



PID 控制下前弯式离心泵流量特性试验研究

木家康, 盛 健*

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 比例系数、积分系数与微分系数作为控制器调节系统动态响应的参数, 在比例积分微分(PID)控制中起到重要作用, 为研究 PID 控制下前弯式离心泵流量控制特性, 以恒定流量为控制目标, 试验 PID 参数在不同范围内的具体表现与各环节控制特性。研究结果表明: 离心泵流量控制失稳振荡会引起电机的启停; 受变频器升限保护限制, 比例系数过高不会缩短控制初期流量调节上升时间, 反而会增加超调量、降低稳定性, 因此应选较低比例系数; 积分饱和造成的超调量上限为 33.50%, 此时继续增大积分系数可缩短稳态时间, 直至系数过大影响稳定性而出现振荡; 若尽量避免产生超调影响, 选用比例系数为 0.2, 积分系数为 0.5 时, 流量调节经初始上升阶段后在目标值附近波动并快速稳定, 超调量微弱, 仅为 8.82%, 稳态时间为 7.4 s, 在测试中具有最佳控制效果; 与微分系数相关的流量超前调节在实际控制中作用微弱, 且对调节过程中的波动没有明显改善。结合以上结论为变频离心泵流量控制中的 PID 调参与控制优化提出参考。

关键词: 离心泵; 流量控制; PID 控制; 试验研究

中图分类号: TH3

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20240066](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20240066)

Experimental Study on Flow Control Characteristics of Forward Bend Centrifugal Pump under the PID Control

MU Jiakang, SHENG Jian*

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Proportional coefficient, integral coefficient, and differential coefficient, as parameters for adjusting the dynamic response of the controller system, play an important role in the proportional integral differential (PID) control. In order to study the flow control characteristics of the forward bending centrifugal pump under the PID control, with constant flow rate as the control objective, the specific performance of PID parameters in different ranges and the control characteristics of each link are tested. The research results indicate that unstable oscillation in flow control of centrifugal pumps can cause motor start stop. Due to the limit up protection limitation of the frequency converter, a high proportion coefficient will not shorten the initial flow regulation rise time of the control, and will increase the overshoot and reduce stability, therefore, a lower proportion coefficient should be selected. The upper limit of overshoot caused by integral saturation is 33.50%. Continuing to increase the integral coefficient can shorten the steady-state time until the coefficient is too large and affects stability, leading to oscillation. If we try to avoid overshoot as much as possible and choose an integral coefficient of 0.5, the flow regulation will fluctuate and quickly stabilize near the target value after the initial rising stage, with a weak overshoot of 8.82% and a steady-state time of 7.4, which has the best control effect in testing. The flow advance regulation related to differential coefficient plays a weak role in the actual control, and does not significantly improve the fluctuation in the regulation process. Finally, based on the above conclusions, a reference is proposed for the optimization of PID tuning in the flow control of variable frequency centrifugal pumps.

Key words: centrifugal pump; flow control; PID control; experimental research

离心泵是靠电机带动叶轮旋转时产生的离心力来输送流体以及增压的机械设备, 在化工、石油、矿业、农业等领域应用广泛, 占据流体输送能耗主要部分。随着现代化生产要求进一步提

高, 在离心泵输送流量与出口压力稳定控制的基础上, 对其控制精度、稳态时间、动态过程的超调量以及抗扰动能力有更高的要求^[1-2]。在实际生产过程中, 由于输送管路内的流体介质、流量需

