

高

水工建筑物

专 题 部 分

武汉水利电力学院 王宏硕 主 编
翁情达 副主编

高等学校教材

水 工 建 筑 物

专 题 部 分

武汉水利电力学院 王宏硕 主 编
翁情达 副主编

水利电力出版社

前 言

本教材是根据1983~1987年高等学校水利电力类教材编审出版规划组织编写的。全书包括基本和专题两部分，适用于本科水利水电工程建筑专业。基本部分为必修，约需60个学时，着重系统全面地向学生传授基本知识；专题部分可根据各地区、各学校的具体情况，选择其中3~4个作为必修，约需30个学时，以扩大和加深学生的知识面，其余专题可供参考；所有专题均可供研究生和有关工程技术人员参考。

由于本教材基本部分的内容自成体系，可单独作为水利水电工程施工、水资源规划及利用等专业少学时水工建筑物课程的教材，也可供水工建筑专业专科借用。

针对当前一般水工建筑物教材中存在的问题以及本教材分两部分的特点，编写过程中注意了体现以下几项原则：

一、在教材的深广度上，无论基本部分和专题部分，均以本科为准。专题的某些部分内容虽较之一般教材稍为深入一些，但也适可而止，不追求成为系统完整的科学专题。

二、作为教材，着重结合某些水工建筑物或其某些部分，进行本课程基本概念、基本理论和基本知识的阐述，不追求完全满足生产设计的需要；对于方法性的内容，着重介绍基本思路，不过分追求系统和全面；对于资料、规范性的内容，着重进行概括的、原则的说明，不过多地罗列具体的数字和图表。但在专题部分，为了更好地贯彻理论联系实际的原则，方法、资料方面的内容稍多一些。

三、努力体现专业课教材的特点，着重介绍如何运用而不是重复讲授已学过的基础知识和技术基础知识。

四、为了培养学生自己吸取知识的能力，对一些应该交待清楚的内容尽可能交待清楚，对另一些没有必要或难以在教材中交待清楚的内容，只进行概括介绍，但指明参考文献。努力避免贪多求全和高度浓缩的现象，以利于学生自学。

五、为了开拓学生的思路，培养学生钻研问题的能力，在着重阐述比较成熟的科学技术知识的同时，适当介绍事物的发展过程、最新成就、当前动态、存在问题和今后的发展方向。

本教材由武汉水利电力学院水工结构教研室集体编写。本册为专题部分。从第一到第十一个专题，编写人分别为翁情达、陈开道、廖孟扬、沈保康、王德蜀、曹学德、丁汉涛、陈介贤、王开治、吴沛寰和李珍照。各专题经专人审查、编写人修改后，由主编王宏硕、副主编翁情达对全书进行修改定稿。周瑾如、段亚辉、刘必秀、王均星、常晓林参加了本书的组织编写、抄稿、绘图和校核等工作。

在编写过程中，有近20所兄弟院校的同行人参加了本教材的研讨会，天津大学祁庆和教授对全书进行了审查，他们对本教材提出了不少宝贵的修改意见，在此对他们表示衷心的感谢。

由于水平所限，编写本教材的指导思想也不一定正确，书中难免有错误和不当之处，希望读者给予批评和指正。

编者

1990

内 容 提 要

本书是在《水工建筑物》基础部分的基础上，进一步深入探讨有关水工技术问题。内容包括11个专题：泄水建筑物的高速水流问题；泄水建筑物下游的消能防冲；水工建筑物的渗流计算；岩基上混凝土坝的稳定及应力分析；拱坝坝座稳定分析；土石坝的应力变形分析及其应用；土基上闸坝工程若干问题；水工隧洞的喷锚衬砌；水工建筑物的抗震设计；水工建筑物的结构模型试验研究；大坝的观测与资料分析。

