

# Modal Analysis of the Single Cylindrical Reticulated Shell Based on Ambient Excitation Method

Jie Chen, Jie Cui, Wubin Wang, Kangyou Peng, Beidou Ding

Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering, China  
University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu  
Email: dbdstar@163.com

Received: May 4<sup>th</sup>, 2017; accepted: May 22<sup>nd</sup>, 2017; published: May 26<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Because of the large number of bars, the frequencies and the mode shapes of the shell structure are very dense, and it is difficult to obtain the modal parameters due to the small energy based on hammer excitation. The ambient excitation method does not need special excitation equipment, only depends on the micro tremors, and the frequency band of signal coverage is wide. In this paper, based on the ambient excitation method, the modal analysis of single-layer cylindrical reticulated shell structure is carried out and compared with the finite element modal analysis. The effectiveness of the modal analysis based on ambient excitation is verified.

## Keywords

Ambient Excitation, Single Cylindrical Reticulated Shell, Modal Analysis

---

# 基于环境激励单层柱面网壳结构的模态分析

陈洁, 崔杰, 王武斌, 彭康佑, 丁北斗

中国矿业大学江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性高校重点实验室, 江苏 徐州  
Email: dbdstar@163.com

收稿日期: 2017年5月4日; 录用日期: 2017年5月22日; 发布日期: 2017年5月26日

---

## 摘要

网壳结构因其杆件众多, 其动力学参数频率和振型比较密集, 采用力锤激振方法因其能量过小不易获取

其模态参数。环境激励法不需要特别的激振设备, 仅仅依赖于地脉动, 信号覆盖的频带较宽, 因而能够有效地识别出了复杂结构模态参数。本文基于环境激励法进行单层柱面网壳结构模型的模态分析并与有限元模态分析结构比较, 验证了基于环境激励模态分析的有效性。

## 关键词

环境激励, 单层柱面网壳, 模态分析

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

对结构模态分析方法有很多如激振法、力锤法以及环境激励方法。当模型较小时, 采用力锤或激振器方法可以获取其模态分参数。对于结构模型较大或实际复杂工程, 由于难以用机械设备进行激振, 一般直接利用地脉动或风脉动作为结构系统输入激励。采用脉冲激励试验测试迅速、灵活, 然而所观测的地面加速度因受到噪声的干扰存在而存在虚假模态。针对环境激励法存在虚假模态的问题, 采用稳定性较好的随机子空间方法进行模态参数识别[1] [2] [3]。单层网壳结构因其刚度大、自重轻的优良特点, 被广泛用于体育场馆、展览馆、火车站等标志性建筑中, 因为考虑地震、风或动荷载作用, 对此类空间结构的模态参数的测试非常必要。从理论分析来看, 单层柱面网壳结构具有频率密集且与结构约束条件和跨度有很大关系[4]。在役网架结构或大型网架结构模型的模态参数, 由于采用力锤激振法等实验室常规方法的能量小, 其模态参数不能够激发出来。而环境激励法不需要特别的激振设备, 仅仅依赖于地脉动, 信号覆盖的频带较宽, 能够有效地识别出了复杂结构模态参数[5]。

本文加工制作网壳结构的缩尺模型, 基于 ANSYS 进行单层柱面网壳有限元模态分析, 同时进行单层柱面网壳基于环境激励法模态分析, 分别获取单层柱面网壳的动态特性频率和振型。对比分析网壳结构有限元模态分析与试验模态分析结果, 验证基于环境激励下模态分析可行性, 作为结构今后进行健康检测、损伤识别依据。

