

DOI: CNKI: 32-1309/P. 20110313. 2241. 023

渠道分水扰动可预知算法设计与仿真

尚毅梓, 吴保生, 李铁键, 王光谦

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 维持控制点水位稳定是保证输水渠道安全有效运行的前提。以控制点水位偏差为主要抑制因子, 基于线性二次型(LQR)指标, 构建了渠道系统水位偏差、偏差变率和流量控制的全状态空间模型, 将加入预测模块的线性二次型算法在渠道系统的全状态空间中进行分析和综合, 提出了扰动可预知模型的构造方法。通过脉冲响应测试来加深对算法结构的理解, 使用南水北调中线电子渠道平台对算法有效性进行验证, 验证结果表明, 该算法在渠道运行工况改变后, 仍能够维持渠道的稳定运行, 算法设计极具潜在的应用价值。

关键词: 渠道运行控制; 南水北调中线工程; 预测算法; 电子渠道

中图分类号: TV135.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)02-0242-07

南水北调中线工程总干渠自动控制和运行安全是南水北调中线工程的重大课题。中线工程有其自身的特点, 如中线工程全线依靠自流水, 可利用水头小, 输水距离长、分水变化大, 沿线缺乏调蓄水库等^[1]。工程实践表明, 干渠水位的微小变化都会引起分水流量的较大变动, 直接影响到水量分配的公平和效率。此外, 干渠水位快速下降或上升还会破坏渠道衬砌, 进而危及到渠道的安全运行^[2]。所谓渠道的运行控制, 就是指“当渠道运行工况改变后, 运行控制系统通过自适应性调节来维护渠道安全, 确保改变带给渠道的负面影响最小。”实际上, 渠道是通过控制有限个点的水位来确保整个渠道系统的高效、安全运行, 这些点通常被称为渠道运行控制点, 维持控制点水位稳定是渠道安全运行的首要条件。国外已有研究多针对灌溉渠道, 这些渠道输水距离短、运行要求相对简单^[3,4]。根据中线工程的固有特点, 建立适合的控制系统模型, 尚未有固定蓝本可以遵循。为直观展现调控下的复杂水流特征, 清华大学开发出“南水北调中线工程电子渠道”^[5]。方神光等^[6]分析比较了渠道在同步控制和顺序控制两种控制方式下, 下游节制闸前水位的波动变化, 认为必须对现有渠道调控方式进行改进才可以维持控制点水位稳定。史哲等^[7]进一步探讨了运行控制方式的实现方式。

本文在以往研究基础上, 将分水变化造成的干渠水位变化作为系统扰动, 以控制点水位波动为主要的抑制因子, 提出将改进后的预测算法加入到线性二次型优化模块中来, 设计出扰动可预知优化调度模块。设计有效性在南水北调中线电子渠道上得到了验证。

1 数学模型

1.1 控制方程及数值方法

中线输水渠道平均底坡为 1/25 000, 属于缓坡渠道, 并认为受节制闸启闭或分水口流量变化影响的渠道水流流态为非恒定渐变流, 其流动特性可用圣维南方程表述。

收稿日期: 2010-06-04; 网络出版时间: 2011-03-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110313.2241.023.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2007CB714100)

作者简介: 尚毅梓(1983-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。

E-mail: syz05@mails.tsinghua.edu.cn

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2 \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \frac{\partial A}{\partial x} - g \left(\theta - \frac{\partial Z}{\partial x} \right) A + \frac{1}{AR^{4/3}} \frac{Qgn^2}{AR^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

式中 B 为水面宽度; z 为水位; t 为时间; Q 为流量; x 为沿程距离; q_1 为单位长度上的旁侧入流或出流; A 为过水断面面积; g 为重力加速度; R 为水力半径; n 为糙率。

采用上、下游守恒的 Pressimann 四点差分隐格式对圣维南方程组进行离散化处理, 将其转化为一维差分方程组^[8]:

$$A_{11}\delta Q_j^+ + A_{12}\delta z_j^+ + A_{13}\delta Q_{j+1}^+ + A_{14}\delta z_{j+1}^+ = A'_{11}\delta Q_j + A'_{12}\delta z_j + A'_{13}\delta Q_{j+1} + A'_{14}\delta z_{j+1} + C_1 \quad (3)$$

$$A_{21}\delta Q_j^+ + A_{22}\delta z_j^+ + A_{23}\delta Q_{j+1}^+ + A_{24}\delta z_{j+1}^+ = A'_{21}\delta Q_j + A'_{22}\delta z_j + A'_{23}\delta Q_{j+1} + A'_{24}\delta z_{j+1} + C_2 \quad (4)$$

