

中国科学院
水利电力部 水利水电科学研究院

研究报告

15

異重流的研究和应用

水利电力出版社

異量流的研究和应用

中国科学院水利水电科学研究院河渠研究所
水利电力部

*

2284 S 701

水利电力出版社出版 (北京西郊科学路二里沟)

北京市书刊出版业营业许可证出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印

新华书店科技发行所发行 各地新华书店經售

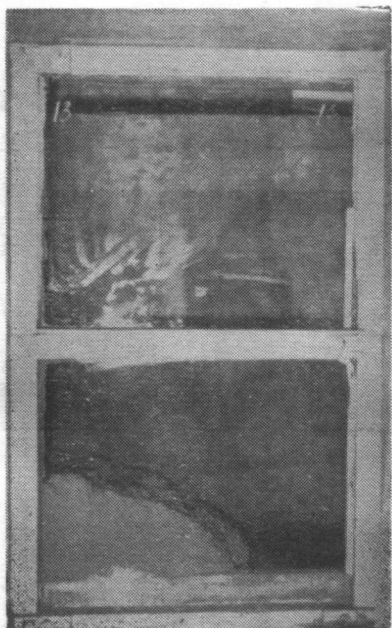
*

850×1168 1/32开本 * 5 3/4印張 * 138千字

1959年12月北京第1版

1959年12月北京第1次印刷(0001—1,870册)

