

克服明渠高速水流 冲击波的方法

西北
陕西省水利科學研究所著

陝西人民出版社



克服明渠高速水流冲击波的方法

西北水利科学研究所著
陕西省

陕西人民出版社

一九五九年·西安

內 容 提 要

明渠高速水流所产生的冲击波，是水利工程上一直未能完滿解决的問題之一。本书經过模型試驗及实际工程的研究，初步总结了克服明渠高速水流收缩及扩散段中冲击波的几种方法，并对这几种方法从理論上加以推导，可供有关水利工程設計人員及高等院校教师等参考使用。

克服明渠高速水流冲击波的方法

西 北 水利科学研究所著
陕 西 省

陕西人民出版社出版（西安北大街109号）
西安市书刊出版业营业許可証出字第001号
西安第一印刷厂印刷 陕西省新华书店發行

850×1168紙 $\frac{1}{32}$ · $1\frac{1}{4}$ 印張·插頁1·25,440字

一九五九年九月第一版

一九五九年十一月第二次印刷

印数：701—1,830 定价：(9)二角三分

統一书号：15094·47

引 言

在以往兴建的水利工程中，曾遇到許多重大的問題未能获得完滿的解决，明渠高速水流所产生的冲击波就是其中之一。

大家熟知，陡坡溢洪道的水流一般均屬急流，此种水流特性在水力計算上存在着一定的疑难，通常必須借助于水工模型試驗以决定工程經濟合理的方案，若工程設計时对于冲击波估計不足，則在建筑物运用过程中往往感到导水边墙高度偏低，因而發生岸墙漫溢現象，致使附近建筑物及河岸可能遭到破坏。其次由于冲击波的存在造成陡槽內水流極不稳定，因此常使下游脚槽状态复杂化。基于上述原因，为了确保工程的安全与接济，故須对克服冲击波的方法作深入的研究。

目 录

引 言

第一章 明渠高速水流的特性..... (1)

一、高速水流与低速水流特性的区别..... (1)

二、急流冲击波的特性..... (2)

三、高速水流波痕传播力学理论简介..... (3)

第二章 克服明渠高速水流冲击波的方法..... (9)

一、利用波痕干扰克服冲击波的方法..... (10)

二、利用直线渐变段克服冲击波的方法..... (11)

三、利用动静压力平衡原理克服冲击波的方法..... (12)

第三章 克服急流扩散段冲击波的方法..... (27)

一、扩散段水流特性..... (27)

二、克服急流扩散段中冲击波的方法..... (27)

简短总结..... (35)

第一章 明渠高速水流的特性

一、高速水流与低速水流特性的区别

高速水流就是指急流亦称射流或超临界流而言，此种水流特性与一般缓流性质完全不同，因此给工程设计带来了许多困难。

稳定渐变流动一般只考虑到水深与距离的变化、水深与流速的变化，其计算方法一般应用稳定渐变流方程式。但对于高速水流如遇有渠槽边界墙有改变的情况，水流就激起冲击波的发生，因而稳定渐变流方程式就不适用，各种稳定渐变流方程式对于高速水流仅能应用于渠槽两侧边界墙平行且底波无横向坡降的直线运动，假如与上述条件不相符合，则计算时使用稳定渐变流方程式就会引起错误。

高速水流与缓流在物理概念上的区别，若用比能曲线表示出来，可总结如下几点：

1. 在比能（圖1）中，经过原点作 45° 倾角的直线，直线左边的纵坐标表示水深，直线右边与比能曲线间横距离示流速水头，A点是临界水深。由圖中看出：缓流中的流速水头 $\frac{V_c^2}{2g}$ 占比能H的很小部分，因此由于边界墙方向的改变而引起的压力变化，将是流速水

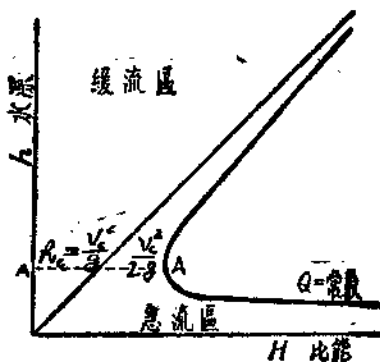


图1 水深比能曲线

头的大部分，但該值同水深相比較仍舊很小。倘若使渠槽边界牆方向改变平緩，同时設槽底或边壁水压力为靜压力分布均是合理的，显然比能 H 有很大的改变时，即意味着水深有很大的改变。

