

引黄入晋工程申同嘴水库冬季输水安全性分析

李文芳¹, 石 娜², 谢能刚²

(1. 山西省引黄入晋工程总工程师办公室, 山西 太原 030003; 2. 安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要: 为给万家寨引黄入晋工程中申同嘴水库是否采取保温措施提供决策依据, 针对水库水温的变化情况建立了基于冰屑形态的水体结冰时间计算模型和基于冰盖形态的出库水温计算模型, 计算了水库水体的结冰时间和出库水温。结果表明: 库水结冰时间取决于库水位和入库水温, 其中库水位影响较大; 在形成有效冰盖的状态下, 不采取保温加盖措施也能保证冬季输水安全。

关键词: 申同嘴水库; 引黄入晋工程; 水温; 结冰时间

中图分类号: TV62+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2004)02-0172-03

申同嘴水库为日调节水库, 位于万家寨引黄入晋工程总干线上。该水库库容 14.7 万 m³, 正常蓄水位 1 240.5 ~ 1 248 m, 中心线长 299.71 m。引黄工程地处内陆深处, 冬季干燥寒冷, 暴露在大气中的申同嘴水库可能会因结冰而影响引黄工程的正常工作。为给申同嘴水库是否采取保温措施提供决策依据, 针对水库水温变化情况建立了基于冰屑形态的水体结冰时间计算模型和基于冰盖形态的出库水温计算模型, 并计算了水体结冰时间和出库水温。

申同嘴水库冬季水温计算方法可分为 (a) 考虑时间因素的全过程仿真计算。在水库实际运行时间里, 水体与库壁、库底形成了一个较为稳定的随时间渐变的温度场。该温度场计算需要水库的实际运行资料和气象变化资料, 计算过程复杂, 资料收集困难。(b) 不考虑历史时间因素影响的计算。以冬季最不利情况发生时间作为计算时段, 只考虑当时气温的影响。这 2 种计算方法中, 方法 (b) 分析的是最不利情况, 计算结果偏于安全和保守, 因此本文采用此计算方法。

1 基于冰屑形态的水库整体结冰时间计算模型

如果水库水体是充分混掺的, 即水温不分层, 水流的失热基本是在整个水体内同时进行的, 则在整个水体的过冷却过程中, 将形成海绵状多孔隙的冰屑。本文基于冰屑形态建立库水整体结冰时间计算模型。

1.1 水体与大气之间的热交换

水体与外界辐射能量的传递方式主要有太阳辐射、大气辐射和由水面发出的长波辐射^[1], 则水体接受的辐射能量为

$$\varphi_r = I - R_1 + G - R_2 - R_3 \quad (1)$$

$$G = \alpha(0.848 - 0.249 \times 10^{-0.069E_l}) (\theta_l + 273) (1 + 0.17\omega^2) \quad (2)$$

$$R_3 = 0.97\alpha(\theta_w + 273)^4 \quad \sigma = 5.7 \times 10^{-2} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

式中: I ——入射的太阳辐射能量; R_1 —— I 被水面反射的能量, $R_1 \approx 0.15I$; G ——大气辐射能量; E_l ——空气中水蒸气分压力; ω ——云度; θ_l ——水面上 2 m 处的气温; R_2 —— G 被水面反射的能量, $R_2 \approx 0.03G$; R_3 ——由水面发出的长波辐射能量; θ_w ——水体温度。

$$\text{蒸发或凝结热量 } \varphi_z = (C_1 + C_2 v_w^{C_3}) (E_l - E_t) \quad E_t = \exp\{-5411/(\theta_w + 273) + 21.32\} \quad (3)$$

式中: C_1, C_2, C_3 ——经验系数; v_w ——水面上 2 m 处风速; E_t ——水温 θ_w 下的饱和蒸气压。

$$\text{对流热量 } \varphi_c = \frac{1}{C_b} (C_1 + C_2 v_w^{C_3}) (\theta_l - \theta_w) \quad (4)$$