本科生可选学本书部分内容，也可作研究生教材，研究人员、工程设计人员亦可从中获得收益。

目 录

前 言	
专题一 泄水建筑物的高速水流问题	1
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	6
第四节 掺气	30
第五节 泄水孔通气量的计算	35
第六节 冲击波	37
专题二 泄水建筑物下游的消能防冲	48
第一节 概述	48
第二节 挑流消能	50
第三节 面流及岸流消能	70
第四节 底流消能	84
专题三 水工建筑物的渗流计算	95
第一节 概述	95
第二节 渗流理论基础	96
第三节 坝基渗流计算	103
第四节 土石坝不稳定渗流的计算	118
第五节 坝下裂隙岩基的渗流分析	123
第六节 大坝渗流计算中的有限元法	125
专题四 岩基上混凝土重力坝的稳定和应力分析	132
第一节 概述	132
第二节 重力坝应力分析的有限元法	133
第三节 重力坝应力分析若干问题	149
第四节 坝基深层抗滑稳定分析	158
第五节 提高坝基抗滑稳定性的工程措施	169
专题五 拱坝坝座稳定分析	176
第一节 概述	176
第二节 拱坝坝座稳定分析的刚体极限平衡法	182
第三节 拱坝坝座稳定分析的有限单元法	195
第四节 改善拱坝坝座稳定性的工程措施	199
专题六 土石坝的应力和变形分析及其应用	205
第一节 概述	205
第二节 土石坝材料的应力—应变特性	
第三节 双曲线模型	

第四节	邓肯模型的修正与发展	221
第五节	线弹性有限元法的应用	225
第六节	非线性有限元法的应用	229
专题七	软基上闸坝工程的若干问题	251
第一节	闸墩的结构计算	251
第二节	反拱底板的结构计算	260
第三节	灌注桩闸基础的结构计算	265
第四节	软基处理	270
第五节	水工建筑物的抗冻技术	284
专题八	水工隧洞的喷锚支护	292
第一节	概述	292
第二节	喷锚支护的型式和构造	297
第三节	喷锚支护的设计	305
第四节	水工隧洞喷锚衬砌设计中的几个问题	313
专题九	水工建筑物的抗震设计	315
第一节	概述	315
第二节	单质点弹性体系的地震反应	319
第三节	多质点弹性体系的自由振动	327
第四节	多质点弹性体系的水平地震反应	334
第五节	地震动水压力	341
第六节	混凝土重力坝抗震计算的有限元法	344
第七节	抗震结构和工程措施	350
专题十	水工建筑物的结构模型试验研究	354
第一节	概述	354
第二节	相似原理及模型设计	357
第三节	模型材料	366
第四节	模型加荷与量测	369
第五节	结构静力模型试验	376
第六节	结构模型破坏试验	389
第七节	地质力学模型试验	383
第八节	动态结构模型试验简介	385
第九节	试验成果整理与误差分析	386
专题十一	坝工观测与资料分析	389
第一节	概述	389
第二节	观测技术	390
第三节	大坝实测性态数学模型	404
第四节	分析观测资料的常用数学方法	420

专题一 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。不少工程的水头超过100m，流速超过40m/s，单宽流量超过 $200\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。这就涉及到一系列特殊的水流现象和问题，这些问题往往成为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，**气蚀**引起建筑物空蚀的问题；水流掺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。根据野外观测和实验室的研究资料，当流速超过16~18m/s时，甚至只超过12~15m/s时，就开始出现一些上述的特殊水流现象。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。如弗汝德数 (Fr)、雷诺数 (Re)、掺气指数 (β)、空穴指数 (σ) 等。 Fr 和 Re 早已熟悉， β 和 σ 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；掺气现象增强，空穴现象容易形成。**惯性力 / 切力 反映雷诺数**
- 2) 水流质点的惯性特别大，因此惯性通常起主导作用，粘性阻力作用不显著。
- 3) 水流对边界特别敏感，冲击波、掺气、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。

高速水流问题是在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，要妥善解决生产实际中的问题还有一定差距，有待于进一步研究和解决。

第二节 高速水流的脉动

脉动的基本特征是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。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、船闸闸首甚至坝体的振动等，有时造成严重的损坏，因此高速水流脉动问题日益引起人们的关注。研究脉动压强对水工建筑物的影响，必须求出脉动压强的频率和振幅。

