

多级调水-供水-蓄水结合泵站-渠道-湖库 系统效率计算

黄海田^{1,2}, 仇宝云², 颜红勤³, 王亦斌⁴, 王 斐²

(1. 江苏省水利厅 科学技术委员会, 江苏 南京 210029; 2. 扬州大学 能源与动力工程学院, 江苏 扬州 225009; 3. 江苏省水利工程科技咨询有限公司, 江苏 南京 210029; 4. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210029)

摘要: 提出了包括全部能源消耗在内的站系统效率概念, 以及既包括水量损失又包括水力损失的渠系统效率概念. 研究得出了单一调水单级泵站-渠道系统效率、调水-供水结合单级泵站-渠道系统效率、单一调水多级泵站-渠道系统效率、调水-供水-蓄水结合多级泵站-渠道-湖库系统效率的计算方法, 进而形成了比较完整的调水工程效率计算方法体系.

关键词: 泵站-渠道-湖库系统; 调水-供水-蓄水结合; 系统效率; 水量损失; 水力损失

中图分类号: TV131.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2007)04-0021-06

Efficiency computation of multi-stage pumping station-canal-lake reservoir system for water transfer-supply-storage

HUANG Hai-tian^{1,2}, QIU Bao-yun², YAN Hong-qin³, WANG Yi-bin⁴, WANG Fei²

(1. *Science & Technology Commission of Water Resources Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;*
2. *School of Energy & Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;* 3. *Hydraulic Engineering Science & Technology Consultation Company of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;* 4. *Jiangsu Water Source Company of South-to-North Water Diversion Project, Nanjing 210029, China*)

Abstract: A conception of pumping station system efficiency is presented which includes all the energy consumption. A conception of canal system efficiency is established including the loss of water volume and head. This paper presents calculation methods of the efficiency of single-stage pumping station-canal system for water transfer, the efficiency of single-stage pumping station-canal system for water transfer and supply, the efficiency of multi-stage pumping station-canal system for water transfer, the efficiency of multi-stage pumping station-canal-lake reservoir system for water transfer, supply and storage. Therefore the calculation method system is formed for estimating efficiency of water transfer projects.

Key words: pumping station-canal-lake reservoir system; combination of water transfer-supply-storage; system efficiency; loss of water volume; loss of head

收稿日期: 2007-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50179032)

作者简介: 黄海田(1962-), 男, 江苏通州人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事泵站和调水工程的规划与管理.

E-mail: huanght999@hotmail.com

传统的泵站(电力泵站)效率计算没有将输电、变电、配电过程的能源损耗和泵站辅机的能源消耗计入泵站的总能源消耗中,导致目前的泵站效率指标不能全面反映泵站实际状况.并且,计算范围仅限从泵站进水池的进口到出水池的出口^[1].而大型泵站都与河、渠道相连接,即泵站需置身于“泵站-渠道”构成的站渠系统中才能发挥功效.因此,需将泵站与渠道作为一个整体来进行研究.

渠道输水所需要的水头是通过泵站提水获得的,渠道输水水力损失是泵站能源损失的外延.但以往仅有考核渠道水量损失的指标^[2],而无考核输水水力损失的指标,更没有既包括水量损失又包括水力损失的渠系统效率.效率是决定调水工程能否达到规划目标的主要参数,也是判断工程成功与否的重要标志之一.效率还直接影响到运行成本和水价.但在我国,既缺乏对调水工程效率的理论研究,又缺少对已建或在建调水工程效率的实践分析.因此,需要对调水工程效率进行深入系统研究^[3].

1 站系统效率

1.1 泵站效率

泵站效率为水体经过泵站后获得的净能量与输入电动机能量的比值.由电动机效率 $\eta_{机}$ 、传动效率 $\eta_{传}$ 、水泵效率 $\eta_{泵}$ 、管路效率 $\eta_{管}$ 和水池效率 $\eta_{池}$ 等5个部分组成^[4].

