

渠道自动化控制系统及其运行设计

吴保生¹, 尚毅梓¹, 崔兴华², 陈植元³

(1. 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; 2. 清华大学自动化系国家 CIMS 研究中心, 北京 100084;
3. 清华大学自动化系智能与网络中心, 北京 100084)

摘要: 渠道运行控制系统可以根据渠道水位、流量等信息来提高渠道的运行效率, 降低运行成本, 提高水资源利用率。系统介绍了渠道运行方式和自动化控制的概念, 扼要论述了近年来在长距离输水渠道运行方式和自动化控制方面的研究和相关成果, 指出其中存在的问题和可能改进的途径。根据渠道运行控制系统多输入多输出、模型非线性、扰动随机性等特点, 对控制解决方案进行了探讨, 并在渠道运行方式选择、控制算法与闸门控制模式等方面指出了进一步的研究方向。

关键词: 渠道; 自动控制; 运行模式; 控制算法

中图分类号: TV91; G353.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2008)05-0746-10

渠道运行控制系统是根据渠道运行信息, 操作节制闸门以控制渠道水位、流量, 满足用户需水需要的基本系统, 其目的在于全面提高渠系运行调度水平, 改善输水效率, 实现实时适量供水, 避免供水的不足与浪费, 降低运行费用, 从而提高水资源利用率。

渠道控制系统自动化设计既要考虑渠道的水力运行特性, 又要据此特性考虑选择合适的闸门调控方式。从此意义上讲, 渠系控制自动化应属于明渠水力学与自动控制理论的交叉科学。渠道自动控制系统研究历史虽然比较长, 发展却一直很缓慢, 国外一些已经建成的自动控制渠道大多为满足农业灌溉用水的需要, 控制系统设计多采用比例-积分-微分(PID)当地控制, 这种系统实现的控制精度不高, 运行效率相对低下^[1~3]。近年来, 随着系统优化和自动控制理论的完善, 国内学者在国外已有研究基础上, 针对像南水北调这样长距离、大规模的复杂供水系统开展了渠道运行方式和自动控制应用研究。控制容量法和模糊 PID 控制、智能网络、最优控制等新成果、新理论不断在渠系控制上得到应用。本文对渠道运行方式和控制概念进行了较为系统的阐释, 并对这些研究成果进行分类评述, 指出其中存在的问题和可能改进的途径, 对渠系水力结构和自动化控制机制进行初步探讨, 并提出新的研究方向和有关研究课题。

1 渠道运行控制方式

渠道运行控制就是控制整个渠系的水量和水深变化, 控制动作与渠道水力学响应有关, 即要满足流量变化时仍要保持渠道水位的稳定, 或能够控制流量变率^[4,5]。渠系的自动化控制通过对节制闸的控制来实现, 节制闸是对渠道输水过程实施调节的主要设备^[6]。通过对闸门开度的调节快速满足用户需求, 保证在有限的时间内使渠道恢复稳定状态。根据渠道对闸群的控制方式, 渠道控制系统可分为当地控制和中央集成监控两大类^[7]。

渠段输水可采用不同的运行方式, 渠道在不同的运行方式下呈现出不同的水力响应特性。根据渠道水位控制点位置的选取, 运行方式又可分为: 上游常水位(闸后常水位)、下游常水位(闸前常水位)、等容积控制、控制容量法^[8]。

上游常水位就是在渠段运行过程中保持其上游水深不变(图 1), 在这种运行方式下, 渠段在零流量和最大

收稿日期: 2007-09-19

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目 (50221903)

作者简介: 吴保生(1959-), 男, 河南安阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail: baosheng@tsinghua.edu.cn

流量 Q_{\max} 过水体积之间存在一个蓄水体积 V (图中阴影部分所示), 这个蓄水体积能快速反应支渠和下游渠道不可预见的流量增大需求, 当下游渠道需水量小时又可容蓄水量。为保证稳定分水, 分水口通常选在渠段上游。这种运行方式对应闭环反馈控制系统, 系统通过对闸门操作, 保持渠段上游闸门后水位不变。渠道在该运行方式下运行, 渠道水面线较高, 渠段蓄水量大, 水力响应特性好, 可以满足用户的紧急需求, 但是由于该方式蓄水体积较大, 流量的突然改变引起渠段的震荡时间也较长。

与以实时供水为主要目的上游常水位运行方式相对应, 下游常水位运行方式对应开环控制系统(图2), 系统通过对渠段上游闸门的调节, 保持渠段下游闸门前水位不变, 分水口一般选在渠段下游, 渠道正常运行流量小于设计流量, 渠段蓄水量小, 用户需水需要提前预订。此种方式自动化实现程度低, 突然的、临时的用户需求改变都会给渠道运行控制带来困难。目前在此运行模式上主要为 P+PR 控制器实现。

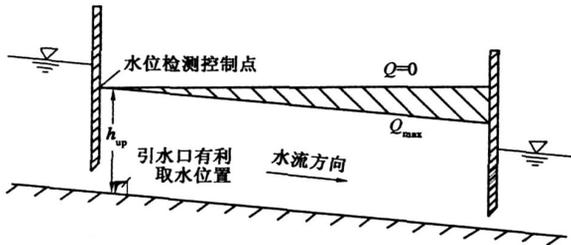


图1 上游常水位

Fig.1 Constant upstream level

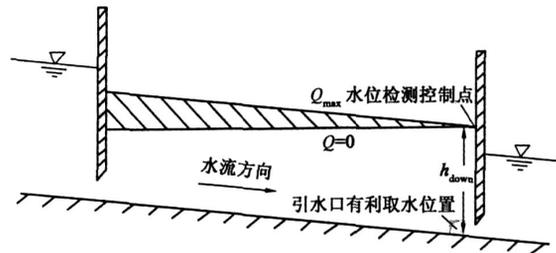


图2 下游常水位

Fig.2 Constant downstream level

在上游常水位和下游常水位运行方式下, 水位检测装置分别放置在上游节制闸后和下游节制闸前。渠段节制闸通过开度的调节来反应本渠段内水情变化, 实现渠道系统内各个渠段的自治。但是, 无论是上游还是下游控制, 这两种运行方式下的渠道自动化测控方式都能对、且仅能对单个渠段水力特性变化做出反应, 无法根据渠道系统的整体运行状态进行调节, 不利于水量的统一调配。

