

吴海波,王新妮.圆柱形支撑大跨度建筑结构强震冲击分析模型仿真[J].地震工程学报,2018,40(1):48-53.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.048

WU Haibo, WANG Xinni. Impact Analysis Model Simulation for Long-span Cylindrical Support Building Structures under Strong Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 48-53. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.048

# 圆柱形支撑大跨度建筑结构强震冲击分析模型仿真<sup>①</sup>

吴海波, 王新妮

(内蒙古交通职业技术学院, 内蒙古 赤峰 024005)

**摘要:** 圆柱形支撑大跨度建筑稳定性较差,不能在强震冲击下保持稳定的结构状态。为解决此问题,设计圆柱形支撑大跨度建筑结构强震下冲击分析仿真模型,通过圆柱分析法则的确定、有限元支撑模拟分析与监测、圆柱形支撑体系承载能力分析以完成模型的仿真分析与监测。基于此对大跨度建筑结构强震冲击进行静力分析,调整强震冲击下模型的结构,完成模型的搭建。模拟强震冲击环境,设计对比实验结果表明,应用圆柱形支撑大跨度建筑结构强震下冲击分析仿真模型,可明确圆柱形支撑大跨度建筑薄弱点,发现稳定性较差建筑结构单元,达到提升圆柱形支撑大跨度建筑在强震冲击下稳定性的目的。

**关键词:** 圆柱形支撑; 大跨度建筑结构; 强震冲击分析; 模型仿真; 有限元; 承载能力

中图分类号: TP311

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)01-0048-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.048

## Impact Analysis Model Simulation for Long-span Cylindrical Support Building Structures under Strong Earthquakes

WU Haibo, WANG Xinni

(Inner Mongolia Vocational and Technical College of Communications, Chifeng 024005, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** Long-span buildings with cylindrical support have poor stability and cannot maintain a stable structural state under strong shock. To solve this problem, this study designs a simulation model for shock analysis of long-span cylindrical support building structures under strong earthquake excitation. Through determining cylindrical analysis rules, analyzing simulations, monitoring finite element support, and performing a bearing capacity analysis of the cylindrical support system, the simulation analysis and monitoring of the model are completed. Consequently, the static analysis of the strong earthquake impact on the long-span building structure is performed, and the structure of the model of a building effected by a strong earthquake is adjusted. Simulation of the strong earthquake impact environment and the experimental results show that the application of analysis and simulation model for large-span cylindrical support building structures effected by a strong earthquake can find the weak points and structural units with poor stability of the long-span cylindrical support structure, thus improving the stability of this kind of buildings effected by of strong earthquakes.

① 收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 中国科学院自动化研究所批准基金项目(61403376)

作者简介: 吴海波(1982-), 男, 内蒙古赤峰人, 讲师, 研究方向: 建筑力学与结构, 建筑技术。E-mail: 17279066@qq.com。

**Key words:** cylindrical support; long-span building structure; impact analysis under strong earthquakes; model simulation; finite element method; bearing capacity

## 0 引言

为满足建筑使用功能上的需要,体育场馆、大型会展中心、商场、影剧院、车间厂房等建筑一般采用圆柱形支撑大跨度结构。但此类建筑大都以圆柱形支撑体系中的大体积钢筋混凝土柱作为主要承力结构。大体积钢筋混凝土柱的主要受力荷载来自大跨度结构建筑的顶端受力,在强震冲击的情况下钢筋混凝土柱受力急剧增加,易造成下部支撑体系变形,进而导致建筑不能保持原有的结构稳定性,从而发生倒塌或变形现象<sup>[1-2]</sup>。为提升圆柱形支撑大跨度建筑结构的抗震稳定性,在此引入有限元理论。在原有圆柱形分析法则满足有限元模拟分析理论的基础上,完成圆柱形支撑体系的负载能力分析<sup>[3]</sup>。以负载能力分析为基础,完善强震冲击的静力分析过程,调整原有分析模型结构,实现新型仿真模型的建立;并模拟强震冲击环境,进行设计对比实验,以此来验证新型仿真模型的实用可行性。

