

人工神经网络非线性时序模型在水文预报中的应用*

王文圣, 丁晶, 刘国东

(四川大学, 四川 成都 610065)

摘要: 首先构造出人工神经网络非线性时序模型, 然后用该模型进行单变量和多变量时间序列预报研究。为了与传统的随机水文模型对比, 选择了自回归模型。以日流量序列为例, 研究表明, 人工神经网络非线性时序模型预报效果不错, 可以在水文预报中加以应用。

关键词: 人工神经网络非线性时序模型; 自回归模型; 单变量; 多变量; 日流量预报

中图分类号: TV 12

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2000)增-0008-03

1 引言

水库的运行与管理都要涉及到它的入流——径流时间序列的预报和分析。目前常用的水文预报方法可分为三类: 经验预报、水文学概念性模型和数学模型。上述三种方法通常都是假定水文系统是线性的, 然后用线性递推和组合的方法来描述。事实上, 水文系统是一个严格的非线性系统, 它包含着系统时间和空间变化的非线性特性。因此, 要延长预见期和提高预报精度, 有必要在水文中应用非线性水文模型, 如门限自回归模型, 指数自回归模型^[1], 双线性模型^[2]等, 初步结果表明是成功的。

近年来, 又掀起了人工神经网络^[3]研究热潮。人工神经网络(ANN)是一个由简单信息处理单元(神经元)组成的高度相关的网络系统, 是非线性动力学系统, 它的优点明确^[4]: 人工神经网络的应用不需要基本过程的前期知识; 在研究应用中不需识别过程的各部分之间的复杂关系; 人工神经网络既不需要约束, 也不需要事先假定解的结构, 它总是收敛于一个最优解; 它能并行快速处理大量信息; 它是高度非线性网络, 具有良好的非线性逼近功能。ANN 在水文水资源中得到了不断的应用和研究^[5], 从文献^{[4][6]}中可以看出它在水文预报和模拟中的应用是成功的。

本文首先构造出人工神经网络非线性时序模型, 然后用该模型进行单变量和多变量时间序列预报研究。为了与传统的随机水文模型对比, 文中选择了自回归模型。以日流量序列为例, 研究表明, 人工神经网络非线性时序模型预报效果不错, 可以在水文预报中加以应用。

2 人工神经网络非线性时序模型

水文时间序列包含了丰富的水文系统信息, 它不仅是过去随时间的演变, 而且可以用来预测未来的发展规律和趋势。水文时间序列如径流、洪水是水文系统随时间的输出, 一般呈现出复杂的、动态的、高度的非线性(如吸引性、耗散性、非平稳性、高维性、广泛联接性和自适应性等)。因此, 应用非线性时间序列分析方法进行分析和计算是必要的。人工神经网络模型就是一种非线性模型。本文用人工神经网络来构造水文时间序列预测模型, 称为人工神经网络非线性时序模型。根据研究对象可分为单变量人工神经网络非线性时序模型和多变量人工神经网络非线性时序模型。

2.1 单变量人工神经网络非线性时序模型

单变量人工神经网络非线性时序模型定义如下:

$$X_t = \varphi(X_{t-1}, \dots, X_{t-i}, \dots, X_{t-p}) + \epsilon_t \quad (1)$$

式中 $\{X_t\}$ ($t=1, 2, \dots, n$) 为单变量水文时间序列; p 为模型输入节点数; ϵ_t 为白噪声; φ 为人工神经网络非线性映射, 体现在神经网络结构和联接权重上, 它不能用一具体函数形式表达, 为一隐式函数, 能反映系统各种复杂的、动态的、高度非线性的关系。

真实水文系统是非线性的, 它受多因素影响, 表现为错综复杂的关系, 这种关系用一具体函数(不管线性还是非线性)表达是不准确的。然而, 这正是人工神经网络模型的优势所在。模型结构如图 1 所示(以三层网络为例)。单变量人工神经网络非线性时序模型是多输入单输出人工神经网络模型, 它研究的是单变量水文时间序列, 类似于随机水文学中的单变量自回归模型。就水文预报而言, 对(1)式取数学期望就可递推预报第 k 滞时水文特征值, 即:

$$\hat{X}_{t+k} = \varphi(\hat{X}_{t+k-1}, \hat{X}_{t+k-2}, \dots, \hat{X}_{t+k-p})$$

收稿日期: 1998-01-21

*基金项目: 自然科学基金资助项目(编号: 49571017)

