

# 飞艇库网壳结构抗震分析

孙黄胜, 时凌云, 尹媛媛, 韩正伟

(山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

**摘要:**采用 ANSYS 软件对某大跨度飞艇库网壳结构建立了有限元分析模型,进行结构静力分析、模态分析和时程分析。通过静力分析得到结构在恒载和活载作用下的竖向变形,检验了结构挠度;通过模态分析得到结构前十阶振动模态,分析了结构整体工作性能;通过在三条地震波激励下的时程分析得到结构分别在小震、中震和大震下的位移反应、基底剪力和关键部位的部分关键杆件的应力。分析结果表明:结构变形较为均匀且符合变形限值要求;结构振动模态以整体振动为主,没有出现明显的局部振动振型,设计方案合理;格构柱-拱交接处杆件内力较大,杆件内力组合值未达到材料屈服强度,符合设计要求。

**关键词:**网壳结构;抗震分析;模态分析;时程分析;飞艇库

中图分类号:TU311.3

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)03-0098-06

## Seismic Analysis of Latticed Shell of an Airship Hangar

Sun Huangsheng, Shi Lingyun, Yin Yuanyuan, Han Zhengwei

(Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,  
Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** With the help of ANSYS, a finite element analytical model of a latticed shell of a large-span airship hangar was established for structural static analysis, modal analysis and time-history analysis. The structural static analysis revealed the vertical deformation of the structure under the combined action of dead load and live load and verified the structural deflection. The modal analysis demonstrated the top ten order vibration modes and the overall working performances of the structure. The time-history analysis under the excitation of three seismic waves showed the displacement response, base shear and stress of some key bars in key positions of the structure under minor, moderate, and strong earthquakes. The results indicate that the structural deformation is uniform and meets the deformation limit requirements. Whole vibration is the most common structural vibration mode and no obvious local vibration mode occurs, which suggests that the design is reasonable. The internal bar force is bigger at the column-arch joints of the latticed shell and the combination value of internal bar force does not reach the material yield strength, which proves that it meets the design requirements.

**Key words:** latticed shell; seismic analysis; modal analysis; time-history analysis; airship hangar

飞艇库属于大跨度机库范畴,通常采用网壳结构,与一般的大跨度结构相比,飞艇库和机库都具有以下特点:跨度大、下部支承结构高,且采用三边支承的方式,其刚度与质量分布很不规则,屋盖结构承受荷载复杂,限制条件多等<sup>[1]</sup>。这些特点使该类结构对动力作用比较敏感,在地震时往往会发生较大的振动,产生较大的变形甚至失稳破坏。因此,进行大跨度空间结构的抗震分析显得尤为重要。文献[2-3]对大跨度机库结构进行了地震响应分析,采用振型分解反应谱法和时程分析法计算机库结构小震作用下的反应,采用基于静力弹塑性分析的能力谱法及动力弹塑性分析法计算机库结构大震作用下的反应。沈顺高等<sup>[4]</sup>对两个大跨度

收稿日期:2014-11-04

基金项目:国家自然科学基金项目(41372288)

作者简介:孙黄胜(1975—),男,湖北黄冈人,副教授,博士,主要从事工程结构抗震减震研究. E-mail:shs7528@sina.com

维修机库结构进行考虑行波效应的多点输入地震反应分析,分析结果对于大跨度机库结构抗震设计考虑行波效应有指导意义。刘河江等<sup>[5]</sup>对 54 个双层球面网壳模型在罕遇地震下的弹塑性响应进行了计算。蔡思思等<sup>[6]</sup>考察了双层球面网壳按设防烈度进行抗震设计的合理性。

本研究分析对象为高烈度区一高支撑、大跨度网壳结构,三侧面由格构柱支撑,一面开口,结构体型不规则,分析结构在地震作用下的振动反应,找出结构的薄弱环节尤为重要。因此,对其进行静力分析、模态分析和时程分析,得到结构在小震、中震和大震下的位移反应、基底剪力和部分关键杆件应力,分析了抗震性能,为结构设计及方案修订提供依据,也可为类似结构设计提供参考。

