

灌区水资源配置、调度与控制过程、模型、算法及软件实现

樊哲 许新忠

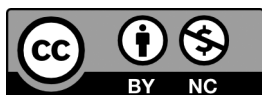
湖北省漳河工程管理局，荆门

摘要 | 我国灌区多建于20世纪五六十年代，工程简陋且不配套，1998年启动的续建配套与节水改造国家项目在在一定程度上完善了工程措施，但灌区目前仍普遍存在管理能力与水平相对滞后的问题。灌区自身管理和行业管理的大量资料仍以人工处理为主，各级行业主管部门难以及时、准确、全面地掌握灌区及行业发展状况与变化趋势，导致灌区管理目标难以量化。众所周知，信息化建设能够有效改进工程管理，合理调配水资源，实现水利用效益最大化。随着需水量与可供水量之间矛盾的激化，用水户对灌区的要求日趋提高。因此，在完善工程措施的基础上，必须通过信息化管理提升灌区服务的质量和水平，确保适时、适量和安全供水。

关键词 | 灌区；水资源；需水量；可供水量

Copyright © 2025 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



1 引言

由于历史原因，灌区存在诸多问题，这些问题导致灌区已难以适应我国农

通讯作者：樊哲，湖北省漳河工程管理局。

文章引用：樊哲，许新忠. 灌区水资源配置、调度与控制过程、模型、算法及软件实现 [J]. 环境与资源, 2025, 7 (1) : 131-150.

<https://doi.org/10.35534/er.0701010>

业、农村乃至国民经济发展的总体需求，甚至成为制约农业综合生产能力提高与影响国家粮食安全的因素之一。主要问题包括以下方面。

（1）灌区配套设施不完善与老化失修：多数灌区工程因历史原因存在配套不完善、建设标准低的问题，且长期运行中老化失修严重，导致灌溉效率低下，水资源浪费严重。

（2）水源不足与用水浪费：随着经济的快速发展，水资源供需矛盾加剧，而灌区灌溉水有效利用率低，进一步加剧了水资源紧张的状况。

（3）投入不足与管理粗放：灌区投入不足、管理粗放，导致灌溉效益衰减，无法适应现代农业和农村发展的需求，甚至成为制约农业综合生产能力提高的因素。

（4）缺乏先进的调度控制技术：灌区水资源配置和调度过程缺乏先进的调度控制技术，难以实现精准调度和实时控制，无法根据实际需求和水源状况进行灵活调整，影响了调水的准确性与效率。

（5）运行控制过程不够精细：虽然水资源配置与调度过程已完成量化计算并存入数据库，但实际运行控制过程仍不够精细，无法对水利工程建筑物进行适时、适量的用水和供水控制，导致水资源浪费和灌溉效率低下。

2 水资源全要素配置概念及模型

灌区供水对象可包括生活、工业、发电、农业、生态和航运六大类。其中，有航运要求的较少，主要发生在南方灌区。例如，江西省赣抚平原灌区的总干渠、安徽省淠史杭灌区的部分干渠，因航运要求需要保证一定的吃水深度，以利行船。而多数北方灌区仅包含灌溉及生态等用水单元。上述六种供水对象基本涵盖了目前水资源的全部需求对象，因此称之为全要素配置。

2.1 水资源全要素配置定义

（1）国际水资源协会（international water resources association，IWRA）主席B.Braga认为，水资源配置是将有限的水资源在多种相互竞争的用户间进行复杂分配的过程，各项目标的核心冲突体现在经济效益与生态环境效益的矛盾上。

(2) 根据《全国水资源综合规划技术大纲》(水利部水规计[2002]330号文件), 水资源配置的定义为: 在流域或特区域范围内, 遵循有效性、公平性和可持续性原则, 利用各种工程和非工程措施, 按照市场经济的规律和资源配置准则, 通过合理抑制需求、保障有效供给、维护和改善生态环境质量等手段, 对多种可利用水源在区域间及各用水部门间进行分配。

2.2 水资源全要素配置模型

水资源全要素配置模型可以分为三类: (1) 基于纯模拟技术的模拟模型; (2) 基于纯优化技术的模拟模型; (3) 优化与模拟技术相结合的模式。

纯模拟模型针对具体工程, 可以获取其实际存在的各类规则, 即便这些规则极为复杂, 也能客观、精准地制定水资源配置方案。然而, 这一优点同时也是纯模拟模型的缺点。由于纯模拟模型仅能按照既定规则进行模拟, 输出水资源系统对该规则的响应结果(即水资源配置), 如果要对其他类似工程, 甚至同类工程但“目标”存在差异的工程制定水资源配置方案时, 往往需要修改甚至大幅修改原来的模型, 才能得到期望的结果。

纯优化模型则是综合考虑某一类工程的不同“目标”, 建立通用模型和求解过程。因此, 对于某一具体工程, 只需赋予其具体参数, 即可求解得到最优水资源配置结果。

当然, 对于不同类型、不同区域、不同供水对象的灌区或引调水工程, 其目标也存在差异。例如, 目标可设定为经济效益最大、供水效率最高、缺水量最小、供水量最大、弃水量最小、水利用系数最高等。若考虑约束条件以及供水对象的权重、优先级等因素, 也可以建立综合目标进行权衡。

