

交 流 教 材

水工建筑物

(专 题 部 分 I)

水工结构教研室

武汉水利电力学院

PDG

交 流 教 材

水 工 建 筑 物

专 题 部 分 I

水 工 结 构 教 研 室

主 编 王 宏 硕

副主编 翁 情 达

武 汉 水 利 电 力 学 院

说 明

本教材包括基本和专题两部分，主要是为水利水电工程建筑专业本科编写的，关于编写本教材的指导思想和有关的几个原则问题，见第一册《基本部分》中全书的前言。本册为第二册，即《专题部分 I》，共收入六个专题，分为六章；另有第三册《专题部分 II》，共收入五个专题。本册中的第一章由翁情达执笔，王宏硕、胡诚义负责初审；第二章由陈开道执笔，王宏硕、胡诚义负责初审；第三章由王德蜀执笔，陆述远、李新民负责初审；第四章由王开治执笔，李新民、张学勤负责初审；第五章由陈介贤执笔，沈保康、廖孟扬负责初审；第六章由吴沛寰执笔，陈介贤、刘铁男负责初审。全部六个专题由王宏硕、翁情达负责最后审查并修改定稿；周瑾如负责组织编写工作，段亚辉、吴学锋负责编辑加工和校核工作，教研室还有一些同志参加了部分校核工作。

由于我们的水平有限，在教材中编写专题又是第一次尝试，在内容选择、体例结构等方面都缺乏经验，错误和不当之处在所难免，文字叙述也不够精练，诚恳地希望同行和广大读者给予批评指正，以便于改进和提高。

目 录

第一章 泄水建筑物的高速水流问题

第一节 概述	(1)
第二节 高速水流的脉动	(1)
第三节 空穴、空蚀问题	(9)
第四节 掺气	(36)
第五节 泄水孔的通气量	(42)
第六节 冲击波	(45)

第二章 泄水建筑物下游的消能防冲

第一节 消能型式选择与模型试验	(58)
第二节 挑流消能	(67)
第三节 面流及库流消能	(83)
第四节 底流消能	(98)

第三章 拱坝坝座稳定分析

第一节 概述	(104)
第二节 拱坝坝座稳定分析的刚体极限平衡法	(110)
第三节 拱坝坝座稳定分析的有限单元法	(124)
第四节 改善拱坝坝座稳定性的工程措施	(134)

第四章 水工建筑物的抗震计算

第一节 概述	(140)
第二节 单自由度弹性体系的地震反应	(142)
第三节 多质点弹性体系的自由振动	(151)
第四节 多质点弹性体系的水平地震反应	(160)
第五节 水库有水时的抗震计算	(169)
第六节 抗震结构和工程措施	(177)

第五章 水工建筑物中的喷锚支护

第一节 概述	(180)
第二节 喷锚支护的型式和构造	(185)
第三节 喷锚支护的设计	(194)
第四节 水工隧洞中喷锚支护中的几个问题及设计实例	(205)

第六章 水工建筑物的结构模型试验研究

第一节 概述	(214)
第二节 相似原理及模型设计	(217)
第三节 模型材料	(222)
第四节 模型加荷与量测	(229)
第五节 线弹性应力模型试验	(237)
第六节 结构模型破坏试验	(241)
第七节 地质力学模型试验	(244)
第八节 动态结构模型试验简介	(245)
第九节 试验成果整理与误差分析	(246)

第一章 泄水建筑物的高速水流问题

第一节 概 述

随着高坝建设的发展,泄水建筑物的实际流速愈来愈高。这样不仅涉及到一般的水力问题,而且还出现一系列的特别水流现象和问题,并往往是建筑物能否正常运行的关键。如高速水流对建筑物边界作用力的脉动及其可能引起轻型结构(如轻型坝及闸门)的振动与破坏问题;局部低压区发生空穴,引起建筑物空蚀的问题;水流挟带空气引起水气混合流动及其对过水断面的设计与消能产生影响的问题;泄槽中出现的冲击波问题以及与这些问题紧密相关的泄水建筑物体型设计问题等。

迄今尚无区分高速与低速的明确界限值。根据野外观测和试验室的研究资料,当流速超过16~18米/秒时,甚至只超过10~15米/秒时,就开始发现一些特殊水流现象,如上述的压力脉动、空穴与空蚀、挟气和冲击波等。一般更为恰当的办法是根据个别问题的性质,采用无量纲数据来加以判定。如佛氏数(Fr)、雷诺数(Re)、挟气指数(β)、空穴指数(σ)等。前两者早已熟悉,后两者将在下述各节中加以介绍。

高速水流现象的基本特征是:

(1)紊动特别强烈,致使动水压强产生强烈脉动,表面容易波动,且不够稳定,挟气现象得到发展,空穴现象容易形成。

(2)水流质点的惯性特别大,因此惯性通常起主导作用,粘性阻力作用一般不显著。

(3)水流受边界的作用特别敏感,冲击波、挟气、空穴等现象,都易受边界与局部扰动的影响。以后可以看到,高速水流问题的解决,在很大程度上有赖于适宜的几何边界条件的采用。

高速水流问题是水利事业发展中提出的新课题,至今只有六、七十年的历史,还未总结出比较成熟的经验,理论研究也很不完善,距离妥善解决生产实际中所产生的问题还有一定距离,有待于进一步研究和解决。