一、脉动压强的性质

从图1-1所示的脉动压强的波形图中可以看出，脉动压力是随机性的荷载，**+**

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，求出脉动振幅和频率。

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）。

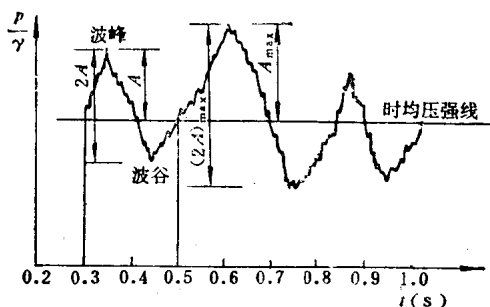


图 1-1 脉动压强波形图

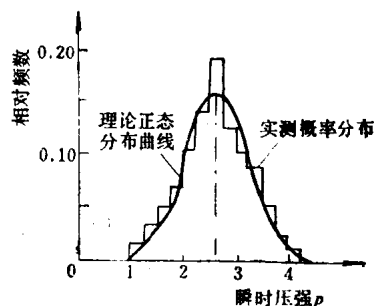


图 1-2 正态分布曲线

水流脉动可按振幅大小分为大脉动和小脉动两种。小脉动的特点是振幅小而频率大。高速急流区产生的是小脉动，其脉动压强比较小。大脉动的特点是振幅大而频率小。水跃区产生的是大脉动，其压强脉动振幅无论与时均压强相比或与时均流速水头相比都可达到同量级。所以大脉动具有重要的实际意义，是我们主要的研究对象。

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点或不大面积上的脉动压强，后者是指建筑物较大面积（如坝面、消力墩、护坦板等）上的脉动压强。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，则须考虑作用在整个块体表面的面脉动压强。

对脉动压强的点面关系尚难作出定量分析。一般来说，足够小的传感器所测得的数据可视为点脉动压强。面脉动压强由于均化作用，其值仅为点脉动压强的 $1/5 \sim 1/10$ 或更小。坝面水流的面脉动压强对坝的影响一般不大，但对于水闸、护坦等轻型结构则必须给予足够重视。以下介绍的均系“点脉动压强”。

二、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，影响护坦的稳定和安全运行。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

由于脉动压强时大时小周期性地作用于建筑物上，当强紊动的高速水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。上述泄洪钢管在某一断面上测得压强的频率为 $12 \sim 13\text{Hz}$ ，而钢管自振频率 $14 \sim 15\text{Hz}$ ，彼此相近，可能共振，说明脉动压力和建筑物抗振安全之间有着密切的联系。

工学院对流溪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

消力池. 掺气空穴

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。

护坦、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脉动而引起振动破坏。

3. 增加空蚀发生的可能性 (参见第三节)

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。在高速水流作用下, 河床岩块的掀起, 主要是因脉动产生的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, 采用轻型闸门, 或减少护坦厚度等。

三、水流脉动的测量

由于牵涉到非常复杂的水流结构, 高速水流的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。实验内容是探讨在一定的水流和边界条件下, 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、激光流速仪和高速摄影机等三种。

热线流速仪是目前国外使用最广和最成熟的测量脉动流速的有效工具, 其感应头很小, 可测到距边壁 0.1mm 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水流无干扰, 并能深入到边界层内部, 测到距边壁 0.1mm 处的点流速, 是传统的流体力学测量仪器所无法达到的。但试验时要求槽壁透明, 水体清晰, 并在水体中含有示踪颗粒等条件。

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。具有克尔盒式快门和移动镜头的各类鼓轮摄影机, 可使曝光速率高达每秒10张。这种昂贵的摄影机已在外国逐渐推广。

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。

四、泄水建筑物脉动压强的振幅与频率

从振动的观点出发, 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。下面就前两者加以阐述。

(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双倍振幅, 故在脉动压力振幅的分析中, 常用最大双倍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F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, $(2A)_{\max}$ 与时均流速水头成正比,

$$(2A)_{\max} = \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (1-2)$$

式中 v —— 测点处的时均流速;

