

文章编号: 1006-4710(2002) 03-0238-06

南水北调东线水量调配研究

赵勇, 朱悦, 解建仓, 马斌, 王少波, 王晓辉
(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 在系统概化的基础上建立了南水北调东线水量调配模型, 进行了水量调配计算, 并进行了仿真试验分析。水量调配结果表明, 东线工程调度过程合理, 且具有较高的可靠性。
关键词: 南水北调东线; 水量调配; 仿真试验
中图分类号: TV213 **文献标识码:** A

Research on Water Operation of the East Route in South-North Water Diversion Project

ZHAO Yong, ZHU Yue, XIE Jian-cang, MA Bin, WANG Shao-bo, WANG Xiao-hui
(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A water operation model for the east route in South-North Water Diversion Project is established on the basis of systematic finalization; the water distribution in operation is computed and the simulation testing analysis is conducted in this paper. The findings from water operation indicate that the process of engineering operation in the east route is both rational and reliable.
Key words: east route of south-north water diversion project; water operation; simulation test

南水北调工程是我国水资源优化配置、解决北方地区缺水的一项战略性基础工程。南水北调东线供水范围位于黄淮海平原的东部及淮河以南的里运河东西两侧, 南起长江、北至天津; 西界为子牙河、滏阳河、梁山、徐州、津浦铁路, 东至渤海、黄海。规划从扬州附近的长江引水, 利用京杭大运河以及其平行河道输水, 黄河以南逐级建设泵站提水北送, 连通洪泽湖、洛马湖、南四湖、东平湖作为调蓄水库。黄河以北沿大运河或新扩建河道自流到天津, 新建或扩建千顷洼、大屯、大浪淀、北大港水库调蓄来水。输水主干线全长 1 156 km, 其中黄河以南 646 km, 穿黄段 17 km, 黄河以北 493 km。第一期工程的规划水平年为 2010 年, 主要供水区域为黄淮海平原东部和山东半岛, 主要供水目标是补充天津、山东半岛和输水沿线其他城市生活环境及工业用水, 并适当兼顾农业和其他用水。^[1]

1 需调水量预测

需求是相对利用目标和用途而言的。本次调度需水量预测是以 1998 年为基准年, 需水量按 2010 年水平年预测, 规划水平年的社会经济发展指标根据各省制定的《国民经济和社会发展第十个五年计划纲要》和城市规划预测, 工业总产值考虑了产业结构的调整, 农业考虑了种植结构的调整, 灌溉面积小幅度增长。需调水量、渠系利用等系数均采用水利部淮河水利委员会、水利部海河流域委员

收稿日期: 2001-12-23
基金项目: 国家计委重大科研项目的部分成果。
作者简介: 赵勇(1976), 男, 西安理工大学硕士研究生。
© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

会 2000 年 8 月编制的《南水北调东线工程修订规划报告》。南水北调东线工程受水区规划水平年(2001)需调水量预测见表 1。

表 1 东线工程受水区 2010 水平年需调水量预测

亿 m³

黄河以南受水区				山东半岛	黄河以北受水区				受水区合计
江苏	安徽	山东	合计		天津	河北	山东	合计	
22.16	3.39	3.97	29.52	8.76	8.87	5.86	4.25	18.98	57.26

2 系统概化及水量调配模型^[2,3,4]

2.1 系统的概化

南水北调东线工程是一个庞大、复杂的供、输、蓄水系统,建模时不可能考虑所有因素,为了使模型简化又真实反映南水北调东线工程的特点,仅考虑对工程影响较大的主要因素。南水北调东线工程水量调配模型概化如图 1 所示。供水沿线共分了 11 片,黄河以南 5 片,黄河以北 6 片,各单元自成系统,通过泵站、河道相联系。

