



# 垂直入汇流量控制及航道水流条件综合研究 \*

张 波

(安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院, 水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 233000)

**摘要:** 针对垂直入汇干支流交汇区的平面布置难题, 采用正态物理模型对支流的流量控制及交汇区航道水流条件进行模拟研究。试验遵循分流、导流、扩散的思路对支流的入汇路径进行优化, 推荐方案试验结果表明: 干流无流量时, 枢纽能将支流来流按设计分流比分向干流上下游; 干流有来流时, 枢纽自动将支流来流调整至通过下游引渠汇入干流; 各工况下交汇区航道水流条件均满足规范要求。通过增设隔板、流线型分流岛、导流板等综合优化措施能实现流量控制、改善垂直入汇交汇区的航道水流条件的目标。

**关键词:** 垂直入汇; 交汇区; 流量控制; 航道水流条件

中图分类号: TV147; U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0110-06

## Vertical inflow discharge control and the flow conditions for navigation

ZHANG Bo

(Anhui & Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Key laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Bengbu 233000, China)

**Abstract:** Regarding the difficult problem of plane layout in the confluence area of vertical branches and tributaries, the normal physical model is used to simulate the flow control and flow conditions for navigation in the confluence area. The inflow path of the tributary is optimized following the idea of split-flow, diversion and diffusion. The results of the recommended scheme show that when the recommended stream has no flow in main stream, the hydraulic complex can divert the tributaries according to the designed split ratio. When the main stream has incoming flow, the hydraulic complex automatically adjusts the incoming flow of tributaries cross downstream channel to join the main stream. The flow conditions for navigation in the confluence area meet the standard requirements under each working condition. The comprehensive optimization measures such as adding partition board, streamlined diversion island, diversion plate and so on can achieve the goal of flow control and improve the flow conditions for navigation in the vertical inflow confluence area.

**Keywords:** vertical inflow; confluence area; flow control; flow conditions for navigation

引江济淮二期工程(水利部分)分为输水干线、骨干供水、输水影响处理等三大版块, 其中骨干供水包括合肥水源工程、庐江水源工程以及大官塘五水厂工程等。小庙提水泵站是合肥水源工程的重要组成部分。其功能一是承担引江济淮向合

肥市董铺水库、大房郢水库、众兴水库和淠河总干渠供水区范围的补水任务, 消纳引江济淮合肥市城市供水主要增供水量; 二是提升潜南干渠灌区抗旱能力, 补充灌区水量和退还灌区被挤占的河道生态用水。

收稿日期: 2023-08-23

\*基金项目: 安徽省自然科学基金项目(2208085US04、2308085US10); 2024年度安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院科技攻关项目(KJGG202301)

作者简介: 张波(1981—), 男, 硕士, 工程师, 从事水力学及河流动力学的研究。

小庙提水泵站位于引江济淮工程江淮沟通段的淠河总干渠渡槽北侧渠道岸坡上, 从引江济淮干渠抽水进入淠河干渠。泵站设计流量  $60.00 \text{ m}^3/\text{s}$ , 其中向下游合肥城市供水流量  $33.00 \text{ m}^3/\text{s}$ 、向上游潜南干渠灌溉供水流量  $27.00 \text{ m}^3/\text{s}$ 。泵站出口设 2 个闸孔, 断面为  $4.00 \text{ m} \times 4.00 \text{ m}$ , 泵站出口与淠河干渠呈  $90.00^\circ$  正交, 淞河干渠现状为 VI 级运河航道, 工程位置处堤防间距约  $65.00 \text{ m}$ , 航道宽为  $30.00 \text{ m}$ 。小庙提水泵站出口设计方案布置见图 1。

