

水利设施运行中水质污染的混沌非线性效应及控制方法*

王海云^{1, 2)} 程胜高¹⁾ 王 军³⁾

(中国地质大学环境学院¹⁾ 武汉 430074)

(三峡大学环境工程系²⁾ 宜昌 443002) (山东经济管理干部学院图书馆³⁾ 济南 250014)

摘要: 采用混沌非线性技术对水利设施运行造成的水质污染效应进行了分析, 通过葛洲坝船闸运行实验结果发现, 受影响的12 km长的河道水位变幅1.50 m, 最大变幅时间11:00, 16:00, 20:00, 22:00时, 物理化学特性及主要污染物COD等在不同水域浓度差异极大, 表现高浓度区远离污染源分布区, 水体质量与河流水文期参数无明显变化, 关系模糊, 具有突变、约束、开放、自组织混沌非线性效应。应用耗散结构理论建立了水质污染非线性动力学模型, 经实测验证误差为3%~6%。

关键词: 水利设施; 混沌非线性; 水质污染效应; 动力学模型

中图法分类号: O 648

1 实验场基本情况

葛洲坝是长江干流上兴建的第一座大型水利枢纽, 枢纽在左岸二江航道布置承担大型客货船通航的特大型2号、3号船闸, 通过能力5 000万t以上, 坝上水位66 m, 坝下39 m, 最大水头27 m。闸室有效尺寸280 m × 34 m × 6 m, 最大水头27 m。船闸输水系统为等惯性型式, 出水支廊道布置对称, 出流扩散面积大, 闸室充、泄水顺畅平稳。当船从上游驶向下游, 充水阀门打开, 水流由取水口经主廊道进入支廊道, 向闸室充水到闸室水位上升到与上游水位一致, 打开上闸首人字门, 船只驶入闸室, 关闭上闸首人字门, 打开泄水阀门, 直到闸室水位下降到与下游水位齐平, 船只驶向下游, 完成船只过闸。船只由下游驶向上游过程与上述步骤相反。

船闸位于长江主江道左侧, 距上游1.2 km处为一级支流黄柏河的入长江汇合处, 因大坝修建水位的抬升, 形成一个人工静水湖泊, 构成了葛洲坝平湖风景区, 周边分布着生活废水及工业废水

污染源。整个船闸水域构成了一个半封闭的既不断接收上游来水, 同时向下游泄水, 又与外界环境中污染物质能量进行交换的水环境系统。水文参数、污染物来源、污染负荷的变化、生态系统信息量、水体生物化学过程存在很大的不确定性。

2 水文流场混沌非线性特征

船闸充、泄水过程中直接影响河道水环境的变化。为保证闸室内船只停泊条件的要求, 输水廊道内水流不容许为明流, 廊道内的流动属于非恒定有压流, 加之整个输水过程中频繁的后闭控制, 以满足输水阀门安全的工作条件, 从而导致船闸水域形成复杂的水流。高速水流在闸室底缘处发生分离, 在强烈的剪切流作用下形成旋涡, 在向下游输移过程中通过合并与卷吸作用, 迅速形成大旋涡, 旋涡的发生与发展使得局部流态时空变化复杂, 并迅速扩大形成整个紊动流场, 非线性特征明显。

船闸约40 min开闭一次, 将上游37万m³水

收稿日期: 2007-11-06

王海云: 男, 52岁, 博士生, 副教授, 主要研究领域为水环境污染控制

* 三峡大学重大科技基金项目资助(批准号: 2005-3)

一次充入闸室并下泄, 重复运行, 闸室水力参数实测值见表 1. 受影响河流水文流场发生了变化, 经测量天然河流的水文特征及要素很难体现, 受人类活动控制水文特征十分明显, 已达到主控地位. 受影响的 14 km 长的河道水位变动明显, 其中 12 km 长的河道常年在 24 h 内水位变幅 1.50 m, 水位最大变幅时间分别在 11:00, 16:00, 20:00, 22:00, 见表 2. 表明水流运动由原天然季节型转变为人为控制型. 水流由层流转变为紊流^[1]、回流

