

# 露点仪自动检定系统的开发与设计

石良喜

(广州计量检测技术研究院, 广州 510030)

**摘要:** 基于机器视觉原理和参数自整定的模糊PID控制理论, 设计开发了一种新型的露点仪自动检定系统, 解决了传统的露点仪检定系统数据量多、误差大、露点温度检定点难以控制、工作效率低等问题; 该系统采用模糊PID调节器实现露点发生器露点温度固定点的自动控制, 通过机器视觉装置实现了标准露点仪和被检露点仪的数据的自动采集和处理; 同时开发了上位机数据处理与管理软件, 实现人机交互和数据管理, 自动采集与处理、自动存储及检定判定, 自动生成原始记录和证书等功能; 测试结果验证表明, 该系统运行可靠, 检定精度能够达到要求; 该系统采用模块化设计, 具备良好的灵活性、可靠性和可扩展性, 可根据实际检定需求进行修改或扩展, 大大提高了露点仪检定的精确性和工作效率。

**关键词:** 露点仪自动检定; 机器视觉数据采集; 露点温度控制; 模糊PID调节器

## Development and Design of the Automatic Verification System for Dew Point Meters

Shi Liangxi

(Guangzhou Institute of Measurement and Testing Technology, Guangzhou 510030, China)

**Abstract:** Based on machine vision principle and Fuzzy PID control theory of parameter self tuning, a new automatic verification system of dew point meter is designed and developed, many problems of the traditional dew point meter have been solved, such as large amount of data, large error, difficulty in controlling dew point temperature, low efficiency and so on. The system uses fuzzy PID controller to realize dew point generator dew point temperature fixed point automatic control, and the automatic collection and processing of the data of standard dew point hygrometer and dew point hygrometer were realized by machine vision device; At the same time, the data processing and management system software of the host computer is developed, Human computer interaction and data management, automatic acquisition and processing, so automatic storage and verification, automatic generation of original records and certificates and other functions are realized in time. Test results verify that the system runs reliably and the calibration accuracy can meet the requirements of the procedure. The system uses modular design, with good flexibility, reliability and scalability, and it can be modified or extended according to the actual verification requirements, which greatly improves the accuracy and efficiency of the dew point meter calibration.

**Keywords:** automatic verification of dewpoint meter; machine vision data acquisition; temperature control of dew point; fuzzy PID regulator

## 0 引言

露点仪作为湿度标准器, 使用越来越广泛, 对露点仪的计量检定越来越高。当前对露点仪的检定还没有实现自动化, 采取的方法是手动调整露点发生装置的露点温度固定点, 进行人工读数, 工作量大, 花费时间长, 检定效率低。针对目前这种现状, 有必要开发出一套新型的露点仪自动检定系统, 实现自动调节露点发生装置, 自动采集标准露点仪和被检露点仪的读数, 经过上位机数据处理系统可以直接出证书, 提高露点仪检定的准确性和工作效率。

## 1 系统方案设计

基于机器视觉与模糊PID控制的露点仪自动检定系统由露点发生器、一级精密露点仪、露点仪、模糊PID控制器、高清摄像头, PCI数据采集卡和上位机构成。其系统方案图如图1所示。

露点发生器采用英国Michell公司的DG-1以提供一定露

收稿日期: 2017-10-22; 修回日期: 2017-11-24。

作者简介: 石良喜(1979-), 男, 湖南省绥宁人, 计量工程师, 主要从事热工计量方向的研究。

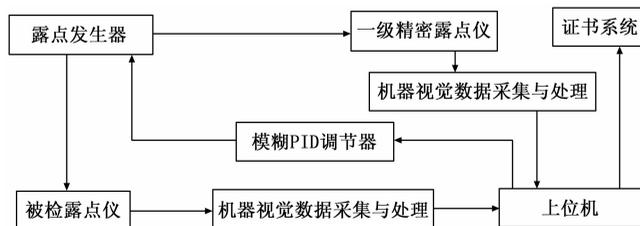


图1 系统方案图

点温度的气流标准源; 以一级精密露点仪作为标准器; 选用高清摄像头和高性能数据采集卡, 针对数显露点仪和指针式露点仪, 分别设计两种不同的机器视觉采集与处理算法, 采集实时的露点温度值, 再传给上位PC机终端; 设计模糊PID调节器, 自动调节露点发生器干湿蝶阀的PID参数, 对采集的不同系统的露点值进行实时分析并对偏差进行处理, 发送指令控制蝶阀的继电器和报警器等执行机构, 使露点发生器保持在检定露点仪时规程所需设定的露点温度值; 利用C#程序设计语言, 开发出自动检定模块与上位机软件系统, 将机器视觉采集与处理模块所采集到的标准露点仪与被检露点仪的值按照规程要求进行比对, 得出结论, 打印出检定证书或者不合格通知

