DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0056-04

双闭环 PID 控制逻辑在阀门控制中的应用

何 山[1,2]

(1.中广核工程有限公司,广东 深圳 518116; 2.中广核清洁能源科技(上海)有限公司,上海 200241)

摘 要:阀门及其闭环试验是核电厂工艺系统调试的前提和重要组成部分,阀门的 PID 参数调节是系统实现工艺要求的基础。本文以华龙一号废气处理系统(gaseous waste precessing system,TEG)为例,针对系统的部分阀门在使用自带 PI 的脉冲型调节阀(motorized control valve with stepper,MCV_S)模块进行控制时,阀位会周期性波动,导致工艺参数无法稳定在要求范围内的问题,研究引入了双闭环 PID 控制方案,其中内环为阀位控制环,外环为工艺参数控制环,并通过工程整定方法优化 PID 参数。将该方案应用于阀门控制试验,并与原 MCV_S 模块的控制效果进行对比。结果表明:双闭环 PID 能有效抑制阀位周期性波动,使工艺参数快速收敛至设定值,稳态误差显著降低。最终验证了在 PID 参数设置合理的前提下,双闭环控制方案完全可以实现废气处理系统阀门工艺参数的精确调节要求。

关键词:阀门试验;调试;脉冲型调节阀;闭环;PID 控制器;废气处理系统

中图分类号:TP273;TL48 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-7241(2026)08-0056-04

Application of double-closed-loop PID controller in control valve

He Shan[1,2]

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518116, Guangdong, China;
2. General Clean Energy Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: The valve and its closed-loop tests are important parts of the process system commissioning of nuclear power plants, and the valve PID parameters adjustment is the basis for realizing the process system requirements. A lot of valves of gaseous waste processing system (HPR1000) are controlled by step action controller (MCV_S) macro within PI controller. The valves position will fluctuate periodically, and it does not meet the process requirements. This paper introduces the application of double-closed-loop PID controller, in which the inner loop is the valve position control loop and the outer loop is the process parameter control loop, and parameter adjustment method in the valve control test. This scheme is applied to valve control tests and compared with the original MCV_S module. The results show that the double-closed-loop PID effectively suppresses the periodic fluctuations in valve position, enables the process parameters to converge quickly to the setpoint, and significantly reduces the steady-state error. Through the application of double-closed-loop PID controller, it is verified that the valve can meet the process requirements if the PID parameters are set reasonably.

Keywords: valve testing; commissioning; control valve (step action controller); closed-loop; PID controller; gaseous waste processing system

电动调节阀能远程控制,具有节能、安装方便、稳定性高、易调节等优点,被广泛应用于华龙一号核电厂核岛相关系统中。阀门的控制系统一般由控制器、执行机构、阀门本体、传感器和比较元件组成。实际应用中,比较元件和控制器是在数字化控制系统(digital control system,DCS)中实现的。阀门本身的性能,如行程时间、死区会影响阀门的控制效果,在工程上,可以使用两个 PID 模块组成的控制器对阀门精确控制,以实现工艺参数的调节要求。

1 电动阀介绍

电动阀主要由电动执行机构和阀门本体组成。执行机构是阀的推动装置,根据所给信号的大小来产生推力,从而推动阀杆进行相应的位移。电动执行机构有两个重要的部件,分别是行程限位机构和力矩保护机构。行程限位机构的目的是保证执行机构的输出在行程范围内运动,以免对阀体产生损害。力矩保护机构可防止电机过载,对电机或阀门造成损坏,适当过力矩能保证阀门关紧、防止泄露[1-2]。

阀位是通过电动执行机构中电位计反馈的。电动执行机构通过联轴器将执行机构转动转换为阀杆的直线运动,同时转动也改变电位计中电阻丝电阻值(类似滑动变阻器)。阀门电机转数经多级变速、减速齿轮后,通过安装在末级齿轮输出轴上的电位器,将转数信号轮换为对应

收稿日期:2025-06-08;**录用日期**:2025-07-23

作者简介:何 山(1987—),男,硕士,工程师,研究方向为三废系统仪控。

引用本文:何山. 双闭环 PID 控制逻辑在阀门控制中的应用[J]. 自动化技术与应用,2026,45(8):56-59. (He Shan. Application of double-closed-loop PID controller in control valve[J]. Techniques of Automation and Applications,2026,45(8):56-59.)

