

给水管网的供水能量变化系数的确定

金 学 易

(建筑工程系)

摘 要

本文论述给水管网的管径优化计算中所常引用的给水能量变化系数 γ 值的确定方法,并提出相应的算式。

给水管网的管径优化计算中,必须计算供水的动力费,因而必然涉及计算供水的能量。由于给水管网的管径优化计算是在满足用户所需的水量和水压的前提下,找出管网年费用折算值为最小的管径即经济管径。为了满足用户所需的水量和水压,管网及输水管必须以设计年限内最高时用水量为计算依据。但是管网并不是每时每刻都通过最高时用水量所形成的管段流量,所以在计算供水动力费用时需引入供水能量变化系数 γ 。目前文献中对系数 γ 的确定方法,有的只提出采用的范围:“对中型城市的网前水塔管网的输水管及无水塔管网为0.1~0.4;网前水塔的管网为0.5~0.75⁽¹⁾”;有的提出按 $\gamma=1/(K_y K_d K_b)^3$ 计算⁽²⁾⁽³⁾,式中 K_y , K_d , K_b 分别为用水量的年、日、小时变化系数;还有的认为:“ γ 值是用水量最高时所消耗的能量 P_{max} 与平均时所消耗的能量 P_0 的比值⁽⁴⁾”,并导出相应的算式。笔者考虑到较准确地确定 γ 值的大小对准确地计算经济管径有一定的意义,而如何更合理地确定 γ 值似仍有探讨的余地,所以特作如下的分析与论证,以供进一步讨论。

一、水泵至网前水塔的输水管

输水管的年费用折算值为

$$W = \frac{\text{输水管造价}}{\text{投资回收期}} + \text{每年折旧及大修费} + \frac{\text{设计年限内总输水动力费}}{\text{设计年限}}$$

$$= \left(\frac{1}{t} + \frac{p}{100} \right) \sum (a + bD_{ij}^n) l_{ij} + \frac{0.01 \times E}{102 \eta T} \left[\sum_1^N Q \left(H_0 + \sum \frac{kq_{ij}^m l_{ij}}{D_{ij}^m} \right) \right]$$

本文于1990年6月13日收到

$$= \left(\frac{1}{t} + \frac{p}{100} \right) \sum a l_{ij} + \left(\frac{1}{t} + \frac{p}{100} \right) b D_{ij}^c l_{ij} + \frac{0.01 \times E}{102 \eta T} \sum_1^N Q H_0 + \frac{0.01 \times E}{102 \eta T} \left[\sum_1^N Q \left(\sum \frac{k q_{ij}^n l_{ij}}{D_{ij}^m} \right) \right] \quad (1)$$

式中 t ——投资回收年限, 年;
 p ——每年的折旧及大修费占输水管造价的%;
 a, b, c ——输水管造价计算式中的系数和指数;
 D_{ij}, l_{ij}, q_{ij} ——管段的直径、长度, 和通过流量;
 E ——电价, 分/千瓦小时;
 η ——水泵效率;
 T ——设计年限, 年;
 N ——设计年限的总小时数, $N = 24 \times 365 \times T$ 小时;
 H_0 ——水泵的静扬程, 米;
 Q ——泵站每小时的供水量, 升/秒;

现先考虑输水管上无节点流量的情况, 即 $q_{ij} = Q$, $\sum l_{ij} = L$ 及 $D_{ij} = D$, 于是式 (1) 中的第三项及第四项输水能量可写成:

$$\frac{1}{T} H_0 \sum_1^N Q + \frac{kL}{TD^m} \sum_1^N Q^{n+1}$$

由于输水管是以设计年限内泵站的最大供水量 $Q_{p, \max}$ 为设计依据, 所以上式输水能量以 $Q_{p, \max}$ 为参数来表示较为方便。为此,

$$\text{令} \quad \gamma_1 \times 365 \times 24 Q_{p, \max} H_0 = \frac{1}{T} H_0 \sum_1^N Q \quad (2a)$$

$$\gamma_2 \times 365 \times 24 kL Q_{p, \max}^{n+1} / D^m = kL \sum_1^N Q^{n+1} / D^m T \quad (2b)$$

$$\text{于是} \quad \gamma_1 = \frac{\sum_1^N Q}{365 \times 24 T Q_{p, \max}} = \frac{1}{N} \sum_1^N Q / Q_{p, \max} \quad (3)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{N} \sum_1^N Q^{n+1} / Q_{p, \max}^{n+1}$$

$$\text{如取 } n = 2, \text{ 则 } \gamma_2 = \frac{1}{N} \sum_1^N Q^3 / Q_{p, \max}^3 \quad (4)$$

