

# The Analysis of the Elastoplastic Carrying Capacity of Solar Dome with Geometric Imperfections

Bo Wang, Zhirong Shen

Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai  
Email: wanggbo@163.com

Received: Nov. 30<sup>th</sup>, 2012; revised: Dec. 31<sup>st</sup>, 2012; accepted: Jan. 9<sup>th</sup>, 2013

**Abstract:** Eigenvalue buckling analysis of solar dome was done firstly, then the buckling modes were got and the most unfavorable mode was pointed. The influence factors of bearing capacity, such as the form and bigness of geometric defect, were discussed. The influence of prestress and the section of rod was further studied. The result shows: The second-order buckling mode is the most unfavorable mode; as the prestress of rop grows, the influence of geometric defect to elastoplastic carrying capacity increases firstly and then decreases; as the section of rod changes, the influence of geometric defect to elastoplastic carrying capacity essentially unchanged.

**Keywords:** Solar Dome; Geometric Defect; Elastoplastic Carrying Capacity; Defect Form; Buckling Mode

## 几何缺陷对索拉穹顶弹塑性承载力的影响分析

王 波, 沈之容

同济大学建筑工程系, 上海  
Email: wanggbo@163.com

收稿日期: 2012 年 11 月 30 日; 修回日期: 2012 年 12 月 31 日; 录用日期: 2013 年 1 月 9 日

**摘 要:** 利用有限元对索拉穹顶进行了特征值屈曲分析, 得到了索拉穹顶的屈曲模态, 并确定出最不利的屈曲模态阶数。通过讨论几何缺陷形式、大小的变化对结构弹塑性承载力的影响, 进一步分析了预应力和杆件截面变化时几何缺陷对弹塑性承载力的影响。分析结果表明: 第二阶特征值屈曲模态的缺陷形式对结构最不利; 随着拉索预应力的增加, 几何缺陷对弹塑性承载力的影响先不变后减小; 钢杆件截面改变时, 几何缺陷对弹塑性承载力的影响基本不变。

**关键词:** 索拉穹顶; 几何缺陷; 弹塑性承载力; 缺陷形式; 屈曲模态

### 1. 引言

随着社会经济的不断发展和生活水平的不断提高, 人们对建筑环境和建筑空间的要求越来越高。空间结构正是适应了这种需求, 在过去的 20 年时间里不断地发展完善, 已经广泛地运用到体育场馆、会议展览中心、歌剧院、车站等各类公共建筑之中<sup>[1]</sup>。空间结构从结构的受力形式上大致可以分为刚性结构体系、柔性结构体系和杂交结构体系, 其中刚性结构

体系有网壳结构、网架、桁架等; 柔性结构体系有索网、膜结构、索杆结构等; 杂交结构体系则是上述结构形式之间的组合。

杂交结构将不同结构形式进行组合优化, 充分利用各种结构形式的优点, 弥补各自劣势, 让结构形式之间相互配合与补充, 从而形成的一种新结构体系。

作为空间结构杂交体系的一种, 索拉穹顶结构以其结构轻盈等优点日益受到人们的关注, 多应用在一

些大跨空间结构的采光顶屋盖中。索拉穹顶结构通过柔性拉索与网壳刚性结构体系相结合,提高了穹顶结构的整体刚度和稳定性,较好地改善了穹顶结构的工作性能。

本文以有限元分析软件 ANSYS 为主要工具,利用一致缺陷模态法对索拉穹顶结构进行几何缺陷稳定性的分析,讨论缺陷形式、大小的变化对结构弹塑性承载力的影响。并通过对索施加不同的预应力和更改网壳杆件的截面,分析预应力和杆件截面变化时几何缺陷对弹塑性承载力的影响。

## 2. 基本模型

### 2.1. 索拉穹顶的结构形式

网壳结构是将杆件依据不同曲面形式布置而组成的,可以利用其自身的“薄膜效应”使杆件受轴力为主,形成空间三维抗压体系<sup>[2]</sup>。初始缺陷和不对称荷载分布对网壳结构的稳定性及受力性能影响较大,索拉穹顶就是在在四边形网格的对角线上运用预应力拉索对网格进行张拉加强,以替代斜杆的作用,使网格的稳定性及受力性能得到提高,使其结构的“薄膜效应”增强,从而形成典型的三维抗压体系<sup>[3]</sup>,并且使结构更加轻盈。

