

学院：土木工程学院

编号：

哈尔滨工业大学

大一年度项目立项报告

项目名称：基于仙人掌仿生结构的涡激振动抑制试验研究

项目负责人：秦莲喜

学号：

联系电话

电子邮箱：

专业集群：智慧人居智能土木智能交通

辅导员：李明哲

指导教师：李惠

职称：教授

联系电话：

电子邮箱

学院及专业：土木工程学院

指导教师：李文杰

职称：博士生

联系电话：

电子邮箱

学院及专业：土木工程学院

哈尔滨工业大学基础学部制表

填表日期： 2020 年 11 月 13 日

一、项目团队成员（包括项目负责人、按顺序）

姓名	性别	所在专业集群	学号	联系电话	本人签字
秦莲喜	男	智慧人居智能土木智与智能交通			
李永江	男	智慧人居智能土木智与智能交通			
聂汉	男	智慧人居智能土木智与智能交通			
蔡马秀	女	智慧人居智能土木智与智能交通			

二、指导教师意见

课题较为新颖，所需研究基础在本科生背景下有所拓展，可以较好地提高本科生对科研的认知与从事科研的兴趣，同时提高同学对土木工程专业了解程度，锻炼自身能力，同意开题。

签 名： 年 月 日

三、项目专家组意见

批准经费： 元 组长签名： （ 学部盖章 ）
年 月 日

四、立项报告

1 课题背景和研究意义

2020 年 5 月 5 日，虎门大桥异常振动的新闻引发了全国性的关注。在新闻报道画面中，这座大型悬索桥的晃动幅度相当大，专家组初步判断，虎门大桥悬索桥振动的主要原因是：沿桥跨边护栏连续设置水马，改变了钢箱梁的气动外形，在特定风环境条件下，产生了桥梁涡振现象。



图 1 虎门大桥的涡振现象

涡激振动是一种复杂的流固耦合振动，当流体经过钝体断面时在下游发生分离生成有规律性脱落的旋涡，旋涡使物面两侧的压力分布呈周期性变化，从而产生作用于物体的强迫交变载荷。当尾涡的脱落频率与结构自由振动频率接近时，结构将发生大幅振动，即涡激振动（Vortex-induced Vibration, VIV）。当发生涡激振动时，在一定风速范围内尾涡的脱落频率不再与风速成正比而是与结构的自振频率保持一致，这一现象称为“频率锁定”。特别的，“频率锁定”现象会对低质量阻尼系统造成了更严重的后果，是结构疲劳破坏和失稳的重要因素之一。

