

# 选择取水的水力计算

牛午生

(水利部水利水电规划设计总院, 北京 100011)

摘要: 根据国外试验研究资料, 结合作者自己的看法, 详细叙述了水库水温成层特性以及选择取水设计中一些参数值(如取水深度、最大取水量、塔内流速、过栅流速、取水塔距岸坡距离等)的计算公式和取值范围, 供国内同行在设计中参考, 以减少设计中的盲目性, 达到提高设计水平之目的。

关键词: 选择; 取水; 水力计算; 设计水平

中图分类号: TU 991. 32

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(1999)03-0077-03

30 年代, 美国成立田纳西流域管理局时就已经开始重视水库水温问题; 日本在 50 年代亦已成立了河川水温调查委员会, 研究水温与水稻生长的关系及水库水温分布特性等。70~80 年代, 日本相继建成了不少多节式选择取水结构, 并在 80 年代后期编制了《选择取水设施设计要领及说明》供设计者采用。我国对选择取水问题的认识不算太晚, 但发展不快, 目前的设计水平也不高。为了提高国内选择取水的设计水平, 笔者根据国外试验研究资料, 结合自己的看法, 着重谈谈以下几个问题, 供国内同行参考。

## 1 水库成层特性

根据水库水温沿水深分布的特性, 可将水库分为成层型、中间型和混合型 3 种。成层型水库表层水温度高, 水温随水深加深而降低, 当达到一定水深时, 水温常年稳定不变, 即水库中的水温形成明显分层状态。水温为什么会有如此规律? 这是因为水库是一个巨大的蓄热库, 水库中的水大量吸收阳光辐射热, 但水体吸收辐射热的多少随水深的不同而不同, 水深愈深, 吸收的辐射热愈小。美国辛尼加湖的观测资料表明: 表层 1 m 水深内吸收的热量占全部吸热量的 80% 的, 其中大部分被表层 20 cm 的水层吸收, 约 5% 的热量能达到 5 m 深度, 仅有 1% 的热量能够达到 10 m 深处。水中热量少, 相对温度就低。从水的密度方面分析, 温水的密度小于冷水的密度, 密度大的水沉在密度小的水的下面是大家都认同的, 所以, 下面的冷水不会自动向上浮, 温水也不会自动向下沉, 即温水、冷水不交换, 从而形成水库中水温分层状态。

不是每座水库水温都分层。水库来水量相对总库容较大的水库, 来水时会破坏水库水温成层分布。

收稿日期: 1999-05-10

日本经多年研究, 规定用表 1 判定水库成层特性。

表 1 水库成层特性判定表

成层类型	$\alpha$	$\alpha_7$	$F_D$
成层型	< 10	< 1	< 0.01
中间型	10~30	1~5	0.01~0.05
混合型	> 30	> 5	> 0.05

表中  $\alpha = \frac{Q_t}{W_t}$        $\alpha_7 = \frac{Q_7}{W_t}$

$$F_D = \frac{L \cdot Q}{H_1 \cdot W_t} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{g(-\frac{d\rho}{dz})}} \quad (1)$$

式中  $Q_t$ ——全年入库总水量 ( $m^3$ );

$Q_7$ ——7 月份入库水量 ( $m^3$ );

$W_t$ ——水库的库容 ( $m^3$ );

$L$ ——水库的长度 (m);

$Q$ ——年平均流量

$Q = Q_t / (365 \times 86400)$  ( $m^3/s$ );

$H_1$ ——水库平均水深 (m);

$\rho_0$ ——水的标准密度 ( $t/m^3$ );

$-d\rho/dz$ ——平均密度梯度 ( $t/m^4$ );

$F_D$ ——水库内的平均费汝德数;

$g$ ——重力加速度 ( $m/s^2$ )。

例如:  $L/H_1 = 400$        $\rho_0 = 1 t/m^3$

$$-\frac{d\rho}{dz} = 0.00006 t/m^4 \quad Q = \frac{Q_t}{365 \times 86400}$$

$$\text{则 } F_D = \frac{400 \times Q_t}{365 \times 86400 \times W_t} \cdot \sqrt{\frac{1}{9.81 \times 0.00006}} \\ = 5.23 \times 10^{-4} \times \alpha$$

