

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.01.011

新型自浮式浮筒分层取水口水动力特性研究

任坤杰¹, 顾玉川², 董静¹, 陈聪聪², 姜治兵¹, 韩松林¹, 高涵³

(1. 长江科学院, 湖北 武汉 430010; 2. 重庆市藻渡水资源开发有限公司, 重庆 401437;

3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为了探究新型自浮式浮筒分层取水口水动力特性与取水效果, 考虑温度对水体物理性质的影响, 采用紊流三维数学模型对自浮式浮筒分层取水口区域流场进行模拟与分析。结果表明: 取水口远区浮力作用占优, 垂向流速分布均匀; 取水口近区取水牵引力占优, 垂向流速分布不均匀, 表层水体流速远大于底部水体; 取水口区域沿水深方向由上至下依次为拟静水区、低流速梯度区及高流速梯度区, 仅高流速梯度区水体参与取水口表层取水; 库区取水深度约为取水口高度的 4.7~6.8 倍; 流动分界面以下区域垂向温分层越明显, 库区取水深度越小; 库区垂向温度分布规律基本一致, 库区水位越高, 库区取水深度越小; 库区水位相同, 流动分界面以下区域垂向温分层特征一致而温度值不同, 则库区取水深度基本相同; 新型自浮式浮筒分层取水出流水温 $T_{\text{分层}}$ 比未设置分层取水设施的单层出流水温 $T_{\text{单层}}$ 提高 0.64~5.59℃, 流动分界面以下区域垂向温分层特征越显著, 浮筒分层取水出流水温温升越大。

关键词: 新型自浮式浮筒分层取水; 数学模型; 流动特性; 取水深度; 出流水温

中图分类号: TV135

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)01-0094-08

Hydrodynamic Characteristics of a Novel Self-floating Buoy Stratified Water Intake

REN Kunjie¹, GU Yuchuan², Dong Jing¹, CHEN Congcong², JIANG Zhibing¹, HAN Songlin¹, GAO Han³

(1. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China;

2. Chongqing Zaodu Water Resources Development Co., Ltd., Chongqing 401437, China;

3. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: In order to clarify the hydrodynamic characteristics and water intake effect of a novel self-floating buoy stratified water intake, and provide a theoretical reference for the scientific design and application of stratified water intakes for irrigation. Considering the influence of temperature on the physical properties of water bodies, the turbulence three-dimensional mathematical model was adopted to simulate and analyze the flow field in the area of the self-floating buoy stratified water intake. The results are as follows. Influenced by buoyancy and water intake traction, buoyancy dominates in the far zone of the water intake, resulting in a uniform vertical velocity distribution; while traction dominates in the near zone, leading to an uneven vertical velocity distribution, with the surface water velocity much greater than that of the bottom water. From top to bottom along the water depth in the water intake area, there are a quasi-still water zone, a low-velocity gradient zone, and a high-velocity gradient zone, with only the water in the high-velocity gradient zone participating in surface water intake. The water intake depth in the reservoir area is approximately 4.7 to 6.8 times the height of the water intake. The more obvious the vertical temperature stratification below the flow interface, the smaller the water intake depth in the reservoir area. The vertical temperature distribution pattern in the reservoir area is basically consistent. The higher the reservoir water level, the smaller the water intake depth. When the reservoir

收稿日期: 2025-09-19

修稿日期: 2025-11-08

基金项目: 2024 年重庆市水利科技项目; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目 (CKSF20241019/SL)

作者简介: 任坤杰 (1975—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事水力学方面研究工作。E-mail: renkj0904@126.com

通讯作者: 董静 (1993—), 女, 博士, 工程师, 主要从事水力学方面研究工作。E-mail: dongjing139@whu.edu.cn

water level is the same, if the vertical temperature stratification characteristics below the flow interface are consistent but the temperature values differ, the water intake depth in the reservoir area is basically the same. Compared with a single-layer water intake without stratified intake facilities, the stratified outflow water temperature (T -stratified) of the novel self-floating buoy stratified water intake is increased by 0.64°C to 5.59°C . The more significant the vertical temperature stratification below the flow interface, the greater the increase in outflow water temperature for stratified water intake using the buoy.

Keywords: novel self-floating buoy stratified water intake; mathematical model; flow characteristics; water intake depth; outflow water temperature

水库建成蓄水后减弱了水温的垂向交互作用,改变了水温时空分布,受太阳辐射作用,库内水温呈现垂向分层特点,深层水温低于表层,有时温差可达 20°C [1-2]。通常水电站进水口或灌溉取水口设置于水库深层,下泄水体基本为水温较低的水库深层水体,直接引用会对下游河道生态环境与灌溉农作物产生冷害影响 [3-5]。为解决水库深层取水发电与灌溉导致的冷害问题,水电站进水口与灌溉取水口分层取水表层水方式逐渐替代了传统的深层取水方式。常用分层取水型式包括叠梁门取水口、多层取水口、浮式取水口型式等,其中浮式取水口大多应用于灌溉取水工程 [6]。