为满足输水渠道的水量动态规划和统一调度的需要, 长距离输水渠道控制宜采用中央集成监控模式。渠道等容积运行方式的提出大大适应了该模式的发展(图3)。流量变化时, 渠段水面线以槽蓄容积的中点为轴转动, 渠段水量的改变需要上下游闸门的同时调节, 因此等容量运行方式也称为“同时运行法”。这种模式是上游常水位和下游常水位运行模式的折衷, 因而具有上述两种运行方式不可比拟的优势。它可显著改善下游常水位运行模式反应延迟的问题^[9]。范杰等^[10]考虑了渠道水位下降约束, 分析了渠道在不同运行方式下的水力响应特性, 认为调蓄水体不能满足水位变化所需水量是造成水位波动的主要原因。当 $V_{\text{供}} > V_{\text{需}}$ 时, 调蓄体体积能够满足水位变化所需体积, 渠道中水位变化过程较为稳定, 水位振荡不明显; 当 $V_{\text{供}} < V_{\text{需}}$ 时, 调蓄体体积不能满足水位变化所需水量的体积, 渠道中水位振荡较为剧烈。同时指出在相同条件下, 等容积运行方式在渠道水位、流量控制方面比上、下游常水位运行方式更具优势。渠段蓄水量是渠道控制的基础, 根据用户需求和上游来水变化, 获取闸门系统的联合调控方案以满足水量实时调配的需要, 是渠道控制的终极目标。渠段水位不动点的选择因而变得不再重要。建立在此理念之上的控制容量法(图4), 没有常水位的限制, 灵活性特别高, 能够比较容易适应渠道的紧急调配。等容积运行方式是控制容量法将槽蓄容积中点选取为控制点的一个特例。

控制容量法在引黄济青工程输水控制中得到应用。实践证明该运行模式可以成功的处理渠段内突然的、大流量的变化, 满足调度运行的需要。目前等容积控制和控制容量实现都是建立在精确水力计算模型, 计算机实时监控和闸群统一调度基础之上的^[7]。

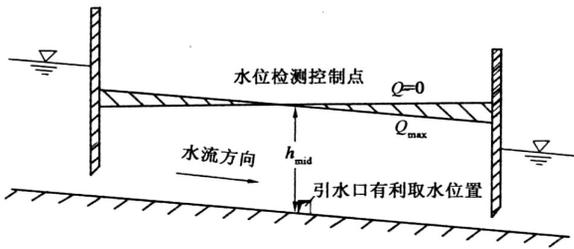


图3 等容积控制

Fig.3 Constant volume control

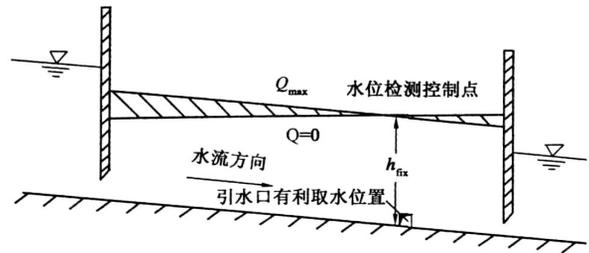


图4 控制容量法

Fig.4 Volume control method

2 渠道控制器设计

渠道自动控制系统的被控对象是整个输水渠道，控制的本质是要实现渠道非恒定流计算和控制算法设计的有机组合^[11]。像南水北调这样大规模长距离的调水工程采用的是明渠输水，明渠输水系统是由多个节制群隔离的渠段顺序串联而成的复杂水力网络。渠道系统中的控制信号依靠渠道中的水波进行传递，多渠段串联运行的最大特点是渠段之间存在着耦合作用，一个渠段的扰动会依次向上、下游两个方向传播，因此渠段水位、流量的波动必然会影响到与其相邻两个渠段的稳定。良好的闸门系统控制方式能够使扰动产生的水位振荡在有限的渠段内得到控制，从而实现调节有限的闸门来保持整个渠道系统稳定的目的^[12]。目前普遍使用的闸门控制器设计模式主要有 On-Off 三点控制，PID 控制、鲁棒控制等。

2.1 基于理想水力模型的闸门控制器设计

1952年，美国加州中央流域工程首次使用 Little Man 三点式当地控制器对 Friantkern 渠道运行进行控制，Little Man 控制器可以将闸门水位维持在目标值，闸门前水位为输入值，输出为闸门增量。然而如果渠道流量幅度变化比较大，这一控制逻辑就很难保持稳定。改进的两段式 Little Man 控制器可以同时保证在正常和加大流量情况下渠段能够正常工作，从而提高了系统流量控制的鲁棒性。然而这种控制器在控制误差较大的情况下，系统有严重的时间延迟。微分控制可以按照误差变率进行操作，结合了微分控制环节的 Clvin 算法在一定程度上加快了系统响应，但是闸门仍然不能进行连续操作，缺少灵活性。不过三点式算法应用比较灵活，结构比较简单。通过调整水位传感器安放位置，可以比较容易的实现上、下游常水位控制。

