

## 铝合金单层球面网壳结构阻尼特性

罗晓群,张锦东,张晋,徐洪俊,张其林<sup>†</sup>  
(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

**摘要:**通过现场实测对铝合金板式节点单层球面网壳结构的阻尼比进行了分析研究. 针对一平面尺寸 45 m×45 m, 矢高 2.86 m 的铝合金板式节点单层球面网壳结构, 设计了 11 种工况, 通过现场实测采集了 160 条人工激励下的节点加速度自由衰减振动信号以及 6 条环境激励下的节点加速度振动信号, 采用解析模态分解法(AMD)结合希尔伯特变换识别结构的自振频率和阻尼比. 对所得数据进行分析, 建议铝合金板式节点单层球面网壳的结构阻尼比取 4%. 运用实测阻尼比数据建立有限元模型分析结构动力响应, 对应实测节点加速度响应曲线和有限元计算得到的响应曲线吻合较好, 所测得阻尼值可为现行规范修订提供依据, 为结构动力分析与工程设计提供参考.

**关键词:**铝合金; 单层球面网壳; 板式节点; 解析模态分解; 模态振动测试; 阻尼比  
**中图分类号:** TU395                      **文献标志码:** A

## Damping Characteristics of Aluminum Alloy Single Layer Spherical Latticed Shell

LUO Xiaoqun, ZHANG Jindong, ZHANG Jin, XU Hongjun, ZHANG Qilin<sup>†</sup>  
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The damping ratio on aluminum alloy single layer spherical reticulated shells with plate-type joints was studied by field measurement. For an aluminum alloy spherical latticed shell with a planar dimension of 45m×45m and a rise of 2.86m, a total of 11 test cases were planned and 160 acceleration damped free vibration signals were collected on site under human-induced excitations as well as 6 vibration signals under environmental excitations. Using the method of analytical modal decomposition (AMD) combined with the Hilbert transform, natural frequencies and modal damping ratio of the structure were identified. Statistic studies were carried out and an average damping ratio of 4% was suggested for this kind of structures. Finite element (FE) models were established using the suggested damping ratio, and the nodal dynamic responses given by numerical analysis showed good consistency with those given by the tests. The damping ratio given here could give a basis for the revision of the current code and provide a reference for the structural dynamic analysis and engineering design.

**Key words:** aluminum alloys; single layer spherical latticed shells; plate-type gusset joints; analytical modal decomposition; modal vibration testing; damping ratio

\* 收稿日期:2019-04-16

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51738009), Key Program of the National Natural Science Foundation of China (51738009)

作者简介:罗晓群(1976—),男,江西临川人,同济大学副教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: qilinzhang0@gmail.com

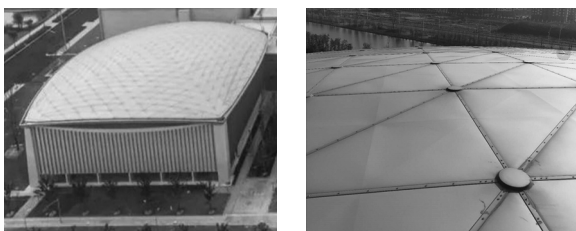
20世纪90年代以来,以网壳和网架结构为主的铝合金结构在我国的应用逐渐增多<sup>[1]</sup>,单层网壳结构是最常见的大跨度铝合金结构形式,其结构特点是以薄膜内力为主;结构由三向网格构成;杆件多采用H型截面挤压型材;节点采用板式节点<sup>[2]</sup>.针对铝合金结构的板式节点受力特性<sup>[3]</sup>、破坏机理<sup>[4-5]</sup>、节点刚度和承载力<sup>[6]</sup>,国内外学者展开了相关研究并取得诸多成果.针对铝合金板式节点网壳结构的静力承载性能的研究也趋于完善<sup>[7]</sup>.

相对于钢网壳,铝合金板式节点单层网壳阻尼特性的研究还处于初步阶段<sup>[8]</sup>.相比试验模型网壳,对已建成的铝合金板式节点单层网壳的阻尼特性进行研究更具理论和工程应用价值.本文对一已建成的铝合金板式节点单层球面网壳进行现场实测,结合结构模态分析选取激励点和采集点,设计了11个工况,采集了在跳跃激励下各网壳测点的自由衰减振动响应以及环境激励下网壳测点的振动响应,对各测点的加速度响应进行模态参数识别,得到各阶自振频率和模态阻尼比,对所得数据进行统计分析,得出了铝合金板式节点单层球面网壳的阻尼比均值.运用所得阻尼参数对结构有限元模型的动力响应进行分析,验证实测节点加速度响应曲线和有限元分析结果的吻合度.

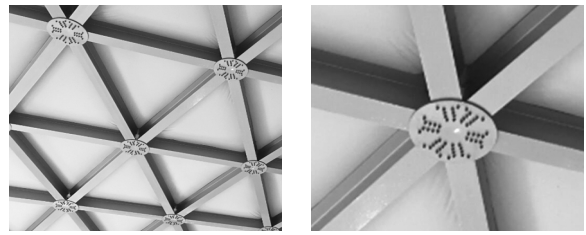
## 1 现场试验

### 1.1 结构概况

对上海崇明体育中心训练馆的铝合金屋盖结构进行现场实测.该屋盖为铝合金板式节点单层球面网壳结构,下部混凝土结构.铝合金单层球面网壳平面尺寸45 m×45 m,矢高2.86 m,杆件采用挤压H型铝材制作,截面尺寸为H320 mm×180 mm×8 mm×10 mm.网壳所有非支座节点均为板式节点.网壳所有构件和节点板材均为6061-T6型铝合金.网壳结构采用一体化铝板系统蒙皮,蒙皮结构由外层铝板和内层保温隔汽层组成.网壳整体照片和节点照片见图1.