式(3)和式(4)分别对应圣维南方程组中的连续方程式(1)和运动方程式(2)。式中, $A_{11}, A_{21}, \dots, A'_{14}, A'_{24}$ 分别为连续方程和运行方程系数; $\delta Q_j^+, \delta z_j^+$ 表示节点 j 处的流量、水位在时层 $n+1$ 的增量; $\delta Q_j, \delta z_j$ 表示节点 j 处的流量、水位在时层 n 的增量; 在稳定状态下, 离散后的常数项 C_1 和 C_2 都为零。

1.2 闸门内边界处理

节制闸是一维计算模型的内边界, 设节点 j 和 $j+1$ 分别为节制闸闸前和闸后节点。根据水流质量守恒和闸门出流公式可知:

$$Q_j = Q_{j+1} = Q_g, Q_g = C_d b u \sqrt{\Delta h} \quad (5)$$

式中 Q_g 为过闸流量; C_d 为闸孔流量系数; u 为闸门开度; b 闸孔宽度。

设渠道稳态工作点为 e , 将闸门出流公式表达为以此工作点的值为基准的增量形式, 并将与时层 $i+1$ 有关项写在方程式右边, 与时层 $i+2$ 有关项写在方程式左边。

$$-\left(\frac{\partial f}{\partial z_j}\right)_e \delta z_j^+ + \delta Q_{j+1}^+ - \left(\frac{\partial f}{\partial z_{j+1}}\right)_e \delta z_{j+1}^+ = -\left(\frac{\partial f}{\partial z_j}\right)_e \delta z_j + \delta Q_{j+1} - \left(\frac{\partial f}{\partial z_{j+1}}\right)_e \delta z_{j+1} + \left(\frac{\partial f}{\partial u}\right)_e \delta u \quad (6)$$

1.3 分水口和倒虹吸等

渠道分水作为系统扰动存在, 设节点 j 和 $j+1$ 分别为分水口前和后两个节点, Q_p 为分水口分水流量, 则节点 j 和 $j+1$ 间水位、流量关系为

$$Q_j - Q_p = Q_{j+1}, z_j = z_{j+1} \quad (7)$$

将式(7)分别代入式(3)和式(4)可得分水口节点的差分方程组。类似地, 渡槽、隧洞和暗渠, 通常为多孔并联设计, 可将其与总干渠结合位置看做汉点, 汉点水位、流量关系与分水口处理类似^[9]。渠道运行过程中的倒虹吸处于满流状态, 为有压输水。为模型简便实用计, 不考虑倒虹吸内部水流运动情况, 将倒虹吸过水能力按有压管道公式进行单独计算^[10]。

可以看出, 除节制闸节点只有一个连续方程外, 其余节点都是一个节点对应两个方程。闸门边界项的引入增加了模型转换矩阵的稀疏性。为减少计算存储空间, 方便分析, 略去增量描述符号 δ , 将处理后的方程组写成紧凑矩阵形式。若记状态向量

$$\delta \mathbf{x}(k) = [\delta Q_j \quad \delta z_j \quad \delta Q_{j+1} \quad \delta z_{j+1} \quad \delta z_{j+2}]^T, \delta \mathbf{x}(k+1) = [\delta Q_j^+ \quad \delta z_j^+ \quad \delta Q_{j+1}^+ \quad \delta z_{j+1}^+ \quad \delta z_{j+2}^+]^T$$

并设

$$\mathbf{A}_L = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{14} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{24} & A_{23} \\ & & 1 & -\left(\frac{\partial f}{\partial z_{j+1}}\right)_e - \left(\frac{\partial f}{\partial z_{j+2}}\right)_e \end{bmatrix}, \mathbf{A}_R = \begin{bmatrix} A'_{11} & A'_{12} & A'_{14} & A'_{13} \\ A'_{21} & A'_{22} & A'_{24} & A'_{23} \\ & & 1 & -\left(\frac{\partial f}{\partial z_{j+1}}\right)_e - \left(\frac{\partial f}{\partial z_{j+2}}\right)_e \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \left(\frac{\partial f}{\partial u}\right)_e \end{bmatrix}^T, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} A_{11} & -B_{11} \\ A_{21} & -B_{21} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