针对灌区的特点及具体情况, 本研究采用模拟与优化相结合的水资源配置模型。该方法通过工程项目的实践, 不断迭代改进, 最终形成针对某一类或某些类的通用模型。

2.3 水资源全要素配置准则

水资源配置的目的是实现需水量与可供水量在自然、经济和社会各方面要

求之间的平衡。当各要素需水量小于或等于可供水量时，按其需求供水；当各要素需水量大于可供水量时，需权衡各方得失，在确保水资源利用目标最优的原则下，为各要素分配合适的水量。

3 水资源配置过程及方法

灌区水资源配置是在需水量与可供水量之间寻求平衡。这一过程既要考虑自然资源的平衡，也要考虑经济效益、社会效益，以及经济效益、社会效益与自然资源之间的平衡。完整的配置过程主要包括目标函数确定、模型表达和模型求解三大步骤。

3.1 目标函数

由于目标之间难以公度，效益函数往往非常复杂，即便能构造出完整的效益函数，这些函数通常也具有高度非线性、不连续的特征。因此，如何实现大规模、非线性的水资源供需平衡并寻优，是一个现实且困难的问题。灌区水资源配置通过引入目标权重，将水资源配置模型的目标与约束简化为线性问题，因此可以采用成熟的线性规划算法求解，并通过软件实现。

灌区水资源配置以考虑成本、兼顾社会效益（对各供水对象赋予动态权重）、寻求不同时段水资源利用的经济效益最高或水利用率最大等为目标函数（也可进行多目标寻优），同时充分利用现代计算机的计算能力（算力），以“全要素、全过程、全覆盖”为宗旨，采用“穷举法（全枚举法）”在多元三维时空中动态求解。

3.2 模型表达

$$\text{MAX} \sum_{i,j,k} R_{i,j,k} \sum_{i,j,k} f(C_1, C_2, X_1, X_2) \quad (1)$$

模型表达式（1）以社会效益的经济效益最大为目标函数，实际应用时，也可以以水利用率最高等为目标函数，只需重新定义 f 的功能及相应的参数即可。其实，其他目标函数都可以转换成计算经济效益的目标函数。

MAX表示最大综合经济效益；

R 为各供水对象的权重系数（不同时段可能不同）；

f 为与 C_1 、 C_2 、 X_1 、 X_2 有关的供水经济效益，其中， C_1 为收益水价、 C_2 为成本水价（成本水价已包括输水过程中所损失水量的价格）、 X_1 为净用水量、 X_2 为毛用水量；

i 为供水对象所在区域，可以定义为行政区划，如村、镇等（不同区域的供水权重、水价等可能不同）；

j 为用水户（用水单元，可视为供水系统中的“节点”），如水力发电用水户、城乡生活用水户、城乡生产用水户、农业灌溉用水户、生态环境用水户等（同样，不同用水户其供水权重、水价等可能不同）；

k 为用水时段（同样，不同时段的供水权重、水价等可能不同）。

约束条件包括：

权重系数：一般情况下，城乡生活用水>城乡生产用水>农业灌溉用水>水力发电用水>城乡生态用水，特殊情况下可以动态人为调整，对每种供水对象的各个口门也可以进一步定义权重，如灌溉中的经济作物权重可能比粮食作物大；

总耗水量（用水量、损失水量、泄水量等）之和小于、等于各种水源的可供水量之和（包括多水源情况）；

每个时段各收费口门总需水量之和小于、等于可供水量；

调水（输水）时间最短（多水源情况下）；

水量损失最小（包括输水道渗漏、蒸发、弃水、水头损失等，多水源情况下）；

各输水段的时段过水流量小于该输水段的最大过流能力；

减少供水量造成的经济、社会损失最小（如城乡生产、农业灌溉等）。

3.3 模型求解

式（1）所构造的模型展开来类似三维的“博弈”矩阵，如图1所示。所谓“博弈”就是当可供水量不能满足需水要求时，要协调各用水单元的用水量。根据用水单元的重要性对其排序，并进行赋权（ R ）。例如，一般情况下，5种受水对象的优先级排序是：城乡生活用水 > 城乡工业用水 > 农业灌溉用水 > 水力发电用水 > 自然生态用水，以此对各受水对象赋权。例如，假定权值为 R 城乡

生活用水 = 1.00、 R 城乡工业用水 = 0.85、 R 农业灌溉用水 = 0.80、 R 水力发电用水 = 0.65、 R 自然生态用水 = 0.60。但是，在不同的区域或该区域的不同时段，受水对象的优先级排序根据具体情况，可能会动态调整，因此要定义成变量。