(a)网壳整体和现场图



(b)网壳节点

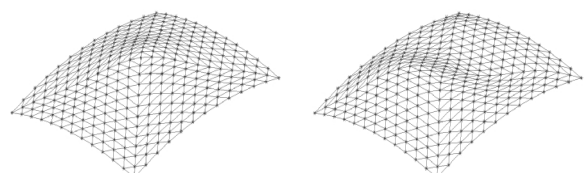
图1 实测铝合金网壳

Fig.1 The measured aluminum alloy latticed shell

### 1.2 测试方案

采用两种方法对网壳进行现场测试:1)测试人员跳跃对网壳施加近似的竖向冲击荷载,采用锤击对网壳施加近似水平向冲击荷载,采集网壳的自由衰减振动响应;2)采集网壳在自然环境激励下的振动响应.测试网壳的矢跨比较小,网壳以竖向振动为主,主要采集网壳各节点的竖向振动,次要采集网壳各节点的水平向振动.

为测得尽可能大的振动响应,提高采集信号的信噪比,在测点选取前采用有限元分析软件ANSYS进行模态分析.ANSYS中有限元模型几何尺寸、构件截面、构件材料与实际结构相同.模型中杆件采用梁单元模拟;采用附加在节点的质量单元考虑蒙皮结构对结构动力特性的影响,折算为80 kg/点;模型中非支座节点刚接,支座节点固接.模态分析得到的结构前6阶振型如图2所示.选取前6阶模态中振动显著部位布置采集点和激励点,采集点和激励点布置见图3.前6阶有限元模型的自振频率以及根据模态分析结果确定的测试方案列于表1.表1中测试方案命名规则如下:A1-A2代表竖向激励点,B1-B2代表水平Y向激励点,C1-C2代表水平X向激励点,点1-点7为加速度测点.例如,A1-1-3代表在A1点施加竖向激励,采集1点和3点的自由衰减加速度响应;A1A2-1-2代表在A1和A2同时施加竖向激励,采集1点和2点的自由衰减加速度响应.\*C-1-2-3代表在采集点1、2、3点处采集环境激励下的网壳竖向振动响应.



(a)第1阶

(b)第2阶

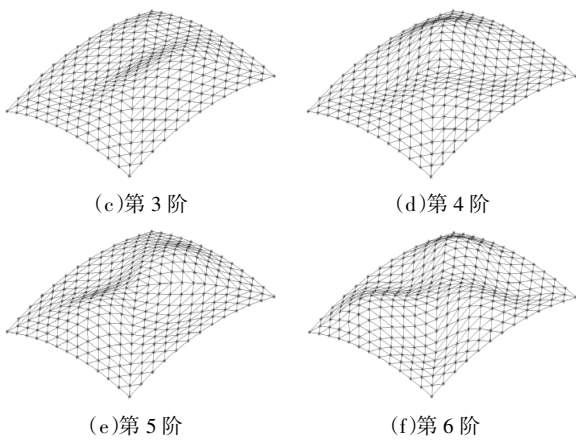


图2 结构前6阶振型

Fig.2 The former 6 natural vibration modes of the structure

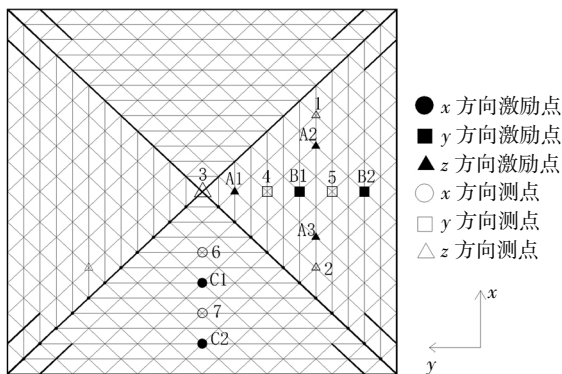


图3 激励点和采集点

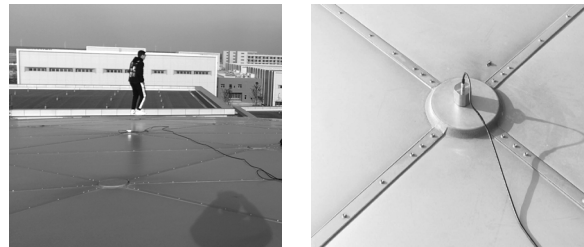
Fig.3 Excitation positions and collection positions

表1 测试方案  
Tab.1 Test scheme

模态阶数	自振频率/Hz	测试方案
1	3.85	*C-1-2-3
2	5.38	A1-1-3、A2-2-3
3	6.44	C1-6-7、C1C2-6-7
4	7.56	A1A2-1-2、*B4-5
5	8.63	A1A2-1-3、*A6-7
6	9.62	B1-4-5、B1B2-4-5

