

污水流量序列关联维数的计算

周玉文¹, 刘兴坡²

(1.北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022; 2.北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100022)

摘要: 为了获得污水管网非恒定流模拟精度要求的节点流量过程线,应用分形理论对污水流量序列的变化特性进行研究,并初步分析其中是否存在分形特征. 首先,应用延迟时间法(G-P法)重构污水流量序列的相空间,计算关联维数;然后对北京市2个污水处理厂日进厂流量记录进行了研究. 为了得到可靠的关联维数,分别研究了时间滞时 $\tau = \Delta t$ 和 $\tau = 4\Delta t$ 2种情况. 研究表明:①污水流量序列中存在分形特性;② $\tau = \Delta t$ 时, $\ln C(r, m) \sim \ln r$ 曲线存在明显的直线段,能够估计到饱和时的关联维数:0.49(污水厂A)和0.53(污水厂B);③ $\tau = 4\Delta t$ 时, $\ln C(r, m) \sim \ln r$ 曲线也存在较为明显的直线段,关联维数为0.75(污水厂A)和0.44(污水厂B);④2个污水流量序列的关联维数定量地说明污水厂流量来源较单一.

关键词: 污水管网; 节点流量; 污水流量序列; 时间尺度; 分形维数; 关联维数

中图分类号: TU 992

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2004)02-0190-05

建立排水管理模型已成为城市排水系统实现科学管理的重要手段. 雨水管网管理模型的研究获得了较大的发展^[1-6],污水管网管理模型的研究则较欠缺. 建立和应用排水管网管理模型,首先需要获知节点流量过程线. 节点流量一般以等间距离散时间序列来表示,如日流量序列、时流量序列等. 污水流量序列的时间尺度是排水管网非恒定流模拟需考虑的问题. 雨水管网一般要求入流的采样间隔小于 $5 \text{ min}^{[7]}$;污水管网需要的时间步长也较小,特别是上游建筑内部污水管道,非恒定流模拟需要更小的时间步长(Swaffield和Galowin建议取 $0.1 \text{ s}^{[8]}$). 人们通常掌握的是较大时间尺度(如d、h等)的污水流量序列,难以满足建模精度要求,问题就在于如何从一种尺度的流量及其变化特性去认识和推论另一种尺度的流量及其变化特性,特别是由大时间尺度流量变化推断小时间尺度的污水流量变化,从而提高污水管网建模的精度. 为此,引入分形理论进行探索性研究,为污水流量序列建模提供一个思路.

1 分形及分形维数

1.1 概述

分形概念最初是指形态上具有自相似性质的几何对象,目前已扩展到了结构、功能、信息、时间上等具有自相似性质的广义分形. 分形中的自相似性是指研究对象的局部和整体之间存在着相似性而且多数为统计意义上的相似. 按照分形理论,在一定尺度范围内,具有自相似性的对象,其某种统计量在不同尺度下的相互关系决定于一种简单变换——标度变换^[9].

1.2 分形的定量表述——分形维数

分形维数(分维)是描述分形的不规则、复杂或混沌程度的数量指标,其大小表征了系统结构的自相似程度. 在实际应用中,分维是判断两个分形是否一致的度量标准. 分形维数有多种定义方法^[10],其中豪斯道夫维、信息维、关联维、容量维等较为常用. 关联维数可以在不知背景条件下,只依靠实验测量的少数

收稿日期: 2003-12-23.

基金项目: 北京市教委科技发展计划基金资助项目(05004790200201).

作者简介: 周玉文(1952-),男,辽宁兴城人,教授,博士,博士生导师.


```

c=a(:,j);
d=b-c;
e=d.^2;
r(i,j)=sqrt(sum(e));
end
end
if r(i)<0.25*j
    y=y+1;
end
liu(j)=y; % 满足条件的相点对个数
end
    
```

3 实例研究

实例研究以北京 2 个污水厂的进厂污水流量序列作为基础数据,采样间隔为 1 d,如图 1 所示. 其中,污水厂 A 的记录日期为 608 d,污水厂 B 的记录日期为 365 d.

