

第六届数学中国数学建模网络挑战赛

地址：数学中国数学建模网络挑战赛组委会
电话：0471-4969085

邮编：010021

网址：www.tzmcm.cn
Email：2013@tzmcm.cn

第六届“认证杯”数学中国

数学建模网络挑战赛

承 诺 书

我们仔细阅读了第六届“认证杯”数学中国数学建模网络挑战赛的竞赛规则。

我们完全明白，在竞赛开始后参赛队员不能以任何方式（包括电话、电子邮件、网上咨询等）与队外的任何人（包括指导教师）研究、讨论与赛题有关的问题。

我们知道，抄袭别人的成果是违反竞赛规则的，如果引用别人的成果或其他公开的资料（包括网上查到的资料），必须按照规定的参考文献的表述方式在正文引用处和参考文献中明确列出。

我们郑重承诺，严格遵守竞赛规则，以保证竞赛的公正、公平性。如有违反竞赛规则的行为，我们将受到严肃处理。

我们允许数学中国网站(www.madio.net)公布论文，以供网友之间学习交流，数学中国网站以非商业目的的论文交流不需要提前取得我们的同意。

我们的参赛队号为：#2621

参赛队员（签名）：

队员 1：

队员 2：

队员 3：

参赛队教练员（签名）：

参赛队伍组别：研究生组

第六届数学中国数学建模网络挑战赛

地址：数学中国数学建模网络挑战赛组委会
电话：0471-4969085

邮编：010021

网址：www.tzmcm.cn
Email: 2013@tzmcm.cn

第六届“认证杯”数学中国

数学建模网络挑战赛 编号专用页

参赛队伍的参赛队号（请各个参赛队提前填写好）：

#2621

竞赛统一编号（由竞赛组委会送至评委团前编号）：

竞赛评阅编号（由竞赛评委团评阅前进行编号）：

第六届数学中国数学建模网络挑战赛

地址：数学中国数学建模网络挑战赛组委会
电话：0471-4969085

邮编：010021

网址：www.tzmcm.cn
Email：2013@tzmcm.cn

2013 年第六届“认证杯”数学中国 数学建模网络挑战赛

题 目 护岸框架

关 键 词 四面六边透水框架，架空率，减速率，数值实验，ADV

摘 要：

四面六边透水框架作为一种新型防洪固岸技术，它是通过改变河道的流速分布，从而起到防洪固岸作用。本文从框架群自身的结构特性以及空间布置方案出发，通过对框架群水力特性及其影响因素的分析研究，探讨了框架群护岸的护岸机理。

采用声学多普勒流速仪(ADV)自动测量分析系统进行水槽测试实验，通过编程曲线对比实验分析出框架体尺寸、架空率和框架群投抛长度、高度等因素与减速消能效果之间的关系，并得出了架空率、长宽比等各影响因素的最佳取值范围。

另外，本文还通过数模计算进一步研究了水流流过框架群时的流态，以及不同框架群形态对框架群后保护区的影响。经分析得出要根据不同的水深和减速率要求来抛投相应长度、宽度、高度、间距的框架群，为框架群的应用推广提供了指导和依据。

室内水槽模型试验和数值模拟实验均表明,这种新型的透水框架具有十分明显的减速消能效果,护岸效果优于传统的护岸工程技术,是一项值得大力推广的护岸新技术。

参赛队号： #2621

所选题目： A 题

参赛密码 _____
(由组委会填写)

第六届数学中国数学建模网络挑战赛

地址：数学中国数学建模网络挑战赛组委会
电话：0471-4969085

邮编：010021

网址：www.tzmcm.cn
Email：2013@tzmcm.cn

英文摘要（选填）

As a new technology for flood prevention and bank-protection, the tetrahedron-like penetrating frame actualizes its function by changing velocity distribution. Starting from the framework groups' structure characteristics and spatial layout, the article analyzes the framework groups' hydraulic characteristics and its influencing factors, and discusses the mechanism of bank-protection.

By conducting sink testing experiments using ADV automatic measurement and analysis system and programming curves, the article analyzes how the framework size, overhead ratio, the length and height of framework groups and other factors influence the deceleration and energy dissipation of framework groups, and works out the best value range of overhead ratio, length-width ratio and other influencing factors.

Besides, the article further studies the flow pattern of water when it traverses framework groups and framework groups' morphological features' influence on protection zone through a mathematical model calculation. Analytically, we should choose length, width, height and interval of framework groups according to water height and demand of velocity, providing guidance for the application and promotion of the framework groups.

Indoor sink testing experiments and numerical simulation results show that, this new type of penetrating frame has great effect on deceleration and energy dissipation, whose bank-protection effect is superior to traditional engineering technology, so it is a new kind of bank-protection technology which is worth promoting.

Keywords: tetrahedron-like penetrating frame, overhead ratio, deceleration rate, numerical experiment, ADV

参赛队号 #2621

1 问题的提出

在江河中，堤岸、江心洲的迎水区域被水流长期冲刷侵蚀。在河道整治工程中，需要在受侵蚀严重的部位设置一些人工设施，以减弱水流的冲刷，促进该处泥沙的淤积，以保护河岸形态的稳定。

现在常用的设施主要是四面六边透水框架。这是一种由钢筋混凝土框杆相互焊接而成的正四面体结构，常见的尺寸为边长约 1m，框杆截面约 0.1m×0.1m。将一定数量的框架投入水中，在水中形成框架群，可以使水流消能减速，达到减弱冲击、防冲促淤的效果。

对四面六边透水框架群，框架尺寸、架空率和长度都直接或间接地影响着其消能减速的效果。当前人们通过水槽实验等方法，已经积累了一些实验数据，也见诸各类文献当中。但由于数据量和数据精度仍有各种不足之处，还没有形成足够完善的经验公式。请你建立合理的数学模型，给出这三个参数与其减速效果之间的关系。

2 条件假设

- 1、假设不考虑河道边壁的糙率。
- 2、假设忽略水面风力及转力因素的影响。
- 3、假设不考虑旁侧入流(降雨等)。
- 4、假设四面六边体框杆截面为正方形，且构架结实牢固。
- 5、假设河流中没有沙石、水草、鱼虾之类的杂物，来进行水槽模拟试验。
- 6、假设每次完整测试水槽中进水流量是固定的。

3 符号约定

四面六边透水框架框杆长宽比	λ
架空率	ε
减速率	η
最小减速率	η_{\min}
最大减速率	η_{\max}
平均减速率	$\bar{\eta}$
投放框架群前测点的流速	V_1

参赛队号 #2621

投放框架群后同一测点的流速	V_2
水槽水深	H
框架群抛投高度	H_0
框架群投抛宽度	B
框架群顺水流方向长度	L
单个框架群所占总体积	V
单个四面六边透水框架体的空间体积	$V_{\text{单}}$
框架群中四面体框架体的个数	N
单个四面六边透水框架体的边长	l
单个四面六边透水框架体边杆的截面宽度	b
纬度	ϕ
经度	λ_1
地球半径	R
控制河段的入流	q_{in}
控制河段的出流	q_{out}
雨水量	P
蒸发量	E
x 向流速	u
y 向流速	v
x 向的压力梯度	p_{ξ}

参赛队号 #2621

y 向的压力梯度	p_{η_1}
x 向外来因素带来的动量	M_{ξ}
y 向外来因素带来的动量	M_{η_1}
谢才系数	C
x 向由于雷诺应力产生的紊动	F_{ξ}
y 向由于雷诺应力产生的紊动	F_{η_1}
曼宁系数	n
达西—魏斯巴赫系数	f

4 名词解释

- 1、架空率：四面六边透水框架群内部空隙的相对大小^[1]。
- 2、长宽比：四面六边透水框架框杆边长与杆截面宽度的比值。
- 3、减速率：描述投放框架群前后同一点水流速度的变化参数。

5 问题分析

本题通过分析四面六边透水框架群，针对问题分几个阶段来解决：

第一阶段：研究四面六边透水框架群技术并分析四面六边透水框架群护岸机理。

第二阶段：通过水槽模型实验，探讨框架尺寸、架空率和长度这三个参数对减速效果的影响。

第三阶段：通过数模计算研究，水流流过框架群时的流态，以及不同框架群形态对框架群后保护区的影响。

6 四面六边透水框架技术的研究及护岸机理分析

江河湖泊及海岸带的堤防和岸滩的安全稳定一直是各国政府水利工程建设和管理的核心问题。如何在迅速有效地实现护堤固岸的同时尽可能地减少对堤防岸滩的生态环境的影响，成为现代堤防安全建设和管理的一个关键问题。长期以来，采用“阻水”式防护，虽然在短时间内防护效果比较明显，但是对促进、加强岸滩稳定无明显的效果，

参赛队号 #2621

同时改变了区域局部的水流条件和地形条件和部分水中生物、岸滩两栖生物的栖息、繁殖环境。二十世纪九十年代，提出了利用抛投四面六边透水框架群来护堤固岸技术^[2]。该技术采用了“亲水”式防护，使得岸边水流能够平稳过渡，不会对堤防岸滩的稳定和安全造成破坏性影响。它不但可以通过内部框架体本身和框架体之间的空隙来透水，而且为底栖、浮游、附着生物提供了栖息场所，为岸滩两栖生物的提供了生活通道；同时通过内部众多框架体的杠件来阻水，杠件在阻水的同时也实现了对水流的消能。因此利用框架群同时具备透水和阻水消能的特点，可以对水流进行多层次、分级式消能逐步削弱水流的冲刷能量，减低水流对堤防岸滩的冲刷，实现了从传统护岸技术中的集中消能到逐步分级式消能的转变。当水流经过四面六边透水框架群的消能后流速小于泥沙的沉降速度时，将会促进水体中泥沙的淤积沉淀，从而进一步增强了对堤防岸滩的保护。如下图 6.1 所示投放四面六边透水框架的施工现场。



图 6.1 投放四面六边透水框架的施工现场

6.1 流速的角度^[3]

当四面六边透水框架群密集，架空率小的情况下，水流受阻，水流的动能瞬时减小，转变成其它能量，形成螺旋流、回流等。此时，四面六边透水框架群对流速的消减能力较强，底流速小，对水流结构的调整更显著，具有实体抗冲护岸特性。当四面六边透水框架架空率较大时，逐步消耗能量，在较大的空间内降低流速至不冲流速以下，甚至落淤的程度，具有减速不冲护岸的特性。