现以 (2a) 式及 (2b) 式代入 (1) 式, 得

$$W = \left(\frac{1}{t} + \frac{p}{100} \right) \sum a l_{ij} + \left(\frac{1}{t} + \frac{p}{100} \right) \sum b D_{ij}^c l_{ij} + \frac{0.01 E}{102 \eta} \times 365 \times 24 \gamma_1 Q_{p, \max} H_0 + \frac{0.01 E}{102 \eta} \times 365 \times 24 \gamma_2 kL Q_{p, \max}^{n+1} / D_{ij}^m \quad (1a)$$

注意到, 式 (1a) 中的第一项和第三项与管径 D_{ij} 无关。

在求年费用折算值最小的经济管径时，第一项及第三项消去，而只需计算第二项及第四项的偏导数。所以，现先分析 γ_2 的计算值如下：

式(4)说明 γ_2 的确切含义是供水能量损失的变化系数，而且它等于泵站每小时供水量立方的平均值(代表平均的供水能量损失)与最大供水量立方(代表最大的供水能量损失)的比值。在一般情况下，它不等于平均供水量与最大供水量比值的立方，即 $\gamma_2 \neq 1(K_y K_d K_b)^3$ 。

实际上，在网前水塔输水管情况下，当水泵选定之后，泵站每小时供水量 Q 并不随时变化，它是定值。一般用分级供水办法来适应一日之中各小时用水量的变化，而且用不同的开泵时数来满足各日不同的用水量，即在用水量较小的日子里，一日中开泵的时数不足24小时。现以泵站分两级供水为例，说明如下：

设水泵最大供水量为 $Q_1 = Q_{pmax}$ ，在一日中其开泵时数为 t_1 ，第二级供水量为 Q_2 ，其开泵时数为 t_2 。在设计年限末， $Q_{pmax}t_1 + Q_2t_2 = Q_{dmax}$ ，式中 Q_{dmax} 为设计年限内最大的日供水量，也就是最大日用水量。

$$\text{因 } Q_{dmax} = Q_{pmax} \left(t_1 + \frac{Q_2}{Q_{pmax}} t_2 \right) \quad (5)$$

式中 Q_2/Q_{pmax} 为两级水泵供水量的比值。当水泵选定之后， Q_2/Q_{pmax} 为定值。于是可令

$$t_1 + \frac{Q_2}{Q_{pmax}} t_2 = t_{cmax}, t_{cmax} \text{ 称为折算最大每日开泵时数。}$$

$$\text{从而 } Q_{dmax} = Q_{pmax} t_{cmax} \quad (6)$$

在其他年限的其他日，每日用水量为

$$\begin{aligned} Q_d &= Q_{pmax} t_1' + Q_2 t_2' = Q_{pmax} \left(t_1' + \frac{Q_2}{Q_{pmax}} t_2' \right) \\ &= Q_{pmax} t_c' \end{aligned} \quad (7)$$

式中 t_1' 、 t_2' ——分别为第一级供水与第二级供水的开泵时数；

因 t_c' 与每日用水量 Q_d 成正比，所以折算每日开泵时数 t_c' 可代表每日用水量 Q_d 。

$$\begin{aligned} \text{于是 } \sum_1^N Q^3 &= \sum_1^{24 \times 365 \times T} Q^3 = Q_{pmax}^3 (t_{c1}^1 + t_{c2}^1 + \dots + t_{c365}^1) + Q_{pmax}^3 (t_{c1}^{11} + t_{c2}^{11} + \dots + t_{c365}^{11}) + \dots \\ &+ Q_{pmax}^3 (t_{c1}^T + t_{c2}^T + \dots + t_{c365}^T) = Q_{pmax}^3 \sum_1^N t_c \end{aligned} \quad (8)$$

