

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：

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：本科组

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）：2326

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 护岸框架及框架群最优化设计

关 键 词 框架结构；最优化；可靠性；强度分析

摘 要

本文就四面六边透水框架的结构强度以及最终堆砌的框架群形状这两个方面进行研究，并设计一个新的框架结构。

在模型一中，基于对施工周期时间长和框架长期使用角度考虑，在第一阶段讨论出的正四面六边透水框架的基础上进行分析设计，最终建立了镰刀—L 型模型。通过研究圆形，正方形，等腰直角三角形这三种截面分别对水流的减速效果，以及抗弯，抗扭，抗拉三方面的研究与定量分析，得出框架应以正方形截面杆进行延伸的结论，并且第一框架的框杆长度为 80cm-120cm，最佳为 100cm；具有可勾连部件 50 的框杆 30 第一连接部 300 长度为 10cm-30cm，最佳为 20cm；第二连接部 301 的长度为 140cm-160cm，最佳为 150cm（见模型一）。

在模型二中，基于对施工周期紧张和短期使用，可回收利用的角度考虑，建立了一种快速组装护岸防冲透水框架模型，并对框架中连接绳子材料选择问题进行研究，选取几种工程中常采取材料进行抗拉强度分析，得出强度由大到小的顺序：钢丝绳，白棕绳，尼龙绳。但鉴于水下情况复杂（如材料腐蚀等问题），最终综合考虑得到的材料排序为：白棕绳，钢丝绳，尼龙绳。模型二最终选择白棕绳作为框架连接材料（见模型二）。

在模型三中，对最终堆砌的框架群形状是否合理的问题进行建模研究，建立一种桩群透水框架坝模型，使其能够应用在水量大，水流条件复杂，并且防洪要求高的河道的治理工程。所用的透水框架为模型一或是模型二中的透水框架，并对桩群透水框架坝坝体可靠性进行计算，计算结果表明该坝体的可靠性约为 98%；采用空间 8 结点随机有限元程序计算桩群透水框架坝各单元的可靠度，计算结果表明，除了坝踵附近一微小区域出现拉应力之外，其余单元均为压应力，抗拉可靠度指标均大于 3.5。坝踵附近坝体单元产生的拉应力较小，基岩 444、445、446、447 和 448 号单元（单元的位置见图 14）的拉应力较大，其抗拉可靠度指标分别为：3.61、2.66、1.49、0.78 和 2.41（见模型三）。

本文中，模型一和模型二的透水框架都具有良好的整体性、稳定性、贴底性、消能、促淤等效果，对减少软体排压载的投资，保护环境和节约资源起到了很好的作用。模型三除具有挑流控导河势的作用外，还能起到减缓过坝水流速度，沉降坝中泥沙的作用，使其在长江干线的航道整治工程中有很大的应用前途。

参赛队号： 2326

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）

Abstract

This paper studies the modeling of six side penetrating frame structure strength and the final stack frames from the two aspects, and design a new frame structure.

In the model one, consider the long-term use of the construction cycle time and frame based on the angle, discussed in the first stage is surrounded by six side penetrating frame structure on the basis of analysis and design, in order to let each frame can be hooked, the need for extension of the framework, the final establishment of sickle - L model. Through the study of circular, square, the isosceles right-angled triangle of the three section of slow flow, and the bending, torsion, research and quantitative analysis of three aspects of tensile, then framework should be extended to the conclusion of square section bar. The first frame and frame length is 80cm-120cm, the best is 100cm; has a hook part 50 frame rods 30 the first connecting portion 300 length is 10cm-30cm, the best is 20cm; the second connecting part 301 of the length of 140cm-160cm, the optimum 150cm (see model).

In model two, the use of construction cycle short and short term based on angle, can be recycled into account, to overcome the existing reinforced concrete production processing all six sides permeable frame assembling complex and high cost, the processing space occupied area, the transportation cost problems, establish a rapid assembly of revetment erosion permeable frame model. And the choice of connection string material frame, several projects often take material tensile strength analysis, draw strength from big to small order: white rope, wire rope, nylon rope. But in view of underwater complex (such as material corrosion problems), considering the final obtained sort materials: white rope, wire rope, nylon rope. Model two final choice of white coir rope as a frame connecting material (see model two).

In model three, modeling research on the reasonableness of the final stack frame group shape, the establishment of a pile permeable frame of dam and its construction method, which can be used in a large amount of water, water flow condition is complex, and the requirement of flood control of river improvement project. Penetrating frame used for model or penetrating frame model 2, and the pile permeable frame dam reliability calculation, the calculation results show that the reliability of the dam is about 98%; with 8 nodes and stochastic finite element program for the calculation of pile group dam permeable frame of each unit's reliability, the calculation results show that, in addition to a small region near the dam heel stress, the remaining units are compressive stress, tensile reliability indices were greater than 3.5. Near the dam heel dam unit the tensile stress is smaller, the bedrock, 445, 446, 447, 444 and 448 units (see chart position unit 14) tensile stress is larger, the tensile index of reliability were: 3.61, 2.66, 1.49, 0.78 and 2.41 (model three).

In this paper, the framework of pervious two model one and overcome before due to throw or suspended hardware link causes or is not close to the river, and they have good integrity, stability, bottom, energy dissipation, silt and other effects, to reduce software deballasting investment, protect environment and saving resources played a very good role. Model three has the control and guide the regime pick the role, but also to slow the flow over spillway dam settlement speed, in the role of sediment. Its reliability, simplicity and safety of construction, make it promising in the Yangtze River waterway regulation engineering.

参赛队号 #2326

一. 问题的重述

在江河中，堤岸和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，以减弱水流的冲刺，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框架群，这是一种由钢筋混凝土框架相互焊接而成的正四面体结构，常见的尺寸为边长约 1m，框架截面约 $0.1 \times 0.1\text{m}$ 。在第一阶段时，知道对四面六边透水框架群来说，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，为此我们也相应研究出这三个因素的合理参数值。

实际上，四面六边透水框架在抛投和使用过程中，可能被水流冲击而翻滚移位，是框架群不能达到理想的堆砌效果，对功能有不利影响。为了使框架在水中相互钩连，需要设计新的形状。但已有的设计方案中都存在问题，主要集中在两个方面：结构强度不足，以及原则上能够相互钩连，但依然不清楚最终堆砌而成的形状是否合理。请你建立合理的数学模型，设计一个良好的框架结构。

二. 符号说明

1. D ：表示圆截面的直径；
2. b ：表示正方形截面的边长；
3. a ：表示等腰直角三角形截面的边长；
4. η ：表示水流的减速率；
5. A_1 ：表示圆形截面的面积；
6. A_2 ：表示正方形截面的面积；
7. A_3 ：表示等腰直角三角形截面的面积；
8. σ_1 ：表示圆形截面所承受的最大应力；
9. σ_2 ：表示正方形截面所承受的最大应力；
10. σ_3 ：表示等腰直角三角形截面所承受的最大应力；
11. τ_1 ：表示圆形截面所承受的最大剪应力；
12. τ_2 ：表示正方形截面所承受的最大剪应力；
13. τ_3 ：表示等腰直角三角形截面所承受的最大剪应力；
14. M ：表示截面所受弯矩；
15. T ：表示截面所受扭矩；
16. F ：表示截面所受拉力；
17. V ：表示铅直力；
18. H_0 ：表示水平力；
19. U ：表示扬压力
20. H_u ：表示上游水位；
21. H_d ：表示下游水位；
22. E_c ：表示螺纹钢混凝土材料的弹模；
23. σ_c ：表示螺纹钢混凝土材料的抗压强度；
24. E_{r1} 、 E_{r2} ：表示基岩的弹模；
25. σ_{tr} 、 σ_{2tr} ：表示螺纹钢混凝土、岩石的抗拉强度；

参赛队号 #2326

26. f ：表示基建面内摩擦系数；

27. C ：表示基建面内凝聚力。

三. 问题分析

混凝土四面六边透水框架是一种新型的江河透水护岸工程技术，通过实验，研究了四面六边透水框架淤滩固脚护岸对减速落淤，弯道凹岸的效果，及透水护岸技术的布设，形式尺寸对减速落淤的影响，并应用于护岸工程中，表明这种新型的透水框架不仅可以改变江岸边的水流形态，有效保护河岸，而且可用于防治和治理崩岸。

实际上，四面六边透水框架在抛投和使用过程中，可能被水冲击而翻滚移位，使框架群不能达到理想的堆砌效果，对功能有不利影响。尽管当前工程施工中就透水框架体钩连性较差的问题多采用串联群抛的方式加以改进，但易导致其对河床变形的贴附性变差，造价增大，相应对施工工艺的要求易变高，同时也还难免压载失稳及排体破坏的情况。因此，为了使四面六边透水框架既能在水中能够互相勾连，结构强度十足，又能达到预期的防冲促淤的预期效果，本文需要对四面六边透水框架重新改进，并设计出新的形状。

本文试图经过图形处理，数据说明以及理论分析设计出新的正四面六边透水框架，但需要解决以下几个问题：

首先，在第一阶段讨论出的正四面六边透水框架结构的基础上进行分析设计，为了让各个框架能够相互勾连，需要对框架进行延伸，并判断框架应以何种截面延伸以及其延伸的长度应为多大。

其次，研究出正四面六边透水框架的延伸截面以及合理的延伸长度之后，考虑到实际生活中的施工运输和框杆的加工工艺，需要对其进行优化。

最后，在已研究出的新的正四面六边透水框架的基础上，需要对框架群进行抛投与堆砌，并设计出一个合理的堆砌形状，以期在应用中既能保证强度要求，又能够相互勾连，达到理想的减速促淤的效果。

四. 模型假设

1. 假设正四面六边透水框架的结构，在研究的整个过程中不变形或者发生极小变形。
2. 假设正四面六边透水框架的各杆杆件的材料相同以及各杆保持各向同性。
3. 假设本文中用到的钢筋混凝土框杆，白棕绳材料优良。
4. 假设本文提供的所有的样本数据是真实可靠的。
5. 假设本文中的数据分析与理论计算都是合理的，不包含太多的人为误差。