四面六边透水框架群利用透水构件分散水流，水流流过四面体后，会发生旋涡分离现象，产生附加的绕流阻力阻滞了水流运动。这种阻滞作用一方面，能在近底流区形成低流速带，使主流上挑，低流速带的存在减小了主流的高速水流对床面冲刷的机会；另一方面，四面六边透水框架群对顶冲的主流是有效的缓冲，从而达到护底保滩、减速促淤的作用。四面体透水框架改变局部水流流态，使断面流速分布发生变化，对水流结构沿垂向上有显著的调整，使得框架群中低部流速减小，而框架群上部流速增加；同时水流在河道横向的调节作用也较明显，四面体透水框架群会产生挑流作用，流量重新分配，一部分水体形成绕流，从而框架群区流量减小、流速降低，工程区外流速增大。

对于二维水流，在相同的床沙条件下，床沙起动所需的近底流速条件是一定的，四面体透水框架护底的存在，改变了水流的分布，在近底产生了一个低流速区，对床面泥沙产生了屏蔽的作用，即在底部要产生同样的起动底流速，需要更大的平均流速或流量。四面体透水框架对水流结构产生了两方面的影响：一方面，降低了底流速，在床面附近形成了一个低流速带，对床沙有屏蔽作用；另一方面，在床面上加入了新的干扰源，使

参赛队号 #2621

相同底流速条件下，近底水流紊动更加剧烈，对床沙有扰动作用。

6.2 阻力的角度^[4]

从水力学理论分析来看，河道水流阻力可通过周界的阻力系数反映，而阻力系数的不同表达方式中，最重要的三个是：谢才系数 C 、曼宁系数 n 以及达西—魏斯巴赫系数 f 它们之间可以相互转化：

谢才公式：

$$U = C\sqrt{RJ} = \frac{C}{\sqrt{g}}\sqrt{gRJ} \quad (6.1)$$

曼宁公式：

$$U = \frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}}\sqrt{RJ} = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{g}}\frac{1}{n}\sqrt{gRJ} \quad (6.2)$$

达西—魏斯巴赫公式：

$$U = \sqrt{\frac{8g}{f}}\sqrt{RJ} = \sqrt{\frac{8}{f}}\sqrt{gRJ} \quad (6.3)$$

摩阻流速：

$$U_{\phi} = \sqrt{gRJ} \quad (6.4)$$

因此有：

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{g}}\frac{1}{n} = \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{U_{\phi}} \quad (6.5)$$

由此可见，这些阻力系数的一定表达形式就等于水流平均流速和摩阻流速的比值。

因此，可以说阻力问题实质上也就是流速分布问题，河道断面流速分布调整，阻力也相应调整。四面体透水框架利用透水构件分散水流，改变局部水流流态，使河道断面流速分布发生变化，从而也使河道局部阻力发生改变。一方面，阻力变化引起河道水流结构的垂线调整。四面体透水框架护岸后，在水流近底床面处形成阻力区，水面产生涌水现象。上部水流流速增大，近底流速大幅度减小，泥沙起动概率降低，保护了河岸。另一方面，阻力变化引起河道水流结构的横向调整。四面体透水框架护岸处床面具有较大的糙率值，大于正常冲积河流主槽糙率。在滩面上布置四面体框架，将增加边滩糙率，这必然导致水流在横向的调整，水流偏向主槽集中，使滩地上的流量减小，流速降低，从而达到减速促淤的目的。

6.3 能量转化的角度^[5]

明渠水流只有在具有一定坡度的条件下才能向前流动。水流不断克服阻力而消耗能量，能量由河流位能的下降来提供。能量的消耗是通过水流阻力做功来完成的。水流所提供的能量中，有 92%来自主流区这一部分能量中又有 90%左右传递到近壁流区，并在

参赛队号 #2621

那里转化为紊动的动能。在转化的过程中，又损失一部分能量，其余部分则变为漩涡的动能。漩涡脱离边界进入主流区分解成尺寸更小的漩涡。这些小漩涡又因当地水流的钻滞作用，将它们的能量消耗为热能。在主流区内就地损失的能量不过占全部能量的 8% 左右，而有 73% 的能量损失却集中发生在近壁流区。近壁流区具有大量紊动能，能够引起泥沙的起动，同时挟沙能力也强些。在河道中加入四面体透水框架，实质上是加入了新的紊源。一方面，在四面体透水框架护岸后，其影响范围之内，受到四面体框架杆件的绕流影响，水流紊乱。从达西—魏斯巴赫公式来看与四面体透水框架护岸相比，沿程水头损失系数增加，从而导致沿程水头损失增大，消耗了更多的机械能；另一方面，在四面体透水框架护岸后，水流机械能转化为紊动能和热能的主要消能位置也发生了改变，由于四面体透水框架成为床面上的主要紊源，因此消能的主要位置由原来的床面附近转移到四面体框架高度及其影响范围内。由于上述两方面的作用，使直接作用于床面的冲刷能部分减少，河流只有提供更大的机械能才能达到同样的冲刷效果，由此，体现了四面体框架的促淤护底效果。

7 水槽实验模型

四面体透水框架是原水利部西北水利科学研究所于 20 世纪 90 年代初研制成功的一种完美结合实体抗冲和减速不冲防护特性于一体的护岸固脚技术，已获得国家实用新型技术专利，其结构模型如下图 7.1 所示。相比于实体护岸方式，它不仅节省工程材料，而且具有良好的减速促淤效果，在投放区域起到了防止冲刷，保护水工建筑物的作用。典型的工程运用实例有长江九江段的护岸工程。由于条件限制，我们在这里采用水槽模拟实验，从四面六边透水框架群的框架尺寸、架空率、投抛长度、投抛高度以及投抛间隔等因素出发，并采用 MATLAB 进行数据处理，对框架群的减速效果进行试验分析。

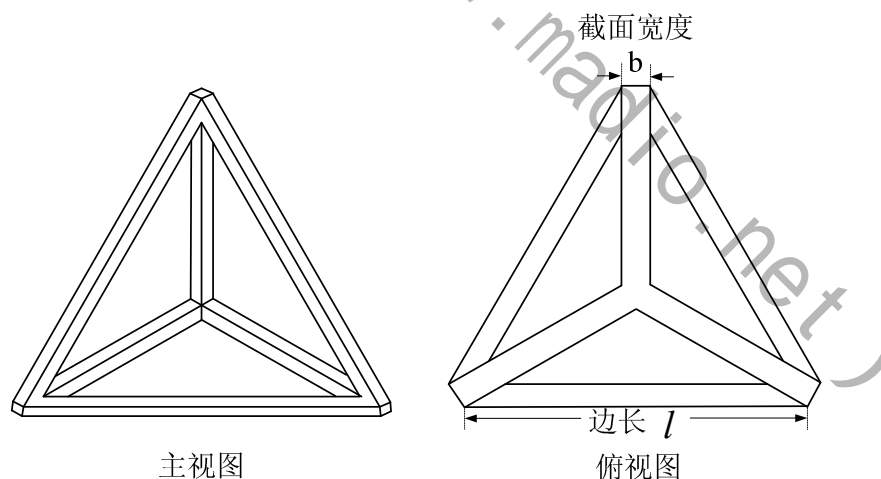


图 7.1 四面六边透水体框架示意图

7.1 实验装置

本文的实验水槽为长 20m、宽 1 m、高 1 m 的循环变坡玻璃水槽，实验时调节水槽底坡以形成稳定的均匀流，流速采用 SonTek 公司的超声多普勒 (ADV) 测速仪量测，该测速仪能够进行三维流场的实时测量，并且对测点处流场无影响，完全能够满足试验所需的精度要求，为便于观测投放框架群后的水力特性变化，试验中保持流量恒定。在距透

参赛队号 #2621

水框架群的下游 10cm、距水槽底 1cm 处布置流速测点。实验装置如图 7.2 所示。

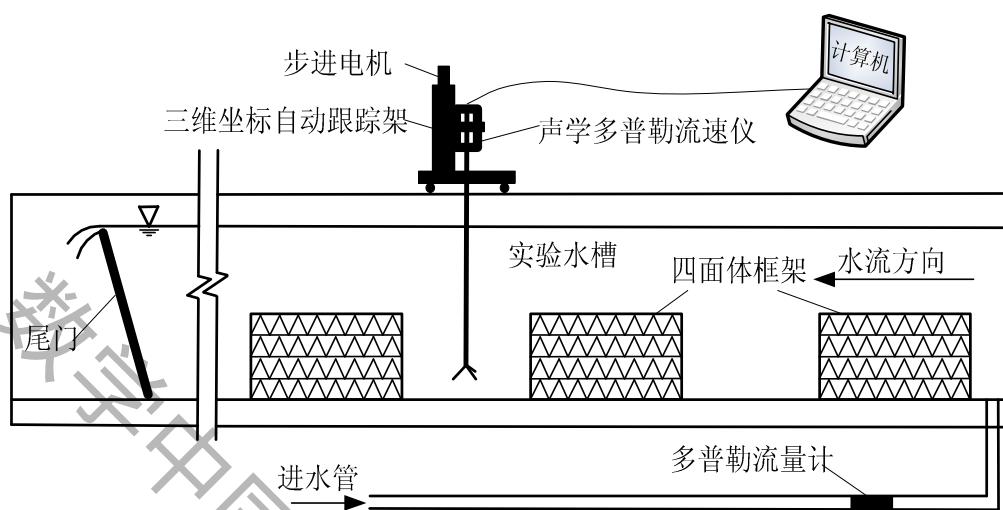


图 7.2 ADV 自动测量和分析系统及水槽示意图

其中，四面体框架群的结构示意图如图 7.3 所示。

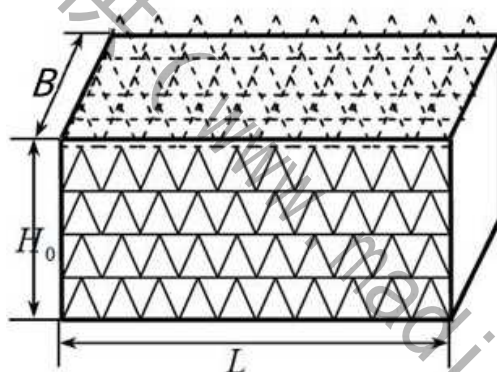


图 7.3 四面六边透水框架群示意图

其中， L 为框架群顺水流方向长度， B 为投抛宽度， H_0 为抛投高度。

7.2 参数定义

1) 定义单位体积架空率 \mathcal{E}

$$\mathcal{E} = \frac{V}{V_{\text{单}} \cdot N} \quad (7.1)$$

其中， V 为四面六边透水框架群体积， $V_{\text{单}}$ 为单个四面六边透水框架的空间体积， N 为框架群中四面体的个数。

由架空率的定义可知，其极限情况是框架群成为一个实心体或完全空心体，因此， \mathcal{E} 的取值范围为 $1-\infty$ 。

参赛队号 #2621

2) 框杆长宽比 λ

$$\lambda = \frac{l}{b} \quad (7.2)$$

其中， l 为单个四面六边透水框架的边长， b 为单个四面六边透水框架体边杆的正方形截面宽度。

3) 定义减速率 η

试验中，利用框架群抛投前后流速的变化来体现四面六边透水框架群减速促淤的效果，为方便起见，用减速率 η 来表示，且有

$$\eta = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (7.3)$$

其中， V_1 为投放四面六边透水框架群前测点的流速， V_2 为投放框架群后测点的流速。

7.3 实验分析

四面六边透水框架群作为一种新型的岸滩防护技术，对于如何达到框架群的最佳防护效果目前尚无十分明确的指导原则。透水性和阻水性是框架群的两个对立统一特性，透水性强就意味着阻水性能受到制约，使得水流对防护对象直接进行冲刷，达不到消能防护的目的；而阻水性能增强，透水性能就受到制约，就达不到“亲水”防护的目的。因此，如何在框架群的透水性能和阻水性能之间找到一个平衡点，达到框架群的最优减速防护效果，就成为框架群实现“亲水”防护的一个关键环节。由框架群的结构组成可以知道，框架群的架空率、铺设长度以及框架体的尺寸都会影响到框架群的透水性和阻水性能，制约着框架群的减速效果。