现场测试共计 11 个工况,包含 3 个环境激励和 8 个人工激励. 在环境激励下, 每个测点采集 15 min 振动响应;在人工激励下,采集测点的自由衰减加速度响应,每个激励点人工激励 10 次,测试人员在网壳节点处跳跃对网壳施加竖向激励,采用橡胶锤垂直于网壳节点敲击对网壳施加水平向激励. 现场采集设备为东方所 3062T 型采集仪, 设定采样频率为 256 Hz; 加速度传感器采用朗斯 LC0132T 型加速度

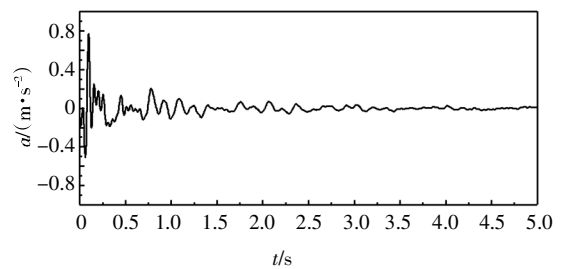
传感器,灵敏度 50 000 mV/g,量程 0.1 g,频率范围 0.05 ~ 500 Hz,分辨率 0.000 000 4 g,频率范围、量程范围、频率分辨率等均符合待测结构的振动特性. 现场测试见图 4. 图 5 展示了现场采集的 A1-1 工况下的 1 条竖向向响应曲线和 B1-4 工况下的 1 条水平向响应曲线.



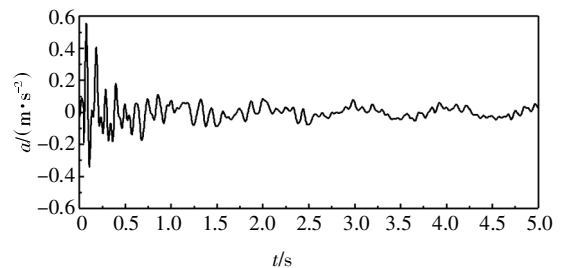
(a)测试人员跳跃激励 (b)加速度传感器布置

图4 现场测试

Fig.4 Field test



(a)A1-1 加速度时程曲线



(b)B1-4 加速度时程曲线

图5 实测加速度曲线

Fig.5 The measured acceleration curve

## 2 结构模态参数识别方法

### 2.1 解析模态分解法

解析模态分解(AMD)法是 Chen 等<sup>[9]</sup>提出的一种新方法. 与 Huang 等提出的希尔伯特-黄变换(HHT)中的经验模态分解(EMD)<sup>[10]</sup>相比,AMD 法具有相似的功能,但在处理密集模态结构的频率混叠、窄带信号以及信号间歇性波动等方面效果明显较好,在模态识别方面应用效果良好<sup>[11]</sup>.

AMD 法假设某个信号  $x(t)$  由一系列单频信号

组  $x_i(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 组成, 满足关系  $x(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t)$ , 每个单频信号  $x_i(t)$  (对应频率为  $\omega_i$ , 且存在一系列边界分割频率 (亦称二分频率)  $\omega_{bi}$  ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ )) 满足:

$$0 \leq \omega_1 < \omega_{b1} < \omega_2 < \omega_{b2} < \dots < \omega_i < \omega_{bi} < \omega_{i+1} < \dots < \omega_{n-1} < \omega_{b(n-1)} < \omega_n \quad (1)$$

由此, 原始信号  $x(t)$  可分解为一系列单频信号, 由式(2)~(4)给出,

$$x_1 = s_1(t) = \sin(\omega_{b1}t)H[x(t)\cos(\omega_{b1}t)] - \cos(\omega_{b1}t)H[x(t)\sin(\omega_{b1}t)] \quad (2)$$

$$\begin{cases} s_i(t) = \sin(\omega_{bi}t)H[x(t)\cos(\omega_{bi}t)] - \\ \cos(\omega_{bi}t)H[x(t)\sin(\omega_{bi}t)] \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_i = s_i - s_{i-1} \quad (i = 2, 3, \dots, n-1) \\ x_n = x(t) - s_{n-1} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $H[\cdot]$  表示希尔伯特变换。

对于多个密集频率信号叠加的复杂信号, AMD 法通过构造一对具有相同特定时变频率的正交函数, 并利用这对时变正交函数与原信号乘积的希尔伯特变换把在频率时间平面内低于正交函数时变频率的任意信号分解出来。

### 2.2 网壳模态参数识别

铝合金板式节点单层网壳具有自振频率低、模态密集的特性。利用 AMD 法处理现场采集的结构振动信号, 可将低频、密集的多模态信号分解为一系列只含单模态特征子信号。对于多模态的自由衰减振动信号, 经解析模态分解后信号可被直接分解为一系列单模态自由衰减振动响应信号; 对于在平稳随机的环境激励下的多模态振动响应信号, 经解析模态分解后可得到一系列单模态特征子信号, 此时可利用随机减量技术<sup>[12]</sup>消除子信号中随机响应的影响, 得到单模态自由衰减响应信号。处理后得到的单模态自由衰减响应信号均可表示为:

$$x_j(t) = A_0 e^{-\xi_j \omega_j t} \sin(\omega_{d,j} t + \phi_j) \quad (5)$$

式中:  $A_0$  为常数,  $\xi_j$  为第  $j$  阶模态阻尼比,  $\omega_j$  为第  $j$  阶无阻尼固有频率,  $\omega_{d,j} = \omega_j \sqrt{1 - \xi_j^2}$  为第  $j$  阶有阻尼固有频率。