五. 模型一（镰刀—L型模型）的建立与求解

5.1 模型的准备

5.1.1. 抗弯刚度的概念

抗弯刚度是指物体抵抗其弯曲变形的能力。抗弯刚度计算公式为 EI_z 。E 是弹性模

参赛队号 #2326

量，即产生单位应变时所需的应力，不同材料的弹性模量不同，可以从材料手册上查出。

早期用于纺织。抗弯刚度大的织物，悬垂性较差，纱支粗，重量大的织物，悬垂性亦较差，影响因素很多，有纤维的弯曲性能、纱线的结构、还有织物的组织特性及后整理等。抗弯刚度现多用于材料力学和混凝土理论中，其英文名称为 **bending rigidity**。以材料的弹性模量与被弯构件横截面绕其中性轴的惯性矩的乘积来表示材料抵抗弯曲变形的能力。

5.1.2.抗扭刚度的概念

抗扭刚度是指物体抵抗其扭转变形的能力。抗扭刚度计算公式为 EI_p 。 E 是材料的弹性量。

抗扭刚度现多用于材料力学和混凝土理论中，其英文名字为 **torsional rigidity**。以材料的弹性模量与被扭构件横截面绕其中性轴的总惯性矩的乘积来表示材料抗扭转变形的能力。

5.1.3.抗拉强度的概念

抗拉强度也叫强度极限，是指材料在其拉断前承受的最大应力值。抗拉刚度计算公式为 EA 。 E 是材料的弹性模量。

抗拉刚度常用于材料的应力校核和强度计算，其英文名字为 **extensional rigidity**。以材料的弹性模量与被拉构件截面的面积的乘积来表示材料抵抗拉压变形的能力。

5.1.4 数值面元分析法的概念

数值面元分析法：是目前基于多元统计过程控制的故障诊断技术的核心，是基于原始数据空间，通过构造一组新的潜隐变量来降低原始数据空间的维数，再从新的映射空间抽取主要变化信息，提取统计特征，从而构成对原始数据空间特性的理解。

5.2 模型的建立

经工程实践证明普通正三棱锥体透水框架的主要缺陷在于：一方面，由于单个正三棱锥体透水框架的重量较小，水流的行近流速增大时，水流对正三棱锥体透水框架的作用力也增大，容易导致正三棱锥体透水框架滑动，翻滚失稳；另一方面，由于正三棱锥体透水框架群的阻水作用，在其周围形成的水流结构和漩涡体系会使得防护带边缘各处出现较深的水槽，当水槽达到一定坡度时，框架体会滚落入冲槽中，从而失去滩面压载守护效果。因此需要对正三棱锥体透水框架，即正四面六边透水框架进行改进，并设计出新的形状。

5.2.1 数值面元分析法模型

为了达到钩连效果，本文现对正三棱锥体透水框架的 6 根杆件进行外伸，由于外伸杆件的截面形状有多种情况，本文选取了三种典型的框架杆截面形状（圆形，正方形，等腰直角三角形），先分别研究它们对均匀水流场的影响，及对水流的减速效果（用减速比 η 衡量），再来研究它们各自的强度条件以及稳定性，从而选出比较好的外伸杆的截面形状。

本文采用面元分析法，对圆形，正方形，等腰直角三角形截面进行面元分析的面元划分，将圆形，正方形截面划分成四个面元；将三角形截面划分成三个面元。

参赛队号 #2326

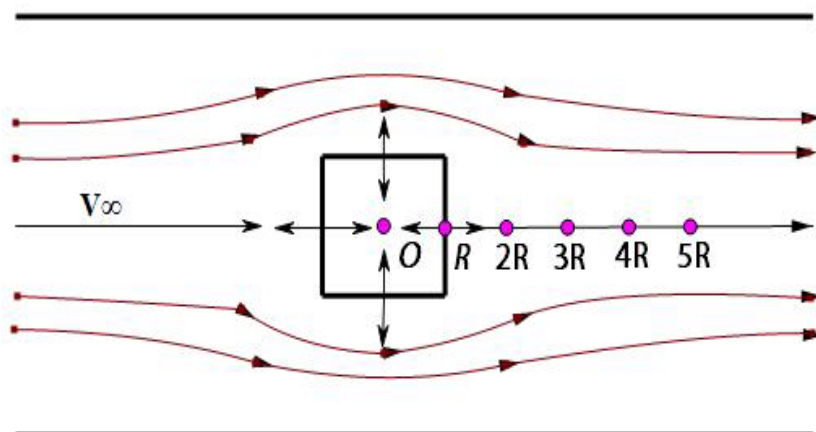


图 1

计算过程中，在障碍物后顺着水流方向距离截面中心距离为 R ， $2R$ ， $3R$ ， $4R$ ， $5R$ 处均匀布了多个研究点（见图1；当截面为圆形时， R 表示圆的半径；当截面为正方形时， R 表示边长的一半；当截面为等腰直角三角形时， R 表示斜边的一半），分别用Matlab计算研究点处的流速，并与自由来流速度作对比，得出减速效果最好，即减速比最大时对应的截面形状。

经过计算与图形模拟，我们得到了不同截面杆对水流的减速效果，见图2。

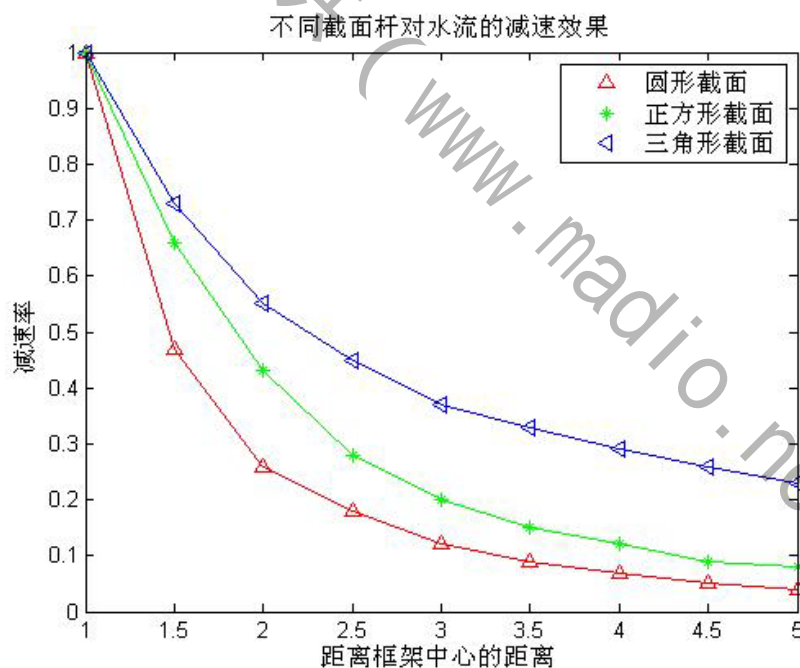


图 2

从图中本文可以看出三角形截面杆的减速效果最好，明显高于正方形和圆形截面杆。从图中也可以看出，距离框架中心越远，速度减少量越小，同时流速呈现逐渐增大的趋势。这也是与实际情况相符的，水流刚刚经过四面六边透水框架时，速度减小最明显，随着河水逐渐流远，流动速度也会逐渐回升。

在工程实际中，往往选取截面为正方形的四面六边透水框架，因为截面为正方形的四面六边透水框架比截面为三角形的四面六边透水框架制造起来容易；而且正方形

参赛队号 #2326

截面的四面六边透水框架的减速比较圆形截面的四面六边透水框架大。

5.2.2 定量分析法模型

在研究了数值面元分析法模型之后，知道往往在施工过程中，四面六边透水框架的截面以及外伸杆截面为正方形，因为其加工简单，而且对水流的减速效果还是比较优越。

现在从强度方面来分析四面六边透水框架外伸杆应采取何种截面，使其强度最大，稳定性较好。本文对圆形，正方形，等腰直角三角形截面进行定量分析，进行强度校核。

为了求杆件的最大应力，必须清楚这三种截面对主轴的惯性矩以及总惯性矩，即它们各自的计算方法，为此，本文不加证明的给出它们各自的求解公式。（它们各自的尺寸如图3）

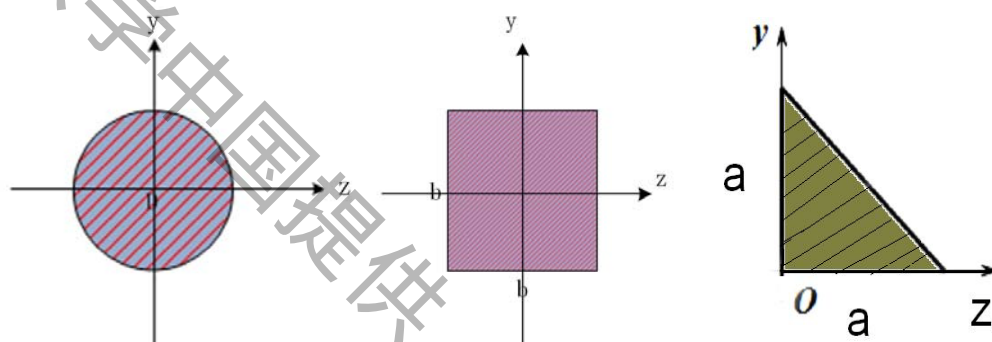


图3

(1) 圆形：

惯性矩：

$$I_z = \frac{\pi D^4}{64}$$

总惯性矩：

$$I_p = \frac{\pi D^4}{32} \quad (D \text{ 表示圆的直径})$$

(2) 正方形：

惯性矩：

$$I_z = \frac{b^4}{12}$$

总惯性矩：

$$I_p = \frac{b^4}{6} \quad (b \text{ 表示正方形的边长})$$

(3) 等腰直角三角形：

惯性矩：

$$I_z = \frac{a^4}{36}$$

总惯性矩：

参赛队号 #2326

$$I_p = \frac{a^4}{9} \quad (a \text{ 表示三角形的边长})$$

本文现采用第一阶段采用的边长约 1m, 框架截面约 $0.1 \times 0.1\text{m}$ 正四面体六边透水框架为研究对象, 并假设这三个典型截面(圆形, 正方形, 等腰直角三角形)面积相同。
圆形:

$$A_1 = \frac{\pi D^2}{4}$$

正方形:

$$A_2 = b^2$$

等腰直角三角形:

$$A_3 = \frac{1}{2} a^2$$

由 $A_1 = A_2 = A_3$, 可得到这三种截面边长之间的关系如下:

$$D^2 = \frac{1}{\pi} b^2$$

$$a^2 = 2b^2$$

首先, 假设这三种截面杆承受相同的弯矩 M , 不承受扭转力以及其它条件的冲击力, 本文来分析它们分别所承受应力为多大, 以及对杆的破坏情况。

经计算可知:

圆形:

$$\sigma_1 = \frac{32M}{\pi D^3}$$

正方形:

$$\sigma_2 = \frac{6M}{b^3}$$

等腰的直角三角形:

$$\sigma_3 = \frac{24M}{a^3}$$

则:

$$\sigma_1 = \frac{16\sqrt{\pi}}{3} \sigma_2$$

$$\sigma_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_3$$

进一步可得到:

$$\sigma_1 > \sigma_3 > \sigma_2$$

从上式可以看出, 正方形截面所承受的应力比圆形, 等腰直角三角形截面所受的应力都小, 所以本文可以得到一个结论: 当承受相同的弯矩时, 正方形截面杆的抗弯强度比较大, 强度较好, 能保持较好的稳定性。

然后再来假设这三种截面杆承受相同的扭转力 T , 不承受弯曲以及其它条件的冲击力, 分析它们分别所承受应力为多大, 以及对杆的破坏情况。

同样通过计算可知:

参赛队号 #2326

圆形：

$$\tau_1 = \frac{16T}{\pi D^3}$$

正方形：

$$\tau_2 = \frac{6T}{b^3}$$

等腰的直角三角形：

$$\tau_3 = \frac{6T}{a^3}$$

则：

$$\tau_1 = 8\sqrt{3}\tau_2$$

$$\tau_2 = 2\sqrt{2}\tau_3$$

进一步可得到：

$$\tau_1 > \tau_2 > \tau_3$$

从上式可以看出，等腰直角三角形的抗剪能力比较强，其次是正方形，最后是圆形，但从比例关系上可以看出正方形截面的抗剪能力和等腰直角三角形的抗剪能力相差不是太多，所以两种截面都可以承受相当的剪应力。

最后，假设这三种截面杆承受相同的冲击力（即拉力或压力） F ，不承受弯曲以及其它条件的扭转力，我们来分析它们分别所承受应力为多大，以及对杆的破坏情况。

再次进行计算可知：

圆形：

$$\sigma_1 = \frac{4F}{\pi D^2}$$

正方形：

$$\sigma_2 = \frac{F}{b^2}$$

等腰的直角三角形：

$$\sigma_3 = \frac{2F}{a^2}$$

则：

$$\sigma_1 = \sigma_2$$

$$\sigma_2 = \sigma_3$$

进一步可得到：

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$$

从上式可以清楚地看到，圆形，正方形，等腰直角三角形截面的抗拉压能力相同，所以很难说明三种截面哪种较好。因此需要对它们进行综合分析，从而选出较好的外伸杆截面形状。

总结

通过研究这三种截面分别对水流的减速效果，以及抗弯，抗扭，抗拉三方面的研究

参赛队号 #2326

与定量分析，我们可以看出，正方形截面的外伸杆不仅减速效果好，制造工艺简单，而且强度可靠，稳定性较强，所以我们选择正四面六边透水框架外伸杆的截面为正方形。

5.2.3 镰刀—L 型模型

在前面两个数值分析法模型和定量分析法模型中，本文已经研究出既满足强度要求，又能够达到减速促淤效果的最佳外伸杆截面形状，现对正四面体六边透水框架的形状进行新的设计。

本文设计了一种透水框架，包括基架，其整体为正三棱锥体，有 6 根长度相等的框架相互连接；还包括，在所述的正三棱锥体 4 个顶点处分别具有一延一根所述框架向外延伸出的勾连部件。所述勾连部件为 L 型或镰刀型。它是在原正三棱锥体透水框架结构基础上，增加了 4 个不同方向的勾连部件，它能使得原正三棱锥体透水框架咬接在一起，形成护底群结构，即使局部水流速度较大，由于周边结构的互相掩护与保护作用，难以冲走单个自勾连式透水框架结构，从而起到很好的水下护底及局部河床不受冲刷的作用。其新形状如图 4：

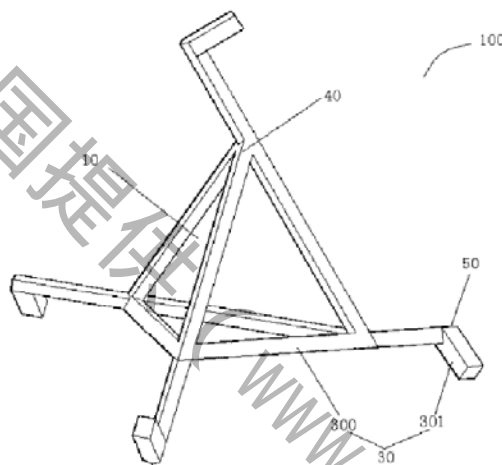


图 4

它的特征如下：

- (1) 其整体为正三棱锥体，由 6 根长度相等的框架相互连接；
- (2) 在所述的正三棱锥体 4 个顶点处分别具有一延一根所述框杆向外延伸出的勾连部件；
- (3) 所述具有可勾连部件的框杆包括第一连接部和第二连接部，所述第一连接部为第二连接部的杆件部分，所述第二连接部为勾连部。
- (4) 所述勾连部的勾连部的勾连部为 L 型，或镰刀型，且勾连部分各异；
- (5) 所述勾连部的勾连方向分别二二对应反向设置；
- (6) 所述框架的材料为螺纹钢混凝土。

在这个模型中基架 10 的六根框杆 30，其中有 4 根框杆 30 在顶点处延伸出可勾连部件 50，且框杆两两不同。具有可勾连部件 50 的框杆 30 包括第一连接部 300 和第二连接部 301，第一连接部 300 为连接第二连接部的杆件部分，第二连接部 301 为勾连部，故整体上透水框架 100 中的所有可勾连部件 50 的第二连接部 301 的勾连方向分别二二对应反向设置，可以保证在各个方向的咬合，使在河滩抛设透水框架 100 时保证透水框架 100 的勾连，以及透水框架 100 跟河床之间的勾连。

通过查询阅览吴华林，刘高峰，汪远洋等人的透水框架专利书，找到并验证了在实

参赛队号 #2326

际运用中，L-镰刀型框架应采取何种合适的长度尺寸。在本实例中，第一框架的框杆长度为 80cm-120cm，最佳为 100cm。具有可勾连部件 50 的框杆 30 第一连接部 300 长度为 10cm-30cm，最佳为 20cm，第二连接部 301 的长度为 140cm-160cm，最佳为 150cm。

六、模型二（快速组装护岸防冲透水框架模型）的建立与求解

6.1 背景技术分析

目前，河岸防冲工程主要是采用实体抗冲护岸和减速不冲护岸技术。实体抗冲护岸技术是采用实体工程来减缓水流对岸坡的冲刷，从而达到护岸的目的。但是实体护岸工程往往存在基础被淘刷影响工程自身稳定的问题。

减速不冲护岸技术则是通过改变局部水流流态，降低岸边流速，将流体对岸坡的冲刷变为不冲或淤积，从而达到减小冲刷深度、淤临造滩、控导河势、保护岸坡、稳定堤脚等目的。其中钢筋混凝土网络桩虽然护岸效果好，但其基础需要深埋，才能保住基础不被冲刷，桩排架不致破坏，存在复杂的水下施工过程。

当前正在推广使用的一种减速不冲护岸技术是用钢筋混凝土制作加工的四面六边透水框架，这种框架由于重心低、不易翻滚，框架杆件具有消能减速的作用，水流改变连续，经过多年的工程证明，采用四面六边透水群防冲护岸固脚效果相当理想。尽管如此，这种钢筋混凝土还是存在三个显著的缺点：（1）钢筋混凝土杆件通过人工焊接拼装成四面六边透水框架，工序较多，耗人力、机械和材料，费用较高。（2）杆件预制，特别是框架拼装及堆放，均需要占用大面积场地。（3）框架拼装场地距离抛投地往往较远，框架运输不可避免，一方面装船需人工抬运，人工费用高，另一方面框架空间体积大，装船摆放不紧凑，导致运输效率低、运输成本高，同时运输过程中框架损坏也较多。

本模型的目的是为了克服现有的钢筋混凝土制作加工的四面六边透水框架拼装复杂与成本高、加工占用场地面积大、运输成本不足，提供一种快速组装护岸防冲透水框架。

6.2 模型的建立与求解

本模型呈三棱锥体，由分别串联在一起以上绳索上的六根杆件首尾相接构成。杆件为混凝土预制件，六根杆件为等长的混凝土杆件通过串接的绳索构成正三棱锥体，所述绳索拼接绳结时采用混合结或收绳结，所用绳索为尼龙绳或钢丝绳或白棕绳，但考虑到绳索的抗拉强度以及在水里的抗腐蚀能力等因素的综合影响从这些方面考虑从而选择绳索（具体选择在后述分析中选择）。

