

沉沙渠及排沙廊道的泥沙计算方法

——兼论长征渠沉沙渠及排沙廊道的尺寸选择

成都科技大学水利系 张启模

一 前 言

在多沙河流上修建低坝或无坝取水枢纽时，防止泥沙进入渠道是十分重要的。由于渠道流速低于河道流速，挟沙能力低，泥沙的淤积，会影响渠道的过流能力。

若排除进水闸后的泥沙采用沉沙池，但造价高，结构复杂。近年来国内外有采用在沉沙渠段后接排沙廊道或排沙闸，如陕西宝鸡峡引渭枢纽工程渠首，设有长216米，宽14米，深10米的沉沙槽，后接冲刷闸（排沙闸）和渠道^[1]，涪惠渠进水闸后设1600米的沉沙渠再接排沙闸和渠道，对排除底沙和悬沙有显著作用。印度的沙达·山纳亚克引水工程^[2]，在进水闸后设300米长的沉沙渠，再接6孔排沙廊道。四川省长征渠进水口设计中，曾考虑在进水闸后设置600米长的沉沙渠和排沙廊道来排除底沙和粗颗粒悬沙。

利用沉沙渠和排沙廊道的排沙过程示于图1。挟沙水流经过沉沙渠，使悬沙中一部分粗粒泥沙沉落渠底变为底沙，然后利用设在沉沙渠底部螺旋槽的螺旋流把泥沙排到下游河道；或者定期冲沙由廊道排除。利用悬沙

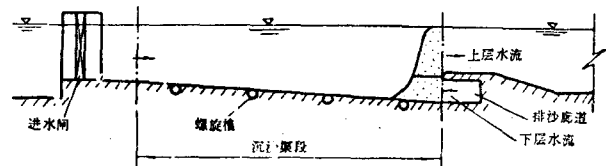


图1

含沙量沿垂线分布的不均匀性，将下层水流中含沙量多、粒径粗的部份水流由排沙廊道排向下游河道，让上层含沙量少泥沙颗粒细的水流进入渠道。由计算表明（见后），设置沉沙渠和排沙廊道后，对排除粗粒径泥沙，减少渠道的含沙量确有作用。

沉沙渠及排沙廊道泥沙计算，主要确定：①沉沙渠出口的泥沙含量和颗粒级配；②分别确定进入廊道和渠道的含沙量和颗粒级配；③核算渠道和廊道的输沙能力；④沉落于沉沙渠底沙排除等。本文仅研究①，②两个问题。

二、沉沙渠泥沙计算原理

根据沉沙渠内含沙量沿程变化，可以导出泥沙量平衡方程式。对于二维稳定非均匀流，均匀沙的平均含沙量沿程变化，如图2沉沙渠纵剖面所示。取微分段 dx ，进口断面含沙量

为 S ，单宽的输沙量为 $S \cdot q$ ，出口断面含沙量为 $(S + ds)q$ ，当研究沉落问题时， ds 应为负值。另一方面含沙量 S 超过挟沙能力 ρ 的那一部份 $(S - \rho)$ 将沉下来，由于泥沙铅直线分布不均匀等因素，沉下来的比理论值略小，故为 $a(S - \rho)$ 。均匀沙的沉降速度为 ω ，单宽下沉流量为 $\omega \cdot dx \cdot 1$ ，则单宽下沉沙量为 $\omega \cdot dx \cdot 1 \cdot a(S - \rho)$ 。由泥沙量平衡和下沉量的关系，可以简单的得出下列方程：

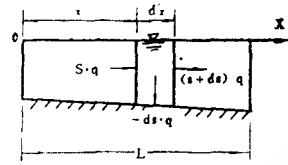


图 2

$$-q \cdot ds = \omega dx \cdot a(S - \rho)$$

则
$$\frac{ds}{dx} = -\frac{\omega}{q} a(S - \rho) \quad (1)$$

为了积分，将一阶线性方程(1)两端同时减去 $\frac{d\rho}{dx}$ ，得

$$\frac{d(S - \rho)}{dx} = -\frac{a\omega}{q}(S - \rho) - \frac{d\rho}{dx}$$

移项得
$$\frac{d(S - \rho)}{dx} + \frac{a\omega}{q}(S - \rho) = -\frac{d\rho}{dx} \quad (2)$$