根据各用水单元、各用水区域及各用水时段的可能组合，其求解过程非常繁复。因此，可以先简化为二维矩阵求解，再计算第三维，亦即，先按分时段求最优解，全部时段的最优解（效益总和）即为全年最优解。

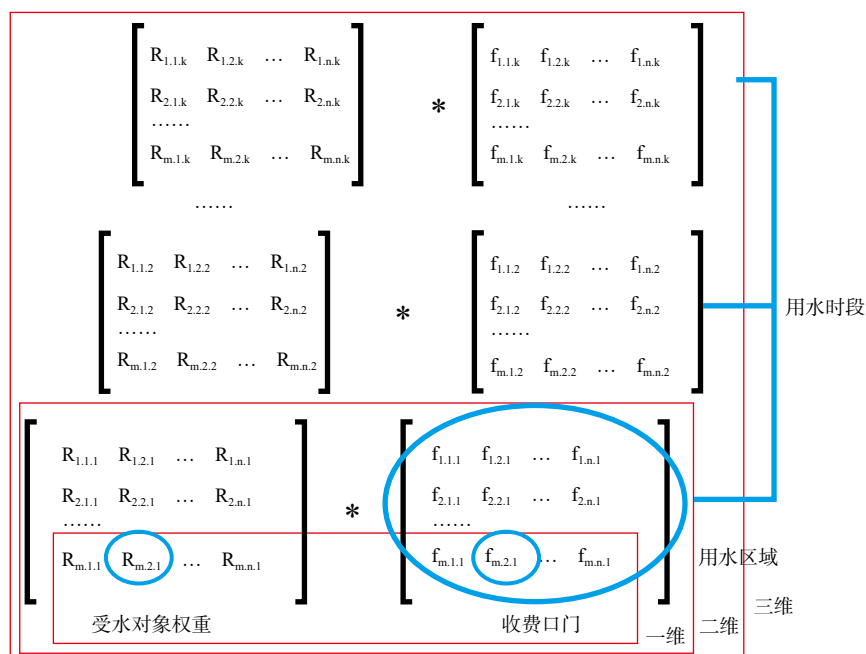


图 1 “穷举法”多元三维时空求解

Figure 1 “Exhaustive method” for solving problems in multi-dimensional three-dimensional space-time

4 水资源调度过程及方法

水量优化调度及输水，是根据水资源配置模型代入时段参数求解后得到各用水单元各时段的配水量，再按照配水量开展水量调度。水量调度的作用主要体现在两个方面。

(1) 适时、适量、优化（如缺水最少、损失最小、效益最高等，适用于多

水源场景)地为现有用水单元供水,包括水源取水泵、闸、阀的开启台数、开度和用水单元(口门)泵、闸、阀的开启台数、开度(现实意义)。

(2)通过分析水量调配过程,优化用水单元的用水结构与区块布局,依据“以水定产”“以水定发展”的原则,合理调整工业产业结构与区块布局、作物种植结构与区块布局、居民点规模与布局等(远期发展)。

4.1 用水单元各时段毛水量计算

毛水量是在水资源配置模型得出的各用水单元净水量基础上,考虑各类水量损失后计算得到的水源毛供水量(毛水量=净水量+损失水量)。因此,向用水单元输水过程中的各种水量损失计算就成为关键。水量损失主要包括蒸发、渗水和漏水损失三个方面。

4.2 水源起始供水时间及持续时间计算

用水单元取水口(水量计量或水费收缴口门)的水量调度,需确定三个核心要素:一是何时能输水到用水单元的用水口门(与水源何时送水、送多少流量、输水道长度、水流行进速度等有关);二是用水口门的开度(以便能过需要的流量,在某一时段中可能要根据用水量需求以及口门处的水情,调整取水口门开度);三是用水口门的过水持续时间(何时关闭口门)。上述过程根据各用水单元时段用水需要确定。例如,对于灌溉时段,可能要划分到不同的灌季及灌季中各月的旬;对于城乡生活用水,则要划分到月及日,甚至一日中各时段(白天和夜晚)所需要的水量。

当用水口门确定了需水流量及需水时间后,根据流速和输水道长度计算出从水源到口门的输水时间,可以确定水源的放水时间和流量,实现适时、适量供水。当水到达口门后,即根据口门行水时间稳定、持续地给用水户输水,保证供水满足用水需要。

水资源调度过程可通过图2所示的“包络图”直观查验与展示,也可利用“数字孪生”技术进行实时呈现或虚拟仿真。若灌区或某灌域全面安装水情监测装置,还可通过实测数据核验计算得出的调度过程参数,必要时进行校正。