7.3.1 架空率对框架群减速率的影响

为研究不同架空率下框架群的减速消能效果，对给定框杆长宽比 $\lambda=10$ 的四面六边透水框架群，进行不同架空率下的减速试验，观测架空率对减速率的影响。试验数据如表 7.1 所示，并绘制架空率与减速率的关系曲线，如图 7.4 所示。

表 7-1 不同架空率下的框架群减速率

	ε	η_{\min}	η_{\max}	$\bar{\eta}$
$\lambda = 10$	3.0	0.60	0.64	0.63
	3.2	0.62	0.66	0.64
	3.5	0.64	0.68	0.67

参赛队号 #2621

$\lambda = 10$	3.8	0.66	0.70	0.68
	4.0	0.68	0.72	0.70
	4.2	0.69	0.73	0.71
	4.5	0.71	0.74	0.72
	4.8	0.73	0.75	0.74
	5.0	0.72	0.74	0.73
	5.2	0.72	0.75	0.73
	5.5	0.71	0.74	0.72
	6.0	0.63	0.67	0.65

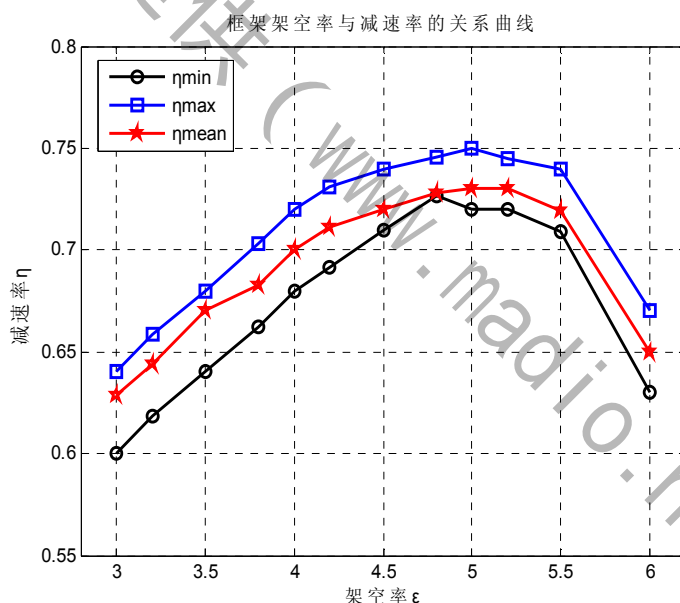


图 7.4 架空率与框架群减速率关系曲线

由图 7.4 可以清楚地看出，当单位体积内架空率 ϵ 较小时，框架群的阻水性能相对较强，透水性能较弱，对水流的减速率也相对较低。随着架空率的增加，框架群内部的空隙率增大，使得框架群的透水性得到增强，内部有足够的水流通过，阻水性能得到了充分发挥，减速率也在逐渐增大。在架空率达到 4.8 时减速率 η 达到最大，当架空率进一步增大时，透水性能得到了迅速提高，阻水性能大为减弱，减速率迅速减小。当架空率为 1 时（四面六边透水框架群为实体），不具透水性；当架空率为 $+\infty$ 时，也就是不投放任何东西，则对水流无任何影响。从图中还可以看出， $\epsilon=4.5\sim 5.0$ 时，减速率的变化较为平缓，因此，在工程设计中应尽可能使抛投透水框架群的架空率落在这一范围内。

参赛队号 #2621

7.3.2 框杆长宽比对框架群减速率的影响

为观测框杆长宽比对框架群减速效果的影响，固定框架群的架空率，进行不同框杆长宽比的减速消能试验。试验中框杆边长保持不变，按不同的长宽比确定框杆截面。选择架空率 $\varepsilon=4.8$ ，观测框杆长宽比对减速率的影响。试验数据如表 7-2 所示，并绘制框杆长宽比与减速率的关系曲线，如图 7.5 所示。

表 7-2 不同框杆长宽比下的框架群减速率

$\varepsilon=4.8$	λ	η_{\min}	η_{\max}	$\bar{\eta}$
	8	0.67	0.71	0.69
	10	0.70	0.74	0.73
	12	0.74	0.76	0.75
	14	0.76	0.78	0.77
	15	0.75	0.78	0.77
	16	0.74	0.79	0.78
	18	0.73	0.77	0.75
	20	0.70	0.75	0.73

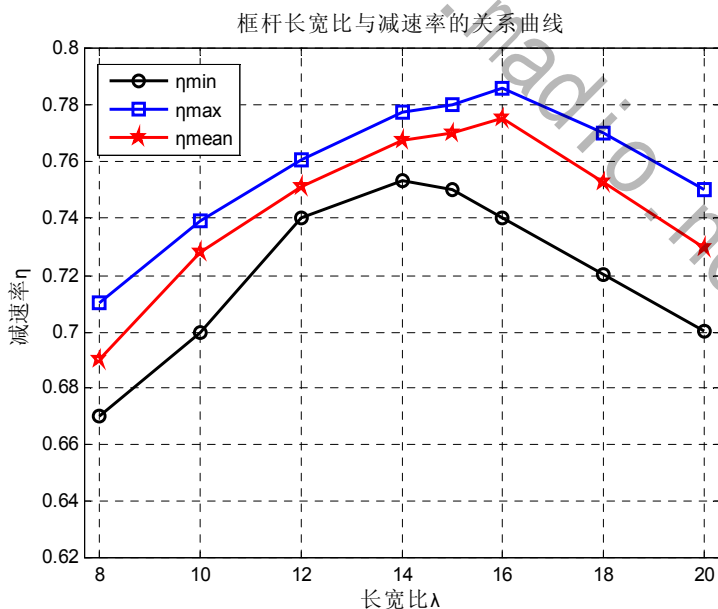


图 7.5 框杆长宽比与框架群减速率关系曲线

由图 7.5 可以看出，在架空率一定、保持框杆边长不变的情况下，当框杆长宽比 λ 较小时，框架群对水流的减速率也相对较小。随着框杆长宽比的增加，框架群的阻水消

参赛队号 #2621

能作用逐渐得到充分的发挥，框架群的减速率也逐渐增加。当框杆长宽比达到 16 时，减速率也达到最大。框杆长宽比再增加，框架群的透水性增强，阻水消能性能受到减弱，使得框架群的减速率逐步降低。试验表明在保持架空率不变的情况下，框杆长宽比在 15~18 范围内框架群减速效果较好。

7.3.3 架空率、框杆长宽比对框架群减速率的共同作用

由上面两次试验可知，四面六边透水框架群的架空率和框架长宽比对框架群的减速效果都有明显的影响。在给定框杆长宽比和架空率的情况下，分别存在最佳的架空率和框杆长度比范围。为了研究架空率和框杆长宽比对框架群减速的共同作用，进行了不同架空率和不同框杆长宽比的减速消能试验。试验所得数据如表 7-3 和表 7-4 所示，架空率、框杆长宽比与框架群减速率的关系曲线分别如图 7.6 和图 7.7 所示。

表 7-3 不同框杆长宽比下的架空率与平均减速率关系数据

ε	$\bar{\eta}$				
	$\lambda=8.0$	$\lambda=10.0$	$\lambda=12.5$	$\lambda=16.0$	$\lambda=20.0$
3.0	0.60	0.63	0.66	0.69	0.67
3.2	0.61	0.64	0.67	0.70	0.68
3.5	0.63	0.66	0.70	0.72	0.69
4.0	0.65	0.70	0.73	0.74	0.71
4.2	0.66	0.72	0.74	0.75	0.73
4.8	0.66	0.73	0.75	0.76	0.73
5.0	0.68	0.73	0.75	0.77	0.72
5.2	0.67	0.71	0.74	0.75	0.72
5.5	0.66	0.68	0.72	0.73	0.70
6.0	0.63	0.65	0.68	0.72	0.68

表 7-4 不同架空率下的框杆长宽比与平均减速率关系数据

λ	$\bar{\eta}$			
	$\varepsilon=3.0$	$\varepsilon=4.0$	$\varepsilon=4.8$	$\varepsilon=6.0$
8	0.60	0.65	0.69	0.62

参赛队号 #2621

10	0.63	0.70	0.72	0.65
12	0.65	0.72	0.75	0.68
14	0.67	0.74	0.77	0.70
16	0.69	0.74	0.77	0.71
18	0.68	0.73	0.76	0.70
20	0.67	0.72	0.74	0.68

