

阀门密封性自动化检测系统设计

郭伟杰

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月8日; 录用日期: 2024年5月8日; 发布日期: 2024年5月15日

摘要

阀门是控制流体流量和流向的重要设备, 其密封性直接影响着阀门的使用效果和安全性能, 因此, 在工业生产中对阀门泄漏率的精确检测非常重要。针对使用国内阀门泄漏率检测装置精度低、使用国外阀门泄漏率检测装置成本高的问题, 采用直压法检测阀门密封性的原理, 开发出一套低成本、高精度的直压法阀门泄漏率自动化检测系统。该系统由可编程序控制器PLC (programmable logic controller)、触摸屏和传感器等组件组成。通过触摸屏设置系统的相关参数, 将信号发送给PLC, PLC对获取的输入信号进行处理, 根据写入的程序将输出信号传输给执行器, 最后将检测结果传回到触摸屏。测试的全过程为自动进行, 通过借助人机交互, 可以方便地进行基本参数的设置, 并最终实现对阀门泄漏率的自动化检测。

关键词

触摸屏, 可编程序控制器, 阀门泄漏率检测

Design of Automated Valve Sealing Integrity Detection System

Weijie Guo

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 8th, 2024; accepted: May 8th, 2024; published: May 15th, 2024

Abstract

Valves are important devices for controlling fluid flow and direction, and their sealing performance directly affects effectiveness and safety of valves. Therefore, accurate detection of valve leakage rate is crucial in industrial production. To address issues of low precision in domestic valve leakage rate detection devices and high cost of foreign devices, principle of using direct pressure method to test air tightness of valves. A low-cost, high-precision direct pressure method valve leakage rate automated detection system has been developed. The system consists of a PLC

文章引用: 郭伟杰. 阀门密封性自动化检测系统设计[J]. 建模与仿真, 2024, 13(3): 2168-2176.

DOI: 10.12677/mos.2024.133199

(programmable logic controller), a touchscreen, sensors, and other components. By setting relevant parameters through touchscreen, signals are sent to PLC. PLC processes the input signals and transmits output signals to actuator based on the programmed instructions. Finally, detection results are transmitted back to touchscreen. The entire testing process is automated, and with assistance of human-machine interaction, basic parameters can be easily set, ultimately achieving automated detection of valve leakage rate.

Keywords

Touchscreen, Programmable Logic Controller, Valve Leakage Rate Detection

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

阀门泄漏率是指阀门在关闭状态下,通过阀门密封面与密封面之间的泄漏量。阀门泄漏率与阀门密封性能有关,密封性能好的阀门泄漏率低,然而阀门的密封性会随着长期使用逐渐下降,导致流体泄漏。在欧洲,机械指令要求机器的设计和制造方式应避免对人类造成潜在风险,为此已经制定了一系列与液压系统安全相关的欧洲标准,并有相关标准作为补充,例如压力设备法规[1]。阀门泄漏不仅造成资源浪费和环境污染,还严重威胁系统运行的安全稳定性,甚至危及工作人员的安全,可能导致人身伤亡事故。因此,如何精确检测阀门泄漏问题成为一个重要的课题。

在工业生产中,常用的阀门泄漏检测方法有水检法、直压法、差压法、气体示踪法、超声波检测法、卤素法等。水检法检测工件是否泄漏是将待测工件内部充入一定压力的气体,然后将其密封后浸入水中观察,若有气泡冒出,则工件内部存在泄漏。姚晓凯[2]通过 Faster R-CNN 目标检测算法,验证了基于卷积神经网络的气密性水检法的可行性与有效性,这种方法提高了检测速度,但无法准确判断泄漏位置,且检测成本较高。差压法是将待测工件和标准件中同时充入一定压力的气体,稳压一段时间后,检测待测工件和标准件之间的压力差,进而判断待测工件是否存在泄漏的问题。刘洋[3]通过制作一系列容积已知的标准容积容器和一系列漏率已知的标准漏孔进行组合测试,最终快速准确地测试出阀门的泄漏量,但这种方法需要精确预估阀门及配套测试管路的容积,存在一定的误差。气体示踪法是将待测工件中充入可追踪的气体,如氦气或二氧化碳,然后用气体探测仪来检测气体泄漏的位置和程度。曾宪阳、池作和等[4]通过此方法来检测气体在管道中的流动,这种方法也可以检测阀门和管道内部是否存在泄漏,测量偏差较小,但对阀门或管道的安装条件较高,增加了检测成本。超声波检测法是用超声波传感器检测待测工件上泄漏点产生的超声波,从而进行泄漏判断,这种方法应用范围广,检测精度高,但成本高昂。卤素法是将加热至 850℃~950℃的铂金属放置在卤素环境中,根据铂在卤素的催化作用下发射电子而产生的电流大小进行泄漏判断,这种方法易对环境造成破坏,且误差大。此外,金耀、朱振雷[5]等研究了一种密封间隙可调整变化的间隙密封结构,该结构能使活塞中部自适应地发生径向变形,使缸筒内壁和活塞外表面的密封间隙减小,进而减少泄漏量。黄亮、郭知龙[6]等设计出一种封隔器的新型密封结构,并对其密封性能和承压能力进行了理论计算和试验研究。

