

柬埔寨桑河二级水电站导截流关键技术研究

张金海¹, 周双全²

(1. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214; 2. 桑河二级水电有限公司, 柬埔寨 上丁。)

摘要: 桑河二级水电站是柬埔寨及“一带一路”沿线国家最大的水电工程, 大坝全长6500m, 为亚洲第一长坝。电站坝址处河道平缓开阔, 为典型平原型河流, 适合明渠导流, 但平原枢纽导流明渠既宽且长, 渠内流态复杂, 抗冲防护困难, 同时工程堰顶与明渠底板高差大, 截流块石料获取难, 明渠截流难度极大, 针对上述难题, 综合采用数值模拟计算和水力学模型试验等手段, 研究提出导流明渠新型组合结构改善流态, 降低进口流速30%以上, 提出壅拦坎新型截流工型式, 减少龙口平均流速16%, 改善了龙口水流条件。取得的成果有效支撑了工程建设。

关键词: 桑河二级水电站; 导截流; 流态; 预控式截流技术

中图分类号: **文献标识码:** A

Key Technologies of Diversion and Closure of Lower Sesan 2 Hydropower Station in Cambodia

ZHANG Jinhai

(Huaneng Lancang River Hydropower Co Ltd, Kunming 650214 China)

Abstract: As the largest hydropower project of Cambodia, Lower Sesan 2 Hydropower Station is the largest along the Belt and Road countries, which is also the longest dam in Asia with a total length of 6500m. The dam site of the power station is a typical plain river, suitable for open channel diversion. However, the open diversion channel of station in the plain area is wide and long with complex flow pattern, so that the anti-scour protection is complicated. At the same time, the height difference between the top of the weir and the floor of the open channel is large, so it is difficult to obtain the block stone, and the closure of the open channel is very difficult. Due to such problems, numerical simulation calculations and hydraulic model tests have been carried out. A new combined structure of diversion channel has been proposed to improve the flow pattern, which finally reduce the inlet velocity by more than 30%. A new type of interceptor has been put forward, which also reduce the average velocity by 16% and improve the flow condition of dike. The achievements have provided strong support for the construction of the project.

Key words: Lower Sesan 2 Hydropower Station; Diversion and closure; Flow pattern; Pre controlled closure technology

1 引言

随着柬埔寨经济社会快速发展，电力能源需求快速增长，柬埔寨政府将电力发展列为经济战略的优先发展行业。桑河二级水电站位于柬埔寨王国上丁省境内的桑河干流上，是柬埔寨也是目前“一带一路”沿线国家最大的水电工程，被誉为柬埔寨的“三峡工程”，电站坝址处河谷宽阔，大坝全长 6500m，为亚洲第一长坝^[1]，电站水库总库容 27.15 亿 m³，电站安装 8 台 50MW 灯泡贯流式机组，最大水头等指标处于同类水电机组世界前列。在桑河二级工程建设过程中，中国水电企业全过程推行应用中国水电技术标准，以中国资本“走出去”带动“中国技术+中国设备+中国管理”的全链条“走出去”，提升了“中国制造”在国际上的影响力。

工程地势平缓、河道宽阔，适合明渠导流^{[2],[3]}，明渠导流设计流量为 14200m³/s，截流设计流量 1200m³/s，龙口最大流速 9m/s、最大落差 8m，综合技术难度居国内外前列。导流明渠既宽且长，渠内流态复杂、流速较高，明渠冲刷防护困难；明渠截流具有龙口流速高、落差大、单宽功率高特点，同时，海外工程截流机械设备缺乏、成本过高，平原地区截流块石料获取困难，明渠截流极其困难^[4]；因此研究提出合适的导流方案和合理科学的截流技术意义重大。

2 平原枢纽导流明渠水流流态控制技术研究

桑河二级工程位于平缓开阔河谷段，流域洪水主要由暴雨形成，雨季的降雨量占全年降雨量的 85%，20 年一遇洪水流量 14200m³/s，具有降雨时段集中，洪水来势迅猛，洪水流量大、持续时间长的特点，工程正常蓄水位 75m 时河面宽度约为 7km，岩体节理裂隙发育，导流明渠既宽且长，渠内流态复杂、流速较高，明渠冲刷防护困难，导流明渠的流态控制至关重要。

