



非恒定流作用下输沙率变化过程研究*

杨祥飞

(长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

摘要: 通航河流修建水利枢纽后, 调峰发电下泄类似“人造洪峰”的非恒定流和含沙量趋近于零的清水, 破坏了河流的平衡, 给河床演变、航道整治技术等带来新的课题。通过水槽试验、理论分析等手段, 研究枢纽下游非恒定流作用下均匀沙的起动与输移规律。研究认为: 非恒定流作用下输沙率变化过程与水流条件具有不同步性, 并与水流非恒定强度 P 有关, 当 $P > 0.32$ 时, 水流参数峰值一般先于输沙率峰值; 当 $P < 0.32$ 时, 水流参数峰值滞后于输沙率峰值。

关键词: 航道整治; 非恒定流; 输沙率

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)07-0017-06

Changing process of sediment transport rate under action of unsteady flow

YANG Xiang-fei

(Survey & Design Institute of Yangtze River Harbor & Waterway Engineering, Chongqing 401147, China)

Abstract: After construction of water conservancy in the navigable river, the discharge of the unsteady water flow which is similar to the man-made flood peak and clear water of near to zero sediment concentration from the peaking power generation destroys the balance of the river, and thus brings a new topics for research on bed evolution and waterway regulation technology. Based on the flume experiment and theory analysis, we study the starting and transport rule of uniform sediment under the action of unsteady flow in the hub's downstream. The result reveals that changing process of sediment rate under unsteady flow and flow condition are not synchronized, and it relates to the intensity of the unsteady flow P . When P is larger than 0.32, the sediment peak generally lags behind the rate of flow parameters of the peak; when P is less than 0.32, the sediment discharge peak may occur before the peak flow parameters.

Key words: waterway regulation; unsteady flow; sediment transport rate

随着我国经济建设快速发展, 电力需求旺盛, 水电作为一种可再生可调节的清洁能源在我国电力发展规划中的比重逐年增加。目前, 在长江、黄河、珠江等主要河流干流及其支流上已兴建或正在兴建的大中型水电枢纽较多, 如葛洲坝、三峡、向家坝、溪洛渡、龙滩等。大型梯级枢纽建成后, 由于对原有天然河道的水流和泥沙输移过

程进行了人为调节, 使原已适应了自然来水来沙过程的天然河道发生剧烈的变化, 在枢纽下泄非饱和水流作用下, 将引起河床冲刷下切、床沙粗化, 进而影响水流输沙能力、河床冲刷过程以及坝下水位下降等^[1]。此外, 由于枢纽负荷的不均衡, 常需进行日调节, 在下游河道形成非恒定强度较大的日调节波, 使河道内的水位、流速、比

收稿日期: 2013-11-07

*基金项目: 西部交通建设科技项目 (2009328746042)

作者简介: 杨祥飞 (1977—), 男, 高级工程师, 主要从事航道整治技术研究等方面的工作。

降等水力要素发生剧烈变化,不仅给船舶航行、码头靠泊带来不利影响,而且给枢纽下游河道泥沙运动、滩槽演变等带来诸多新的问题。

枢纽下泄非恒定水沙过程对坝下泥沙运动是否有影响、如何预测泥沙运动规律、河床冲刷变形及坝下水位降低等问题都是进行坝下河床演变与航道整治研究时迫切需要回答的问题。国内外众多学者曾对此进行过一些研究,发现非恒定流水力要素变化不同于恒定流,其输沙特性也不同于恒定流,同时发现非恒定流输沙过程与水流运动之间存在不同步现象。总体来看,目前国内外在非恒定流对均匀沙、不均匀程度较小的非均匀沙在水流输沙方面的研究有一定进展,但鉴于问题的复杂性,研究成果总体还不成熟,在某些问题上还存有一定的分歧。除此以外,现有学者在试验研究非恒定流作用下泥沙输移时常尽可能保持试验段底坡与水面比降相一致,试验段水流类似明渠均匀流,这与渠化河流或天然河流实际情况不符。