## 1 圆柱形支撑体系的仿真分析与监测

圆柱形支撑体系的仿真分析与监测是大跨度建筑结构强震冲击分析仿真模型的建立基础。具体分析过程遵循如下步骤。

### 1.1 圆柱形分析法则的确定

根据给定圆柱支撑大跨度建筑结构的剖面图,确定剖面圆中心,令圆曲线与圆中心、固定点  $A$  间连线的交点作为兴趣点  $a$ 。任选一点  $B$  作为圆柱形分析法则的辅助源,连接辅助源与圆中心,确定虚拟辅助源  $b$  位置,连接兴趣点  $a$  与虚拟辅助源  $b$ 。则圆中心、兴趣点  $a$ 、虚拟辅助源  $b$  三者间组成一个普通三角形<sup>[4-5]</sup>(图 1)。

图 1 中设兴趣点  $a$  到虚拟辅助源  $b$  的距离为  $d$ ,且  $d \perp ob$ ,圆中心  $o$  到兴趣点  $a$  间的距离为  $r$ , $oa$  与  $ob$  间夹角为  $\alpha$ ,则  $d$  可表示为:

$$\sin \alpha = \frac{d}{r}; \quad (1)$$

$$d = r \sin \alpha; \left[ \alpha \in \left( 0, \frac{\pi}{2} \right) \right]$$

根据式(1)可知,兴趣点  $a$  到虚拟辅助源  $b$  间的距离  $d$  可表示为半径  $r$  与夹角  $\alpha$  正弦的乘积。通过  $d$  的具体数值,可完成圆柱形分析法则的确定。

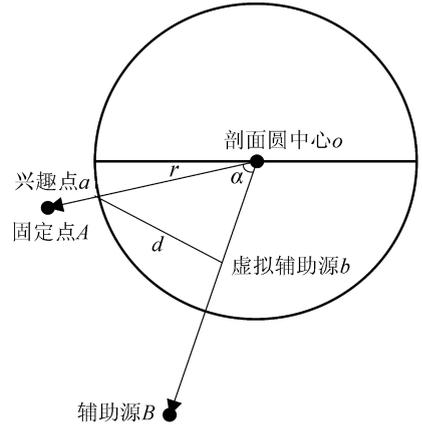


图 1 圆柱形分析法则示意图

Fig.1 Schematic diagram of cylindrical analysis rule

### 1.2 有限元支撑模拟分析与监测

圆柱有限元支撑体系在建筑施工过程中并不是一直保持均匀受力的情况。在建筑施工的不同阶段,各主析架拱上的荷载受力不同,导致有限元支撑体系的受力存在差异<sup>[6]</sup>。有限元支撑模拟分析与监测,从整个建筑结构层面来看是以刚性基础作为建筑依据,且不将基础变形考虑在内。圆柱有限元支撑建筑结构的平面截取位置根据梁板跨度的不同而具有多种截取方法。若以圆柱内侧距框架柱最近处作为截取点,则其具体平面截取结构如图 2 所示。

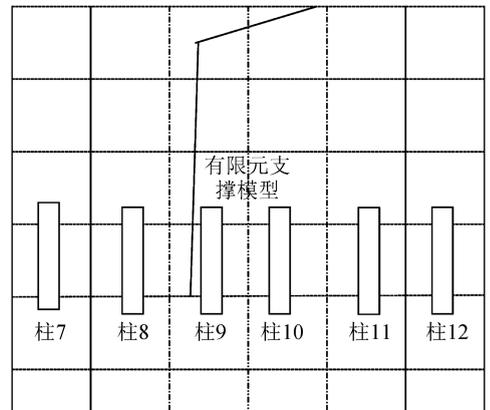


图 2 有限元支撑模拟分析与监测截取结构平面图

Fig.2 Plan of the interception structure for finite element support simulation analysis and monitoring

### 1.3 圆柱形支撑体系承载能力分析

圆柱形支撑体系承载能力分析是在有限元支撑模拟分析与监测的基础上,截取 10、11、12 三个支撑柱进行荷载方向和荷载支撑能力分析。具体分析结果如表 1 所列。

表1 圆柱形支撑体系承载能力分析表

Table 1 Bearing capacity of cylindrical support system

柱号	初始状态			自重荷载			支撑能力			
	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$F_x$	$F_y$	$F_z$	
10	0	0	0	+q	+q	+q	1	247	286	269
							2	245	289	268
							3	248	288	266
							4	242	284	265
							5	241	286	267
11	0	0	0	-q	-q	-q	1	-247	-286	-269
							2	-245	-289	-268
							3	-248	-288	-266
							4	-242	-284	-265
							5	-241	-286	-267
12	0	0	0	+q	-q	+q	1	247	-286	269
							2	245	-289	268
							3	248	-288	266
							4	242	-284	265
							5	241	-286	267

