

九旬峡泄洪洞突扩跌坎体型的水力学试验

许文海¹, 卢泰山², 南晓红²

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

2 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 通过水力学模型试验, 对偏心铰弧门突扩跌坎体型的水流流态、空腔特性及其对掺气量、侧墙压力分布和水下噪声等的影响进行了观测, 对突扩跌坎体型水力及空化特性进行了研究, 确定突扩宽度 $\Delta b = 0.8 \text{ m}$, 并以突体高度低于 4 mm 作为施工不平整度的控制标准。

[关键词] 泄洪洞; 突扩跌坎体型; 水力特性; 模型试验

[中图分类号] TV 135.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2006)11-0217-06

随着高坝建设的发展, 偏心铰弧门突扩跌坎体型已在国内外一些工程中得到应用。工程实践证明, 采用偏心铰弧门和伸缩式水封是解决高水头泄水洞闸门止水的有效途径^[1]。这两种闸门止水型式均要求弧形门座侧向突扩、底部突跌, 除便于布置闸门止水外, 也为设置掺气减蚀设施创造了有利条件。高速水流流经突扩跌坎不平顺边界时, 沿垂直和水平两个方向扩散, 水流紊动剧烈, 压力分布和水流流态相当复杂。结合高压弧门止水布置的突扩跌坎掺气体型, 国内外已有成功的工程经验, 但也有少数工程在突扩跌坎下游发生了空化空蚀破坏^[1]。目前, 突扩坎

体型的研究多为改善突扩跌坎体型水流条件的措施, 对突扩跌坎体型的水力及空化特性的研究还不够深入。本试验以九旬峡水利枢纽工程泄洪洞水力学模型试验为基础, 对突扩跌坎体型泄洪洞的水力及空化特性进行了研究, 以期对工程设计和运行以及偏心铰弧门突扩跌坎体型的推广和运用提供可靠的理论依据。

1 九旬峡水利枢纽工程泄洪洞概况

九旬峡水利枢纽工程泄洪洞示意图见图1。

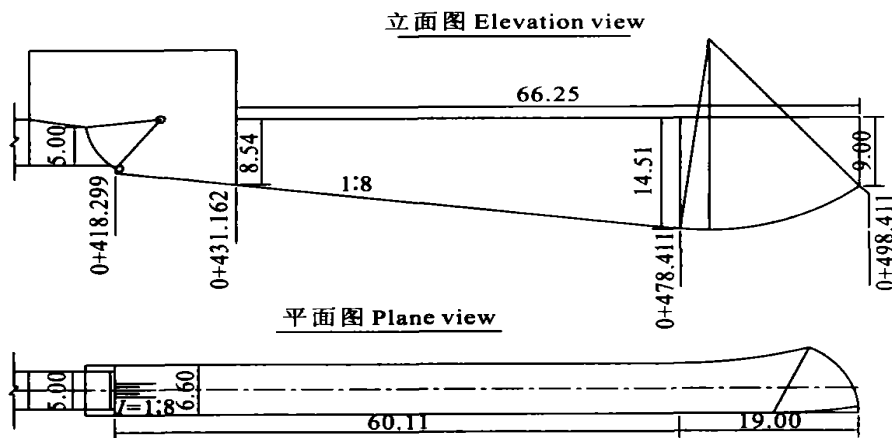


图1 九旬峡水利工程泄洪洞示意图

Fig 1 Sketch of discharge tunnel of Jiudianxia water conservancy project

试验泄洪洞出口孔高 $h = 5 \text{ m}$, 孔宽 $b = 5 \text{ m}$, 泄洪洞出口按弧形门座两侧各突扩 $\Delta b = 0.5 \text{ m}$ ($\frac{\Delta b}{h} =$

0.10) 和 $\Delta b = 0.8 \text{ m}$ ($\frac{\Delta b}{h} = 0.16$) 两个方案进行试验。底部跌坎 $d = 1.0 \text{ m}$, 跌坎后泄流明槽底坡为 $1:8$,

