

基于 Poincare 截面方法的 VIV 检测

钟兴福, 林黎明, 吴应湘

中国科学院力学研究所, 北京 100190

摘要: 用 Poincare 截面方法, 可以研究在二维、三维或更高维空间内流形的动力学行为, 定性给出各流形的 Poincare 截面特征, 其特点是可以降低维数来研究高维系统。本文工作利用 Poincare 截面, 给出了从测量的单变量时间序列中快速检测柱体结构发生涡激振动共振的方法。室内试验表明, 这种方法快速可靠, 为工程检测柱体结构的涡激振动提供了一种新的检测手段。

关键词: Poincare 截面; 涡激振动; 检测

The VIV Detection Based on Poincare Surface of Sections

Xingfu Zhong, Liming Lin, Yingxiang Wu

Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China

Abstract: By Poincare surface of sections, dynamical features of manifold in two, three or high dimensions can be investigated. Characteristics of Poincare sections for all kinds of manifold can be obtained qualitatively, which is used to study system with high dimensions by reducing dimension. In present work, a method of quick detection on occurrence of vortex-induced vibrations (VIV) of cylindrical structure is developed from measured time history of one variable by using Poincare surface of section. Experimental results have shown that such method is quick and reliable as a new means of engineering detection on VIV of cylindrical structure.

Key words: Poincare surface of sections; vortex-induced vibration; detection

当前很多工程应用中大量采用了钝体结构, 如桥梁, 海洋工程, 建筑物, 热交换器等。例如, 海洋工程中常常用到的钝体结构是立管, 它在深海油气开发系统中是连接海面作业平台和海底钻采设施的关键设备。当海流绕过立管结构时, 在立管两侧会产生交替的涡旋脱落。同时, 结构表面会受到流体脉动作用力, 特别是在与水流垂直的横向方向上。由于这种涡旋脱落诱发的流动载荷脉动较强, 导致结构振动幅值较大, 从而形成涡激振动 (Vortex-induced vibration, VIV)。当涡脱落频率接近立管的自振频率时, 将会产生同步或者锁定现象, 此时结构受到的流体载荷和振荡振幅突然增大, 进而结构发生疲劳破坏, 从而造成油气田停产及海域大面积污染的事件时有发生, 不但带来了巨大的经济损失, 而且破坏了海洋生态环境。因而深海立管的安全问题得到了各国海洋工程界的广泛关注。

近几十年来, 各国学者纷纷提出多种的涡激振动抑制措施和减振方法, Sarpkaya & Isaacson^[1], Zdravkovich^[2], Kumar^[3]和吴浩&孙大鹏^[4]等, 通过控制钝体尾迹涡动力学, 实现削弱涡脱落和流体载荷, 进而降低涡激振动对立管的疲劳破坏。然而上述这些抑制措施在深海立管中既有优点, 也有不足之处, 特别是在具有大长径比柔性立管、海洋来流复杂环境下, 如螺旋型列板虽能有效降低涡激振动强度, 然而其增大结构的拖曳阻力等。因而需要设计一种新型的涡激振动抑制装置以适应未来发展的需要。

本文首先介绍了 Poincare 截面应用的基本原理, 在柱体的涡激振动测量实验基础上, 研究经过特殊设计的表面形状对涡激振动现象的影响, 通过对涡激振动实验中获得的测量信号在时域和频域中进行分析, 给出用



Poincare 截面检测结构发生涡激振动及共振方法。

1 基本原理

1.1 Poincare 截面

动力系统是随时间变动着的系统，它的状态也将随时间而变动，所以要用状态空间描述它，这种状态空间常常是用一种流形(曲的空间，包括不曲的平直面空间在内)表示系统在某时间的姿态的所有可能情况,称为姿态空间，然后与时间坐标的乘积空间构成；动态系统就是从模型的状态空间映入姿态空间的一种映射。由此，一个动态系统是一个映射^[5,6]

$$\bar{\Phi}: \bar{M} \times \bar{R} \rightarrow \bar{M}$$

\bar{M} 是一个流形，它可以是平直空间中的欧氏空间 R^n ，也可以是曲线、曲面、超曲面等等的曲的空间。在 n 维相空间中取横截于流形的 $n-1$ 维超曲面 Σ ，如图 1 所示，