的电阻值,再通过数字化控制系统将电阻值转换为相应的阀门开度[3],最终电位计输出的电阻值可以和阀位建立线性关系。

2 阀门工艺设置和控制器的研究

华龙一号项目中,TEG 主要功能是吹扫用户系统的设备,限制放射性气体的流动范围。系统中采用了较多的脉冲型调节阀,下面以废气处理系统的调节阀 TEG6109VJ-为例进行说明。

2.1 阀门的工艺功能

TEG6109VJ-是废气处理系统减压站 1 的阀门,废气压缩机为整个废气处理系统的气体循环吹扫提供动力,压缩机的出口压力测量仪表 TEG6104MP-联锁减压站 1 调节阀 TEG6109VJ-,使废气压缩机出口(或调节阀入口)压力维持在 0.8 MPa 左右。TEG6109VJ-的上游和下游分别各有一个手动隔离阀 TEG6108VJ-和 TEG6109VJ-,便于阀门的后续维护。

图 1 是 TEG6109VJ-的控制方案框图,输入偏差是压力测量仪表 TEG6104MPa 的数值与设定值 0.8 MPa 相比较。图 1 中的 PI 控制器是 MCV_S 模块,将在 2.3 小节中介绍,该控制方案是一个典型的闭环控制回路。

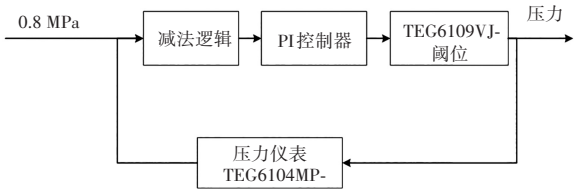


图 1 控制方案

Fig. 1 Control scheme

2.2 闭环控制概述

闭环控制是一种通过对系统输出进行测量和比较,来对输入进行调整,以使系统达到期望状态的控制方法,图 1 中,将 TEG6109VJ-看成一个系统,就是闭环控制的典型结构图。随着阀门阀位的变化,管道中的流量会发生变化,从而影响压力测量仪表,形成闭环。

控制偏差 XD 可以是工艺整定值与测量值的差或是测量值与工艺整定值的差,两个定义的选择取决于在偏差上采取的动作。如果控制偏差是正值(XD>0),驱动控制模块将阀门向开方向移动;如果控制偏差是负值(XD<0),驱动控制模块将阀门向关方向移动。压力测量仪表 TEG6104MP-在阀门 TEG6109VJ-的上游,如果操纵员想要增大压力(整定值>测量值),则阀门应该关闭(XD<0),所以控制偏差 XD 是测量值减工艺整定值。

2.3 脉冲型调节阀

在华龙一号项目中,根据输出信号类型,调节阀类执行机构分为脉冲型调节阀和连续型调节阀,脉冲型调节阀(MCV_S)阀门位置调节是由 DCS 完成的,输出模块发出开关量脉冲信号至开关盘。模块引脚信息见图 2。

在 MCV_S 模块内部封装了 PID-S(脉冲 PID)模块,详见图 3,需要注意的是模块没有 TD 的输入,左边 3 个输入的编码与 MCV_S 的模块引脚对应。此类型的模块是根据偏差生成开关方向的脉冲,当 AOP/ACL(自动关开)、PAOP/PACL(优先级自动开关)存在时控制器停止输出。

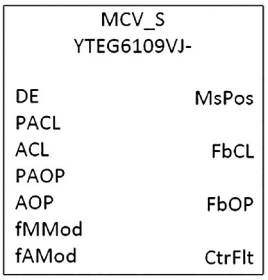


图 2 脉冲型调节阀(MCV_S)模块

Fig. 2 Step action controller (MCV_S)

2.4 PID 控制方式

PID 控制器是工业过程控制系统中常用的校正装置,包括一个比例环节、一个积分环节和一个微分环节。比例控制能够按照系数的比例快速缩小控制系统的偏差,实质上是一个放大器,加大比例系数,可以提高系统的增益,减少稳态误差,但是会降低系统的相对稳定性,所以在实际工程应用中,仅使用比例调节无法实现控制的目的[4-9]。微分控制是根据信号的变化速度进行超前调节,它只对动态过程起作用,对系统噪声非常敏感。积分控制有利于系统稳态性能的提高,如果有误差,误差会随着时间进行积累,只有在误差全部消除后,积分调节才会停止。PID 控制器最简单的传递函数如式(1)所示。

$$F(s) = K_1 + K_2/s + K_3 s \tag{1}$$

在华龙一号控制逻辑的 PID 模块中,其参数有死区、算法类型、增益、积分时间(time of integration、TI)、微分时间(time of differentiation、TD)和惯性时间常数。在应用中默认的算法类型是乘法,公式如下所示。

$$F(s) = \mathrm{GAIN}\left(1 + \frac{1}{\mathrm{TI}s} + \frac{\mathrm{TD}s}{1 + \mathrm{TDAMP}s}\right) \tag{2}$$