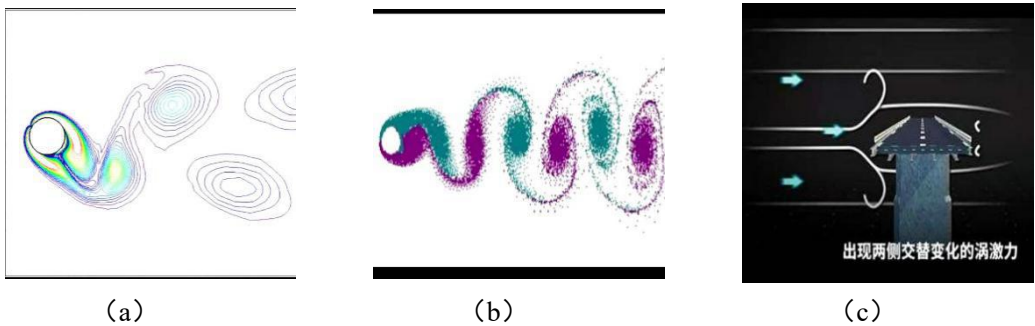


图 2 涡激振动

在工程实践中，如海洋工程、地面交通工程、桥梁工程、能源工程等众多领域中涡激振动一直是一个普遍存在的问题。海洋工程领域中，很多关键部件如海

底电缆、浮式平台缆索等都具有类圆柱体形状，这些海洋结构物极易受到尾流涡脱引起的动力载荷作用，尤其当其固有振动频率和尾涡脱落频率一致时，整个结构物的涡激振动会变得更加剧烈，最终导致结构物的疲劳破坏。海岸边港口起重机结构中的圆截面杆件很容易发生风致振动，而其中又以涡激振动为主，很快就能引起杆件两端节点板应力集中部位的疲劳开裂。大跨度桥梁主梁在运营阶段常遇风速下易发生涡激振动现象，从而引起行车舒适性和桥梁结构疲劳等问题。对于桥梁和高楼等非圆形结构来说，在涡激力作用下，除横向弯曲振动外，还可能发生扭转振动，结构局部应力集中，受损可能性增大。



(a) 缆风绳



(b) 日本东京大桥

图 3 涉及涡振的实例

涡激振动不仅会造成结构的疲劳损伤，当形成共振时，会对结构造成直接破坏；此外，旋涡脱落还有增大阻力，产生噪声等危害。因此，寻找抑制涡激振动的方法对解决工程实际问题具有非常重要的意义。

2 研究现状

在大跨度悬索桥的设计和施工中，我们不得不考虑悬索桥吊杆的涡振效应，并尽可能地减弱或克服它所带来的影响。抑制涡激振动的办法大致分为两类，一是安装阻尼耗能装置，二是对桥梁结构进行气动外形优化，使之具有良好的涡振性能。考虑到前一方法成本较高且需要长期维护更换，从吊杆的气动外形优化不失为一种较为巧妙的解决问题的思路。

2.1 圆柱涡激振动的抑制

对单圆柱体的绕流和涡激振动的研究是从实验开始的，经过多年来国内外学者的研究，关于单圆柱的绕流和涡激振动的理论和成果已经相当成熟。当流体流动的雷诺数 Re 较低时，圆柱体周围的流动是稳定的。当雷诺数增加到 $Re=46$ 时，圆柱后的尾流呈现出摆动，开始出现不稳定性。当雷诺数 $Re=190$ 时，流体开始表现出三维性。当雷诺数进一步增大到 $Re=500$ 左右时，圆柱尾流开始变为紊流，