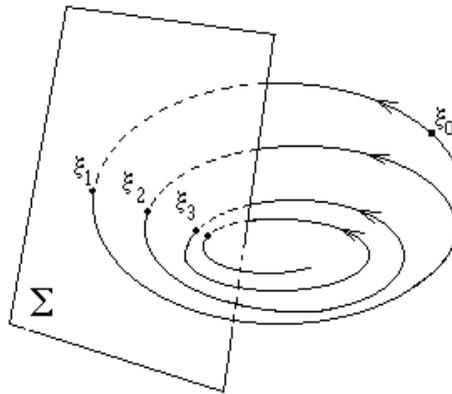


图 1 Poincare 截面

ξ_0 为其上的一点，它沿通过它的轨线运动，第一次与 Σ 的交点记为 ξ_1 ，再从 ξ_1 出发，仿上可得 ξ_2 、 ξ_3 、.....。截面上的点 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 、..... ξ_n 之间的关系可表示为： $\xi_{n+1} = P(\xi_n)$ ，称 P 为 Poincare 截面。由于 P 是在 $n-1$ 维空间中的截面，研究起来比较简单。用 Poincare 截面方法，可以研究在两维、三维或更高维空间内流形的动力学行为，定性给出各流形的 Poincare 截面特征，Poincare 截面可以通过降低维数来研究高维系统，写成便于计算的形式：

$$x_{n+1} = f(x_n) \tag{1}$$

1.2 测量信号

在实际测量过程中，工程测量信号 $x_{(t)}$ 可以表示为以下形式：

$$x_{(t)} = x_{p(t)} + x_{n(t)} + n_{(t)} \tag{2}$$

其中： $x_{p(t)} = x_{p(t+T)}$ 为周期分量， T 为基本周期；

$x_{n(t)} = g_{(t)} \cdot x_{r(t)}$ 为一非周期分量；

$g_{(t)} = g_{(t+T)}$ 为周期函数；

$x_{r(t)}$ 为一随机函数；



$n_{(t)}$ 为随机干扰噪声。

可以看出,若对信号进行分析,就要进行统计学意义上的处理,然后才能得到真实信号的良好估计。Poincare 截面方法可以简化处理过程,将 n 维相空间中的动力学行为,在 $n-1$ 维空间内直观给出工程测量信号的基本特征。

2 实验简介

在深海复杂洋流环境下,绕过立管结构的来流方向往往难以确定;因而某些设计的涡激振动抑制装置就无法很好地发挥其抑制结构振动的效果,如在来流和尾迹中布置的干扰装置。通过基于 Bernoulli 方程的理论分析,和几何扰动对结构绕流流场影响的数值模拟计算^[7],提出新型涡激振动抑制装置的设计型式为:具有 (a) 始终为圆形横截面和 (b) 沿柱体轴向整周期性变化的装置,即圆形柱体直径沿轴向非均匀、整周期性变化。这种抑制装置,典型型式有简谐波型、圆球型、椭球型和圆锥型等,并可依据特定洋流沿水深的分布而布置具有不同起伏波型剧烈程度的抑制装置。

在本次试验中,将结构受到的流体载荷转化为结构受力发生运动的强弱,这种运动不是通过平动来表现,而是通过摆动来实现。其方法是将流体载荷的强弱转化为结构受到流体载荷后发生运动的幅度,通过测量不同柱体在来流作用下出现横向涡激振动的摆动幅值,得到运动强弱,当涡脱离频率和单摆固有频率相接近时,发生共振,摆动幅度达到最大值,以此来找出何种流动工况下发生共振,由此可确定不同柱体结构发生 VIV 共振时的流动工况。