叠梁门取水口与多层取水口因广泛应用于大型发电取水工程而备受关注,其分层取水相关研究成果比较丰富。郑铁刚等 [7-8] 采用三维数学模型研究了模型尺寸下的叠梁门分层取水水动力特性,研究坝式叠梁门挡墙取水水头对水库下泄水温的影响,提出了叠梁门分层取水的取水层主要位于叠梁门顶作用水头中部,取水层内流速与温度分布主要受取水高程影响等结论。郑铁刚等 [9] 依托新疆噶尔河流域库尔干水利枢纽工程,通过物理模型试验提出了叠梁门分层取水适宜水头为 $3\sim 6\text{ m}$ 。王岑等 [10] 通过物理模型试验提出了取水效率较高的叠梁门与帷幕相结合布置的取水结构。张文远等 [11] 依托大石峡水电站,从水力学角度验证叠梁门分层取水口布置方案的可行性。尹辉等 [12] 依托 KRG 水利工程,论证了中小型发电取水工程采用叠梁门分层取水的可能性,结合分层取水下泄水温,提出了较优的叠梁门取水高程。柳海涛等 [13] 针对改进叠梁门分层取水结构以提高取水效果,运用数学模型与物理模型相结合的手段系统研究了水平帷幕长度与取水温升的关系。以上研究成果为其他形式分层取水水力特性与效果的研究提供了理论基础。

而浮式取水口分层取水研究成果相对较少。高学平等 [14] 通过物理模型试验对水库水温分布、取水

口淹没深度及取水流量与浮式管型取水口下泄水温的关系进行了研究,得到了下泄水温随取水口淹没深度减小而升高,下泄水温变化幅度与水库水温分布相关,增大取水流量可提高下泄水温等结论。高学平等 [15] 通过数学模型对浮式管分层取水口前流速分布进行研究,得出水流运动受到浮力与牵引力作用,取水口远区水体主要受浮力影响,垂向流速分布趋于均匀;近区水体主要受取水牵引力影响,浮力作用较弱,垂向流速分布趋于不均匀,取水口高程范围内流速较大等结论。而基于浮式取水口取水原理的新型自浮式浮筒分层取水口的水力特性与取水效果研究鲜有报导。

本文以实际工程新型自浮式浮筒分层取水口为研究对象,考虑水温影响,利用三维数学模型模拟取水口区域水流流场与温度场,分析取水口前水流流速分布与温度分布及取水效果,为自浮式分层取水口科学设计与应用推广提供科学支撑。

1 新型自浮式浮筒分层取水口布置

藻渡灌溉分层取水工程设计流量为 $15.5\text{ m}^3/\text{s}$,目前自动分层取水的浮式取水口最大设计流量为 $2.4\text{ m}^3/\text{s}$ [11],而叠梁门取水口单机引水流量可达 $690\text{ m}^3/\text{s}$ [7],但无法实现自动无极分层取水。结合浮式取水口与叠梁门取水口的特点,既要满足工程取水需求,又可达到引用表层水的目的,藻渡工程取水口提出了新型自浮式浮筒分层取水口布置型式。新型自浮式浮筒分层取水口,由自浮式 U 型浮筒与叠梁组成,U 型浮筒在重力与水体浮力的作用下实现自浮实现取用表层水的目的,较浮式管结构简单便于维护;叠梁较常规分层取水叠梁的高度大,其目的是尽量减少机械干预实现阻挡浮筒下方低温水下泄的目的。通过数值模拟对比分析了浮筒过流断面取水高度 $2.0, 2.5, 3.0\text{ m}$ 条件下的叠梁门顶上方与进水仓流道内最大流速以及取水效果。分析结果表明,取水高度 $2.5, 3.0\text{ m}$ 时,叠梁门顶上方与进水仓

流道内最大流速较类似工程小,再结合工程安全与取水效果,最后确定浮筒过水断面取水高度为 2.5 m。

新型自浮式浮筒分层取水口布置如图 1 所示,进水塔沿水流方向依次布置拦污栅槽、自浮式浮筒装置、叠梁门槽、进水仓、通仓及短有压出口。进水塔长度 28 m,宽度为 2.5~8 m,底高程为 339 m,顶高程 379.3 m。自浮式浮筒装置为上部预留过流面的平板浮筒,由上部两侧浮筒、过流面及下部浮筒组成,浮筒厚度 0.8 m,上部两侧浮筒宽 0.9 m、高 4.0 m,过流断面宽 5.0 m、高 2.5 m,下部浮筒宽 6.8 m、

高 6 m,在浮筒底部下游侧设置挑檐与下游叠梁门搭接阻止进水塔内底部低温水进入下游。下游叠梁门槽内布置每节高度 5.15 m 的叠梁。库区水流汇入进水塔由浮筒过水断面进入叠梁门下游,经过水仓、通仓及短有压出口向下游供水。整个浮筒装置根据水位变化自动升降,保证取用表层水;下游设置叠梁门,根据水位变化,当浮筒取水过水断面底面将低于叠梁门顶时,利用桥机提起一节叠梁,当浮筒挑檐将高于叠梁门顶时,通过桥机下放一节叠梁,实现无级分层取水。

