

文章编号:1673-5005(2010)02-0110-04

基于 CFD 的深水隔水管螺旋列板几何参数优选

鞠少栋, 陈国明, 盛磊祥, 畅元江

(中国石油大学 机电工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:基于计算流体动力学方法(CFD),利用 FLUENT 软件计算亚临界雷诺数条件下隔水管和螺旋列板的升力系数和曳力系数等流场参数并进行对比;以流场参数为目标函数,建立正交数值模拟试验,并对螺旋列板几何参数进行敏感性分析,确定几何特性对列板性能的敏感度。结果表明:列板高度和条数对减振功效和曳力性能都有显著影响;优化的几何参数组合可为现场应用中螺旋列板的结构设计提供参考。

关键词:隔水管; 涡激抑制; 参数优选

中图分类号:TE 58

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2010.02.022

CFD-based optimization for geometric parameters of deepwater riser helical strakes

JU Shao-dong, CHEN Guo-ming, SHENG Lei-xiang, CHANG Yuan-jiang

(College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: Based on CFD theory, the difference of flow field parameters, including lift coefficient and drag coefficient, was compared and analyzed using FLUENT software, between helical strakes and riser in the subcritical conditions of Reynolds number. Taking flow field parameters as the objective function, an orthogonal experiment of numerical simulation was performed and the sensitivity analysis was applied on the helical strakes' geometric parameters to determine the sensibility of geometrical property. The results show that the variation of the strake height and the number of strip has a significant affection on vortex-induced vibration (VIV) suppression and drag force, and an optimized structure may provide the reference for the structural design.

Key words: riser; vortex-induced vibration (VIV) suppression; parameter optimization

随着海洋油气勘探与生产进入深水和超深水领域,涡激振动成为隔水管失效的重要因素^[1]。为了避免或减小涡激振动造成的危害,目前已研制了多种不同的涡激抑制装置。作为涡激振动控制方法中的代表技术,螺旋列板(helical strakes)对深水隔水管涡激振动具有较好的抑制效果,疲劳损伤可以减小80%以上^[2]。螺旋列板减振的本质机制是^[3]通过不断改变径向的来流分离角度扰乱漩涡的空间相关长度,从而削弱漩涡强度并达到减小升力的目的。这种装置已经成功应用于 Serrano, Oregano 和 Brutus 等多个平台。螺旋列板结构相对复杂,以往试验只研究单一几何因素与列板性能之间的关系,参考

价值具有一定局限性。笔者利用 CFD 方法对螺旋列板流场参数进行分析计算,综合考虑列板高度、条数和螺距等几何因素对升力和曳力的影响,设定数值模拟试验进行多目标敏感性分析,在此基础上选出螺旋列板最优结构。

1 螺旋列板几何特性

螺旋列板的性能被自身的几何特性所控制,但列板性能对几何尺寸的敏感度尚未得到完全理解。关于螺旋列板的应用,有两个基本问题需要解决:(1)确定列板的尺寸,如螺纹的高度与螺距;(2)确定列板覆盖长度。图1所示的是已装在隔水管上的

收稿日期:2009-06-23

基金项目:国家自然科学基金项目(50904078);国家大型油气田及煤层气开发子课题(2008ZX05026-001-07)

作者简介:鞠少栋(1984-),男(汉族),山东潍坊人,博士研究生,从事深海石油装备方面的研究。

螺旋列板^[4]。Frank 等^[5]对 3 线螺纹、高 $0.25D$ 、螺距 $16D$ 的列板模型进行的实验结果表明,无论一致流场还是剪切流场,圆柱体的响应振幅随着列板覆盖范围的增大而降低,而当圆柱体全部覆盖列板后,响应振幅的降低幅度可超过 95%。

螺旋列板的几何特性可以通过高度、螺距以及螺旋列板条数来表述,高度与螺距通常表示为外径 D 的倍数。大量的实验研究表明,高度对列板性能的影响非常敏感^[6],对于海洋环境,列板高度一般可取为 $(0.15 \sim 0.25)D$ 。高度小于 $0.1D$ 时,列板的减振功效不显著,但高度增大时,列板的曳力系数随之增大。螺距对列板性能的影响不甚敏感,合适的螺距为 $(15 \sim 17.5)D$ 。