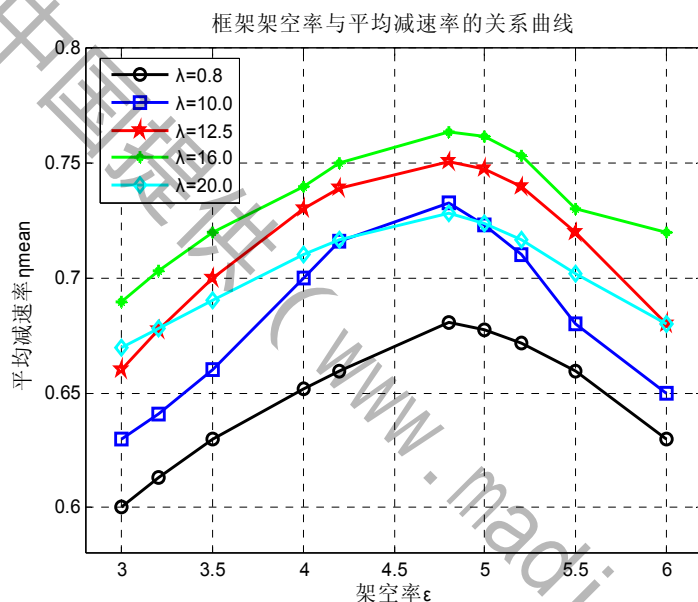
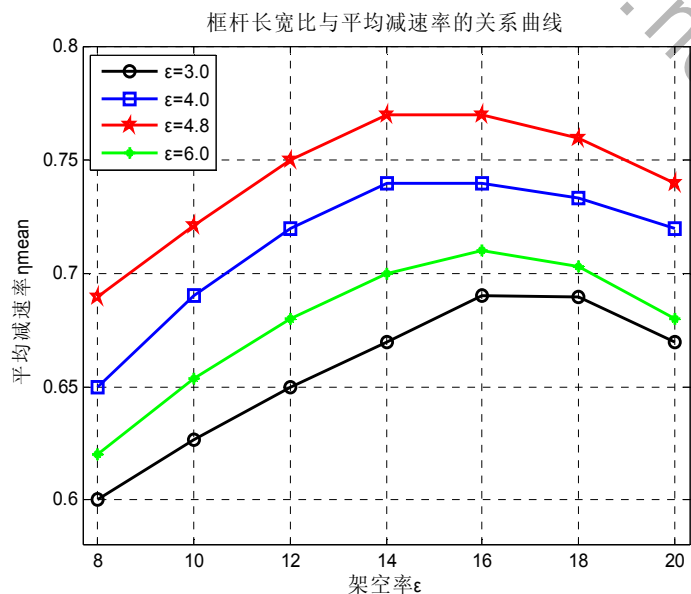


图 7.6 不同框杆长宽比时架空率与平均减速率关系曲线



参赛队号 #2621

图 7.6 不同架空率时框杆长宽比与平均减速率关系曲线

由图 7.6 和图 7.7 可以看出，不同架空率和不同框杆长宽比下，框架群的减速率随架空率和框杆长宽比的同步增大而逐渐增大。当架空率和框杆长宽比继续增大超过一定范围时，减速率反而在减小。在 $\lambda = 15 \sim 18$ ， $\varepsilon = 4.0 \sim 5.5$ 范围内减速率变化比较平缓，与前述架空率、框杆长宽比单独作用在框架群上的规律一致。在 $\lambda = 16$ ， $\varepsilon = 4.8$ 时框架群的减速效果最好。在工程中可根据实际需要，选择适当的框架群结构条件，使得架空率和框杆长宽比尽可能落在其最佳作用范围。

7.3.4 框架群长度对水平顺水流方向减速率的影响

为观测单个框架群长度对顺水流方向上减速率的影响，在不同架空率 ($\varepsilon = 6$ ， $\varepsilon = 4.8$) 下，固定框架群的高度、宽度，分别进行不同抛投长度下框架群的减速效果试验，试验中流速测点在框架群下游 10m、距离底部 $0.4H_0$ 、边壁 $0.5B$ ，试验数据如表 7-5 所示。

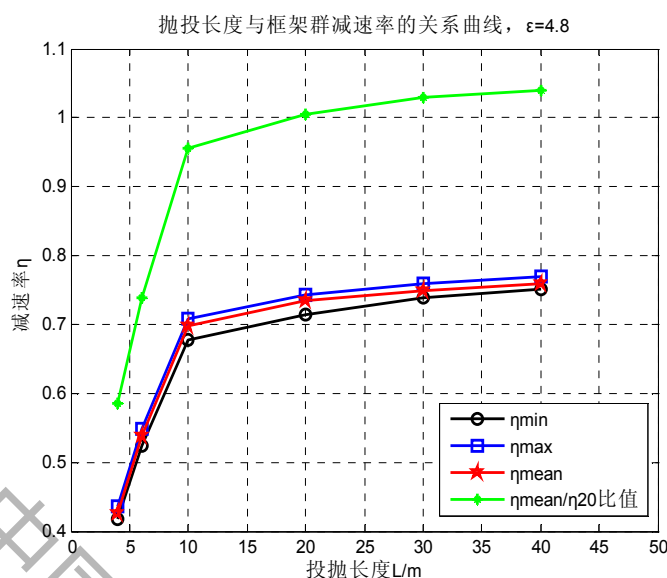
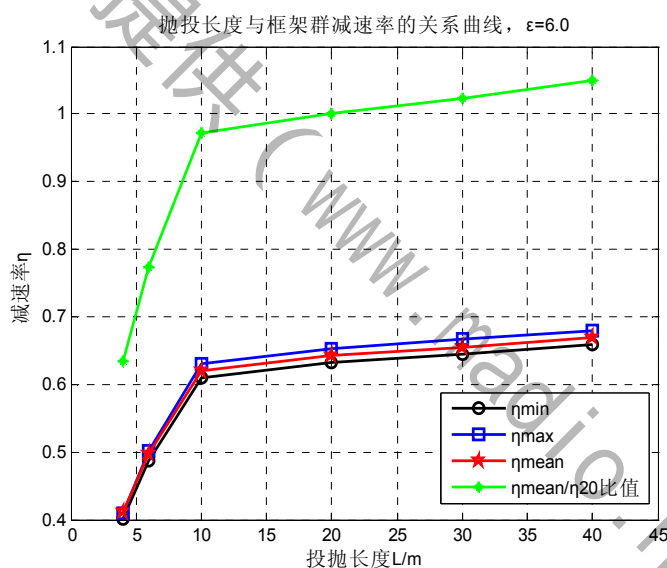
表 7-5 不同抛投长度(L)下的框架群减速率

$L(m)$	$\varepsilon = 4.8$				$\varepsilon = 6.0$			
	η_{\min}	η_{\max}	$\bar{\eta}$	$\bar{\eta}/\eta_{20}$	η_{\min}	η_{\max}	$\bar{\eta}$	$\bar{\eta}/\eta_{20}$
4.0	0.42	0.44	0.43	0.59	0.40	0.41	0.41	0.63
6.0	0.52	0.54	0.53	0.73	0.49	0.51	0.50	0.78
10.0	0.68	0.71	0.70	0.96	0.61	0.63	0.62	0.97
20.0	0.71	0.74	0.73	1.0	0.63	0.65	0.64	1.0
30.0	0.74	0.76	0.75	1.03	0.64	0.65	0.65	1.02
40.0	0.75	0.77	0.76	1.04	0.66	0.68	0.67	1.05

*表中，L 为原型值，空间比尺为 1:25(模型：原型)。

从表中可以看出，在不同的架空率下，随着框架群抛投长度的增加，框架群后测点处减速率在迅速增大，但当抛投长度超过 20m 后，抛投长度的持续增加，对框架群后测点流速没有明显的影响，减速率变化在 5% 以内。因此，在减速率增长有限的情况下，继续加大框架群抛投长度是没有必要的。为便于分析比较，又将相对减速率(不同抛投长度下框架群的减速率与抛投长度为 20m 时的减速率的比值)列于表 7-5 中，并绘制不同架空率 ($\varepsilon = 6$ ， $\varepsilon = 4.8$) 下，相对减速率与抛投长度的关系曲线如图 7.8 和 7.9 所示。

参赛队号 #2621

图 7.8 $\varepsilon=4.8$ 时框架群抛投长度与相对减速率的关系曲线图 7.9 $\varepsilon=6.0$ 时框架群抛投长度与相对减速率的关系曲线

由图 7.8 和图 7.9 可以看出, 当抛投长度超过 20m 后, 相对减速率虽然有所增加, 但增加幅度非常有限。当抛投长度为 10m 时, 虽然相对减速率与 20m 相近, 但是一旦抛投长度小于 10m, 相对减速率急剧下降, 不能起到一个有效的减速作用。考虑到实际应用, 一般取抛投长度为 10~20m 的范围。

将两图进行对比还可以发现, 架空率 $\varepsilon=4.8$ 时的减速率大于 $\varepsilon=6.0$ 时的减速率, 这也进一步验证了前述架空率对框架群减速率的影响。

7.3.5 框架群高度对水深方向减速效果的影响

为观测单个框架群的不同抛投高度对水深方向减速率的影响, 进行了框架群抛投高度试验。在保持框架群抛投长度 ($L=20m$)、宽度以及水深不变的条件下, 观测不同相对

参赛队号 #2621

抛投高度 H_0/H (框架群抛投高度与水深比值) 框架群的减速效果。试验中流速测点在框架群下游 $0.5L$ 、距离底部 $0.4H_0$ 、边壁 $0.5B$ 。试验所测数据如表 7-6 所示，并绘制相对抛投高度与平均减速率关系曲线，如图 7.10 所示。

表 7-6 不同相对抛投高度下的平均减速率

H_0/H	$\bar{\eta}$	H_0/H	$\bar{\eta}$
0.08	0.66	0.25	0.73
0.10	0.68	0.30	0.73
0.12	0.69	0.35	0.73
0.15	0.71	0.40	0.75
0.20	0.72	0.45	0.77

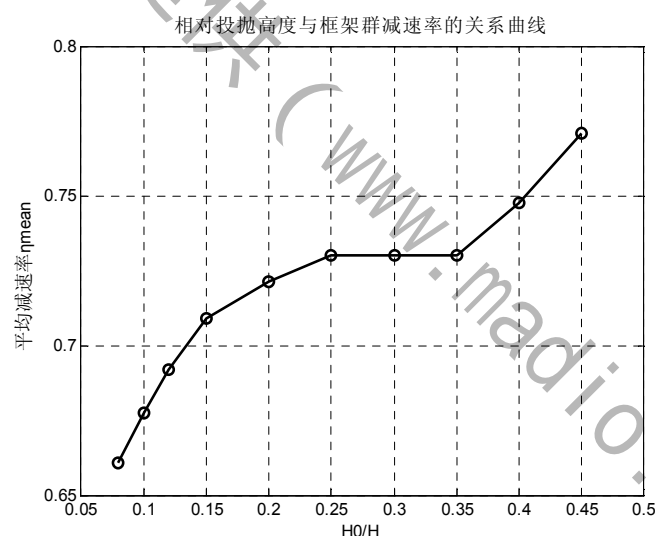


图 7.10 框架群相对抛投高度与平均减速率关系曲线

由图 7.10 可以看出，随着框架群抛投高度的增加，减速率也在逐渐增大。当 $H_0/H < 0.16$ 时，随着相对抛投高度的增加，减速率增加较快；当 H_0/H 在 $0.16 \sim 0.35$ 范围内时，减速率变化甚微，基本保持稳定。当 $H_0/H > 0.35$ 时，减速率又有增加。框架群高度 H_0 对近底减速率影响较小，当水深 H 不变，增加框架群高度，减速效果主要是减速区高度增加(减速区高度约为 $0.8H_0$ ，从框架群底部算起)，近底流速变化不显著。