〔收稿日期〕 2006-09-23

〔作者简介〕 许文海(1965-), 男, 甘肃兰州人, 教授级高级工程师, 主要从事水利水电工程设计与研究。

再经 $R = 160\text{ m}$ 圆弧曲线过渡后接 $1:4$ 陡坡。经体型优化后改为跌坎后泄流明槽底坡 $1:8$, 且一坡到底。跌坎后两侧墙各设 1 孔 $\Phi = 0.8\text{ m}$ 通气孔, 为跌坎底部通气。主要试验水头为 95.11 和 93.38 m (设计水头), 相应泄流量分别为 758.1 和 $752\text{ m}^3/\text{s}$, 压力洞出口流速分别为 30.5 和 29.0 m/s 。泄洪洞水力学模型试验的常压模型比尺为 $1:50$, 减压模型比尺为 $1:28$ 。模型按重力准则设计, 减压模型除满足重力相似外, 还要求模型与原型水流空化相似。

2 结果与分析

2.1 水流流态

泄洪洞突扩跌坎后, 高速水流脱离边壁形成射流, 水流侧向因边壁突扩而横向扩散, 随后冲击侧墙。侧扩射流与两侧边壁间形成侧空腔, 底部射流与底板间形成底空腔。侧空腔与底空腔相互连通, 侧空腔成为向底空腔供气的通道。射流界面上因水流剧烈紊动而产生水气交换, 造成底部水流掺气^[2], 对泄流明槽底部具有掺气减蚀的保护作用。突扩跌坎后侧扩射流冲击侧墙, 向上形成水翅, 向下形成水帘, 水翅沿侧墙爬高。门座突扩宽度 $\Delta b = 0.5\text{ m}$ 时, 水翅引起的激溅水花不时冲击弧门支铰, 给弧门支铰结

构带来安全问题, 而当门座突扩宽度 $\Delta b = 0.8\text{ m}$ 时, 水翅及激溅水花不会冲击弧门支铰。底部射流冲击底板, 水流冲击点前水流上溯, 形成局部反向旋滚和水垫, 虽可减轻射流产生的冲击压力, 却减小了底空腔的有效高度和长度, 对掺气不利。随水头下降, 底空腔减小, 水头为 56 m 时, 回水已抵达坎下, 且淹没通气孔达 $1/2$ 孔高。

在试验水位下, 突扩跌坎后水流大致可分为水翅、表面搅动掺气区、底部掺气区和清水区(图2)4个部分, 底部掺气水流在下泄过程中, 气泡逐渐向上部扩散飘移, 底部掺气减少。侧扩射流与两侧墙接触线后的底部掺气区与表层搅动掺气区之间存在明显的清水区, 说明这些部位掺气不足, 未能形成对侧墙的掺气保护条件。

当水头为 93.38 m 时, 弧形门座突扩宽度 $\Delta b = 0.5\text{ m}$ 时, 形成的清水区长约 30 m , 高约 3.5 m , 水翅高约 2.7 m , 长约 17 m 。弧形门座突扩宽度为 0.8 m 时, 在其他特性基本未变的情况下, 水翅高度减少至 1.3 m , 清水区及水翅产生位置向下游移动约 2 m 。试验表明, 适当增大门座突扩宽度, 明显降低了水翅高度, 并使水翅产生的位置向下游移动, 基本上避免了水翅及激溅水花对弧门支铰的威胁。

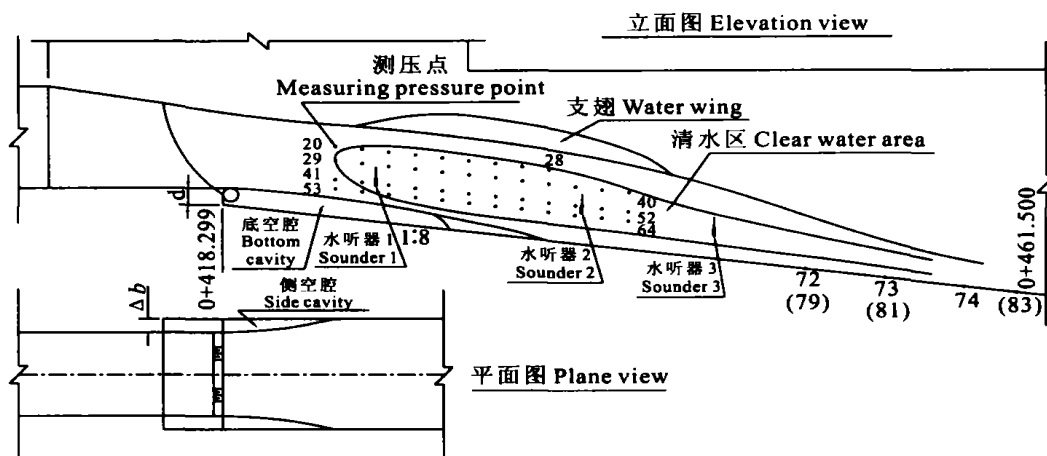


图2 突扩跌坎后水流流态及测压点示意图

Fig. 2 Flow regime and measuring pressure points after sudden enlargement and bottom drop