統一书号: 15143·1857 定价(第10类)1.10元

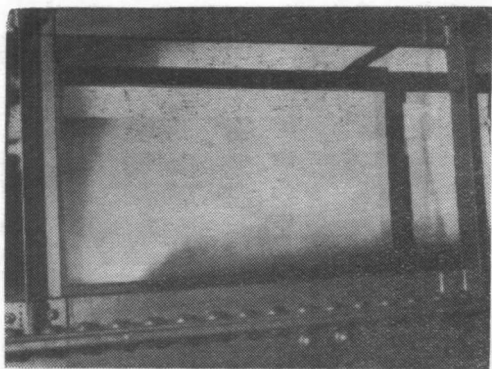


照片6 第1号水槽内泥水异重流的前鋒

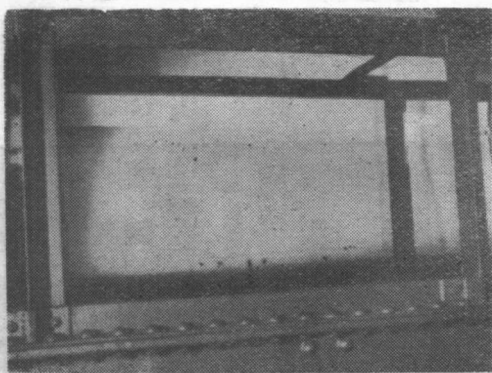


照片7 第1号水槽内泥水异重流的前鋒

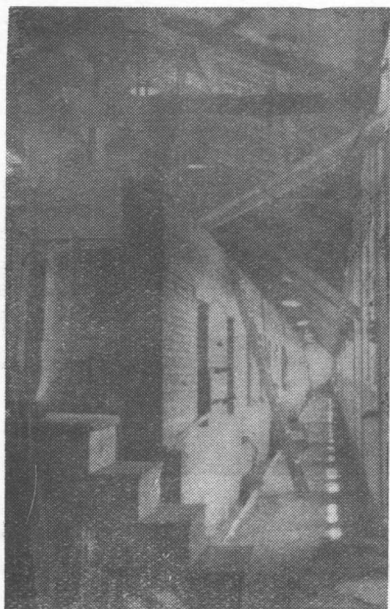
7A31810P



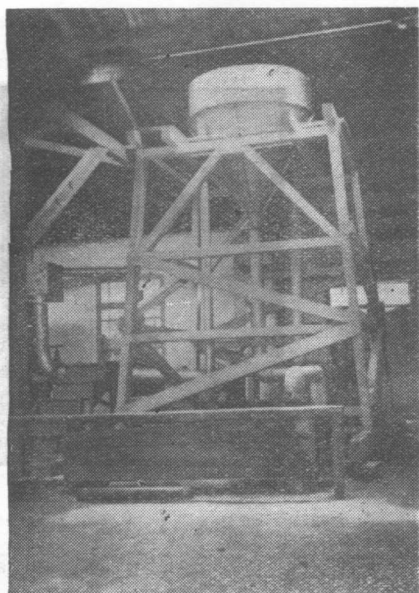
照片8 盐水异重流的前鋒



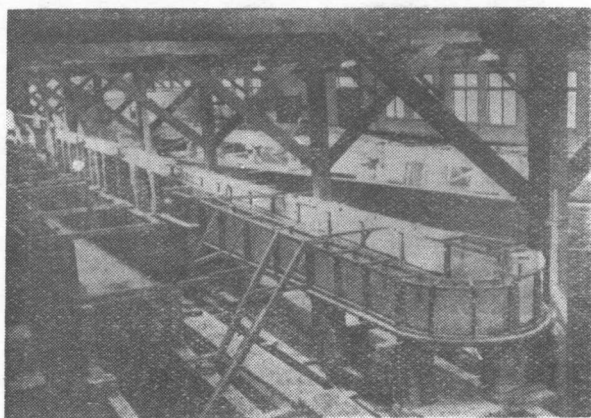
照片9 盐水异重流前鋒过后出现稳定的
异重流，交界面非常清晰



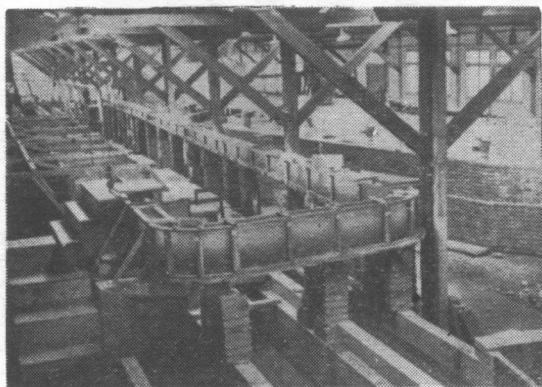
照片1 50米长磚砌异重流試驗
水槽(第1号水槽)



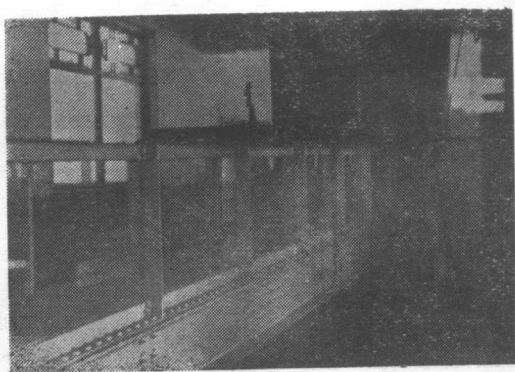
照片2 第1号水槽的平水塔及
渾水池



照片3 15厘米寬木框玻璃水槽(第2号水槽)的
第三种布置, 180°弯道



照片4 15厘米寬木框玻璃水槽(第2号水槽)
的第二种布置, 两个90°弯道



照片5 14米长活动玻璃水槽(第3号水槽)
及盐水供水箱

目 录

緒 論	5
一、异重流水力学基础	7
(一)异重流的基本方程	7
1. 异重流中的压力	7
2. 异重流的运动方程	9
3. 异重流的动量方程	10
4. 异重流的連續方程	11
(二)异重流的运动	11
1. 异重流的不恒定流	12
2. 异重流不恒定的試驗	14
3. 异重流在恒定条件下的运动	17
4. 交界面阻力系数	19
5. 不均匀流动的特性	21
6. 异重流的前鋒流速和平均流速	23
(三)异重流的发生	25
1. 水槽內渾水潛入底部形成异重流的过程	26
2. 潛入条件的分析	27
3. 潛入前后水流因子的关系	29
4. 潛入时的单寬流量同异重流强度的关系	31
5. 异重流挟帶的极限粒徑	31
(四)异重流的局部損失	32
1. 突然放大段上下游的异重流流态	33
2. 收縮段上下游的异重流因子的关系	36
3. 异重流通过弯道上下游水力因子的关系	37
4. 弯道上的横向比降	42
5. 异重流局部变化的能量損失	44
(五)异重流孔口出流	45
1. 异重流孔口出流流态的分析	46

