渠道输水系统自动化控制技术研究

水力学研究所　崔 巍、陈文学、穆祥鹏

1 调研背景概述

渠道是调水工程和农业灌溉排水系统用于输水配水的主要工程结构形式，与管道相比较，它具有结构简单、成本低廉、维护方便等优点，因而在世界范围内得到广泛应用。渠道输水系统自动化控制技术（简称渠系自动化技术）是自动控制技术与明渠水力学的有机结合，通过按照一定的规则控制闸门、分水口、泵站等渠系设备，根据用户的要求适时、适量地供水，减少工程建设费用，避免水量浪费，降低运行管理成本，从而实现渠道输水系统高效、经济地运行。

国外渠系自动化技术的研究始于 20 世纪 30 年代，由法国 Neyrpic 公司研制出一系列的水力自动闸门和自动化装备开始。其研制的水力自动闸门（Avis/Avio 闸门）许多仍在运行中。二战之后，国外进一步发展了利用电气控制的渠系自动化控制设备，充分利用了电气讯号传输速度快的特点，提出了一些新的控制方式，并发展了相应的数学模拟技术，如美国垦务局开发的 Little-Man Golvin 控制器等。20 世纪 60 年代后，随着科学技术的飞速发展，尤其是通讯、电子技术的飞跃及计算机技术的广泛应用，提出了一些渠系控制算法并编写了相应的软件程序，并开发建设中央自动监控的灌溉系统，其中比较著名的有法国的普洛旺斯灌区、美国的“加利福尼亚输水道”工程等。有些渠系的控制工程已做到无人看管，达到了很高的现代化管理水平。一些专业的渠系自动化监控系统，如美国的 SacMan、澳大利亚的 TCC（Total Channel Control）、法国的 SIC（Simulation of Irrigation Canals）等正在朝商业化应用发展。

国内渠系自动化技术的研究与应用较为滞后。20 世纪 70 年代起，一些灌区开始装备水力自动闸门，在湖南、湖北、广东的部分灌区得到实验应用。近年来随着大量调水工程的兴建，先进的信息化监控技术得以应用。如引滦入津工程于 2002 年开始管理信息系统的建设，引黄济青工程于 2003 年实现了部分计算机监控，景泰川调水工程于 2005 年完成了调水工程的信息化建设，北疆调水工程于 2000 年实现了信

息化管理，计划于2014年建成通水的南水北调中线工程设计采用以闸前常水位运行方式为主的自动控制方式。整体看来，国内调水工程的自动化更多体现在硬件水平和办公信息化方面，多数还未引入渠系控制算法，距离真正意义的渠道运行控制自动化还要相当一段距离。

渠道输水是个复杂的非恒定流水力过渡过程，需要在满足各类运行约束条件下，应对一系列控制难题。其中主要的运行约束条件包括：将水位维持在设定的上下界限之间，以防渠堤漫溢；将渠道的水位变化速度限制在一定的范围内，以防渠道衬砌的损坏；将闸门的开启速度和变幅限制在一定范围之内，减少闸门的操作，避免损坏；优化泵站机组的运行方式，以减少能耗和维护费用，适应维护计划等。从渠道运行控制的角度看，渠道运行控制需应对的控制难题有：

（1）强非线性问题。描述明渠非恒定水流运动的圣维南方程组是双曲型非线性偏微分方程组，渠道上的闸门、分水口、堰等结构的水力关系也都是非线性的。强非线性对渠道控制模型的构建、堰流孔流分界点计算等提出了难题。非线性还增加了闸门控制算法参数鲁棒性的要求，需要保证控制系统在不同工况下具有一定的稳定性和精确度。

（2）强扰动问题。渠道运行过程存在各种来自系统内外的已知和未知的扰动，如分水口流量变化、闸门启闭、风浪、局部暴雨、操作失误等，使渠道控制指标偏离目标值，渠内流量水位波动，影响系统的稳定性和分水计划的实现，严重时可能会影响输水系统的运行安全。闸门控制算法作为渠道运行控制系统的核心部分，应能够快速有效应对各种扰动对渠道系统的影响，在满足金属结构和机电设备控制要求的前提下，尽量降低操作成本。

（3）强耦合问题。当渠道由闸门群控制时，存在着闸门控制作用的相互耦合的问题。单个闸门的操作，会引发相邻多个渠池内水位流量的变化，当有多个闸门参与操作时，它们的控制作用会彼此影响，相互叠加，使系统的水力响应特性变得十分复杂。耦合作用会增加控制器参数的整定难度，并可能恶化控制器的控制性能。耦合作用还会带来不必要的闸门操作，引发水面持续波动，使控制系统长时间难以稳定，增加渠道运行维护成本。在某些工况下，耦合作用甚至会引发水位误差逐渠池放大，水面发生持续振荡，导致堤岸破坏事故，严重影响工程的安全运行。

（4）大滞后问题。与管道相比，渠道控制过程存在严重的时间滞后。渠道水流

通常为明渠非恒定流，以浅水波的形式运动，流速通常只有数米每秒，下游响应滞后于上游变化。以我国在建的南水北调中线工程为例，其干渠长约 1270 公里，若采用自流方式，水从丹江口水库到达北京需两周左右，供给严重滞后于需求。因此需要研究主动的控制方法，保证适时适量供水。当前，渠道输水系统自动化控制技术的研究进展，主要集中在控制过程仿真和模型试验、渠道控制建模、闸门控制算法、闸门群控制技术等方面。针对具体的工程，需根据其结构特点、运行性能要求、约束条件等，选定最适合的运行方式，在此基础上，进一步开展控制建模、闸门控制算法设计、控制参数整定与优化等工作。对于某些工程，可能还存在多种运行方式同时并存、多种闸门控制算法切换等问题。对于高纬度、高海拔地区的调水工程，可能还存在的冰期输水问题，需结合冰水力学理论和特定的运行控制约束条件，确定运行控制技术。

2 选择本专题进行调研的原因、必要性及意义

实现渠道运行自动控制，是提高调水工程输配水效率，保障输水安全的重要措施。水资源的紧缺使得我国城市用水的矛盾越来越突出，干旱缺水越来越成为制约社会经济发展的瓶颈之一，跨流域调水将成为 21 世纪中国水利的一大特点。据统计，我国 669 座城市中有 400 座供水不足，110 座严重缺水（杨立信，2003）。随着我国城市化进程的加快，通过跨地区、跨流域的调水工程解决城市用水的要求日益迫切。当前我国的供水工程供水方式还处于计划供水、人工控制的阶段，由渠首按计划引入流量，流量的变化由渠首控制，这一流量变化以波动的形式从上游传到下游。这种运行控制方式实质上是一种上游运行方式，在运行上缺乏必要的灵活性，难以作到适时、适量供水，或导致供水不足，或导致渠道弃水。

实现渠道运行自动控制，是实现节水农业的迫切要求，是灌区现代化管理的重要内容。我国的人均水资源拥有量居世界第 109 位，水资源严重短缺。在我国农业用水占总用水量的 80%以上，渠系是其主要的输水方式。目前灌溉系统采用的仍然是传统的劳动密集型管理方式，其供水方式多为人工控制的方式，存在不少弊端，表现在（1）大多采用人工操作，操作笨拙，信息传递、反应极为缓慢，需要大量有经验的操作、管理人员，年运行费用高；（2）水量难于准确控制，容易造成经常出现大量弃水或供水不足的现象；（3）水资源利用率低，浪费严重；

（4）易产生环境问题，如土壤盐碱化和土壤板结等；（5）管理上人为因素多，以及由于水量供应的不及时、不合理和不公平，农民相互间及农民与灌区管理机构间易产生纠纷。

渠道运行自动化与传统的方法相比具有如下优点：（1）对渠系流量的经常变化可以作出迅速反应；（2）可根据分水计划实现灵活调度；（3）渠道流量可以天或小时为时段调节，以适应渠侧出水口配水量变化；（4）对突发的或没有预报的渠侧配水量的变化或暴雨形成的洪水流入渠道做出及时响应。因此，渠系运行自动化控制是调水工程安全高效输水的重要保障，是农业现代化的重要标志，选择本专题调研，具有十分重大的现实意义。

3 近年该专题发展新动向和值得关注点

3.1 本专题发展的新方向和值得关注点

3.1.1 明渠系统控制建模

渠道系统控制模型是分析其控制与响应特性、设计控制算法的基础。自上世纪30 年代起，国外学者基于明渠非恒定流数学模型，应用数值分析方法、自动控制原理、计算机控制技术等，开发出多种渠道运行控制模型。然而受建模方法、模型精度、应用成本等因素影响，目前只有少数控制模型应用于工程实践。国内在该领域的研究相对滞后，近年来随着引黄济青、南水北调中线等调水工程的兴建，虽然加强了科研投入，但主要是跟踪国外已有研究成果，取得的原创性成果还较少。