2. 在高速水流中，流速水头的大小不但与水深 h 可以比拟，同时由試驗和实际观测的大多数情况証明，还超过水深很多。在这种情况下，比能 H 有較大的变动，即相当于水头有很大的改变，若边界牆稍有偏折角度，所引起的动压力变化与流速水头相比甚小，但与水深或水面高的改变相比将是比較大的，靜水压力分布有着極为显著的改变，而流速水头的改变則占很小的百分数。所以說比能 H 的很大变化，同时也是流速水头的極大改变。

3. 水流接近于临界水深时，即 $V = \sqrt{gh}$ ，此时 h 和 $\frac{V^2}{2g}$ 有相同的阶次，当 H 保持不变时， h 和 $\frac{V^2}{2g}$ 互相影响發生改变，比能 H 稍有改变就招致 $\frac{V^2}{2g}$ 和 h 較大的变动，若边界牆稍有偏折，由于对靜水压力分布的影响相当于对 H 有較小的改变，致使水深和流速形成較大的扰动，因此时常見到水面有波动。

通常用佛汝德数 F ($F = \frac{V}{\sqrt{gh}}$) 来分辨水流流动的性質，上述第 1 点中所指水流性質相当于 $F < 1$ ，第 2 点中高速水流性質相当于 $F > 1$ ，在临界水深时則 $F \approx 1$ 。

二、急流冲击波的特性

如前所述，在高速水流中由于边界牆的偏折，就招致水流的極大扰动，同时由于高速水流的流速大于波速（波速 $C = \sqrt{gh}$ ），因此扰动并不能向上游传播，且在某一定分界綫的下游，才改变其水流方向和水面形状以及水深和流速分布。換言之，也即是下游边界牆的偏折所形成的水流扰动，对上游水流特性在一

設情況下并無影響。通常把此一分界綫稱為擾動綫(冲击波綫)，使與上游水流截然分開。該擾動綫由邊界牆開始處與上游水流方向，理論上保持一定的波角斜貫下游，遇到對岸邊界牆時復又反射回來。若陡槽很長，此種擾動波由於反復干擾就會逐漸減小以至最後完全消失；但當若干擾動綫匯集在一起，即會形成陡峻坡面，稱為冲击波或斜坡水壩。

渠槽邊界牆的偏折，強使水流方向發生改變，因此水深與流速隨之發生調整，其關係通常與水躍相似。二者相同點為水深均成共軛關係；所不同者為洩水建築物渲洩而下之急流與下游卸接一般採用水躍形式，躍後為緩流，流向與原來方向相同，波角等於 90° 。但急流經過冲击波後流向發生改變，坡角小於 90° ，而水流仍由一急流轉向另一急流。

三、高速水流波Ⅱ傳播力學理論簡介(1)*

冲击波的基本特性可以根據以下假定為基礎加以闡述：

1. 若急流邊界牆方向偏折角度很小，則形成水深變化也小，因此垂直方向的加速度可以略而不計，所以鉛直綫上壓力分布應服從靜壓力分布定律。

2. 假定沿水深垂綫上各點的流速相等，而且沿着槽底和水深，從 h_1 轉變到 h_2 ，能量的消耗，也可不計。

3. 設沿槽底剪力為

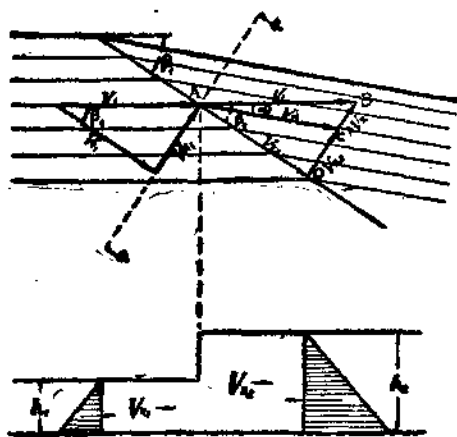


圖2 冲击波之平面及流速向量圖

* (1) 係參攷文獻編號，以下皆同。

零，即可以认为槽底剪力与重量分值相等。

根据以上假定，取横过水流波面之单位宽度，即可写出連續方程和动量方程（圖 2）：

連續方程式：

$$h_1 V_{n1} = h_2 V_{n2} \quad (1)$$

动量方程式：

$$\frac{1}{2} \gamma h_1^2 + \frac{\gamma}{g} h_1 V_{n1}^2 = \frac{1}{2} \gamma h_2^2 + \frac{\gamma}{g} h_2 V_{n2}^2 \quad (2)$$