为了解决上述阀门密封性检测方法存在的问题,如何设计一套安全可靠、成本较低且高效率的阀门密封性测试系统成为文章的研究重点,并通过对其进行测试验证,最终证明了这套系统的可行性,从而

实现了对阀门密封性的低成本高精度检测。文章还详细阐述了系统的硬件配置和软件设计。该研究的意义在于如何精确而快速地检测阀门的密封性，从而确保阀门及相关设施的安全稳定运行，研究结果具有一定的理论指导意义和工程应用价值。

2. 系统原理

2.1. 直压法检测原理

直压法是将待测工件中充入一定压力的气体，稳压一段时间后，测出工件稳压前后的压力值，以此来判断待测工件是否存在泄漏问题[7]。若测试前后压力几乎无变化，则满足密封性要求。由于直压法检测阀门密封性具有操作简单，成本较低，且可以用于各种类型和规格的阀门检测，故本文采用的检测原理为直压法。

直压法检测原理示意图如图 1 所示，直压法检测试验分为 4 个阶段，分别为充气阶段、稳压阶段、检测阶段和排气阶段[8]。排气阶段在得出检测结果之后，对检测结果没有影响，不予考虑。

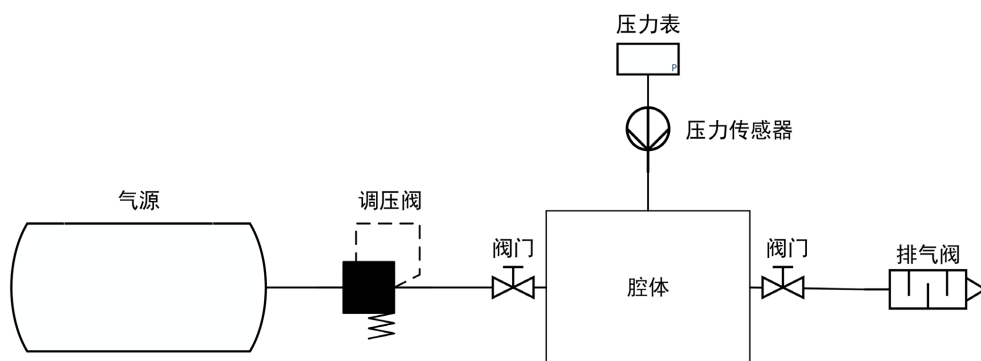


Figure 1. Schematic diagram of direct pressure method detection principle

图 1. 直压法检测原理示意图

被测工件的腔内气体理想气体状态方程为：

$$PV = nRT \quad (1)$$

公式(1)中， P 为腔内气体的压力， V 为被测工件腔体内气体的体积， n 为腔内气体的物质的量， R 为理想气体状态常数， T 为腔内气体的温度， n 和 R 均为常量，对公式进一步推导得出：

$$n = \frac{PV}{RT} \quad (2)$$

设充气阶段完成后， n_1 为此时腔内气体的物质的量， P_1 为此时腔内的压力值， T_1 为此时腔内的温度；稳压一段时间后， n_2 为此时腔内气体的物质的量， P_2 为此时腔内的压力值， T_2 为此时腔内的温度。得出了稳压结束后，腔内气体的物质的量的变化为：

$$\Delta n = n_1 - n_2 = \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right) \cdot \frac{V}{R} \quad (3)$$