α —— 脉动压强振幅系数。

苏联福米契夫 (М.С.Фомичев)、尼奇柏罗维奇 (А.Ничпорович)、罗赞诺夫 (Н.П.розанов) 和北京水利水电科学研究院李桂芬等人, 根据泄槽试验和溢流坝原型观测资料的分析, 认为泄槽急流区的最大脉动压强双倍振幅系数 $\alpha \approx 0.05$ 。

原水利电力部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。有的泄洪钢管 α 可达 0.2, 而在局部水流有急剧变化处 (如高压闸门下游旋涡区) 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的空气, 竖井跌流带人的空气等), 破坏水流的连续性与平稳性, 从而加强了脉动。若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, 脉动压强双倍振幅系数 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双倍振幅系数 $\alpha \approx 0.192 \sim 0.32$, 且跃前的 α 比跃后的大 2 ~ 4 倍。水跃区的 α 一般取为 0.15 ~ 0.4。水跃区的脉动压强还可参照以下各研究成果确定。

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, 其分布规律见表 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	$<(3.5 \sim 4)h_c$	$5h_c$	$6h_c$	$8h_c$
α	0.285	0.1 ~ 0.12	0.07 ~ 0.04	0.04 ~ 0.02

苏联普列奥布拉任斯基 (Н.А.Преображенский) 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脉动压强双倍振幅公式为:

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

式中 x 为计算点到收缩断面距离; h_c 为决定于单宽流量的临界水深; Fr_c 为收缩断面弗汝德数。

普氏结果表明：最大脉动压强双倍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：

$$(2A)_{\max}=(0.07\sim 0.10)(H_0-h_c) \quad (1-4)$$

H_0 为消力池底以上总能头； h_c 为收缩断面水深。

普氏还指出，脉动压强双倍振幅随淹没度加大而减少。相对于临界水跃（淹没系数为1），淹没水跃脉动双倍振幅的折减系数如表1-2所示。

表 1-2 淹没水跃脉动双倍振幅折减系数

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

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，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。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如图1-3所示。

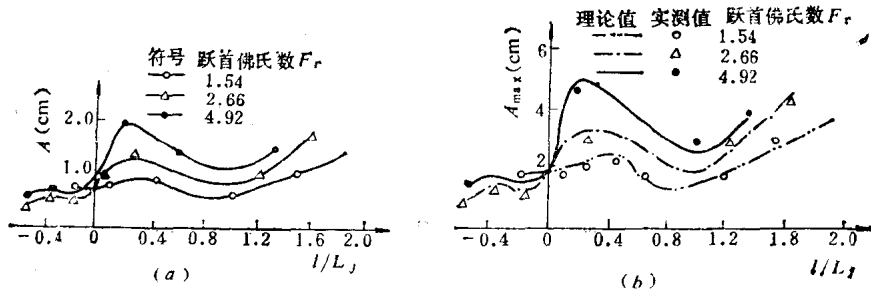


图 1-3 脉动压强沿程分布（闸室底板和护坦）
(a)平均脉动强度沿程变化；(b)最大脉动强度沿程变化

从图中可以看出：在水跃首部上游脉动压强变化不大；从跃前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；以后复又下降，水跃区尾部左右脉动压强最低；水跃后脉动压强又略有上升。

水利水电科学研究院的试验研究表明：由于辅助消能工的存在，使护坦上脉动压力值普遍有所减少，脉动频率有所增大，但产生水平向的脉动压力。

(二) 脉动压强频率

泄水建筑物的泄槽急流区，脉动压力具有大脉动和小脉动两种。根据溢流坝的原型和模型试验资料得知，平均频率 $f \approx 30\sim 35\text{Hz}$ ，主频率 $f_1 \approx 20\sim 30\text{Hz}$ ，此值比坝的自振频率为高，不会共振。泄洪压力钢管中的脉动主频率一般在几赫兹到 $20\sim 30\text{Hz}$ 之间变化。

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尼作用，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，且跃前弗汝德数 Fr_1 越小频率越低，一般主频率 $f_1 < 10\text{Hz}$ ，甚至小于 3Hz 。

