

圆柱附加刚性分离盘涡激振动数值模拟

陈雯煜, 王嘉松*

(上海交通大学工程力学系水动力学教育部重点实验室, 上海, 200240, Email: chenwenyu@sjtu.edu.cn)

摘要: 涡激振动是一种典型的流固耦合问题, 附加刚性分离盘是一种典型的流动控制方法。本文通过对 OpenFOAM 开源流体力学计算库嵌入自编写流固耦合程序, 开发了可用于求解低质量比网格大变形的求解器。本文验证了单圆柱 VIV 经典算例。采用 k- ω 湍流模型计算了 $Re=2250$ 和 8250 下的 1 倍圆柱直径分离盘长的流致振动案例。通过对振动幅值及其涡脱模式并经由 FFT 变换对其频域的分析, 可以看出圆柱附加刚性分离盘的振动特性不同于经典 VIV, 呈现出大振幅低频驰振, 适用于振动能量回收

关键词: 涡激振动; 刚性分离盘; 驰振; 能量回收

1 引言

在海洋工程应用中, 圆柱结构的涡激振动十分常见。随着对海洋新能源的不断探索和水力发电电网控制技术的成熟, 流致振动能量回收成为水动力回收的一种新方法。为了增强涡激振动, 需要采取一些流动控制策略。

工程上, 涡激振动的控制策略主要有两种: 主动方式和被动方式。主动控制的方式是引入外部能量, 如表面加热和吸吹方式; 被动控制的方式是在圆柱表面附加各种抑制装置, 如整流罩 (fairing), 分离盘 (splitter plate), 螺旋导板 (strakes) 等^[1]。

分离盘是一种有效的抑制旋涡脱落的装置。王嘉松等^[2]、钟庆等^[3]通过数值模拟的方式深水隔水管附加分离盘后流动控制的效果。Unal 等^[4]、Texier 等^[5]、Akilli 等^[6]以及谷斐^[7]采用实验手段对圆柱后附加分离盘后流动形态进行了研究。梁盛平^[8-9]采用实验手段对圆柱后加有间隙的固定刚性分离盘, 圆柱后固加柔性分离盘流动形态进行了研究并发现了驰振现象。

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11872250)

通讯作者: 王嘉松, E-mail: jswang@sjtu.edu.cn

从流动控制的角度，分离盘的确能很大程度上抑制旋涡脱落，减小结构所受的流体力但在某些情况下，又会导致振动加强。Assi 等^[10]进行了一系列的水洞实验，结果表明，圆柱上附加分离盘不仅没能降低振动，反而使振动大大加强。Assi 等^[11]发现，附加分离盘后，升力与位移之间相位差不会突然跳跃，PIV 实验发现，剪切层会附着在分离盘上。Assi 等^[10]把此时的结构响应归为驰振(galloping)。

对于圆柱附加刚性分离盘的涡激振动，以往多采用实验手段进行研究，对于圆柱附加刚性分离盘的数值研究尤其是湍流下的数值研究极为少见，但实际海洋状况复杂，圆柱附加刚性分离盘的数值模拟仍需要进一步研究。本文基于 OpenFOAM 开源库，嵌入结构动力学求解及耦合模块，成功模拟了湍流状态下的圆柱附加刚性分离盘的流动特性。并与 Assi^[13]实验结果对比吻合良好。

2 数值模型及其验证

流场控制方程采用雷诺平均 N-S 方程，结合 k-omega 湍流模型。由于刚性结构物振动时，变形对结构物及贴体网格的影响不大，本文处理流固耦合界面采用弱耦合。流场求解采用 PIMPLE 算法，振动方程求解采用 Lax-Wendroff 算法。

验证算例根据 Khalak 等^[12]的实验模型给出，其结构参数如表 1 所示，网格量 3-5 万， u 为来流速度，约化速度 Ur 根据 $Ur=u/(fnD)$ 得到。

表 1 结构模型参数

项目	(质量比) m^*	(阻尼比) ζ (%)	(圆柱直径) D (m)	(固有频率) fn (Hz)
单圆柱	2.4	0.59	0.04	0.5
圆柱附加分离盘	2.7	0.7	0.05	0.3