渠道控制建模主要采用两类方法，一类是机理分析法，以圣维南方程组为基础，通过线性化、离散化、拉氏变化等数学处理，导出控制模型；另一类是试验建模方法，也称为系统辨识，利用模拟仿真、模型试验或原型观测数据，构建黑箱灰箱控制模型。Malaterre 在 1998 年曾对已有的渠道运行控制模型进行了全面的总结，包括圣维南方程组反演模型、线性圣维南方程组模型、无限阶线性传递函数模型、有限阶非线性模型、有限阶线性状态空间模型等。经过十余年的发展，随着科技水平的进步和渠道运行控制需求的更新，许多模型得到了改进与提高，呈现出新的特点和发展方向。根据它们采用的建模方法与模型的特点，主要分为以下四类。

（1）非线性圣维南方程组模型

该类模型为非线性模型，通过离散处理圣维南方程组导出，能够准确表现渠道水流的非线性特性，多用于反演计算（model inversion）和开环控制。代表性的有Wylie（1969）提出的 Gate Stroking 模型，Fubo Liu（1998）提出的 CLIS 模型等。2004年 Bautista 在 Gate Stroking 原理基础上提出了 Volume-compensation 方法，该方法被证明是简单、有效且鲁棒的，可用来拟定渠道的闸门操作计划，目前在美国盐河工程上进行测试研究。

由于非线性圣维南方程组模型的数学推导较为复杂，在许多工况下无解或解不收敛，也不便于使用控制理论分析系统的鲁棒性、稳定性等控制特性，更多的学者将圣维南方程组线性化，导出控制模型，运用丰富的线性控制工具分析系统的控制特性，设计控制算法。当前非线性圣维南方程组模型的研究与应用较少。目前尚没有其用于渠道闭环控制的报道。

（2）线性圣维南方程组模型

该类模型采用在工作点附近线性化处理圣维南方程组的方式导出，常用的是状态空间模型。该类模型在上世纪末研究较多，学者们运用现代控制论、智能控制论的控制原理，对渠道的可控制、可观测性、稳定鲁棒性进行分析，设计渠道集中控制算法。代表性的模型如 Malaterre（1997）、Reddy（1999）使用有限差分格式线性化处理圣维南方程组得到的集中式状态空间模型，Durdu（2005）应用优化模糊估计理论设计状态观测器，并在闸前常水位运行方式下进行了仿真，结果表明所设计状态观测器在稳定性、简易性方面都优于 Kalman 状态观测器。

该类模型多以整个渠道为单元建模，便于从整体上分析渠道的控制特性，处理渠池间的耦合关系，实现优化求解。但对于大型渠道，状态矩阵将十分庞大，对计算、存储要求较高，难以做到实时优化与控制。受模型建模过程复杂、计算量偏大等缺点限制，该类模型近年来的研究相对较少。

（3）简化圣维南方程组模型

该类模型以圣维南方程组为基础，通过简化或忽略次要的水力因素进行建模。常见的处理方法是将圣维南方程组线性化和拉氏变换，在频域内分析渠池的主要特征并对模型做简化处理。早期 Corriga 等（1989）、Ermolin（1992）的模型都属此类。也有学者基于 Hayami 模型、扩散波模型进行控制建模，这些模型是圣维南方程组在

某些工况下的简化。相比较而言，近年来出现的简化模型在适用范围、模型精度等方面有了较大提高。以 Schuurmanns（1995）提出的积分滞后（ID）模型和 Litrico 和 Fromion（2004,2005,2007）改进的积分滞后零阶（IDZ）模型为代表。

简化圣维南方程组模型成为近年来的研究热点。该类模型多以渠池为建模单元，具有结构简单，计算量较小，便于实施分布控制等优势，但其在模型精度、适用范围等方面仍需进一步提高。近年来一些学者尝试以该类模型为基础，推导线性状态空间模型，开展渠道的集中控制算法研究。

（4）基于辨识的黑箱灰箱模型

受渠道水流运动的复杂性，以及渠道物理参数变化、量测误差、未知扰动等因素的影响，完全基于圣维南方程组推导渠道控制模型比较困难和复杂，而随着渠道参数的变化（如糙率等），所建模型的精度会在渠道运行一段时间后出现偏差，因此一些学者提出运用系统辨识技术建立渠道运行黑箱灰箱模型。代表性的有 Sawadogo 等（2000）、Rodellar 等（2003）应用 Auto-Regressive Integrated with eXogenous input（ARIX）和 Auto-Regressive Integrated Moving Average with eXogenous Input（ARIMAX）模型构建的渠道控制黑箱模型。

基于辨识的黑箱灰箱模型近年来发展较快，所建渠道控制模型已能达到较高精度，且模型结构相对简单，适用于自适应控制。由于黑箱灰箱模型不便于分析系统的控制特性，且系统辨识的成本还较高，辨识过程也较为复杂，仍待进一步发展。

3.1.2 渠道控制算法

渠道的控制算法是根据输入水位、闸门开度等可测量或预估的参数，按照一定的规则进行逻辑和数值运算处理，并产生闸门运动等输出的过程。典型的控制算法可表示为一系列的数学方程，通过计算机来完成。渠道控制算法的研究已有数十年历史，根据这些算法使用的控制技术，可分为单变量启发式控制、PID 控制、预测控制、模糊控制、非线性模型反问题控制、最优控制、鲁棒控制等类别。进入二十世纪，渠道控制算法的研究进展主要集中在 PI 控制、预测控制、鲁棒控制和最优控制几类。

（1）PID 类控制算法

PID 类算法属于经典反馈控制算法，具有结构简单、稳定性好、工作可靠、调整

方便等优点，在各种算法中应用最广。近年来随着渠道规模不断增大，对控制性能的要求越来越高，传统的 PID 类控制算法需要加入前馈、解耦、滤波等环节。针对大型渠道系统的集中式 PID 控制研究开始增多，但其复杂的建模和计算过程使得许多学者更青睐对分布式 PID 控制算法的改进上。

Schuurmans（1999）提出了一种流量控制与闸门控制相结合的分布式 PI 控制算法，其参数可基于 ID 简化模型方便地进行整定。Malaterre（1999）研究了优化方法整定分布式 PI 控制算法。Seatzu（2002）将状态反馈对角矩阵和 H_2 最小范数用于分布式 P 和 PI 控制算法研究。Van Overloop 等（2005）研究了多模型优化方法的分布式 PI 控制器，并在美国 Umatilla Stanfield Branch Furnish 渠道为对象进行了仿真测试。

上述研究均属分布式 PI 控制算法，而理论上渠道为多输入多输出系统，因而集中式 PI 控制算法更为合适有效。不过受集中控制模型建模复杂、参数整定困难等因素影响，该方向开展的研究较少。Clemmens 和 Schuurmans（2004）基于 ID 简化模型建立渠道状态空间模型，构建 LQR 目标方程。仿真结果表明，完全集中式控制以及仅考虑上游所有渠池和下游相邻渠池信息的分布式控制效果最好。Montazar 等（2005）以印度 Narmada 渠道为对象，建立 ID 简化模型，研究了集中式 PI 控制算法。

国内针对 PI 控制算法开展了较多的理论研究，在利用模糊控制、神经网络等新兴理论整定控制参数方面取得一些成果，但在大型渠道控制参数的整定方面成果还较少，一些结论有待物理模型及工程实践检验。崔巍（2005）研究了渠道自调整模糊 PI 控制算法；范杰（2003）利用权函数研究 PID 控制与模糊控制的联合作用；韩延成（2007）将小脑模型神经网络 CMAC 的原理与 PID 控制相结合，应用于渠道控制。上述研究成果仅进行了单渠池仿真测试。王长德、柳树票（2001）研究了等体积运行方式下的 P+PR 控制算法，探讨了串联倒虹吸的处理问题；姚雄（2008）研究了闸前常水位运行渠道主动流量补偿前馈方法。崔巍针对闸前常水位运行方式特点，提出了“PI 串级反馈控制＋主动蓄量补偿前馈控制＋解耦”的控制算法。

（2）最优控制算法

渠道最优控制算法是以渠道系统性能指标（通常是水位波动和闸门操作量的加权函数）最优为求解目标的反馈控制算法，在上世纪 90 年代一度成为研究热点，主要用于渠道集中控制方式研究。该算法使用状态空间模型，针对整个渠道建模，因

而理论上其控制效果优于分布式控制算法，然而受状态空间模型建模复杂、计算存储要求高等因素影响，尚未见到工程应用实例，近年所受关注大大减少。该类控制算法主要是线性二次最优控制算法和线性二次调节器算法。

Malaterre（1998）研究了渠道线性二次最优控制算法。该算法具有模型状态变量和矩阵规模大的缺点，且仅能用于缓流渠道。Reddy 和 Jacquot（1999）应用线性二次最优控制理论开发了比例积分控制算法，发现在等体积控制方式下，当地控制算法同集中控制算法性能接近，而在常水位运行方式下，当地控制算法性能明显下降。Durdu（2005）采用模糊控制方法，为线性 LQG 控制算法开发了状态观测器，并与传统的 Kalman 观测器进行了比较，结果表明其状态观测器具有更好的稳定性，且容易实现。

