

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2008. 06. 022

阶梯溢洪道的研究现状及展望

王承恩 张建民 李贵吉

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 四川 成都 610065)

摘要 :分别从流态分类、流场特性、压力特性、消能率以及影响消能率的因素等方面对前人研究阶梯溢洪道的成果进行归纳和总结。指出目前阶梯溢洪道研究中存在的问题及发展方向。

关键词 :阶梯溢洪道 ;流态 ;流场特性 ;压强特性 ;消能率

中图分类号 :TV651.1 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2008)06-0089-06

Trends of current research on the stepped spillway//WANG Cheng-en ,ZHANG Jian-min ,LI Gui-ji(*State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering , Sichuan University , Chengdu 610065 ,China*)

Abstract :This paper reviews and summarizes the achievements of research on aspects of the stepped spillway such as the flow classification , flow pattern characteristics , energy dissipation , influential factors of energy dissipation , etc. Some current problems and further studies on the stepped spillway research are also discussed.

Key words :stepped spillway ; flow pattern ; flow pattern characteristics ; pressure intensity ; energy dissipation

阶梯在水利工程中的应用历史悠久。因其底部加糙、水流的横向旋滚、掺气及剧烈的紊动增强了消能效果。某些设置了阶梯后消能效果较好的工程 ,能减小部分消能设施的尺寸 ,甚至取代其他部分消能设施(如水垫塘、消力池等) ,节省了工程投资。随着碾压混凝土技术的发展 ,它的优点更加突出 ,能加快施工进度、缩短工期、节约成本 ,并且施工方便 ,建成后还便于检修和修复。

目前阶梯溢洪道应用于许多工程中 ,世界上已建成的 RCC 阶梯式溢洪道有 20 多座 ,典型工程实例如表 1 所示 ,最早追溯到公元前 1300 年希腊人在 Akarnania 修建的土质溢流堰。美国在 1986 年利用 RCC 技术在 Monksville Dam 上修建了第一个阶梯溢流坝。1987 年美国上静水坝(Upper Still Water Dam)上阶梯溢洪道的成功修建和运行 ,使阶梯溢洪道的

表 1 阶梯溢洪道典型工程实例

工程名称	坝高/ m	最大单 宽流量/ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	坡度	阶梯高度/ m	坝 型
上静水坝	61	11.6	0.6/0.3	0.61	RCC 坝
布尔东峡	26	55	0.9	1.2	RCC 坝
百色水电站	130	203	0.8	0.9	Y 形宽尾墩 RCC 坝
毛儿盖水电站	147	72	0.22/0.26	2	
鱼背山水库	70	100.8	0.33	2	混凝土面板堆石坝

注 :毛儿盖水电站设前置掺气坎。

修建和研究逐渐成为世界水利的热点。中国从 20 世纪 90 年代开始研究并建成阶梯溢洪道 ,具有代表性的工程如百色水电站、大朝山水电站、丹江口水库、水布垭水库、鱼背山水库等。

随着对阶梯溢洪道实际工程应用研究和基础研究的逐步深入 ,人们对它的认识更加具体和详细。通过大量的试验 ,总结了流态的分类 ,利用先进的测量仪器和数值模拟方法 ,研究了流场和压强特性 ,同时也得出了一些计算消能率的经验公式。以目前的认识水平 ,在阶梯消能工的单宽流量大于 $50 \text{ m}^2/\text{s}$ 的大流量和高水头情况下 ,为了避免阶梯溢洪道可能因为消能率下降、通气困难等原因发生空蚀破坏 ,部分学者引入了一些辅助的消能工与阶梯相结合 ,例如 ,将掺气分流墩与阶梯相结合 ,将宽尾墩与阶梯相结合 ,以及在阶梯前设置通气孔和前置掺气坎等。通过这些消能工的联合使用 ,增大了单宽流量 ,提高了阶梯的应用范围。研究表明 ,在适当位置设置掺气设施能避免大流量时前几级阶梯被破坏的危陉^[1-3]。