随着微处理器的出现，PID 以其根据确定水力模型可以对节制闸进行稳定连续的调节，在渠道闸门控制系统上得到广泛的应用。P+PR(比例+比例复位)控制算法将微分控制引入渠道，并在 Umattilla 流域输水工程中得到实现。Buyalski^[13]为消除水位波动对控制器的影响，在传统的 PI(比例+微分)控制中加入滤波器，研制出 HL-HLO plus reset(电子水位过滤器+复位)，并将其应用到 Coming 渠道下游常水位控制。Sogreah 开发出 Sogreah PID 控制器用于 Kirkuk-Adhaim 渠道下游的常水位控制，此后，Sogreah 同时考虑了渠道上下游水位的影响，开发出 BIVAL(常水位控制逻辑)，在 Miami 的两个渠道上得到成功应用。

HL-HLO 算法主要用于渠系的下游自动控制，而 P+PR 算法主要用于渠系的上游自动控制，但是无论是上游还是下游控制，它们都有一个共同的特点是反应速度慢、整体调节能力差。王常德^[14]将 P+PR 算法和 BIVAL(比威尔控制)结合起来对单个渠段进行了可控性研究^[15]，发现采用 P+PR 控制器的渠道响应速度，在等体积运行方式下要比常水位控制快一倍左右，认为将算法和渠段运行方式进行有机的组合可以提高系统控制性能，从而有效的缩短渠段控制反应时间。随后，王长德等^[16]又将闸门同步操作技术和 P+PR 算法结合起来建立了考虑有渠侧出流的多渠段串联渠系等容积控制模型，并对系统稳定性、过渡时间、超调量和稳定精度等控制指标进行了分析。柳树票等^[17]将单渠段等容积控制算法 P+PR 应用于串联倒虹吸控制，建立了理想串联倒虹吸多渠段控制模型，并对控制过程进行了仿真，结果显示该模型能够在较大流量下稳定运行，具有比较好的

动态调控性能。

设计 PID 控制算法的核心是 PID 参数的整定, 参数的选择直接影响到渠段运行控制的品质, 通常 PID 参数的整定是根据系统对控制对象数学模型的描述, 采用试算法来确定的。采用试算法对参数进行整定工作量大, 而且这些参数在运行过程是随渠段运行状况的改变而改变的, 试算参数的时不变性很难消除控制中产生的误差, 因而不能精确描述渠段的运行状况。范杰等^[18]认为采用模糊控制可以消除 PID 控制产生的暂态误差, 缩短渠段稳定时间。通过引入 K_1 和 K_2 两个时变加权系数把模糊控制和 PID 控制结合起来, 设计实现了联合控制算法。王涛等^[19]考虑到渠道系统上下游渠段的波动耦合作用, 把神经网络(BP)应用于 PID 控制参数的整定, 通过 BP 网络的自适应和自学习功能, 实现了 PID 控制参数的在线调整。结合渠段等容积运行方式对一个 3 渠段的渠池进行了仿真试验, 认为加入自适应单神经元的 PID 控制器可以减小渠段内的水位超调, 缩短系统控制反应时间。王常德等^[20]吸取了现代控制理论中的优化思想, 将预测控制中的动态矩阵控制(DMC)引入到渠系自动控制系统, 在常规 PID 控制模块基础上设计出 DMC 控制器, 并对采用等容积控制方式运行的单渠段进行了仿真研究, 结果表明预测控制器可以利用实测信息对 DMC 进行反馈校正, 提高了运行效率, 在一定程度上克服了渠道的非确定性。

2.2 基于渠道扰动模型的闸门控制器设计

由于渠道水流的非恒定性, 节制闸开度与渠道水面线变化具有动态对应关系, 因而渠道系统是一个多输入多输出的多变量系统, 有限的参数很难对系统变化做出精确的描述, 在某些时候, 这种描述甚至是错误的。被控对象的不确定性是时时存在的, 如分水口需求变化、渠道的淤积、渠道运行模式的改变等都会引起系统结构的变化^[21]; 有些扰动是不可避免的, 例如在控制器设计中描述渠道水流过渡过程的圣维南方程就是一个非线性方程组, 为了计算和描述的方便通常将圣维南公式进行线性化和离散化处理, 去掉了高次项, 控制方程自身就与原来的水力学方程有一定的差异。如果控制器不考虑这些因素, 建立的调控模型极可能会引起渠段内大幅度、长时间的水面波动^[22]。

Corrigan 等^[23~25]尝试将最优控制概念加入到反馈控制器设计中, 企图消除不确定分水计划所造成的渠道水面扰动, 大部分设计成果集中在单输入单输出闸门控制器。其后扩展的多渠池控制是这种控制器的简单串联, 试验结果表明该设计无法有效的消除上下游的渠段波动耦合^[26~29]。

状态空间法将整个渠系看作是一个状态空间系统, 将渠道运行工况改变或水力参数摄动造成控制误差看为系统状态向量, 运用状态估计、反馈等多种方法建立系统和各个状态向量的关系。状态空间模型针对多输入多输出系统设计具有天然的优势。王念慎等^[30]以渠池首尾水深作为状态变量, 以闸门开度作为控制变量建立状态空间方程, 通过线性二次型性能指标最小寻优获取了节制闸最优调节规律, 建立了渠段等容积控制模型, 可以实现闸门的同步操作。阮新建等^[31~35]利用有限差分法对 St. Venant 进行离散, 将每个计算节点的水位和流量设置为状态变量, 对控制系统反馈增益矩阵的确定和权矩阵的选取进行了系统的研究, 设计出带观测器的渠道运行反馈控制器。系统可以容忍水位、流量测量误差的存在。随后, 崔巍等^[36]将模型预测算法运用到渠道过渡过程状态空间离散方程上, 构造出目标方程。刘青娥等^[37,38]在控制系统的观测回路上并联了两个神经网络模型——NNM 和 NNC, 尝试利用神经网络的自学习和自适应功能来补偿控制中的扰动和误差。值得说明的是, 采用预测算法和并联 BP 神经网络模型的控制方式, 其原理都是预测(学习)-滚动优化-反馈校正。它们都是根据渠道运行系统的历史操作信息对输入的水位或流量信号进行判断, 并对下一时刻闸门的操作进行预测和控制。