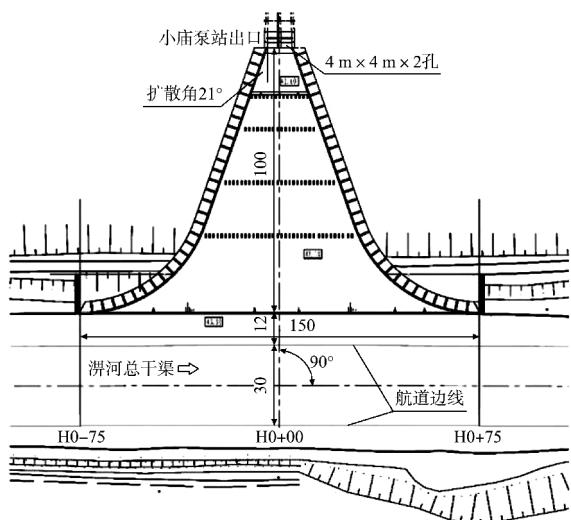


图 1 泵站出口原设计方案布置 (单位: m)

项目所在河段为干支流交汇河段, 在河流交汇区的研究中, 一般把汇流区分为 Y 形汇流及垂直汇流, 国内学者当前主要聚焦于水流结构、水力特性、汇流区航道水流条件等方向, 鲜有既研究干支流交汇区航道水流条件, 又兼顾控制支流向干流上下游分流流量的研究。

支流入汇河段几何形态三维性特别强, 汇流区的水流为典型的三维水流, 存在停滞区、流速偏向区、分离区、流速加速区、混合层区(剪切层)等水流分区<sup>[1]</sup>。三维水流宜采用正态物理模型, 或数学模型进行研究。

付中敏等<sup>[2]</sup>通过水槽概化模型试验研究干支流汇合口水力特性, 认为入汇角和汇流比是影响汇合口区域表面流速及水面比降的主要因素; 兰波等<sup>[3]</sup>认为对同一交汇河段, 汇流比是影响交汇

段水面形态的主要因素, 交汇角对交汇河口的水流形态起控制作用; 刘同宦等<sup>[4]</sup>通过水槽试验对  $90^\circ$  支流入汇区域时均流速分布特征进行试验研究, 认为汇流比增大, 支流顶托干流的程度随之增大, 引起支流水面坡降增大、干流水面减小, 支流入汇区域不同位置垂线时均流速分布主要受主支汇流比和水流流态的双重影响, 随着汇流比的增大, 入汇口上游断面时均流速逐渐减小, 而入汇口下游断面产生了明显的高、低流速带, 形成回流分离区。王晓刚等<sup>[5]</sup>通过三维数值模拟分析汇流比对 Y 形汇流口处螺旋流结构的影响, 认为当干支流流量相差悬殊时, 流量占绝对优势一侧的水流会在汇流口处形成大螺旋流, 另一侧螺旋流将受到压迫, 在汇流口处表现为单一的大螺旋流结构; 当干支流流量相当时, 汇流口处水流表现为表面汇聚的双螺旋流结构。王冰洁等<sup>[6]</sup>通过数值模拟方法对入汇角为  $90^\circ$  的河流交汇处产生的分离区水流特征进行研究, 提出可以减小或消除分离区的优化堤线整流方案。侯志强等<sup>[7]</sup>在研究牡丹江入汇松花江时, 指出干流河口段的水位将不是来水与河床形态的单一函数, 而是受支流流量及汇流比的影响。张文江等<sup>[8]</sup>选取川江控制流域规模较大的岷江、沱江、嘉陵江和乌江等支流与长江汇合部位为研究对象, 对干支流汇合口的航道特征、航道现状、碍航特性进行分析和研究, 并根据分析成果提出初步治理思路。

本文基于正态物理模型, 在小庙提水泵站出口平面布置研究的基础上分析垂直入汇支流对汇流区航道水流条件的影响; 研究控制支流在干流无流量时向干流上下游分流的措施; 支流在干流有流量和无流量时入汇通道的自动调整问题。提出小庙提水泵站出口的整体布置推荐方案, 旨在为类似项目的设计及研究提供参考。

