

## 交汇河段水力计算探讨\*

倪晋仁

王光谦

张国生

(北京大学)

(中国科学院力学研究所)

(辽宁省建设委员会)

### 提 要

本文首先对汇流河段的各种水力特性进行了综合分析,在此基础上经过系统考虑这些因素,提出了汇流河段的水力计算方法。实测资料与用本文模式计算得到的结果符合良好。采用本文的方法能够从理论上确认前人建立经验关系时所采用的多参数定性分析的合理性,并且能够用定量计算结果来补充这些定性分析的不足之处。

### 一、引 言

在一个水系中,支流入汇干流是经常可以见到的,因此对于、支流交汇问题的研究具有普遍的意义。

一般顺直单一河流,流量与水位存在着单一对应的关系,但当有支流入汇时,交汇河段上游的干流流量与水位不再呈单一对应的关系<sup>[1]</sup>,只有当考虑用反映汇流特性的参数之一——汇流比 $R_0 = Q_z / Q_f$  ( $Q_z$ 和 $Q_f$ 分别表示支流和干流的入汇流量)作为一个新的参量时才能得出由水位、流量( $Q_f$ 或 $Q_z$ )及汇流比组成的三变量的各组单一关系。本文的目的就在于说明为什么在诸多的影响变量中取干流水位、干流流量(或支流流量)及汇流比时恰能对汇流河段的水流特性进行较好的描述,并结合某些合理的假设给出上述变量之间的定量计算方法。

对上述问题解答的理论探讨实际上在1944年就已由Taylor<sup>[2]</sup>提出过。此后,McNown等<sup>[3,4]</sup>、Tgom和Apelt<sup>[5]</sup>及Webber和Greated<sup>[6]</sup>都曾分别从能量方程、动量方程及势流计算等途径对此作过探索。不足之处是因为当时缺乏系统的实验及相应的汇流河段水流特性的直观认识,而未对业已提出的问题找到解决的办法,且在考虑问题时计入的影响因素太少。继这些工作之后许多作者<sup>[7,8]</sup>进行了室内实验及野外观测的卓有成效的工作,为进一步对这些工作中有关成果进行综合和深入分析提供了可能。

对于具有强烈掺混现象及较高能量损失的复杂的汇流河段水力计算问题,采用动量方程的途径较其它方法更为合适,而能量方程的采用则因对该区域紊动掺混的复杂现象难以模拟及能量损失的方式难以搞清而不具有多大实际意义。在进行汇流河段的水力计算时,通常都归结为建立交汇段上游干流水位(或水深)与干、支流流量,干支流间的交汇角及其它相关因素的关系。根据实测资料对一些未知变量间的关系作一些较为合理的假设,是能够通过理论分析为前面提到的问题提供解答并给出能与实测资料相符的计算方法的。

\* 本文于1990年3月1日收到。

## 二、汇流河段水流基本方程

当不考虑泥沙运动时,干支流交汇河段的河底及两岸都是固定不变的.在这种情况下,矩形断面汇流河段的一个概化描述可由图1给出.图中 $B_1$ 和 $B_2$ 分别为交汇段上下游的干流河宽, $B_3$ 为支流河宽; $H_1$ 、 $H_2$ 和 $H_3$ 为对应的水深; $\theta$ 为干支流间的交汇角, $Q_m$ 和 $Q_3$ 分别代表干、支流的流量.在图1(b)中,由 $a'acbb'$ 构成的区域称为交汇段,在交汇段干支流水流剧烈掺混使上游发生壅水现象,由壅水区过渡到下游的准均匀流区还需一段调整距离,上下游水面通过交汇区的下跌水面线相衔接(见图1(a)).由交汇区水流掺混引起的水力因子变化的范围通常都会延伸到交汇区以外一些区域.