但是圆柱周围的流体（边界层）仍然为层流。当雷诺数进一步增加到 $Re=105$ 左右时，圆柱表面边界层的流动变为紊流。

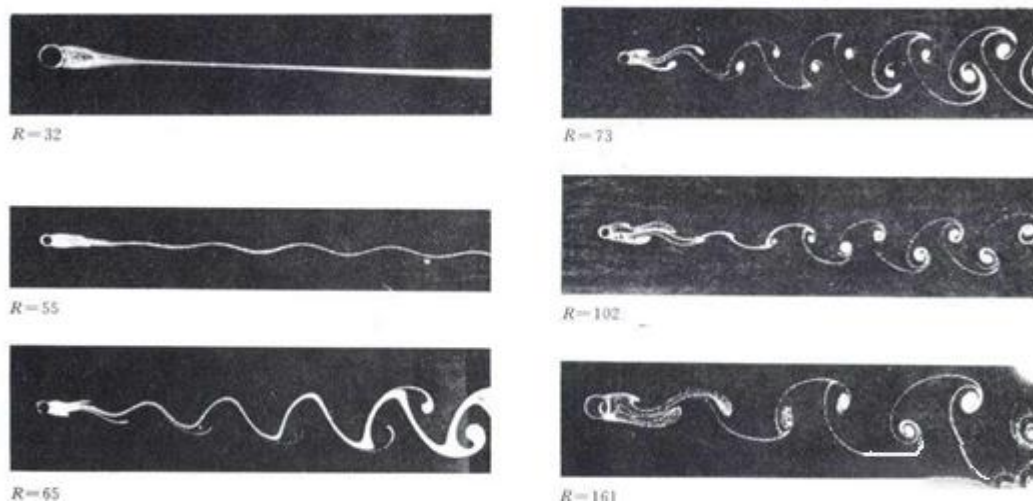
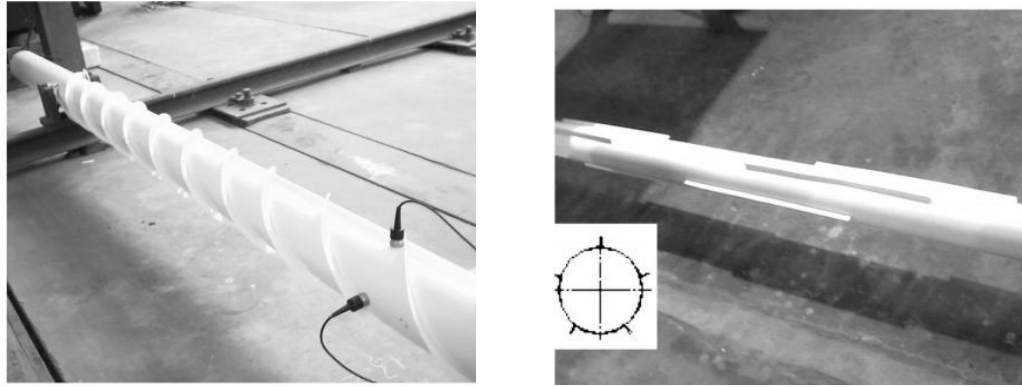


图 4 不同 Re 下的单圆柱体绕流情况

许多科学家从圆柱体本身出发，通过改变圆柱体的外形以达到抑制涡激振动的目的。Shuanhuang^[2]详细地介绍了三螺旋槽对固定圆柱的阻力和弹性支承圆柱的涡激振动的影响。他的研究发现三螺旋槽能较为有效抑制圆柱的涡激振动。郑苏针^[6]对目前在岸边起重机结构中采用的抑制风振措施主要是安装螺旋肋，但关于螺旋肋的参数未有研究这一现象，先从理论上分析引起这些杆件涡激振动的原因；然后用具体实验模拟圆截面杆件的风致振动，在实验中分别采取螺旋肋和直条肋，对多种布置方式下的实验结果进行对比，证明了螺旋肋对于圆截面杆件的横风向振动的控制作用控振效果与螺旋肋的肋数和导径比有关。胡传新等人设置栏杆扶手抑流板，抑流板改变了断面上表面区域流场，进而破坏了双旋涡模式，从而有效抑制了涡振。李志国^[13]在分离式双箱梁两侧箱梁之间安装中央格栅，中央格栅将经由上游断面而产生的上、下部旋涡打碎和隔离，使得旋涡尺度、作用强度减弱、范围明显变小，导致断面升力幅值显著减小，从而有效地抑制竖向涡振的发生。

还有一些科学家通过在物体表面安装凸起物，改变表面流动的分离线和方向来控制尾区结构。如郑苏^[6]在结构表面安装螺旋肋，发现螺旋肋对于圆截面杆件的横风向振动有较明显的控制作用；邵传平^[12]在沿结构展向每隔一定距离布置一根直径很小的圆棒，发现在所选定的棒间距和攻角下，旋涡脱落被完全抑制。Lee 和 Kim^[14]在圆柱上按螺旋包扎三根小线，发现表面凸起物拉长了旋涡形成区，并降低了旋涡脱落频率和尾区宽度。Tognarelli^[15]研究了圆柱体群在有螺旋列板和无螺旋列板两种情况下的振动响应和疲劳寿命。