由于平行于波面无力的分值，所以切綫方向的流速分值 V_{t1} 与 V_{t2} 经过波面后仍保持不变，显然减低流連的不平衡压力，只能对正交于波面的水流动量起作用。

解方程式(1)与(2)得出流速正交分值 V_{n1} 与水深 h_2 及 h_1 的关系：

$$V_{n1} = \sqrt{gh_1} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{h_2}{h_1} \left(1 + \frac{h_2}{h_1}\right)} \quad (3)$$

因为假定波面是固定的，所以 V_{n1} 即为波速。在高速水流中任何冲击波高为 $(h_2 - h_1)$ ，流速正交于波面的分值即可由方程式(3)来确定，非如此波面就不是固定的。

将方程式(3)中的 V_{n1} 以相等的 $V_1 \sin \beta_1$ 代之，則得：

$$\sin \beta_1 = \frac{\sqrt{gh_1}}{V_1} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \frac{h_2}{h_1} \left(1 + \frac{h_2}{h_1}\right)} \quad (4)$$

假如由于边界墙偏折角度很小，因而所引起的波高也很小或者不够显著，亦即 $h_1 \approx h_2$ ，那么根号内的数值即接近于 1，因此波角計算可簡化为下式：

$$\sin \beta_1 = \frac{1}{F} \quad (5)$$

其次从圖2的流速向量几何圖中，分析三角形 $\triangle ABC$ 則得：

$$\frac{\Delta V_n}{V_1} = \frac{\sin \Delta \theta}{\sin(90^\circ - \beta_1 + \Delta \theta)}$$

倘若为極小的角度改变，則上式可簡写为：

$$dV_n = \frac{V d\theta}{\cos \beta_1} \quad (6)$$

略去其中脚註，对于任意極微量的水深与流速地改变，写出动量关系，則得到表示 dV_n 的微分方程式：

$$\gamma h \cdot dh = \frac{1}{g} \gamma h V_n dV_n$$

$$\text{或} \quad dV_n = \frac{dh}{V_n} \cdot g \quad (7)$$

合併方程式(6)与(7)，并且以 $V_n = V \sin \beta$ 代入得：

$$\frac{V d\theta}{\cos \beta} = \frac{g dh}{V \sin \beta}$$

$$\text{或} \quad dh = \frac{V^2}{g} \operatorname{tg} \beta \cdot d\theta \quad (8)$$

若假定比能为常数：

$$H = h + \frac{V^2}{2g}$$

$$\text{則} \quad V = \sqrt{2g(H-h)}$$

$$\begin{aligned} \text{因此} \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{V_n}{V_t} &= \frac{\sin \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta}} = \frac{\sqrt{gh}}{\sqrt{V^2 - gh}} \\ &= \frac{\sqrt{h}}{\sqrt{H - 3h}} \end{aligned}$$

方程式(8)最后可写为：

$$\frac{dh}{d\theta} = \frac{2(H-h)\sqrt{h}}{\sqrt{2H-3h}} = \frac{\sqrt{\frac{2h}{H}(1-\frac{h}{H})} \cdot H}{\sqrt{1-\frac{3}{2}\frac{h}{H}}} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{积分得: } \theta &= \sqrt{3} \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\frac{h}{2H/s}}{1-\frac{h}{2H/s}}} \\ &\quad - \operatorname{tg}^{-1} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\frac{h}{2H/s}}{1-\frac{h}{2H/s}}} - \theta_1 \quad (10a) \end{aligned}$$

式中 θ_1 为积分常数，由起始边界条件来决定。当 $\theta = 0$ 时，因 $\frac{h}{2H/s} = \frac{3}{2+F^2}$ ，以此值代入方程式(10a)，可求得 F 与 θ 之相互关系：

$$\theta = \sqrt{3} \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{3}{F^2-1}} - \operatorname{tg}^{-1} \frac{1}{\sqrt{F^2-1}} - \theta_1 \quad (10b)$$