因为它有积分因子 $e^{\frac{a\omega}{q}x} = e^{\frac{a\omega}{q}x}$ 则(2)式两端乘以 $e^{\frac{a\omega}{q}x}$ 得：

$$e^{\frac{a\omega}{q}x} \left[\frac{d(S - \rho)}{dx} + \frac{a\omega}{q}(S - \rho) \right] = -e^{\frac{a\omega}{q}x} \frac{d\rho}{dx}$$

即
$$\frac{d}{dx} \left[e^{\frac{a\omega}{q}x} (S - \rho) \right] = -e^{\frac{a\omega}{q}x} \frac{d\rho}{dx}$$

两端就 x 从0到 L 积分得：

$$\left[e^{\frac{a\omega}{q}x} (S - \rho) \right]_0^L = - \int_0^L e^{\frac{a\omega}{q}x} \frac{d\rho}{dx} dx$$

注意， $x = 0$ 时， $S = S_0$ ， $\rho = \rho_0$ ； $x = L$ 时， $S = S$ ， $\rho = \rho$

则：
$$e^{\frac{a\omega}{q}L} (S - \rho) - e^0 (S_0 - \rho_0) = - \int_0^L e^{\frac{a\omega}{q}x} \frac{d\rho}{dx} dx$$

将 $e^0(S_0 - \rho_0)$ 移到右端，并对两端同除以 $e^{\frac{a\omega}{q}L}$ 得：

$$S - \rho = (S_0 - \rho_0) e^{-\frac{a\omega}{q}L} - e^{-\frac{a\omega}{q}L} \int_0^L e^{\frac{a\omega}{q}x} \frac{d\rho}{dx} dx \quad (3)$$

现在研究的是二维渐变不均匀流，单位长度上挟沙能力的平均变化相等，得

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{\rho - \rho_0}{L} = -\frac{\rho_0 - \rho}{L}$$

代入(3)式中，取其最后一项来分析：

$$-e^{-\frac{a\omega}{q}L} - \left(\frac{\rho_0 - \rho}{L} \right) \int_0^L e^{\frac{a\omega}{q}x} dx = e^{-\frac{a\omega}{q}L} \frac{\rho_0 - \rho}{L} \left[\frac{e^{\frac{a\omega}{q}x}}{\frac{a\omega}{q}} \right]_0^L$$

$$\begin{aligned}
 &= e^{-\frac{a\omega}{q}L} \frac{\rho_0 - \rho}{L} \left[\frac{e^{\frac{a\omega}{q}L}}{\frac{a\omega}{q}} - \frac{e^0}{\frac{a\omega}{q}} \right] \\
 &= \frac{\rho_0 - \rho}{L} \cdot \frac{q}{a\omega} \left[e^{\frac{a\omega}{q}L} \cdot e^{-\frac{a\omega}{q}L} - e^{-\frac{a\omega}{q}L} \right] \\
 &= (\rho_0 - \rho) \frac{q}{a\omega L} \left[1 - e^{-\frac{a\omega}{q}L} \right]
 \end{aligned}$$

将该项代回 (3) 式并令 $\frac{q}{\omega} = l$ 则得,

$$S = \rho + (S_0 - \rho_0) e^{-\frac{aL}{l}} + (\rho_0 - \rho) \frac{l}{aL} (1 - e^{-\frac{aL}{l}}) \quad (4)$$

公式 (4) 描述了二维稳定非均匀水流不平衡输沙时含沙量沿程变化的规律。出口断面的含沙量, 由三部份组成, ①出口断面的挟沙能力 ρ , ②进口断面剩余含沙量 $(S_0 - \rho)$ 经过渠长衰减后, 剩下的部份 $(S_0 - \rho_0) e^{-\frac{aL}{l}}$, ③由于水力因素变化, 引起沉沙渠段挟沙能力变化的修正值 $(\rho_0 - \rho) \frac{l}{aL} (1 - e^{-\frac{aL}{l}})$ 。