收稿日期: 2024-03-07

基金项目: 上海市 2020 年度“科技创新行动计划”技术标准项目(20DZ2204400)。

作者简介: 木家康, 硕士生, 制冷及低温工程专业。E-mail: 760198482@qq.com

* 通信作者: 盛健, 博士, 高级实验师, 主要从事特种制冷与空调系统方面的研究。E-mail: sjhvac@usst.edu.cn

求变化及管网布置高度等差异,离心泵流量控制存在非线性、时变性、不确定性等,因此,优化控制方法以提高离心泵运行效率与控制系统性能,成为研究的重要课题^[3-5]。

PID 控制算法因其简便性与强适应性广泛应用于泵流量的闭环控制系统,但仅依靠经验整定 PID 参数无法达到最佳控制效果^[6]。文献 [7-13] 介绍了模糊自适应 PID 控制在泵流量控制中的应用,弥补了常规 PID 控制参数整定的不足,结合模糊逻辑进一步动态调整控制参数,仿真结果均表明基于模糊 PID 控制的泵流量控制系统具有更强的鲁棒性与动态性能。而目前相关 PID 控制系统在离心泵流量控制中的应用研究局限于 Simulink 工具仿真模拟,与实际控制情况仍有差距,且控制参数的模糊规则表并没有针对离心泵流量控制特性进行调整,需针对 PID 控制下离心泵流量控制各环节特性进行试验研究。

据此本文搭建了离心泵流量调节性能试验台,设计了基于 PID 控制的变频流量调节系统,实现离心泵在设定流量下的恒定输出,并对控制参数在不同范围内的调节特性进行分析,进一步总结变频离心泵流量控制中各环节的作用,指导离心泵流量调节的 PID 参数整定及智能控制算法优化。

1 离心泵流量控制试验

1.1 PID 控制下离心泵流量控制原理

在离心泵流量控制中,PID 控制器接受流量计反馈的实际流量,再与设定流量值比较得到误差信号,进行处理后输出信号调节变频电机的转速,可在负载干扰下满足设定流量下的恒定流量输出控制,流程如图 1 所示。

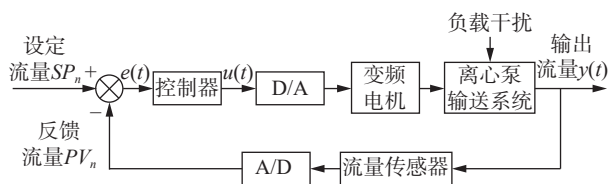


图 1 离心泵流量控制流程图

控制器获得的误差信号与输出信号都是时间函数,记为 $e(t)$ 与 $u(t)$,PID 控制规律为^[14]:

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

式中: K_p 为控制比例系数, T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数。

对 PID 控制算法进行离散化表示,假设采样间隔为 T ,则在第 K 时刻下,得到位置型 PID 公式:

$$u_{(k)} = K_p e_{(k)} + K_i \sum e_{(0-k)} + K_d (e_{(k)} - e_{(k-1)}) \quad (2)$$

式中: $K_i = K_p T / T_i$ 为控制积分系数, $K_d = K_p T_d / T$ 为控制微分系数。

PID 控制效果与 K_p 、 K_i 、 K_d 共 3 个参数有关,分别影响比例、积分、微分控制的作用,其参数整定是控制环节中的重要部分。

1.2 离心泵试验台

离心泵试验台由变频离心泵、连接管路、阀门及测量仪器等组成,如图 2 所示,主要设备型号参数如表 1 所示。选用单级单吸蜗壳式变频离心泵,前弯叶片半开式叶轮,额定工况参数:叶轮直径 165 mm,叶片数 12,流量 $9 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 12 m,转速 1800 r/min。控制系统包括数据采集模块、可编程自动化控制器 (programmable automation controller, PAC)、人机界面、涡轮流量计、压力传感器与变频器 (variable-frequency drive, VFD),其中 PAC 控制器是控制系统核心,负责数字信号与模拟信号的转换、处理及传输。采集模块间隔 0.1 s 记录流量与出口压力,并导入上位机进行数据的整理与分析。可在上位机程序中输入流量设定值与 PID 参数值,满足离心泵流量控制测试试验要求。

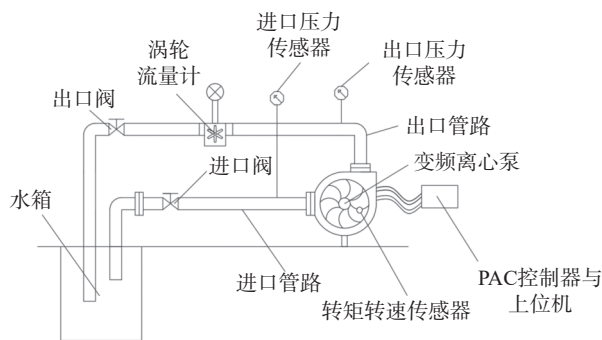


图 2 离心泵试验台示意图

1.3 试验方法

试验对 K_p 、 K_i 、 K_d 共 3 个控制参数进行大范围整定测试。由于比例增益可以单独作用在控制上,所以整定 K_p 时,将 K_i 、 K_d 设置为 0,从 0 开始逐步调大 K_p 值,直至比例增益过大引起流量

