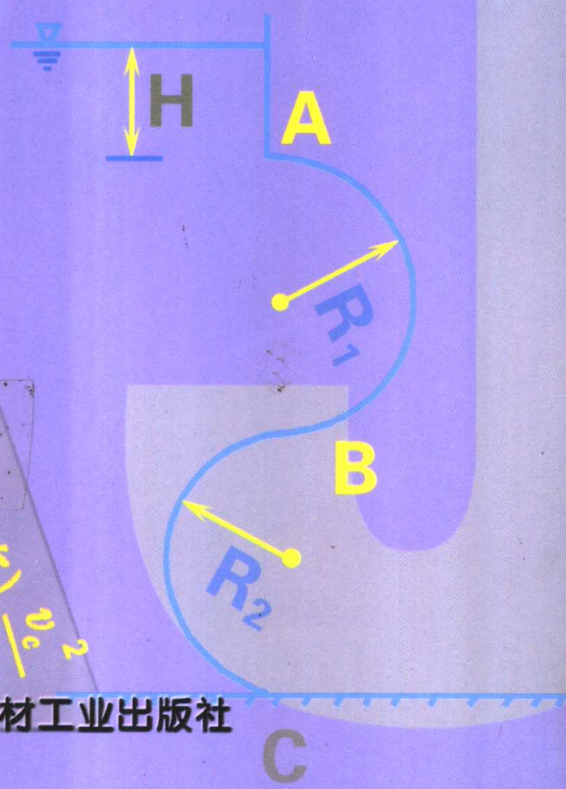
水利科技前沿丛书

固体边壁上的动水荷载及特性

齐清兰 杨庆瑞 薛运田 著

$$u_x = u_x(x, y, z, t)$$

$$T_0 = h_c + (\alpha_c + \xi)\frac{v_c^2}{2g}$$



中国建材工业出版社

固体边壁上的动水荷载及特性

齐清兰　杨庆瑞　薛运田 著

中国建材工业出版社

图书在版编目（CIP）数据

固体边壁上的动水荷载及特性．/齐清兰等著 —北京：中国建材工业出版社，2001.4

ISBN 7－80159－105－4

Ⅰ．固…　Ⅱ．齐…　Ⅲ．水利学－室内试验－研究生教育－教学参考资料　Ⅳ．TV 131

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 19206 号

固体边壁上的动水荷载及特性

齐清兰　杨庆瑞　薛运田　著

*

中国建材工业出版社(北京海淀区三里河路 11 号)

新华书店北京发行所发行　各地新华书店经销

北京丽源印刷厂印刷

*

开本　850 mm × 1168 mm　1/32　　印张 6.25　字数 198 千字

2001 年 4 月第 1 版　　2001 年 4 月第 1 次印刷

印数 1－1000　　定价：19.00 元

ISBN 7－80159－105－4/TV・000

作者简介：

齐清兰，女，1962年7月出生，河北省南皮县人。1988年天津大学研究生毕业。现任河北工程技术高等专科学校副教授。多年来一直从事水力学教学和水动力学科学研究。曾主持多项科研课题的研究，其中两项获奖。独立编写全国城镇建设试点专业《水力学》教材。主编《水力学学习指导与考试指南》。自1990年以来发表论文30余篇。1997年作为优秀知识分子代表当选河北省九届人大代表。2000年被授予“河北省优秀青年教师”称号，并荣立三等功。

作者简介：

杨庆瑞，男，1962年10月出生，河北省高邑县人。1982年毕业于河北水利专科学校。现任河北省水利工程局第二工程处副处长。多年来一直从事重大水利工程的施工工作，先后担任大黑汀水利枢纽配套工程、海口闸工程、微水发电厂子坝加高等工程的技术负责。发表论文多篇。

薛运田，男，1960年8月出生，河北省辛集市人。1982年毕业于河北水利专科学校。多年来一直从事河北省重大水利工程的设计、施工工作，先后担任石家庄市水利勘测设计院副院长，石家庄市水利工程公司经理。发表论文多篇。