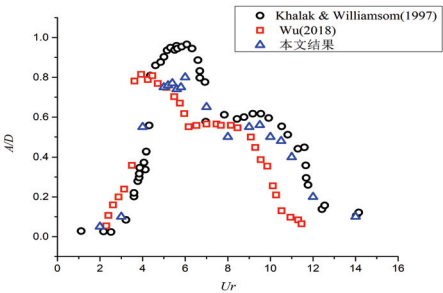


图 1 单圆柱横向 VIV 响应振幅

图 1 对比了 Khalak 等^[12]经典实验数据与 Wu^[13]数值模拟结果中圆柱在不同约化速度下的横流向 VIV 响应振幅。结果表明当前数值模型可以很好地模拟不同来流速度下的圆柱 VIV 响应。在 $Ur=6$ 附近的约化速度区间内，VIV 响应最为强烈。最大振动幅值 A/D 约为

0.8，同样的模型参数，本文的数值模型相对于 Wu 能更好的捕捉下端分支及共振区间。

3 圆柱附加刚性分离盘

3.1 绕流模型参数及结果分析

模型参数根据 Assi^[14]的实验模型给出(表 1)所示。为了提高计算效率，本文采取先单独计算流场等到流场稳定续算流固耦合程序，由表 2 可知，对于固定圆柱的圆柱附加分离盘，其阻力系数和升力系数明显小于单圆柱。

表 2 绕流计算所得力系数

项目	C_l	C_d		C_l	C_d
单圆柱 $Re=2250$	0.78	1.2	单圆柱 $Re=8250$	0.59	1.1
圆柱附加分离盘 $Re=2250$	0.07	0.9	圆柱附加分离盘 $Re=8250$	0.15	0.8

3.2 振动模型参数及结果分析

3.2.1 幅值响应

如图 2 所示 (a) 为 $Re=2250$ ， $Ur=3$ 的振动幅值与升力系数的历时曲线图，此时振动不强，但升力系数较之固定绕流分离盘显著增大，达到近 3.0。此时 A/D 约为 0.15,振动不强烈，从幅值来看类似经典 VIV 初始分支。但是对于 $Re=8250$ ， $Ur=11$ 的圆柱附加分离盘较之单圆柱呈现显著差别，此时 A/D 约为 1.84，是同约化速度单圆柱无量纲振幅的近 4 倍。不论是 $Ur=3.0$ 还是 $Ur=11.0$ ，升力与振动都是同相的，不同于经典 VIV 在约化速度锁定区会有一次相位跳跃，这使得升力一直对振动幅值起到正向作用，使得振动越来越强烈。

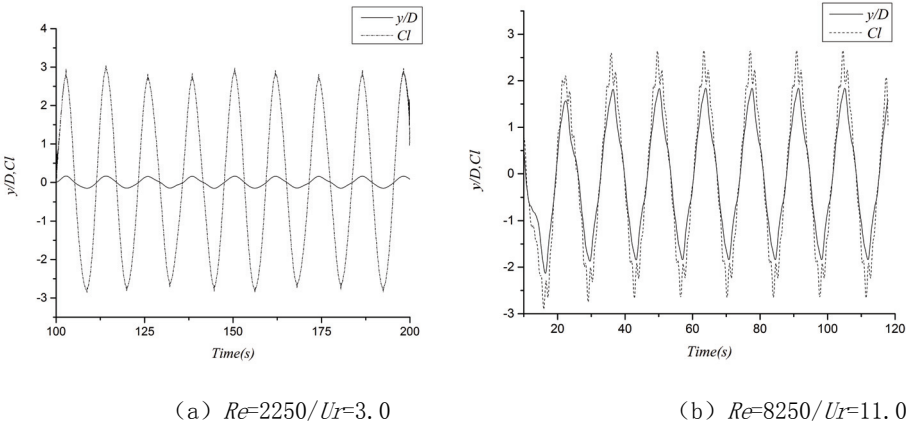


图 2 横流向位移响应和升力系数历时曲线

表 3 幅值及振动频率对比

	($Ur=3.0$) A/D	($Ur=11.0$) A/D	($Ur=3.0$) f_o/f_n	($Ur=11.0$) f_o/f_n
Assi (2009)	0.17	1.80	0.2	0.28
本文	0.15	1.84	0.25	0.254

3.2.2 频域分析

如图 3 和图 4 是对圆柱附加分离盘的位移和升力进行 FFT 得到的结果，并将其与同雷诺数的单圆柱振动比较。其中 L_{sp} 指的是附加分离盘的长度。可以看出，相较于单圆柱，附加分离盘的无因次振动频率明显远远小于 1， $Ur=3.0$ 和 $Ur=11.0$ 时的附加分离盘的圆柱结构振动频率都约等于 0.25，如表 3 所示，这与 Assi^[14]的实验结果也是十分吻合的。由图 4 可以看出在振动很强的时候升力也出现了多倍频，图 3 中此时在 0.5~1.0 中间出现了小的突起，结合图 5 可知每侧同时涡脱会出现一个大涡和一个小涡，由幅值响应可以看出小涡对振动激励可能不大，应此升力此处未出现明显多倍频。