2.2 空腔特性与掺气

利用弧形门座突扩跌坎, 在侧扩射流与两侧墙之间和底部射流与底板之间形成稳定的侧空腔及底空腔, 以向水流掺气保护侧墙和底板, 这是设置突扩跌坎掺气设施的主要目的之一。侧空腔的形成主要受突扩宽度 Δb 的影响, 其长度随突扩宽度和来流佛

汝德数 F_r 的增大而增长; 跌坎高度 d 和泄流明槽底坡 i , 则主要影响底空腔的形成, 底空腔的长度随 d 和 i 的增大而加大。当水头为 93.38 m 、弧形门座突扩宽度 $\Delta b = 0.5\text{ m}$ 时, 侧空腔长度约为 6.7 m ; 当门座突扩宽度 $\Delta b = 0.8\text{ m}$ 时, 侧空腔长度增至 7.5 m 。增加门座突扩宽度, 可增大侧空腔宽度和长度, 增大

了供气通道的有效面积。

试验水头下,泄洪洞突扩跌坎后形成的侧空腔和底空腔较为稳定,侧空腔与底空腔相互贯通,通气顺畅。侧扩射流冲击侧墙后,产生冲击压力,其上部与大气相通,不能形成强迫掺气条件,清水区内仅出现线状掺气现象。进一步的测量结果表明,当水头为 93.38 m 时,清水区内掺气浓度仅为 0%~0.7%,说明侧空腔仅成为向跌坎底部供气的通道,侧空腔空气除部分进入底空腔外,其余空气不能沿两侧墙掺入水流。因而,在底部掺气水流与表层掺气水流之间

形成了明显的清水区,未能形成对侧墙的掺气保护条件。

闸门全开时,泄洪洞出口侧扩射流形成稳定的侧空腔与底空腔,侧空腔与底空腔贯通性较好,侧空腔成为向底部供气的良好通道。沿程掺气浓度变化(表 1)表明,随水流下泄,底部掺气区气泡逐渐向上部飘移扩散,水流底部掺气浓度减少。各试验水位下,跌坎下游 50.0 m 处水流底部掺气浓度为 2.7%~4.5%,仍可起到一定掺气减蚀作用。

表 1 在各试验水位下突扩跌坎下游水流底部不同位置处掺气浓度的测量结果

Table 1 Measure results of aerated concentration at different places of bottom flow after sudden enlargement and bottom drop at test levels

距跌坎距离/m From the bottom drop	水头/m Water head				
	95.11	93.38	92.00	89.00	56.00
20.8	21.8	22.8	12.6	8.6	3.2
50.0	4.1	4.5	4.2	3.7	2.7

2.3 压力特性及水流空化数

泄洪洞突扩跌坎后,侧扩射流冲击侧墙,底部射流冲击底板。侧扩射流冲击侧墙形成冲击交角,在两侧墙形成清水区。清水区内流线折射,导致局部压力降低。侧扩射流冲击侧墙形成的压力分布是分析侧墙空化特性的一项重要指标^[3]。本试验在清水区侧墙上布置了 45 个测压点,在泄流明槽底板布置了 20 个测压点。压力分布规律表明,突扩跌坎后,侧扩射流与底部射流相比有明显不同。侧扩射流冲击侧墙后产生清水区,压力升高范围较小且衰减迅速,形成低压区,甚至出现负压,清水区后端压力得以回升。

底部射流冲击底板,受水深影响,在一定范围内仍保持着较高压力。弧形门座突扩宽度的改变,对改善清水区压力分布有一定影响。

各测点水流空化数(σ)按(1)式计算:

$$\sigma = \frac{h_a + h - h_v}{v^2/2g}$$
 (1)

式中, h_a 为大气压力水柱(m); h 为各测点压力水头(m); h_v 为水的汽化压力水柱(m); v 为计算断面平均流速(m/s)。

93.38 m 水头下侧墙最小水流空化数及泄流明槽底板沿程水流空化数的变化见表 2。

表 2 93.38 m 水头下侧墙最小水流空化数及泄流明槽底板沿程水流空化数的变化

Table 2 The smallest flow ing cavitation number on the side wall and the charge of flow ing cavitation number along the bottom of discharge open channel under 93.38 m water head

