

## 超临界二氧化碳闭式试验回路压力调节系统

张海涛

西安空天能源动力智能制造研究院有限公司, 陕西 西安 710199

**[摘要]**超临界二氧化碳具有低黏度、高密度以及良好的流动性等特点。通过闭式试验回路对其特性研究的过程中, 试验回路的压力调节是一个重要方面。介绍了压力调节技术、压力调节系统组成, 基于 PLC 控制系统、bang\_bang 控制原理、脉冲宽度调制和脉冲序列输出技术, 以柱塞泵、电磁阀、压缩机等为主要设备, 设计了一套压力调节系统。介绍了压力调节工艺流程及控制系统组成、压力调节原理及过程。经过系统设计和理论分析, 可实现超临界二氧化碳闭式试验回路压力的远程、连续、精确调节。为类似闭式回路压力调节提供一种可行思路和方法。

**[关键词]**超临界二氧化碳; 闭式回路; 压力调节; bang-bang 控制系统; 高速电磁阀

DOI: 10.33142/sca.v6i5.9207

中图分类号: TH49

文献标识码: A

## Pressure Regulating System of Closed Test Circuit for Supercritical Carbon Dioxide

ZHANG Haitao

Xi'an Aero-space Engine & Smart Manufacturing Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710199, China

**Abstract:** Supercritical carbon dioxide has the characteristics of low viscosity, high density and good liquidity. In the process of studying its characteristics through a closed test circuit, the pressure regulation of the test circuit is an important aspect. Introduced pressure regulation technology, composition of pressure regulation system, based on PLC control system, bang\_bang control principle, pulse width modulation and pulse sequence output technology, with plunger pumps, solenoid valves, compressors, etc. as the main equipment, a pressure regulation system has been designed. Introduced the process flow and control system composition of pressure regulation, as well as the principle and process of pressure regulation. Through system design and theoretical analysis, it can realize remote, continuous and accurate regulation of supercritical carbon dioxide closed test circuit pressure, providing a feasible idea and method for similar closed circuit pressure regulation.

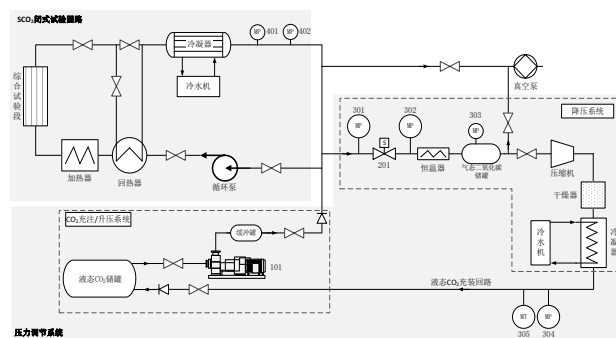
**Keywords:** supercritical carbon dioxide; closed circuit; pressure regulation; bang\_bang control system; high speed solenoid valve

### 引言

超临界二氧化碳(以下缩写为  $SCO_2$ )具有临界点适中、来源广泛、无毒环保等优良特性, 其密度接近于液体, 黏度与气体接近, 具有良好的流动性。近些年, 随着“碳达峰”“碳中和”目标的提出, 针对  $SCO_2$  动力循环特性、换热特性的研究逐渐广泛和深入。目前, 对于  $SCO_2$  特性的研究与试验, 主要以闭式布雷顿循环为主<sup>[1]</sup>。为满足不同压力工况下的试验需求, 需要对闭式回路的压力进行调节。常用的调压方法有以下几种: (1) 串联多级调节阀, 通过控制阀门开度调节系统压力; (2) 采用减压阀进行调压; (3) 通过排放阀排放和补充回路介质调节系统压力。以上几种方式, 存在以下不足: 一是闭式循环回路通常压力较高, 调节阀前后存在较大的压差, 调节阀开启困难, 难以有效进行压力调节; 二是在闭式回路中通过节流或减压阀调压, 存在使试验回路循环泵入口压力下降, 发生汽蚀的风险。三是减压阀调压方式每次只能获得某一特定压力值, 要获得其他压力时, 需人工对减压阀进行调整; 四是压力调节精度不高、压力调节范围小以及调节量难以控制; 五是通过排放介质的方式调压, 存在工质浪费、环境污染等问题; 另外, 人工调压操作不便, 同时存在安全风险。