## 1 模型设计及试验工况

按重力相似准则设计模型, 采用比尺为 1:50 的正态物理模型。为预留充足的过渡段以保证汇

流区的流态相似, 上下游各模拟 550.00 m。流量控制采用 45° 三角堰, 水位采用 SCM60 型水位测

针, 其测量精度为 0.10 mm, 流速测量采用三维流速仪小威龙 Vectrino。主要不利试验工况见表 1。

表 1 合肥水源工程小庙提水泵站出口主要不利运行工况

工况	淠河总干渠水位/m	泵站出口流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	淠河总干渠来流流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	备注
1	46.24	60.00	0.00	最低通航(运行)水位+淠河总干渠不引水。支流向干渠上游分流 27.00 m <sup>3</sup> /s, 向干渠下游分流 33.00 m <sup>3</sup> /s
2	46.24	60.00	66.00	最低通航(运行)水位+淠河总干渠加大引水流量
3	47.49	60.00	66.00	最高运行水位+淠河总干渠加大引水流量

## 2 原设计方案试验成果

原设计方案各工况下泵站出水口两孔出流基本均匀, 水流出消力池后偏向左侧(干流下游侧)并在右侧(干流上游侧)形成回流区, 回流进一步压缩了主流的过流断面。泵站出水口区域除左侧宽约 25.00 m 为主流区外, 其余均为回流区。

工况 1 水流在 H0+00—H0+50 间入汇至淠河干渠, 后顶冲至淠河干渠右侧再分向上下游; 干渠河道上下游主流均位于右侧, 并在左侧形成回流区或静水区。H0+00—H0+50 断面间水流方向与航道中心线基本垂直, H0+25 断面除右侧航道边线横向流速为 0.21 m/s 外, 其余各测点横向流速均大于 0.30 m/s, 最大值达 0.67 m/s。

工况 2 泵站出水口通航区域内 H0+50 及 H0+75 断面左侧航道边线横向流速分别为 0.43、0.32 m/s, 超过 0.30 m/s, 其余断面横向流速均不超过 0.30 m/s。

工况 3 泵站出水口通航区域内 H0+50 断面左侧航道边线横向流速为 0.33 m/s, 超过 0.30 m/s, 其余断面横向流速均不超过 0.30 m/s。

设计方案最低通航水位时泵站出口处水流弗劳德数约为 0.31, 水流的单位势能较大, 水流进入消力池后, 水深增大, 两侧边界也随翼墙的扩散而增大, 流速值降低, 弗劳德数进一步减小。受淠河干渠水体顶托, 水流不能有效扩散, 主流沿左侧翼墙汇入淠河干渠, 后顶冲至干渠右侧再分向上下游, 在过渡段右侧形成回流区。水流集中垂直汇入淠河干渠导致汇流区航道水流条件不满足规范要求。各工况试验流态见图 2。



a) 工况1



b) 工况2



c) 工况3

图 2 原方案各工况试验流态

## 3 垂直入汇及支流流量控制对枢纽布置的要求

支流入汇至有通航要求的干流时, 汇流区的航道水流条件须满足规范要求, 一般从调整流速方向及减小流速值两方面来对汇流区的平面布置进行调整。干支流垂直时, 支流水流转向角度最大,

不利于水流入汇至干流后与航道中心线的夹角控制; 受汇流区复杂流态的影响, 垂直入汇更易造成水流集中入汇; 从而在流速方向和流速值上均不利于汇流区的航道水流条件。

为实现平顺汇流及流量控制目标, 原设计方案采用先汇流再分流, 使支流集中入汇至干流后水流自动调节至上下游, 导致入汇时水流方向与航道中心线基本垂直, 无法实现航道水流条件满足规范要求的目标。唯有先分流再汇流才能为实现泵站出口平面布置功能创造条件。

