

# 泥沙颗粒的扬动机理分析\*

刘青泉

曹文洪

(中国科学院力学研究所) (中国水利水电科学研究院)

**摘要** 本文从分析床面附近泥沙颗粒的运动特征出发,较细致地论述了沙粒在水流中从推移运动到扬起悬浮的物理过程,根据水槽试验的基本现象,讨论了过去一些理论中存在的问题和不足,概括了泥沙颗粒在水流中从床面扬起的基本模式,从二相流角度出发,分析了沙粒在水流中扬起的动力学机理。

**关键词** 泥沙颗粒,无规则运动,跃移,紊动猝发,扬动。

泥沙颗粒的扬动是泥沙运动的水力基本特性之一。分析河床冲淤变形,需要合理地考虑悬移质与推移质之间的交换,其问题之一就是交换的临界条件,即泥沙的扬动条件,尤其以数学模型为研究手段更是如此。多年来,不少学者对此作了一定的探讨,但床面附近的泥沙运动十分复杂,且测试实验做起来困难较大,致使该问题一直没能得到良好的解决。因此,进一步的工作应着重加强对沙粒扬动机理的分析,以弥补经验的不足。

颗粒在水流中是如何扬起的,概括过去的研究,主要观点有:

(1) 由于床面附近的水流水平速度有垂向梯度,流经沙粒时颗粒上部流速大于下部流速,因此颗粒上部压强小于下部压强,颗粒受到一个向上的作用力,即上举力,用于平衡沙粒的水下重力,使沙粒扬起悬浮<sup>[1]</sup>。

(2) 水流对沙粒的垂向作用力分为两部分:一部分为颗粒上、下部时均流速差引起的压强差形成的垂向作用力;另一部分为水流湍流脉动的垂向分速对颗粒产生的紊动上举力。当二者之合克服了沙粒的水下重力后,沙粒即从床面扬起<sup>[2,3]</sup>。

(3) 沙粒是否扬起,反映了沙粒重力与床面附近水流紊动作用的相对强弱,当近底水流的垂向紊动作用大于沙粒的水下重力作用时,沙粒就会扬起,而近底水流的垂向紊动作用主要表现为紊动猝发,即床面上的沙粒是否上扬决定于近底猝发紊动水团的上升速度<sup>[4,5]</sup>。

本文将从床面附近的泥沙运动特性出发,分析沙粒扬起的物理过程,讨论过去理论中存在的问题和不足,从二相流角度出发,探讨沙粒在水流中的扬动机理。

## 1 床面附近泥沙运动特性

**1.1 沙粒在水流中的运动形式及过程** 胡春宏曾用高速摄影技术观测了泥沙颗粒从静止到悬浮的全过程<sup>[6]</sup>,结果表明,随着水流运动强度的增大,不同容重和粒径的颗粒自起动以后,无论是在光滑或粗糙的床面上,泥沙颗粒运动过程均可概括为:起动 滚动(间或滑动) 滚动和跃移相间 连续跃移 跃移和悬移相间 悬移。泥沙颗粒的跃移运动是泥沙运动的一个重要形式,泥沙颗粒由推移运动转入悬移运动一般都要经过跃移运动过程,即沙粒一般是从跃移运动形式转为悬移运动的。

对于泥沙颗粒从推移运动到悬移运动,除了由跃移到悬移这种一般的转化过程之外,实际上还有2种转化的过程和形式:一种是由于床面附近的紊动猝发过程,即由于床面上的紊动“猝发”作用,低流速水团可以直接挟带一部分泥沙颗粒上升到主流区,使其呈悬浮状态;另一种形式主要是对于动床床面,当床面出现较显著的不平整时,就会产生局部的水流分离,从而将床面上的泥沙卷扬起来送