式中 t_{c1}^1 ——第1年第1天的开泵时数

t_{c365}^T ——第T年第365天的开泵时数，余类推。

注意到 $t_{c1}^1 + t_{c2}^1 + \dots + t_{c365}^1 = \frac{\text{第一年的全年用水量}}{Q_{pmax}}$

$$\text{同理 } \sum_1^N t_c = \frac{\text{设计年限内的总用水量}}{Q_{pmax}} = \frac{Q_m \times 24 \times 365 \times T}{Q_{pmax}} = \frac{NQ_m}{Q_{pmax}} \quad (9)$$

式中 Q_m ——设计年限内的平均小时用水量。

$$\text{而且 } Q_m = \frac{Q_{hmax}}{K_y K_d K_b} \quad (10)$$

式中 Q_{hmax} ——设计年限内最高小时用水量;
 K_y 、 K_d 、 K_h ——分别为用水量的年、日、小时变化系数。

$$\text{令 } \frac{Q_{pmax}}{Q_{hmax}} = \frac{\text{水泵的最大供水量}}{\text{最高时用水量}} = K_p \quad (11)$$

K_p 值取决于水塔调节容积的大小,一般可采用 $K_p = 0.7 \sim 0.85$;以(8)、(9)、(10)、(11)各式代入式(4)得

$$\gamma_2 = \frac{1}{N} \frac{NQ_{pmax}}{Q_{pmax}} = \frac{Q_{hmax}}{Q_p} \frac{1}{K_y K_d K_h} = \frac{1}{K_p K_y K_d K_h} \quad (12)$$

式中 K_y 为由于在设计年限内用水量逐年增大而形成的用水量年变化系数。设用水量逐年增大率为 $S\%$,则

$$K_y = \frac{1}{2 - (T-1) \times \frac{S}{100}} = \frac{2}{2 - (T-1) \times \frac{S}{100}}$$

如设计年限 $T = 5$ 年,逐年用水量增大率 $S = 5\% \sim 10\%$,由上式得 $K_y = 1.11 \sim 1.25$ 。根据室外给水设计规范:在不同的用水标准条件下, $K_d = 1.2 \sim 2.0$, $K_h = 1.4 \sim 2.0$,现以 K_p 、 K_y 、 K_d 、 K_h 各值代入式(12),算得网前水塔的输水管的 γ_2 值。

$$\gamma_2 = 0.29 \sim 0.63$$

二、网前水塔的管网

对网前水塔的管网,水泵先送水至水塔,再由水塔向管网供水。管网管径的大小,影响水塔的高度,从而影响水泵的供水能量。管网的管径越小,水塔越高,水泵的静扬程且越大,从而输水的动力费用越大;反之亦然。为了保证在最高时用水量情况下,水塔的高度能满足管网控制点的用水量和水压。网前水塔的管网须按最高时用水量情况下各管段的通过流量 q_{ijmax} 来计算各管段管径。于是水塔高度

$$H_t = H + Z_c + \sum \frac{k q_{ijmax}^2 l_{ij}}{D_{ij}^5}$$

而水泵的静扬程

$$H_0 = H_t + Z_t - Z_0 = H_c + Z_c - Z_0 + \sum \frac{k q_{ijmax}^2 l_{ij}}{D_{ij}^5}$$

因此,每年水泵经由水塔向管网供水的需要能量(不包括由水泵至水塔的输水管能量损失)为:

$$\frac{1}{T} \sum_1^N Q H_0 = \frac{1}{T} \sum_1^N Q (H_c + Z_c - Z_0) + \frac{1}{T} \sum_1^N Q \left(\sum \frac{k q_{ijmax}^2 l_{ij}}{D_{ij}^5} \right) \quad (13)$$

上列各式中 H 、 Z_c ——管网控制点的自由水头和地形标高;
 H_t 、 Z_t ——水塔的高度和水塔处的地形标高;
 Z_0 ——水泵吸水井水面标高。

式(13)中只有第二项与管径 D_{ij} 有关。为了以泵站最大供水量 $Q_{p,max}$ 作为供水能量损失的参数

$$\text{令 } \gamma_2 \times 24 \times 365 \times Q_{p,max} \left(\sum \frac{k q_{ij,max}^2 l_{ij}}{D_{ij}^5} \right) = \frac{1}{T} \sum_1^N Q \left(\sum \frac{k q_{ij,max}^2 l_{ij}}{D_{ij}^5} \right)$$

$$\text{于是 } \gamma_2 = \frac{1}{24 \times 365 \times T} \times \frac{\sum_1^N Q}{Q_{p,max}} = \frac{1}{N} \frac{\sum_1^N Q}{Q_{p,max}}$$

