

溢洪道急流控制

(苏)Л.И.维索茨基 著

水利部西北
陕西省水利科学研究所

急道洪湓

几以维索

赵秀雯

周新 校

一九七九年十二月

前

言

水工建设的迅猛发展，特别是高水头水力枢纽的设计和施工，要求找出新的更有效的结构构件。所以控制高速水流结构物水力学计算方法的研究是目前迫切任务之一。对于这了目的来说，既有一维水力学计算方法，已不能适用。而向二维和三维水流模型的过渡，使水流的分析和相应结构物的计算更趋复杂，但如果使用电子计算机，就可以避免复杂的计算过程。目前，甚至在一些较小的设计单位，都有自己的计算中心和专职的工作人员，根据相应的程序，他们能胜任复杂的计算任务。

最近十年内，由我国科学家研究了控制急流的高效结构物计算方法。但这些方法在设计工作中的推广使用很慢。按照 C. M. Cаукович, 教授^[64]的说法，其原因在于这些计算方法所得的解没能给工程技术人员带来可以使用的结构形式，在很多情况下，由于复杂的计算过程和缺少相宜的计算方法，使设计人员不敢使用。而登载在定期出版文献、机关刊物、学术论文、科研报告中的部分解，又常被设计人员忽视。很多解尚未由试验所证实，其中包括原型观测，所以对计算出的数据不相信。甚至有些解还有相矛盾。最后，设计中使用新的计算方法，还存在某些情况，注重实验室研究和按类推法取计算的解。为了设计控制急流的结构物，采用计算的方法代替价值高、工作量大、时间又长的试验，而目前在实践中广泛使用这种新方法，还有一定的阻碍。克服它们的途径是向广大设计人员介绍使用计算方法的可能条件，其适用范围及技巧。最近在这方面有了一定的发展，例如出现了一系列有关的专题科技书^[9, 29, 86]，提出了关于急流控制结构物水力学计算的建议^[19]。但是，往往由于建议中提出使用数码电子计算机，

而又没有现成的程序和详细办法，所以设计人员使用计算法还有一定的困难。控制急流的双曲线结构物等的实例也还缺少。

当然，用这一本书不可能非常详细地介绍控制急流结构物的所有计算法。结合已经发表的方法，尽量说明控制急流结构的使用特点，并在一定程度上，对实例、计算程序、附表和设计人员所必须的其他资料中的不足之处给以补充。书中把最主要的注意力放在了分析与双曲结构物的计算有关的各种观点上。

本书对于试验资料未给予仔细的分析，而仅指出使用计算方法的可能性，使读者能把计算结果与试验资料进行对比。

扩散挑坎，认为是水工结构，水利土壤改良，以及公路工程中，应用最为广泛的一种双曲结构。在附录中给出了这些结构的底部坐标表，并列举了使用这些表的例子。

Ю. И. Морозов О. Б. Карманов, Г. С. Щукун, Б. Л. Шнайзер, Б. А. Югун 等工程师参加了编程序和计算工作，为此，作者向他们表示感谢。科学技术博士 Б. Д. Емцев 对本书手稿提出了改进意见，作者表示谢意。

作者

引 言

目前水力发电工程大规模地发展起来。为了最大限度地提高这些工程的投资效果，必须采用先进的概念和原则，以及科学技术的最新成就。在这方面，有很多相互联系着的，难以解决的问题摆在设计人员、试验研究人员和管理人员面前。而其中一个问题就是急流控制问题。

“急流控制”这个名词，可以有各种解释。以下指的是，急流控制课题的目的在于：研究出一种能保证急流按事先给定的特点（运动的、几何的等等）运动的人工河道的几何形式。显然，后者应由设计人员根据控制急流结构本身，及其后河道的安全运行条件提出。

设计高速流无压洩水道时，往往必须采用急流控制的方法。在一系列关于高水头洩水道水力学会议上，不只一次地强调过重要的是以最快速度研究出计算急流控制结构的方法并在实践中推广使用。这个问题，对于大型水工建筑物更有重大意义，因为，后者是代价最大又最重要的一种建筑物，其各构件的合理设计能大大地节约经费，提高它的可塑性。

对于道路运输工程，这个问题也很迫切，因为公路的安全运行在很大程度上取决于山坡上小型排水建筑的工作情况。设计得合理的结构，会明显地节约总的经费。因此，洩水道尺寸的确定它的合理选择和设计是个技术经济课题。不但建筑物的造价，就是它的生存力也都取决于这个课题的正确解决。