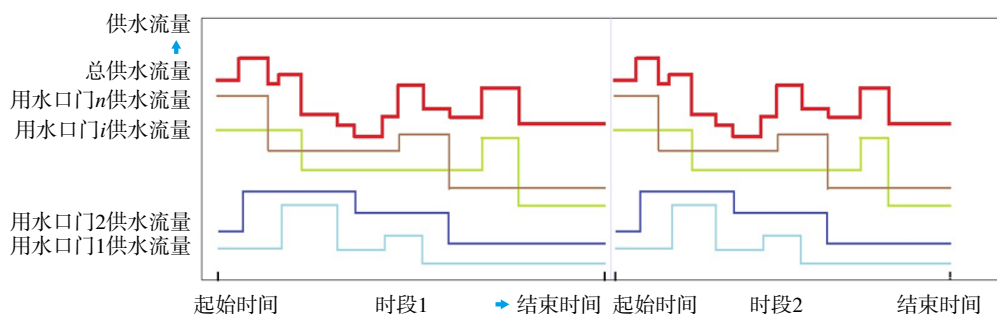


图 2 灌区供水调度过程“包络图”（示意）

Figure 2 “Envelope diagram” (schematic) of water supply dispatching process in irrigation areas

输水的起始时间和终止时间主要与水源至“口门”（用水单元）之间输水道的行水时间有关，对于既有工程，因为输水道长度已知，所以，行水时间仅与流速有关。

（1）梯形明渠和矩形明渠流速计算

对于梯形明渠：

$$v = C\sqrt{Ri} \text{ 则 } C\sqrt{Ri} \times A = Q$$

因为流量 Q （可以从该时段的用水量计算得到： $Q=W/\text{时间}$ ，时间为该时段的秒数）已知，所以，从上式中解出水深 h 即可求得 v 。

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \text{ 或 } C = \frac{1}{n} R^y \quad (C \text{ 为谢才系数})$$

$$y = 2.5\sqrt{n} - 0.13 - 0.75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0.10)$$

式中， n 为渠道壁糙率，水泥衬砌 $n=0.016$ ， $R = A / X$ ， R 为水力半径， A 为过水断面面积， X 为湿周。二者均与断面水深以及断面的几何形状及尺寸（已知）有关，只有 h 是变量。因此，代入 $C\sqrt{Ri} \times A = Q$ 后即可求出 h 。

$$X = b + 2h\sqrt{1+m^2} \quad (m \text{ 为边坡系数})$$

i 为水力坡度（对于均匀流可用渠道纵坡代替）；

输水时间 $t_j = L / v$ ， L 为输水段 j 的长度。

流速 (v) 及行水时间 (t) 计算过程:

以梯形断面为例, 计算过程如下:

$$A = ((B + 2 \times m \times H) + B) \times H / 2$$

$X = B + 2H\sqrt{1+m^2}$, 式中 H 为水深, B 为底宽, m 为边坡系数, 矩形断面 m 为 0;

$$R = A / X = (B + 2 \times m \times H) + B \times H / 2 / ((B + 2 \times m \times H) + B) \times H / 2 \times \sqrt{1+m^2}$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} = \frac{1}{n} ((B + 2 \times m \times H) + B) \times H / 2 / ((B + 2 \times m \times H) + B) \times H / 2 \times \sqrt{1+m^2}^{1/6}$$

把 C 、 R 、 A 代入 $Q = C\sqrt{Ri} \times A$ 和 $v = Q / A$ 。

因为 Q 已知, 因此可以求出 H 和 v , 则输水时间 $t_j = L / v$ 。

假定, $Q=1 \text{ m}^3/\text{s}$ (已包括节制闸的过流量), $B=1\text{m}$, $m=0.75$, $i=0.001$, $L=1000\text{m}$, $n=0.016$, 算算看。

以上虽然只计算了一个渠段, 其他渠段计算方法一样, 只是 Q 、 B 、 m 、 i 、 L 、 n 的取值不同而已。

对于矩形明渠:

矩形明渠的流速计算与梯形明渠相同, 由于矩形明渠为直立式渠壁, 所以边坡系数为 0, 即 $m=0$ 。

(2) 圆形管道流速计算 (满管、有压)

对于圆形管道, 行进流速计算如下:

$$V = 1 / \sqrt{\lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta} \times \sqrt{2gh}$$

式中, H 为管道上下游水位差;

g 为重力加速度;

$\sum \zeta$ 为管道进口和出口局部损失系数的总和;

L 为管道长度;

D 为管道内直径;

λ (沿程损失系数) = $8g / c^2$;

上式中, c 为谢才系数, 所以,

$$\lambda = 8g / (R^{1/6}/n)^2$$

上式中,

$$R(\text{水力半径}) = \frac{d}{4} \left(1 - \frac{\sin 2\pi}{2\pi} \right)$$

根据行进流速就可以计算出水源地到收费口门的行水时长,进而确定水源地的放水时间和停水时间。

水源地放水时间=上游渠道行水时长+收费口门放水时间;

水源地停水时间=收费口门停水时间-上游渠道行水时长。

这里的水源地放水和停水时间不是绝对的放水和停水,而是因某些收费口门放水和停水时,导致水源地放水和停水流量发生变化,因此要重新计算调节的时间。显然,调度过程是动态的。