若  $\alpha = 19$

则  $F_D = 5.23 \times 10^{-4} \times 19 = 0.01$

结论: 水库为中间型水库。

在设计中首先应根据表 1 判定水库成层特性, 当为成层型时有考虑选择取水的必要, 当是混合型时, 则毫无必要选择取水。

## 2 取水深度

从成层型水库中取水时,在取水口附近会形成一流动层,流动层的水流向取水口被排出库外,这一流动层的水应是人们所需要取的水。图1为某水库表层取水时,水温分布及流动状况图。同样,在中层、底层取水时,取水口附近也会形成一流动层。因此,可以说人们可以根据需要有目的的取水,即只取需要的水。

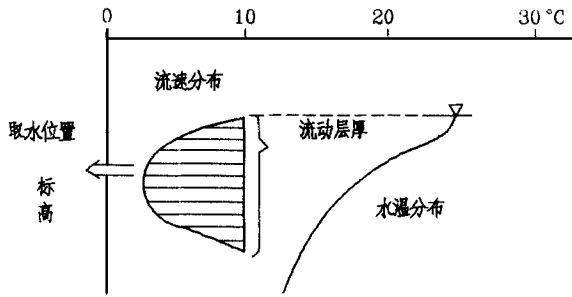


图1 表层取水水温分布及流动状态图

流动层厚度  $\delta$  用下式求得:

$$\delta = \left[ \frac{Q_1}{G \cdot \theta \sqrt{g \cdot \beta}} \right]^{1/3} \quad (2)$$

式中  $Q_1$ ——取水量 ( $m^3/s$ );

$G$ ——日野,大西系数(表层、底层取水时为 0.324,中层取水时为 0.134);

$$\beta = (\rho_b - \rho_s) / (\rho_b \cdot H_2) \quad (1/m)$$

式中  $\rho_b, \rho_s$ ——底层、表层水密度 ( $t/m^3$ );

$H_2$ ——水库的最大水深 (m);

$\theta$ ——有效开口角(取水口为直线型或半圆型时等于  $\pi$ ,为圆型时等于  $2\pi$ )。

式(2)是在取水深度  $H < (1/2 \sim 1/3) \delta$  的条件下由试验得出。也就是说,当  $H$  小于  $\delta/3$  时,不会影响流动层的厚度  $\delta$ ,只能取厚度  $\delta$  内的水。如若  $\delta$  为设计中需要的最大值  $\delta_{max}$  时,则取水深度  $H$  必须控制小于或等于  $1/3 \delta_{max}$ ,设计中  $H$  值通常为 2~3 m。

## 3 最大取水量

对二层水域即水的密度分上下两层的水域进行研究,其结论是,当只取上层或只取下层水的限制条件为取水量不能太大,并可根据试验结果计算出最大取水量  $Q_0$ 。

### 3.1 垂直壁下开口口取底层水

当垂直壁下开口口只取底层水时(见图2),其研究结果为:满足壁右侧的上层水不会被引到壁左侧的极限条件为:

壁为平面时:

$$\frac{Q_c}{\sqrt{\epsilon \cdot g \cdot d^5}} = 0.544 \frac{B}{d} \quad (d/D > 2.5) \quad (3)$$

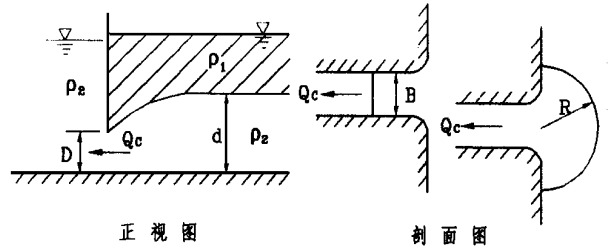


图2 垂直壁下开口口的底层取水示意图

壁为弧面时:

$$\frac{Q_c}{\sqrt{\epsilon \cdot g \cdot d^5}} = 0.544 \frac{\theta \cdot R}{d} \quad (d/D > 1.5) \quad (4)$$

式中  $\epsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$ ;

$\theta R$ ——重直壁的中心角及圆弧半径 (m);

$d$ ——底层水深度 (m);

$D$ ——孔口高度 (m);

$B$ ——平面垂直壁宽度 (mm)。

可知,弧面垂直壁取水优于平面垂直壁取水。

### 3.2 铅直取水管底层取水

#### 3.2.1 铅直管底层取水

当二层水域下方用铅直管只取底层水时(见图3a),试验得出的极限条件为:

$b = 0$  时:

$$\frac{Q_c}{2\pi \sqrt{\epsilon \cdot g \cdot d^5}} = 0.256 \quad (0.3 < D/d < 1.3) \quad (5)$$

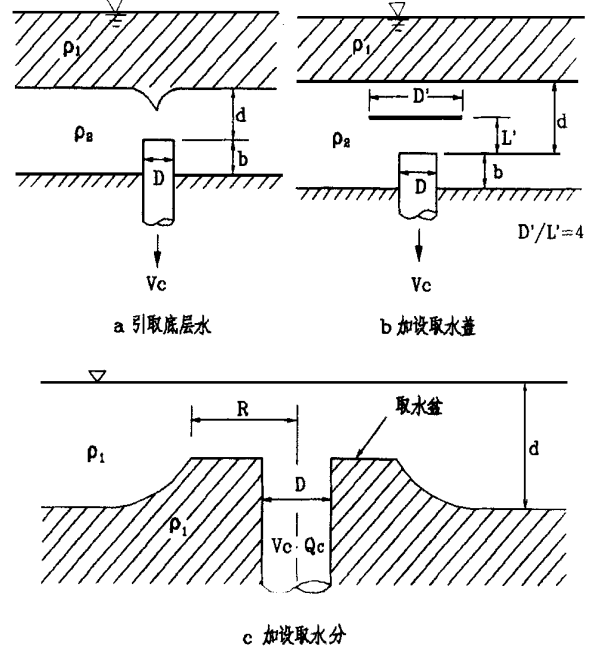


图3 铅直取水管取水示意图

$b = 0$  时:

$$\frac{Q_c}{2\pi \sqrt{\epsilon \cdot g \cdot d^5}} = 0.474 \quad (b/d = 0.5 \text{ 或 } 1.0) \quad (6)$$

式中  $\epsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$

可以看出, 取水管突出优于不突出。

### 3.2.2 加设取水盖

二层水域铅直取水管上加设取水盖, 只取底层水时(见图 3b), 试验得出的极限条件为:

$$\frac{Q_c}{2\pi\sqrt{\epsilon \cdot g \cdot d^5}} = 0.662 \quad (7)$$

式中  $\epsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$

式(7)与式(5)、式(6)相比可以看出, 加设取水盖优于不加设取水盖。

### 3.2.3 加设取水盆

二层水域铅直取水管顶部加设外径  $R$  的取水盆, 只取表层水时(图 3c), 试验得出极限条件:

$$\frac{Q_c}{2\pi\sqrt{\epsilon \cdot g \cdot d^5}} = \begin{cases} 0.65 & (0 < \frac{R}{d} < \frac{1}{2}) \\ 0.93(\frac{R}{d} - 0.1)^{0.5} & (\frac{1}{2} < \frac{R}{d} < \frac{3}{2}) \\ 0.44(\frac{R}{d} + 1.0) & (\frac{3}{2} < \frac{R}{d}) \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\epsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$

## 4 取水设施的栅流速

为防止冰、污物等流入取水塔内, 在取水设施中均设置拦污栅。过栅流速过大时会产生涡流; 当取水水流的振动频率  $f$  与拦污栅的固有频率  $f_n$  相近时, 会引起共振, 致使拦污栅破坏。通常设计中推荐  $f_n / f = 2.5$ 。

$$f = S_t \cdot U_1 / \delta_1 \quad (9)$$

$$f_n = \frac{K}{2\pi} \sqrt{\frac{E \cdot I \cdot g}{W \cdot L_1^3}} \quad (10)$$

式中  $W = V_1 (\gamma_2 + l \cdot \gamma_1 / \delta_1)$ ;

$S_t$ ——0.2 (系数);

$U_1$ ——过栅流速;

$\delta_1$ ——栅条厚度;

$K$ ——支承状态系数(栅条两端固定时为 1.7);

$E$ ——弹性模量;

$I$ ——栅条惯性矩;

$L_1$ ——栅条支承间距;

$\gamma_1$ ——水容重;

$\gamma_2$ ——栅条容重;

$V_1$ ——栅条支承间的体积;

$l$ ——栅条的净间距。

例:  $\delta_1 = 0.9 \text{ cm}$ ; 栅条宽 9 cm;  $L_1 = 50 \text{ cm}$ ;

$E = 2.1 \times 10^6 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ ;  $g = (981 \text{ cm/s}^2)$ ;