河道泥沙都是不均匀的, 对于不均匀沙含沙量沿程变化, 我们设想把不均匀沙按粒径分为 n 组, 分别求出每组的平均沉速 ω_i 和平均重量百分比 P_i , 则每组粒径变为均匀化的粒径, 就可以用 (4) 式求沉沙渠出口断面的含沙量, 这里 $l_i = q/\omega_i$, 任一组泥沙计算, 由 (4) 式改写的下式计算:

$$S_i = \rho_i + (S_{0i} - \rho_{0i}) e^{-\frac{aL}{l_i}} + (\rho_{0i} - \rho_i) \frac{l_i}{aL} (1 - e^{-\frac{aL}{l_i}})$$

总的含沙量等于各组含沙量的总和即:

$S = \sum S_i$, $\rho = \sum \rho_i$, S 和 ρ 表示出口断面含沙量和挟沙能力总和。

$$\sum S_{0i} = S_0 P_{01} + S_0 P_{02} + \dots + S_0 P_{0n} = S_0 \sum_{i=1}^n P_{0i}$$

同理 $\sum \rho_{0i} = \rho_0 \sum_{i=1}^n P_{0i}$, 则上式改写为:

$$S = \rho + (S_0 - \rho_0) \sum_{i=1}^n P_{0i} e^{-\frac{aL}{l_i}} + \rho_0 \sum_{i=1}^n P_{0i} \frac{l_i}{aL} (1 - e^{-\frac{aL}{l_i}})$$

$$-\rho \sum_{i=1}^n P_i \frac{l_i}{aL} (1 - e^{-\frac{aL}{l_i}}) \quad (5)$$

利用(5)式来求沉沙渠出口断面的含沙量时,仅仅知道沉沙渠的水力因素,进口断面含沙量 S_0 和泥沙粒径级配 P_{0i} 是不够的,必须补充一组出口断面悬沙级配 P_i 变化的方程式,公式如下(3),

$$P_i = P_{0i} \frac{(1-\lambda) \frac{\omega_i}{\omega_\varphi}}{1-\lambda} \quad (6)$$

式中: $\lambda = \frac{S_0 - S}{S_0}$, ω_i ——每组泥沙粒径的沉速, ω_φ ——沉沙渠输沙率由进口减到出口

时,悬沙淤积的有效沉速,为了确定 ω_φ 可按 $\sum_{i=1}^n P_i = 1$ 的条件,即是假定 ω_φ 计算出断面各组泥沙的重量百分比之和为1时,假定 ω_φ 值就是所求 ω_φ 值。

利用(5), (6)方程联解,可求得沉沙渠出口断面含沙量 S 和颗粒级配 P_i 。由于因素复杂,必须采用试算方法,其步骤如下:

(一) 先假定沉沙渠出口断面平均含沙量 S 值;

(二) 计算系数 λ 值,求进口断面各组泥沙平均沉速 ω_0 和挟沙能力 ρ_0 ;

(三) 由(6)式计算出出口断面泥沙粒径级配 P_i ,并求平均沉速 ω 和挟沙能力 ρ ;

(四) 由(5)式计算出出口断面含沙量 S 值,如果计算出的 S 值与原假定的 S 值相等,说明假定的 S 值就是出口断面的含沙量,否则重新假定 S 值进行重复计算。

经过上面计算步骤,可求得:出口断面的含沙量和泥沙级配 P_i ;沉沙渠中沉落底沙量和泥沙级配。

三、计算进入排沙廊道和渠道的含沙量的方法

(一) 确定排沙廊道和渠道进口断面(即是沉沙渠出口断面)悬沙在垂线上分布规律:利用悬沙运动的紊流扩散理论,可求得悬沙在垂线上分布规律,其理论公式如下(4):

$$\frac{S_y}{S_a} = \left(\frac{h-y}{y} \cdot \frac{a}{h-a} \right)^z \quad (7)$$