第二节 高速水流的脉动

一、概述

水流的脉动产生了紊流,其基本特征为流场内的流速和压力随时间不断变化,对水工建筑物的行水边界产生脉动压力。水流脉动与其内部存在的一系列随机性的旋涡结构有着密切关系。在高速情况下,这些涡体旋转很快,液体质点横向运动很强烈,随之动水压强脉动也十分剧烈。近年来高水头泄水建筑物在运用中观察到不少振动现象,如高压闸门、泄水道、船闸闸首甚至坝体等的振动,因而高速水流脉动问题更引起了人们的关注。研究脉动压强对水工建筑物的影响,就必须求出脉动压强的频率和振幅。

二、脉动压强的性质

本节主要讨论脉动压强问题，但有些地方考虑到习惯用语，有时也把脉动压强称为脉动压力。

从图 1—1 所示的脉动压强的波形图中，可以看出它具有如下一些性质：

1. 脉动压力的随机性

脉动压力是随机性的荷载，很不规则，难以用一般数学公式予以描述，一般要通过模型试验或原型观察，用示波仪记录行水边界的动水脉动压力曲线，用概率分析法及随机数据处理法，求出典型分布曲线，以求得振幅的某些统计特征值。通过分析发现动水脉动压强振幅的变化符合理论正态分布曲线（图 1—2）。动水脉动频率也不规则，也只能用同样方法进行处理。

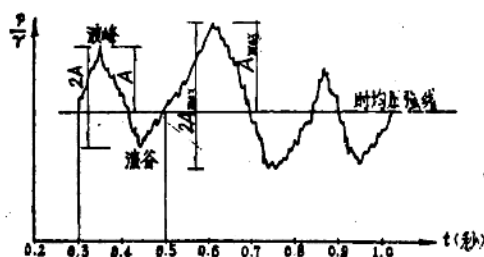


图 1—1 脉动压强波形图

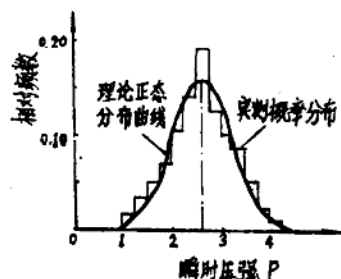


图 1—2 正态分布曲线

2. 大脉动和小脉动

按水流脉动振幅的大小可分大脉动和小脉动两种。小脉动的特点是振幅小而频率大，主要来源于水流的内部随机旋涡的不断产生与衰灭。高速急流区产生的是小脉动，用水柱高表示的脉动压强，虽有可能与时均压强达到同量级，但其绝对值仍是比较小的。大脉动的特点，是振幅大而频率小，主要来源于空气周期性地突然冲入水流低压区、行水边界突然扩大、水跃区大旋涡的摆动以及水面波动等因素。在急流向缓流过渡的水跃区产生的是大脉动，用水柱高表示的压强脉动振幅无论与时均压强比或与时均流速水头比都可达到同量级。所以大脉动具有重要的实际意义，是我们主要的研究对象。

3. 点脉动和面脉动

试验发现，就脉动的受力范围来说，可分为点脉动和面脉动。前者是指建筑物表面个别不大面积上的脉动压强，后者是指建筑物较大面积上（如坝面、消力墩、护坦板等）的脉动压强。在估计空穴等现象会不会发生时，需要知道建筑物表面上个别点处的脉动压强，而在进行护坦的静力计算或溢流坝的振动分析时，则必须确定其上的面脉动压强。

丰满坝的原型观测结果，表明了脉动压强与作用面积大小的关系。该坝在反弧段曾用四种不同直径（ $d = 4、8、30、50$ 厘米）的传感器进行观测，并分析了振幅之比 $2\bar{A}_n/2\bar{A}_{50}$ （ $2\bar{A}_n$ 、 $2\bar{A}_{50}$ 分别表示直径为 n 厘米及 50 厘米时的平均脉动的双倍振幅）与传感器直径之比 d_n/d_{50} 的关系。当传感器面积相差约 150 倍时，振幅相差 3 倍。并发现 d_n/d_{50} 愈小， $2\bar{A}_n/2\bar{A}_{50}$ 愈大。

这主要是由于作用面积大时，不同相位的正负脉动压强有抵消均化的作用。但实测结果也表明， $d = 4$ 厘米与 $d = 8$ 厘米的传感器测得的振幅就无明显差别，亦即两者均在紊动尺度范围之内，均可视为点压强的脉动振幅。

清华大学在乌江渡水电站厂房顶溢流的模型试验中曾用 $d = 0.3$ 厘米和面积为 20×31 平方厘米的两种传感器施测脉动压强，结果表明：在作用面积相差8800倍的情况下，压强脉动振幅相差12倍。也得到类似的规律性。

但脉动压强的点面关系的确定，尚难作出定量分析，一般来说足够小的传感器一般为点脉动压强是可信的。而面脉动压强一般为点脉动压强的 $1/5 \sim 1/10$ 或更小。因此坝面水流的脉动压强是很小的。

三、水流脉动对水工建筑物的影响

1. 增大建筑物的瞬时荷载

由于脉动压强时大时小，瞬时值可以低于也可以高于时均压强。消力池水跃区（特别是水跃区前部）的压强脉动除可能促使空穴产生外，还可能产生可观的正负脉动荷载，影响护坦的安全运行。又如在某泄洪钢管的某一断面曾测到最大脉动压强为时均压强的1.43倍，显然是设计时应该考虑的。