$$P_{机入} = \sqrt{3} U_{机} I_{机} \cos\varphi; \quad P_{净} = P_{池} = \rho g Q_{泵} H_{站};$$

$$\eta_{机} = \frac{P_{机}}{P_{机入}}; \quad \eta_{传} = \frac{P_{泵入}}{P_{机}}; \quad \eta_{泵} = \frac{P_{泵}}{P_{泵入}} = \frac{\rho g Q_{泵} H_{泵}}{P_{泵入}}; \quad \eta_{管} = \frac{H_{净}}{H_{泵}}; \quad \eta_{池} = \frac{H_{站}}{H_{净}}$$

$$\text{则泵站效率} \quad \eta_{I} = \frac{P_{净}}{P_{机入}} = \frac{P_{机}}{P_{机入}} \frac{P_{泵入}}{P_{机}} \frac{\rho g Q_{泵} H_{泵}}{P_{泵入}} \frac{H_{净}}{H_{泵}} \frac{H_{站}}{H_{净}} = \eta_{机} \eta_{传} \eta_{泵} \eta_{管} \eta_{池} \quad (1)$$

式中: η 为效率(%); P 为能量(kW); Q 为流量(m^3/s); H 为扬程或水头(m); $U, I, \cos\varphi$ 分别为电压(V)、电流(A)、功率因素; ρ 为水体密度(kg/m^3); g 为重力加速度(m/s^2).

1.2 站系统效率

η_{I} 实际上是电动机定子的输入能量转换为水的位能的效率.但泵站作为一个能量转换系统,有相应的输电、变电、配电系统和辅机系统(包括油气水、励磁、照明、捞草机等),其能源损耗或消耗是泵站运行所必需的,应将这一部分能源计入整个泵站的输入能量,并建立站系统效率概念.站系统能量传递与转换关系见图1.

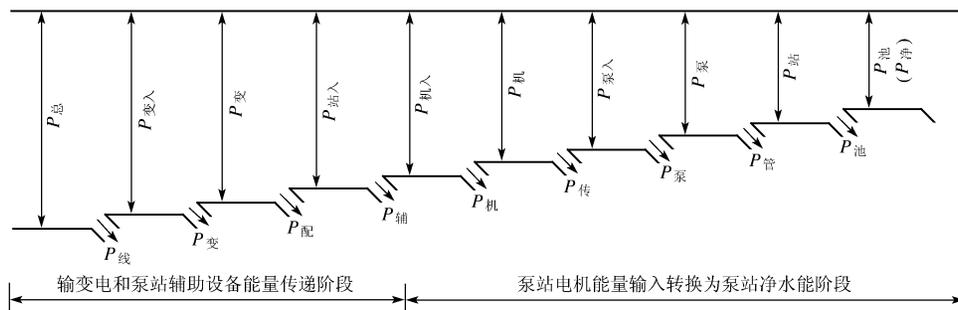


图1 站系统能量传递和转换关系

Fig. 1 Energy transmission and transformation in the pumping station system

首先建立输变配电效率 $\eta_{电}$ 、辅机效率 $\eta_{辅}$ 概念.这里,把辅机系统消耗的能源作为站系统能源损耗的一部分.根据图1,有:

$$\eta_{电} = \frac{P_{站入}}{P_{总}}; \quad \eta_{辅} = \frac{P_{机入}}{P_{站入}} = \frac{P_{站入} - P_{辅}}{P_{站入}} = 1 - \frac{P_{辅}}{P_{站入}} \quad (2)$$

站系统的输入能量 $P_{总}$ 为电网向泵站供电出线处的能量.这样,站系统效率 η_{II} 为站系统净水能与输入站系统的电能的比值.即:

$$\eta_{II} = \frac{P_{净}}{P_{总}} = \frac{\rho g Q_{泵} H_{站}}{\sqrt{3} U_{总} I_{总} \cos\varphi} = \eta_{电} \eta_{辅} \eta_{机} \eta_{传} \eta_{泵} \eta_{管} \eta_{池} = \eta_{电} \eta_{辅} \eta_{I} \quad (3)$$

2 单级泵站-渠道系统效率

调供水结合单级站渠系统水力与水量变化关系见图 2. 系统有 n 个供水口, 第 i 个供水口输出流量为 $Q_{i供}$. 以供水口为界, 渠道分为 $n+1$ 个渠段, 各渠段的长度分别为 l_1, l_2, \dots, l_{n+1} , 其相应的单位长度流量损失为 q_1, q_2, \dots, q_{n+1} .