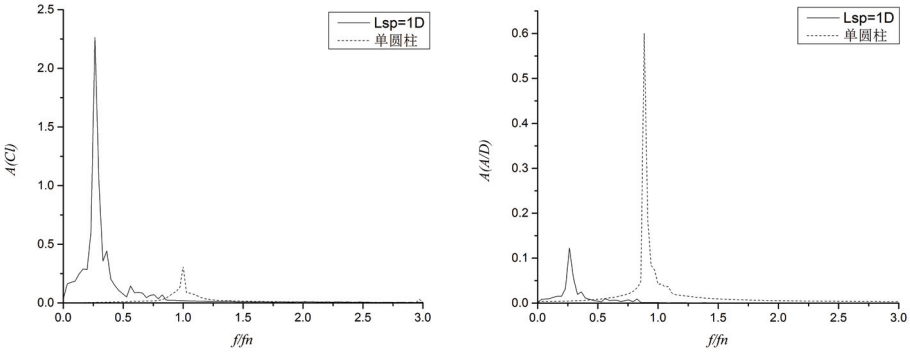


图 3 $Re=2250/Ur=3.0$ 升力系数及结构横流向振动位移 FFT 结果

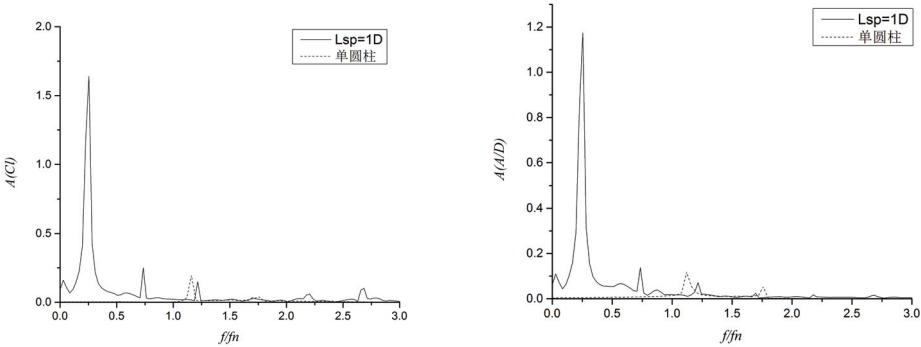


图 4 $Re=8250/Ur=11.0$ 升力系数及结构横流向振动位移 FFT 结果

3.2.3 涡脱模式

图 5 和图 6 是两种雷诺数下的一周期内选取的前半周期的瞬态涡量场云图。可以看出边界层在整个振动过程中一直黏附在分离盘上下两侧。当雷诺数较小时，每次涡从圆柱上脱

落刚好结构物的振动带动分离盘使得涡被分离盘“掐”断成一个大涡和一个小涡然后同时脱落，此时一个周期脱落 2 个大涡 2 个小涡。当 $Ur=11.0$ 时，可以看出随着流速增大，由于振动响应幅值大，涡脱频率幅值大，其尾部涡分布会出现偏斜和 S 型，一个周期共脱落 22 个涡，每侧会以 S+5P 模式涡脱。

综上，圆柱附加刚性分离盘改变了圆柱涡激振动的涡脱模式，其边界层黏附到分离盘使得产生低频高幅驰振，这种增强振动的流动控制方法可用于振动能量回收利用，将后续深入研究。