## 1 结构模型

本工程为中国某飞艇基地网壳工程,工程地点位于内蒙古自治区。建筑面积为 45 955 m<sup>2</sup>,结构形式为正放四角锥网壳,节点形式为螺栓球(局部焊接球、相贯节点)<sup>[7]</sup>,支承形式为周边格构柱支承。工程为甲级建筑,结构安全等级为一级,耐火等级为一级,设计使用年限为 50 年,抗震设防烈度为 7 度(0.15g)。该飞艇库为双层网壳,长约 362 m,柱距为 6.15 m,一端开口处是方形门柱及横梁,门宽约 135 m,高约 127 m;另一端是拱形网壳,宽约 123 m,高 117.6 m。

网壳结构钢材均采用 Q345B,弹性模量取  $2.06 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>,密度取 7 850 kg/m<sup>3</sup>,泊松比取 0.3;杆件采用梁单元 BEAM44,杆件铰接。附加恒载及活荷载通过附加质量 MASS21 单元形式施加于节点,柱底部节点施加固定约束。模型如图 1 所示。单元总数 46 519,节点总数 13 284。模型 X 向为结构纵向(长度),Y 向为横向(宽度),Z 向为垂直方向。

## 2 静力分析

### 2.1 恒载作用

恒载作用下,结构中房屋顶最大竖向变形 88.8 mm,门口顶部最大竖向位移 108.6 mm。结构屋脊中部竖向变形如图 2 所示。屋脊中部变形较均匀,入口端竖向变形较大。

### 2.2 活载作用

活荷载作用下,结构中房屋顶最大竖向变形 60.0 mm,门口顶部最大竖向位移 15.8 mm。结构屋脊中部竖向变形如图 3 所示。屋脊中部变形较大,且分布较均匀。

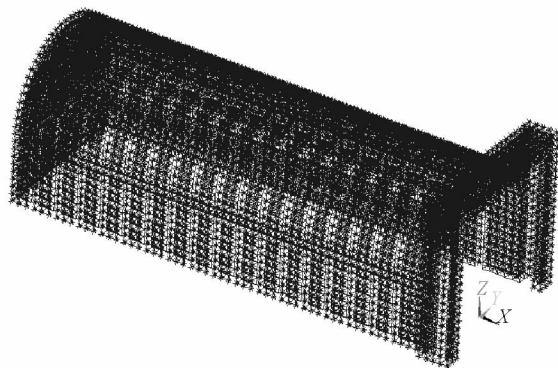


图 1 结构有限元模型

Fig. 1 Structural finite element model

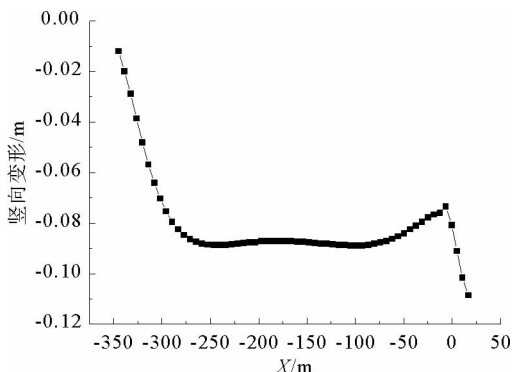


图 2 恒荷载作用下竖向变形分布

Fig. 2 Vertical deformation distribution under dead load

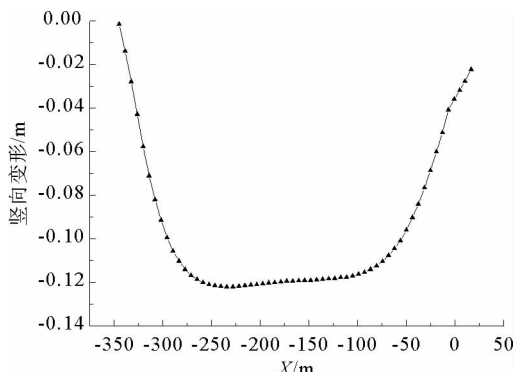


图 3 活荷载作用下竖向变形分布

Fig. 3 Vertical deformation distribution under live load

### 3 模态分析

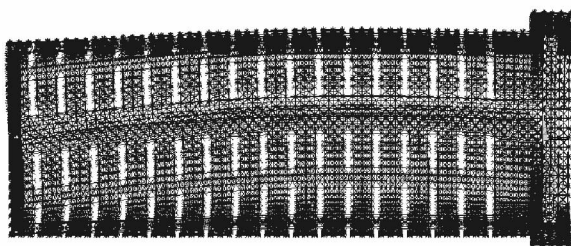
为分析结构的整体性和基本自振周期,采用模态分析可以得到结构的动力特性。采用 Block Lanczos 方法提取模态<sup>[8]</sup>。结构前 10 阶振型如表 1 所示。结构第一阶和第二阶振型如图 4 所示。