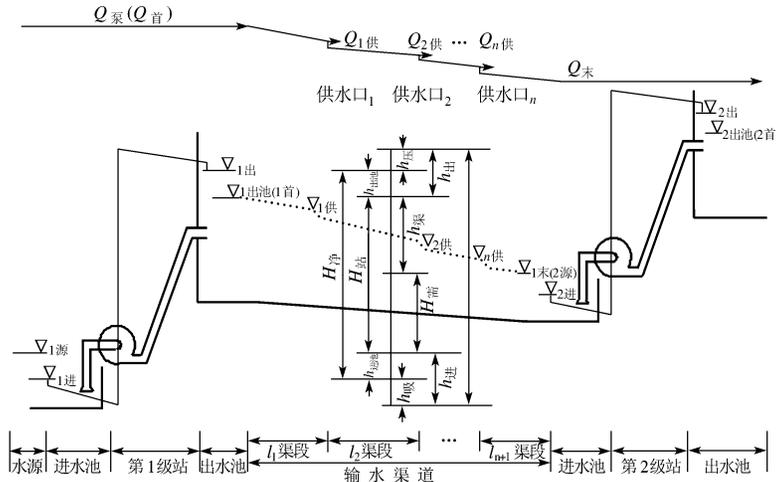


图 2 调供水结合单级站渠系统水力与水量变化关系

Fig. 2 Changes in water head and volume of the single-stage pumping station-canal system for water transfer and supply

2.1 单一调水单级泵站-渠道系统效率

单一调水时, 图 2 中 $Q_{1供} = Q_{2供} = \dots = Q_{n供} = 0$.

渠系统水量效率即为渠系水利用系数^[2]: $\eta_{量} = \frac{Q_{末}}{Q_{首}} = \frac{Q_{末}}{Q_{泵}}$.

定义渠系统水力效率为: $\eta_{力} = \frac{H_{需}}{H_{站}}$.

渠末的净水能 $P_{末} = \rho g Q_{末} H_{需}$, 渠首水的能量 $P_{首} = \rho g Q_{首} H_{站}$, 则渠系统效率

$$\eta_{III} = \frac{P_{末}}{P_{首}} = \frac{\rho g Q_{末} H_{需}}{\rho g Q_{首} H_{站}} = \frac{Q_{末} H_{需}}{Q_{首} H_{站}} = \eta_{量} \eta_{力} \quad (4)$$

泵站-渠道系统效率 η_{IV} 为经过泵站提水和渠道输水, 渠道末的净水能与输入站系统的能量的比值. 注意到 $Q_{泵} = Q_{首}$, 则:

$$\eta_{IV} = \frac{P_{末}}{P_{总}} = \frac{\rho g Q_{末} H_{需}}{\sqrt{3} U_{总} I_{总} \cos\varphi} = \eta_{电} \eta_{辅} \eta_{机} \eta_{传} \eta_{泵} \eta_{管} \eta_{池} \eta_{量} \eta_{力} = \eta_{II} \eta_{III} \quad (5)$$

若渠道总长度为 L , 沿程单位长度流量 q 相同, 有 $Q_{末} = Q_{首} - Lq$, 同时, 渠道水头损失 $h_{渠} = H_{站} - H_{需}$. 则:

$$\begin{aligned} \eta_{IV} &= \frac{\rho g Q_{首} H_{站}}{\sqrt{3} U_{总} I_{总} \cos\varphi} - \frac{\rho g Q_{首} h_{渠}}{\sqrt{3} U_{总} I_{总} \cos\varphi} - \frac{\rho g L q H_{需}}{\sqrt{3} U_{总} I_{总} \cos\varphi} \\ &= \eta_{II} - \frac{\rho g Q_{首} h_{渠}}{\sqrt{3} U_{总} I_{总} \cos\varphi} - \frac{\rho g L q H_{需}}{\sqrt{3} U_{总} I_{总} \cos\varphi} \end{aligned} \quad (6)$$

若渠道任一断面的流量为 $Q_{渠}$, 则:

$$h_{渠} = \int_0^L \frac{Q_{渠}^2}{K^2} dl = \frac{1}{K^2} \int_0^L (Q_{首} - ql)^2 dl = \frac{L}{3K^2} (Q_{首}^2 + Q_{首} Q_{末} + Q_{末}^2) \quad (7)$$

式中: K 为渠道流量模数(m^6/s^2).