## 2. 基于 ANSYS 单层柱面网壳的有限元模型模态分析

### 2.1. 有限元理论模型

利用 ANSYS 对单层柱面网壳有限元理论模型进行模态分析, 识别网壳结构动态特性的过程如下: (1) 根据单层柱面网壳需要计算的数据, 选择合适的单元类型和材料, 设置实常数和单位制, 建立梁截面, 定义梁截面的材料属性, 进行网格划分等, 建立准确的单层柱面网壳有限元模型。(2)有限元模型建立完毕, 施加动力荷载, 选择适当的结构边界条件, 确定结构模态分析的计算方法。梁单元可以模拟结构的拉压、弯曲以及扭转, 本文采用 Beam188-三维线性有限应变梁单元, 定义梁的截面尺寸、密度、弹性模量、泊松比、惯性矩等。

因网壳结构试验模型选取杆件截面均为  $\Phi 10 \times 2$ , 试验模型跨度为 1500 mm, 矢高为 375 mm, 纵向长度为 2000 mm, 矢跨比为 1/4。节点处采用 100 mm  $\times$  100 mm  $\times$  8 mm 钢板处理, 为固定试验设备提供平台。单层柱面网壳各个杆件简化为刚性连接, 网壳与大型反力架之间的连接简化为限制网壳结构三向

位移的较支座，建立单层柱面网壳的有限元理论模型；物理参数为：杆件密度  $7850 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量为  $207 \text{ GPa}$ ，泊松比为  $0.3$ ，材料的屈服应力为  $207 \text{ Mpa}$ ，网壳结构的有限元理论模型如图 1。

## 2.2. 单层柱面网壳有限元模态分析

单层柱面网壳有限元理论模型进行模态分析时，质量矩阵采用一致质量矩阵，通过对单层柱面网壳有限元理论模型进行模态分析，获取结构的模态参数如频率和振型，并基于模态参数对结构的整体刚度和自振特性进行评价。利用 ANSYS 建立单层柱面网壳结构的理论模型时，支座限制网壳两端截面三个方向的位移，单层柱面网壳结构无侧移，各个杆件之间的连接简化为刚接，有限元分析软件分析单层柱面网壳的频率如下表 1 和振型如图 2 所示。

利用 ANSYS 对单层柱面网壳结构进行模态分析，对网壳的动力特性进行分析，可以看出：依据 ANSYS 分析得到网壳结构的振型图，可以看出网壳结构边缘的位移较大，而结构顶部节点位移较小。单层柱面网壳结构的自振频率比较密集，相邻各阶频率相差不大，没有明显大幅度跳跃。模型的自振频率较大，表明网壳结构的刚度大、安全性能较高，常用于大跨度结构的屋盖。网壳结构的振型较复杂，主要表现在结构的低阶振型以水平扭转振动为主，整体表现为水平扭转振动和竖向振动耦合振型，结构水平方向的刚度较弱。网壳边缘的变形较大，为提高结构的安全性能，进行网壳结构设计时，需增加网壳结构边缘构件的截面面积；或者采取构造措施增加网壳结构的水平刚度，如增加支座对网壳结构水平方向的约束能力，增加一些水平支撑，减小网壳结构的水平位移，达到经济安全的双重效果。

## 3. 单层柱面网壳模型试验

### 3.1. 试验模型

单层柱面网壳选缩尺试验模型，尺寸为  $2000 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$ 、矢高为  $375 \text{ mm}$ 、矢跨比为  $1/4$ ，杆

