强实验点,参数选取不当或误操作极易使测试罩压强瞬间升高,超出分子泵工作压强上限,导致分子泵损坏。

针对上述问题,本文研制了基于虚拟仪器的分子泵抽速自动测试软件,可实现实验数据的采集、记录和压强实验点调节的自动化。下面就分子泵抽速测量原理、装置、压强控制算法、分子泵抽速自动测试软件功能作以介绍,最后对PID控制器完成的测试结果进行分析。

## 1 分子泵抽速的测量原理及装置

### 1.1 流量法测量分子泵抽速测量原理

本系统采用流量法进行抽速测量。抽速即体积流率,是指单位时间内流经泵入口的气体体积。当泵在规定条件下工作时,体积流率  $S$  可表示为

$$S = \frac{Q}{p_1 - p_0} \quad (1)$$

式中  $S$  为抽速  $L/s$ ;  $Q$  为通过气体质量流量控制计向测试罩内引入气体的流量  $Pa \cdot m^3/s$ ;  $p_0$  为测试罩中引入流量前的本底压强  $Pa$ ;  $p_1$  为测试罩中气体平衡后压强  $Pa$ 。

### 1.2 分子泵抽速测试装置原理结构

分子泵性能测试装置的构成如图1所示<sup>[5]</sup>。图中1—测试罩;2—前级泵;3—分子泵;4—气体入口阀;5—气体入口阀;6—气体质量流量控制计;7—真空计(被测泵入口压力);8—真空计(测量测试泵前级压力);9—稳压室;10—加热罩;11—流导阀。

本测量控制系统选用真空计测量范围为  $10^5 \sim 10^{-6} Pa$ ,测量精度为10%。选用的气体质量流量控制计,能够提供的量程规格覆盖  $1 \sim 500 cm^3/min$ ,测量精度位1.0%,能够满足不同量级压强下测试罩的供气需要,实现对分子泵抽速系统流量的测量和调节。选用温度控制仪使用K热电偶,测量范围

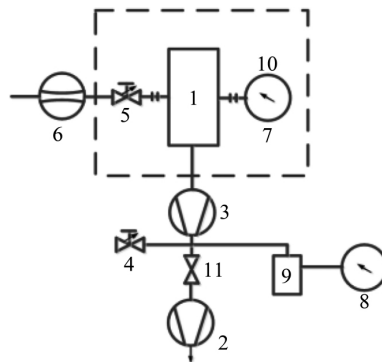


图1 分子泵抽速测试装置原理结构

Fig.1 Schematic diagram of the self-developed pumping speed measurement technique

$0 \sim 800^\circ C$ ,测量精度为0.1%,对测试罩烘烤除气时温度测量和控制。上述三种仪器均可通过RS485接口实现通信控制。

## 2 分子泵抽速测试系统软件设计

本测试软件选择由美国国家仪器(NI)公司开发的LabVIEW作为开发平台。LabVIEW是实验室虚拟仪器集成环境的简称,是一种多功能的图形化编程软件<sup>[6-9]</sup>。近年来,虚拟仪器在自动测试中的应用越来越广泛,运用虚拟仪器可以共享硬件和软件资源,可以方便、快速的组建各种自动测试系统,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<sup>[10-13]</sup>。本自动测试软件主要包括通信模块、PID控制模块、数据采集和存储模块。

### 2.1 测量仪器数据通信设计

在对测控仪器进行数据采集前,需要实现LabVIEW与测控仪器的通信。利用LabVIEW所提供的VISA接口模块进行编程可以快速实现LabVIEW与仪器的通信。VISA是应用于仪器编程的标准I/O应用程序接口,采用的是编程方式面向对象,提升了系统的兼容性,增强了程序的扩展性。当外部测试仪器和设备发生变化时,仅仅需要对程序模块进行简单的变更即可,具有很高的开发效率。