2.1.1 黄河以南子系统

黄河以南水量调配示意图如图 2 所示。根据黄河以南具体特点,黄河以南子系统建模时具体考虑了以下几个主要因素:¹突出五个湖泊本身的调节能力,反映各湖泊之间的水量调配,忽略输水河网的调蓄功能;④以湖泊为中心,相应的将湖泊之间的复杂状况简化为单一河道,各湖泊形成串联结构,抽水泵站群复合在各个湖泊出口和入口;(四)对于系统内的各级泵站,只考虑其补给过程(抽水时间和抽水水量),忽略水头变化对抽水效率的影响。

2.1.2 黄河以北子系统

黄河以北水量调配示意图如图 3 所示。黄河以北子系统概化为 6 个分水口门,相应地分为 6 片。根据黄河以北具体特点,建模时考虑了以下主要因素:¹突出了河道本身的调节能力,考虑了水库、蓄水河道的调节水量能力和它们之间的相互补偿作用;④以河道为中心,相应地将河道之间的复杂状况简化为单一河道,各蓄水河道形成串联结构。

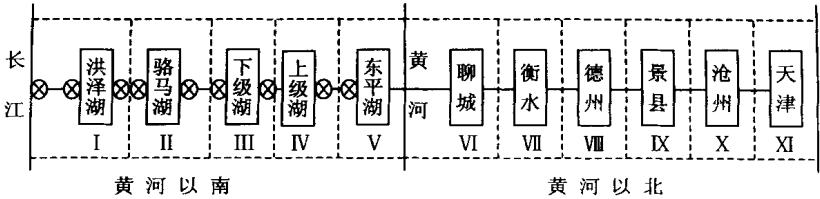


图 1 水量调配模型概化图

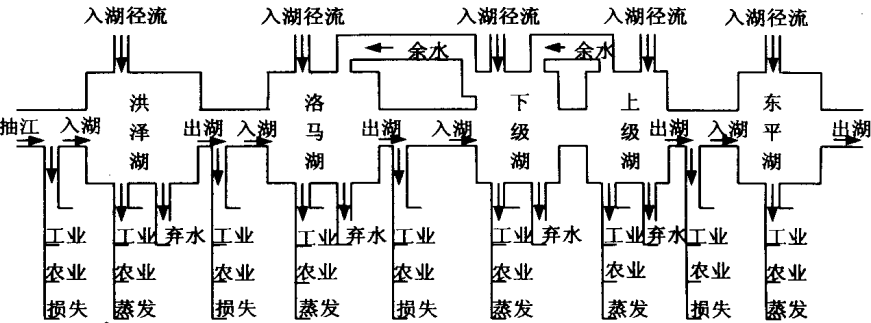


图 2 黄河以南水量调配示意图

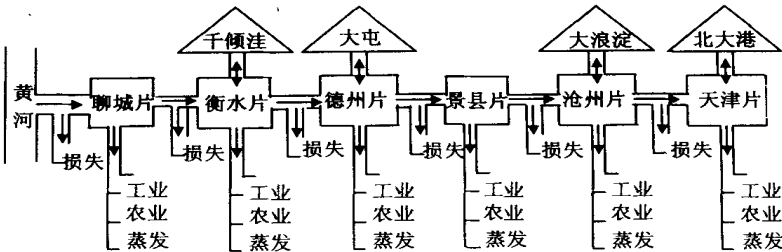


图 3 黄河以北水量调配示意图

2.2 调度原则

南水北调东线工程输水河道和沿线水库是在原有工程基础上扩建、北延而成的,在确定调度原则时,既要经济合理地利用水资源,又要尊重现有用水情况。南水北调东线工程水量调配应遵循以下原则:^①尊重已用水源现实,调水工程的兴建以不影响原有灌区合理用水为原则;^④江水、淮水并用,淮河枯水年多抽江水,淮河丰水年多用淮河水;^{④④}充分利用当地水资源,当地水资源不足时逐级从上一级湖泊调水补充,当地径流不能满足整个系统供水时,调江水补充;^④黄河以南各调蓄湖泊,考虑各区原有的用水利益,参照现有江水北调工程的调度运用原则,规定了各调蓄湖泊的北调控制水位,一般情况下,低于此水位时,停止从湖泊抽水;^⑤供水次序是首先满足城市生活、工业及航运用水,其次是黄河以南农业灌溉,然后是北方输水沿线农业灌溉补水;为保证城市用水,在湖泊停止向北供水时,抽江水量优先满足全区的城市供水;^④第一期工程抽江规模较小,对长江口盐水入侵影响甚微,不需“避让”;第二期工程根据长江流量的大小限制抽江水量;^⑧黄河以北优先考虑没有规划调蓄水库的供水区域。