公式(3)中， Δn 为腔内气体物质的量的变化量。在充气阶段中，气体进入待测工件的腔体后与腔壁发生碰撞而产生热量，使得腔内的温度发生轻微变化，即 $T_1 \approx T_2$ ，因此得出：

$$\Delta n = \frac{(P_1 - P_2) \cdot V}{T \cdot R} \quad (4)$$

因此, 在使用直压法检测阀门泄漏实验时, 先向待测工件中充入生产过程中指定压力的气体, 待气压稳定后, 记录压力表上的数值 P_1 , 再根据生产要求稳压指定时间后, 测出压力表上的数值 P_2 , 于是得出了稳压前后被测工件内部压力变化量 $\Delta P = P_1 - P_2$, 通过 ΔP 的大小来判断待测工件是否存在泄漏。

此外, 为了提高阀门的使用效果和安全性, 通常可以通过设计合理的阀门结构、加强阀门运行的监测管理、选择优质的密封面材料、优化阀门的生产工艺流程等方法来有效降低阀门的泄漏率[9]。

2.2. 系统检测原理

基于直压法检测原理, 充气一段时间后, 通过压力传感器获取阀门的压力值 P_1 ; 然后进入稳压阶段, 稳压 2s 后测得压力 P_{00} , $P_1 - P_{00}$ 若大于 $P_1 \times 10\%$, 则测试停止, 报警灯报警, 若小于 $P_1 \times 10\%$, 则测试继续进行, 稳压一段时间后, 得到此时阀门的压力值 P_2 ; 若 $P_1 - P_2$ 小于设定的内部泄漏上限 TH_1 , 说明阀门保压前后气体泄漏量在技术要求范围内, 则测试结果为合格, 测试完成。

3. 系统设计

3.1. 测试系统组成

阀门测试系统的硬件组成图如图 2 所示, 通过这些元器件搭建一个阀门性能测试模拟实验台。其中可编程控制器 PLC 采用的是 SK2N-24MRT, 嵌入式触摸屏采用了繁易 FE6100C 型号的触摸屏。温度传感器是用来检测阀门管道内的温度, 避免温度过高而带来的安全隐患; 报警灯能够及时提醒操作人员当前测试台运行异常, 方便操作人员及时修正错误, 为测试台的安全运行提供保障[10]。

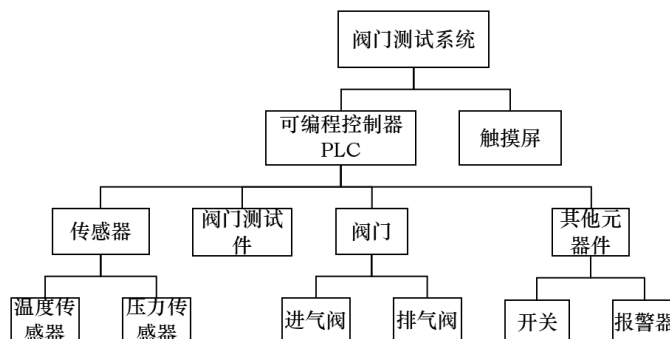


Figure 2. Hardware configuration diagram of the valve testing system
图 2. 阀门测试系统的硬件组成图

3.2. PLC 程序设计

PLC 可以根据实际需求来实现不同的功能, 具有较高的可靠性和抗干扰能力。PLC 可以与各种传感器、执行器和其他设备进行接口连接, 实现多种输入和输出的集成控制[11] [12]。采用触摸屏控制 PLC 的控制方案, 嵌入式触摸屏作为主站, PLC 控制器作为从站, 两者采用的通讯方式是 RS-232。根据系统方案所设计的程序包括检测过程控制模块、压力采集计算控制模块、温度采集计算控制模块、参数组的调用保存控制模块、数据保存控制模块, 以下对一些主要控制模块进行功能验证。

3.2.1. 压力测试和温度测试

系统压力测试是压力传感器将阀门内部采集到的压力转换为电信号, 将压力上限值和下限值分别放置于地址为 D1000 和 D1002 的寄存器中, 通过 PLC 的 AD0 端口进行信号的采集和处理, 而温度测试是温度传感器将阀门内部采集到的温度转换为电信号, 将温度上限值和下限值分别放置于地址为 D1010 和

D1012 的寄存器中, 通过 PLC 的 AD2 端口进行信号采集和处理, 最终在触摸屏上显示采集到的压力值和温度值。使用 RD3A 指令分别读取 AD0 通道和 AD2 通道中的值, 并放置于地址为 D1016 寄存器中。

3.2.2. 数据存储

在外部泄漏测试完成后, 计时 3s, 将内部和外部泄漏测试所得的数据存储到系统中, 方便用户查看数据, 并进行数据对比和调用。

3.2.3. 参数设置与产品调用

触摸屏界面中包含参数设置和不同产品型号的参数调用与保存, 所需设置的参数包含充气时间 t_1 、稳压时间 t_2 、泄漏上限 TH 等。产品调用是将用户需要调用的产品型号的参数直接调用到参数设置界面中。