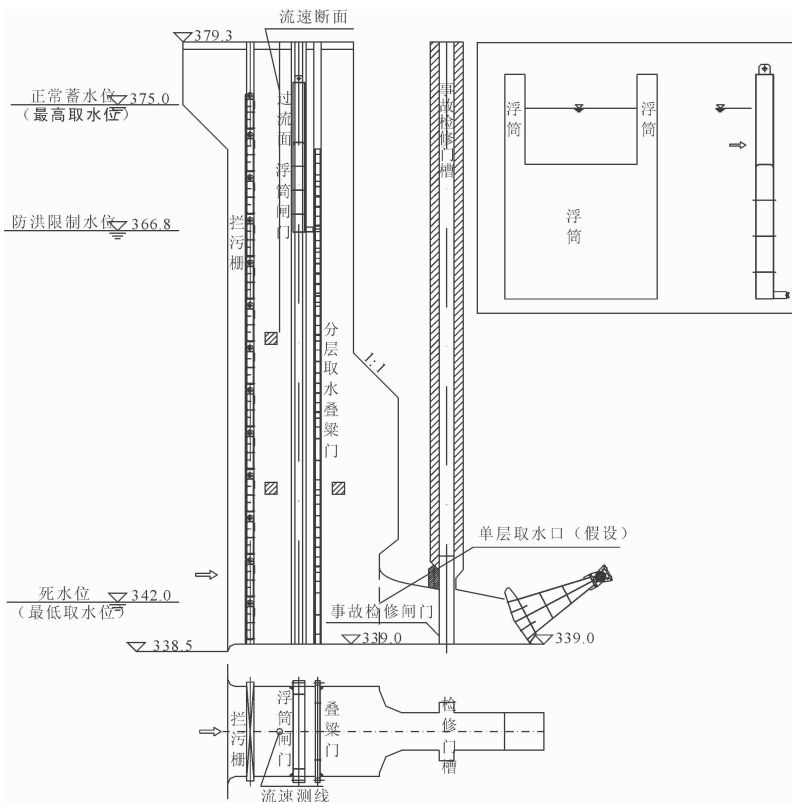


图 1 新型自浮式浮筒分层取水口布置

2 数学模型及验证

利用水气两相 Realizable $k-e$ 紊流三维数学模型对浮筒取水口区域水流流场进行模拟。

2.1 控制方程

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + C_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} C_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (4)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x_i} - \overline{u_i T'} \right) + \frac{q}{C_p} \quad (5)$$

状态方程:对于天然水体,密度与温度的关系可近似为^[4]:

$$\rho = (0.102027692 \times 10^{-3} + 0.677737262 \times 10^{-7} \times T - 0.905345843 \times 10^{-8} \times T^2 + 0.864372185 \times 10^{-10} \times T^3 - 0.642266188 \times 10^{-12} \times T^4 + 0.10516443 \times 10^{-17} \times T^7 - 0.104868827 \times 10^{-19} \times T^8) \times 9.8 \times 10^5 \quad (6)$$

式中: ρ 为水体密度; t 为时间; u_i, u_j, x_i, x_j 分别为速度分量与坐标分量; μ, μ_t 分别为动力粘性系数与紊流粘性系数; $\mu_t = C_u \rho \kappa^2 / \varepsilon$; p 为压力; f_i 为质量力; κ 为湍动能; ε 为湍动能耗散率; C_κ 为平均速度梯度产生的紊动能项, $C_\kappa = \mu_t \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right]$; 经验常数 $C_u = 0.09, \sigma_\kappa = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92$; T 为温度; D_T 为热扩散系数, $D_T = \lambda / \rho C_p$, λ 为导热系数; q 为热源项; C_p 为水的比热。

2.2 计算区域

新型自浮式浮筒分层取水口计算区域如图 2 所示。计算区域包括部分近库区、进水塔段。近库区段,库区长度依据水温分布特征、温跃层高程及引水最高水位等取为 150 m;其宽度考虑进水塔进流为源汇入流,进水塔两侧宽度为约为 3 倍库区水位变幅,则水库宽度为 216 m;库底高程为 300 ~ 339 m。进水塔段布置型式尺寸参见前文。