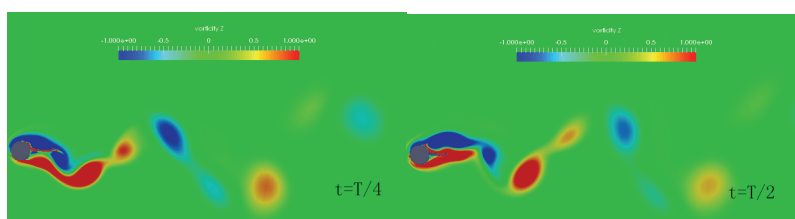


图 5 $Re=2250/Ur=3.0$ 瞬时涡量场

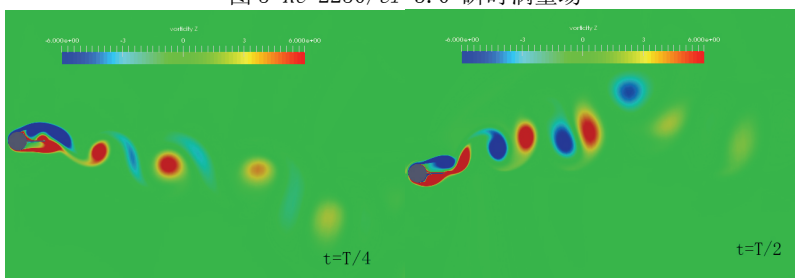


图 6 $Re=8250/Ur=11.0$ 瞬时涡量场

参 考 文 献

- 1 Lee, K., et al. Prediction of vortex-induced vibration of bare cylinder and cylinder fitted with helical strakes. in MATEC Web of Conferences. 2017.
- 2 王嘉松. 附加分离盘控制隔水管涡激振动的高分辨率数值模拟研究 [C]. 第九届全国水动力学学术会议暨第二十二届全国水动力学研讨会论文集. 2009.
- 3 钟庆,等.附加分离盘控制隔水管涡激振动的研究[J].煤炭技术,2010,29(09):177-179.
- 4 Unal, M.,D. Rockwell. On vortex formation from a cylinder. Part 2. Control by splitter-plate interference . Journal of Fluid Mechanics, 1988,190: 513-529.
- 5 Texier, A., A.S.C. Bustamante, & L. David, Contribution of a short separating plate on the control of the swirling process downstream a half-cylinder. Experimental thermal and fluid science, 2002. 26(5): 565-572.
- 6 Akilli, H., B. Sahin, & N.F. Tumen, Suppression of vortex shedding of circular cylinder in shallow water by a splitter plate. Flow Measurement and Instrumentation, 2005. 16(4): 211-219.
- 7 谷斐, 等. 利用分离盘抑制隔水管涡激振动的风洞实验研究 [C]. 第九届全国水动力学学术会议暨

第二十二届全国水动力学研讨会论文集, 2009.

- 8 Liang, S., et al. VIV and galloping response of a circular cylinder with rigid detached splitter plates. *Ocean Engineering*, 2018, 162: 176-186.
- 9 Liang, S., et al. Vortex-induced vibration and structure instability for a circular cylinder with flexible splitter plates. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 174: 200-209.
- 10 Assi, G.R., P. Bearman, & N. Kitney, Low drag solutions for suppressing vortex-induced vibration of circular cylinders. *J. Fluids Struct.*, 2009, 25(4): 666-675.
- 11 Assi, G.R. & P.W. Bearman, Transverse galloping of circular cylinders fitted with solid and slotted splitter plates. *J. Fluids Struct.*, 2015, 54: 263-280.
- 12 Khalak, A. and Williamson, C.H.K. Fluid forces and dynamics of a hydroelastic structure with very low mass and damping. *Journal of Fluids and Structures*, 1997, 11(8): 973-982.
- 13 吴文波 海洋结构中多圆柱流动干涉与涡激振动特征研究[D]. 2017.
- 14 Gustavo R. S. Assi Mechanisms for flow-induced vibration of interfering bluff bodies[D]. 2009.

Numerical Simulation of vibration response for the circular cylinder with attached splitter plates

CHEN Wen-yu, WANG Jia-song

(MOE Key Laboratory of Hydrodynamics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Email: chenwenyu@sjtu.edu.cn)

Abstract: Vortex-induced vibration is a typical fluid-structure interaction problem. An additional rigid splitter plate is a typical flow control method. This paper develops a solver that can be used to solve large deformation of mesh for low-mass ratio circumstances by embedding a self-written fluid-structure interaction program into the OpenFOAM. This paper verifies the classic example of a single cylinder VIV. The k- ω turbulence model was used to calculate the flow-induced vibration of the cylinder fixed with rigid splitter plate of one diameter length under Reynolds number of 2250 and 8250. Through the analysis of the vibration amplitude and its vortex shedding mode through FFT transformation, it can be seen that the vibration characteristics of the circular cylinder with attached splitter plates are different from the classical VIV, and it exhibits the large-amplitude low-frequency galloping characteristics of the vibration, and it may be used for the vibration energy harvesting.

Key words: vortex induced vibration, rigid splitter plate, galloping, energy harvesting