### 2.2. 模型建立

选取结构平面为圆形,穹顶的直径为 15 m,控制矢跨比为 1/6,网格大小 1 × 1 m。钢杆单元采用箱型截面,尺寸为 100 × 50 × 4;索单元截面尺寸 Φ25;钢杆节点采用刚接;穹顶边界条件为铰接。利用大型有限元软件 ANSYS 对结构进行弹塑性承载力的参数分析:采用 BEAM189 单元来模拟杆, LINK10 单元来模拟索。计算模型如图 1 所示。

钢材本构模型采用理想弹塑性模型。钢材屈服应力为 345 MPa,弹性模量为  $2.1 \times 10^5$  MPa;拉索的屈服应力为 1860 MPa,弹性模量为  $1.8 \times 10^5$  MPa。

拉索的预应力采用使钢索“降温”的办法来模拟。就“温度应力”而言它是单元内力,从而解决了预应力节点的平衡和钢索变形协调两方面的问题,故此得出的解是真实的内力和变形。取穹顶拉索初始预应力为 100 MPa,降温温度  $\Delta t$  的计算如式(1)所示:

$$\Delta t = \frac{-P_0}{E_c A_c \alpha} \quad (1)$$

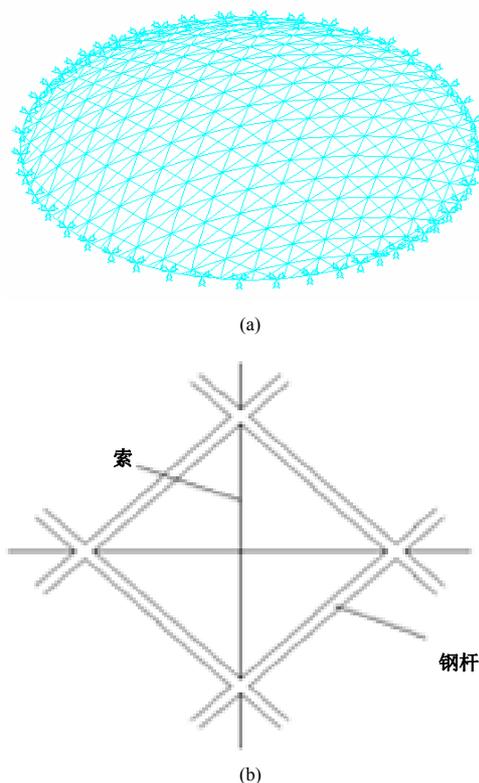


Figure 1. Calculating model of solar dome: (a) Calculating model (solid line represent rod, dotted line represent rope); (b) Network's forms  
图 1. 索拉穹顶计算模型: (a) 计算模型图(实线杆件, 虚线拉索); (b) 网格布置图

式中,  $P_0$  为初始预应力,  $E_c$  为拉索的弹性模量,  $A_c$  为拉索的截面积,  $\alpha$  为拉索的线膨胀系数。

在计算分析前,对结构先施加自重(自重由程序自动计算)和预应力。然后在该初始状态下施加外荷载(恒载和活载)。分析时同时考虑几何非线性和材料非线性,考虑恒载 + 满跨活载工况,其中恒载(不包括自重)取值为  $1 \text{ kN/m}^2$ ,活载取值为  $1 \text{ kN/m}^2$ 。

在弹塑性承载力计算时,对结构进行逐步加载直到最终破坏。定义荷载因子  $F$  的概念为:

$$F = \frac{\text{施加的荷载}}{\text{基准荷载}} \quad (2)$$

式中,基准荷载为 1 倍的“恒载 + 满跨活载”。

## 3. 计算分析

### 3.1. 索拉穹顶的缺陷稳定性分析

单层网壳结构是缺陷敏感性结构,结构在施工安装过程中所产生的误差可能会对结构的受力造成较

大的影响。而索拉穹顶正是由单层网壳发展而来的，有必要研究其缺陷对弹塑性承载力的影响。《网壳结构技术规程》(JGJ61-2003)<sup>[4]</sup>(以下简称规程)建议采用一致缺陷模态法对网壳结构进行分析。《规程》提出采用结构最低阶屈曲模态进行初始缺陷验算。但是文献[5]发现，对于预应力空间结构来说，当初始缺陷按最低阶的屈曲模态进行分布时，所得到的结果不一定是结构最不利值；此外，对于一些缺陷形式所求出来的极限荷载甚至比理想结构求得的结果还要大<sup>[5]</sup>；考虑初始缺陷大小为跨度的 1/300 进行计算时，得到的结果也不一定为最不利<sup>[5]</sup>。因此在进行缺陷性分析时，需要考虑不同的缺陷模式及缺陷大小对结构弹塑性承载力的影响。

