



普通高等学校土木工程专业新编系列教材

# 桥涵水文

QIAOHAN SHUIWEN

中南大学 文雨松 编著

中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等学校土木工程专业新编系列教材

# 桥 涵 水 文

中南大学 文雨松 编著

中 国 铁 道 出 版 社

2005年·北京

## 内 容 简 介

本书主要包括:桥涵水文的数学基础、径流过程、河道与泥沙运动、水文观测与形态勘测、利用流量观测资料求设计流量、大中桥的桥位选择和孔径检算、利用雨量推算流量、小桥涵孔径计算、既有桥梁的水文检算与水害整治。

本书除作为土木工程各专业的教材外,也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

桥涵水文/文雨松编著. —北京:中国铁道出版社, 2005. 12  
(普通高等学校土木工程专业新编系列教材)  
ISBN 7-113-06759-X

I. 桥… II. 文… III. 桥涵工程-工程水文学-高等学校-  
教材 IV. U442.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 129415 号

书 名:桥涵水文

作 者:中南大学 文雨松 编著

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

策划编辑:程东海

责任编辑:程东海

封面设计:薛小卉

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

开 本:787mm×960mm 1/16 印张:8.25 字数:163千

版 本:2005年12月第1版 2005年12月第1次印刷

印 数:1~3 000册

书 号:ISBN 7-113-06759-X/TU·819

定 价:15.00元

### 版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话 (010)51873135 发行部电话 (010)51873171

# 前 言

我国的桥梁有悠久的历史。在某种意义上,桥梁代表了社会的文明程度。一座设计和建造优良的桥梁可以经过长期自然环境的考验。如中国的赵州桥,在一千多年后还能体现中国的古代文明,就是很好的工程实例。

桥梁水文勘测和水文计算是桥梁设计的重要内容。从现有桥梁来看,很少有桥梁被车辆活载破坏,但桥梁被洪水冲毁的事件时有发生。引起这种事件的因素很多,其中最重要的有两条。第一条是桥梁修好后,生态环境发生了很大的变化。如大地植被在设计桥梁时发生了较大变化。在设计时看来不大的降雨,到现在可能形成较大的洪水,有的甚至威胁桥涵的安全。非法挖砂使河床变得粗糙,改变了糙率系数,降低了桥梁的过洪能力,致使桥梁出现事故。第二条是设计不合理。如没有收集到应该收集的雨量、流量等水文参数,设计流量没有体现河流的实际情况。设计流量确定得过大,桥梁修得过大,是一种浪费;设计流量确定得过小,桥梁跨径或基础埋置深度不够,建成后,桥梁容易发生水害。

桥涵水文计算涉及到天文、地理和气候等很多方面的知识,其计算十分复杂。传统的水文计算方法是手工计算设计流量,并依据设计流量确定桥跨孔径和基础的埋置深度。因为桥涵水文计算涉及面太宽,每个工程师对河流水文特性的理解、对桥梁设计规范的掌握不同,可能导致按同样的水文资料由不同工程师设计的桥梁差别较大。

在水文方面,我国铁路桥梁规范与公路桥梁规范有一定的差别。但教育部的学科分类已没有铁路桥梁与公路桥梁的差别。土木工程专业的毕业生毕业后,可能从事公路桥梁的设计、施工和维护工作,也可能从事铁路桥梁的设计、施工和维护工作。本教材的内容在这方面已不再加以区分了。

由于近年来发生了既有桥梁水害事故,本书增加了既有桥梁的水文检算与水害桥梁加固的内容。

本教材适合于土木工程各专业,可供 28 至 36 学时的教学使用。

编著者

2005 年 12 月

# 目 录

第一章 桥涵水文的数学基础.....	1
第一节 概率统计基础.....	1
第二节 水文中常用的概率模型.....	3
第三节 最小二乘法.....	8
第二章 径流过程 .....	10
第一节 径流的形成 .....	10
第二节 影响径流的主要因素 .....	11
第三节 我国河流的水量补给 .....	15
第四节 雨量等值线 .....	16
第三章 河道与泥砂运动 .....	18
第一节 河道的基本特征 .....	18
第二节 泥沙运动与河床演变 .....	20
第三节 造床流量与河相关系 .....	21
第四章 水文观测与形态勘测 .....	23
第一节 水文观测 .....	23
第二节 形态勘测 .....	28
第五章 利用流量观测资料求设计流量 .....	36
第一节 利用水文观测资料推求设计流量 .....	36
第二节 含特大洪水系列的频率分析方法 .....	40
第三节 有少量流量资料时设计流量的计算 .....	42
第四节 利用水位观测系列计算设计流量 .....	43
第五节 水库调蓄作用 .....	45

