

# 调水与供水结合站渠系统效率的计算和分析

黄海田<sup>1 2</sup>, 颜红勤<sup>3</sup>

(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)

**摘要:** 在建立既包括水量损失又包括水头损失的渠道输水效率概念及计算方法, 以及将泵站和渠道作为整体建立站渠系统调水效率概念及计算方法的基础上, 针对站渠系统普遍实行的调水与供水相结合的运行方式, 提出该方式下站渠系统效率的计算方法, 并初步分析了影响系统效率的相关因素。

**关键词:** 站渠系统; 调供水结合; 系统效率; 影响因素分析

中图分类号: TV68; TV674 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2008)02-0059-03

**Calculation and analysis of efficiency of pumping station-canal system for water diversion and supply//HUANG Hai-tian<sup>1 2</sup>, YAN Hong-qin<sup>3</sup>**(1. *Science & Technology Commission of Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China*; 2. *School of Energy & Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China*; 3. *Jiangsu Hydraulic Engineering Science & Technology Consultation Co., Ltd, Nanjing 210029, China*)

**Abstract:** A concept and calculation method with consideration of loss of water volume and water head were developed for water conveyance efficiency. Aiming at a combined water diversion and water supply operation pattern, which is generally adopted in pumping station-canal system, the conception and calculation method of water conveyance efficiency of the pumping station-canal system were proposed. Finally, some factors influencing the efficiency of the pumping station-canal system were analyzed.

**Key words:** pumping station-canal system; combination of water diversion and supply; efficiency of the system; influencing factor analysis

在灌溉排水领域, 目前考核渠道水量损失的指标仅有渠系水利用系数<sup>[1]</sup>, 而没有考核输水过程中的水头损失。对于为泵站配套输水的渠道, 其输水所损失的水头是泵站能量消耗的外延。

大型泵站都与渠(河)道或湖泊相连接。但传统的泵站效率研究范围却局限在从泵站进水池到出水池这一区域<sup>[2-3]</sup>, 而没有把泵站和渠道作为一个系统(即站渠系统)来研究其效率。大规模调水工程一般都将向远方调水与向输水沿线供水结合起来, 属调水与供水相结合的站渠系统。这样的系统, 在某一时段以调水为主, 在另一时段则以供水为主, 或者两者相兼顾, 其水力、动力等效率因素关系十分复杂。

效率直接影响到运行成本和水价甚至投资。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、系统的研究<sup>[4]</sup>。图 1 表明了调水与供水结合的站渠系统结构和水头、水量变化关系原理。

本文中,  $\eta$  为效率(%),  $P$  为功率(kW),  $Q$  为流量( $m^3/s$ ),  $H$  和  $h$  分别为扬程和水头(m),  $U$  和  $I$  分别为电压(kV)和电流(A),  $\cos\varphi$  为功率因素,  $\rho$  为水体密度( $kg/m^3$ ),  $g$  为重力加速度( $m/s^2$ ),  $L$  为长度(km),  $q$  为渠道单位长度流量损失( $m^3/s/km$ ),  $K$  为渠道流量模数( $m^6/s^2$ )。

## 1 单一调水站渠系统效率

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

### 1.1 泵站提水效率

泵站规范<sup>[2]</sup>明确电力泵站效率由电机效率、传动效率、水泵效率、管路效率、水池效率等 5 部分组成, 泵站效率为

$$\eta_{\text{泵站}} = \eta_{\text{机}} \eta_{\text{传}} \eta_{\text{泵}} \eta_{\text{管}} \eta_{\text{池}} = \frac{P_{\text{机输出}}}{P_{\text{机输入}}} \frac{P_{\text{泵输出}}}{P_{\text{泵输入}}} \frac{H_{\text{净}}}{H_{\text{站}}} \frac{H_{\text{站}}}{H_{\text{净}}} = \frac{\rho g Q_{\text{泵}} H_{\text{站}}}{\sqrt{3} UI \cos\varphi} \quad (1)$$