控制器的计算结果限制在区间[LRV,URV](物理上下限值)范围内。例如,比例系数 GAIN 为 1 时,如果 XD 为 0,则输出 Y 为 LRV;如果 XD 为 100,则输出 Y 为 URV。

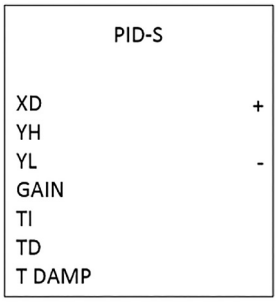


图 3 MCV_S 模块内部的 PID-S 模块

Fig. 3 PID-S module within the MCV-S module

3 单闭环 PID 控制器的应用

废气处理系统调试阀门时有两步,首先是阀门试验,包括机械部分检查、电气及绝缘检查和功能检查。第二步是阀门的闭环控制试验。

3.1 阀门闭环控制试验

关于 TEG6109VJ-的运行准则是"减压站 1 的 TEG6109VJ-维持废气压缩机出口 TEG6104MP-的压力(0.80±0.01)MPa。具体的试验步骤如下。

1) 通过阀门配置按钮的选择,确认 TEG6109VJ-已被选择。

2) 确认 TEG6109VJ-处于自动模式。

3) 等待系统温度后,确认减压站 1 上游压力仪表 TEG6104MP-示数稳定在 0.80 MPa 左右。

4) 改变 TEG6109VJ-的压力跟踪设定值为 0.84 MPa,等待系统稳定后,确认 TEG6104MP-示数稳定在 0.84 MPa 左右。

5) 再次改变 TEG6109VJ-的压力跟踪设定值为 0.80 MPa,等待系统稳定后,确认 TEG6104MP-示数稳定在 0.80 MPa 左右。

6) 评价试验结果。确定是否需要调整控制器 PID 参数,若控制器 PID 参数需调整,则需要在参数调整后,重新执行上述步骤。

步骤中设定值的调节就是扰动阶跃值的选择,一般是按照量程的±10%比例来选择,这样有利于控制回路的参数分析。由于各系统的差异性和工况的不同,可以结合实际工况选择阶跃幅度和方向。调节阀可以视为单级的控制回路,脉冲型调节阀(MCV_S)模块中只有 PI 参数的调节,有以下两个步骤。

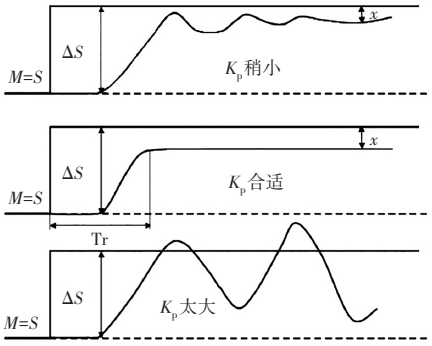


图 4 单级控制回路比例环节响应曲线

Fig. 4 Response curve of the proportional element in a single-loop control loop

3.1.1 比例环节整定

将控制系统切换到手动模式。通过将积分时间 TI 设置为无穷大、微分时间 TD 设置为零的方式,使 PID 控制器工作在纯比例模式。设置一个相对保守(较小)的比例系数 GAIN。将控制系统切换到自动模式,执行扰动试验。根据图 4 的曲线形状,观察闭环控制系统响应情况,需要适当调整 GAIN。图中 X 是稳态偏差,M 是被调量,S 是设定值,Tr 是响应时间。比例系数的增加能够减小稳态误差,但过大的比例系数会导致系统失稳。