2. 入流同出流的濃度的关系	47
3. 盐水异重流孔口出流試驗結果	49
4. 泥水异重流孔口出流的試驗結果	51
(六) 异重流泥沙的沉淀	62
1. 渾水中层异重流	62
2. 細泥沙沉淀的性質	63
二、水庫异重流运动及其計算	65
(一) 官厅水庫簡况	65
(二) 官厅水庫异重流的运动情况	68
(三) 异重流流速同泥沙粒徑的关系	77
(四) 底部异重流的形成条件	80
(五) 异重流的持續条件	83
(六) 异重流排出沙量的計算	88
(七) 异重流的淤积	103
(八) 异重流出庫沙量的估算步驟(举例)	106
三、异重流在沉沙池和冷却池工程中的应用	110
(一) 沉沙池中的异重流	111
1. 沉沙池的試驗	112
2. 在中层异重流时清水的分离	115
3. 含沙量分布和粒徑分配的变化	116
4. 沉沙池的測驗	118
5. 在形成异重流的条件下沉沙池的設計原則	119
(二) 冷却池中的异重流	120
1. 冷却池的設計要求	120
2. 冷却池中入池熱水的流态	121
3. 冷却池的設計	122
四、河道引水渠及沿海引水渠, 海港內的异重流	127
(一) 河道引水渠內的异重流	127
1. 河道引水渠內的淤积概況	127
2. 河道引水渠內异重流运动的試驗	129
(二) 沿海引水渠內及海港內的异重流	135
1. 沿海海滩細粒泥沙的組成及渠內港內的淤积概況	135
2. 細粒泥沙的起動条件	136

3. 在波浪和水流作用下的泥沙的垂綫分布.....	139
4. 港内外泥沙的动态及异重流現象.....	142
5. 沿海引水渠内异重流的运动.....	145
結論	150
参考文献	151
附录1. 試驗数据表	153
附表1. 光滑底部泥水异重流阻力系数試驗数据表($J_0=0.0005$)...	153
附表2. 光滑底部泥水异重流阻力系数試驗数据表($J_0=0.005$)...	154
附表3. 官厅水库异重流的阻力系数数据表.....	156
附表4. 盐水异重流二元孔口出流試驗数据表.....	157
附表5. 盐水异重流三元孔口出流試驗数据表.....	160
附表6. 泥水异重流二元孔口出流試驗数据表.....	163
附表7. 泥水异重流三元孔口($7@2 \times 2$ 厘米 ²)出流試驗数据表.....	165
附表8. 泥水异重流方形底孔($7@2 \times 2$ 厘米 ²)出流試驗数据表.....	171
附表9. 泥水异重流长方形底孔($4@2 \times 3$ 厘米 ²)出流試驗数据表.....	171
附表10. 官厅水库实测异重流孔口出流数据表.....	172
附表11. 泥水异重流潛入条件試驗数据表.....	172
附表12. 泥水异重流弯道試驗数据表.....	173
附表13. 泥水异重流扩大試驗数据表.....	173
附录2. 异重流試驗設備	174
附录3. 符号表.....	176
俄文摘要	178