第六节	水库溃坝流量计算 .....	46
第七节	桥涵设计洪水频率标准 .....	49
<b>第六章</b>	<b>大中桥的桥位选择和孔径检算 .....</b>	<b>51</b>
第一节	桥位选择 .....	51
第二节	铁路桥梁的孔径布置 .....	53
第三节	公路桥梁的孔径布置 .....	55
第四节	大中桥的孔径检算的特点 .....	58
第五节	大中桥的水位检算 .....	58
第六节	桥下河床冲刷计算 .....	67
第七节	桥头引线路肩标高检算 .....	79
<b>第七章</b>	<b>利用雨量推算流量 .....</b>	<b>83</b>
第一节	推理公式法 .....	83
第二节	经验公式法 .....	87
第三节	铁一院法 .....	87
第四节	铁二院法 .....	91
第五节	铁三院法 .....	96
第六节	铁四院法 .....	99
<b>第八章</b>	<b>小桥涵孔径计算 .....</b>	<b>105</b>
第一节	小桥孔径计算 .....	105
第二节	涵洞孔径计算 .....	109
<b>第九章</b>	<b>既有桥梁的水文检算与病害整治 .....</b>	<b>113</b>
第一节	既有桥梁的水文勘测 .....	113
第二节	既有桥梁的水文检算 .....	114
第三节	病害桥梁的整治 .....	116
<b>附录 I</b>	<b>墩形系数和计算宽度表 .....</b>	<b>120</b>
<b>附录 II</b>	<b>非黏性土的容许(不冲刷)平均流速表 .....</b>	<b>124</b>
<b>附录 III</b>	<b>黏性土的容许(不冲刷)平均流速表 .....</b>	<b>125</b>
<b>附录 IV</b>	<b>石质土的容许(不冲刷)平均流速表 .....</b>	<b>125</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>126</b>

## 第一章

# 桥涵水文的数学基础

桥涵水文的数学基础以数理统计为主,在学习本课程前有必要了解一些必要的数理统计知识。

## 第一节 概率统计基础

### 一、事 件

自然界许多事物都有不确定性。如  $n$  次测量同一桥跨的长度,会得到  $n$  个不同的长度; $n$  个同一种材料同样大小的混凝土试件,可以测到  $n$  个不同的抗压强度。人们称事物的这种性质为随机性。桥涵水文现象也有随机性。经验告诉人们,事物的随机性伴随有统计规律。例如,特大流量或特小流量出现的机会很少,不大不小的流量出现的机会很多,这种事实无论在湘江还是赣江都存在,已经成为规律。这种规律就是统计规律。

数理统计中以事件来描述随机现象。

事件是随机实验的结果,它可以分为三类:

#### 1. 必然事件

在一定的条件下必定发生的事件称为必然事件。例如,“在近百年内,长江不会断流”。这是必定发生的事件,其条件是“在近百年内”。

#### 2. 不可能事件

在一定的条件下必定不会发生的事件称为不可能事件。例如,“明年湘江的最大流量比明年长江的最大流量大”,这是不可能事件,因为湘江是长江的支流,明年湘江的最大流量不可能比明年长江的最大流量大。

#### 3. 随机事件

在一定的条件下可能发生也可能不会发生的事件称为随机事件。例如,“明年大冲河的洪水淹没某桥的钢梁梁底”,这是随机事件,因为明年大冲河的洪水淹没某桥钢梁梁底的事件可能发生,也可能不发生(尽管发生的可能性很小,但还是有可能的)。

### 二、概 率

表示随机事件发生可能性大小的数值为概率。概率分为事先概率和经验概率。

### 1. 事先概率

事件发生前可以计算出来的概率为事先概率。例如,抛掷一枚硬币出现正面的概率为 50%,因为这个事件只有出现正面和出现反面两种可能,并且机会相等,这是事先可以计算到的。