则转换后的水力学数学模型通用表达式可简化表达为

$$x(k+1) = Ax(k) + B_u u(k) + B_d d(k) \quad (8)$$

式中 系统矩阵 $A = (A_L)^{-1}A_R$, 输入矩阵 $B_u = (A_L)^{-1}B$, 扰动矩阵 $B_d = (A_L)^{-1}C$ 。 $u(k)$ 为过闸流量, $d(k)$ 为分水扰动, 式(8)表明渠道系统状态的调整是通过调节节制闸门来实现的。在控制理论上通常称式(8)为状态方程。式(8)是本文后面优化调度算法设计的基础。

2 扰动可预知模型

2.1 可预知算法的提出

所谓非恒定流输水过程的预测控制就是指采用逐时段向前滑动的、不断根据渠道当前状态对后续时段的控制点水位偏差的预测进行修正的控制手段。其控制过程是, 如果在 K 时刻分水流量发生变化, 根据式(8)推测出未来 N 个时刻控制点水位的变化值, 比照控制点水位的设定值, 通过调整控制输入 $u(k)$ 来修正模型参数, 得到新的预测值 $y(k)$ 。这样, 逐次从面临当前时段的实测值出发, 不断调整控制输入或调整控制模型参数, 最终维护控制点水位恒定。预测控制模型可以通过阶跃响应试验得到, 无须深入了解系统或过程的内部结构, 也不必进行复杂的系统辨识, 建模容易、简单, 而且算法中采用滚动优化策略, 并在优化过程中不断通过实测系统输出和预测模型输入的误差来反馈矫正, 能在一定程度上克服由于模型误差和某些不确定性干扰带来的影响, 特别适合复杂水力学过程的预测和控制。

根据未来的变化来决定现在的行动是预测控制的主要特点。输水工程在实际运行过程中, 就需要根据未来干渠分水变化, 实时调整渠道运行状态。预测控制所说的对“未来情况”的把握和输水工程对“未来情况”的把握是有差异的, 前者只是一种“估计”或者说“预测”(如水文模型中对降雨的预测, 未来某一具体时刻是否真的降雨并不是必然的), 而后者却是明明白白讲的一个事实(到时间, 分水口必须按照分水计划开启分水), 这里权且称为“可预知”。

渠道运行控制系统实际上是, 根据已经确认的系统未来应该满足什么要求、系统的未来目标信号或外部干扰将会有怎样的变化等信息来做出当前时刻的决策。如果以最优控制理论作为控制系统设计的理论基础和求解手段, 控制系统设计所追求的应该不仅是当前时刻的最优, 也是未来一段时间的最优。在这段时间内, 它能根据已知信息, 提前调整系统状态, 使即将到来的扰动对系统影响最小, 实现系统目标下的整体最优。

根据上述分析结论, 可预知算法和预测算法所使用的调节手段和所追求的目标都是不同的, 算法结构自然也是不同的。如果要实现“可预知”这一手段就需要对预测控制算法进行一点小小的改造。

2.2 可预知算法的构造

可预知算法设计的基本思路是: 形成一个包含有 M 步未来信息的扩大误差系统, 然后用二次型最优调节器设计的方法求解系统的最优控制律。

对式(8)进行一阶差分, 并将差分后的方程组和原方程合写成一个方程组, 称该方程组为误差系统。

$$x_0(k+1) = \Phi x_0(k) + G_u \Delta u(k) + G_d \Delta d(k) \quad (9)$$

式中 $x_0(k) = [e(k) \quad x(k)]$, 其中, $e(k)$ 为式(8)一阶差分后的误差信号。误差系统的系统矩阵 $\Phi = \begin{bmatrix} I_m & CA \\ 0 & A \end{bmatrix}$, 输入矩阵 $G_u = \begin{bmatrix} -CB_u \\ B_u \end{bmatrix}$, 扰动矩阵 $G_d = \begin{bmatrix} -CB_d \\ B_d \end{bmatrix}$ 。

进一步如果设外扰的变化可以提前 M 步被预知, 并定义

$$x_d(k) = \begin{bmatrix} \Delta d(k+1) \\ \Delta d(k+2) \\ \vdots \\ \Delta d(k+M) \end{bmatrix}, \quad \Delta d(k+i) = 0, i = M+1, M+2, \dots$$