7.3.6 框架群抛投间距对减速率的影响

通过表 7.5 及图 7.8、7.9 可以看出，在框架群抛投长度为 20m 时，框架群沿水流方向有着较好的减速效果。为进一步确定框架群沿水流方向的有效减速区域范围，我们对框架群抛投长度为 20m 时不同抛投间隔进行试验，其中观测测点布置在抛投间隔长度

参赛队号 #2621

的 $1/2$ 处。试验中对抛投长度 $L=20\text{m}$ 、架空率 $\varepsilon=4.8$ 、 $\varepsilon=6.0$ 的框架群，观测其不同抛投间隔时，间隔区内测点近底流速的减速率如表 7-7 所示，并绘制减速率与相对抛投间隔长度的关系曲线如图 7.11 所示。

表 7-7 不同相对抛投间隔长度下的框架群减速率

$\Delta L / L(m)$	$\varepsilon=4.8$			$\varepsilon=6.0$		
	η_{\min}	η_{\max}	$\bar{\eta}$	η_{\min}	η_{\max}	$\bar{\eta}$
0.25	0.92	0.97	0.95	0.80	0.84	0.82
0.375	0.76	0.77	0.77	0.65	0.66	0.66
0.50	0.73	0.73	0.73	0.64	0.66	0.65
0.75	0.59	0.59	0.59	0.51	0.51	0.51
1.00	0.42	0.47	0.45	0.38	0.40	0.39
1.50	0.23	0.26	0.25	0.21	0.22	0.21
2.00	0.15	0.18	0.12	0.15	0.15	0.15

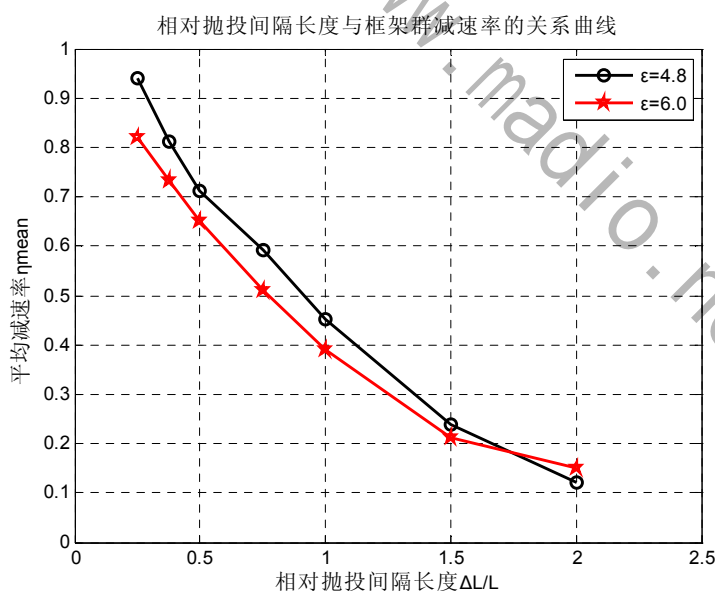


图 7.11 框架群减速率与相对抛投间隔的关系曲线

从表 7-7 和图 7.11 中可以看出，在不同架空率下，随着框架群相对抛投间隔的增加，相应测点的减速率不断减小。当 $\Delta L / L < 0.25$ 时，框架群减速率超过了 0.8。当 $0.25 < \Delta L / L < 0.5$ 时，减速率有较大的整体跌落变化，减速率值也较大，表明减速效果比较明显。当 $\Delta L / L > 0.5$ 后，随着抛投间隔的增加，测点的减速率在迅速减小，减速消

参赛队号 #2621

能效果越发不明显。综上所述，在工程施工中，框架群抛投间隔不应超过框架群长度的一半，应根据实际情况选择合适的抛投间隔。对于水流条件恶劣、对减速率要求比较高的情况，可以选择较小的抛投间隔以保证减速防护效果；对减速效果要求不高的情况下可以适当加大抛投间隔以减少工程投资和规模，但间隔仍不宜大于 0.75。

8 数值实验模型

通过水槽试验，研究了空心四面体框架群减速特性。实际工程中，近岸水流受四面体框架群的阻滞作用，被迫向主槽汇集，流过框架群后，又再次向岸边扩散。显然，这种水流现象是水槽试验中无法观测到的。为此，本章将借助于数学模型这一强有力的研究工具，进一步研究 L/H 、 H_0/H 、 B/H 对框架群减速特性的影响。

8.1 数值模拟技术介绍

1) 有限差分法

有限差分法是通过差商代替微商，用差分方程逼近微分方程，并根据原问题的初边值条件合理地给出离散化代数方程的初边值条件。计算时先将求解区域分成网格，以各节点的函数值为未知量，再将各节点的偏导数用相邻各节点的未知函数值和已知间距来表示，即可求得代数方程组的解。其优点是离散原理简单，数学推演和编写程序的工作量小，占用计算机内存小。根据离散方法和求解方法的不同可分为：直接差分法、ADI^[6]法、破开算子法。

2) 有限元法^[7]

有限元法是将给定的连续介质划分成许多具有合适形状的微小单元，在单元内，选定一些适当的节点，将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式，借助于变分原理或加权剩余法，将控制微分方程转换成控制所有孤立单元的有限元方程。然后，将所有局部单元上的方程汇集成总体的微分方程组或代数方程组，再换上应有的边界条件和初始条件，便组成一个完备的代数方程组，可以求得各节点的函数值，从而求得微分方程在整个计算域上的数值解。

3) 有限分析法^[8]

有限分析法是将计算域分成有限个规则子域，按解析法求得子域内各变量和子域边界变量之间的解析关系，然后将所有子域上的关系汇集成一组代数方程，根据所提出的实际边界条件，解出域内各点的变量值。有限分析法有较高的计算精度，并具有自动迎风特性，计算稳定性好，收敛较快，在我国有了较多的研究和应用。但由于有限分析系数中含有交错级数，这给实际计算与理论分析都带来一些困难。

在数值模拟的过程中，虽然采用的离散求解方法不同，但都有相同的特点，即首先把计算区域化分成许多控制体或网格，然后在这些小块上把微分方程离散成代数方程，再把小块上的代数方程汇合成总体代数方程组，最后在一定的初边值条件下求解此方程组，从而求得计算区域内各节点的物理量。所以数值模拟的正确性和精确度取决于网格的划分、方程的离散、初边值条件、代数方程组的求解以及所建模型的物理理论依据是否正确合理等几个因素。

参赛队号 #2621

8.2 数学模型建立

8.2.1 水流控制方程

流体数值计算是在离散的计算网络上进行的，因此，采用的计算网络是否适合对计算的成败起着关键的作用，好的网格应该能完整准确的反映固体边界的情况，疏密适当，既能够较好的控制计算量，使计算有较好的收敛性，又能使计算结果误差不致过大，能真实的反映流体的运动情况。目前广泛应用的是曲线坐标网格。

曲线坐标网格即是在水平方向上采用正交曲线坐标 (ξ, η) ，令 $\xi = \lambda_1$ ， $\eta = \phi$ ， $\sqrt{G_{\xi\xi}} = R \cos \phi$ ， $\sqrt{G_{\eta\eta}} = R$ ，

其中 λ_1 为经度， ϕ 为纬度， R 为地球半径。

在进行平面二维计算时采用的是沿水深平均的二维数学模型，其连续方程为：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} G_{\eta\eta}} \frac{\partial [(d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} G_{\eta\eta}} \frac{\partial [(d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad (8.1)$$

其中： $Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E$

q_{in} ， q_{out} 表示控制河段的入流和出流 P 表示雨水量， E 表示蒸发量。

x 向的动量方程为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ - f_v = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(V_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (8.2)$$

y 向的动量方程为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \eta} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \xi} \\ + f_u = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(V_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (8.3)$$

其中 u 、 v 分别表示 x 向、 y 向流速， p_ξ 、 p_η 表示 x 向、 y 向的压力梯度， F_ξ 、 F_η 表示 x 向、 y 向由于雷诺应力产生的紊动， M_ξ 、 M_η 表示外来因素带来的动量。

8.2.2 离散格式

参赛队号 #2621

在求解曲线正交坐标系下的基本方程式时，对结点变量采用交错网格技术。离散为差分方程时，采用 A0I 法，该离散格式的构造步骤如下：将时间步长分成前后两个半步，在前半个时间步长取某一个方向为隐式；为保持对称，在后半个时间步长改变隐式方向，每一时间步都交替改变隐式方向进行计算，最终的代数方程组系数矩阵呈三对角型式，采用 TDMA 以方法进行求解，获得各结点沿水深平均的流速和水位。

8.2.3 定解条件

1) 初始条件

在给定的计算区域内，采用冷启动条件，计算开始时给定各点某一水位和零流速作为初始条件。即在时间 $t=0$ 时，令 $h(x, y, 0) = h_0(x, y)$

$$U(x, y, 0) = 0 \quad (8.4)$$

$$V(x, y, 0) = 0 \quad (8.5)$$

2) 边界条件

① 自由边界

上边界 Q 为已知，下边界采用 Z_T 为已知，对于流量边界条件根据地形变化情况按下式分段给定断面上各段的流量：

$$Q_i = \frac{B_i H_i^{3/2}}{\sum_{j=1}^N B_j H_j^{3/2}} Q \quad (8.6)$$

式中 Q_i 为某段的流量， B_i 为该段的宽度， H_i 为该段的水深， Q 为断面总流量。

② 时间步长的确定

$$C_f = 2\Delta t \sqrt{gH \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)} < 4\sqrt{2} \quad (8.7)$$

式中 Δx Δy 分别表示纵向、横向网格的最小长度。

③ 固壁边界

对于固壁边界应满足无滑动边界条件，紊动耗散率为有限值。在实际应用过程中该条件往往难以应用，所以采用不穿透条件。 $V \cdot n = 0$ ，其中 n 为固体边界的法向矢量。

8.4 计算结果与分析

河道宽 $B1$ 为 50m，长 $L1$ 为 500m，水深 H 为 3m，河道模型如下图所示。

参赛队号 #2621

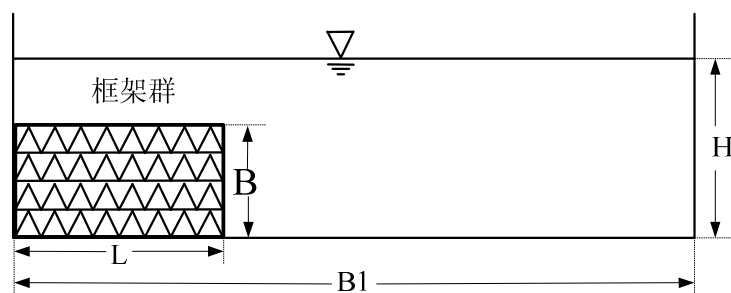


图 8.1 河道模型

本数值试验主要针对单个框架群进行研究，从离上游边界 200m 处开始抛投，只抛在河道的左侧，右侧不抛。本文主要研究框架群的形态对框架群后水流的减速特性，故将研究位置设在框架群后的各点上，研究点坐标示意图如图所示。