3.3. 触摸屏界面设计

触摸屏作为一种直观易用的人机交互界面, 已经成为了智能终端的重要组成成分, 相比于传统的按键输入方式, 触摸屏更灵活、方便, 为用户提供了直观的操作界面和参数设置功能, 它可以一定程度上节省空间, 并提高人机交互的效率[13] [14]。

3.3.1. 界面设计框架

根据测试要求, 设计出的触摸屏界面包括产品调用、过程检测、参数设置、数据存储等界面, 触摸屏的总体框架如图 3 所示。

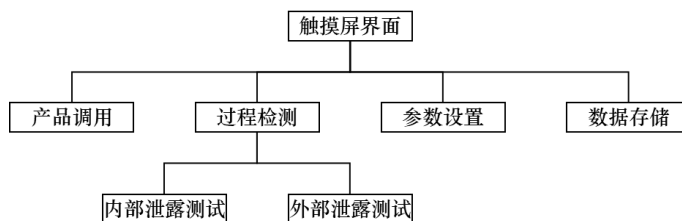


Figure 3. Interface design framework for touchscreen
图 3. 触摸屏的界面设计框架

3.3.2. 功能介绍

启动测试台, 进入测试台主界面, 如图 4 所示。



Figure 4. Main interface of touchscreen
图 4. 触摸屏的主界面

在阀门密封性检测开始前，测试台会提醒用户先安装堵头，安装堵头是为了防止管道内流体发生泄漏，保护管道和其他零部件免受损害[15]。安装堵头后即可开始密封性测试。阀门的测试过程分为内部密封性检测和外部密封性检测，同时触摸屏会根据测试台的运行状态而显示 6 个状态，分别为未检测、充气、稳压、计算中、排气和完成。

测试结束后，根据内部泄漏率和外部泄漏率的两次计算结果，触摸屏会显示阀门检测的最终结果，若内部泄漏率和外部泄漏率均为“合格”，则结果显示“合格”，否则显示“不合格”。

整个测试流程结束后，点击“完成”返回到主界面，在主界面中点击进入“数据存储”界面，可以查看历史实验数据，也可根据用户的实际需求将实验数据导入到 U 盘中。

4. 测试台的运行过程

由于阀门内部密封性和外部密封性检测过程一致，所以以内部密封性检测为例介绍系统的运行过程。开启测试实验台，设定内部泄漏和外部泄漏的充气时间 t_1 、稳压时间 t_2 和泄露上限 TH 后，实验台开始测试，测试运行过程如图 5 所示。