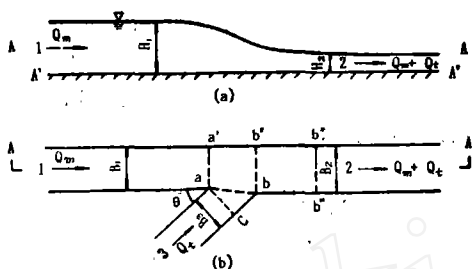


图1 汇流河段概化简图

由水力学知识知,对汇流河段水流流动这类问题应该用动量方程来探讨,而动量方程的正确建立则依赖于对汇流河段各水力因子变化规律的正确认识.为分析问题简便,我们只考虑干、支流河道底坡均近似为零的情形,干、支流的河槽形态假设为矩形,干、支流交汇的方式为支流与干流斜交.这样,在考虑各种因素的影响后就可建立沿干流向下游方向的动量方程.

取 $a'acbb'$ 为脱离体,则沿平行于 $A'A'$ 线向下游(即由1到2的方向)的合力为

$$\Sigma F_x = \frac{\gamma}{2} B_1 H_1^2 - \frac{\gamma}{2} B_2 H_2^2 + \frac{\gamma}{2} B_3 H_3^2 \cos\theta - F \quad (1)$$

式中: $\gamma$ 为水流的比重, $F$ 为 $bc$ 壁面对水流的阻力和整个 $a'acbb'$ 区域中所有边壁对水流阻力的综合作用力沿 $A'A'$ 方向的投影.同样地,我们可以给出沿 $A'A'$ 方向单位时间内汇流前后的动量改变量为

$$\Delta k = \alpha_2 \rho (Q_1 + Q_m) V_2 - \alpha_1 \rho Q_m V_1 - \alpha_3 \rho Q_3 V_3 \cos\theta, \quad (2)$$

其中, $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 和 $\alpha_3$ 为动量修正系数,一般可取为1. $V_1$ 、 $V_2$ 和 $V_3$ 分别为 $aa'$ 断面、 $bb'$ 断面和 $ac$ 断面处的平均流速.

根据动量定律可以得到:

$$\frac{\gamma}{2} B_1 H_1^2 - \frac{\gamma}{2} B_2 H_2^2 + \frac{\gamma}{2} B_3 H_3^2 \cos\theta - F = \rho (Q_m + Q_3) V_2 - \rho Q_m V_1 - \rho Q_3 V_3 \cos\theta, \quad (3)$$

注意到 $V = Q/BH$ 及 $\gamma = \rho g$ ,则式(3)可进一步化简为

$$\frac{g}{2} (B_1 H_1^2 - B_2 H_2^2 + B_3 H_3^2 \cos\theta) - F/\rho = Q_m^2 \left[ \frac{(1+R_0)^2}{B_1 H_1} - \frac{1}{B_1 H_1} - \frac{R_0^2}{B_3 H_3} \cos\theta \right]. \quad (4)$$

由式(4)可以看出,在一个方程中包含有许多未知量.其中 $\theta_m$ 、 $R_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 和 $\theta$ 是已知参量,因此,还有 $H_1$ 、 $H_2$ 和 $H_3$ 三个未知变量及综合阻力 $F$ 待定.一般地,在研究汇流问题时人们最为关注的是求得 $H_1$ ,为此面对这么一个复杂的问题必须先根据实际观测到的现象作某些假设和简化.

### 三、汇流河段各水力要素之间的关系

如果用图2来表示概化的汇流河段流场变化,则可对合图1及其它实测结果对干、支流在交汇段的相互影响及间关系作进一步的分析.