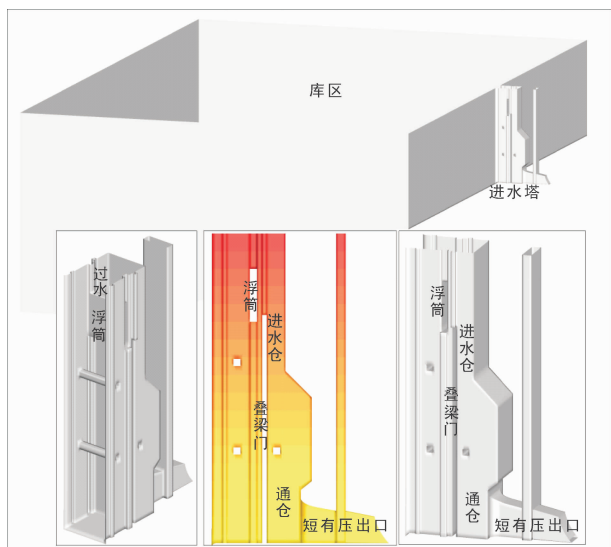


图 2 新型自浮式浮筒分层取水口计算区域

2.3 计算网格

计算区域采用计算精度与效率均较高的结构化六面体网格划分。网格尺寸沿水流方向为 0.1 ~ 1.0 m,水深方向为 0.3 ~ 0.5 m,宽度方向为 0.2 ~

2.0 m;网格尺度库区大、进水塔段小。

2.4 边界条件与初始条件

库区上游为入流边界,设定速度进口边界,给定断面平均流速与沿水深方向的水温分布;短有压出口设定压力出口边界,依据弧门开度设定自由出流孔口尺寸;固壁边界采用无滑移边界条件;大气温度与水面温度一致。库内初始温度分布为如图 3 所示的典型年坝前水温分布。

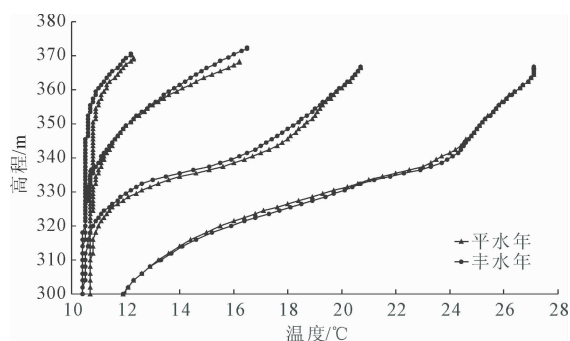


图 3 坝前水温分布

2.5 模型验证

采用以上数学模型,模拟库区水位 366.8 m、取水流量 15.5 m³/s、浮筒分层取水口淹没深度 2.5 m 条件下的水流流场。分析对比进水塔内物理模型试验与数学模型计算得到的垂向流速分,进水塔内取水口前 0.8 m 断面处(见图 1)垂向流速分布如图 4 所示。

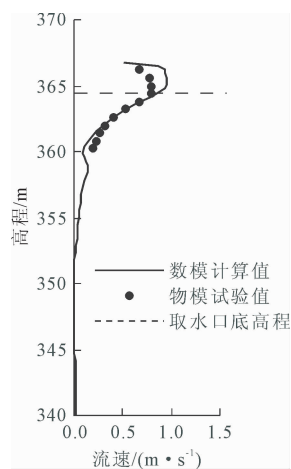


图 4 取水口前 0.8 m 断面处垂向流速分布

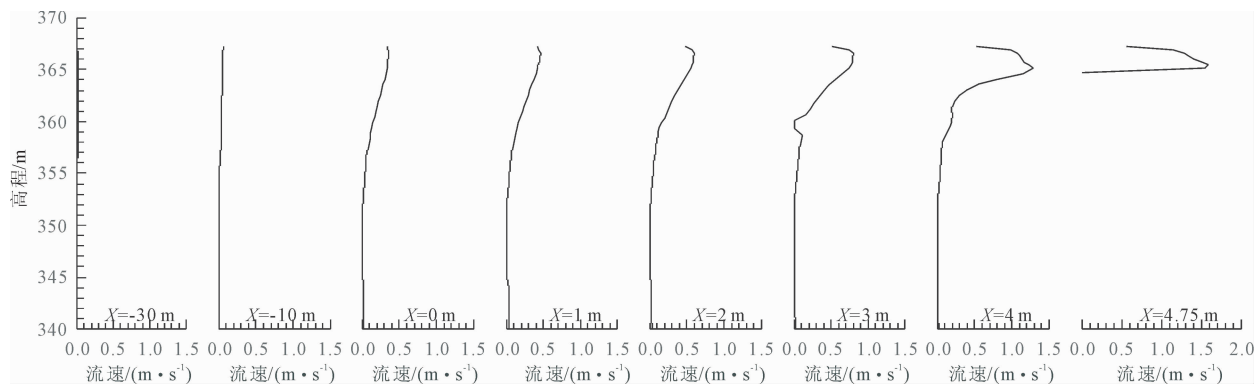
由图 4 可知,沿水深方向,取水口底高程以上随水深减小流速呈先增大再减小趋势,底高程以下随水深减小流速呈增大趋势。沿水深方向流速分布规律,数学模型计算与物理模型试验非常一致;流速值,在取水口底高程附近数学模型计算值与物理模