从上述计算过程中可以看出,不同的水深行进流速是不同的,而水深与流量有关。因此,首先要建立水深(水位)与流量的关系,然后根据需水流量(这是可知的)即可获得水深。当工程建好通水后,水深(水位)与流量的关系(通常用关系曲线表示)可以通过实测(水位计和流速仪)获得,也可以假设一系列水位,计算出过流量,以此建立二者的关系,根据过流量要求即可从关系(曲线)中查出水深,进而计算行进流速。

5 运行控制过程及方法

完成水资源配置与调度过程(年/月/日/旬)的计算后,数据均存入相应的数据库表中,运行控制过程只是从数据表中取出相应的参数,对口门和水源进行适时、适量的用水和供水控制,亦即水利工程建筑物(灌区主要是水闸、泵站和阀门,这里主要针对水闸,泵站和阀门根据实际工程再拓展控制方式和过程)启闭时间(闸门的开启和关闭时间)和过流量控制。

也可以根据计算结果绘制图2所示的“包络图”,实际调度时,按照该图进行直观控制或自动控制(将包络图转换成数据表)。

5.1 闸门过流方式

对于闸门而言(灌区主要采用闸门控水过水)目前主要有两种过流方式,

一是底流式，二是顶流式。

5.2 过闸流量控制

用水单元某一时段的用水量要求可以换算成过闸流量，根据流量与闸前、闸后水位（淹没出流时需要）及闸门开度的关系，可以通过闸门开度，控制闸门的过流量。在工程现场安装传感器，就可以自动采集闸前（上游）和闸后（下游）水位和闸位（闸门开度）实现闸门的自动控制。

5.2.1 底流式闸门流量计算

底流式闸门过流的流态分为两种，一种是自由出流，一种是淹没出流。判断条件是：闸后水深/闸前水深 ≤ 0.7 为自由出流，闸后水深/闸前水深 > 0.7 且 ≤ 0.9 为淹没出流。

（1）孔流

$$Q = \mu b h_g \sqrt{2g(H - 0.65h_g)} \quad (2) \text{ 自由出流过闸流量计算公式}$$

$$Q = \mu' b h_g \sqrt{2gZ_l} \quad (3) \text{ 淹没出流过闸流量计算公式}$$

式（2）（3）中： μ 、 μ' 为流量系数（由水闸与渠道连接形式确定）， b 为闸孔宽度， h_g 为闸门开度， H 为上游水深。该上游水深指闸前要有一段接近“均匀流”的水流， H 即该均匀流末端的水深， Z_l 为闸前、闸后水深差。

（2）堰流

$$Q = mbh\sqrt{2gH} \quad (4) \text{ 自由出流过闸流量计算公式}$$

$$Q = \phi b h_H \sqrt{2g(H - h_H)} \quad (5) \text{ 淹没出流过闸流量计算公式}$$

式中（4）（5）中： m 、 ϕ 为流量系数（由水闸与渠道连接形式确定）， b 为闸孔宽度， h 为闸门开度， H 为上游水深。该上游水深指闸前要有一段接近“均匀流”的水流， H 即该均匀流末端（临近闸门）的水深， h_H 为下游（闸后）水深。

所谓孔流就是闸下水流与闸门底缘间没有自由水面，形成有压的孔口出流；而堰流则相反，闸下水流与闸门底缘间存在自由水面。由于两种过流方式的流量计算方式不同，所以首先要判定孔流还是堰流。

(3) 底流式过闸流量控制的问题

底流式流量控制只需在闸门处安装上、下游水位计（用于判断自由出流还是淹没出流，若是自由出流，则流量计算只需要上游水位，以此计算出上游水深）和闸位计即可计算得到过流量，因此简易、方便。但是在实际工程中，已建或拟建的水闸上游均不能形成一段平顺水流（接近均匀流），导致流态差，监测的水位不满足流量计算要求。

5.2.2 顶流式闸门流量计算

顶流式闸门按照闸门开度分为两种过流方式，当闸门的倾角较大，开度较小时，为自由出流方式；当闸门倾角较小，开度较大时，为淹没出流方式。两种方式过流量计算不同。同样，也要用上、下游水深进行判定。如果是Rubicon的“槽闸”（顶流式），也可以直接用其流量计算结果。

(1) 自由出流流量计算

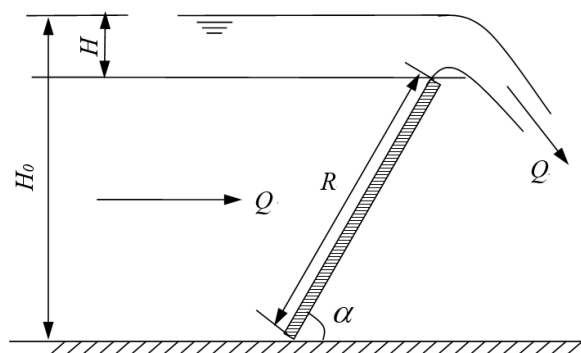


图3 顶流式闸门的自由出流

Figure 3 Free outflow of top-flow gate

水流从闸门顶部通过，根据闸门设计，闸门面板的厚度 δ 小于 $0.67H$ ， H 为堰上水头。闸门过流量可以按倾斜薄壁堰自由出流计算：

$$Q = m\sigma_{\alpha} B \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (6)$$