前　言

对于脉动压力的问题，早在雷诺提出了紊流的概念之后就已经受到人们的关注。对脉动压力的系统研究是从20世纪40年代才开始的，一些学者从脉动压力基本方程出发，对脉动压力进行理论分析研究，曾经取得一些成果。然而由于实际工程问题的复杂性，多数工程中的边壁脉动压力问题很难用理论分析方法求得解答，通常是由实验量测。近年来对脉动压力的研究重视与紊流理论结合来研究脉动压力的机理，从定性描述到定量计算。同时，脉动压力数据的分析处理方法，也经历了一个由不严格的选用代表性幅值和频率的"统计分析法"到较为严格的随机过程分析方法的发展过程。本书从工程实际需要出发，以解决工程问题为目的，提出了模型实验与理论分析相结合研究边壁脉动压力的方法。

本书主要内容共分为四章。第一章简单介绍水流脉动压力的随机分析方法；第二章以二元射流为例研究作用于平面上的点脉动压力与面脉动荷载；第三章以孔板消能工和圆管突扩流场为例，研究作用于二维曲面上的点脉动压力与面脉动荷载；第四章研究作用于三维曲面上的点脉动压力与面脉动荷载。由于研究问题过程中需要进行大量的数据处理，书中附录部分介绍了实验数据的回归分析方法。

本书是在恩师崔广涛教授、师兄练继建教授的指导下完成的。书中还部分引用了他们的研究成果。本书的完成过程中还得到了彭新民高工以及天津大学高速水流研究室老师们和河北工程技术高等专科学校岳国英教授的支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢！

限于作者水平，书中缺点和错误在所难免，希望读者提出批评指正。

内容提要

本书分别以平面、柱面和球面为例，详细讨论了作用于固体边壁上的脉动压力的时域、频域和幅值域特性，并得出点、面脉动压力幅值和频谱的解析式。由此可以解决工程设计中面脉动荷载的计算问题。主要内容包括：水流脉动压力的随机分析方法，作用于平面上的点脉动压力与面脉动荷载，作用于二维曲面上的点脉动压力与面脉动荷载，作用于三维曲面上的点脉动压力与面脉动荷载等。本书可供水利、水电等有关行业的科技工作者和研究生参考。

目　　录

第一章 水流脉动压力的随机分析方法

一、基本概念

自然界的水流流态多属于紊流。紊流的基本特征是许许多多大小不等的涡体相互混掺着前进,它们的位置、形态、流速都在时刻不断地变化着。因此,当一系列参差不齐的涡体连续通过紊流中某一定点时,必然会反映出这一定点上的瞬时运动要素(如流速、压强等)随时间发生波动的现象,这种现象称为运动要素的脉动。

紊流中的脉动现象和实际工程的关系是很大的。紊流中质点的紊动和混掺、旋涡的产生,增加了水流阻力,从而能量损失大大增加;由于紊流中流速脉动,引起水流内部质点交换,流速分布趋于均匀化;紊流中的压强脉动增大或减小了建筑物上的瞬时荷载,特别是高速水流,压强脉动还会引起建筑物的振动,若压强脉动使局部瞬时负压增大,则还将增加气蚀的可能性。因而在工程实践中,对紊流中压强和流速的脉动必须进行深入的研究。

1. 水流脉动的表示法

在紊流中,流速和压力的瞬时值可表示为时均值与脉动值之和

$$\begin{aligned} u &= \overline{u} + u' \\ p &= \overline{p} + p' \end{aligned} \qquad (1-1)$$

和一般不规则的随机现象一样,瞬时值可表示为

$p(t)$(或 $u(t)$) = {长期倾向} + {周期性} + {随机性}

式中长期倾向,在一般分析中也称为趋势项,包括长周期项,在分析中应当视情况加以取舍。

实际上，水流压力和流速脉动场都可以解释为大大小小不同旋涡结构作用。所以，复杂脉动也只是各种周期分量的总和，因此脉动压力（或荷载）都可看做是随机性的。随机变量的平均统计特性值（如 $\overline{p}$）不随时间变化的过程称为平稳随机过程。平稳过程若以各态历经性为前提，可按各态历经平稳随机过程处理。这里所谓各态历经性，即由变量 $p(t)$ 所得出的平均值，除了普通用的时间平均外，同时要测定 N 个 $p_k(t)$（$k=1, 2, \cdots, N$），再固定一个时间 t 对 N 个资料所进行的平均值，即认为是集合平均。这个集合平均和时间平均一致时，就称此现象是各态历经的。