构造解析信号:

$$y_j(t) = x_j(t) + i\tilde{x}_j(t) = A_j(t) e^{-i\theta_j(t)} \quad (6)$$

式中  $\tilde{x}_j(t)$  为  $x_j(t)$  的希尔伯特变换:

$$\tilde{x}_j(t) = A_0 e^{-\xi_j \omega_j t} \cos(\omega_{d,j} t + \phi_j) \quad (7)$$

瞬时振幅:

$$A_j(t) = A_0 e^{-\xi_j \omega_j t} \quad (8)$$

瞬时相位:

$$\theta_j(t) = \omega_{d,j} t + \phi_j \quad (9)$$

则结构的第  $j$  阶有阻尼固有频率为:

$$\omega_{d,j} = \frac{d(\theta_j(t))}{dt} \quad (10)$$

构造指数函数式(11)对式(6)的瞬时振幅式(8)进行拟合:

$$A_p(t) = A_0 e^{-\alpha_j t} \quad (11)$$

对于实际大型土木工程结构, 阻尼比小于 10%, 采用式(10)计算的有阻尼固有频率  $\omega_{d,j}$  代替无阻尼固有频率  $\omega_j$  计算足够满足计算精度要求<sup>[13]</sup>, 则由式(8)、式(10)和式(11)可得结构各阶模态阻尼比

$$\xi_j = \frac{\alpha_j}{\omega_{d,j}}$$

## 3 模态识别

### 3.1 模态识别过程

AMD 法本质上是利用希尔伯特变换将具有特定频率成分的信号分解出来, 根据设定的截断频率可在多模态信号中准确地分解单模态信号。本节以 A1-1 工况下的 1 条加速度时程曲线(图 5(a))为介绍应用 AMD 法提取各单模态信号而后利用希尔伯特变换进行结构模态参数识别的流程。

图 5(a)中加速度曲线频谱图如图 6 所示。按照图 6 中的频谱峰值由低到高设置 7 个截断频率, 使用 AMD 法将原始信号分解为 8 阶子信号。8 阶子信号的频谱图如图 7 所示。图 7(a)为采集信号中的趋势项<sup>[14]</sup>, 不包含任何模态信息; 图 7(h)为高于第 6 阶的模态信息的信号与采集系统中的高频噪声的混合; 图 7(b)~(g)为结构前 6 阶模态的单模态频谱图。

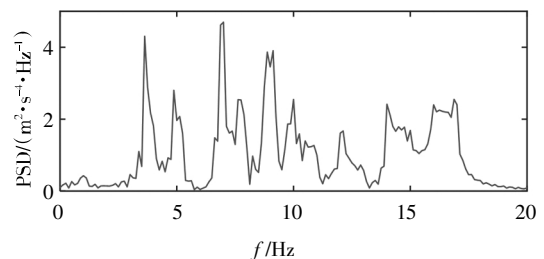


图 6 A1-1 曲线频谱图

Fig.6 The spectrogram of A1-1

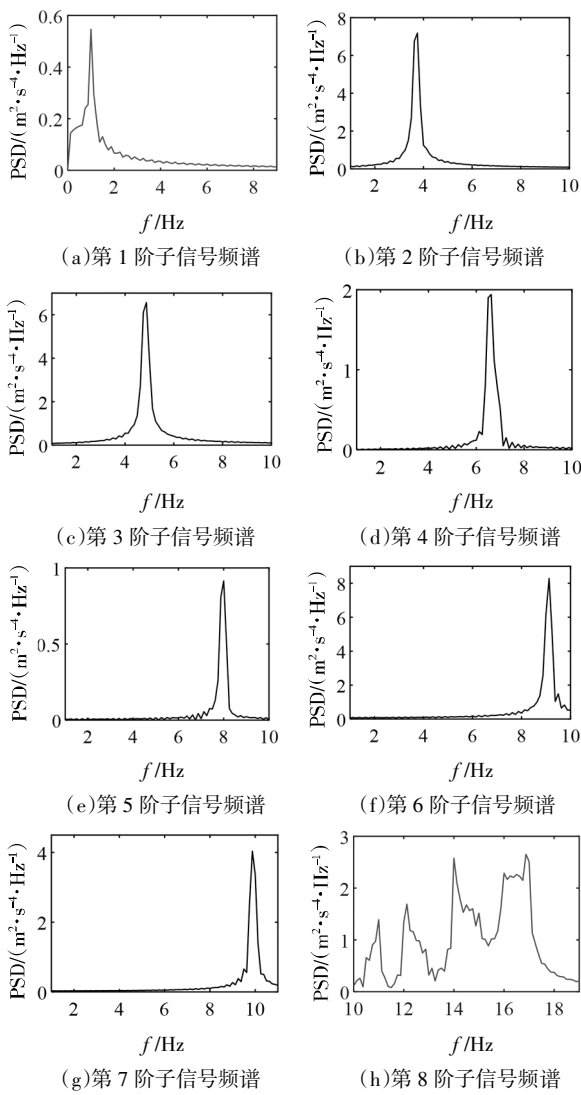


图7 子信号频谱图

Fig.7 Spectrogram of sub-signals

虽然在解析模态分解法中仅在式(3)和式(6)中调用2次希尔伯特变换,但仍会因为有限长度的傅里叶变换造成端部的频率泄露,造成较大的拟合误差,因此在分析中采用镜像沿拓<sup>[19]</sup>对希尔伯特变换产生的端点效应进行抑制,减少解析模态分解中产生的端点效应对拟合精度的影响.图8为经AMD法分解后获取的结构前6阶模态的单模态响应曲线.单模态响应曲线的瞬时幅值以实线表示,按照式(11)对曲线瞬时幅值进行拟合,拟合曲线以虚线表示.