以真空计的串口通信为例,真空计串口通信部分程序如图2所示,实现该部分程序使用的主要函数有:VISA配置串口VI函数,对串口进行初始化,主要设置参数有:VISA资源名称、波特率、数据位、停止位,本系统中真空计所用的串口通信程序资源名称为COM5,波特率为9600,8位数据位,1位停止位;VISA设置I/O缓冲区大小函数,作用是设置缓冲区大小,需要使用的主要参数有:VISA资源名称以及缓冲区的大小,本系统中缓冲区大小为256字

节; VISA 写入函数, 作用是将写入缓冲区的数据资源写入 VISA 资源名称指定的设备或接口当中, 需要使用的主要使用参数有: VISA 资源名称以及缓冲区的大小, 本系统中需要的缓冲区大小为 11 字节; VISA 读取函数, 从 VISA 资源名称指定的设备或接口中对指定数量的数量的字节进行读取操作, 主要使用参数有: VISA 资源名称以及读取字节总数, 本系统中所需要的 20 个字节; VISA 关闭函数, 作用是将 VISA 资源名称的指定的设备会话句柄或事件对象进行关闭操作, 需要使用的主要使用参数有: VISA 资源名称。

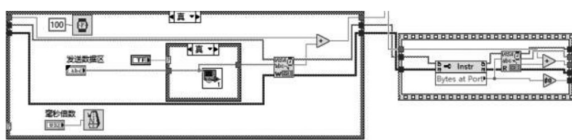


图2 真空计串口通信程序  
Fig.2 Data acquisition algorithm of vacuum gauge

### 2.2 数据采集设计

完成 LabVIEW 与测控仪器的通信后, 根据厂家提供的通信协议对上位机接收的数据帧进行处理, LabVIEW 提供了包括字符串截取、移位、转化、保存等字符串操作函数以满足用户处理数据的不同需要。如图 3 所示为真空计字符串有效信息的截取和数据保存部分程序。

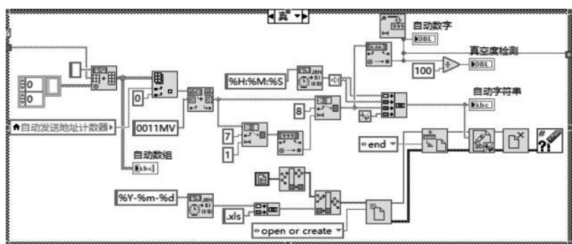


图3 真空计数据截取与保存程序部分  
Fig.3 Data sampling and storage of vacuum gauge

### 2.3 压强控制算法设计

#### 2.3.1 PID 控制器的基本结构

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 PID 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<sup>[14]</sup>。

测试过程中分子泵 3 与前级泵 2 连接组成抽气

系统, 对测试罩 1 抽真空, 改变气体质量流量控制计 6 向测试罩 1 内的供气量可以调节压强实验点, 当实际压强低于压强实验点时, 增加气体质量流量控制计的通气量升高压强, 当实际压强高于压强实验点时, 减少气体质量流量控制计的通气量来降低压强。此过程通过加入 PID 控制器对气体质量流量控制计的进气量进行控制从而获得压强实验点。PID 常规控制器原理框图如图 4 所示, 其中  $y$  为系统输出, 即经过调整后的压强值;  $y_{sp}$  为设定值, 即所需要的压强测试点;  $e$  为控制误差, 是设定压强测试点值和实时测量的压强值之间的差, 即为  $e = y_{sp} - y$ ;  $u$  为控制信号, 即经过控制器计算后得到的气体质量流量控制计开度大小信号。

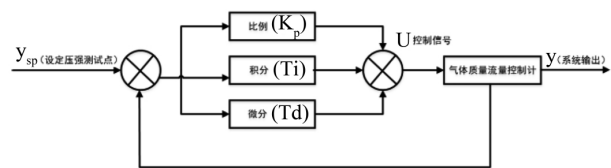


图4 PID控制原理框图  
Fig.4 Flow chart of the PID control

PID 控制器的传递函数可以表示为

$$G_e(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{S T_i} + S T_d \right) \quad (2)$$