急流控制的任务是通过对结构物给急流一定的作用：用急弯迫使急流转弯；迫使它在陡槽或衔接段上扩散（束窄）；利用扩散挑坎，以扩散水舌自由跌落的形式，使急流扩散和抛离建筑物较

远距离，保证急流具有指定的变形的不同组合。为此，必须在被控制河道的水流相互作用段内，通过水流的水力学特征和河道的几何形式确定控制作用。通常，急流控制结构物应使急流不产生分离。

对急流的作用有两种基本方法：(1) 借助于侧墙；(2) 利用曲线形底部。按照这样的分类，计算结构时应考虑急流的特有性质，即表面扰动传播特点和河道底部足够光滑的纵向外形所决定的特点。按以上所述处理方法可对复杂几何形式河道里的高速水流进行水力学计算，洩水道定线时，有可能考虑地形和地质条件并得出最优解。

在苏联，关于复杂变形急流计算方法问题是由 H. T. Me-
лешенко 和 H. E. Кондратьев 等开始研究的。他们发表
了很多著作。必须指出，最近几年来，不但在我国，就是在国外，
对这些方法的兴趣也有了明显的增加。这个问题确实有了较大的
发展 [29, 43, 52, 53, 72, 78, 79, 87 等]。但也应当承认，水工建设
实践中，使用这些方法的情况还不够满意。大家知道，一种新
结果的使用往往使人很不习惯并且是个长阶段的过程，又需要有
拥护这些新事物的人的坚决支持。到底是什么阻碍了控制急流方
法的使用呢？有些原因是可以看出来的。虽然近来出版了一些普
及性的专题科技书 [9, 19, 29]，但向广大设计人员介绍控制急流
结构计算方法还很不多。同时受到承认的水力学手册的作者们，
报导这些消息又很谨慎，只限于简单地提一提控制急流的可能性。

不久前，几本关于急流控制结构水力学计算的专议的书 [19]
问世了，A. M. Убайдуллин 所著 [86]，描述国外水力枢纽
大坝洩洪道的书也与读者见面了。但愿，这些书引起广大设计
人员对控制急流的注意。阻碍使用控制急流复杂计算方法的常见
原因之一是，它们尚未达到所谓工程形式。很多设计人员认为劳

动量大又昂贵的实验方法或按相似法选择题解的方法比复杂的计算要好，当然了，我国和国外水利工程事业中积累起来的丰富经验应当采用，但不能不考虑当地的特点，而把一些成功的题解搬来使用。

关于得出工程题解（当然，自己本身也是非常希望的），显然，说起来是十分明确的，但在很多情况下，这又实现不了。因为，一方面，为得到工程题解必须大力简化所给条件，而用这样的代价所未得的相对地较简单的结果，才能使设计人员满意。另一方面，为得到可靠的资料，必须解几个复杂的微分方程式，求它包括大异变数和参变数的偏导数。但是用传统的方法往往很难解出这些方程式，而且本身方面需要引入很多简化假设，这又会使所得结果与实际情况不相符。

现在所有的问题都越来越明显了，流体力学中的多尺度课题的全面研究只能用数值方法，而解析方法（即或他们愿意）只适用于相对较窄的课题范围。但数值法的计算工作量往往非常大，也不能使设计人员满意。利用电子计算机可能会有出路。目前，大多数设计单位都有自己的计算中心和受过专门训练的干部。很多单位还能得到其他计算中心的帮助。用数值电子计算机计算控制流结构的费用不能与实验费用做任何比较。但，这样的计算对于设计人员来说，需要具有详细指南的和使用例题的程序。

为简化计算可使用另一种途径：对于这种或那种单一类型结构物，借助于电子计算机进行适当数值的计算，再把这些计算表格化，并给出使用表格的范例。

利用现代化电子计算机，在很多情况下，可以向数学模型过渡，即对许多方案进行仔细挑选和对比以后，选出最优的结构。通过电子计算机得出的题解，不仅具有数值形式，也可能是图表形式的。目前提出并正在研究更新的仅适用于电子计算机的数值法。