1 国内外研究现状

1.1 流态

阶梯溢洪道的水流流态反映了水流的水力特性 ,流态不佳直接会对坝体和边墙产生不利影响。

基金项目 :国家自然科学基金(50479062) ,国家重点基础研究发展计划(973 项目)(2007CB714105)
作者简介 :王承恩(1984—) ,男 ,四川通江人 ,硕士研究生 ,从事水工水力学研究。E-mail :chengenlining@163.com

一般来说阶梯溢洪道上水流分为 3 类:滑行水流 (skimming flow)、过渡水流 (transition flow) 和跌落水流 (nappe flow)。尽管没有形成判别流态的统一公式,但是对这 3 种流态的定义大多叙述为:当水流流过阶梯表面时,各阶梯内全部被水充填,没有空腔存在,并在各阶梯隅角和主流之间形成一个横轴旋涡,靠近主流处旋涡旋转方向和主流流动方向一致,这种水流称为滑行水流;在各阶梯隅角与主流之间总是有一个近似三角形的空腔存在,空腔下为一近似梯形静水池,流股出现较大的弯曲,称为跌落水流;处于滑行水流和跌落水流之间,在一些阶梯内总是有类似跌落水流的三角形空腔形成,而在另一些阶梯内总是有类似滑行水流的横轴旋涡形成,并且这 2 种形态沿阶梯向下游交替存在于阶梯表面与主流之间,定义为过渡水流。

20 世纪以前,流态的分类和判别标准各异,差距很大。1990 年 Rajaratnam^[4]提出,若坡度 $i = 0.37 \sim 0.67 = \sin \theta = h / \sqrt{h^2 + l^2}$ (θ 为坡角, h 为阶梯高度, l 为阶梯水平长度),当 $y_c / l > 0.8$ 时为滑行水流,当 $y_c / l < 0.8$ 时为跌落水流 (y_c 为临界水深)。1996 年 Peyras 等^[5]认为流态分为小流量和水浅时的完全水跃型跌流水舌和部分发展的跌流水舌 (也叫部分跌流水舌)。Houston 等^[6]认为,对于小流量而言水流逐级跌落,大流量时的理想流动条件是整个流动强烈掺气,出现“白水”,形成近似均匀流的情况。Chamani 等^[7]于 1999 年提出了滑行水流的下限经验公式:

$$\frac{h}{l} = \sqrt{0.89 \left[\left(\frac{y_c}{h} \right)^{-1} - \left(\frac{y_c}{h} \right)^{-0.34} + 1.5 \right]} - 1 \quad (1)$$

最近几年,流态的分类和判别标准逐渐一致。2001 年 Chanson^[8]提出了各流况的临界经验公式:

$$\text{滑行水流下限} \quad \frac{y_c}{h} = 1.2 - 0.325 \frac{h}{l} \quad (2)$$

$$\text{跌落水流上限} \quad \frac{y_c}{h} = 0.89 - 0.4 \frac{h}{l} \quad (3)$$

适用的坡角 θ 的范围为 $2.86^\circ \leq \theta \leq 59.5^\circ$ 。2001 年 Ohtsu 等^[9-10]经过系统试验也提出各流况的临界公式:

$$\text{滑行水流下限} \quad \frac{h}{y_c} = 1.16 (\tan \theta)^{0.165} \quad (4)$$

$$\text{跌落水流上限} \quad \frac{h}{y_c} = 1.3 + 0.57 (\tan \theta)^3 \quad (5)$$

适用范围为 $5.7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$, $Re \geq 2.0 \times 10^4$, $B/y_c \geq 5.0$, 其中 B 为宽度, $\tan \theta = h/l$ 。

2005 年田嘉宁^[11]认为,当 $5.7^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 时各流况的经验公式为

$$\text{滑行水流下限} \quad \frac{y_c}{h} = \frac{1}{1.206 (\tan \theta)^{0.187}} \quad (6)$$

$$\text{跌落水流上限} \quad \frac{y_c}{h} = \frac{1}{0.54 (\tan \theta)^{0.9} + 1.3} \quad (7)$$

由以上各公式绘得图 1,由图 1 可见滑行水流和跌落水流的分类曲线近似平行,且临界水深与阶梯高度的比值与坡度成反比关系,当阶梯高度一定时,阶梯长度增大,临界水深也增大。根据以上各公式及实验数据,得出 1 组更准确的流况分类曲线。

