

串联渠系PID改进积分与微分环节仿真研究

黄凯^{1,2}, 管光华¹, 刘大志¹, 莫振宁¹

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;

2. 贵州省水利水电勘测设计研究院, 贵阳 55000)

摘要:渠道系统自动化运行是提高明渠输水系统水资源利用效率的有效途径,其基本思路是通过节制闸的实时调节维持渠道内的水位、流量在一定的目标状态。经典PID控制算法在应用到渠道控制中存在微分环节极易引起超调甚至系统失稳的问题,因而实际渠系控制器多采用比例积分环节(PI),其缺点是响应缓慢。为了提高渠系控制的响应速度、减小系统调节动作量,在PID算法的积分环节中引入启动阈值,并采用惯性环节串联补偿微分环节。采用ASCE的标准渠道测试算例进行建模仿真,计算结果表明改进算法在传统PID算法的基础上降低系统超调、减少闸门的调节量;在PI算法的基础上提高系统响应速度。

关键词: PID算法; 非恒定流; 自动控制; 渠系运行

中图分类号: TV133

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.02.001

黄凯,管光华,刘大志,等. 串联渠系PID改进积分与微分环节仿真研究[J]. 灌溉排水学报,2017,36(2):1-11.

0 引言

渠道系统自动化控制是灌区管理信息化、自动化的重要标志。渠系自动化提高了渠道运行调度的水平,改善水的输送效率,提高水资源利用率。目前,国内外灌区及调水工程大都为人工控制,水资源利用率较低、反应缓慢、需要大量操作人员,实现渠系自动化控制是解决上述问题的有效途径。

渠系自动化的核心是控制算法,其描述了从输入渠系信息(水位、流量)到输出控制作用(闸门运动)的整个逻辑过程^[1]。渠道自动化最早起源于法国科学家研制的用于实现渠道自动运行的水力自动闸门。由于计算机及传感器技术的发展,20世纪美国垦务局提出了小人算法、科文算法、ELFLO算法等,提高了渠道控制的精度,同时也对后期控制算法的发展产生了极大影响。国内外渠道控制算法主要可分为3个阶段:经典控制算法阶段、现代控制算法阶段和智能控制算法阶段。经典控制算法阶段主要以传递函数为基础,单输入单输出的线性定常系统。此阶段主要成果为PID类算法,主要包括P、PI、PID、PIF等经典反馈控制算法, Van Overloop等^[2]采用多模型优化方法进行PI控制器的参数整定可得到较优的控制效果。现代控制算法阶段以状态空间为基础,研究多变量系统。此阶段, Malaterre^[3]研究了渠道线性二次最优控制算法,开发了相应的状态观测器; Clemmens等^[4]基于ID模型和LQR原理设计最优下游反馈控制器和耦合水位差控制器; 管光华等^[5]将耦合水位差控制应用于CAP工程,验证了耦合水位差控制模式的优势。尚毅梓等^[6]等基于线性二次型(LQR)指标,加入预测模块提出了扰动可预知模型的构造方法。智能控制算法阶段以人的思维方式为基础研究复杂控制系统。此阶段 Litrico^[7]基于内模模型开发了一种鲁棒控制算法,用于法国 Gimone河项目研究; 管光华等^[8]研究了鲁棒控制算法线性矩阵不等式设计方法; 周美林等^[9]建立了双目标优化配水模型,并应用改进遗传算法进行求解。韩延成等^[10]推导了RBF人工神经网络整定PID输水控制算法。当前仍有大量基于智能控制理论和状态空间模型的控制算法问世,如预测模型算法、自适应算法及神经网络等,但其仍然处于研究阶段。

收稿日期:2015-12-07

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51439006)

作者简介:黄凯(1991-),男,贵州人。硕士研究生,主要从事灌排自动化研究。E-mail: hkwhu@foxmail.com

通信作者:管光华(1979-),男,江苏阜宁人。副教授,硕士生导师,主要从事灌排自动化及量水理论研究。E-mail: GGH@whu.edu.cn

渠道控制算法中,PID控制算法因简单方便而应用最广。PID控制算法中的微分环节主要作用是提高系统的响应速度,减小控制延迟,但是其对干扰较为敏感,容易造成超调过大、系统失稳等问题。因而,现阶段渠道控制器基本都是使用没有引入微分环节的PI控制器,而PID控制器应用较少。兹主要对PID微分及积分环节进行改进研究,在积分环节引入阈值,在微分环节加入惯性量,改善其对于干扰的敏感性,提高PID算法的控制性能,并进行仿真分析。

1 渠道运行控制系统模型

1.1 渠系控制目标

输水渠道中一般以2个节制闸之间的渠段作为1个渠池。渠系运行的方式主要有下游常水位、上游常水位、等容积法以及控制容积法^[1]。文中主要采用下游常水位的运行方式,因而此控制系统模型以渠池下游水深不变作为控制目标,即支点位于渠池下游端。当渠道流量发生变化时,渠道水面线将绕着此支点转动,从而形成不同稳定流水面线间的楔形蓄水体。

图1中 y_d 为节制闸下游目标水位; $Q_{\max}$ 为渠道能流过的最大流量,其所对应的线为最大流量下的水面线; Q_0 为渠道流量为0时的水面线。

1.2 控制系统模型

渠道控制系统主要由控制模块、流量计算模块以及水位计算模块组成(图2),3个模块相互作用。在计算机仿真过程中,需要将整个系统离散化,故选取1个采样时间,而这个采样时间同时也是水位计算模块中解圣维南方程组的时间间隔。在整个仿真过程中,控制模块是核心部分,其以水位的偏差和偏差变化率作为输入,以闸门的开度增量作为输出。