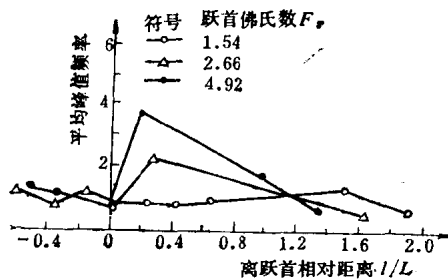


图 1-4 斜坡消力池护坦上脉动频率的沿程分布

长江水利水电科学研究院试验结果(图1-4)

表明:

1) 跃前弗氏数不同, 跃首上游各测点的峰值频率差别不大。

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 $(0.2 \sim 0.3)L_j$ 处达到最大值, 而后又下降, 但当跃首弗汝德数很低时, 沿程各测点的峰值频率相近。

3) 在水跃区内, 各测点的峰值频率随跃首弗氏数的增大而升高。

第三节 空穴、空蚀问题

一、概述

(一) 空穴、空蚀的物理过程

当水面为大气压时, 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”, 产生空穴的过程称为“空化”。与此类似, 当温度一定, 而使水体所受的压力减低到该温度下水的蒸汽压力值时, 水内也会发生空穴现象。

关于水的蒸汽压力, 是指在某一温度下水化为蒸汽时所具有的压力。 100°C 时, 水的蒸汽压是 101300Pa 。水温越低, 相应的蒸汽压力也越小, 其值如表1-3所示。

表 1-3 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 (Pa)	610	872	1228	1705	2337	3167	4243	5623	7375	12356	101300

当水流中某点的压力降低到蒸汽压力时, 出现空穴现象, 产生空泡。空泡随高速水流带向下游压力较高区域后, 泡中的蒸汽重新凝固, 空泡突然破裂溃灭, 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数百兆帕^[6]。雷利 (L. Rayleigh) 于 1917 年指出: 如果这种巨大的冲击力(压强)直接作用在物体的边壁上, 而且是连续不断地发生, 将导致物体表面的破坏, 这种现象称为“空蚀”。

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, 而且延续时间较长, 使过流边壁失去其应有的强度而遭破坏时, 才出现空蚀现象。加拿大麦卡 (Mica) 坝泄水孔利用突然放大消能, 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：只有在实际空穴数 $\sigma \geq 1.0$ 、运行80h或 $\sigma \geq 0.58$ 、运行20h后，混凝土边壁才会发生空蚀破坏。

在有些情况下，空蚀会自行停止，这是由于水的缓冲作用将空蚀区复盖，阻止了空泡破灭点和边壁的直接接触。

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；同时会产生噪音。因此，在原型观测中，有时可把振动和响声的产生作为空穴现象发生的标志。

空蚀是空穴水流和边界材料两方面特性的综合，如上所述，空泡溃灭引起高压，高压冲击可以引起材料的机械破坏，这是引起空蚀的主要因素。同时高压也可以引起材料温度的变化和产生电位差以及空泡中气体温度的变化和带电现象。因此，诸如化学的、电学的、温度的作用等次要因素对空蚀也会产生一定的影响。空穴和空蚀的机理非常复杂，目前国内外的研究还不够充分和深入。主要困难之一是它属于一种高速现象，用肉眼无法分辨其细部，更难以追踪其整个过程。使用所谓慢动作“摄影机”只能有一定限度的改进。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，否则是观察不到的。因此，大量关于空穴和空蚀的性质是根据一些有关影响因素推断的结果，而不是根据对其现象本身直接观测的结果。

(二) 负压可能出现的部位

在常温情况下，能否发生空穴现象，关键在于低压。由伯努利方程式：

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

可知，当流速 v 较高或位能 z 较大时，压力就显得很小。当水流中压力低于大气压力就出现负压。水工建筑物凡是可能发生较大负压的部位，就有产生空穴甚至空蚀的可能。因此，对于空穴、空蚀问题的研究，必须注意边界压力分布的情况及其变化规律，合理设计过流边界的体型，力求避免发生过大的负压。