注意到 $\frac{1}{N} \sum_1^N Q =$ 设计年限内的平均时用水量 Q_m

$$\text{因此 } \gamma_2 = \frac{Q_m}{Q_{p,max}} = \frac{Q_{h,max}}{Q_{p,max} K K_d K_h} = \frac{1}{K_p K_y K_d K_h} \quad (14)$$

比较式(12)与式(14)可见：网前水塔管网与其输水管所采用的 γ_2 值恰好相同。

三、无水塔管网和输水管

在无水塔管网的情况下，泵站直接向管网供水，所以泵站的供水量 Q_p 等于管网的用水量 Q_h 。如水泵的实际扬程正好等于管网所需的水头（不过，除非采用无级调速水泵，这是难以完全实现的）。则水泵的扬程为

$$H = H_c + Z_c - Z_0 + \sum \frac{k q_{ij}^2 l_{ij}}{D_{ij}^5}$$

在设计年限内，水泵每年向管网的供水能量为

$$\frac{1}{T} \sum_1^N QH = \frac{1}{T} \sum_1^N Q(H_c + Z_c - Z_0) + \frac{1}{T} \sum_1^N Q \left(\sum \frac{k q_{ij}^2 l_{ij}}{D_{ij}^5} \right) \quad (15)$$

假设用水量变化时，管网中各节点流量的按同一比率进行变化，则管网中各管段的流量分配

比例为一定，即 $\frac{q_{ij}}{Q} = \frac{q_{ij,max}}{Q_{h,max}} = K_{ij} =$ 定值。式中 $q_{ij,max}$ 和 $Q_{h,max}$ 分别为最高时用水量的管段流量和全管网用水量。于是，(15)式中的能量损失项可写成：

$$\frac{1}{T} \sum_1^N Q \left(\sum \frac{k q_{ij}^2 l_{ij}}{D_{ij}^5} \right) = \frac{1}{T} \sum_1^N Q^3 \left(\sum \frac{k K_{ij}^2 l_{ij}}{D_{ij}^5} \right) \quad (16)$$

为了以最高时用水量 $Q_{p,max}$ 作为计算参数，令

$$\gamma_2 \times 24 \times 365 \times Q_{h,max}^3 \left(\sum \frac{k K_{ij}^2 l_{ij}}{D_{ij}^5} \right) = \frac{1}{T} \sum_1^N Q^3 \left(\sum \frac{k K_{ij}^2 l_{ij}}{D_{ij}^5} \right)$$

$$\text{得 } \gamma_2 = \frac{\frac{1}{N} \sum_1^N Q^3}{Q_{h,max}^3} = \frac{\frac{1}{N} \sum_1^N Q^3}{Q_{p,max}^3} \quad (17)$$

式中 Q ——设计年限内各小时用水量；

$Q_{h,max}$ ——设计年限内最高时用水量，对无水塔管网，它等于水泵最大供水量 $Q_{p,max}$ 。

为了较准确地计算出 $\frac{1}{N} \sum_1^N Q^3$, 可作如下处理:

$$\text{设 } Q = \bar{Q}_m + \Delta Q$$

式中 \bar{Q}_m ——一日中平均每小时用水量;

ΔQ ——各小时用水量对平均小时用水量的差值;

现采用设计年限为 5 年, 用水量逐年增大率 $S = 10\%$; 第五年的一日中平均小时用水量为 $\bar{Q}_{m,5}$ (为简便计, 表示为 $Q_{m,5}$)

$$\text{而 } \frac{Q_{m,5}}{Q_{h,max}} = \frac{1}{K_d K_h} \quad (18)$$

$$\text{于是 } \sum_1^N Q^3 = 365 \times (0.6^3 + 0.7^3 + 0.8^3 + 0.9^3 + 1) \times Q_{m,5}^3 \sum_1^{24} \left(1 + \frac{\Delta Q}{Q_m}\right)^3$$

$$\text{令 } K_{y'} = 1 / \left(\frac{0.6^3 + 0.7^3 + 0.8^3 + 0.9^3 + 1}{5} \right) = 1.79 \quad (20)$$

$$K_d' = \frac{1}{24} \sum_1^{24} \left(1 + \frac{\Delta Q}{Q_m}\right)^3 \quad (21)$$