### 2. 经验概率

只能通过多次实验求得的概率为经验概率。例如,某河床断面出现大于  $2\ 600\text{ m}^3/\text{s}$  流量的概率  $p$  只能依靠多年的流量观测才可以计算出,  $p$  就是经验概率。

## 三、频 率

水文中不严格的区分频率与概率,常用频率取代概率。事实上,当实验的次数较多时,频率总是稳定在一个数值,当试验的次数相当多时,这个数值就接近概率。

## 四、重 现 期

水文中常用到重现期,重现期是平均多少年发生一次的年数。例如,百年一遇流量的重现期是 100 年。重现期与频率是互为倒数的关系,即

$$T = \frac{1}{p} \quad (1-1)$$

式中  $T$ ——重现期(年);

$p$ ——频率。

## 五、经验频率

对于简单的随机事件,其试验的次数总是有限,当每一次试验结果出现的可能性相等并且互不相容时,其概率可以应用古典概率公式计算,即

$$p(A) = \frac{m}{n} \quad (1-2)$$

式中  $p(A)$ ——随机事件  $A$  的概率;

$n$ ——可能结果的总数;

$m$ ——有利于事件  $A$  的可能次数。

当  $m=n$  时,  $p(A)=1$ ,  $A$  为必然事件。当  $m=0$  时,  $p(A)=0$ ,  $A$  为不可能事件。可见,随机事件的概率总是在 0 和 1 之间。

在水文计算中,常用维泊尔公式计算年最大洪峰流量的经验频率,即

$$p_m = \frac{m}{n+1} \quad (1-3)$$

式中  $p_m$ ——序号为  $m$  的流量值的频率;

$n$ ——流量样本的总数。

如果取到 100 个流量样本(即  $n=100$ ),最小的流量样本  $Q_{\min}$  排序为 100(即  $m=$



100)。用古典概率公式(1-2)计算时,发生大于等于  $Q_{\min}$  事件的经验频率为 100%;用维泊尔公式(1-3)计算时,发生大于等于  $Q_{\min}$  事件的经验频率为 99.01%。

显然,如果用经验频率来替代频率,说发生大于等于  $Q_{\min}$  的频率为 100% 是不合适的,因为可能还有比  $Q_{\min}$  更小的流量没有测到或在今后的年代中才会发生。因此,水文计算中用维泊尔公式计算年最大洪峰流量的经验频率似乎更加合理。

## 六、随机变量系列

随机现象的每次试验结果可以用一数值  $x$  表示。 $x$  随试验的结果不同而有不同的数值,并且有对应出现的概率。这种带有随机性的变量  $x$ ,称为随机变量。例如,水文中的水位、流量、流速等都是随机变量。

随机变量组成的系列成为随机变量系列。例如,1950 年起到 2002 年止,某桥桥下通过的年最大洪峰流量共有 51 个数据,这 51 个数据组成年最大洪峰流量系列。

## 第二节 水文中常用的概率模型

数学中常用随机变量所有可能取值及其对应的概率来描述随机变量现象的变化规律。反映某种随机变量与其概率关系的规律称为概率分布。

### 一、正态分布

世界上许多随机变量的概率分布可以用一种函数来描述或近似描述。例如,多次测量某桥梁的跨度时,由于测量仪器的误差、测量者的心理状况、气候变化等因素会导致每次测到不同的数据,这种不同数据的变化规律可以用正态分布来描述,即

$$p(x > x_p) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_p}^{\infty} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (1-4)$$

式中  $\mu$ ——均值;

$\sigma$ ——均方差。

混凝土的抗压强度、钢筋的抗拉强度等都可以应用正态分布来描述。

### 二、皮尔逊 III 型分布

经验表明,中国大多数河流的年最大洪峰流量可以近似用皮尔逊 III 型曲线描述。年最大 24 h 降雨量也可以近似用皮尔逊 III 型曲线描述,即

$$p(x > x_p) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_p}^{\infty} (x-a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} dx \quad (1-5)$$