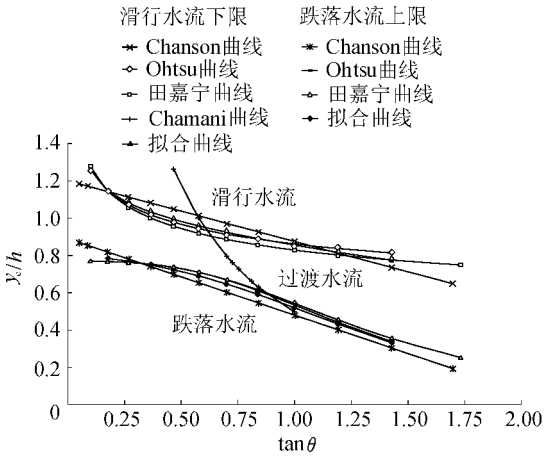


图 1 各公式的流况分类区域比较

1.2 流场特性

流场因其能反映水流特性,在高速水流的研究中备受关注。但以往受流速较大、掺气剧烈、仪器测量困难等的影响,对阶梯溢洪道的流场研究较少。随着科学技术的发展,尤其是数值计算技术的发展,部分学者开始对流场进行数值模拟研究。

郑阿漫^[3]通过模型实验利用毕托管对阶梯溢洪道上的流速进行测量,得出以下结论:同一测量断面处流速随着水深的增大而增大,受表面张力的影响,水流表面流速有减小的趋势;光滑斜坡段流速沿程增大,阶梯段流速沿程减小。杨庆^[12]利用 LDV (laser doppler velocity) 对滑行水流未掺气水流进行了测量,指出在同一流量下,随着阶梯的下移,旋滚强度增大;速度越大水流自身的紊动能也越大。Amador 等^[13]利用 PIV (particle image velocimetry) 对阶梯溢洪道上滑行水流未掺气区域的流速进行了测量,对比了阶梯和光滑溢洪道平均流速和紊流强度分量,溢洪道的表面情况可以改变紊动能的产生过程,反映在平均流速、雷诺应力等紊动特性上。阶梯边缘内的区域被认为是紊动产生的区域,该区域到阶梯隅角中心的最大平均流速是逐渐减小的。

计算机的应用和数值方法的发展给阶梯溢洪道的研究提供了有利条件。廖华胜等^[14]首次利用数值模拟的方法对阶梯溢洪道进行研究。陈群^[15]利用数值模拟方法对阶梯溢洪道进行了深入研究,通

过计算发现沿坡面法线方向滑行水流的流线由疏变密,表明滑行水流速度沿水深方向由小变大,速度梯度由大变小。阶梯的隅角内有顺时针旋涡产生,旋涡中心的速度为零,向四周旋转速度逐渐增大,但是涡旋的速度比滑行水流流速小,滑行水流的方向基本与坡面平行。陈香菊等^[16]引入水气两相混合流,采用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型进行计算,计算结果与试验值十分吻合。她指出在阶梯旋涡中心处,由于卷吸空气消耗能量,导致速度削减,靠近大气面速度又逐渐增加。当穿过旋涡中心截取断面时速度呈现由大变小再变大的过程,在接近空气界面时速度达到最大值。

尽管采用了比较先进的仪器和手段,但是大多数研究仍停留在滑行水流上,对临界水流和跌落水流的流场研究较少,并且实验的方法和手段还有待进一步发展,毕托管、LDA 及 PIV 对掺气区域测量得尚不够准确,有些区域无法测量,而旋桨式流速仪对流场扰动很大,流速方向不准确。因此,流场测量仍是研究的热点和难点。

1.3 压强特性

阶梯溢洪道可以利用坡面阶梯消耗部分能量,然而在大流量、高水头、高流速的工况下,过大的阶梯体形却又是引起建筑物空蚀破坏的直接原因。同时,高速水流的紊动和掺气会在阶梯上产生很大的脉动,因此要对阶梯溢洪道压强的研究给予足够重视。

