

长距离自流型渠道输水控制的二步法研究

韩延成, 高学平

(天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 提出了一种针对自流型渠道输水的最优化控制的两步法。第一步是控制各闸站流量使渠段水位(或蓄水量)达到目标水位(或蓄水量), 第二步是调整流量使渠段水位稳定。建立了使渠道内水流在最短时间内恢复到正常运行水位的最优渠道输水控制模型。构建了长距离渠道输水控制的一系列约束条件, 包括渠道下游需水量约束、最高控制水位、水位最大容许下降速度、渠道容许过流能力、最少的开机次数等。提出了利用线性规划或将大系统分解为若干子系统求解的方法。算例结果表明, 用传统的渠道控制方法需要几天才能使水位恢复到目标水位的渠道, 用本优化方法控制, 可以在几小时内使渠道水位达到目标水位并达到稳定。

关 键 词: 长距离; 渠道; 最优控制; 输水; 自流; 调度

中图分类号: TV133.04 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2006)03-0414-05

渠道自动控制方法的研究, 在国外开展的较早, 而我国在这方面的研究较为滞后。早在 1952 年, 一种叫做 Little Man 的控制方法就被应用到美国加州中央流域工程的 Friantkern 渠道上^[1]。以后许多控制方法被研究和应用。1979 年 Buyalski 等^[2]研究了一种叫电子水位过滤器补偿+ 复位(EL-FLO plus reset)的就地控制算法, 用于控制 Corning 渠道。它是在传统的比例+ 积分控制中加入过滤水位波动的模块, 以消除水位波动的影响。BF-VAL^[3]是一种等容积就地自动控制模型, 相当于将控制水位点设在渠道的中央。应用的有 Sahe 等渠道^[4]。P+PR^[1](比例+ 比例复位)控制算法将微分控制引入渠道控制, 应用于 Umattilla^[4]流域工程等。学者们也对大型复杂渠道的集中控制方法进行了研究。控制蓄量法是通过控制渠段蓄水量从而控制整个渠道运行, 应用的有美国加州调水工程、中亚利桑拿州调水工程等^[5]。动态规划法应用动态规划原理建立输水控制模型, 应用的有希腊雅典供水工程等^[4]。也有学者对另外一些控制方法进行了探索, 如 SMITH 等预测法、线性二次规划法等^[6,7]。

本文提出一种实用的两步法控制渠道输水运行的方法, 其基本原理是在满足渠道输水所需的约束条件下(如满足水位、水位降落速度、流量、需水量、开机次数等条件), 用线性规划的优化方法使渠道水位达到最优状态。第一步是控制各闸站(或泵站)流量使渠段水位(或蓄水量)达到目标水位(或蓄水量), 第二步是调整流量使渠段水位(或蓄水量)稳定。

1 数学模型的构建及求解

由于渠道控制过程中, 闸门不可能完全按设定的流量运行, 总会有误差, 因此渠道运行一段时间后, 总会偏离设定的目标水位。当水位超出其最高(或最低)控制水位时, 为了不致漫堤, 需将水位尽快恢复到目标水位。另外当渠道中间或上下游流量发生变化时, 也需要实时调正。因此调正过程为当水位偏离目标水位时, 在设定的时间内使渠道水位恢复到目标水位。当水位恢复到目标水位后, 还应使渠道水位保持稳定。图 1 是一个典型渠道, 将渠道通过这些控制站划分为 m 个渠段: 1, 2, ..., m 。优化变量取各渠段、不同时段渠段末流量与渠段蓄水量。

收稿日期: 2004 12 10; 修订日期: 2005-03-08

作者简介: 韩延成(1971-), 男, 甘肃天祝人, 天津大学博士研究生, 主要从事远距离输水调度自动控制研究。

E-mail: yanchenghan@126.com

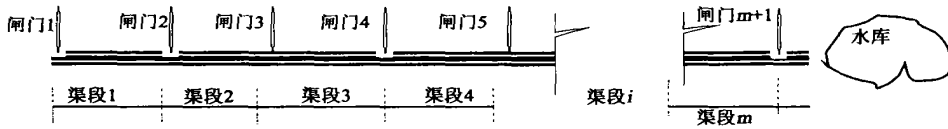


图1 典型输水渠道拓扑示意图

Fig 1 Sketch of representative delivery water canal

1.1 目标函数

目标函数取规定时间结束时渠段蓄水量与目标蓄水量之间的差值最小。不取水位作目标函数是由于渠段的蓄水量与流量之间更容易建立关系。因此可以把控制水位转化为控制渠段蓄水量，控制了渠段蓄水量也就控制了水位^[5]。水位和蓄量之间，工程上一般采用将水面线线性化，建立各渠段水位和蓄量对应关系，具体方法见文献[1, 5, 8]。