因此,针对金沙江等梯级枢纽开发以及其下游航道整治措施,通过水槽试验、理论分析等手段开展枢纽下泄非恒定流作用下的泥沙运动规律研究,为枢纽非恒定流作用下航道整治工程建设提供基础的科学依据是有必要的。

1 水槽非恒定流及其推移质输沙的控制与采集

试验采用变坡水槽,全长 $L = 40$ m,宽 $B = 0.8$ m,深 0.8 m,长宽比 $L/B = 50$,水槽尺度较通常试验水槽大,有利于紊流的充分发展,同时有利于减小水槽侧壁对试验结果的影响。

变坡水槽的结构采用翘板式钢架玻璃侧壁,其作用主要是通过底部安装的钢结构支架对槽底的坡度进行调节,底坡的调节范围为 $1/60 \sim 1/400$,整个变坡水槽由两侧各 26 块玻璃侧壁组成,其中每块玻璃面长 1.5 m,高 0.8 m。水流循环运

行首先由泵房从供水库抽水至平水塔,由平水塔经输水管道下泄稳定流至水槽(时差式超声波流量计),再由水槽出水口及回水槽将水流送回地下供水库,其水流循环基本工作原理见图 1。其中水槽进水口采用直径 2.5 cm,长 50 cm 的 PVC 管群进行消能,使进口水流沿水槽宽度方向均匀分布。

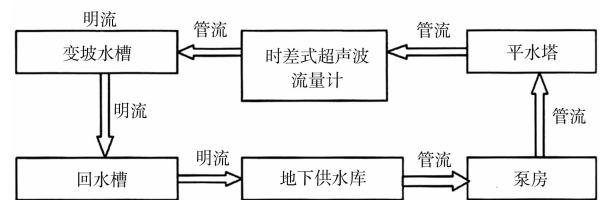


图 1 水流循环基本工作原理

水槽进口流量控制系统由计算机、流量的控制接口、电子电动的执行器、直行程双座的调节阀、时差式超声波流量计组成。计算机进行自动控制时,会将超声波流量计的流量与电动执行器的电压两者之间的率定关系式代入。当试验给定流量与实测流量之间出现偏差时,计算机系统将传出控制信号给电子式电动执行器,对流量进行调节。调节后的流量经过超声波时差式流量计再反馈回到计算机,经再调节控制,从而形成一个闭合的自动控制系统,直至达到要求的误差范围以内,流量测量控制偏差 $\leq 2\%$ (恒定流), 5% (非恒定流)。

变坡水槽沿程共布置 5 个自动水位仪,3 个流速测量仪 (ADV、Vectrino、PIV)。模型试验段长 15.09 m,试验段上游定床面粘天然卵石,确保水流进入试验段之前紊流充分发展,试验段下游定床面同样粘天然卵石,防止尾门回水影响试验段;在试验段尾部设置集沙槽,内设接沙容器,在顶部架设电子天平,用于测量输沙率的变化,具体布置见图 2。试验过程中流量、水位、输沙率、流速通过计算机控制,可同步实时测量。