$$z = \frac{\omega}{K\sqrt{ghJ}} \quad (8)$$

式中: S_y 是垂线上离河床 y 处的含沙量。 S_a 是离河床已知点 a 处的含沙量, h 是水深, ω 是泥沙的沉速, K 是卡门常数取0.4, J 是水力坡降。为了应用方便,选定 $a = 0.05h$, 设 $y/h = M$, 则 $y = M \cdot h$, 令 $h = 1$ 时,代入(7)式得:

$$\frac{S_y}{S_a} = \left[\frac{(1-y) \cdot 0.05}{0.95y} \right]^z \quad (9)$$

按分组泥沙的沉速 ω 值代入(8)式,计算各组泥沙的Z值,以 y/h 作纵轴, S_y/S_a 为横轴,将Z代入(9)式可求出各组粒径含沙量在垂线上的分布规律曲线,令每一条曲线在河底处的相对含沙量是 $S_y/S_a = 1$ 。为了说明计算方法,以长征渠的沉沙渠第六方案(见表2)出口断面六组泥沙分布曲线来说明,如图3。

(二) 确定分层水流界线

可以根据廊道进口高度 h_3 来确定, h_3 可按在进口处进入渠道和廊道的流速相等来决定,进入廊道的流量为 Q_2 ,进入渠道流量为 Q_3 ,出口断面水深为 h_2 ,则 h_3 由下式计算,

$$h_3 = \frac{h_2 Q_2}{Q_2 + Q_3} \quad (10)$$

长征渠第6方案排沙廊道的高度按(10)式计算。 $h_3 = (10 \times 90) / (90 + 250) = 2.65$ 米, $y/h = 2.65/10 = 0.265$,如图3,在 $y/h = 0.265$ 以下水流进入廊道,上部水流进入渠道。

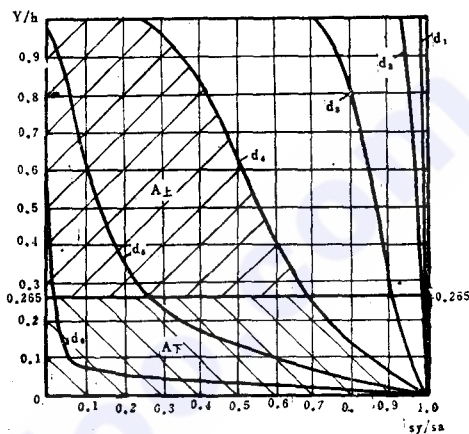


图3

(三) 计算进入廊道和渠道的悬沙量

根据各组泥沙的平均含沙量和它的垂线分布曲线来计算,以第六方案第四组泥沙为例,其相对含沙量在垂线分布曲线如图3中的 d_4 ,进入廊道水流层厚度系数 $\eta_2 = h_3/h_2$

$$= 2.65/10 = 0.265, \text{ 进入渠道水流层厚度系数 } \eta_1 = \frac{h_2 - h_3}{h_2} = \frac{10 - 2.65}{10} = 0.735,$$

$$\text{上层水流平均相对含沙量 } S_1' = \frac{A_{\text{上}}}{\eta_1} = \frac{0.3638}{0.735} = 0.5013,$$

$$\text{下层水流平均相对含沙量 } S_2' = \frac{A_{\text{下}}}{\eta_2} = \frac{0.2187}{0.265} = 0.8252,$$

$A_{\text{上}}, A_{\text{下}}$ ——分别为该组泥沙曲线,在分界线上面和下面与座标轴形成的面积。

$$\text{该组泥沙总的平均相对含沙量 } S_i' = \frac{A_{\text{上}} + A_{\text{下}}}{\eta_1 + \eta_2} = 0.5825$$

$$\text{上层水流含沙量, } S_{\text{上}} = S_i \frac{S_1'}{S_i'} = 2.0397 \frac{0.5013}{0.5825} = 1.755 \text{ 公斤/米}^3,$$

$$\text{下层水流含沙量, } S_{\text{下}} = S_i \frac{S_2'}{S_i'} = 2.0393 \frac{0.8252}{0.5825} = 2.8905 \text{ 公斤/米}^3.$$