式中 $C_b = 0.0152 \text{ } ^\circ\text{C/Pa}$ 。

1.2 库水与库壁之间的自然对流换热

若考虑水体自然对流的特性, 库水与库壁之间的热交换类型可认为是水体与竖板之间的自然对流换

热^[2].单位时间内水体与库壁之间的对流换热量为

$$\Phi_s = \int_0^H -K\alpha_z(\theta_w - \theta_{kb})dz \tag{5}$$

$$\alpha_z = Nu_z\lambda_w/z \tag{6}$$

$$Nu_z \approx 0.75\left(\frac{0.4Pr}{1 + 2Pr^{0.5} + 2Pr}\right)^{0.25} (Gr_zPr)^{0.25} \tag{7}$$

$$Gr_z = g\alpha_V z^3(\theta_w - \theta_{kb})/\nu^2 \tag{8}$$

式中: z ——沿库水深度方向的坐标值; K ——水库周长; H ——水深; θ_{kb} ——库壁温度; α_z ——水体在 z 处的对流传热系数; λ_w ——水体的热导率; Nu_z ——纳赛尔数; Pr ——普朗特数; g ——重力加速度; α_V ——水体的体胀系数; ν ——水体运动粘度.

1.3 库水温度计算模型

库水温度 θ_w 随时间变化的微分方程为

$$\frac{d\theta_w}{dt} = \frac{\Phi(\theta_w,t)}{\rho_w c_{wp} V} \tag{9}$$

$$\Phi_l = \int_0^L [\varphi_u(x) + \varphi_b(x) + \varphi_d(x)]B(x)dx + \Phi_s \tag{10}$$

式中: ρ_w, c_{wp} ——水体的密度和比定压热容; V ——有效库容; Φ_l ——单位时间内库水与外界交换的总热量; $B(x)$ ——水库在 x 处过水断面的表面宽度; L ——水库中心线长度.

采用迭代解法求解式(9).设初始水温为 $\theta_w^{(0)}$,第 $i+1$ 时段的水温变化量为 $\Delta\theta_w^{(i+1)} = \Phi_l(\theta_w^{(i)}, i+1)/(\rho_w c_{wp} V)$,则第 $i+1$ 时段的水温为 $\theta_w^{(i+1)} = \theta_w^{(i)} + \Delta\theta_w^{(i+1)}$.计算至 $\theta_w^{(n)} \leq 0$ 为止, n 即为库水的结冰时间.

2 基于冰盖形态的出库水温计算模型

在气温过低和流速较慢的情况下,库水结冰将主要以冰盖形态出现.在多年日平均最低气温和输水流量为小流量的情况下,申同嘴水库的运行状况将为冰盖下输水.本文基于冰盖形态对出库水温进行计算分析.

2.1 冰盖温度场分析

忽略冰盖与大气之间的辐射能量,沿水库中心线 x 处的冰盖内热传导方程为^[3]

$$\lambda_{bs}[\theta_d - \theta_u(x)]/h_b = \varphi_u(x) - \varphi_b(x) \tag{11}$$

$$\varphi_u(x) = \alpha_u[\theta_u(x) - \theta_l] \tag{12}$$

$$\varphi_b(x) = \alpha_d(x)[\theta_w(x) - \theta_d] \tag{13}$$

$$\alpha_d(x) = 16.22u_x^{0.8}H_x^{-0.2} \tag{14}$$

式中: φ_u, φ_d ——冰盖上、下表面的面积热流量; λ_{bs} ——冰的热导率; θ_u, θ_d ——冰盖上、下表面温度, θ_d 一般取冰点值; h_b ——冰盖厚度; α_u ——冰盖上表面与大气的传热系数; α_d ——冰盖下表面与水体的传热系数; u_x —— x 处的水流速度; H_x —— x 处的水深.

变换式(11)可得

$$\theta_u(x) = \{\lambda_{bs}\theta_d + h_b\alpha_u\theta_l + h_b\alpha_d(x)[\theta_w(x) - \theta_d]\}/(\lambda_{bs} + h_b\alpha_u) \tag{15}$$

$$\varphi_u(x) = \alpha_u \frac{\lambda_{bs}(\theta_d - \theta_l) + h_b\alpha_d(x)[\theta_w(x) - \theta_d]}{\lambda_{bs} + h_b\alpha_u} \tag{16}$$

2.2 库水温沿水流方向分布方程^[4]

$$\frac{d\theta_w(x)}{dx} = -\frac{\varphi_u(x)K(x)dxA(x)}{\rho_w c_{wp} Q_V(x)Q(x)} \tag{17}$$

式中: Q ——流量; $Q_V = Q \cdot 1s$; $A(x)$ —— x 处水体的过水面积.