式(6)中 σ_{α} 为闸门倾斜的修正系数，随倾角 α 而变，可按试验结果（表1）取值。

表 1 闸门倾斜修正系数 σ_α 取值表

Table 1 Table of values for gate tilt correction coefficient

α	6°	13°	21°	30°	47°	59°	90°
σ_α	1.070	1.100	1.125	1.127	1.105	1.088	1.000

m 为薄壁堰流量系数。忽略行进速度 V_0 的影响时,即为

$$m = 0.405 + \frac{0.0027}{H} \quad (7)$$

考虑 V_0 的影响时,又为

$$m = (0.405 + \frac{0.0027}{H}) [1 + 0.555 \frac{H^2}{(H + \sin \alpha)}] \quad (8)$$

式中 B 为闸门宽(m);

g 为重力加速度(m/s^2);

α 为闸门面板倾角($^\circ$);

H 为堰上水头(m)。

$$H = H_0 - R \sin \alpha \quad (9)$$

式中 H_0 为堰上总水头,即闸门的水位传感器监测到的闸门的过流水位; R 为闸门的半径,单位为米。

(2) 淹没出流流量计算

当闸门开度较小时,水流从闸门顶经过,形成自由出流,但随着闸门的开度越来越大,堰顶位置越来越低,当下游水位高于堰顶并且堰下游发生淹没水跃时,下游水位将会影响闸门的泄流量,将发生淹没出流,如图4所示。只要不同时满足这两个条件,堰顶水流仍处于急流状态,泄流时的流态仍然为自由出流。

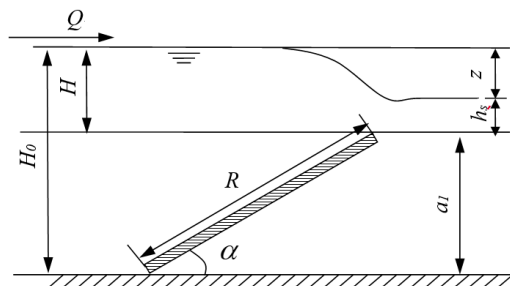


图 4 闸门淹没出流情况图

Figure 4 Diagram of submerged outflow of gate

下游水位高于堰顶这一条件很容易判断,而堰下游发生淹没水跃的条件则需要用经验的方法进行判断。根据实验,发生淹没水跃的经验关系是

$$\frac{z}{a_1} \leq \left(\frac{z}{a_1} \right)_c \quad (10)$$

式中,临界值 $\left(\frac{z}{a_1} \right)_c$ 与 $\frac{H}{a_1}$ 的经验关系如图5所示。当计算的 $\left(\frac{z}{a_1} \right)$ 值位于图4中

$\left(\frac{z}{a_1} \right)_c$ 曲线下方时,下游将发生淹没水跃。其中, z 为上、下游水位差, a_1 为下游堰高, H 为上游水头。

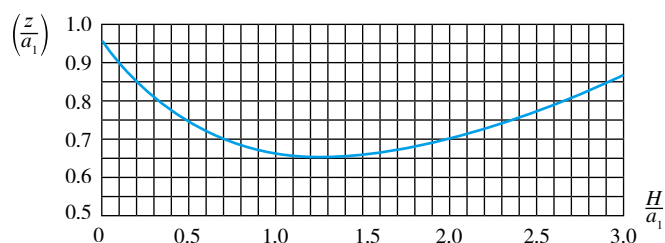


图5 经验关系图

Figure 5 Experience relationship diagram

当下游水位高于堰顶并且堰下游发生淹没水跃时,闸门过流量按薄壁堰淹没出流的流量公式计算

$$Q = \sigma \sigma_a m B \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (11)$$

式中, σ 为淹没系数,可用以下经验公式计算

$$\sigma = 1.05 \left(1 + 0.2 \frac{h_s}{a_1} \right)^3 \sqrt{\frac{z}{H}} \quad (12)$$

式中, h_s 为下游水位高于闸门顶的数值。

需要说明的是,虽然薄壁堰淹没出流时的流量可以计算,自由出流和淹没出流也有界定条件,但是由于上游水位、下游水位和闸门开度等数值可能同时变化,系统界定是自由出流还是淹没出流具有一定的复杂性,而且淹没出流的流量计算精度比自由出流流量计算精度低。为保证量测精度,降低系统计算复杂度,尽量避免使闸门在淹没出流情况下工作,尽量避免闸门开度较大。

顶流式闸门流量计算，也可以用“矩形堰”过流量计算公式或“跌水”过流量计算公式，然后与其他量水方式比较，特别是用转子流速仪的流速-面积法进行率定，有可能的话，与Rubicon的流量算法比较。