国内在该方向以理论研究为主，上世纪八十年代末中国水利水电科学研究院曾以引黄济青渠道为对象，开展了最优控制算法理论与试验研究（郭军，1988；王念慎，1989），但受多种因素限制，未进行工程测试。近些年国内研究者跟踪国外进展，陆续开展了些理论探讨工作，但未见新的物理模型试验或工程应用报道。阮新建（2002）基于有限差分格式推导出渠道的状态空间模型，设计了渠道二次最优控制算法及 Kalman 观测器，分析了渠道的可控性可观测性等特性；阮新建（2003）还研究了渠道离散状态空间模型，设计出离散时间系统的最优控制算法，使其更为实用。崔巍（2007）尝试应用最优控制理论，研究调水工程中的时间滞后和耦合问题。通过建立渠道运行二次性能指标，求解出闸门最优调度方案。

（3）模型预测控制算法

受渠道水流运动特性影响，精确地建立渠道运行控制模型较为困难，因而近些年发展起来模型预测控制算法逐渐成为研究的热点之一。在工业界，模型预测控制算法是除 PID 外应用最广的控制算法。近年来，渠道预测控制算法研究主要集中在约束预测控制、线性化圣维南方程组模型预测控制、自适应预测控制等方面。研究以理论分析和数值仿真为主，部分成果在试验渠道上进行了测试，但尚未见到工程应用（2007）。

多位学者开展了分布式预测控制算法研究。Gómez 等（2002）采用 Muskingum 模型和蓄量模型预测各渠池水流的动态变化。Akouz 等（1998）研究了渠道广义预测控制算法（GPC），检验其在克服渠道系统时间滞后和非线性影响方面的效果。Rivas

等学者（2002）开展了自适应预测控制算法研究。

Malaterre 和 Rodellar（1997）开展了渠道集中预测控制算法研究。他们采用 Preissmann 格式将圣维南方程组线性化处理，得到线性状态空间模型，并设计了 Kalman 观测器。研究表明随着预测时域的增大，控制算法作用范围随之扩大，由当地控制向集中控制过渡。

部分学者在研究中考虑了执行机构和渠道运行过程的约束条件。Rodellar 等（2003)研究了包含闸门最大开度、闸门运动速度等约束条件的预测控制算法。Wahlin（2004）研究了约束条件对模型预测控制算法性能的影响，表明模型预测控制能够达到与集中 PI 控制相当的控制效果，但加入闸门运动约束条件后性能下降明显。

国内对模型预测控制算法的研究以模拟仿真为主，个别进行了试验测试，研究对象涵盖了常见的多种预测控制算法。王长德、郭华（2005）研究了等体积运行单渠池的动态矩阵控制算法；安宁（2003）研究了基于参数模型的广义预测控制算法，在一小型试验装置上进行了测试；崔巍（2005）尝试将模型预测控制算法应用于多渠池控制，从圣维南方程组中导出状态空间离散模型；范杰（2006）采用系统辨识方法建立了渠道内模控制模型，与 PID 控制相结合形成复合控制系统。

（4）鲁棒控制算法。

渠道几何参数的误差、工作区变动、风浪扰动等因素都会导致渠道数学模型存在不确定性。利用鲁棒控制理论，可以设计出固定不变的控制器，并维持一定的控制品质，包括系统仍相当稳定，动态性能满足要求，外加干扰的影响有限等。虽然鲁棒性问题近些年来受到较多的关注，但针对渠道开发出的鲁棒控制算法还较少。

Litrico 和 Georges （1999）研究了两种渠道鲁棒控制算法，分别是史密斯鲁棒预测控制算法和鲁棒极点配置控制算法。Litrico（2001）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。仿真结果表明，鲁棒控制效果明显优于过去采用的半人工控制方式。除了开发鲁棒控制算法，许多学者（Seatzu，1999；Litrico，2007）应用鲁棒控制理论于各种控制器的设计与参数整定方面。

国内近些年较为重视鲁棒控制算法的研究，取得了不少成果，但所开发算法距离实际应用还有一定差距。管光华（2005）研究了鲁棒控制算法线性矩阵不等式设计方法；管光华（2008）还研究了渠道状态空间模型不确定性的描述与度量，将线性化模型作为标称模型，得出模型不确定性的定量描述。尚毅梓、吴保生等（2008）

基于状态空间模型频率设计方法，完成了串联多渠池渠段自适应控制算法的设计和测试。尚毅梓、吴保生等（2009）研究了基于有限状态空间模型的鲁棒控制算法，具有良好的波动抑制能力。

3.1.3 渠道控制解耦

渠道运行过程中，存在着闸门的控制作用相互耦合的问题。单个闸门的操作，会引发相邻多个渠池内水位流量的变化，当有多个闸门参与操作时，它们的控制作用会相互叠加，彼此影响，使总的水力响应特性变得十分复杂。耦合作用会增加控制器参数的整定难度，并可能恶化控制器的控制性能。耦合作用还会带来不必要的闸门操作，引发水面持续波动，使控制系统长时间难以稳定，增加渠道运行维护成本。在某些工况下，耦合作用甚至会引发水位误差逐渠池放大，水面发生持续振荡，导致堤岸破坏事故，严重影响工程的安全运行（Schuurmans，1997）。

早期的渠道规模不大，主要采用就地自动控制方式，人们对耦合问题认识不深，开发的闸门控制算法都未加入解耦处理。上世纪 70 年代，美国加利福尼亚输水道、中亚利桑那调水工程等大型输水工程建成，采用了先进的中央监控控制方式。受当时计算机硬件条件所限，解耦算法的开发以明渠恒定流计算为主，非恒定流计算为辅，采用的是流量、蓄量补偿的方式。进入上世纪 90 年代，随着现代控制论、预测控制论等控制理论的发展，许多学者将其应用于闸门控制算法的研究。这一时期代表性的闸门控制算法有线性二次调节算法（LQR）、线性二次高斯调节算法（LQG）和模型预测控制算法（MPC）等。这些算法针对整个渠道建模，闸门按内部边界条件处理，通过更改模型矩阵中特定位置元素的值，就可以对渠道进行解耦（Malaterre P.，1998）。由于建模复杂、模型精度要求高、计算量大，这类控制算法及解耦技术尚未应用于工程实际（A. J. Clemmens，1999）。

近年来，数据采集与监视控制系统（SCADA）开始广泛应用于渠道控制中，闸门控制算法随之呈现出“决策集中、控制分散”的发展趋势。为便于工程应用，这些算法力求简单、实用，常以简化控制模型（Schuurmans，1995；Litrico，2004）（以 Integral Delay 模型为代表）为基础，并采用比例积分（PI）控制算法。许多学者对此类闸门控制算法的解耦问题进行了研究。Schuurmans（1992）通过分析渠道的传递函数模型，发现渠池间存在或强或弱的耦合关系，但他并未给出衡量耦合严重程

度的指标。通过仿真他发现前馈补偿可以在一定程度上降低耦合作用，并设计了Decoupler 1 和 Decoupler 2 两个解耦算法，分别用于上、下游方向的解耦。Schuurmans 提出的解耦方法受到多位学者关注，Clemmens（1994）和 Wahlin（2002）分别在不同渠道上对上述算法进行了测试，证明解耦作用明显，但同时发现 Schuurmans 推荐的解耦系数并不通用，需重新选取。他们以及后来的学者都使用试错法，根据数值仿真效果的比对进行参数寻优，试错方法虽然有效却比较繁琐和费时。Clemmens 和 Wahlin 还发现加入解耦算法后原有控制器有偏于不稳定的趋势，主要表现在水位过程不再平滑。他们通过调整解耦系数控制了这种失稳趋势，但并未从机理上作深入的分析与探讨。Schuurmans 的解耦方法在上游方向比较有效，下游方向则不太理想。为此 Deltour（1998）、Acharya（1999）等学者尝试采用了新的解耦途径，即在 Schuurmanns 方法的基础上将闸门算法变换为闸门流量算法，通过增设流量控制器，降低下游方向的耦合作用。然而该方法的解耦效果很大程度上依赖流量控制器的精度，且结构相对复杂，有待深入研究。

国内对闸门控制算法及耦合问题的研究相对较晚，较多是跟踪国外研究进展。王长德、阮新建等（2004,2005）运用模糊神经网络、鲁棒控制、最优控制等理论，研究渠道控制模型和多闸门控制算法；郭军、王念慎等（1998）以引黄济青渠道为对象，基于 Corriga.G 推导的状态空间模型，采用数值仿真和物理模型试验的手段研究了等容量运行闸门控制算法；崔巍（2005,2006）基于最优控制理论研究了二次最优闸门控制算法，并尝试采用预测控制理论解决渠道运行中存在的耦合、大滞后问题。上述学者从多输入多输出控制系统的角度研究控制算法，研究方法有助于分析控制回路间的耦合机理，但由于模型结构比较复杂且没有考虑控制约束的影响，研究成果有待进一步完善。吕宏兴（2002）研究了渠道闸门调控过程中的非恒定流问题；韩延成（2006）基于小脑神经网络理论研究了具有自调整能力的、稳定的 PID 渠道输水控制器；方神光、吴保生（2007）通过非恒定流数值仿真，就闸门时序控制算法进行了探讨；刘德有、吴泽宇（2006）提出了调度区间的概念，研究了最优限水位实时控制原理及设计。但是，这些研究很少涉及闸门控制的耦合问题。