实验是在中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室的循环水槽中完成的,如图 2 所示。该水槽设计水深最大达到 1m,最大流速为 1m/s,实验段宽 1m,长 6m,本次实验水深保持在 0.65m 到 0.7m 之间。结构振荡位移测量装置为激光位移传感器。来流速度则通过超声波多普勒测速仪来校准不同的实验来流速度。

依据涡激振动抑制设计原理获得的柱体外形图,如图 3 所示,0#为直圆柱,其他为扰动柱,其中 1#、2#、3#为表面呈谐波型的柱体,而 4#、5#、6#为表面呈类圆锥型的柱体。实验柱体为铝制材料。直圆柱直径为 20 毫米,扰动柱最大直径分别为 26 毫米,32 毫米和 44 毫米,扰动波型的波长为 120 毫米。



(a) 循环水槽 (b) 试验段 (c) 实验装置示意图

图 2 中国科学院力学研究所水动力学和海洋工程重点实验室装置

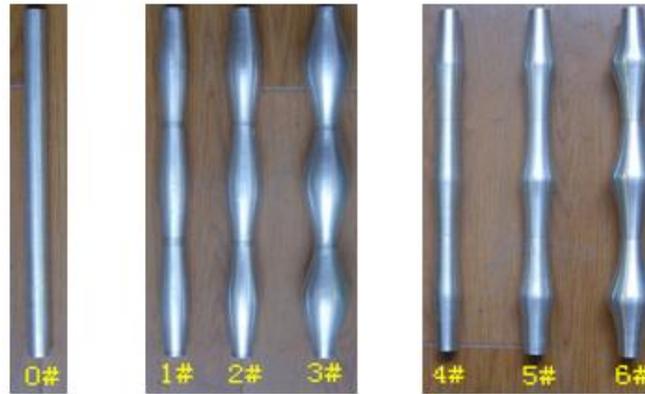


图3 不同类型柱体结构 (0#直圆柱, 1#、2#、3#谐波型柱, 4#、5#、6#圆锥型柱)

3 VIV 测量信号分析

所有分析数据是在中国科学院力学研究所水动力学和海洋工程重点实验室装置上得到的, 实验内容主要包括如下几个方面: (1) 测量柱体结构在空气中和水中自由振动时的固有频率, 以此预报可能发生涡激振动时的来流速度; (2) 测量水的实际流速; (3) 在特定柱体结构下, 调节流速分别为 2, 5, 8, 10, 13, 15, 18, 20 cm/s, 测量振动幅值; (4) 更换柱体, 重复步骤 (3), 当流动稳定后开始测量, 所有测量信号直接由计算机记录。

图 4 和图 5 分别为 0#柱和 5#柱横向涡激振动的时域和频域图, 时域图(a)中纵轴为无量纲振动幅度 (振幅 d/D / 圆柱直径 D), 横轴为测量时间 ($S \cdot 1/10$), 频域图(b)中纵轴为无量纲振动幅度能量, 横轴为频率 (Hz)。