異重流的研究和应用

水利水电科学研究院河渠研究所

提 要

本报告叙述有关異重流的实验、理論分析与实测資料分析的研究成果，内容包括四个部分：

(1) 異重流水力学基础。通过理論分析与实验，討論了異重流的发生条件，異重流运动的不同流态，局部損失，孔口出流，以及极限粒徑等方面的問題。

(2) 水庫中異重流的分析。結合水槽实验成果，分析水庫中異重流的发生和运行的情况，討論了異重流持續的条件，以及影响異重流可能流到坝址的各种因素，以估算在一定的进庫洪峰条件和一定水庫地形条件之下的出庫沙量，同时，推算水庫中淤积数量的分布情况，作为规划設計时估算水庫寿命、安排管理工作，以及利用異重流排除泥沙时的参考。

(3) 異重流在泥沙池及冷却池中的应用。根据異重流运动的特性，討論泥沙池和热电站中冷却池的某些設計原則。

(4) 河道引水渠以及沿海引水渠与海港內的異重流。在河道引水渠內以及类似条件下，由于河道渾水的潛入而造成異重流成层的淤积，因而引起引水上的困难。通过試驗，提出淤积量的粗估方法，并对于沿海引水渠及海港內的泥沙运动，进行初步的分析。

本工作除了实验室的工作以外，还引用了官厅水庫水文实验站的多年累积的異重流实测資料，以及江苏省水利厅等单位的实测資料。

本工作参加者，有本所 范家驊、玉华丰、黃寅、吳德一、沈受百等同志。

緒 論

随着我国水利水电建設事业的飞跃发展，异重流的研究已日益具有重要的意义。异重流在水利工程及其有关方面的領域內，是經常会碰到的現象。例如：水庫、沉沙池、冷却池、河流及沿海的引水渠、河口港湾等处，都存在不同形式的上层、中层或下层异重流。异重流带来的泥沙，会造成水庫中細粒泥沙的普遍淤积，但是同样可以利用异重流来排除泥沙；又如异重流对于火电厂中的冷却池，却造成有利于冷却的条件。因此，研究异重流的性质，使它为我国社会主义建設事业服务，不仅具有理論价值，同时更具有重要的实际应用的意義。

异重流是二种比重相差不大的液体，由于比重的差异而发生的相对运动。比重的差别可以是由于含沙量的不同造成，也可以由于含盐量或温度的不同所造成。重液体在輕液体的下部运动，叫做下层异重流或底部异重流，輕液体则在重液体的上部运动，叫做上层异重流；如果在上下两层不同密度的中間运动的，叫做中层异重流。在水工方面，出現較多而影响也較广的是底部异重流。

有关异重流的問題，可以分下列的几个方面說明：

(1) 異重流的形成

要研究异重流的运动，首先要了解异重流在什么条件下产生。在这方面，寶格諾阿^[1]曾建議过以 $(\gamma' - 1)q$ 作为渾水潛入的判別数，式中 γ' 为渾水的重率， q 为单寬流量。列維^[2]也分析过产生异重流的最小极限含沙量問題。

(2) 異重流的运动

异重流的运动有不恒定与恒定以及不均流与均流之分；另一方面，則有射流与緩流的区别。有关在层流和紊流范围的把异重流看作是均匀流动的阻力系数的試驗，以往有許多学者进行过研究，如：果諾^[3]、巴塔^[4]、布朗雪^[5]、米助^[6]、列維^[2]等人。异重流交界面的稳定的問題，也属于异重流运动的范疇內。柯力

根^[7]曾分析和試驗有关异重流交界面稳定的問題。

(3) 異重流的局部能量損失

除了沿程能量損失以外，异重流还有局部能量損失。例如：异重流通过弯道的能量損失，寬度扩大或收縮的損失，以及两异重流相会或分流的局部損失等等，都应该加以研究。

在这方面，可以提出的是易家琛的异重流水跃的研究^[8]。

(4) 異重流的孔口出流

异重流通过孔口时出流濃度的变化規律的研究，对于估計排泄异重流或者避免异重流的排出方面，极为重要。

加利埃在水槽中进行过盐水自孔口排出时的“极限吸出高度”的試驗^[9]。这个問題，克拉亚进行过理論的分析^[10]。

此外，必須提到的是有关异重流的实地測量，已在不少水庫中进行过；一般情况，請參閱参考文献^[11]。我国官厅水庫自1953年以来，每年进行异重流的观测，并刊出了报告^[12]。