表中荷载方向  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  分别代表沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的荷载分量。规定 10、11 及 12 三个支撑柱上所有荷载初始状态均为 0,  $q$  代表圆柱形支撑体系基础支撑能力荷载, “+”、“-”代表支撑体系基础支撑能力荷载的方向。支撑能力大小仅凭数值判断, “+”、“-”仅代表方向<sup>[7]</sup>。

## 2 大跨度建筑结构强震冲击分析仿真模型的建立

基于上述圆柱形支撑体系的仿真与监测, 通过大跨度建筑结构强震冲击静力分析、模型结构的调整来完成圆柱形支撑大跨度建筑结构强震冲击分析仿真模型的搭建。

### 2.1 大跨度建筑结构强震冲击静力分析

通过 3D3S 软件完成对大跨度建筑结构强震冲击的静力分析。为了方便分析过程的开展, 强震下大跨度建筑结构的下部支承体系采用 H 型钢柱的四周支承结构<sup>[8-9]</sup>。整体网架结构在通过 3D3S 软件的优化后可以利用 ANSYS 分析模块, 在有限元模型的基础上, 通过调整强震冲击下大跨度建筑结构属性来完成静力分析<sup>[10]</sup>。具体静力分析过程如图 3。

### 2.2 强震冲击下模型结构的调整

原有强震冲击下的模型结构是采用正放四角锥网架结构。这种结构容易凸显网架结构的薄弱部位, 在强震冲击下薄弱部位需要承受巨大的压力, 导致杆件损坏加剧, 使位于断裂带上的长跨方向上弦单元发生断裂, 从而造成圆柱形支撑大跨度建筑倒

塌<sup>[11]</sup>。为提升建筑结构抗震性, 采用面积为原有截面积 1.25 倍的钢管杆件来加大薄弱面受力面积<sup>[12]</sup>。调整后模型结构与原有结构产生较大区别, 可通过图 4 所示立体图和俯视图来体现。

### 2.3 仿真模型的建立及实现

通过大跨度建筑结构强震冲击静力分析、强震冲击下模型结构的调整来完成圆柱形支撑大跨度建筑结构强震冲击分析仿真模型的建立。为保证已建立模型的正常工作, 设  $\mu$  代表模型结构调整系数,

$\mu = \sqrt{\frac{M}{T}}$  (其中  $M$  代表强震冲击强度,  $T$  代表静力分

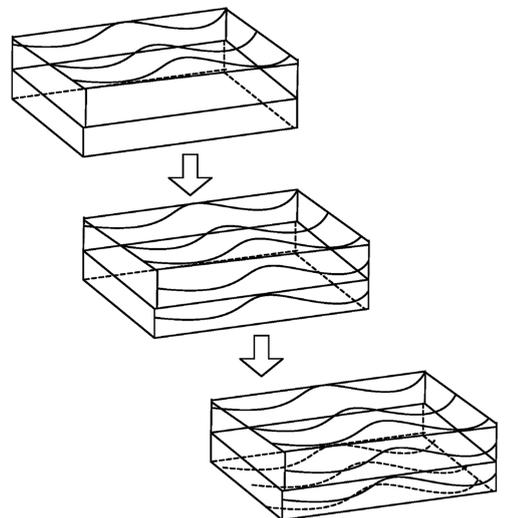


图3 大跨度建筑结构强震冲击静力分析过程  
Fig.3 Static analysis process of strong earthquake impact on large-span structure

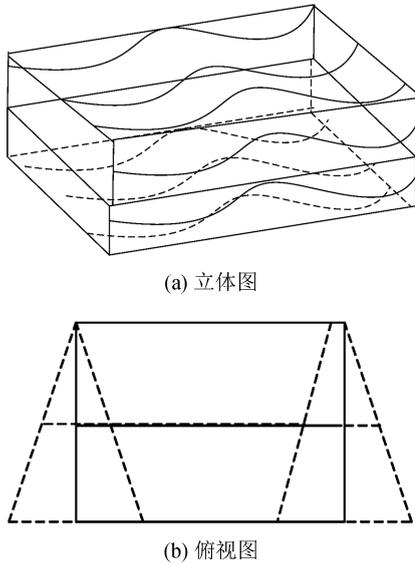


图4 调整后强震冲击下模型结构立体图及俯视图

Fig.4 Stereogram and overlook map of model structure under strong shock after adjustment