因此, 设计一套能够满足不同的试验压力需求, 并且能够快速、精确、安全的调压系统, 对于  $SCO_2$  性能研究具有重要意义。

### 1 系统组成



101—变频柱塞泵 201—高速电磁阀 301—高速电磁阀进口压力表 302—高速电磁阀出口压力表 303—储罐真空表 304—充装回路压力表 305—充装回路温度表 401—试验回路压力表 402—试验回路真空表

图1 超临界二氧化碳闭式试验回路与压力调节系统

$SCO_2$  试验及压力调节系统主要由两部分组成: 一是闭式试验回路, 二是压力调节系统。闭式试验回路通过工质

的循环流动,对  $\text{CO}_2$  流动传热理论及关键技术进行研究<sup>[2]</sup>。压力调节系统由充注/升压和降压调节两部分组成,主要实现试验回路压力调节。压力调节系统同时配有压缩机、干燥器、冷凝器等设备对二氧化碳的液化和回收,达到试验介质循环利用的目的<sup>[3]</sup>。系统整体组成见图 1。

### 1.1 闭式试验回路

闭式试验回路主要依据  $\text{CO}_2$  特性试验需求设计。主要功能是通过在试验回路中的“综合试验段”设置不同的换热部件,在不同的温度和压力条件下使  $\text{CO}_2$  循环通过综合试验段。以此来研究其流动特性和传热特性。试验回路的主要设备有循环泵、回热器、加热器、综合试验段、冷凝器、仪表、阀门等。系统启动阶段通过柱塞泵将二氧化碳注入闭式试验回路,经过柱塞泵的加压和试验回路加热器作用,使二氧化碳进入超临界状态(压力 7.38Mpa 以上,温度 31.1℃ 以上)。在试验回路循环泵的作用下,  $\text{CO}_2$  依次经过回热器、加热器、综合试验段、冷凝器等设备,然后回到循环泵入口,通过采集试验系统各处温度、压力、流量等参数,完成  $\text{CO}_2$  的循环流动特性及换热性能研究。

### 1.2 压力调节系统

压力调节系统由充注/升压和降压调节两部分组成。压力调节主要依靠柱塞泵和电磁阀完成,调节原理分为升压和降压两部分。系统需要升压时,利用 PLC 控制变频器驱动柱塞泵运行,通过向闭式试验回路中注入工质来实现压力升高;需要降压时,利用 PLC 和 PWM/PTO 技术,通过控制高速电磁阀的启闭次数和启闭时长,使系统内工质泄放,以达到降低试验系统压力的目的<sup>[5]</sup>。另外,在降压调节回路中设有压缩机、干燥器、冷凝器等设备。用于对降压过程中产生的二氧化碳进行液化、回收。以达到工质循环利用、减少环境污染的目的。

## 2 压力调节技术

### 2.1 Bang-bang 控制

Bang-bang 控制基于系统的误差信号,通过开关控制器在误差信号达到一定阈值时切换系统的工作状态。其基本原理是:根据系统状态变量与设定值的比较结果,选择相应的动作来控制系统<sup>[5]</sup>。Bang-bang 控制策略的数学模型可以通过以下方式表示:

$$u(t) = \begin{cases} u_1 & X(t) < \text{setpoint} \\ u_2 & X(t) > \text{setpoint} \end{cases}$$

其中,  $u(t)$  是  $t$  时刻系统所选择的动作;  $u_1$  和  $u_2$  分别代表两种可能的动作选择;  $x(t)$  是系统的状态变量;  $\text{setpoint}$  是设定值(或目标值)。在压力调节的应用中, Bang-bang 控制常用于电磁阀的控制。本文所讨论的压力调节系统中,  $x(t)$  表示闭式试验回路的压力过程值;  $\text{setpoint}$  表示闭式试验回路压力的设定值;  $u_1$  和  $u_2$  分别代表电磁阀的关闭和开启动作。在试验过程中,当压力超过设定的上限值或者期望压力降到某一设定值时,控制器

打开电磁阀,对试验回路进行泄压。当试验系统压力到达设定值时,控制器关闭电磁阀完成降压过程<sup>[6]</sup>。在本压力调节系统中, Bang-bang 控制只用于对系统降压,而升压过程由变频柱塞泵完成。因此,一定程度上避免了由单一电磁阀既升压又降压带来的系统压力的波动和振荡。

### 2.2 PWM/PTO 技术

PWM (Pulse Width Modulation, 脉宽调制) 技术和 PTO (Pulse Train Output, 脉冲序列输出) 技术是自动化控制系统中常用的两种数字信号输出技术。在控制电机、阀门等设备方面具有精度高、响应快、可靠性强等优点。