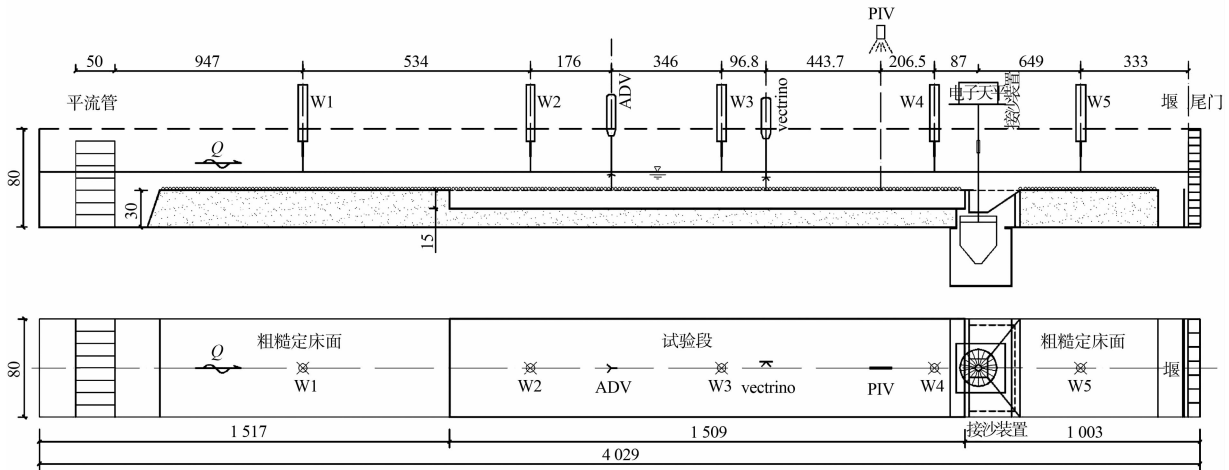


图 2 水槽试验布置 (单位: cm)

2 枢纽下泄非恒定流的概化及非恒定强度的确定

1) 枢纽下泄非恒定流的概化。

电站实际运行过程中, 下泄的非恒定流波形较为复杂, 为便于通过波形参数对水流特性、输沙特性的影响进行研究, 可将非恒定泄水过程概化为连续的三角波过程 (图 3)。连续三角波条件下涨水或落水的整个过程水流的非恒定性 (dQ/dt) 保持不变, 便于分析水流非恒定性对输沙的影响。

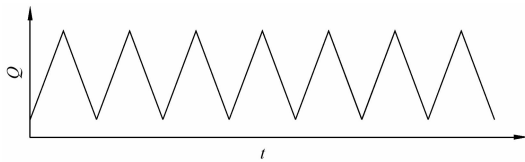


图 3 枢纽下泄非恒定流波形概化简图

考虑枢纽下泄流量的非恒定性 (dQ/dt), 对单个对称非恒定流波 (涨水与落水时间相同) 而言, 有 4 种概化方式:

概化 I: 非恒定性不同的来流过程, 一个周期 T 内 (来流过程由基流 Q_b 上涨至峰值流量 Q_p 再降落至基流 Q_b 所持续的时间) 枢纽下泄的径流量保持不变, 同时下泄基流 Q_b 不变, 但非恒定波周期 T 不同, 非恒定程度越大, 对应波周期 T 越短 (图 4)。

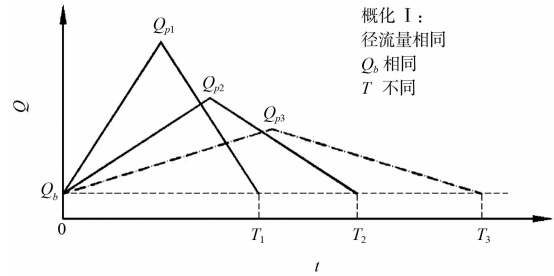


图 4 相同径流基流, 不同周期概化示意图

概化 II: 一个周期内枢纽下泄径流量保持不变, 平均流量 \bar{Q} 和波周期 T 保持不变, 但枢纽下泄基流 Q_b 不同, 非恒定程度越大, 对应 Q_b 越小 (图 5)。