\* 本文于1996年11月26日收到,本研究得到国家博士后科学基金的资助。

到主流区。这 2 种形式通常可以使床面泥沙不经跃移过程，甚至直接从静止状态转为悬移运动。但就更一般的情况下，沙粒的扬起是经过跃移运动过程的。

1.2 跃移和悬移颗粒运动速度和加速度的变化特点 图 1 (a) —(e) 和图 2 (a) —(e) 分别为根据大量实测资料选出的，颗粒的典型跃移和悬移轨迹及对应的颗粒速度和加速度沿运动轨迹的变化过程<sup>[6]</sup>。

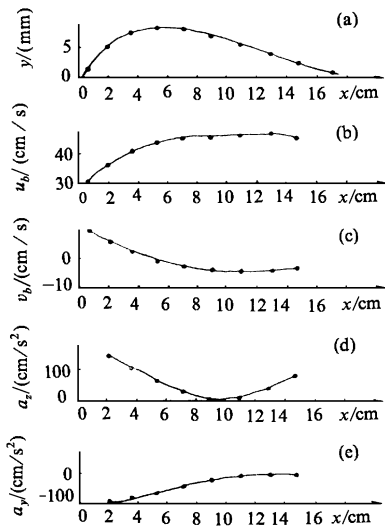


图 1 跃移颗粒运动轨迹及速度和加速度沿轨迹变化

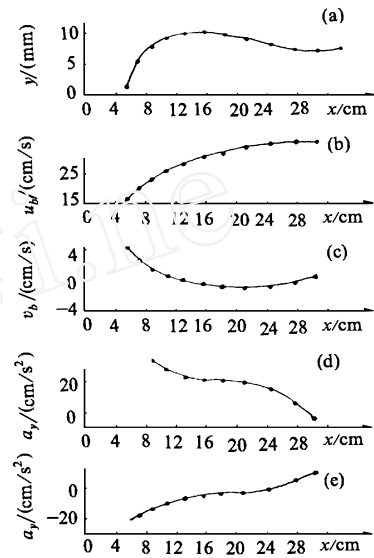


图 2 悬移颗粒起悬浮运动轨迹及速度和加速度沿轨迹变化

图 1 (a) 为典型的颗粒跃移轨迹；图 1 (b)、(d) 分别表示颗粒纵向速度  $u_b$  和加速度  $a_x$  沿轨迹的变化。图 1 (c)、(e) 分别表示颗粒垂向速度  $v_b$  和加速度  $a_y$  沿轨迹的变化。可以看出，纵向速度和加速度始终为正。垂向运动速度  $v_b$  的变化可分为两部分，在跃高点以前的上升段， $v_b$  的方向是向上的。在跃高点以后的下降段  $v_b$  的方向是向下的。垂向加速度  $a_y$  基本上始终为负值，说明颗粒始终受到一个垂直向下的合力，导致颗粒垂向速度不断减小，直至为零后开始下降。

比较从跃移和悬移颗粒的速度和加速度沿轨迹变化过程，在悬移过程中的上升阶段，颗粒运动速度和加速度与跃移运动类似。可见，在悬移的起悬段与跃移的起跃段变化特点是一致的，进一步说明了一般情况下，悬移是经过跃移过程的，且一般是在起跃段上进一步向悬移转化的。

## 2 泥沙颗粒的扬动模式

2.1 关于泥沙颗粒扬动模式的讨论 泥沙颗粒从床面上的扬起过程，与泥沙在床面附近的运动特性密切相关，从床面附近泥沙的基本运动特性及运动过程中速度和加速度的变化特点，可以看出以往的泥沙扬动模式理论中存在的问题。

2.1.1 用上举力与沙粒水下重力的平衡来解释沙粒的扬动 从图 1、图 2 所示的颗粒跃移和悬移起悬段的垂向加速度变化过程看出，沙粒的跃起和扬起的过程中，其垂向加速度始终为负，即说明垂粒的垂向受力是始终向下的，看来一般情况下，上举力是小于重力的（且上举力与  $du/dy$  成正比，随着离床面距离越远， $du/dy$  越小，因此上举力也会越来越小）。另外，颗粒的扬起跟水流紊动有较大关系，这里显然是没有包括水流紊动对沙粒扬起所起的作用。