6.2.1 绳索的选择

通过网上查阅资料，现得到了尼龙绳、钢丝绳、白棕绳的相关技术参数（分别见表 1，表 2，表 3）。

表 1 尼龙绳的相关技术参数

直径允差 (mm)	锦纶		涤纶		维尼纶	
	极限拉力 (T)	极限拉力 (T)	极限拉力 (T)	极限拉力 (T)	极限拉力 (T)	极限拉力 (T)
Φ3-4	0.28	0.07	0.25	0.06	0.14	0.04
Φ5-6	0.50	0.13	0.48	0.12	0.25	0.06
Φ7-8	0.80	0.20	0.75	0.19	0.40	0.10
Φ9-10	1.1	0.20	1.04	0.26	0.55	0.14

参赛队号 #2326

Φ 11-12	1.6	0.40	1.45	0.37	0.8	0.20
Φ 13-14	2.5	0.63	2.3	0.58	1.25	0.31
Φ 15-16	3	0.75	2.8	0.7	1.5	0.4
Φ 17-18	3.7	0.95	3.4	0.86	1.85	0.46
Φ 19-20	4.8	1.2	4.4	1.1	2.4	0.6
Φ 21-22	5.8	1.5	5.2	1.3	2.9	0.72
Φ 23-24	7	1.8	6.4	1.6	3.5	0.87
Φ 25-26	8	2	7.6	1.9	4	1
Φ 27-28	9	2.2	8.4	2.1	4.5	1.1
Φ 29-30	10.1	2.5	9.5	2.4	5	1.25
Φ 31-32	11.5	2.9	10.8	2.7	5.7	1.4
Φ 33-34	12	3	11.2	2.8	6	1.5

表 2 钢丝绳的相关技术参数

直径		钢丝绳的抗拉强度/MPa				
钢丝绳/mm	钢丝/mm	1440	1550	1700	1850	2000
		钢丝绳破断拉力总和/kN				
8.7	0.4	39.00	43.20	47.30	51.50	55.70
11.0	0.5	60.00	67.50	74.00	80.60	87.10
13.0	0.6	87.80	97.20	106.50	116.00	125.00
15.0	0.7	119.50	132.00	145.00	157.50	170.50
17.5	0.8	156.00	172.50	189.50	206.00	223.00
19.5	0.9	197.00	218.50	239.50	261.00	282.00
21.5	1.0	243.50	270.00	296.50	322.00	348.50
24.0	1.1	295.00	326.50	358.00	390.00	421.50
26.0	1.2	351.00	388.50	426.50	464.00	501.50
28.0	1.3	412.00	456.50	500.50	544.50	589.00
30.0	1.4	478.00	529.00	580.50	631.50	784.00
32.5	1.5	548.50	607.50	666.50	725.00	892.00
34.5	1.6	624.50	691.50	758.00	825.00	1005.00
36.5	1.7	705.00	780.50	856.00	931.50	1025.00
39.0	1.8	790.00	875.00	959.50	1040.00	1125.00
43.0	2.0	975.50	1080.00	1185.00	1285.00	1390.00
47.5	2.2	1180.00	1305.00	1430.00	1560.00	-----
52.0	2.4	1405.00	1555.00	1705.00	1855.00	-----
56.0	2.6	1645.00	1825.00	2000.00	2175.00	-----

表 3 白棕绳的相关技术参数

公称	线密度	最低断裂强力 (daN)	绳捆外型尺寸 (mm)
----	-----	--------------	-------------

参赛队号 #2326

直径 (mm)	公称值 ktex	标准重量	公差	优等品	一等品	合格品	内径	外径	高度
6	29	7.15	±10	255	240	230	120	318	260
8	54	12.1		473	450	425	120	412	260
10	68	17.65	±8	622	590	560	120	412	280
12	105	24.2		936	890	840	120	412	300
14	140	31.9	±5	1260	1200	1130	120	410	300
16	190	41.8		1770	1680	1590	130	522	315
18	220	53.9		2100	1990	1890	130	522	400
20	275	66		2790	2650	2510	150	585	395
22	330	78.1		3340	3170	3010	150	585	475
24	400	90.75		3990	3790	3590	150	659	440
26	470	105.5		4640	4410	4180	150	659	515
28	530	119.9		5220	4960	4100	150	680	560
30	625	138.6		5980	5680	5380	150	732	550
32	700	157.3		6730	6390	6060	150	816	500
36	890	199.1		8530	8110	7680	150	869	555
40	1100	246.4		10300	9790	9590	150	942	580
44	1340	298.1		12500	11880	11250	180	1042	580

经过再次查阅资料与整理以上图表，可以得到以白棕绳，钢丝绳，尼龙绳为主的各种绳子的特性指标（如表4），并绘出了它们相应的指标特性曲线图（如图5）。

表4

特性 分类	抗拉性	耐酸碱性能	耐磨性	耐严寒性
纸绳	较差	差	较强	较强
草绳	较差	较差	较强	较强
棉纱绳	较差	较差	较强	较强
钢丝绳	较强	差	较强	较强
尼龙绳	强	强	较强	较差
白棕绳	强	强	强	强

参赛队号 #2326

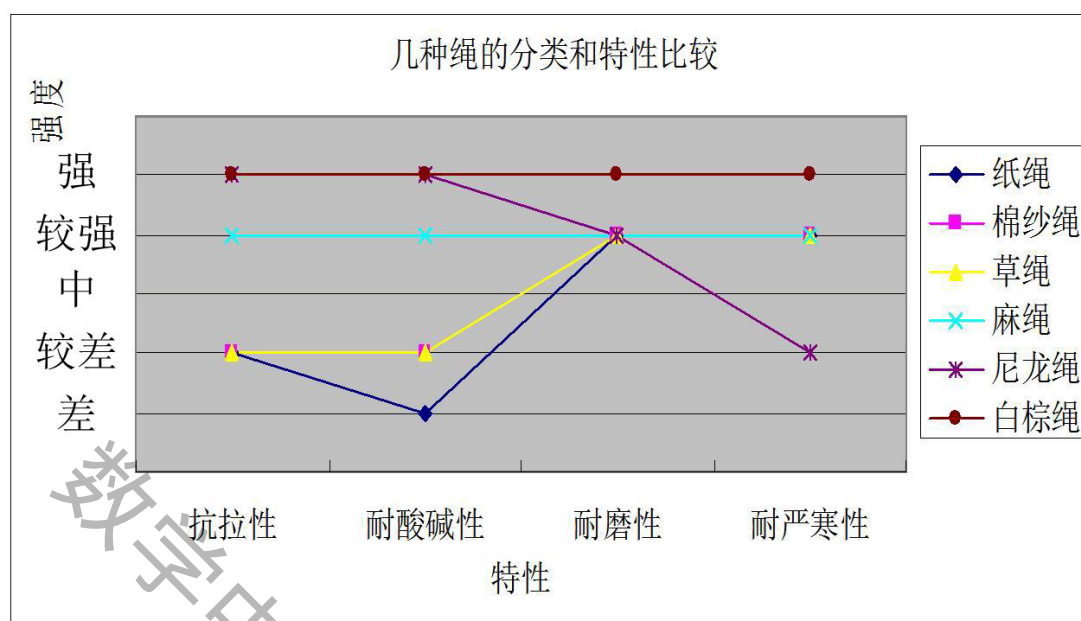


图 5

现在，我们采用定量的方法，即规定绳子的平均直径为 24mm 来研究白棕绳，钢丝绳，尼龙绳的抗拉强度（通过极限拉力 F_N 来校核）。通过图表综合分析，本文得出了以下结论：

（1）通过控制变量法分析这三条绳子的极限应力，得出其平均值大小分别为 3590N，3678N，640N；所以它们的强度大小排序为：钢丝绳 白棕绳 尼龙绳。

（2）通过定量分析与图形比较的方法研究这三种材料的平均使用寿命以及其抗腐蚀能力，从而本文进一步得出了这三种绳子的优越性：白棕绳 钢丝绳 尼龙绳。

（3）由于本文要求所选材料在水中的抗腐蚀能力较强，强度较为合适，所以我们选择白棕绳作为框架链接材料。

6.2.2 具体实施方式

实施例 1：

本实施例由六个等长的方形混凝土杆件 A 通过链接绳 B 相接构成正三棱锥体。杆件中五个串联预制在第一绳索 B1 上，形成节点 1、2、3、4、5、6，另一个杆件预在第二个绳索 B2 上，形成接点 7、8，其中四个绳结点全采用混合结，依次是 1 接 4、6 接 2、7 接 3、最后 8 接 5。

实施例 2：

本实施例由六个等长的方形混凝土杆件 A 通过连接绳相接构成正三棱锥体。杆件中四个串联预制在第一绳索 B1 上形成节点 1、2、3、4、5，另一单杆件预制在第二绳索 B2 上，形成接点 6、7、8，其中依次是 1 接 4、6 接 2、5 接 7、最后 8 接 3；框架拼装各绳结均采用收绳绳结

6.2.3 附图说明

图 5 为模型实例 1 结构示意图；

图 6 为模型实例 1 五个杆件预制结构示意图；

图 7 为模型实例 1 单杆件预制结构示意图；

参赛队号 #2326

图 8 为模型实例 2 结构示意图；

图 9 为模型实例 2 四个杆件预制结构示意图；

图 10 为模型实例 2 双杆件预制结构示意图。

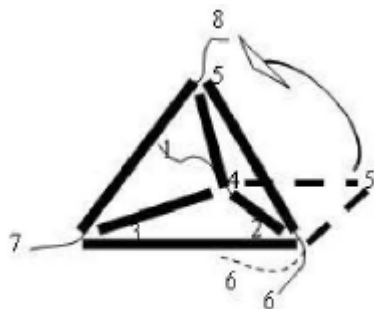


图 5



图 6



图 7

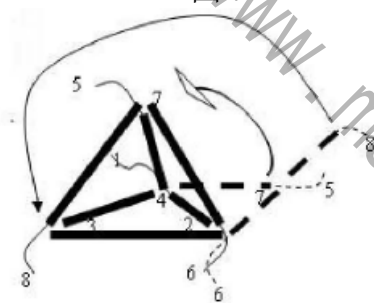
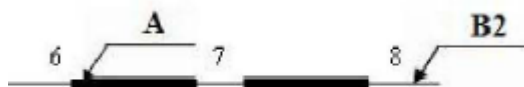