将(7)式代入(6)式可得:

$$\eta_{IV} = \eta_{II} - \frac{\rho g \frac{Q_{首} L}{3K^2} (Q_{首}^2 + Q_{首} Q_{末} + Q_{末}^2)}{\sqrt{3} U_{总} I_{总} \cos\varphi} - \frac{\rho g L q H_{需}}{\sqrt{3} U_{总} I_{总} \cos\varphi} \quad (8)$$

2.2 调水-供水结合单级泵站-渠道系统效率

非单一调水时,根据图2可得:

$$\begin{aligned} Q_{首} &= (l_1 q_1 + Q_{1供}) + (l_2 q_2 + Q_{2供}) + \dots + (l_n q_n + Q_{n供}) + l_{n+1} q_{n+1} + Q_{末} \\ &= \sum_{i=1}^{n+1} l_i q_i + \sum_{i=1}^n Q_{i供} + Q_{末} \end{aligned} \quad (9)$$

设第 i 渠段首端的流量为 $Q_{i首}$, 则: $Q_{i供} = Q_{i首} - l_i q_i - Q_{(i+1)首}$, ($i = 1, 2, \dots, n$).

设第 i 个供水口相对于泵站水源水位的水头为 $H_{i需}$, 第 i 渠段的水力损失为 $h_{i渠}$, 则: $H_{i需} = \nabla_{i供} - \nabla_{源}$; $h_{i渠} = H_{(i-1)需} - H_{i需}$, ($i = 1, 2, \dots, n$), 当 $i = 1$ 时, $h_{1渠} = H_{站} - H_{1需}$.

各供水口输出水的净能量与渠道末端水的净能量之和为净水能. 即:

$$P_{净} = \rho g \left(\sum_{i=1}^n Q_{i供} H_{i需} + Q_{末} H_{需} \right) = \rho g \left(Q_{1首} H_{站} - \sum_{i=1}^{n+1} Q_{i首} h_{i渠} - \sum_{i=1}^{n+1} l_i q_i H_{i需} \right) \quad (10)$$

调水-供水结合单级泵站-渠道系统效率 η_V 为经泵站提水和渠道输水、供水系统的总的净水能与输入站系统的能量的比值. 考虑到 $Q_{1首} = Q_{泵}$, 则:

$$\begin{aligned} \eta_V &= \frac{P_{净}}{P_{总}} = \frac{\rho g \left(Q_{1首} H_{站} - \sum_{i=1}^{n+1} Q_{i首} h_{i渠} - \sum_{i=1}^{n+1} l_i q_i H_{i需} \right)}{\sqrt{3} U_{总} I_{总} \cos\varphi} \\ &= \eta_{II} - \frac{\rho g \sum_{i=1}^{n+1} Q_{i首} h_{i渠}}{\sqrt{3} U_{总} I_{总} \cos\varphi} - \frac{\rho g \sum_{i=1}^{n+1} l_i q_i H_{i需}}{\sqrt{3} U_{总} I_{总} \cos\varphi} \end{aligned} \quad (11)$$

3 多级泵站-渠道系统效率

设系统有 m 个单级站渠, 第 j 级渠长度为 L_j , 其单位长度流量损失为 q_j . 调供蓄水结合多级站渠系统水力和水量变化关系见图3.

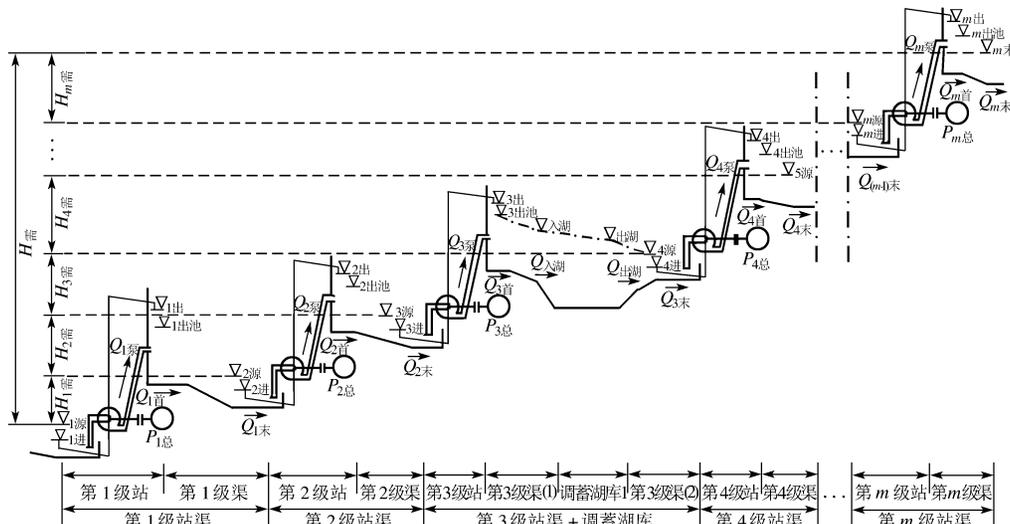


图3 调供蓄水结合多级站渠系统水力和水量变化关系

Fig. 3 Changes in water head and volume of the multi-stage pumping station-canal system for water transfer, supply and storage