2.2 多变量人工神经网络非线性时序模型

多变量人工神经网络非线性时序模型即多输入多输出人工神经网络模型,它研究的是多变量时间序列,类似于随机水文学中的多变量自回归模型。所谓多变量可以是同一测站上的几个变量,如降水、径流、蒸发等,也可以是不同测站上的同一变量,或者是不同测站上的几种不同的变量。模型定义如下:

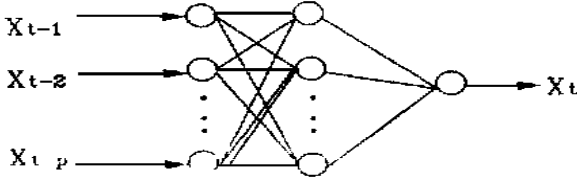


图1 单变量人工神经网络非线性时序模型图

$$\begin{cases} X_t^{(1)} = g_1(X_{t-1}^{(1)}, \dots, X_{t-1}^{(1)}, X_{t-1}^{(2)}, \dots, X_{t-1}^{(2)}, \dots, X_{t-1}^{(m)}, \dots, X_{t-1}^{(m)}) + \epsilon_t^{(1)} \\ X_t^{(2)} = g_2(X_{t-1}^{(1)}, \dots, X_{t-1}^{(1)}, X_{t-1}^{(2)}, \dots, X_{t-1}^{(2)}, \dots, X_{t-1}^{(m)}, \dots, X_{t-1}^{(m)}) + \epsilon_t^{(2)} \\ \vdots \\ X_t^{(m)} = g_m(X_{t-1}^{(1)}, \dots, X_{t-1}^{(1)}, X_{t-1}^{(2)}, \dots, X_{t-1}^{(2)}, \dots, X_{t-1}^{(m)}, \dots, X_{t-1}^{(m)}) + \epsilon_t^{(m)} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\{X_t^{(i)}\}$ ($t = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m$) 为 i 变量 t 时刻水文特征值; m 为网络输出节点数, 即水文变量

个数; $\sum_{i=1}^m P_i$ 为网络输入节点数, P_i 为第 i ($i = 1, 2, \dots, m$) 变量的输入节点数; $\epsilon_t^{(i)}$ (i 同前) 为 t 时刻的白噪声; g_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 为神经网络非线性映射, 为一隐式函数, 体现在神经网络结构和联接权重上。

多变量人工神经网络非线性时序模型结构如图2所示(以三层网络为例)。对(2)式取数学期望即可进行第 k 滞时预报(递推)。

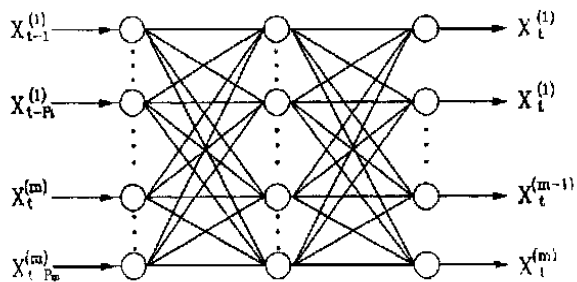


图2 多变量人工神经网络非线性时序模型图

3 随机水文模型

为了与人工神经网络非线性时序模型对比, 本文选用随机水文学中普遍使用的自回归模型, 它包括模型阶数识别、参数估计和检验三部分, 见文献^[6]。下面列出自回归模型形式。

多变量 P 阶自回归模型(MAR(P))为:

$$Z_t = A_1 Z_{t-1} + A_2 Z_{t-2} + \dots + A_P Z_{t-P} + U_t \quad (3)$$

式中 $Z_{t-i} = (Z_{t-i}^{(1)}, Z_{t-i}^{(2)}, \dots, Z_{t-i}^{(m)})^T$ ($i = 0, 1, 2, \dots, P$)

为标准正态化序列, m 为变量个数; A_j ($j = 1, 2, \dots, P$) 为 $m \times m$ 阶矩阵; $U_t = (U_t^{(1)}, U_t^{(2)}, \dots, U_t^{(m)})^T$ 为正态白噪声。它的第 k 滞时预报为 $\hat{Z}_{t+k} = A_1 \hat{Z}_{t+k-1} + A_2 \hat{Z}_{t+k-2} + \dots + A_P \hat{Z}_{t+k-P}$ 。当 $m = 1$ 时, 式(3)退化为单变量 P 阶自回归模型AR(P), 即:

$$Z_t^{(1)} = \varphi Z_{t-1}^{(1)} + \varphi Z_{t-2}^{(1)} + \dots + \varphi Z_{t-P}^{(1)} + U_t^{(1)} \quad (4)$$