式中  $\alpha, \beta$  为参数。

由统计学理论可知

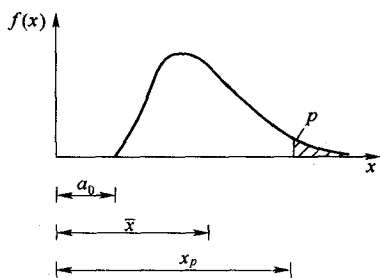


图 1-1 皮尔逊Ⅲ型曲线的密度函数

$$\alpha = \frac{4}{C_s^2} \quad (1-6)$$

$$\beta = \frac{2}{xC_v C_s} \quad (1-7)$$

$$a_0 = \bar{x} - \frac{2\bar{x}C_v}{C_s} \quad (1-8)$$

式中,  $\bar{x}$ 、 $C_v$  和  $C_s$  分别为系列的平均值、变异系数和偏差系数。

$a_0$  是系列零点至曲线的起点距, 在水文资料统计中, 年最大流量或年最大降雨量不可能为 0, 所以

$$\bar{x} - \frac{2\bar{x}C_v}{C_s} \geq 0 \quad (1-9)$$

式(1-5)中,  $\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt$  是标准的  $\Gamma$  函数, 以下为  $\Gamma$  函数的渐近表达式

$$\ln \Gamma(x) = \left(x - \frac{1}{2}\right) \ln x - x + \frac{1}{2} \ln(2\pi) + \frac{1}{12x} - \frac{1}{360x^3} + \frac{1}{1260x^5} - \frac{1}{1680x^7} + \dots \quad (1-10)$$

### 三、皮尔逊Ⅲ型曲线的表格形式

皮尔逊Ⅲ型曲线涉及到  $\Gamma$  函数, 计算十分复杂。

经水文研究人员的简化, 将式(1-5)中的  $x$  换成流量  $Q$ , 将  $\alpha$ 、 $\beta$  与统计参数  $\bar{Q}$ 、 $C_v$ 、 $C_s$  联系起来, 经整理后, 式(1-5)以易于接受的形式出现, 即

$$Q_p = (\phi_p C_v + 1) \bar{Q} \quad (1-11)$$

式中  $Q_p$ ——频率为  $p$  的洪水流量 ( $m^3/s$ );

$\bar{Q}$ ——年最大洪峰流量的平均值;

$C_v$ ——频率曲线的变异系数;

$\phi_p$ ——与频率  $p$  对应的离均系数, 它依频率  $p$  和偏差系数  $C_s$ , 以表格的形式出现, 见表 1-1。

式(1-11)中涉及到  $\bar{Q}$ 、 $C_v$ 、 $C_s$  三个统计参数。

#### 1. 平均流量 $\bar{Q}$

$\bar{Q}$  反映了流量系列的平均水平, 其值为

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad (1-12)$$

#### 2. 变异系数 $C_v$

$C_v$  表征各流量  $Q_i$  对于  $\bar{Q}$  的变化差异程度, 其值为

$$C_v = \frac{1}{\bar{Q}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}} \quad (1-13)$$

### 3. 偏差系数 $C_s$

$C_s$  反映了各流量  $Q_i$  偏离  $\bar{Q}$  的不平衡性, 其值为

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^3}{(n-3)\bar{Q}^3 C_v^3} \quad (1-14)$$

式(1-12)~式(1-14)中,  $Q_i$  为第  $i$  个样本, 即第  $i$  年的年最大洪峰流量,  $n$  为样本总数。

桥梁技术人员的主要目标是解决实际桥梁技术问题。因此, 以往桥梁技术人员常利用前人已制定的表格(表 1-1)来使用皮尔逊 III 型曲线。

为了方便, 还有按  $C_s$  与  $C_v$  倍数关系制定的皮尔逊 III 型曲线表格形式, 即

$$Q_p = K_p \bar{Q} \quad (1-15)$$

式中,  $K_p$  为模比系数。

在利用地方公式计算桥涵设计流量时, 常用到  $C_s$  与  $C_v$  倍数关系的  $K_p$ , 可查阅《铁路工程设计技术手册 桥涵水文》。

## 四、算例 1-1

已经求得某桥年最大流量的平均值为  $75 \text{ m}^3/\text{s}$ , 变异系数  $C_v$  为 0.7, 偏差系数  $C_s$  为 2.4, 求此桥百年一遇的流量。