控制急流结构计算的理论基础在文献〔9、19、29等〕中已有了叙述。为了解释问题的基本观点，将重复这些基本理论。显然，可以认为，控制急流问题的一般理论原则，目前研究的已很充分。所以本书把主要注意力放在问题的应用方面，同时也注意了双曲底部结构的计算问题。

此外还应注意到，在急流严重变形情况下（当自由表面纵向和横向坡降很大和表面严重弯曲情况下），尤其大福系数时，“浅水”理论零近似的假设不再适应。目前没有希望得出，三向急流沿弯曲表面运动问题的精确解，所以采用一种过渡的计算方法是合理的，它考虑了急流的最重要特点并能求得足够可信的结果。当然，充分考虑这些因素的影响，如掺气等（常与急流运动同时发生）就很难以纯理论概括做为基础。在这样的条件下，用简单概括的方式来说明水流情况，并把计算方法用到描述模型水流运动的方程式中去都是恰当的，也是可以得到证实的。但，在此情况下，不可避免的要出现相当复杂的理论概括和问题的解，因为急流变形的复杂现象，未必能用简单的方式描述。

本书通过实例说明解急流沿固体表面运动反问题的实际解法（取直接引向最终目的并在最大程度上满足生产实际的需要），和以前〔9〕所提出的计算各种急流控制建筑物的统一方法。

附录中列出了扩散挑坎无尺度座标表，设计人员可根据它给出挑坎尺寸，而无需大量的计算工作。

由于双曲底部结构控制急流理论的实现和它的经济意义的被证实加上大量试验资料又肯定了它的效果，这样就奠定了制定相应定额、技术条例和典型结构的基础，进而把从事这方面试验研究的人员从不可证实的经验中解放出来。

目 录

第一章 急流控制的任務及方法

1-1	急流的特性	1
1-2	急流控制的任務	3
1-3	急流控制结构形式的分类	6
1-4	关于複式泄槽中的急流课题	8

第二章 控制急流的结构物

2-1	扩散挑坎	1
2-2	急弯挑坎	11
2-3	特殊挑坎	14
2-4	急 弯	16
2-5	陡槽过渡段	20
2-6	急流控制效果的几个指标	23

第三章 用侧滩控制急流结构物计算的理论基础

3-1	二维水流运动和连续微分方程	1
3-2	特征值法解典型课题	15
3-3	计入阻力和底部坡降情况下特征线法的特点	33
3-4	平底结构物计算方法的应用条件	37

第四章 计算双曲底部结构物的理论基础

4-1	双曲底部结构物的运行特点	1
4-2	圆柱座标系统中的自由表面方程式	1
4-3	自由表面的积分微分方程式	19
4-4	空间弯曲水流内的压力分佈	20
4-5	自由表面方程式的解法	22
4-6	解自由表面方程式的近似方法的精确度问题	41

4-7	空间弯曲水舌的连续方程式-----	49
4-8	双曲结构物的计算次序-----	54
4-9	水流掺气和能量损失的考虑-----	59

第五章 控制急流的双曲底部结构物的水力学计算

5-1	对边界条件和表面流线平面图函数的一般要求-----	1
5-2	挑坎的水力学计算-----	2
5-3	急弯的计算-----	21
5-4	过渡段的计算-----	28

第六章 双曲水工结构物水力学计算例

6-1	扩散挑坎和急弯挑坎的计算-----	1
6-2	过渡段的计算-----	18
6-3	急弯的计算-----	21

第七章 控制急流结构物运行情况的试验研究

7-1	扩散挑坎的运行情况-----	1
7-2	急弯挑坎的工作情况-----	26
7-3	特殊挑坎的工作情况-----	28
7-4	扩散过渡段和急弯的工作情况-----	32

$$c = \sqrt{gh}$$

(1-1)