采用预测建模方式, 式(9)可扩展包含 M 步未来扰动信息的扩大误差系统。

$$\begin{bmatrix} x_0(k+1) \\ x_d(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi & G_M \\ 0 & \Theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(k) \\ x_d(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_u \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (10)$$

$$\text{式中 } G_M = [G_d \quad o], \Theta = \begin{pmatrix} 0 & I & o \\ & I & \\ & & \ddots \\ o & & I & \\ & & & 0 \end{pmatrix}_{M \times M}$$

根据式(10)的形式, LQR 优化指标函数相应扩展为

$$J = \sum_{k=-M+1}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} x_0^T(k) & x_d^T(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(k) \\ x_d(k) \end{bmatrix} + \Delta u^T(k) R \Delta u(k) \right\} \quad (11)$$

式中 Q 和 R 都为正定加权矩阵。

到现在为止, 系统设计又转化为寻找一个最优控制律使式(11)取极小值这一经典问题。本文不对求解过程进行展开, 仅给出这个解的表达式。

$$\Delta u(k) = F_0 x_0(k) + \sum_{j=0}^{M_d} F_d(j) \Delta d(k+j) \quad (12)$$

式中 $F_0 = -[R + B_u^T P B_u]^{-1} B_u^T P A$, 正定矩阵 P 为 Riccati 方程的解。

$$F_d = -[R + B_u^T P B_u]^{-1} B_u^T (\xi)^j P B_d, j = 0, 1, 2, \dots, M, \varepsilon = A + B_u F_0 \quad (13)$$

对式(12)进行 Z 变换, 并进一步绘制出控制结构图(见图1)。

$$u(k) = F_e \frac{1}{1-z^{-1}} e(k) + F_x(k) x_0(k) + F_{pv}(z) d(k) \quad (14)$$

式中 $F_0 = [F_e \quad F_x]$, $F_{pv}(z) = F_d(0) + F_d(1)z + \dots + F_d(M)z^M = \sum_{j=0}^M F_d(j)z_j$

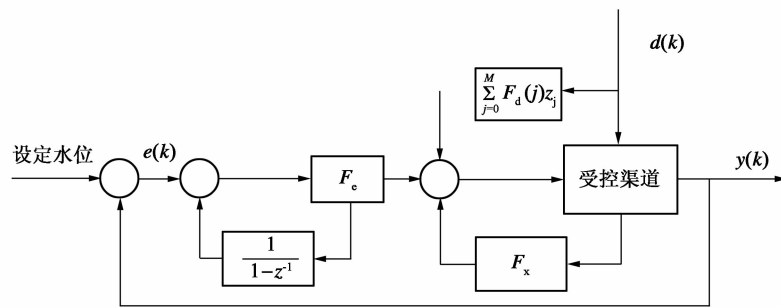


图1 可预知算法控制结构图

Fig. 1 Control structure of the foreseeable algorithm

2.3 模型阶跃响应测试

渠道是耗散系统, 即使不施加任何控制, 渠道水位最终也将稳定, 将未施加任何控制的系统称为原始系统, 称描述该系统的水力学数学模型为状态空间名义模型。为了直观展示模型的扰动抑制性能, 本文使用脉冲响应分析工具对扰动可预知模型进行性能分析。算例中仅考虑了计划内分水的扰动影响, 采用矩形方波脉冲代替渠道分水变化, 分别使用经典 LQR 优化算法和经过 LQR 指标函数优化后的扰动可预知算法, 对原始闭环反馈系统进行仿真计算, 绘制出单渠段状态空间名义模型在该扰动下的输出响应, 图2为渠道系统在这3种运行方式下的控制点水位响应曲线, 图3为系统分别在 LQR 算法和本文算法下的控制输入。不考虑实际物理意义, 两组实验使用相同的控制参数和加权矩阵。