(a) 螺旋状突起

(b) 直线型突起

图 5 表面安装凸起物的模型

2.2 仙人掌仿生圆柱涡激振动的抑制

研究人员对沙漠中的仙人掌的仔细观察发现即使沙漠中的风沙很大,仙人掌的根扎的很浅,柱状仙人掌依然能够稳定的站立。因此,有科学家开始对柱状仙人掌的耐风特性进行了研究。余俊^[3]采用 PIV 流动显示技术对类仙人掌圆柱周围流场流动特性进行定量描述,通过对光滑圆柱和类仙人掌圆柱进行高分辨率 PIV 测量,结果表明类仙人掌圆柱拉长了绕流尾迹的长度,并减少了远场尾迹区的脉动强度,从圆柱上下沿脱落的小漩涡结构在远场耦合形成大尺度相干结构表明类仙人掌圆柱表面的齿槽结构减小了相干结构的尺寸。Talley^[16]通过风洞试验证明了仙人掌型截面圆柱体受到的阻力比等比尺的圆柱体更小。Krishnan Mahesh 和 Pradeep Badu^[17]通过 DNS 的方法对二维仙人掌圆柱和光滑圆柱进行数值模拟,表明仙人掌圆柱齿槽中产生的旋涡减小了壁面应力,且仙人掌圆柱的粘性阻力小于光滑圆柱。当雷诺数较大时,仙人掌圆柱的压差阻力小于光滑圆柱。赵帆^[8]等人研究了仙人掌仿生圆柱在水中涡激振动的响应。表明仙人掌型截面相比于圆形截面具有一定的抑振效果,且明显抑制了下游立管的振动,降低了疲劳损伤率。说明仙人掌仿生圆柱在水这种流体中具有良好特性。Wang^[1]等人对仙人掌仿生圆柱的气动特性进行了研究,基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法研究了具有不同高度比的仿生表面的圆柱体的 VIV 响应。随着仿生结构高度比的增加,大振幅运动区的范围逐渐减小,锁定范围较小。横流方向的振幅比从 1.50 下降到 0.75,减少了约 50%。顺流方向的振幅比从 0.35 下降到 0.12,下降了 65.7%左右。仙人掌仿生结构在今后的研究中一定会有大的用处。

3 项目研究内容及实验方案

3.1 项目研究内容

- (1) 设计不同形状参数的仿仙人掌截面柱体模型；
- (2) 通过静力和动力试验探究仿仙人掌截面柱体对涡激振动的控制效果。

3.2 实验研究方案

3.2.1 实验概述

本次实验拟在哈尔滨工业大学风洞实验室完成，首先设计不同参数的仿仙人掌截面，通过 3D 打印技术制作相应的柱体模型，对不同截面柱体模型在不同流速下分别开展固定模型试验和动力试验测试，探究仿仙人掌截面对涡激振动的控制效果。