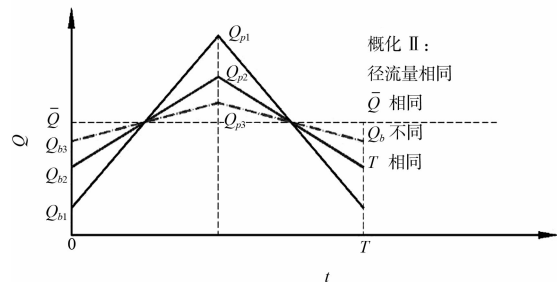


图 5 相同径流周期, 不同基流概化示意图

概化 III: 一个周期内枢纽下泄径流量不同, 非恒定程度越大, 下泄径流量越大, 但基流 Q_b 和波周期 T 均保持不变 (图 6)。

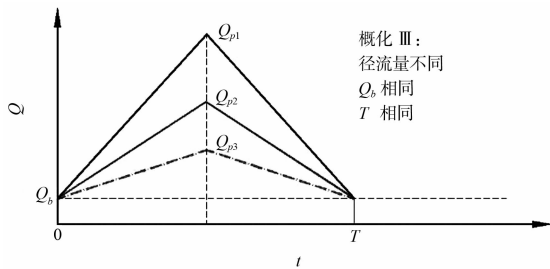


图6 相同基流周期, 不同径流概化示意图

概化 IV: 一个周期内枢纽下泄径流量不同, 下泄基流 Q_b 和峰流 Q_p 均相同, 但波周期 T 不同 (图7)。

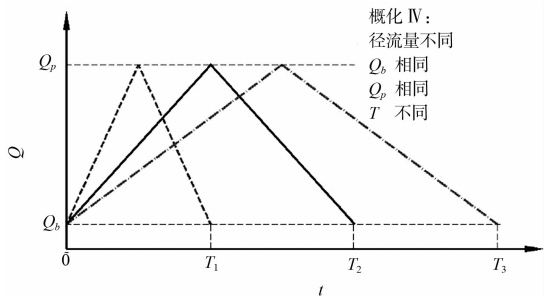


图7 相同基流峰流, 不同径流周期概化示意图

上述4种概化方式在电站实际运行过程中均有可能发生, 考虑通常情况下, 电站下泄基流较为固定, 为方便问题的研究, 本文以概化 I (电站下泄径流量相同、基流流量固定、涨水与落水时间相同、下泄流量变率不同)、概化 IV (电站下泄径流量不同、基流流量、峰值流量固定、涨水与落水时间相同、下泄流量变率不同) 作为非恒定流试验波形进行水槽试验。

2) 枢纽下泄非恒定强度的确定。

非恒定泄水波在向坝下游传播的过程中, 由于受摩阻、槽蓄等影响, 坝下水位、流量的变幅常逐渐减小, 坝下流量和沿程水位的变化大小直接反映出水电枢纽的泄流非恒定强度在沿程上的变化和大小。前人曾采用以下非恒定参数反映枢纽泄流非恒定强度的大小^[2-5]。

$$\Gamma' = \frac{1}{u_{*b}} \cdot \frac{\Delta h}{T_r} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{1}{U_m} \cdot \frac{\Delta h}{T_r} \quad (2)$$

$$\Omega = \frac{1}{u_{*b}^2} \cdot \frac{\Delta q}{\Delta T} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{u_{*p}^2 - u_{*cr}^2}{u_{*cr}^2} \left(\frac{h_p - h_b}{T_r} \frac{U_b + U_p}{2} \right) \quad (4)$$

上述非恒定参数中含有基流摩阻流速 U_{*b} , 单宽流量变化率 $\Delta q/T_r$, 水深变化率 $\Delta h/T_r$, 基流或峰流垂线平均流速 (U_b 或 U_p)。对于枢纽下泄的非恒定流, 常为日调节, 确定 U_{*b} , U_b , U_p 比较困难, 确定 $\Delta q/T_r$ 和 $\Delta h/T_r$ 相对容易, 所以基于流量变化率和水深变化率, 马爱兴提出表征枢纽下泄非恒定流强度的无量纲数 $P^{[6]}$, 如下

$$P_{r,f} = \frac{BT_{r,f}}{Q_p - Q_b} \left(\frac{h_p - h_b}{T_{r,f}} \right)^2 \quad (5)$$

式中: $P_{r,f}$ 为反映涨水或落水期水流平均非恒定强度的无量纲数; B 为河宽; T 为历时; 下标 r 和 f 表示涨水或落水期, Q_p 和 Q_b 分别表示非恒定流峰值流量 (最大流量)、基流流量 (最小流量), h_p 和 h_b 分别表示非恒定流最大、最小水深。