可以利用公式(1-11), 查表 1-1, 得离均系数  $\phi_p$  为 3.81, 则

$$Q_p = 75 \times (0.7 \times 3.81 + 1) = 275.02 (\text{m}^3/\text{s})$$

表 1-1 皮尔逊 III 型曲线的离均系数值表

$p(\%)$ $C_s$	0.2	0.33	0.5	1	2	5	20	50	90	95	99
0.0	2.88	2.71	2.58	2.33	2.02	1.64	0.84	0.00	-1.28	-1.64	-2.33
0.1	3.00	2.82	2.67	2.40	2.11	1.67	0.84	-0.02	-1.27	-1.62	-2.25
0.2	3.12	2.92	2.76	2.47	2.16	1.70	0.83	-0.03	-1.26	-1.59	-2.18
0.3	3.24	3.03	2.86	2.54	2.21	1.73	0.82	-0.05	-1.24	-1.55	-2.10
0.4	3.36	3.14	2.95	2.62	2.26	1.75	0.82	-0.07	-1.23	-1.52	-2.03
0.5	3.48	3.25	3.04	2.68	2.31	1.77	0.81	-0.08	-1.22	-1.49	-1.96
0.6	3.60	3.35	3.13	2.75	2.35	1.80	0.80	-0.10	-1.20	-1.45	-1.88
0.7	3.72	3.45	3.22	2.82	2.40	1.82	0.79	-0.12	-1.18	-1.42	-1.81
0.8	3.85	3.55	3.31	2.89	2.45	1.84	0.78	-0.13	-1.17	-1.38	-1.74

续上表

$p(\%)$ $C_s$	0.2	0.33	0.5	1	2	5	20	50	90	95	99
0.9	3.97	3.65	3.40	2.96	2.50	1.86	0.77	-0.15	-1.15	-1.35	-1.66
1.0	4.09	3.76	3.49	3.02	2.54	1.88	0.76	-0.16	-1.13	-1.32	-1.59
1.1	4.20	3.86	3.58	3.09	2.58	1.89	0.74	-0.18	-1.10	-1.28	-1.52
1.2	4.32	3.95	3.66	3.15	2.62	1.91	0.73	-0.19	-1.08	-1.24	-1.45
1.3	4.44	4.05	3.74	3.21	2.67	1.92	0.72	-0.21	-1.06	-1.20	-1.38
1.4	4.56	4.15	3.83	3.27	2.71	1.94	0.71	-0.22	-1.04	-1.17	-1.32
1.5	4.68	4.24	3.91	3.33	2.74	1.95	0.69	-0.24	-1.02	-1.13	-1.26
1.6	4.80	4.34	3.99	3.39	2.78	1.96	0.68	-0.25	-0.99	-1.10	-1.20
1.7	4.91	4.43	4.07	3.44	2.82	1.97	0.66	-0.27	-0.97	-1.06	-1.14
1.8	5.01	4.52	4.15	3.50	2.85	1.98	0.64	-0.28	-0.94	-1.02	-1.09
1.9	5.12	4.61	4.23	3.55	2.88	1.99	0.63	-0.29	-0.92	-0.98	-1.04
2.0	5.22	4.70	4.30	3.61	2.91	2.00	0.61	-0.31	-0.89	-0.95	-0.99
2.1	5.33	4.79	4.37	3.66	2.93	2.00	0.59	-0.32	-0.87	-0.91	-0.95
2.2	5.43	4.88	4.44	3.71	2.96	2.00	0.57	-0.33	-0.84	-0.879	-0.91
2.3	5.53	4.97	4.51	3.76	2.99	2.00	0.55	-0.34	-0.82	-0.85	-0.87
2.4	5.63	5.05	4.58	3.81	3.02	2.01	0.54	-0.35	-0.79	-0.82	-0.83
2.5	5.73	5.13	4.65	3.85	3.04	2.01	0.52	-0.36	-0.77	-0.79	-0.80
2.6	5.82	5.20	4.72	3.89	3.06	2.01	0.50	-0.37	-0.75	-0.76	-0.77
2.7	5.92	5.28	4.78	3.93	3.09	2.01	0.48	-0.37	-0.73	-0.74	-0.74
2.8	6.01	5.36	4.84	3.97	3.11	2.01	0.46	-0.38	-0.70	-0.710	-0.71
2.9	6.10	5.44	4.90	4.01	3.13	2.01	0.44	-0.39	-0.68	-0.69	-0.69
3.0	6.20	5.51	4.96	4.05	3.15	2.00	0.42	-0.39	-0.66	-0.67	-0.67
3.1	6.30	5.59	5.02	4.08	3.217	2.00	0.40	-0.40	-0.64	-0.64	-0.65
3.2	6.39	5.66	5.08	4.12	3.19	2.00	0.38	-0.40	-0.62	-0.62	-0.63
3.3	6.48	5.74	5.14	4.15	3.21	1.99	0.36	-0.40	-0.60	-0.61	-0.61
3.4	6.56	5.80	5.20	4.18	3.22	1.98	0.34	-0.41	-0.59	-0.589	-0.59
3.5	6.65	5.86	5.25	4.22	3.23	1.97	0.32	-0.41	-0.57	-0.57	-0.57
3.6	6.73	5.93	5.30	4.25	3.24	1.96	0.30	-0.41	-0.55	-0.56	-0.56
3.7	6.81	5.99	5.35	4.28	3.25	1.95	0.28	-0.42	-0.54	-0.54	-0.54