$$\min Z = \sum_{i=1}^m W_i (PM_{ie} + PN_{ie}) + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m (WA_{ik}M_k + WB_{ik}N_{ik}) \quad i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, nt \quad (1)$$

式中 Z 为优化的目标函数；下标 i 为渠段编号； e 为最后一个时段号。 PM_{ie} 、 PN_{ie} 为实际蓄水量与设定的目标蓄水量之间的差值，其具体意义见式(2)。 W_i 为实际蓄水量与设定的目标蓄水量之间的差值的惩罚因子。 M_k 与 N_{ik} 是为限制闸门或泵站频繁开启而增设的虚函数，其具体意义见式(12)节。 WA_{ik} 、 WB_{ik} 为 M_k 与 N_{ik} 的惩罚因子。

1.2 输水约束条件

(1) 在规定的时间内水位应恢复到目标水位的约束(第一步) 当水位超出其最高(或最低)水位时，应使水位(或蓄量)在规定的时间内恢复到目标水位(或蓄量)，用渠段蓄量表示为

$$V_{ie} - VG_{ie} = PM_i - PN_i \quad (2)$$

式中 下标 e 表示本次循环中第一阶段末时间序号。 V_{ie} 为 i 渠段第一阶段末的蓄量； VG_{ie} 为设定的 i 渠段的目标蓄量。 PM_i 、 PN_i 为增加的非负虚变量，初值设为零，其基本意义：当最后 e 时段的蓄量与目标蓄量不相等时，优化过程中 PM_i 、 PN_i 必不同时为零，这样最小化目标函数(式(1))中必然产生惩罚，迫使蓄水量与目标蓄水量之间的差值为零。

(2) 水位恢复到目标水位后应使水位保持稳定(第二步) 当水位恢复到目标水位时刻，即完成第一阶段的任务，但这时各渠段的进出水流量可能不相等。也就是说。如果对流量的趋势继续，渠道内的水位很快又会达到新的极限水位，又需要重新调整。因此，当水位达到目标水位后应调整流量，使渠段上下游进出水流量平衡，水位保持稳定。

$$DT_k(Q_{i-1k} - Q_{ik} + QIN_{ik}) - DT_kQS_{ik} - DT_kQD_{ik} = 0 \quad (3)$$

式中 QIN_{ik} 为渠道水位达到目标水位后，第 i 渠段在第 k 时段的入流； QD_{ik} 为第 i 渠段 k 时段的总出水流量； QS_{ik} 为 i 渠段 k 时段的渗漏流量。

(3) 水位(或蓄水量)约束 渠道输水最基本的要求就是把运行水位控制在一定的范围之内。由于选取的基本优化变量为流量。流量和渠段的蓄水量之间更容易建立关系，将控制水位转化为控制渠段蓄水量，其约束为

$$Vdn_{ik} \leq V_{ik} \leq Vup_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, nt - 1 \quad (4)$$

式中 i 为渠段号； k 为时间序列； V_{ik} 为第 i 渠段在第 k 时段的蓄水量； Vdn_{ik} 为第 i 渠段在 k 时段的控制下限蓄量； Vup_{ik} 为第 i 渠段在 k 时段的控制上限蓄量。在正常输水时，一般渠段可不设下限值，但在以下一些情况下可能需要设下限值：①在冰期输水时为防止水位过低造成冰塞；②本渠段有分水口而需要一定的控制水位；③一些泵站前池要求限制最低淹没水位；④有的渠段渠底没有衬砌，为减少渠底冲刷，可抬高运行水位，减缓流速，避免冲刷。