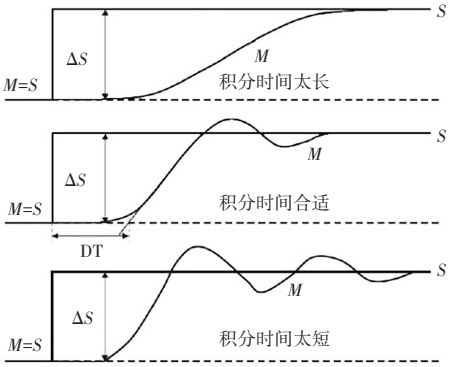


图 5 单级控制回路积分环节响应曲线

Fig. 5 Response curve of the integral element in a single-loop control loop

3.1.2 积分环节整定

积分环节的作用是消除稳态偏差。在确定比例系数 GAIN 后,积分时间 TI 的初始值选择一般不小于比例环节整定中的系统响应时间 Tr。执行扰动试验,参考图 5,根据系统响应曲线,适当调整 TI 数值。图中 M 是测量值,S 是设定值,ΔS 是设定值变化, DT 是响应滞后时间。如果没有积分环节即积分时间无穷大,设定值与被调量之间的偏差就无法消除。逐步减小积分时间,能够消除偏差;继续减小积分时间,系统响应时间缩短;再减小响应时间,系统开始发散,在几个波动周期后才能稳定在设定值。

3.2 阀门的实际控制情况

根据 3.1 节的内容调试 TEG6109VJ-时,发现调节阀入口压力波动,TEG6104MP-无法稳定在设定值,同时阀门频繁动作,TEG6109VJ-阀位和入口压力 TEG6104MP-的数值呈周期性波动,压力趋势图见图 6。现场通过修改调节阀控制模块内部参数后,发现调节效果无明显变化。

经过分析,由于阀门的行程时间相对较短,被控对象为气体,阀门入口压力随阀位变化较快,阀位无法进入设定的死区中,所以产生周期性波动。

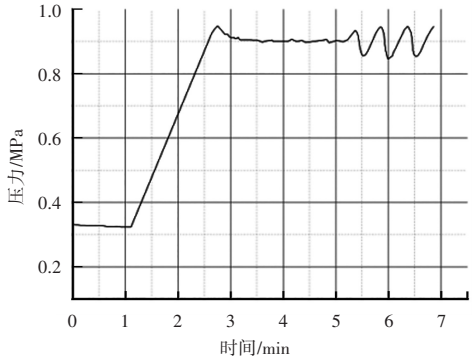


图 6 单闭环控制下的压力的趋势

Fig. 6 Trend of pressure(PID)

4 双闭环 PID 控制器的应用

4.1 双闭环 PID 控制逻辑概述

在实际的工程应用中,由于阀门流量系数、行程时间、管道设置等因素,脉冲型调节阀(MCV_S)内部的 PID 控制器可能无法使控制对象稳定在目标值。图 7 是双闭环 PID 控制器应用的框图,主变量压力的 PID 控制器和副变量阀位的 PI 控制器串联运行的,串级 PID 的目的是保证压力能够稳定,两个控制器不是相互独立的,参数需要相互调节优化。当压力发生变化时,内环的 PI 会先行调整,将扰动一定程度消除后,外环的 PID 控制器再进行调整,所以控制的稳定性和响应时间都优于单级 PID[10-11]。

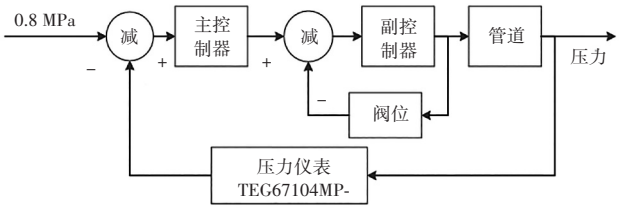


图 7 双闭环 PID 控制方案

Fig. 7 Control scheme of double-closed-loop PID

在双闭环的控制逻辑中,定义了两个闭环。1)有脉冲型调节阀(MCV_S)模块的阀位控制回路;2)有 PID 模块的工艺参数控制回路。

工艺控制偏差连接到外部的 PID 模块 XD 输入端,输出是计算后的阀门位置数值,与实际阀门位置比较后,输出到脉冲型调节阀(MCV_S)内部 PID 模块的 XD 端。阀门位置信息的引入,提高了系统的动态性能。由于串级 PID 的主副回路存在相互影响的情况,很难对参数进行调整。工程上可以通过以下方法进行调整。

