

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.005

陈红, 嵇阳, 唐立模, 等. 基于PID参数自整定的河工模型尾门控制[J]. 水利水运工程学报, 2018(1): 27-31. (CHEN Hong, Ji Yang, TANG Limo, et al. Research on tailgate control of river model based on PID parameter by self-tuning[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(1): 27-31. (in Chinese))

基于PID参数自整定的河工模型尾门控制

陈 红¹, 嵇 阳², 唐立模¹, 吴严君¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 理学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 设计了尾门自动控制系统, 运用水位仪实时采集尾门水位数据, 反馈调节电机转速驱动翻板门, 实现水位控制。采用PID模型作为电机转速控制器, 测试了固定PID参数条件下, 系统在平原河流和山区河流河工模型中水位控制效果, 山区河流水位最大控制偏差达到1.3 mm, 无法满足规范要求。针对该问题运用产生式学习方法总结了尾门控制中PID参数调节规则, 构建了以水位跟踪偏差、水位涨落速度、涨落预期及跟踪相位为关键要素的知识库, 确立了12条控制策略。尾门控制时根据实测数据与知识库规则自主选择对应控制策略, 实现PID参数的自整定。工程实践表明, 基于PID参数自整定的尾门控制系统水位控制最大偏差为0.5 mm。

关 键 词: 河工模型; 尾门控制; PID控制; 自整定

中图分类号: TV83

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2018)01-0027-05

河工模型试验中尾门控制用于调节模型边界流态与原型流态的相似, 是开展模型试验的必备过程。非恒定流试验中需要实时调整尾门确保边界水位过程与天然相似。然而, 人工尾门调节方式难以满足水位控制精度及连续性试验要求, 因而, 逐渐发展了尾门的自动控制系统。杨铁笙等^[1-3]运用微机控制技术开发了河工模型尾门控制系统, 虞邦义等^[4]研发了差动式尾门控制系统, 实现了对尾门的自动控制。水位变化比较复杂时, 常规尾门控制系统控制精度难以满足规范要求。大量研究者引入PID等控制模型提高尾门控制系统的响应速度及控制精度。蔡辉等^[5-6]根据水位变化特点, 利用PID优化控制过程, 提高了尾门水位控制系统的动态特性; 李俊敏^[7]运用伺服电机和推拉式尾门, 采用PID调节算法, 结合拉格朗日插值方法, 实现了尾门水位的自动控制。杜剑锋等^[8]采用分时PID控制, 试验初始阶段停止PID控制, 模型水位接近目标水位后再自动转入PID控制, 解决了长江防洪模型目标水位降幅较大时尾门超调难题; 然而, 该控制方法针对特定模型, 通用性能差。李晓飏等^[9]运用模糊控制改进了水工模型尾门控制器, 通过模糊控制器判断水位偏差分别选取比例或比例积分控制, 提高了水位控制精度。

上述应用表明, PID控制模型有利于提高尾门控制精度, 但难以解决水位速涨速落等复杂控制中超调或滞调等难题。虽然PID控制是最经典的反馈控制模型, 具有很好的适应性和鲁棒性, 但其控制效果与参数设置密切相关。常规尾门控制系统在试验过程中PID参数保持不变, 降低了尾门控制系统的适应性, 无法满足规范要求。自动控制领域内, 通过模式识别判别控制偏差, 实时整定PID参数, 其控制效果明显更优^[10-13]。因此, 本文根据非恒定流试验过程中目标水位、水位跟踪偏差、水位预期变化趋势等特征, 实时整定PID参数, 提高控制系统动态响应特性, 实现水位速涨速落等复杂情况的精确控制。

收稿日期: 2017-03-16

基金项目: 重大科学仪器设备开发专项(2011YQ070055); 国家自然科学基金资助项目(51309083, 51404331)

作者简介: 陈 红(1981—), 男, 重庆人, 高级实验师, 博士, 主要从事流体测试技术、图像处理技术等研究。

E-mail: 496443687@qq.com

1 尾门控制系统设计

常用尾门型式有翻板门和推拉门,推拉门存在止水困难、出流不稳、易受杂物阻挡等缺点,而翻板门具有动作灵活、出流稳定等优点。因此,选取翻板门作为尾门控制系统水位调节装置。系统主要包括水位仪、翻板门、电机、控制器和计算机(如图 1 所示),计算机设定控制器参数,调节电机转速和方向,驱动翻板门变化,实现尾门水位的控制。