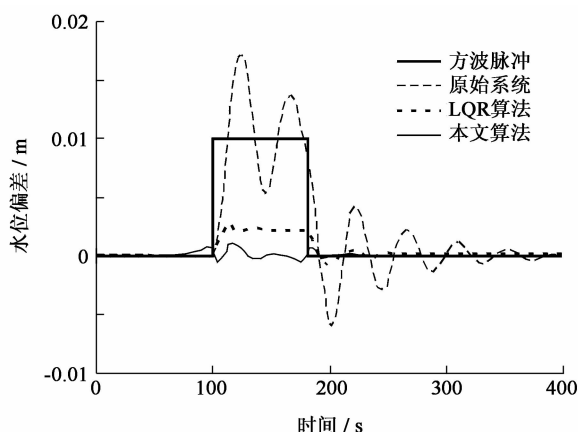


图 2 控制点水位响应曲线

Fig. 2 Response curve of the controlled point

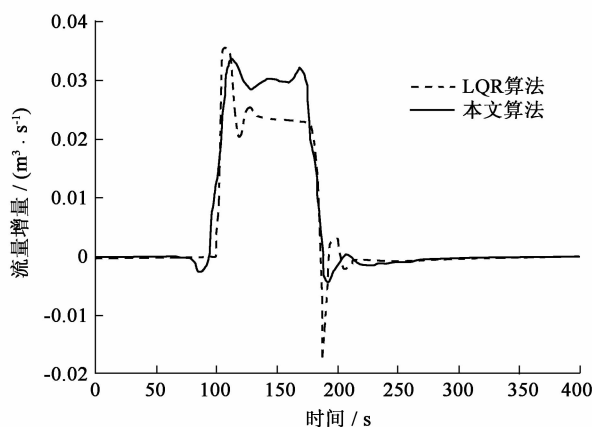


图 3 控制信号输入变化曲线

Fig. 3 Input signal curve

综合图 2 和图 3 的结果,可以看出虽然 LQR 算法和本文算法的控制输入相差不大,但后者的分水扰动一直效果明显优于前者,证实了可预见控制算法的确可以通过未来情报的利用和前馈作用取得较理想的控制效果。图 4 有助于进一步理解扰动可预知模型建立的意义(设定水位变化为目标信号)。

如图 4 所示,如果在 $k=1$ 的目标值将有变化,受控渠段能在此前步预知该信息,并根据优化评价函数选择适宜时间段完成控制量的调整,以期望系统能够从避免系统超调,减小稳态误差。

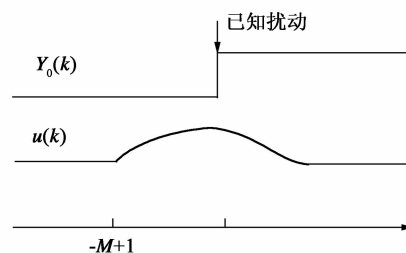


图 4 预知分水后的模型调整过程

Fig. 4 Control signal adjusted by model after foreseeing the scheduled demand

3 电子渠道仿真测试

南水北调中线京石应急段工程,起点为古运河节制闸,终点为河北省渠道终点,全长 217.045 km。整个渠道由 14 个节制闸分成 13 个相对独立的子渠段。起点渠段设计流量为 $170 \text{ m}^3/\text{s}$,终点渠段设计流量为 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 。电子渠道按设计流量运行,在渠道运行过程中上游水深保持不变。永安分水口(位于第 2 渠段)初始分水为 $3.75 \text{ m}^3/\text{s}$,西名村分水口(位于第 3 渠段)初始分水为 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$,留营分水口(位于第 4 渠段)初始分水为 $16.5 \text{ m}^3/\text{s}$,大寺城涧分水口(位于第 6 渠段)初始分水为 $3.75 \text{ m}^3/\text{s}$,高昌分水口(位于第 6 渠段)初始分水为 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$,郑家佐分水口(位于第 8 渠段)初始分水为 $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$,西黑山分水口(位于第 9 渠段)初始分水为 $5.38 \text{ m}^3/\text{s}$,荆轲山分水口(位于第 11 渠段)初始分水为 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$,三岔沟分水口(位于第 13 渠段)初始分水为 $10.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

将可预知优化调度模块植入南水北调中线电子渠道平台,着眼于系统工况突变后的系统随动性分析,对运行控制系统的整体性能进行综合考察。位于第 9 渠段的西黑山分水口(即天津干渠取水口)为应急段工程的主要分水口,所允许分水流量变化大,对干渠水位变化影响也较强,并认为如果满足西黑山分水口紧急分水要求,京-石应急段渠道控制系统设计合格。

设西黑山分水口在分水过程中,分水流量大幅变化。按照分水计划,西黑山分水口在第 2 h 时段初,分水口分水流量突然由 $5.38 \text{ m}^3/\text{s}$ 增至 $58.38 \text{ m}^3/\text{s}$,渠道运行到第 4 h,分水口流量又增加 $5.32 \text{ m}^3/\text{s}$,总分水增至 $63.70 \text{ m}^3/\text{s}$,渠道运行至第 8 h,西黑山分水口紧急关闭(分水流量突降为 0)。绘制受控渠道在下游常