根据动量守恒定理, 当垂直支流的水流质点遭遇出口处的大体积水体时, 流速迅速减小, 直至产生停滞点, 继续流来的水流质点绕过停滞点, 改变原有流向, 从而在另一侧形成漩涡, 导致支流水流集中, 偏向一侧, 最终造成支流的集中入汇。为顺利实现分流, 需在停滞点前将水流分开, 分别导引至上下游引渠, 通过上下游引渠控制入汇至干流的角度。

当高水位时, 如需实现支流来流自动调整至通过下游引渠汇入干流, 可控制分流隔板的高度, 使干流上流的水流通过隔板以上的空间汇流至下游引渠。

## 4 修改方案研究

### 4.1 支流流量控制

由设计方案试验成果可知, 工况1时, 支流若集中汇入淠河干渠再进行分流, 将导致汇流区横向流速超过规范要求, 因此须在入汇前完成分流流量控制。针对泵站出口处水流弗劳德数较低, 而出口区域水体面积较大的特点, 进行两个方案的试验比较: 方案1在消力池后设置分流岛; 方案2在消力池内设隔板, 在消力池下游顺接分流岛。

试验发现方案1仅在消力池后设分流岛, 水流仍基本从左侧引渠汇入干流, 无法向上游分流。方案2水流从闸孔流出便分为两支, 可有效减轻

出口区域大面积水体对水流的顶托, 顺利实现分流目的。

经多次试验比较, 分流措施最终方案为消力池内隔板起点为闸出口中墩, 终点为尾坎中点偏右侧1.0 m, 在消力池尾坎断面, 干渠上下游两侧引渠宽分别为7.96、8.93 m, 比值为47.13%: 52.87%, 与最低通航水位干流无来流时分向上下游的设计分流比(27:33)接近。在消力池尾坎处设分流岛与隔板顺接。

为使干流有流量时支流能自动调节, 通过下游引渠汇入干流, 隔板高度选为2.50 m, 最低通航水位时隔板高为水深的53.88%。既保证干流无流量时隔板能将支流分开, 将两孔出流分别导向上下游, 也保证了在干流有流量时, 上游引渠在干流的顶托下, 使通过上游引渠的水流能自动从隔板以上流向下游引渠, 实现支流水流在干流有流量和无流量变化时自动调整入汇通道的目标。

### 4.2 水流流速分布控制

泵站出口水流受大面积水体顶托, 加之弗劳德数较低, 极易产生偏流现象。试验发现水流出消力池后紧贴分流岛, 不能在引渠内有效扩散。试验主要采取3个措施进行优化: 1) 缩小消力池翼墙扩散角至12°; 2) 在消力池末端设置消力墩; 3) 在上下游引渠进口附近各设置一块长为5.0 m的导流板。

缩小翼墙扩散角减小了水体对水流的顶托作用; 在消力池出口设置消力墩具有整流作用, 使水流更易沿引渠横断面均匀分布; 引渠进口的导流板将出消力池的水流均匀分布至整个引渠断面, 降低了水流的最大流速, 为改善汇流区航道水流条件提供基础。

### 4.3 水流流向控制

垂直支流汇入干流, 水流转向角度达90°, 转向段水流产生弯曲, 纵向和横向水流结合形成螺旋流, 其中横向流速与水深及垂线平均流速成正

比, 与水流弯曲半径成反比。为减小水流汇入干渠时与航道中心线的夹角, 需在有限的距离内增大转向段水流方向的改变速率, 因曲线形分流岛改变水流方向的作用大于直线形分流岛, 最终采用流线型分流岛, 具体布置见图 3, 分流岛对水流方向改变的效果显著。