2.3 数学模型

2.3.1 目标函数

南水北调东线工程是一个多水源、多用户、多调节水库的大系统,是一个多目标决策分析的问题。本文选取缺水量最小和调水耗能最小作为目标函数,运用模糊带权目标协调法将多目标管理问题转化为单一目标优化问题的求解。

缺水量最小和调水耗能量最小的目标函数分别为:

$$\min z_1 = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n SH(i,j)$$
$$\min z_2 = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n E(i,j) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n [\alpha PR(i,j) + \beta PC(i,j)]$$

式中 $SH(i,j)$ 、 $E(i,j)$ 分别为第*i*片第*j*时段的缺水量和调水耗能量; $PR(i,j)$ 、 $PC(i,j)$ 分别为调入水量和调出水量; α 、 β 分别为调入水耗能系数和调出水耗能系数。

2.3.2 水量平衡方程

$$V(i,t+1) = V(i,t) + PR(i,t) - PC(i,t) + \sum_{j=1}^2 Q_j(i,t) + \sum_{j=1}^2 Sh_j(i,t) - \sum_{j=1}^2 W_j(i,t) - \sum_{j=1}^2 LS_j(i,t) - Sur(i,t)$$

式中 $V(i,t+1)$ 、 $V(i,t)$ 分别表示第*i*片第*t*时段初库容和时段末库容; $PR(i,t)$ 、 $PC(i,t)$ 分别表示调入、调出的水量; $Q_j(i,t)$ 表示湖区和区间的天然径流量; $Sh_j(i,t)$ 表示湖区和区间缺水量; $W_j(i,t)$ 表示湖区和区间的预测需水量; $LS_j(i,t)$ 表示水量损失; $Sur(i,t)$ 表示弃水量。

2.3.3 约束条件

保证率约束为各段、各部门供水保证率应达到设计保证率要求;蓄水库容约束为 $V_{\min}(i,t) \leq V(i,t) \leq V_{\max}(i,t)$;抽水能力约束为 $PR(i,t) \leq PR_{\max}(i,t)$ 、 $PC(i,t) \leq PC_{\max}(i,t)$;弃水量约束为 $Suro(i,t) \leq Suro_{\max}(i,t)$ 、 $Sur_i(i,t) \leq Sur_{i\max}(i,t)$ 、 $Sur_l(i,t) \leq Sur_{l\max}(i,t)$;北调控制线约束为 $V(i,t) \leq V_l(i,t)$;非负约束。以上各式中 $V_{\min}(i,t)$ 、 $V_{\max}(i,t)$ 、 $V_l(i,t)$ 、 $PR_{\max}(i,t)$ 、 $PC_{\max}(i,t)$ 、 $Suro_{\max}(i,t)$ 、 $Sur_{i\max}(i,t)$ 、 $Sur_{l\max}(i,t)$ 分别表示第*i*库第*t*时段的最小库容、最大库容、北调控制库容、入库能力、出库能力、河网承泄能力、湖泊承泄能力和泄出系统外能力。

2.3.4 边界条件

起调水位为 $H_1(i,1) = H_x(i)$ ($i = 1, 2, \dots, 9$);传递条件为 $H_j(i,36) = H_{j+1}(i,1)$ ($i = 1, 2, \dots, 9$) ($j = 1, 2, \dots, 42$);各级工程规模和北调控制线在方案比较时可取不同值。式中 $H_1(i,1)$ 表示第*i*库第1年第1时段的水位, $H_x(i)$ 表示第*i*库的汛限水位, $H_j(i,36)$ 表示第*i*库第*j*年最后一个时段的末