书，完成自动检定过程。

## 2 模块设计

### 2.1 机器视觉数据采集模块

本模块由高清摄像头、数据图像采集卡、图像处理单元和计算机等几个部分组成。图像采集与识别过程如图 2 所示。高清摄像头采集图像包括模拟的图像和数字的图像，通过数据图像采集卡把信息传输到上位机，上位机上的图像识别和图像处理软件处理后直接显示当前采集的数据信息。被检露点仪有数字显示仪表和指针式模拟仪表两种，图像采集与识别过程在图像处理和图像特征提取不同。

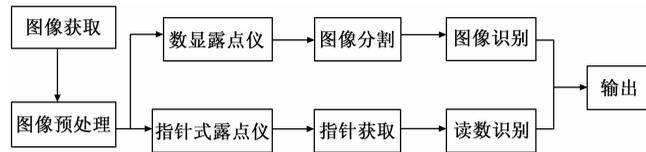


图 2 图像采集与识别过程图

#### 2.1.1 数字显示仪表的数据采集处理

设计时候选取的高清摄像头位置可以相对固定，以便简化图像定位的过程。数字显示仪表型的露点仪屏幕一般为 LED 或者 LCD，由于环境光照度的影响，需要对图像进行预处理，图像灰度变换，图像平滑，倾斜度校准，图像二值化等，来克服出现亮度不均匀，边缘模糊，数字区域与背景重叠难以区分等现象。

图像灰度变换采用目前常用的标准的平均值法，把摄像头采集到的彩色的 RGB 格式转换成需要的灰度图像；图像平滑过程采用八领域平均法对图像进行去噪处理；倾斜度校正过程采用 Hough 变换法检测出倾斜角后进行校准。

图像二值化值域的选择是二值化的关键，这里采用局部值域法。其是把原始的图像分成若干小的几个子图像，再对每个子图像分别求出最优值域，可克服光照度不均匀引起灰度直方图双峰谷底不明显，单峰值，多峰值等复杂情况。

图像字符分割的任务是把图像中的多行或者多个字符从整幅图像中分割出来，成为单个的字符体，以便于识别。这里选取投影直方图法，通过对字符区域进行垂直投影来获取数字或符号的前沿和后沿，然后确定相应的位置，再把每一组前沿和每一组后沿作为一个数字或者符号来统计字符的总数，达到字符分割的效果。

图像字符识别是图像数据采集的关键，是数据信息实现人机接口的途径。目前常用的字符识别方法比较多，这里选取模板识别法，预先建立二值化的数字模板作为标准模板库，将分割后得到的图像区域进行归一化处理，并且从图像区域中提取若干特征量与模板逐个进行相应的比较，得出二者之间的匹配度，进行归类，完成识别的功能。

#### 2.1.2 指针式仪表的数据采集处理

指针式仪表的数据采集的预处理与数字显示仪表的类似，但其中灰度图像需做要求更高的细化处理来提高识别精度和速度。需要把一个像素宽度的线条图像即骨架取代该图形，但是原图像中图形的连通性和拓扑结构不要改变。这里选取基于 Hilditch 的改进细化算法，达到优质的细化效果。