$V_1 = 0.9 \times 9 \times 50 = 405 \text{ (cm}^3\text{)}$ ;

$I = \frac{0.9^3 \times 9}{12} = 0.547 \text{ (cm}^4\text{)}$ ;

$\gamma_2 = 0.00785 \text{ kg/cm}^3$ ;  $\gamma_1 = 0.001 \text{ kg/cm}^3$ ;  $l = 15$

cm,

$$U_1 = \frac{K}{2\pi} \sqrt{\frac{E \cdot I \cdot g}{V_1 (\gamma_2 + l \cdot \gamma_1 / \delta_1) \cdot L_1^3}} \cdot \frac{\delta_1}{2.5 \times S_t}$$

$$U_1 = \frac{17}{2 \times 3.14} \sqrt{\frac{2.1 \times 10^6 \times 0.547 \times 981}{405 (0.00785 + 15 \times 0.001 / 0.9) \times 50^3}} \times \frac{0.9}{2.5 \times 0.2}$$

$$U_1 = 147 \text{ cm/s}$$

拦污栅的过栅流速通常为 1.0 m/s 左右, 所以不会产生振动。

## 5 取水塔塔内流速

取水塔塔内流速  $U_2$  过大会产生负压, 也可能发生共振。当取水是为发电时, 则水头损失会加大。取水塔内不产生负压的条件为:

$$U_2 < \sqrt{\frac{U_3^2 + 2g \cdot h}{1+n}} \quad (11)$$

式中  $U_3$ ——进水口流速;

$h$ ——从水面到计算点的距离;

$n$ ——损失系数。

例:  $U_3 = 1 \text{ m/s}$ ;  $h = 5 \text{ m}$ ;  $n = 0.2$ ;

$$U_2 < \sqrt{\frac{1^2 + 2 \times 9.81 \times 5}{1 + 0.2}} = 9.08 \text{ (m/s)}$$

只要塔内流速控制在 2~5 m/s, 并且在进水口布置喇叭状的取水盆, 使流线不脱离取水闸门内壁, 就不会有产生负压的危险。

取水塔塔内流速  $U_2$  很小时, 塔内会吸入空气, 吸入空气后会产生旋涡。通常当取水深  $H$  与取水塔塔内直径之比小于 2~3 时, 不吸入空气的条件为:

$$U_2 > \sqrt{54 \times g \cdot K_1 \cdot h^2 / R_1^2} \quad (12)$$

式中  $K_1$ ——旋涡发生初期的水面下降量与  $h$  之比。

$R_1$ ——取水塔塔内半径。

例:  $h = 3 \text{ m}$ ,  $R_1 = 2 \text{ m}$ ,  $K_1 = 1/300000$

$$U_2 > \sqrt{54 \times 9.81 / 300000 \times 3^2 / 2^2} = 0.16 \text{ (m/s)}$$

当  $K_1 = 1/10000$  时, 则  $U_2 > 0.9 \text{ m/s}$

## 6 堤坝、边坡的影响

从式(2)中可知, 有效开口角  $\theta$  是影响取水量的因素之一。而  $\theta$  的大小又受取水口到堤坝、边坡的距离的影响。

通过表层取水试验, 得出圆筒型闸门的有效开口角  $\theta$  为:

$$\theta = \frac{1 + 2.35L_2/D_1}{2 + 2.35L_2/D_1} \cdot 2\pi \quad (13)$$

式中  $L_2$ ——取水口到堤坝、边坡的距离。

(下转第 82 页)

高到 55 万 kW。除主体工程外的其他项目,均由业主按照公开招标、邀请招标或邀请议标的方式来确定施工队伍,确保了工期质量,也能有效地保证合同结算价款不超概算。

### 3.2 施工实施阶段

要以合同为主线,加强管理,控制承包合同价,防止合同价升值。为此,必须落实责任制,建立内部协调、制约机制和专业部门联审制,制定确保全面履行合同的体系和措施的基础上,抓好三个工作重点:

在确保工程质量、安全的前提下,抓进度、保工期。要采取各种有效措施,如千方百计保证资金及时到位,实行重奖重罚等。为施工创造良好的外部条件,寻求缩短工期的途径,以减少时间的消耗,减少贷款利息和管理费、风险费等各种费用,达到降低造价和提前发挥投资效益之目的。严把设计变更关。对设计变更实行“双签制”,即变更设计一定要设计人员与计经人员共同签字才能有效。计经人员在会签时要认真分清优化施工与设计修订,增补变更与原设计内容界限,并核实投资变化幅度。尽量使造价控制在概算限额以内。狠抓投资的静态控制、动态管理。只要招标阶段严格按执行概算掌握,使这一阶段的静态投资低于执行概算的静态投资,就可实现建设实施阶段的静态控制,而动态投资则不然。设计变更、地质情况变化、国家政策性调整、物价和设备价格的调整以及不可预见的费用项目等,这些动态因素都将在工程实施过程中反映出来。因而,动态投资应是包括超出概算静态投资的全部内容。所以,工程实施阶段造价管理的核心是动态投资的管理。要搞好动态投资管理,其编制方法问题又是有效控制工程造价与市场价格放开相结合的关键。根据一些单位经验,考虑采用分年度编制动态投资为宜。即在工程刚开始的年初,按照分年度静态投资和对应的动态投资,安排工程实施年的资金计划,年终按本年度施工中设计变更(项目、工程量)或材料、设备价格上涨和人工费标准、各种费用标准变化等实际情况,对不同问题运用不同方法进行计算,然后汇总起来,即为本年度动态投资。各施工年(设计施工年)编制

的动态投资之和就是该工程项目的动态总投资。静态投资与动态投资之和即为工程实施阶段(或年)的工程造价。但上述方法编制的静态投资只是相对的,其中仍有不少动态因素。例如,设计变更减少的工程(项目和量)等。只有把静态投资不实施部分(工程项目、量和费用)从静态投资中扣除,然后动、静态投资合计再加上建设还贷利息,才能真正构成工程总投资。采用这种动、静结合的方法,虽然计算比较复杂,但它能结合市场经济实际,有利于水电工程造价的有效控制和市场放开价格以及政策变化等的结合。

二滩工程在施工阶段,严格按照合同规定办事,尽量减少设计变更,工程量得到了有效的控制。对设计边线以外的超挖应是承包商的责任,监理工程师一律不承认,业主也不予支付。如在导流洞开挖中,部分区段超挖超过 0.5 m,有的甚至超过 1 m,对超挖的部分,监理工程师不仅不承认,还要求承包商用高标号的混凝土予以回填,对回填部分的混凝土亦同样不予承认,使工程量得到了有效的控制,静态投资亦得到了有效的控制。

另一方面,在二滩工程建设过程中,为解决施工期的争议与索赔,建立了一套完整的组织机构和程序,聘请了美国哈扎公司和挪威 A GN 作为咨询顾问为二滩工程服务,并聘请了争议评审团(DRB)解决施工中的争议,因此,二滩工程及时地处理了各种争议,有效地解决了工程索赔问题,同时也就有效地解决了项目法人的概算控制问题。

作为一个工程项目的法人,在工程成本控制中,控制静态投资是主要职责。要千方百计地保证静态投资不超概算,同时也要管理好动态投资。

水电工程的项目法人在造价管理上,只要抓住“确定造价”和“控制造价”两个阶段,使造价管理贯穿工程建设全过程,就一定能把造价管理好。

感谢二滩水电开发有限责任公司计划合同处处长滕代文高级经济师和时育才高级经济师的指导。

作者简介:

窦丽娜,女,二滩水电开发有限责任公司经营部,经济师

(上接第 79 页)

$D_1$ ——取水盆直径。

对于半圆筒闸门,则式(13)中的  $2\pi$  用  $\pi$  代替。由式(13)可以看出,  $L_2/D_1$  愈大,则  $\theta$  愈大,当  $L_2/D_1 = 2$  时,  $\theta = 0.85 \times 2\pi$ , 当  $L_2/D_1 = 3.5$  时,  $\theta = 0.9 \times 2\pi$ 。另外,如  $L_2/D_1$  太小,还会影响流动层的厚度  $\delta$ , 对  $0.95\delta \sim L_2/D_1 = 1.5\delta$  做试验,其结论是  $L_2/D_1$

愈小,对  $\delta$  的影响愈大,直到  $L_2/D_1 = 1.5\delta$  时,其流动层厚度才不会受到影响。再者,  $L_2/D_1$  愈大,愈不经济,所以,工程设计中必须认真予以考虑。总之,选择取水的水力学问题是复杂的,很多设计参数都需通过水力试验才能决定。

作者简介:

牛牛生,男,水利部水利水电规划设计总局,高级工程师