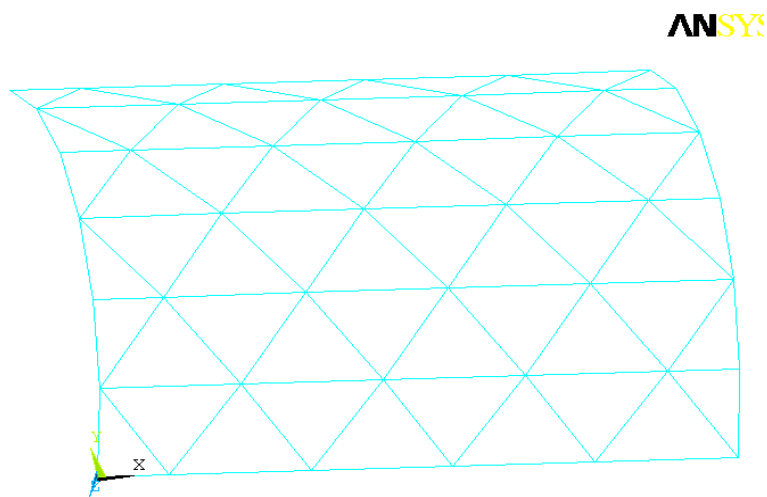
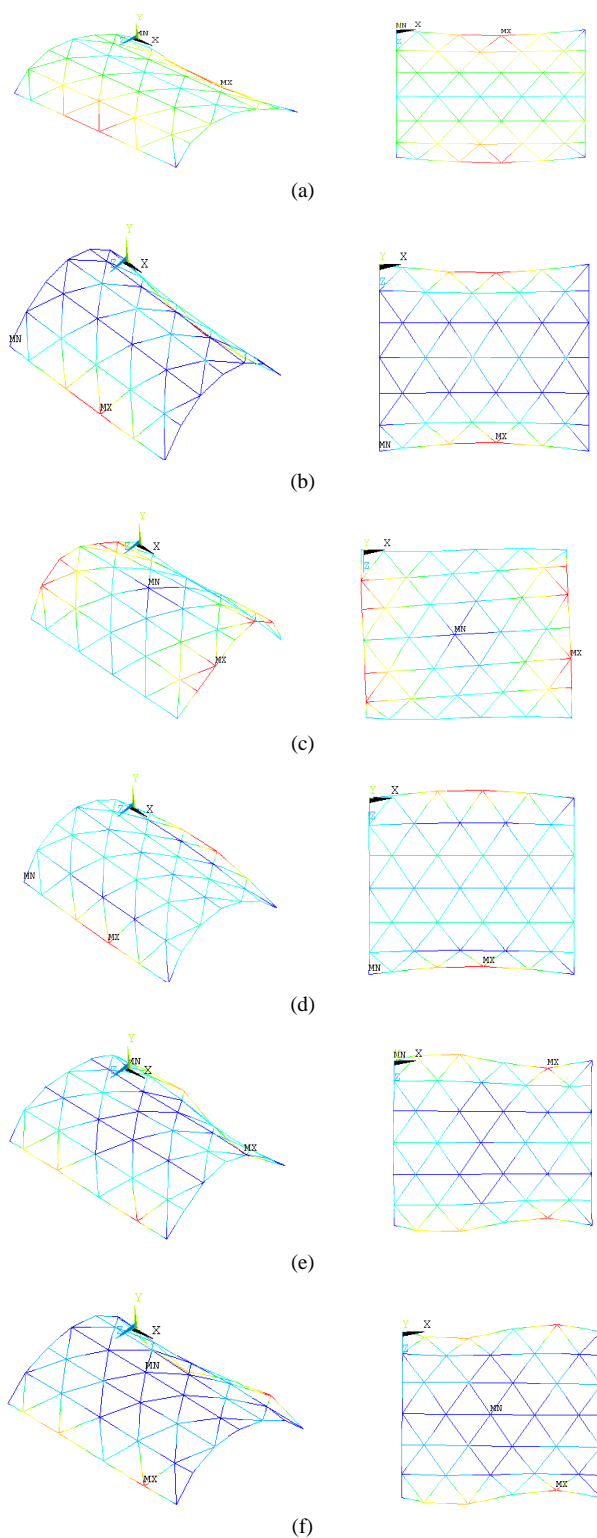


Figure 1. Single cylindrical reticulated shell finite element theory model  
图 1. 单层柱面网壳有限元理论模型

Table 1. The first sixth natural frequencies of single cylindrical reticulated shell (HZ)

表 1. 单层柱面网壳前 6 阶固有频率(HZ)