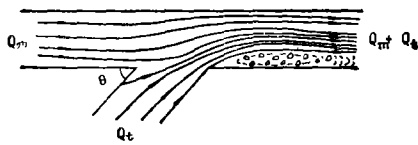


图2 交汇河段流场概观

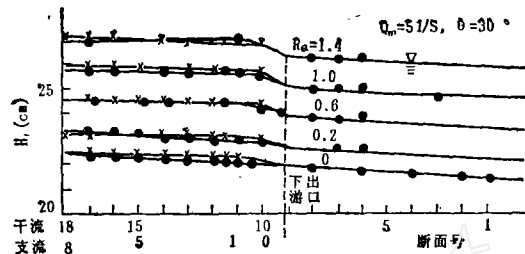


图3 干支流交汇前后水位变化

(一)干、支流交汇人口处水深 $H_1$ 和 $H_2$ 的关系 水流进入交汇段,由于干支流相互掺混和顶托使得在入口处上游形成壅水区域,从而使得上游水面线较下游水面线形成一种如图1所示的跌落.但观察表明<sup>[8]</sup>,在交汇口的上游水面基本保持平稳,而且干、支流水面同步升降.当 $Q_m$ 给定时, $H_1$ 和 $H_2$ 均随 $R_0$ 的增大而增大,水面抬升.由于支流的入汇,使得在入口处上游的干流水面出现局部的隆起现象(见图3),隆起的位置随 $R_0$ 增大而上移,在这一点上与下面将要讨论的入汇角的影响类似.在交汇段则有着另一番景观,该区域中的水面因水流的剧烈掺混而波动不定,并且使上游水面大幅度跌落.从实验结果来看,在下游出口处前后的水深明显不同,在上游干流水深在各种入汇角及汇流比情形下都相差不大,属同一量级.这就使得我们能够用下式

$$H_2 = B_1' H_1 \quad (5)$$

来近似表达二者的关系,式中 $B_1'$ 接近于1.

(二)交汇段下游水深 $H_3$ 的变化特性 由图2可以看出,在干、支流交汇以后的出口处流线将向另一侧集中,而在该侧的对面则形成一涡流区,相应地在水面形态上由于支流出口的挑流和水流在下方的折冲使得这个区域的水面成为极不规则的扭曲面<sup>[8]</sup>;这暗示着交汇前后水深由 $H_1$ 下落到 $H_3$ (见图1(a))的方式及下跌幅度与上述涡流区的特性有密切联系.从实验结果来看,入汇角 $\theta$ 虽然对上游水深影响较为明显且随着 $\theta$ 的增加上游水深也在增加、隆起部位上移(如图4),但它对下游水深的影响却不可忽略.同样地,从图3我们可以看出下游水深主要与支流与干流流量有关.另一方面,我们也应注意到,由于下游流线的束窄使得下游水深并不简单地与干、支流流量总和相关,还与造成不同流域束窄程度的干支流流量对比有关.因此,若同时考虑:(i)存在涡流区的断面流速分布颇不规则,在采用 $V$ 作为平均流速时应采用一个流速分布系数.(ii)在该区域,因干、支流的相互影响及其引起的流场变化、剧烈的掺混和紊动将损失更多

的能量, 再注意到水流在交汇段出口处流线的束窄相应也引起水面跌落, 则我们可以将这种水流的侧向收缩与无坎宽顶堰情形相类比, 并相应地采用堰流公式

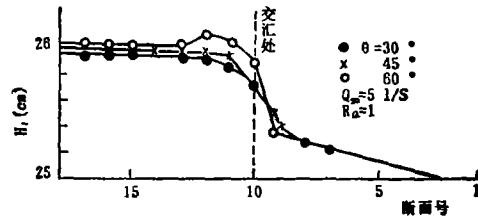


图 4 交汇角对水面线的影响

$$Q_m + Q_i = \beta_1' B_1 \sqrt{2g} H_1^{3/2} \quad (6)$$

其中, 系数  $\beta_1'$  用来反映流线的束窄程度、流速分布及局部能量损失等的影响, 将式(6)转换形式, 则可得

$$H_1 = \beta_1' (Q_m + Q_i)^{2/3} (\sqrt{2g} B_1)^{-2/3} \quad (7)$$

式中  $\beta_1' = f(\beta_1)$ , 式(7)便可用来描述  $H_1$  的变化特性。

(三) 综合作用力  $F$  的确定 由于  $F$  是边界对水流的综合作用力沿  $A'A'$  方向的投影, 所以它不仅与边壁的光滑、粗糙特性有关, 更重要的是它与交汇段水流结构掺混特性的同有关, 归根到底交汇段掺混特性系因支汊的存在及支流入汇引起, 所以又决定了  $F$  与  $\theta$ 、 $Q_m$  及  $R_0$  有关。从数量级及其物理意义上讲它都应  $\gamma B_1 H_1 \cdot \cos\theta/2$  相近, 例如当近乎无支流入汇效应时若不考虑边界对水流的阻力, 则  $F$  应与  $\gamma B_1 H_1 \cdot \cos\theta/2$  等值反向, 但对一般的水流交汇的问题二者不可能完全抵消。鉴于此, 假设

$$F = \frac{\gamma}{2} B_1 H_1 \cos\theta + \beta_2 \frac{\gamma}{2} B_1 H_1 \quad (8)$$