因此，在缺陷性分析时，本文首先对结构进行特征值屈曲分析，得到特征值屈曲模态，然后按屈曲模态的形状修改原结构模型的节点坐标，对结构进行弹

塑性承载力分析。需要指出的是，屈曲模态的定义应理解为屈曲前、后两个临近状态的位移之差<sup>[2]</sup>。

### 3.2. 缺陷模式对弹塑性承载力的影响

采用的一致缺陷模态法的求解步骤为：

- 1) 对结构进行特征值屈曲分析，得到结构的屈曲模态；
- 2) 对应用特征值屈曲分析求得的屈曲模态进行归一化处理；
- 3) 按照各个屈曲模态的结构变形修改有限元模型的节点位移坐标；
- 4) 对结构在荷载作用下进行弹塑性分析得到其最终的承载力。

通过对结构模型进行特征值屈曲分析，得到如图 2 所示的前六阶特征值屈曲模态。

分析不同的缺陷模式对结构的弹塑性承载力的

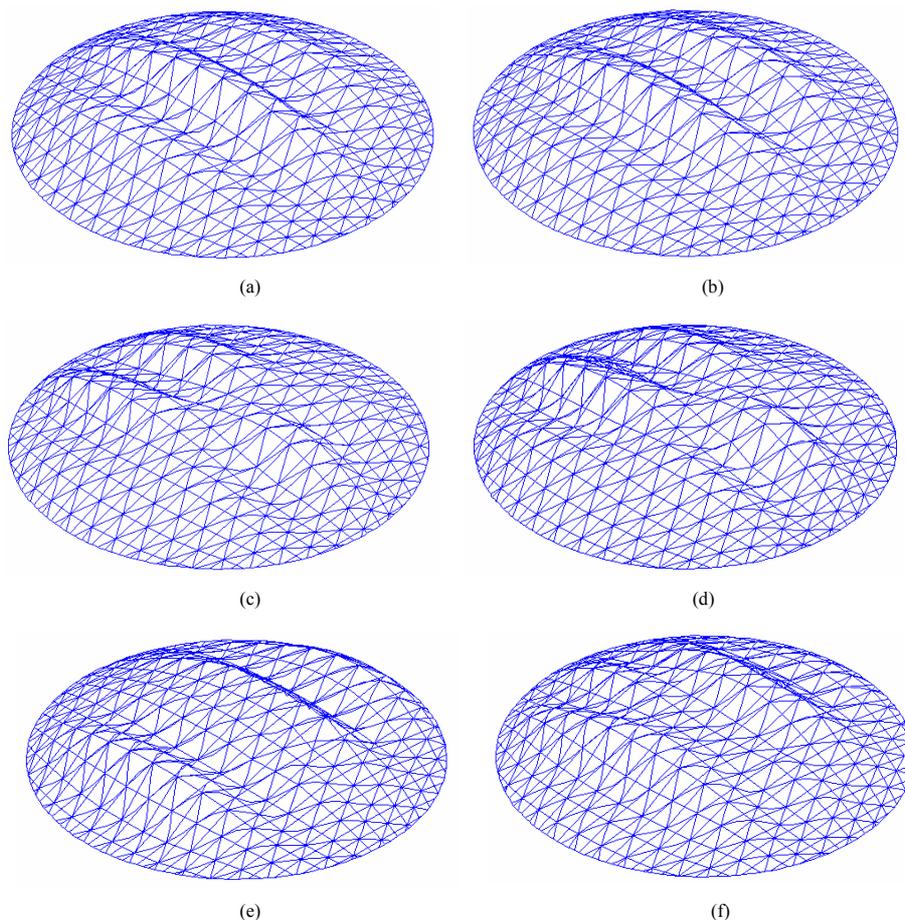


Figure 2. The first six buckling modes of solar dome: (a) Model 1; (b) Model 2; (c) Model 3; (d) Model 4; (e) Model 5; (f) Model 6  
 图 2. 索拉穹顶前六阶屈曲模态图: (a) 第 1 阶屈曲模态; (b) 第 2 阶屈曲模态; (c) 第 3 阶屈曲模态; (d) 第 4 阶屈曲模态; (e) 第 5 阶屈曲模态; (f) 第 6 阶屈曲模态