测点 Measuring point	$\Delta b=0.5\text{ m}$		测点 Measuring point	$\Delta b=0.8\text{ m}$	
	压力/kPa Pressure	水流空化数 σ Flow ing cavitation number		压力/kPa Pressure	水流空化数 σ Flow ing cavitation number
40 [#]	-9.0	0.15	47 [#]	5.8	0.21
52 [#]	-13.1	0.14	56 [#]	3.5	0.19
64 [#]	-18.1	0.13	59 [#]	4.9	0.21
79 [#]	24.1	0.22	72 [#]	29.1	0.29
81 [#]	36.8	0.23	73 [#]	36.3	0.31
83 [#]	15.9	0.19	74 [#]	36.8	0.31

注: 40[#], 52[#], 64[#], 47[#], 56[#], 59[#] 测点位于侧墙; 79[#], 81[#], 83[#], 72[#], 73[#], 74[#] 测点位于泄流明槽底部。

Note: 40[#], 52[#], 64[#], 47[#], 56[#], 59[#] measuring points on the side wall, 79[#], 81[#], 83[#], 72[#], 73[#], 74[#] measuring points at the bottom of discharge open channel

表2表明,当水头为93.38 m、弧形门座突扩宽度为0.5 m时,清水区内有3个测压点出现负压,其最大负压值为-18.1 kPa,最小水流空化数为0.13。当弧形门座突扩宽度为0.8 m时,清水区各测压点均未出现负压,清水区侧墙上的最小压力为3.5 kPa,其最小水流空化数提高至0.19。弧门门座突扩宽度变化后,受突扩宽度增大和水流惯性的影响,侧扩射流冲击侧墙的冲击交角发生变化,清水区内流线折射状况也因之改变,引起侧扩射流冲击侧墙后在清水区内形成的压力梯度变化,使清水区内负压消除,压力分布状况得到改善。因此,在一定范围内,适当增大门座突扩宽度,对改善突扩跌坎后清水区侧墙上的压力分布状况及水流空化特性是有利的。

清水区侧墙上的水流空化数较小,空化特性较差,减压试验将重点论证其空化特性。当突扩宽度 $\Delta b = 0.8$ m时,泄流明槽底板沿程水流空化数约为0.3,泄流明槽沿程水流平均流速小于30 m/s,且水流底部掺气浓度超过3%,可满足泄流明槽安全运行的要求。

2.4 空化特性

泄洪洞突扩跌坎后水流大致可分为表面掺气区、底部掺气区和清水区三部分。突扩跌坎后泄流明槽底部可通过水流掺气,达到减免空化的目的。减压模型试验重点论证了侧墙清水区的空化特性,结果表明,突扩跌坎后侧扩射流冲击侧墙,产生清水区。清水区内流线折射,导致局部压力降低,形成低压区,水流空化特性偏差。而清水区几乎不掺气,若清水区过流边壁稍有缺陷,很可能产生近壁空化。突扩跌坎体型水流空化问题,既可能是由于体型缺陷引起的,也可能是因为施工不平整造成边壁水流空化所致。减压模型试验分别从这两方面入手,研究泄洪洞突扩跌坎体型的空化特性,确定允许的施工不平整度。实际工程中,混凝土表面可能产生各种各样的突体,造成施工不平整。试验选取其中较为典型的垂直升坎突体作为研究对象。减压条件下,突体发生空化后,水流中将产生肉眼可以观察得到的白光(空化云),可以通过目测判断空化是否发生。水流空化过程中,空化泡的形成、发生和溃灭的各个阶段均伴随着与一般水流噪声不同的声辐射。现有研究表明,水工建筑物不同过流条件下水流空化噪声频谱有以下特征:空化发生后,声压级会突然升高^[4],其高频部分声压级上升幅值一般超过10 dB,并存在优势频率^[5],且其范围较宽(40~180 kHz)。声压级计算公