3 计算参数及结果

3.1 计算参数

由于库底一直被水覆盖,故近似地认为库底温度与水温相等;库壁初始温度近似地等于气温; $v_w =$

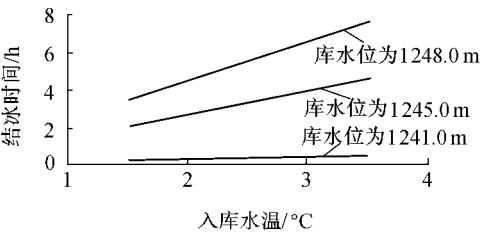


图1 申同嘴水库结冰时间与入库水温关系曲线

Fig.1 Relationship between freezing time and inflow temperature of Shentongzui Reservoir

4 小 结

- a. 申同嘴水库库水结冰时间取决于库水位和入库水温,其中库水位影响较大.因此在冬季,为防止泵站停机检修等突发事件造成库水结冰,水库应保持高水位.
- b. 在申同嘴水库形成有效冰盖的状态下,冰盖内形成稳定温度场,冰盖下水流失热较少,即使在小流量 6.45 m³/s、低入库水温的情况下,也能保证输水安全,因此申同嘴水库无须采取保温加盖措施.在极低入库水温情况下,采取加大入库流量的方法可避免水体结冰.

参考文献:

[1] 金士博. 水环境数学模型[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987. 53—57.

[2] 钱壬章, 余昌铭, 林文贵. 传热分析与计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987. 87—96.

[3] 张学成, 可素娟, 潘启民, 等. 黄河冰盖厚度演变数学模型[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 203—205.

[4] 谢能刚, 宋培玉, 王德信. 万家寨引黄入晋工程引水线路冬季水温计算[J]. 人民黄河, 2002(4): 35—37.

Safety analysis of water conveyance to Shentongzui Reservoir
in winter by water diversion project from Yellow River to Shanxi Province

LI Wen-fang¹, SHI Na², XIE Neng-gang²

(1. Chief Engineer's Office of Yellow River-Shanxi Province Water Diversion Project, Taiyuan 030003, China;
2. College of Mechanical Engineering, Anhui Univ. of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract: This work is done to provide a basis to determine whether the heat insulating measure should be taken at the Shentongzui Reservoir. With consideration of the water temperature variation in the reservoir, calculation models for freezing time of the water body and outflow temperature of the reservoir are developed based on the shapes of ice scraps and ice covers, and the freezing time and outflow temperature are calculated. The results show that the freezing time depends on the water level and inflow temperature of the reservoir, and the water level has greater influences, and that, if an effective ice cover is formed, it is unnecessary to take any heat insulating measures.

Key words: Shentongzui Reservoir; water diversion project from Yellow River to Shanxi Province; water temperature; freezing time

24 m/s; $I = 0.0117 \text{ W/m}^2$; $E_l = 172.8 \text{ Pa}$; $\theta_d = 273 \text{ K}$; $\alpha_u = 10 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$; $\lambda_{bs} = 2.220 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$; $\lambda_w = 0.574 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$; $\lambda_s = 1.37 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$; $Pr = 12.22$; $c_{wp} = 4180 \text{ J/(kg} \cdot \text{°C)}$; $\nu = 1.760 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$; $g = 9.8 \text{ N/kg}$; $\alpha_V = 0.081 \times 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$; $C_1 = 0.0$; $C_2 = 0.0876 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{Pa)}$; $C_3 = 1.0$.

3.2 计算结果

基于冰屑形态的库水整体结冰时间如图1所示,基于冰盖形态的出库水温计算结果如表1所示.

表1 申同嘴水库出库水温计算结果

Table 1 Calculated result of outflow temperature from Shentongzui Reservoir

进库水温 /°C	$\theta_l = -17.2 \text{ °C}$		$\theta_l = -22.7 \text{ °C}$	
	$Q = 6.45 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 12.90 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 6.45 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 12.90 \text{ m}^3/\text{s}$
1.5	1.0306	1.0773	1.0129	1.0707
2.1	1.4477	1.4959	1.4300	1.4893
4.6	3.1855	3.2399	3.1678	3.2333