鲁棒控制是 20 世纪 70 年代针对模型不确定性等问题提出的, 能够使控制系统在误差扰动下仍能保持稳定, 以牺牲系统的灵敏度为代价来提高控制系统的稳定性。目前应用在渠道控制的主要有 H 法。考虑到线性化误差及水力参数变化给控制过程带来的影响, 尚涛等^[39]将扰动抑制的概念引入到 H 设计中。管光华等^[40]对建模误差进行了量化, 根据参数摄动对控制系统造成的不同影响, 对扰动进行分类。尚毅梓等^[41]分析了渠池运行控制特性, 并在此基础上提出了权函数的选择方法, 避免了加权函数的试凑。 H 设计方式的采用提高了控制器运行的稳定性, 避免了控制的误动作。另一方面, 这项技术的使用却加大了渠道输水过程中的稳态控

制误差。

无论是基于理想水力模型设计的PID控制器,还是基于渠道扰动模型的闸门控制器设计,考虑到渠道响应速度和调蓄容积小等特点,渠段的运行方式多为对渠段容量的控制。值得注意的是,在实际控制中,控制容量法实际上是通过水位的控制来实现的。等容积控制则是对渠道中点水位来进行控制,通过保持控制点的加权水位 $Y = 0.5 Y_1 + (1 - 0.5) Y_2$ (Y_1 、 Y_2 分别为上、下游水位)不变,来实现渠道控制蓄量的不变。水流特性(渠段的壅水、跌水等)使控制过程势必存在一定的误差,水流的这种波动特性就决定了实际的等容积控制是不存在的。

2.3 人工智能控制器

无论经典PID控制还是现代鲁棒控制都严重依赖于对控制对象的精确描述。渠道水流的非线性、大滞后、多扰动等特点使精确控制模型的建立变的非常困难。而人工智能控制设计可以避免复杂的数学建模,在一定程度上可以解决模型非线性和渠道中的随机扰动等问题。

2002年,尚涛等^[42]首次将BP网络应用于水资源的预测,根据水资源的历史数据对模型进行解析,通过样本训练形成预测控制模型。随后,秦亮等^[43]对人工神经网络在有压输水系统过渡过程的应用作了深入的研究,对BP算法比较并进行了改进,建立出理想渠道的输水预测控制模型,结果表明采用BP控制算法可以避免大规模的数学计算,大大提高了系统控制的实时性。但是在实际的渠道系统中,不同渠段的水力特性参数是不同的(糙率、波速、水力断面等),将整个渠道系统的运行参数放在同一个网络里进行分析和训练显然不妥。安宁^[44]考虑到不同渠段的特点,利用广义预测算法(GPC)在渠道的各个子渠段分别建立受控自回归数学模型(CARIMA),设计出多渠段控制器,并在两个渠段上进行了仿真试验,结果显示广义预测控制模型可以补偿渠道分水造成的流量扰动,可以达到比较好的控制精度。

模糊控制是一种基于规则的控制,无须建立数学模型,基本思想就是将人的经验通过计算机控制来实现。模糊控制系统和常规控制系统在总体结构上是一致的,都包括控制器、执行机构(闸门电机)、控制对象(节制闸),它们的区别仅在于控制器。模糊控制器按照经验规则对被控对象进行控制,而不考虑控制对象的内部特性。2003年,杨桦等^[45]首次提出将模糊控制理论应用于单渠道控制,并在长5000m的渠段上进行了模拟仿真,然后,又利用闸门同步操作技术,将多变量控制器分解为多个单变量控制器(简单模糊控制器),建立了多渠段等容积控制模型^[46],但是控制精度不高,简单模糊控制器之间的整体协调能力比较差。崔巍等^[47]认为在模糊控制中加入自调整模块,可以提高控制精度,设计出一种在全论域范围内带有自调整因子的控制器,它能根据水位偏差 e 和水位偏差变化率 ec 的实时变化趋势对量化因子进行在线调节,从而实现了模糊控制器的自调整功能。该控制器在鲁棒性和抗干扰能力上都优于普通模糊控制器。王长德等^[48]针对渠道系统简单模糊控制器动态和静态性能比较差的特点,提出了分层模糊控制的思想,分层模糊控制对论域进行分层,外层解决系统动态响应问题,内层解决动态精度控制问题,设计出分层模糊控制器,对模糊控制器的整体控制性能进行了改善,但是其整体控制仍然不能达到令人满意的效果。

人工智能网络和模糊控制器的设计与基于被控对象模型建立控制器的设计理念是不同的,神经网络是根据已知渠道运行资料(如水位、流量及对应闸门开度)拟合出一个非线性模型,用来反映渠道的运行规律,然后运用这个非线性模型对渠道扰动做出反应,对节制闸进行控制。模糊控制的核心是模糊规则的设计,模糊控制则是操作者对渠道长期运行经验加以总结、提炼而得的模糊条件语句的集合,控制器将渠段运行条件与规则进行模糊匹配得出节制闸的开度,从而实现对渠系的自动化控制。因此可以看出,智能控制不涉及被控对象的物理机制,它完全建立在历史运行数据之上的。因此渠段运行模式的改变,分水口的开启等非平滑扰动都会造成控制系统的剧烈震荡,导致控制的失败甚至会引引起节制闸的破坏。