Ohtsu 等^[17]和 Yasuda 等^[18]测量了跌落水流和滑行水流在溢洪道内的时均压力。相同的体形,上游来流量增大,沿程的时均压强也增大。Sanchez^[19]和 Matos 等^[20]对滑行水流中阶梯水平面和竖直面的压力进行了测量,测得在距离水平阶梯面 $1/3$ 高以上到竖直面顶部范围内出现负压,最大负压出现在阶梯竖直面顶部。田嘉宁^[11]通过大量实验指出,跌落水流时,阶梯水平面上的时均压强均表现为正值,在靠近阶梯顶部竖直面上的时均压强可能出现负值,滑行水流时,阶梯水平面上的时均压强也为正值,在竖直面顶部仍可能出现负压,而且流量小时负压大,流量大时负压小,但差别较小,并且随着坡度的增加负压也增大。李布雳^[21]认为在各种水流流态下,无论是阶梯水平面还是竖直面,沿程阶梯面时均压强均出现大小值交替的现象。时均负压全集中在阶梯竖直面凸角附近,阶梯水平面上均为正压,且与水流的冲击有关,主要集中在阶梯水平面凸角附近。随着流量的增大,阶梯竖直面上的负压区范围减小,但负压值增大,阶梯水平面上的正压值也随之增大。

李布雳^[21]认为脉动压强强度沿程大小值间隔出

现,阶梯水平面凸角处的脉动压强强度均大于阶梯面上其他地方的脉动压强强度,跌落水流在水趺跌落处的阶梯面上的脉动压强强度大于过渡水流和滑行水流。阶梯水平面上的脉动压强,在跌落水流和过渡水流流态下随着坡度的增大而增大,而在滑行水流流态下,随着坡度的增大而有一定程度的降低。

1.4 消能

1.4.1 消能率的计算

计算阶梯溢洪道的消能率有 2 种公式:一是利用上下游能量守恒原理,用水流经过阶梯溢洪道的能量减小与上游总能量之比计算消能率;二是利用相对消能率的概念,计算阶梯溢洪道相对于光滑渠道的消能率。

Chamani 等^[22]引入了阶梯水头损失比率 α 的概念(α 通过试验估算),通过对 N 个阶梯求和以后,得出计算跌落水流的经验公式:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 1 - \frac{(1 - \alpha)^N \left[1 + 1.5 \left(\frac{y_c}{h} \right) \right] + \sum_{i=1}^{N-1} (1 - \alpha)^i}{N + 1.5 \left(\frac{y_c}{h} \right)} \quad (8)$$

式中 ΔE 为能量损失; E_0 为上游的总能量; N 为阶梯个数; $\alpha = a - b \lg \left(\frac{y_c}{h} \right)$, 其中 $a = 0.3 - 0.35h/l$, $b = 0.54 + 1.72h/l$ 。

Rajaratnam^[4]则在给出的计算滑行水流的公式中使用了阶梯面摩擦系数 C_F 和光滑面摩擦系数 C_f :

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{1 - \alpha + \frac{Fr^2}{2} \frac{A^2 - 1}{A^2}}{1 + \frac{Fr^2}{2}} \quad (9)$$

式中: Fr 为光滑溢洪道坡脚处的弗劳德数; $A = (C_F/C_f)^{1/3}$ 。

Chanson^[23]于 1994 年提出了关于阶梯溢洪道的较完整的消能率计算公式。对于滑行水流:

开敞式溢洪道

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{1/3} \cos \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{-2/3}}{\frac{2}{3} + \frac{H_{\text{dam}}}{y_0}} \quad (10)$$

闸控溢洪道

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{1/3} \cos \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{-2/3}}{\frac{H_{\text{dam}} + H_0}{y_0}} \quad (11)$$

对于跌落水流:

开敞式溢洪道

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{0.54 \left(\frac{y_0}{h} \right)^{0.275} + 1.715 \left(\frac{y_0}{h} \right)^{-0.55}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{\text{dam}}}{y_0}} \quad (12)$$

闸控溢洪道

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{0.54 \left(\frac{y_0}{h} \right)^{0.275} + 1.715 \left(\frac{y_0}{h} \right)^{-0.55}}{H_{\text{dam}} + H_0} \quad (13)$$