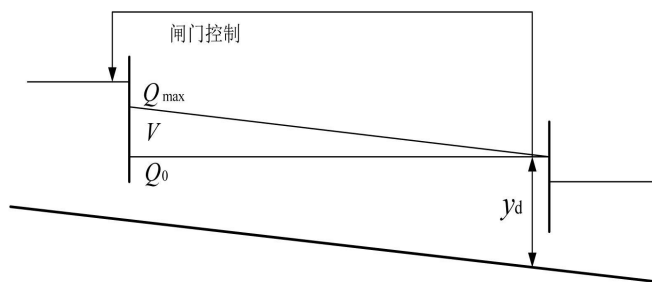


图1 下游常水位运行方式

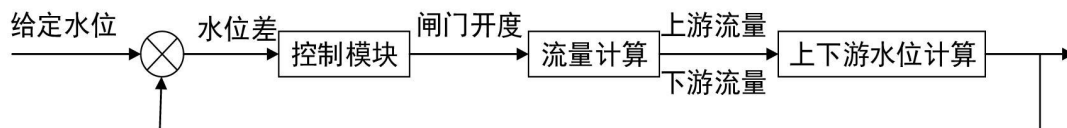


图2 渠系控制模型流程图

1.3 节制闸模型

节制闸模型主要是节制闸过闸流量计算模块,其通过节制闸二边水位差以确定过闸流量。此过闸流量不仅是水位计算模块的边界条件,控制目标(下游水位不变)也是通过改变过闸流量来实现的,因而节制闸模型中流量的精确计算对于最终的控制效果而言是很重要的。在计算机仿真中,采用美国中亚利桑那调水工程(CAP)运行控制模型的弧形闸门过闸流量计算公式^[12],该公式包含了流速水头与静水头,适用于弧形闸门的自由出流和淹没出流的情况,其过闸流量计算公式如下:

$$Q = C_d a b \sqrt{2g(y_u - y_d) + \frac{Q^2}{A_u^2}}, \quad (1)$$

式中: C_d 为流量系数; a 为闸门开度(m); b 为闸门宽度(m); y_u 、 y_d 分别为闸门上、下游水深(m); Q 为过闸流量(m^3/s); A_u 为闸门上游过水断面面积(m^2); g 为重力加速度(m/s^2)。流量系数 C_d 的数值根据水流状态的不同有一定的变化,在实际使用中需通过水力试验或现场测试确定。美国ASCE协会于2002年成立了专门的渠道闸门流量量测委员会,研究闸门测流及其流量系数的率定,Clemmens等^[13]在能量方程和动量方程的基础上,通过迭代计算的方法对弧形闸门的流量系数进行了校正。

1.4 非恒定流模型

河、渠中过水断面上的水力要素如流量、平均流速及水位等均随时间不断变化的流动均称为明渠非恒定流。渠道运行过程中,闸门在开启与关闭时的水流、水波明显是非恒定缓流,且输水渠道大多是规则的

棱柱型明渠,其断面沿程变化较小。因此,采用一维圣维南方程组^[14]来描述渠池的水流特性。

1) 连续方程

$$B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = q, \quad (2)$$

2) 动量方程

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial s} + \left(1 - \frac{BQ^2}{gA^3}\right) \frac{\partial z}{\partial s} = \frac{q}{gA} (v_{qs} - v) + \frac{BQ^2}{gA^3} (i + M) - \frac{Q^2}{A^2 C^2 R}, \quad (3)$$

式中: B 为水面宽(m); Z 为水位(m); t 为时间(s); Q 为流量(m^3/s); s 为断面的距离坐标(m); q 为区间入流量($\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$); g 为重力加速度(m/s^2); A 为过水断面面积(m^2); V 为水流沿轴线方向的流速(m/s); V_{qs} 为侧向入流在水流方向的平均流速(m/s), 常忽略不计; C 为谢才系数; R 为水力半径(m); i 为渠道底坡; M 为明渠单宽、定深(常深)、断面沿程的放宽率, $M = \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial s}|_h$, 对于棱柱型明槽, 可令 $M=0$ 或 $\frac{\partial A}{\partial s}|_h = 0$ 。在仿真过程中, 采用四点加权 Preissmann 隐式差分^[15]格式离散并求解。

2 控制算法的改进

2.1 PID 控制器

在渠系控制中, 下游常水位控制方式是以下游闸门处水位作为控制量, 控制目标是要保证下游节制闸处水位恒定, 其水位值 $c(t)$ 与目标值 $r(t)$ 的偏差作为 PID 控制器^[19]的输入:

$$e(t) = r(t) - c(t). \quad (4)$$

将偏差的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量, 其标准方程为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_d}{dt} \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (5)$$

式中: K_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

在 PID 控制器中, 比例环节主要是用于减小水位偏差, 积分环节主要是用于减小闸门处的水位控制的稳态误差, 提高系统控制的准确性, 微分环节主要反映水位偏差的变化趋势, 并在其偏差急剧增加前引入一个早期的修正量, 从而加快闸门的控制动作、减小调节时间。

由于计算机控制系统需要将控制方程进行离散化。选取一个采样时间 T 将其标准方程离散化, 以和式代替积分, 以增量代替微分可得:

$$\begin{cases} t \approx kT \\ \int_0^t e(t) dt \approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e(j) \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \end{cases}, \quad (6)$$

即可得离散的 PID 方程为:

$$u(t) = K_p e(k) + K_i T \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)], \quad (7)$$

式中: k 为采样序号, $k=0, 1, 2, \dots$; $u(k)$ 为第 k 次采样时刻的控制器输出值, 为闸门开度的增量; $e(k)$ 为第 k 次采样时刻输入的偏差值, 为第 k 次采样时刻的水位差; K_i 为积分系数, $K_i = K_p T / T_i$; K_d 为微分系数, $K_d = K_p T_d$ 。

2.2 PID 算法改进

2.2.1 积分环节

常规 PID 控制器引入积分环节是为了消除渠系水位残差, 提高控制精度。但是在控制器的启动或大幅增减目标水位时, 短时间内系统会输出较大的偏差, 造成 PID 运算的积分环节累计输出量较大, 致使输出的控制量可能会大于闸门的最大动作速度, 进而产生较大的超调和系统振荡。现采用人为设定阈值 $\varepsilon > 0$ 来解决上述问题, 以提高控制性能。

当 $e(k) > \varepsilon$ 时, 即偏差 $e(k)$ 较大, 则采用 PD 控制, 关闭积分环节的输出, 这样既能使系统避免较大的超

调,又能使系统较快响应。

当 $e(k) \leq \varepsilon$ 时,即偏差 $e(k)$ 较小,采用 PID 控制,启动积分环节输出,则可保证控制精度,消除水位稳态误差。

具体在积分环节引入系数 β ,当 $e(k) > \varepsilon$ 时,取 $\beta = 0$;当 $e(k) \leq \varepsilon$ 时,取 $\beta = 1$,则可实现上述算法改进。

2.2.2 微分环节

尽管 PID 控制中引入的微分环节能够有效地反映系统的水位偏差变化速率、加快闸门的控制动作、改善渠系系统的动态性能,但是微分环节的引入也使系统对于渠系控制中存在的干扰较为敏感。渠系中有较小扰动(如闸门突然的开闭)就可能会使系统出现超调过大,甚至失稳等现象。