2.1.2 用上举力和脉动上举力的共同作用解释沙粒的扬动 考虑到水流紊动作用，将水流对泥沙的垂向作用分作两部分，即除了上述的上举力外，另一部分为脉动上举力，一般的作法，是参照时均上举力表达式将其表示为  $F = C_L d^3 \overline{u}^2$ ，这样从物理意义上引进了水流紊动的作用，但同样存在一个问题，如果这个力在床面附近就能克服沙粒的水下重力的话，颗粒在跃起和悬起的初始阶段就应该在

垂向上是加速的, 事实上一般情况并非如此. 由此看来, 由此二力之合克服重力使泥沙从床面扬起的观点仍缺乏充分的说服力. 实际上, 众所周知, 水流的紊动强度在床面附近迅速减小, 这种紊动的平均作用强度是不会很大的.

2.1.3 用紊动‘猝发’作用解释沙粒的扬动 在上述理论的基础上, 人们认识到水流紊动的特点, 进一步用紊动猝发作用来描述沙粒的扬动过程. 水流的紊动‘猝发’的确可以带动一些泥沙颗粒从床面扬起, 但只有在猝发紊动比较强烈, 或者泥沙颗粒较细, 重力作用较小时, 才是泥沙颗粒扬动的重要原因. 当泥沙颗粒较粗, 重力作用较强时, 仅靠水流的紊动猝发作用, 是否能使大量的泥沙颗粒从床面上扬起, 并保持较稳定的浓度分布, 是值得商榷的. 我们认为紊动猝发作用只是颗粒扬动的一种机理, 用它表述不了颗粒通过跃移向悬移转化这种更一般的颗粒扬起现象, 也表述不了由于床面不平整产生的局部水流分离引起的卷扬沙粒运动(这种情况在不平整的动床床面上更为普遍).

2.2 泥沙颗粒扬动的进一步分析 归纳过去的研究, 大都认为, 床面上的沙粒由于受到了垂直向大于沙粒水下重力的作用后, 沙粒就会扬起. 沙粒在床面上跃起时就具有一定的初速度, 显然是在较短的时间内通过动量转化而具有的, 这种动量转化可从三种途径得的初速度, 显然是在较短的时间内通过动量转化而具有的, 这种动量转化可从三种途径得来: (1) 沙粒作跃移运动, 在获得了主流传给动量后, 当跃落在床面时, 与床面发生碰撞, 在很短的碰撞瞬间, 跃起的沙粒获得了较大的动量. (2) 由于床面的不平整, 水流发生局部分离, 将泥沙卷起, 使泥沙在短时间内获得了较大的动量. (3) 床面附近的紊动猝发, 带动泥沙颗粒, 迅速传递给沙粒较大的动量.

由此, 可将沙粒的扬起过程概括为下列 3 种途径和模式:

(1) 沙粒通过跃移运动, 获得了较大的动量, 并在跃移的上升过程中, 被大尺度的紊动水团挟带呈悬浮状态.

(2) 对于不平整床面, 由于水流在床面附近产生局部分离, 将沙粒卷起, 沙粒获得充分动量, 在卷起的过程中, 进一步被主流区的大尺度紊动水团挟带悬浮.

(3) 床面上水流的紊动猝发, 被低速水团挟带的泥沙在上升过程中, 又不断从主流区的大尺度紊动水团中获取新的动量, 从而继续地呈悬移状态.

综上所述, 泥沙颗粒的扬动是在床面附近颗粒运动的基础上, 通过跃移、分离水流的卷扬和紊动猝发作用等无规则运动, 获得了充分的动量之后, 在运动中发生的. 床面附近的泥沙运动对颗粒的扬动起着十分重要的作用, 没有床面附近颗粒的剧烈运动, 泥沙颗粒是很难扬起悬浮的. 正是床面附近颗粒的运动将悬移质泥沙和推移质泥沙有机地结合在一起, 床面泥沙与悬浮泥沙的逐渐过渡正是通过床面附近的泥沙运动在床面层内完成的.

