

X 型宽尾墩体型设计方法探索

梁宗祥¹,尹进步¹,郑 治²,卢 红²,龚红林¹

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;2 中国水电顾问集团 贵阳勘测设计研究院,贵州 贵阳 550002)

【摘 要】 **【目的】**探索 X 型宽尾墩消能技术中 X 型宽尾墩体型设计及其与堰面的关系。**【方法】**在参考传统宽尾墩体型设计方法的基础上,利用水工水力学工程模型试验研究方法,结合已建索风营水电站及在建思林、大朝山等工程经验,对 X 型宽尾墩体型设计中顶扩面、收缩面、底流面及其与堰面间的位置关系等进行了系统分析研究。**【结果】**分析了 X 型宽尾墩的体型及水流特点,提出其在堰面的相对位置及布置原则;X 型宽尾墩体型的设计应根据其消能技术的特殊要求,综合考虑顶扩面、收缩面及底流面与堰面的关系予以分析和确定。**【结论】**随着 X 型宽尾墩相关研究的深入,其应用潜力必将在水工消能流域得到更大发挥。

【关键词】 X 型宽尾墩;消能;体型设计;水电工程

【中图分类号】 TV135.2 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2008)05-0206-05

Study on the method for style designing of X type flaring gate piers

LIANG Zong-xiang¹, YIN Jin-bu¹, ZHENG Zhi², LU Hong², GONG Hong-lin¹

(1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2 Guiyang Hydropower Investigation Design & Research Institute, CHECC, Guiyang, Guizhou 550002, China)

Abstract: **【Objective】** The paper was to study the method for style designing of X type flaring gate pier and the relative position on the pier. **【Method】** The paper analysed the relevance of up spread section and constriction section, down flow section on X type flaring gate pier by hydraulic model testing. The study compared the data of Suofengying hydropower station and Silin hydropower station, Dachao-shan hydropower station. **【Result】** The method for style & position designing of X type flaring gate pier was put forward on the basis of the relevance of up spread section and constriction section, down flow section on X type flaring gate pier. **【Conclusion】** The method would be applied in energy dissipation with the development on the study of X type flaring gate pier.

Key words: X type flaring gate pier; energy dissipation; style design; hydro-engineering

宽尾墩作为一种消能工,已在多个大型水电工程上得到应用^[1]。其改变了传统二元水跃底流的消能形式,将挑流与底流巧妙地结合起来,形成空中掺气、池中多轴漩滚的三元水跃,消能率大为提高,消力池长度可缩短 1/2 左右,不仅具有显著的经济效益,而且将我国泄洪消能技术水平提升到一个新高度^[2]。随着研究工作的深入及对已建工程的运行观测发现,宽尾墩在取得巨大成功的同时,还存在着一些缺陷:第一,常遇小流量泄洪时,由于堰上水头及流速较小,水舌经过宽尾墩后,不能实现完全的纵向拉开,而是沿坝面以收缩叠加水股的方式下泄,此时消力池尾水相对较浅,下泄水股得不到缓冲,在坝脚和消力池前部产生较大冲击压强;第二,宽尾墩泄流时,溢流坝大约只有 30% 坝面过水,剩余的 70% 坝面不能得到有效利用,这对于台阶坝面过水,从消能方面而言是一种浪费;第三,相对于平尾墩而言,宽

* [收稿日期] 2007-11-09
[基金项目] 中国水电顾问集团科研项目(CHC-KJ-2004-05-01)
[作者简介] 梁宗祥(1964—),男,陕西岐山人,高级工程师,主要从事水工水力学研究。E-mail:liangzx@nwsuaf.edu.cn

尾墩所形成的挑射水流对消力池底板产生的冲击压强更大,容易引起底板破坏。为了克服上述问题,在乌江索风营水电站水力学模型试验研究过程中,X 型宽尾墩作为一种新型宽尾墩消能工被探索性地提出^[3-4]。试验研究表明,X 型宽尾墩在继承传统宽尾墩优点的同时,很好地克服了传统宽尾墩所存在的缺点。这种宽尾墩最终被成功地应用于索风营水电站工程,并已建成过水。在索风营工程设计过程中,虽然通过试验研究,提供了一个比较适合索风营工程应用的 X 型宽尾墩体型,但未能提出 X 型宽尾墩体型设计的具体原则。