人工智能控制在渠段控制自动化上面的研究还不成熟,一些研究者把工业过程控制中的参数简单的应用到渠段控制中而未作调整和论证,这种做法是值得商榷的(因为还必须考虑到渠段的各水力因素、渠道边界条件、闸门调节能力等)。但是把人工智能和渠道运行模式结合起来对渠道控制进行描述,将有助于人们对渠道控制的随机性和非线性规律把握。另一方面,将神经网络和模糊控制应用于渠道控制研究中,还使经典控制显示

出新的生命力。无论如何，渠道运行方式、控制方式的研究都具有重要的理论和实际意义，是基于自动化渠道优化调度的基础，值得深入研究。

3 渠道优化调度

控制系统设计和渠道优化调度方案是不同的两个概念，控制器参数和性能优化不能代替调度方案的选择。调度方案的确立应是以控制系统建立为前提，并能在自动化控制渠系中得到验证，也就是说调度方案的确立是建立在渠系控制研究基础上的。完整意义上的渠系自动化应该是能对整个渠系实施优化管理，使优化调度和自动控制相结合的系统，美国加州、中亚利亚桑那州等调水工程在动态规划原理基础上建立了输水控制模型^[49,50]；国内一些研究者利用线性规划对渠段调度控制提出了二步法，第一步由渠段完成水位的调整，第二步调整水量使渠道稳定^[51]；也有的一些学者以控制输水成本为目标，建立了优化模型^[52]。但是这些都尚待完善，采用线性优化模型是否合理还尚待商榷。

4 渠道水力特性与控制系统设计过程中应考虑的问题

跨流域调水是实现水资源优化配置，解决区域性缺水的战略性基础设施工程。工程一般具有水量输送距离远，输运流量大，渠道内水流形态复杂等特点，且设计渠系沿线缺少必要的在线调蓄水库，分水口会不定期开启，这样造成了渠道控制的困难。造成控制困难的物理机制主要有如下几个方面：

(1) 模型非线性 水力模型非线性是渠道控制非线性产生的根本原因，描述渠道水流过渡过程的 St. Venant 方程为双曲型偏微分方程组，目前尚无法求得其解析解。另外渠道的各个渠段通过水流波动相互关联，研究表明，这种关联和作用通常是非线性的，很难表述为线性方程。非线性是水流、节制闸动态调节、渠道水力运行要素相互关联的纽带，是控制系统内外协同、进行水力输移机理研究的关键。

(2) 动态多维性 多维性是非恒定流的基本特征，分析渠段非恒定流中各参数之间的关系，可知在波所涉及区域内，各过水断面的水位~流量不是单一的对对应关系，非恒定过渡过程的附加水力坡度是产生这种多对应关系的直接原因，渠段涨水过程，附加水面坡度为正，流量比恒定流时大，落水过程附加水面坡度为负，流量比恒定流时小，在涨落水过程中，水位和流量分布呈现绳套曲线。渠道的整个调度运行过程，就是渠道的槽蓄不断调整的过程，水位~流量的这种多维对应关系直接导致水位和节制闸开度之间的对应关系不唯一，因此基于精确模型建立的单输入单输出的控制器设计方式实际上是不存在的。

(3) 扰动的非确定性 如何消除扰动的非确定性是控制算法选择的关键。由于描述渠道的抽象模型与实际总有误差，因此扰动是不可避免的，即被控对象是不确定的。这主要有以下几方面造成的：参数测量及线性化带来的误差，由于流体自身的特点，测量仪器不可能做得像工业控制那样精确，水位或流量的测量值和实际值之间一定存在误差。采取等容积或控制容量法对渠段运行进行控制，目前控制点水位是通过上下游测点线性加权插值得到，人为造成的扰动也是不可避免的。运行环境和运行模式的变化带来的扰动，分水口的开启，闸门快速启闭造成的渠段壅水，上下游渠段运行模式的切换等都会引起数学模型参数的调整。渠段非恒定流计算模型的简化引起的扰动，为求解圣维南方程组，通常将进行离散和线性化处理，这同样会影响控制的精确性。由此看出，被控对象模型具有极大的不确定性，如要系统能在这样的环境下稳定运行，控制器必须具有针对这些扰动的鲁棒性。

5 进一步的发展方向

分析、归纳现有的成果可以发现，针对控制器设计、渠道运行方式研究成果较丰富，而在渠道调度运行方面研究成果还不多。针对控制器的设计，比较成熟的单输入单输出的 PID 控制为部分调水工程所采用，该设计方式固有的缺点严重制约了当地控制器的普及。多输入多输出系统是研究的热点，然而基于多输入多输出的中

央集中控制器对渠道水力特性及渠道扰动抑制考虑不足,目前仍处在理论研究阶段。在研究方法上,采用控制机理对设计机制进行改进的方法比较多,从渠道运行机理对控制方法进行改进的研究还较少,这在一定意义上有舍本逐末之嫌。

针对上述问题做了一些新的尝试和探索,但是由于实际系统的复杂性,迄今为止尚未完全阐明问题的本质,仍有深入研究的必要。为此,提出对以上问题的看法和设想。

(1) 针对渠道运行方式 渠段在控制容量方式下运行,水位、流量的监测是否可以转化为对流量或流量变率的控制,从而减小线性化控制水位对渠段非恒定流描述的误差。控制容量法从字面上理解是控制渠段内水体的体积,然而在运行过程中控制水体的体积形态从未严格固定过,实际进行控制的一直都是渠段的槽蓄,转化为控制就是通过改变节制闸闸门开度来实现对过闸流量的调节。因此,采用对过闸流量或流量变率的监测和控制本质上和渠段等容积控制运行更为接近。