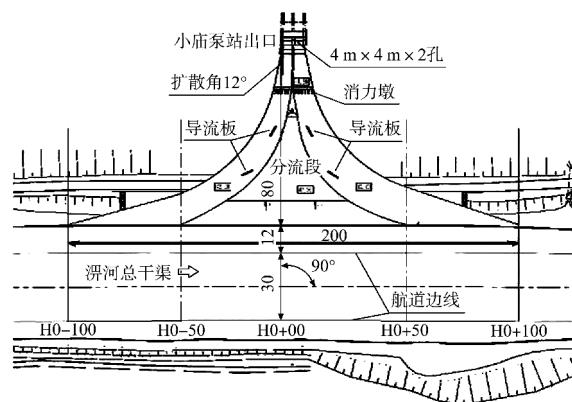


图 3 枢纽推荐方案布置 (单位: m)

为进一步减小支流汇入干渠的角度、使水流沿引渠断面均匀分布, 试验在上下游引渠出口处也各设置了导流板。推荐方案最低通航水位水流进入转向段后, 在分流岛及导流板的综合作用下, 支流水流沿上下游引渠平顺汇入淠河干渠。在干流有流量时, 上游引渠内的导流板对阻止干流通过上游引渠进入下游引渠的作用亦明显。

#### 4.4 其他优化措施

在上述研究的基础上, 结合实际情况及各方要求, 试验还采取了其他措施: 1) 增大转向段干渠侧的宽度, 推荐方案出口区域淠河干渠侧的宽度由 150.00 m 增大至 200.00 m; 2) 支流转向段的直线长度由 100.00 m 缩短至 80.00 m。

#### 5 推荐方案试验成果

推荐布置方案遵循分流、导流、扩散的思路

采取修改措施, 使支流在各工况下均平顺汇入干流, 推荐方案各工况试验流态见图 4。工况 1 水流按设计分流比分流至干渠上下游, 汇流区的最大横向流速为 0.27 m/s, 汇流区流速分布见 5; 工况 2 支流自动调整至通过下游引渠入汇至淠河干渠, 汇流区的最大横向流速为 0.16 m/s; 工况 3 汇流区的最大横向流速为 0.17 m/s, 各工况回流流速均小于 0.40 m/s, 航道水流条件满足规范要求。