根据以上推导，小结如下：

(1) 若 $F > 1$ 并令 H 值保持常数不变，由于扰动冲击波而發生的水深变化 Δh ，一般的沿横过水流波面發生，与来水方向所成的角度为 β_1 ，在稳定流情况下，不会有其他角度發生。

(2) 波角和水深决定于正交波面流速的改变，因此經過每一波面后水流的方向必然改变 Δ 角。

(3) 当水流經過相間任意距离的連續波面时（波面不能相距过近，以此保持微小的加速度），流向总的改变可以直接关系到流綫两点之間总的流速和水深的改变。

方程式(10a)与(10b)內之 θ_1 为积分常数，表示当 $\theta = 0^\circ$ ，

$h=h_1$ 时 边界墙未偏折前的虚拟偏折角。同时也可视为水流扰动前之水流因素 V_1 、 h_1 或 F_1 ，系由另一虚拟情况(V_0 、 F_0 为无穷大 水深 h_1 为无穷小)，经折一 θ_1 角度后而得来的。此乃系虚拟情况，且为高速水流之最大极限。另一极限为水流的临界情况，即 $h=\frac{2}{3}H$ 或者 $F=1$ 。前一极限为 $\theta_1+\theta_{\pm}=0^\circ$ ，后一极限值为 $\theta_1+\theta_{\pm}=65^\circ53'$ ，二者之间水深的变化为 $h:0\sim h_1$ (h 为临界水深)。(10a)与(10b)两式绘制成曲线如(图3)。

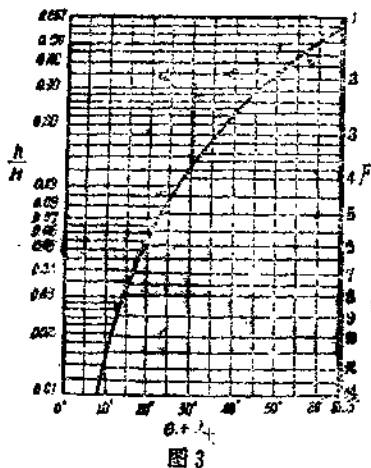


图3

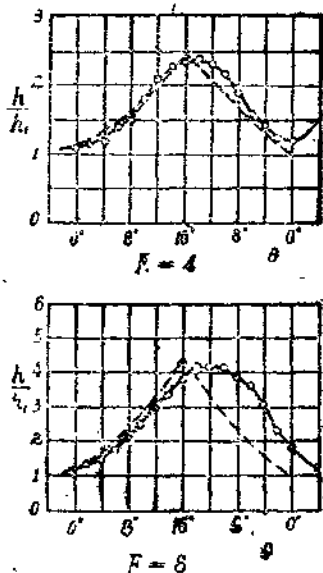


图4

当设计高速水流边界墙偏折角度而检用该曲线时，应该利用边界墙偏折前的水流因素 $\frac{h}{H}$ 和 F_1 。在(图3)曲线中定出 θ_1 值，然后用 θ 角为计算偏折角之起始点，查 $(\theta_1+\theta_{\pm})$ 之对应值 $\frac{h}{H}$ 或 F_1 ，若偏折角向内(趋向水流)， θ 为正值；偏折角向外

(背离水流), θ 为負值。

(圖 4) 为急流槽渐变段边界水深的理論計算值与試驗实测值之比較, 縱座标用 $\frac{h}{h_1}$ 表示, 横座标以偏折角度表示之, 圖中所示边界为曲綫之正反二圓弧, 其半徑相等, 先向內偏折 16° , 然后向外偏折 16° 。向內偏折时渠槽內水深是逐漸增加的, 向外偏折时水深逐漸降低。圖中虛綫为計算值, 实綫为試驗观测值。

如理論計算沿渠槽边界水面綫, 其步驟为: 首先已知 V_1 值, 在 (圖 3) 中查出 $\frac{h}{H}$ 值, 求得其 θ_1 。然后再由 (圖 3) 依次查出 $C_1 + \theta_1$ 与 $\frac{h}{H}$ 曲綫, 找出水深比 $\frac{h}{h_1}$, 以此即可逐点求出渐变段內之水面綫。