影响，确定最不利缺陷形式对应的屈曲模态的阶数。分别考虑初始缺陷的最大值为跨度的 1/300 和 1/500，得到结构的“荷载 - 位移”曲线如图 3 所示。图中所取点为各自缺陷模式下承载力分析结束时竖向位移最大值。图 4 为前十阶屈曲模态的承载力对比图。由图 3 和图 4 可以看出，几何缺陷对于不同屈曲模态下网壳弹塑性承载力的影响有着较大的差异。虽然不同初始缺陷的“荷载 - 位移”曲线形状相近，初始缺陷为 D/300 时的承载力荷载因子明显小于 D/500 所求得的荷载因子。但无论 D/300 还是 D/500，第二阶特征值屈曲模态的缺陷形式都为结构的最不利缺陷形式，因此在后面分析几何缺陷大小对索拉穹顶极限承载力的影响时，都施加第二阶特征值屈曲模态的缺陷形式。

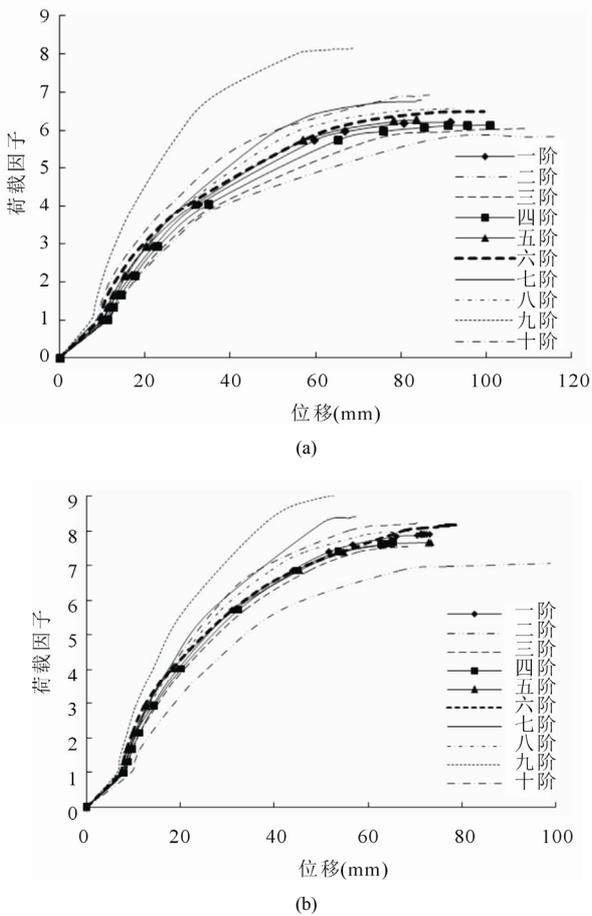


Figure 3. Curve: load-displacement of different buckling modes: (a) Curve: load-displacement when the initial imperfection is D/300; (b) Curve: load-displacement when the initial imperfection is D/500

图 3. 不同屈曲模态下的荷载 - 位移曲线: (a) 初始缺陷为 D/300 时荷载 - 位移曲线; (b) 初始缺陷为 D/500 时荷载 - 位移曲线

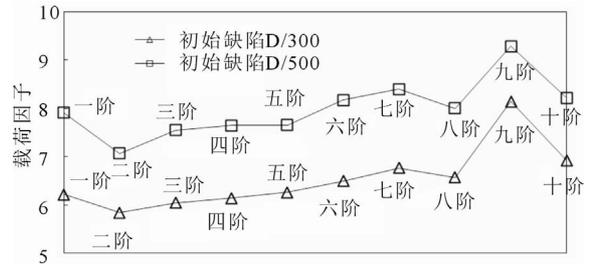


Figure 4. Curve: load factors of the first ten buckling modes  
图 4. 前十阶屈曲模态下的荷载因子

### 3.3. 缺陷大小对弹塑性承载力的影响

对模型施加最不利的缺陷值进行缺陷大小的参数分析，得到的“荷载 - 位移”曲线如图 5 所示。可以发现，不同缺陷大小的弹塑性承载力不同：随着初始缺陷的增大不断减小，并且减小的幅度越来越大，表明索拉穹顶对缺陷具有敏感性。