水位(即闸前常水位)运行模式下,各渠段控制点的水位偏差。受控渠道各渠段控制点水位偏差如图5所示。

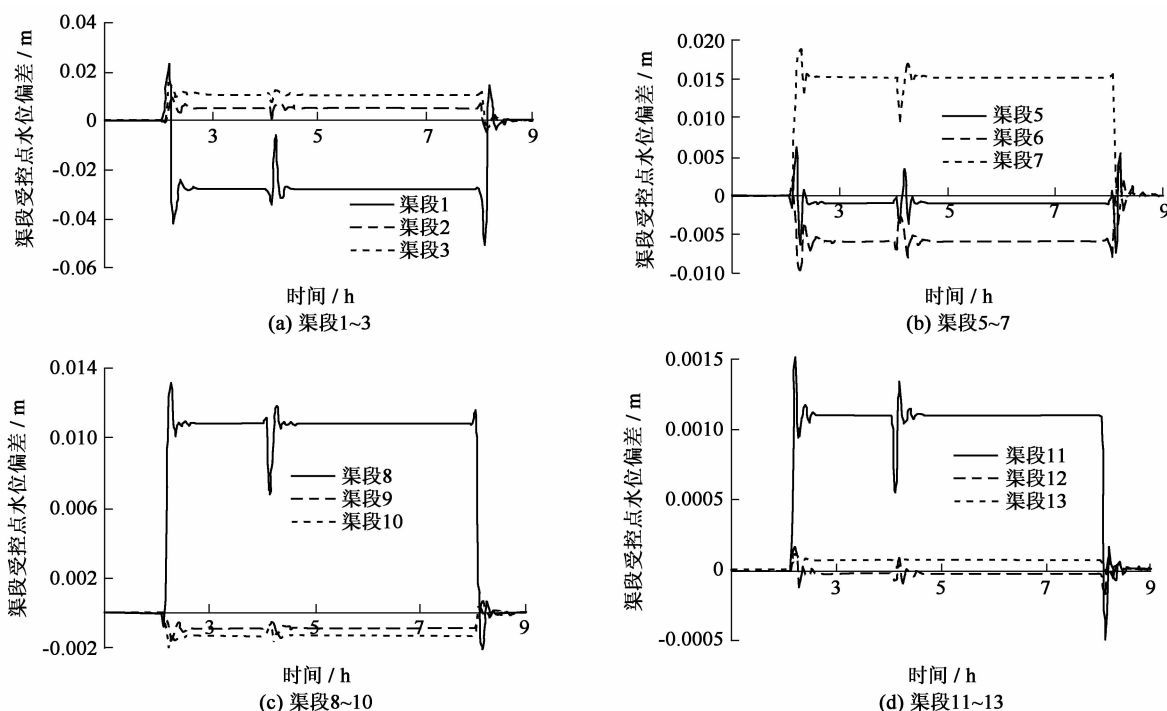


图5 渠段控制点水位偏差

Fig. 5 Water level variation for the controlled points of pools

根据图5分析算法的运行控制性能。第2 h时段初分水口流量突然大幅增加,系统针对此变化及时作出响应,计算并重新设定渠道控制点水位,各渠段经过短暂调整后稳定在新的运行点。系统运行至第4 h,分水流量又增加 $5.32 \text{ m}^3/\text{s}$,各渠池经过短暂调整后,水位恢复稳定。渠道运行8 h后,西黑山分水口关闭,受控渠道重新恢复至原设定水位。渠道整个调整过程各渠池闸前水位偏差式中保持在5 cm以内,符合规定15 cm/h和30 cm/24 h的水位波动安全限幅。由此可以看出,受控渠道在大分水情况下能重新调整控制水位,小分水情况下能够维持控制点水位不变,工况恢复之后受控渠道还能无偏差回归至原水位控制点。系统在整个调整过程都满足渠道的安全运行要求,这表明本论文所设计渠道自动化控制系统随动性能良好,针对扰动具有较强的鲁棒性。提请注意的是,本文所设定工况,无论是采用文献[2]还是文献[6]中的控制逻辑,电子渠道平台都无法顺利完成推演,也就是说对上述文献所提起的运行控制方法而言该工况实际是“不可控”的。