我所在1956年开始进行异重流的实验研究和实测資料的分析工作。工作內容包括了上面所述的四个方面，即异重流的发生、运动、局部損失和孔口出流。但对异重流的交界面的稳定問題則尚未进行研究。这些工作的主要部分，将分別地予以討論。

为了叙述的方便起見，在第一部分中首先討論有关异重流运动的問題，然后討論异重流的发生，局部損失和孔口出流。最后討論异重流挟帶的細粒泥沙的沉淀性質。在第二部分中主要討論官厅水庫中的异重流。从异重流的現象的分析中，提出了异重流的計算方法，以估計在一定水庫地形条件和进庫洪峯的条件下，利用异重流可能排出水庫的泥沙数量。在第三部分中将初步地討論异重流在沉沙池和冷却池中运动的情况。作为設計中考虑异重流运动时的参考。第四部分分別討論河道分水渠內由于异重流运动和它所造成的淤积，以及有潮区(沿海引水渠和海港)內有关异重流运动的一些情况。

为了避免叙述的繁瑣，有关試驗設備及試驗情况，都放在附录中分別叙述。在本文中仅在必要时作扼要的說明。

一 異重流水力學基礎

(一) 異重流的基本方程

1. 異重流中的壓力

觀察靜止的兩種不同密度的液體的壓力分布 (圖1-1)，設上層較輕液體重率為 γ ，下層較重的重率為 γ' ，如上下兩種液體的密度都是均勻的話，則在重液體中的壓力 p 為

$$p = p_0 - \gamma' y. \quad (1-1)$$

式中 p_0 ——底部即 $y=0$ 處的壓力；

y ——底部以上的高度。

從靜壓力平衡的條件可知，靜止的兩種不同密度的交界面必然保持水平。

壓力 p 包括兩部分壓力，一部分是輕液體的壓力，另一部分是重液體的壓力。

壓力 p 值還可以這樣來理解，一部分是僅由輕液體引

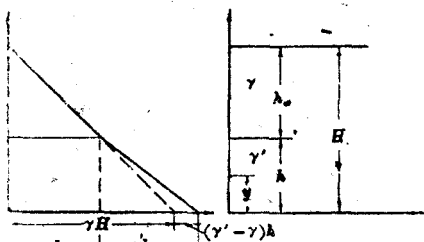


圖 1-1. 壓力分布圖

起的壓力，另一部分 (由於某個深度範圍內是重液體) 因輕重液體的重率差而引起的附加壓力，其表達式分別為

$$p = \gamma h_w + \gamma' (h - y) \quad (1-2)$$

$$\text{和} \quad p = \gamma (H - y) + (\gamma' - \gamma) (h - y) \quad (1-3)$$

在底部處的壓力為

$$p_0 = \gamma h_w + \gamma' h = \gamma H + (\gamma' - \gamma) h = \gamma H + \Delta \gamma h \quad (1-4)$$

一般地說，可以寫成：

$$p = p_* + \Delta p.$$

式中 p_* ——輕液體的壓力；

Δp ——附加壓力。

水力学中计算液体中的压力时，一般不计大气的压力。根据上述附加压力的看法，则在空气中的液体内的任一点压力，除受有大气压力外，还有因液体的重率不同于空气重率所引起的附加压力，所以有

$$p = p_a + (\gamma - \gamma_a)(H - y), \quad (1-5)$$

$$p_0 = p_a + (\gamma - \gamma_a)H \quad (1-6)$$

式中 p_a ——大气压力；

γ_a ——空气的重率；

H ——液体的深度；

y ——自底部量起的距离。

把公式(1-5)、(1-6)同公式(1-4)、(1-3)比较，则可以看出，在水力学中所计算的液体压力，只是后一部分的所谓附加压力的部分，因为忽略大气压力及 $\gamma_a H$ ，故得