型试验值吻合较好。以上结果表明所建立的数学模型合理可行,可用于研究本文自浮式浮筒叠梁组合闸门分层取水口水动力特性。

3 模拟结果与分析

3.1 模拟条件

基于平水年与丰水年灌溉期 3—5 月、7 月坝前水温分布,平水年库区水位分别为 369.4、368.4、366.8、366.8 m,丰水年库区水位 370.6、372.5、366.8、366.8 m,取水流量均为 $15.5 \text{ m}^3/\text{s}$,浮筒取水口淹没深度均为 2.5 m 条件,采用三维数学模型模拟取水口区域速度场与温度场。



CAES 图 5 浮筒前近库区与进水塔内沿程垂向流速分布(库区水位 366.8 m,平水年 7 月份)

图 6 为浮筒前近库区与进水塔内水温分布、水流流向、特征界面及各流区分布示意图,图中彩色云图表示温度分布,颜色由蓝色过渡至红色表示温度由低至高;黑色带箭头线条为流线,表示水流流动轨迹与方向。沿水深方向,定义流速 0.05 m/s 、温度等值面开始斜向上弯曲的流层为流动分界面,流动分界面以下区域为拟静水区,以上为动水区。在动水区内,定义流速 0.2 m/s 、温度等值面斜向上弯曲的流层为流速梯度分界面(流速梯度为相邻两点流速差与其距离的比值),流速梯度分界面以下为低流速梯度区,以上为高流速梯度区。拟静水区内水体水温较低,水流流线弯曲,甚至形成强度极弱的回流,流速较小(小于 0.05 m/s),此区域水体滞留于库区与进水塔内,不参与取水口表层取水;低流速梯度区水体水温较高,库区水流流线顺直,至浮筒前端进水塔内流线向斜上方弯曲、流速相对较小($0.05 \sim 0.2 \text{ m/s}$)、流速梯度亦相对较小,此区域水体被拖曳拉动但不参与取水口表层取水;高流速梯度区水体水温比较高、水流流线顺直、流速与流速梯度均相对较大,库区来流平顺,至进水塔平顺的通过浮筒取水

3.2 取水口区域水流流动特性

图 5 为平水年 7 月份浮筒前近库区与进水塔内沿程垂向流速分布,定义进水塔进口 $X = 0 \text{ m}$, X 值进水塔内为正,库区为负,过流断面顶部断面 $X = 4.75 \text{ m}$ 。由图 5 可知,取水口区域水流受浮力与取水牵引力作用,在取水口远区 $X = -30 \text{ m}$ 、 $X = -10 \text{ m}$,水流受浮力作用占优,垂向流速分布较为均匀;在取水口近区 $X = 3 \text{ m}$ 、 $X = 4 \text{ m}$ 、 $X = 4.75 \text{ m}$,水流受取水牵引力作用占优,垂向流速分布极不均匀,表层水体流速远大于底部水体,越接近取水口该特征越显著。浮筒取水口区域流速分布规律与文献[12]研究成果基本一致。

口进入下游,此区域水体全部参与取水口表层取水。

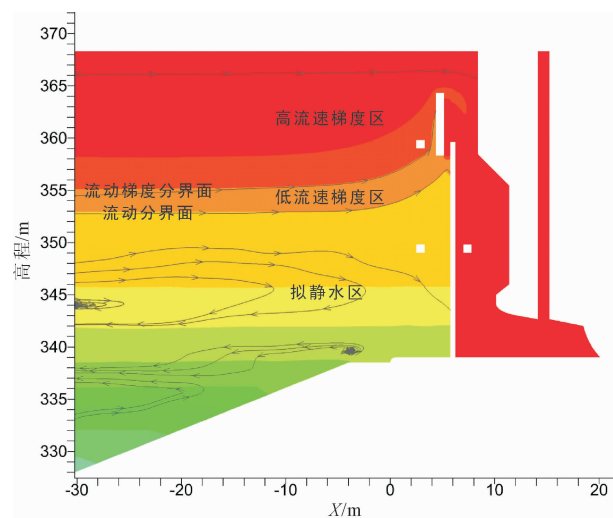


图 6 浮筒前近库区与进水塔内水温分布、水流流向、特征界面及各流区分布示意

各取水条件下库区内特征参数见表 1,其中,取水深度即为高流速梯度区深度。各典型年月份,在设计取水量 $15.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,取水口取水深度为 $11.8 \sim 16.9 \text{ m}$,约为取水口高度 (2.5 m) 的 $4.7 \sim$

6.8倍。

平水年 5、7 月份与丰水年 5、7 月份,库区水位均为 366.8 m,流动分界面以下深度 53 m 区域的温度变化为 8.1~13.7℃,垂向温分层较为显著,库区取水深度均为 11.8 m;平水年 3、4 月份与丰水年 3、4 月份,库区水位为 366.8~372.5 m,流动分界面以下深度 50~58 m 区域的温度变化仅为 0.1~3℃,垂向温分层不显著,取水深度为 12~16.9 m,则平、丰年 5、7 月份较平、丰水年 3、4 月份,流动分界面以下区域垂向温分层较显著,库区取水水深较小。因此,在各取水条件下流动分界面以下区域垂向温分层越显著,库区取水深度越小。