我們知道 (8) 式計算水深的方法仅适用于 $\frac{h_2}{h_1}$ 值很小的情况, 亦即偏折角 $\Delta \theta$ 不大或者在渐变段內并无陡立波面的情形, 若边界牆偏折角較大或許多正扰动綫聚为一陡峻的波面, 那么扰动前或者扰动后的比能 H 为常数的假定已不适用, 必須改用动量原理, 可由 (1) —— (3) 式来推导:

在 (圖 2) 中用 $\Delta \theta_1$ 代替 $\Delta \theta$ 則可得:

$$V_1 = \frac{V_{n1}}{t_g \beta_1} = \frac{V_{n2}}{t_g (\beta_1 - \theta)}$$

由連續方程式知:

$$V_{n1} = \frac{h_2}{h_1} V_{n2}$$

則上式可写成:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{t_g \beta_1}{t_g (\beta_1 - \theta)} \quad (11)$$

解(11)式得:

$$t_g \theta = \frac{t_g \left(\frac{h_2}{h_1} - 1 \right)}{\frac{h_2}{h_1} + t_g^2 \beta_1} \quad (12)$$

由(4)式得:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8F_1^2 \sin^2 \theta_g} - 1 \quad (13)$$

合併(12)与(13)两式:

$$t_g \theta = \frac{t_g \beta_1 (\sqrt{1 + 8F_1^2 \sin^2 \beta_1} - 3)}{2t_g^2 \beta_1 + (\sqrt{1 + 8F_1^2 \sin^2 \beta_1} - 1)} \quad (14)$$

繼而求得:

$$F_2^2 = \frac{h_1}{h_2} \left[(F_1)^2 - \frac{1}{2} \frac{h_1}{h_2} \left(\frac{h_2}{h_1} - 1 \right) \left(\frac{h_2}{h_1} + 1 \right)^2 \right] \quad (15)$$

$$\text{式中: } F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gh_1}} \quad F_2 = \frac{V_2}{\sqrt{gh_2}}$$

(13)(14)(15)三式中包括 F_1 、 θ_1 、 $\frac{h_2}{h_1}$ 、 β_1 及 F_2 五个

未知函数, 可利用参考文献[1]中之曲线求知, 此处不再詳述。

第二章 克服明渠高速

水流冲击波的方法

前章阐述了明渠高速水流冲击波的特性及其形成的基本理论, 此种波形的存在, 对水工建筑物的安全有极大的危害性, 因此在设计时应力圖减小或避免冲击波的产生。目前关于克服冲击波的理论方法的研究尚极不成熟, 而已有的方法, 也存在着—

定的局限性，以下仅根据冲击波理論所推导出的方法，結合我們在这方面的研究成果，分別加以敘述：

一、利用波浪干扰克服冲击波的方法

急流冲击波可分为正的和負的两种，正波系水流偏向波面綫，使水面从而抬高，向水流偏折的边界牆压缩水流，可以看作是正波的来源。負波或者水面降低的波面，系由水流背离波面綫，由于水流的橫断面扩大而使水面降低，因而背离水流的边界牆，可看作是負波的来源。由此可知，边界牆的偏折是冲击波的来源，要使冲击波不出現或消失，可利用波浪干扰的方法来消除。

边界牆偏折的方向如果作适当的调整，即可利用波浪干扰的方法，消除不必要的冲击波。即一个負波可以利用一个等强度的正波来抵消，相反亦然。这种情况可简单地闡述如下：

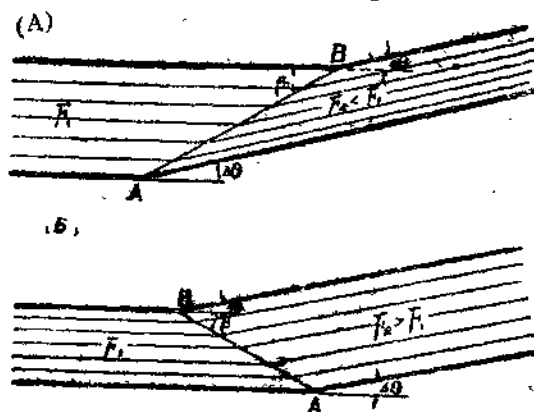


图 5 波浪干扰消除冲击波

如(圖 5 a)所示：因为在 A 点边界牆偏折的方向 趋向水流而造成正波，但渠槽对岸的边界牆方向并没有立即改变，且有意識地使其偏折点恰位于正波横过水槽到达对岸的 B 点，因为水流