2. 可能引起建筑物的振动

由于脉动压强是时大时小周期性地作用于建筑物上，当强紊动的高速急流通过轻型水工结构，特别是局部开启运行的闸门时，可能迫使结构振动，甚至引起共振。上述泄洪钢管在同一断面上测得压强的频率为12~13次/秒，而钢管自振频率为14~15次/秒，彼此相近可能引起共振，说明脉动压力和建筑物抗振安全之间有着密切的联系。

大连工学院对溪流河溢流拱坝的脉动压力引起振动的试验结果表明，坝顶溢流时，水流所产生的脉动压力将引起坝身振动，振动所引起的应力对坝的安全不会发生显著的影响，但坝身材料在水流脉动作用下的疲劳强度问题需加以研究。

所以对坦护、海漫、溢流厂房顶板、闸门、输水管道以及拱坝等轻型结构，设计时都应考虑是否会因振动引起破坏。

3. 增加空蚀发生的可能性(参见第三节)

此外，对泄水建筑物下游河床的冲刷，脉动压强也起着重要的作用，尤其高速水流作用下，河床岩块的掀起，主要由于不平衡动水压力的瞬间作用。

高速水流压力脉动问题，已成为设计中必须考虑的问题。正确掌握水流脉动压力的规律，有助于更经济地设计水工建筑物，例如在具有充分论证时，轻型水工建筑物可采用较大的单宽流量以及采用轻型闸门，减少护坦厚度等。

四、水流脉动的测量

由于牵涉到非常复杂的水流结构，水流脉动流速和脉动压力，目前尚难进行理论计算，一般只能进行试验研究。试验内容主要是确定在一定的水流和边界条件下，动水脉动流速和压力的分布规律及其对建筑物的影响。

由于水流脉动是随机性的，因此不能用一般的测量仪器，而必须采用惯性小，灵敏度高

的电测仪器。

近年来观测脉动流速的方法主要是使用热线流速仪、高速摄影机和激光流速仪等三种。

热线流速仪是目前国外使用最广和最成熟的测脉动流速的有效工具，其感应头很小，可测到距边壁0.1毫米的点流速。国内也正开始使用。

激光测速仪的优点是测量时对流无干扰，并能深入到边界层内部，测到距边壁0.1毫米处的点流速，是传统的流体力学测量仪器所无法比拟的。但试验时要求槽壁透明，水体清晰，以及水体中要有示踪颗粒等较为苛刻的条件。

高速摄影机的优缺点基本上与上述相同，它能拍照观测肉眼不能快速分辨的脉动流速和空化区的发生发展过程，近来具有克尔盒式快门和移动镜头的各类鼓轮摄影机，使曝光速率加快到高达每秒10张，它是一种昂贵的摄影机，然而已在外国逐渐推广。

水流脉动压强观测的测点一般应布置在边界条件有改变的部位，如闸门底缘、闸门槽、闸门后、闸墩后、鼻坎处、隧洞和泄水管道出口处、溢流坝面、护坦、海漫及其它水流扰动最大的部位等。

五、水流脉动波形图的分析

水流脉动的实测波形图（图1-1）反映了一个随机过程，很不规则。如前所述，在分析资料时，常用概率分析及随机数据处理两种方法求出脉动频率和振幅，以解决它们对泄水建筑物的影响问题。

概率分析法的主要优点是能直观地给出较符合实际的 $2A_{max}$ 或 A_{max} 的数据，方法也较简便，其缺点是：缺乏严格的理论依据，而且存在一定程度的任意性，如大小波的取舍上，频率区间划分的大小上，都没有一定的标准等，使所得结果往往因人而异。近年来由于电子计算机的普遍应用，对水流脉动的处理已较普遍地采用以随机函数理论为基础的随机处理法。

六、泄水建筑物中脉动压强振幅与频率

从振动的观点出发，动水脉动压强对泄水建筑物的动力作用是一个弹性体在随机的干扰力（脉动压强）作用下的强迫振动问题，因此必须知道脉动压强的振幅、频率以及建筑物的自振频率。下面仅就前两者加以阐述，至于建筑物自振频率问题，此处从略。

（一）脉动压强振幅

表征脉动压强振幅的具体指标，有的用统计时段波形图（图1-1）各波的平均振幅 $\bar{A}$ 或平均双倍振幅 $2\bar{A}$ ，有的则用最大振幅 A_{max} 或最大双倍振幅 $2A_{max}$ 。从工程意义出发，动荷载的增大和空穴的发生，决定于瞬时压力的最大振幅，故在压力脉动振幅的分析中，常用最大振幅作为统计特征值。由于最高波峰和最低波谷一般不会出现在同一波上，根据经验大致有：

$$\frac{A_{max}}{2A_{max}} = 0.65 \sim 0.75 \quad (1-1)$$

试验及原型观测资料表明，它与时均流速水头成正比：

$$2A_{max} = \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (1-2)$$

式中 V ——测点处的平均流速;

α ——脉动压强振幅系数。

苏联福米契夫 (М.С.Фотичев) 对光滑边界二元明渠急流试验得出 $\alpha \leq 0.05$, 他又根据第聂伯溢流坝坝面原型观测和一些模型试验资料得出 $\alpha = 0.055$ 。苏联尼奇柏罗维契 (А.Ничпорович) 在1930年于埃里温 (Эриван) 泄槽中进行实验, 当 $Q = 1.54 \sim 6.18 \text{ 米}^3/\text{秒}$, $Fr = 6.15 \sim 8.46$ 时, 在掺气和不掺气水流中, 测得 $\alpha \approx 0.05$ 。此外罗占诺夫等也从溢流坝的模型试验中得出 $\alpha \approx 0.05$ 。