3.1.4 渠道控制参数整定

对于明渠输水工程，控制参数整定是其控制系统设计的核心内容之一。由于渠

道的糙率、断面尺寸、闸门过流系数等参数均存在不确定性，而且随着季节轮换、泥沙淤积、水草生长，这些参数均在不断变化中。因此，控制参数的整定十分关键，直接关系着控制性能和渠道运行安全。不佳的控制参数会导致水力过渡时间变长，水位流量波动增大，甚至出现持续振荡，发生漫堤垮堤事故。在渠道控制领域，绝大多数应用的控制算法是 PI 算法（Burt，2004），具有结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便等优点。近年来其参数整定主要在以下方面取得进展。

（1）经验试算法（trial-and-error）。

该方法属于简单的经验方法，多用于简单的小型渠道的控制系统。该方法不依赖于渠道的数学模型，而是利用仿真软件（如 CanalCAD、SIC 等），依照设定的性能指标，如水位超调最小、稳定历时最短等，通过大量的测试，整定出最佳控制参数。ELFLO + RESET 算法的参数整定即是如此，以水位波动的大小为指标，依靠工程师的经验仿真确定（Buyalski，1979）。Wahlin（2004）在 ASCE test canal 1 上研究 PI 和 PI+解耦算法时，采用的是类同的手动整定方法。Burt（1998）在整定 Highline 渠道控制参数时，先是确定比例、积分系数的合理取值范围，然后逐对扫描寻找出最优组合；崔巍（2005）尝试引入模糊控制理论，根据水位偏差和水位偏差变化率的实时变化趋势，整定 PI 控制参数；韩延成（2007）尝试将小脑模型神经网络 CMAC 的原理应用于 PI 控制参数的自适应学习与整定。

（2）理论计算整定法。

该方法属于传统的主流的整定方法，基于渠道的数学模型（包括辨识模型），利用根轨迹法、频率特性法、衰减频率特性法等自动控制理论进行整定，自动控制领域的方法基本都得到了应用。Schuurmans（1999）基于圣维南方程组导出积分滞后模型（ID 模型）及其传递函数，在频域内设定相位裕度与增益裕量，进行 PI 算法参数整定。Overloop（2005）基于 ID 模型，以水位偏差与闸门操作量为性能指标，采用多模型优化法整定 PI 控制参数。该方法的优点是可适应大范围的工况变化，缺点是计算时间长，且求解可能出现困难。Seatzu（1999）基于圣维南方程组导出渠道状态空间模型，将状态反馈对角矩阵和 H2 最小范数用于 PI 控制参数整定。Litrico 和 Fromion（2006）基于渠道积分滞后零阶模型（IDZ 模型），应用鲁棒控制理论，提出可设定相位裕度与增益裕量的 PI 控制参数整定方法。Weyer（2002）采用系统辨识的方式得到 Haughton 渠道的一阶非线性模型，采用频域特性法整定 PI 控制参数。由

于采用人工整定方式，较为费时。Su Ki Ooi（2008）采用数值仿真与系统辨识相结合的方式，得到渠道的一阶非线性模型，根据设定的相位裕度与增益裕量进行 PI 控制参数整定。由于在多个环节引入了经验公式，其整定效率较高。范杰（2006）基于渠道内模控制模型，采用神经网络方法优化整定 PI 控制参数。

（3）在线整定法

在线整定法近年来受到广泛关注，法国 Cemagref 在该领域居领先地位，部分成果已经嵌入 SCI 监控软件系统。该类方法属于理论基础上通过实践总结出来，试验与整定公式相结合的方法。一般包括两个内容, 一是过程特性的获取, 二是整定公式的计算。一般说来, 需要在线试验获取过程的特性，而整定公式的计算在线离线均可。常用试验方法有连续循环法、继电反馈法、阶跃测试法等，常用整定公式如 Ziegler-Nichols 公式、Astrom-Hagglung 公式等。Xianshu Piao（2005）采用了数值模拟方式，利用连续循环法获取渠道的谐振峰值和谐振频率特性，结合 Schuurmans（1999）的方法整定参数。Litroco（2007）采用 Auto-tune Variation 法辨识渠道 ID 模型，并在线整定 PID 类控制算法参数。

3.1.5 冰期渠道运行控制研究

冰盖下输水是高纬度地区渠道冰期运行的主要方式，通过形成稳定冰盖，让水体与大气隔离，使输水在冰盖下完成。近些年，随着高纬度地区大型长距离调水工程的兴建，冰期渠道的运行控制越来越受到人们的重视。在冰盖形成期和开河期，冰情演变所引起的渠道阻力变化会引起渠池输水流量和水位发生大幅变化，若不加以控制，则无法保证冰盖稳定，严重时将导致渠池冰盖破碎，引发冰害。因此，在冰盖形成及消融过程中, 采取合理的运行方式和水力控制措施，使渠道中的各节制闸、泵站根据冰情和水情进行水位、流量的调控，保证冰盖的稳定和用户分水计划的实施，是实现渠道冰期安全运行的关键，也是管理人员非常关心的重要问题。

随着冰水力学理论的发展，以及河流、渠道冬季运行管理经验的积累，人们在冰期输水方面已取得了不少理论成果和宝贵经验。俄罗斯、北欧的运河和渠道，我国的引黄济青、京密引水、引黄济津、引滦入津等工程积累了不少成功的冰期运行经验（杨立信，2002；宋杰，1998；王大伟，1996；李善增，1992）。如在关键部位设置拦冰索，即可防止流冰撞击建筑物，又能促进冰盖形成；冰期来临前，利用节

制闸抬高运行水位、降低水流流速和佛汝德数，可形成促进冰盖形成的水流条件，一般为了保证冰花在冰盖和拦冰索前缘不下潜，避免冰塞的形成，通常要求渠道断面平均流速控制在0.4~0.6m/s以下，水流佛汝德数应小于0.07~ 0.09（Shen，1986；Sun和Shen，1988）。引黄济青工程根据多年的冰期输水运行经验，得出冰期保证冰盖稳定的水力控制条件，即水位的变幅每小时不得超过15cm．每天不超过30cm（王大伟，1996）。天津大学（2010）采用真冰上拱试验以及冰盖稳定性的有限元计算，分析了不同冰厚条件下的保证冰盖稳定的最大允许水位上升幅度。这些研究成果为冰期渠道的水力调控提供了依据。

在冰期输水水力调控方面，国外主要是通过水库对冰期河流实施流量调节，在冰盖形成期保障水位、流量和冰盖的稳定，同时防止水位壅高过大威胁堤防安全，在开河期槽蓄量释放时，减少河流的下泄流量，防止下游武开河的发生。Andres（2003）基于现场观测的结果，描述了开河所造成的槽蓄量释放的水流过程。Beltaos（2005）研究了槽蓄量释放的水力特性，及其对下游冰盖稳定性的影响。Tuthill（1999）总结了冰期河流的流量调控方法，提出了利用电站控制河流水位的指导原则。加拿大阿尔伯达省的能源及环境管理局（2007，2009）在Peace河进行了多年现场试验，通过在结冰期和开河期控制Peace河上游的电站泄量来降低凌汛灾害的风险。我国科研工作者在黄河防凌研究中通过多年研究，也总结了一套水库防凌调度的运用原则（张志红等，2008），例如为防止开河期槽蓄增量的突然释放，提前减少水库泄量，必要时全部关闭水库闸门等。在该原则的指导下，黄河干流的刘家峡、万家寨、三门峡、小浪底分别承担起相应河段的防凌任务，大大减轻了黄河的凌情形势。但从当前河流冰期流量调控的现状来看，流量调控时机的选择需要依赖气温、流量、融雪径流的预报结果，以及数学模型对封、开河过程预测的正确性。气温预报及开河预报中存在的不确定性，会在一定程度上影响流量调控的效果，甚至出现预测失误，调控不及时的情况（Martin Jasek，2007）。穆祥鹏，陈文学等（2010）对长距离输水渠道的冰期运行控制进行了有益的探索，针对渠池内的冰盖演变特性，提出了渠道在结冰期应采用闸前常水位的运行方式，以保证结冰期冰盖的稳定；提出冰期渠道采用水位-流量串级的反馈控制方法，该方法不依赖于气象和冰情的预报精度，能够适应气象和冰情的复杂变化，通过对南水北调中线工程黄河以北干渠的冰期输水数值模拟表明，采用水位-流量串级反馈控制后，在结冰期和融冰期，节制闸闸前水位波动

最大值在±0.10m之间，最大水位波动速度为±0.106m/day，满足冰盖稳定的控制要求。针对冰期输水前，渠道需要抬高运行水位，降低输水流量，以形成适宜冰盖形成的水流条件，冰期结束后，渠道降低运行水位，加大输水流量的运行要求，崔巍、陈文学（2012）提出了闸前变水位控制算法，该算法将闸前变水位运行分解为同步进行的闸前常水位运行和变水位蓄量补偿两个过程，从而实现了闸前常水位运行和闸前变水位运行控制算法的一致，也实现了渠道冰期前后的运行控制算法的统一。