图 8



图 9



参赛队号 #2326

图 10

七、模型三（桩群透水框架坝模型）的建立与求解

7.1 背景技术分析

目前，长江中下游河道整治工程多采用实体丁坝来束水攻沙，从而达到整治浅滩的目的。虽然实体丁坝取得了较好的工程效果，但仍存在以下不足：①耗用石材、木材等建筑材料较多，工程量较大；②水流遇实体丁坝受阻，能量大部分集中在坝体上，流态转变成环流、回流等，对河槽水流形成较大的约束，引起坝体水流流速异常，坝基生根困难，需要多年的抢护才会稳定；③实体丁坝占据了河流的自然空间，限制了河道过洪能力，破坏了滩槽的水沙平衡，使河槽的负担加重；④实体非淹没丁坝遇大洪水，一旦漫顶会造成严重损失，因此受防洪标准的限制较大；⑤护根、护底和护坡有时要用大量的沉排，对河底生态破坏严重。

在全国各大流域河道治理以及主要航道和河口治理工程中均应用有透水丁坝，尤其是钢筋混凝土桩坝应用最为广泛。透水桩坝是用钻孔、振动、水力冲孔等工艺将预制或浇注混凝土桩插入河床深处，并按一定间隔排列形成透水丁坝。它除具有一定的挑流疏导河势的作用外，还能起到减缓过坝水流流速，使泥沙在坝后沉降，能够充分利用洪水淤滩刷槽的特点，有目的地落淤造滩。同时，它还具有结构简单、施工机械化程度高、运用安全可靠、可适应各种洪水标准、保护生态、赔偿费用低等优点，但作为河货运量比较大的流域河道（例如长江）由于水流条件较为复杂，水量较大，透水桩坝不适合在这种地方的航道整治工程中应用。

本模型就是要解决上述背景技术的不足，建立一种桩群透水框架坝及其施工方法，使其能够应用在水量大，水流条件复杂，并且防洪要求高的河道的治理工程。所用的透水框架即为模型一或是模型二中的透水框架。

7.2 模型的建立与求解

7.2.1 具体实施方式

如图 11 所示的一种桩群透水框架坝，它包括竖向坝桩 1，网格 2、透水框架 3 三个单体。竖向坝桩 1 预先打设在在施河流中，在竖向坝桩 1 之间设有用于保证竖向坝桩 1 之间的稳定性的横向梁（图中未标出），相邻的竖向坝桩之间设有网格 2（网格 2 的结构示意图如图 12 所示），竖向坝桩 1 和网格 2 构成封闭区间，透水框架 3 放置于网格 2 内，竖向坝桩 1 的外壁设有由透水框架构成的限位装置 4，限位装置 4 设置在施河流的下游：当在水流流速较大的洪水期施工时，限位装置 4 可对整个桩群透水框架坝起到支撑作用；当在水流流速较小的枯水期施工时，限位装置 4 可以不用设置，这是因为在枯水季时，水流流速较小，不需要限位装置 4 对桩群透水框架坝进行支撑，在枯水期到洪水期这段时间内，透水框架 3 将会发挥防冲促淤的效果，在后方产生淤积，当洪水期来临时，透水框架 3 周围产生的淤泥已经起到对桩群透水框架坝的支撑限位作用，因此在水流较小的枯水期施工时，可以不用设置限位装置 4；另外，当坝高本身比较低的时候，也不需要设置限位装置 4。

其中透水框架 3 是桩群透水框架坝的实质和主体，本文采用的透水框架为模型一或模型二任意一种皆可。坝桩 1 和网格 3 都是用来固定透水框架 3 的，使其形成一个整体坝体形状，具体为：其中的每几个竖向坝桩 1 可围成一个区域，所示的区域的其内部空间需保证能套入透水框架 3，透水框架 3 设置在区域内，在竖向坝桩 1 围成的区域和透水框架 3 之间设有网格 2，竖向坝桩 1 主要是用来固定透水框架 3 的位置，网格 2 主要

参赛队号 #2326

是根据透水框架 3 的尺寸来确定其尺寸，用来防止透水框架 3 在水流的冲击下漏出网格 2 的内部区域。

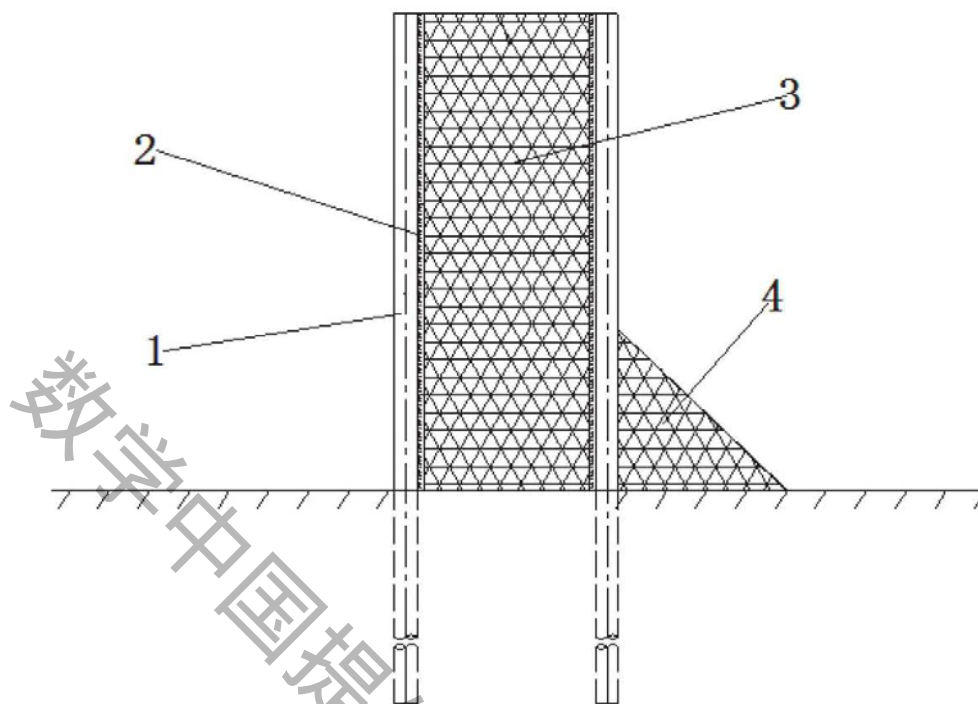


图 11

竖向坝桩 1 的结构形式可选为 PHC 桩或钻孔灌注桩，本实施例中竖向坝桩 1 的结构形式为 PHC 桩，PHC 桩的桩身强度高，承压力高，能抵抗较大的抗裂弯矩，具有较强的工作性能，桩身能在恶劣的施工环境下保持完好，大大减少裂桩，断桩事故的发生，且可有专业厂家大批量自动化生产，桩身质量稳定可靠；在静压施工时，施工现场简洁，无污染、无噪音，能保障文明施工；由于 PHC 桩的单桩承载力相对较高，其环形截面所耗混凝土量较少，因而单位承载力造价最省。

本实施例中，所述的网格 2 为透水钢格栅，如图 12 所示。

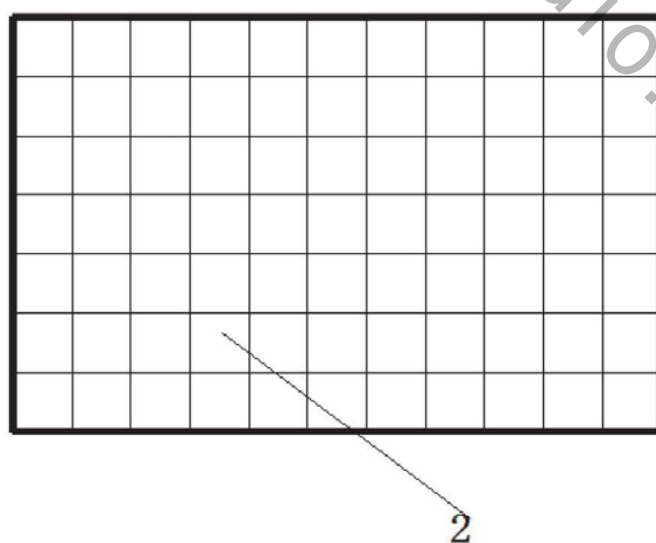


图 12

透水框架 3 的结构型式为四边透水框架、四面六边透水框架或其他非封闭式透水框

参赛队号 #2326

架，本实施例中本实施例中选择为四面六边透水框架，如图 4，图 5 和图 8 所示。

经研究表明，透水框架消能减速、防冲促淤的作用主要是因为其具有适当的透水性，这与透水框架的空隙率有关。四面六边透水框架为非封闭式透水框架，其空间较大，在堆积时，相互勾连作用强，堆积效果及稳定性更好，还可拓宽框架的适用范围，由于框架间勾连性较好，可更好地适应于较陡、地形复杂的河床或坡岸，可用于筑透水坝，可用于养滩工程等。四面六边透水框架可在工厂预制，进行大批量生产，可提高施工效率。

7.2.2 施工方法及说明

一种基于上述所述的桩群透水框架坝的施工方法，包含以下步骤：

(1) 根据水流流速及泥沙级配确定透水坝的空隙率，确定透水框架 3 结构型式及尺寸；勘测工程区域的地质条件，确定竖向坝桩 1 的结构型式、深度及管径，然后进行桩群透水框架坝的进一步设计，选择尺寸合适的网格；

(2) 相邻的竖向坝桩 1 之间设网格 2，竖向坝桩 1 和网格 2 构成封闭区间；

(3) 把透水框架 3 抛投到网格内，形成单位透水框架；

(4) 重复施工步骤 3，抛投其他的透水框架 3 至网格 2 内，使单元透水框架形成桩群透水框架坝。

说明：

当在洪水季，河流较大时，在河流的逆向方向，沿竖向坝桩外壁抛投透水框架 3。

在本事实例中，竖向坝桩 1 可以根据工程需要选择不同的结构框架型式，调节管径大小、间距及深度等；网格 2 可以根据工程需要选择不同的结构形式，调节孔径及单个宽度；透水框架 3 也可以根据工程设计透水空隙率的需要，选用不同的结构型式及尺寸。

