

空化喷嘴混沌特性的辨识

刘江辉, 张凤华, 唐川林, 裴江红

(湖南工业大学 高压水射流与湍流应用技术及设备实验室, 湖南 株洲 412008)

摘要: 通过实验, 使用高频水听器采集 3 种常用不同结构空化喷嘴产生的空化噪声信号, 选取其中的信号, 以 Takens 定理为基础, 进行相空间重构, 并分别计算其最大 Lyapunov 指数值。实验对空化喷嘴的混沌特性进行辨识以及比较分析, 为空化喷嘴的设计、检测提供了一种新的途径。在采用的实验条件下, 选取的空化噪声信号的最大 Lyapunov 指数值大于零, 即这些信号都是混沌信号。实验显示, 具有自激振荡腔结构喷嘴的最大 Lyapunov 指数值最大。

关键词: 空化喷嘴; 空化噪声; 水射流; 相空间; 混沌

中图分类号: O358

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2007)04-0065-04

Identification of the Chaotic Property of Cavitation Nozzles

Liu Jianghui, Zhang Fenghua, Tang Chuanlin, Pei Jianghong

(Lab of High Pressure Water Jet and Turbulence Application Technology and Equipment,
Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: The mechanism of hydraulic cavitation is far from known for the complexity of itself. The core of the technology of hydraulic cavitation is the cavitation nozzle. Researches show that cavitation phenomenon displays some chaotic properties. On this basis, the cavitation noise signals, which are produced by the common cavitation nozzles in different shape, are collected by hydrophone experimentally. The state spaces of some selected signals are built on the base of taken theorem, and their largest Lyapunov exponents are calculated. This experiment identifies and compares the chaotic properties of cavitation nozzle, and presented a new method for the design and the test of cavitation nozzles. Under this experimental condition, the result displays that the largest Lyapunov exponents of these selected cavitation noise signals are larger than 0, which means that these signals are all chaotic signals. The largest Lyapunov exponent of the nozzle with self-oscillating cavity is the largest of the three.

Key words: cavitation nozzle; cavitation noise; water jet; state space; chaos

空化, 因其对水利水电设施以及水力设备的巨大破坏作用而日益引起人们的重视。然而, 若对空化产生的能量加以有效利用, 就可以为某些物理和化学过程提供所需的特殊环境。例如, 在水处理领域, 水射流空化技术因其节能、环保、广谱、高效等特点, 已经得到越来越多的重视和应用^[1-3]。

然而, 水射流空化中空化空泡是在流动情况下产生的, 因为影响因素众多, 且呈现非线性的特点, 其

机理目前远未清楚。已有的研究发现, 如果水射流空化的动力系统中含有低自由度的混沌, 那么, 无论采用多么高阶的线性模型, 都不可能对该系统的行为做出恰当的解释或较准确的预测。而一个成功的低阶非线性模型, 或许就可以很好地刻画该动力系统。

1 相空间重构理论

Takens 嵌入定理: 设 M 是 d 维紧流形, $\varphi: M \rightarrow$

收稿日期: 2007-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50504021), 湖南省教育厅基金资助重点项目(04A067)

作者简介: 刘江辉(1977-), 男, 湖南新邵人, 湖南工业大学硕士研究生, 主要研究方向为水射流理论。

M , φ 是一个光滑的微分同胚; $y: M \rightarrow R$, y 有两阶连续导数; $\psi(\varphi, y): M \rightarrow R^{2d+1}$, 其中

$\psi(\varphi, y) = (y(x), y(\varphi(x)), y(\varphi^2(x)), \dots, y(\varphi^{2d}(x)))$, 则 $\psi(\varphi, y)$ 是 M 到 R^{2d+1} 的一个嵌入。

Takens 定理说明: 在用一维观测序列及其所构成的维数合适的相空间中, 系统演化的动力学行为可用此空间中点的演化轨迹无奇异地表达出来。此定理很容易与实际问题相对应, φ 对应于一动力系统的系统方程, 而 y 对应于系统状态与测量数据间的函数关系。

为了使重构的相空间能较充分而细致地反映系统运动的特征, 恰当地选取嵌入维数 m 和延迟时间 τ 的大小是相空间重构的关键。本文中嵌入维数 m 的计算采用 G-P 算法^[4], 延迟时间 τ 的计算采用重构展开法^[5]。