该无量纲数 P 仅需确定泄水波的水深、流量变化率及河宽等参数, 更具可操作性、更合理。

3 试验沙选择及配制

试验泥沙选择天然沙, 实际配制过程如下: 由振动筛初筛5组不同粒径大小的均匀沙, 其中粒径组 0.1~1 mm 和 1~2 mm 的均匀沙为天然黄沙 ($\rho_s = 2\ 630\ \text{kg/m}^3$), 粒径组 2~4 mm, 4~6 mm, 6~10 mm 的均匀沙由天然大颗粒卵石 ($\rho_s = 2\ 710\ \text{kg/m}^3$) 经过粉碎、打磨筛选而成, 按设计沙样中各粒径组占设计沙样总量的百分比, 由5组不同粒径大小的均匀沙按不同的比例混合配制而成 (图8)。

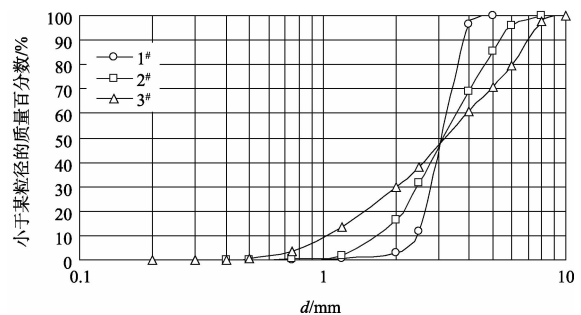


图8 试验配沙级配

4 非恒定流作用下均匀沙输移试验

非恒定流下的均匀沙输移试验的进口流量过程是以不间断的三角波形予以控制，总计开展了6组试验。试验过程中水槽进口基流的流量采用 $43.6\sim 45.3\text{ m}^2/\text{s}$ ，流量的峰值 $80.1\sim 118.7\text{ m}^2/\text{s}$ ，基流的水深 $10.8\sim 12.2\text{ cm}$ ，峰流的水深 $12.8\sim 15.8\text{ cm}$ ，试验的峰流水槽宽深比(B/h)为 $5.1\sim 6.3$ ，基流断面平均流速 $0.46\sim 0.50\text{ m/s}$ ，峰流断面平均流速 $0.8\sim 0.9\text{ m/s}$ ，峰流傅汝德数范围 $0.71\sim 0.75$ ，即试验水流均为缓流，采用的非恒定参数 $P = (1.83\sim 3.80) \times 10^{-4}$ 。

试验成果显示，在放水初期水流流速接近泥沙的起动流速，水槽床面上个别泥沙颗粒在近底水流脉动力作用下常先行颤动，当水流的瞬间作用力超过保持颗粒稳定的力量后，泥沙颗粒开始滚动并在惯性作用下与凹凸不平的水槽床面脱离接触，跳跃向前，经小段距离后，在重力作用下又再次落于床面，落下后或者继续滚动一小段距离，或者立即停止运动，直到水流瞬时作用力再次超过保持其稳定的力量后才再次跳跃。一般情况下颗粒单步跳跃移动时间很短，随着上游来流持续增强，作用在泥沙颗粒上的平均作用力也继续增加，床面泥沙颗粒的运动也由个别跃移逐渐变为少量跃移，泥沙颗粒跳起并落于床面后常继续跳跃向前运动，随着水流作用力的持续增加，床面泥沙颗粒也成群跃移前行。

通过对涨落水过程中床面泥沙颗粒运动情况的观察以及输沙率的测量，非恒定流作用下砾石输移的主要特性如下：

1) 泥沙颗粒输移有随机性、间歇性和阵发性。

由于近底水流的脉动性、颗粒位于床面位置的不确定性，即使在连续波涨水或落水的相同水流条件下，泥沙的输移仍然表现出明显的随机性；同一泥沙颗粒在运动过程中由于床面位置的不同，维持泥沙颗粒稳定的作用力也不同，泥沙颗粒在涨水或落水过程中时走时停，对同一颗粒而言，在水流强度较小时可能向前运动，当水流强度较大时却可能停止运动，这表现出泥沙运动的间歇性；当水流强度较大时，床面泥沙运动还表现出一定的阵发性^[7]。