是可行的, 不难判断, 式(8)中系数  $\beta_2$  的取值一般都较小。

结合以下分析及其式(5)、(7)、和(8), 可将式(4)进一步化简为

$$\begin{aligned} & \frac{g}{2} H_1^3 [(1-\beta_1) B_1 + (\beta_1 - 1) B_1 \cdot \cos\theta] + \frac{Q_m^2}{H_1} \left( \frac{1}{B_1} + \frac{R_0^2 \cos\theta}{\sqrt{\beta_1} B_1} \right) \\ &= \frac{g}{2} \beta_1 B_1 \left[ \frac{Q_m(1+R_0)}{\sqrt{2g} B_1} \right]^{4/3} + \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \frac{(1+R_0)^{4/3}}{B_1} (\sqrt{2g} B_1)^{2/3} Q_m^{1/3} \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)知,  $H_1$  确实是  $R_0$ 、 $Q_m$  和  $\theta$  的函数, 当入汇角  $\theta$  给定时,  $H_1$  将只是  $R_0$  和  $Q_m$  的函数, 式(9)便可用来估算不同条件下汇流河段上游的水深。在式(9)中,  $\beta_1 = \beta_1'$ ,  $\beta_2 = \beta_1'$ , 再加上  $\beta_2$ , 共有三个系数需根据不同的具体条件从实测资料中总结, 关于它们各自的取值的精确确定主要取决于对汇流掺混特性的研究水平。

#### 四、计算与实测资料的比较

为了对以上模式进行检验, 我们采用张国生的全部清水试验资料来与式(9)进行比较。在张国生的试验中, 实验段有效长度为9m, 其中交汇口以上有效长度为4m。干支槽横断面均为矩形, 槽宽为0.4m, 槽深为0.25m。槽尾装有筛板式闸门, 控制下游的水面比降。干支水槽之间的交汇角共变化三次, 分别为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 。在每种角度下, 选择各种干、支流入汇流量搭配进行试验。显然在这种试验条件下, 式(9)将可

大大简化。

由于在试验中发现干、支流在入汇处上游的水深非常接近，因此选择  $\beta_1 \approx 1$  (或  $\beta \approx 1$ ) 是可行的。此外，从不同实验情况来看，选择  $\beta_2 = 7.18$  (或  $\sqrt{\beta_2} = 2.68$ ) 与  $\beta_2 = 0.13$  是一种极好的近似。

在图5、图6、和图7中给出了关于式(9)和实验资料<sup>[9]</sup>的对比情况，不难看出计算结果与实测资料符合很好。图5-7说明，当干流流量及入汇角 $\theta$ 给定时，上游水深 $H_1$ 随 $R_q$ 的增大而增大，即支流入汇流量的增加使上游水面壅高；当支流流量及入汇角 $\theta$ 给定时，上游水深 $H_1$ 随 $R_q$ 的增大而减小，即这时干流流量的减小将使上游水位 $H_1$ 相应降低；当干流流量给定时， $H_1$ 随 $R_q$ 的变化在不同入汇角情况下有所不同， $\theta$ 越大在相同条件下 $H_1$ 越大，即 $\theta$ 的增加也将使上游水面壅高。相对来说，在实验范围内 $\theta$ 对上游水深的影 响最小。所有这些认识也都与通常在天然河流中观察得到的经验相一致。由此可见，式(9)不仅可以解释本文引言中提出的问题，而且还能从理论上直接给出它们的定量关系，从而说明汇流河段水力特性问题有可能从理论上进行探讨。