借鉴索风营工程经验,乌江思林、沙沱、贵州马马崖、云南鲁地拉等工程也在泄洪消能建筑物设计中运用了 X 型宽尾墩^[5],一方面使 X 型宽尾墩体型研究得到了深入发展,另一方面也为同类工程应用提供了较好的参考依据。但每个工程只根据自己的特定工程条件,通过试验对适合本工程的 X 型宽尾墩体型设计问题进行了研究。对于 X 型宽尾墩体型设计方法而言,仍然缺乏一个比较系统的设计原则。为此,在 X 型宽尾墩与台阶面联合消能技术专题研究的基础上,作者结合上述工程各自的研究成果,对 X 型宽尾墩体型设计方法及相关原则问题进行了具体分析和总结,以期对 X 型宽尾墩消能技术的发展及应用提供参考。

1 X 型宽尾墩体型、水流特征与基本布置原则

X 型宽尾墩是在常规 Y 型宽尾墩靠近坝面处切口而形成,体型如图 1 所示。由于其出口断面形状与字母 X 非常相像,故称其为 X 型宽尾墩。当下泄流量小于下部开口过流能力时,水流全部沿坝面以二元流形式下泄,宽尾墩不起作用,从而避开了宽尾墩小流量泄洪的不利工况;当下泄流量大于下部开口过流能力时,一部分沿坝面下泄,超过下开口过流能力部分,受宽尾墩约束,形成一股窄而高的水舌,以收缩射流形式下泄,下开口过流部分对上部宽尾墩射流有一个上托作用,可有效减小消力池底板所承受的冲击压强。无论大小流量泄洪,坝面均能得到充分地利用。试验研究表明,X 型宽尾墩比 Y 型宽尾墩消能率高约 5%~10%,可使消力池地板承受的冲击压强减小约 30%^[4]

基于 X 型宽尾墩体型及水流特点的要求,X 型宽尾墩体型及其在堰面上的相对位置应根据以下基本原则确定^[5]:第一,宽尾墩不能对堰面过流能力产

生太大影响;第二,宽尾墩在台阶坝面所形成的纵向拉开水舌要适应不同下泄流量与消力池消能要求;第三,宽尾墩底部开口体型既要满足台阶面消能,又必须满足台阶面与宽尾墩本身防空蚀破坏的要求。

根据上述原则,对 X 型宽尾墩体型按上、中、下 3 部分进行划分,并对每部分及各个特征点命名。定义 C 点为宽尾墩上顶点,D、F 点分别为宽尾墩上、下折点,E、G 点分别为宽尾墩上、下收缩点,H 点为宽尾墩下底点。顶部 CDE 面为顶扩面,中部 DEGF 面为收缩面,底部 FGH 面为底流面,则上述 3 条原则其实就是对 X 型宽尾墩顶扩面 CDE、收缩面 DEGF 及底流面 FGH 的设计原则分别提出了具体要求。

由于 X 型宽尾墩是在传统宽尾墩基础上产生的,且其顶扩面与收缩面水流特征与 Y 型宽尾墩基本相同,因此传统宽尾墩体型的研究成果可在分析的基础上借鉴使用。

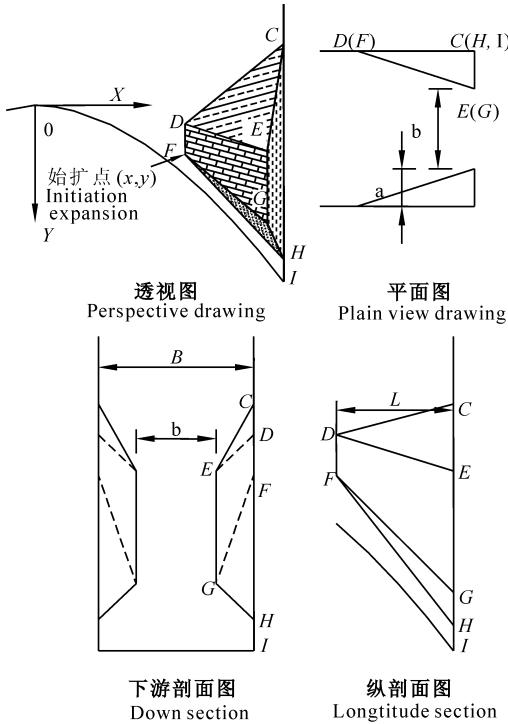


图 1 X 型宽尾墩详图
Fig. 1 Detailed drawing of X flaring gate pier

2 传统宽尾墩体型研究成果分析

刘永川^[6]对传统宽尾墩体型进行了系统的比较研究发现,对于侧墙垂直的传统宽尾墩而言(参考图 1),其体型及位置可由以下 4 个基本参数表示,即收缩比:

$$\beta = \frac{b}{B}. \quad (1)$$

式中: β 为收缩比, B 为闸室过流宽度(m), b 为宽尾墩收缩后的过流宽度(m)。

尾部折射角:

$$\theta = \arctg\left(\frac{B-b}{2L}\right). \quad (2)$$

式中: θ 为尾部折射角, L 为宽尾墩纵向水平投影长度(m)。

宽尾墩上折点位置参数:

$$\xi_1 = \frac{x}{H_d}, \xi_2 = \frac{y}{H_d}. \quad (3)$$

式中: ξ_1 、 ξ_2 为折点位置参数, x 、 y 为上折点相对于堰顶的坐标位置(m), H_d 为堰面定型设计水头(m)。

刘永川^[6]认为, 收缩比 β 的合理取值范围为 0.4~0.7, 如果 $\beta > 0.7$, 消能率降低, 冲刷加剧; 若 $\beta < 0.4$, 水舌虽薄但落点不一定很远。 β 的取值并不能依据某一个固定解析式求解得到, 对某一具体工程条件而言, 一般都在一定范围之内, 而且比较合理的 β 取值, 应满足不影响泄流能力、闸室水面较低、消能率较高、下游河道消能防冲效果较好等原则。刘永川最终建议 θ 取值为 $18^\circ \sim 26^\circ$, ξ_1 与 ξ_2 取值应以不影响泄流能力为原则, 建议 $\xi_1 > 0.85$, $\xi_2 > 0.37$ 。上述研究成果, 对传统宽尾墩体型的设计提出了比较具体的原则, 特别是几个参数的设定, 基本涵盖了传统宽尾墩体型的所有影响因素。随着宽尾墩在工程中应用范围的不断扩大, 相应研究工作也得到了深入开展, 其中也出现一些实际工程宽尾墩体型与上述设计原则不一致的现象, 其主要原因在于传统设计原则是根据特定工程条件试验研究确定, 而每个工程实际情况又各具特色, 因此关于 X 型宽尾墩体型的设计, 只能在遵循上述原则的基础上, 针对 X 型宽尾墩消能技术的特殊要求予以具体分析。

3 X 型宽尾墩体型设计分析

3.1 顶扩面

在索风营水电站模型试验中, 通过对 X 型宽尾墩顶扩面 CDE 体型的详细分析, 认为上折点 D 的移动, 即文献[6]中传统宽尾墩上折点参数 ξ_1 、 ξ_2 的取值问题, 直接影响着表孔过流能力的变化^[7]。不同体型的试验研究结果表明, 当 $\xi_1 < 0.85$ 时, 宽尾墩将对泄流能力产生很大影响, 而且水舌入池长度较短^[5]。因此, 设置宽尾墩时, ξ_1 取值必须大于 0.85。在此前提下, 试验测试发现, 当上折点 D 与堰

顶高程比较接近或高于堰顶高程时, 高、中库水位下泄流量也要减小, 其中校核水位流量与无宽尾墩堰面流量之间的最大差值达到 10%, 宽尾墩起始断面水流佛氏数 F_r 不足 1.0; 当 D 点低于堰顶高程, 校核水位时, 宽尾墩仍对流量产生影响, 但影响差值不足 3%, 且水流佛氏数 F_r 不小于 2.0; 库水位低于校核水位时, 宽尾墩对流量无任何影响。试验研究最终确定, 索风营工程宽尾墩的上折点 D 低于堰顶约 7.23 m。当 D 点的上、下位置确定后, 则 E 点高于 D 点时, 宽尾墩顶部水冠一般稳定性较差; E 点与 D 点同高程或低于 D 点时, 水冠比较稳定, 且 E 点越低, 宽尾墩顶部水冠越稳定, 但宽尾墩水舌的外缘点距离坝脚却比较近, 因此许多工程在综合各种因素后, 一般取 E 点与 D 点同高程。上顶点 C 点与堰上水头密切相关, C 点与坝面之间的高差(宽尾墩出口断面总高度)为 29 m, 约为 1.2 $H_{\max}$ ($H_{\max}$ 为堰上最大工作水头), 对安康、大朝山等工程进行统计发现, 该值基本为 $H_{\max}$ 的 1.0~1.2 倍。