3.2 评价与分析

（1）明渠系统控制模型

作为渠系自动化技术研究的基础，各类控制模型具有不同的特点和适用性，随着自动控制理论、计算机技术和经济社会的发展，它们呈现不同的发展趋势。

非线性圣维南方程组模型具有完整保留渠道水流非线性特性的优点，在各类控制模型中精度最高，主要用于反演计算和开环控制，上世纪中后期应用于部分实际工程。目前对其求解格式的研究已比较充分，在严格的计算条件下，模型在某些工况下会无解或解不收敛。如能在求解过程中对边界条件进行适当的近似或简化处理，可改善模型的适用性。由于目前非线性系统自动控制理论发展的还不够完善，直接应用该模型进行控制系统设计或是分析系统的控制特性还有一定困难。该类模型的应用推广有赖于非线性控制理论的进一步完善。

线性圣维南方程组模型的主要代表是状态空间模型，在工作点附件具有较高的精度，其控制特性参数可用于简化圣维南方程组模型的设计与校验。该类模型多以整个渠道为建模单元，所建模型为多输入多输出结构，这同渠道自身的变量关系是一致的。该类模型的优势还体现在它能从整体上分析渠道的控制特性，处理渠池间的耦合关系，并且在理论上能够实现最优化求解。该类模型的构建技术已发展得较为成熟，但模型普遍存在结构复杂、建模工作量大，对计算、存储要求较高等缺点，目前的计算机硬件水平还难以实现该类模型的在线优化与实时控制。对模型进行合理简化，降低使用成本将是该类模型的发展方向。此外，以往该类模型主要应用于渠道最优控制研究，近年来随着人们对变量约束、前馈反馈混合控制、模型鲁棒性等问题的重视，学者们开始关注预测控制、鲁棒控制等先进控制理论的应用，因而今后该类模型将更多地应用到这些新领域。

简化圣维南方程组模型是当前的研究热点之一，也是各类控制模型中接近工程应用的一类。该类模型以渠池为单元进行分布式建模，具有结构简单、物理概念明确、计算存储量小的优点，模型精度相对较低，不过近年来不断改善。该类模型适合应用于 PID 类控制算法开发，构建工业控制领域流行的集散控制系统，因而具备良好的工程应用前景。目前其代表性的 ID 模型已应用于美国 WM 渠道、盐河，荷兰 Meuse 河，印度 Narmada 渠道等工程的控制系统研究。该类模型的缺点在于其应用时需加入专门的解耦处理，增加了控制算法的复杂性和控制器参数的整定难度。此外，作为一种分布式控制模型，理论上其控制效果会劣于集中控制模型。近年来一些学者尝试将其与状态空间模型结合，基于分布式模型导出集中式状态空间模型，从而兼有模型规模小和整体优化求解的优势。该方向的发展具有较高的实用价值。

随着近年来系统辨识技术的进步，渠道黑箱灰箱模型的研究也逐渐增多。目前采用辨识技术得到的渠道运行控制模型已能达到与非恒定流模型相当的精度，而且模型的结构较为简单，方便在线辨识，较其它类模型更适用于自适应控制。不过该类模型还未得到广泛应用，一方面是因为系统辨识的成本还较高，辨识过程也较为复杂，另一方面是因为黑箱灰箱模型的物理概念不明确，难以分析系统内部的控制特性，不便于复杂控制系统的开发。将黑箱灰箱建模技术与基于圣维南方程组的模型相结合，应用系统辨识技术于圣维南方程组模型参数的识别与整定，甚至实现在线更新和自适应控制，可能是今后的发展方向。

各类渠道运行控制模型的发展，除了在保持自身特点的基础上继续完善外，还会呈现相互借鉴，甚至融合的趋势。譬如一些非线性模型中开始加入线性近似处理，以提高模型的适用性；一些状态空间模型能够通过设定模型矩阵中特定位置元素的值，实现集中控制模型与分布控制模型间的转换，提高控制方案的灵活性；一些简化圣维南方程组模型的参数通过系统辨识技术得到，提高模型的精度与鲁棒性。随着线性、非线性控制理论的日臻完善与发展，计算机软硬件水平的进一步提高，将有越来越多的渠道运行控制模型应用到实际工程中。

（2）明渠控制算法

控制算法是渠系自动化技术的核心，也是该领域的研究热点和难点。

PID 类控制算法研究最早，应用也最为广泛，其简单实用的优点使我们相信在一定时期内，基于 PID 控制原理的算法还会不断出现。当前 PID 类控制算法的研究主

要是分布式控制算法，理论上其控制效果要劣于集中控制方式，因而加强集中控制PID类控制算法的研究十分必要。为减小算法的复杂程度，提高算法的实用性，应采用简单、有效的渠道简化控制模型。参数整定方面应积极探索在线辨识技术，提高参数的鲁棒性。

最优控制算法依托现代控制理论发展起来，受状态空间模型复杂、建模成本高等缺陷限制，该类算法从未应用于物理模型试验及工程。最优控制算法在全局优化、处理渠池间耦合作用方面具有优势，而在应对多种控制约束条件方面存在缺陷。近年来出现的简化建模方法使最优控制算法的计算成本有所降低，因此一些学者应用最优控制思想，探讨介于分布控制与集中控制间的控制方式，力求在控制效果和控制成本间取得较好的平衡。继续提高算法的实用性是今后努力的方向。

模型预测控制近些年受到国外学者的重点关注，一些模型预测控制算法已在美国WM渠道上进行现场测试。今后该算法将朝着结构更加简单，控制参数可在线辨识、实时校正等方向发展。由于模型预测控制算法自身综合了前馈控制与反馈控制作用，理论上能够避免单独设置前馈和反馈环节时常常出现的二者效能部分相抵的现象。不过从目前已有成果看，效果还不够理想，部分学者将其归于建模误差原因，因而有待进一步研究。模型预测控制较最优控制在处理约束条件方面能力更强，不过从数值仿真和物模试验成果看，系统稳定性有所下降，因而需进一步研究该算法应对约束条件的能力。

鲁棒控制作为一种新兴控制理论，至上世纪90年代中后期才发展成熟并进入应用阶段，目前其在渠道控制领域的应用还很少。当前提出的一些鲁棒控制方法，包括一些自适应控制等都不可避免地要依赖于对系统数学模型的精确数学分析，对于非线性特性突出的渠道系统来说，鲁棒控制对渠道模型精度提出了较高要求。此外，鲁棒控制使用状态空间方法，对模型的规模提出了一定限制。目前时滞系统的鲁棒控制成为控制领域新的研究热点，对时间滞后普遍存在的渠道系统而言，可以借鉴和应用相关领域的研究成果。

（3）明渠控制解耦

渠道的控制解耦问题是关系控制系统性能和工程运行安全的重要问题。近年来，针对渠道的耦合问题开展了不少研究，也设计了一些解耦算法，但这些算法或是解耦效果不令人满意，或是未能应用于工程实际。分析其中的原因，主要源于三方面

的问题：一是对耦合机理的分析不够深入，导致解耦设计不够有效。二是一些解耦算法结构复杂，实现起来较为困难；三是解耦参数的整定效果不佳，引发控制系统的稳定性下降。要想较好地解决控制耦合问题，必须从上述三方面问题入手，深入分析渠道的耦合机理，设计实用高效的解耦算法，减少耦合对控制系统稳定性的影响。从以上闸门控制耦合问题的研究进展来看，有以下几个方面亟待深入研究：

一是闸门控制耦合的机理分析。已有研究对耦合机理的分析不够深入，对解耦途径的选择和解耦效果的判定不够系统，应运用控制理论对闸门控制耦合机理作深入地分析。

二是闸门控制解耦算法的研究。目前已有解耦方法或是结构复杂、不够实用，或是解耦效果低下。应从解耦控制理论出发，结合大型渠道运行特点，设计实用、高效的解耦算法。

三是解耦参数的整定。目前已有的解耦方法主要采用试错法，受渠道系统非线性、大时间滞后等特性的影响，往往解耦效果不佳，还存在控制系统稳定性下降的问题。应基于鲁棒控制理论，整定具有一定稳定裕度的解耦参数。

（4）渠道控制参数整定

渠道控制参数整定是控制系统设计的重要环节。各类整定方法在理论性和复杂性方面差异较大，但均有其最适合发挥其作用的环境，且在理论上和应用过程中相互支撑。

经验试算法虽不需要推导渠道控制模型，但离不开熟练的技巧和丰富的经验，而且往往还相当费时，更适于小型和自动化水平不高的渠道。随着它们的升级改造，经验试算法常被更为先进的理论计算整定法取代。

理论计算整定法无论采用的是机理分析模型还是辨识模型，由于忽略了一些因素，所得数学模型是近似的。此外，实际渠道与理想渠道的动态特性也有差别，所以整定的参数并不十分可靠。而且该方法往往比较复杂、繁琐，使用不十分方便。但理论整定法的一些原理为在线整定法奠定了理论基础。