北京水科院李桂芬等根据泄槽试验及原型观测资料得出泄槽的 $\alpha \approx 0.044$, 即二元明渠急流区的最大脉动压强双倍振幅不超过流速水头的 5%。

我国东北勘测设计院科研所得出: 丰满溢流坝反弧段 $\alpha \approx 0.058 \sim 0.1$, 鼻坎段 $\alpha \approx 0.027 \sim 0.108$, 护坦段 $\alpha \approx 0.108 \sim 0.16$ (认为与掺气有关); 大伙房泄槽段 $\alpha \approx 0.027$ 。

压力管道中压力脉动问题往往也较突出, 如有的泄洪钢管 α 可达 0.2, 而在局部水流有急剧变化时则更甚 (如高压闸门下流旋涡区的 α 值则更大)。压力管道压力脉动强烈的主要原因之一, 在于水流中可能带有空气 (如低压条件下释放溶解的空气, 进口水流发生立轴旋涡卷入空气, 竖井跌流带入空气), 并在管流中不易排走, 破坏水流的连续性与平稳性, 从而加强了脉动。所以压力管道的体形设计较好, 使水流平稳, 脉动就可减弱。

水跃局部剧变区, 具有大脉动低频率的特点, 脉动压强振幅系数 α 可达 0.4; 二龙山输水洞出口消力池及大伙房溢洪道堰下收缩段消力池的水跃区测得脉动压强振幅系数 $\alpha = 0.192 \sim 0.32$, 且跃前的 α 比跃后的大 2 ~ 4 倍。

(1) 苏联 Д.И.库明 (Кумин) 的研究成果认为, 跃后区后部边界的脉动压强由两部分组成, 即:

$$2A_{\max} = 0.06h_2Fr_2^{1/2} + 0.01 \frac{V^2}{2g} \quad (1-3)$$

式中等号右边第一项是表面波引起的脉动压强; h_2 为第二共轭水深; Fr_2 为相应的佛氏数, $Fr_2 = \frac{V^2}{g h_2}$; V 为水跃区平均流速, 可达收缩断面时均流速 V_c 的 0.5 倍。在水跃区内, 最大脉动压强双倍振幅可达收缩断面流速水头的 0.285 倍, 向下游则迅速衰减, 其分布规律如表 1-1 (以距收缩断面的距离 x 表示)。

表 1-1 最大脉动压强双倍振幅系数 α 的沿程分布

x	$< (3.5 \sim 4) h_2$	$5 h_2$	$6 h_2$	$8 h_2$
α	0.285	0.1~0.12	0.07~0.04	0.04~0.02

(2) 苏联普列奥布拉任斯基 (Н.А.преображенский) ⁽¹⁵⁾ 研究了临界和小淹没度水跃 (淹没系数为 1 ~ 1.05), 给出水跃区消力池底最大压强脉动双倍振幅公式为:

$$2A_{\max} = 1.6 Fr_c^{2/3} \left(\frac{h_k}{x} \right)^{4/3} h_k \quad (1-4)$$

式中 x 为计算点到收缩断面距离; h_k 为决定于单宽流量的临界水深; Fr_c 为收缩断面佛氏

数。

普氏结果表明：最大脉动压强振幅在水跃前部跃首附近，其值 $2A_{max} = 0.4 (H_0 - h_c)$ 。而沿程向下游衰减甚剧。如取跃长 $L_j = (9 \sim 12) h_c$ ，则在水跃末端：

$$2A_{max} = (0.07 \sim 0.10) (H_0 - h_c),$$

H_0 为消水池底以上总能头； h_c 为收缩断面水深。

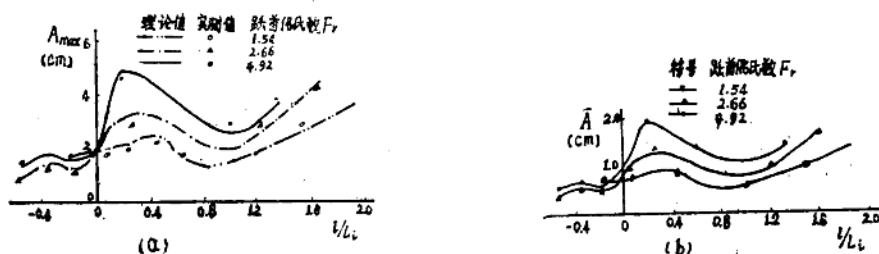
普氏还指出脉动压强振幅随淹没度加大而减小，相对临界水跃（淹没系数为 1），淹没水跃脉动振幅的折减系数如下表所示。