### 3 颗粒扬动的动力学机理

3.1 沙粒的垂向受力 对于沙粒由推移到悬移的转化过程, 主要关心的是沙粒的垂向受力. 对于跃移或悬移的单颗粒泥沙, 在水流中的垂向受力可归纳为如下几个力的作用:

$$(1) \text{重力} = \frac{1}{6} d^3 \rho_s g, \quad (1)$$

式中  $d$  为沙粒粒径(假定沙粒形状为一圆球),  $\rho_s$  为沙粒密度,  $g$  为重力加速度.

$$(2) \text{压差力} = -\frac{1}{6} d^3 \frac{dp}{dy}, \quad (2)$$

对于一般的明渠水流运动, 压强梯度  $\frac{dp}{dy}$  (垂向) 主要是由水流的重力引起的, 因此, 压差力实际就表现为浮力, 有

$$\text{浮力} = -\frac{1}{6} d^3 g. \quad (3)$$

将重力与浮力合并, 称之为沙粒的水下重力, 表达为  $\frac{1}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g$ .

$$(3) \text{ Saffman 力} = 1.62 d^2 \sqrt{\nu} (u - u_s) \sqrt{\frac{du}{dy}} \quad (4)$$

式中  $\nu$  为水流运动粘性系数。(该力的表达式是 Saffman 在无界均匀剪切流中导出的, 在床面附近仅定性正确.)

单颗粒泥沙在垂向上, 除了受到上述三种力外, 还受到 Magnus 力、升力和水流阻力的作用. 但对于沙粒跃移和悬移的起始阶段, Magnus 力一般很小, 可以忽略 (颗粒旋转角速度一般小于  $45\text{ n/s}$ ). 升力是一种形状阻力 (垂向), 对于园球状颗粒, 升力系数为 0, 对于不同形状的沙粒, 升力可能向上, 也可能向下, 沙粒的取向是随机的, 对于群体沙粒而言, 平均升力为零, 因此, 一般二相流中都不考虑升力. 对于颗粒的初始扬动过程, 一般水流阻力也是可以忽略的. 因此, 对于单颗粒泥沙, 在垂向上, 除了受到重力和浮力之外, 主要就受到 Saffman 力 (上举力) 的作用. 这也就是以往认为泥沙扬起是由于上举力克服了沙粒水下重力的原因.

**3.2 沙粒扬动的动力学机理** 单颗粒沙粒在垂向主要受到重力、浮力和 Saffman 力的作用, 从前面的分析知道, 仅靠上举力 (Saffman 力) 是很难平衡重力和浮力而使沙粒扬起悬浮的, 那么沙粒是如何扬起的呢? 实际上, 泥沙运动是一种群体颗粒运动, 颗粒的扬动是在床面附近群体颗粒运动的基础上发生的. 应该从群体颗粒的垂向动量平衡来分析.

对于水平流动中床面附近的沙粒, 在垂直方向上除了受到重力和浮力外, 还受到其它垂向力 (主要是 Saffman 力) 的作用. 假设  $a$  为这些垂向力的合力产生的加速度, 那么根据二相流理论, 从宏观上分析, 颗粒群沿垂向的运动方程为:

$$-\frac{\partial P}{\partial z} - \rho_s \frac{\partial p}{\partial z} - \rho_s g + \rho_s s = 0, \quad (5)$$

其中  $s$  为沙粒群在水沙混合物中所占的体积分数,  $p$  是流体静压强,  $P$  为由沙粒无规则运动引起的脉动正应力,  $\rho_s$  为沙粒的密度.