按照公式(3)对索风营工程 X 型宽尾墩上折点位置参数进行计算, 可得 $\xi_1 = 1.01$, $\xi_2 = 0.36$, 基本符合传统宽尾墩要求。因此, 对于 X 型宽尾墩而言, 其上顶点 C 一般按宽尾墩总高度满足 $(1.0 \sim 1.2)H_{\max}$ 取值即可, 上折点 D 取值可参考传统宽尾墩布置原则 $\xi_1 > 0.85$ 及 $\xi_2 > 0.35$ 的要求选取。

为了满足 $\xi_1 > 0.85$ 以及 $\xi_2 > 0.35$ 的取值要求, 有时宽尾墩上、下折点 D、F 的高差可能缩小到不足 5 m, X 型宽尾墩底流面 FGH 的存在, 也使 F、D 之间的距离被缩短^[5]。因此, 为了便于施工, 简化体型, 可将 D 点与 F 点直接合并为 1 个点, 统称为折点或始扩点, 索风营工程 X 型宽尾墩体型设计中就采用了这种方法, 只保留了 1 个折点。

根据文献[8]中资料, 对已建工程进行统计发现, 大部分工程堰上工作水头不超过 26 m, 但也有些工程, 由于设计堰上水头比较高, 存在 $H > 26$ m 的运行情况。此时, 上折点 D 的位置不一定满足 $\xi_2 > 0.35$ 的要求, D 点可能与堰顶高程相同或高于堰顶。针对这种情况, 思林工程试验研究发现, 当堰上水头较高时, 一般下游河道尾水深度也相应比较大^[9]。尾水深度大即可利用深尾水进行挑流泄洪。此时, 宽尾墩体型设计中, 只需将顶扩面 CDE 的平面改为锥形曲面, 使 C 点位置降低的同时, 在 X 型宽尾墩顶部又形成一层横向展开水舌, 即使堰面下泄流量不受影响, 又可利用挑流、深尾水条件获得较高的消能率。

思林水电站泄水建筑物表孔堰上最大水头为 30.77 m,设计工况时堰上水头为 26.33 m,通过水力学模型试验,按照上述方法对 X 型宽尾墩体型进行了修改,充分利用高水头、深尾水的特点,使消能与泄洪流量问题同时得到解决,其宽尾墩体型及水流形态如图 2 所示^[8]。

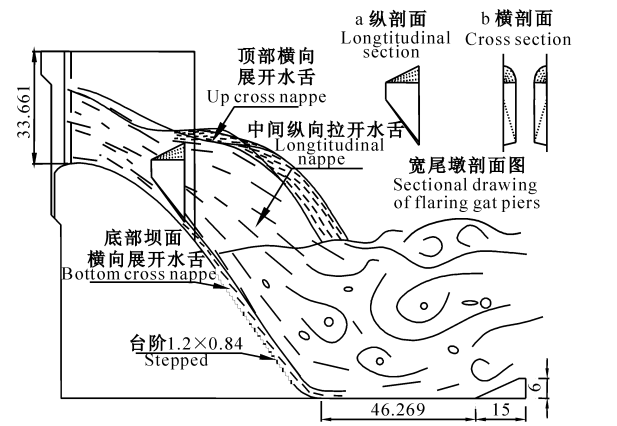


图 2 思林工程的水流形态图
Fig. 2 Sectional drawing on discharge

3.2 收缩面

收缩面 DEFG 决定着 X 型宽尾墩水舌纵向拉开的效果。与传统宽尾墩相同,这部分体型可根据

折射角 θ 和收缩比 β 的取值选定。其中收缩比 β 决定着上、下收缩点 E、G 的左右位置,折射角 θ 决定着上、下折点 D 与 F 的前后位置。表 1 是对使用传统宽尾墩及 X 型宽尾墩的已建或在建工程 β 、 θ 等参数的统计。

由表 1 可见,这些在建或已建工程宽尾墩收缩比 β 和折射角 θ 的取值与文献^[6]的要求并不完全一致,其中收缩比 β 取值范围的差别较大。 β 取值过大,不能形成充分的纵向拉开水舌。根据最新研究成果统计资料,建议在设计时,将收缩比 β 的取值控制在 0.35~0.55,折射角 θ 控制在 $16^{\circ}\sim24^{\circ}$ ^[5]。