式中,  $K_p$  为比例增益;  $T_d$  为微分时间;  $T_i$  为积分时间。

#### 2.3.2 继电反馈 PID 自整定方法

PID 控制器的参数决定着系统的控制效果, 参数选取不当甚至会引起系统失控。分子泵抽速测试系统属于动态平衡系统, 存在诸多不确定性, 当设备、环境条件发生变化后需要对 PID 参数重新进行整定。传统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 控制自整定技术应运而生<sup>[15]</sup>。

本系统采用继电反馈 PID 自整定方法计算 PID 的控制器参数。首先在闭环控制过程回路中加入一种具有继电特点的非线性控制过程, 该过程能够使被控过程产生极限环震荡, 然后通过该极限环震荡得到的震荡曲线得到系统数学模型的临界比例  $K_u$  和临界震荡周期  $T_u$ , 最后再根据 Z-N 临界比例度 PID 参数整定表给出的整定关系整定出对应的 PID 参数。自整定完成后, 系统将自动将新的 PID 参数带入控制器中并调整为控制模式。相较于传统的人工经验 PID 参数整定方式, 继电反馈型 PID 自整定方

法仅仅需要确定一个参数便可以自动整定出PID控制器的参数 耗时少且便于方便使用自整定技术耗时少且易于使用<sup>[16]</sup>。继电反馈型自整定控制系统结构框图如图5所示。

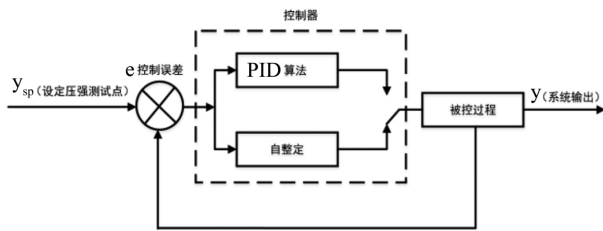


图5 自整定控制系统结构框图

Fig.5 Block diagram of the self-tuning control scheme

通过描述函数法能够确定临界系统的临界增益和临界震荡周期。当被控系统处于等幅值震荡时,在非线性环节中加入一个正弦输入信号,表示为:  $e(t) = A \sin(\omega t)$ 。而如果用傅里叶级数表示为一个在标准继电条件下继电输出为  $u(t)$ 、周期为  $T_u$ 、幅值为  $M$  的方波信该正弦输入信号可以用下式表示

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

如果用描述函数来表示理想继电特性  $N(A)$ , 可以进一步简化表示为: 一个幅值为  $M$  的继电特性输出  $u(t)$  的基波成分除以输入正弦震荡信号的曲线幅值  $A$ , 即  $N(A) = \frac{4M}{\pi A}$ 。闭环系统产生极限环震荡的条件为

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

其中  $G_p(j\omega)$  为被控过程。

Z-N 临界比例度公式的参数中,临界比例  $K_u$  和临界震荡周期  $T_u$  可以通过以下两个方程表示

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

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

式中  $K_u$ -临界振荡比例增益;  $T_u$ -临界振荡周期; 具有继电特性的PID参数自整定算法的控制过程曲线如图6所示,依据式(7)计算震荡曲线  $A$  的幅值

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

式中  $y_{\max}$ -系统稳定震荡的输出最大值  $y_{\min}$ -系统稳定震荡的最小值  $T_{\max}$ -输出最大值对应的时间  $T_{\min}$ -为输出最小值对应的时间。