(4) 渠段水位上涨及降落速度约束条件 渠道水位如果下降速度过快, 容易使渠堤产生滑坡, 危及渠道的安全。冰期输水时如果水位上涨速度过快容易使冰盖涨破或水漫溢上冰盖, 造成冰塞或冰坝事故; 水位下降速度过快, 还容易使冰盖塌落造成冰塞事故。因此对水位的上涨或下降速度要进行控制。另外, 控制上涨及降落速度也可间接控制渠道水流稳定, 以免渠道水流发生大的波动。渠段蓄水量约束条件为

$$\text{水位降落速度约束条件 } (V_{ik} - V_{ik+1})/DT_k \leq HJ_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, nt-1 \quad (5)$$

$$\text{水位上涨速度约束条件 } (V_{ik+1} - V_{ik})/DT_k \leq HS_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, nt-1 \quad (6)$$

式中 V_{ik} 为第 i 渠段在第 k 时段的蓄水量; HJ_{ik} 与 HS_{ik} 分别为第 i 渠段在第 k 时段的蓄水量变化的上涨与降落速度限值。

(5) 渠段最大过流能力约束条件 由于泵站或渠道的最大过流能力是有限的, 另外, 一些输水渠道引水口可引水流量是有限制的, 过流能力的约束条件为

$$Q_{\min ik} \leq Q_{ik} \leq Q_{\max ik} \quad (7)$$

式中 Q_{ik} 为第 i 渠段端首处在第 k 时段的流量; $Q_{\max ik}$ 为第 i 渠段端首在第 k 时段的最大容许流量; $Q_{\min ik}$ 为第 i 渠段端首在第 k 时段的最小容许流量。

(6) 渠段的流速约束条件 有一些输水渠道不是衬砌渠道或没有完全衬砌, 这就要求本渠段流速不能过大, 以免引起冲刷。另外对一些多泥沙渠道, 流速又不能太小, 以免造成渠道淤积。渠段流速约束条件示为

$$U_{dn ik} \leq U_{ik} \leq U_{up ik} \quad (8)$$

将流速近似表示为流量与蓄量的关系:

$$U_{ik} = Q_{ik}/A_{ik} \approx Q_{ik}DS_i/(A_{ik}DS_i) = Q_{ik}DS_i/V_{ik} \quad (9)$$

即

$$U_{dn ik}V_{ik}/DS_i \leq Q_{ik} \leq U_{up ik}V_{ik}/DS_i \quad (10)$$

式中 U_{ik} 为第 i 渠段在第 k 时段的流速; $U_{up ik}$ 与 $U_{dn ik}$ 为第 i 渠段在第 k 时段的最大容许流速与最小容许流速; DS_i 为第 i 渠段的长度; A_{ik} 为断面面积。

(7) 各渠段上下游流量与蓄水量关系约束条件 渠道沿线有渗漏, 沿线用水户的用水也必须满足, 渠道沿线流量必须相匹配。其约束为

$$DT_k(Q_{i-1k} - Q_{ik} + QIN_{ik}) - DT_kQ_{sik} - DT_kQD_{ik} = V_{ik} - V_{ik-1} \quad (11)$$

式中 QIN_{ik} 为第 i 渠段在第 k 时段的流入; QD_{ik} 为 i 渠段 k 时段的总出水流量; Q_{sik} 为 i 渠段 k 时段的渗漏流量。一般输水渠道水深变化不会太大, 因此某一渠段的渗漏流量可给定为常数。

(8) 限制频繁调节闸门或泵站开停机约束 对闸站, 特别是用丝杠提升的平板闸门, 频繁起闭, 容易使丝杠损坏, 闸门变形。在实际的输水调度过程中也会要求泵站尽量减少开停机次数, 以延长水泵的使用寿命。在约束条件中不好直接限定开停机的次数, 但是可用限制流量的变化率间接的限制频繁起闭闸门或开停泵站机组。同时使整个渠道内的流量比较稳定。其约束条件为

$$Q_{ik} - Q_{ik-1} = M_{ik} - N_{ik} \quad (12)$$

式中 M_{ik} 、 N_{ik} 为增加的非负虚变量, 初值设为零。其基本意义: 当时段 k 的流量与前一时段 $k-1$ 的流量不相等时, 优化过程中 M_{ik} 与 N_{ik} 必不同时为零。这样最小化目标函数(式(1))中必然产生惩罚。