针对 PID 控制的这一缺陷,现在微分阶段引入一个惯性环节(低通滤波器):

$$G_f(s) = 1/(1 + T_f s) \quad (8)$$

式(5)写成传递函数为:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \quad (9)$$

则微分阶段引入惯性环节后可得其传递函数为:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + T_f s} \right) = U_p(s) + U_i(s) + U_d(s) \quad (10)$$

显然,式(7)中可以得出比例环节输出 $U_p(s)$ 与积分环节的输出 $U_i(s)$ 和普通的 PID 控制一样,而微分环节的输出 $U_d(s)$ 则不一样。

$$U_d(s) = \frac{K_p T_d s}{1 + T_f s} E(s) \quad (11)$$

式(11)写成微分方程为:

$$u_d(t) + T_f \frac{du_d(t)}{dt} = K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (12)$$

式(12)以采样时间 T 离散化可得:

$$u_d(k) + T_f \frac{u_d(k) - u_d(k-1)}{T} = K_p T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (13)$$

整理得微分环节输出为:

$$u_d(k) = \frac{T_f}{T_f + T} u_d(k-1) + \frac{K_p T_d T}{T_f + T} [e(k) - e(k-1)] \quad (14)$$

将式(14)带入式(7)的离散方程,可得改进后的 PID 离散方程为:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_f}{T_f + T} u_d(k-1) + \frac{K_p T_d T}{T_f + T} [e(k) - e(k-1)] \quad (15)$$

式中: u_d 为微分环节的输出量;令 $\alpha = T_f / (T_f + T)$,则可得 $1 - \alpha = T / (T_f + T)$ (仿真计算时,取 $\alpha = 0.5$),即有:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_{j=0}^k e(j) + \alpha u_d(k-1) + K_p (1 - \alpha) [e(k) - e(k-1)] \quad (16)$$

从上述公式可以看出,尽管经过改进后的方程更为复杂,但是因为惯性环节的加入,有效克服了其对干扰的敏感性太高的不足,从而极大地提高了控制性能,后面的仿真计算也验证了这一点。

3 仿真分析

采用 20 世纪 90 年代美国 ASCE 渠系自动化委员会拟定的 2 条标准测试渠道(ASCE Canal 1 和 ASCE Canal 2)中的 Canal 2 进行仿真建模^[16],以测试所提出的 PID 改进方法是否有效。此渠道是基于美国加利福尼亚康宁运河上游部分渠段所拟定的,是渠系自动化新算法常用的测试渠道。此测试渠道主要由八段渠池组成,渠道底坡为 0.000 1,糙率为 0.02,设计流量为 12 m³/s,渠道每段渠池下游均设置有取水口(表 1)。

使用武汉大学开发的输水渠道系统运行仿真与控制软件 V1.0 中的程序包^[17]进行仿真计算,取初始流量为 4 m³/s,初始取水口流量均为 0 m³/s,仿真总时长为 48 h,仿真工况如图 3 所示。

表1 仿真渠池参数表

编号	长度/m	底宽/m	糙率 n	边坡	底坡
1	7 000	7	0.02	2	0.000 1
2	3 000	7	0.02	2	0.000 1
3	3 000	7	0.02	2	0.000 1
4	4 000	6	0.02	2	0.000 1
5	4 000	6	0.02	2	0.000 1
6	3 000	5	0.02	2	0.000 1
7	2 000	5	0.02	2	0.000 1
8	2 000	5	0.02	2	0.000 1

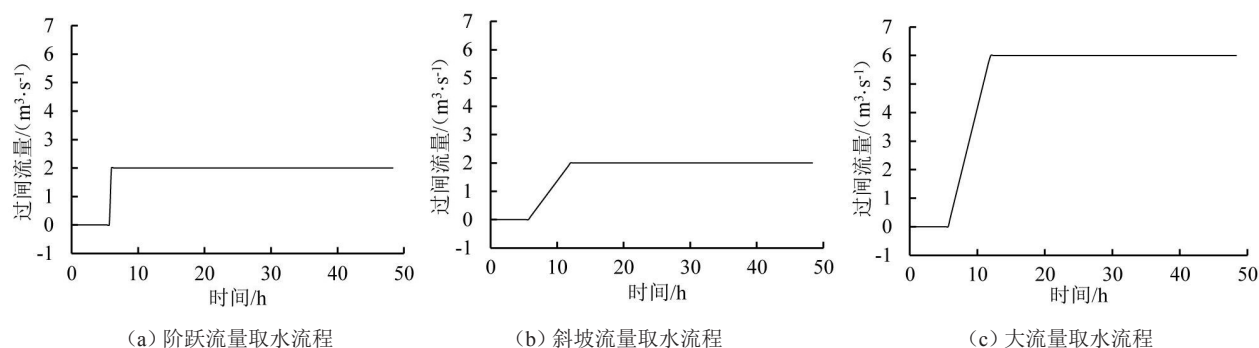


图3 3种工况的取水流程

1) 在仿真进行到6 h时,人为设置第8渠段的取水 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量阶跃,用以测试改进算法对于阶跃干扰信的响应。

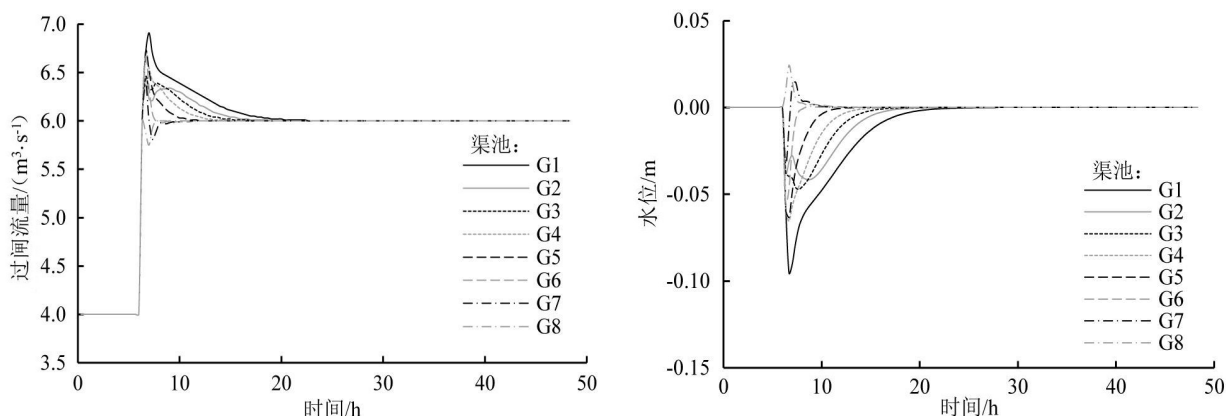
2) 仿真在6 h,人为设置第8渠段取水口开始取水,取水流量从零不断增加,到12 h时流量为 $2 \text{ m}^3/\text{s}$,以后一直维持不变。用以测试算法对斜坡信号的响应。