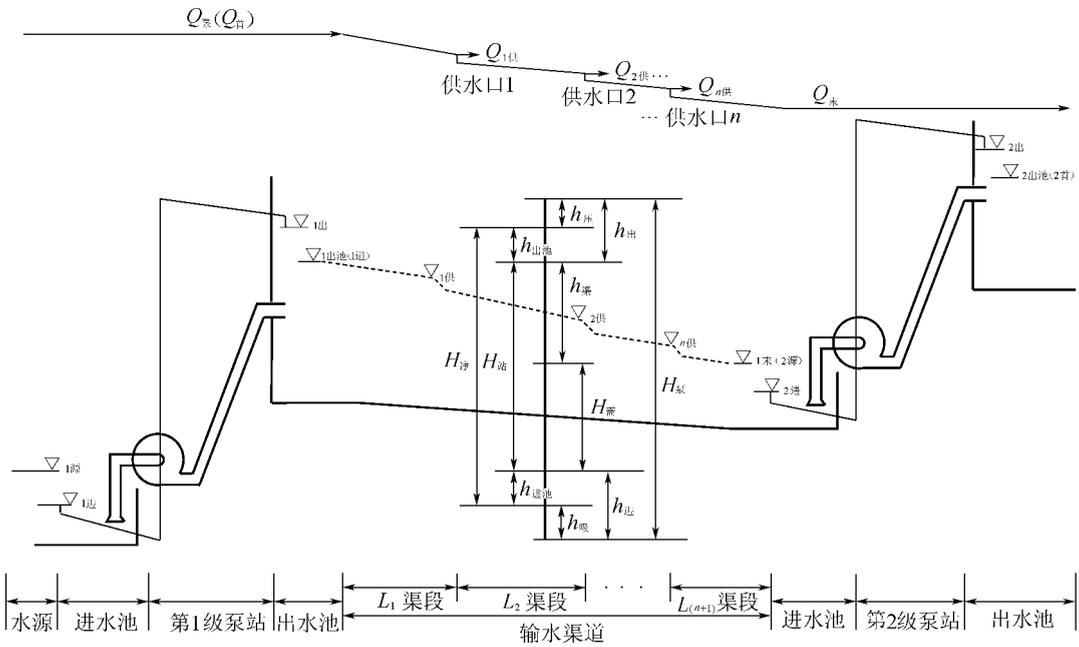


图1 调水与供水结合站渠系统水力与水量变化关系原理

## 1.2 渠道输水效率

渠道水量效率即为渠系水利用系数<sup>[1]</sup>:

$$\eta_{\text{渠水量}} = \frac{Q_{\text{末}}}{Q_{\text{首}}} = \frac{Q_{\text{末}}}{Q_{\text{泵}}} \quad (2)$$

由泵站提水并经渠道输送到达渠道末梢时的剩余水头,是站渠系统调水实际需要的提水高度<sup>[3]</sup>。由此,可定义渠道水头效率为

$$\eta_{\text{渠水头}} = \frac{H_{\text{需}}}{H_{\text{站}}} \quad (3)$$

定义渠道输水效率为渠末的水能与渠首的水能之比值。以泵站下游水源水位为计算基面,渠末、渠首的水能为

$$P_{\text{渠末}} = \rho g Q_{\text{末}} H_{\text{需}}$$

$$P_{\text{渠首}} = \rho g Q_{\text{首}} H_{\text{站}}$$

则渠道输水效率为

$$\eta_{\text{渠}} = \frac{P_{\text{渠末}}}{P_{\text{渠首}}} = \frac{\rho g Q_{\text{末}} H_{\text{需}}}{\rho g Q_{\text{首}} H_{\text{站}}} = \frac{Q_{\text{末}} H_{\text{需}}}{Q_{\text{首}} H_{\text{站}}} = \eta_{\text{渠水量}} \eta_{\text{渠水头}} \quad (4)$$

## 1.3 站渠系统效率

定义站渠系统的效率为:经过泵站提水和渠道输水,在渠道末端获得的净水功率与输入泵站机组能量的比值。注意到  $Q_{\text{泵}} = Q_{\text{首}}$  则

$$\eta_{\text{调站渠}} = \frac{P_{\text{渠末}}}{P_{\text{机入}}} = \frac{\rho g Q_{\text{末}} H_{\text{需}}}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} =$$

$$\eta_{\text{机}} \eta_{\text{传}} \eta_{\text{泵}} \eta_{\text{管}} \eta_{\text{池}} \eta_{\text{渠水量}} \eta_{\text{渠水头}} = \eta_{\text{泵站}} \eta_{\text{渠}} \quad (5)$$

若输水渠道沿程单位长度流量损失  $q$  相同,有  $Q_{\text{末}} = Q_{\text{首}} - Lq$  则

$$\eta_{\text{调站渠}} = \frac{\rho g Q_{\text{泵}} H_{\text{站}}}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} - \frac{\rho g Q_{\text{首}} h_{\text{渠}}}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} - \frac{\rho g Lq H_{\text{需}}}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} =$$

$$\eta_{\text{泵站}} = \frac{\rho g Q_{\text{首}} h_{\text{渠}}}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} - \frac{\rho g Lq H_{\text{需}}}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} \quad (6)$$