该飞艇库结构的振型大体分为两类:一类是节点水平分量很大、竖向分量较小的振型,即水平振动为主;另一类是各节点竖向分量很大、水平分量较小的振型,即竖向振动为主。前三阶振型以平动振动为主,从第四阶振型开始出现扭转振动。前几阶没有出现明显的局部振动振型,但右侧开口端刚度削弱,存在整体扭转振动和门柱扭转振动振型,建议加强方开口处立柱和横梁与壳体连接。

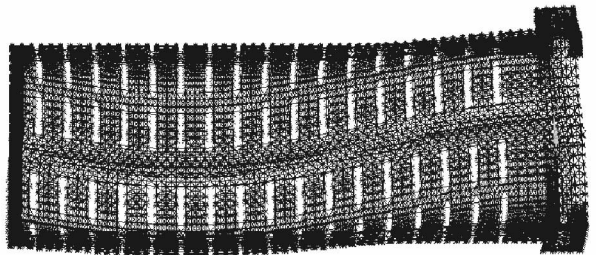
表 1 结构整体模态

Tab. 1 The modal of structure

阶数	自振频率/Hz	自振周期/s	振动形式说明
1	0.549	1.821	开口端横向振动
2	0.695	1.439	横向扭转振动
3	0.781	1.280	纵向振动
4	0.974	1.027	横向扭转振动
5	1.201	0.833	竖向振动
6	1.244	0.804	横向扭转振动
7	1.278	0.782	竖向振动
8	1.422	0.703	竖向振动
9	1.452	0.689	扭转振动
10	1.499	0.667	纵向振动



(a) 第一阶模态  
(a) The first order mode



(b) 第二阶模态  
(b) The second order mode

图 4 结构振动模态

Fig. 4 Structural modal shapes

### 4 时程分析

#### 4.1 地震波选取

结构所处地区为 7 度(0.15g),小震、中震和大震时加速度峰值分别取 55,150 和 310 cm/s<sup>2</sup>。选择 El Centro(1940 NS)波、Taft 波(1952 N21E)和迁安波(1976)的南北分量、东西分量和竖向分量作为地震激励,结构横向(Y 向)采用地震波南北分量,纵向(X 向)采用东西分量,竖向采用其垂直分量,地震波三向加速度峰值比调整为 Y : X : Z=1 : 0.85 : 0.65。三条地震波时间步长分别为 0.02,0.02 和 0.01 s,时长分别取 53.40,54.38 和 30.00 s。

#### 4.2 计算结果及分析

##### 4.2.1 小震作用下的位移反应

在小震作用下,屋脊中部节点 3 834 和仓库门口顶部横梁中部节点 8 785 在 El Centro 波激励下的位移时程如图 5 所示。在三条地震波激励下,屋脊、门梁和立柱节点侧向位移分布如图 6 所示。

在小震作用下,分析可得:

1)结构开口处横向位移较大,纵向位移分布较均匀;

2)在不同地震波激励下结构反应不同。在 El Centro 波作用下结构位移反应较大,迁安波激励下位移较小;