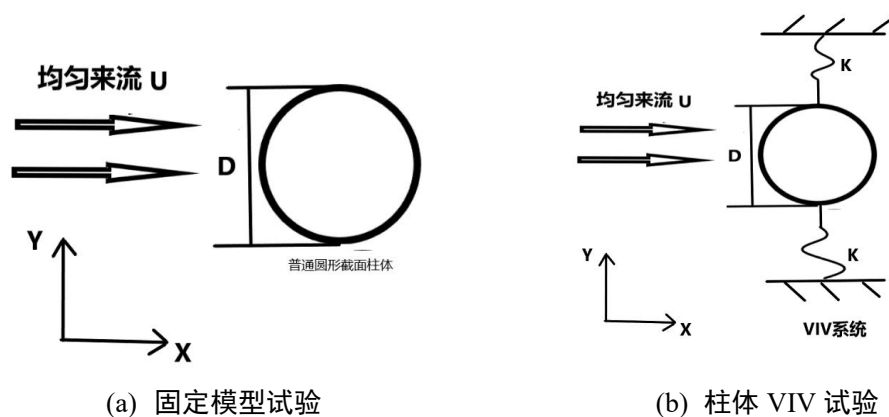


图 6 试验示意图

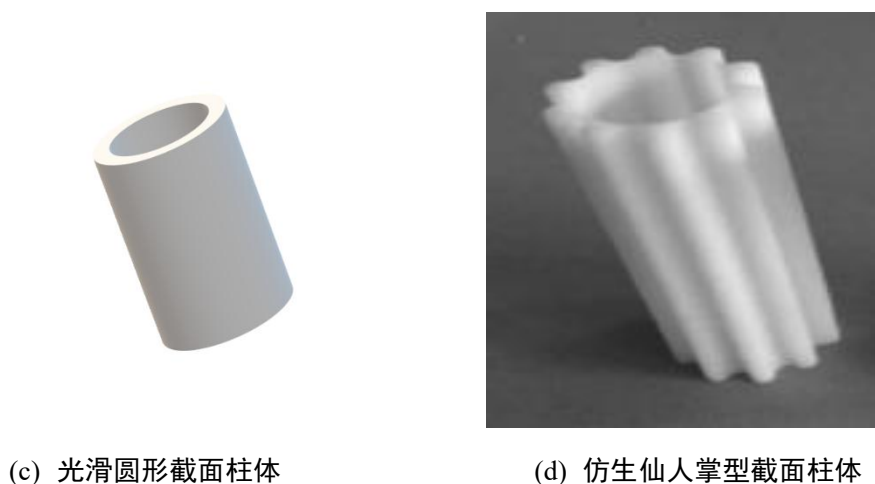


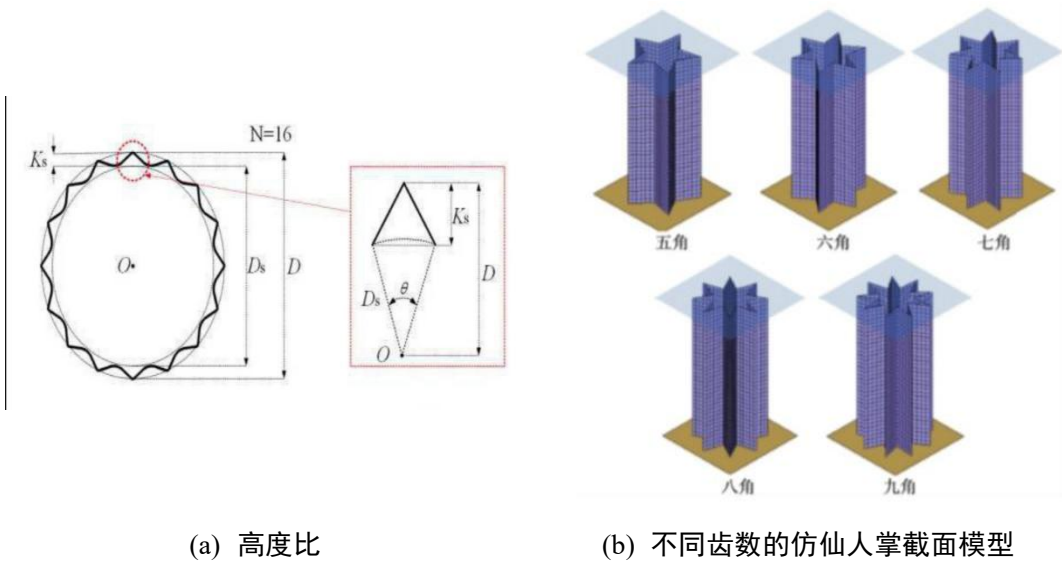
图 7 不同截面柱体模型图

3.2.2 仿生仙人掌型截面参数

对于该仿生仙人掌模型，引入仿生结构的高度比 $\eta = K_s/D$ ，其中 K_s 表示仿生表面高度， D 表示圆柱直径（如图 8(a)）。在以往的相关研究中大多都使用了控制变量法，控制齿数 N 不变，改变模型的高度比，然后进行对仿生结构相关