在线整定法在渠道控制领域的研究仍很薄弱，一些常规试验方法和整定公式还不能用于渠道系统。如连续循环法，要求控制系统至临界稳定状态。又如Ziegler-Nichols 整定公式，会导致 1/4 衰减比例的响应，对渠道系统而言是极端振荡（Su Ki Ooi,2008）和不安全的。此外，如何应对大型明渠工程的解耦参数整定、输

入信号滤波等问题，也需深入探讨。

大型明渠调水工程的控制参数整定，已成为关系着控制性能和运行安全的关键技术问题。传统的基于经验试算法或理论模型的整定方法已无法适应复杂的外部环境和日益增长的控制要求，克服渠道几何物理参数的不确定性和运行环境变化的影响，开展控制参数的在线整定方法研究十分必要。

（5）冰期渠道的运行控制问题

近些年，随着高纬度地区大型长距离调水工程的兴建，冰期渠道的运行控制越来越受到人们的重视。渠道的工程特点为水力调控的实施提供了条件：长距离输水渠道由许多节制闸分成一系列的渠池，渠道运行过程中，通过控制节制闸的开度，能够改变渠池内的输水流量和运行水位，从而起到控制渠道运行的作用，其调控性能和精度要大大高于水库对于河流的调节。但是长距离输水渠道的自身特点也决定了实现冰期运行控制的难度和复杂性：1）受渠道自身衬砌安全及冰盖稳定要求的限制，渠道允许水位变幅和变化速率小，运行条件苛刻；2）调水工程一般为串联系统，沿线输水用户众多，一旦发生冰害，将会引起整条线路瘫痪，甚至造成重大损失，因此要求运行控制方法的可靠性高；3）每一个闸门的操作所产生的扰动波将向上、下游传播，渠池间存在的耦合效应将影响系统的响应速度和控制效果；4）调水工程距离长，条件复杂，输水过程中可能出现计划外的未知流量扰动，威胁冰期输水安全。此外，冰期输水问题与水流条件、气象条件、冰情演变、冰盖糙率变化等诸多因素密切相关，准确预测气象条件、冰盖糙率的变化、冰情演变过程难度很大，而目前国内外还没有应用于冰期渠道的自动控制方法，输水渠道的冰期运行控制还主要建立在冰情预测的基础上，以人工控制和经验运行为主，运行风险大、输水保证率低。

从以上研究进展来看，有以下几个方面亟待深入研究：

1）不依赖冰情、气象预报精度的运行控制算法。以往的渠道冰期运行控制多依赖于气象、春季径流以及封河开河过程的预报精度，存在较大的不确定性。因此亟需研究能够适应气象、水情、冰情预报的不确定性，以及计划外分水、突发事故、地表径流等未知扰动影响的渠道控制算法；

2）冰期调度风险应对技术研究。冰害发生时的应急调控涉及节制闸、退水闸、分水口、排冰闸、拦冰、捞冰、破冰等机械设施的联合调控，运行控制十分复杂，

而当前的冰期应急调控还仅仅停留在原则及经验的层面，尚缺乏相关理论的指导，因此有必要开展冰期调度风险应对技术研究，为减小冰害损失和影响范围，及时恢复工程供水提供技术支撑。

3）冰期渠道的运行控制参数整定。由于渠池内冰盖的发展、演变，冰期渠道的系统参数（如渠道糙率）具有时变特性，因此冰期渠道在水流响应特性和频域特性上均与无冰渠道有很大差异，非冰期渠道的运行控制参数直接用于冰期渠道将会影响渠道的控制质量，因此需要针对冰期渠道系统参数的时变特性，研究具有鲁棒性的冰期渠道控制参数的整定技术。

4 对我院（我国水电行业）本专题发展的建议，未来发展思路和新兴增长点

与国外同行相比，我国在渠道控制算法研究领域的投入还很少，技术力量比较薄弱，以下几方面亟待加强。

在研究内容方面，国内学者主要是跟踪借鉴国外研究成果，在大型输水工程运行控制模式、控制系统参数整定与优化等方面仍需加强。当前在建的南水北调中线工程面临复杂的运行控制问题，不少是前所未有的，需要有所创新突破，任务十分艰巨。此外，国内在该方向的研究主要侧重于经济、技术指标，对社会、环境、生态等因素考虑的还不够。

在仿真手段方面，国外大型水利科研机构都已开发成熟的控制仿真软件，如美国 Iowa 大学水力学试验室的 CanalCAD、荷兰的 Delft 水力学所的 Sobek、法国 Cemagref 的 SIC 等，部分实现了商业化。相比较，国内缺少规范的仿真软件，基本处于针对具体工程对象个别研究和开发应用的阶段，研究手段各异，不利于成果的交流与推广。因而除了要引进国外优秀的软件，还应加强自主研发及二次开发能力。

在试验条件方面，美国垦务局早在上个世纪 70 年代就建立了一个物理模型，开发出多种实用的渠道控制算法。美国加州工业大学、葡萄牙 Evora 大学水力学及渠道控制中心（NuHCC）、西班牙 Catalonia 工业大学、墨西哥水科技研究中心（IMTA）等机构都建立了物理模型试验平台，用于渠道自动控制研究。国内目前仅中国水利水电科学研究院在建一大型明渠工程运行控制物理模型试验平台，相关物理模型试验技术有待积累。

结合我国今后一段时期内渠道输水工程自动化运行发展需求，建议下一阶段，加强以下方向的研究：

（1）大型调水工程应急体系研究

基于 GIS 技术建立相应的灾害预警机制，形成一套完整的灾害应急管理与决策支持系统，构建大型输水工程的应急保障体系。主要研究方向包括：研究断电、设备故障等事故工况下的调度方案及对建筑物的损害分析，为应急系统提供技术支持；进行水质分析和趋势预测研究。建立水质数学模型，分析水质变化趋势；研究突发事件情况下（如局部水质污染），污染物扩散速度和对下游的影响，并研究相应的应对策略；研究洪水和突发地质灾害（地震、滑坡和泥石流等）对调水工程的影响，提出预警应急预案，研究事故工况下紧急退水策略。

（2）中央集中控制模型研究

较传统当地控制模型，中央控制模型优势在于能够更好地处理渠池间的耦合问题，当与优化算法结合时，其求解效果也优于当地控制解法。其劣势在于模型规模较大，计算求解工作量较大。因而必须研究参数少，简单而又能够抓住渠道系统水力学特性的控制模型。

（3）多种运行方式联合实施研究

大型渠道涉及复杂运行工况，闸前常水位、等容积、控制蓄量法都有可能被采用，有时会在不同渠段采用不同的运行控制方式。如何选择及组合它们，达到快速、合理、经济的控制效果，需要进行深入研究。

（4）鲁棒控制系统研究

具有足够的鲁棒性是保证渠道控制系统有效应对用水计划变更，且在各种未知扰动和各种不确定因素影响下仍旧稳定、高效的基础。该研究对于提高工程总体的稳健性，满足用水户复杂要求具有重要意义。

（5）渠道控制参数辨识及整定技术

渠道控制系统涉及许多重要参数，如回水面积、滞后时间、渠池谐振频率等。使用参数辨识技术，既可以为工程运行控制提供准确的参数，也可以为渠道在线自适应控制系统开发提供支撑。参数整定技术可以让控制系统适应因施工偏差、渠道淤积等因素带来的渠道尺寸、糙率等参数变化，始终维持良好的控制状态。

（6）输水工程的冰期原型观测研究

南水北调中线工程黄河以北渠道在冬季不可避免的会面临冰期输水问题，开展冰期原型观测研究，既可以对以往冰期输水研究成果进行验证，对冰期输水模型的影响参数进行率定，又能以此为基础开展冰期运行调度的试验研究，研究和制定冰期运行调度方案，为冰期运行管理提供依据。

（7）渠道及过流建筑物的输冰能力研究

渠道在初冬期，可以通过加大流量、提高流速的方式适当推迟冰期，以提高渠道的运行效益，因此有必要对渠道以及闸、桥、倒虹吸等建筑物的输冰能力进行研究，为冰期优化运行提供理论依据。

参考文献

1. Akouz K., A. Benhammou, P.-O. Malaterre, B. Dahhou, and G. Roux. Predictive control applied to ASCE Canal 2[C]. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. 1998(4):3920-3924, San Diego, USA.
2. Acharya, K.D. SAU J., Sanfilippo F..NARMADA Project:Controlled Volume Concept[R]. France,Société du Canal de Provence,1999:122-127.
3. Begovich O., C. Aldana, V. Ruiz, D. Georges, and G. Besançon. Real-time predictive control with constraints of a multi-pool open irrigation canal[C].XI Congreso Latinoamericano de Control Automatico, CLCA2004, La Habana, Cuba, May 2004.
4. Buyalski C P, Falvey H T. Rogers D S. Canal systems automation manual Volume 1[M].Denver Colo:US Bureau of Reclamation,1991:9-11.
5. Buyalski C.P, E.A.Serfozo. Electronic Filter Level Offset(ELFLO) Plus RESET Equipment for automatic Downstream Control of Canals[R].Denver Colo:US Bureau of Reclamation,1979.6.
6. Buyalski C.P, Automatic Downstream Control System for Canals. [R].Denver Colo:US Bureau of Reclamation,1977.9.
7. Burt,C.M., R.Mills, R.Khalsa, and V. Ruiz.Improved Proportional-Integral (PI) Logic for Canal Automation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering[J]. 1998,124 (1), 30-35.
8. [5] Burt C.M.,X. Piao.Advances in PLC-based Irrigation Canal Automation[J]. Irrigation and Drainage.2004,53(1):29-37.
9. Clemmens A. J., T. F. Kacerek, B. Grawitz and W. Shuurmans, Test Case for Canal Control Algorithms [J].Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 1998, 124(1):23-27.
10. Clemmens A. J. and J. Schuurmans. Simple optimal downstream feedback canal controllers:theory[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering.2004, 130(1):26-34.
11. Clemmens A. J. and J. Schuurmans. Simple optimal downstream feedback canal controllers:ASCE test case results[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004,130(1):35-46.