S_i ——该组泥沙在廊道和渠道进口断面的含沙量。

上层水流总的含沙量,是各组泥沙含沙量的总和,见表2,得 $S_1 = 5.34$ 公斤/米³,下层水流总的含沙量为 $S_2 = 8.31$ 公斤/米³。

四、程序简介

沉沙渠及排沙廊道的泥沙计算,必须采用试算。若布置方案多,计算工作量更大,宜于编制电算程序(计算公式如前所述),使用ALGOL语言,在TQ-16机上计算,每个

方案电算约3分钟。输出主要结果有①沉沙渠出口断面的含沙量和各组泥沙级配；②廊道和渠道进口断面各组泥沙的垂线分布曲线及廊道和渠道分界线上面和下面的面积 $A_{上}$ 、 $A_{下}$ ；③进入廊道和渠道的含沙量及各组泥沙含沙量和沉速（程序和输入输出数据略）。

五、长征渠沉沙渠及排沙廊道尺寸选择

（一）计算资料及要求

长征渠位于四川省青衣江，是低闸引水灌溉工程^[5]。设计中在进水口前设有冲沙闸，进水闸后设置一段沉沙渠，渠底设螺旋槽，沉沙渠末端设三孔排沙廊道。进水闸引用流量 $340 \text{米}^3/\text{秒}$ ，其中渠道引用流量 $250 \text{米}^3/\text{秒}$ ，廊道排沙流量 $90 \text{米}^3/\text{秒}$ ，进入进水闸悬沙含沙量为 $8 \text{公斤}/\text{米}^3$ ，各分组泥沙资料如表1。

表1 长征渠进水闸各组泥沙资料

泥 沙 分 组	1	2	3	4	5	6
粒径范围 d_i (毫米)	<0.007	$0.007 \sim 0.025$	$0.025 \sim 0.05$	$0.05 \sim 0.1$	$0.1 \sim 0.2$	$0.2 \sim 2$
平均沉速 $\bar{\omega}_i$ (厘米/秒)	0.0034	0.0198	0.1014	0.4028	1.357	7.732
平均粒径 \bar{d}_i (毫米)	0.007	0.015	0.038	0.08	0.14	0.76
泥沙级配 P_{oi} (%)	10.3	16.3	16	29.1	12.3	16
含沙量 S_i (公斤/米 ³)	0.82	1.30	1.28	2.33	0.99	1.28

沉沙渠末端分上下层设置渠道进水口和排沙廊道，廊道进口高度，取该断面水深的26.5%。渠道进水口后面接渠道，渠道断面为梯形，底宽15.8米，边坡1:1.5，水深7米，底坡1/8000，糙率0.0225，流速1.363米/秒。

要求通过泥沙计算，确定合理的沉沙渠及排沙廊道的尺寸。

（二）方案选择

根据地形、水文条件，沉沙渠为矩形条石衬砌。渠宽35米，长度不得大于1600米，水深不超过12米。共拟定7个方案，电算结果见表2。并作渠长、渠深与含沙量的关系曲线如图4、图5。

1. 沉沙渠长度选择：随沉沙渠长度增加，出口断面含沙量 S 、平均粒径 d 、粗粒径含量 P 都减小（图4所示）。但是，当长度大于600米后，其减小的梯度缓慢，如果长度短于300米，沉沙渠作用较小，进入渠道的含沙量 S_1 大于渠道的挟沙能力 ρ_1 （见方案1、2）。则渠道发生淤积，所以沉沙渠长度选定600米较好。

2. 沉沙渠深度选择：由图5看，当流速大于1.2米/秒时，渠道含沙量和粗粒含量增加梯度要快些，当流速小于0.9米/秒时，排沙较好，但增加工程量。我们认为只要能满足渠道的输沙要求，并考虑在沉沙渠内预留泥沙淤积厚度，则选择沉沙渠内平均流速在0.9~1.0米/