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的部位、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边壁轮廓急变部位（图1-5），容易引起水流分离，产生旋涡，使局部压力降低，出现空蚀现象。经验表明，当流速超过40m/s时，即使体型设计及施工经过认真考虑和严格控制，也难以保证不发生空蚀。这时尚需结合采取其它减蚀措施，才能奏效。

(三) 空穴数

空穴初生是水流中的气核（小气泡）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，为了确定水流中是否有空穴、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，叫空穴数 σ ，其定义为：

$$\sigma = \frac{p_0 - p_c}{\rho v_0^2 / 2} = \frac{(p_0 - p_c) / \gamma}{v_0^2 / 2g} \quad (1-6)$$

式中 p_0 、 v_0 ——计算（或参考）断面处的绝对压强和平均流速；



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
1—分离区；2—空蚀区；3—低压区

p_s ——相应水温下的蒸汽压强；

ρ 、 γ 、 g ——分别为水的密度、容重和重力加速度。

式中分子为压强差，它反映阻止空穴发生的有效压强；分母是单位水体的动能，它越大压强越小，它反映引起空穴发生的有效压强。所以空穴数的意义是阻止空穴发生的有效压强对引起空穴发生的有效压强之比。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称初生空穴数 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1-4^[6]是 σ_i 的一些实验值，可供参考。在水流不与边界分离情况下，在水流边界上可以测到最小压力值，因而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^[4]求得。

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。

近几年内，德国的凯勒（A.Keller）博士通过初步试验研究，认为采用水的抗拉强度来代替式（1-6）中水的蒸汽压强 p_s ，来计算初生空穴数更为合理。但是这一观点尚处于初步研究阶段，目前还未推广使用。

表 1-4

不平整体的初生空穴数 σ_i

序号	简 图	简 要 特 征	σ_i	序号	简 图	简 要 特 征	σ_i
1		垂直升坎	2.1	6		倾斜升坎	$0.466\sqrt[3]{a}$ ($90^\circ > \alpha > 5^\circ$)
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		表面均匀自然粗糙, 突体平均高度为 Δ	1.0
4		跌 坎	≤ 1.0	9		圆柱体的钢筋头	3.0~4.0
5		坡度突变	1.05				

注 按空穴数的定义, 使用不平整体顶部的行近流速计算 σ_i 值时, σ_i 与不平整体的尺寸无关^[6]。

(四) 水流紊动对空穴发生的影响

式(1-6)只是用时均压强 p 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。

泰勒(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:

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

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。所以在高度紊动区域内应考虑紊动对空穴数的影响。

(五) 控制空穴、空蚀的标准

水工建筑物中, 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 $1 \text{ mH}_2\text{O}$ 的负压, 1978年《混凝土重力坝规范》规定负压值不得超过 $3 \sim 6 \text{ mH}_2\text{O}$; 日本不允许超过 $3 \text{ mH}_2\text{O}$; 美国不允许超过 $6 \text{ mH}_2\text{O}$ 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电站的溢流坝面未完工时, 坝体过水, 水头 8.09 m , 单宽流量 $30 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$, 坝面负压达 $3.13 \text{ mH}_2\text{O}$, 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筑物体型的初生空穴数 σ_1 ，作为初生空穴的控制标准。设计时要求实际水流空穴数 $\sigma > \sigma_1$ ，以避免空穴和空蚀。

近年来有人指出：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 σ_0 的概念。 σ_0 值应按工程的重要性、部位、流速大小、空穴发展阶段和保护面材料性质等综合因素来决定。还有人提出稳定空蚀与不稳定空蚀的概念，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，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，进行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。

(六) 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、原型观测与实验室量测等三种。用理论分析的方法来研究空穴问题，主要是：①在已知水流条件下，如何定出无空穴的边界轮廓线；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，可用伯努利方程式、拉普拉斯方程式求出边界压力分布或定出边界压力系数，来判断空穴情况。原型观测的主要优点是不会有比尺影响（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，因而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。室内实验常用的方法有常压模型、减压模型和高速循环水洞等三种试验，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。后两种试验方法还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