性质进行研究，在此基础上，我们小组欲探究在高度比不变的情况下，改变仙人掌截面的齿数，同时令凸起沿轴向周期变化（呈螺旋状），研究具有不同齿数和螺旋周期数的仿生仙人掌截面柱体对 VIV 的控制效果。

采用 3D 打印技术来制作具有不同仿生截面的柱体模型，通过配重设计使得不同截面模型的总长度，总质量均保持一致。



(c) 螺旋状凸起结构

图 8 相关参数

3.2.3 实验方案

(1) 静力试验

将不同截面柱体模型固定在支架上，静置在风洞中，开展静力试验研究，探究仿生仙人掌截面柱体模型对尾部涡脱的影响。拟采用六分量天平测量柱体的三分力系数，采用眼镜蛇风速仪测量气体经过柱体所产生的尾部涡脱情况，辅助以烟线法观察流场特征。

(2) 静风下自由振动试验

对所有待试验模型进行静风下自由振动试验，试验为弹簧悬挂的两自由度节段模型试验方法，采用激光位移计测量柱体模型的静风自由振动位移时程，由快

速傅里叶变换可以求得模型的顺流向（X 向）和横流向（Y 向）自振频率，由对数衰减律可以求得模型的阻尼比。理想结果下，待试模型在空气中的自振频率和阻尼应该基本一致，据此可以筛选出设计失误的模型。

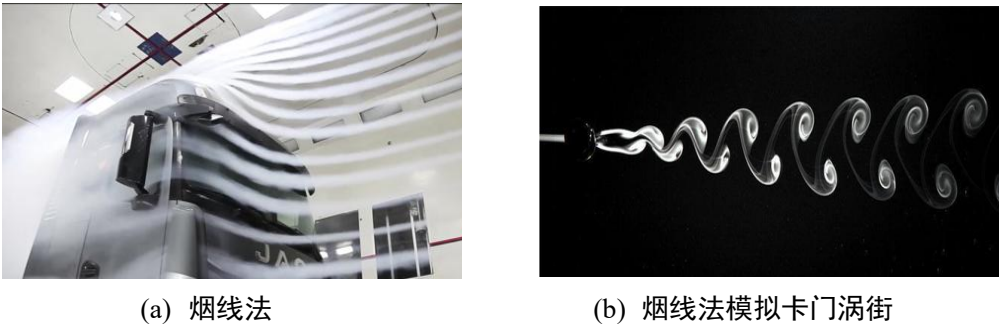


图 9 烟线法应用

(3) VIV 试验

对不同仿仙人掌截面柱体节段模型，改变来流风速并测量模型顺流向（X 向）和横流向（Y 向）的振动响应，寻找涡激振动发生的风速区间，对比不同仿生截面的涡振响应幅值，同时采用眼镜蛇风速仪和烟线法相结合来揭示柱体尾流场涡脱特征，探究不同齿数和螺旋周期数的仿生仙人掌截面柱体对 VIV 的控制效果。

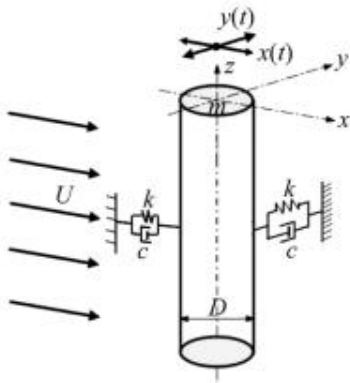


图 10 两自由度弹簧悬挂节段模型示意图

4 进度安排

表 1 具体进度安排表

任务序号	任务名称	起止时间	持续时间
1	学习涡激振动相关物理知识	2020.11-2021.07	9 个月
2	查找资料、文献完善实验方案	2020.11-2020.12	2 个月
3	设计不同类仙人掌结构柱体，打印实验模型	2020.11-2020.01	3 个月