图5所示加速度时程曲线的模态识别结果见表2.表2中,各阶自振频率根据解析信号的瞬时相位导数式(10)求得,求得式(11)中拟合系数 $\alpha_j$ 后,各阶模态阻尼比 $\xi_j$ 根据公式 $\xi_j = \frac{\alpha_j}{\omega_{d,j}}$ 求得.以拟合优度 $R^2$ 表明曲线拟合效果,在表2中列出以式(11)对单

模态响应曲线的瞬时幅值进行拟合的拟合优度 $R^2$ .各曲线的拟合优度均大于0.9,表明曲线拟合取得了良好的效果.

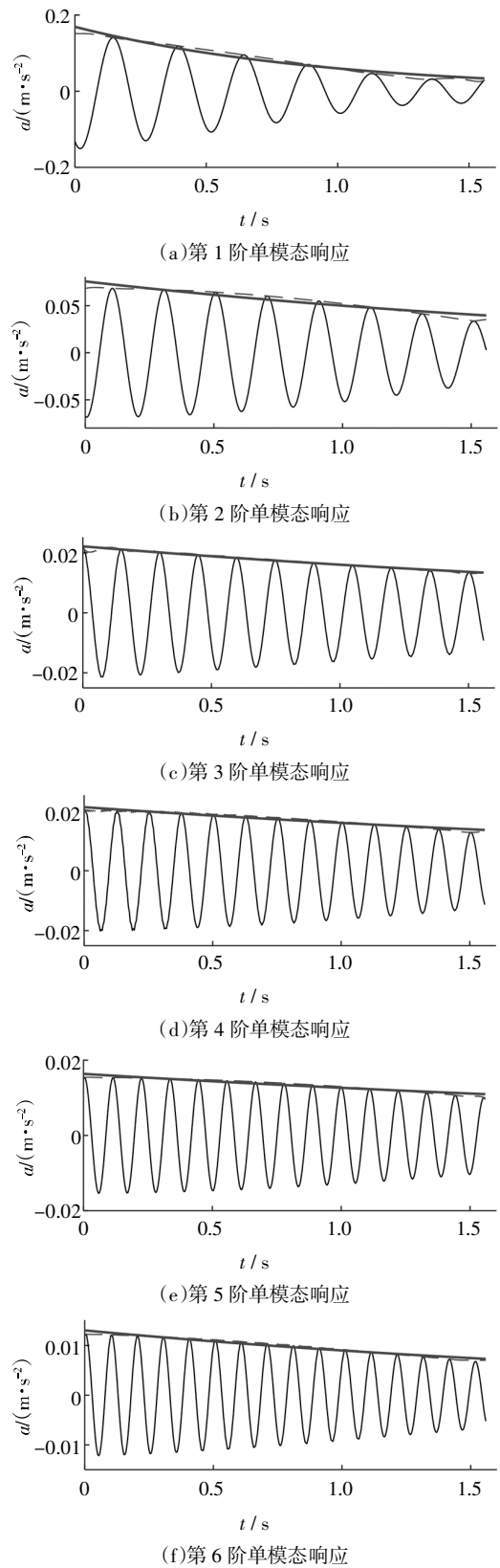


图8 单模态响应曲线

Fig.8 Single mode response curve

表 2 A1-1 解析模态识别结果

Tab.2 The results of analytical modal analysis of A1-1

模态阶数	自振频率/Hz	阻尼比/%	拟合系数 $\alpha_i$	拟合优度 $R^2$
1	3.89	4.2	1.027	0.942
2	5.12	3.3	1.062	0.936
3	6.70	2.3	0.968	0.975
4	7.97	1.9	0.951	0.980
5	9.05	1.4	0.796	0.962
6	9.97	1.6	1.002	0.967

### 3.2 模态识别结果统计分析

对每一次激励后采集的自由衰减振动曲线以上文所述的相同处理方式进行模态识别, 共处理 8 个工况下 80 次跳跃激励下采集到的 160 条自由衰减振动曲线. 对模态识别结果进行统计分析, 160 次各阶模态自振频率  $f$  识别结果的散点图及其平均值如图 9 所示, 绘制模态阻尼  $\xi$  的频率直方图如图 10 所示, 图 10 中纵坐标  $f$  表示在某区间的模态阻尼出现频率. 各阶自振频率的离散性较小, 取平均值作为模态识别的最终结果.