表 1—2 淹没水跃脉动振幅折减系数

淹没系数	1.0	1.05	1.15	1.30	1.50
折减系数	1.0	0.95	0.90	0.80	0.75

(3) 长江水利水电科学研究院丁灼仪根据葛洲坝二江泄水闸的斜坡消力池护坦上脉动压力特性试验，并使用随机数据处理方法，得出如下一些成果。

护坦上水流脉动压力振幅概率分布符合正态分布曲线。并将护坦及闸室底板上每一个测点的平均脉动压力强度和 99% 的最大脉动压力强度的沿程变化分别绘于图 1—3。



1—3 脉动压强沿程分布（闸室底板和护坦）

(a) 最大脉动强度沿程变化； (b) 平均脉动强度沿程变化

从图中可以看出：在水跃首部上游脉动压强变化不大，而从跃首开始脉动压强逐渐升高，约至 $l = (0.2 \sim 0.4) L_j$ 处强度达到最大值；而后复又下降，约至水跃区尾部脉动压强最低，水跃后略有上升。

带辅助消能工的护坦上的点脉动荷载，北京水科院曾对几种消能工进行试验，根据资料分析结果指出：

(1) 加一道消力坎时，对脉动振幅增加极少，基本与光滑护坦所得之值相同；脉动压力的频率也为 2 ~ 4 次/秒。

(2) 加一道消力齿时，护坦后半部的脉动压力振幅比前半部的要大，后半部主频率增为 4 ~ 6 次/秒，而前半部的振幅及频率与光滑护坦的一致。

(3) 加两道消力墩时，情况变化较大，最大之平均振幅急剧下降，到只有光滑护坦上的 1/10，而后半部脉动压力主频率也增为 6 ~ 8 次/秒。

由于辅助消能工的存在，使脉动压力值普遍有所减少，但使护坦上产生水平向的脉动压

力。

(二)脉动压强频率

泄水建筑物的急流区,脉动压力具有大脉动与小脉动两种。由汇集到的溢流坝的原型和模型试验资料,得平均频率 $f \approx 30 \sim 32$ 赫兹。根据丰满溢流坝反弧等四个不同部位,在各种不同单宽流量下,测得49点脉动压力资料,得平均频率为 $20 \sim 35$ 赫兹,主频率为 $20 \sim 30$ 赫兹,大伙房泄槽急流脉动压力平均频率为 $20 \sim 26$ 赫兹;与丰满坝相近。在光滑坝面及泄槽的渐变明流情况下,其主频率 $f_k \leq 35$ 赫兹,此值比坝的自振频率为高,不会共振。掺气严重时,小脉动的频率可达100赫兹。泄洪压力钢管道中的脉动主频率可在几赫兹到 $20 \sim 30$ 赫兹之间变化。根据文献介绍,某水工建筑物一些部位的水流脉动压强的峰值频率如表1—3所示。

表 1—3

某些水工建筑物水流脉动的峰值频率

建筑物部位	峰值频率范围(赫兹)	备注
压力管道水流急变区	20~30	
明流水流急变区	<10	
平底水跃区	2.0~3.4	
导流底孔顶部	3~5 30~50	原型
水电站压力钢管	18~20	原型
泄水闸	3~4	
滑雪道式溢洪道	1~3	

从表中看出:一般有压管道水流的脉动频率较高,可达 $20 \sim 30$ 赫兹,或更高;而明流的脉动频率较低,一般在5赫兹以内。

如果脉动频率与自振频率很接近,则可能发生共振甚至使建筑物丧失稳定。这时需要进一步确定脉动压力,从而判断建筑物是否能安全工作。由于实际建筑物存在阻力作用,振幅不会很大,当脉动压强很小时,纵令两者频率重合,建筑物仍能正常工作。

水跃区脉动频率一般是相当低的,且跃前佛氏数 Fr_2 越小频率越低,一般主频率 $F_k < 10$ 赫兹,甚至小于3赫兹,根据丰满和大伙房两个消力池水跃区实测资料分析,跃前水流一次脉动最长周期达0.55秒,平均频率 $8.5 \sim 11.2$ 赫兹;跃后水流脉动的最长周期可达11.2秒,平均频率 $2.1 \sim 2.4$ 赫兹。加辅助消能工后,护坦上主脉动频率有所加大。

丁灼仪将试验获得的葛洲坝二江泄水闸的斜坡消力池护坦上脉动频率及平均峰值频率,绘于图1—4中,其中 l 为各测点离水跃区首部的距离(在跃首上游者为负,下游者为正); L_j 为水跃长度。

(1)从图1—4中看出,在跃首上游各测点的峰值频率接近。

(2)在水跃区内,从跃首开始,峰值频率逐渐上升,约在离水跃区首部(0.2~0.3) L_j 处达最大值,而后又下降,但当跃首佛氏数很低时,沿程各测点的峰值频率相近。

(3)在水跃区内,各测点的峰值频率均随跃首佛氏数的增大而升高。将水跃区内平均峰值频率,最大点的峰值频率范围同跃首佛氏数的关系列于表1—4,表中还引用了溢流坝下游消力池水跃区内峰值频率范围随跃首佛氏数变化的数据,从表中看出,两者的趋势是一致的。

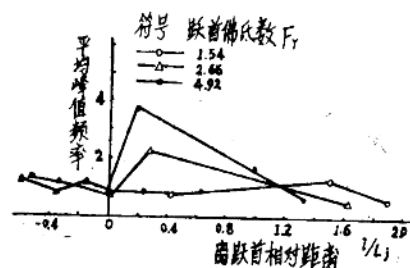


图1—4 斜坡消力池护坦
上脉动频率的沿程分布

表1—4

峰值频率同跃首佛氏数的关系

溢流坝	跃首佛氏数	4.7	5.9	6.6
消力池水跃	峰值频率(次/秒)	1.47~5.13	2.4~8.4	3.61~12.2
泄水闸	跃首佛氏数	1.54	2.66	4.92
消力池水跃	峰值频率(次/秒)	0~1.75	0~4.5	0~7.5