### 五、海森机率坐标

在普通的直角坐标上,皮尔逊Ⅲ型曲线呈S形,曲线两端陡峭,不易作外延等工作。

海森首先提出使用机率格纸,这样将皮尔逊Ⅲ型曲线绘制在海森机率坐标上,可以得到一条接近直线的线,改善这一情况。

表 1-2 列出了海森机率格纸的横坐标。表 1-2 中,  $p$  为频率,单位为%;  $X_p$  为由中值(50%)起的水平距离。

表 1-2 海森机率格纸的横坐标分格

$p(\%)$	$X_p$	$p$	$X_p$	$p$	$X_p$	$p$	$X_p$	$p$	$X_p$
0.01	3.720	0.3	2.748	2	2.053	14	1.080	32	0.468
0.02	3.540	0.4	2.652	3	1.881	15	1.036	34	0.412
0.03	3.432	0.5	2.576	4	1.751	16	0.994	36	0.358
0.04	3.353	0.6	2.512	5	1.645	17	0.954	38	0.305
0.05	3.290	0.7	2.457	6	1.555	18	0.915	40	0.253
0.06	3.239	0.8	2.409	7	1.476	19	0.878	42	0.202
0.07	3.195	0.9	2.366	8	1.405	20	0.842	44	0.151
0.08	3.156	1.0	2.326	9	1.341	22	0.774	46	0.100
0.09	3.122	1.2	2.257	10	1.282	24	0.706	48	0.050
0.10	3.090	1.4	2.197	11	1.227	26	0.643	50	0.000
0.15	2.967	1.6	2.144	12	1.175	28	0.583		
0.20	2.878	1.8	2.097	13	1.126	30	0.524		

图 1-2 为海森机率格纸的坐标图。使用图 1-2 解决实际问题时,应注意把竖坐标的最大值设为样本流量的最大值(或略小于),把竖坐标的最小值设为样本流量的最小值(或略大于),这样就可以合理的布置图形。

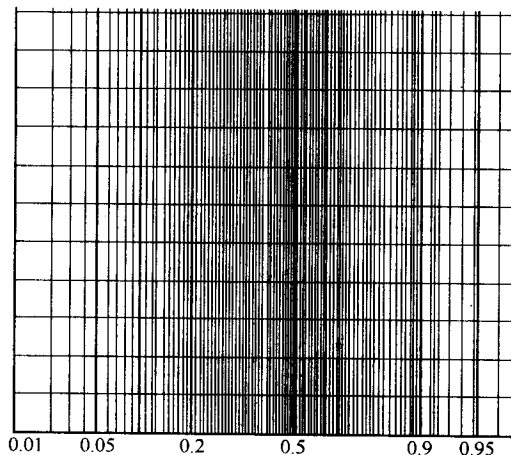


图 1-2 海森机率格纸

### 第三节 最小二乘法

最小二乘法是水文工作中使用较多的数学方法。对于  $n$  组测试数据:  $(X_i, Y_i), i=1, 2, 3, \dots, n$ , 有两种情况可以使用最小二乘法。第一种情况是: 这些数据在理论上位于一条直线上, 但测试误差使这些点偏离了理论直线; 第二种情况是: 不知道这些数据的理论方程, 但测试点位于一条直线左右。