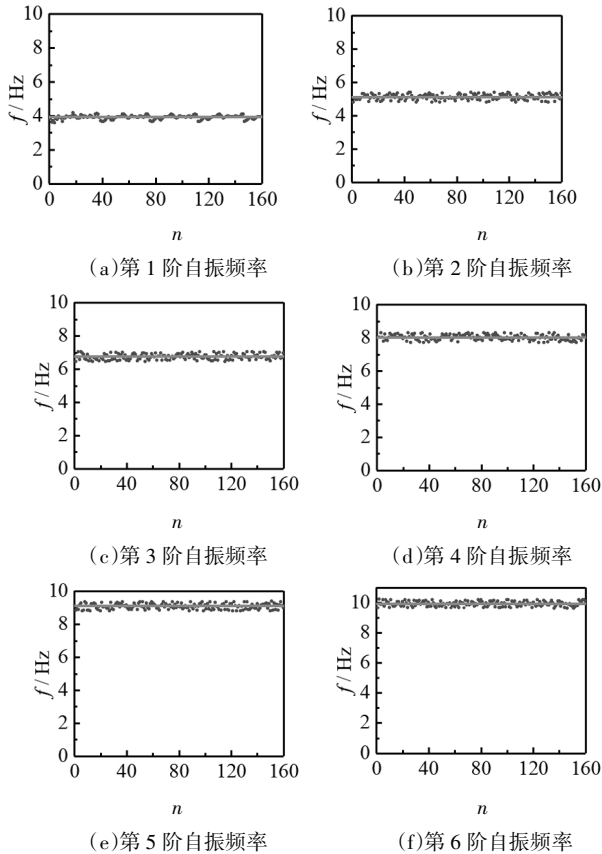


图 9 自振频率识别结果

Fig.9 Identification results of natural frequency

图 10 直方图显示, 各阶模态阻尼比分布在较宽的区间内且呈现一定离散性, 参考类似空间结构的阻尼比取值方式<sup>[16]</sup>, 取人工激励下的各阶模态阻尼比平均值作为网壳的模态阻尼比.

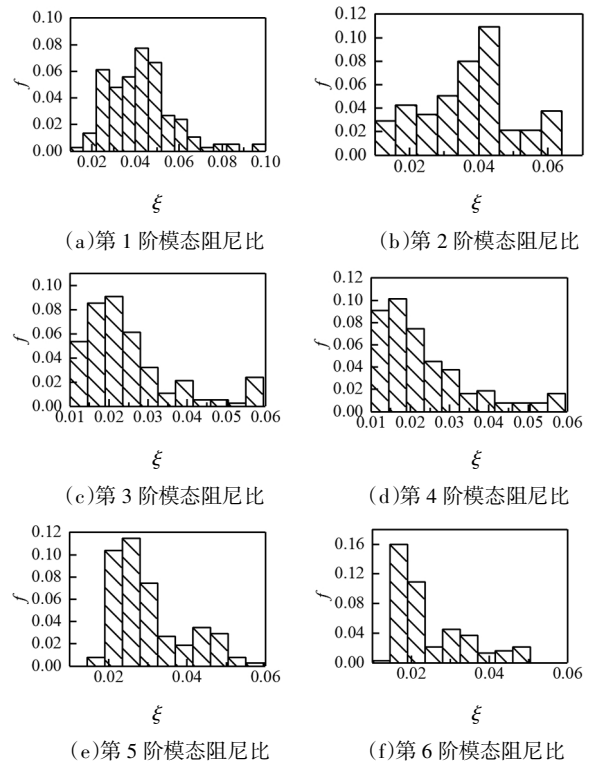


图 10 模态阻尼识别结果

Fig.10 Identification results of modal damping ratio

在对环境激励下的信号进行结构模态参数识别时, 需要在 AMD 法后采用随机减量技术提取单模态的自由衰减振动曲线, 之后与人工激励下的结构模态参数识别流程相同. 表 3 中列出了人工激励下的结构模态参数识别结果、环境激励下的结构模态参数识别结果和有限元模态分析结果.

表 3 模态分析结果

Tab.3 The results of modal analysis

模态阶数	人工激励 频率/Hz	人工激励 阻尼比/%	环境激励 频率/Hz	环境激励 阻尼比/%	有限元模型 频率/Hz
1	3.91	4.0	3.83	2.7	3.85
2	5.10	3.5	5.03	2.2	5.38
3	6.74	2.0	6.82	2.0	6.44
4	8.01	2.1	8.10	1.7	7.56
5	9.09	2.6	8.99	2.1	8.63
6	9.91	2.1	9.87	1.9	9.62

表3结果中人工激励和环境激励下的自振频率识别结果差别很小,表明结构自振频率的识别与外界激励方式无关.模态阻尼是各阶模态能量耗散的宏观表现,表3中人工激励的阻尼比由低阶到高阶降低,反映了各阶模态的能量耗散呈现递减趋势.动力反应中蒙皮结构与主体结构存在摩擦耗能现象,在统计分析中各阶模态阻尼比均值大于无蒙皮结构的模态阻尼比均值<sup>[8]</sup>.各阶有限元模型的自振频率与实测自振频率的误差均小于10%,说明测试前有限元模型较好地模拟了结构的质量和刚度特性,可进一步用此有限元模型验证根据实测结果建议阻尼比取值的合理性.

## 4 有限元模拟

### 4.1 阻尼模型选取和有限元模拟结果

采用 Rayleigh 阻尼模拟结构的阻尼特性,将实测节点加速度响应与 ANSYS 有限元模型计算的响应结果进行对比,检验阻尼比取值的合理性. Rayleigh 阻尼系数根据实测阻尼比由式(12)(13)反算得到:

$$\alpha = \frac{2\omega_i\omega_j(\xi_i\omega_j - \xi_j\omega_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_j\omega_j - \xi_i\omega_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \quad (13)$$

式中: $\omega_i, \omega_j$  为任意两阶固有频率; $\xi_i, \xi_j$  为固有频率对应的阻尼比.