混合流, 河流水环境条件发生了根本性的改变. 水文流场各参数(流速、流向、流态、扩散系数等)是一个短时间的变量值、动态值, 表现了典型的非线性特征. 葛洲坝船闸运行水环境系统不断地与外界发生物质和能量的交换, 具有非平衡性、非线性、多尺度性、突变性、自组织性、自相似性、有序性和随机性^[2], 是一个复杂的动态系统, 常规的数学模型、计算方法和水污染控制理论难以满足运行过程中实施水污染控制的要求.

表 1 葛洲坝船闸输水系统运行相关水力参数实测值

监测日期	实测次数	实测时段	水位组合/m	最大惯性 超高值/m	闸室水位上升 速度/(m·min ⁻¹)	最大输水流量 /(m ³ ·s ⁻¹)
2005-01-10	1	09:50~10:02	65.85~39.12	0.49	4.4	785.60
	2	11:00~11:18	65.82~39.10	0.47	4.4	787.20
	3	12:45~13:05	65.83~39.33	0.41	4.4	784.16
	4	14:30~14:45	65.85~39.30	0.37	4.4	785.10
	5	15:50~16:02	65.80~39.33	0.43	4.4	785.55
2005-01-12	1	10:40~10:55	65.83~38.62	0.35	4.4	798.10
	2	11:55~12:08	65.90~38.70	0.38	4.5	786.23
	3	12:56~13:11	65.86~38.90	0.37	4.4	785.20
	4	13:55~14:10	65.87~38.74	0.38	4.4	785.33
	5	15:50~16:00	65.86~38.85	0.40	4.4	786.10

表 2 受影响河道水位动态测量结果(2006-03-03)

水位测点	距船闸 /km	07:00		11:00		16:00		20:00		22:00	
		高程/m	变幅/m	高程/m	变幅/m	高程/m	变幅/m	高程/m	变幅/m	高程/m	变幅/m
对颈窝	1	66.50	0	67.0	+0.50	66.25	-0.25	66.10	-0.40	65.75	-0.75
黄柏河桥	4	67.30	-0.35	67.10	-0.55	67.15	-0.50	68.25	+0.60	66.95	-0.70
曹家坊	8	74.45	-0.28	74.30	-0.43	74.44	-0.29	74.0	-0.73	73.90	-0.83
晓溪塔	12	77.63	+0.44	77.30	+0.11	77.60	+0.41	76.80	-0.39	76.46	-0.73

3 水质污染混沌非线性效应

2004 年对研究水域采用梅花型布点法实施采样监测, 结果表明, 主要污染物为有机污染物, 化学需氧量、高锰酸盐指数、总磷、氨氮浓度在不同水域差异很大, 总体表现高值浓度区平面分布远离污染源分布区, 关系表现模糊, 水体质量与河流水文期参数(枯、丰、平水期)无明显变化关系.

上述污染效应充分体现了水质污染系统自身并不具有纯粹的随机性和偶然性, 也不是简单的无序, 虽然没有明显的周期和对称, 但是却具有丰富的内部层次的有序结构, 蕴涵着深层次的结构和秩序, 在一定条件下以某种方式显示出来. 它的定常状态不是通常概念的确定性运动的三种状态: 静止(平衡)、周期运动、准周期(拟周期)运动, 而是一种始终局限于有限区域, 且轨道永不重复的, 性态复杂的运动混沌非线性特征.

4 水污染非线性动力学方程

4.1 模型建立
平衡方程

$$\frac{ds}{dt} = x - y \tag{1}$$

动力学方程

$$S = \sum_{m=1}^M a_m(x, y) \frac{d^{(m)}x}{dt^{(m)}} + \sum_{n=1}^N b_n(x, y) \frac{d^{(n)}y}{dt^{(n)}} \tag{2}$$

式(1), (2)中: S 为单元水体调蓄容量, L³; x 为单元水体入流量, L³/h; y 为单元水体出流量, L³/h; a_m(*) 为 m 阶入流容量的非线性系数; b_n(*) 为 n 阶消耗容量率的非线性系数.