( $-\rho_s \frac{\partial p}{\partial z}$ ) 是作用于沙粒群上的浮力, ( $-\rho_s g$ ) 为作用于沙粒群上的重力, ( $\rho_s s$ ) 为作用于沙粒群上的其它垂向力 (上举力). 根据定义有

$$s = \frac{n_s m_s}{\rho_s} = \frac{1}{6} d_s^3 n_s, \quad (6)$$

其中  $n_s$  为沙粒的数密度,  $m_s$  为沙粒的质量,  $d_s$  为沙粒的直径.

颗粒相脉动正应力  $P$  是群体颗粒运动的结果. 过去在输沙力学中没有对此引起足够的重视, 更没有对此加以分析. 下面我们考察一下颗粒相脉动正应力  $P$  的微观意义, 并从微观上讨论沙粒的重力和浮力是靠什么维持平衡的.

刘大有从二相流角度出发, 曾对颗粒的无规则运动进行了分析<sup>[7]</sup>, 认为颗粒的无规则运动会产生应力作用, 并将其定义为颗粒相分压, 它对群体颗粒的运动十分重要. 实际上, 这种颗粒垂向无规则运动产生的应力更类似于水流的脉动正应力, 因此, 我们直接称之为颗粒相脉动正应力: 在水流中高度  $z = z_0$  处取一单位底面积、高为  $z$  的柱体. 由于沙粒的无规则运动, 每时每刻都有许多沙粒从下面通过端面  $z = z_0$  进入柱体, 同时将它们具有的正动量带到柱体内, 另一方面又有许多沙粒从柱体经端面  $z = z_0$  飞出, 同时将它们所具有的负动量带出柱体, 也使柱体获得了正动量. 对于每一个通过端面  $z = z_0$  的沙粒所运输的动量进行统计, 结果得到外界通过单位面积端面  $z = z_0$  给予柱体的动量传递率 (即沙粒的脉动正应力) 为:

$$P(z_0) = \overline{(n_s m_s w_s^2)}_{z=z_0}, \quad (7)$$

其中  $w_s^2$  是颗粒无规则运动  $z$  向分速度的平方平均, 包括热运动、湍流脉动和其它各种形式的无规则运动.

同样可以得出从上端面输出的  $z$  向动量为:

$$P(z_0 + z) = \overline{(n_s m_s w_s^2)}_{z=z_0+z}, \quad (8)$$

这说明从微观看，颗粒的脉动正应力是沙粒无规则运动的一种表现形式。由此，可以将式 (5) 改写为：

$$\frac{\partial}{\partial z} (n_s m_s \overline{w_s^2}) - n_s m_s g + n_s m_s = 0. \quad (9)$$

根据式 (7)、(8) 结果可以得出柱体净得的  $z$  向动量为：

$$P(z_0 + z) - P(z_0) = (n_s m_s \overline{w_s^2})_{z=z_0+z} - (n_s m_s \overline{w_s^2})_{z=z_0} + z \frac{\partial}{\partial z} (n_s m_s \overline{w_s^2}), \quad (10)$$

则由式 (9) 可得出柱体内沙粒的  $z$  向动量平衡关系式

$$- n_s m_s g \left( 1 - \frac{z}{s} \right) = z \frac{\partial}{\partial z} (n_s m_s \overline{w_s^2}) - z n_s m_s. \quad (11)$$

即

$$- n_s m_s g \left( 1 - \frac{z}{s} \right) = \frac{\partial}{\partial z} (n_s m_s \overline{w_s^2}) - n_s m_s. \quad (12)$$

因此，微观分析表明， $n_s z$  个沙粒的重力和浮力可以依靠沙粒无规则运动运输的动量和水流对沙粒的上举力来得到平衡。说明沙粒的扬起悬浮主要是靠群体沙粒本身的无规则运动，只要颗粒无规则运动产生的脉动应力达到一定强度，沙粒就会扬起悬浮。当然，水流对沙粒的上举力也促使沙粒更易扬起。