式中 φ ($i = 1, 2, \dots, P$) 为自回归系数, 其余意义同上。它的第 k 滞时预报为

$$\hat{Z}_{t+k}^{(1)} = \varphi \hat{Z}_{t+k-1}^{(1)} + \varphi \hat{Z}_{t+k-2}^{(1)} + \dots + \varphi \hat{Z}_{t+k-P}^{(1)}$$

4 实例分析与计算

4.1 基本资料的收集与处理

本文基本资料来源于金沙江流域屏山站和屏山站与宜宾区间(简称宜~屏区间)。屏山站具有1940~1987年共48年日流量过程线, 用 $\{X_t\}$ 表示; 宜~屏区间日流量由区间高场站实测日流量按面积比获得1940~1987年共48年资料, 用 $\{Y_t\}$ 表示。

(1) 规范化处理。将实测日流量资料进行规范化处理后就可用于人工神经网络模型的建模。规范化如下:

$$X_t = \frac{X_t - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5)$$

$$Y_t = \frac{Y_t - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad (6)$$

式中 X_t, Y_t 分别为屏山站的宜~屏区间规范化日流量; X_{\max}, X_{\min} 表示序列 $\{X_t\}$ 的最大值和最小值; Y_{\max}, Y_{\min} 表示序列 $\{Y_t\}$ 的最大值和最小值。

(2) 标准正态化预处理。由计算知屏山站和宜~屏区间日流量是非平稳偏态序列。在建立自回归模型时必须进行标准正态化预处理。本文使用W-H逆变换, 具体见参考文献^[1]。

4.2 预报方案

用人工神经网络非线性时序模型和自回归模型预报单变量和多变量日流量的过程, 其预报质量用确定性系数 dy 和合格率 δ 来衡量。确定性系数 dy 定义如下:

$$dy = 1 - s^2/s^2 \quad (7)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - ZY_i)^2/n} \quad (8)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2/n} \quad (9)$$

式中 s 为预报误差的均方差; s 为水文特征量的均方差; Z_i 为实测值; ZY_i 为预报值; \bar{Z} 为实测值均值; n 为序列长度。合格率 δ 定义如下:

$$\delta = n_e/n \times 100\% \quad (10)$$

式中 n_e 为小于等于相对误差 e 的样本数; n 为总

样本数。本文相对误差 e 取 10%。

4.3 模型结构的确定

4.3.1 神经网络非线性时序模型结构的确定

文献^[7]指出,一个三层神经网络模型就可解决一般函数的拟合、逼近问题。水文预测预报实际上就是函数拟合问题,因此,三层神经网络能满足要求。输入层、隐层和输出层节点数的选取取决于研究对象及其复杂程度。对水文时间序列来说,不管是单变量还是多变量神经网络非线性时序模型,它的输出节点数是很容易确定的,但网络输入节点数的确定目前仅靠经验判断,无定量指标;本文沿用赤池准则(AIC)来确定网络输入节点数,网络隐层节点数的确定比较困难,本文根据预报效果定性确定。

首先用屏山站和宜~屏区间实测日流量分别建立对应的单变量神经网络非线性时序模型,模型具体结构如图3、4所示。再用屏山站和宜~屏区间实测日流量建立两变量神经网络非线性时序模型,模型具体结构如图5所示。