平水年 3 月份与丰水年 3 月份,库区水位分别为 369.4、370.6 m,库区垂向温度分布规律基本一致,库区取水深度分别为 16.9、16.6 m;同样,平水年 4 月份与丰水年 4 月份,库区水位分别为 368.4、372.5 m,库区垂向温度分布规律基本一致,库区取水水深分别为 13.4、12 m;则丰水年 3 月份较平水年 3 月份、丰水年 4 月份较平水年 4 月份,库区垂向

温度分布规律基本一致,库区水位较高,库区取水深度较小。因此,各取水条件下库区垂向温度分布规律基本一致,库区水位越高,库区取水深度越小。

平水年 5 与平水年 7 月份,库区水位均为 366.8 m,流动分界面以下深度 53 m 区域的温度变化分别为 8.3、13.6℃,垂向温分层均较为显著,其温度值分别为 10.7~19.0℃、11.9~25.5℃,库区取水深度均为 11.8 m;同样,丰水年 5 月份与丰水年 7 月份,库区水位均为 366.8 m,流动分界面以下深度 53 m 区域的温度变化分别为 8.1、13.7℃,垂向温分层均较为显著,其温度值分别为 10.7~18.8℃、11.9~25.6℃,库区取水深度均为 11.8 m;则平水年 5 月份较平水年 7 月份、丰水年 5 月份较丰水年 7 月份,库区水位相同,流动分界面以下区域垂向温分层均较为显著,其温度值较低,库区取水深度相同。因此各取水条件下库区水位相同,流动分界面以下区域垂向温分层特征一致,其温度值不同,则库区取水深度相同。

表 1 各取水条件下库区内特征参数

特征年月份	水位 /m	流动分界面高程/m	流动界面以下区域				流速梯度分界面高程/m	取水深度 /m
			高程/m	深度/m	温度区间 /℃	温差/℃		
平水年 3 月	369.4	350.0	300.0~350.0	50.0	10.7~10.8	0.1	352.5	16.9
平水年 4 月	368.4	353.5	300.0~353.5	53.5	10.7~12.7	2.0	355.0	13.4
平水年 5 月	366.8	353.0	300.0~353.0	53.0	10.7~19.0	8.3	355.0	11.8
平水年 7 月	366.8	353.0	300.0~353.0	53.0	11.9~25.5	13.6	355.0	11.8
丰水年 3 月	370.6	352.0	300.0~352.0	52.0	10.4~10.6	0.2	354.0	16.6
丰水年 4 月	372.5	358.0	300.0~358.0	58.0	10.4~13.4	3.0	360.5	12.0
丰水年 5 月	366.8	353.0	300.0~353.0	53.0	10.7~18.8	8.1	355.0	11.8
丰水年 7 月	366.8	353.0	300.0~353.0	53.0	11.9~25.6	13.7	355.0	11.8

3.3 取水口区域水温分布与出流水温

图 7 为平水年 7 月份库区与进水塔内水温分布图。由图 7 可知,库区内水温分布基本维持初始状态的垂向分层特性;进水塔内,浮筒前端沿水深方向,上部温度高、流速大的水体拖曳下部温度低、流速小的水体,流动分界面(平水年 7 月份,高程 353.0 m,温度 25.03℃)以上动水区域水体被向斜上方拖曳,依据水流流动特性可以看出仅有流动梯度分界面(平水年 7 月份,高程 355.0 m,温度 25.30℃)以上高流速区不同温度层水体(平水年 7 月份,水面高程 366.8 m、温度 27.1℃)经浮筒取水口汇入下游进水仓掺混并进行热交换,至短有压出口基本呈等

温水体(平水年 7 月份,出流水温 26.16℃)流出。

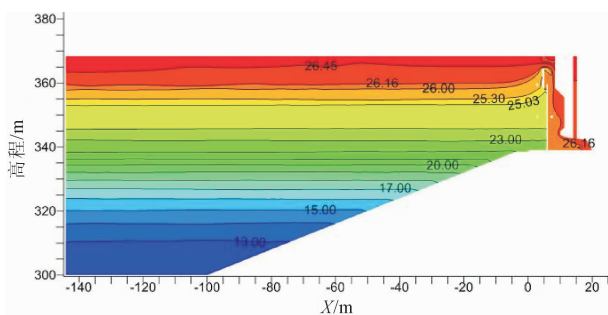


图 7 库区及进水塔内水温分布 (库区水位 366.8 m,平水年 7 月份)