式为:

$$SPL = 20 \lg \frac{P}{P_0} \quad (2)$$

式中, SPL 为声压级(dB); P 为测点声压(μPa); P_0 为参考声压级(μPa), $P_0 = 1 \mu\text{Pa}$ 。

利用8103型水听器进行水下噪声的测量,将接收到水流噪声信号输入3560型PULSE多分析仪进行分析、处理,最后通过计算机绘出一定频段的噪声频谱图,可以根据水流噪声频谱特性来分析、判断空化是否发生。减压试验研究将模型置于减压箱内,在满足水流空化相似条件下,采用目测和水下噪声测试相结合的方法来综合分析、判断水流空化特性。试验在突扩跌坎下游两侧边墙清水区低压部位可能发生空化的地方,布置了3个水听器和4列8 mm高垂直升坎突体。通过在侧墙不布置突体和布置突体两种方案,分别论证突扩跌坎体型的空化特性并确定施工不平整度的控制标准。

门座突扩宽度为0.5 m时,在清水区不布置突体和布置突体试验中,当水头为93.38 m时水流均已发生初生空化,不满足设计要求。通过水力及空化特性综合分析比较,决定舍弃门座突扩0.5 m方案。

门座突扩宽度为0.8 m,在清水区不布置突体试验中,当水头为95.11 m时,在2个频段上,相似真空度噪声频谱峰值声压级与背景噪声(水流无空化)声压级差值超过10 dB,水流发生初生空化(图3);当水头为93.38 m或其他值时,水流均未发生空化。在清水区内布置突体试验中,当水头为93.38 m时,目测突体未产生空化云,水流未发生空化;水下噪声测试观测表明,相似真空度噪声频谱峰值声压级与背景噪声声压级差值小于10 dB(图4),水流未发生空化。试验表明,门座突扩宽度由0.5 m优化为0.8 m后,由于供气通道面积增大,清水区内负压消除,压力分布状况得到有效改善,使突扩跌坎下游水流空化特性得到明显改善。只要将运行水头控制在设计水头,并严格控制施工不平整度,泄洪洞是可以安全运行的。试验决定将门座突扩宽度 $\Delta b = 0.8$ m ($\frac{\Delta b}{h} = 0.16$)方案作为推荐方案。考虑到突扩跌坎后水流运动要素脉动和减压模型试验缩尺效应的影响及必要的安全保证。建议工程以突体高度低于4 mm作为施工不平整度的控制标准,并建议泄洪洞在93.38 m水头以下水位运行。

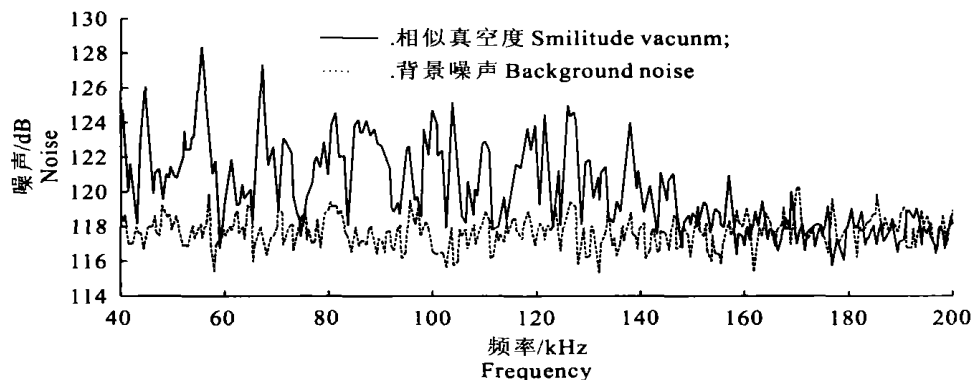


图3 95.11 m 水头(无突体)噪声频谱图

Fig 3 Noise frequency spectrum of 95.11 m water head (without protrusion)

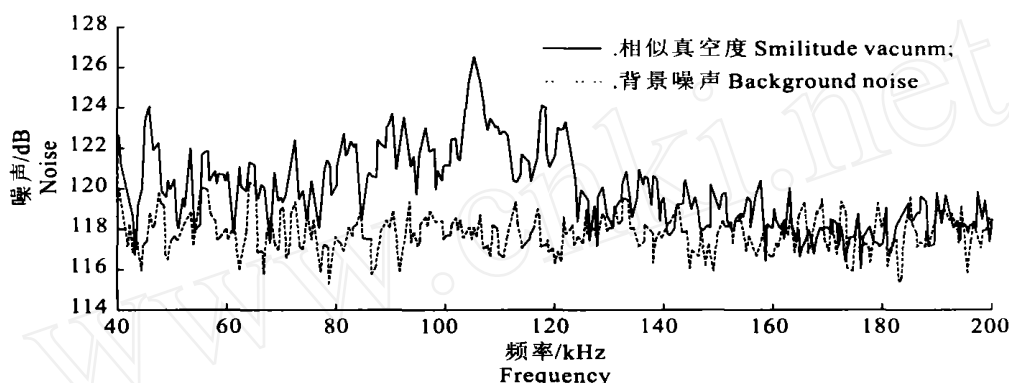


图4 93.38 m 水头(8 mm 突体)噪声频谱图

Fig 4 Noise frequency spectrum of 93.38 m water head (8 mm protrusion)