$$p = \gamma(H - y) \quad \text{和} \quad p_0 = \gamma H.$$

如果把轻液体也看作是沒有重量的話，可对整个轻重液体施以与重力加速度 g 相反的加速度 $-g$ ，即可看出轻重液体相对运动的受力特性，此时轻液体的重率为 $\rho g + \rho(-g) = 0$ ，重液体对轻液体的相对重率为 $\rho'g' = \rho'g - \rho g$ ，得

$$g' = \frac{\Delta\rho}{\rho'}g,$$

g' 的物理意义是：在不计轻液体的重力条件下，重液体在轻液体中运动所承受的相对加速度。反过来看，对于轻液体而言，也可以看作是具有相反方向的相对加速度。

这就不难理解，較重的液体总是往低处流动，而流动的速度在其他条件相同时，与轻重液体的重率差的开方成比例。

在异重流运动时，我們认为压力分布仍保持靜压的分布；异重流的压力同非异重流的压力之間的差别，就是前者多一項由于密度差而引起的附加压力。

在本报告中，考虑到异重流运动时交界面上下液体的密度分

布，基本上是均匀的，所以可利用上述两种不同密度的液体均属均质的假定。

如果密度不是均质的话，则在重液体中有 $dp = \gamma' dy$ ，因此有

$$p = p_0 - \int_0^y \gamma' dy. \quad (1-7)$$

2. 异重流的运动方程

在异重流中取出长度为 ds 的流管，其断面面积为 dA ，不计阻力，则得欧拉方程(图1-2)

$$\frac{1}{\rho'} \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{\partial y}{\partial s} + \frac{\partial \left(\frac{v^2}{2} \right)}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} = 0. \quad (1-8)$$

式中 p ——异重流中一点的压力， $p = p_* + \Delta p_0$ ， ρ' 为异重流的密度。

因此有

$$\left(\frac{p}{\rho'} + gy + \frac{v^2}{2} \right)_2 = \int_1^2 \frac{\partial v}{\partial t} ds, \quad (1-9)$$

对于恒定流，有伯努利方程：

$$\begin{aligned} & \left(\frac{p_1}{\rho'} + gy_1 + \frac{v_1^2}{2} \right) \\ &= \left(\frac{p_2}{\rho'} + gy_2 + \frac{v_2^2}{2} \right) \end{aligned} \quad (1-10)$$

自图1-3， $p + \gamma' y = \gamma H + \Delta \gamma h + \gamma' y_0$ ，如以底 p 为基准面，即不计 y_0 ，如 $H_1 = H_2$ ，则

$$\frac{\Delta \gamma}{\gamma'} h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{\Delta \gamma}{\gamma'} h_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

或

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2 \frac{\Delta \gamma}{\gamma'} g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2 \frac{\Delta \gamma}{\gamma'} g} \quad (1-11)$$

如考虑流管管壁的剪力 τ ，则可得

$$\frac{1}{\rho'} \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{\partial y}{\partial s} - \frac{1}{\rho'} \frac{\partial \tau}{\partial n} + \frac{\partial \left(\frac{v^2}{2} \right)}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} = 0, \quad (1-12)$$

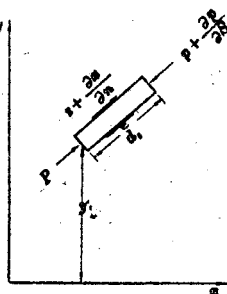


图 1-2 异重流流綫段 ds 作用力示意图

或写成

$$\left(\frac{p_1}{\gamma'} + y_1 + \frac{v_1^2}{2g}\right) - \left(\frac{p_2}{\gamma'} + y_2 + \frac{v_2^2}{2g}\right) = h_f + \frac{1}{g} \int_1^2 \frac{\partial v}{\partial t} ds. \quad (1-13)$$

式中 $h_f = \frac{1}{\gamma'} \int_1^2 \frac{\partial \tau}{\partial n} ds$; $p_1 = p_* + \Delta p_1$; $p_2 = p_* + \Delta p_2$.