若忽略  $q$  对  $Q_{\text{首}}$  和  $Q_{\text{末}}$  的影响,由于  $h_{\text{渠}} = \frac{Q_{\text{渠}}^2}{K^2} L$ , 则式(6)可写成

$$\eta_{\text{调站渠}} = \eta_{\text{泵站}} - \frac{\rho g \frac{Q_{\text{渠}}^3 L}{K^2}}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} - \frac{\rho g Lq H_{\text{需}}}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} \quad (7)$$

从式(7)可见,单一调水情况下系统损失包括泵站自身能量损失、渠道输水水力损失造成的能量损失和渠道渗漏蒸发水量损失所造成的能量损失。

## 2 调供水结合站渠系统效率

设系统有  $n$  个供水口,第  $i$  个供水口的输出流量为  $Q_{i\text{供}}$ 。渠道共分为  $(n+1)$  段,各渠段的长度和流量损失分别为  $L_1 \sim L_{(n+1)}$  和  $q_1 \sim q_{(n+1)}$ 。

### 2.1 水量关系和水头关系

$$Q_{\text{首}} = \sum_{i=1}^{n+1} L_i q_i + \left( \sum_{i=1}^n Q_{i\text{供}} + Q_{\text{末}} \right) \quad (8)$$

$L_i$  渠段首端的流量为

$$Q_{i\text{首}} = Q_{i\text{供}} + L_i q_i + Q_{(i+1)\text{首}} \quad (9)$$

从水源到达各供水口的水头是各供水口实际需要的水头  $H_{i\text{供}}$ 。若  $L_i$  渠段的水头损失为  $h_{i\text{渠}}$  则

$$H_{i\text{供}} = \nabla_{i\text{供}} - \nabla_{\text{源}} \quad (10)$$

$$h_{i\text{渠}} = H_{(i-1)\text{供}} - H_{i\text{供}} \quad (11)$$

其中

$$h_{1\text{渠}} = H_{\text{站}} - H_{1\text{供}}$$

### 2.2 能量关系

系统的净输出能量为各供水口输出的净水能与渠道末梢净水能之和,即

$$P_{\text{净}} = \rho g Q_{1\text{供}} H_{1\text{供}} + \dots + \rho g Q_{n\text{供}} H_{n\text{供}} + \rho g Q_{\text{末}} H_{\text{需}} = \rho g \left( \sum_{i=1}^n Q_{i\text{供}} H_{i\text{供}} + Q_{\text{末}} H_{\text{需}} \right) \quad (12)$$

由式(9)有

$$P_{\text{净}} = Q_{1\text{首}} H_{1\text{供}} - [Q_{2\text{首}}(H_{1\text{供}} - H_{2\text{供}}) + Q_{3\text{首}}(H_{2\text{供}} - H_{3\text{供}}) + \dots + Q_{n\text{首}}(H_{(n-1)\text{供}} - H_{n\text{供}})] - Q_{(n+1)\text{首}} H_{n\text{供}} - (L_1 q_1 H_{1\text{供}} + L_2 q_2 H_{2\text{供}} + \dots + L_n q_n H_{n\text{供}}) + Q_{\text{末}} H_{\text{需}} \quad (13)$$

又由式(11)有

$$h_{2\text{渠}} = H_{1\text{供}} - H_{2\text{供}}$$

$$h_{3\text{渠}} = H_{2\text{供}} - H_{3\text{供}}$$

.....

$$h_{n\text{渠}} = H_{(n-1)\text{供}} - H_{n\text{供}}$$

则式(13)可写成

$$P_{\text{净}} = Q_{1\text{首}} H_{1\text{供}} - (Q_{2\text{首}} h_{2\text{渠}} + Q_{3\text{首}} h_{3\text{渠}} + \dots + Q_{n\text{首}} h_{n\text{渠}}) - Q_{(n+1)\text{首}} H_{n\text{供}} - (L_1 q_1 H_{1\text{供}} + L_2 q_2 H_{2\text{供}} + \dots + L_n q_n H_{n\text{供}}) + Q_{\text{末}} H_{\text{需}} \quad (14)$$

因  $H_{1\text{供}} = H_{\text{站}} - h_{1\text{渠}}$ , 则  $Q_{1\text{首}} H_{1\text{供}} = Q_{1\text{首}} H_{\text{站}} - Q_{1\text{首}} h_{1\text{渠}}$ 。同时  $Q_{\text{末}} = Q_{(n+1)\text{首}} - L_{(n+1)} q_{(n+1)}$ ,  $H_{\text{需}} = H_{(n+1)\text{供}} = H_{n\text{供}} - h_{(n+1)\text{渠}}$ 。则

$$Q_{\text{末}} H_{\text{需}} - Q_{(n+1)\text{首}} H_{n\text{供}} = (Q_{(n+1)\text{首}} - L_{(n+1)} q_{(n+1)}) \cdot (H_{n\text{供}} - h_{(n+1)\text{渠}}) - Q_{(n+1)\text{首}} H_{n\text{供}} = -Q_{(n+1)\text{首}} h_{(n+1)\text{渠}} - L_{(n+1)} q_{(n+1)} H_{(n+1)\text{供}}$$