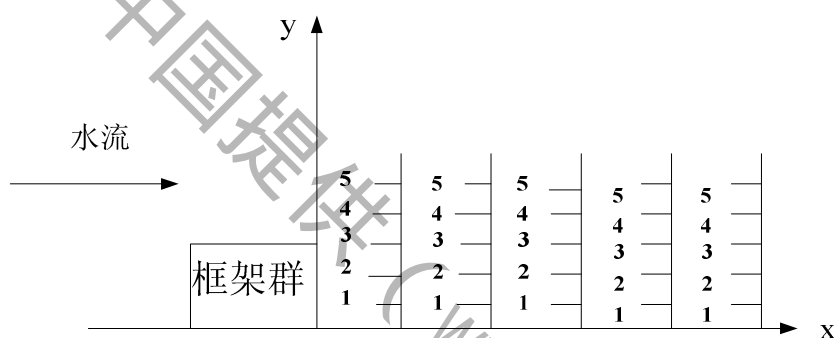


图 8.2 研究点坐标示意图

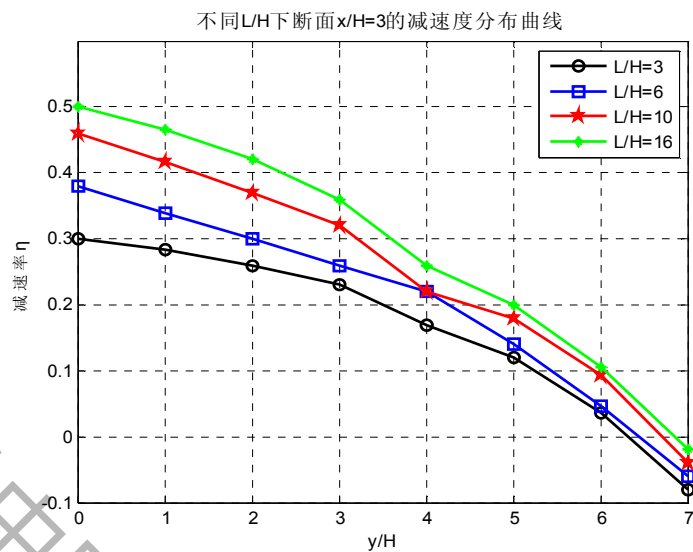
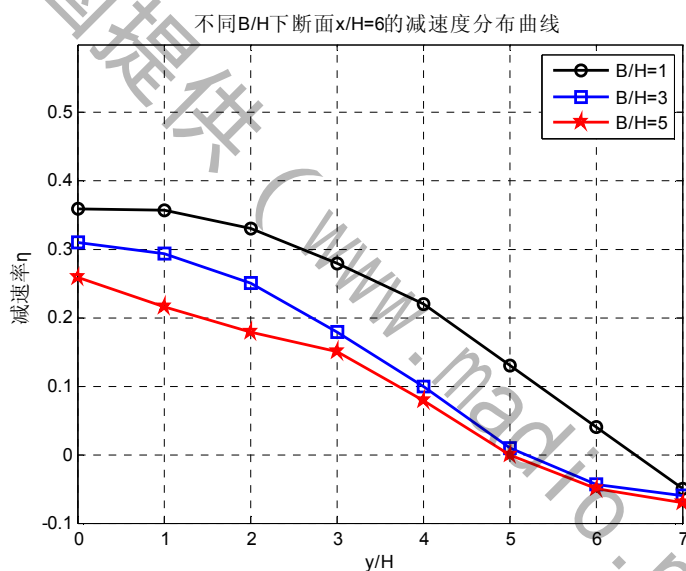
其中， x 表示框架群后研究点的距离， y 表示研究点到左岸的距离，在文中，采用 x/H 、 y/H 表示研究点在框架群后的位置。

架群护岸时采用间隔布置，可节省大量投资。故了解框架群形态如 L/H 、 B/H 、 H_0/H 对框架群后不同距离的水流减速率的影响，这对于在实际工程中框架群护岸的设计有着极其重要的意义。定义框架群后减速率大于 0.2 的区域为框架群的保护区，下面就 L/H 、 B/H 、 H_0/H 对框架群后保护区的影响逐一进行研究。

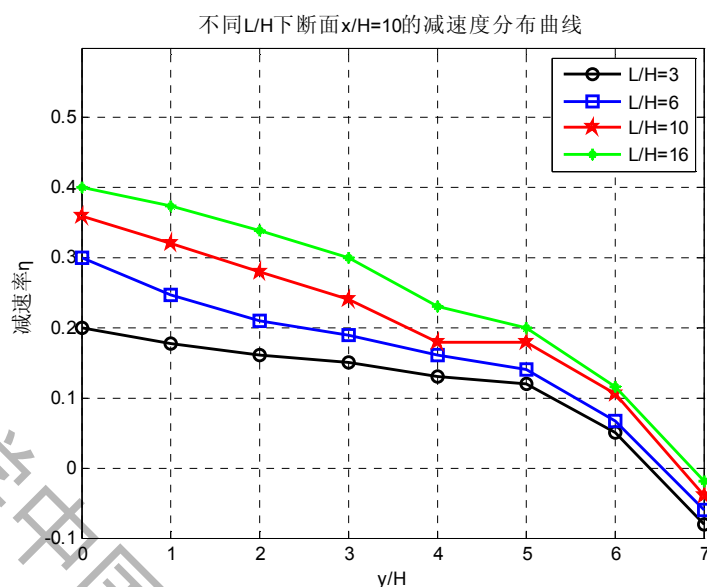
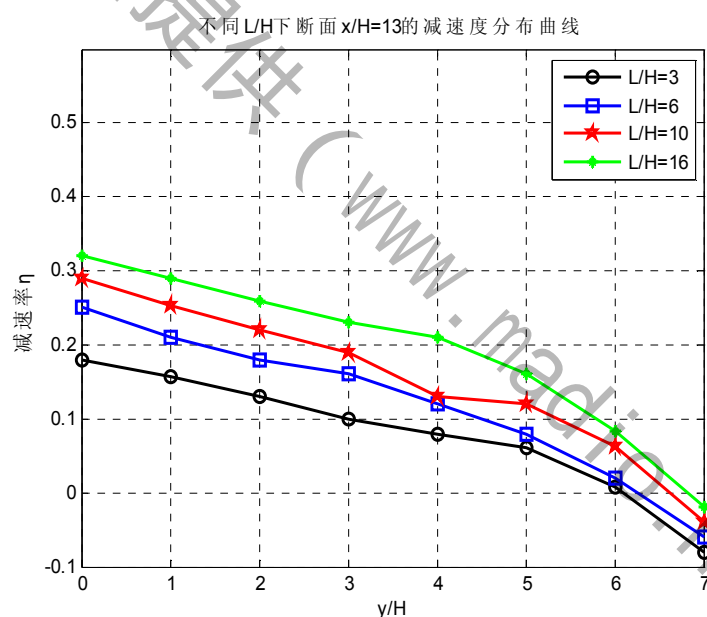
8.4.1 L/H 对框架群后保护区的影响

为比较不同的 L/H 下保护区范围的变化，在不同的 L/H 下进行计算，并将各研究断面的减速率绘成图（投放框架群前河道各断面点的垂向平均流速 1m/s ），各研究断面的减速率分布如下图所示。

参赛队号 #2621

图 8.3 不同 L/H 下断面 $x/H=3$ 的减速率分布图 8.4 不同 L/H 下断面 $x/H=6$ 的减速率分布

参赛队号 #2621

图 8.5 不同 L/H 下断面 $x/H=10$ 的减速率分布图 8.6 不同 L/H 下断面 $x/H=13$ 的减速率分布

从各断面不同 L/H 下减速率的分布图可以看出：

(1) 将四张图对比可以看出，随着 x/H 的增大，相同 L/H 下水流的减速率顺水流方向逐渐减小，说明框架群后距离越远，减速率越小；当 $x/H=13$ 时，仍具有一定的减速率，说明了在框架群后有相当长距离的减速区。

(2) 当 $y/H \leq 2$ 时，各研究断面的水流减速率都是随着 L/H 的增加而增大。由此可知，框架群越长，框架群后对应点水流的减速率越大，减速区延续的距离越远，从而保护区的长度就越长。

(3) 减速率随着 y/H 的增大而减小，但当 $y/H > 2$ 时，各研究断面的水流减速率仍然大于 0，由此可知，框架群放入水中后，对框架群后 $y > b$ 的水流仍有一定的减速作用。

参赛队号 #2621

(4)随着 y/H 的增大，减速率逐渐减小至小于 0，表明由于框架群的阻滞作用，框架群外部的水体受到挤压，使水流在框架群后河道横向上产生了流速梯度，从而也说明了在框架群后被挤压水体向左岸扩散的原因。

因此，随着 L/H 的变化，框架群后保护区的长度也是不同的， L/H 越大，保护区长度越长，故应适当的选择框架群的长度和间隔距离，这样才能在最省的投资下达到最好的护岸效果。

8.5.2 B/H 对框架群后保护区的影响

固定 $H_0/H=0.6$ ， $L/H=6$ ，在不同的 B/H 下进行计算，得到不同的 B/H 下框架群后各断面的减速率，不同 B/H 下框架群后各断面的减速率分布如下图所示。