式中: ΔH 为水头损失; $H_{\max}$ 为总水头; H_{dam} 为泄槽进口到下游坝址的距离; f 为非掺气水流的摩擦因数; y_0 为进口收缩断面水深; H_0 为堰顶水头。

汝树勋等^[24]在计算消能率时考虑了掺气的影响,得到

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{\left(\frac{v_c^2}{2g} - \frac{v_T^2}{2g} \right)}{\frac{v_c^2}{2g}} \quad (14)$$

式中: v_c 为光滑溢流坝趾断面平均流速; v_T 为阶梯面坝址流速。

万德华^[25]在总结前人实验数据的基础上得出计算阶梯溢洪道跌落水流消能率的公式:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{1}{1 + c \frac{y_c}{Z}} \quad (15)$$

式中: Z 为大坝高度; $c = \left(\frac{9}{8c_d^2} \right)^{1/3}$, 其中 c_d 为流量系数, 其值为 0.738 ~ 0.64, 则 c 值为 1.273 ~ 1.400。

田嘉宁^[11]通过理论分析推导出在各坡度下滑行水流和跌落水流都适用的一个经验公式:

$$\frac{\Delta h_1}{h_{\max}} = \frac{\frac{h_{\text{dam}}}{y_c}}{A + B \frac{h_{\text{dam}}}{y_c}} \quad (16)$$

其中

$$A = \begin{cases} 3.00175 + 0.06575\theta & 5.7^\circ \leq \theta \leq 30^\circ \\ 1(0.12393 + 0.00017765\theta) & 30^\circ < \theta \leq 60^\circ \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} \theta(0.26813 + 1.0079\theta) & 5.7^\circ \leq \theta \leq 30^\circ \\ 0.9475 + 0.0012785\theta & 30^\circ < \theta \leq 60^\circ \end{cases}$$

式中: Δh_1 为跃前断面能量损失; $h_{\max}$ 为上游断面总能量; h_{dam} 为泄水建筑物高。

万德华、田嘉宁、Chanson 的消能率计算公式比较见图 2。由图 2 和上述计算公式可知, 阶梯溢洪道的消能率与相对坝高成递增关系, 在相对坝高小于 20 时, 消能率受相对坝高影响很大, 而当相对坝高为 40 以后, 相对坝高增加, 消能率增加不大。

1.4.2 影响消能率的因素

影响阶梯溢洪道消能率的因素主要有单宽流

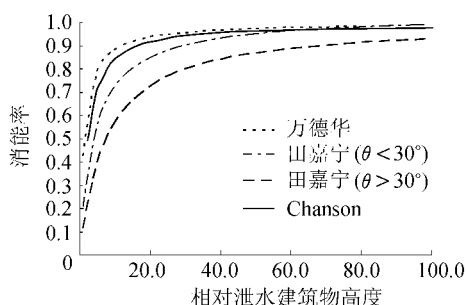


图 2 万德华、田嘉宁与 Chanson 计算消能率公式比较量、水流流态、溢洪道的坡度、阶梯的高度和长度, 阶梯的数量、溢洪道的断面尺寸、临界水深等。

Christodoulou^[26]对阶梯为中等高度的阶梯溢洪道进行了模型试验, 指出消能率不仅与临界水深 y_c 和阶梯高度 h 有关, 也与阶梯个数 N 有关。Stephenson^[27]通过模型试验分析了阶梯尺寸对消能率的影响, 指出当下游坡较陡、阶梯上的水深为临界水深的 1/3 时, 能量的消耗会增大, 因而可通过增大阶梯尺寸来增加消能效果。Peyras^[5]认为消能率随坡度变缓而增大。Yasuda^[18]的试验结果证明, 在滑行水流条件下, 消能率随坡度增大而下降。耶尔德兹等^[28]指出对于滑行水流, 当 $\theta < 51.3^\circ$ 时能量的消散随着台阶的增加而增大, 当 $\theta = 60^\circ$ 时阶梯高度对消能影响不大。当阶梯高度较小时, 坡度变陡, 消能率减小, 但是当阶梯高度较大时, 坡度对消能率的影响较小。