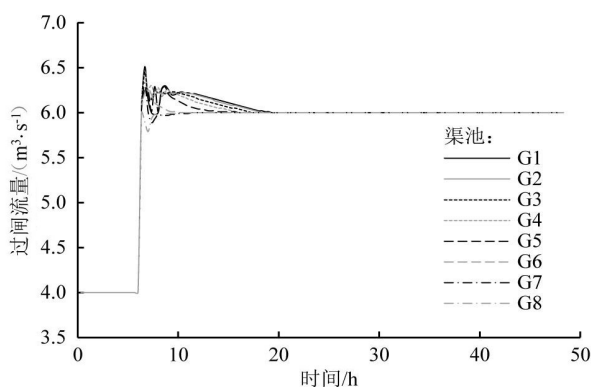
3) 仿真在6 h,人为设置第8渠段取水口开始取水,取水流量从零不断增加,到12 h时流量为 $6 \text{ m}^3/\text{s}$,以后一直维持不变。用以测试算法对大流量工况下的响应。

为了更加深入地了解积分改进与微分改进分别的效果,现先采用阶跃流量工况,分别在只有积分或只有微分改进时进行仿真计算。

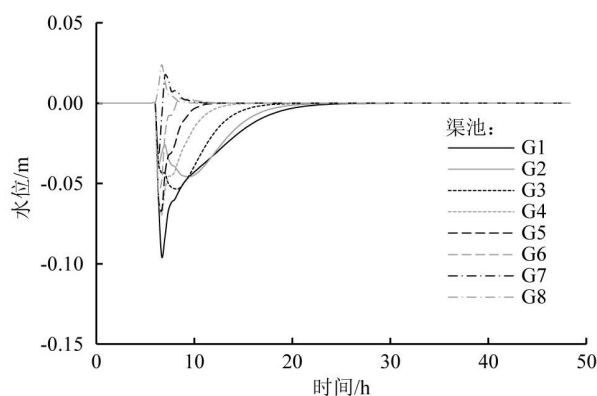
3.1 积分改进仿真计算

积分环节的改进计算取 $\varepsilon = 0.05 \text{ (m)}$,在积分环节改进仿真计算中,为了能够达到与微分环节的对比,关闭微分的改进与输出。即在仿真时只打开积分的改进,并与常规的PID仿真计算对比仿真结果。仿真计算结果如图4所示。





(c) 积分改进仿真渠池 1~8 流量过程线



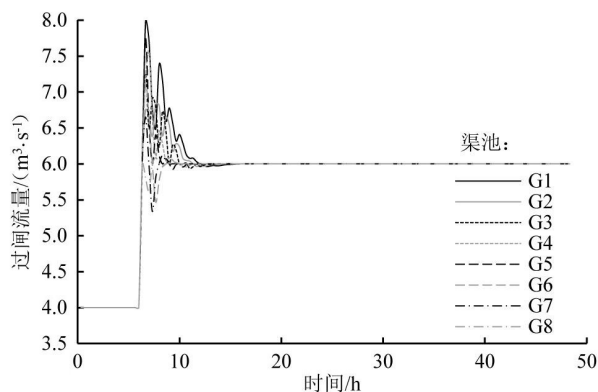
(d) 积分改进仿真渠池 1~8 水位偏差

图4 常规PID与积分改进仿真计算结果

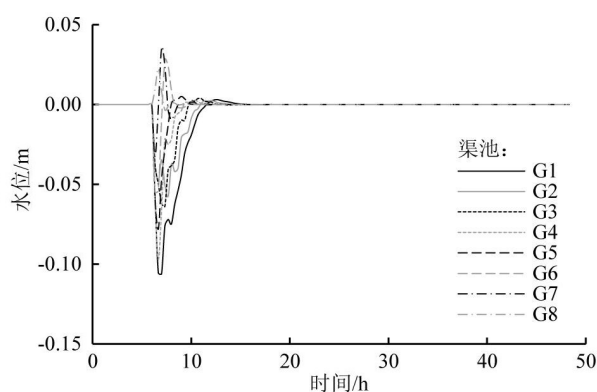
由图4可以看出,在6~9 h左右,渠池中水位偏差大于0.05 m,此时由于积分算法的改进环节,关闭积分环节的输出,可以从流量结果图中反映出来,其流量的超调得到了有效地降低。在9 h以后水位偏差小于0.05 m,此时积分环节介入,可以消除残差,提高控制的稳态精度,使得水位与流量最终稳定在目标值附近。其中常规PID的最大超调为6.9 m³/s,超调量接近45%;积分改进算法的最大超调为6.5 m³/s,超调量为25%,即最大超调减小0.4 m³/s,约为20%。据此可以得出,改进算法有效抑制了系统在启动或大幅增减目标水位时所引起的较大超调。

3.2 微分改进仿真计算

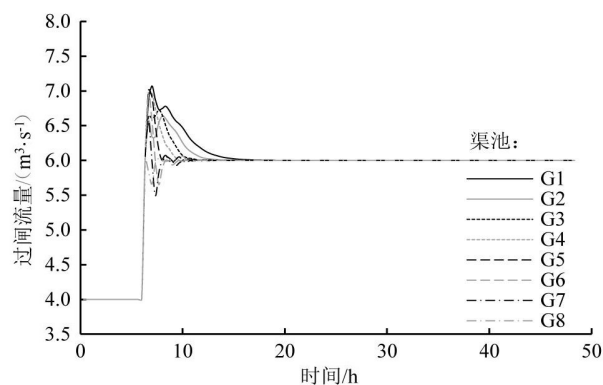
为了能够区分积分与微分的改进效果,在此只改进微分环节,采用阶跃流量工况进行计算仿真,为了能够单独分析微分环节改进的效果,又要消除系统产生的残差,仿真时减小积分环节输出,用以分析仅有微分环节改进时控制器的性能指标,其仿真计算结果如图5所示。