PWM 技术的原理是通过周期性地改变一个固定的载波信号的占空比来输出数字信号。其中,载波信号一般采用正弦波或方波,占空比指的是输出信号中高电平所占的时间比例<sup>[6]</sup>。例如,占空比为 75% 的 PWM 信号指:在一个周期(T)内,高电平占 75% 的时间,低电平占 25% 的时间。

在 PWM 技术中,可以根据需要灵活地调节输出信号的占空比,实现精确的控制效果。在本文的压力调节系统中,利用 PLC 输出 PWM 信号来精确控制高速电磁阀在一定时间内的启闭时长和启闭次数,以实现试验系统压力的精确调节。

PTO 技术也是一种数字信号输出技术,用于生成一系列占空比固定的脉冲序列信号。PTO 技术具有响应速度快、精度高、稳定性强等优点。它可以在较短的时间内输出大量的脉冲信号,并且可以通过改变脉冲频率来实现更加灵活的控制。在压力调节系统中,通过控制 PTO 信号的输出频率,可以在极短时间内使高速电磁阀多次启闭,以达到精确调节系统压力的目的。

在控制方案设计时,将 PWM、PTO 技术组合使用。压力偏差较大时,使用 PWM 技术,通过控制电磁阀的开启时长使偏差值迅速减小。然后切换至 PTO 控制,通过在极短时间内输出多个脉冲信号控制电磁阀的启闭次数,使偏差进一步更精确的接近设定值。PWM 技术提供了快速的响应能力,而 PTO 技术则提供了更精确的控制能力。因此,这两种技术的组合使用能够满足系统对响应时间和控制精度的要求。

## 3 压力调节系统设计

### 3.1 工艺流程设计

压力调节系统基于超临界二氧化碳闭式试验回路,对压力调节的需求而设计。从工艺流程看,是在闭式试验回路上增加一路工质泄放及二氧化碳液化、回收回路。压力调节的升压过程由试验回路中的柱塞泵完成。按照功能划分,压力调节系统分为:充注/升压回路、降压系统、充装回路三部分。压力调节系统的工艺流程图,见图 2。

充注/升压部分的主要功能:在启动阶段为试验系统充注工质;在试验阶段通过柱塞泵升高试验系统压力。主要设备有:液态二氧化碳储罐、变频柱塞泵、缓冲罐以及阀门。充注/升压部分的工质流向为:液态二氧化碳储罐——入口阀——变频柱塞泵——缓冲罐——出口阀——逆止阀。

降压系统由高速电磁阀、恒温器、气态二氧化碳储罐、压缩机以及各种仪表组成。在试验过程中，通过控制高速电磁阀的启闭次数和启闭时长，实现为试验系统降压的目的。压缩机、干燥器、冷凝器等设备主要用于对气态二氧化碳进行压缩、干燥、冷却并使之液化，然后通过充装回路进入储罐。降压系统的工质流向为：高速电磁阀——恒温器——气态二氧化碳储罐——压缩机——干燥器——冷凝器——液态二氧化碳储罐。

充装回路主要由管道、阀门和温度表、压力表组成。通过管路温度、压力参数判断二氧化碳的相态，并完成工质回收。

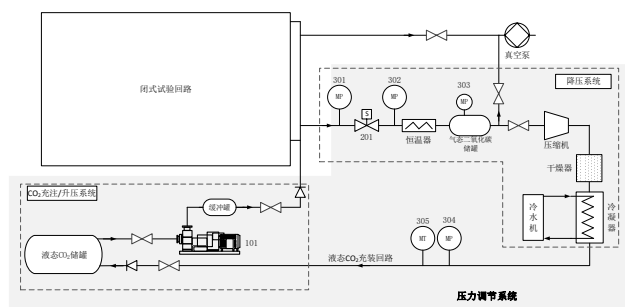


图2 压力调节系统工艺流程

## 3.2 主要设备

### 3.2.1 液态二氧化碳储罐

液态二氧化碳储罐由高强度材料（如碳钢或不锈钢）制成，具有密封性能和耐压能力。采用卧式撬装结构，并配有压力表、液位计、安全阀、爆破片等附件。主要为试验系统提供试验所需的工质，同时作为压力容器，储存来自充装回路的液态二氧化碳。