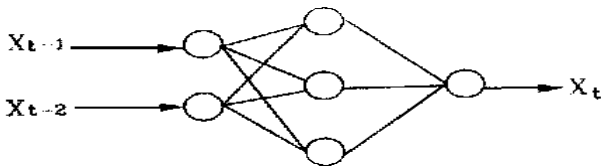


图3 屏山站ANN非线性时序模型图

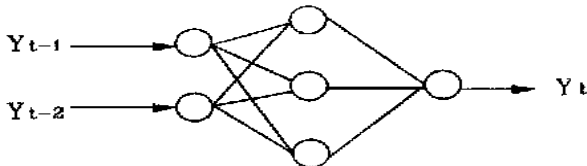


图4 宜~屏区间ANN非线性时序模型图

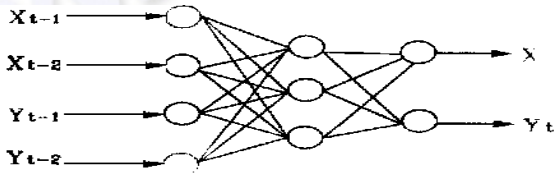


图5 屏山站与宜~屏区间两变量ANN非线性时序模型图

4.3.2 自回归模型结构的确定

用AIC准则确定模型阶数,由矩法估计参数。屏山站和宜~屏区间实测日流量可分别用AR(2)模型表征或用MAR(2)模型联合表征。

4.4 模型的评定与检验

用1940~1983年共44年日流量资料进行模型评定(神经网络采用改进的BP算法^[8]训练);用1984~1987年4年日流量资料进行模型检验。本文只作了预见期为1d、2d和3d三种。各模型评定与检验效果见表1(以屏山站为例)。从表1中可看出,

神经网络非线性时序模型的预报效果不错比自回归模型优。

表1 模型评定与检验效果表

预见期 /d	类别 模型	模型评定			模型检验				
		单变量 ANN	多变量 AR(2)	MAR	单变量 ANN	多变量 AR(2)	MAR		
1	dy	0.9824	0.9653	0.9867	0.9731	0.9820	0.9574	0.9760	0.9631
	δ	91.56	89.82	91.41	90.42	91.78	88.60	89.20	88.34
2	dy	0.9201	0.9061	0.9314	0.9057	0.9168	0.8964	0.9120	0.8870
	δ	86.76	82.96	85.80	83.70	84.34	81.79	85.10	82.40
3	dy	0.8835	0.8379	0.8764	0.8342	0.8674	0.8219	0.8571	0.8173
	δ	80.43	77.48	78.70	77.25	79.52	75.81	80.18	76.12

5 结语

通过以上的计算和分析,可以得出如下结论:

(1)用本文提出的单、多变量神经网络非线性时序模型预报日流量过程,并与随机水文学中的自回归模型进行对比,实例分析和计算表明,神经网络非线性时序模型预报精度较高,可用于水文水资源系统中的时间序列预报。

(2)神经网络模型具有很强的非线性逼近功能,能拟合、逼近复杂的输入与输出之间的映射关系,这种映射关系是隐式的,较一般显式映射关系(线性或非线性)适应性强,因此,神经网络模型适合于研究复杂的水文水资源系统。

(3)虽然目前神经网络模型的研究已有所进展,但还存在一些不足。如隐层数与隐层节点数的合理确定还是凭经验,它与研究对象的复杂程度有关,如何建立隐层数和隐层节点数与研究对象的复杂程度间的定量表达式是需要探讨的。又如网络训练方法需进一步改进。在水文水资源系统中常采用BP算法,该法存在着收敛速度慢和局部极小问题,其改进方案需进一步探索。

参考文献:

- [1] 王文圣,丁晶,等 一类洪水预报的非线性时序模型——指数自回归模型[J]. 四川联合大学学报(工程科学版), 1997, (6).
- [2] 袁鹏,王正勇 一种洪水随机模拟新模型——双线性模型[J]. 成都科技大学学报, 1996, (6).
- [3] 张立明 神经网络模型及其应用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1994.
- [4] H. Raman et al, multivariate modeling of water resources time series using artificial neural network hydrological sciences Journal- des Sciences Hydrologiques, 40, 2, april 1995.
- [5] 张翔,丁晶 水文水资源神经网络模型的研究[J]. 水文科技信息, 1996, (2).
- [6] 丁晶,邓育仁 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988.
- [7] Hecht-Nielsen R. Komogrov's mapping neural network existence theorem. Proceedings of the international conference on neural networks New York, IEEE Prss, 1987(3).

(下转第30页)

采用 525 号江油中热大坝水泥,在闸墩上临时架接供水管,拌合用水的 PH 值= 8.45,不掺外加剂,所用材料指标均能满足规范要求,浆液水灰比按 $(0.45 \sim 0.5) : 1$ 控制,浆液密度为 $1.85 \sim 1.90 \text{ g/cm}^3$ 。

3.5.3 灌浆工艺

在墩头端,补偿张拉后 48 h 内进行灌浆,在灌浆前,用氧焊切割锚具外长出的钢丝,用环氧沙浆封堵每孔锚索的两端头。主次锚索均采用二次起浆,二次并浆一次倒灌的方法施工,出浆口均设压力表,其压力控制在 $0.1 \sim 0.2 \text{ MPa}$,其工艺如下:

(1) 第一次灌浆。

主次锚索均由夹片端 $\Phi 90.5 \text{ cm}$ 进浆管进浆,墩头端一序、二序回浆管出浆兼排气,待出浆浓度密度大于 1.85 g/cm^3 时关闭进浆管,进行压力式并浆 30 min 。

(2) 第二次灌浆。

以备用进浆管与 $\Phi 90.5 \text{ cm}$ 进浆管同时进浆,其它工序同第一次灌浆,完毕后封堵进浆管。

(3) 倒灌。

顺灌结束 30 min 后,从二序出浆管进浆,一序出浆管出浆,待收浆密度大于 1.85 g/cm^3 ,水灰比在 $0.5 : 1$ 以下后迅速封堵进浆管,结束灌浆。

(4) 灌浆质量检查。

由于精心组织施工,严格施工过程控制,灌浆结束后会同监理检查:每束孔均密实,满足设计要求。

4 结 语

该工程于 1998 年 4 月 2 日验收合格,交付蓄水,且经历了 1998 年白龙江百年一遇的洪峰考验,经多方观测分析工况良好,证明了所采用的后张法预应力锚索施工技术比较成熟,施工方案合理可靠。通过中孔预应力闸墩的施工,笔者总结出了以下几点经验,供设计和施工人员参考。

4.1 初张拉循环次数

初张拉循环次数主要与张拉千斤顶行程有关,在钢丝较短的情况下,一次能张拉到设计吨位就不必再进行二次循环。因为,循环次数越多,对钢丝锁紧夹片的内齿损伤就越严重,这样,锚索锁定后,预

应力损失也相应增加。所以,本工程次锚索未采用二次循环。

4.2 夹片安装注意事项

由于夹片分为 3 瓣,安装对位时端头一定要平齐,前后相差不应超过 2 mm ,否则无法张拉到设计吨位夹片便脱扣了。如本闸墩次锚补张拉时,个别夹片就出现了脱落,后又重新安装夹片,重新张拉,因此,安装时要严格要求。

4.3 培训的重要意义

锚索张拉掌握每一台油压机的性能是关键,这就必须保证有专人操作,上岗前先进行培训,掌握机器的原理和技术性能。稳荷是为了保证所加荷载千斤顶的伸长量;缓慢升荷是为了保证钢丝的弹性增长均匀,不致使钢丝因局部拉力大而拉断,缓慢升荷可使拉力沿钢绞线分力,使钢绞线受力均匀。所加荷载不能超过弹性极限应力,只有这样才能保证钢丝是弹性变形,符合虎克定律等力学规律。

4.4 如何保证锚索张拉吨位

应从下面几个方面作好张拉前的准备工作:每个夹片在穿之前,牙缝之间必须清洗干净,不能存在任何杂物;夹片在安装就位后,3 个夹片的尾端必须在同一个平面上;墩头锁紧端补偿张拉后,锁紧螺母必须保证锁紧;循环张拉中,第一次张拉的拉力和第二次张拉的拉力,要保证锁紧牙扣,不在钢绞线上的同一位置(与上次张拉咬合位置不再重复)。

4.5 国产钢丝的性能

国产钢丝材质较硬,墩头直裂纹多,墩头直径小,在墩头压力为 42 MPa 时,墩头直径为 $9.5 \sim 10.5 \text{ mm}$,且在张拉时夹片容易脱扣,现场观察脱扣夹片,发现夹片的牙扣都磨平了,与钢丝材质过硬有关。

作者简介:

常明云(1966 年-),男,四川广元人,中国水利水电第五工程局第四分局生产办工程师,现从事水电施工生产管理工作;

杨振华(1966 年-),男,浙江桐乡人,中国水利水电第五工程局第六分局机械队队长,工程师,现从事施工机械管理工作。

(上接第 10 页)

[8] 沈清,汤霖 模式识别导论[M].北京:国防科技大学出版社,1991.

作者简介:

王文圣(1970 年-),男,四川宣汉人,四川大学水电学院讲师,博士,从事水文水资源新理论新方法研究;

丁 晶(1935 年-),男,江苏扬州人,四川大学水电学院教授,博士生导师,从事水文计算和预测研究;

刘国东(1962 年-),男,安徽六安人,四川大学水电学院副教授,博士,从事水环境研究

ABSTRACT

The Neural Network Model for Reservoir Operation

FU Shipeng ZHAO Wen-qian MA Guang-wen

(State Key Hydraulic Laboratory of High Velocity Flow of Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065)

Abstract: Because there are much nonlinear relationship in reservoir operation, good results are hard to gained by using traditional linear relationship. Therefore, a neural network model for long tem reservoir operation is established by BP algorithm. It is more practical and superior.