2. 统计量

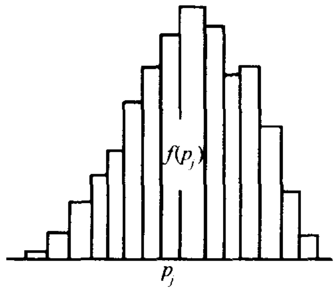
一般情况下，组成统计调查对象的单体的集合称为母体，构成母体的单体的个数通常是很庞大的，每个单体的数值做为变量 p，测量 N 个单体值，可得出样本值 $p_1, p_2, \cdots, p_n$ 系列，问题在于对本值进行处理要能推算母体所具有的统计特性量，即推算总体参数，与这个总体参数相对应的，由样本实测值新构成的特征量称为统计量。

为了使样本值的分布状态一目了然，需把这些样本值按大小的顺序进行排队。将样本数值的变动范围适当地分成若干个小区间，再给出各区间里的样本数，即频数，这样就得到阶梯状的频数图叫做频度分布图。若再把各组的频度除以样本的个数 N 值，其比值称为相对频数。上述分析可用柱状图表来表示，称为直方图（图 1－1）。

在定量地表示样本值分布时，把样本的中心位置表示为样本平均值，首先表达围绕平均值的分散状况的特征量是样本方差，可表示为：

样本平均 $$\overline{p} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} p_i = \sum^{h} p_j f(p_j) \tag{1-2}$$

样本方差 $$\sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(p_i - \overline{p})^2 = \sum^{h}(p_j - \overline{p}) f(p_j) \tag{1-3}$$



$$\sum_{j=1}^{n} f(p_j) = 1$$

图 1-1　直方图

式中：p_j 是被分为 h 个组合的各组的中心值；$f(p_j)$ 是其相对频数。

方差的开平方值 σ 称为均方差（标准差或均方根），$\sigma/\overline{p}$ 称为变差系数，其高次矩由下式定义

$$M_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(p_i - \overline{p})^3}{N} = \sum^{h}(p_j - \overline{p})^3 f(p_j) \qquad (1-4)$$

$$M_4 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(p_i - \overline{p})^4}{N} = \sum^{h}(p_j - \overline{p})^4 f(p_j) \qquad (1-5)$$

M_3 是平均值周围的非对称性表示尺度，M_3/σ^3 称为偏差系数；M_4 是由方差和分布的周边推广的，更能很好地表达分布中心处高低的程度，M_4/σ^4 称为峰度。我们要了解的是母体中所具有的平均值 $\overline{P}$ 和方差 σ^2 以及变量 p 在 $p \sim p + \mathrm{d}p$ 范围内的概率函数 $f(p)\mathrm{d}p$。统计学中的重要课题是根据所求出来的样本值来判断母体性质。概率密度函数具有代表性的形式是正态分布，即

$$f(p)\,\mathrm{d}p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \mathrm{e}^{-\frac{(p-m^2)}{2\sigma^2}} \mathrm{d}P \qquad (1-6)$$

这个分布的平均值为 m，均方差为 σ，偏差系数为 0，峰度系数为 3。

3. 概率密度函数

对于平衡随机过程 $p\ (t)$（图 1－2），取一足够长的时间过程 T，若时间间隔为 Δt 的记录中，$p\ (t)$ 在 p 和 $p+\mathrm{d}p$ 的能级之间，则存在的时间长度的总和 $\sum\Delta t_i$ 测出来就很明显。概率密度函数 $p\ (t)$ 变为下式