(2) 针对控制器的设计 对水力模型和控制器性能的掌握是控制系统设计的核心问题。模型的非线性和水力参数的动态多维性是控制器设计的难点,模型参数(糙率、水头损失等)是随渠段运行和扰动的改变而改变的,因此单输入单输出的经典控制理论所应用的参数时不变设计是不合适的,而完全基于历史运行数据而建立的人工智能网络等经验控制方法,针对大扰动或渠道运行模式的突变很难做出有效的控制。基于以上分析,笔者认为基于扰动控制的鲁棒设计方法具有更好的适用性,当然,状态空间法等鲁棒设计方法仍有改进的地方,例如:如何把经验控制和模型控制融合在一起,现在有些研究者将模糊控制融入到控制器设计中并取得不错的效果,这是一个尝试的方向。另外,专家智能决策能够根据目前渠段运行特性和水力参数做出有效的判断和调整,而且支持提供系统解决方案,遗传算法能够积累渠道运行经验使控制变的很简单,如何将其引入控制器设计,融入这种设计的控制是否具有好的适用性也待探讨。目前控制理论在渠道控制上的应用还在尝试阶段,要寻求一个实际水力模型和控制算法的最优搭配还有很长的路要走。

(3) 针对渠道运行模式 针对像南水北调这样的大规模长距离输水渠道,要保持水量的统一调配,系统控势必要采用中央监控模式。跨流域调水渠道跨越多行政地区、多地质结构、多地貌形态,同时由于水源地供水量以及其它受水区的需水量的不确定性,监控中心对整个渠道的每个渠段都采取同样的调度控制措施显然是不合适也是不现实的。笔者设想能否采取多层监控、分级控制,根据相关渠道水力特性和控制设备约束采用整数规划的方法对渠段进行划分和归类,对相似特性的渠段控制采用统一配置和运行方式,设置子监控中心对子渠系进行在线控制,这样可以最大的发挥渠段控制灵活性,可期望采用合适的调度和运行方式来解决冰期过渡带输水的困难。当然其中还存在很多问题,如:优化模型采用线性还是非线性,子渠段的动态调节过程控制是分步还是连续控制,控制目标是多目标好还是单目标好,从哪个级别上解决渠段之间的耦合等。

参考文献:

- [1] BURT C M. Overview of canal control concepts[A]. DARLL D Z. Symposium on planning, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery systems[C]. New York: ASCE, 1987. 81 - 109.
- [2] BUYALSKI C P, EHLER D G, FALVEY H T, *et al.* Canal systems automation manual[M]. Denver Colorado: US Bureau of Reclamation, 1991.
- [3] CLEMMENS A J, REHLOGLEJ A. Control of irrigation canal networks[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1989, 115 (1): 96 - 110.
- [4] 王长德,阮新建.南水北调中线总干渠控制运行设计[M]. 武汉:人民长江出版社,1999. (WANG Chang-de, Ruan Xin-jian. Operation and design for middle route South-to-North Water Transferring Project[M]. Wuhan: Yangtze River Press, 1999. (in Chinese))
- [5] 阮新建.渠道运行 GSM 算法及其适用条件[J]. 中国农村水利水电, 1999(5): 15 - 17. (RUAN Xin-jian. Solution method of the open channel operation GSM model and its applicability[J]. China Rural Water and Hydropower, 1999(5): 15 - 17. (in Chinese))
- [6] 吴泽宇,周 斌.南水北调中线渠道控制计算模型[J]. 人民长江, 2000, 31(5): 10 - 11. (WU Ze-yu, ZHOU Bin. Computation model for channel flow control of the middle route project for South-to-North Water Transfer[J]. Yangtze River, 2000, 31(5): 10 - 11. (in Chinese))