阶数	1	2	3	4	5	6
频率	28.65	40.72	61.16	96.18	105.85	113.95



**Figure 2.** The first sixth single cylindrical reticulated shell vibration mode. (a) Mode shape at the frequency of 28.65 Hz; (b) mode shape at the frequency of 40.72 Hz; (c) mode shape at the frequency of 61.16 Hz; (d) mode shape at the frequency of 96.18 Hz; (e) mode shape at the frequency of 105.85 Hz; (f) mode shape at the frequency of 113.95 Hz

**图 2.** 单层柱面网壳前六阶振型。(a)  $f = 28.65$  Hz 时振型; (b)  $f = 40.72$  Hz 时振型; (c)  $f = 61.16$  Hz 时振型; (d)  $f = 96.18$  Hz 时振型; (e)  $f = 105.85$  Hz 时振型; (f)  $f = 113.95$  Hz 时振型

件截面均为  $\Phi 10 \times 2$ 。单层柱面网壳结构杆件的外径为 10 mm，壁厚为 2mm 的钢管，材料选用钢材弹性模量  $E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ，泊松比为 0.3，密度为  $7850 \text{ kg/m}^3$ ，与有限元模态分析模型参数相同。单层柱面网壳振动试验模型的基本参数见表 2，实际网壳模型见图 3，单层柱面网壳结构试验模型采用固定铰支座，三个方向不存在线位移。

### 3.2. 试验仪器、传感器

基于环境振动试验的动态测试系统包括四部分：激励设备、传感系统、动态信号测试分析系统 DH3817F 以及模态分析系统，采集频率高达 1K(HZ)，加速度计为 DH610 型，测点布置见图 4。

### 3.3. 模态分析

单层柱面网壳结构，使用动态采集仪获取环境振动加速度时程数据。模态分析时采用模态分析软件 DHMA 识别网壳结构动力参数，得到网壳结构的固有频率。单层柱面网壳加速度信号时程曲线见图 5，网壳幅值数据见图 6，网壳结构频率分析结果见表 3。单层柱面网壳结构的四次振动试验识别的频率与平均

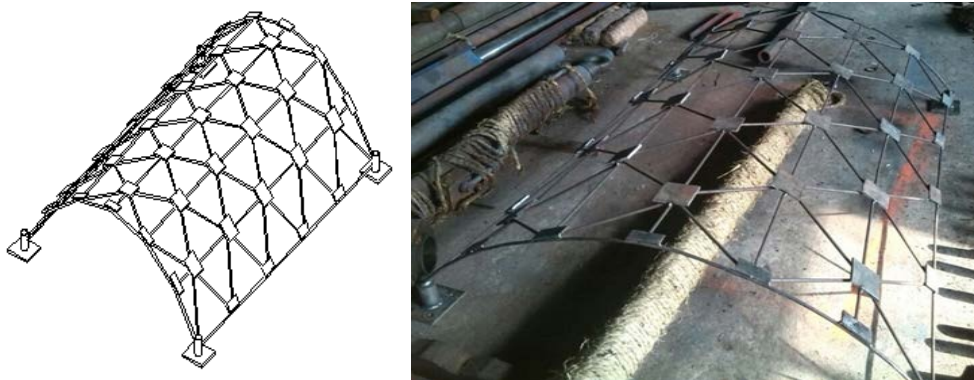


Figure 3. The test model of single cylindrical reticulated shell model  
图 3. 单层柱面网壳试验模型

Table 2. Single cylindrical reticulated shell test model parameters  
表 2. 单层柱面网壳试验模型参数

物理参数	跨度	宽度	矢跨比	矢高	横向网格数	纵向网格数
参数值	2 m	1.5 m	0.25	0.375 m	5	6

Table 3. Test modal frequencies of single cylindrical reticulated shell structure  
表 3. 单层柱面网壳结构的频率