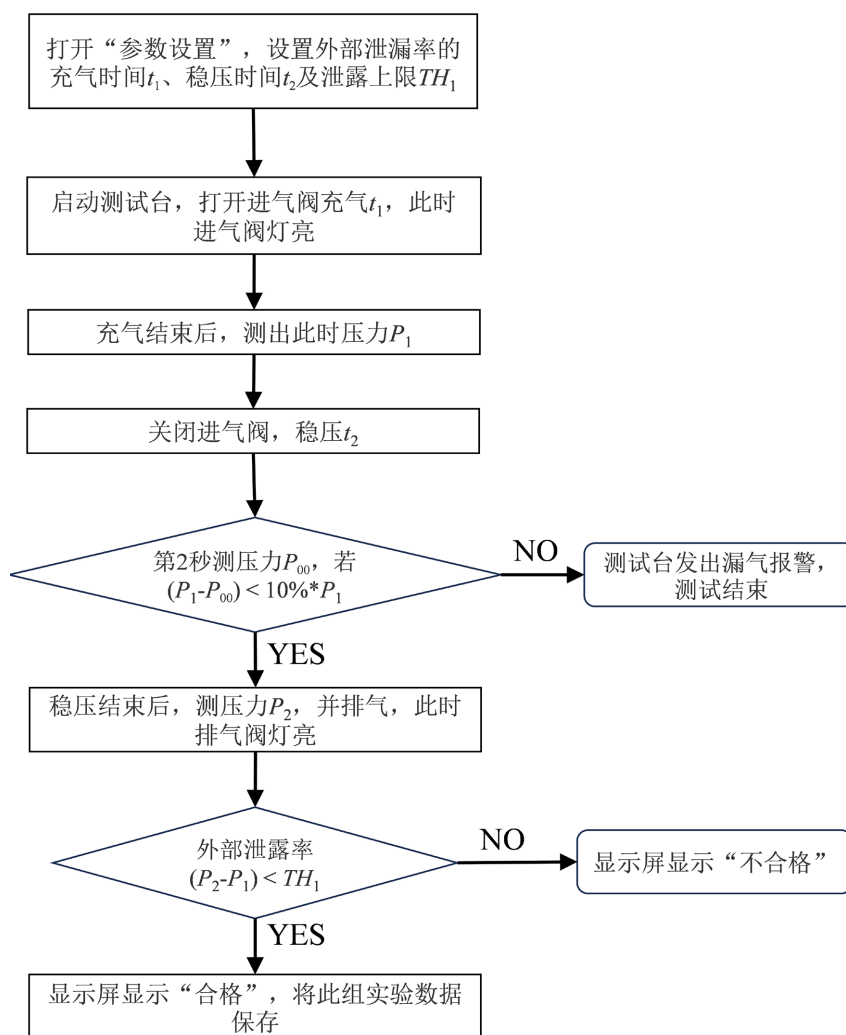


Figure 5. Leakage rate testing process diagram

图 5. 泄漏率测试流程图

5. 模拟仿真及结果验证

将测试台组装完成后,选择要测试的阀门安装到测试台管路中,并将 PLC 和触摸屏连接到计算机后进行在线模拟运行,利用 FStudio 软件的在线模拟功能,对系统进行测试,模拟对各个参数的设定以及对阀门进行检测等操作。这种模拟运行的优势在于可以在阀门测试台实际运行之前,对系统的操作性能和各个功能进行全面的验证。首先对系统的各个参数进行设定,然后进行系统模拟运行,最后得出实验模拟结果,三个过程分别为如图 6~8 所示。



Figure 6. Simulation parameter setting interface

图 6. 模拟参数设置界面

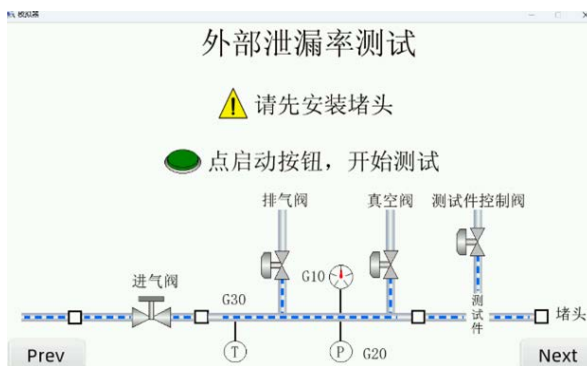


Figure 7. Simulated running interface

图 7. 模拟运行界面

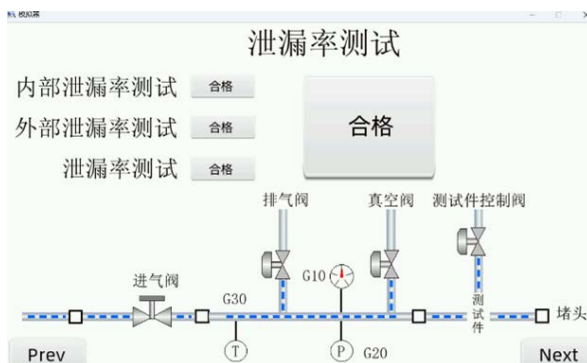


Figure 8. Experimental results simulate the interface

图 8. 实验结果模拟界面

通过在线模拟运行，能够模拟阀门测试台的各项功能、控制系统和数据采集过程，可以提前发现潜在问题，确保阀门测试台在实际工作中的稳定性和可靠性。

模拟运行结束后，在确认阀门测试台不存在潜在问题后，将程序写入实验台，设置充气时间均为 10s，稳压时间均为 5s，压力上限 TH 均为 0.5 KPa，分别测试四个阀门的泄漏率，实验结果见表 1。

Table 1. Experimental simulation results

表 1. 实验模拟结果

	压力		温度		$\Delta P/\text{KPa}$	阀门是否合格
	P_1/KPa	P_2/KPa	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$		
阀门 1 内部	10.5	9.2	24.6	24.6	1.3	阀门 1 不合格
阀门 1 外部	13.6	9.7	24.5	24.6	3.9	
阀门 2 内部	10.3	9.6	24.5	24.4	0.7	阀门 2 不合格
阀门 2 外部	11.0	9.0	24.6	24.5	2.0	
阀门 3 内部	10.3	9.9	24.6	24.5	0.4	阀门 3 合格
阀门 3 外部	10.1	9.8	24.5	24.5	0.3	
阀门 4 内部	15.3	8.2	24.6	24.5	7.1	阀门 4 不合格
阀门 4 外部	13.6	8.8	24.4	24.5	4.8	