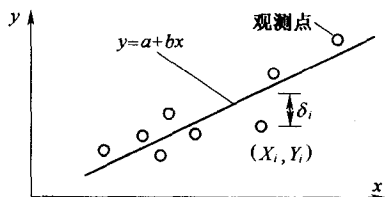


图 1-3 观测点与拟合直线

最小二乘法的目的是找一条直线

$$y = a + bx \quad (1-16)$$

调整参数  $a$  和  $b$ , 使直线尽可能接近每一个点, 如图 1-3 所示。这个“尽可能”的准则就是使误差的平方和达到最小。设第  $i$  个测点与直线的距离为

$$\begin{aligned} \delta_i &= Y_i - y|_{x=X_i} \\ &= Y_i - (a + bX_i) \end{aligned}$$

所有观测点对直线  $y = a + bx$  有误差, 这些误差的平方和为

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \\ &= (Y_1 - a - bX_1)^2 + (Y_2 - a - bX_2)^2 + \dots + (Y_n - a - bX_n)^2 \end{aligned}$$

为了使误差的平方和达到最小, 可以使用多元函数求极小值的通常条件, 令两个一阶导数等于零, 这就有两个方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial a} &= 2(Y_1 - a - bX_1)(-1) + 2(Y_2 - a - bX_2)(-1) + \dots + \\ &2(Y_n - a - bX_n)(-1) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial b} &= 2(Y_1 - a - bX_1)(-X_1) + 2(Y_2 - a - bX_2)(-X_2) + \dots + \\ &(Y_n - a - bX_n)(-X_n) = 0 \end{aligned}$$

将上面两式除以 2, 按未知系数  $a, b$  合并同类项, 得

$$na + b \sum_{i=1}^n X_i = \sum_{i=1}^n Y_i \quad (1-17)$$

$$a \sum_{i=1}^n X_i + b \sum_{i=1}^n X_i^2 = \sum_{i=1}^n X_i Y_i \quad (1-18)$$

求解式(1-17)、式(1-18), 最后得参数  $a$  和  $b$  为

$$b = \frac{l_{xy}}{l_{xx}} \quad (1-19)$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X}$$

(1-20)

$$\text{式中 } \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$$

$$l_{xx} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, l_{xy} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$$

相关系数  $r$  的定义为

$$r = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx}l_{yy}}}, \text{其中, } l_{yy} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$$

当  $|r|=1$  时为完全线性相关, 当  $|r|=0$  时为全无线性相关。一般情况下, 根据可信度  $\alpha$  与  $n$ , 当  $|r|$  大于表 1-3 的值时, 所配直线才有意义。

表 1-3 相关系数  $|r|$  的起码值

$n-2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
$\alpha$	0.05	0.997	0.950	0.878	0.811	0.754	0.707	0.666	0.632	0.602	0.576	0.553	0.532
	0.01	1	0.990	0.959	0.917	0.874	0.834	0.798	0.765	0.735	0.708	0.684	0.661
$n-2$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
$\alpha$	0.05	0.514	0.497	0.482	0.468	0.456	0.444	0.433	0.423	0.413	0.404	0.396	0.388
	0.01	0.641	0.623	0.606	0.590	0.575	0.561	0.549	0.537	0.526	0.515	0.505	0.496
$n-2$	25	26	27	28	29	30	35	40	45	50	60	70	
$\alpha$	0.05	0.381	0.374	0.367	0.361	0.355	0.349	0.325	0.304	0.288	0.273	0.250	0.232
	0.01	0.487	0.478	0.470	0.463	0.456	0.449	0.418	0.393	0.372	0.354	0.325	0.302
$n-2$	80	90	100	125	150	200	300	400	1000				
$\alpha$	0.05	0.217	0.205	0.195	0.174	0.159	0.138	0.113	0.098	0.062			
	0.01	0.283	0.267	0.254	0.228	0.208	0.181	0.148	0.128	0.081			