振动试验	一阶频率	二阶频率	三阶频率	四阶频率	五阶频率	六阶频率
一次	28.54	40.48	61.77	96.55	105.71	113.42
二次	28.77	40.29	60.99	96.41	105.18	113.36
三次	28.44	40.98	61.34	96.62	105.67	113.34
四次	28.65	40.50	61.43	96.24	105.33	113.28
试验值	28.60	40.56	61.38	96.45	105.47	113.35
有限元	28.65	40.72	61.16	96.18	105.85	113.95
MAC	0.9984	0.9976	0.9954	0.9890	0.9940	0.9958

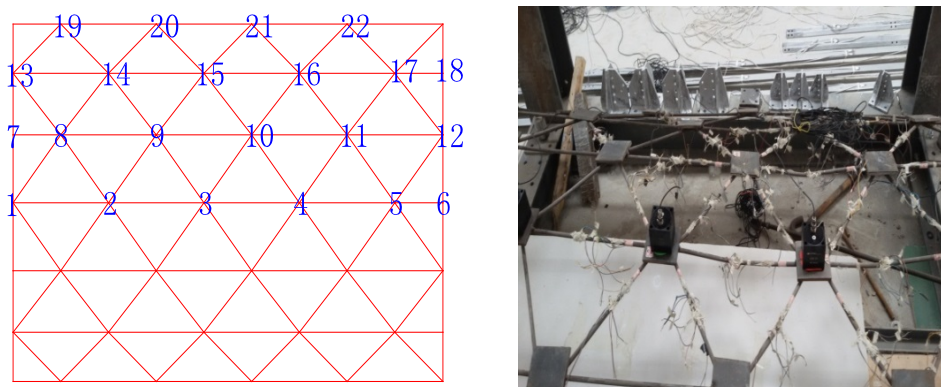


Figure 4. Acceleration measuring point layout and physical map of single cylindrical reticulated shell  
图 4. 单层柱面网壳加速度测点布置及实物图

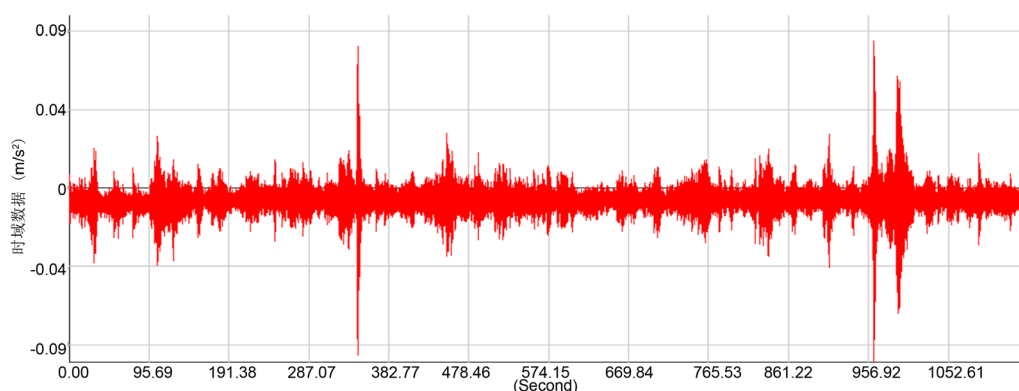


Figure 5. Single cylindrical reticulated shell acceleration signal time curve  
图 5. 单层柱面网壳加速度信号时程曲线