2.1 导流明渠进口水流控制措施

根据水力学模型试验，当采用常规的导墙方案布置时，受导墙缓坡地形影响，在 14200m³/s 的大流量时，导墙进口位置最大流速达 9.48m/s，进口导墙基础和明渠底部的冲刷严重，流态如图 1。



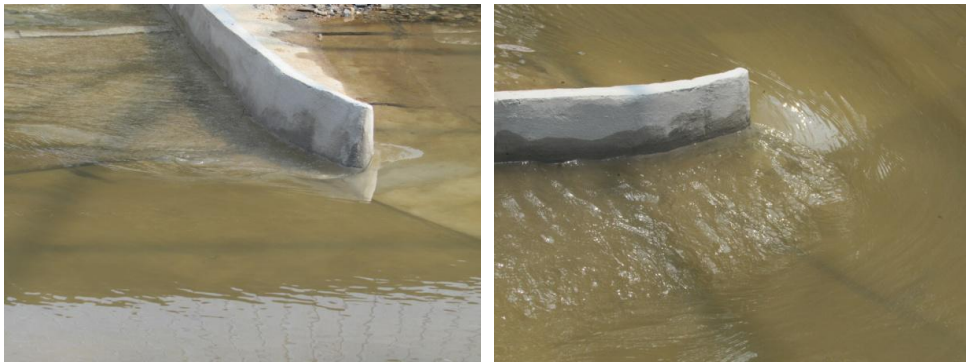
图 1 常规导流明渠左侧导墙流态图

通过试验研究，提出阶梯式进口，同时对首部做圆角处理并接斜坡过渡段，在离心力和绕流的作用下，流速在流量为 $5180\text{m}^3/\text{s}$ 时达到最大值 6.07m/s ，流量大于 $7500\text{m}^3/\text{s}$ 后，护坡顶部开始溢流，两股水流相互作用，护坡首部附近区域流速逐渐减小，新型结构型式降低进口流速达 30% 以上。同时达到了不同流量下水流汇入明渠主槽的时间和空间上的差时错位效果，实现了对不同流量下的明渠进口水流均具备汇流优化效果，流态明显改善，如图 2 和图 3 所示。



(1) 流量 $5180\text{m}^3/\text{s}$ 条件下阶梯式进口流态图 (2) 流量 $12100\text{m}^3/\text{s}$ 条件下阶梯式进口流态图

图 2 阶梯式进口流态图



(1) 流量 $5180\text{m}^3/\text{s}$ 明渠导墙首部流态图

(2) 流量 $9870\text{m}^3/\text{s}$ 明渠导墙首部流态图

图 3 斜坡段引流段坡度为 45° 时导墙首部流态图

2.2 导流明渠中部水流控制措施

在导流明渠中上部，为避免底流对右侧导墙基础的冲刷，并结合后期明渠截流要求，提出壅拦坎结构形式。



(1) 流量 $4100\text{m}^3/\text{s}$ 明渠壅拦坎流态图

(2) 流量 $9870\text{m}^3/\text{s}$ 明渠壅拦坎流态图

图 4 明渠中部壅拦坎流态图

根据水力学模型试验，通过流态图（图 4）可以看出：小流量时，壅拦坎局部阻断水流，逼迫水流偏向明渠左侧，大流量时，壅拦坎被淹没，对水流的影响有一定的减小，但仍能形成小规模壅水，迫使水流偏向明渠主床，能够减少右侧导墙段的明渠水流底部流速。