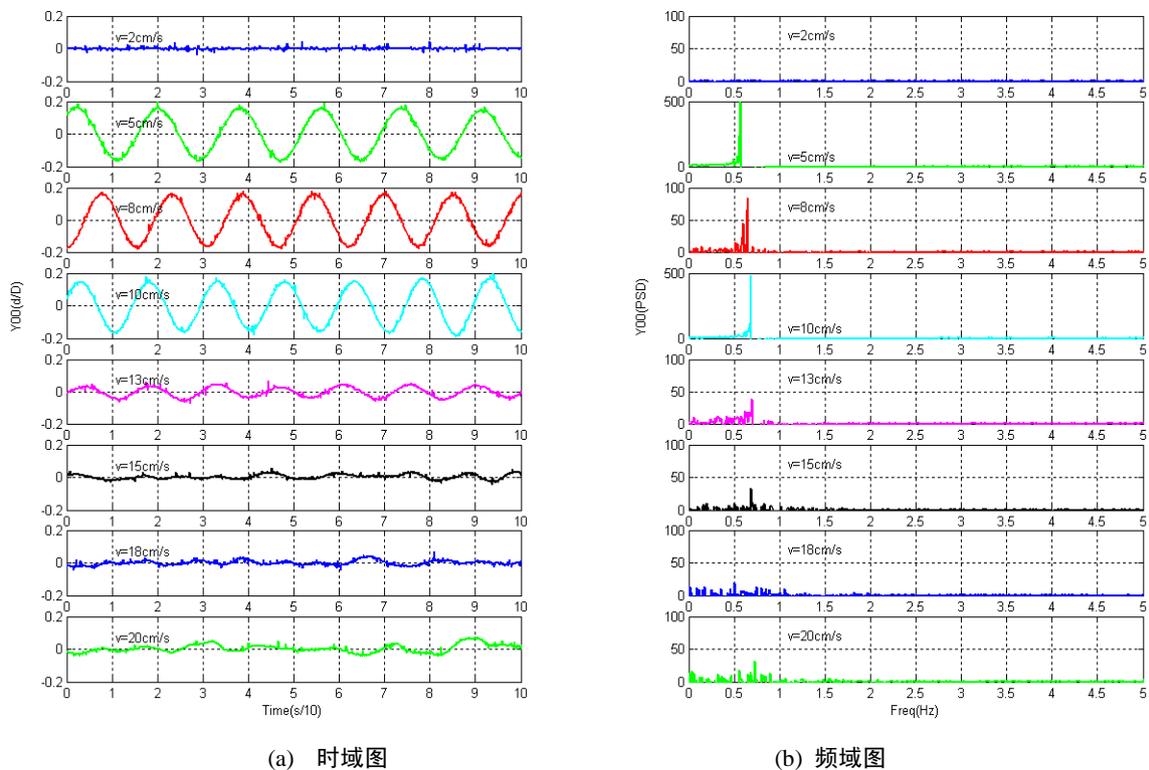


图4 0#柱在不同流速下横向振动的时域和频域图



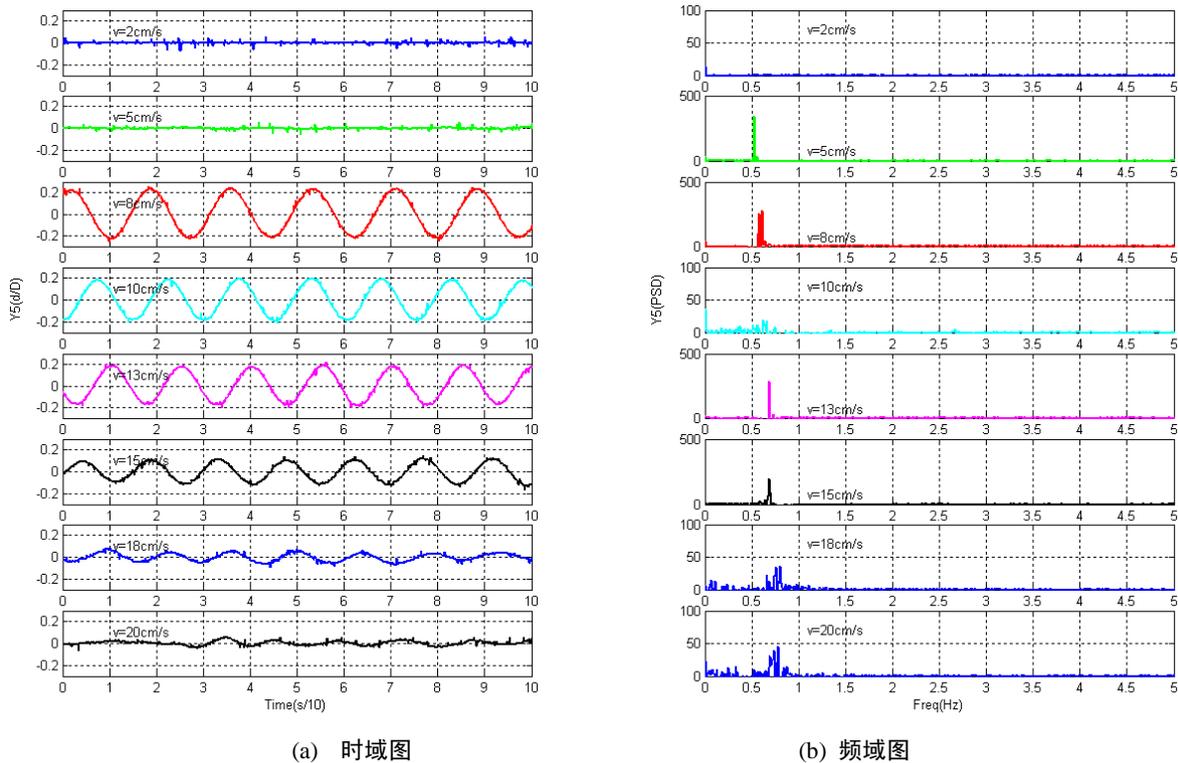


图 5 5#柱在不同流速下横向振动的时域和频域图

4 快速检测柱体结构发生 VIV 的方法

参数检测的目的就是从测量信息中获得有用的信息,其关键在于如何从时间序列信号中抽取特征,而这些特征应与流体的流速、振幅、频率等相对应,通过对无量纲振幅时间序列的 Poincare 截面分析,我们可以得到具有代表性的特征图,从它的时间序列以及相应的 Poincare 截面可以得出以下几点认识:

1、从图 6 中可以看出,用 0#柱实验时,流速逐渐从 2cm/s 增大到 20cm/s 时, Poincare 截面具有不同的特征:当 $v=2\text{cm/s}$ 时, Poincare 截面上数据点比较密集、集中,说明系统稳定,柱体振动微弱,几乎静止不动。当 $v=5\text{cm/s}$ 时, Poincare 截面上数据点构成圆形,说明系统进入准周期轨道,稳定运行,虽然柱体振动强度加大,但很稳定。当 $v=10\text{cm/s}$ 时, Poincare 截面上数据点成椭圆形,说明系统进入另一个准周期轨道,柱体振动幅度达到最大,发生共振。当 $v=13\text{cm/s}$ 时, Poincare 截面上数据点成椭圆形,但比较密集,说明系统进入下一个准周期轨道,柱体振动减弱。