1) 根据单个 PID 模块调节方法改变控制器参数,观察控制器参数对系统的影响。

2) 适当调节主副控制器参数,使主控制回路被控参数的响应曲线较好。

3) 如果在调节过程中阀位发生震荡,可以增大两个模块的任何参数,以消除震荡。

4) 如果出现严重震荡,需要将阀门变为手动模式,稳定后再进行设定。

4.2 阀门的实际控制情况

将阀门修改为双闭环控制器方案后再进行试验,趋势图见图 8,可以看到 PID 的参数修改后,阀门的入口压力不再振荡,基本维持在设定值,控制效果比较理想。

4.3 控制器死区的设置问题

调节阀控制器有死区 $Y\%$ 的,阀门全关状态下阀位反馈 $X\%$,允许存在一个极小的开度 $Z\%$,阀门完全关闭,需要满足 $Y\% - X\% \leqslant Z\%$。理论上如果要阀门全关,Z 需要等于 0,所以 X 大于 Y,电厂会出现阀门实际已经完全关闭,但是运行人员会看到阀门开度是 $Z\%$ 的情况。此问题可以通过修改阀位对应关系来解决。将实际 0% 的阀位所对应的外置变送器显示开度 $X\%$ 大于阀门控制死区 $Y\%$,可以确保阀门完全关闭。另外也可以关注两个 PID 模块的死区设置,尽量将死区大部分分配在外部 PID 模块的工艺参数的控制回路中,阀位控制回路的死区设置较小的数值。

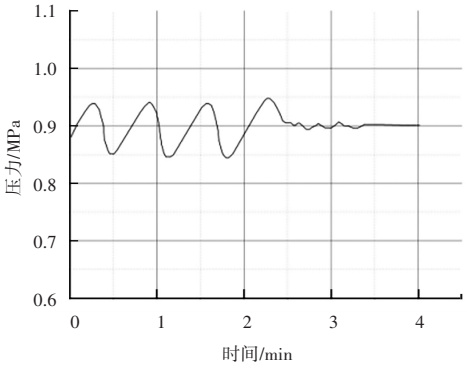


图 8 双闭环控制下的压力的趋势

Fig. 8 Trend of pressure(double-closed-loop PID)

5 结论

阀门调试是核电厂系统调试的基础。如果被控对象为气体,管道压力随阀门的变化较快,脉冲型调节阀(MCV_S)自带的 PI 控制器,可能无法满足阀门的调试要求。双闭环 PID 控制器将调节阀的阀位信息引入到控制回路中,现场通过控制方案的修改,实际比较修改前后阀门的控制效果,确认双闭环 PID 控制方案可以很好地实现工艺控制要求。目前,华龙一号废气处理系统大部分调节阀的阀位信号是电阻信号,滑动变阻器产生信号可能会不稳定,如果该信号发生故障,会造成阀门完全不可用。在后续的项目中可以考虑将阀位信号修改为 4~20 mA DC 的电流信号。

参考文献

[1]陈洪东. 开关型电动阀调试方法的探讨[J]. 现代信息科技,2019(14):39-40,43.
[2]杨俊峰. 浅析电站智能型电动阀调试方法[J]. 设备管理与维修,2021,9(17):148-149.
[3]黄东东,张俊河. 关于核电电动调节阀阀位信息反馈方式的分析[J]. 中小企业管理与科技,2018(2):150-151.
[4]张世奇. 模糊自校正串级 PID 板球控制系统设计与研究[J]. 自动化技术与应用,2019,38(1):1-4.
[5]骆明霞. 基于卧式 PID 优化的卧式数控车床电气自动控制系统[J]. 自动化技术与应用,2023,42(11):34-37.
[6]鲁玺,孙延. 基于 PID 控制的汽车电子机械制动系统设计[J]. 自动化技术与应用,2021,40(1):137-140.
[7]任铭,汪志峰,徐洁,王跃. 基于遗传算法在反应釜模糊 PID 控制中的优化[J]. 自动化技术与应用,2025,44(6):22-27.
[8]王少坤,李伟,童俊. 基于模糊 PID 的温度控制系统研究进展[J]. 自动化技术与应用,2025,44(1):1-4.
[9]党丽. 基于变论域模糊 PID 的金属热处理过程温度控制方法[J]. 自动化技术与应用,2024,43(1):14-17.
[10]崔业梅,杨焕峥,徐玲. 基于串级 PID 算法的加热炉温控嵌入式软件自动化设计[J]. 制造业自动化,2023,45(7):56-60.
[11]乔纬国. 一种采用双 PID 串级控制的双轮自平衡车的研制[D]. 长春:吉林大学,2017.