蒋晓光^[29]通过试验和前人的试验数据得出了小的阶梯高度适合小的单宽流量, 消能率高, 大的阶梯高度适合大的单宽流量, 但是当单宽流量增大到一定值时消能率有显著下降的趋势。陈群等^[30]通过数值模拟得出了单宽流量增大后坝面的消能率明显降低的结论。同时指出为提高消能率, 除了采用改变阶梯高度、放缓坝坡等措施外, 应设法增强坝面水流的紊动, 使紊动耗散率增大。田嘉宁^[11]认为阶梯溢洪道的消能率随相对泄水建筑物高度 h_{dam}/y_c 的增大而增大, 随泄槽坡度的增大而减小。当相对泄水建筑物高度、泄槽坡度一定时, 阶梯个数对消能率的影响较小。

许多学者将滑行水流、过渡水流和跌落水流的消能率进行了比较。Chamani^[31]指出跌落水流的消能率大于滑行水流的消能率; Matos^[32]进一步指出, 当坡度相同时, 随相对坝高的增加, 两者的消能率逐渐趋于一致; 而 Chanson^[33]指出对于较短的溢洪道, 跌落水流的消能率要比滑行水流的大, 但当溢洪道较长时, 滑行水流的消能率却大于跌落水流的消能率; 田嘉宁^[34]则认为, 对于一定的 h_{dam}/y_c , 滑行水流、过渡水流和跌落水流的消能率相差

很小。

2 展 望

经过数代人的研究,人们对阶梯溢洪道的认识逐步深入。从单一的模型试验扩大到利用数值模拟方法进行研究,从常规的实验仪器发展到使用 PIV, LDA 等先进测量仪器对阶梯溢洪道进行研究,从差异较大的经验公式逐步发展成为统一的、完整的、差距较小的公式。

尽管如此,阶梯溢洪道的研究还存在着较多的问题 ①阶梯溢洪道的许多公式仍是半经验性的,还没有统一、公认的计算公式。②阶梯溢洪道的水深、流速和掺气的准确测量仍是难点,需要进一步改进测量仪器,完善测量方法。③流态的划分仍需研究,滑行水流、过渡水流、跌落水流的范围有待准确界定。④高水头、大流量工况下阶梯溢洪道容易发生空蚀破坏,限制了阶梯溢洪道的应用。在这种工况下如何寻求更多的消能工与阶梯联合消能以扩大阶梯应用范围有待解决。⑤目前许多研究仅停留在实验现象和工程应用上,微观实质和机理性的研究不够深入。例如对于阶梯上的掺气,气泡是如何进入阶梯隅角的,在隅角内是如何运动的,这些尚不清楚。⑥阶梯溢洪道上容易形成强的冲击波、水力波动以及水翅,这些对边墙影响很大,而这方面的研究很少。⑦阶梯水道在其他领域的运用有待扩大,如将阶梯应用于人工观赏水道、水处理厂中进行水气交换有机质挥发的水道。

参考文献:

[1] 张挺,伍超,卢红,等. X 型宽尾墩与阶梯溢流坝联合消能的三维流场数值模拟[J]. 水利学报, 2004(8):15-20.

[2] 郭军,刘之平,刘断广,等. 大朝山水电站宽尾墩阶梯式坝面泄洪水力学原型观测[J]. 云南水力发电, 2002, 18(4):16-20.

[3] 郑阿漫. 掺气分流墩台阶式溢洪道水力特性试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2001.

[4] RAJARATNAM N. Skimming flow in stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1990, 116(4):587-591.

[5] PEYRAS L, ROYET P, DEGOUTTE G. Flow and energy dissipation overstepped gabion weirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1992, 118(5):707-717.

[6] HOUSTON K L, RICHARDSON A T. Energy dissipation characteristics of a stepped spillway for an RCC dam[C]//Proc Intl Symp on Hydraulics for High Dams. Beijing:IAHR, 1988:91-98.

[7] CHAMANI M R, RAJARATNAM N. Characteristics of skimming flow over stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, 125(4):361-368.

[8] CHANSON H. A transition flow regime on stepped spillways the facts[C]//Proceeding of 29th IAHR Congress. Beijing:Tsinghua University, 2001:490-498.