水位; $H_{j+1}(i, 1)$ 表示第 i 库第 $j + 1$ 年第 1 个时段的初水位。

3 模型求解

根据多目标管理模型的 2 个目标, 建立模糊子集 θ_1, θ_2 , 其相应的隶属函数和权重分别为 $\mu_1, \mu_2, \omega_1, \omega_2$, 则多目标函数的效用函数为:

$$\max Z = \sum_{j=1}^2 \omega_j \mu_j$$

根据最小隶属函数模型法确定多目标隶属函数为:

$$\mu_j = \begin{cases} 1 & z_j \leq \inf(z_j) \\ \frac{\sup(z_j) - z_j + \inf(z_j)}{\sup(z_j) + \inf(z_j)} & \sup(z_j) > z_j > \inf(z_j) \\ 0 & z_j \geq \sup(z_j) \end{cases}$$

式中 $\sup(z_j)$ 、 $\inf(z_j)$ 分别表示目标函数的上下确界。则多目标函数的效用函数为:

$$\max Z' = \sum_{j=1}^2 \omega_j \mu_j = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n Sh(i, j) \mu_1 - \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n E(i, j) \mu_2$$

从而可实现由多目标向单目标优化的转化。

4 调度结果

根据上述数学模型, 编制调度软件, 进行南水北调东线水量调算。通过对权重向量的迭代试算, 当权重向量为(0.65, 0.35)时多目标函数的效用函数取得最佳满意解。

多年平均调水量见表 2。多年平均抽江水量 110.2 亿 m^3 , 全线水量损失 26.63 亿 m^3 , 损失率约为 24.2%; 过黄河水量 29.0 亿 m^3 , 输水损失 9.72 亿 m^3 , 占损失总量的 36.5%, 占输水总量的 33.5%。

表 2 南水北调东线工程多年平均调水量 亿 m^3

区 段	抽 江	调出洪泽湖	调出洛马湖	调出下级湖	调出上级湖	穿黄河
调水量	110.2	85.9	67.2	44.8	44.0	29.0

规划调水量包括现有工程的增供水量。增供水量是由于兴建了工程所增加的供水量, 它反映了新建调水工程的效益。增供水量包括增供的抽江水量和淮水利用量。经调算得出多年平均增供水量为 71.3 亿 m^3 , 其中增抽江水量为 59.3 亿 m^3 , 增加利用淮河水量为 11.9 亿 m^3 。多年平均各片调配水量见表 3。

表 3 多年平均各片调配水量 亿 m^3

区 段	净需水量	净供水量	净缺水量	供水保证程度/ %	旬供水保证率/ %
洪泽湖片	101.778	101.654	0.124	99.9	99.3
洛马湖片	31.779	30.897	0.882	97.2	99.2
下级湖片	21.845	20.835	1.010	95.5	94.8
上级湖片	11.486	10.832	0.654	94.3	97.3
东平湖片	5.680	5.577	0.103	98.2	94.8
胶东片	8.760	8.200	0.560	93.6	98.3
聊城片	1.520	1.445	0.077	95.8	95.7
衡水片	2.400	2.397	0.003	99.9	99.3
德州片	2.450	2.450	0	100	100
景县片	0.660	0.627	0.033	96.0	95.7
沧州片	2.120	2.120	0	100	100
天津片	7.665	7.609	0.056	99.3	99.8

上述调水量是在拟定的需调水量规划下计算的,而工程规模是根据枯水年的供需水量确定的,因此在一般年份还有加大供水的潜力。按工程的供水能力计算,多年平均抽江水量 118.8 亿 m^3 ,多年平均过黄河水量 43.0 亿 m^3 。与按工程供水能力计算的调水量相比较,多年平均还可增抽江水 8.6 亿 m^3 ,多年平均过黄河增调水量 14.0 亿 m^3 ,可向黄河以北供水以补充这里的农业和生态用水量。