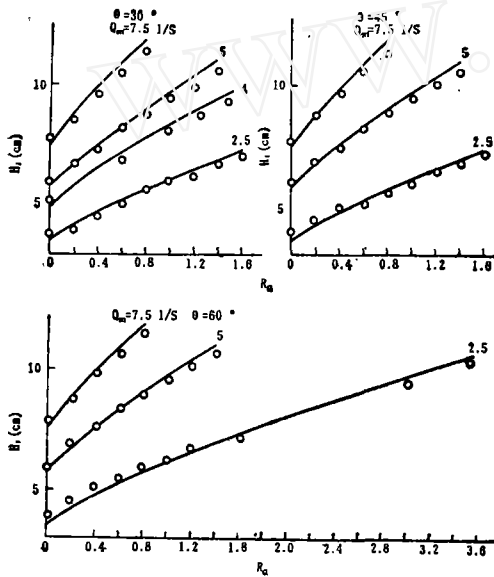


图5 实测资料与式(9)的比较之一

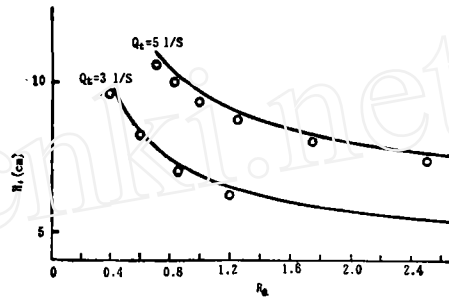


图6 实测资料与式(9)的比较之二

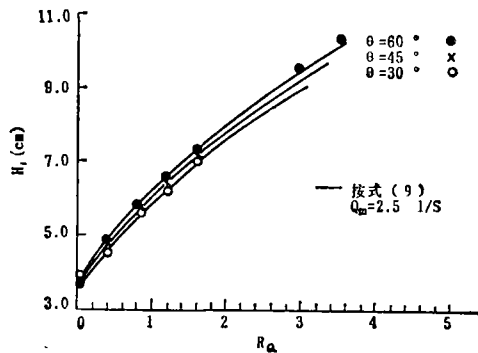


图7 实测资料与式(9)的比较之三

## 五、结 论

通过上述分析，文中得到的主要结论有：

(一) 理论分析表明，由动量方程推导得到的结果反映的正是交汇段上游干流水深 $H_1$ 与干流流量 $Q_m$  (或支流流量 $Q_1$ )，汇流比 $R_q$ 及入汇角 $\theta$ 之间的关系。对于 $\theta$ 给定的汇流问题，理论上能够证明以往的关于建立 $H_1$ 、 $Q_m$  (或 $Q_1$ )和 $R_q$ 的三变量关系定性分

析是合理的, 它抓住了问题的本质.

(二) 计算结果表明, 在干流流量及入汇角  $\theta$  给定时, 上游水深  $H_1$  随  $R_0$  增大而增大; 当干支流流量给定时,  $H_1$  随入汇角的增大而增大. 这与实测结果是一致的.

(三) 根据实测汇流河段的水流特性引入有关系数能够较好地弥补前人研究中考虑因素过分简单的不足之处, 并使得定量计算成为可能. 有关系数  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  和  $\beta_3$  的精确确定则有赖于水对水流掺混特性这一复杂问题的认识深度.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 王桂仙、陈稚聪, 嘉陵江入汇时长江重庆河段影响的分析. 泥沙研究, 1987年第4期.
- [ 2 ] Taylor, E.H., Flow characteristics at rectangular open-channel junctions. *Trans. ASCE*, Vol. 109, 1944.
- [ 3 ] McNown, J. S and Hsu E.-Y., Application of conformal mapping to divided flow. Proc. 1st Midwest Conf. Fluid Dynamics, May, 1950., Urbana, Univ. of Illinois, 1951.
- [ 4 ] McNown, J. S., Mechanics of manifold flow. *Trans. Amer. Soc. Civ. Engi.*, Vol. 109, 1954.
- [ 5 ] Thom, A. and Apelt, C. J., Field computations in engineering and physics *Van Nostrand, Ch. 7*, 1961.
- [ 6 ] Webber, N. B. and Greated, C. A., An investigation of flow behaviour at the junction of rectangular channels. Proc. of the Institution of Civil Engineers, July, 1966.
- [ 7 ] Lubowe, J. K., Stream junction angles in the dendritic drainage pattern *American Jour. of Science*, Vol. 262, March 1964.
- [ 8 ] 张国生, 汇流河段水流和泥沙输移特性的试验研究. 清华大学硕士论文, 1987年.