嵌入定理其实是将系统相空间向嵌入空间投影, 若嵌入维数选得太小, 相空间轨迹向低维空间投影, 会产生许多错误的交叉; 如果嵌入维数取得太大, 相空间点的数目将大大减少, 相空间轨迹将不能充分反映原动力系统。Grassberger 和 Procaccia 在计算混沌时间序列嵌入维数 m 和分形维数 d_m 时, 提出以下简便易行的吸引子关联维数的算法, 俗称 G-P 算法。

假设通过实验或现场所得到的等时采样的时间序列为 x_1, x_2, \dots, x_n , 则其延迟向量可表示为:

$$Y_i(m) = (x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}), \quad i=1, 2, \dots, n-(m-1)\tau。$$

引用关联积分: $C_m(r) = \frac{1}{N_m(N_m-1)} \sum_{i,j=1, i \neq j}^N \theta(r - |Y_i - Y_j|)$,

其中: 相空间中相点数 $N_m = n - (m-1)\tau$;

$|Y_i - Y_j|$ 表示相空间中两相点 Y_i 和 Y_j 之间的距离;

$$\theta(x) \text{ 是 Heaviside 函数: } \theta(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0; \\ 1, & x > 0. \end{cases}$$

对距离测度 r 的某个适当范围, 吸引子的关联维数 d_m 与关联积分函数 $C(r)$ 应满足对数线性关系:

$$d_m = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln(C_m(r))}{\ln(r)}, \text{ 此时的吸引子维数 } d_m \text{ 与嵌入维数 } m \text{ 有关。}$$

因此, 对不同嵌入维数 m , 分别求出 d_m 的值。当 m 增大到恰当的维数后, d_m 不再随 m 的增大而改变。取 d_m 值的第一个到达平稳时的 m 估计嵌入维数, 此时的 d_m 值作为吸引子维数的估计; 取 $m \geq 2d_m + 1$, 则 m 可作为相空间的嵌入维数。

相空间重构的另一个重要参数是时间延迟 τ 。与嵌入维数不同的是, 时间延迟 τ 并不在嵌入理论的要求之内, 因此, 从数学的角度看, 时间延迟 τ 可以取任意值。然而, 在实际应用中, 时间延迟 τ 选取的好坏, 对时间序列分析结果有直接的影响。如果 τ 太小, 会引起延迟矢量的不同元素之间强烈相关, 相互间没有区别, 重构相空间轨迹向相空间主对角线压缩, 这就是所谓的冗余。对于含有噪声的数据来说, 如果在

$m\tau$ 这样一段时间内, 信号的变化没有超过一个噪声级, 那么, 噪声将居于主导地位, 重构的相空间是没有意义的。但是, 如果 τ 太大, 混沌系统所导致的相邻轨迹的混沌分离, 可能使得一个相空间矢量相邻的含噪延迟坐标元素间的相互信息丢失, 即不相关性增大。这时, 重构相空间都不能较好地反映原动力系统。

重构展开法综合考虑了冗余或不相关之间的折衷, 在 L_2 范数下定义平均位移 $S(m, \tau)$ 为

$$S(m, \tau) = \frac{1}{N_m} \sum_{n=1}^{N_m} \sqrt{\sum_{l=1}^{m-1} (x_{n+l\tau} - x_n)^2},$$

平均位移 $S(m, \tau)$ 表示重构状态空间的轨线从状态空间主对角线打开的程度, 定量地刻划了当 τ 增加时冗余误差的减少。当 τ 增加时, $S(m, \tau)$ 相应地增加, 对较大的 m , 在某个 τ 处, $S(m, \tau)$ 不再增加, 则此时的 τ 为所求的延迟时间。

在诊断和描述混沌信号时, Lyapunov 指数 λ 不仅是一个很重要的不变量, 而且是判断混沌存在的重要依据。Lyapunov 指数 $\lambda > 0$ 是混沌出现的充分条件。因此, 利用 λ 去诊断和描述混沌仍然是一种主要方法。本文利用文献[6]的算法, 计算最大李雅普诺夫指数, 计算式如下:

$$\lambda(i) = \frac{1}{jh \cdot \Delta t} \log \frac{\|x_{ip+jh} - x_{i+jh}\|}{\|x_{ip} - x_i\|} = \max_h \left\{ \frac{1}{h \cdot \Delta t} \log \frac{\|x_{ip+h} - x_{i+h}\|}{\|x_{ip} - x_i\|} \right\},$$