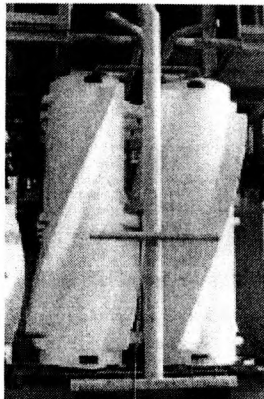


图 1 螺旋列板

Fig.1 Helical strakes

2 螺旋列板流场参数计算

2.1 正交数值模拟试验

涡激抑制和减小曳力是改善隔水管作业条件的关键问题^[7]。升力是衡量螺旋列板涡激抑制功效的重要参数,但减小升力不能以过度增大曳力作为代价。考虑影响升力和曳力的螺旋列板几何参数,设计正交数值模拟试验 $L_9(3^4)$ 并进行编码(表 1)。螺旋列板各几何参数之间无交互作用。

利用 Pro/E 软件建立螺旋列板三维模型并导入 FLUENT 软件中进行螺旋列板流场参数的分析计算。流场雷诺数取亚临界状态 $Re = 2.5 \times 10^5$ 。湍流模型采用大涡模拟^[8],时间积分方案选择二阶精度的 SIMPLE 半隐式方案,基于有限体积法的空间

离散格式,为克服假扩散,选择具有二阶精度的二阶迎风格式。

表 1 模拟试验设计

Table 1 Simulated experiment design

因素	列板条数 A	高度 B	螺距 C	空白列
试验 1	2	$0.1D$	$10D$	1
试验 2	2	$0.15D$	$15D$	2
试验 3	2	$0.2D$	$17D$	3
试验 4	3	$0.1D$	$15D$	3
试验 5	3	$0.15D$	$17D$	1
试验 6	3	$0.2D$	$10D$	2
试验 7	4	$0.1D$	$17D$	2
试验 8	4	$0.15D$	$10D$	3
试验 9	4	$0.2D$	$15D$	1

2.2 流场参数分析

为了避免重复性工作和便于结果比较,在 Pro/E 建模过程中仅须改变几何因素参数,即可导入重新进行分析计算。数值模拟试验结果如表 2 所示。

表 2 数值模拟结果

Table 2 Numerical simulation results

试验编号	升力系数 C_l	曳力系数 C_d
1	0.061	1.049
2	0.058	1.156
3	0.041	1.314
4	0.073	1.316
5	0.062	1.550
6	0.043	1.629
7	0.056	1.445
8	0.046	1.657
9	0.037	1.863

对比隔水管的升力系数幅值 0.346 和曳力系数最大值 0.593 ^[9],螺旋列板能够明显减小隔水管升力系数,具有抑制横向涡激的作用,但曳力系数显著增加,将引起隔水管顶部张力和固定端弯矩增大。试验 3 和试验 5 的升力系数和曳力系数变化曲线如图 2、3 所示。升力系数变化呈多频特性,曳力系数基本保持稳定。