2.3 导流明渠尾部水流控制措施

为减少明渠水流对凹岸出口段岸坡的直接冲刷，提出在导流明渠左侧凹岸末端布置双叶脉式潜坝方案，布置图如图 5 所示。

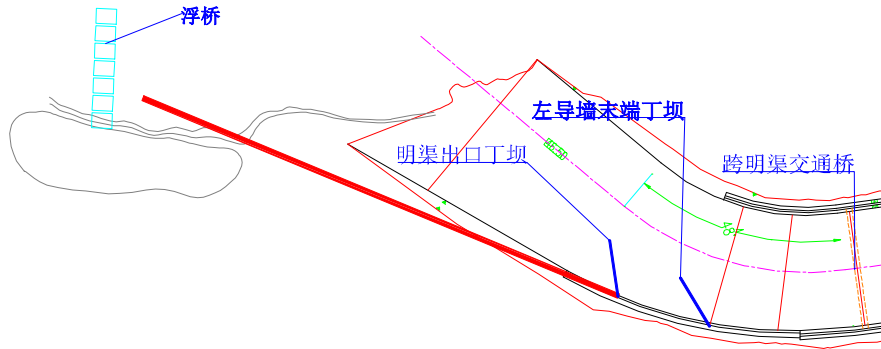


图 5 双潜坝布置示意图

根据水力学模型试验结果：在小流量时，上潜坝对水流的影响较大，阻断水流逼迫水流偏向右侧，潜坝附近流速范围为 $0.27\text{m/s}\sim 1.52\text{m/s}$ ，对沿程流速的削减幅度可达 $60\%\sim 70\%$ ；在大流量时，潜坝较大程度的改变了水流原始方向，使下游水流偏离左岸，同时水流越过潜坝下泄，在潜坝上游形成壅水，潜坝附近流速范围为 $2.36\text{m/s}\sim 5.55\text{m/s}$ ；随着流量的进一步增大，上下游水位进一步抬升，上游壅水效果逐渐减小，潜坝对水流方向的影响有所降低，潜坝附近流速范围为 $3.07\text{m/s}\sim 5.75\text{m/s}$ ，对沿程流速的削减幅度可达 $20\%\sim 30\%$ 。



(1) 流量 $5180\text{m}^3/\text{s}$ 上潜坝区域流态图

(2) 流量 $14200\text{m}^3/\text{s}$ 上潜坝区域流态图



(3) 流量 5180m³/s 下潜坝区域流态图

(4) 流量 14200m³/s 下潜坝区域流态图

图 6 潜坝区域流态图

上、下双潜坝的布置，对河道水流的约束作用明显，将原本偏向左岸的水流导向河道中部，同时使得水流得以大面积扩散，这就大大减小了水流对明渠出口左岸及下游浮桥基础的冲刷破坏，为整个导流过程的顺利进行提供了有利条件。

3. 高落差预控式截流技术研究

为优化永久运行期泄洪条件，简化导流程序，缩短工程工期，桑河二级工程选导流明渠截流时利用泄洪闸段 10 孔等高溢流堰作为分流建筑物，溢流堰堰顶与导流明渠进口底板自然落差达 8m，截流龙口最大流速达 9m/s 以上，明渠内截流难度极大。而且，海外工程截流备料困难、施工组织困难，平堵截流、双戽堤截流、普通宽戽堤均不适用于桑河二级工程大流速、高落差、高单宽功率并存的明渠截流，需要研究提出其他的辅助截流措施^[6]。

3.1 新型预控式截流工型式

通过提前布置截流工^[6]，优化龙口三维形状，将龙口水流与戽堤下游低水位水流隔开，达到降低截流难度的目的，可在明渠开挖的过程中在特定位置预留岩坎并加固形成壅拦坎，形成新型预控式截流工型式，其平面布置如图 7 所示。