当 $v=15\text{cm/s}$, 18cm/s 时, Poincare 截面上数据点比较密集、集中,说明系统又进入稳定状态,柱体振动微弱,几乎静止不动。由此可以快速直观地检测出柱体结构发生 VIV 共振的流速大约是 10cm/s 。在工程应用上,对于这种结构的柱体,应避免在 $v=10\text{cm/s}$ 的流体环境中使用,以免引发共振,造成工程结构的损伤。

2、同样的道理,从图 7 中可以看出,用 5#柱实验时, $v=2\text{cm/s}$, 5cm/s 时, Poincare 截面上数据点比较密集、集中,说明系统处于稳定状态,柱体振动微弱,几乎静止不动。当 $v=10\text{cm/s}$, 13cm/s , 15cm/s 时, Poincare 截面上数据点成椭圆形,说明系统在不同的周期轨道上稳定运行,而柱体振动强度最大的流速点,是发生在 $v=13\text{cm/s}$ 的状态中。当 $v=18\text{cm/s}$ 时, Poincare 截面上数据点比较密集、分散,说明系统在一个不稳定状态下运行,柱体

振动但不是周期性的。

3、基于信号统计学意义上的分析，将测量数据的特征量，如均方根差和均值等分别与流速、频率和振幅相对应，由此从已知的单变量时间序列中估算出不同柱体结构发生共振时的实际流速，从而在工程应用中，提早避免共振的发生。