以上结合最佳实施对本发明进行了描述，但本发明并不局限于以上揭示的实施例，而应当涵盖各种根据本发明的本质进行的修改、等效组合。

7.3 桩群透水框架坝坝体可靠性计算

该桩群透水框架坝的断面图如图 11 所示，可简化为如图 13 所示：

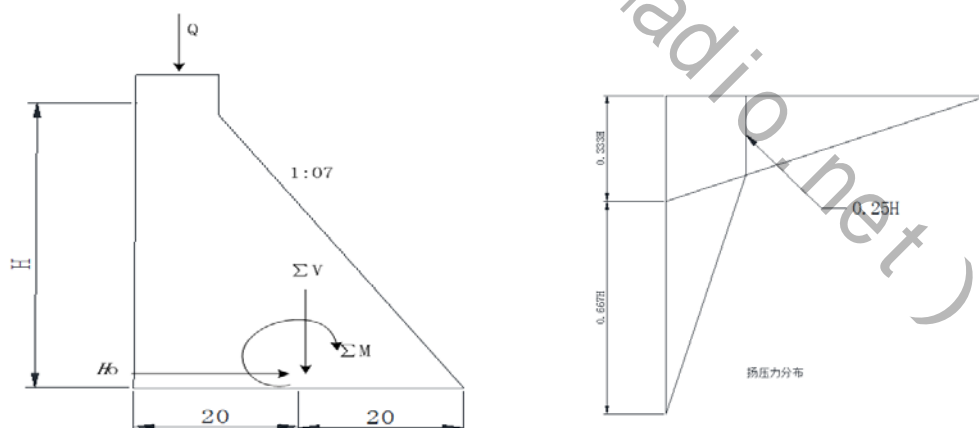


图 13

考虑随机变量即螺纹钢混凝土的抗拉强度 R_f 、抗压强度 R_c 、坝上游水位 H 、螺纹钢混凝土容重 γ_c ，坝顶附加载荷 Q 、建基面内摩擦系数 f 和凝聚力 C 。设各随机变量的统计特性如表 5 所示。以 V 表示铅直力、 H_0 表示水平力、 M 表示力矩、 U 表示扬压力。坝段的受力情况及扬压力分布见图 13，各力与力矩的计算结果见表 6。

参赛队号 #2326

由表 6 的计算结果可进一步得到：

$$\sum V = 1000\gamma_c - 70.0H + Q$$

$$\sum H_0 = 5H^2$$

$$\sum M = -5000\gamma_c + 543.6H + 1.667H^3 - 13.5Q$$

根据材料力学方法可得上游坝踵，下游坝址的应力公式的应力计算公式：

$$\sigma = \frac{\sum V}{T} \pm \frac{6\sum M}{T^2}$$

式中 $T=40\text{m}$ 为坝底宽度。将有关量代入上式得坝踵、坝址处的应力（以压为正），则上游坝踵

$$\sigma_{yu} = 43.75\gamma_c - 3.903H - 0.00625H^3 + 0.0756Q$$

下游坝址

$$\sigma_{yd} = 6.25\gamma_c + 0.147H + 0.00625H^3 - 0.0256Q$$

表 5 随机变量的统计特性

变量	均值	变异系数	分布
R_c	$1500 \text{ kN} / \text{m}^2$	0.22	正态
R_t	$900 \text{ kN} / \text{m}^2$	0.39	正态
H	50 m	0.06	正态
γ	$24 \text{ kN} / \text{m}^2$	0.03	正态
F	1.2	0.30	正态
C	$100 \text{ kN} / \text{m}^2$	0.50	正态
Q	250 kN	0.35	正态

表 6 力与力矩的计算结果

项目	力 / kN	力臂 / m	力矩 / $\text{kN} \cdot \text{m}$
V_1	$\frac{1}{2} \times 5 \times 50 \times r = 125r$	16.667	$-2083.38r$
V_2	$\frac{1}{2} \times 35 \times 50 \times r = 875r$	3.333	$-2916.38r$
V_3	$\frac{1}{2} \times 5 \times H \times 10 = 25H$	18.333	$-458.3H$
V_4	Q	13.5	$-13.5Q$
H_0	$\frac{10}{2} H^2$	$-H / 3$	$1.667H^2$
U_a	$-\frac{1}{2} \times 0.333 \times H \times 10 \times 40 = -66.6H$	6.667	$443.6H$
U_b	$-\frac{1}{2} \times 0.667 \times H \times 10 \times 10 = -33.35H$	16.667	$558.3H$

参赛队号 #2326

桩群透水框架坝的失效模式为抗拉抗压强度失效、沿建基面滑动和整体颠覆三种。由于该坝属于中小型重力坝，一般前两种为控制情况，所以本例只考虑坝体强度不够和沿建基面滑动两种失效模式。

在抗滑稳定条件下，功能函数为：

$$Z_1 = f \sum V + CA - \sum H_0 = 1000f\gamma_c - 75fH + fQ + 40C - 5H^2$$

在强度条件下，下游坝址的抗压功能函数为：

$$Z_2 = R_c - 6.25\gamma_c - 0.147H - 0.00625H^3 + 0.0256Q$$

下游坝址的抗压功能函数为：

$$Z_3 = R_t + 43.75\gamma_c - 3.903H - 0.00625H^3 + 0.0756Q$$

依据上面三个功能函数和随机变量的统计特性，由 JC 法求得可靠指标和失效概率如下：由 $Z_1 = 0$ ，得 $\beta_1 = 2.06$ ， $P_{f1} = 0.019699$ （抗滑）；由 $Z_2 = 0$ ，得 $\beta_2 = 4.25$ ， $P_{f2} = 0.1068 \times 10^{-4}$ （抗压）；由 $Z_3 = 0$ ，得 $\beta_3 = 3.11$ ， $P_{f3} = 9.35 \times 10^{-4}$ （抗拉）。

由于三个功能函数都包含随机变量 H 、 Q 和 γ ，所以失效模式间存在相关性。采用一般界限法可得该坝的失效概率为：

$$0.019699 \leq P_f \leq 0.019699 + 0.1069 \times 10^{-4} + 9.350 \times 10^{-4}$$

即

$$0.019699 \leq P_f \leq 0.020644$$

坝体的可靠性约为 98%。

7.4 桩群透水框架坝抗拉可靠度计算

建筑在成层岩基上的螺纹钢混凝土桩群透水框架坝，其横截面图如图 14 所示。坝体在自重和水压的作用下可能在坝踵附近区域产生较大的拉应力并导致坝体或岩基开裂，因此分析桩群透水框架坝的抗拉可靠度具有实际意义。取坝体中间 20m 长的坝段分析，有限元划分沿坝长方向分为 4 层，坝体单元总数为 1112 个，两层基岩采用随机场模型，随机场单元总数为 24 个。螺纹钢混凝土和岩石的 Poisson 比均作 μ 为确定值，取 $\mu = 0.2$ 。螺纹钢混凝土和岩石的容重分别用 γ_c 和 γ_r 表示，也作为确定值， $\gamma_c = 24 \text{ kN/m}^3$ ， $\gamma_r = 25 \text{ kN/m}^3$ 。

各变量的统计特性列于表 7，其中 H_u 为上游水位， H_d 为下游水位， E_c 、 σ_c 分别为螺纹钢混凝土材料时弹模和抗压强度， E_{r1} 、 E_{r2} 为基岩的弹模， σ_{1t} 、 σ_{2t} 分别为螺纹钢混凝土、岩石的抗拉强度， f 、 C 为建基面内摩擦系数、凝聚力。

参赛队号 #2326

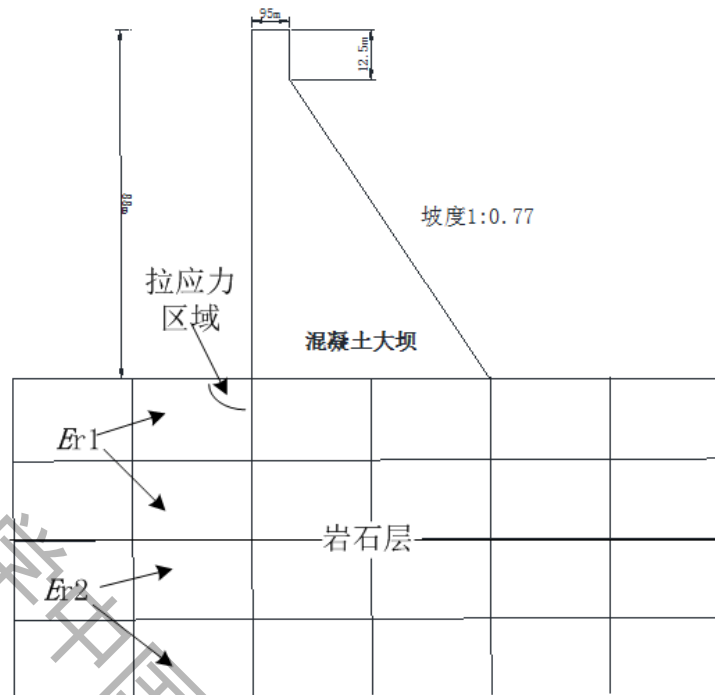


图 14

表 7

随机变量	均值	变异系数	分布
$H_u(m)$	80.0	0.062	正态
$H_d(m)$	10.0	0.063	正态
$E_c(MPa)$	20000	0.10	正态
$E_{r1}(MPa)$	18000	0.15	正态
$E_{r2}(MPa)$	27000	0.15	正态
$\sigma_c(MPa)$	18.0	0.2	对数正态
$\sigma_{lt}(MPa)$	1.0	0.2	对数正态
$\sigma_{2t}(MPa)$	0.5	0.2	对数正态
f	1.2	0.2	对数正态
$c(MPa)$	1.5	0.2	对数正态