(9) 其它约束条件 上下游边界条件约束: 对一些输水系统来说, 上游来水及下游需水是有限的。如有的输水系统, 下游没有调蓄水库, 需要给用水户供给恒定流量的供水。

$$\text{约束为 } Q_{pk} = QP_{pk} \quad k = 1, 2, \dots, nt \quad (13)$$

$$\text{初始流量及调整后要求达到的流量 } Q_{ic} = QC_{ic} \quad (14)$$

式中 p 为最上游一个控制站或最下游控制站编号; QP_{pk} 为最上游或最下游点设定的在第 k 时刻的流量; i 渠段号; 下标 c 为初始或调整结束时刻, QC_{ic} 为初始或调整后最后要求要达到的流量。

1.3 数学模型求解

可以看出, 此优化模型实际上是一个线性规划问题, 求解过程用一般的线性规划方法就可以求解。但对于一个复杂的大型输水工程, 变量和方程数会很大, 可用一些现有的大规模线性方程组的解法, 具体方法可参考文献[9], 也可将整个系统分解为几个小系统, 分别求解。

2 应用算例

某输水工程, 渠长 225 km, 沿线控制闸站 16 个, 各控制站之间相距 15 km。运行控制要求: 渠道水位下降速度控制在 0.2 m/h 以下。不能产生弃水。正常运行渠道流量控制在 30.0~60.0 m³/s。测得开始时流量和渠段蓄水量(根据水位计算)见表 1、表 2。要求 6 h 内水位达到正常水位并稳定, 即各区间蓄水量达到目标蓄水量(表 2)。下游由于降水等原因, 需水急剧减少。同时须将整个渠道的流量调整到 40 m³/s。求解时, 设定第 1~4 h 水位达到目标水位, 第 5~6 h 为流量调整期。根据式(1)~式(14)写出目标函数及约束条件, 显然是一个线性最优化问题。编程中, 第 1~4 h 约束条件(3)不作要求, 第 5~6 h 加入条件(3)。此处用单纯形法求解, 得到各渠段、各时段流量和蓄量控制过程如表 3、表 4。可以看出, 虽然控制过程分两步控制, 但数学模型是一个线性规划问题, 不需要分两步单独求解。

表 1 各站初始流量

Table 1 Initialized runoffs of all stations

m³/s

闸站编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
初始流量	60.43	59.55	60.95	61.74	60.04	60.97	58.68	60.29	61.34	61.68	60.84	59.46	61.27	59.18	58.88	59.50

表 2 初始蓄水量及目标蓄水量

Table 2 Initialization volume and goal volume

万 m³

渠段号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
初始	10.24	10.58	8.46	9.86	9.32	8.69	11.36	8.84	7.90	12.42	9.54	11.50	9.83	7.89	9.28
目标	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

表 3 各站点各时段流量控制和蓄量控制过程计算结果

Table 3 Computing results of runoff and volume for all period

站 点	各站点各时段流量控制过程/(m ³ ·s ⁻¹)						各站点各时段蓄量控制过程/万 m ³					
	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00
1	60.43	44.49	47.29	63.60	40	40	10.24	9.64	9.52	10.00	10.00	10.00
2	59.55	46.16	47.62	62.28	40	40	10.58	9.57	9.48	10.00	10.00	10.00
3	60.95	48.96	47.87	60.83	40	40	8.46	9.46	9.33	10.00	10.00	10.00
4	61.74	46.18	48.22	58.97	40	40	9.86	9.42	9.28	10.00	10.00	10.00
5	60.04	47.40	48.60	56.97	40	40	9.32	9.38	9.28	10.00	10.00	10.00
6	60.97	47.24	48.88	54.96	40	40	8.69	9.36	9.28	10.00	10.00	10.00
7	58.68	45.36	49.10	52.97	40	40	11.36	9.41	9.29	10.00	10.00	10.00
8	60.29	50.77	49.44	51.01	40	40	8.84	9.38	9.29	10.00	10.00	10.00
9	61.34	49.28	49.67	49.05	40	40	7.90	9.40	9.30	10.00	10.00	10.00
10	61.68	45.12	49.96	47.09	40	40	12.42	9.53	9.30	10.00	10.00	10.00
11	60.84	53.14	50.60	45.15	40	40	9.54	9.53	9.30	10.00	10.00	10.00
12	59.46	53.15	51.24	43.20	40	40	11.50	9.57	9.30	10.00	10.00	10.00
13	61.27	58.49	51.99	41.27	40	40	9.83	9.53	9.31	10.00	10.00	10.00
14	59.18	59.33	52.60	39.36	40	40	7.89	9.50	9.34	10.00	10.00	10.00
15	58.88	54.85	53.04	37.54	40	40	9.28	9.58	9.36	10.00	10.00	10.00
16	59.50	54.00	53.66	35.76	40	40						