指针刻度的提取也采用 Hough 变换法，指针刻度读数的识别是关键。这里采用最小二乘法拟合法，根据指针与刻度线

的距离来识别仪表的读数，以刻度线示值作为基准，当指针与刻度线重合的时候，用刻度线的示值作为仪表的读数；当指针位于两刻度线之间的时候，则用刻度线示值和距离法相结合进行读数识别。假设指针左侧的第一条刻度线示值为  $A$ ，指针右侧的第一条刻度线示值为  $B$ ，指针左侧的第一条刻度线到指针的距离取指针左侧的第一条刻度线上的所有点到指针的平均距离为  $C$ ；同理指针右侧的第一条刻度线到指针的距离取指针右侧的第一条刻度线上的所有点到指针的平均距离为  $D$ ；则指针表的示值  $S$  就为：

$$S = A + (B - A)C/D$$

### 2.2 模糊 PID 调节器模块

自动检定的时候需要露点发生器稳定在某一个固定的露点值。调节器模块主要实现露点仪发生器固定点的调节。一般情况下，露点发生器用的是手动调节干气和湿气的五路针阀，这里设计时需要把针阀用蝶阀来代替，调节器通过调节蝶阀的开启大小来实现进气的大小从而实现露点发生器固定点的值。

蝶阀的开启大小的控制通过设计具有参数自整定功能的模糊 PID 算法来实现。区别于传统的 PID 算法，该调节器可以根据预定露点值与当前露点值之间的偏差绝对值  $e$  和偏差变化率绝对值  $e_c$  的改变，在线自动调节 PID 参数，驱动蝶阀在线进行其开启大小的调节，从而有效的对固定露点值进行实时控制。

模糊 PID 调节器的设计以预定露点值与当前露点值之间的偏差绝对值  $e$  和预定露点值与当前露点值之间的偏差绝对值变化  $e_c$  作为输入，可以满足不同时刻的  $e$  和  $e_c$  对 PID 参数自整定的要求。利用模糊推理算子实现对 PID 参数进行在线修改，构成了模糊 PID 调节器，其系统结构见图 3。

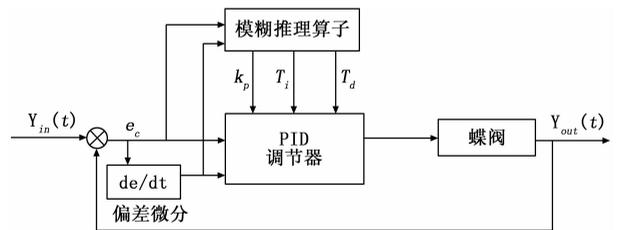


图 3 模糊 PID 调节器结构图

PID 参数模糊自整定是找出 PID 三个参数与  $e$  和  $e_c$  之间的模糊关系，在运行中通过不断检测  $e$  和  $e_c$ ，根据模糊推理算子对  $k_p$ ， $T_i$ ， $T_d$  这三个参数进行在线修改，以满足不同  $e$  和  $e_c$  是对控制参数的不同要求，获得稳定的固定露点值，本模块所使用的 PID 调节器的算法为：

对于连续情况：

$$e(t) = Y_{in}(t) - Y_{out}(t) \quad (1)$$

其中： $Y_{in}(t)$  为当前露点值， $Y_{out}(t)$  预定露点值：

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

其中： $k_p$  为比例系数； $T_i$  为积分时间常数； $T_d$  为微分时间常数。

对于离散情况：

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) T + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (3)$$

$$\Delta u(k) = k_p (e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + k_d (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (4)$$

其中： $k_i = k_p / T_i$ ， $k_d = k_p / T_d$ ， $k$  为采样序号， $T$  为采样

周期。

模糊推理算子设计与露点发生器的气路阀相关。露点发生器气路系统通常由干气粗调阀,干气细调阀,湿气粗调阀,湿气细调阀和混合阀组成。对于露点温度为  $(-80 \sim +20)^\circ\text{C}$  的露点发生装置,相对全干状态下,干气粗调阀,干气细调阀均为全开状态,而湿气粗调阀,湿气细调阀均为关闭状态,此时露点值为  $-80^\circ\text{C}$ ,如若有所偏离,相应的调节细调蝶阀;对于饱和湿度状态,湿气粗调阀,湿气细调阀均为全开状态,而干气粗调阀,干气细调阀则为全关状态;露点值为  $10^\circ\text{C}$  时,湿气粗调阀半开状态,湿气细调阀全开,干气粗调阀,干气细调阀,均为半开状态;露点值为  $0^\circ\text{C}$  时,湿气粗调阀,湿气细调阀,干气粗调阀,干气细调阀,均为半开状态;露点值为  $-20^\circ\text{C}$  时,湿气粗调阀开度为  $1/4$ ,湿气细调阀全开,干气粗调阀,干气细调阀,均为开状态;露点值为  $-40^\circ\text{C}$  时,湿气粗调阀开度为全关,湿气细调阀  $1/2$ ,干气粗调阀,干气细调阀,均为开状态;以上各个区间的期望值如若有所偏离,根据  $k_p, T_i, T_d$  这三个参数的功能特点,通过设计模糊规则和语言,输出相应的模糊指令,以调节相对应的细调蝶阀,达到期望的露点值。