### 3.2.2 柱塞泵

柱塞泵作为一种定量泵，通过柱塞在泵腔内的往复运动实现流体输送。压力调节系统中的柱塞泵采用变频电机驱动，其功能有两个：一是在初始阶段，为试验回路注入二氧化碳，并配合试验回路的加热器对二氧化碳进行加压、升温使之进入超临界态；二是在试验阶段，根据试验过程对压力调节的需求，通过向试验回路注入工质来升高系统压力。

### 3.2.3 高速电磁阀

高速电磁阀指具有快速响应时间和高频率操作能力的电磁阀。通常用于需要精确控制和快速响应的领域<sup>[7]</sup>。其工作原理是借助于控制电磁铁产生的电磁吸力，使得电磁阀芯高速地正、反向运动，从而实现液流在阀口处的交替通、断功能。本文所讨论的压力调节系统中，高速电磁阀是一个重要的被控对象，它的性能直接影响着压力调节的效果。根据超临界二氧化碳试验回路特点，以及流量范围、工作压力、工作介质、温度范围、响应时间等技术指标所选定的高速电磁阀技术参数见表1。

表1 高速电磁阀技术参数

序号	名称	参数
1	额定流量	150L/min
2	额定压力	200bar
3	响应时间	<3ms
4	控制电压	24V DC
5	控制方式	脉冲控制
6	温度范围	60℃至120℃
7	介质	耐超临界二氧化碳
8	阀体材质	不锈钢或合金材料
9	耐用性	寿命大于100万次操作
10	安全认证	符合相关安全标准和认证要求

### 3.1.4 控制系统硬件

控制系统基于西门子 SIMATIC S7-1200 PLC 实现，主要硬件有 CPU 模块、数字量输入/输出模块、模拟量输入/输出模块等。由于压力调节中采用了 PWM/PTO 技术，因此在 CPU 选型时，应选择带脉冲输出功能的型号。根据压力调节系统控制需求及系统规模，所选择的控制系统硬件见表2：

表2 控制系统 PLC 硬件配置

序号	名称	型号/参数	数量
1	CPU	6ES7214-1AG40-0XB0 DC/DC/DC 板载6个高速计数器和4路脉冲输出	1
2	DI 模块	6ES7221-1BH32-0XB0 SM1221 数字量输入模块, 16 输入 24V DC	按实际需求
3	DO 模块	6ES7222-1HH32-0XB0 SM1222 数字量输出模块, 16 输出继电器	按实际需求
4	AI 模块	6ES7231-4HF32-0XB0 SM1231 模拟量输入模块 8AI 13 位分辨率	按实际需求
5	AO 模块	6ES7232-4HD32-0XB0 SM1232 模拟量输出模块 4AO 14 位分辨率	按实际需求

## 3.3 控制系统设计

### 3.3.1 控制系统选择

PLC（可编程控制器）作为一种常用的工业电气控制系统，具有可靠性高、抗干扰能力强、扩展性强等优点。它利用存储器内部的功能块以及指令，配合各种板卡能够方便地对现场各类信号进行采集、运算，以及对执行器的控制。其中西门子公司的 SIMATIC S7-1200 系列 PLC 能充分满足于中小型自动化的系统需求。因此，根据压力调节系统的控制需求，选择西门子 SIMATIC S7-1200 系列 PLC 作为压力调节的控制系统。

### 3.3.2 控制系统架构

基于西门子 PLC 的控制系统架构分为设备层、控制层、人机接口层，三个层次：

设备层：由各种传感器、执行器组成，用于采集现场信号、执行控制功能。

控制层：作为控制系统的核心层，由各类板卡以及通信网络组成。完成对现场信号的采集、处理以及逻辑运算；

接收人机接口传来的指令、向现场设备输出控制指令。

人机接口层 (HMI): 由工控机和显示单元组成。通过组态画面对系统状态进行监视、向现场设备发送动作指令。

### 3.3.4 控制逻辑设计

压力调节系统控制逻辑主要针对变频柱塞泵和高速电磁阀进行设计。

变频柱塞泵采用 PID 控制, 其中被控量为试验系统压力, 控制器为变频器, 被控对象为柱塞泵。在西门子 PLC 编程组态软件中, 通过调用“PID\_Compact”指令实现变频柱塞泵的 PID 控制, 控制原理图见图 3。