其中: $h \cdot \Delta t$ 为演化时间;

x_{ip} 为重构轨迹中的第 i 个点 x_i 的最近邻, 即满足:

$$\|x_{ip} - x_i\| = \min_j \|x_j - x_i\|, \quad \|\cdot\| \text{ 为欧氏范数。}$$

2 实验原理及系统

水射流空化产生的空化噪声与水流, 及其它机械噪声有较大差别。由声源机理可知, 空化一旦发生, 空泡辐射噪声基本上属于脉动源(单极子)类型, 呈宽谱特性, 其频率范围为 0.02~200 kHz, 贡献在频谱的高频段。实验可以采用高频水听器在淹没状态下采集水射流空化噪声信号。

研究表明, 水射流空化空泡在固壁面附近溃灭较为剧烈, 因此, 分别在喷嘴出口处和靶盘位置处布置水听器, 采集在相同靶距条件下的喷嘴出口处和靶盘位置处的空化噪声信号, 进行对比研究。水射流空化实验系统如图 1 示。

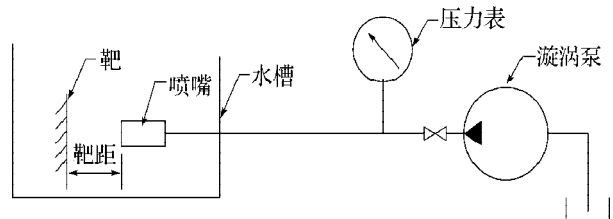


图 1 水射流空化实验系统图

Fig. 1 Experimental system of cavitation water jet

水听器水平布置, 与喷嘴轴线等高, 距喷嘴轴线 40 mm, 水听器与喷嘴的布置如图 2 示。

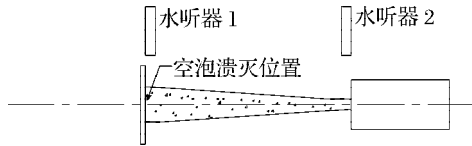


图 2 水听器与喷嘴布置图

Fig. 2 Deployment of the hydrophones and the nozzle

实验系统参数如下。

漩涡泵: W 型漩涡泵, 电机功率 1.3 kW, 流量 1.25 m³/h, 扬程 80 m; 喷嘴: 喷嘴材料为酚醛树脂, 形状为锥形, 出口直径为 2 mm。喷嘴 I 具有自激振荡腔结构, 喷嘴 II 的入口位置为直角, 喷嘴 III 的入口位置为锥角 (结构示意图如图 3~5); 水听器: 压电式陶瓷水听器, 型号 CS-3, 工作频率范围 $f \leq 160$ kHz, 采样频率为 10 MHz, 硬件分辨率 12 bit, 指向性 $\theta < 15^\circ$; 喷嘴压降: 0.5 MPa; 围压: 0.05 MPa; 淹没深度: 0.5 m。

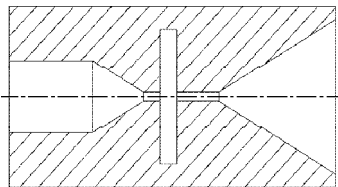


图 3 喷嘴 I 结构示意图

Fig. 3 Diagram of the shape of nozzle I

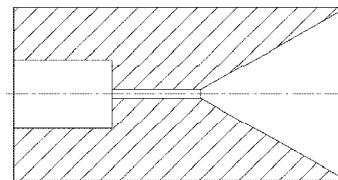


图 4 喷嘴 II 结构示意图

Fig. 4 Diagram of the shape of nozzle II

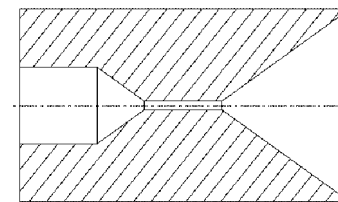


图 5 喷嘴 III 结构示意图

Fig. 5 Diagram of the shape of nozzle III

3 实验数据分析

根据文献[7]可知, 水射流空化存在混沌现象。在本实验条件下, 靶距为 35 mm 时, 空化噪声信号最为显著。通过高频水听器, 获得此实验条件下靶盘上水声信号的 1 组时间序列为 $\{x(t_i)\}$, $i=1, 2, \dots, N$, 序列长度为 8 192 点, 分别采集空化噪声信号 (每一种结构的喷嘴采集 60 个样本), 其典型时域波形如图 6~8 所示。