- [7] 李欣苓. 渠系的控制方法评价[J]. 水利水文自动化, 2002(1):5-6. (LI Xin-ling. Evaluation of control methods for canal system[J]. Automation in Water Resources and Hydrology, 2002(1):5-6. (in Chinese))
- [8] 周斌, 吴泽宇. 调水工程渠道运行控制方案设计[J]. 人民长江, 1999, 30(4):10-11. (ZHOU Bin, WU Ze-yu. Control design for water transfer channel[J]. Yangtze River, 1999, 30(4):10-11. (in Chinese))
- [9] 王长德, 阮新建. 南水北调中线总干渠控制运行设计[J]. 人民长江, 1999, 30(1):19-21. (WANG Chang-de, Ruan Xin-jian. Operation and design for middle route South-to-North Water Transferring Project[J]. Yangtze River, 1999, 30(1):19-21. (in Chinese))
- [10] 范杰, 王长德, 管光华, 等. 渠道非恒定流水力学响应研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1):55-60. (FAN Jie, WANG Chang-de, GUAN Guang-hu, et al. Study on the hydraulic reaction of unsteady flows in open channel[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1):55-60. (in Chinese))
- [11] 张礼卫, 王长德, 胡成胜. 水力自动控制渠系串联系统仿真模型研究[J]. 中国农村水利水电, 2006(1):56-59. (ZHANG Li-wei, WANG Chang-de, HU Cheng-sheng. Study on the simulation model of tandem of automatic water level control canal system[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(1):56-59. (in Chinese))
- [12] 张礼卫. 水力自动控制渠系动态过程与仿真研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2006. (ZHANG Li-wei. Dynamic process and simulation research of hydraulic automatic control canals[D]. Wuhan: Wuhan University, 2006. (in Chinese))
- [13] BUYALSKI C P, SERFOZO E A. Electronic filter level offset (EL-FLO) plus reset equipment for automatic control of canals[R]. Denver: Engineering Research Center, 1979.
- [14] 王长德, 柯善青, 冯晓波. P+PR 控制器用于比威尔算法[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(2):11-15. (WANG Chang-de, KE Shan-qing, FENG Xiao-bo. Using P+PR controller into Bival control algorithm for automatic operation of open channel[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2000, 33(2):11-15. (in Chinese))
- [15] CHEVEREAU G, SCHWARTZ-BENEZETH S. BIVAL system for downstream control[A]. DARELL D Z. Symposium on planning, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery systems[C]. New York: ASCE, 1987. 155-163.
- [16] 王长德, 柳树票, 崔玉炎, 等. 多渠段串联渠系 P+PR 控制[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(1):15-19. (WANG Chang-de, LIU Shu-piao, CUI Yu-yan, et al. P+PR algorithm for multireach canal systems[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2002, 35(1):15-19. (in Chinese))
- [17] 刘树票, 王长德, 崔玉炎, 等. 串联倒虹吸渠系的 P+PR 控制[J]. 中国农村水利水电, 2001(10):30-32. (LIU Shu-piao, WANG Chang-de, CUI Yu-yan, et al. P+PR algorithm control for multireach canal systems with inverted siphon in series[J]. China Rural Water and Hydropower, 2001(10):30-32. (in Chinese))
- [18] 范杰, 王长德, 崔巍, 等. 渠道运行系统中的模糊 PID 联合控制研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(4):59-62. (FAN Jie, WANG Chang-de, CUI Wei, et al. Fuzzy-PID combined control strategy for canal operation system[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(4):59-62. (in Chinese))
- [19] 王涛, 阮新建. 基于单神经元 PID 控制器在渠道自动控制中的应用[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(4):53-56. (WANG Tao, RUAN Xin-jian. Application of neural network PID controller for canal control system[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004, 21(4):53-56. (in Chinese))
- [20] 王长德, 郭华, 邹朝望, 等. 动态矩阵控制在渠道运行系统中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(3):6-18. (WANG Chang-de, GUO Hua, ZOU Chao-wang, et al. Application of dynamic matrix control to operation of canal system[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(3):6-18. (in Chinese))
- [21] 张劲松, 王长德, 刘丽珍. 水力自动溢流堰在自动调控渠系中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2003(4):32-34. (ZHANG Jin-song, WANG Chang-de, LIU Li-zhen. Application of hydraulic overflow weir in the automatic control of canal system[J]. China Rural Water and Hydropower, 2003(4):32-34. (in Chinese))
- [22] 尚涛. 渠道自动运行鲁棒控制的理论研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004. (SHANG Tao. Study on the robust control theory of canal automatic operation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [23] CORRIGA G, SANNA S, USAI G. Suboptimal level control of open channels[J]. Appl Math Modelling, 1983(7):262-267.
- [24] REDDY J M. Evaluation of optimal constant volume control for irrigation canals[J]. International Journal Applied Mathematics Modeling, 1990, 19(4):201-209.
- [25] REDDY J M, DIA A, OUSSOU A. Design of control algorithm for operation of irrigation canals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engi-

- neering, ASCE, 1992, 118(6):852 - 867.
- [26] REDDYJ M. Kalman filtering in the control of irrigation canals[J]. *International Journal Applied Mathematics Modeling*, 1995, 19(4):201 - 209.
- [27] LIU F, BERLAMONTJ, FEYEN J. Downstream control of multireach canal systems[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 1995, 121(2):179 - 190.
- [28] REDDYJ M. Design of global control algorithm for operation of irrigation canals[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 1996, 122(9):503 - 511.
- [29] REDDYJ M, JACQUOT R. Stochastic optimal and suboptimal control of irrigation canals[J]. *Water Resource Planning, Management*, 1999, 125(6):369 - 378.
- [30] 王念慎, 郭 军, 董兴林. 明渠瞬变最优等容量控制[J]. *水利学报*, 1989(12):12 - 20. (WANG Nian-shen, GUO Jun, DONG Xing-lin. Optimal constant-volume control for transient flow in open channels[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1989(12):12 - 20. (in Chinese))
- [31] 阮新建, 杨 芳, 王长德. 渠道运行控制数学模型及系统特性分析[J]. *灌溉排水*, 2002, 21(1):36 - 40. (RUAN Xin-jian, YANG Fang, WANG Chang-de. A mathematic model of canal operation control and its system property analysis[J]. *Irrigation and Drainage*, 2002, 21(1):36 - 40. (in Chinese))
- [32] 阮新建, 杨 芳. 渠道运行离散模型及最优控制[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(5):56 - 71. (RUAN Xin-jian, YANG Fang. The discrete-time model and optimal control in canal operation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(5):56 - 71. (in Chinese))
- [33] 阮新建, 王长德. 渠道运行最优控制与运行模拟仿真[J]. *人民长江*, 2003, 34(10):30 - 32. (RUAN Xin-jian, WANG Chang-de. Optimal control and operation simulation for canal system[J]. *Yangtze River*, 2003, 34(10):30 - 32. (in Chinese))
- [34] 阮新建. 带观测器的渠道控制系统设计与运行模拟仿真[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 33(3):66 - 69. (RUAN Xin-jian. Design and operation simulation of canal control system with state observer[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 33(3):66 - 69. (in Chinese))
- [35] 阮新建, 袁宏源, 王长德. 灌溉明渠自动控制设计方法研究[J]. *水利学报*, 2004(8):21 - 25. (RUAN Xin-jian, YUAN Hong-yuan, WANG Chang-de. Design of irrigation canal automatic control[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(8):21 - 25. (in Chinese))
- [36] 崔 巍, 王长德, 管光华, 等. 渠道运行管理自动化的多渠段模型预测控制[J]. *水利学报*, 2005, 36(8):1000 - 1006. (CUI Wei, WANG Chang-de, GUAN Guang-hua, *et al.* Model predicative control for automatic operation of canals[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(8):1000 - 1006. (in Chinese))
- [37] 刘青娥, 杨 芳. 渠道供水系统的神经网络控制模型研究[J]. *中国农村水利水电*, 2005(9):73 - 77. (LIU Qing-e, YANG Fang. Research on neural network control model in water supply canal system[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2005(9):73 - 77. (in Chinese))
- [38] 阮新建, 姜兆雄, 杨 芳. 渠道运行神经网络控制[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(1):114 - 118. (RUAN Xin-jian, JIANG Zhao-xiong, YANG Fang. Neural control of channel operation[J]. *Transaction of CSAE*, 2006, 22(1):114 - 118. (in Chinese))
- [39] 尚 涛, 安 宁, 刘 永. 渠道运行鲁棒控制的理论及其动态仿真研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2004, 37(2):78 - 84. (SHANG Tao, AN Ning, LIU Yong. Research on theory and dynamic simulation of robust control for channel automatic operation[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2004, 37(2):78 - 84. (in Chinese))
- [40] 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):1379 - 1391. (GUAN Guang-hua, WANG Chang-de, FAN Jie, *et al.* Application of robust controller in automatic control of multi-section channel system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(11):1379 - 1391. (in Chinese))
- [41] 尚毅梓, 吴保生. 多渠段渠道自动控制系统的稳定控制[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2008, 48(6):967 - 971. (SHANG Yi-zi, WU Bao-sheng. Performance analysis and stability control for multireach canals[J]. *J of Tsinghua University Science and Technology*, 2008, 48(6):967 - 971. (in Chinese))
- [42] 尚 涛, 安 宁, 王长德. 基于 BP 网络的水资源预测方法的研究[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2002, 36(4):455 - 458. (SHANG Tao, AN Ning, WANG Chang-de. Research on the forecast methods of water resource based on BP network[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Science)*, 2002, 36(4):455 - 458. (in Chinese))
- [43] 秦 亮, 练继建, 万五一. 长距离输水系统的神经网络模型研究[J]. *水利水电技术*, 2003, 34(9):1 - 4. (QIN Liang, LIAN Ji-jian, WAN Wu-yi. Study on Artificial Neural Network Models of Long-distance Water Supply System[J]. *Water Resources and Hydropower En-*