析系数)。若式(2)成立,则代表所建立仿真模型可正常使用。

$$\varphi = \left( \frac{1}{1 + \mu^{-2\mu}} \right)^d \quad (2)$$

其中: $\varphi$ 代表模型稳定常量,通常情况下取 $\varphi = 0.37$ 。若式(2)计算结果与0.37间误差不超过0.1,则认为模型误差在可接受范围内,模型可正常运行;反之,则认为模型误差超过可接受范围,该仿真模型不具备可应用条件。

### 3 实验结果与分析

上述过程完成强震冲击下圆柱形支撑大跨度建筑结构分析仿真模型的建立。为验证该模型的实用性价值,模拟强震冲击环境,进行设计对比实验。以两台配置、运行速度等都相同的电脑作为实验对象。令其中搭载圆柱形支撑大跨度建筑结构分析仿真模型的一台计算机作为实验组;另一台不搭载任何分析模型的电脑作为对照组。实验开始前,规定相关实验指标,设置具体参数。

#### 3.1 实验参数设定

表2为五级强震冲击下各项参数的具体数值;表3为六级强震冲击下各项参数的具体数值。在这两个表中,参数名称栏依次代表强震冲击等级、圆柱支撑稳定系数、大跨度稳定系数、预计抗压极限、横向抗压极限、纵向抗压极限。

表2 试验参数设定表(五级强震冲击)

Table 2 Setting of test parameters (Under the impact of  $M=5.0$  earthquake)

参数名称	实验组	对照组
ISE/级	V	V
SCS	0.97	0.97
LSC	0.85	0.85
PCL/N	$3.46 \times 10^8$	$3.46 \times 10^8$
TCL/N	$1.99 \times 10^8$	$1.99 \times 10^8$
LCL/N	$1.82 \times 10^8$	$1.82 \times 10^8$

表3 试验参数设定表(六级强震冲击)

Table 3 Setting of test parameters (Under the impact of  $M=6.0$  earthquake)

参数名称	实验组	对照组
ISE/级	VI	VI
SCS	0.97	0.97
LSC	0.85	0.85
PCL/N	$3.84 \times 10^8$	$3.84 \times 10^8$
TCL/N	$1.97 \times 10^8$	$1.97 \times 10^8$
LCL/N	$1.86 \times 10^8$	$1.86 \times 10^8$

#### 3.2 强震冲击下确定稳定性薄弱建筑单元速度对比

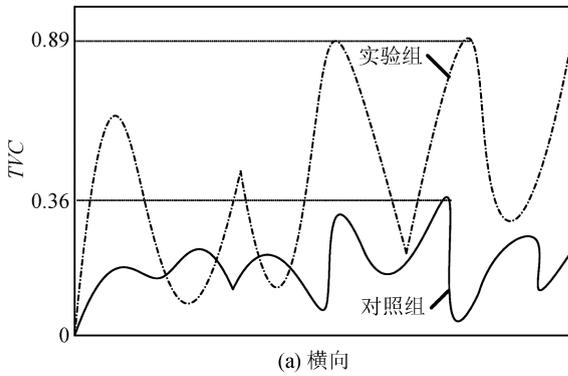
##### (1) 五级强震冲击

五级强震冲击下,确定稳定性薄弱建筑单元需要从横、纵两方向进行。横向确定稳定性薄弱建筑单元速度依靠TVC曲线完成,曲线变化幅度越大代表确定速度越快;纵向确定稳定性薄弱建筑单元速度依靠LVC曲线完成,曲线变化幅度越大代表确定速度越快。打开强震模拟仪,模拟五级震动幅度,令实验组、对照组计算机同时开始横、纵向检测稳定性薄弱建筑单元,记录两组各自的检测速度,结果如图5所示。

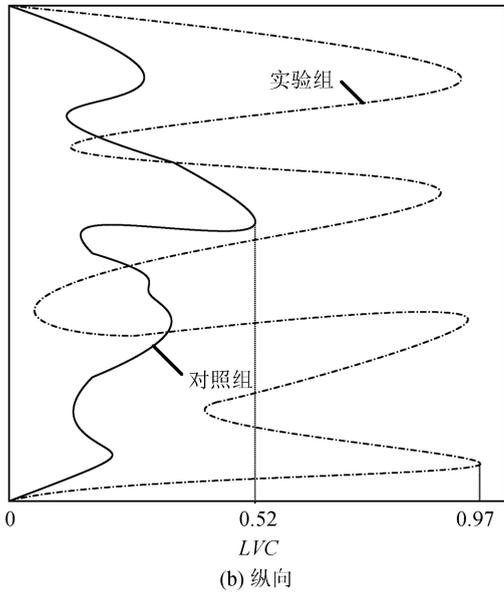
分析图5(a)可知,在五级强震冲击下,横向对照组TVC曲线最小值为0,最大值为0.36,二者间差值为0.36;横向实验组TVC曲线最小值为0,最大值为0.89,二者间差值为0.89;实验组TVC曲线变化幅度,明显大于对照组。分析图5(b)可知,在五级强震冲击下,纵向对照组LVC曲线最小值0,最大值为0.52,二者间差值为0.52;纵向实验组LVC曲线最小值为0,最大值为0.97,二者间差值为0.97;实验组LVC曲线变化幅度明显大于对照组。因此可证明在五级强震冲击下,应用圆柱形支撑大跨度建筑结构分析仿真模型可加快确定稳定性薄弱建筑单元的速度。