$$p(t)\mathrm{d}p = \frac{\sum\Delta t_i}{T}$$

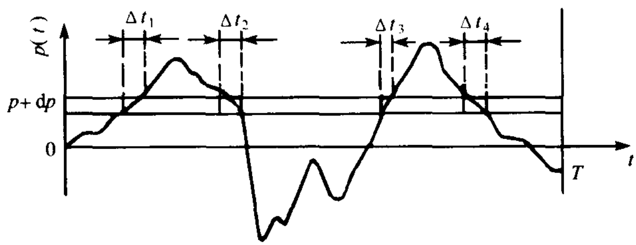


图 1－2　概率分布

概率密度函数的积分形式是概率分布函数，在水流脉动压力分析中通常使用概率密度函数来推断脉动幅值的分布特性和计算最大可能的幅值。所以，概率密度函数也是水流脉动压力的一个重要统计特性。研究表明，水流脉动压力（荷载）基本上服从正态分布规律，但对于急变流，如水跃前、后段，挑跌流水舌在浅水垫情况下对河床的作用力等等，都明显地区别于正态分布规律，而服从 Rayleih 分布。

在接近正态分布的情况下，最大振幅值可采用：$A_{\max}=3\sigma$，即极差 $I_m=A_{\max}-A_{\min}=6\sigma$（$\sigma$ 为均方差）。而在考虑可能偏离正态的情况下，最大值考虑 $A_{\max}=4\sigma$ 或更大才合适。众所周知，采用 $\pm3\sigma$ 在正态情况下，实际上概率为 99.7%（图 1－3）。

二、水流脉动压力的相关函数

作为平稳随机过程，研究水流中所测定出的脉动压力随时间

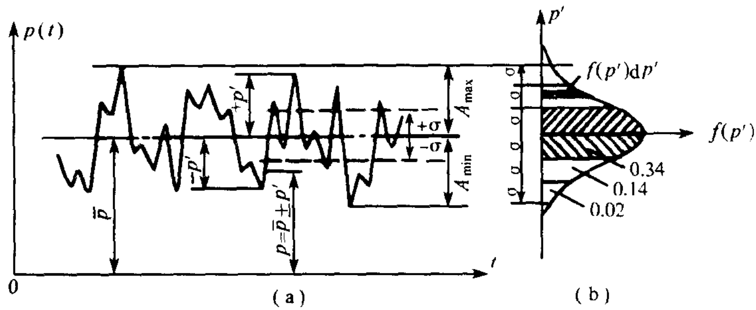


图 1－3　脉动压力记录及其概率密度函数表示

（a）脉动压力记录 p（t）　　（b）概率密度分布曲线

变化的瞬时值 p（t）或随地点变化的瞬时值 p（l）都可以构成本身的相关函数（图 1－4）。

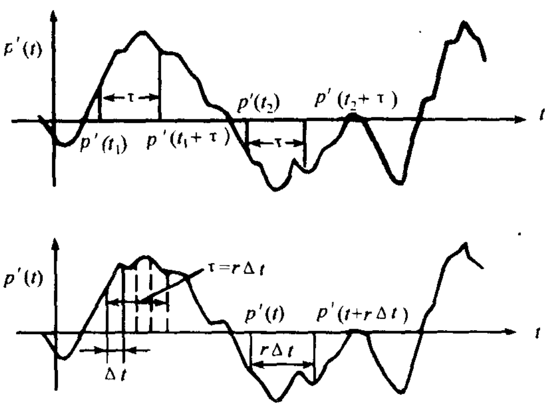


图 1－4　自相关函数说明图

$$R(\tau) = \overline{p'(t)p'\,t+\tau} = \lim \frac{l}{2T}\int_{-T}^{T} p'(t)p'(t+\tau)\mathrm{d}\tau \cdots \quad (1-7)$$

当 $\tau = 0$ 时

$$R(0) = \overline{p'^2}$$

将相关函数标准化

$$\rho(\tau)=\frac{R(\tau)}{R(0)}=\frac{\overline{p'(t)\ p'(t+\tau)}}{\overline{p'^2}} \tag{1-8}$$