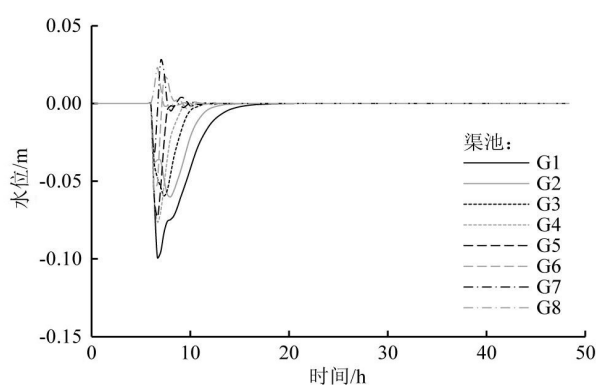
(a) 常规PID仿真渠池 1~8 流量过程线



(b) 常规PID仿真渠池 1~8 水位偏差



(c) 微分改进仿真渠池 1~8 流量过程线



(d) 微分改进仿真渠池 1~8 水位偏差

图5 常规PID与微分改进仿真计算结果

根据仿真结果可以得到,常规PID的流量超调接近8 m³/s,超调量接近100%,由于一般情况下绝对稳定的系统在现实中是不存在的,渠道仿真中流量波动低于5%时认为系统进入了稳定状态(下同),故由图5可

得,常规PID稳定时间为11 h,而微分改进以后,超调为7 m³/s,超调量接近50%,稳定时间为13 h,因此可以得出对于本算例,微分环节的改进使控制器在有较大干扰时,其超调减小了1 m³/s,减小百分比为50%,有效减小了控制器由于微分环节引起的振荡。但是从算法的改进可以看出,在微分部分引入惯性环节,其相当于在流量发生突变时引入衰减量,使此时控制器的输出发生衰减,从而减小流量突变时的系统超调,并把衰减部分按一定比例加在后面时段的控制器输出上,所以微分改进算法的稳定时间会长于常规PID算法。

3.3 微分-积分改进仿真计算

在分别了解了积分与微分环节改进算法的控制效果以后,组合2种改进算法,采用改进算法控制器、常规PID与PI控制器3种控制器,在3种工况下进行对比仿真,以研究最终改进控制算法的控制性能。仿真结果如图6所示。

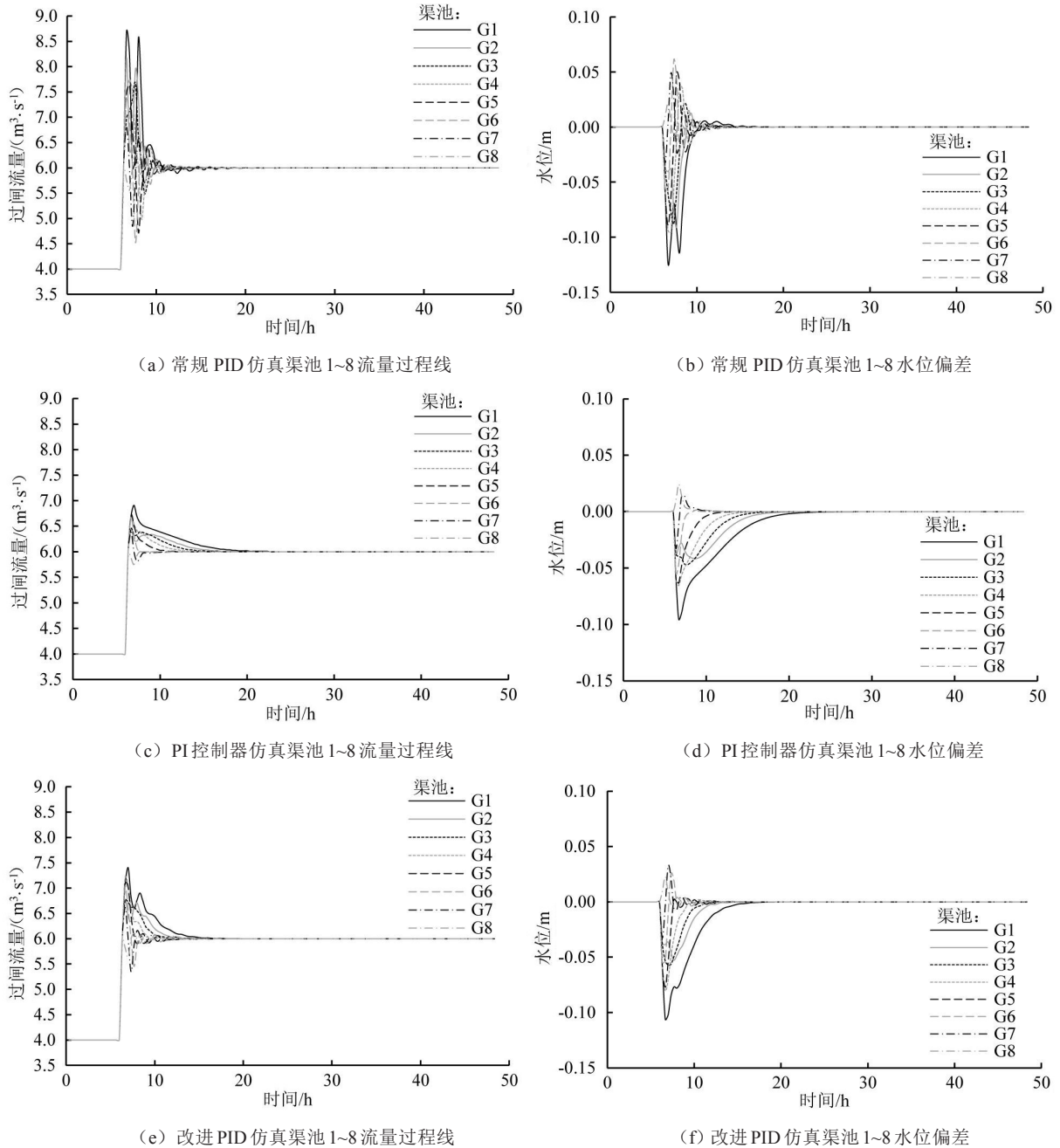


图6 阶跃流量下PID、PI与改进PID仿真计算结果

由图6可以得出,在阶跃流量工况下,PID控制器超调为8.7 m³/s,稳定时间为11.3 h,PI控制器超调为6.9 m³/s,稳定时间为15.3 h,改进算法控制器超调为7.4 m³/s,稳定时间为12.3 h。据此可以看出,在阶跃流量工况下,由于系统干扰突变较大,致使常规PID超调较大,此时渠道中容易产生漫顶的可能,而PI控制