##### (2) 六级强震冲击

分析图6(a)可知,在六级强震冲击下,横向对



(a) 横向



(b) 纵向

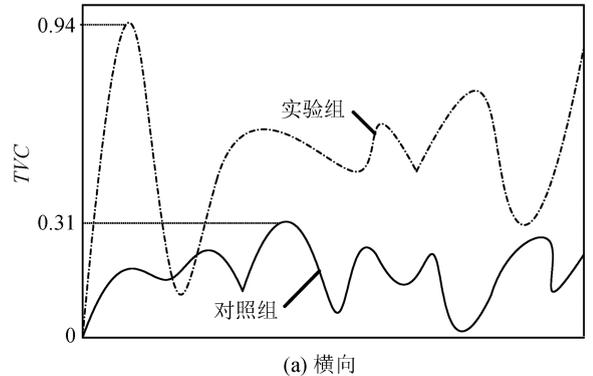
图5 确定稳定性薄弱建筑单元速度图(五级强震冲击)

Fig.5 Velocity map for determining the weak building unit (Under the impact of  $M=5.0$  earthquake)

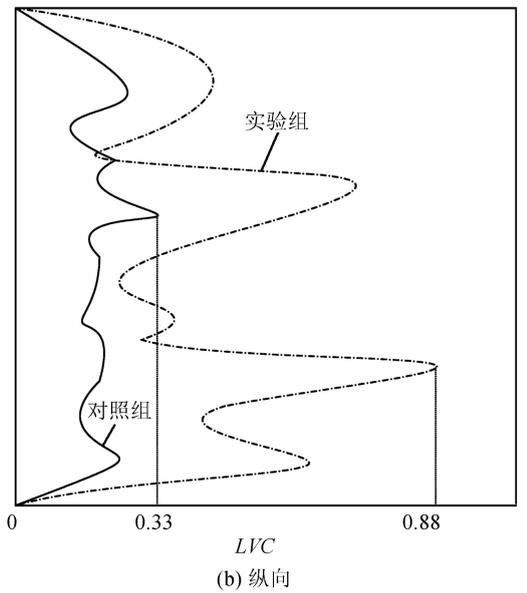
对照组  $TVC$  曲线最小值为 0, 最大值为 0.31, 二者间差值为 0.31; 横向实验组  $TVC$  曲线最小值为 0, 最大值为 0.94, 二者间差值为 0.94; 实验组  $TVC$  曲线变化幅度明显大于对照组。分析图 6(b) 可知, 在六级强震冲击下, 纵向对照组  $LVC$  曲线最小值 0, 最大值为 0.33, 二者间差值为 0.33; 纵向实验组  $LVC$  曲线最小值为 0, 最大值为 0.88, 二者间差值为 0.88; 实验组  $LVC$  曲线变化幅度明显大于对照组。所以可证明在六级强震冲击下, 应用圆柱形支撑大跨度建筑结构分析仿真模型可加快确定稳定性薄弱建筑单元的速度。

#### 4 结语

上述研究完成了圆柱形支撑大跨度建筑结构强震冲击分析仿真模型的建立, 并分别模拟五级、六级强震冲击, 完成设计对比实验, 证明应用仿真模型其



(a) 横向



(b) 纵向

图6 确定稳定性薄弱建筑单元速度图(六级强震冲击)

Fig.6 Velocity map for determining the weak building unit (Under the impact of  $M=6.0$  earthquake)