采用求和形式

$$R(r\Delta t)=\frac{l}{N-r}\sum_{k=1}^{N-r}p_k'\cdot p'_{k+r} \tag{1-9}$$

其中 $r=1,\ 2,\ \cdots,\ m$；$k=1,\ 2,\ \cdots$

平稳的自相关函数与 t 无关，则 $R(\tau)=R(-\tau)$，即自相关函数是偶函数。

地点和时间同时变化的互相关函数称为时空相关函数（图 1-5），其相关系数为

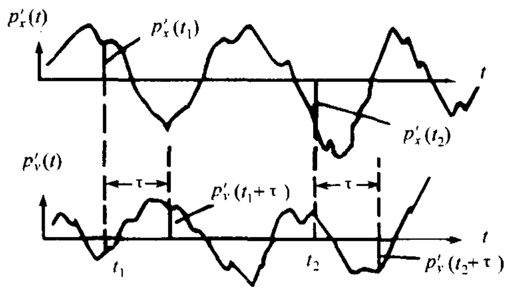


图 1-5 互相关函数的说明图

$$\rho(\xi,\ \eta,\ \tau)=\frac{\overline{p'(x,\ y,\ t)\ p'(x+\xi,\ y+\eta,\ t+\tau)}}{[\overline{p'^2(x,\ y,\ t)}\ \overline{p'^2(x+\xi,\ y+\eta,\ t)}]^{1/2}} \tag{1-10}$$

当 $\xi=\eta=0$ 时，$\rho(0,\ 0,\ \tau)$ 为自相关系数。

当 $\xi\neq0$，$\eta=0$ 或者 $\xi=0$，$\eta\neq0$ 时，$\rho(\xi,\ \tau)$ 或 $\rho(\eta,\ \tau)$ 为一个方向的空间相关系数，分别表示为

$$\rho_x(\xi,\ \tau)=\rho(\xi,\ 0,\ \tau)=\frac{\overline{p'(x,\ y,\ t)\ p'(x+\xi,\ y,\ t+\tau)}}{[\overline{p'^2(x,\ y,\ t)}\ \overline{p'^2(x+\xi,\ y,\ t)}]^{1/2}} \tag{1-11}$$

$$\rho_y(\eta,\ \tau)=\rho(0,\ \eta,\ \tau)=$$

$$\frac{\overline{p'(x,y,t)\,p'(x,y+\eta,t+\tau)}}{[\overline{p'^2(x,y,t)}\cdot\overline{p'^2(x,y+\eta,t)}]^{1/2}} \qquad (1-12)$$

当 $\tau=0$ 时，式（1－11）或（1－12）即为瞬时空间相关系数，用 $\rho(l)$ 表示

$$\rho(l)=\frac{\overline{p'(l)\,p'(l+\Delta l)}}{\overline{p'^2(l)}} \qquad (1-13)$$

瞬时空间相关系数 $\rho(l)$ 是表示两个点之间的相关关系。这在研究点面脉动压力关系上是很重要的方法。

由于量测时空相关系数要比量测空间相关系数容易得多，因此，通常用时空相关系数表征空间相关特征，即：

$$\left.\begin{aligned}\rho(l)&=\rho(\tau)\\ \tau&=\frac{l}{V_e}\end{aligned}\right\} \qquad (1-14)$$

式中 $\rho(l)$ 表示某点与其附近各点的互相关系数，$\rho(\tau)$ 为该点的自相关系数，V_e 为旋涡传递速度，在脉动压力相关分析中，$V_e=l/\tau_m$，τ_m 为时空相关图中峰值的时滞。一些实验得出 $V_e=a\bar{u}$（$\bar{u}$ 是流动平均流速，a 为小于 1 的系数）。

当 $\bar{u}\gg u'$ 时，可以假定一个测点 x_0 处的脉动时间波形在保持其不变的同时，又能以平均流速 V_e 向下游流动，这就是“泰勒冻结紊流假定”，它表明 t_0 时刻通过 x_0 测点的脉动经过 τ 时段后就成为 $x_0+V_e\tau$ 处的脉动，如图 1－6 所示。