### 2.3 自动检定模块与上位机软件系统设计

在被检露点仪、标准露点仪、机器视觉系统安装连接好,露点发生器达到规程所要求的设定点之后,送入检定信息和通过检查后,开始按照相关规程进行检定。自动检定的过程框图如图 3 所示。首先标准露点仪判断露点值是否稳定在所需要的设定点,是否满足检定条件,如果满足,开始测量;当一个露点值检定点结束后,判断是否完成,如果完成,保存结束,如果还有下一个露点值需要检定,设定参数驱动调节器使露点发生器达到下一个露点值,然后开始下一个露点值的检定,其中出现数据采集偶尔出错,继续进行下一轮采集,如果是标准器出错,立即检定中断,发出警报。

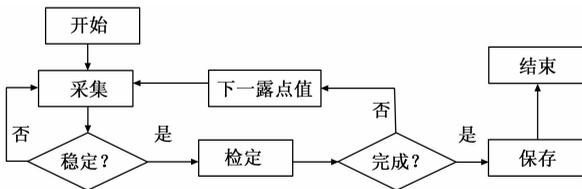


图 4 露点仪自动检定过程图

检定过程中要求工作可靠,具备容错能力,以保证在检定过程中数据采集偶尔出错不导致上位机程序跳出或者死机。在自动检定过程中由于特殊原因需要停止检定,可立即中断和退出,同时保存中间检定数据。

检定结束,可以立即进行检定结果数据处理,原始数据和处理结果打印出来;对于检定的原始数据保存在上位机硬盘里,可随时进行查阅但不允许修改。

上位机软件系统包括被检露点仪管理模块、标准露点仪管理模块、露点发生器固定点设置模块、检定过程控制模块、证书与原始记录生成模块。其中,被检露点仪管理模块与标准露点仪管理模块具备露点仪信息的录入、查询与修改功能;露点发生器固定点设置模块通过设定检定规程所要求的检定点完成露点发生器固定点的设定功能;检定过程控制模块负责向机器视觉数据采集与处理模块、调节器模块等发送检定命令、实时显示图像信息、回传检定结果命令和显示检定结果等功能;证

书与原始记录生成模块对检定结果进行数据处理与计算,按照相应的检定规程的要求动态生成原始记录和检定证书。

### 3 测试与结果验证

在检定过程中,选取北京兴泰公司 DP99 型号的露点仪作为被检对象,以 Michell 公司型号为 S8000 并经国家计量院检定合格的一级精密露点仪为标准,对露点温度为  $-40^\circ\text{C}$  这个点分别采取手动调节固定点和新型自动检定系统自动调节固定点进行 10 次重复测量,测试结果如图 5~8。