器由于没有微分环节,其超调较小,但是正因为其没有微分环节,故系统稳定时间也相对较长。而改进算法控制器由于引入了积分与微分的改进,其超调在较大程度上得以减小,同时稳定时间也有很大程度的提升。因此,可以得出改进算法的抗干扰性能更好。

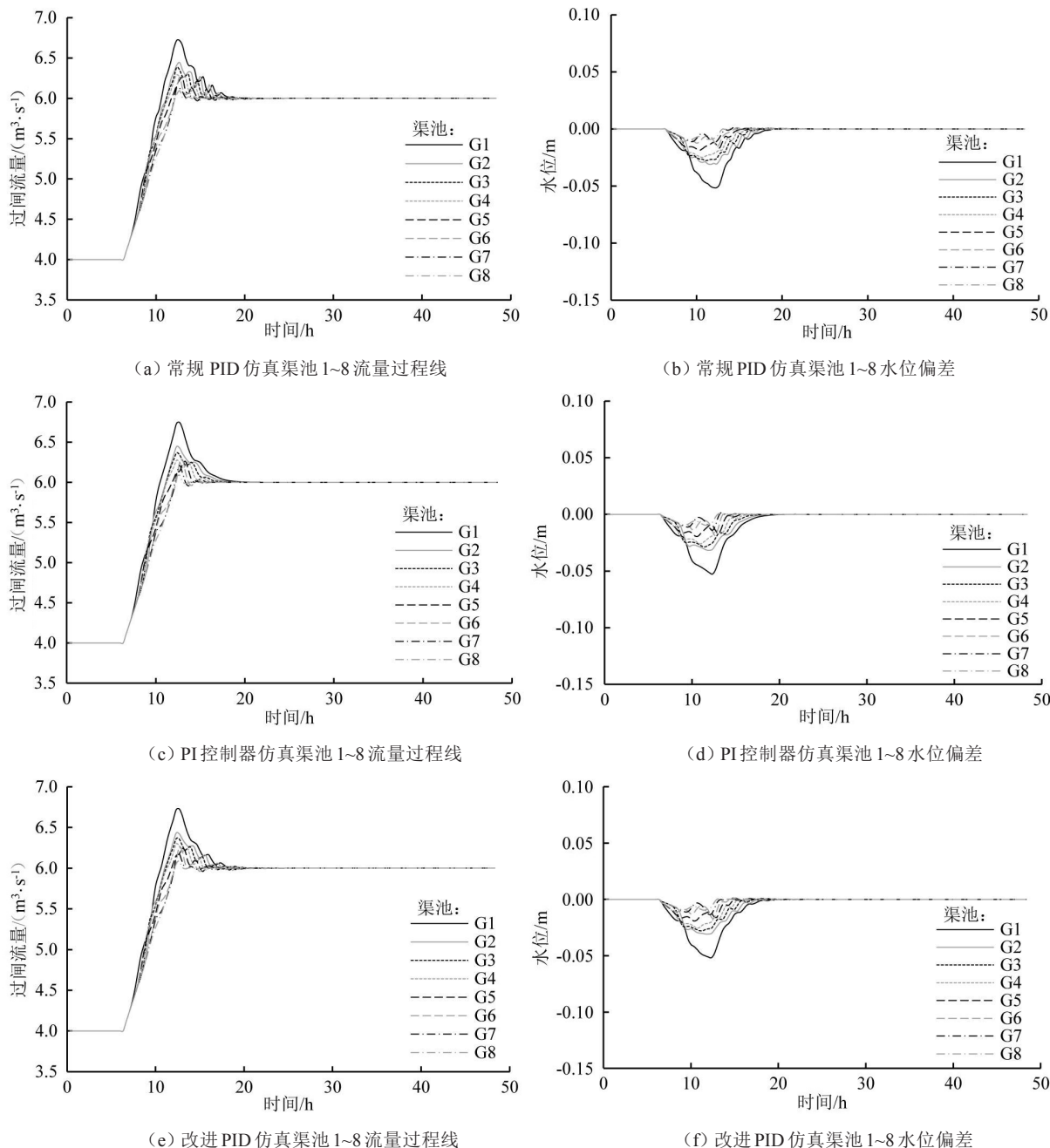


图7 斜坡流量下PID、PI与改进PID仿真计算结果

由图7可以得出,在斜坡流量工况下,PID控制器、PI控制器,改进算法控制器超调均为 $6.7 \text{ m}^3/\text{s}$,稳定时间均为 16.3 h ,即3种控制器的控制效果几乎一样,产生此结果的原因主要是在斜坡流量的情况下,系统的瞬时变化较小,即干扰较小,水位的波动也较小,此情况下对于3种算法的输出几乎是相等的,可以得到算法对于干扰敏感性的改进在干扰较小时效果并不明显。

由图8可以得出,在大流量工况下,PID控制器超调为 $13.1 \text{ m}^3/\text{s}$,稳定时间为 15.6 h ,PI控制器超调为 $12 \text{ m}^3/\text{s}$,稳定时间为 22.3 h ,改进算法控制器超调为 $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$,稳定时间为 19.6 h 。这是因为在大流量工况下,尽管其是斜坡信号,但是由于渠道中流量变化较大,系统干扰突变较大,致使常规PID超调较大,系统容易失稳;而PI控制器由于没有微分环节,其超调较小,系统的稳定时间也相对较长。改进算法控制器由于引入了积分与微分的改进,其超调得到了较大程度上的减小,同时稳定时间也有很大程度的提升,可以得到改进算法的控制性能在干扰较大时优于其他2种算法。