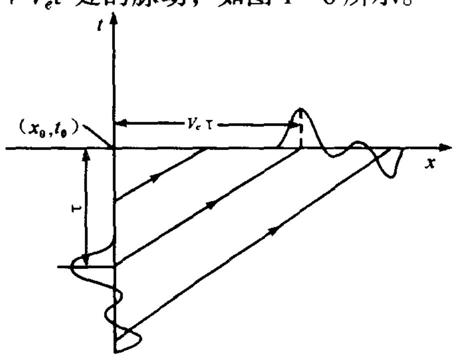


图 1－6　冻结紊流假定

泰勒紊流实际上是针对均匀各向同性的紊流。在实际工程中，由于平均流速分布都有速度梯度，所以是伴随有剪切应力的紊流，即剪切紊流，可近似应用上述假定分析水工水力学脉动压力问题。

三、脉动压力的功率谱

功率谱密度函数和自相关函数互为富里叶变换。在流体力学和研究水工振动等问题中，多采用单边功率谱形式表达。其关系由著名的 $W_{iener} - X_{инчин}$公式表示

$$G(f) = 4\int_0^\infty R(\tau)\cos 2\pi f\tau \mathrm{d}\tau \tag{1-15}$$

$$R(\tau) = \int_0^\infty G(f)\cos 2\pi f\tau \mathrm{d}f \tag{1-16}$$

当 $f=0$ 时

$$G(0) = 4\int_0^\infty R(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{1-17}$$

当 $\tau=0$ 时

$$R(0) = \int_0^\infty G(f)\mathrm{d}f = \overline{p'^2} \tag{1-18}$$

功率谱表示脉动能对频率的分布，也就是说，功率谱的积分表示脉动总能量。$G(f)\mathrm{d}f$ 是整个脉动能量的一部分，它表示在 f 和 $f+\mathrm{d}f$ 之间波动所“贡献”的大小。

关于频谱的物理概念如图 1－7 所示。该图显示的是振幅谱（富氏谱）。功率谱是以方差形式表示谱结构，所以也叫方差谱。表 1－1 是具有代表性的自相关函数和功率谱密度函数。对紊流来说，由于是把紊动看做是大小不同的各种尺度、旋涡的不规则运动，所以在某种涡旋持续通过测点的时间内，相关就大些，随着 τ 的增加，相关就越小。所以紊流流动的自相关函数的形式是随 τ 单调减小，而近似接近于指数函数形式。图 1－8 为脉动壁压频谱图。

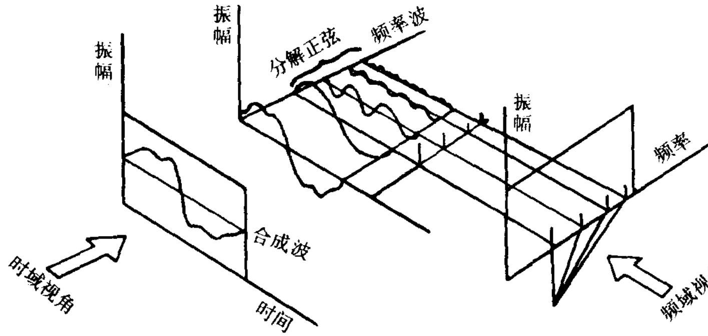


图 1-7 频谱概念说明图

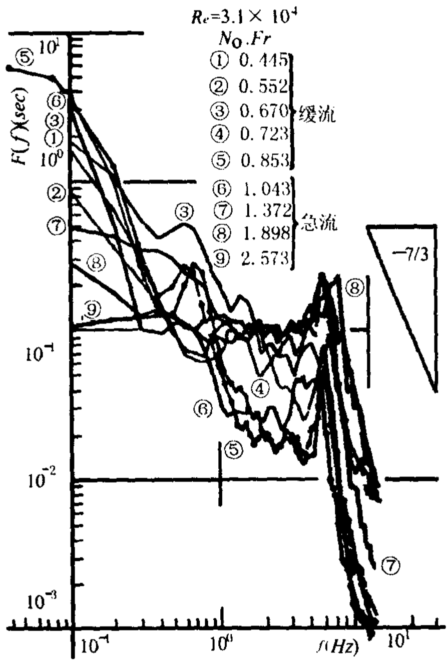


图 1-8 脉动壁压频谱图