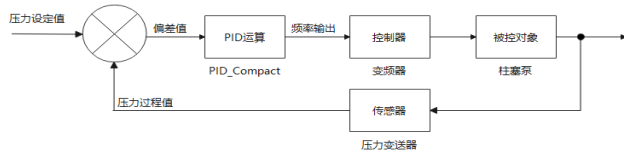


图 3 变频柱塞泵 PID 控制原理图

高速电磁阀采用脉冲控制方式, 在西门子 PLC 编程组态软件中, 通过调用“CTRL\_PWM”和“CTRL\_PTO”指令实现脉冲输出。由于电磁阀只负责降低系统压力, 因此脉冲输出只有在偏差值 (过程值-设定值) 大于 0 时起作用。为了实现快速精确的压力调节, 可根据偏差值的大小选择启用“CTRL\_PWM”, 还是启用“CTRL\_PTO”。例如, 偏差百分比在 40% 以上时, 启用 PWM 输出; 在 40% 以下时启用 PTO 输出。另外, 在使用 PWM 输出时, 可进一步根据偏差百分比的大小选择不同的输出频率 (例如: Pulse1~3), 以此来获得更快的调节速度。高速电磁阀的脉冲控制过程见图 4。

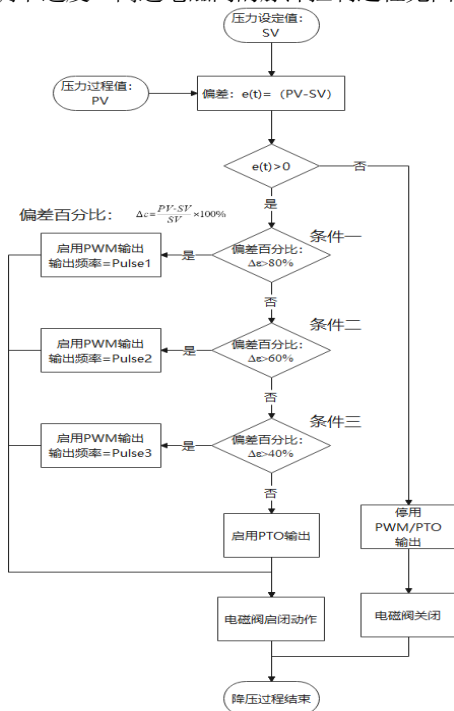


图 4 高速电磁阀的脉冲控制过程

## 4 压力调节原理与过程

### 4.1 压力调节原理

压力调节分为升压和降压两个过程。升压过程由柱塞泵完成; 降压过程由 PLC 控制的高速电磁阀完成。

(1) 升压原理: 通过控制柱塞泵的运行频率及运行时间, 向闭式试验系统中注入定量的工质, 可实现系统压力的升高。具体来说: 利用柱塞泵高排出压力、运行频率可控、单位时间输送量一定等特点, 将工质注入到闭式试验系统中, 通过监视试验系统压力, 控制柱塞泵运行频率及运行时间, 可以实现工质的定量输送, 从而达到系统精确升压的目的。

(2) 降压原理: 通过 PLC 系统与 PWM/PTO 技术, 控制高速电磁阀启闭时长和启闭次数, 使闭式试验系统中的工质定量泄放, 可实现系统压力的降低。

具体的降压原理如下: 对于闭式试验回路, 根据理想气体状态方程:

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

P——压强

V——气体体积

n——气体的物质的量

R——摩尔气体常数

T——温度

及

$$n = \frac{m}{M} \quad (2)$$

n——物质的量

m——物质的质量

M——物质的摩尔质量

可以得到:

$$PV = \frac{m}{M}RT \quad (3)$$

对于公式 (3), 由于试验系统为闭式系统, 可认为系统容积不变, 即 V 恒定; 通过保温、隔热等措施使试验系统内介质温度 T 保持恒定; 针对同一种介质, M 和 R 为常数。则可以得出试验系统压力 P 与介质质量 m 成正比, 即, 通过精确控制试验系统内介质的质量 m, 可实现对试验系统压力 P 的精确控制。另外, 对于选定的电磁阀, 其 Cv 值 (流量系数) 是确定的, 根据流量公式:

$$Q = C_v \left[ \frac{\Delta P}{\rho} \right]^{0.5} \quad (4)$$

Q——流量

Cv——流量系数

ΔP——阀门上下游压差

ρ——流体密度

结合公式 (3) 与公式 (4), 在试验系统运行时, 通过 PWM/PTO 技术, 控制高速电磁阀的启闭时长和启闭次数, 可以精确控制试验系统内介质的泄放量, 达到精确控制系统压力的目的。