沙粒在水流中的无规则运动有多种形式，如热运动、湍流脉动等，除此之外，还有一些其它形式的无规则运动<sup>[7]</sup>。对于沙粒来讲，热运动很弱，可以忽略不计，对于离开床面较远的主流区，沙粒的湍流脉动占据主导地位，其它的无规则运动均可忽略。在床面附近，情况则有所不同，水流的湍流度在床面附近迅速减小，而沙粒的无规则运动仍很强烈（如图 3 所示为我们的水平方管水-沙两相流中，对水、沙两相垂向脉动强度的测量结果<sup>[8]</sup>。流动条件： $U_{\max} = 68\text{cm/s}$ ），这里的湍流脉动很弱，这说明有一种新的无规则运动形式。颗粒与颗粒、颗粒与床面的碰撞，以及颗粒的跃移运动就是一种不属于湍流脉动的颗粒无规则运动；由于床面不平整产生局部水流分离，在背水面出现局部旋涡卷扬沙粒，同样造成床面附近沙粒的局部脉动。而根据上述的理论分析表明，沙粒的这种无规则运动恰恰是影响床面附近泥沙颗粒扬起和悬浮的关键所在。

由于床面附近泥沙颗粒的运动，以及泥沙颗粒的扬动临界过程都比较难以观测，因此，要用试验直接验证上述结论存在着很大的困难。然而，我们认为泥沙颗粒的悬浮运动能够保持稳定的浓度分布，与颗粒的扬运过程具有同样的动力学机制，即悬浮颗粒具有稳定的浓度分布也主要是依靠颗粒的垂向无规则运动运输的动量很以维持。刘大有曾经由此从二相流方程出发，对颗粒浓度分布与颗粒垂向无规则脉动强度之间的关系进行了分析<sup>[9]</sup>。

忽略 Saffman 力（认为该力很小），引进水流阻力  $f$ （对悬浮颗粒，水流阻力作用显著），则颗粒垂向动量方程为：

$$\frac{\partial}{\partial z} (m_s n_s \overline{w_s^2})_{\text{平均}} - m_s n_s g \left( 1 - \frac{z}{s} \right) + f = 0. \quad (13)$$

将阻力分解为层流阻力  $f^L$  和湍流阻力  $f^T$ ，即有  $f = f^L + f^T$ 。且有：

$$f^L = m_s n_s g (1 - z/s), \quad (14)$$

$$f^T = - m_s n_s \frac{v_s}{T}. \quad (15)$$

式中  $T$  为两相湍流运动的弛豫时间； $v_s$  为颗粒的沉降速度。

最后得到颗粒浓度（数密度）与颗粒垂向脉动强度之间的关系：

$$n_s \overline{v_s^2} = [n_s v_s^2]_{y=0} \exp \left[ \frac{y}{T} \left( \frac{v_s}{v_s} \right)^2 \right] dy. \quad (16)$$

我们利用激光多普勒分相测量技术，对颗粒的垂向脉动强度和颗粒浓度（相对数密度）作了较细

致的观测<sup>[8]</sup>。根据明渠水槽中的试验结果，对上面颗粒浓度分布与颗粒垂向脉动强度的关系进行验证。结果如图4所示（图中实线为计算结果，点据为试验测量结果，流动条件：水深  $H = 9\text{cm}$ ， $U_{\max} = 68\text{cm/s}$ ）。可见，符合良好。

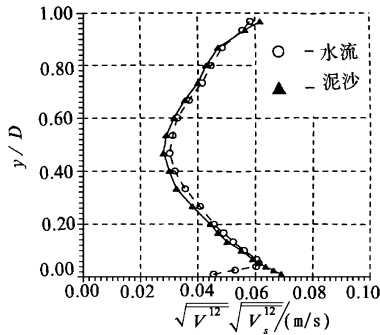


图3 水沙两相的垂向脉动强度  
 $d_s = 0.083 \sim 0.105\text{mm}$  (天然沙)