稳定性较差, 建筑结构单元速度明显加快, 便于明确圆柱形支撑大跨度建筑的薄弱点, 为提升圆柱形支撑大跨度建筑在强震下的稳定性做出贡献。

#### 参考文献(References)

- [1] 殷俊锋, 闵圣捷, 辛世友, 等. 大跨度组合拱支撑结构应力分析的有限元模拟[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(1): 79-82.  
YIN Junfeng, MIN Shengjie, XIN Shiyu, et al. The Finite Element Stress Analysis and Experiments on Long-span Arch Supporting Structure[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(1): 79-82.
- [2] 杨子胜, 李新明, 杨毅辉, 等. MIDAS/Building 双塔大跨度连体建筑抗震设计[J]. 中国测试, 2016, 42(6): 80-84.  
YANG Zisheng, LI Xinming, YANG Yihui, et al. Twin Towers Long-span Connected Building Seismic Design Based on MIDAS/Building[J]. China Measurement & Testing Technology, 2016, 42(6): 80-84.

- [3] 郭昌奇,沈小璞,储晓路.大跨度斜撑转换结构的抗震性能分析[J].安徽建筑大学学报,2015,23(3):13-17.  
GUO Changqi, SHEN Xiaopu, CHU Xiaolu. Seismic Performance Analysis on Large Span Brace Transfer Structure[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry, 2015, 23(3):13-17.
- [4] 周峰,崔理纲,刘凯.基于实测数据的新型大跨度空间结构模型修正研究[J].工业建筑,2015,45(11):162-166.  
ZHOU Feng, CUI Ligang, LIU Kai. A Study of Model Correction of the Large Span Spatial Structure Based on Measured Data[J]. Industrial Construction, 2015, 45(11):162-166.
- [5] 田黎敏,魏建鹏,郝际平,等.基于多重响应的大跨度空间网格结构重要构件评估方法[J].湖南大学学报(自科版),2016,43(11):39-46.  
TIAN Limin, WEI Jianpeng, HAO Jiping, et al. Evaluation Method for Important Members of Large-span Spatial Grid Structures Based on Multiple Responses[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(11):39-46.
- [6] 林俊,彭媛, LIN Jun, 等.体育场工程大跨度异形管桁架结构现场整体拼装技术[J].建筑施工,2016,38(4):436-439.  
LIN Jun, PENG Yuan, LIN Jun, et al. Jobsite Integral Assembly Technology for Long-span Abnormally Shaped Pipe-Truss Structure in Stadium Engineering[J]. Building Construction, 2016, 38(4):436-439.
- [7] 葛杰,王桂玲,王玉岭,等.杭州国际博览中心大跨度钢管桁架施工技术研究[J].钢结构,2016,31(8):81-84.  
GE Jie, WANG Guiling, WANG Yuling, et al. Research on the Construction Technology of Long-span Steel Truss of Hangzhou International Expo Center[J]. Steel Construction, 2016, 31(8):81-84.
- [8] 郑晓清,董石麟,苗峰,等.浙江科技学院学生活动中心大跨度复杂折面形屋盖结构设计[J].钢结构,2016,31(10):42-46.  
ZHENG Xiaqing, DONG Shilin, MIAO Feng, et al. Design of Long-span Spatial Folded Plane Steel Structure of the Zhejiang University of Science & Technology Student Center[J]. Steel Construction, 2016, 31(10):42-46.
- [9] 李志强,张志宏,董石麟.乐清体育中心体育场大跨度空间索桁体系结构设计简介[J].空间结构,2015,21(4):38-44.  
LI Zhiqiang, ZHANG Zhihong, DONG Shilin. Introduction on Structural Design of Large-span Spatial Cable-truss System in the Stadium of Yueqing Sports Center[J]. Spatial Structures, 2015, 21(4):38-44.
- [10] 陈记豪,程远兵,李晓克,等.大跨度屋盖结构竞赛模型设计[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(2):35-39.  
CHEN Jihao, CHENG Yuanbing, LI Xiaoke, et al. Competition Model Design of Large-span Roof Structures[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2015, 36(2):35-39.
- [11] 李玉学,白硕,杨庆山,等.大跨度柱面网壳结构风荷载特性风洞试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(4):105-111.  
LI Yuxue, BAI Shuo, YANG Qingshan, et al. Experimental Study of Wind Load Characteristics on Large-span Cylindrical Latticed Shell[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(4):105-111.
- [12] 冯远,夏循,王立维.大跨度椭圆形索承单层网壳受力性能及影响因素分析[J].建筑结构学报,2015,36(5):63-69.  
FENG Yuan, XIA Xun, WANG Liwei. Analysis on Mechanical Properties of Long-span Ellipsoidal Cable-supported Dome[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(5):63-69.