通过上述过程得到临界增益临界增益  $K_u$  和振荡周期  $T_u$  后,再由PID参数整定表表1计算整定出

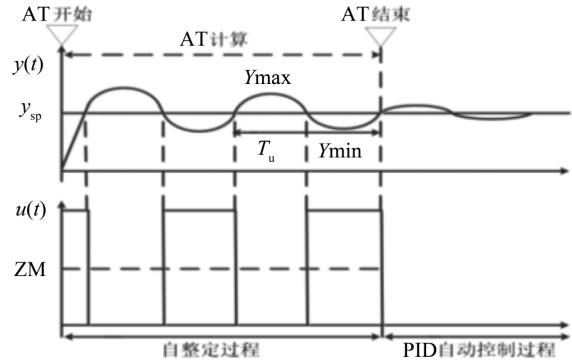


图6 继电振荡自整定过程曲线

Fig.6 Self-tuning of the relay oscillation

PID控制器的响应参数。

表1 临界比例度PID参数整定

Tab.1 PID parameter tuning of the critical proportionality

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

### 2.4 人机界面设计

LabVIEW 提供丰富的图形化模块,用户只需要调用相关的模块并对接线定义进行相应的连线即可,主界面如图7所示,包括真空计、气体质量流量控制计、温度控制仪、测试项目、证书出具5部分。

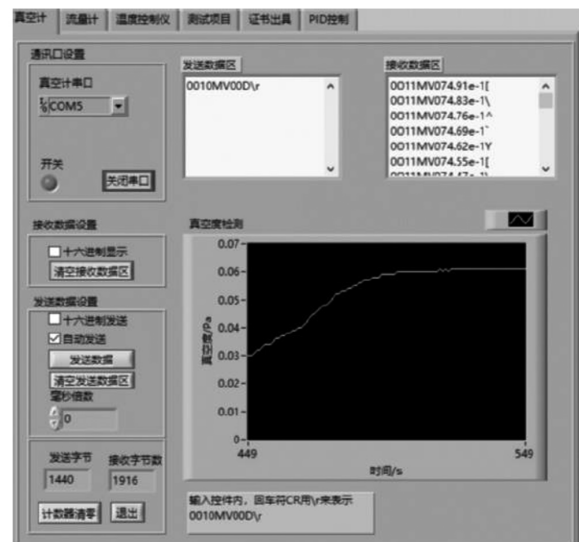


图7 测试界面中真空计部分

Fig.7 Test interface of vacuum gauge

### 3 测试结果与分析

#### 3.1 压强控制

选取两个压强点  $6.00 \times 10^{-3}$  Pa 和  $9.0 \times 10^{-3}$  Pa 作为压强控制效果和压强测试点转换的测试实验点, 使用该测试软件对压强进行自动调节, 得到的数据绘制的响应曲线如图 8 所示。通过对实验数据的分析, 相较于人工调节, 自动调节的优势有: 超调量小, 避免了人工调节过程中, 因气体质量流量控制计参数选取不当使系统震荡过大; 稳定性好, 抗干扰能力增强, 自动测试系统将压强调整到实验点后, 压强能够稳定在实验点处, 当系统出现扰动后, 测试系统能够迅速对外界产生的干扰作出响应并消除偏差, 将压强重新调整至实验点; 调节过程中能够对数据自动进行记录, 消除了原测试工程中手工记录数据实时性差而带来的人为测试误差, 提高了测试精度; 响应速度快, 相对于传统的人工调节方式, 能够快速将压强调整至压强实验点, 提升了测试效率, 缩短了测试周期。

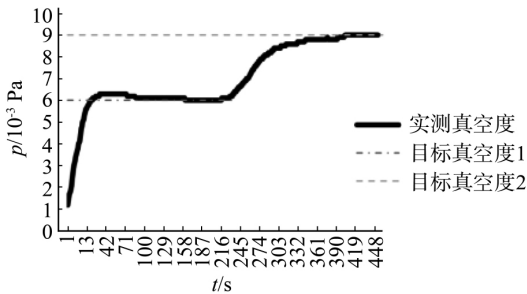


图8 压强自动响应曲线  
Fig.8 Automatic response of the pressure

#### 3.2 抽速测试

选取某种型号的分子泵通过该控制系统进行实际测试, 依据相关的实验规程使用  $N_2$  进行测试, 在每个压力数量级上测量三组参数, 得到表 2 中的数据, 并将得到的数据绘制出抽速曲线如图 9 所示。