从优化结果看, 用两步法在 6 h 内就可使水位(或蓄量)恢复到了设定的目标水位, 并且使水位稳定到目标水位(或蓄量)。每个闸站闸门只需要调节 2 次。如果按传统的按顺序逐级调节闸门的控制方法, 据测算, 这样长的渠道, 要使整个渠道水位达到目标水位, 并保持稳定, 需要几天的时间, 闸门(或泵站)的调节次数也将远远超过 4 次。从本例优化结果也可以看出, 从 5 h 以后, 渠段上下游进出流量相等, 水位将保持不变。当然实

际调度中这种稳定状态不可能永远保持下去。由于水位、流量的测量误差及所需闸门开度的计算误差,使渠段上下游实际进出水流量不能完全平衡,因此这种稳定的状态慢慢会达到新的不稳定(水位达到最高或最低水位),需再次调整。

3 结 论

根据多年调度运行的实践经验和优化理论,提出了一种两阶段渠道输水控制方法,其较传统的控制方法有以下优点:①可以在规定的时间内,以最快的速度使渠道水位达到目标水位,以满足下游需水的要求,从算例可以看出,渠道水流从一种状态调整到另一种状态,响应时间大大减少。②模型中对渠段的蓄水量变化速率、流量变化等进行了约束,因此能使渠道内水流平稳运行,也可避免由于水位降落速度过快产生的渠堤滑坡。③可以以最少的闸门(或泵站)调节次数控制整个渠道运行。本渠道控制模型是建立在输水和优化基础上的,适用于南水北调中线等自流输水渠道或无泵站提水的系统。

参考文献:

- [1] Buyalski C P, Falvey H T, Rogers D S. Canal systems automation manual Volume II[M]. Denver Colo: US Bureau of Reclamation, 1991.
- [2] Ploss L. Canal automation using the electronic filter level offset (EL-FLE) method[A]. Planning, operation, rehabilitation, and automation of irrigation water delivery systems[C]. edited by Zimbelman, New York: ASCE, 1987.
- [3] Chevereau G, Schwartz benezeth S. BIVAL system for downstream control[A]. Planning, operation, rehabilitation, and automation of irrigation water delivery systems[C]. edited by Zimbelman, New York: ASCE, 1987.
- [4] David C, Rogers, Jean Goussard. Canal control algorithms currently in use[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1998, 124(1): 11- 15.
- [5] Harald D, Frederiksen. Design of California Aqueduct[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1968, 95(IR2): 307- 328.
- [6] Balogun, Hubbard. Automatic Control flow using linear quadratic regulator theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(1): 75- 101.
- [7] Jear Lue Deltour, Franck Sanfilippo. Introduction of Smith Prediction into Dynamic Regulation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1998, 124(1): 11- 15.
- [8] Dewey H G, Madsen W B. Flow control and transients in the California Aqueduct[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1976, 102(IR3): 335- 348.
- [9] 林延江, 陆昌甫, 朱光熙, 等, 水利土木工程系统分析方法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.

Two-step optimal operation and control method for long distance gravity-flow delivery in canals

HAN Yarr cheng, GAO Xue ping

(School of Constructional Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A new two-step control method based on the principle of optimality is proposed for the gravity-flow in open channel system. The first step is to control all the levels (or volumes) in the channel to reach the goal levels (or volumes). The second step is to adjust the channel flow of all sections to realize the stabilized level. The optimization flow control model is built, which make the levels reach the goal levels in the shortest time. The corresponding constraints for this model, the downstream water demands, the maximum water levels, the allowable drawdown rate of water level, the allowable discharge capacity of the channel, the minimum frequent of switching on and off the pump, and so on, are constituted. The solution to the problem is proposed by using linear the program method or decomposing a large and complex system into two or three small and simple systems. The example application of this method shows that the time during which the water levels reach the target levels and keep them stable can be reduced from a few days to a few hours.

Key words: long distance; canal; optimization; control; water delivery; gravity-flow; operation