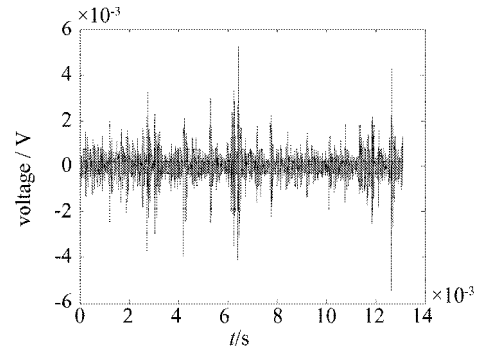


图 6 喷嘴 I 的信号时域波形

Fig. 6 Cavitation noise signal produced by nozzle I in time domain

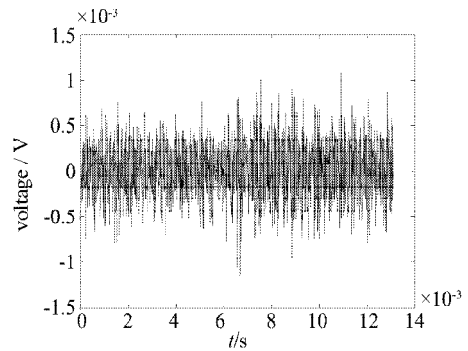


图 7 喷嘴 II 的信号时域波形

Fig. 7 Cavitation noise signal produced by nozzle II in time domain

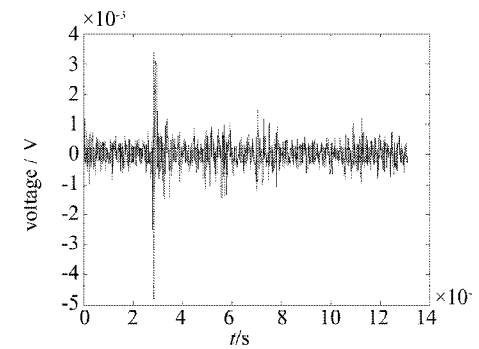


图 8 喷嘴 III 的信号时域波形

Fig. 8 Cavitation noise signal produced by nozzle III in time domain

分别对采集的空化噪声信号进行相空间重构, 根据前述算法, 利用 MATLAB 软件对时间序列进行计算, 取相空间嵌入维数 m 和时间延迟 τ 如表 1 所示。

表 1 相空间重构参数与最大 Lyapunov 指数

Table 1 Parameters of phase-space reconstruction and maximum values of Lyapunov exponent

喷嘴序号	相空间重构参数		Lyapunov 指数 λ	方差
	维数 m	时间延迟 τ		
I	7	83	0.912 8	0.03
II	8	80	0.879 5	0.01
III	8	85	0.526 2	0.05

重构相空间后, 计算它们的 Lyapunov 指数值。典型信号的 Lyapunov 指数曲线分别如图 9~11 所示。

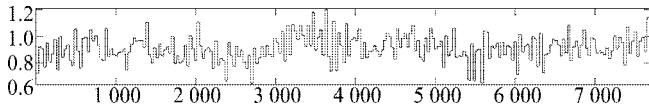


图 9 喷嘴 I 的信号 Lyapunov 指数谱

Fig. 9 Lyapunov exponent curve of the cavitation noise signal produced by nozzle I

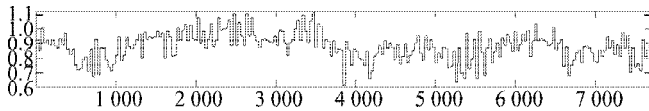


图 10 喷嘴 II 的信号 Lyapunov 指数谱

Fig. 10 Lyapunov exponent curve of the cavitation noise signal produced by nozzle II

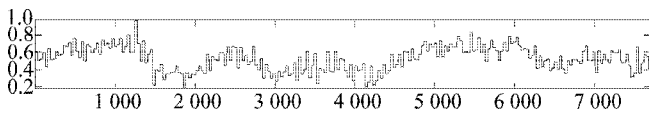


图 11 喷嘴 III 的信号 Lyapunov 指数谱

Fig. 11 Lyapunov exponent curve of the cavitation noise signal produced by nozzle III