表 2 抽速参数  
Tab.2 Measure pumping speed

序号	压力 / $\times 10^{-3}$ Pa	抽速 L/s	序号	压力 / $\times 10^{-3}$ Pa	抽速 L/s
1	0.3	247	9	90	295
2	0.6	254	10	300	303
3	0.9	259	11	600	308
4	3	269	12	9.00	304
5	6	274	13	1000	298
6	9	279	14	3000	237
7	30	286	15	6000	196
8	60	291	/	/	/

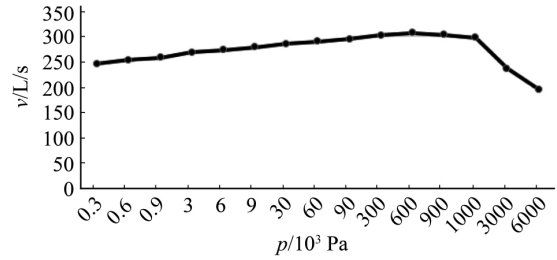


图9 分子泵抽速曲线  
Fig.9 Time evolution of the measured pumping speed

从数据和图表可知, 在  $3.00 \times 10^{-3}$  Pa ~  $1.00 \times 10^{-2}$  Pa 的压强区间内, 分子泵抽速有缓慢的小幅上升, 当逼近分子泵启动点即压强在 1.00 Pa 左右时, 分子泵的抽速呈现比较大的下降。

### 4 结束语

本测试软件实现了分子泵抽速测试过程中数据采集、实验点调节的自动化, 消除了实验人员手动记录数据造成的误差, 提高了测试精度, 增强了数据采集的实时性, 降低了实验人员的工作强度。系统中加入的 PID 控制能够将测试罩压强快速调整至压强实验点并保持稳定, 缩短了测试周期, 能够有效抑制压强波动, 控制系统具有较好的鲁棒性; 加入的继电器型 PID 参数自整定解决了由于测试环境、被测件变化导致 PID 参数需要重新整定的问题, 提高了系统的适应性; 程序采用的模块化设计, 提高了软件的功能扩展性和可维护性。该软件目前已应用与分子泵性能测试工作中。

#### 参 考 文 献

- [1] 巴德纯, 王晓冬, 刘 坤, 等. 现代涡轮分子泵的进展 [J]. 真空, 2010, 47(4): 1-6
- [2] 梁文升, 张世伟, 张志军, 等. 扩散真空泵性能自动测试系统的研制 [J]. 真空, 2009, 46(6)
- [3] 卢耀文, 陈 旭, 李得天, 等. 便携式真空计校准装置 [J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(05): 462-467
- [4] 卢耀文, 陈 旭, 李得天, 等. 复合型便携式真空计校准装置 [J]. 真空, 2013, 50(03): 1-5
- [5] 卢耀文. 分子泵性能参数测试装置 [A]. 中国真空学会 2014 学术年会论文摘要集 [C]. 中国真空学会, 2014: 2
- [6] 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, (s1): 94-101
- [7] Liu C, Xu L, Cao Z. Measurement of Nonuniform Temperature and Concentration Distributions by Combining Line-of-Sight Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 113: 1-10

- py 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 ( 2 版) [M]. 北京: 电子工业出版社 ,2005
- [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 ,ShuaiP ,等. 基于继电反馈的 PID 自整定控制技术进展 [J]. 上海电力学院学报 ,2008 ,24( 2) : 132 - 135
- [16] 杨 智 ,陈雨琴 ,YANGZhi ,等. 基于 LabVIEW 的 PID 自整定控制器设计 [J]. 化工自动化及仪表 ,2015 ,( 11) : 1188 - 1191