设定船闸水体运行中的动力调蓄具有不同的结构, 闸室的开闭频率并联式串联的非线性水体, 由式(1)、式(2)可导出初次船闸运行水质状况

$$Q_1(t) = \frac{1}{1 + KD} I(t) \tag{3}$$



式中: $Q_1(t)$ 为初次运行水质; $I(t)$ 为入流量; K 为常数, 相当于运行的平均滞后时间; D 为微分算子, $D = d/dt$

船闸水环境系统一般需要 3 个状态变量即可充分描述 设 x, y, z 为 3 个不同的序列, 应用之前, 先对其标准化, 依据系统的物理性质, 将 f_i (多个变量) 设为某种非线性函数, 本系统设如下形式

$$\frac{dx}{dt} = a_{1x} + a_{2y} + a_{3z} + a_{4x}^2 + a_{5y}^2 + a_{6z}^2 + a_{7xy} + a_{8xz} + a_{9yz} \quad (4)$$

$$\frac{dy}{dt} = b_{1x} + b_{2y} + b_{3z} + b_{4x}^2 + b_{5y}^2 + b_{6z}^2 + b_{7xy} + b_{8xz} + b_{9yz} \quad (5)$$

$$\frac{dz}{dt} = c_{1x} + c_{2y} + c_{3z} + c_{4x}^2 + c_{5y}^2 + c_{6z}^2 + c_{7xy} + c_{8xz} + c_{9yz} \quad (6)$$

由方程(4)~(6)组成的Jacobi 矩阵 J 特征多项式为 $\lambda^3 + A\lambda^2 + B\lambda + C = 0$, 由动力学稳定性分析理论得知, 水环境容量系统稳定的充分条件可满足: $A > 0, AB > C, C > 0$, 否则系统为不稳定状态, 形成污染

混沌系统所有的L yapunov 特征指数之和 $K_1 = \sum L E_j$ 称为Kolmogorov 熵^[3], 它给出了系统信息平均产生速率的一个量, 表示在相空间中一个无穷小体积元在某伸长方向上的平均指数增长 $1/K$ 表示系统的误差每增长某个倍数所需经历的时间, 称之为污染系统可预测时间尺度

用Runge-Kutta 法对式(4)~(6)作数值积分可求出预测值, 比较预测值和观察值可估计预测的精度 我们可以非线性动力学理论为基础^[4-5], 根据时间序列^[6]资料提出船闸动态水污染形成过

程的非线性动力学模型, 进而预报水污染的发生, 预测效果良好, 具有一定的实用价值

4 2 污染物预测与验证

选取 2004 年 1~12 月份监测COD 时间序列资料来计算吸引子维数, 得COD 的饱和维数为 2.792, 其维数非整数, 所对应的相空间数 m 为 3, 其动力学过程为 3 个独变变量 设 X, Y, Z 分别代表COD 预测浓度 3 个不同的观测序列 并采用本监测序列的平均值对数据进行标准化处理, 用非线性方程(4)进行计算, 式中 $a_1, a_2, \dots, a_9; b_1, b_2, \dots, b_9; c_1, c_2, \dots, c_9$ 为反演确定的常数 经标准处理, 用反演理论确定方程式中的各项待定参数, 得到船闸水域有机物污染过程的非线性动方程组为

$$\frac{dx}{dt} = -1.260x - 2.901y + 4.015 + 0.249x^2 + 0.119y^2 - 3.304z^2 + 1.441xy - 0.853xz + 2.499y^2 \quad (7)$$

$$\frac{dy}{dt} = -0.929x - 2.495y + 1.933 + 0.303x^2 + 0.956y^2 - 1.987z^2 + 1.899xy - 0.149xz + 2.197y^2 \quad (8)$$

$$\frac{dz}{dt} = -1.401x - 2.274y + 1.951 + 0.298x^2 + 0.120y^2 - 1.709z^2 + 0.130xy - 0.727xz + 1.596y^2 \quad (9)$$