表 2 为各取水条件下特征分界面高程与水温、出流水温,等温面为与出流水温相同的库区等温面。单层取水口主要取用水库底部低温水,出流温度较低。由表 2 可知,流动分界面与流速梯度分界面之间的低流速梯度区体积占比小、温差小;流速梯度分界面以上的高流速梯度区为分层取水区域,其深度为 11.8~16.9 m,温差为 1.49~3.94℃;与出流水温相同的库区等温面位于水面以下 5.7~7.5 m,等温面以上区域温差为 0.88~2.07℃;等温面基本位于取水区域中部,其高程低于浮筒取水口底部高程。

采用自浮式浮筒分层取水,出流水温 $T_{\text{分层}} > T_{\text{流速梯度分界面}} > T_{\text{流动分界面}} > T_{\text{单层}}$,浮筒分层取水出流水温 $T_{\text{分层}}$ 比未设置分层取水设施的单层出流水温 $T_{\text{单层}}$ 提高了 0.64~5.59℃,表明浮筒分层取水口在很大程度上起到了取用表层高温水的显著作用。

图 8 为平水年与丰水年灌溉期各月浮筒分层取水出流水温与单层取水出流水温的对比图。由图 8 可知,各取水条件下,流动分界面以下区域垂向温分层特征越显著,浮筒分层取水出流水温温升越大。

表 2 特征分界面高程与水温及出流水温

特征年月份	水位 /m	$T_{\text{单层}} / ^\circ\text{C}$	流动分界面		流速梯度分界面		$T_{\text{表面}} / ^\circ\text{C}$	等温面高程 /m	$T_{\text{分层}} / ^\circ\text{C}$	$(T_{\text{分层}} - T_{\text{单层}}) / ^\circ\text{C}$
			高程 /m	$T_{\text{流动分界面}} / ^\circ\text{C}$	高程 /m	$T_{\text{流速梯度分界面}} / ^\circ\text{C}$				
平水年 3 月	369.4	10.7	350.0	10.80	352.5	10.81	12.3	363.5	11.34	0.64
平水年 4 月	368.4	11.0	353.5	12.03	355.0	12.26	16.2	362.5	14.13	3.13
平水年 5 月	366.8	14.1	353.0	18.46	355.0	18.76	20.7	359.8	19.69	5.59
平水年 7 月	366.8	22.0	353.0	25.03	355.0	25.30	27.1	359.3	26.16	4.16
丰水年 3 月	370.6	10.5	352.0	10.59	354.0	10.60	12.2	364.9	11.22	0.72
丰水年 4 月	372.5	10.9	358.0	12.68	360.5	13.05	16.5	366.6	14.57	3.67
丰水年 5 月	366.8	14.5	353.0	18.06	355.0	18.40	20.7	360.0	19.55	5.05
丰水年 7 月	366.8	23.7	353.0	25.06	355.0	25.30	27.1	359.5	26.22	2.52

注: $T_{\text{单层}}$ 为未设置分层取水设施的单层出流水温; $T_{\text{分层}}$ 为浮筒分层取水出流水温; $T_{\text{流动分界面}}$ 为流动分界面水温记号; $T_{\text{流速梯度分界面}}$ 为流速梯度分界面水温; $T_{\text{表面}}$ 为水面温度。

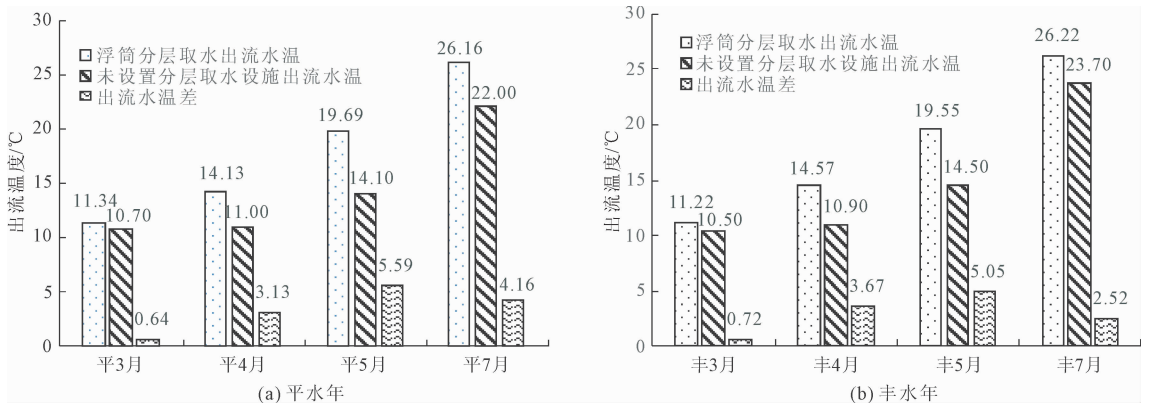


图 8 灌溉期各月浮筒分层取水出流水温与单层取水出流水温对比

4 结 论

(1) 自浮式浮筒分层取水口远区浮力作用占优,垂向流速分布均匀;取水口近区取水牵引力作用占优,垂向流速分布不均匀,表层水体流速远大于底部水体,越接近取水口该特征越显著。