经过AB已经偏折了一个角度 $\Delta\theta$ ，故不致再发生任何扰动，这种情况可解释为由A点起源的正波在对岸B点开始反射，但此反射之正波适与B点起源的负波相抵消，所以在AB波面后不再有冲击波发生。

其次如(圖56)所示：同样，一个边界墙偏折角可使在B点先产生一个负波，渠槽对岸边界的偏折点恰位于负波横过水槽到达之A点，以使该点产生的正波与到达之负波相抵消。

上述两种方法在实际运用上恰当地结合，可以使陡槽内冲击波水流得到控制，但波浪干扰方法尚有以下不足之处。

1. 实际工程上往往受地形限制，不可能使边界墙多样地偏折。

2. 该方法仅适用于某一固定流量，若流量发生变化时则渠槽内冲击波的位置就发生变动，因此又将引起新的冲击波。

二、利用直綫渐变段克服冲击波的方法(1)

高速水流渠槽收缩渐变段的最优设计，除使冲击波的湧高减低外，更希望在下stream渠道中冲击波现象减为最小，并消除此种冲击波在下stream的传播。前已介绍渠槽边界墙偏折角决定着波高和波动强度，而与其曲率角的大小无关，因此减小偏折角至最小，即可使冲击波强度大大减弱。

由(圖6)很清楚地看出：在渐变段等长

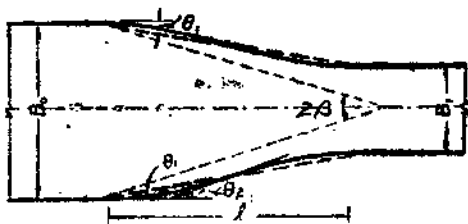


圖6 直綫漸變段示意圖

的条件下，反曲綫渐变段边界墙的偏折角 θ_2 大于直綫渐变段边界墙偏折角 θ_1 ，所以在高速水流运用直綫渐变段时，水流因边界墙

偏折而产生的冲击波强度，应较反曲线渐变段为低，这种直线渐变段是联结上下游渠道两切点而成。

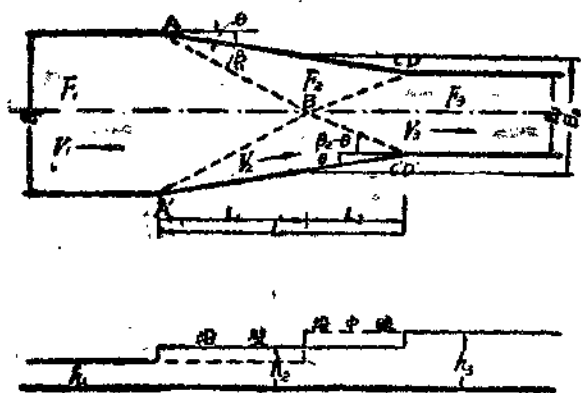


图7 直线渐变段设计方法示意图

其次根据上述波浪干扰的理论，欲使下游渠槽内在直线渐变段运用下，达到减小冲击波的目的，其设计方法如（图7）所示，使渠槽边界的偏折点恰在波浪达到对岸之C及C'处，因此渠槽偏折而产生的正波适与反射之负波相抵消，所以下游渠槽内将无冲击波发生。其时渐变段长度：

$$L = L_1 + L_2 = \frac{B_0}{2tg\beta_1} + \frac{B_1}{2tg(\beta_2 - \theta)} \quad (16)$$

但是必须指出：用这种方法设计的直线渐变段，仅适用于某一固定流量，当流量发生变化时，新的冲击波又将出现，以致运用这种方法，会受到一定限制。

三、利用动静压力平衡原理克服冲击波的方法

通常设计工程时，一般均按最大流量进行计算，但实际上急流槽内所出现的流量，常常小于此值。因此，由于流量的变化影响到冲击波传播行程的不同，致使新的冲击波又将出现，这就足以