若以 Lyapunov 指数曲线均值作为最大 Lyapunov 指数值的估计, 则最大 Lyapunov 指数值与方差如表 1 所示。图 9~11 显示, 3 组信号的所有 Lyapunov 指数值 λ 均大于 0, Lyapunov 指数曲线围绕着均值作小幅振荡。比较靶上空化噪声信号的时域波形 (图 6~8), 可见由喷嘴 I 到喷嘴 III 的信号时域波形的幅值, 以及波形振荡的程度依次降低。因为喷嘴压降、围压以及靶距等实验条件均相同, 固定在靶盘位置的水听器位置也始终未变, 则时域波形的这一显著差别反映了靶上空化空泡溃灭的情况。

分别比较各喷嘴空化噪声信号的 Lyapunov 指数曲线 (图 9~11), 也可以得到上述类似的结论。

若以 Lyapunov 指数曲线上各点的均值作为最大 Lyapunov 指数值的估计, 则由喷嘴 I 到喷嘴 III 的最大 Lyapunov 指数值依次降低; 同时, Lyapunov 指数曲线的振荡程度却依次增大, 显示喷嘴 I 的信号混沌特性较为稳定。

在非线性动力系统中, Lyapunov 指数描述了相空间相邻轨道的平均指数发散率和平均指数收敛率, 同时也表述了系统运动对初始条件的敏感。实验结果显示, 喷嘴 I (具有自激振荡腔结构的喷嘴) 的空化噪声时间序列的最大 Lyapunov 指数值 λ 最大, 这说明: 喷嘴 I 的空化噪声信号的相空间中混沌运动最剧烈, 同时它对初始条件的敏感程度也最大。

4 结语

水射流空化技术的目的是如何有效利用空化产生的能量。本文以混沌理论为基础, 从实验的角度对空化喷嘴的混沌特性进行辨识和比较研究, 为喷嘴设计及喷嘴空化效果的测试提供了一种新的途径。

1) 在相同的条件下, 实验获取 3 种不同结构喷嘴的空化噪声时间序列。实验结果显示这 3 类信号的 Lyapunov 指数值 λ 均大于 0 (最大 Lyapunov 指数值见表 1), 可知该 3 类信号是混沌信号。

2) 实验显示喷嘴 I 的空化噪声信号的 Lyapunov 指数值 λ 最大, 说明该信号构成的相空间中混沌运动最剧烈, 同时也表明了具有自激振荡腔结构的喷嘴 I 对初始条件的敏感性最大。

3) 通过比较靶盘位置采集的空化噪声信号的时域波形, 以及 Lyapunov 指数曲线的变化规律, 喷嘴 I 产生的空化噪声信号与其他喷嘴产生的空化噪声信号有着显著的差别, 这种差别反映了不同空化喷嘴调制的水射流空化在靶盘上溃灭强度的差别。

4) 图 9~11 所示 3 种不同喷嘴产生的空化噪声的 Lyapunov 指数曲线围绕均值振荡。实际采集的信号都有噪声污染, 滤波消噪与相空间构造之间的联系和影响目前仍然不明确。因此, 本文在相空间重构前均未进行滤波消噪, 但是, 在选择相应算法时, 偏向于选择那些对噪声不敏感的算法。

参考文献:

- [1] Jyoti K K, Pandit A B. Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation[J]. Biochemical Engineering Journal, 2001 (7): 201-212.
- [2] 廖振方, 陈德淑, 邓晓刚, 等. 利用空化射流清洗湖泊[J]. 清洗世界, 2004, 20 (4): 1-6.
- [3] 李志义, 张晓冬, 刘学武, 等. 水力空化及其对化工过程的强化作用[J]. 化学工程, 2004, 32 (4): 27-29.
- [4] Grassberger P, Procaccia I. Measuring the strangeness of attractors[J]. Physica D, 1983 (9): 189-208.
- [5] 王海燕, 盛昭瀚. 混沌时间序列相空间重构参数的选取方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2000, 130 (15): 113-117.
- [6] 杨绍清, 章新华, 赵长安. 一种最大李雅普诺夫指数估计的稳健算法[J]. 物理学报, 2000, 49 (4): 636-640.
- [7] 张风华, 廖振方, 唐川林. 空泡运动非线性动力学特性的数值研究[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2001, 24 (4): 1-4.