从6个试验组次水槽水下单宽输沙率 g_b 随涨落水的变化情况看，当水流以相同的非恒定强度下泄时，各输沙率波明显不同，各波的输沙率波峰具有明显的脉动性。从试验成果看，水流的非恒定强度(P)对输沙率波峰的脉动性有影响，具体表现在当水流非恒定强度较小时，输沙率波峰的脉动则较为平稳，当水流非恒定强度较大时，输沙率波峰的脉动强度相应较大。

2) 输沙率变化与水流条件具有不同步性(表1)。

试验中流速的测量位置位于输沙率测量位置的上游约3 m处，水深的测量位置位于输沙率测量位置的上游0.87 m处。为比较相同位置处水流条件与输沙率之间的关系，将各处实测的水深、流速等水力参数按水位的传播速度计算至输沙率的测量位置，计算时考虑到距离较短，保持水力参数的波形不变，其传播速度根据自动水位仪之间的距离除以波峰到达的时差得到。

表1 各组输沙率、水流条件最大值达到时间

试验组次	非恒定参数 $P/(10^{-4})$	涨水期 时间 T_r/s	$t-g_{bmax}/s$	$t-U_{max}/s$	$t-h_{max}/s$	$t-g_{bmax} -$ $t-U_{max}/s$	$t-g_{bmax} -$ $t-h_{max}/s$	$t-U_{max} -$ $t-h_{max}/s$	$(t-g_{bmax} -$ $t-U_{max})/T_r$	$(t-g_{bmax} -$ $t-h_{max})/T_r$	$(t-U_{max} -$ $t-h_{max})/T_r$
UUM1	3.80	36	37.43	34	39	3.43	-1.57	-5	0.10	-0.04	-0.14
UUM2	3.02	40	34.04	39	43	-4.96	-8.96	-4	-0.12	-0.22	-0.10
UUM3	2.49	44	41.43	41	46	0.43	-4.57	-5	0.01	-0.10	-0.11
UUM4	1.82	48	45.04	50	57	-4.96	-11.96	-7	-0.10	-0.25	-0.15
UUM5	3.27	30	28.43	24	27	4.43	1.43	-3	0.15	0.05	-0.10
UUM6	3.09	35	28.43	35	40	-6.57	-11.57	-5	-0.19	-0.33	-0.14

从各个试验组次接沙容器处水深、垂线平均流速与推移质的单宽输沙率等要素随涨落水过程

的变化，可以看出水深、流速峰值与推移质的输沙率峰值到达时间不同步(图9)。流速峰值与输

沙率峰值的不同步基本在 $P = 3.2 \times 10^{-4}$ 附近发生反向, 对于 $P > 3.2 \times 10^{-4}$ 的强非恒定流, 流速峰值领先输沙率峰值的时间分别为 3.4, 4.4 s, 领先时间分别占非恒定流涨水期时间的 10% 和 1%, 而对于 $P < 3.2 \times 10^{-4}$ 的弱非恒定流, 流速峰值却滞后输沙率峰值, 滞后时间分别为 5.0, 5.0, 6.6 s, 分别占非恒定流涨水期时间的 11%, 9%, 18%; 各组试验中除了第 5 个试验组的水深峰值领先输沙率峰值外, 其余试验组水深的峰值均滞后于输沙率的峰值, 滞后的时间占涨水期时间的 5% ~ 30%; 流速的峰值领先水深的峰值时间占涨水期时间的 11% ~ 15%。