Key words: reservoir operation; neural network; BP algorithm

Application of Artificial Neural Network Model with Nonlinear Time Series in Hydrologic Forecast

WANG Wen-sheng DENG Jing LIU Guo-dong

(Sichuan University, Chengdu, Sichuan, 610065, China)

Abstract: At first, the artificial neural network(ANN) models with nonlinear time series are established, then time series for single variable and multiple variables are studied with the models. The performance of the ANNs is compared with that of the auto-regressive models. The results have showed that the ANNs are effective in hydrologic forecast.

Key words: the artificial neural network models with nonlinear time series; auto-regressive model; single variable; multiple variables; daily discharge forecasting

Application of Percolation Theory in the Water and Soil Conservation for Slope

WANG Xie-kang AO Ru-zhuang FANG Duo

(State Key Hydraulic Laboratory of High Velocity Flow of Sichuan University, Chengdu, Sichuan, 610065, China)

Abstract: The slope erosion is the original zone of water and soil loss and water and soil on slope must be treated quickly. because rainfall infiltration on slope, afflux and sediment transport is a percolating process, water and soil conservation for cultivated and non-cultivated land on slope is carried out by the percolation theory. Comparing percolation thresholds among the different tow-dimensional percolation models, theoretically, water and soil loss is effectively controlled on slope with honeycomb shape and by hydraulic and biological engineering, which is a new method for water and soil conservation.

Key words: slope erosion; water and soil loss; percolation theory; biological engineering

Study on Engineering Geological Problems at Tanzitai Reservoir in Fengdu County of Chongqing

DENG Rong-gui FU Xiaom in

(Civil Engineering Department of Chengdu Technical Institute, Chengdu, Sichuan, 610059, China)

Abstract: Based on numerous data obtained from field investigations, detail description and in-depth, systematical analysis on engineering geological problems at Tanzitai reservoir in Fengdu County of Chongqing are provided and the results are used as design basis for Tanzitai reservoir.

Key words: reservoir analysis; stability of rock mass; reservoir slope

Nonlinear Properties of Furrow Profiles of Debris Flow in Bailong River Basin

WANG Xie-kang AO Ru-zhuang FANG Duo

(State Key Hydraulic Laboratory of High Velocity Flow of Sichuan University, Chengdu, Sichuan, 610065, China)

Abstract: Debris flow is a nonlinear dynamic process, so the furrows of debris flow have nonlinear properties. Based on analysis of dynamic factors of debris flow growth, accumulative distribution of furrows of debris flow in function with its dynamic factors is studied by fractal theory. The results are satisfactory and benefit for study on debris flow in the Bailong River Basin and Jialingjiang River Basin.

Key words: debris flow; nonlinear; fractal theory

Experimental study on the Hydraulics Characteristics of Intermittent Disposed Buoyant Flows

YU Guo-liang¹ AO Ru-zhuang¹ LIAO Neiping²

(1. State Key Hydraulic Laboratory of High Velocity Flow of Sichuan University, Chengdu, Sichuan, 610065, China;

2. Southwest Electricity Survey and Design Institute Chengdu, Sichuan, 610061, China)

Abstract: There are two ways discharge of sewage water into ocean. In addition to the conventional way, the other is intermittent discharge, which is widely used, in recent decades. The hydraulic characteristics of intermittent disposed buoyant flows were preliminary experimentally studied and the differences of the hydraulic characteristics between intermittent discharge and steady discharge were compared in this paper.

Key words: buoyant flows; hydraulic characteristics; intermittent discharge; steady discharge

Several Problems Being Worth Notice in Management of Project with Foreign Funds

JU Qifeng

(Sichuan Ertan International Engineering Consulting Co. Ltd.,

CHDI of SPC, Chengdu, Sichuan, 610072, China)

Abstract: In the management of projects with foreign funds, some aspects are worth discussing and improving. Then, the construction market of China will be perfect day by day and transform into international practice smoothly. Experiences and lessons gained from practice in management of project with foreign funds in Ertan Project are presented for reference to similar projects.

Key words: project with foreign funds; problem; relationship; exchange rate; escalation; subcontract; division into lots; supply; claim indemnity