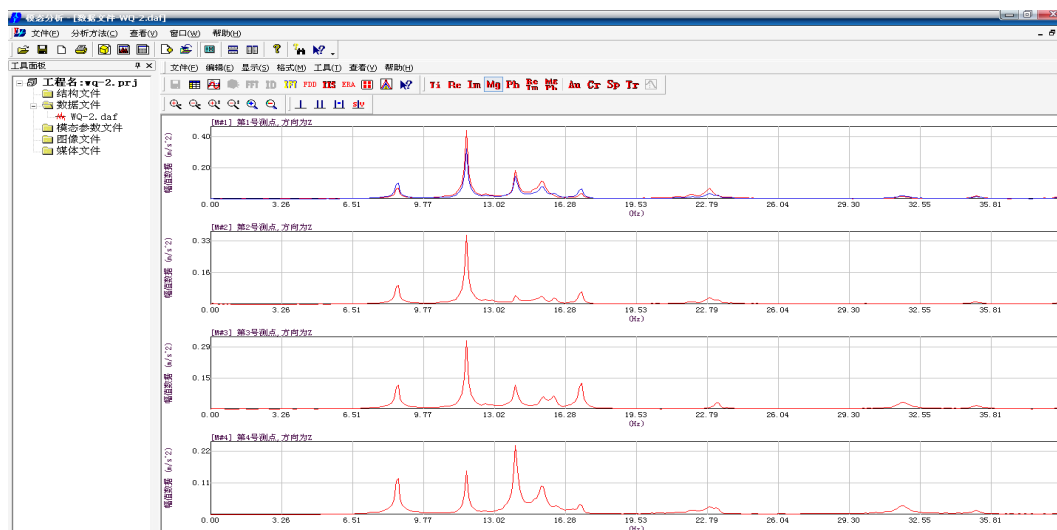


Figure 6. The amplitude data of single cylindrical reticulated shell  
图 6. 单层柱面网壳幅值数据

值差距较小, 模态置信准则(MAC)矩阵中主对角线的数值接近 1, 说明可以利用该方法进行网架结构的理论模态分析和试验模态分析。



### 3.4. 试验分析与有限元分析结果相比

综合有限元分析、环境激励试验的结果可以得出网架模型的自振频率见表 3。可见, 单层柱面网壳结构的四次振动试验识别的频率与平均值差距较小。计算得到单层柱面网壳模态保证准则, 发现振型相关矩阵除主对角线元素接近 1 外, 其它元素的都较小, 因此单层柱面网壳结构试验模态分析的结构较为可靠。将环境激励下的频率数值以及有限元分析结果相比较, 可见数值非常接近。有限元模态分析和环境激励模态分析, 相近频率时, 两者阵型具有相近振型。同时, 低阶时, 有限元频率分析结果较大, 而高阶时, 试验模态频率分析结果较大, 验证了基于环境激励网壳结构振动试验识别模态参数的准确性。

## 4. 结论

本文进行了单层网壳结构缩尺模型试验模态分析并和有限元理论模态分析结果进行了比较, 得到以下试验结论:

(1) 基于环境激励单层柱面网壳结构四次加速度时程曲线, 进行试验模态分析, 获取网壳结构的前六阶频率和相应振型, 通过比较分析四次振动试验的模态置信准则, 可知网壳结构振动试验的误差较小, 试验数据准确有效且模态分析过程可靠。

(2) 将环境激励下的频率数值以及有限元分析结果相比较, 低阶时, 有限元分析结果较大, 而高阶时, 试验模态分析结果较大, 验证了基于环境激励识别单层柱面网壳结构模态参数的可靠性。

## 基金项目

1. 中国矿业大学国家级创新训练项目, 项目编号 201610290079。
2. 徐州市科技局社会发展项目(KC16SG270)。
3. “江苏省普通高校研究生科研创新计划项目”(SJZZ16\_0274)。

## 参考文献 (References)

- [1] 禹丹江. 土木工程结构模态参数识别——理论实现与应用[D]: [博士学位论文]. 福州: 福州大学, 2005.
- [2] 李帅, 张亮亮, 杨佑发. 环境激励下结构模态参数识别的改进 STD 法[C]. 中国计算力学大会, 2012, 44(2): 473-479.
- [3] 任伟新. 环境振动系统识别方法的比较分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 80-86.
- [4] 丁北斗. 基于环境激励网架结构的模态分析与损伤识别研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- [5] 赵艳. 基于环境激励结构模态分析与模型修正方法研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)