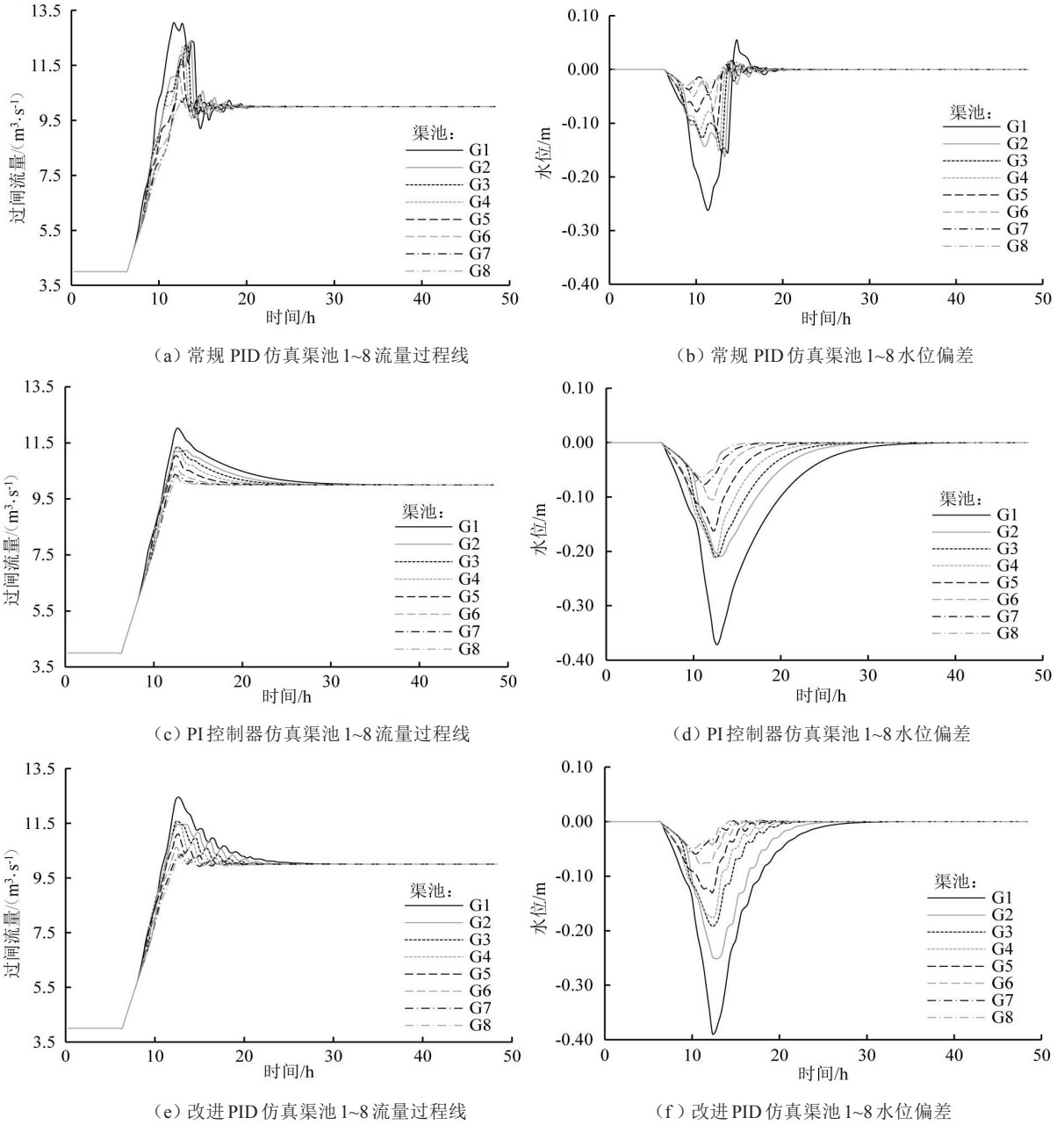


图 8 大流量下 PID、PI 与改进 PID 仿真计算结果

在上述仿真结果的基础上,采用稳定时间、最大超调、 $IAE(\%)$ 和 $IAQ(m^3/s)$ 等 4 个控制器性能指标对 3 种控制器的控制效果进行对比。其中绝对误差值积分指标计算公式为:

$$I_{IAE} = \frac{\Delta t}{(t_2 - t_1)} \sum_{t=t_1}^{t_2} |y_t - y_{target}|, \quad (17)$$

式中: Δt 为控制时间步长,通常为定值; t_1 为流量变化起始时刻; t_2 为系统恢复稳态时刻; $t_2 - t_1$ 也可取为测试时间步长(通常为 12 h 或 24 h)。该指标本质上是一个积分指标,指示着水位偏离设置点的时间长短,其代表了系统在过渡过程中水位误差的积累,该值越小表示系统越快稳定。

综合绝对流量变化值 I_{IAQ} :

$$I_{IAQ} = \sum_{t=t_1}^{t_2} (|Q_t - Q_{t-1}|) - |Q_{t_1} - Q_{t_2}|, \quad (18)$$

式中: Q_t 为 t 时刻闸门流量; t_1 、 t_2 分别为初始、结束时刻;相应地, Q_{t_1} 、 Q_{t_2} 分别代表了初始流量和末流量。该指标其实代表了控制动作需要的闸门动作量,最小值为 0。其值越小表示闸门动作越小,系统越稳定。据上述仿真成果得性能指标对比如表 2 所示。

表2 控制器性能指标对比

性能指标		稳定时间/h	最大超调/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$IAE/\%$	$IAQ/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
阶跃流量	PID	11.3	8.7	0.833	9.7
	PI	15.3	6.9	1.667	2.9
	改进PID	12.3	7.4	0.982	3.8
斜坡流量	PID	16.3	6.7	1.262	1.5
	PI	16.3	6.7	1.263	1.5
	改进PID	16.3	6.7	1.262	1.5
大流量	PID	15.6	13.1	2.793	10.4
	PI	22.3	12.0	4.595	3.3
	改进PID	19.6	12.5	3.829	5.6

选取阶跃流量工况与大流量工况数据,用雷达图的形式输出(图9),以便直观地对3种控制器性能指标及优劣性能进行对比,而斜坡流量工况下由于其流量变化较小,故3种控制器的输出结果基本一致。