故有

$$P_{\text{净}} = \rho g \left( Q_{1\text{首}} H_{\text{站}} - \sum_{i=1}^{n+1} Q_{i\text{首}} h_{i\text{渠}} - \sum_{i=1}^{n+1} L_i q_i H_{i\text{供}} \right) \quad (15)$$

### 2.3 系统效率计算

定义系统的效率为系统输出的总净水能与输入泵站的能量之比值。考虑到  $Q_{1\text{首}} = Q_{\text{泵}}$ , 则

$$\eta_{\text{调供站渠}} = \frac{P_{\text{净}}}{P_{\text{机入}}} =$$

$$\frac{\rho g \left( Q_{1\text{首}} H_{\text{站}} - \sum_{i=1}^{n+1} Q_{i\text{首}} h_{i\text{渠}} - \sum_{i=1}^{n+1} L_i q_i H_{i\text{供}} \right)}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} = \frac{\rho g Q_{\text{泵}} H_{\text{站}}}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} - \frac{\rho g \sum_{i=1}^{n+1} Q_{i\text{首}} h_{i\text{渠}}}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} - \frac{\rho g \sum_{i=1}^{n+1} L_i q_i H_{i\text{供}}}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} = \eta_{\text{泵站}} - \frac{\rho g \sum_{i=1}^{n+1} Q_{i\text{首}} h_{i\text{渠}}}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} - \frac{\rho g \sum_{i=1}^{n+1} L_i q_i H_{i\text{供}}}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} \quad (16)$$

## 3 系统效率影响因素分析

在调供水结合站渠系统中,要实现系统效率最高,不仅需要考虑泵站自身的效率和输水渠道的输

水效率,还要重视调水与供水的协调问题。

### 3.1 提高泵站提水效率

调供水结合站渠系统效率首先体现在泵站效率上,其效率的高低直接决定了系统效率的高低。应选择优秀的水力模型和装置形式来提高泵装置的效率,通过泵站的优化运行实现泵站效率最高。然而,在现有的泵站效率研究中,对泵机组以外的能量消耗和损耗造成的对泵站系统效率的影响还缺乏重视和研究<sup>[5]</sup>,因此,要通过对泵站系统效率的研究,寻求提高站渠系统效率的新途径。

### 3.2 降低渠道水量损失

渠系水量损失对系统的效率有显著的影响。调水工程一般采用明渠输水,其水量损失较大。经实测,江苏江水北调工程每千米水量损失在 0.125 ~ 0.22 m<sup>3</sup>/s 之间,加权平均每千米水量损失为 0.19 m<sup>3</sup>/s<sup>[6]</sup>。因此要采取工程措施减小渠道渗漏,以尽量提高渠道水量效率。

在系统的运行上,在给定调供水量的情况下可适当加大流量,缩短运行历时,以减小渠道水量损失占总调供水量的比重。即通过非工程措施,提高渠道水量效率,同时也可以显著提高泵站的效率。以江都抽水站为例,在年抽水量 65 亿 ~ 69 亿 m<sup>3</sup> 时泵站的效率为 55.8% ~ 56.7%,而抽水量为 11 亿 ~ 17 亿 m<sup>3</sup> 时泵站的效率仅为 46.8% ~ 48.1%,可见后者较前者低 9% 左右<sup>[5]</sup>。

### 3.3 减小渠道水头损失

渠道的水头损失对系统效率有较大的影响,水头损失越大则效率越低。应选择合适的输水线路、渠道断面和糙率系数,以尽量提高渠道水头效率。在系统的运行上,尽量做到调水与供水分开。由于区间供水,渠道的水位坡降就显著加大,水稻灌溉期的坡降更大。因此,要尽可能将调水与供水在时间上分开,以提高水头效率。

### 参考文献:

- [1] SL207—98, 节水灌溉技术规范[S].
- [2] SL255—2000 泵站技术管理规程[S].
- [3] 严登丰. 泵站工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [4] 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, 2(2): 3-5.
- [5] 黄海田, 冯晓莉, 仇宝云. 南水北调东线泵站全站运行效率分析[J]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(3): 11-14.
- [6] 江苏省水文水资源勘测局. 江水北调河道输水损失测验报告[R]. 南京: 江苏省水利厅, 2000.

(收稿日期 2007-05-10 编辑 高建群)