5 仿真分析

东线工程是一个跨流域的调水工程,涉及面广,运行复杂。东线工程调度的灵活性如何,能否适应变化的需求,决定了东线工程实施以后能否发挥预期的效果。用户需求要求的变化对整个东线工程水量调配有着至关重要的作用,所以选择需水量作为变参进行拉偏试验,以供水保证程度作为指标,检验需水参数在各种偏差情况下对调度结果的影响,检验系统在有参数偏差情况下的运行情况。

5.1 恒定数拉偏试验

将全线需水量统一增大一定比例 5%、10%、30%、50%、70%、100% 进行拉偏试验,检验供水保证程度随需水增加变化情况,结果见表 4,图 4 给出了北调水量随需水量增加变化曲线。

表 4 供水保证程度随需水量增加变化情况 %

需水量增加	0	5	10	30	50	70	100
全线供水保证程度	98.5	97.5	96.6	91.9	86.9	81.6	74.6
黄河以南供水保证程度	98.3	97.4	96.5	92.4	88.3	84.0	77.9
黄河以北供水保证程度	99.1	98.6	96.7	86.8	71.3	55.2	38.0

由表 3 和图 4 可以看出,抽江水量一直呈上升趋势,即使需水量增加 100%,满足抽江水量的调度原则,长江水源仍没达到其可提供水量。在需水量增加 30% 的情况下,抽入洪泽湖的水量达到最大值,随着需水增加,抽入洪泽湖的水量将减少,而抽出洪泽湖在全线需水量增加

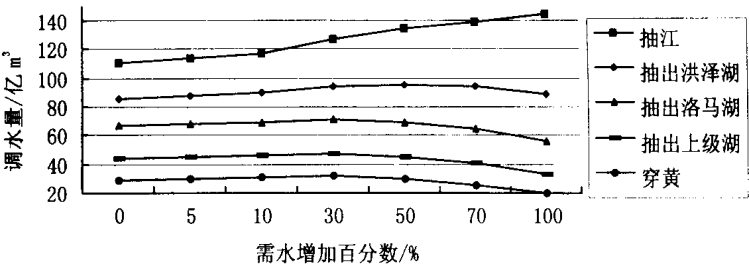


图 4 需水量增加与北调水量关系曲线

50% 才达到峰值,这是由于洪泽湖水量比较充沛,调蓄库容很大,可以较好地调蓄水量。可以看到入出洛马湖、下级湖、上级湖和东平湖的水量都是在全线需水量增加 30% 时达到峰值,说明黄河以南各级工程规模级配选择较好。

通过恒定数拉偏试验,可以得出:①南水北调东线工程在全线需水量增加 25% 以内时,仍然有较满意的供水保证程度;需水量增加大于 25% 时,黄河以北的用水保证程度将会迅速下降;④南水北调东线工程黄河以南的调蓄能力很强,黄河以北的调蓄能力次之;④一期工程的工程规模选择比较合理,工程级配较好。

5.2 随机数拉偏试验

南水北调东线工程水量调度的需水量参数,是由各地方预测统计得到的。需水量参数与真实值有一定的偏差,而各地方预测的需水量都希望尽可能符合实际值,即需水量的期望是真实值,可能有一些偏差,但偏差小的概率要多于偏差大的概率,这种情况符合正态分布。那么,在需水量参数按正态分布的偏差变化时,调水工程的效益受不受到影响,影响程度的大小如何,都是不知道的,所以引入基于数理统计的随机数拉偏试验检验系统随参数变化情况,以获得更准确合理描述系统运行的情况,检验南水北调东线工程水量调度的敏感性。