丰满坝反弧段几种不同作用面积的传感器所测得的压力脉动频率没有明显差别。

(三) 小结

(1)脉动压强取决于水流结构和水流与周围介质相互作用的特性,即脉动压强尺度与局部水流变化程度、掺气程度等有关。水流变化愈剧,旋涡愈大或愈强烈,掺气愈严重,波动愈大,则脉动压强也愈大。

(2)上述高速水流脉动问题,均属无旋涡无空穴水流情况,在无空穴的紊流中,会发生频率不同的压强脉动,振幅大的相应的脉动频率则低。

(3)光滑坝面及泄槽的渐变明流,脉动压强频率较低,最大脉动压强双倍振幅系数 α 一般取为0.05,原型掺气水流的 α 比模型的略大。

(4)在明流局部急变区具有振幅大频率低的特点,但脉动振幅有向下游沿程衰减,以及随淹没度增加而衰减的规律。对平底自由水跃的极大值,常出现在距跃首(0.2~0.4) L_j 处。水跃区的频率是相当低的。

(5)压力管道中,脉动压强往往也较突出,在局部水流有急剧变化时则更甚,如高压闸门下游旋涡区的 α 更高。

(6)各家试验⁽¹⁵⁾表明:在没有明显旋涡区的水流情况下(无分离水流的管流,泄槽上的水流等) $\alpha \approx 0.03 \sim 0.06$;在有明显旋涡区的水流情况下(水跃区,突然扩散区)以及其它容易产生旋涡的地方, $\alpha \approx 0.15 \sim 0.4$ 。

第三节 空穴、空蚀问题

一、概述

(一)空穴、空蚀的物理过程

在日常生活中可以看到清水加温到 100°C 时, 就开始沸腾, 水中产生大量气泡, 实际上就是出现了“空穴现象”。由此可知: 当液面为大气压时, 温度升高到 100°C , 水的蒸汽压力等于大气压力, 水中就开始发生空泡, 称为空穴, 产生空穴的现象称为空化; 相反, 当温度一定, 而使液体所受的压力减低到该温度下水的蒸汽压力值时, 水内也会发生空化现象, 出现“空穴”。液体空化后的流动叫空穴流, 是二相流的一种。

关于水的蒸汽压力, 是指在某一温度下水气化为蒸汽时所具有的压力。即 100°C 时水的蒸汽压是 10.33 米水柱; 水温越低, 相应的蒸汽压力也越小, 其值如表 1—5 所示。

表 1—5 不同温度时水的蒸汽压力 (绝对压力) 值

水温 $^{\circ}\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	50	100
蒸汽压力 (厘米水柱)	6.225	8.895	12.520	17.385	23.834	32.296	43.265	57.337	75.210	126.00	1033

从水力学可知, 不可压缩流体无粘性流动的伯努利方程式:

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z = \text{常数} \quad (1-5)$$

由上式看出, 当流速很高或位能 Z 值很大时, 压力能就会显得很小。如水流中压力低于大气压力就出现负压, 如降低到蒸汽压力左右, 水分子内压力大于周围压力, 于是体积膨胀, 水分子发生气化, 形成空穴, 空泡不断在气化点产生, 并随高速水流带向下游压力较高区域, 在该处气泡中的蒸汽又重新凝固, 气泡突然破裂溃灭, 四周水体以极快的速度向空泡内部冲去, 其动量几乎在几千分之一秒的时间内立刻减小到零, 据有些文献记载: 空泡破灭时的冲击压强可高达几千个大气压力⁽⁶⁾。雷利 (L. Rayleigh) 于 1917 年指出: 空泡溃灭时所产生的这种巨大的冲击力 (压强), 如果直接作用在物体边壁附近, 而且是连续不断地发生, 则将导致物体表面的破坏 (脆性材料的撞击破坏或韧性材料的疲劳破坏), 这就形成了所谓空蚀。大多数学者都承认这种机械的冲击作用是初步破坏的起因, 是主导的。

但空蚀是空穴水流和边界材料两方面特性的综合, 空泡溃灭引起高压, 高压可以引起材料的机械破坏, 同时也可以引起材料的温度和电位差。另外, 空泡消失也可以引起空泡中所含气体的温度和带电现象。因此诸如化学的、电学的、温度的作用等次要因素的影响也常常不可忽略。

综上所述, 空穴、空蚀的物理过程是由空穴的形成、空穴的运动、空穴的破灭、空蚀的发生等四部分所组成。空化现象是指液体的内部产生空穴或空腔的现象; 而空蚀则是指空穴破灭对固体表面的破坏作用, 空蚀是空穴的直接后果。必须指出, 有空穴不一定有空蚀, 只

有在空穴发展到一定程度并由于连续长时间的作用，使水流边壁失去其应有的强度而遭破坏时，才构成空蚀现象。加拿大麦卡坝（Mica Dam）泄水孔系利用突然放大消能，曾对混凝土模型在接近原型的水头和空穴情况下进行试验，其结果是一定要在空穴相当严重时，比如 $\sigma \geq 1.0$ 运行80小时或 $\sigma = 0.58$ 运行20小时后，混凝土边壁才发生空蚀破坏。