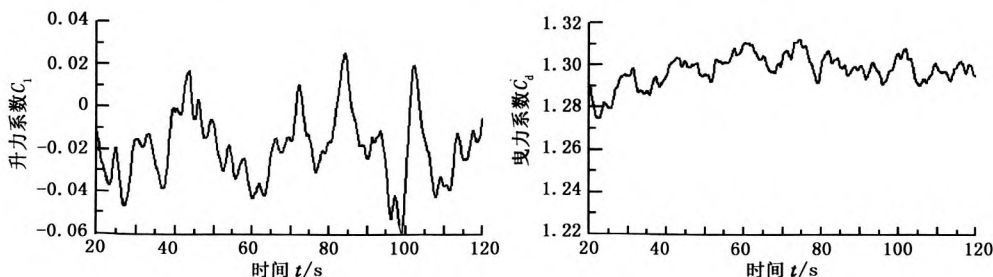


图 2 试验 3 升力系数和曳力系数

Fig.2 Lift coefficient and drag coefficient of test 3

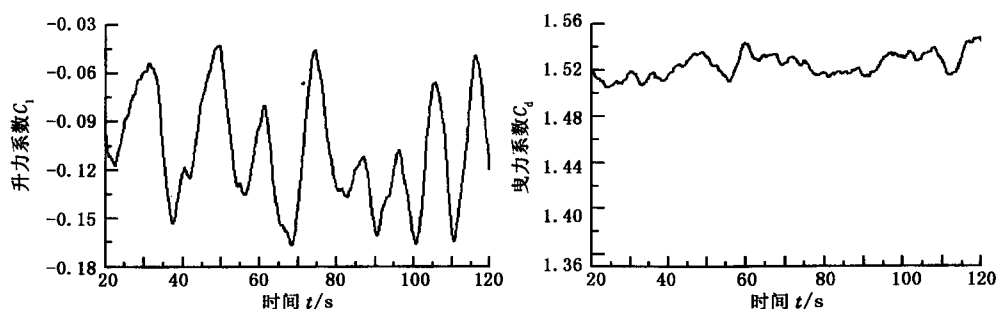


图3 试验5升力系数和曳力系数

Fig. 3 Lift coefficient and drag coefficient of test 5

3 几何参数敏感性分析

3.1 极差

螺旋列板要求升力和曳力两个指标同时达到最小值,对于多指标试验采用单指标分析综合处理法分别对每个指标进行极差分析(表3)。

表3 升力系数幅值极差分析

Table 3 Range analysis for lift coefficient amplitude

因素	列板条数 A	列板高度 B	螺距 C	空白列
水平 1	0.053	0.063	0.050	0.053
水平 2	0.059	0.055	0.056	0.052
水平 3	0.046	0.040	0.053	0.053
极差	0.013	0.023	0.006	0.001

由极差分析可知,对升力系数幅值影响最大的几何因素是列板高度 B,高度越大,列板升力系数越小,尔后依次是列板条数 A、螺距 C。按照影响的大小顺序依次选取各几何因素列中数值最小的水平,即螺旋列板的优选结构为 B3A3C1。

表4为曳力系数最大值极差分析。由表4可知,对曳力系数最大值影响最大的几何因素是列板条数 A,条数越多,列板曳力系数越大,尔后依次是列板高度 B、螺距 C。螺旋列板的优选结构为 A1B1C3。

表4 曳力系数最大值极差分析

Table 4 Range analysis for drag coefficient maximum

因素	列板条数 A	列板高度 B	螺距 C	空白列
水平 1	1.173	1.270	1.445	1.487
水平 2	1.498	1.454	1.445	1.410
水平 3	1.655	1.602	1.436	1.429
极差	0.482	0.332	0.009	0.077

极差分析表明,影响升力系数最大的因素是列板高度,而影响曳力系数最大的因素是列板条数,所以单纯通过极差分析无法确定螺旋列板的最优结构。极差分析的优点是简便、计算工作量小^[10],但该方法判断因素效应的精度低,不能给出试验误差大小的估计,在试验误差较大时往往可能造成误判。

3.2 方差分析

方差分析能充分利用试验得到的信息,估计试验误差,判断因素影响的精度高。

试验考察的指标有两个,单独考察各个影响因素对每个试验指标影响的显著性。

各几何因素对升力系数影响的显著性如表5所示。由表5可知,列板高度对升力系数的影响是高度显著,说明列板高度变化对螺旋列板的减振特性影响最大。

表5 升力系数方差分析

Table 5 Variance analysis for lift coefficient

方差来源	偏差平方和	自由度	方差估计值	F 值	$F_{0.005}$	$F_{0.01}$	显著性
列板条数	0.000 254	2	0.000 127	127	199	99	显著
列板高度	0.000 818	2	0.000 409	409	199	99	高度显著
螺距	0.000 054	2	0.000 027	27	199	99	不显著
误差	0.000 002	2	0.000 001				
总和	0.001 128	8					

各几何因素对曳力系数影响的显著性如表6所示。由表6可知,所有的因素在显著性水平为0.01时对曳力系数的影响都不显著。造成这个结果的原因是误差较大,误差自由度较小,检验灵敏度不高。为了提高检验的灵敏度,可将影响最不显著的螺距所对应的偏差平方和并入误差平方和,其相应的自