环境激励下结构以微振动为主,此时铝合金网壳结构的阻尼特性无法较好反映实际工程设计的需求,人工激励下结构的阻尼特性更接近于工程设计中结构的阻尼特性,因此有限元模型中 Rayleigh 阻尼的系数根据人工激励下结构模态阻尼的均值以下面两种方式确定:

1)模拟实测模态阻尼比随模型阶数增加而降低的趋势,并减少高阶模态的影响,取第1阶模态阻尼比4.0%,第2阶模态阻尼比3.5%,对应 Rayleigh 阻尼系数  $\alpha_1 = 1.5694, \beta_1 = 0.0006561$ ;

2)模拟工程中常采用的固定阻尼比,阻尼比取一阶模态阻尼比4%,对应 Rayleigh 阻尼系数  $\alpha_2 = 1.4593, \beta_2 = 0.0001075$ .

采用以上两种 Rayleigh 阻尼模拟结构的阻尼特性.由于环境激励下结构的输入未知,无法对此类工况进行有限元模拟,本文仅模拟和对比人工激励下节点的加速度响应.根据表1测试方案中的激励点和采集点位置在有限元模型的对应位置施加瞬态激励,提取对应的采集点处节点的自由衰减振动响应曲线,对比有限元模拟结果与实测响应曲线的峰值、衰减规律是否符合,验证实测阻尼比是否可用于有限元模型的分析中.

图11为在A1处施加激励在采集点1采集到的加速度响应曲线和有限元模型计算结果的比较,加速度响应的实测曲线与有限元模型模拟曲线的峰值、衰减规律吻合较好,其余各工况下的实测响应曲线与有限元模拟具有相似的对比结果,在此不一列出.

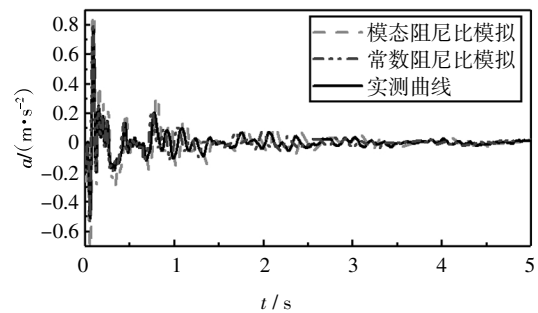


图11 节点加速度响应曲线

Fig.11 An acceleration response curve of joint

### 4.2 模拟结果评价

采用相关系数来评价有限元模拟曲线与实测曲线的相关性.有限元模拟曲线的数据为变量  $X$ ,实测曲线的数据为变量  $Y$  时,两变量的相关系数由式(14)求得:

$$r(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var[X]Var[Y]}} \quad (14)$$

其中,  $Cov(X, Y)$  是  $X$  与  $Y$  的协方差,  $Var[X]$  是  $X$  的方差,  $Var[Y]$  是  $Y$  的方差.依次求得各工况下各测试点的实测曲线与有限元模拟曲线的相关系数如表4所示.表中工况 A1-1 表示在 A1 点施加激励在 1 点采集的工况,依次类推; $r(X, Y)$  表示实测响应数据与本节第一种有限元模拟方法计算得到的响应数据的相关系数; $r(X, Z)$  表示实测响应数据与本节第二种有限元模拟方法的响应数据对应的相关系数.

表4 实测数据与有限元模拟数据的相关系数

Tab.4 Correlation coefficient between measured data and finite element simulation data

工况	$r(X, Y)$	$r(X, Z)$	工况	$r(X, Y)$	$r(X, Z)$
A1-1	0.771	0.733	A1-3	0.693	0.851
A2-2	0.832	0.832	A2-3	0.823	0.851
C1-6	0.842	0.871	C1-7	0.861	0.753
C1C2-6	0.861	0.713	C1C2-7	0.733	0.851
A1A2-1	0.861	0.812	A1A2-2	0.713	0.733
A1A2-1	0.832	0.752	A1A2-3	0.832	0.782
B1-4	0.891	0.783	B1-5	0.842	0.703
B1B2-4	0.822	0.733	B1B2-5	0.763	0.891

表4中有限元模拟得到的数据和实测数据的相关系数处于0.7~0.9的区间内,大部分相关系数超过0.75,数据间具有较强的相关性,数据的吻合程度较好。

因式(12)(13)换算的 Rayleigh 阻尼系数公式计算的高阶振型阻尼比与实测阻尼比存在差异,实测数据和有限元模拟数据存在误差,部分模拟数据相关性在0.69~0.73之间,但是,实际在激励下结构振动主要由结构的低阶模态控制,因此本文中两种选取 Rayleigh 阻尼模型进行的有限元模拟可较准确反映铝合金网壳的动力特性。

## 5 结论

本文对一平面尺寸45 m×45 m,矢高2.86 m的铝合金板式节点单层球面网壳结构进行现场实测,采用解析模态分解法将各采集点的自由衰减振动曲线分解为单模态的自由衰减振动曲线,结合希尔伯特变换识别结构的各阶自振频率和模态阻尼比。对160条人工激励下结构的自由衰减振动曲线和6条环境激励下结构的振动曲线进行模态识别,将识别结果进行分析。研究结论如下:

1)大型铝合金网壳具有低频、模态密集的特性,解析模态分解法可对其在非平稳激励和平稳激励下进行模态参数识别,有效获取各阶模态参数。

2)环境激励下结构以微振动为主,阻尼比小于

人工激励下的同阶模态阻尼比,人工激励下结构的阻尼特性更接近于工程设计中结构的阻尼特性。相比于无蒙皮铝合金网壳结构,有蒙皮的铝合金网壳结构阻尼比取值应大于无蒙皮铝合金网壳结构的阻尼比取值。

3)各阶自振频率的模态识别结果离散性较小,取平均值作为模态识别的最终结果。在人工激励下识别的各阶模态阻尼呈现一定的离散性,偏于安全地,建议此类有蒙皮的铝合金板式节点柱面网壳阻尼比可采用人工激励下的一阶模态阻尼均值4%。采用建议阻尼比的数值分析结果与实测结果吻合较好,可用于有蒙皮的铝合金板式节点网壳结构的工程设计。

目前,铝合金板式节点单层网壳结构阻尼比取值往往参考钢结构,本文提出的阻尼比建议值可对铝合金板式节点单层网壳结构的规范取值及工程设计提供依据。

## 参考文献

- [1] 杨联萍,韦申,张其林. 铝合金空间网格结构研究现状及关键问题[J]. 建筑结构学报,2013,34(2):1-19.  
YANG L P,WEI S,ZHANG Q L. Aluminum reticulated spatial structures:state of the art and key issues [J]. Journal of Building Structures,2013,34(2):1-19. (In Chinese)
- [2] 沈祖炎,郭小农,李元齐. 铝合金结构研究现状简述[J]. 建筑结构学报,2007,28(6):100-109.  
SHEN Z Y,GUO X N,LI Y Q. State-of-the-arts of research on aluminum alloy structures [J]. Journal of Building Structures,2007,28(6):100-109. (In Chinese)
- [3] 徐晗. 铝合金螺栓连接节点性能研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2012:59-63.  
XU H. Research on performance of aluminum alloy bolted joints [D]. Shanghai:School of Civil Engineering,Tongji University,2012:59-63. (In Chinese)
- [4] 郭小农,邱丽秋,罗永峰,等. 铝合金板式节点受弯承载力试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2014,41(4):47-53.  
GUO X N,QIU L Q,LUO Y F,et al. Experimental research on the bending capacity of aluminum alloy gusset joints [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2014,41(4):47-53. (In Chinese)
- [5] 王元清,柳晓晨,石永久,等. 铝合金网壳结构盘式节点受力性能有限元分析 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2015,48(S1):1-8.  
WANG Y Q,LIU X C,SHI Y J,et al. Finite element analysis on me-



- chanical performance of temcor joints in aluminum alloy shell structures [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2015, 48(S1): 1—8. (In Chinese)
- [6] 郭小农,熊哲,罗永峰,等. 铝合金板式节点面外初始弯曲刚度的杆件间交互影响[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(3): 36—42.
- GUO X N, XIONG Z, LUO Y F, *et al.* The out-of-plane initial bending stiffness interaction of members on the Aluminum alloy gusset Joint [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(3): 36—42. (In Chinese)
- [7] 徐帅,陈志华,王小盾,等. 泰姆科节点铝合金单层穹顶结构稳定性分析 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2015, 48(S1): 32—38.
- XU S, CHEN Z H, WANG X D, *et al.* Stability analysis of aluminum single-layer dome based on the behavior of temcor joint [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2015, 48(S1): 32—38. (In Chinese)
- [8] 郭小农,王丽,相阳,等. 铝合金板式节点网壳阻尼特性试验研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(18): 34—39.
- GUO X N, WANG L, XIANG Y, *et al.* Experimental study on the damping property of aluminum alloy latticed shells with gusset joints [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(18): 34—39. (In Chinese)
- [9] CHEN G, WANG Z. A signal decomposition theorem with Hilbert transform and its application to narrowband time series with closely spaced frequency components [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 28(2): 258—279.
- [10] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903—995.
- [11] 李晶,曹登庆,刘绍奎,等. 基于解析模态分解和希尔伯特变换的模态参数辨识新方法[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(1): 34—39.
- LI J, CAO D Q, LIU S K, *et al.* A new method for modal parameter identification based on analytical modal decomposition and Hilbert transformation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(1): 34—39. (In Chinese)
- [12] KIM B H, STUBBS N, PARK T. A new method to extract modal parameters using output-only responses [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 282(1): 215—230.
- [13] 克拉夫 R,彭津 J. 结构动力学[M]. 第2版. 王光远,译. 北京:高等教育出版社, 2006: 22—23.
- CLOUGH R, PENZIEN J. *Dynamics of structures* [M]. 2ed. Translated by WANG Guangyuan. Beijing: Higher Education Press, 2006: 22—23. (In Chinese)
- [14] BENDAT J S, PIERSOL A G. *Random data: analysis and measurement procedures* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1986: 396—398.
- [15] HUANG D, ZHAO J, SUN J. Practical implementation of Hilbert-Huang Transform algorithm [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 22(1): 1—14.
- [16] 韩庆华,裴波,王成博,等. 预应力组合网架结构的自振特性分析及现场测试 [J]. *地震工程与工程振动*, 2004, 24(2): 118—124.
- HAN Q H, PEI B, WANG C B, *et al.* Analysis of natural vibration characteristics and testing on construction site of pre-stressed composite space truss [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2004, 24(2): 118—124. (In Chinese)