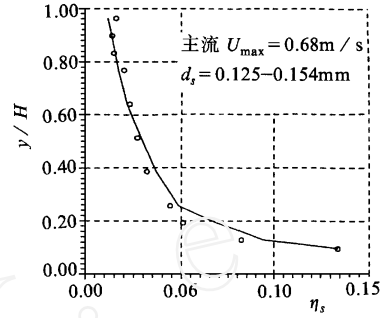


图4 水槽流动的颗粒浓度分布  
 $d_s = 0.125 \sim 0.154\text{mm}$  (天然沙)

上述验证结果证实了：颗粒的悬浮运动能够保持稳定的浓度分布，的确主要是依靠颗粒的垂向脉动运输的动量。由此也间接地证明了，床面附近泥沙颗粒的剧烈脉动对颗粒扬动所起的重要作用。

#### 4 结论

(1) 沙粒的扬动，更一般地是在离开床面一段距离处发生的，而不是直接在床面上发生的，除非对很细颗粒沙有可能从床面直接被局部分离水流卷起或被猝发紊动水团带去。

(2) 只有在床面附近群体颗粒强烈运动的基础上，泥沙颗粒才可能扬能。沙粒的扬动过程可概括为三种模型。(1) 沙粒在跃移运动的过程中，被大尺度的紊动水团挟带扬起。(2) 对于不平整的床面，由于水流在床面附近产生局部分离，将沙粒卷起，并在卷起的过程中，进一步被主流区的大尺度紊动水团挟带扬起。(3) 床面上的紊动猝发水团挟带泥沙在上升过程中，又不断从主流区的大尺度紊动水团中获取新的动量，从而使泥沙颗粒扬起悬浮。

(3) 沙粒在水中扬起的根本动力是沙粒本身的无规则运动所运输的动量，也就是说沙粒的无规则运动是泥沙在水中扬起的根本原因。而沙粒的无规则运动除了一般的湍流脉动（热运动极弱）外，更主要的是另一种新的脉动形式，即沙粒的跃移运动和由于床面不平整产生的局部水流分离引起的卷扬运动。

#### 参 考 文 献

- 1 沙玉清. 泥沙运动学引论. 北京: 中国工业出版社, 1965.
- 2 周志德. 泥沙颗粒扬动条件. 水利学报, 1981, (6).
- 3 洪大林, 唐存本. 泥沙扬动试验研究. 全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集. 1992.
- 4 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学. 北京: 科学出版社, 1986.
- 5 Sumer B M, Deigaard R. Experimental Investigations of Motion of Suspended Heavy particales and the Bursting Process. Series Paper 23, Inst. of Hydrodynamics & Hydraulic Engineering. Technical University of Denmark, 1979.
- 6 惠遇甲, 胡春宏. 水流中颗粒跃移的运动学特征. 水利学报, 1991, (12).
- 7 刘大有. 二相流体动力学. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- 8 刘青泉. 水-沙两相流运动机理的试验和研究. 中科院力学所博士后工作报告, 1995, (12).
- 9 刘大有. 论气(水)力输送管道中颗粒悬浮机理和悬浮功的概念. 第七届全国化学工程论文报告会论文集(上), 1993.

(下转 53 页)

# The Optimum Operation Model of flood control System

Fu Xiang Ji Changming

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering)

**Abstract** A multidimensional dynamic programming model is established for joint operation of complicated flood control system of eliminate the effect related of system history. The optimum strategy for regulation of a flood can be effectively acquired by utilizing this model when progressive optimality algorithm (POA) method is used. The feasibility and effectiveness are demonstrated by comparisons of results.

**Key words** flood control system, operation, multidimensional DP.

---

(上接第 6 页)

## On the mechanism of winnowing of sediment particles

Liu Qingquan

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Cao Wenhong

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research)

**Abstract** In this paper, a systematic study on the process of sediment particles being winnowed in water flow from river bed is carried out. Some questions that exist in traditional theories are discussed. Based on a new mechanics idea, the mechanism of the winnowing of the sediment particles is analyzed in detail.

**Key words** sediment particles, irregular motion, saltation, turbulent bursting, winnowing.