根据表 1 的数据分析，当压力差 ΔP 超过设定的泄漏上限 TH 时，系统将判定阀门不合格；当阀门的内部泄漏率和外部泄漏率都同时满足合格后，才能被判定为合格的阀门。此外，若阀门存在泄露，则整个测试过程是一个动态过程，因此可以延长充气时间，而保压时间可短于充气时间，但也不宜过短，此次实验中的充气时间和保压时间设定合理，因此实验数据有参考价值，实验结果满足预期要求。

6. 结论

基于直压法检测密封性的原理，结合 PLC 和触摸屏技术，设计出阀门密封性自动化检测系统，并通过对其进行实验模拟和最终实际操作验证，完成阀门质量的评估，实现了快速准确地检测阀门密封性的目的，最终得出以下结论：

在检测过程中测得的两次压力值是直压法检测阀门密封性试验的关键参数，因此要尽可能地保证其准确性，可以采用精度较高的压力传感器。充气时间和保压时间对密封性的检测结果也有不同程度的影响，对于不同规格的阀门，应设定合理的充气时间和保压时间。

利用直压法原理检测阀门密封性的过程中只需额外使用一个充气泵，即可完成阀门密封性检测的全部流程，相较于其他检测密封性的原理更具经济性。这套系统能够准确检测出阀门密封性情况，确保阀门符合标准要求，从而提高了阀门的安全性能；且系统的检测速度较快，能够迅速判断阀门是否合格，可应用于大批量生产规模的质量检测中，提高了检测效率。

综上所述，这套系统的优势在于其高精度、快速的检测能力，能够有效降低阀门密封性检测的成本，并提高生产线的效率，这对于保证产品质量和提升生产效率具有一定意义。通过不断的技术改进和应用推广，阀门测试系统有望在工业过程控制中发挥更大的作用。

参考文献

- [1] Haack, S. 工业液压的未来: 从“恐龙”到“金独角兽” [J]. 液压与气动, 2023, 47(8): 1-7.
- [2] 姚晓凯. 基于深度可分离卷积神经网络的密闭容器气密性水检方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西京学院, 2022.
- [3] 刘洋, 曹京京, 牛淼, 等. 火箭总装过程中阀门漏率差压法检测技术研究[J]. 机械工程与自动化, 2022(1): 147-149.
- [4] 曾宪阳, 池作和, 郑明广, 等. 示踪法测量气体流量的试验研究[J]. 流体机械, 2011, 39(9): 6-10.
- [5] 金耀, 朱振雷, 陈矗. 一种液压缸变间隙密封结构及流场分析[J]. 液压与气动, 2023, 47(11): 136-141.
- [6] 黄亮, 郭知龙, 王喜乐, 等. 封隔器密封胶筒挤压失效分析与改进设计[J]. 液压与气动, 2023, 47(7): 177-182.
- [7] 阳浩. 气密性检测台用测试控制技术研究是实现[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2023.
- [8] 潜龙杰. PE 阀门气密性试验装置的设计[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 中国计量大学, 2017
- [9] 吴春源. 阀门低压密封试验泄漏量检测装置研究[J]. 市场监管与质量技术研究, 2022(6): 54-56.
- [10] 王秀鹏, 高晓博, 刘文婷, 等. 阀门密封性试验[J]. 化学工程与装备, 2023(10): 158-161.
- [11] 任俊杰, 李媛. 基于 PLC 和串口通信的压力仪表自动调试系统设计[J]. 制造业自动化, 2022, 44(10): 88-91.
- [12] 于吉生, 张盛开, 程彭勃, 等. 基于 PLC 的制桶生产线控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2023, 45(12): 150-153.
- [13] 王贺彬, 白锐, 吕永津, 等. 基于 PLC 与触摸屏的空压站自动监控系统设计[J]. 制造业自动化, 2023, 45(10): 125-128.
- [14] 张羽. 基于 PLC 与触摸屏的试验控制箱[J]. 电气开关, 2023, 61(1): 90-93.
- [15] 马少亮, 卢祺, 赵冬冬, 等. 先导式安全阀活塞密封圈国产化研制[J]. 液压气动与密封, 2023, 43(4): 112-117.