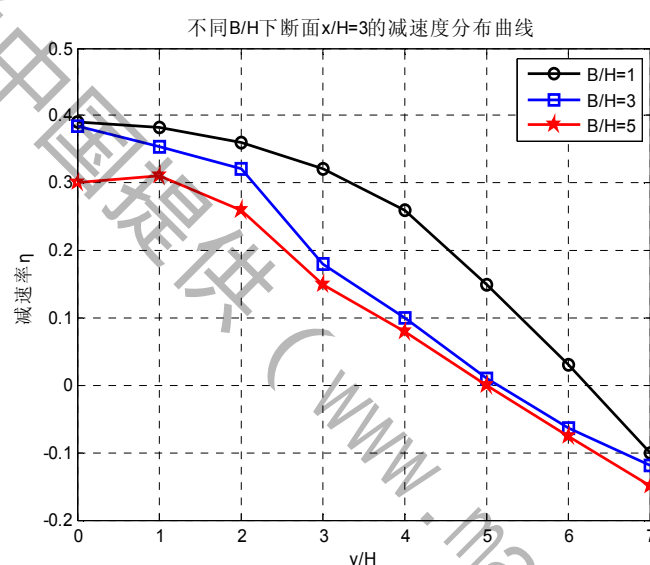


图 8.7 不同 B/H 下断面 $x/H=3$ 的减速率分布

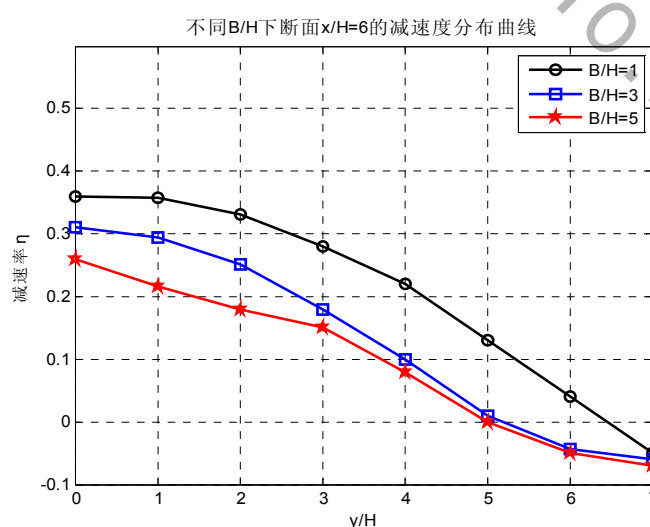
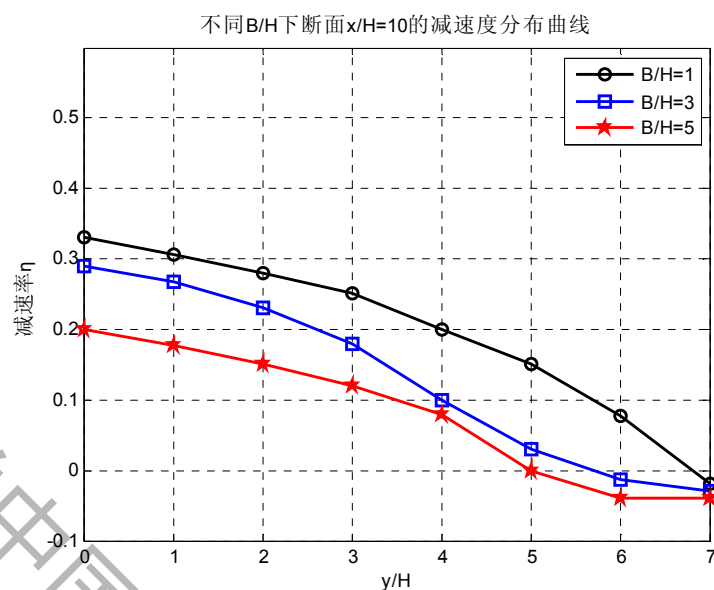
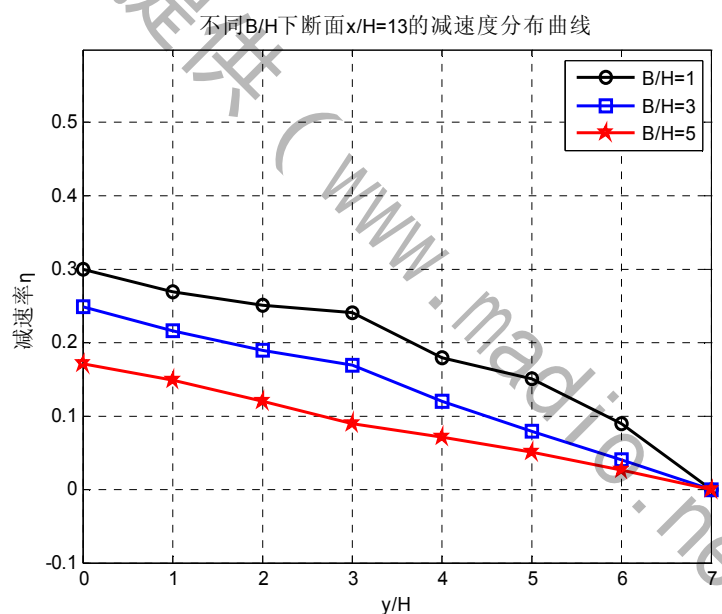


图 8.8 不同 B/H 下断面 $x/H=6$ 的减速率分布

参赛队号 #2621

图 8.9 不同 B/H 下断面 $x/H=10$ 的减速率分布图 8.10 不同 B/H 下断面 $x/H=13$ 的减速率分布

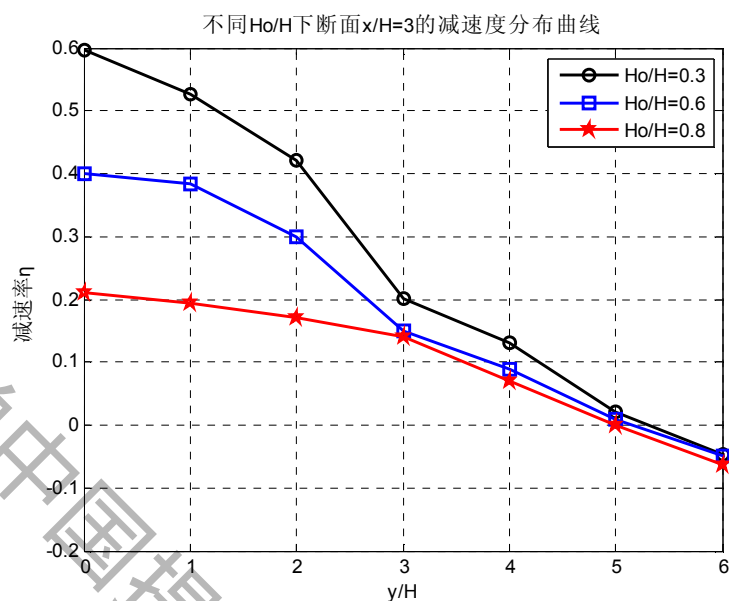
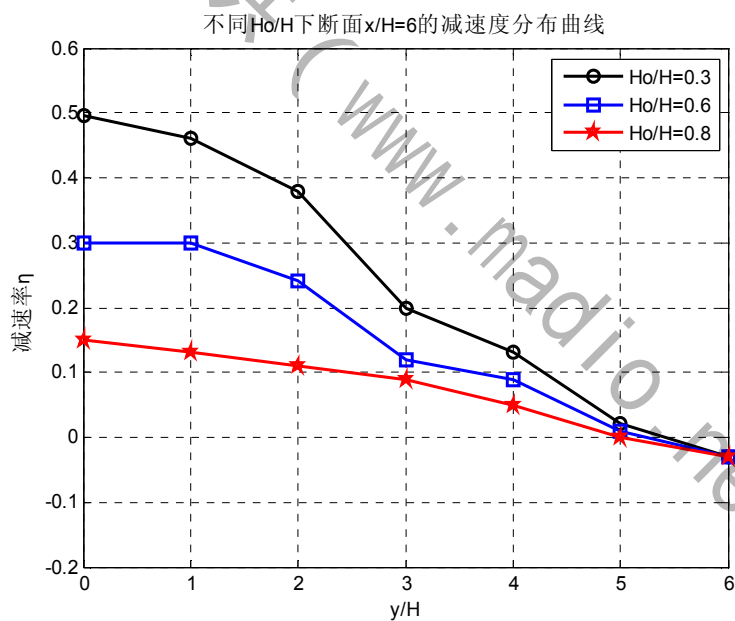
由上面各图可以看出：

- (1) 同一研究断面上，随着 B/H 的增大，保护区的宽度越宽。
 - (2) 框架群后对应点的减速率随着 B/H 的增加而增大。由此可知，框架群越宽，框架群后对应点水流的减速率越大，减速区延续的距离越远，从而保护区的长度也就越长。
- 因此，为使框架群护岸具有一定的保护宽度和长度，应适当选择框架群的宽度。

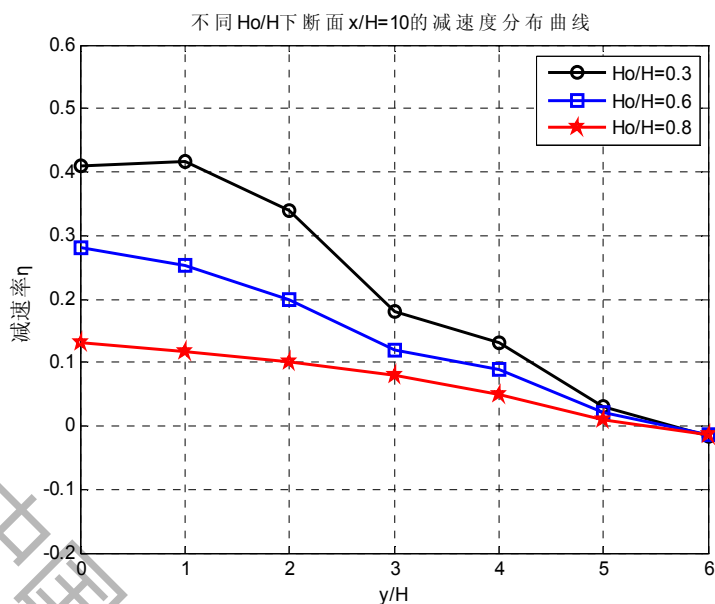
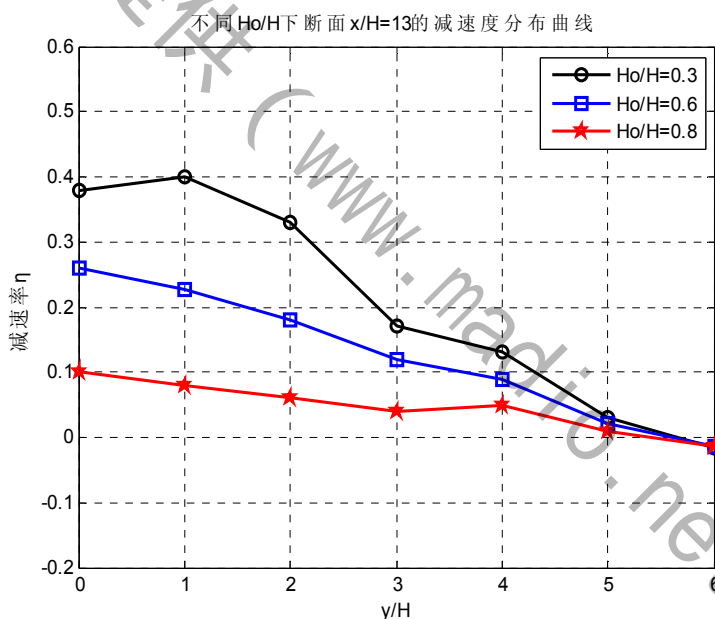
8.5.3 H_0/H 对框架群后保护区的影响