式中: g — 重力加速度。

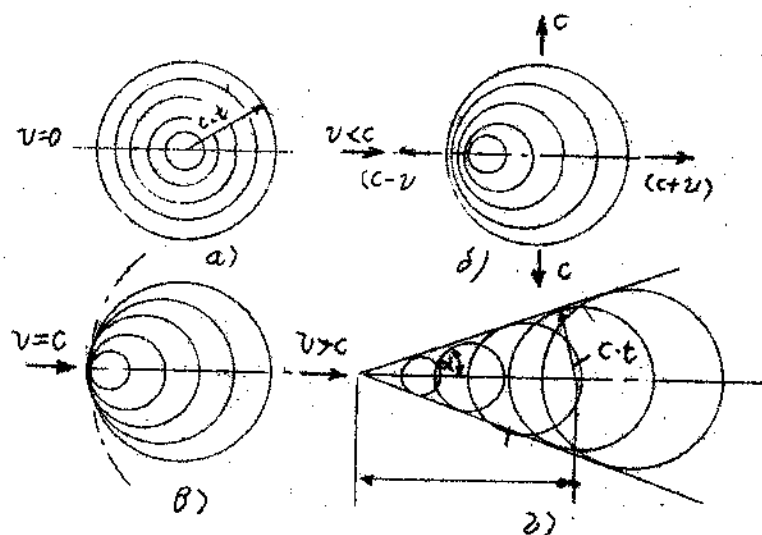


图 1-1

表面扰动在静止流中和
运动流件里的传播

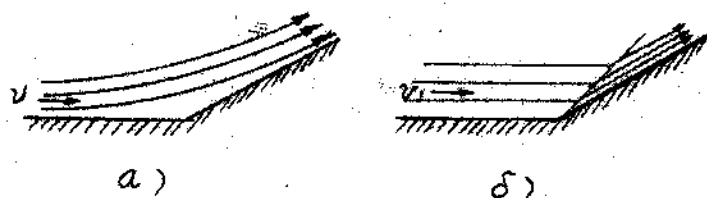


图 1-2

缓流 (a) 和急流 (b) 流过
障碍物时的流况

第一章 急流控制的任务及方法

1-1 急流的特性

由于种种原因，可能引起不可压缩流体各个运动参数（即流速、自由表面高程、压力等等）的扰动。这种扰动在流体里的传播速度一般情况下与流体的运动速度不同。从以下的叙述中，可以看出自由表面较小的扰动的传播速度最有意义。

若在静止液体自由表面的某点，当 $u_0 = 0$ 时，发生了小扰动（自由表面的高程有小的变化），此扰动就以某个速度 c 均匀地向各个方向传播，（见图 1-1 a）。分析一下液体自由表面小扰动传播速度的特点，就很容易发现它与液体运动速度 V 和小扰动传播速度 c 的此有很大关系。当 $V/c < 1$ 时，扰动向所有方向传播，只不过是向逆水流方向传播的快些（ $c - V$ ），顺水流方向传播的快些（ $c + V$ ），见图 1-1 b；当 $V/c = 1$ 时，扰动不可能在越过扰动源又与液体运动方向垂直的后面传播，见图 1-1 c；最后当 $V/c > 1$ 时，小扰动始终不能超出两条界线之外，这两条界线随过扰动源，并相互成 $\alpha = \arcsin V/c$ 角。见图 1-1 d。这两条界线就称为扰动线，类似于气体动力学中的声线，马赫（Mach）线。