(3) 无侧收缩矩形堰流量计算

无侧收缩矩形堰如图6所示。可用式(13)计算其过流量。

$$Q = mb\sqrt{2g}H^{1.5} \quad (13)$$

式(6)适用范围： $0 < H/P < 6$ 。

式中， $m = 0.407 + 0.0533 H/P$ ；

H 为堰上水头，单位为米；

P 为堰高，单位为米。

对于顶流式闸门，这里的堰高可以根据闸门的倾斜度计算得到。

B 为堰顶的宽度，单位为米。

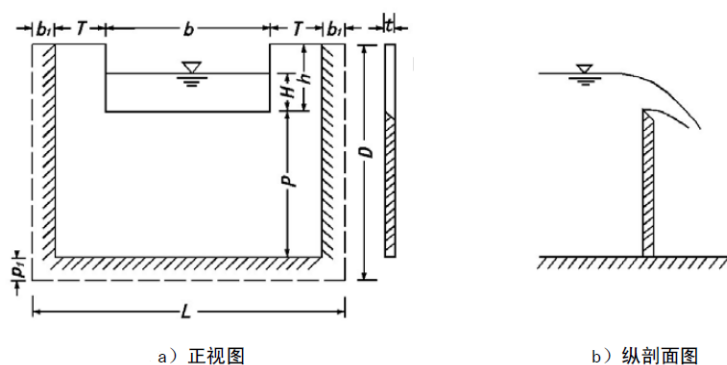


图6 矩形堰过流示意

Figure 6 Schematic diagram of flow over rectangular weir

5.3 孔流与堰流的判定

要利用闸门量水就要在闸前（上游）、闸后（下游）安装水位计，并在闸门处安装闸位计。根据水位可以计算出水深，同样根据闸位也可以计算出闸门底缘至闸底板的高度。因此，当闸门底缘至闸底板的高度小于闸前水深时，可判定为孔流；反之，当闸门底缘至闸底板的高度大等于闸前水深时，则判定为堰流。根据判定结果选择合适的过闸流量计算公式。

依据上述概念，堰流和孔流的量化判定计算如下：

当 $e/H > 0.75$ 时为堰流；当 $e/H \leq 0.75$ 时为孔流。

e 为闸门开启高度， H 为闸前水深。

5.4 阀门流量控制

分水口门采用阀门分水时，其流量控制比较简单。一般在阀门后安装超声波管道流量计、电磁管道流量计、远传水表等实现水量计量。与分水口采用闸门且为“前控后量”（量的方式可以不同）方式一样，阀门根据流量计获取的流量值控制阀门开度，当流量达到需要的流量时，即稳定开度在固定值，期间有一定的微调过程。

5.5 运行控制过程

由于区域气候、自然环境、人类行为和社会变革等因素的变化，对水资源配置与调度提出越来越高的动态性和时效性要求，导致灌区运行控制过程不能再沿袭传统的人工作业方式，必然也须采用信息化技术实现自动化乃至智能化控制。无论是自建自管（近期）还是社会服务，创建运行控制平台都是唯一的出路。

随着智能化技术及设备的进步与应用，运行控制（从五级渠系自下而上或自上而下控制）会逐步实现“自动闭环控制”，如图7所示。

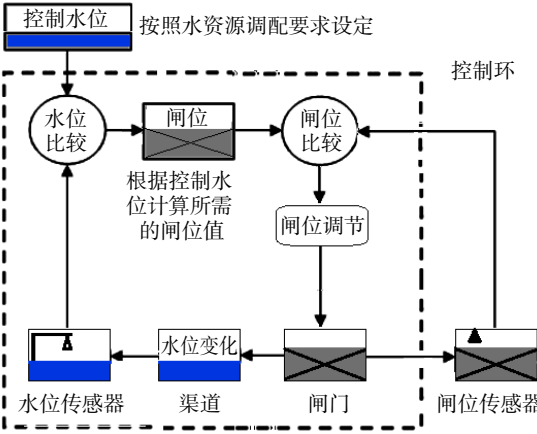


图 7 自动闭环控制示意

Figure 7 Schematic diagram of automatic closed-loop control

灌区水资源调度过程的运行控制过程就是按照各个“口门”各时段的需水要求（事先配置好），根据该时段口门处上、下游水深或“前控后量”工程场景的下游流量计的流量与控制装置的设置的关系。例如，闸门启闭数量和各闸门的开度、水泵的启停台数和各水泵的开度、阀门的开关数量和各阀门的开度等，确定运行时的装置控制，以保证过流量需求。

以闸门控制为例，根据具体口门的过流量需求（最小到最大），事先按照前面的计算公式，计算上、下游水深及闸位与流量的关系。例如，流量为 Q_1 时，上游水深、下游水深（当为自由出流时，可能不需要该数据）、闸门开度应为多少；流量为 Q_2 时，上游水深、下游水深、闸门开度应为多少等。然后建立水深、闸门开度的关系，可以用表格，也可以用曲线（参见图8，建立数学表达式）。实际运行时，根据流量要求、实测的水深，查找对应的闸门开度即可控制运行。