表2 沉沙渠及排沙廊道泥沙电算成果

方 案	渠 长	沉 沙 渠			廊 道 进 口 高	沉 沙 渠 断 面				进 入 廊 道 泥 沙				进 入 渠 道 泥 沙				
		进 口 水 深	出 口 水 深	平 均 流 速		含 沙 量	沉 速	平 均 粒 径	粗 粒 含 量	含 沙 量	平 均 沉 速	平 均 粒 径	粗 粒 含 量	含 沙 量	平 均 沉 速	平 均 粒 径	粗 粒 含 量	挟 沙 能 力
	L	h ₁	h ₂	v	h ₃	S	ω	d	P	S ₂	ω ₂	d ₂	P ₂	S ₁	ω ₁	d ₁	P ₁	ρ ₁
	米	米	米	米/秒	米	公斤/米 ³	厘米/秒	毫米	%	公斤/米 ³	厘米/秒	毫米	%	公斤/米 ³	厘米/秒	毫米	%	公斤/米 ³
1	100	6	7	1.495	1.85	7.41	1.18	0.15	23.2	11.42	2.44	0.25	43.5	5.97	0.305	0.0739	7.1	5.19
2	300	6	7	1.495	1.85	6.78	0.78	0.12	17.8	9.48	1.61	0.18	32.2	5.81	0.285	0.0718	6.8	5.75
3	600	6	7	1.495	1.85	6.27	0.49	0.095	13.3	8.11	0.92	0.13	23.9	5.61	0.265	0.07	7.57	6.42
4	1200	6	7	1.495	1.85	5.76	0.31	0.075	9.2	7.03	0.47	0.097	16.0	5.31	0.237	0.0655	5.91	6.76
5	600	7.5	8.5	1.214	2.25	6.17	0.44	0.09	12.3	8.15	0.81	0.12	23.0	5.46	0.248	0.0676	6.49	7.09
6	600	9	10	1.023	2.65	6.13	0.43	0.089	11.9	8.31	0.76	0.115	23.1	5.34	0.236	0.0666	5.68	7.63
7	600	10.5	11.5	0.883	3.05	6.11	0.42	0.088	11.7	8.51	0.74	0.11	23.3	5.23	0.225	0.0655	5.00	8.2

注：①沉沙渠进口断面泥沙平均沉速 $\omega_0 = 1.54$ 厘米/秒，平均粒径 $d_0 = 0.178$ 毫米，挟沙能力 $\rho_0 = 1.016$ 公斤/米³。
 ②粗粒含量是指大于0.1毫米的泥沙含量占总沙量的百分数，沉沙渠进口断面为28.3%。