(2) 依据水流流线、流速与温度分布等界定了流动分界面与流速梯度分界面,分界面将库区沿水深方向由下至上分为拟静水区、低流速梯度区及高

流速梯度区,分析了各区流动特征,指出了仅有高流速梯度区水体参与取水口表层取水。

(3) 各库区水位下,库区取水深度约为取水口高度(2.5 m)的 4.7~6.8 倍。流动分界面以下区域垂向温分层越明显,库区取水深度越小;库区垂向温度分布规律基本一致,库区水位越高,库区取水深度越小;库区水位相同,流动分界面以下区域垂向温分层特征一致而温度值不同,则库区取水深度基本相同。

(4) 自浮式浮筒分层取水出流水温 $T_{\text{分层}}$ 比未设置分层取水设施的单层出流水温 $T_{\text{单层}}$ 提高 0.64 ~ 5.59℃, 表明浮筒分层取水口在很大程度上起到了取用表层高温水的显著作用。流动分界面以下区域垂向温分层特征越显著, 浮筒分层取水出流水温温升越大。

参考文献:

- [1] 黄永坚. 水库分层取水[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [2] 叶舟, 龚梦园. 基于下游生境水温需求的水库分层取水调度研究[J]. 人民长江, 2022, 53(6): 105-110.
- [3] 高学平, 董绍尧, 宋慧芳, 等. 水电站进水口分层取水水力特性模型试验研究[C]//国际水利工程与研究协会中国分会, 中国水利学会水力学专业委员会, 第三届全国水力学与水利信息学大会论文集, 2007: 308-314.
- [4] 林泉, 梁瑞峰, 刘清园, 等. 向家坝灌区水温改善措施效果研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 715-724.
- [5] 严忠鑫, 卢晶莹, 王小明, 等. 叠梁门分层取水对下泄水温影响的分析方法研究[J]. 水力发电, 2023, 49(1): 7-9, 57.
- [6] 范志国, 郑向晖, 刘国军, 等. 新型分层取水结构的研究与应用[J]. 水利水电技术, 2017, 48(10): 103-108, 128.
- [7] 郑铁刚, 孙双科, 柳海涛, 等. 大型分层型水库下泄水

温对取水高程敏感性分析研究[J]. 水利学报, 2015, 46(6): 714-722, 731.

- [8] 郑铁刚, 孙双科, 柳海涛, 等. 叠梁门分层取水水温-水动力动态过程模拟及分析[J]. 水利学报, 2020, 51(3): 305-314.
- [9] 郑铁刚, 刘志国, 孙双科, 等. 叠梁门分层取水水力特性试验研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10): 122-126.
- [10] 王岑, 柳海涛, 王继保, 等. 分层取水结构型式对取水水温影响的试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(2): 262-268.
- [11] 张文远, 杨帆, 章晋雄, 等. 大石峡水电站进水口叠梁门分层取水试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(6): 516-522.
- [12] 尹辉, 蔡宝柱, 郑铁刚. 典型工程叠梁门分层取水方案优化分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(4): 369-376.
- [13] 柳海涛, 李广宁, 孙双科, 等. 进水口叠梁门顶水平帷幕取水温升影响的研究[C]//2023 中国水利学术大会论文集(第四分册). 郑州, 2023: 391-400.
- [14] 高学平, 张少雄, 刘际军, 等. 浮式管型取水口下泄水温试验研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 163-167.
- [15] 高学平, 刘俊, 孙博闻, 等. 水库水温分层对浮式取水口前流速分布的影响[J]. 水利水电技术, 2017, 48(9): 132-137, 142.

(上接第 73 页)

- [14] Hu Xiongyu, He Chuan, Walton G, et al. Laboratory model test of EPB shield tunneling in a cobble-rich soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(10): 04020112.
- [15] Hu Xiongyu, He Chuan, Fang Yong, et al. Laboratory experiments and discrete element modeling on the surface failure induced by EPB tunneling; the effects of cutterhead open ratio and relative tunneling depth[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106731.
- [16] Zhang Pei, Jin Liu, Du Xiuli, et al. Computational homogenization for mechanical properties of sand cobble stratum based on fractal theory[J]. Engineering Geology, 2018, 232: 82-93.
- [17] Lindquist E S. The strength and deformation properties of m \acute{e} lange [D]. Berkley: University of California,

1994.

- [18] Medley E W. The engineering characterization of m \acute{e} langes and similar block-in-matrix rocks (Bimrocks) [D]. Berkley: University of California, 1994.
- [19] Peck R B. Deep excavation and tunneling in soft ground [C]//Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State of the Art Volume, Mexico. 1969: 225-290.
- [20] Mair R J, Taylor R N, Bracegirdle A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays [J]. Geotechnique, 1993, 43(2): 315-320.
- [21] Lin Qingtao, Song Tao, Lu Dechun, et al. A novel analytical method for describing ground motion behaviour caused by tunnel excavation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 161: 106546.