控制失稳,并记录数据。对积分增益 K_i 进行整定时,需搭配比例增益进行比例积分(proportional integral, PI)控制,微分增益 K_d 设置为 0;对微分增益 K_d 进行整定时,需搭配比例增益与积分增益进行 PID 控制,对 K_i 、 K_d 值的整定,同样

从 0 开始向上调节,直至流量控制出现失稳振荡,试验期间记录多组数据。试验过程中出口阀与进口阀保持全开,取泵电机中间转速 1100 r/min 下泵出口流量 $6.83 \text{ m}^3/\text{h}$ 为控制目标,确保控制过程电机转速超调时不触及上限。

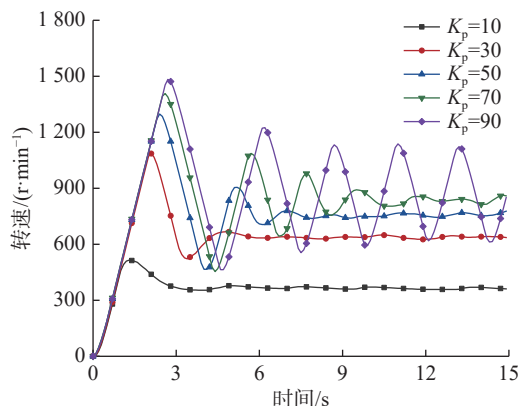
表 1 主要设备生厂商及型号参数

设备	生产商	型号	参数描述
泵电机	LEESON	G131579.00	全封闭式外部风扇冷却式电机,三相电压230/460 V,功率2.205 kW
VFD变频器	Allen Bradley	25B-A011N104	2.2 kW变频驱动,控制安全转矩,流量调节控制
PAC控制器	Allen Bradley	1769-L18ER-BB1B	1734-IE2C双通道模拟I/O模块,1734-VHSC24高速计数器I/O模块
涡轮式流量计	FIMETER	LWGY-DN40	测量范围2~20 m^3/h ,0.2% FS精度等级
压力传感器	Setra	Mode 209	测量范围0~175 kPa,0.25% FS精度等级

2 流量控制特性试验分析

2.1 比例控制下离心泵流量调节特性

测试不同 K_p 参数下纯比例控制环节效果,设定目标流量下离心泵电机转速和出口流量随时间变化分别如图 3 和图 4 所示。调节初期, K_p 值达到 10 时,电机转速因变频器升限保护已达到升速上限,其中转速增长速率约为 $599 (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})/\text{s}$,流量增长速率约为 $3.36 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{s}$,两者均不随比例增益提升而改变。因此,在实际离心泵变转速流量控制过程中,受电机升限保护限制,在控制初期,单纯放大误差信号,并不能提高响应速度与缩短上升时间。此外,在不同 K_p 值下转速与流量变化趋势相同,转速变化起始点为 0,流量变化起始点约在 0.8 s 左右,存在一定的传递滞后。

图 3 不同 K_p 值下转速控制曲线

K_p 值提高到 90(临界比例增益)后,由于变频器与泵电机整体的控制传递、泵电机转速与离心泵出口流量的控制传递存在惯性滞后,期间出口处流量超过设定值临界范围,在比例增益的加持

下控制器判断变频电机需停转以补偿过余误差,反之变频电机高速启动,控制曲线失稳并等幅振荡。比例系数进一步增大后流量振荡表现如图 5 所示。随 K_p 值提高,流量波动振幅与启停间隔增加。对于离心泵流量控制而言,控制曲线失稳振荡直观表现为变频电机频繁启停,易引起变频器过流故障与直流过压,导致其中重要部件绝缘栅双极晶体管老化,应尽量避免。