试验过程: ① 按均值为 0、均方差为 σ_1 , 取 36 个随机数 $\Delta Q_1 \sim \Delta Q_{36}$, 以此作为全线用户的用水偏差量, 即各用户的需水量变为 $Q_i = Q_0(1 + \Delta Q)$; ④ 进行多年调蓄计算, 求得在新需水量下的水量保证程度 $P_1 = Q_{s1} / Q_{n1}$, 其中 Q_{s1} 为第 1 次调算的供水量, Q_{n1} 为第 1 次调算的需水量; ④ 仍在均方差为 σ_1 的情况下取新的 36 个随机数, 重复进行第 2 步调蓄计算, 得到 $P_2 = (Q_{s1} + Q_{s2}) / (Q_{n1} + Q_{n2})$, 在 σ_1 相同的情况下, 重复 t 次第 1 步和第 2 步, 直到用户的水量保证程度收敛为止, 即 $P_n - P_{n-1} < \delta$, 此时 $P_n = (Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3} + \dots + Q_{st}) / (Q_{n1} + Q_{n2} + Q_{n3} + \dots + Q_{nt})$, 求得在用户需水量偏差的均方差为 σ_1 时的供水保证程度 P_{σ_1} ; ⑤ 另取均方差为 σ_2 , 求得此时的水量保证程度 P_{σ_2} 。重复上述步骤即可求得供水保证程度与需水量偏差的均方差的关系曲线。

随机数拉偏试验结果见表 5。

表 5 供水保证程度随方差变化情况

%

保证程度	方 差					
	0	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0
全线供水保证程度	98.5	97.5	95.1	92.5	90.2	85.2
黄河以南供水保证程度	98.3	97.4	95.5	93.1	90.9	86.8
黄河以北供水保证程度	99.1	97.8	94.1	90.2	85.9	78.6

从恒定数拉偏试验和随机数拉偏试验结果可知, 沿线用水需求有 50% 变化(偏差按正态分布、均方差) 情况下仍能很好地满足沿线用水需求, 表明南水北调东线工程具有很强的调蓄灵活性和适应能力。

参考文献:

[1] 南水北调东线工程规划报告[R]. 水利部淮河水利委员会, 水利部海河流域委员会, 2000.

[2] 盛骤, 谢式千. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.

[3] Simonvic S P. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1992(3): 262~ 280.

[4] 谢新民, 周之豪. 水电站水库群与地下水资源系统联合运行多目标管理模型[J]. 水电能源科学, 1993(2): 96~ 104.

(责任编辑 韩星明)

· 科技简讯 ·

水轮机转轮优化设计与制造

水轮机转轮是水电站水轮发电机组的心脏, 其性能决定了电站的经济效益。西安理工大学从 80 年代中期开始一直开展水电站水轮发电机组增容改造、转轮测绘整形、水轮机优化设计等科研工作; 90 年代在国家自然科学基金、机械部科学基金和陕西省水利厅科研基金的资助下, 逐步开发与完善了基于准三维和全三维的水轮机转轮优化设计方法和技术; 1995 年研制成功了国内第一个多功能水轮机转轮优化设计与性能预估大型软件包, 并用该软件包先后为有关电站、多家水轮机厂和有关研究单位的 100 多台老型水轮机转轮进行了改型设计和制造, 这些转轮已全部用于水电站技术改造和新建电站的设备配套, 从实际运行情况看, 转轮运行平稳、效率高、抗磨蚀性能好, 使用户获得了巨大的经济效益。

由于用多功能水轮机转轮优化设计软件进行优化设计具有很大的灵活性, 可以根据电站的具体情况来“量体裁衣”, 即根据电站的具体参数, 通过优化设计得到最优方案。这对于大型电站来说, 既可满足论证需要, 又可减少试验次数, 缩短水轮机的研制周期; 对于中小型电站, 可直接应用优化设计的结果进行转轮加工制造。

1999 年, 西安理工大学恒新水电科技发展有限公司成立后, 投入资金 18 万元引进了国外最先进的转轮性能预估软件, 并对优化设计软件包进行了改进和完善, 使设计周期进一步缩短, 设计成果更加可靠实用。

(联系单位: 西安理工大学科技处 电话: 029- 2312509 E-mail: kfb@ xaut. edu. cn)

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>