以(18)、(19)、(20)、(21)各式代入(17)式得

$$\gamma^2 = \frac{K_d'}{K_{y'} (K_d K_h)^3} \quad (22)$$

对无水塔管网的输水管, 只不过是式(15)中 $q_{ij} = Q$, $K_{ij} = 1$, 故式(22)也适用于无水塔管网的输水管。

现据给水排水设计手册第三册P20所列上海等城市的用水量逐时变化资料, 算得 $K_d' = 1.22 \sim 1.42$; 设计年限 $T = 5$, 逐年用水量增大率 $S = 5\% \sim 10\%$, 则 $K_{y'} = 1.35 \sim 1.79$; 如再取 $K_d = 1.2 \sim 2.0$, $K_h = 1.4 \sim 2.0$; 并将以上 K_d' 、 $K_{y'}$ 、 K_d 、 K_h 各值代入式(22), 即可算得无水管塔网及其输水管的 γ_2 值:

$$\gamma_2 = 0.01 \sim 0.22$$

至于 γ_1 值, 由式(3)及式(12)可见:

$$\gamma_1 = \frac{1}{N} \sum_1^N Q / Q_{p,max}$$

$$\text{对网前水塔的输水管和管网, } \gamma_1 = \frac{\frac{1}{N} \cdot N Q_m}{Q_{p,max}} = \frac{Q_{p,max}}{Q_{h,max} K_y K_d K_h} = \frac{1}{K_p K_y K_d K_h}$$

$$\text{对无水塔的输水管和管网, } \gamma_1 = \frac{\frac{1}{N} \cdot N Q_m}{Q_{h,max}} = \frac{1}{K_y K_d K_h}$$

不过, 在计算经济管径时, 并不涉及与管径无关的 $\frac{1}{N} \sum Q H_0$ 项, 所以经济管径也与 γ_1 无关。

但在计算给水成本时，则应计算式(1a)中的第三项 $\frac{0.01E}{102\eta} \sum_1^N QH_0 = \frac{0.01E}{102\eta} \times 365 \times 24 \gamma_1 Q_{p,max} H_0$ ，应注意，对无水塔管网的 γ_1 值与 γ_2 值并不相等。有的文献中将式(1a)的第三、四两项合并写成， $\frac{0.01E}{102\eta} \times 365 \times 24 \gamma Q_{p,max} \left(H_0 + \sum \frac{kq_{ij} l_{ij}}{D_{ij}^m} \right)$ ，似欠妥。

四、 结 论

- 1、系数 γ_2 的含义是供水能量损失的变化系数，即实际供水能量损失与按最高时供水流量 $Q_{p,max}$ 计算的供水能量损失的比值。其值等于各小时供水流量立方的平均值对最高时供水流量立方的比值，不是两种流量比值的立方。在管网年折算费用的算式中，系数 γ_2 只与供水水头损失项相乘。
- 2、对网前水塔的输水管和管网， γ_2 值可按 $\gamma_2 = 1/K_p K_y K_d K_b$ 计算。
- 3、对无水塔管网及其输水管， γ_2 值按 $\gamma_2 = K_d' / K_y' (K_d K_b)^3$ 计算。
- 4、系数 γ_1 的含义是输水流量变化系数，对无水塔管网的 γ_1 值与 γ_2 值不相等。

参 考 文 献

- [1] 杨钦、严煦世·给水工程·北京：中国建筑出版社，1987
- [2] А.Е.БЕЛЕН, Л.Д.ХОРУЖИИ, ТЕХНИКО—ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ВОДОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ НА ЭВМ, 姜乃昌等编译中译本，湖南大学出版社，1986
- [3] 杨钦·给水外管网的设计与计算·北京：建筑工程出版社，1957
- [4] 魏文圃·给水管网优化计算中经济参数 t 、 p 、 γ 值的确定，中国给水排水，1988.6

Evaluation of Energy Coefficient in Water Distribution System Analyses

Jin Xueyi

ABSTRACT

The evaluation method of energy loss coefficient used in optimization of pipe diameter for network calculating is presented. Relevant formulas are proposed.