### 3.4. 预应力变化时缺陷对弹塑性承载力的影响

对模型施加第二阶屈曲模态的缺陷形式，取初始缺陷最大值为跨度的 1/300 和 1/500，分析施加不同预应力时缺陷对弹塑性承载力的影响。得到的“荷载 - 位移”曲线如图 6 所示，施加不同预应力时的极限弹塑性承载力如图 7 所示。由图 6 和 7 可知，预应力小于 250 Mpa 时，缺陷对弹塑性承载力的影响随着预应力的增大而增大；预应力超过 250 MPa 后，缺陷对弹塑性承载力的影响随着预应力的增大而减弱。

### 3.5. 杆件截面变化时缺陷对弹塑性承载力的影响

对模型施加第二阶屈曲模态的缺陷形式，取初始

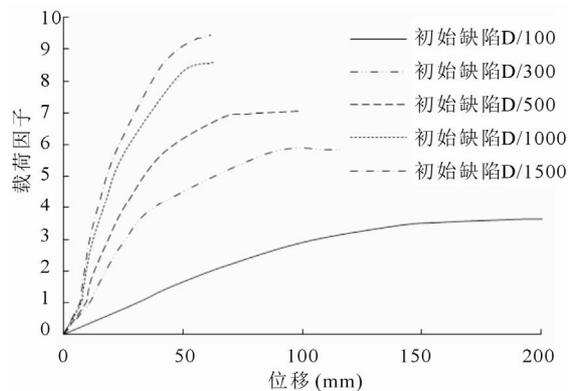
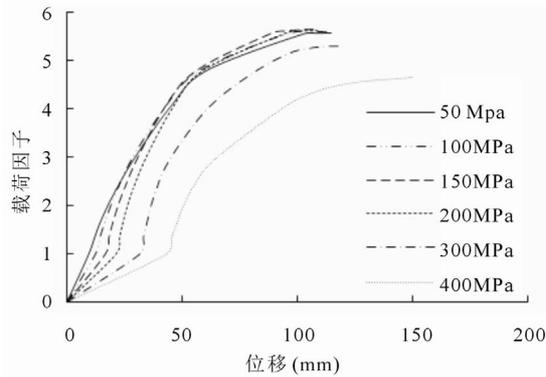
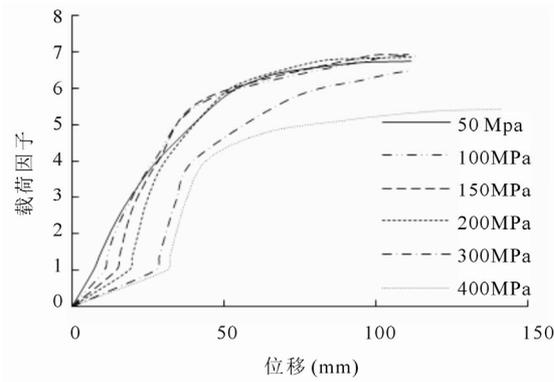


Figure 5. Curve: load-displacement with different imperfection  
图 5. 不同缺陷大小下荷载 - 位移曲线

缺陷最大值为跨度的 1/300，分析钢杆件截面改变时缺陷对弹塑性承载力的影响。得到的“荷载 - 位移”曲线如图 8 所示。钢杆件截面改变时的弹塑性承载力如图 9 所示。由图 8 和 9 可知，取不同钢杆件截面计



(a)



(b)

Figure 6. Curve: load-displacement with different prestress: (a) Initial imperfection is D/300; (b) Initial imperfection is D/500  
图 6. 施加不同预应力时的荷载 - 位移曲线: (a) 初始缺陷 D/300; (b) 初始缺陷 D/500