根据上述情况得出以下重要结论。从扰动传播特性很容易看出， $V/c < 1$ 时，流向障碍物的流线在距障碍物老区的地方，就重新调整了。

相反，当 $V/c > 1$ 时，只有过了扰动线之后，流线才改变自己的形状（图 1-2）。

小扰动的传播速度 c 称为波速。对于深度为 h 的静止液体已的简单计算式为：

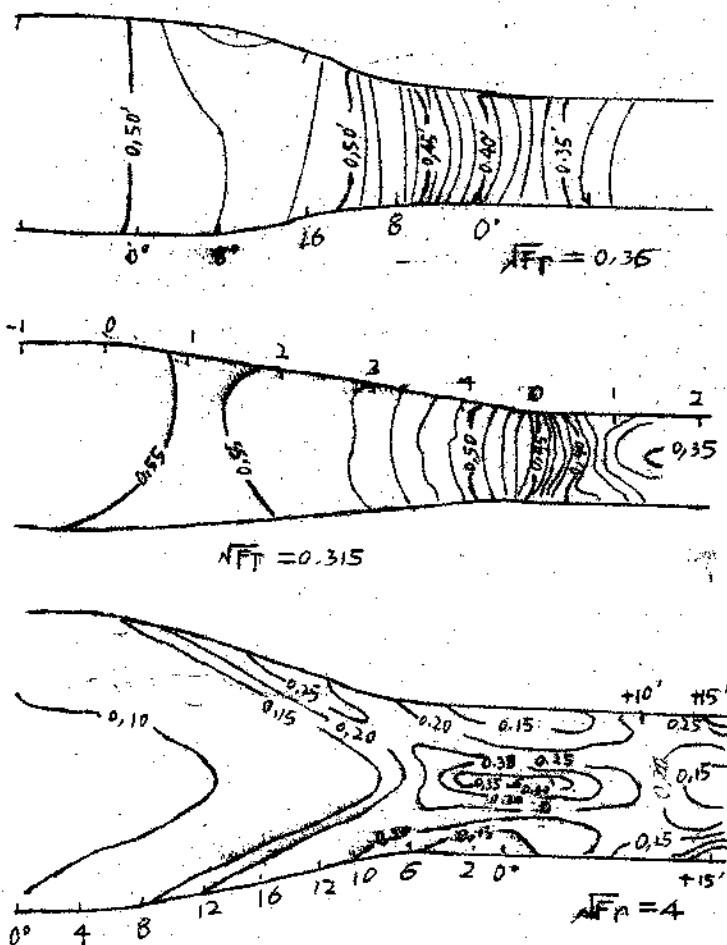


图 1—3 缓流和急流自由表面高程线

照 片 略

图 1—4 表面扰动在退水坝里的传播

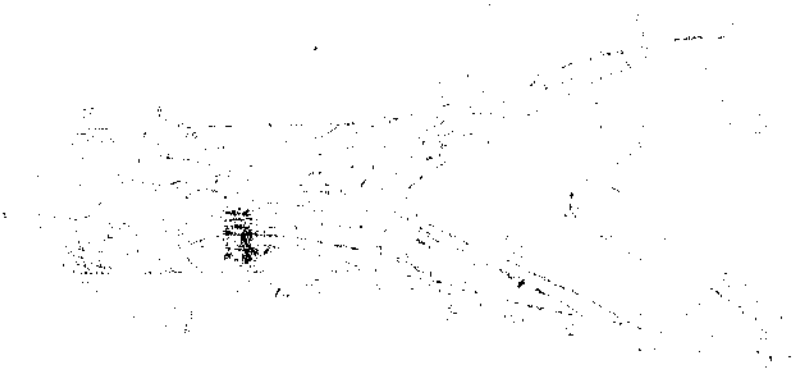
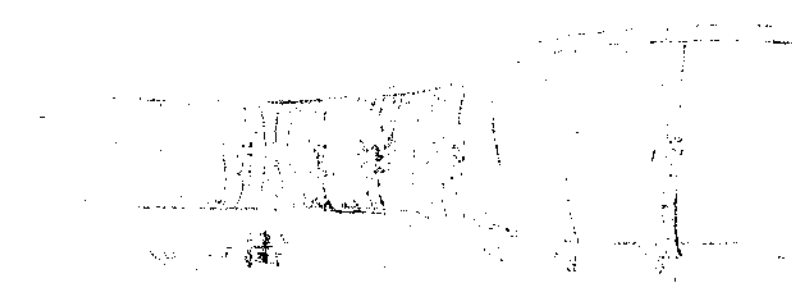


图 1-1 图

图 1-2 图

图 1-3 图

对于水滞，(1-1)只是近似式。根据一些资料[69]，水滞中滞速分布特点对C值有影响。对坡降较大的槽子来说[29]，

$$c = \sqrt{gh \cos \beta} \quad (1-2)$$

式中： β ——自由表面与水平面的夹角。

自由表面的曲率及其它因素对C值都有复杂的影响。通常根据 $V/c \geq 1$ 来判断水流的情况，当按(1-1)式确定C时，该比值与福氏数的平方根相符合，若取福氏数中的水深为特征线性尺寸：

$$Fr = V^2/c^2 = V^2/(gh) \quad (1-3)$$

、 $V/c > 1$ ($Fr > 1$) 时称为急流；而 $V/c < 1$ ($Fr < 1$) 时称为缓流； $V/c = 1$ ，称为临界流。

对急流的这个特性必须注意，因为利用侧岸使急流转向时，将产生水流对侧岸的撞击和反射，并引起水的飞溅现象，斜波及水跃等。这就急剧地改变了水流参数，并且破坏了水深；流速和单宽流宽的分布规律，这种现象在退水渠很长一段距离内都存在。