3 结 语

1) 泄洪洞门座突扩宽度由0.5 m 增大至0.8 m 后,水翅位置向下游移动,水翅高度降低,避免了水翅及激溅水花对弧门支铰的威胁,并使侧空腔面积增大,增大了向水流底部供气的通道,对提高泄流明槽底部掺气减蚀能力有利。

2) 突扩跌坎后侧射流冲击侧墙产生明显的清水区,清水区内掺气不足。清水区内压力降低,形成低压区。门座突扩宽度优化为0.8 m ($\frac{\Delta b}{h} = 0.16$) 后,

清水区内负压得以消除,压力分布状况得到改善,水流空化数有所提高。减压试验表明,突扩跌坎体型的水流空化特性得到改善,推荐方案突扩跌坎体型设计合理。建议工程以突体高度低于4 mm 作为施工平整度的控制标准,并建议泄洪洞将运行水位控制在93.38 m 水头以下。

3) 鉴于偏心铰弧门突扩跌坎体型国内外已建工程的经验和教训,应加强该体型的水力及空化特性的研究,进一步研究突扩跌坎后清水区掺气的方法和措施,以探求减免空化空蚀破坏的有效途径。

[参考文献]

- [1] 廖仁强,吴效红,孔繁涛,等. 三峡工程深孔明流段体型选择[J]. 水力发电, 1997(12): 42-45
- [2] 陈 端,黄国兵,段文刚,等. 水布垭枢纽放空洞工作闸门区突扩跌坎体型的试验研究[M]. 水力学与水利信息学进展 成都: 四川大学出版社, 2005
- [3] 王河生,柴恭纯. 浑水条件下偏心铰弧形闸门的空化问题[M]//泄水工程与高速水流 长春: 吉林科技出版社, 1998
- [4] 周宪政. 用声学原理测空化噪声的有关方法及探讨[C]//水科学青年学术论文集 北京: 水利电力出版社, 1990
- [5] 柴恭纯. 用声学法研究高速低压空穴流的初步探讨[R]. 江苏南京: 南京水利科学研究所, 1982

Hydraulics experiment study of Jiudianxia discharge tunnel's sudden enlargement and bottom drop types

XU Wen-hai, LU Tai-shan, NAN Xiao-hong

(1 College of Hydraulic and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 College of Hydraulic and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: By hydraulic model tests, the flow regime, characters of cavity and influence on the aerate quantity, pressure on side wall and under water noise were observed and the hydraulic and cavitation characteristics of sudden enlargement and bottom drop types were studied. The width of sudden enlargement was determined to be $\Delta b = 0.8\text{ m}$, and the height of protrusions lower than 4 mm was used as control standard of construction unevenness.

Key words: discharge tunnel; sudden enlargement and bottom drop types; hydraulic characteristic; model test

(上接第216页)

Abstract ID: 1671-9387(2006)11-0212-CA

Optimal selection of cascade reservoirs compensation benefit of the Yellow River mainstream based on AHP and catastrophe evaluation

XIA Zhong^{1,2}, HUANG Qiang¹, LIU Han³, LU Yu-jie¹

(1 Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 The Upper Yellow River Hydropower Development Co. Ltd., Xining, Qinghai 810003, China;

3 China Power Investment Corporation Northwest Branch, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract: Considering social, eco-environmental and economic factors, the projects' index system of cascade reservoirs compensation benefit of the Yellow River mainstream is established, and with AHP and catastrophe evaluation, synthetically evaluation was done of the six schemes of cascade reservoirs compensation benefit of the Yellow River mainstream. Results show AHP and catastrophe evaluation methods can be used in Multiple Criteria Decision making (MCDM).

Key words: analytic hierarchy process (AHP); catastrophe evaluation; the Yellow River mainstream; compensation benefit; project optimal selection