为了对收缩比 β 、折射角 θ 与工程条件之间的关系进行详细研究,韩立^[8]对使用宽尾墩的部分工程资料进行了综合分析研究,提出 β 、 θ 与工程基本条件之间的经验关系式,即:

$$\beta=0.2\frac{H_d}{Z_a\tg\theta}-0.06。 \tag{4}$$

式中: H_d 为堰面定型设计水头(m), Z_a 为堰顶距宽尾墩末端之间的高差(m)。

由于 H_d 一般随工程条件而定,而 Z_a 又确定了宽尾墩在堰面上的位置,所以这一规律基本反映了 β 、 θ 与工程基本条件之间的关系。

表 1 使用宽尾墩的工程参数统计表
Table 1 The projec table of flaring gate piers

工程名称 Project	堰上水头/m Barrage head	表孔宽度/m Gate wide	纵向长度/m Longitude wide	出口宽度/m Exit wide	收缩比 β Contraction ratio	折射角 $\theta/(^{\circ})$ Angle of refraction
水东 Shuidong	16.00	15.00	12.00	5.60	0.37	21.39
百色 Baise	21.43	14.00	20.00	4.80	0.34	12.95
索风营 Suofengying	23.87	13.00	10.00	6.00	0.46	19.29
大朝山 Dachaoshan	23.89	14.00	11.55	6.30	0.45	18.43
安康 Ankang	24.05	15.00	11.25	6.00	0.40	21.80
五强溪 Wuqiangxi	26.90	19.00	19.30	7.00	0.37	17.27
岩滩 Yantan	25.20	15.00	12.00	8.00	0.53	16.26
思林 Silin	30.77	13.00	10.00	5.50	0.42	20.56

虽然上述分析结果所建议的 β 、 θ 2 个参数的取值范围都比较大,但工程实际条件的差别也很大,因此每个工程应根据各自特定情况,通过试验对利用经验公式(4)所确定的实际 β 、 θ 取值范围进行验证调整。

3.3 底流面与堰面关系

底流面 FGH 与堰面的关系,一方面决定于台阶面全断面平均过流量的大小,另一方面也决定了其压强的分布规律。据试验测试,FGH 面近壁水流流速一般在 20 m/s 附近,所以压强大小在一定程度也决定了该处水流的空化特性。

底流面 FGH 的选取一般有 2 种方法:一种是以台阶面平均单宽过流量确定,另一种是以 X 型宽

尾墩底部过流量与全断面过流量之比来选取。对工程试验资料进行分析发现,满足台阶面高消能率与防空蚀破坏的台阶面平均单宽过流量一般为 30~40 m³/(s·m),比较稳定^[10-11]。但对不同运行工况而言,X 型宽尾墩底部与全断面之间的分流比范围却比较大,很难用一个相对比较稳定或准确的分流比范围决定 X 型宽尾墩的下开口尺寸,因此只能用台阶面单宽过流量控制 FGH 面与堰面之间的位置关系^[5]。

工程试验研究发现,当 X 型宽尾墩下收缩点 G 与堰面的竖向距离 ≤ 3.5 m 时,下游台阶面单宽过流量不大于 40 m³/(s·m);当该距离 ≤ 3.0 m 时,下游台阶面单宽过流量不大于 30 m³/(s·m)^[4,12]。

因此, G 点与堰面的竖向距离 ≤ 3.5 m 时,台阶面过流量基本可控制在其高消能率范围之内。但下收缩点 G 与堰面之间的距离也不能 <3 m,否则,台阶面单宽过流量太小,一方面不能充分发挥台阶面的消能作用;另一方面,台阶面过流形成的水垫对集中水股冲击力的减缓作用也会受到影响。

索风营与思林两个工程的试验结果表明,当底流面的边 FG 与堰面成收缩式夹角时,底流面不会有负压出现;当边 FG 与堰面平行或成扩散式夹角时,底流面可能出现负压,且负压值随扩散角的增加而增大^[7,13]。如果底流面出现负压,一般情况下,越靠近下收缩点 G ,负压越大。因此,底流面的边 FG 与堰面应尽可能地成收缩式夹角布置。 FG 与堰面成收缩式夹角布置后,由于点 H 一般比下收缩点 G 低,所以底流面的边 FH 与堰面也必然成收缩式夹角布置,因此 H 点附近也不可能存在负压问题。但受宽尾墩底部结构与台阶面水流深度的限制,下底点 H 的高度也应受到一定的限制。一般 H 点与 I 点高差为 G 点与 I 点高差的一半左右,具体取值为 $1.5\sim 1.8$ m,如果 <1.5 m,台阶面单宽过流量太小且不均匀;如果 >1.8 m,则底流面的边 GH 与水平线夹角太小,宽尾墩结构稳定性会受到影响。