12. Clemmens A. J.Real-Time Operation of Water Resources Systems: On- Versus Off-Line Optimization[C]. 26th Annual Water Resources Planning and Management Conference, Tempe, Arizona, June 6-9, 1999.
13. Clemmens A. J. Sloan G.. Canal control needs :example[J].Journal of Irrigation and Drainage Engineering.1994,120(6):1077-1081.
14. Clemmens A. J., Wang Changde, Reploge J. A, Dynamic response of automatic water-level controller II: Application[J]. Journal of irrigation and drainage engineering .1990,116(6): 784-796.
15. Corriga, G. Sanna S., and Usai G.. Estimation of uncertainty in an open-channel network mathematical model [J]. Appl. Math. Modeling, 1989,13(11):651-657.
16. David C. Rogers, Jean Goussard. Canal Control Algorithms Currently in Use [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1998,124(1):11-15.
17. Dale E.Seborg, Thomas F. Edgar. Process Dynamics and Control [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2006.
18. Deltour Jean-Luc and Franck Sanfilippo. Introduction of Smith Predictor into Dynamic Regulation[J].Journal of Irrigation and Drainage Engineering.1998,124(1):47-49.
19. Durdu Ö. F.. Control of transient flow in irrigation canals using Lyapunov fuzzy filter-based gaussian regulator [J].International Journal for Numerical Methods in Fluids.2005,50(4):491-509.
20. Ermolin,Y.A. Study of open-channel dynamics as controlled process[J].J. of Hydraulic Engineering.1992,118(1):59-71.
21. Falvey, H. T., and Luning, P. C.Gate stroking.[R]. RECERC-79-7, 1979.USDI-U.S. Bureau of Reclamation, Washington, D.C.
22. Fubo Liu, Jan Feyen, and Pierre-Olivier Malaterre, Development and evaluation of canal automation algorithm CLIS[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 1998,124(1):40-46.
23. Gómez M., J. Rodellar, and J. A. Mantecón. Predictive control method for decentralized operation of irrigaton canals[J]. Applied Mathematical Modeling, 2002, 26(11):1039-1056.
24. Litrico X. and D. Georges. Robust continuous-time and discrete-time flow control of a dam-river system.(II)Controller design[J]. Applied Mathematical Modeling, 1999, 23(11):829-846.
25. Litrico X.. Robust flow control of single input multiple outputs regulated rivers. Journal of Irrigation and Drainage Engineering[J]. 2001, 127(5):281-286.
26. Litrico X. and V. Fromion. Simplified modeling of irrigation canals for controller design[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering.2004, 130(5):373-383.
27. Litrico X.and Fromion. V. Frequency Modeling of Open Channel Flow[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004,130(8):806-815.

28. Litrico X., V. Fromion, J.-P. Baume, C. Arranja, and M. Rijo. Experimental validation of a methodology to control irrigation canals based on Saint-Venant equations[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(11):1425-1437.
29. Litrico X. and V. Fromion. Tuning of robust distant downstream PI controllers for an irrigation canal pool. I: Theory[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2006, 132(4):359-368.
30. Litrico X., V. Fromion, and J.-P. Baume. Tuning of robust distant downstream PI controllers for an irrigation canal pool. II: Implementation issues [J].Journal of Irrigation and Drainage Engineering.2006, 132(4):369-379.
31. Litrico X., P.-O. Malaterre, J.-P. Baume, P.-Y. Vion, and J. Ribot-Bruno. Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2007,133(1):27-37.
32. Litrico X.Test of Auto-Tuned Automatic Downstream Controller on Gignac Canal[A].Second USCID Conference on SCADA and Related Technologies for Irrigation Systems Modernization[C]. Denver,2007,6: 105-114.
33. Malaterre P.-O. and J. Rodellar. Multivariable predictive control of irrigation canals：Design and evaluation on a 2-pool model[C].International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals: state of the art of research and applications,Marakech.Morocco, 1997,4:230-238.
34. Malaterre P.-O.. Pilote: Linear quadratic optimal controller for irrigation canals[J].Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1998,124(4):187-194.
35. Malaterre P.-O. and J.-P. Baume. Optimum choice of control action variables and linked algorithms:comparison of different alternatives[C].ASCE-ICID Workshop on Modernization of Irrigation Water Delivery Systems,1999,10.Phoenix, USA.
36. Montazar A., van Overloop P. J., and Brouwer R.. Centralized Controller for the Narmada Main Canal[J]. Journal of Irrigation and Drainage.2005, 54(1):79–89.
37. Overloop P. J. van, J. Schuurmans, R. Brouwer, and C. M. Burt. Multiple-model optimization of proportional integral controllers on canals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering.2005,131(2):190-196.
38. Montazar A., P. J. van Overloop, and R. Brouwer. Centralized controller for the Narmada Main Canal[J]. Journal of Irrigation and Drainage.2005, 54(1):79–89.
39. Overloop P. J van.,J. Schuurmans,R. Brouwer.Multiple-Model Optimization of Proportional Integral Controllers on Canals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005,131(2):190-196.
40. Reddy J. M. and R. G. Jacquot. Stochastic optimal and suboptimal control of irrigation canals[J].Journal of Water Resources Planning and Management.1999，125(6):369-378.
41. Riva R. s, C. Prada, J. R. Perán, and P. I. Kovalenko. Robust adaptive predictive control of water distribution in irrigation canals[C].15th IFAC World Congress, Barcelona, Spain, July 2002.

42. Rodellar J., C. Sepúlveda, D. Sbarbaro, and M. Gómez. Constrained predictive control of irrigation canals[C]. Proceedings of the 2nd International Conference on Irrigation and Drainage.2003, 5,477-486, Phoenix, Arizona. USCID.
43. Ruiz V. M. and J. Ramírez. Predictive control in irrigation canal operation[C]. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics.1998(4):3897-3901, San Diego, USA.
44. Sawadogo S., R. M. Faye, P.-O. Malaterre, and F. Mora-Camino. Decentralized predictive controller for delivery canals[C]. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1998(4):3880-3884, San Diego, USA.
45. Sawadogo S., R. M. Faye, A. Benhammou, and K. Akouz. Decentralized adaptive predictive control of multi-reach irrigation canal[C]. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics.2000,10,3437-3442, Nashville, USA.
46. Seatzu C.. Design and robustness analysis of decentralized constant volume-control for openchannels[J].Applied Mathematical Modeling.1999,23(6):479-500.
47. Schuurmans J.. Controller Design for a Regional Downstream Controlled Canal [R]. Netherlands,Delft University of Technol, 1992, A6681.
48. Schuurmans,J., Bosgra, and Brouwer,R[J]. Open-channel Flow Model Approximation for Controller Design. Applied Mathematical Modelling[J].1995,l(19):525-530.
49. Schuurmans,J.. Control of Water Levels in Open-channels[D]. Netherlands: Delft University of Technol, 1997:101.
50. Schuurmans,J., A. Hof, S. Dijkstra, O. H. Bosgra, and R. Brouwer. Simple Water Level Controller for Irrigation and Drainage Canals [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering.1999, 125(4):189-195.
51. Schuurmans J.. Control of Water Levels in Open-channels[D]. Netherlands: Delft University of Technol, 1997:101.
52. Seatzu C.. Design and robustness analysis of decentralized constant volume-control for openchannels[J]. Applied Mathematical Modeling.1999, 23(6):479-500.
53. Seatzu C.. Decentralized controllers design for open-channel hydraulic systems via eigenstructure assignment[J]. Applied Mathematical Modeling.2000, 24(12):915-930.
54. eatzu C. and G. Usai. A decentralized volume variations observer for open channels[J]. Applied Mathematical Modeling.2002, 26(10):975-1001.
55. Wahlin B. T. and A. J. Clemmens. Performance of historic downstream canal control algorithms on ASCE Test Canal 1[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering.2002, 128(6):365-375.
56. Su Ki Ooi, Erik Weyer. Control Design for an Irrigation Channel from Physical Data[J]Control Engineering Practice. 2008,16: 1132–1150.