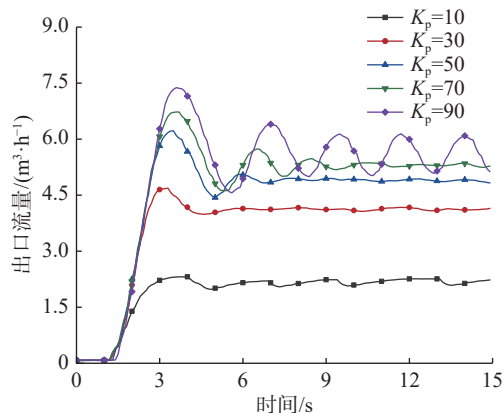
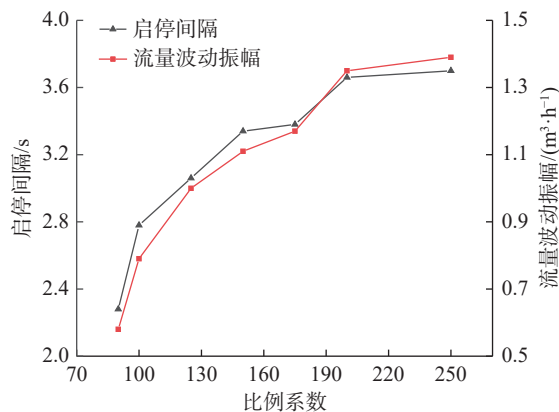
图 4 不同 K_p 值下流量控制曲线

图 5 比例系数与流量振荡关系图

比例系数提高引起的超调量、稳态时间与稳态误差变化如图 6 所示。其中 K_p 值提高降低了稳态误差, 且仅在比例系数较小时 (K_p 值取 10~40) 具有较明显效果, 而直至比例系数过大引起流量振荡, 稳态误差仍然存在, 因为纯比例控制下无法做到无差控制, 而此部分稳态误差在积分增益下很容易被消除。 K_p 值提高使流量的超调量与稳态时间均增大, K_p 值在 20~40 范围内超调量快速增大, 而后超调量增长趋于平缓; K_p 值达到 60 后稳态时间大幅上升至 18.6 s, 直至流量控制出现失稳振荡。

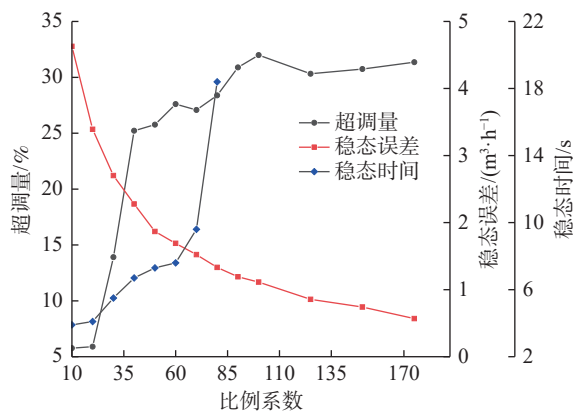


图 6 比例系数与控制动态性能关系图

离心泵出口管道压力变化如图 7 所示, 可见流量与压力变化趋势吻合, 且压力变化与叶轮转速变化同步。压力测点布置在泵蜗壳出口处, 而流量测点布置于出口管道中间段, 相隔一定间距, 计算验证可得流量变化的滞后约为对应管长内流体的输送时间。并由此可得, 对于流量控制系统, 满足测量精度情况下调整出口管路上的流量测点位置可改善控制传递滞后, 提升系统动态性能。另由图 7 可得, 流体输配管网运行中, 流量控制的超调与振荡反映了泵出口管道压力的大幅度脉动, 易造成载流管路振动而危害管网安全, 需设置合适的比例增益。