3.1 单一调水多级泵站-渠道系统效率

单一调水时,图3中无调蓄湖库,且 $Q_{1供}=Q_{2供}=\dots=Q_{m供}=0$.

$$L_j q_j = Q_{j首} - Q_{j末} = Q_{j泵} - Q_{(j+1)泵}$$

$$Q_{1首} = Q_{m末} + \sum_{j=1}^m L_j q_j = Q_{j末} + \sum_{k=j+1}^m L_k q_k$$

第 j 级站渠从下游水源经泵站提水和渠道输水,到达该级末端的水头是该级实际需要的水头.从第1级泵站水源到达第 m 级渠道末端的水头,是系统调水实际需要的提水高度.根据图3,有 $\nabla_{j首} = \nabla_{j出池}$, $\nabla_{j末} = \nabla_{(j+1)源}$, $H_{j需} = \nabla_{(j+1)源} - \nabla_{j源}$,则:

$$H_{需} = \nabla_{m末} - \nabla_{1源} = H_{1需} + H_{2需} + \dots + H_{m需} = \sum_{j=1}^m H_{j需}$$

$$h_{渠} = h_{1渠} + h_{2渠} + \dots + h_{m渠} = \sum_{j=1}^m h_{j渠}$$

多级站渠系统末端的净水能是系统的有效水能.即: $P_{净} = \rho g Q_{m末} H_{需} = \rho g Q_{m末} \sum_{j=1}^m H_{j需}$.

系统总的输入能量为: $P_{总} = P_{1总} + P_{2总} + \dots + P_{m总} = \sum_{j=1}^m P_{j总}$.

单一调水多级泵站-渠道系统效率 η_{VI} 为系统末端的净水能与输入各级站系统的能量之和的比值.

$$\begin{aligned} \eta_{VI} &= \frac{P_{净}}{P_{总}} = \frac{\rho g Q_{m末} \sum_{j=1}^m H_{j需}}{\sum_{j=1}^m P_{j总}} = \frac{\rho g \sum_{j=1}^m Q_{j末} H_{j需}}{\sum_{j=1}^m P_{j总}} = \frac{\rho g \sum_{j=1}^m (Q_{j末} - \sum_{k=j+1}^m L_k q_k) H_{j需}}{\sum_{j=1}^m P_{j总}} \\ &= \frac{\rho g \sum_{j=1}^m Q_{j末} H_{j需}}{\sum_{j=1}^m P_{j总}} - \frac{\rho g \sum_{j=1}^m \sum_{k=j+1}^m L_k q_k H_{j需}}{\sum_{j=1}^m P_{j总}} = \frac{\sum_{j=1}^m \eta_{jIV} P_{j总}}{\sum_{j=1}^m P_{j总}} - \frac{\rho g \sum_{j=1}^m \sum_{k=j+1}^m L_k q_k H_{j需}}{\sum_{j=1}^m P_{j总}} \end{aligned} \quad (12)$$

3.2 调水-供水-蓄水结合多级泵站-渠道-湖库系统效率

设系统有 w 个湖库,第 j 级站渠的水力、水量关系参见图2.

调蓄湖库一般也是输水通道,调蓄和输水都会造成水量损失,调蓄湖库面积大,其损失水量也大.若泵站-渠道-湖库系统处于同步、协调运行状态,则不论湖库面积及其水量损失大小,都可以把湖库概化为渠道,将湖库水量损失作为湖库所在渠道的水量损失.但实际上系统往往不能同步、协调运行.为便于分析,设定全系统处于同步、协调运行状态.