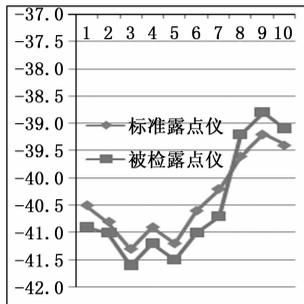


图 5 手动调节固定点时 10 次测量结果曲线图

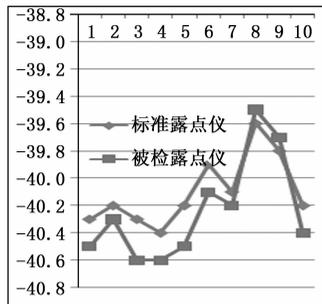


图 6 自动调节固定点 10 次测量结果曲线图

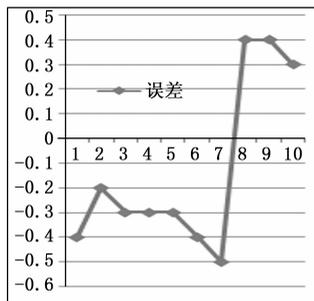


图 7 手动调节固定点 10 次测量误差曲线图

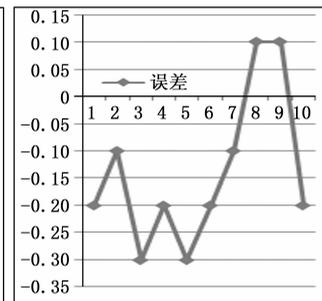


图 8 自动调节固定点 10 次测量误差曲线图

根据曲线图,采用手动调节固定点被检露点示值在  $(-38.8, -41.6)^\circ\text{C}$ ,标准露点示值在  $(-39.2, -41.3)^\circ\text{C}$ ,误差在  $(-0.5, 0.4)^\circ\text{C}$ ;而采用自动调节固定点被检露点示值在  $(-39.5, -40.6)^\circ\text{C}$ ,标准露点示值在  $(-39.6, -40.4)^\circ\text{C}$ ,误差在  $(-0.3, 0.1)^\circ\text{C}$ 。表明在无论是被检标准露点仪还是标准露点仪采用新型自动检定系统自动调节固定点检定得到的结果重复性好过手动调节固定点得到的结果,偏移  $-40^\circ\text{C}$  设定点的幅度也小,并且误差也小于采用手动调节固定点得到的结果。露点仪检定实验过程中,在被检露点仪和标准露点仪都固定的情况下,露点测量误差的大小不同,主要由于采用露点发生器手动调节固定点和自动调节固定点两种检定方法的不同引起,从而验证开发的新型露点仪自动检定系统的可靠性和科学性。

### 4 总结

基于机器视觉原理和参数自整定的模糊 PID 控制理论,开发与设计了一种新型的自动调节露点温度固定点的露点仪自动检定系统,真正实现了露点仪检定的自动化。通过与手动调节固定点法对比实验,验证了该系统的可靠性和稳定性,减少了人为因素引起的误差,降低了计量成本,提高了检定效率,以满足日益发展的露点仪的自动化计量,为类似计量器具的自

动量化提供有效的参考。

参考文献：

[1] 张晓明, 王颖. 温度数字仪表原理 [M]. 北京: 中国质检出版社, 2014.  
 [2] 石良喜. 模糊 PI 控制在真空蒸发镀膜中的应用 [J]. 机电工程技术, 2010, 39 (5): 71-74.  
 [3] 张克. 温度测控技术及应用 [M]. 北京: 中国质检出版社, 2011.  
 [4] 刘金焜. 先进 PID 控制及其 Matlab 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

[5] 国家质量监督检验检疫总局. JJG499-2004 精密露点仪检定规程 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2004.  
 [6] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1272-2011 阻容法露点湿度计校准规范 [M]. 北京: 中国质检出版社, 2011.  
 [7] 李英干, 范金鹏. 湿度测量 [M]. 北京: 气象出版社, 1990.  
 [8] 冯庆东, 杨丽. C# 项目开发全程实录 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.  
 [9] 扶松柏. C# 项目开发实战密码 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.

(上接第 13 页)

4 测试实验

根据系统的功能要求, 对开发系统测试分为两部分: 首先利用集成平台发送指令, 通过快速模拟器中的控制评估卡生成电机驱动信号, 由电机驱动卡驱动直流电机进行相关运动, 利用测功机系统对电机及其驱动的各项参数进行测试并上传至集成平台, 从而获得对集成平台控制、快速原型机电机驱动、测功机系统测试性能的评价; 其次利用旋变模拟器模拟旋转变压器发出正弦信号, 利用旋变测试仪以及快速原型机的轴角解算卡进行角度解算, 并将测试数据上传至集成平台进行分析, 验证轴角模拟测试模块、快速原型机的轴角解算卡的性能, 以确保满足遥感器光机扫描控制器的测试需求。

4.1 直流电机驱动测试

根据测试要求将测功机系统中的电力分析仪的电流及电压测试管脚经直流电机后, 与电机驱动卡驱动输出端相连, 将电机按要求与测功机联轴器相连。由集成平台授时并并发出测试指令, 并实时监听测功机数据及电机驱动卡数据, 测试结果如图 7 所示。