57. Silva P., M. Ayala Boto, J. Figueiredo, and M. Rijo. Model predictive control of an experimental water canal[C].Proceedings of the European Control Conference 2007,7,2977-2984,Kos, Greece.
58. Wahlin B. T. and Clemmens A.J., Performance of Historic Downstream Canal Control Algorithms on ASCE Test Canal 1[J].Journal of Irrigation and Drainage Engineering.2002,128(6):372-375.
59. Wahlin B. T. Performance of model predictive control on ASCE Test Canal 1[J].Journal of Irrigation and Drainage Engineering.2004,130(3):227-238.
60. Wafeek S. Wahby.Technologies Applied in the Toshka Project of Egypt[J]. The Journal of Technology Studies.2004,30(4):86-91.
61. Weyer. E. Decentralised PI Control of an open Water Channel[A]. the 15th World Congress of IFAC, Barcelona, Spain, 2002,7.
62. Willian W.G. Central Arizona Project:Operations Model[J].Journal of the Water Resources Planning and Management Division,1980,6,521-525.
63. Xianshu Piao and Charles Burt. Tuning Algorithms for Automated Canal Control[R].USA, Cal Poly, ITRC,2005,ARI 04-3-005.
64. 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.
65. 崔巍，王长德，管光华等。渠道运行自适应模糊控制系统设计与仿真[J]。武汉大学学报工学版，2005，2:104-108
66. 崔巍,王长德,管光华等.渠道运行自适应模糊控制系统设计与仿真[J].武汉大学学报工学版.2005,2,104-108.
67. 崔巍,王长德,管光华，范杰.渠道运行管理自动化的多渠段模型预测控制[J].水利学报.2005.8,1001-1009.
68. 崔巍，王长德，管光华，范杰。渠道运行管理自动化的多渠段模型预测控制[J]，水利学报，2005，8: 1001-1009
69. 崔巍.渠道运行最优控制研究[D].武汉：武汉大学,2006.
70. 崔巍，陈文学，穆祥鹏等.明渠运行前馈控制改进蓄量补偿算法研究[J]．灌溉排水学报，2011,Vol.30，No.3：12-17.
71. 崔巍,王长德等. 渠道运行管理自动化的多渠段模型预测控制[J].水利学报.2005.8
72. 崔巍, 王长德.调水工程运行最优控制研究[J].南水北调与水利科技，2007, 5(2)，6-8.
73. 崔巍，陈文学，姚雄．明渠调水工程运行水位一流量串级控制研究[J]．武汉大学学报（工学版），2009.12，VOl.42，No.6：764-768．
74. 崔巍，陈文学，郭晓晨，穆详鹏，王琦．明渠调水工程闸前常水位运行控制解耦研究[J]．灌溉排水学报，2009.12，Vol.28，No.6：9-13.

75. 崔巍，陈文学，穆祥鹏等.长输水渠道前馈控制时间研究[J].水利学报，2009.11，Vol.40，No.11：1345-1350.
76. 崔巍,陈文学,姚雄等.大型输水明渠运行控制模式研究[J];南水北调与水利科技;2009,5.
77. 崔巍，陈文学，穆祥鹏. 明渠运行控制算法研究综述[J]．南水北调与水利科技，2009.12，Vol.7，No.6：113-117
78. 崔巍，陈文学，郭晓晨.明渠运行控制模型研究进展[J]．南水北调与水利科技，2009. Vol.7，No.4：5-9.
79. 崔巍，李斯胜，陈文学，等.南水北调中线总干渠分水口群运用方式研究[J].水利学报，2011,42(11):1316-1321.
80. 崔巍，姚雄，陈文学等.南水北调中线穿黄工程控制蓄量运行方式研究[J].水力发电学报，2011,Vol30,3:85-91.
81. 崔巍，陈文学，穆祥鹏等.明渠闸前常水位运行控制解耦试验研究[J].水力发电学报，2012,Vol.30,4.
82. 崔巍，陈文学，郭晓晨等. 南水北调中线总干渠冬季输水过渡期运行控制方式探讨[J]. 水利学报，2012.Vol.42，No.8.
83. 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): 59-63.
84. 范杰.渠系运行特性分析及智能控制研究[D].武汉：武汉大学，2006.
85. 冯德顺.美国加利福尼亚调水工程成功的启示[J].水利水电快报，2003，24(4).
86. 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) : 1379-1384.
87. 管光华，王长德，冯小波。大型渠系联合运行状态空间模型不确定性的描述与度量[J].水科学进展，2008，19(1): 251-256.
88. 郭军，王念慎，董兴林。引黄济青输水河等容量控制物理模型试验[R].北京：中国水利水电科学研究院水力学所，1988.
89. 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.
90. 韩延成，高学平，涂向阳.基于 CMAC 神经网络的自适应渠道输水自动控制研究[J]。灌溉排水学报，2007,26(2): 76-79.
91. 方神光,吴保生.南水北调中线干渠闸前变水位运行方式探讨[J].水动力学研究与进展,2007,122(5):633-639.
92. 刘德有,吴泽宇.长距离输水系统输水调度控制理论及关键技术研究[R].河海大学,2006.
93. 吕宏兴,宋松柏等.灌溉渠道闸门调控过程中的非恒定流研究[J].农业工程学报，2002,18(6):18-22.
94. 柳树票，王长德。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.

95. 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):967-968.
96. 尚毅梓，吴保生，崔兴华等。长距离输水渠道节制闸调节系统控制特性研究[J].水力发电学报，2009，28(1):95-101.
97. 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,2004,8,21-24.
98. 阮新建.渠道自动运行现代控制理论模型研究[D].武汉:武汉水利电力大学，2002.
99. 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):56-59.
100. 县仪伦.国外流域和地区调水工程[J].水利电力科技，2001，1.
101. 引黄济青输水河等容量控制物理模型试验[R].中国水利水电科学研究院，1990.1.
102. 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，1999.1.
103. 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),1-5.
104. 王长德，郭华。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): 6-9.
105. 王念慎，郭军，董兴林。明渠瞬变流最优等容量控制[J].水利学报，1989，12:12-20.
106. 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.
107. 姚雄,王长德,丁志良等。渠系流量主动补偿运行控制研究[J].四川大学学报，2008，40(5):38-44.
108. 郑双凌，马吉明，张永良。穿黄隧洞水头损失的模型试验分析[J].南水北调与水利科技，2007，5.
109. National Research Council of Canada, Optimum Operation of Hydro-Electric Plants During the Ice
110. 杨立信。俄罗斯莫斯科运河的运行情况[J]。水利发展研究，2002，Vol.2，No.10：60-62。
111. 宋杰，金富深，崔鹏。明渠冬季冰盖下安全输水综述[J]。内蒙古水利,1998,增刊：37-40.
112. 王大伟，江勇. 引黄济青工程冰期输水运行研究[J]. 水利水电工程设计，1996（2）：55-58.
113. 隋觉义，方达宪，汪德胜. 水内冰冰塞堆积演变的研究[J]. 水利学报，1994.8
114. 李善增，程天金，李为民. 明渠冰盖输水观测研究[C]. 第一届全国冰工程学术会议论文集，山西，1992.12：57-64.
115. Shen, H.T., Ho, C.F. Two-dimensional Simulation of Ice Cover Formation in a Large River [C], Proc. IAHR Ice Symp., Iowa City, 1986: 547-558.
116. Sun, Z. C., Shen, H.T. A Field Investigation of Frazil Jam in Yellow River [C]. Proc. 5th Workshop on Hydr. Of River Ice/Ice Jams, Winnepeg, 1988: 157-175.

117. Regime of Rivers, A Canadian Experience. Associate Committee on Hydrology, Task Force of the Subcommittee on Hydraulics of Ice Covered Rivers, NRCC 31 107,1990.
118. Andres, D., Van Der Vinne, G., Johnson, B., and Fonstad, G. Ice consolidation on the Peace River: release patterns and downstream surge characteristics. Proceedings (CD format), 12th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment, Edmonton, AB, 2003, June 19-20, pp. 319-330.
119. Spyros Beltaos, David D. Andres. Hydrodynamic Characteristics of Waves Released by Ice Cover Consolidation and Effects on Ice Cover Stability of Peace River below Dunvegan[C]. 13th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers Hanover, NH, 2005,September15-16.
120. Tuthill, Andrew M., Flow Control to Manage River Ice. CRREL Special Report 99-8, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, US Army Corps of Engineers. 32 p., Hanover, New Hampshire, USA, 1999.
121. Martin Jasek. Operational River Ice Forecasting on the Peace River- Managing Flood Risk and Hydropower Production[C]. CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment 14th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Quebec City, 2007, June 19 – 22.
122. Martin Jasek, Bernard Trevor. Mitigation of Elevated River Freeze-up Levels by Revised Flow Regulation[C]. CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment 15th Workshop on River Ice St. John's, Newfoundland and Labrador, 2009, June 15-17.
123. 张志红，张浩，高治定．水库防凌调度在冰凌洪水调度运用中的探讨[J]．水文，2007.6，Vol.27，No.3：29-30．
124. 穆祥鹏，陈文学，崔巍，郭晓晨，王琦．长距离输水渠道冰期运行控制研究[J]. 南水北调与水利科技．．2010.2，Vol.8，No.1：8-13.