由度也并入误差自由度,然后得到修正后的分析结果(表7)。

由表7可知,列板条数和列板高度在显著性水平为0.01时为高度显著,且列板条数的显著性大于列板高度。

表 6 曳力系数方差分析

Table 6 Variance analysis for drag coefficient

方差来源	偏差平方和	自由度	方差估计值	F 值	$F_{0.005}$	$F_{0.01}$	显著性
列板条数	0.3627	2	0.18135	37	199	99	不显著
列板高度	0.1660	2	0.08300	17	199	99	不显著
螺距	0.0001	2	0.00005	0.01	199	99	不显著
误差	0.0097	2	0.00485				
总和	0.5386	8					

表 7 修正后的曳力系数方差分析

Table 7 Variance analysis for modified drag coefficient

方差来源	偏差平方和	自由度	方差估计值	F 值	$F_{0.005}$	$F_{0.01}$	显著性
列板条数	0.3627	2	0.18135	74	26.28	18	高度显著
列板高度	0.1660	2	0.08300	34	26.28	18	高度显著
误差	0.0098	4	0.00245				
总和	0.5386	8					

基于正交试验的螺旋列板几何参数敏感性分析的方差分析表明,在 0.01 显著性水平下,列板条数和高度对螺旋列板的减振和曳力性能都具有显著性影响,而螺距的影响很小。列板条数和高度越大,升力系数越小,列板条数和高度越小,曳力系数越小。考虑工程实际应用时曳力太大会显著增大隔水管顶部张力和固定端弯矩的不利影响,同时兼顾节省材料的目的,建议螺旋列板的条数和高度参数取中间值以同时兼顾减振和减小曳力的功效,螺距取较大值,即螺旋列板优选结构为 A2B2C3。

4 结 论

(1)在亚临界状态($Re = 2.5 \times 10^5$)下,螺旋列板升力系数幅值远小于隔水管,曳力系数值显著增大,将引起隔水管顶部张力和固定端弯矩增大。

(2)对升力系数影响最大的因素是列板高度,高度越大,列板减振效果越好;对曳力系数影响最大的因素是列板条数,随着条数增多曳力变大,引起隔水管连接处转角增大,隔水管更容易损坏。

(3)列板高度和条数对减振和曳力性能都有显著性影响,螺距几乎没有影响。列板高度和条数的高敏感度符合现场应用规律。

(4)综合考虑工程实际应用时各种因素的影响,建议螺旋列板的条数和高度参数取中间值,螺距取较大值,螺旋列板的最优结构为列板条数 3 条、列板高度 $0.15D$ 、螺距 $17D$ 。

参考文献:

- [1] 孙友义,陈国明,畅元江. 深水铝合金隔水管涡激振动疲劳特性[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008, 32(1):100-104.
SUN You-yi, CHEN Guo-ming, CHANG Yuan-jiang.

Vortex-induced vibration fatigue characteristic of deepwater aluminum alloy riser [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(1): 100-104.

- [2] HOWELLS H, BOWMAN J. Drilling riser/well system interaction in deepwater, harsh environments [R]. 2H Offshore Engineering Limited, 1997.
- [3] ALLEN W, LEE L, HENNING D L. Fairings versus helical strakes for suppression of vortex-induced vibration: technical comparisons: proceedings of the 2008 Offshore Technology Conference, 2008 [C]. Houston; c2008.
- [4] ARMSTRONG S P. Planning, procedures, and results of a deepwater vertical SCR VIV suppression retrofit project: proceedings of the 2006 Offshore Technology Conference, 2006 [C]. Houston; c2006.
- [5] FRANK W R, TONARELLI M A, SLOCUM S T, et al. Flow-induced vibration of a long flexible, straked cylinder in uniform and linearly sheared currents: proceedings of the 2004 Offshore Technology Conference, 2004 [C]. Houston; c2004.
- [6] ALLEN W, HENNING D L, LEE L. Performance comparisons of helical strakes for VIV suppression of risers and tendons: proceedings of the 2004 Offshore Technology Conference, 2004 [C]. Houston; c2004.
- [7] TAGGART S, TONGNARELLI M A. Offshore drilling riser VIV suppression devices: proceedings of OMAE2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering, 2008 [C]. Estoril; c2008.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 139-142.
- [9] 盛磊祥. 海洋管柱结构涡激振动流体力学分析 [D]. 东营:中国石油大学机电工程学院, 2008: 31-39.
- [10] 何少华. 试验设计与数据处理 [M]. 湖南:国防科技大学出版社, 2002: 70-72.

(编辑 沈玉英)