[9] OHTSU I, YASUDA Y. Characteristics of flow condition on stepped channel[C]//Proceeding of 27th IAHR Congress. San Francisco:IAHR Publications, 1997:583-588.

[10] OHTSU I, YASUDA Y, TAKAHASHI M. Discussion of onset of skimming flow on stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2001, 127(6):522-524.

[11] 田嘉宁. 台阶式泄水建筑物水力特性试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2005.

[12] 杨庆. 阶梯溢流坝水力特性和消能机理试验研究[D]. 成都:四川大学, 2002.

[13] AMADOR A, der GRAAF G V. Characterization of the flow field in a stepped spillway by PIV[C]//Proc 12th Symp Applications Laser to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal:Institute of Physics Publishing, 2004:1-10.

[14] 廖华胜,汝树勋,吴持恭. 阶梯溢流坝水力特性实验研究[C]//水利部松辽水利委员会科学研究院. 泄水工程与高速水流论文集. 成都:成都科技大学出版社, 1994:95-97.

[15] CHEN Qun. Numerical simulation for the stepped spillway overflow with turbulence model[J]. Journal of Hydrodynamics Ser B, 2002(2):58-63.

[16] CHENG Xiang-ju, LUO Lin. Two phase flow simulation of aeration on stepped spillway[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(7):626-630.

[17] OHTSU I, YASUDA Y. Characteristics of flow condition on stepped channels[C]//Proceeding of 27th IAHR Congress. San Francisco:ASCE, 1997:583-588.

[18] YASUDA Y, OHTSU I. Flow resistance of skimming flow in stepped channels[C]//Proceeding of 28th IAHR Congress. Graz Austria:ASCE, 1999(CD-ROM).

[19] SANCHEZ M. Pressure field in skimming flow over a stepped spillway[C]//Proc Intl Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways. Rotterdam:Balkema, 2000:137-145.

[20] MATOS J, QUINTELA A. Air entrainment and safety against cavitation damage in stepped spillways over RCC dam[C]//Proc Intl Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways. Rotterdam:Balkema, 2000:69-76.

[21] 李布雳. 台阶式溢流坝上压强特性的试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2005.

[22] CHAMANI M R, RAJARATNAM N. Jet flow on stepped spillway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1994, 120(2):254-259.

[23] CHANSON H. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes[J]. Journal of Hydraulic Research, 1994, 32(2):213-218.

[24] RU Shu-xun, TANG Chao-yong, PAN Rui-wen et al. Stepped dissipator on spillway faces[C]//Proceedings of Ninth Congress of Asian and Pacific Division of the International Association for Hydraulic Research:Vol 2. Singapore:IAHR, 1994:193-200.

[25] 万德华. 梯式溢洪道上水流的形态及其水力计算[J]. 人民长江, 1996, 27(10):39-41.

[26] CHRISTODOULOU G C. Energy dissipation on stepped spillway[J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE , 1993 , 119(5) : 644-651.

[27] STEPHENSON D. Energy dissipation down stepped spillways [J]. Water Power and Dam Construction , 1991(9) : 27-30.

[28] 耶尔德兹 D 科斯 I. 台阶式斜槽溢洪道的水力特性[J]. 蒯圣堂 , 译. 水利水电快报 , 1999 , 20(9) : 1-4.

[29] 蒋晓光. 阶梯式溢流消能浅析[J]. 泄水工程与高速水流 , 1992(4) : 37-40.

[30] 陈群 , 戴光清. 影响阶梯溢流坝消能率的因素[J]. 水力发电学报 , 2003(4) : 96-103.

[31] CHAMANI M R , RAJAJRATNAM N. Discussion about jet flow on stepped spillways [J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE , 1995 , 121(5) : 446-448.

[32] MATOS J , QUINTELA A. Discussion about jet flow on stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE , 1995 , 121(5) : 443-444.

[33] CHANSON H. Discussion about jet flow on stepped spillways [J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE , 1995 , 121(5) : 441-442.

[34] 田嘉宁. 台阶式溢洪道各流况的消能特性[J]. 水利学报 , 2003(4) : 35-39.