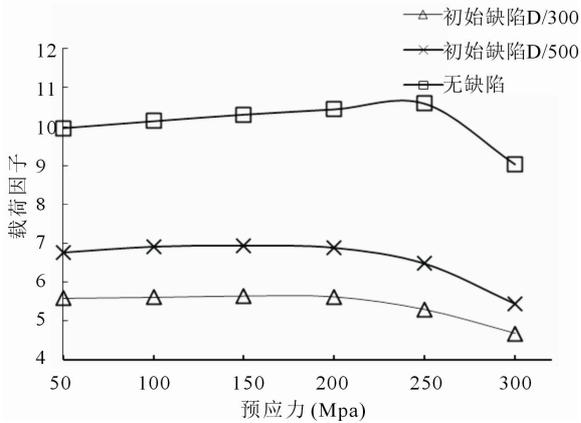
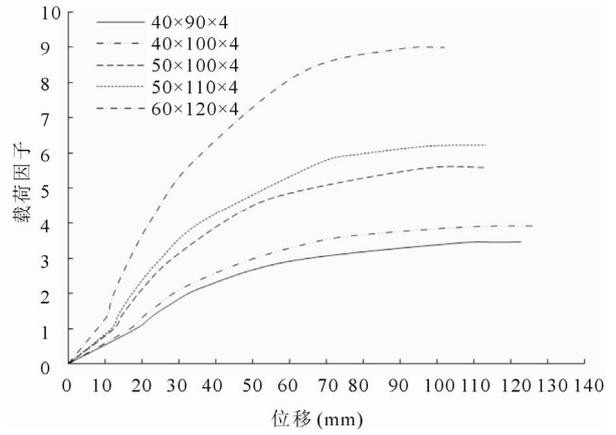
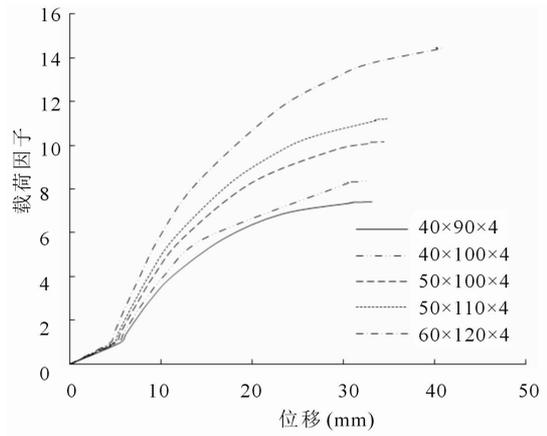


Figure 7. Curve: elastoplastic carrying capacity with different prestress  
图 7. 施加不同预应力时弹塑性承载力



(a)



(b)

Figure 8. Curve: load-displacement with different rod sections: (a) initial imperfection is D/300; (b) no initial imperfection  
图 8. 不同钢杆件截面时的荷载 - 位移曲线: (a) 初始缺陷 D/300; (b) 无初始缺陷

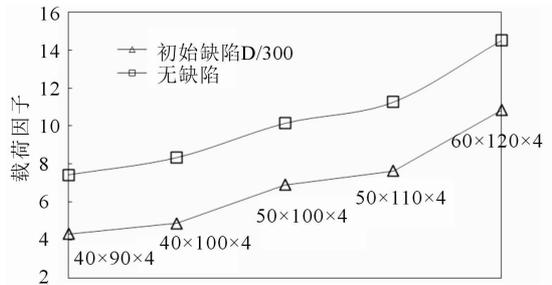


Figure 9. Curve: elastoplastic carrying capacity with different rod sections  
图 9. 不同钢杆件截面时弹塑性承载力

算得到的荷载 - 位移曲线形状相似，并且钢杆件截面改变时，缺陷对弹塑性承载力的影响基本不变。

#### 4. 结论

本文对索拉穹顶受几何缺陷影响的弹塑性承载

力进行了较为详细的研究,可以得出如下结论: 1) 对于索拉穹顶,不同缺陷模式的弹塑性承载力有较大的差异,第二阶特征值屈曲模态的缺陷形式对结构最不利; 2) 随着缺陷的增加,结构的弹塑性承载力不断下降; 3) 随着索中预应力的增加,结构的弹塑性承载力先增大后减小; 4) 钢杆件截面改变时,缺陷对弹塑性承载力的影响基本不变。

## 参考文献 (References)

- [1] 董石麟. 我国大跨度空间钢结构的发展与展望[J]. 空间结构, 2000, 6(2): 3-14.
- [2] 沈世钊, 陈听. 网壳结构稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [3] J. Schlaich, H. Schober. Design principles of glass roofs. Proceedings of the International Symposium of Lightweight Structures in Civil Engineering, 2002: 812-866.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ61-2003 网壳结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [5] 石开荣. 大跨椭圆形弦支穹顶结构理论分析与施工实践研究[D]. 东南大学, 2007.