不良的过流体型，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。

工程运行实践及实验研究表明，在坝面溢流情况下，当水流流速超过16~18 m/s时，就有可能出现空蚀破坏，例如柘溪溢流坝下的差动鼻坎，丰满电站的溢流表面。此外，磨子潭泄洪洞的进口段，官厅水库的闸门槽等部位，也曾遭受过空蚀破坏。下面仅就表面不平整度、消能工、反弧段、差动鼻坎、深孔进口段、闸门槽等的空穴、空蚀问题进行介绍。

(一) 不平整度问题

过流表面不平整会使所在部位的边界层厚度发生相应变化，导致局部流速增加和压力降低，初生空穴数 σ_1 值加大，空穴提前发生。故对于高速水流，过水边界应尽可能流线化，尽量避免突然的或不规则的变化；对施工也要提出更高的要求，尽量避免局部放线不

准, 模板错动、浇筑层偏移、存在预埋物体的突头或混凝土的残渣, 以及表面粗糙等过水边界上各式各样的不平整现象。此外, 运转期泥沙对混凝土表面的不均匀磨损等也会造成不平整。如丰满、柘溪等溢流坝表面, 当落差超过一定范围时, 小蚀坑比比皆是, 其原因都是由于局部不平整而引起的。

刘家峡电站右岸泄洪洞反弧末端附近受到严重破坏, 其原因之一就是在反弧段上存在着施工错缝、弓形突体、钢筋突头和另外一些不平整体而引起的。

又如美国胡佛 (Hoover) 坝泄洪洞的空蚀破坏, 主要也是由于剥蚀区上游端有几处隧洞施工不良 (底部向外突出)、混凝土表面不平整以及施工缝面比较粗糙等原因引起的。

可以说, 溢流坝、泄洪洞等的空蚀问题, 主要是表面不平整问题, 因而关于不平整表面空穴现象的研究, 具有普遍而重要的意义。

1. 不平整体的类型

工程上常见的不平整体的形状, 可归纳为①升坎、跌坎、曲率突变、变坡、横向沟槽、凸缝等弧立体; ②表面粗糙两大类。不平整度形成的空穴及相应而生的空蚀情况如图 1-5(a)、(b)、(i)~(n) 所示。不平整体有使水流分离边界的趋势, 因此在分离处形成一个负压区。流速愈高, 偏离水流的趋势愈大, 负压也愈大, 直到发生空蚀。如前所述, 不平整突体的形状和所处部位对空穴的发生也有影响。对大型水工建筑物来说, 应根据不同部位提出不同控制标准。

2. 由孤立体产生的空穴

孤立型不平整体附近的水流, 可为分离的 (如在三角形突体附近), 也可为不分离的 (如在流线形突体表面)。分离水流的空穴发生在分离点下游的剪力层中; 不分离水流的空穴则发生在突体表面上。对于二元不分离水流可用理论分析方法估算初生空穴数 σ_i , 但与实测值误差较大, 下面介绍一个半经验分析方法。

阿恩特 (Arndt) (4) 指出, 孤立粗糙突体的初生空穴数可表示为:

$$\sigma_i = C \left(\frac{h}{\delta} \right)^a \left(\frac{v_0 \delta}{\nu} \right)^b \left(\frac{1}{H} \right)^c \quad (1-8)$$

或简化为:

$$\sigma_i = C \left(\frac{h}{\delta} \right)^a \left(\frac{v_0 \delta}{\nu} \right)^b \quad (1-9)$$

式中 h —— 孤立突体高度;

ν —— 流体运动粘滞系数;

a, b, C —— 与突体形状有关的系数, 见表 1-5^[4];

δ —— 边界层厚度, 取 $\delta = 0.38\nu/v_0$;

v_0 —— 突体处边界层外的流速。

阿恩特应用上式, 将已有的三角、圆弧凹槽、半球、角锥及圆柱等孤立体的资料进行整理, 说明该式与大多数实测资料相当吻合, 平均误差不大于 6.5%。