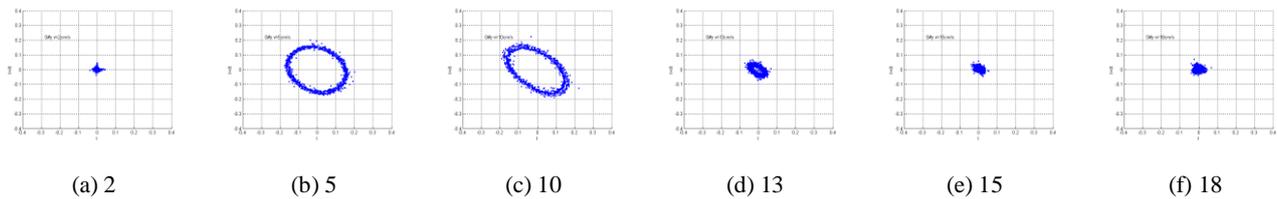


图 6 0#柱在不同流速（单位 cm/s）下无量纲横向振动的 Poincare 截面

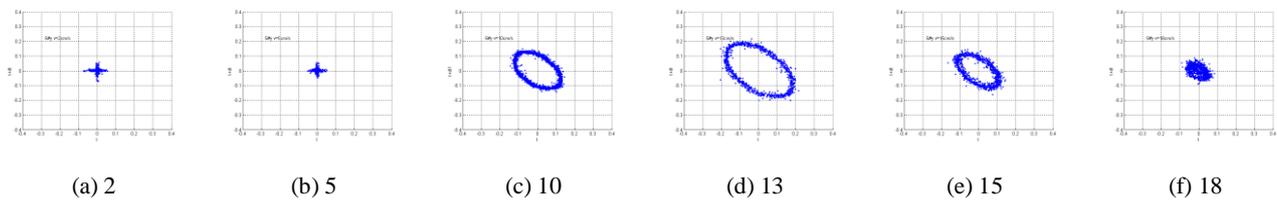


图 7 5#柱在不同流速（单位 cm/s）下无量纲横向振动的 Poincare 截面

5 结论

1. 用 Poincaré 截面方法，可以研究在两维、三维或更高维空间内流形的动力学行为，定性给出各流形的 Poincaré 截面特征，其特点是可以降低维数来研究高维系统。

2. 利用 Poincaré 截面，可以从测量信号的时间序列中快速直观地检测柱体结构发生 VIV 共振的方法，室内实验表明，这种方法快速可靠，为工程检测柱体结构的涡激振动提供了一种新的检测手段。

3. 在工程应用上，对于不同结构的柱体，应提早估算出结构固有频率和 VIV 频率，针对不同的流体环境，使用不同的柱体结构，以免引发共振，造成工程结构的损伤。

参考文献

- [1] Sarpkaya, T. & Isaacson, M. Mechanics of wave forces on offshore structures. Published by Van Nostrand Reinhold Company, New York, U.S., 1981.
- [2] Zdravkovich, M.M. Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding. J. Wind Eng. Indust. Aerodyn. 1981, 7:145-189.
- [3] Kumar, R.A., Sohn, C.H. & Gowda, B.H.L. Passive control of vortex-induced vibrations: an overview. Recent Patents on Mechanical Eng. 2008, 1: 1-11.
- [4] 吴浩&孙大鹏. 深海立管涡激振动被动抑制措施的研究. 中国海洋平台. 2009, 24(4): 1-8.
- [5] Jong Hyun Kim, John Stringer, Applied Chaos, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, INC. 1997.

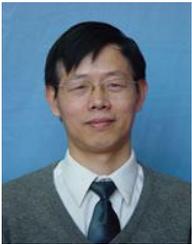


- [6] Anastasio A.Tsonis, Chaos form Theory to Application, Plenum Press, New York, 1992.
- [7] L.M. Lin, G.C. Ling and Y.X. Wu, "Mechanism responsible for the complete suppression of Kármán vortex in flows past a wavy square-section cylinder," Chin. Phys. Lett. 2010, vol. 27, pp. 034702.



【作者简介】

钟兴福（1967-），男，汉，副研究员，博士，研究方向：海洋工程，多相流体力学。
Email:xfzhong@imech.ac.cn.



导师：吴应湘（1956年-），男，汉，研究员，博士，流体力学、海洋工程力学、水动力学、多相流体力学研究。

Email:yxwu@imech.ac.cn.