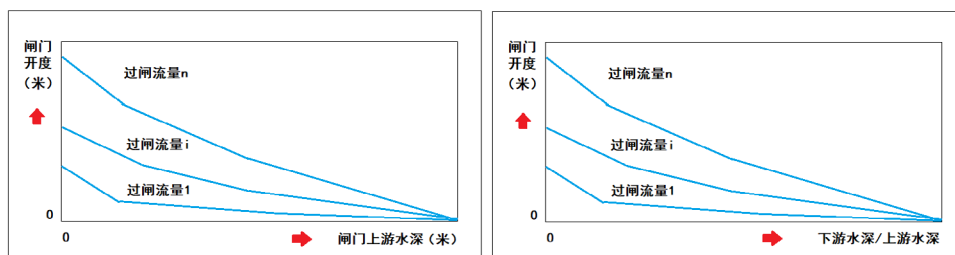


图8 闸门上游、下游水深、闸门开度与流量关系曲线

Figure 8 Relationship curve between water depth upstream and downstream of the gate, gate opening, and flow rate

对于“前控后量”方式和阀门控制方式，其控制过程比较简单，闸门启闭过程中，同步自动观察实际过流量（通过水量计量设备实现），当过流量稳定在要求过流量时即可固定闸门开度。

6 结论

（1）水资源配置的全要素考量：在水资源配置过程中，不仅考虑灌溉需求，还综合纳入生活、工业、发电、生态和航运等多方面用水需求，实现了水

资源的全方位、多层次配置。

(2) 目标函数确定与模型表达：通过确定合理的目标函数，如考虑经济效益、社会效益，以及自然资源平衡等，构建相应数学模型表达水资源配置问题，为后续求解奠定基础。

(3) 水量优化调度及输水：依据水资源配置模型，可计算出各用水单元各时段的配水量，并按配水量开展水量调度，保障水资源的适时、适量供应。

(4) 运行控制过程的精细化：在运行控制过程中，通过从数据库提取相应参数，对水利工程建筑物（如水闸、泵站、阀门）的启闭时间与过流量进行精细化控制，实现水资源的精准管理。

参考文献

- [1] 吴玮, 张维佳. 水力学(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [2] 赵振兴, 何建京, 王付. 水力学(第3版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
- [3] 郑遵名等. 水工设计手册 灌区建筑物[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [4] CURIEL I J, MASCHLER M, TIJS S H. Bankruptcy games[J]. Zeitschrift für Operations Research, 1987, 31(5): A143-A159.
- [5] Thomson W. Lorenz rankings of rules for the adjudication of conflicting claims[J]. Economic Theory, 2012, 50(3): 547-569.
- [6] 顾建, 王伟, 封学军, 等. 基于GAMS的港口节能减排建设方案多目标优化[J]. 上海海事大学学报, 2016, 37(4): 15-18.
- [7] 何勇, 鲍一丹, 陈发荣. 粮食产后处理模式的通用代数建模(GAMS)仿真与优化[J]. 农业工程学报, 2001, 17(4): 102-106.
- [8] 王浩, 刘攀, 刘志武, 等. 水资源二元模拟与股权合作配置[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023.
- [9] 雷晓辉, 王浩, 蒋云钟, 等. 复杂水资源系统模拟与优化[M]. 北京:

- 中国水利水电出版社, 2012.
- [10] 魏传江, 韩俊山, 韩素华. 流域/区域水资源全要素优化配置关键技术及示范 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [11] 陈金水. 灌溉水资源非常态控制过程建模与验证 [C] //都江堰学术论坛论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [12] 胡旸, 万永根, 丁家煜, 等. 算力未来 构筑数智时代新基石 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2023.
- [13] 数字孪生水利“天空地水工”一体化监测感知夯基提能行动方案 (2024—2026年) [Z]. 水利部, 2024.

Water Resource Allocation, Scheduling and Control Processes, Models, Algorithms, and Software Implementation in Irrigation Areas

Fan Zhe Xu Xinzhong

Zhanghe Engineering Administration Bureau, Hubei Province, Jingmen

Abstract: Most of China's irrigation areas were built in the 1950s and 1960s, with rudimentary and uncoordinated projects. The national project for continued construction, supporting facilities, and water-saving renovation in 1998 improved the engineering measures to some extent. However, the irrigation areas still generally face issues of relatively lagging management capabilities and levels. A large amount of data for irrigation area self-management and industry management is still mainly handled manually, making it difficult for industry authorities at all levels to timely, accurately, and comprehensively understand

the development status and changing trends of irrigation areas and the industry, leading to the inability to quantify irrigation area management objectives. As we all know, informatization construction can effectively promote engineering management, rationally allocate water resources, and maximize water use efficiency. With the intensification of the contradiction between required water quantity and available water supply, water users' demands for irrigation areas are increasing. On the basis of improving engineering measures, only through informatization management can the quality and level of irrigation area services be improved, achieving timely, appropriate, and safe water supply.

Key words: Irrigation district; Water resources; Required water quantity; Available water quantity