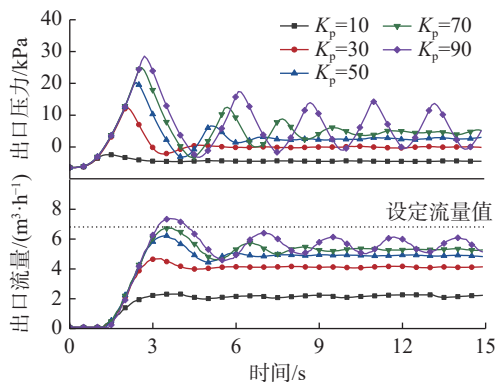


图 7 离心泵出口流量与压力对照图

由综合试验结果可得, 针对离心泵流量控制中比例系数的整定应更多考虑流量调节过程中稳定性的影响, 选用较低比例系数也能有效减小稳态误差, 满足流量控制的快速响应, 具有理想的上升时间, 且能明显改善系统的超调与缩短稳态时间并减少泵出口管道压力脉动。

2.2 积分控制下离心泵流量调节特性

测试不同 K_i 参数下的比例积分控制环节效果如图 8 和图 9 所示。具有相同的比例增益时, 积分增益提升使流量调节初始上升阶段的峰值提高, 超调量上升, 并在积分环节的作用下使流量向设定值攀升或下降, 其速率与 K_i 值正相关, 最终调节流量达到设定值, 做到无差控制。另外, 较纯比例控制, 积分控制的加入并不会改变原有的流量控制曲线波动的振幅与间隔, 且流量调节的稳态时间受比例系数影响, 在相同的积分增益下, 比例增益提高使得超调量与稳态时间上升。

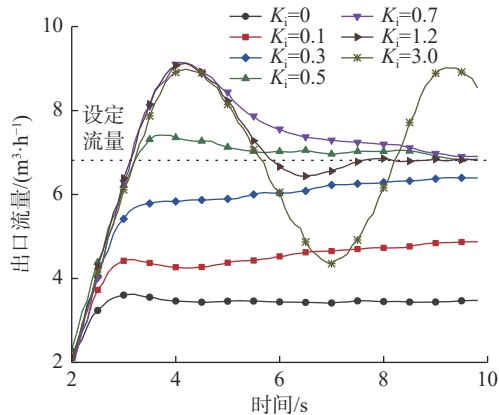


图 8 $K_p=20$ 下各积分参数控制曲线

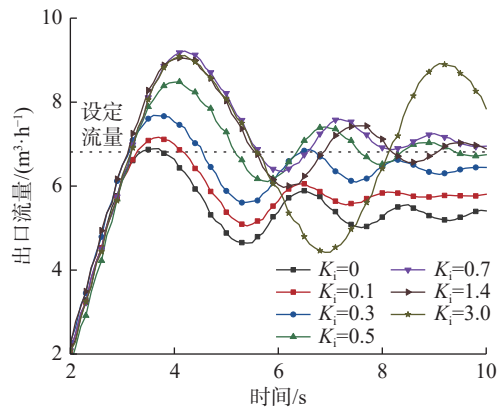


图 9 $K_p=70$ 下各积分参数控制曲线

不同 K_i 值下离心泵流量调节初始上升阶段峰值如图 10 所示。当 K_i 值上升至 0.7 后, 流量调节初始峰值与超调量上升并稳定于 $9.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 与 33.50%。调节流量超出设定值后, 偏差反向, 但由于上升

阶段内过大的正向积分积累值影响,产生积分饱和,控制量需要一定时间脱离饱和区,从而引起流量的大幅超调,积分增益越大所需脱离饱和区的时间越长,表现为流量超调量的增加。当 K_i 值到达0.7后继续提升,因变频电机输出限制,流量调节初始峰值与超调量增长均至最大值无法提升,而后出口流量值逐渐回落。