4 结 论

对南水北调中线输水工程来说,渠道分水变化是可以预先获知的。如果将分水过程看作系统未知扰动,显然不尽合理。本文吸收预测模型建模思路,将扰动矩阵看作可预见外扰,尝试构造出包含有 M 步未来信息的扩展系统。系统设计是在预测算法的基础上进一步涵括了可预知的外扰信息 $d(k)$,称该运行控制模块为扰动可预知模块。详细阐述了可预知模型的建模启示和思路,利用脉冲响应测试来理解模型机制,使用电子渠道仿真实验来说明模型的确可用。

参考文献:

- [1] 吴保生,尚毅梓,崔兴华,等. 渠道自动化控制系统及其运行设计[J]. 水科学进展, 2008, 19(5):746-755. (WU Bao-

- sheng, SHANG Yi-zi, CUI Xing-hua, et al. Automatic canal control system and its operation and design[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(5):746-755. (in Chinese))
- [2] 方神光, 吴保生, 傅旭东 等. 南水北调中线输水渠道中分水口的影响[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2007, 47(9):1452-1456. (FANG Shen-guang, WU Bao-sheng, FU Xu-dong, et al. Effect of deviations in the middle route of the South to North Water Transfer Project[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2007, 47(9):1452-1456. (in Chinese))
- [3] LOZANO D, ARRANJA C, RIJO M, et al. Simulation of automatic control of an irrigation canal[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97:91-100.
- [4] VALENTIN G M, BENEDE J R. A control tool for irrigation canals with scheduled demands [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2008, 46(E1):152-167.
- [5] 魏加华, 王光谦, 陈志祥, 等. 南水北调中线电子渠道平台建设[J]. *南水北调与水利科技*, 2007, 5(2):28-52. (WEI Jia-hua, WANG Guang-qian, CHEN Zhi-xiang, et al. Digital canal of the middle route of South to North Water Diversion Project[J]. *South to North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2007, 5(2):28-52. (in Chinese))
- [6] 方神光, 李玉荣, 吴保生. 大型输水渠道闸前常水位的研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(1):68-71. (FANG Shen-guang, LI Yu-rong, WU Bao-sheng. Constant water levels at the upstream of sluice gates in a large-scale transferring channel[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(1):68-71. (in Chinese))
- [7] 史哲, 马吉明, 郑双凌. 节制闸控制下宽浅渠道内的非恒定流[J]. *南水北调与水利科技*, 2007, 5(6):21-24. (SHI Zhe, MA Ji-ming, ZHENG Shuang-ling. The unsteady flow in the wide shallow open channel with controlling gates[J]. *South to North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2007, 5(6):21-24. (in Chinese))
- [8] ÖMER F D. Control of transient flow in irrigation canals using Lyapunov fuzzy filter-based Gaussian regulator [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2006, 50:491-509.
- [9] 李义天. 河网非恒定流隐式方程组的汉点分组解法[J]. *水利学报*, 1997(3):49-57. (LI Yi-tian. A junctions group method for unsteady flow in multiply connected networks[J]. *Journal of Hydraulics Engineering*, 1997(3):49-57. (in Chinese))
- [10] 余国安. 闸门调控下的灌溉渠道非恒定流数值模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2004. (YU Guo-an. Numerical simulation of sluice gate regulated unsteady flow in irrigation canals [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2004. (in Chinese))

Design and simulation of a foreseeable algorithm for canals *

SHANG Yi-zi, WU Bao-sheng, LI Tie-jian, WANG Guang-qian

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Water level hold at specified locations within each reach is of the utmost importance for reliable and efficient management in a channel. A new algorithm for the control of unsteady flows in open channels is presented. An innovative control method is first analyzed, and then synthesized to construct a foreseeable module. The algorithm can thus be obtained by implanting the predicative module into a linear quadratic regulator (LQR). Using LQR, the canal operation problem can thus be reformulated as an optimal control problem, which regulates the gate discharge using the water level error as its constraints. The logical structure of the new algorithm is identified using an impulse response test, and the performance of the algorithm is tested on the platform of the “digital canal of the middle route of south to north water diversion project”. The result shows that the algorithm performs well, is able to cope with the planned demand for large quantities of water, and is potentially useful for real applications.

Key words: canal control; the middle route of South to North Water Transfer Project; predicative algorithm; digital canal

* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2007CB714100)