在有些情况下，空蚀会自行停止，显然是由于水的缓冲作用将空蚀区复盖，防止空泡破灭点和边壁直接接触的原因。

此外，发生空穴时，压力管道的流量会受影响；水流的脉动大大加强，使一些轻型水工建筑物如闸门、薄拱坝等产生振动；同时会产生噪音，对工作带来一定的困难。原型观测中，在某种情况下，可以把振动和响声的产生作为空穴现象发生的标志。沙湟夫根据空蚀强度试验得出，声响强度的极大值明显地与空蚀强度极大值相重合。

空穴和空蚀现象是由许多复杂的因素造成的，目前国内外研究的还不很充分和深入。主要困难之一，在于它是一种高速现象，使肉眼无法辨其细部，使整个过程的研究复杂化，限制了人们研究的深入。使用所谓慢动作“摄影机”只能有较少的改进。另外的困难是这种现象通常发生在无法接近的部位，除非采用专门的措施，否则是看不到的。因此，大量的关于其性质的推论多半是根据一些有关影响因素的研究，而不是根据对其现象本身的直接观测。

（二）负压可能出现的部位



图 1—5 负压可能出现的部位及表面不平整度影响下的流态与空蚀

自然状态下水的温度一般在 20°C 左右,水内发生空化现象的压力约为绝对压力24厘米,即相当于10米水柱左右的压力。所以水工建筑物凡是可能发生较大负压的地方,就有产生空穴的可能。

因此对于空穴、空蚀问题的研究,就必须注意边界压力分布的情况及其变化的规律,力求避免发生太大的负压。

一般溢流坝面、反弧段、差动鼻坎、深孔进口、突然扩大而补气不足、压力弯管的内侧、岔管尖端附近、门槽下游附近、消能工、变坡处、升坎、跌坎、凸缝以及表面粗糙等局部压力降低部位,均有可能出现空穴现象。因为在这些边壁轮廓急变部位(图1—5),容易引起水流分离,产生旋涡等现象,使局部压力降低而出现空蚀的缘故。经验表明,当流速超过40米/秒时,即使体型设计及施工经过严格考虑也不易保证不发生空蚀。

(三)水工建筑物设计中控制空穴、空蚀的标准

水工建筑物设计中,曾采用过不同的标准来控制空穴、空蚀,限制空蚀破坏的发生。

1. 限制负压允许值

50年代初期,曾采用限制过流边壁上的负压值来控制空蚀。如苏联规定不允许出现负压;我国过去不允许或只允许不超过1米水柱的负压,1978年《混凝土重力坝规范》规定负压值不得超过3~6米水柱;日本不允许超过3米水柱;美国不允许超过6米水柱等。当然这种限制负压绝对值的方法并不十分科学,因为负压大小并不是有无空蚀的唯一标准。有时虽然发生负压,但因流速较小,不一定发生空穴;又如水流分离成为紊流边界层时,最小压力发生在水流内部,再用边界上的最小压力来控制空穴、空蚀的发生就有一定的局限性。因而最大允许负压值的控制标准,应随边界条件和流速而变,不应笼统地规定一个常数。例如苏联的斯依罗柯夫斯卡亚电站的溢流坝面未完工时,坝体过水,水头8.09米,单宽流量 $30\text{米}^3/\text{秒}\cdot\text{米}$,坝面负压达3.13米水柱,还未产生空蚀。

2. 限制最小水流空穴数

首先用试验方法确定水工建构筑物体型的初生空穴数 δ_0 (详后),作为初生空穴的控制标准。设计时要求实际水流空穴数 $\delta > \delta_0$,以避免空穴和空蚀。

近年来有人提出:空蚀破坏是在空穴发展到相当程度的时候才开始的,即初生空穴与初生空蚀并不同步,因而用初生空穴数来控制空蚀破坏是偏于保守的,从而提出允许空穴数 δ_a 的概念。 δ_a 值应按工程的重要性、部位、流速大小,空穴发展阶段和护面材料性质等综合因素来决定。还有人提出稳定空蚀和不稳定空蚀的概念,前者对建筑物危害不大,而后者则危害较大,应加以防范。也就是说,以允许产生一定程度的空蚀来作为控制空蚀破坏的标准。后二种的提法都有一定可取之处。但如何根据这些概念订出便于实用的标准作为设计的依据,则有待进一步研究。由于存在着空穴、空蚀的缩尺影响,在实验室探求初生空穴与初生空蚀很难准确,因此,通过大量的原型空蚀调查是制定空蚀标准的一个比较可靠的途径。

(四)空穴数

空穴初生是水流中的气核(小空泡)由于周围压力改变而迅速生长,并丧失稳定的结果。研究空穴问题时,为了确定水流中无空穴、空穴初生和空穴发展等各个阶段的定量指标,常采用一个无量纲数作为衡量实际水流是否会发生空穴的指标,叫空蚀数 δ ,其定义为

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} = \frac{(p_0 - p_v) / \gamma}{V_0^2 / 2g} \quad (1-6)$$