4 结 语

X 型宽尾墩体型可分为顶扩面、收缩面与底流面 3 部分,其中顶扩面决定着宽尾墩对表孔泄流能力的影响程度,同时也对宽尾墩水舌顶部的稳定性有一定影响,其体型由宽尾墩上顶点与上折点位置所决定;收缩面决定着宽尾墩水舌纵向拉开的效果与水舌的稳定性,其体型由宽尾墩 2 个特征参数收缩比 β 和折射角 θ 所决定,一般收缩比 β 的取值为 $0.33\sim 0.65$,折射角 θ 的取值为 $16^\circ\sim 24^\circ$,且 β 与 θ 还必须满足公式(4);底流面决定着宽尾墩与堰面之间的关系和宽尾墩本身的结构稳定性,其体型一般必须满足边 FG 和 FH 分别与堰面成收缩式夹角布置, G 与堰面的垂直距离应不大于 3.5 m,不小于 3.0 m, H 点与 G 点的高差为 G 点与 I 点高差的一半左右,具体取值为 $1.5\sim 1.8$ m。

[参考文献]

[1] 谢省宗,李世琴,李桂芬.宽尾墩联合消能工在我国的发展[J].红水河,1995,14(3):3-11.
Xie S Z,Li S Q,Li G F. Development on flaring gate piers united dissipator [J]. Hongshui River,1995,14(3):3-11. (in Chinese)

[2] 于忠政,刘永川,谢省宗,等.安康水电站泄洪消能新技术的研究与应用[J].水力发电,1990,16(11):32-36.
Yu Z Z,Liu Y C,Xie S Z,et al. Studying & application on the new dissipator technology of Ankang hydropower [J]. Water Power,1990,16(11):32-36. (in Chinese)

[3] 尹进步,刘韩生,梁宗祥.用于大单宽泄洪台阶坝面上的一种新型宽尾墩[J].西北水电,2002(1):44-46.
Yin J B,Liu H S,Liang Z X. A new flaring gate piers on stepped spillway dam [J]. Northwest Water Power,2002(1):44-46. (in Chinese)

[4] 梁宗祥,尹进步,刘韩生,等.宽尾墩与台阶坝面联合消能工的试验探索[J].长江科学院院报,2003,20(6):3-5.
Liang Z X,Yin J B,Liu H S,et al. Experimental study on united dissipator with stepped spillway dam surface and flaring gate piers [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2003,20(6):3-5. (in Chinese)

[5] 尹进步.X 型宽尾墩+台阶坝面联合消能技术物理模型试验研究报告[R].陕西杨凌:西北农林科技大学,2007.
Yin J B. Hydraulic model experimental study report on united dissipator with stepped spillway dam surface and X type flaring gate piers [R]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2007. (in Chinese)

[6] 刘永川.宽尾墩消能塘在安康水电站应用中的水力学问题[J].水利水电技术,1987,18(9):11-15.
Liu Y C. Hydraulics studying & applying on flaring gate piers of Ankang hydropower [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,1987,18(9):11-15. (in Chinese)

[7] 尹进步.乌江索风营水电站招标设计阶段水工水力学模型补充试验报告[R].陕西杨凌:水利部西北水利科学研究所实验中心,2003.
Yin J B. Wujiang Suofengying hydropower hydraulic model study report in the period of invite tenders designing [R]. Yangling, Shaanxi: Northwest Hydrotechnical Research Institute Experiment Centre MWR,2003. (in Chinese)

[8] 韩立.RCC重力坝台阶溢流面采用宽尾墩联合消能工专题研究报告[R].北京:北京国电水利电力工程有限公司,2006.
Han L. Special study report on united dissipator with RCC stepped spillway dam surface and flaring gate piers [R]. Beijing:Beijing National Hydro-electricity Ltd,2006. (in Chinese)

[9] 尹进步,梁宗祥,龚红林.X 宽尾墩应用与发展的试验研究[J].水力发电学报,2007,26(4):36-39.
Yin J B,Liang Z X,Gong H L. Experimental study on application & development of X type flaring gate piers [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2007,26(4):36-39. (in Chinese)

[10] 杨敏,滕显华,任红亮,等.阶梯溢流面的几个水力学问题[C]//泄水工程与高速水流 1998 年版.长春:吉林科学技术出版社,1998.
Yang M,Qi X H,Ren H L,et al. Several hydraulics problem on stepped spillway [C]//Discharge engineering & high velocity flow 1998. Changchun:Jilin Science Publishing House,1998. (in Chinese)