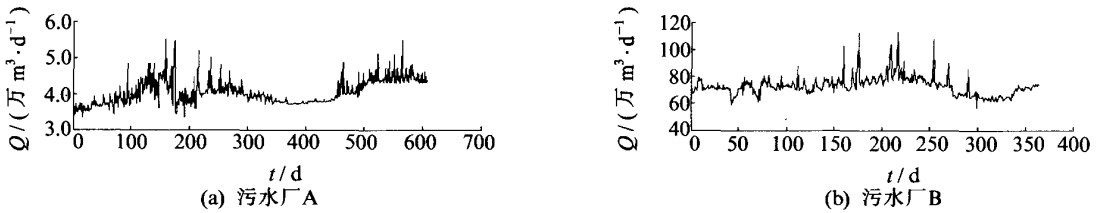


图1 污水厂A和B的进厂流量变化曲线

Fig.1 The flowrate input to wastewater treatment plant A and B

应用计算程序,可以得到污水厂 A、B 的日污水流量序列的 $\ln C(r, m) \sim \ln r$ 关系(见图 2). 图 2(a) 中从左向右依次为嵌入维数 $m=2, 4, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 24, 30$ 时获得的曲线; 图 2(b) 中从左向右依次为 $m=2, 4, 8, 16, 24, 30$ 时获得的曲线. 由图 2 可以看到, 当 m 达到一定数值时, 直线段部分变得平行, 表明斜率不再增大, m 可达到饱和, 从而根据饱和时的直线斜率初步确定污水厂 A 和 B 的污水流量序列的关联维数分别为 0.488 7 和 0.525 4. 表 1 中列出了嵌入维数 $m=30$ 时的部分标度值及相应的关联函数值.



图2 $\ln C(r, m) \sim \ln r$ 关系图($\tau = \Delta t$)

Fig.2 The relation between $\ln C(r, m)$ and $\ln r$ ($\tau = \Delta t$)

表1 部分标度值与对应的关联函数值

Tab.1 Some scale values and the corresponding relative function values

r	污水厂 A			污水厂 B		
	C(r)	ln r	ln C(r)	C(r)	ln r	ln C(r)
10	0.546 5	2.302 585	-0.604 2	0.501 6	2.302 585	-0.690 0
15	0.602 6	2.708 050	-0.506 6	0.503 2	2.708 050	-0.686 9
20	0.690 5	2.995 732	-0.370 2	0.506 4	2.995 732	-0.680 4
25	0.794 4	3.218 876	-0.230 1	0.514 2	3.218 876	-0.665 1
30	0.865 3	3.401 197	-0.144 7	0.540 8	3.401 197	-0.614 6
35	0.919 5	3.555 348	-0.083 9	0.581 5	3.555 348	-0.542 1

由图2还可以看到, $\ln C_2(r, m) \sim \ln r$ 中均存在明显的一个直线段, 没有呈现多段杂乱的变化, 这在一定程度上反映了整个研究区内不同时期污水流量变化特征的相似性。

应用G-P法计算关联维数, 并以此估计分形维数时, 应注意时间序列滞时 τ 的选取^[13], 为此在前面 $\tau = \Delta t$ 研究的基础上, 进一步研究 $\tau = 4\Delta t$ 时的情况, 即滞时为4 d。图3为所获得的 $\ln C(r, m) \sim \ln r$ 关系曲线。图3(a)中从左向右依次为 $m = 2, 4, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 24$ 时获得的曲线; 图3(b)中, 从左向右依次为 $m = 2, 4, 8, 16, 24, 30$ 时获得的曲线。根据饱和时直线段部分的斜率, 确定污水厂A和B流量序列的关联维数分别为0.75和0.44, 以此作为污水流量序列分形维数的初步估计值。

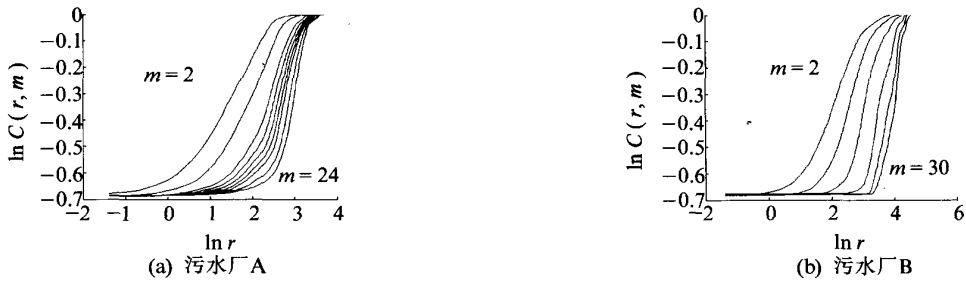


图3 $\ln C(r, m) \sim \ln r$ 关系图($\tau = 4\Delta t$)

Fig.3 The relation between $\ln C(r, m)$ and $\ln r$ ($\tau = 4\Delta t$)

根据上述研究, $\ln C(r, m) \sim \ln r$ 关系曲线中均存在较为明显的直线部分, 而且能够得到饱和时的关联维数。这就初步证实污水流量序列中存在分形特征。

分形维数是反映污水流量变化特征的参数, 可以揭示污水流量过程形状的复杂性。本文计算的2个污水厂进厂流量序列饱和时的关联维数分别为0.75和0.44, 定量地论证了序列的分形特征; 同时, 流量序列的关联维数值较小, 表明污水厂流量来源较为单一, 流量变化曲线的形状较为简单。此外, 分形维数对于解决缺乏刻画污水流量过程形状的客观定量指标问题会有帮助。

参考文献:

- [1] 岑国平, 沈晋, 范荣生. 城市暴雨径流计算模型的建立和检验[J]. 西安理工大学学报, 1996, 12(3): 184-225.
CEN Guo-ping, SHEN Jin, FAN Rong-sheng. The establishment and verification of urban storm runoff model[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1996, 12(3): 184-225. (in Chinese)
- [2] 岑国平. 城市雨水径流计算模型[J]. 水利学报, 1990(10): 68-75.
CEN Guo-ping. A model to simulate stormwater runoff in urban area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990(10): 68-75. (in Chinese)
- [3] 周玉文, 赵洪宾. 城市雨水径流模型研究[J]. 中国给水排水, 1997, 13(4): 4-6.
ZHOU Yu-wen, ZHAO Hong-bin. A study on urban storm runoff model[J]. China Water and Wastewater, 1997, 13(4): 4-6. (in Chinese)
- [4] 周玉文, 戴书健. 城市排水系统非恒定流模拟模型研究[J]. 北京工业大学学报, 2001, 27(1): 84-86.
ZHOU Yu-wen, DAI Shu-jian. Study on unsteady flow simulation model of urban drainage system[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2001, 27(1): 84-86. (in Chinese)
- [5] 周玉文, 孟昭鲁. 瞬时单位线法推求雨水管网入流流量过程线的研究[J]. 给水排水, 1995, 21(3): 5-9.
ZHOU Yu-wen, MENG Zhao-lu. Study on course curve of inlet flowrate into rain-water network by instantaneous unit line (IUL) theory[J]. Water & Wastewater Engineering, 1995, 21(3): 5-9. (in Chinese)
- [6] 周玉文, 赵洪宾. 排水管网理论与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
ZHOU Yu-wen, ZHAO Hong-bin. Theories and Calculations of Urban Drainage Network[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese)

- [7] GREENE R G, CRUISE J F. Urban watershed modeling using geographic information system[J]. Journal of water resources planning and management, 1995, 121(34): 318-325.
- [8] BUTLER D, GRAHAM N J D. Modeling dry weather wastewater flow in sewer networks[J]. American Society of Civil Engineers, Journal of Environmental Engineering Division, 1995, 121(2): 161-173.
- [9] 丁晶, 王文圣, 金菊良. 论水文学中的尺度分析 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003, 35(3): 9-13.
DING Jing, WANG Wen-sheng, JIN Ju-liang. Scale analysis in hydrology[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2003, 35(3): 9-13. (in Chinese)
- [10] 吴彤. 自组织方法论研究 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 114-117.
WU Tong. Study on Self-Organizing Methodology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 114-117. (in Chinese)
- [11] 黄润生. 混沌及其应用 [M]. 第2版. 武汉: 武汉大学出版社, 2000. 176-265.
HUANG Run-sheng. Chaos and its Applications[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2000. 176-265. (in Chinese)
- [12] 谢正栋, 张永勤, 徐敏, 等. 淮河流域洪水的分形特征及可预报时间研究 [J]. 南京大学学报(自然科学版), 2003, 39(1): 113-119.
XIE Zheng-dong, ZHANG Yong-qin, XU Min, et al. Fractal traits and predictable time analysis for flood series in the huaihe river basin[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2003, 39(1): 113-119. (in Chinese)
- [13] 傅军, 丁晶. 嘉陵江流域形态及流量过程分维研究 [J]. 成都科技大学学报, 1995(1): 74-80.
FU Jun, DING Jing. The preliminary study on the fractal dimension of the flow hydrograph and basin configuration in jialing river[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1995(1): 74-80. (in Chinese)

Calculation of the Correlative Dimension of Daily Sewage Flow Series

ZHOU Yu-wen¹, LIU Xing-po²

(1.College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;
2.College of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: In order to obtain the nodal hydrograph suitable for the unsteady flow simulation of urban sanitary sewer networks, the study on the dynamic characteristics of sewage flow series is conducted using fractal theory so as to judge whether there are fractal traits. Firstly, the delayed-time method is used to reconstruct the phase space of sewage flow series and calculate the correlative dimension. Then case studies are carried out based on the daily flow records derived from two wastewater treatment plants (WWTPs) in Beijing. In addition, the correlative dimensions are calculated respectively according to the delayed-time $\tau = \Delta t$ and $\tau = 4\Delta t$. The results indicate that ① the fractal traits exist in sanitary flow series; ② the distinct linear section occurs within $\ln C(r, m) \sim \ln r$ curves and the correlative dimension is 0.49 for WWTP A and 0.53 for WWTP B when $\tau = \Delta t$; ③ the distinct linear section also occurs in $\ln C(r, m) \sim \ln r$ curves when $\tau = 4\Delta t$ and the correlative dimension is 0.75 for WWTP A and 0.44 for WWTP B; ④ the correlative dimensions of the flow series quantitatively show that the flow source of WWTP is simplex.

Key words: sanitary sewer networks; nodal flow; sewage flow time series; temporal scale; fractal dimension; correlative dimension