对于在流线的法线方向的平衡, 亦可用同样方法, 写出它的平衡关系。

3. 异重流的动量方程

在计算异重流局部阻力损失问题时, 往往要应用动量方程。在讨论中常忽略边界的阻力, 或者在某种条件下不考虑异重流重力的分力, 最简单的情況是讨论两断面 A_1 和 A_2 之间的均质异重流, 其动量方程为

$$p_1 A_1 - p_2 A_2 = \frac{\gamma' Q v_2}{g} - \frac{\gamma' Q v_1}{g} \quad (1-14)$$

式中 p_1, p_2 ——一点的压力;

A_1, A_2 ——断面总面积;

$p_1 A_1, p_2 A_2$ ——分别为断面 A_1 和 A_2 上的总压力。

因此, 对于二元问题, 有

$$p_1 H_1 - p_2 H_2 = \frac{\gamma' q v_2}{g} - \frac{\gamma' q v_1}{g}, \quad (1-15)$$

而

$$pH = \frac{\gamma H^2}{2} + \frac{\Delta \gamma h^2}{2}.$$

所以 $\frac{\gamma}{\gamma'} \frac{(H_1^2 - H_2^2)}{2} + \frac{\Delta \gamma}{\gamma'} \frac{(h_1^2 - h_2^2)}{2} = \frac{q}{g} (v_2 - v_1)$

設 $H_1 = H_2$, 則 $\frac{\Delta \gamma}{\gamma'} \frac{h_1^2}{2} + \frac{q v_1}{g} = \frac{\Delta \gamma}{\gamma'} \frac{h_2^2}{2} + \frac{q v_2}{g}$

或 $\frac{\Delta \gamma}{\gamma'} \frac{h_1^2}{2} + \frac{q^2}{g h_1} = \frac{\Delta \gamma}{\gamma'} \frac{h_2^2}{2} + \frac{q^2}{g h_2} \quad (1-16)$

或 $\frac{h_1^2}{2} + \frac{q^2}{\Delta \gamma g h_1} = \frac{h_2^2}{2} + \frac{q^2}{\Delta \gamma g h_2}$

4. 異重流的連續方程

在不恒定情況下，對於均質而無沉淀現象的異重流，有流量的連續方程式：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0, \quad (1-17)$$

考慮到異重流的密度 ρ' ，則用質量的連續方程：

$$\frac{\partial \rho' A}{\partial t} + \frac{\partial \rho' Q}{\partial s} = 0. \quad (1-18)$$

在天然情況下， ρ' 并不是常數，因而

$$A \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho' \frac{\partial A}{\partial t} + Q \frac{\partial \rho'}{\partial s} + \rho' \frac{\partial Q}{\partial s} = 0.$$

對於異重流的恆定流動， $\frac{\partial \rho'}{\partial t} = 0$ ， $\frac{\partial A}{\partial t} = 0$ ，則有 $\frac{\partial \rho' Q}{\partial s} = 0$ ，

$\rho' Q = \text{常數}$

$$\text{或} \quad \rho' \frac{\partial Q}{\partial s} + Q \frac{\partial \rho'}{\partial s} = 0. \quad (1-19)$$

如沿程 ρ' 不改變，則為

$$\frac{\partial Q}{\partial s} = 0. \quad (1-20)$$

對於泥水異重流，在異重流的流速改變後，一部分泥沙下沉，因而不能保持上述輸沙的連續的關係。

(二) 異重流的運動

天然異重流的運動，多是不恆定流，例如水庫中潛入底部運動的泥水異重流，隨著進庫的洪峯的落漲，各斷面上的異重流的厚度也彼此起伏。但由於沿程的槽蓄作用和阻力的作用，異重流在經過一定距離後，會慢慢地接近於恆定狀態。又如熱電站向水庫中排除熱水，會形成的上層異重流，它隨熱水排除流量的改變以及溫度的差別，也有不恆定的性質。

異重流在恆定流時，同明渠水流一樣，又可分均勻流動和不