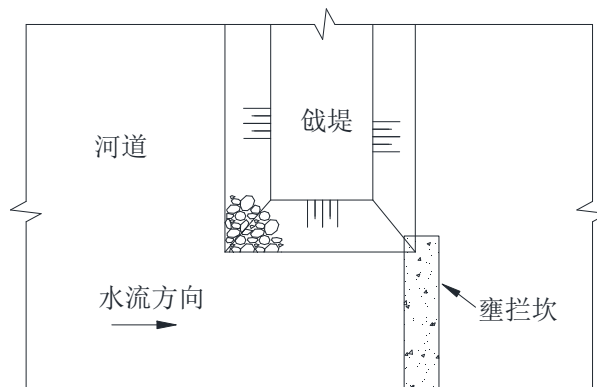


图 7 壅拦坎截流工立堵截流平面布置示意图

3.2 壅拦坎截流工对龙口流态的影响

通过数值模拟和模型试验得到（如图 8 所示）：单戽堤立堵截流龙口垂线平均流速沿程急剧增大，而壅拦坎立堵截流垂线平均流速沿水流方向先增大后减小，在轴线附近区域

垂线平均流速基本保持不变。

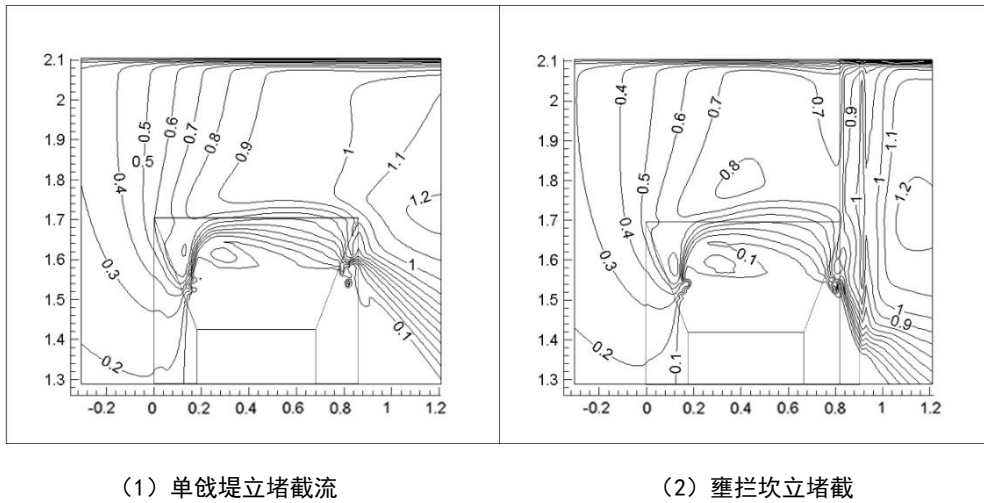


图 8 龙口区域垂线平均流速等值线

图 9 可以看出，在壅拦坎的前沿区域，底部流速沿水流方向逐渐减小，有利于上游已起动截流材料的再次止动，能有效阻止截流材料的流失。

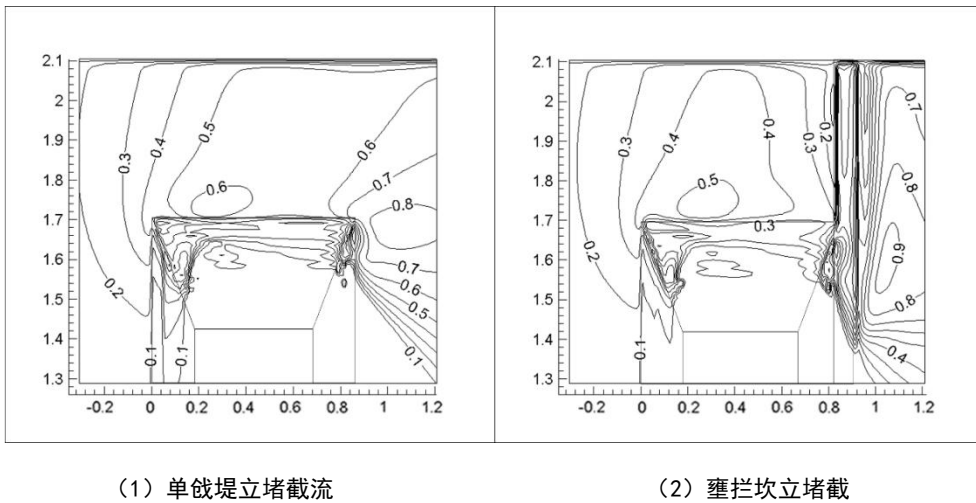


图 9 龙口区域底部流速等值线

表 1 为龙口区域主要水力指标，可以看出壅拦坎新型截流工型式能有效壅高戽堤下游坡脚处水位，降低戽堤上、下游坡脚之间的落差，减小龙口水流水力坡降，继而降低流场区域的流速，显著减小截流材料的粒径。

表 1 龙口区域主要水力指标

项目	轴线平均流速 (m/s)	轴线水深 (m)	单宽流量 (m ² /s)	落差 (m)
单戽堤	0.891	0.091	0.075	0.059
壅拦坎	0.741	0.107	0.070	0.030
变幅 (%)	-16.745	16.726	-5.480	-48.737

3.3 壅拦坎高度对龙口主要水力指标的影响

图 10 为壅拦坎高度对龙口主要水力指标的影响，随着壅拦坎高度的增大，轴线平均流速、单宽流量以及戽堤上游到壅拦坎前沿的落差均减小，轴线水深增大。当壅拦坎高度由 0.0125m 增大为 0.0500m 时，轴线平均流速减小幅度为 42.17%；轴线水深增大幅度为