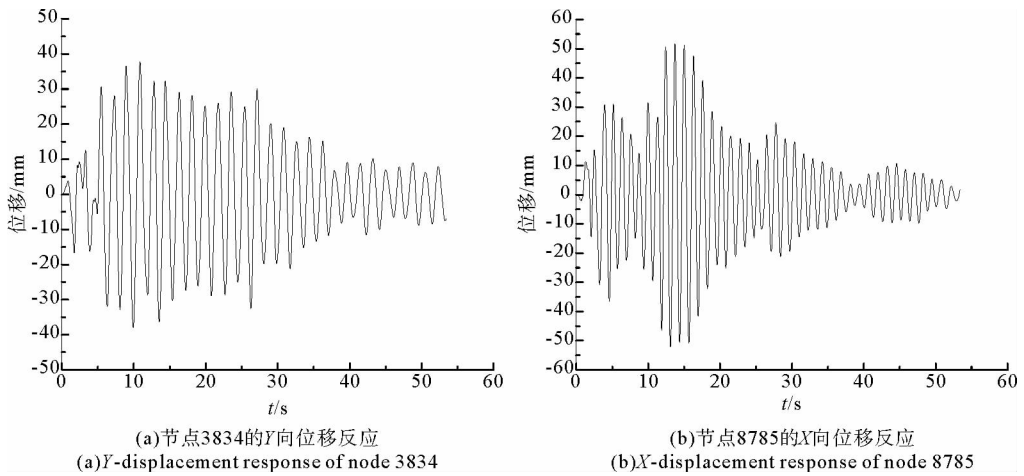


图5 节点位移时程曲线

Fig. 5 Nodal displacement time history

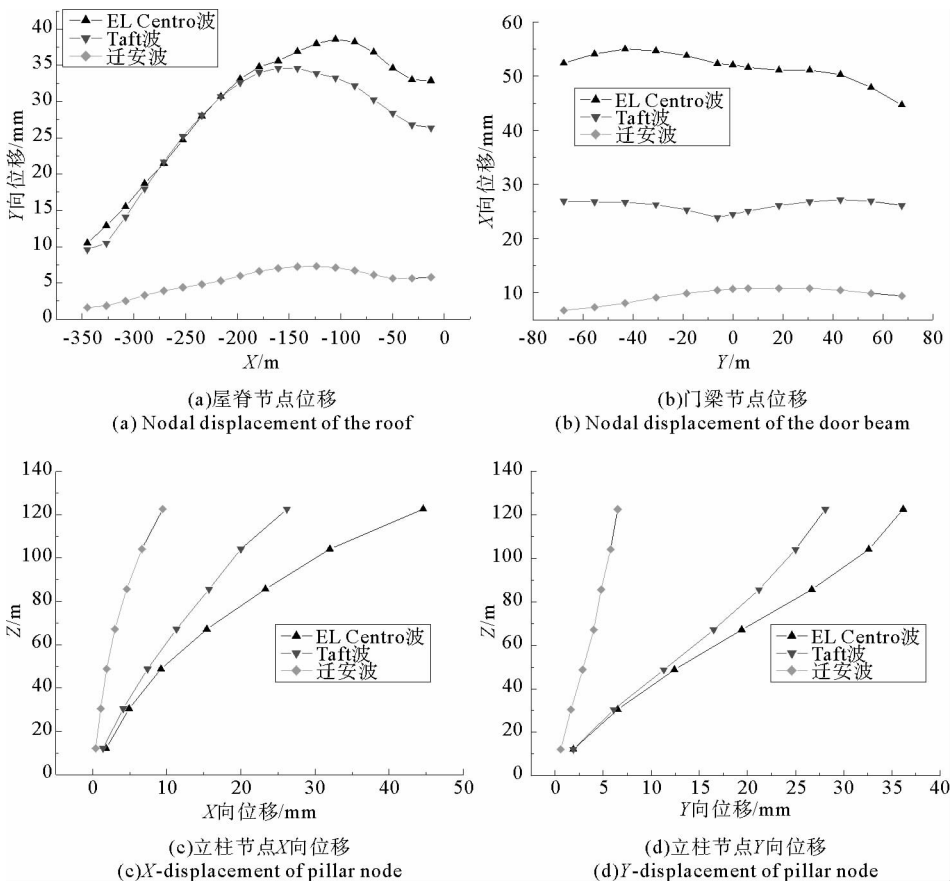


图6 节点位移分布

Fig. 6 Nodal displacement distribution

3) X 向层间位移角最大值为  $1/2\ 347$ , Y 向层间位移角最大值为  $1/3\ 290$ , Z 向挠度跨度比最大值为  $1/11\ 981$ 。最大层间位移角均满足抗震规范规定小于  $1/250$  的要求<sup>[9]</sup>。

#### 4.2.2 小震作用下的基底剪力

小震作用下结构基底剪力最大值如表 2 所示。在 El Centro 波作用下得到 X 向和 Y 向最大基底剪力分别为  $9\ 081\ \text{kN}$  和  $4\ 562\ \text{kN}$ 。可见不同地震波作用下基底剪力相差较大。

#### 4.2.3 小震作用下的杆件应力

侧面格构柱与屋顶壳体相连接处是结构薄弱环节,该处杆件受力复杂,因此成为设计分析关键部位。在小震作用下,关键部位的部分杆件应力最大值如表 3 所示。在反复荷载作用下,表中数值为杆件轴应力。