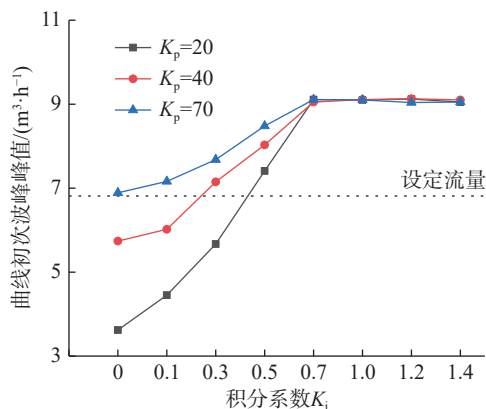


图10 不同积分增益下流量初次波峰峰值

不同 K_i 值下流量控制收敛时间如图11所示。若 K_i 值偏小,初始流量达不到目标,流量控制需较长时间积分累计,才能消除稳态误差,上升逼近设定目标;若 K_i 值过大,初始流量超过目标,造成较大超调,同样需要一定时间完成下降回落。当 K_i 值取0.1~1.4时,随 K_i 值提升,流量向设定值攀升或下降速率增长,表现为控制稳态时间的缩短。而 K_i 值为0.5时稳态时间骤降,是由于在设定流量下,存在相应范围内的系数使得离心泵的流量调节经初始上升阶段后在目标值附近波动,流量值无明显攀升与下降过程,能快速稳定。当 K_p 值取20, K_i 值取0.5时,超调量较小仅为8.82%,波动完成时间约为稳态时间即7.4 s,无稳态误差,具有理想控制效果。 K_i 值到达1.4后继续提升,稳态时间反而上升,是由于此时积分

增益过大,导致相位裕度过低,控制稳定性大幅下降,导致流量控制振荡加剧,阻碍流量调节稳定。 K_i 值到达3后,流量控制出现剧烈波动,控制曲线等幅度振荡,泵电机出现启停现象。

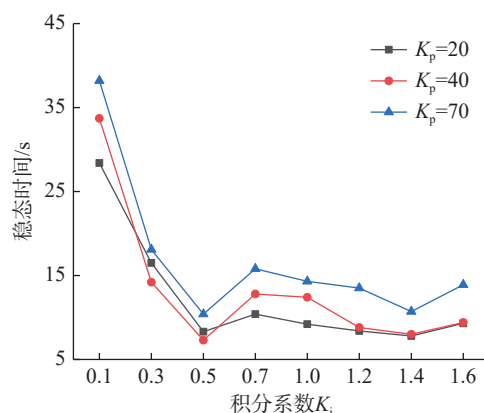


图11 不同积分增益下流量控制收敛时间

综合试验结果可得,在离心泵流量调节中,选用合适的积分增益可消除稳态误差并改善稳态时间。在设定流量下,存在相应的积分系数使得离心泵的流量调节经初始上升阶段后正处于目标值附近波动并快速稳定,具有最优的控制效果。当流量调节超调量达到上限时,继续提升积分系数可缩短稳态时间,直至过大积分增益下流量调节出现波动,阻碍控制稳定。且在相同积分增益下,选用较低比例系数能完成无差控制并具有更加理想的动态性能,与上述结论一致。

2.3 微分控制下离心泵流量调节特性

基于已有比例积分控制环节上添加微分控制,不同 K_d 值下离心泵流量调节特性如图12所示。不同微分增益下离心泵流量调节在初始上升阶段没有明显差异,原因是变频电机的转速增速在比例积分增益下已达到上限,微分环节对流量上升阶段超调的超前抑制作用微弱。上升阶段后的动态过程中,微分控制并没有明显改善流量在调节过程中的波动。

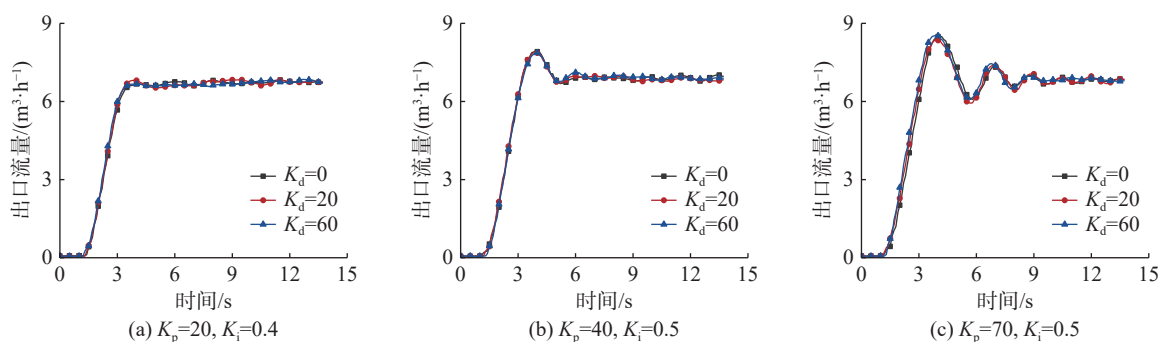


图12 不同 K_d 值下离心泵流量控制曲线

参考文献

3 结束语

本文搭建了离心泵流量调节性能试验台, 试验得出 PID 控制下变频离心泵出口流量调节在比例环节、积分环节与微分环节的具体表现及流量控制的 5 个特性:

1) 离心泵流量控制传递滞后主要受出口管长影响, 流量控制失稳振荡直观表现为泵电机的启停, 且带来泵出口管道压力大幅脉动;

2) 由于变频器升限保护, 比例系数的提高并不会缩短控制初期流量调节上升时间, 反而会增加控制超调量, 延长稳态时间;

3) 离心泵流量调节过程中的积分饱和作用存在上限, 测试中超调量增长至 33.50% 后不再提升, 此时继续提升 K_i 值可缩短稳态时间, 直至 K_i 值过大流量控制稳定性受影响;

4) 对于设定流量目标, 存在相应的积分系数使得离心泵的流量调节经初始上升阶段后正处于目标值附近波动并快速稳定, 此处 K_i 值为 0.5 时, 超调量为 8.82%, 稳态时间达到 7.4 s, 无稳态误差, 具有最优动态性能;

5) 微分环节对流量上升阶段超调的超前抑制作用微弱, 且没有明显改善流量在调节过程中的波动。

得出针对 PID 控制下变频离心泵流量控制调参策略如下: 降低 K_p 值至纯比例控制下流量调节平稳无波动; 从 0 逐步提高 K_i 值, 直到达到微小超调, 流量控制经初始上升阶段后位于设定值附近; 不考虑微分增益影响, K_d 值取 0。本试验中取得最优 K_p 值为 20、 K_i 值为 0.5、 K_d 值为 0、超调量为 8.82%、稳态时间为 7.4 s, 能做到无差控制, 在测试中具有最佳控制效果。

- [1] 何勇冠. 超低比转速自平衡多级离心泵水力优化与结构分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [2] 丛小青, 肖建荣, 李辉, 等. 高速离心泵水动性能多目标优化设计[J]. 流体机械, 2022, 50(12): 27-34.
- [3] 聂建英, 于洋, 罗雄麟. 离心泵变频控制对流量控制性能的影响分析[J]. 化工自动化及仪表, 2013, 40(4): 485-489.
- [4] 彭俊超. 离心泵的流量控制方法浅析[J]. 中国西部科技, 2012, 11(4): 47-48.
- [5] 徐旺盛, 管洁, 陈洪岩. 离心泵变频控制对流量控制性能的影响分析[J]. 中国高新技术企业, 2015(5): 85-86.
- [6] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166-172.
- [7] 李浩, 马新华, 施卫东, 等. 自适应模糊 PID 控制在水泵试验台流量调节中的应用[J]. 水电能源科学, 2011, 29(9): 147-149.
- [8] 刘汉忠, 俞鹏. 模糊 PID 自适应控制在微型齿轮泵恒流控制系统中的应用[J]. 流体机械, 2018, 46(12): 50-53.
- [9] 侯培国, 姚海兰, 邢耀双, 等. 基于 MSP430 和模糊 PID 油田注水流量控制系统[J]. 仪表技术与传感器, 2011(4): 103-106.
- [10] 高礼科, 倪福生, 蒋爽. 基于模糊 PID 控制器的旋流泵调速控制[J]. 自动化与仪表, 2020, 35(12): 72-76.
- [11] 谭平, 熊瑞平, 霍开子, 等. 模糊 PID 控制的液驱平流泵仿真[J]. 液压与气动, 2022, 46(7): 136-142.
- [12] 冯山. 模糊 PID 在离心泵恒流量控制中的应用[J]. 长江大学学报, 2017, 14(17): 60-65.
- [13] 杨佩琦, 张颖, 文凯, 等. 模糊 PID 控制在汽车发动机冷却水泵系统中的应用[J]. 机电工程技术, 2020, 49(12): 120-122.
- [14] 吴宏鑫, 沈少萍. PID 控制的应用与理论依据[J]. 控制工程, 2003(1): 37-42.

编辑 葛晋