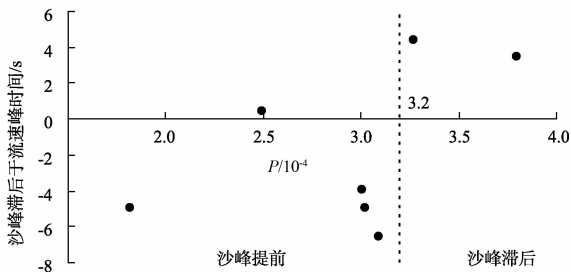


图9 沙峰与流速峰值不同步时间与 P 的关系

3) 输沙量与径流量、水流非恒定性关系。

采用试验实测资料对非恒定参数 P , 径流量 Q , 输沙量 W_b 进行线性回归分析^[8], 得到非恒定参数 P , 径流量 Q , 输沙量 W_b 的关系式:

$$W_b = 4 \times 10^{11} Q^{1.86} P^{3.81} \quad (6)$$

由此可见, 非恒定流在涨水和落水过程中, 泄水波引起床面输沙量与径流量、水流非恒定性有关, 式中 P 的指数为 3.81, 大于 Q 的指数 1.86, 表明水流非恒定强度对输沙量的影响敏感于径流量。

4) 单宽输沙率与单宽流量、水流非恒定性关系。

当水槽底坡固定、床面由某一粒径相对均匀的泥沙组成时, 非恒定流引起水槽床面泥沙的单宽输沙率 g_b 与单宽流量 q 及水流非恒定性 P 有关, 即:

$$g_b = f(q, P) \quad (7)$$

试验中通过点绘各组试验 g_b 与 q 的关系

(图 10), 可看出单宽输沙率 g_b 随着单宽流量 q 的增加而相应加大, 但两者之间的关系呈绳套曲线, 这由输沙率与流量变化的不同步引起, 绳套宽度大小与水流非恒定性 P 有关, 当 $P > 0.0003$ 时, 绳套曲线较宽, 即同流量条件下, 涨落水输沙率相差较大; 若 $P < 0.00025$, 绳套曲线较窄, g_b 与 q 趋于单一关系。

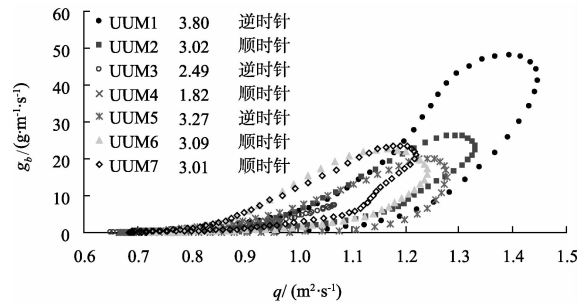


图10 推移质单宽输沙率 g_b 与单宽流量 q 关系

类似分析表明泄水波过程中推移质的最大单宽输沙率 g_{bmax} 与对应单宽流量 q 和水流平均非恒定性 (P) 有关, g_{bmax} 随单宽流量 q 或非恒定性 P 的增加而加大, 它们之间的经验关系可表示为:

$$g_{bmax} = 7.24 \times 10^5 q^{2.4} P^{2.2} \quad (8)$$

5 结论

1) 泥沙输移具有明显随机性、间歇性与阵发性。水流非恒定强度对输沙率波峰的脉动性有影响, 当水流非恒定强度 P 较小时, 输沙率波峰的脉动较为平稳; 当水流非恒定强度 P 较大时, 输沙率波峰的脉动强度相应较大。

2) 输沙率的变化与水流条件有不同步性。非恒定强度 $P > 3.2 \times 10^{-4}$ 的强非恒定流, 输沙率峰值滞后于流速峰值; 对于非恒定强度 $P < 3.2 \times 10^{-4}$ 的弱非恒定流, 输沙率峰值却先于流速峰值。

3) 水流非恒定强度对输沙量 W_b 影响敏感于径流量, g_{bmax} 随 P 或 q 的增加而相应增大。输沙量 W_b 和最大单宽输沙率 g_{bmax} 成果公式采用试验资料对其进行回归分析, 具有一定的普遍性, 在缺乏实测资料时可参考使用。