#### 4.2.4 小震作用下的杆件组合内力

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)第 5.4.1 条进行荷载效应组合,上述杆件轴应力组合后包络值如表 4 所示。结果表明,大部分杆件轴应力都较小,均小于材料拉、压强度值。

表 3 小震下杆件轴向应力

Tab. 3 Bar axial stresses under minor earthquake MPa

杆件单元 编号	El Centro 波		Taft 波		迁安波	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
5813	-6.6	7.4	-5.4	5.9	-1.8	1.4
6019	-18.1	17.9	-9.0	7.8	-4.1	3.5
6182	-11.9	11.6	-5.5	6.2	2.1	1.9
6554	-10.2	10.7	-6.3	5.6	-2.0	2.4
6555	-12.0	12.4	-7.1	6.6	-2.3	2.8
6799	-27.0	26.7	-17.4	14.9	-4.4	5.2

表 2 小震下基底剪力

Tab. 2 Base shear under minor earthquake kN

地震波方向	El Centro 波	Taft 波	迁安波
X	9 080.9	5 846.5	2 743
Y	4 562.1	4 022.4	1 671

表 4 杆件轴向应力组合值

Tab. 4 Combined values of member axial stresses MPa

杆件单元 编号	应力组合值		杆件单 元编号	应力组合值	
	Min	Max		Min	Max
5813	-76.860	-58.660	40123	8.36	42.81
6019	-29.086	17.714	5889	-43.84	-7.44
6182	-43.910	-13.360	5910	-50.55	-31.31
6554	-79.020	-51.850	6211	-42.31	-15.27
6555	-89.520	-57.800	9151	-21.34	31.31
6799	-37.980	31.830	14383	-17.69	-5.73

#### 4.2.5 中震作用

中震作用下,屋脊各节点沿 X 向(纵向)位移分布较为均匀;Y 向(横向)位移均为两端小、中间大;Z 向(竖向)位移跨中大、两端小。门口顶部横梁节点 X 向和 Y 向位移随宽度方向分布较为均匀;Z 向位移分布不均匀,中间大,两端小。门口立柱节点 X 向和 Y 向位移随高度方向增大,在迁安波作用下增加量最小,其中 X 向呈剪切型分布,Y 向呈弯曲型分布;Z 向位移跨中大、两端小。在三条地震波激励下,结构位移反应不同,在 El Centro 波作用下 X、Y、Z 向位移均最大。中震作用下结构基底剪力峰如表 5 所示。在 El Centro 波作用下,X 向和 Y 向最大基底剪力分别为 24 766 和 12 442 kN。

中震作用下,关键部位的部分杆件应力最大值如表 6 所示。在反复荷载作用下,表中数值为杆件轴应力包络值。可见中震作用下杆件内力亦未达到材料强度设计值。

#### 4.2.6 大震作用

在大震作用下,节点位移明显增加,且横向(Y 向)位移比纵向(X 向)位移大。屋脊节点 X 向位移分布较均匀,Y 向位移均为两端小、中间大,Z 向位移分布不均匀;在 Taft 波作用下,X 向和 Z 向位移最大;在 El Centro 波作用下,Y 向位移最大,且和 Taft 波作用下的 Y 向位移相差不大。

门梁节点 X 向和 Y 向位移分布较均匀,Z 向位移分布不均匀,中间大,两端较小;在 Taft 波作用下 X、Y、Z 向位移均最大,且 Y 向位移相对 X 向和 Z 向分布最大。立柱节点 X 向和 Y 向位移均随高度方向增大,迁安波作用下位移增加量最小,其中 X 向呈剪切型变化,Y 向呈弯曲型变化;Z 向位移中间大、两端小;在 Taft 波作用下 X、Y、Z 向位移均最大,且 Y 向位移相对 X 向和 Z 向分布最大。

X 向层间位移角最大值为 1/726, Y 向层间位移角最大值为 1/476,均满足抗震规范规定小于 1/50 的要求<sup>[10]</sup>。结构抗震性能满足“大震不倒”的设防目标。