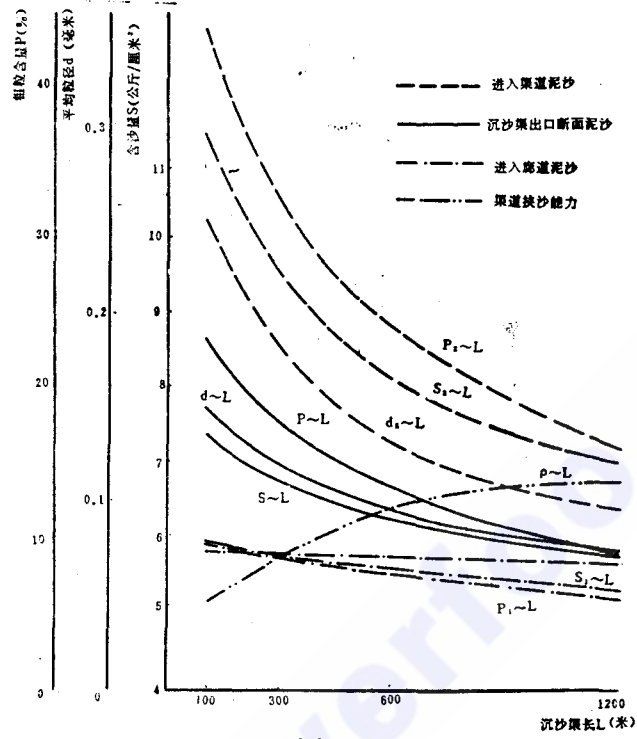


图 4

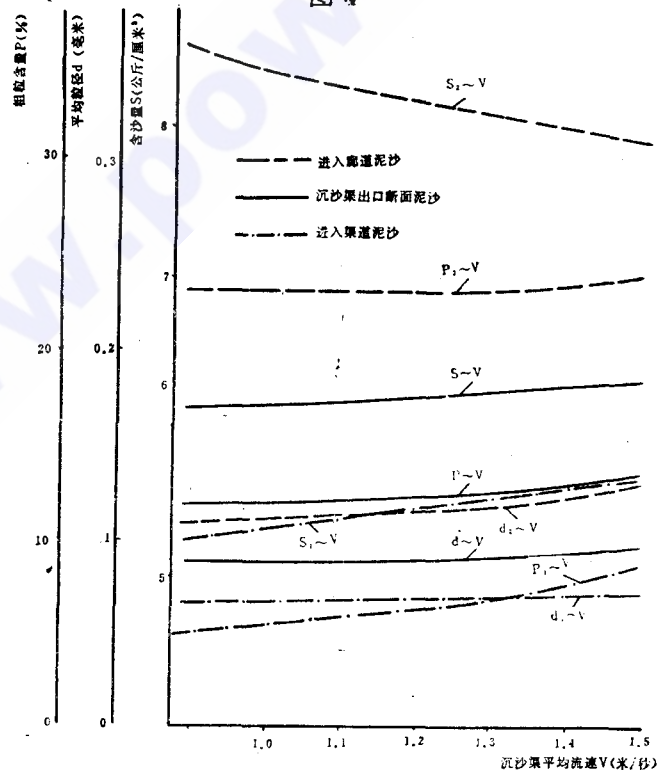


图 5

秒的第6方案较好,沉沙渠进口水深9米,出口水深10米,长度600米。

3. 选定方案计算结果分析见表2:沉沙渠进口断面悬沙含量为8公斤/米³,粗粒含量($d > 0.1$ 毫米)占泥沙总量的28.3%;水流经过长600米的沉沙渠后,在出口断面悬沙含量减为6.13公斤/米³,平均粒径由0.178毫米减小到0.089毫米,粗粒含量减少为11.9%,其中大于0.2毫米粒径含量由11.18%减到1.64%。由于在沉沙渠出口处设置排沙廊道,将水流中的粗粒和含沙量大的下层水流排除;进入渠道的水流,其含沙量再次减至5.34公斤/米³,小于渠道的挟沙能力7.63公斤/米³;平均粒径减小至0.066毫米、粗粒含量减至5.68%,无大于0.2毫米泥沙。所以沉沙渠和排沙廊道对减少渠道的含沙量和排除粗粒泥沙确有作用。

参 考 文 献

- [1] 陕西省宝鸡峡工程指挥部《宝鸡峡引渭灌溉工程技术总结》 1974. 3.
- [2] 成都工学院水工专业编《取水口设计中的防砂排砂问题译文》 1976. 9
- [3] 水库泥沙报告汇编《水库不平衡输沙的初步研究》长科院 1972
- [4] 沙玉清《泥沙运动学引论》
- [5] 成都工学院《四川省长征渠总干渠工程初步设计说明书》,第四篇第一章首部枢纽 1976. 9.

《四川水力发电》征订启事

《四川水力发电》是四川省水力发电工程学会主办、内部发行的综合性学术刊物。主要刊载水电规划、勘测、设计、设备制造、施工、运行、管理、教学、科研和能源政策等方面的论文、经验总结、科研成果、国内外科技动态、技术引进及新兴科学知识等,并适当选登译文和科普文章。

本刊暂订为半年刊,每期10—15万字,收费标准为:

期 数	收 费 标 准 元/每期		
	单 位	非 会 员	本 会 会 员
1982, 1—2期	0.80 (全年1.60)	0.40 (全年0.80)	0.20 (全年0.40)
1983, 1—2期	0.80 (全年1.60)	0.40 (全年0.80)	0.20 (全年0.40)

82、83年各期现均可供整订、另购。汇款时请注明所需订期数、份数与收件人详细地址(订单函索即寄)。订款请寄:四川省成都市青羊宫水电部成都勘测设计院《四川水力发电》编辑组。开户银行:成都市人行胜西办,账号:890077。

《四川水力发电》编辑组1983年7月