## 第二章

# 径流过程

## 第一节 径流的形成

自降雨开始到水量流出出口断面的过程称为径流形成过程,如图 2-1 所示。它包括以下四个阶段。

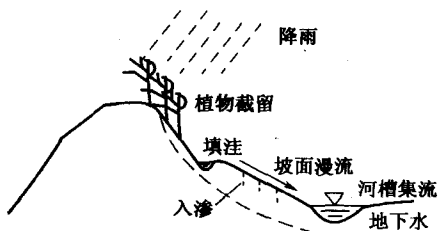


图 2-1 径流的形成

### 一、降雨过程

降雨是形成地面径流的主要因素,降雨的多少决定径流量的大小。降雨量以降雨厚度(mm)表示。单位时间内的降雨量称为降雨强度(mm/s)。每次降雨,降雨量及其在空间和时间上的变化都各不相同。降雨的变化过程直接决定径流过程的趋势,降雨过程是径流形成过程

的重要环节,它是桥涵水文现象的基础。对小桥涵而言,当地降雨就是形成洪峰流量的直接原因。

### 二、流域蓄渗过程

降雨开始时并不立即形成径流,雨水被流域内生长的树木、杂草,以及农作物的茎叶截留一部分,不能落到地面上,称为植物截留。

然后,落到地面上的雨水,部分渗入土壤,称为入渗;单位时间内的入渗量(mm)称为入渗强度(mm/h)。降雨开始时入渗较快,随着降雨量的不断增加,土中水分逐渐趋于饱和,入渗强度减缓,达到一个稳定值,称为稳定入渗。

另外,还有一部分雨水被蓄留在坡面的坑洼中,称为填洼。

植物截留、入渗和填洼的整个过程,称为流域蓄渗过程;

这部分雨水不产生地面径流,对降雨径流而言,称为损失,扣除损失后剩余的雨量,称为净雨。

为了反映流域蓄渗过程,各省的《水文手册》或《水文图集》用损失参数 $\mu$ 来表征当地的蓄渗现象。



### 三、坡面漫流过程

流域蓄渗过程完成后,剩余雨水沿着坡面流动,称为坡面漫流。流域内各处坡面漫流开始的时间是不一致的,某些区域可能最先完成蓄渗过程而出现坡面漫流,也只是局部区域的坡面漫流;然后,完成蓄渗过程的区域逐渐增多,出现坡面漫流的范围也随之扩大,最后才能形成全流域的坡面漫流。

### 四、河槽集流过程

坡面漫流的雨水汇入河槽后,顺着河槽由小沟到支流,由支流到干流,最后到达流域出口断面,这个过程称为河槽集流。汇入河槽的水流,一方面继续沿河槽迅速向下游流动,另一方面也使河槽内的水量增大,水位也随之上升;河槽容蓄的这部分水量,在降雨结束后才缓慢地流向下流,最后才通过流域出口,使流域出口断面的流量过程变得平缓,历时延长,从而起到河槽对洪水的调蓄作用。

## 第二节 影响径流的主要因素

从径流形成过程来看,影响径流变化的自然因素可分为气候因素和下垫面因素两类。

### 一、气候因素

#### 1. 降雨

空气中的水汽随气流上升时,因冷却而凝结水滴降落到地面上,形成降雨。降雨是径流形成的主要因素,降雨强度、降雨历时和降雨面积对径流量及其变化过程都有很大影响。

一场降雨由开始到结束所经历的时间称为降雨历时,降雨历时的长短与地域有关。长江流域的年降雨总历时要比黄河流域的年降雨总历时长,而西北地区的年降雨总历时最短。

单位时间内的降雨厚度称为降雨强度,简称雨强,单位为 mm/h,通常用  $a$  表示。雨强  $a$  随时间的变化称为雨强过程线,简称雨型,如图 2-2 所示。实测资料表明,我国的雨型有单峰、双峰和多峰三种。各省、自治区在将实测资料整理成应用成果时,通常根据当地的情况将雨型简化成三角形或阶梯形(图 2-2 将雨型简化成阶梯形)。

为了将雨强过程线化为便于应用的数学公式,计算降雨强度最大的时段  $t_1$  内的平均强度  $a_1$ ,将  $(a_1, t_1)$  点画在图 2-2(b)上;将时段  $t_2$  内的平均强度  $a_2$  也点画在图 2-2(b)上……如此可以求得相关曲线  $a=f(t)$ ,实测表明,我国的  $a=f(t)$  有两种表达式,即

$$a = \frac{s}{t^n} \quad (2-1)$$