- gineering, 2003, 34(9) :1 - 4. (in Chinese))
- [44] 安 宁. 渠道运行广义预测控制技术及其仿真[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(3) :4 - 6. (AN Ning. Generalized predicative control model and simulating for canals[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(3) :4 - 6. (in Chinese))
- [45] 杨 桦, 王长德, 冯晓波. 模糊控制在渠道运行系统中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(1) :45 - 49. (YANG Hua, WANG Chang-de, FENG Xiao-bo. Application of fuzzy control to canal operation systems[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(1) :45 - 49. (in Chinese))
- [46] 杨 桦, 王长德, 范 杰, 等. 多渠段串联渠系运行模糊控制[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(2) :58 - 61. (YANG Hua, WANG Chang-de, FAN Jie, *et al.* Application of fuzzy control to multireach canal system[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(2) :58 - 61. (in Chinese))
- [47] 崔 巍, 王长德, 管光华, 等. 渠道运行自调整模糊控制系统设计与仿真[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(1) :104 - 116. (CUI Wei, WANG Chang-de, GUAN Guang-hua, *et al.* Adaptive fuzzy control strategy for canal system[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(1) :104 - 116. (in Chinese))
- [48] 王长德, 姚 雄, 李长菁. 分层模糊控制器在渠道运行系统中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(1) :1 - 4. (WANG Chang-de, YAO Xiong, LI Chang-jing. Application of layered fuzzy controller to canal system[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(1) :1 - 4. (in Chinese))
- [49] WILLIAM W G, LENOARD B, DOUGLAS T. Central arizona project :operations model[J]. Journal of the Water Resources Planning and Management Division, ASCE, 1980(7) : 521 - 540.
- [50] 范 杰, 王长德, 管光华, 等. 美国中亚利桑那调水工程自动化运行控制系统[J]. 人民长江, 2006, 37(2) :4 - 5, 58. (FAN Jie, WANG Chang-de, GUAN Guang-hua, *et al.* Automatic canal control system in Arizona[J]. Yangtze River, 2006, 37(2) :4 - 5, 58. (in Chinese))
- [51] 韩延成, 高学平. 长距离自流型渠道输水控制的二步法研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(3) :414 - 418. (HAN Yang-cheng, GAO Xue-ping. Two-step optimal operation and control method for long distance gravity-flow delivery in canals[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(3) :414 - 418. (in Chinese))
- [52] 韩延成, 高学平. 长距离调水工程最优控制数学模型[J]. 水利水电技术, 2006, 36(10) :62 - 66. (HAN Yan-cheng, GAO Xue-ping. Mathematic model for optimal control of long distance water transfer project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 36(10) :62 - 66. (in Chinese))

Automatic canal control system and its operation and design^{*}

WU Bao-sheng¹, SHANG Yi-zi¹, CUI Xing-hua², CHEN Zhi-yuan³

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. National CIMS Engineering Research Center, Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Center for Intelligent and Networked Systems, Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract : The automatic canal control system based on the water level and discharge of a canal can greatly improve the operation and the water use efficiency, and reduce the operation costs. This paper introduces systematically the canal control theory and the concept of automation. A brief review on the studies of the complex long-distance water transfer projects in recent years is provided, and the problems in the literature and possible ways of improvement in the operation are discussed. The control scheme is investigated from the viewpoint of the multi-input multi-output of the system, the nonlinear model, and the stochastic disturbance. The future study in the fields of canal operation mode, control algorithm, and gate control scheme is suggested.

Key words : canal; automatic control; conveyance channel operation method; control algorithm

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50221903).