大震作用下结构基底剪力最大值如表 7 所示。X 向最大基底剪力为 40 696 kN,Y 向最大基底剪力为 31 715 kN。

表 5 中震下基底剪力

Tab. 5 Base shear under moderate earthquake kN

地震波方向	El Centro 波	Taft 波	迁安波
X	24 766	15 945	7 482
Y	12 442	10 970	4 559

表 6 中震下杆件轴向应力

Tab. 6 Bar axial stress under moderate earthquake

MPa

杆件单元 编号	El Centro 波		Taft 波		迁安波	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
5813	-18.1	20.3	-14.7	16.1	-5.0	3.9
6019	-49.4	48.9	-24.6	21.4	-11.1	9.6
6182	-32.5	31.6	-15.1	17.0	-5.6	5.3
6554	-27.7	29.1	-17.2	15.4	-5.4	6.7
6555	-32.6	33.9	-19.3	18.1	-6.4	7.6
6799	-73.6	72.7	-47.5	40.6	-12.1	14.1

## 5 结论及建议

表 7 大震下基底剪力

Tab. 7 Base shear under strong earthquake

kN

激励方向	激励地震波		
	El Centro 波	Taft 波	迁安波
X	22 619	40 696	15 462
Y	31 715	28 066	9 421

1) 结构在恒荷载和活荷载作用下, 结构变形均匀, 竖向挠度没有超出规范规定范围;

2) 结构振动模态以整体振动为主, 没有出现明显的局部振动, 设计方案合理。由于结构一端敞口, 有明显的扭转振动;

3) 在小震作用下, 结构位移未超出规范规定范围; 恒载、活荷载以及地震作用下的杆件内力组合值未达到材料屈服强度值, 满足规范要求;

4) 建议适当加强开口处立柱、门梁与壳体间的连接。

## 参考文献:

- [1] 孟祥瑞, 吴金志, 耿笑冰, 等. 某大跨度高支承飞艇库地震响应分析[J]. 建筑结构学报, 2010(S1): 265-271.  
Meng Xiangrui, Wu Jinzhi, Geng Xiaobing, et al. Earthquake response analysis of an airship shed structure[J]. Journal of Building Structures, 2010(S1): 265-271.
- [2] 钱稼茹, 张微敬, 朱丹, 等. 北京 A380 机库结构地震反应分析[J]. 土木工程学报, 2008, 41(2): 9-16.  
Qian Jiaru, Zhang Weijing, Zhu Dan, et al. Earthquake response analyses of Beijing A380 hangar structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(2): 9-16.
- [3] 吴金志, 张毅刚, 王雪生. 山东太古飞机工程维修基地(II)机库大厅网架地震响应分析[C]//第十届空间结构学术会议. 北京: 中国土木工程学会, 2002: 616-623.
- [4] 沈顺高, 张微敬, 朱丹, 等. 大跨度机库结构多点输入地震反应分析[J]. 土木工程学报, 2008, 41(2): 17-21.  
Shen Shungao, Zhang Weijing, Zhu Dan, et al. Seismic response analysis of two long-span hangars under multiple support excitations[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(2): 17-21.
- [5] 刘河江, 邓华. 罕遇地震下双层球面网壳的弹塑性动力响应分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(24): 161-167.  
Liu Hejiang, Deng Hua. Elasto-plastic dynamic response analysis for double-layer spherical reticulated shells under rare earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(24): 161-167.
- [6] 蔡思思, 邓华, 干钢. 设防烈度地震设计的双层球面网壳抗震性能分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(15): 53-57.  
Cai Sisi, Deng Hua, Gan Gang. Investigation on behaviors of double-layer spherical reticulated shells under seismic precautionary intensity[J]. Building Structure, 2013, 43(15): 53-57.
- [7] 建工行业建设标准. JGJ7-2010, 网架结构设计与施工规程[S].
- [8] 刘哲锋, 沈蒲生, 陈遼. 阻尼模型对混合结构地震耗能分析的影响[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(5): 9-12.  
Liu Zhefeng, Shen Pusheng, Chen Kui. The effects of various damping models to energy response of hybrid structures[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(5): 9-12.
- [9] 中华人民共和国国家标准. GB50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- [10] 吴婷婷, 魏德敏. 网架结构静力及动力响应分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(S): 356-359.  
Wu Tingting, Wei Demin. Static and dynamic response analyses for space grid structures[J]. Industrial Construction, 2010, 40(S): 356-359.

(责任编辑: 吕海亮)