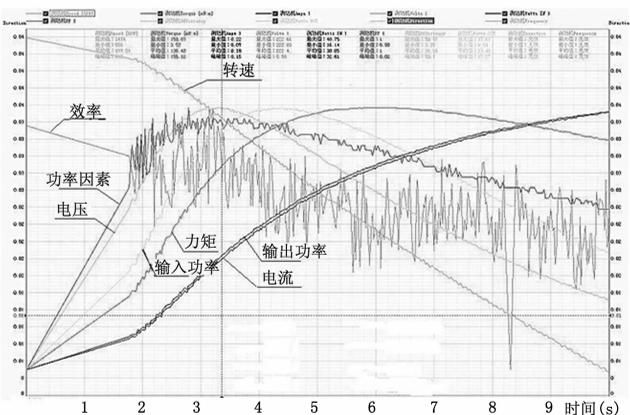


图 7 测功机测试结果

根据测试可以获得电机转速、输出力矩与驱动卡的输出电流、功率、电压等的的数据曲线, 根据该数据曲线可为扫描控制器控制算法的设计提供参考, 并可实时评估控制算法的性能。

4.2 轴角解算测试

根据测试要求, 由轴角模拟器模拟旋转变压器的输出信号, 分别与轴角测试仪以及快速原型机的轴角解算卡相连。通过系统集成平台授时并控制两者分别对轴角模拟信号进行解算, 通过集成平台获取解算结果, 并对测试结果进行保存分析。如表所示为集成平台获取的特征轴角模拟下的解算结果。

表 1 轴角解算结果对比

模拟器输出角度	轴角解算结果	
	轴角测试仪	轴角解算卡
0°	0.000 3°	0.001 6°
45°	45.000 4°	45.002 2°
90°	90.000 3°	90.001 8°
135°	134.999 8°	134.997 6°
180°	180.000 1°	180.002 1°

根据结果可以看出轴角测试仪的输出误差为 0.000 5°, 而轴角解算卡的输出误差为 0.003°, 由此可以获得轴角解算卡解算精度的评价, 从而指导轴角解算卡 AD2S82 配置电路的调试, 亦可用于旋转变压器的装调参考。

5 结论

文中针对目前常用遥感器光机扫描控制器的执行、测角反馈部件, 开发了一套高精度控制器测试系统, 用于对扫描系统执行电机的力矩、转速、功率等进行实时测量; 对轴角传感器进行模拟测量。同时利用信息集成平台, 在线获取各环节测试信息, 通过控制器快速原型机设计控制系统, 对扫描系统参数的快速测试及性能评估, 实现了控制器的测量—开发闭环, 可用于遥感器光机扫描控制器的快速测试, 从而提高了研制开发效率。

参考文献：

[1] 蔺宇辉, 傅丹膺, 唐国金. 空间光学遥感器扫描运动部件运动学与动力学分析方法研究 [J]. 航天返回与遥感, 2004, 25 (4): 30-34.  
 [2] 汪逸群, 齐心达. 国外空间光学扫描机构现状 [J]. 光机电信息, 2012, 27 (12): 15-20.  
 [3] 杨维帆, 徐抒岩, 曹小涛, 等. 空间光学遥感器扫描控制系统设计 [J]. 光学精密工程, 2014, 22 (2): 397-405.  
 [4] 汪逸群, 颜昌翔, 贾平. 成像光谱仪运动准确度测量 [J]. 光子学报, 2012, 41 (2): 185-189.  
 [5] 朱钰, 付晶, 韩昌佩. 基于 TSC695-FPGA 架构的空间扫描运动系统设计 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12 (20): 4965-4969.  
 [6] 黄昊宇, 黄辉, 凌忠伟, 等. 基于 PXI 总线的 Φ0.5 米高超风洞测量系统研制与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (9): 21-24.  
 [7] 郑鲁平, 陈连忠, 董永晖, 等. 基于 PXI 总线和 RT 实时系统的远程数据测量系统 [J]. 电子技术与软件工程, 2017 (14): 171-174.  
 [8] 陈海清, 熊进星, 孙永飞. 基于 LABVIEW 的旋转机构测控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (6): 60-63.