采用空间 8 结点随机有限元程序计算桩群透水框架坝各单元的可靠度，计算结果表明，除了坝踵附近一微小区域出现拉应力之外，其余单元均为压应力，抗拉可靠度指标均大于 3.5。坝踵附近坝体单元产生的拉应力较小，基岩 444、445、446、447 和 448 号单元（单元的位置见图 14）的拉应力较大，其抗拉可靠度指标分别为：3.61、2.66、1.49、0.78 和 2.41。

八. 模型的评价

8.1.模型的优点:

参赛队号 #2326

8.1.1 模型一的优点：

(1) 本模型透水框架构成的压载群结构克服了以前由于群抛或者硬件链接导致的悬空或者不贴近河床问题，其单体结构件无任何硬连接或者铰接，能在重力作用下自然适应复杂的河床或滩面地形变化，贴近性良好。

(2) 由于增加了不同方向的可勾连部件，该结构对局部水流的分散及消能减速效果将更为加强，从而间接地保护了软体排的稳定。

(3) 由于其良好的整体性、稳定性、贴近性、消能、促淤等效果，自勾连式透水框架能恰当地利用淤积的泥沙作为附加压载，对减少软体排压载的投资，保护环境和节约资源有着良好的效果。

8.1.2 模型二的优点：

(1) 由于框架拼接采用绳结法，速度快节省费用。

(2) 加工工艺简单白棕绳具有拉力强，耐酸碱，耐摩擦、耐严寒等良好特点。

(3) 杆件之间的连接方式采用绳结，加快了拼装速度，便于机械装船运输。

8.1.3 模型三的优点：

(1) 本模型具有一定的挑流控导河势的作用外，还能起到减缓过坝水流的流速，使泥沙在坝后沉降，能够充分利用洪水淤滩刷槽的特点，有目的地落淤造滩。

(2) 它具有结构简单、施工机械化程度高、运用安全可靠、可适应各种洪水的标准。

(3) 它还具有保护生态，赔偿费用低，施工简单方便等优点。

8.2.模型的缺点：

(1) 模型一对技术的要求较高，施工工艺较为复杂，在汛期使用时，有很大的时间紧迫性。

(2) 模型二虽然简单，易于施工，但从长期性来考虑时，它还具有一定的缺陷。

(3) 模型三有很好的消能减速作用，但对于水流条件较为复杂，水量较大的河流，此透水桩坝很难在整治工程中使用。

参考文献

- [1]卓家寿,邵国建,武清玺,黄丹.力学建模导论[M].北京:科学出版社,2007.
- [2]刘洪文主编.高等材料力学[M].北京:高等教育出版社,1985.
- [3]刘洪文主编.材料力学 II[M].北京:高等教育出版社,2011.1.
- [4]黄兴棣.工程结构可靠性设计[M].北京:人民交通出版社,1989.
- [5]武清玺著.结构可靠性分析及随机有限元法[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [6]Ying Wei Liu,Fred Moses.A sequential response surface method and its application in the reliability analysis of aircraft structural systems[J].Structural Safety. 1994,16: 39~46.
- [7]Faravelli L.Response-surface approach for reliability analysis[J].Journal of Engineering Mechanics.ASCE.1989,115:2736~2781.
- [8]陈厚群,梁爱虎.重力坝动力可靠度的随机有限元分析方法,工程结构可靠性全国第三届学术交流会议论文集.南京:河海大学出版社,1992,324~331.

参赛队号 #2326

附录

程序：

图 2Matlab 程序：

```

x=[1:0.5:5];
y1=[1,0.47,0.26,0.18,0.12,0.09,0.07,0.05,0.04];
y2=[1,0.66,0.43,0.28,0.2,0.15,0.12,0.09,0.08];
y3=[1,0.73,0.55,0.45,0.37,0.33,0.29,0.26,0.23];
plot(x,y1,'r^-');
hold on
plot(x,y2,'g*-');
hold on
plot(x,y3,'b<-');
xlabel('距离框架中心的距离');
ylabel('减速率');
legend('圆形截面','正方形截面','三角形截面')
title('不同截面杆对水流的减速效果')

```

空间8结点随机有限元C程序：

```

enum
ElementType{Triangle_2D_3Nodes,Quadrilateral_2D_4Nodes,Tetrahedron_3D_4Nodes,Hex
ahedron_3D_8Nodes};
class Element
{
protected:
unsigned int Id;
double E,mu; //弹性模量与泊松比
ElementType Kind;
unsigned int NodeNum;
Matrix<double> K; //单元刚度矩阵
Matrix<double> D;
Matrix<double> Stress;
Matrix<double> Strain;
Node **NodeList;
public:
Element(void){Id=0;E=mu=0;};
Element(unsigned int newId,ElementType newKind);
virtual ~Element(void);
unsigned int getId() const{return Id;};
void setId(const unsigned int newId){Id=newId;};
double getE() const{return E;};
void setE(double newE){E=newE;};
double getmu() const{return mu;};
void setmu(double newmu){mu=newmu;};
ElementType getKind() const{return Kind;};
unsigned int getNodeNum() const{return NodeNum;};
void setNode(const unsigned int LocalId,Node & newNode);
Node & getNode(const unsigned int LocalId);
Node & operator()(const unsigned int LocalId);
virtual void connectNode()=0;

```

参赛队号 #2326

```

virtual Matrix<double> & calculateD()=0;
virtual Matrix<double> & calculateK()=0;
virtual Matrix<double> & calculateStress()=0;
virtual Matrix<double> & calculateStrain()=0;
};
Element::Element(unsigned int newId,Element_Type newKind)
{
Id=newId

48
Kind=newKind;
switch (newKind)
{
case Hexahedron_3D_8Nodes:
NodeNum=8;
D.setDimension(6,6);
K.setDimension(24,24);
Stress.setDimension(6,1);
Strain.setDimension(6,1);
break;
}
NodeList=new Node*[NodeNum];
}
Element::~~Element(void)
{
delete [] NodeList;
}
void Element::setNode(const unsigned int LocalId,Node & newNode)
{
if (LocalId>=1 && LocalId<=NodeNum)
NodeList[LocalId-1]=&newNode;
}
Node & Element::getNode(const unsigned int LocalId)
{
if (LocalId>=1 && LocalId<=NodeNum)
return *(NodeList[LocalId-1]);
}
Node & Element::operator()(const unsigned int LocalId)
{
if (LocalId>=1 && LocalId<=NodeNum)
return *(NodeList[LocalId-1]);
}
class Element_Hex_3D_8Nodes:public Element
{
private:
Matrix<double> B;
public:
Element_Hex_3D_8Nodes(unsigned int newId);
~Element_Hex_3D_8Nodes(void);
//Matrix<double> & calculateB(const double GaussPoint[]);

```

参赛队号 #2326

```

Matrix<double> & calculateB(const double GaussPoint[],double & detJacobi);
Matrix<double> & calculateD();
Matrix<double> & calculateK();
Matrix<double> & calculateStress();
Matrix<double> & calculateStrain();
void connectNode();
};
Element_Hex_3D_8Nodes::Element_Hex_3D_8Nodes(unsigned int
newId):Element(newId,Hexahedron_3D_8Nodes),B(6,24)
{
}
Element_Hex_3D_8Nodes::~Element_Hex_3D_8Nodes(void)
{
}
/*
Matrix<double> & Element_Hex_3D_8Nodes::calculateB(const double GaussPoint[])
{
Matrix<double> dNxyz(3,8); //形函数矩阵对直角坐标的导数
Matrix<double> dNrst(3,8); //形函数矩阵对自然坐标的导数
Matrix<double> Jacobi(3,3); //雅克比矩阵
Matrix<double> Node_XYZ(8,3);
unsigned int i,j;
//===== 求解型函数矩阵对自然坐标 r,s,t 的导数
=====
double r=GaussPoint[0],s=GaussPoint[1],t=GaussPoint[2]; //r,s,t为自由坐标系坐标
double ri[8]={-0.5,0.5,0.5,-0.5,-0.5,0.5,0.5,-0.5};
double si[8]={-0.5,-0.5,0.5,0.5,-0.5,-0.5,0.5,0.5};
double ti[8]={-0.5,-0.5,-0.5,-0.5,0.5,0.5,0.5,0.5};
for(i=1;i<=8;i++)
{
dNrst(1,i)=ri[i-1]*(0.5+si[i-1]*s)*(0.5+ti[i-1]*t);
dNrst(2,i)=si[i-1]*(0.5+ri[i-1]*r)*(0.5+ti[i-1]*t);
dNrst(3,i)=ti[i-1]*(0.5+ri[i-1]*r)*(0.5+si[i-1]*s);
}
//===== 求解 Jacobi 矩阵及其行列式
=====
for(i=1;i<=8;i++)
{
Node_XYZ(i,1)=(*this)(i).getx();
Node_XYZ(i,2)=(*this)(i).gety();
Node_XYZ(i,3)=(*this)(i).getz();
}
Jacobi=dNrst*Node_XYZ;
//=====求解型函数矩阵对直角坐标x,y,z的导数=====
dNxyz=(Jacobi.inv())*dNrst;
//=====求解B矩阵=====
for(i=1;i<=8;i++)
{
j=(i-1)*3+1;