31.91%；单宽流量减小幅度为 27.40%；落差减小幅度达 68.89%。壅拦坎高度是影响龙口流场的主要因素，壅拦坎越高，壅水效果越明显，流速越低，对截流越有利。

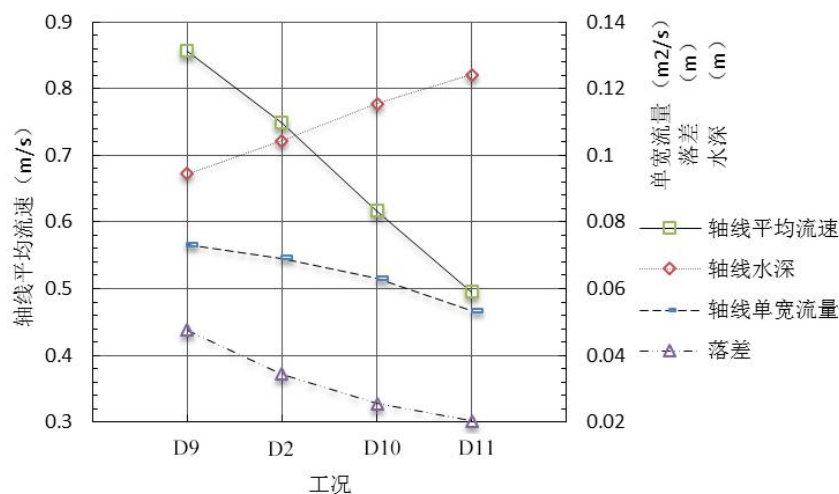


图 10 壅拦坎高度对龙口主要水力指标的影响

4 结论

针对平原枢纽导流明渠既宽且长，渠内流态复杂、流速较高，明渠冲刷防护困难的问题，通过水力学模型试验研究，提出了“进口首部斜坡式引流段”、“中部壅拦坎”“尾部叶脉式潜坝”的较为系统技术方案，实现了对导流明渠内水流的全过程流态多工况控制。其中，“进口首部斜坡式引流段”能有效的避免明渠进口的无规律紊流，“中部壅拦坎”能控制明渠内主流在各种流量下均靠近明渠轴线，减轻对明渠两侧建筑物的冲刷，“尾部叶脉式潜坝”约束出口水流向主槽中央扩散，相互之间对明渠内主流进行承接和引导。

针对导流明渠高落差、大流速截流的技术难题，开展预控式截流风险控制技术研究，提出了壅拦坎新型截流工型式，通过局部抬高戽堤下游水位，改善龙口水力条件，确立了预控式截流工的施工方法，克服了传统截流施工组织复杂难题，相比单戽堤截流，可降低龙口轴线平均流速 16%；成果成功应用于工程实践，实现龙口高水力指标下的长历时、慢进占截流，龙口连续作业长达 64h，但抛投料平均尺寸仅为同类工程的 60%，减少特殊截流材料用量约 80%，抛投料流失率降低约 10%。

参考文献

- [1] 吴宏荣,叶建群,熊立刚,徐辉,李强,罗书靖. 桑河二级水电站枢纽布置设计[J]. 云南水力发电.2018,34(4):59-62.
- [2] 邱亚锋,吴彬,吕国轩,任金明,叶建群,王哲鑫. 平原河流大流量施工导流和高落差截流应用研究[J]. 云南水力发电.2018,34(1):155-159.
- [3] 戴会超,胡昌顺,朱红兵. 施工导截流理论与科技进展[J]. 水力发电学报.2005,24(4):78-83.
- [4] 夏仲平. 水利工程施工截流技术进展[J].人民长江.2005,36(12):11-12.

- [5] 陈忠儒,陈义东,陈义武. 高落差截流工程的进展及其工程措施[J]. 水电站设计.2003,19(1):64-69,102.
- [6] 陆贺. 具有辅助截流工的单戽立堵截流龙口水力特性研究[D].武汉:武汉大学博士毕业论文,2016.

作者简介：张金海（1976—），男，河南方城人，高级工程师，主要从事水电水利工程施工技术与建设管理工作。通讯地址：云南省昆明市官渡区世纪城中路1号华能澜沧江水电股份有限公司基本建设部。电话 0871-67216882，传真：0871-67216674，手机号码：13987129963，E_mail: 182189191@qq.com。