固定 $L/H=6$, $B/H=3$, 改变框架群的高度 H_0 , 在不同的 H_0/H 下进行计算，得到不

参赛队号 #2621

同 H_0/H 下的各断面的减速率分布如图所示图 8.11 不同 H_0/H 下断面 $x/H=3$ 的减速率分布图 8.12 不同 H_0/H 下断面 $x/H=6$ 的减速率分布

参赛队号 #2621

图 8.13 不同 H_0/H 下断面 $x/H=10$ 的减速率分布图 8.14 不同 H_0/H 下断面 $x/H=13$ 的减速率分布

从不同 H_0/H 下各断面的减速率分布图可知：

(1) 框架群后距离越远，减速率越小，但 H_0/H 越大，对应点的减速率也越大；由此可知， H_0/H 越大，框架群后保护区的长度越长。

(2) 在不同的 H_0/H 下，同一断面的减速率随 y/H 变化的趋势是相同的，都随着 y/H 的增大而减小，但减速率是不同的，从而保护区的宽度是不同的，随着 H_0/H 的增加，保护区的宽度也在增大。

参赛队号 #2621

由此可知，不同的 H_0/H 下，框架群后的水流具有不同的减速率，且保护区也有不同的长度和宽度，故为达到较佳的护岸效果，应根据不同的水深抛投相应的框架群高度和间隔距离。

本章通过数模计算主要研究了水流流过框架群时的流态， L/H 、 B/H 、 H_0/H 对框架群后垂线平均流速的减速率以及保护区长度、宽度的影响。

(1) 通过对水流流过框架群流态研究表明，框架群在其下游一定距离内有一定的减速作用。

(2) 随着 L/H 、 B/H 、 H_0/H 的增加，框架群后对应点的减速率也逐渐增加，保护区长度、宽度也不断增加，因此，应根据不同的水深和减速率要求抛投相应长度、宽度、高度、间距的框架群。

另外，通过数值实验模型进一步探讨了 L/H 、 B/H 、 H_0/H 对框架群的减速率特性及保护区的长度、宽度的影响，为框架群的应用推广提供了指导和依据。

9 总结与展望

本文主要通过理论分析、水槽模型试验、数模数值实验等研究水段对四面体框架群护岸机理、穿越框架群水流的阻力特性、减速特性及其影响因素（如框架体尺寸、架空率和框架群投抛长度、高度等）进行了研究。由图形对比分析可知，应根据不同的水深和减速率要求抛投相应长度、宽度、高度、间距的框架群。

由于护岸工程涉及诸多因素，如河道的河势与演变，水流的三要素：流量、流速、水深的变化、河岸及河床的地质构成等，都使护岸工程具有其特殊性与复杂性。水槽试验难以模拟，只能抓住主要方面进行简化处理。基于水槽条件的限制，试验受到边壁的影响，本文所得结果不可避免的存在一定局限性。因此，四面六边透水框架护岸作为一种新型的护岸技术，目前研究尚为浅显，本文也仅仅在四面体水流特性和阻力特性基础上进行河岸护岸布置等方面做了十分有限的探索，还有不少问题有待于进一步改正和深入研究：

(1) 在含沙水流中，通过物模试验附以先进的测量手段，研究框架群内部剪切力的变化以及促淤效果。

(2) 我国大多数平原河道都复式河槽，框架群在复式河道中护岸后，研究框架群对河势、行洪量以及主槽与滩地的动量交换的影响，这对于框架群在复式河道中的护岸设计有着及其重要的意义。

(3) 采用物模和数模的手段对单个四面体内外流场及阻力特性进行研究，找出四面体减速的微观机理。

因此，四面体透水框架的以后还有更多的工作需要进行，从而使得该防护措施得到最大优化目的。

参考文献

[1] 吴龙华, 周春天, 严忠民等. 架空率、杆件长宽比对四面六边透水框架群减速促淤效果

参赛队号 #2621

- 的影响[J], 水利水运工程学报, (3):74-77, 2003.
- [2] 王南海, 张文捷, 王玢. 新型护岸技术-四面六边透水框架群在长江护岸工程中的应用[J], 长江科学院院报, 16(2): 11-16, 1999.
- [3] 林云光. 新型河道保滩护岸结构—混凝土码搓群的水流特性研究[D], 河海大学硕士学位论文, 2001.
- [4] 徐锡荣, 唐洪武, 宗竟等. 长江南京河段护岸新技术探讨[J], 水利水电科技进展, 24(4):26-28, 2004.
- [5] 刘刚. 透水框架体水流特性及护岸应用试验研究[D], 河海大学硕士学位论文, 2006.
- [6] 顾尔柞. 流体力学有限差分法基础[M], 上海交通大学出版社, 1988.
- [7] 陈材侃. 计算流体力学[M], 重庆出版社, 1992.
- [8] 田玉丽, 河势分析及二维水流模拟在迁产业重机码头工程上的应用[D], 河海大学硕士学位论文, 2003. 4.

附录

由于程序太多只附加部分 MATLAB 程序代码, 其他程序类似。

附录 1 架空率因素与减速率之间的关系

```
close;clc;%长宽比固定,  $\lambda=10$ , 架空率与框架群减速率关系曲线
E=[3.0, 3.2, 3.5, 3.8, 4.0, 4.2, 4.5, 4.8, 5.0, 5.2, 5.5, 6.0];%架空率
Nmin=[0.60, 0.62, 0.64, 0.66, 0.68, 0.69, 0.71, 0.73, 0.72, 0.72, 0.71, 0.63];
%减速率最小值
Nmax=[0.64, 0.66, 0.68, 0.70, 0.72, 0.73, 0.74, 0.75, 0.74, 0.75, 0.74, 0.67];
%减速率最大值
Nmean=[0.63, 0.64, 0.67, 0.68, 0.70, 0.71, 0.72, 0.74, 0.73, 0.73, 0.72, 0.65];
%减速率平均值
figure;
plot(E, Nmin, '-ko', 'LineWidth', 1.5);hold on; % 绘制图形黑色
plot(E, Nmax, '-bs', 'LineWidth', 1.5);hold on; %蓝色
plot(E, Nmean, '-rp', 'LineWidth', 1.5);hold on;%红色
legend('  $\eta_{min}$ ', '  $\eta_{max}$ ', '  $\eta_{mean}$  ');
xlabel(' 架空率  $\epsilon$  ');ylabel(' 减速率  $\eta$  ');
title(' 框架架空率与减速率的关系曲线 ');
grid on;
axis([2.8 6.2 0.55 0.8]);
```

附录 2 长宽比因素与减速率之间的关系

```
close;clc;%杆边长保持不变, 按不同的长宽比确定四面体的截面宽度, 架空率  $\epsilon=4.8$ 
```


参赛队号 #2621

```

R=[8, 10, 12, 14, 15, 16, 18, 20];%长宽比
Nmin=[0.67, 0.70, 0.74, 0.76, 0.75, 0.74, 0.73, 0.70];%减速率最小值
Nmax=[0.71, 0.74, 0.76, 0.78, 0.78, 0.79, 0.77, 0.75];%减速率最大值
Nmean=[0.69, 0.73, 0.75, 0.77, 0.77, 0.78, 0.75, 0.73];%减速率平均值
figure;
plot(R, Nmin, '-ko', 'LineWidth', 1.5);hold on; % 绘制图形
plot(R, Nmax, '-bs', 'LineWidth', 1.5);hold on;
plot(R, Nmean, '-rp', 'LineWidth', 1.5);hold on;
legend('  $\eta_{min}$ ', '  $\eta_{max}$ ', '  $\eta_{mean}$ ');
xlabel('长宽比  $\lambda$ ');ylabel('减速率  $\eta$ ');
title('框杆长宽比与减速率的关系曲线');
grid on;
axis([7.7 20.3 0.62 0.8]);

```

附录3 抛投长度与减速率之间的关系

```

close;clc;%不同抛投长度(L)下的框架群减速率
L=[4, 6, 10, 20, 30, 40];%抛投长度
E1=4.8;%架空率
Nmin1=[0.42, 0.52, 0.68, 0.71, 0.74, 0.75]; %最小减速率
Nmax1=[0.44, 0.54, 0.71, 0.74, 0.76, 0.77]; %最大减速率
Nmean1=[0.43, 0.53, 0.70, 0.73, 0.75, 0.76];%平均减速率
NN1=[0.59, 0.73, 0.96, 1.0, 1.03, 1.04];%不同抛投长度下框架群的平均减速率
%与抛投长度为 20m 的减速率的比值
E2=6.0;%架空率
Nmin2=[0.40, 0.49, 0.61, 0.63, 0.64, 0.66]; %最小减速率
Nmax2=[0.41, 0.51, 0.63, 0.65, 0.65, 0.68]; %最大减速率
Nmean2=[0.41, 0.50, 0.62, 0.64, 0.65, 0.67];%平均减速率
N_N2=[0.63, 0.78, 0.97, 1.0, 1.02, 1.05];%不同抛投长度下框架群的平均减速率
%率与抛投长度为 20m 的减速率的比值
figure(1);
plot(L, Nmin1, '-ko', 'LineWidth', 1.5);hold on; % 绘制图形
plot(L, Nmax1, '-bs', 'LineWidth', 1.5);hold on;
plot(L, Nmean1, '-rp', 'LineWidth', 1.5);hold on;
plot(L, NN1, '-g*', 'LineWidth', 2);hold on;
legend('  $\eta_{min}$ ', '  $\eta_{max}$ ', '  $\eta_{mean}$ ', '  $\eta_{mean}/\eta_{20}$  比值');
xlabel('抛投长度 L/m');ylabel('减速率  $\eta$ ');
title('抛投长度与框架群减速率的关系曲线,  $\varepsilon=4.8$ ');
grid on;
axis([0 50 0.4 1.1]);
figure(2);
plot(L, Nmin2, '-ko', 'LineWidth', 1.5);hold on; % 绘制图形
plot(L, Nmax2, '-bs', 'LineWidth', 1.5);hold on;

```

参赛队号 #2621

```
plot(L, Nmean2, '-rp', 'LineWidth', 1.5);hold on;  
plot(L, NN2, '-g*', 'LineWidth', 2);hold on;  
legend('  $\eta$  min', '  $\eta$  max', '  $\eta$  mean', '  $\eta$  mean/  $\eta$  20 比值');  
xlabel(' 抛投长度 L/m');ylabel(' 减速率  $\eta$ ');  
title(' 抛投长度与框架群减速率的关系曲线,  $\varepsilon=6.0$ ');  
grid on;  
axis([0 45 0.4 1.1]);
```

数学中国提供 (www.madio.net)