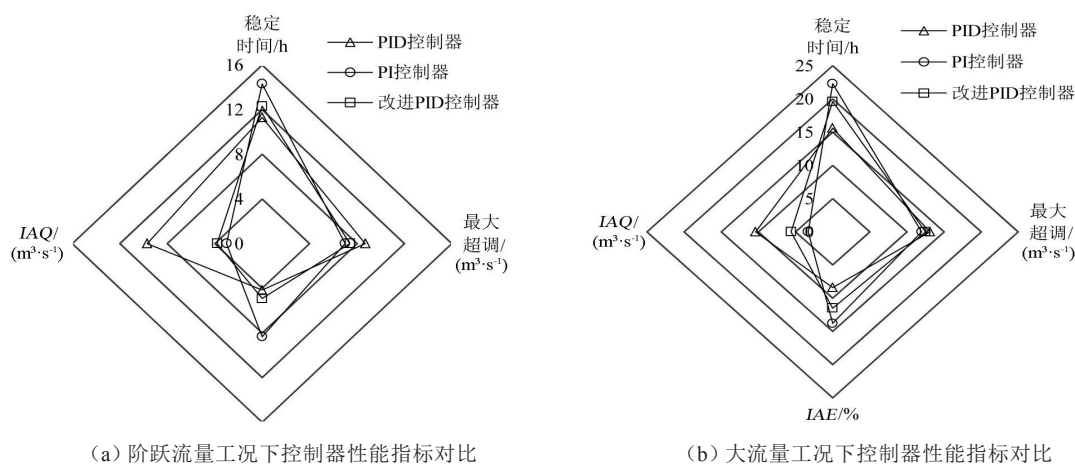


图9 阶跃流量与大流量工况控制器性能指标对比

由图9可以看出,改进PID控制器在性能雷达图中所包围的面积最小,改进PID在稳定时间与 IAE 指标上不如常规PID,却显著优于PI控制器;在最大超调与 IAQ 指标上不如PI控制器,却明显优于常规PID控制器。另外阶跃流量工况下改进PID控制器在4个性能上均能接近较小值,说明其综合了PI控制器与PID控制器优点,同时说明其有较强抗阶跃干扰的能力;大流量工况下能够得到同样的结果。故改进PID控制效果综合了PI与PID的优点,其在引入积分与微分环节改进后的对于突变干扰的敏感性有明显的降低,从而使渠系在有干扰时,超调较小,不易失稳。而PI控制器由于没有微分环节,其超调更小,稳定时间也更长。大流量下,3种算法的规律和阶跃流量相一致,原因是大流量下水位偏差变化率较大。改进后的控制算法要比常规PID控制算法的稳定时间长,这是因为在微分环节中引入的惯性环节相当于在微分输出上加了一个逐渐衰减量,使PID控制器的微分输出按一定比例分配在更长的时间里。这样既能够使渠系系统较为稳定,又保证了其输出控制动作的精度与速度。计算结果表明改进算法在传统PID算法的基础上减小系统超调、减少闸门的调节量,相较于PI算法又提高了响应速度。对于渠系这种需要稳定性较高的系统来说,此算法更为合适。

4 结论

在渠道自动控制理论的基础上,对常规PID算法进行改进,在微分阶段加上惯性环节,改善了PID微分对干扰较敏感的特性,在积分环节引入阈值以减小偏差较大阶段的超调,提高了控制性能。改进算法较适用于渠道控制系统。

1)改进算法对于阶跃流量变化有显著的衰减抑制作用,其抗干扰性能较强,此算法较适用于需要稳定性强的系统。

2)改进算法的敏感性降低的同时,稳定时间也相应增加,即常规PID比改进算法更快达到稳定。因而对于需要控制器响应较快的系统,此算法不优于常规PID算法。

3)PI控制器虽然稳定时间较长,但是在控制器参数设置适当的情况下,渠池中水位波动较小,其控制效果较好。

参考文献:

- [1] 崔巍,陈文学,穆祥鹏,等.明渠运行控制算法研究综述[J].南水北调与水利科技,2009,7(6):113-122.
- [2] VAN-OVERLOOP P J, SCHUURMANS J, BROUWER R, et al. Multiple-model optimization of proportional integral controllers on canals [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(2): 190-196.
- [3] MALATERRE P-O. Linear quadratic optimal controller for irrigation canals [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1998, 124 (4):187-194.
- [4] CLEMMENS A J. Water-level difference controller for main canals [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2011, 138(1): 1-8.
- [5] GUAN G H, CLEMMENS A J, KACEREK T F, et al. Applying water-level difference control to central Arizona project [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2011, 137(12): 747-753.
- [6] 尚毅梓,吴保生,李铁键,等.渠道分水扰动可预知算法设计与仿真[J].水科学进展,2011,22(2):242-248.
- [7] LITRICO X. Robust flow control of single input multiple outputs regulated rivers [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2001, 127 (5): 281-286.
- [8] 管光华,王长德,范杰,等.鲁棒控制在多渠段自动控制的应用[J].水利学报,2005,36 (11):1 379-1 384.
- [9] 周美林,吕宏兴,韩文霆,等.渠系配水优化模型和多目标遗传算法研究[J].中国农村水利水电,2014(9):5-7.
- [10] 韩延成,高学平.基于RBF人工神经网络的下游常水位自适应渠道输水控制研究[J].西北农林科技大学学报,2007,35(8):202-206.
- [11] 美国内务部垦务局.现代灌区自动化管理实用手册[M].庞进武,高占义译.北京:中国水利电力出版社,2003: 35-40.
- [12] WILLIAM W-G Y, ALBERT L G, DOUGLAS T. Central Arizona Project: Operation Model [J]. Journal of the Water Resources Planning and Management Division, 1980, 106(2):521-540.
- [13] CLEMMENS A J, STRELKOFF T S, REPOGL J A. Calibration of Submerged Radial Gates [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,129 (9): 680-687.
- [14] 徐正凡.水力学[M].下册.北京:高等教育出版社,1986: 320-334.
- [15] 陶永华,尹怡欣.新型PID控制及其应用[M].北京:机械工业出版社,1998: 1-17.
- [16] CLEMMENS A. J., KACEREK T. F. Test Cases for Canal Control Algorithms [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1998, 124 (1): 23-30.
- [17] 武汉大学.输水渠道系统运行仿真与控制软件V1.0[P].中国:2011SR034392,2011-06-03.

Simulation for PID Controller of Modified Integral and Differential on Tandem Canal System

HUANG Kai^{1,2}, GUAN Guanghua¹, LIU Dazhi¹, MO Zhenning¹

(1.State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2.Guizhou Survey and Design Research Institute for Water Resources and Hydropower, Guiyang 550002, China)

Abstract: Automatic operation is an effective way to improve the utilization efficiency of water resource on canal system. The basic idea is to maintain channels of water level and flow rate in a certain target state through real-time adjustment of the gate. Differential link of classic PID control algorithm easily leads to excessive overshoot and even system instability, therefore PI controller without differential stage is commonly used in canal system. In order to improve the system response speed and reduce regulating action, starting threshold in the stage of the integral, with inertial factor for differential stage to improve the classic PID algorithm was introduced. Simulation was carried out for standard test cases from ASCE. Results showed that the modified algorithm could reduce the over shoot and decrease the adjustment of gate compared with traditional PID algorithm, and improve the system's response speed in contrast to PI algorithm.

Key words: PID algorithm; unsteady flow; automatic control; canal operation

责任编辑:赵宇龙