4	初步开展静止模型风洞实验	2021.01	2 周
5	完成静止模型风洞烟线实验	2021.03	1 个月
6	进行两自由度节段模型动力实验	2021.04-2021.05	2 个月
7	整理实验数据，对比分析，得出相关结论，提出优化外形	2021. 06	1 个月
8	结题成果整理汇总，完成结题报告	2020.07	1 个月

5 中期及结题预期目标

5.1 中期目标

- (1) 制订完整的实验方案
- (2) 实验模型设计工作完成，打印出 3D 模型
- (3) 进行了初步的实验工作
- (4) 形成中期报告一份

5.2 结题目标

- (1) 完成所有既定研究内容，提出能够较好抑制涡激振动的仿生结构模型的外形
- (2) 完成结题报告

6 经费使用计划

表 2 经费使用明细表

项目名称	费用
资料费，文件打印费	500
材料费，3D 打印费	500
市内交通费	200
总计	1200 元

7 参考文献

- [1] Wei Wang, Baowei Song, Zhaoyong Mao, Wenlong Tian, Tingying. Numerical investigation on VIV suppression of the cylinder with the bionic surface inspired by gaint cactus [J]. Ocean Engineering, 2020 (214), 107775.

- [2] Shan Huang. VIV suppression of a two-degree-of-freedom circular cylinder and drag reduction of a fixed circular cylinder by the use of helical grooves[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2011 (27), 1124-1133.
- [3] 余俊.类仙人掌结构圆柱绕流的 PIV 实验研究[D]. 上海:上海交通大学动力机械及工程学科硕士学位论文, 2010
- [4] 葛平政, 胡雄杰, 强薇.仙人掌仿生结构的耐撞性研究[J]. *公路与汽运* 2019 (6): 195
- [5] 李华阳.大跨度悬索桥吊杆涡激振动响应分析[D]. 郑州:郑州大学建筑与土木工程专业硕士学位论文, 2018
- [6] 郑苏, 钞素莉, 唐军领.圆截面杆件涡激振动控制结构试验[J]. *上海海事大学学报*,2016(12):14-17
- [7] 陈东阳, 肖清, 顾超杰, 王国平, 芮筱亭. 柱体结构涡激振动数值计算[J].*振动与冲击*, 2020 (19): 7-12
- [8] 赵帆, 刘洋, 时晨.仙人掌型截面圆柱体群涡激振动响应的水槽实验研究[J].*海洋工程装备与技术*
- [9] 张立启.三维圆柱绕流与涡激振动的行波壁控制方法研究[D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程专业硕士学位论文, 2019
- [10] 颜知音.串列粗糙双圆柱涡激振动响应的研究[D].成都: 西南石油大学石油与天然气工程专业硕士学位论文, 2019
- [11] 赵洪亮.非线性因素影响下海洋立管涡激振动机理研究[D].成都: 西南石油大学机械工程专业硕士学位论文, 2019
- [12] 胡传新等.流线型闭口箱梁抑流板抑制涡激的机理研究[J].*振动工程学报*, 2020 (33) .
- [13] 李志国等.中央格栅抑制分离式双箱梁涡振的机理研究[J].*桥梁建设*, 2018 (48) .
- [14] Lee,Kim. The effect of surface protrusions on the near wake of a circular cylinder[J]. *Wind England, Aerodyn.* 1997(69): 351-361.
- [15] Tognarelli. Experimental verification of flow induced vibration fatigue of a flexible tube array with and without strakes[C]. *OMAE*. 2016.54062.
- [16] Talley. Flow around cactus-shaped cylinders[R]. *Center for Turbulence Reserch, Annual Research Brife*. 2002, 363-376.
- [17] Krishinan, Mahesh, Pradeep. Badu. Aerodynamic loads on cactus-shaped cylinders at low Reynold numbers[J]. *Physics of fluids*. 2008, 035112.