导岸迫使急流转向的角度越大或急流的福氏数越大，则急流参数改变越显著。上述情况可用为本 (Unne H) 在平底情况下用侧岸束窄缓流和急流的研究资料来证明。很容易看出急流 ($Fr = 16$) 与侧岸相互作用的复杂性质 (图1-3)。某些横断面上的水深竟相差2.6倍。顺水流传播的扰动现象，见 (图1-4)。

急流特性应该能在描述其运动的微分方程中反映出来。实际上，二维急流的运动方程为双曲型，而缓流的是椭圆型，它们的解具有根本性的区别，并且正如试验所证明的那样，这些解都反映了实际的水流情况。

1-2 急流控制的任务

岸边溢洪道及其他泄水建筑物的造价在很大程度上取决于对

当地条件的正确估计。其中首先是对地形和地质条件的考虑。在不利的地形和地质条件下，布置开敞式溢洪道往往不得不把溢洪道的各个下件做成复杂的几何形状，同时为了使上下沉脚连接良好，急流控制的课题就更复杂了。

每个工程的地形、地质和其他条件都不同，所以洩水建筑物各构件的结构也是多种多样的。由于这些原因，对世界各国在设计开敞式溢洪道方面积累起来的经验，有必要进行总结，使之推广和系统化〔9、19、86〕等。但必须指出，鉴于上述原因，必须根据具体条件来吸取已有工程的经验，而不应是形式主义的。

设计人员对所设计溢洪道的运行特点，进行比较，往往就知道了整个溢洪道内水流应具有适当的参数（最优参数）。但设计人员往往不了解溢洪道应具有什么样的几何形式才能保证所要求的水流参数。因此就产生了控制水流运动的课题。通过分析 and 试验途径解决这样的课题，才能合理地设计出这样或那样的洩水建筑物。

显然，控制水流运动课题，可以从最优控制理论的一般观点来分析。在提出控制过程理论课题时，有一点是共同的，即任何一种所研究的事物，受到一定的控制作用，这控制作用使它从给定的（开始）状况转化到另一种给定的（终结）状况，并满足对控制过程质量的一些要求（最优的、合理的或其它的）。因为每个工程都有其自己的特点，所以才出现了相似课题不同解的现象。目前，注意到最优运动所伴生的问题及控制课题的正确性等，其中有由于解控制课题时技术条件所要求的各种本质不同的目的，使控制过程理论中的数学概括未必能实现。下面来讨论一下考虑课题特点和性质控制急流课题的解法。

所讨论的控制对象是距槽受侧岸或槽底限制的无压水流。距槽的反抗作用就是控制作用。依信它，使水流规范在一定的状态。

这个反作用与水流所属参数（流速、水深、紊动性、黏滞性等），以及阻槽本身及被控制水流的几何形式有关。

表面流线的平面图，自由表面纵剖面图，水流扩散（收缩）程度，转弯角等等都可以能是所要求的水流运动的已知条件。

对控制过程质量的要求有：自由表面（свободная поверхность）上无斜波（косая волна）和水跃、建筑物底下无脱壁流流，没有负压及空蚀现象等。

以把水流从一种已知状态变为另一种状态为目的的水流控制问题可借助于各种结构来解决，如不同的几何尺寸，及表面形式等等。控制质量有时与其他要求和条件有矛盾，如经济条件等。所以就产生了最优控制问题，但这个题目往往很难准确地表示，它可能在较大范围内变化，主要取决于设计人员如何理解“控制质量”这一概念。

综上所述，“控制水流”是一个广义的概念，可以有各种不同解释，往下，把“控制水流”理解为：保持起如按水流参数情况下，改变某段阻槽的几何形式，使水流受到一定方向的作用，以便在该段末端断面得到给定的参数。对于控制过程质量的要求，即对阻槽控制段内水流情况的要求，按经常表视为使水流自由表面的形式受到某些限制，保证阻槽段内水流按给定的表面流线平面图（即给定的流况平面图）运动，通常就是这类控制。

1—3 急流控制结构形式的分类：

以下几章只介绍通过一定形式的阻槽控制急流结构的水力学计算，所以就不再提到闸竖墩、宽墩、分流齿、导流墩、雷伯克（Редок）溢槛等等设备控制水流的方法。

我们将按急流控制结构特点和工作条件，对急流控制结构物进行分类（不要求严格性和全面性）。

可以采取各种方法使阻槽对水流起控制作用；