(收稿日期 2008-04-21 编辑 骆超)

(上接第 78 页)

对水利投资与国民经济产出变量的绝对量、相对量进行相关分析 , 计算结果如表 6 所示。

表 6 水利投资与国民经济指标的相关系数

指 标	水利投资与 各指标的 相关系数	水利投资增长率与 各指标增长率 的相关系数
水利投资(1950 ~ 1998 年)	1.000	1.000
TPS(1952 ~ 1991 年)	0.753	0.563
GDP(1978 ~ 1998 年)	0.955	0.445
GDP(1998 ~ 2005 年)	0.690	0.437

由表 6 可知 , 水利投资与 GDP 呈强相关性 , 表明水利财务效益虽然不高 , 但作为基础产业和基础设施 , 其对 GDP 的发展至关重要。水利投资与 GDP 的强相关性也验证了水利的基础产业和基础设施地位。进入 21 世纪 , 随着经济总量的高速增长 , 水利投资增长应趋于稳定^[4]。

4 结 论

- a. 水利投资具有投资巨大、效果长期、投入边际成本递增、效益滞后等技术经济特点。
- b. 水利投入具有较明显的周期性 , 这种周期性除与国家的经济政策有关 , 还与自然灾害严重程度紧密相关。

- c. 与经营性行业投资来源基本是由利润机制起驱动作用不同 , 具有社会公益性和效益外部性的水利业 , 其投资力度主要由国家产业政策起驱动作用。
- d. 水利与国民经济的关系是局部与整体的关系 , 水利投资与国民经济产出存在着较好的量化关系 , 水利投入与国民经济产出的弹性分析和水利与国民经济其他产业部门之间的关联度分析 , 应充分考虑水利对国民经济及其他产业的前导影响 , 加大水利投入力度 , 提高水利在国民经济产业结构中的基础地位。
- e. 水利投资与 GDP 的强相关性验证了水利的基础产业和基础设施地位。

参考文献 :

[1] 王浩 , 马静. 水利与国民经济协调发展研究[J]. 中国水利 , 2006 , 5(8) : 73-75.

[2] 王才君 , 邵东国. 水利投资经济效益的弹性分析模型研究[J]. 中国农村水利水电 , 2002 , 44(7) : 31-33.

[3] 乐建红 , 邱忠恩. 水利投入与国民经济发展适应关系分析[J]. 水利经济 , 2002 , 20(9) : 45-50.

[4] 苏明中. 水利投资与宏观经济发展关系研究[J]. 理论与实践 , 2007 , 50(1) : 86-88.

(收稿日期 2007-11-01 编辑 骆超)

(上接第 83 页)

[40] 毛春梅. 农业水价改革与节水效果的关系分析[J]. 中国农村水利水电 , 2005(4) : 2-4.

[41] 周春应 , 章仁俊. 农业需水价格弹性分析模型[J]. 节水灌溉 , 2005(6) : 24-26.

[42] 陈丹. 南方季节性缺水灌区灌溉水价与农民承受能力研究[D]. 南京 : 河海大学 , 2007.

[43] 廖永松 , 鲍子云 , 黄庆文. 灌溉水价改革与农民承受能力[J]. 水利发展研究 , 2004(12) : 29-34.

[44] 谢新民 , 于福亮 , 裴源生 , 等. 宁夏河套灌区可持续发展的水价调整方案[J]. 水利水电科技进展 , 2003 , 23(2) :

13-16.

[45] 付洪明 , 马季 , 宋卫. 尼尔基水利枢纽工程供水对象水价承受能力分析[J]. 东北水利水电 , 2006 , 24(1) : 64-66.

[46] 沈大军 , 阮本清. 黄淮海流域灌区农民灌溉水费支出的调查报告[J]. 中国水利 , 2001(4) : 84-85.

[47] 张春玲 , 阮本清 , 罗建芳. 我国农业水价管理现状分析[J]. 沈阳农业大学学报 : 自然科学版 , 2003 , 34(3) : 207-210.

[48] 李晓鑫 , 李刚 , 冯建维. 农业水价改革中的悖论[J]. 水利天地 , 2005(6) : 24-26.

(收稿日期 2008-04-10 编辑 骆超)