水位仪实时测量水位 $H_1(t)$,与目标水位 $H_0(t)$ 对比,得到水位偏差 $e_H(t)$:

$$e_H(t) = H_1(t) - H_0(t) \quad (1)$$

水位偏差大于设定阈值,电机动作,重复迭代完成目标水位跟踪控制。电机转速 PID 控制模型为:

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

k_p, T_i, T_d 分别为比例、积分、微分系数, $e(t)$ 为转速偏差,通过改变 k_p, T_i, T_d 数值,控制电机运动速度和方向。 k_p 较大提高电机转速,使翻板门快速动作加快水位调节,但过大 k_p 易导致尾门水位出现超调和滞后。 T_i 可消除系统累计偏差,促进系统逼近目标输出。 T_d 根据偏差变化趋势产生超前控制,具有预见性。

2 PID 参数整定

2.1 固定 PID 参数试验

PID 参数主要通过理论计算、经验凑试或试验确定,实际中难以用数学模型或传递函数准确描述时,多采用经验凑试或试验确定,遵循“先比例、再积分、后微分”原则。以平原河流河工模型为例,控制目标水位变化较平缓(图 2),尾门控制选用 PI 控制模型,经验凑试 k_p 为 1.3, T_i 为 3 s,尾门水位控制效果如图 2 所示,最大跟踪误差小于 1 mm。

山区河流洪水过程中水位速涨速落,图 3 是某山区河流洪水过程水位监测曲线,其中从 45.5 至 53.5 h, 8 h 内水位涨幅达 2.55 m。

固定 PID 参数,尾门水位控制出现较大偏差(如图 4 所示),增大 k_p ,尾门水位出现超调;反之,又出现滞后。固定参数模式下,水位跟踪最大偏差达到 1.3 mm,超出了规范要求。

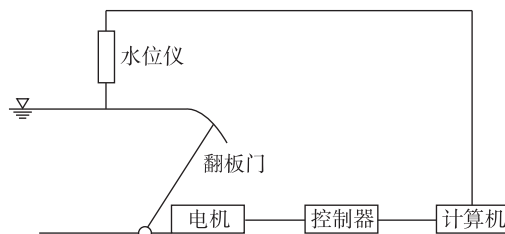


图 1 尾门控制系统结构

Fig. 1 Structure of the tailgate control system

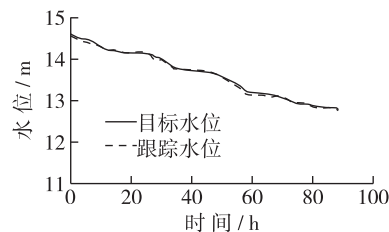


图 2 水位跟踪过程

Fig. 2 Water level tracking process

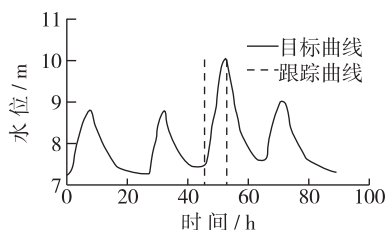


图 3 山区河流水位变化过程

Fig. 3 Hydrograph of water level changing in mountain rivers

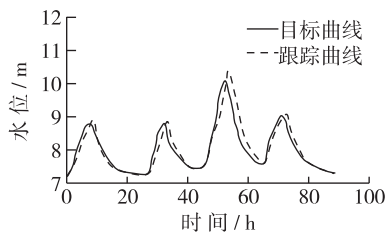


图 4 常规 PID 参数整定跟踪过程

Fig. 4 Process of tracking PID parameters self-tuning conventionally

2.2 PID 自整定

PID 参数应与水位跟踪偏差、水位涨落速度、涨落预期以及跟踪相位等特征密切相关,根据实际控制经验运用产生式表示法总结尾门水位控制知识,形成专家知识库。产生式知识表示法是 1943 年 E.Post 根据串替规则提出的一种计算模型,其中每一条规则称为一个产生式。产生式用于表示因果关系知识,其基本形式为:IF a THEN b。a 为前提,b 为结论。

水位调节过程中,需要以水位跟踪偏差、水位涨落速度、涨落预期以及跟踪相位作为条件,调节电机动作。主要知识可表示为:

- 知识 1, IF 模型水位涨速大于原型水位涨速, THEN 减小 k_p ;
- 知识 2, IF 模型水位涨速小于原型水位涨速, THEN 增大 k_p ;
- 知识 3, IF 模型水位涨速等于原型水位涨速, THEN k_p 不变;
- 知识 4, IF 模型水位降速大于原型水位涨速, THEN 减小 k_p ;
- 知识 5, IF 模型水位降速小于原型水位涨速, THEN 增大 k_p ;
- 知识 6, IF 模型水位降速等于原型水位涨速, THEN k_p 不变;
- 知识 7, IF 模型水位预期上涨幅度超过原型水位, THEN 减小 T_1 ;
- 知识 8, IF 模型水位预期上涨幅度小于原型水位, THEN 增大 T_1 ;
- 知识 9, IF 模型水位预期上涨幅度等于原型水位, THEN T_1 不变;
- 知识 10, IF 模型水位跟踪相位滞后, THEN 增大 T_D ;
- 知识 11, IF 模型水位跟踪相位超前, THEN 减小 T_D ;
- 知识 12, IF 模型水位跟踪相位相等, THEN T_D 不变。

尾门控制中,实时监测水位涨落速度、涨落趋势以及目标相位,对比知识库,做出相应调节。实时水位 $H_s(t)$ 与目标水位 $H_m(t)$ 的偏差 $\Delta H(t)$:

$$\Delta H(t) = H_s(t) - H_m(t) \quad (3)$$

设实时水位 $H_s(t)$ 与目标水位 $H_m(t)$ 的变化率分别为 $H'(t)$ 和 $H'_m(t)$, 则

$$H'(t) = H_s(t) - H_s(t-1) \quad (4)$$

$$H'_m(t) = H_m(t) - H_m(t-1) \quad (5)$$

按照当前 PID 参数进行控制,水位理论上升时间为 t_{Hm} , 实际已上升时间为 t_s , 则水位还将上升时间 Δt 为:

$$\Delta t = t_{Hm} - t_s \quad (6)$$

设迭代因子 σ : $\sigma = \Delta t H'(t) / \Delta H(t)$ (7)

根据专家知识库,尾门控制策略为: $\sigma < 1$, 则增大 k_p 和 T_D ; $\sigma = 1$, k_p 和 T_D 不变; $\sigma > 1$, 减小 k_p 和 T_D ; $H'(t) > H'_m(t)$, 减小 T_1 ; $H'(t) < H'_m(t)$, 增大 T_1 ; $H'(t) = H'_m(t)$, T_1 不变; 接近水位最高点或最低点时, 提前停止电机动作, 依靠水位上升或下降惯性实现水位跟踪。 k_p, T_1, T_D 具体调节幅度依据实际现场调节经验确定。图 5 为 PID 参数自整定模式下水位控制过程, 控制最大偏差仅为 0.05 mm, 相对于固定 PID 参数控制系统, 自整定系统控制精度及动态响应性能大幅提高。

3 结 语

尾门自动控制对于非恒定流试验顺利开展至关重要, 虽然 PID 控制器能够优化尾门控制性能, 但仍然难以满足水位速涨速落等复杂条件下水位跟踪控制需求。为提高复杂条件下翻板门控制精度, 以山区河流

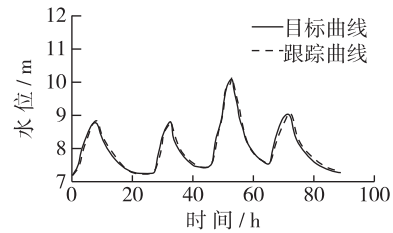


图 5 专家系统 PID 参数整定跟踪过程

Fig. 5 Process of tracking PID parameters by self-tuning with expert system

洪水过程为例。首先,运用固定 PID 参数模式实施了尾门控制,试验结果为水位控制最大偏差达到 1.3 mm,超出了规范要求。然后,运用产生式学习法总结尾门控制系统 PID 参数调节规则,构建以水位跟踪偏差、水位涨落速度、涨落预期以及跟踪相位为关键要素的知识库,确立了 12 条控制策略,尾门控制时根据实测数据与知识库规则自主选择对应控制策略,实现 PID 参数的自整定。PID 参数自整定大幅降低了水位控制偏差,同样山区河流水位控制,水位跟踪最大偏差仅为 0.5 mm,尾门控制精度大幅提高。

本文仅讨论了单一尾门控制情况,多个尾门控制存在水位调整滞后,PID 参数自整定方法及实施方案还有待改进完善。同时,非恒定流控制包括上边界流量控制,试验效果还需要考虑上边界流量控制精度。

参 考 文 献:

- [1] 杨铁笙,安凤玲,詹秀玲. 模型尾门水位控制方法研究[J]. 泥沙研究, 1993(1): 21-29. (YANG Tiesheng, AN Fengling, ZHAN Xiuling. On the method for control of tailgate water level of a hydraulic model[J]. Journal of Sediment Research, 1993(1): 21-29. (in Chinese))
- [2] 王昕,蔡守允,张河. 河工模型试验计算机测控系统[J]. 水利水电技术, 2003, 34(5): 57-59. (WANG Xin, CAI Shouyun, ZHANG He. Computer control and measurement system for hydraulic model test[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(5): 57-59. (in Chinese))
- [3] 贺昌海,雷川华,周小平,等. 模型试验流量与水位自动控制系统研制[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(3): 72-74. (HE Changhai, LEI Chuanhua, ZHOU Xiaoping, et al. Research and development of automatic control system of discharge and water-level in model-testing[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(3): 72-74. (in Chinese))
- [4] 虞邦义,马浩,俞国青. 差动式尾水调节系统数学模型[J]. 泥沙研究, 2005(1): 21-25. (YU Bangyi, MA Hao, YU Guoqing. Mathematic model for difference-type tail-water measuring and controlling system[J]. Journal of Sediment Research, 2005(1): 21-25. (in Chinese))
- [5] 蔡辉,马洪蛟,孙典红,等. 水工模型水位的自动控制优化算法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(5): 95-97. (CAI Hui, MA Hongjiao, SUN Dianhong, et al. Optimized algorithm for automatic control of water level in hydraulic model experiments[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2002, 30(5): 95-97. (in Chinese))
- [6] 苏杭丽,马洪蛟,张东生,等. 复合模型系统的控制策略[J]. 海洋工程, 2002, 20(2): 96-99. (SU Hangli, MA Hongjiao, ZHANG Dongsheng, et al. Control strategies of hybrid model system[J]. The Ocean Engineering, 2002, 20(2): 96-99. (in Chinese))
- [7] 李俊敏. 河工模型尾门水位控制系统的设计与研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(5): 135-138. (LI Junmin. Design and research of tail gate control system for river model experiment[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(5): 135-138. (in Chinese))
- [8] 杜剑锋,马志敏,范北林. 河工模型试验目标水位突降时尾门水位的控制[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(4): 131-134. (DU Jianfeng, MA Zhimin, FAN Beilin. A method of controlling water level at tail gate when target water level drops sharply in river model experiment[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(4): 131-134. (in Chinese))
- [9] 李晓飏,赵国昌,汪拥赤. P-FUZZY-PI 控制器在水工模型水位控制系统中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(4): 341-343. (LI Xiaobiao, ZHAO Guochang, WANG Yongchi. Application of P-FUZZY-PI controller in water level control system of hydraulic model experiments[J]. Computer Measurement and Control, 2005, 13(4): 341-343. (in Chinese))
- [10] HANG C C, ASTROM K J, HO W K. Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula[J]. Control Theory and Applications, 1991, 140: 143-162.
- [11] 孟祥泉. PID 参数自整定方法研究与控制器研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2010. (MENG Xiangquan. Research on the methods of PID parameters self-tuning and development of the controller[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [12] HE S Z, TAN S H, XU F L, et al. Fuzzy self-tuning of PID controllers[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 56(1): 37-46.
- [13] 张永浩. 模糊 PID 自整定控制器的仿真研究[J]. 航海工程, 2005(5): 1-4. (ZHANG Yonghao. The simulation study of PID-controllers with fuzzy self-adjusting parameter[J]. Ship and Ocean Engineering, 2005(5): 1-4. (in Chinese))

Research on tailgate control of river model based on PID parameter by self-tuning

CHEN Hong¹, JI Yang², TANG Limo¹, WU Yanjun¹

(1. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;*

2. *College of Science, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The tailgate automatic control system is designed, and the water level data of the tailgate is collected in real-time by water level meter, setting the flap door in motion by the motor speed of feedback regulation for realizing water level control. Using the PID model as the motor speed controller, the water level control effect in the physical models for alluvial rivers and mountain rivers under the conditions of the fixed PID parameter is tested. The maximum deviation of the water levels in the mountain rivers reaches 1.3 mm, which can not meet the requirements of the specification. For this problem, the rule of adjusting PID parameters in controlling the tailgate by using the production learning method summarized, and a knowledge base with the water level of tracking error, level fluctuation velocity, expected fluctuation and tracking phase as the key elements is established with 12 control strategies. According to the measured data and the knowledge base rules, the corresponding control strategy is chosen independently to realize the by self-tuning of PID parameters when the tailgate is controlled. The practical application results show that the maximum deviation in controlling the water level by the tailgate control system based on PID parameters self-tuning is 0.5 mm.

Key words: physical model; tailgate control; proportional integral derivative (PID) control; self-tuning