将上述方程进行数值积分, 经量纲还原后得出预测结果 对 2004 年实测数据进行验证, COD 预测值和实测值对比结果见表3 由表3 得出COD 预测值和实测值的相对误差为3%~6%, 说明所建立的非线性动力学方程预测精度是满意可行的

表3 葛洲坝船闸水域COD 预测值与实测值对比结果

	时间/月											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
预测值/(mg·L ⁻¹)	23.9	21.7	25.4	23.4	26.4	22.0	23.4	27.5	25.8	25.9	22.4	21.7
实测值/(mg·L ⁻¹)	24.2	23.7	22.8	21.7	27.5	21.7	22.9	27.1	24.0	22.3	20.9	20.5

参 考 文 献

[1] Ambrosetti A, Prodi G. A primer of nonlinear analysis[M]. Taipei: Taipei Publisher of Taiwan University, 2001: 11-23

[2] 彭 静. 线性与非线性紊流模型及其在丁坝绕流中的应用[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(5): 589-594

[3] 陈继光. 基于L yapunov 指数的观测数据短期预测[J]. 水利学报, 2001(9): 67-70

[4] Konishi K. Stability extended delayed feedback con-

trol for discretetime chaotic systems[J]. IEEE Trans. Circuits and Systems, 1999, 46(10): 1285-1288

[5] Islam M N, Sivakumar B. Characterization and prediction of runoff dynamics: a nonlinear dynamical view[J]. Advances in Water Resources, 2002, 25(2): 179-190

[6] Jayawardena A W, Li W K, Xu P. Neighbourhood selection for local modeling and prediction of hydrological time series[J]. Journal of Hydrology, 2002, 258: 40-57.

Chaotic Nonlinear Effect of Water Pollution in Operation of Water Conservancy and the Control Method

Wang Haiyun^{1,2)} Cheng Shenggao¹⁾ Wang Jun³⁾

(China University of Geosciences, environment college, Wuhan 430074)¹⁾

(Department of Environment Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002)²⁾

(Library of Shandong Economic Management Institute, Jinan 250014)³⁾

Abstract

In this paper, the effect of water pollution caused by operation of water conservancy is analyzed with the chaotic nonlinear method. According to the result of ship lock gate operation experiment in Gezhouba, it is found that the amplitude of water level changing is 1.50m in influenced river which is 12km long, and the time of max amplitude is 11:00, 16:00, 20:00, 22:00. Physical chemistry properties and main pollution (COD, etc.) are greatly different in different areas. The high polluted area is far from the pollution source. Water quality and parameter of hydrology are not changed obviously, the relation between them is obscure, and has a chaotic nonlinear effect. A nonlinear dynamic model of water pollution is built with the theory of dissipation structure. It is verified that the error is 3%~6% in practice.

Key words: water conservancy; chaotic nonlinear; effect; model

(上接第315页)

[5] 汪 澜. 水泥混凝土: 组成·性能·应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.

[6] 徐世烺, 赵艳华, 吴智敏, 等. 楔入劈拉法研究混凝土断裂能[J]. 水力发电学报, 2003(4): 15-22.

Study on the Fracture Properties of Different Type Concretes Affected by Simulation Conditions

Tian Aoshuang Jia Yandong Liu Hongyan Sun Guozhong

(Civil Engineering Department, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001)

Abstract

In this paper, the fracture properties of ordinary Portland concrete and fly ash concrete affected by simulation condition (dry-immersion and freeze-thaw recycle tests) are researched. The experimental results indicate that after affected by simulated condition, their compressive strengths are increased than before except that FC30's strength decreases appreciably owing to the ingredient and proportion, the substitute ratio and etc. The important parameter-fracture toughness K_{Ic} increases with the compressive strength f_c , but fracture energy G_F changes indistinctively.

Key words: 28 day ages; simulation condition; compressive strength; fracture toughness; fracture energy