a) 工况1



b) 工况2



c) 工况3

图 4 推荐方案各工况试验流态

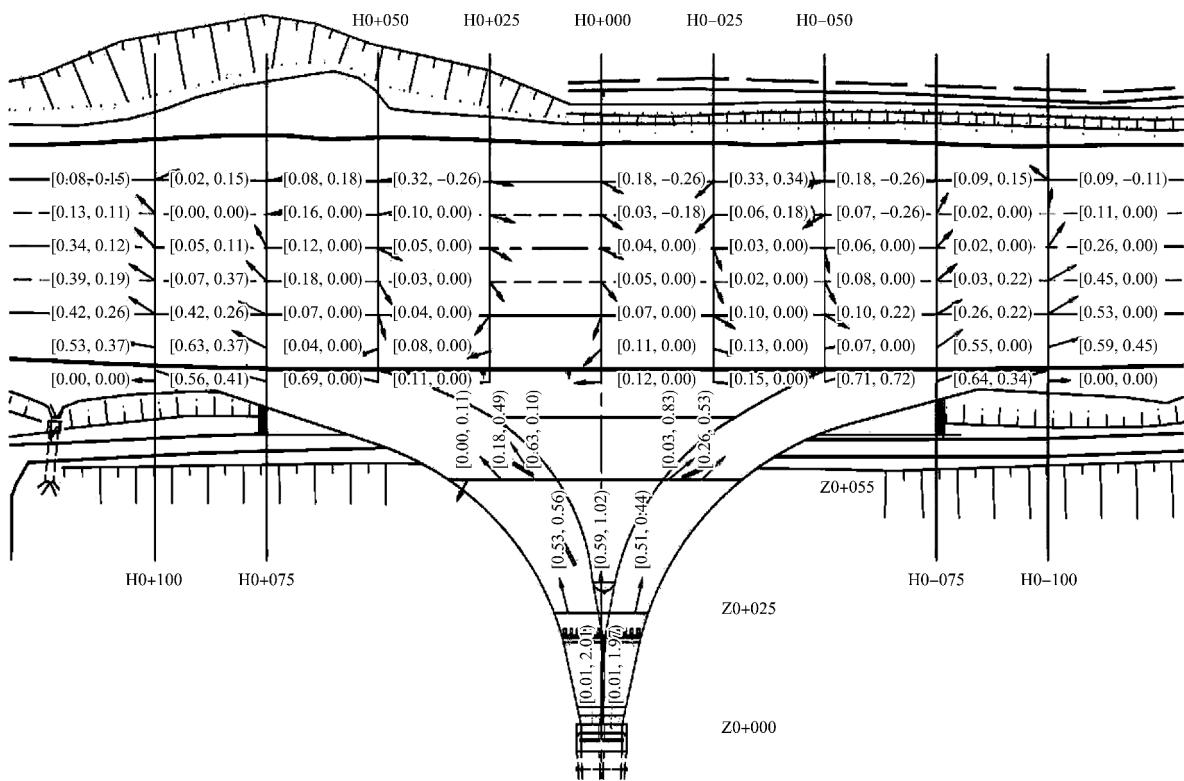


图5 推荐方案工况1汇流区流速分布(单位: m/s)

## 6 结论

1) 采用正态物理模型对小庙泵站出口布置进行研究,发现原设计方案在工况1时支流集中垂直汇入淠河干渠,汇流区最大横向流速达0.67 m/s,航道水流条件不满足规范要求。

2) 推荐方案遵循分流、导流、扩散的思路进行枢纽布置,工况1时水流按设计分流比分流至淠河干渠上下游,上下游引渠内水流分布均匀,汇入干渠后,汇流区的最大横向流速为0.27 m/s;工况2支流自动调整,通过下游引渠入汇至淠河干渠,汇流区的最大横向流速为0.16 m/s,工况3汇流区的最大横向流速为0.17 m/s,各工况回流流速均小于0.40 m/s,航道水流条件满足规范要求。

3) 采用的流量控制措施既满足工况1对支流分流比的准确控制,又保证了支流在干流有来流时顺利自动调整,通过下游引渠汇入干渠,可为类似有流量控制要求的工程提供参考。

4) 在有通航要求的河段,为实现垂直支流的平顺汇流及流量控制目标,建议根据实际情况,优先考虑先分流再汇流。

5) 支流分向干流上下游的流量差别不大,且

泵站出口正好为两孔,可将两孔出流分别导向上下游,对于多孔出流或分流比有较大差别的还需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 王晓刚. 汇流口水流水力特性研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2007(10): 82-86.
- [2] 付中敏, 谷祖鹏, 郑惊涛, 等. 干支流汇合口水力特性的试验性研究[J]. 水运工程, 2013(4): 46-51.
- [3] 兰波, 汪勇. 干支流交汇水面形态特征分析[J]. 重庆交通大学学报, 1997, 16(4): 109-114.
- [4] 刘同宣, 郭炜, 詹磊. 90°支流入汇区域时均流速分布特征试验研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 485-489.
- [5] 王晓刚, 严忠民, 王明才. 汇流比对“Y型”汇流口处螺旋流结构的影响[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34(4): 79-83.
- [6] 王冰洁, 周苏芬, 王海周, 等. 明渠干支河流直角交汇区整流方法探讨[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(S1): 7-12.
- [7] 侯志强, 王义安, 陈一梅. 支流入汇对干流航道影响分析[J]. 现代交通技术, 2006, 3(4): 70-73.
- [8] 张文江, 田咏梅, 曾涛, 等. 川江干支流汇合口航道特征及治理思路[J]. 水运工程, 2016(1): 130-133.

(本文编辑 赵娟)