一般调水量相对于湖库容量较小,故湖库输水的水力损失较小.且当风向与水的流向相同时,会出现入湖水位 $\nabla_{入湖}$ 低于出湖水位 $\nabla_{出湖}$ 的情况,故很难单独计算湖库输水水力损失.因此,将其直接归集到湖库所在渠道的水力损失中.

$$\text{系统的供水量} \quad Q_{供} = Q_{1供} + Q_{2供} + \dots + Q_{m供} = \sum_{j=1}^m Q_{j供} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} Q_{ji供}$$

n_j 个供水口将第 j 级渠道分为 n_j+1 个渠段,则系统的损失水量为:

$$\begin{aligned} Q_{损} &= Q_{渠损} + Q_{湖损} = (Q_{1渠损} + Q_{2渠损} + \dots + Q_{m渠损}) + (S_1 e_1 + S_2 e_2 + \dots + S_w e_w) \\ &= \left(\sum_{i=1}^{n_1+1} l_{1i} q_{1i} + \sum_{i=1}^{n_2+1} l_{2i} q_{2i} + \dots + \sum_{i=1}^{n_m+1} l_{mi} q_{mi} \right) + \sum_{t=1}^w S_t e_t = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j+1} l_{ji} q_{ji} + \sum_{t=1}^w S_t e_t \end{aligned}$$

式中: S 为湖库的面积(km^2); e 为单位面积湖库蒸发量($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$).

系统的调水量 $Q_{调} = Q_{m末}$.这样,整个系统的水量关系为:

$$Q_{1首} = Q_{调} + Q_{供} + Q_{损} = Q_{m末} + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} Q_{ji供} + \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j+1} l_{ji} q_{ji} + \sum_{t=1}^w S_t e_t \right) \quad (13)$$

系统的输入能量 $P_{\text{总}} = \sum_{j=1}^m P_{j\text{总}}$. 系统末端的调水净水能 $P_{\text{调}} = \rho g Q_{m\text{末}} \sum_{j=1}^m H_{j\text{需}}$; 系统供水的净水能 $P_{\text{供}} = \rho g \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} Q_{ji\text{供}} H_{ji\text{需}}$. 则系统总的净水能

$$\begin{aligned} P_{\text{净}} &= P_{\text{调}} + P_{\text{供}} = \rho g Q_{m\text{末}} \sum_{j=1}^m H_{j\text{需}} + \rho g \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} Q_{ji\text{供}} H_{ji\text{需}} \\ &= \rho g (Q_{m\text{末}} \sum_{j=1}^m H_{j\text{需}} + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} Q_{ji\text{供}} H_{ji\text{需}}) \end{aligned} \quad (14)$$

调水-供水-蓄水结合多级泵站-渠道-库湖系统效率 η_{VII} 为系统末端获得的调水净水能及各供水口的供水净水能之和与输入各级站系统的能量和的比值, 即:

$$\eta_{\text{VII}} = \frac{P_{\text{净}}}{P_{\text{总}}} = \frac{\rho g (Q_{m\text{末}} \sum_{j=1}^m H_{j\text{需}} + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} Q_{ji\text{供}} H_{ji\text{需}})}{\sum_{j=1}^m P_{j\text{总}}} \quad (15)$$

4 结 语

通过对站系统、渠系统、单一调水单级泵站-渠道系统、调水-供水结合单级泵站-渠道系统、单一调水多级泵站-渠道系统、调水-供水-蓄水结合多级泵站-渠道-湖库系统的效率分析研究, 对影响调水工程系统效率的主要因素有较为全面系统的认识, 并为构建调水工程效率的计算、分析体系, 建立以效率最高为目标的调水工程优化设计和运行模型提供了理论基础.

参 考 文 献:

- [1] 严登丰. 泵站工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 277-281.
- [2] SL207-98, 节水灌溉技术规范[S].
- [3] 黄海田, 仇宝云, 马 倩, 等. 基于系统理念对东线江苏境内一期工程进行调水效率研究的设想[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(2): 3-5.
- [4] SL255-2000, 泵站技术管理规程[S].

第 11 届 建 筑 材 料 与 构 件 耐 久 性 国 际 会 议

时 间: 2008 年 5 月 11 日 ~ 14 日

地 点: 土耳其伊斯坦布尔

联系人: Dr. Nil Sahal, Istanbul Technical University, Faculty of Architecture, Taskisla, Taksim 34437, Istanbul, Turkey

电 话: +90 212 2931300 - 2246

传 真: +90 212 2514895

网 址: www.11dbmc.org