式中 p_0 、 V_0 ——水流未受扰动处的绝对压强和平均流速；

p_v ——相应水温下的蒸汽压强；

ρ 、 γ 、 g ——分别水的密度，容重和重力加速度。

式中分子为压强差，是阻止空穴发生的因素；分母为单位体积的动能，它越大压力越小，是引起空穴发生的因素。所以空穴数的意义是阻止空穴发生的有效压力对引起空穴发生的有效压力之比。由式可知，绝对压强愈低、空穴数愈小，发生空穴的可能性愈大，开始发生空穴时的空穴数叫做初生空穴数 σ_i 。初生空穴数的大小与过流边界条件有关，它是表明在一定的边界几何条件下是否引起空穴的水流参数。对于某种边界轮廓，其初生空穴数 σ_i 是一个固定值，通常可用减压模型试验来确定。表1—6是 σ_i 的一些实验值，可供参考。在不能脱流情况下，也可通过常压模型试验或理论分析用求最小压力系数的方法求得。

表 1—6

不平整体的初生空穴数 σ_i

	简图	简要特征	σ_i		简图	简要特征	σ_i
1		垂直升坎	2.1	6		倾斜升坎	$0.466\sqrt{\alpha}$ ($90^\circ > \alpha > 5^\circ$)
2		正坡升坎	2.3	7		顶部尖小的孤立凸体	2.0~3.5
3		逆坡升坎	2.0	8		表面均匀自然糙率，突体平均高度为 Δ	1.0
4		跌坎	≤ 1.0	9		圆柱体的钢筋头	3~4
5		坡度突变	1.05				

初生空穴数 σ_i 越大，空穴越易发生，越小越难发生。将实际水流的空穴数 σ 和相应的初生空穴数 σ_i 比较，当 $\sigma > \sigma_i$ 时，不发生空穴，当 $\sigma < \sigma_i$ 时，有空穴发生。所以初生空穴数可以作为是否出现空穴的判别指标，而且 σ_i 越小越好。一个设计良好的体型，其 σ_i 可低到0.2；而对于很粗钝的形状，其 σ_i 可高达2.0以上。

近几年来，法国凯勒(Keller)博士通过初步试验研究，认为采用水的抗拉强度来代替(1—6)式中水的蒸汽压力 p_v ，得出初生空穴数就更为合理。但是这一观点尚处于初步研究阶段，目前还未推广使用。

(五)水流紊动对空穴发生的影响

式(1—6)只是用时均压强 p_0 及平均流速 V 表达的一个指标，但紊流时瞬时压强可能比时均压强小一个脉动压强 p' 值。

太勒(G.I. Taylor)根据各向同性紊流模型进行计算, 得到瞬时空穴数为:

$$\sigma' = 6 - 6 \frac{\overline{u'^2}}{u^2} \quad (1-7)$$

根据试验结果, 靠近底部的紊动强度 $\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{u} \approx 0.15$, 代入上式得瞬时空穴数可能比时

均空穴数 σ 低 0.14。所以在高度紊动的区域内应考虑紊动对空穴数的影响。

(六) 初生空穴数与压力系数的关系

水流空化既然是因压力降低而引起, 那么, 就可以用一个有关压力的参数(称压力系数, 来估计水流是否会发生空穴。

压力系数定义为: $C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2}\rho V_0^2}$, 其中 p 为突体表面任一点压强, 其他符号意义同前。

当水流与突体表面不分离时, 则最小压力系数为: $C_{pmin} = \frac{p_{min} - p_0}{\frac{1}{2}\rho V_0^2}$ 对比空穴数定义,

即可写出:

$$\sigma = -C_{pmin} \quad (1-8)$$

当水流与突体表面发生分离时, 经推导得:

$$\sigma = 1 - 2C_{pmin} \quad (1-9)$$

在量度空穴初生时, 常设流动的最小压强等于蒸汽压强, 就发生空穴, 即当 $p_{min} = p_v$ 时, $-C_{pmin}$ 即 σ_i , 其他符号意义同前。

(七) 空穴问题的研究方法

对水工建筑物来说, 主要目的是研究防止空穴的发生, 以免除空蚀的危害。至于空穴力学基本性质和抗蚀材料等的研究, 这里不予介绍。

水工上常用的研究方法有: 理论分析、原型观测与试验室量测等三种。用理论分析的办法来研究空穴问题, 主要是: (1) 在已知水流条件下, 如何定出一个无空穴的边界曲线; (2) 在既定的边界条件下, 如何判断空穴现象的有无。如果边界为流线型时, 未发生空穴以前的压力分布是接近势流分布的。对于稳定的无旋流动, 可用伯势利能量方程式, 拉普拉斯方程式求出边界压力分布或定出边界压力系数, 来估计空穴情况。原型观测的主要优点是没有什么比尺影响(物理量、几何尺寸和水流流速等), 其主要缺点是在原型中难以对空穴区的范围和型态进行直接观测和拍照, 因此难以获得这些资料及其对建筑物运行性能影响之间的关系。室内试验常用的方法有常压模型试验和减压模型试验两种, 其优缺点, 一般与原型观测相反。它不仅可用以研究空穴特性, 且可以研究建筑物其他运行特性。对于空穴现象的研究, 减压模型试验的优点是可以将空穴区域定位, 并详细观察拍摄下来, 但如何运用试验室中取得的资料来推测原型条件下水工建筑物的运行情况还有待于进一步研究。

二、泄水建筑物的空穴、空蚀问题

空蚀是高速水流的四大特点(脉动、掺气、空蚀、冲击波)之一, 不良的溢流体型, 细微的表面不平整(几厘米甚至几毫米)都可能导致泄流能力的降低和高水头泄水建筑物的空蚀破坏, 因此必须认真研究空蚀问题并加以防止。

工程运行实践及试验研究表明, 在坝面溢流情况下, 当水流流速超过 16~18 米/秒时,