### 4.2 压力调节过程

(1) 降压过程: PLC 控制系统实时采集试验系统压力值, 与压力设定值比较。若系统压力值高于目标压力值,

则通过 PLC 程序控制脉冲发生器输出占空比和频率可调的脉冲信号,控制高速电磁阀的启闭。直至试验系统压力值与设定值的差值到达允许范围内,降压过程完成。此过程为闭环控制,采用的控制策略为 bang\_bang 控制。其中被控对象为高速电磁阀,被控量为试验系统压力。

(2) 升压过程:启动柱塞泵向闭式试验系统中注入二氧化碳。同时,PLC 控制程序对试验系统实时压力值与压力设定值进行比较,根据比较的差值控制柱塞泵的运行频率和运行时长。若差值满足试验需求时,停止柱塞泵,完成系统升压过程。升压过程控制原理见图 5。

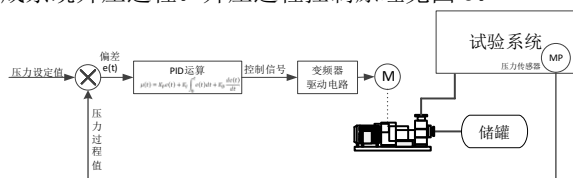


图 5 升压过程控制原理图

(3) 二氧化碳的回收:降压过程中泄放的二氧化碳会进入气态储罐。通过比较高速电磁阀前后压力表示数,以此判断调压系统是否达到调压能力上限。若高速电磁阀前后压力表示数趋于相等时,说明气态储罐内已充满二氧化碳,调压系统暂时无法继续调压。此时,开始进行二氧化碳的液化和回收。启动压缩机、干燥器、冷凝器等设备,对气态储罐中的二氧化碳进行压缩、干燥、降温等措施,使之液化。通过充装回路中的压力表和温度表判断二氧化碳的相态,待二氧化碳处于液态后,开始进行充装。待气态储罐真空表示数回到系统初始状态数值后,则认为液态二氧化碳充装完成,调压系统调压能力恢复。

## 5 结语

基于超临界二氧化碳闭式试验回路压力调节的实际需求,通过工艺流程和控制系统设计,从理论上讨论了压力调节系统的可行性及实现方法。

压力调节控制系统中关于 PID 参数整定、Ctrl\_PWM 和 Ctrl\_PTO 算法块参数设置等,需要结合控制系统和工

艺系统特性,进行多次试验调整才能确定。

由于超临界二氧化碳相态的特殊性、多变性,压力调节系统难以进行压力的动态调整。升压和降压过程宜采用分步进行。升压过程要想达到精确的控制效果,需要对柱塞泵运行频率、介质输送量、系统压力变化,这三者的关系进行多次试验调整,以获得准确的数学模型。另外,对于通过 PWM/PTO 控制高速电磁阀的降压过程,同样需要通过多次整定,找出 PWM/PTO 脉冲信号的频率、占空比与系统压力变化之间的关系。

通过充注和泄放工质的方法进行压力调节,是一种理想状态下的理论推导模型。由于超临界态的二氧化碳在高压和高温条件下表现出非理想性,因此,具体的压力变化可能还受到多种因素的影响,具有一定的复杂性。

## [参考文献]

- [1]叶楷.超临界二氧化碳自然循环流动与换热研究[D].福建:厦门大学,2020.
- [2]王乃心,杨大章,谢晶,王金锋.超临界 CO<sub>2</sub> 对流换热特性试验研究进展[J].流体机械,2020,48(11):73-79.
- [3]吴豪,刘猛,董锐.热动力试验系统温度压力动态调节方法研究[J].流体传动与控制,2016(3):28-33.
- [4]彭轶,盛晓岩,李鑫武.背压平衡式液体压力调节装置设计及测试方法[J].计测技术,2015,35(3):36-38.
- [5]穆慧灵,胡冰馨.基于变频调速技术的 Bang-Bang-PID 恒压供水闭环控制方法[C].冶金自动化杂志社:冶金自动化信息,2015 年会论文集,2015.
- [6]于正同,时培燕,孙锴.基于 PWM 快速电磁阀的驱动控制电路设计[J].现代车用动力,2020(1):69-38.
- [7]邹开凤,胡新生.高速电磁阀响应特性的研究[J].移动电源与车辆,2021,52(1):40-42.

作者简介:张海涛(1984.10—),男,毕业院校:中北大学,学历:本科,所学专业:自动化,职称:工程师。