```

参赛队号 #2326

```

B(1,j)=dNxyz(1,i);
B(2,j)=0;
B(3,j)=0;
B(4,j)=dNxyz(2,i);
B(5,j)=0;
B(6,j)=dNxyz(3,i);
j++;
B(1,j)=0;
B(2,j)=dNxyz(2,i);
B(3,j)=0;
B(4,j)=dNxyz(1,i);
B(5,j)=dNxyz(3,i);
B(6,j)=0;
j++;
B(1,j)=0;
B(2,j)=0;
B(3,j)=dNxyz(3,i);
B(4,j)=0;
B(5,j)=dNxyz(2,i);
B(6,j)=dNxyz(1,i);
}
//B.Display();
return B;
}
*/
Matrix<double> & Element_Hex_3D_8Nodes::calculateB(const double GaussPoint[],double
& detJacobi)
{
Matrix<double> dNxyz(3,8); //形函数矩阵对直角坐标的导数
Matrix<double> dNrst(3,8); //形函数矩阵对自然坐标的导数
Matrix<double> Jacobi(3,3); //雅可比矩阵
Matrix<double> Node_XYZ(8,3);
unsigned int i,j;
//=====求解型函数矩阵对自然坐标r,s,t的导数=====
double r=GaussPoint[0],s=GaussPoint[1],t=GaussPoint[2]; //r,s,t为自由坐标系坐标
double ri[8]={-0.5,0.5,0.5,-0.5,-0.5,0.5,0.5,-0.5};
double si[8]={-0.5,-0.5,0.5,0.5,-0.5,-0.5,0.5,0.5};
double ti[8]={-0.5,-0.5,-0.5,-0.5,0.5,0.5,0.5,0.5};
for(i=1;i<=8;i++)
{
dNrst(1,i)=ri[i-1]*(0.5+si[i-1]*s)*(0.5+ti[i-1]*t);
dNrst(2,i)=si[i-1]*(0.5+ri[i-1]*r)*(0.5+ti[i-1]*t);
dNrst(3,i)=ti[i-1]*(0.5+ri[i-1]*r)*(0.5+si[i-1]*s);
}
//=====求解Jacobi矩阵及其行列式=====
for(i=1;i<=8;i++)
{
Node_XYZ(i,1)=(*this)(i).getx();
Node_XYZ(i,2)=(*this)(i).gety();
}
}

```

参赛队号 #2326

```

Node_XYZ(i,3)=(*this)(i).getz();
}
Jacobi=dNrst*Node_XYZ;
detJacobi=Jacobi.det();
//=====求解型函数矩阵对直角坐标x,y,z的导数=====
dNxyz=(Jacobi.inv())*dNrst;
//=====求解B矩阵=====
for(i=1;i<=8;i++)
{
j=(i-1)*3+1;
B(1,j)=dNxyz(1,i);
B(2,j)=0;
B(3,j)=0;
B(4,j)=dNxyz(2,i);
B(5,j)=0;
B(6,j)=dNxyz(3,i);
j++;
B(1,j)=0;
B(2,j)=dNxyz(2,i);
B(3,j)=0;
B(4,j)=dNxyz(1,i);
B(5,j)=dNxyz(3,i);
B(6,j)=0;
j++;
B(1,j)=0;
B(2,j)=0;
B(3,j)=dNxyz(3,i);
B(4,j)=0;
B(5,j)=dNxyz(2,i);
B(6,j)=dNxyz(1,i);
}
//B.Display();
return B;
}
Matrix<double> & Element_Hex_3D_8Nodes::calculateD()
{
double a=E*(1-mu)/((1+mu)*(1-2*mu));
D(1,1)=1;
D(2,2)=1;
D(3,3)=1;
D(1,2)=mu/(1-mu);
D(2,1)=D(1,2);
D(1,3)=D(1,2);
D(3,1)=D(1,2);
D(2,3)=D(1,2);
D(3,2)=D(1,2);
D(4,4)=(1-2*mu)/(2*(1-mu));
D(5,5)=D(4,4);
D(6,6)=D(4,4);
}

```


参赛队号 #2326

```

D=D*a;
//D.Display();
return D;
}
Matrix<double> & Element_Hex_3D_8Nodes::calculateK()
{
//=====利用计算B矩阵计算刚度矩阵K=====
/*
double GaussPoint[2]={0.577350269189626,-0.577350269189626};
//double GaussWeight[2]={1.0,1.0};
int i,j,k;
Matrix<double> temp(24,24);
calculateD();
for(i=0;i<2;i++)
for(j=0;j<2;j++)
for(k=0;k<2;k++)
{
double GP[3]={GaussPoint[i],GaussPoint[j],GaussPoint[k]};
double a;
int m,n;
calculateB(GP,a);
a=absv(a);
//a=GaussWeight[i]*GaussWeight[j]*GaussWeight[k]*absv(detJacobi);
temp=B.trans()*D*B;
for(m=1;m<=24;m++)
for(n=1;n<=24;n++)
K(m,n)+=(temp(m,n)*a);
}
return K;
*/
//=====以下算法提高计算速度=====
unsigned int i,j,k;
Matrix<double> dNxyz(3,8); //形函数矩阵对直角坐标的导数
Matrix<double> dNrst(3,8); //形函数矩阵对自然坐标的导数
Matrix<double> Jacobi(3,3); //雅克比矩阵
Matrix<double> Node_XYZ(8,3);
double ri[8]={-0.5,0.5,0.5,-0.5,-0.5,0.5,0.5,-0.5};
double si[8]={-0.5,-0.5,0.5,0.5,-0.5,-0.5,0.5,0.5};
double ti[8]={-0.5,-0.5,-0.5,-0.5,0.5,0.5,0.5,0.5};
double GaussPoint[2]={0.577350269189626,-0.577350269189626};
Matrix<double> temp(24,24);
calculateD();
for(i=1;i<=8;i++)
{
Node_XYZ(i,1)=(*this)(i).getx();
Node_XYZ(i,2)=(*this)(i).gety();
Node_XYZ(i,3)=(*this)(i).getz();
}
for(i=0;i<2;i++)

```

参赛队号 #2326

```

for(j=0;j<2;j++)
for(k=0;k<2;k++)
{
double GP[3]={ GaussPoint[i],GaussPoint[j],GaussPoint[k]};
double a;
int m,n;
for(m=1;m<=8;m++)
{
dNrst(1,m)=ri[m-1]*(0.5+si[m-1]*GP[1])*(0.5+ti[m-1]*GP[2]);
dNrst(2,m)=si[m-1]*(0.5+ri[m-1]*GP[0])*(0.5+ti[m-1]*GP[2]);
dNrst(3,m)=ti[m-1]*(0.5+ri[m-1]*GP[0])*(0.5+si[m-1]*GP[1]);
}
Jacobi=dNrst*Node_XYZ;
a=absv(Jacobi.det());
dNxyz=(Jacobi.inv())*dNrst;
for(m=1;m<=8;m++)
{
n=(m-1)*3+1;
B(1,n)=dNxyz(1,m);
B(2,n)=0;
B(3,n)=0;
B(4,n)=dNxyz(2,m);
B(5,n)=0;
B(6,n)=dNxyz(3,m);
n++;
B(1,n)=0;
B(2,n)=dNxyz(2,m);
B(3,n)=0;
B(4,n)=dNxyz(1,m);
B(5,n)=dNxyz(3,m);
B(6,n)=0;
n++;
B(1,n)=0;
B(2,n)=0;
B(3,n)=dNxyz(3,m);
B(4,n)=0;
B(5,n)=dNxyz(2,m);
B(6,n)=dNxyz(1,m);
}
//a=GaussWeight[i]*GaussWeight[j]*GaussWeight[k]*absv(detJacobi);
temp=B.trans()*D*B;
for(m=1;m<=24;m++) for(n=1;n<=24;n++)
K(m,n)+=(temp(m,n)*a);
}
return K;
}
Matrix<double> & Element_Hex_3D_8Nodes::calculateStress()
{
double GaussPoint[2]={0.577350269189626,-0.577350269189626};
int i,j,k;

```

参赛队号 #2326

```

Matrix<double> Q(3*8,1);
Matrix<double> temp(3*2,1);
for(i=1;i<=8;i++)
{
j=(i-1)*3+1;
Q(j,1)=(*this)(i).getdispX();
Q(j+1,1)=(*this)(i).getdispy();
Q(j+2,1)=(*this)(i).getdispz();
}
for(i=0;i<2;i++)
for(j=0;j<2;j++)
for(k=0;k<2;k++)
{
double GP[3]={ GaussPoint[i],GaussPoint[j],GaussPoint[k]};
double a;
int m;
calculateB(GP,a);
a=absv(a);
temp=B*Q;
for(m=1;m<=6;m++)
Stress(m,1)+=(temp(m,1)*a);
}
return Stress;
}
Matrix<double> & Element_Hex_3D_8Nodes::calculateStrain()
{
Strain=D*Stress;
return Strain;
}
void Element_Hex_3D_8Nodes::connectNode()
{
(*this)(1).addAdjNode((*this)(2).getId());
(*this)(2).addAdjNode((*this)(1).getId());
(*this)(1).addAdjNode((*this)(4).getId());
(*this)(4).addAdjNode((*this)(1).getId());
(*this)(1).addAdjNode((*this)(5).getId());
(*this)(5).addAdjNode((*this)(1).getId());
(*this)(2).addAdjNode((*this)(3).getId());
(*this)(3).addAdjNode((*this)(2).getId());
(*this)(2).addAdjNode((*this)(6).getId());
(*this)(6).addAdjNode((*this)(2).getId());
(*this)(3).addAdjNode((*this)(4).getId());
(*this)(4).addAdjNode((*this)(3).getId());
(*this)(3).addAdjNode((*this)(7).getId());
(*this)(7).addAdjNode((*this)(3).getId());
(*this)(4).addAdjNode((*this)(8).getId());
(*this)(8).addAdjNode((*this)(4).getId());
(*this)(5).addAdjNode((*this)(6).getId());
(*this)(6).addAdjNode((*this)(5).getId());
(*this)(5).addAdjNode((*this)(8).getId());

```

参赛队号 #2326

```
(*this)(8).addAdjNode((*this)(5).getId());
(*this)(6).addAdjNode((*this)(7).getId());
(*this)(7).addAdjNode((*this)(6).getId());
(*this)(7).addAdjNode((*this)(8).getId());
(*this)(8).addAdjNode((*this)(7).getId());
}
```

数学中国提供 (www.madio.net)