

文章编号:1671-6833(2015)01-0125-04

单层球形网壳结构的分析及实验研究

马泳涛, 陈天跃, 李伟, 袁涛

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对单层球形网壳进行结构设计. 以网壳承受的风载为设计载荷, 利用 FLUENT 软件得到网壳表面风压分布载荷. 采用单向流固耦合(FSI)技术, 将计算得到的表面风压施加到网壳结构分析模型上. 通过结构分析的非线性计算, 得到网壳在风载条件下的应力分布及变形. 以网壳梁截面尺寸最小为优化目标, 得到满足设计指标要求的梁截面尺寸. 通过现场实验, 得到网壳节点位移载荷曲线, 在相同条件下, 将实验结果与仿真模型进行对比, 验证了网壳结构模型的正确性.

关键词: 单层球形网壳; FLUENT; 流固耦合; 优化尺寸; 实验分析

中图分类号: TU312 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.030

0 引言

单层网壳结构是由空间梁构件和具有一定预张力的膜材组成的梁膜混合结构, 该结构具有杆系结构和薄壳结构的优点^[1], 被广泛应用于中小型建筑、工业厂房以及跨度较大的展览馆、航空港等公共建筑, 有广阔的发展应用前景^[2]. 但由于网壳结构中组成的两种基材力学及物理性能相差较大, 并且结构中存在膜的预张力, 致使其在设计过程中无法按照传统的网架结构或薄壳结构设计规范进行计算. 其结构分析及力学性能研究是当前空间结构领域的热点问题^[3].

笔者以有限元法为计算手段, 将网壳的分析分为流场分析和结构场分析两部分. 以单层球形网壳结构的风载为建模条件, 首先对网壳结构进行风场分析^[4-5], 得到网壳中心截面的风压分布. 在结构场分析中, 运用流固耦合技术将风载施加到网壳结构分析模型上, 并通过梁膜结构的非线性分析得出网壳结构截面的优化尺寸. 最后通过网壳结构实物的单点和多点加载实验, 得到了节点的位移载荷曲线, 将实验结果与仿真模型相比较, 验证了实验数据与仿真所得结果在误差允许范围内的一致性, 进一步说明了力学模型的正确性.

1 网壳结构风场分析

1.1 几何模型与计算域

对网壳结构进行风场分析时, 选取理想球以替换实际的网壳结构, 以获得精度较高的风压结构. 理想球面上的风压数值模拟时, 取较合理的封闭求解计算域, 取代开放的风场空间计算域. 根据流场计算域的常规设定可得理想球面网壳风压分析的几何模型^[6], 如图1所示.

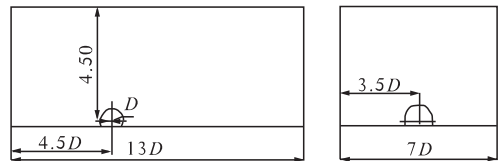


图1 理想球面网壳风压分析的几何模型

Fig.1 Geometry model of ideal spherical shell wind pressure analysis

1.2 网格划分

网格划分是计算流体力学数值计算中重要的环节, 网格质量对迭代计算的收敛性以及计算结果的准确性有着较大的影响. ICEM CFD 是专业的流体分析网格划分工具, 其划分的网格质量一般较高, 故选用 ICEM CFD 划分网格. 将已建立的风场分析几何模型导入 ICEM CFD, 经几何修复后定义 INLET、OUTLET、WALL、BALL 等结构部

收稿日期:2014-08-30;修订日期:2014-10-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305136)

作者简介:马泳涛(1975-),男,河南郑州人,郑州大学讲师,博士,研究方向为先进制造技术与结构仿真, E-mail: 925038897@qq.com.

件.采用四面体非结构化网格划分方法,得到风场的流体计算模型,如图2所示.

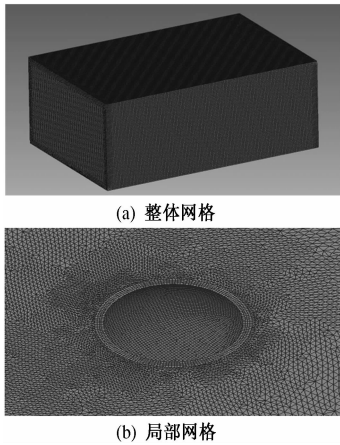


图2 风场计算的网格模型

Fig.2 Grid model of wind field computing

1.3 边界条件及求解设置

通过ICEM与FLUENT之间的接口,将网格导入FLUENT进行计算.采用速度-压力结算方式,入口速度67 m/s(相当于18级风速),出口压力设置为表压力0 Pa,壁面按默认值设置.

采用绝对速度方程压力基求解器,求解定常流动. Model面板中,在Viscous Model的Model中选k-epsilon两方程模型,k-epsilon Model选择标准的.在Solution的Solution Methods中,定义动量方程、湍流脉动能量和湍流耗散率均采用一阶迎风离散格式,其余采用默认设置,计算模型选标准的 $\kappa-\epsilon$ 模型,其中

$$k = \frac{3}{2}(vI)^2; \tag{1}$$

$$\epsilon = C_{\mu}^{\frac{3}{4}} \frac{k^{3/2}}{l}, l = 0.07L. \tag{2}$$

式中: I 为湍流强度; L 为网壳直径; v 是入口的风速; C_{μ} 为无量纲经验常数, C_{μ} 取0.09.

1.4 网壳结构风场的分析

网壳结构风场分析以其表面风压分布为主,风场分析结果如图3所示.查看结构表面的迎风面和背风面的风压分布,之后以表面的风压作为载荷条件导入结构场,实现流固耦合分析.

网壳中心截面风压数值的比值大小一般可判断风压是否准确.设定风速的入口是正方向,压力 P_0 位于过球心水平线和球截面的交点处,压力 P_n 位于与水平线夹角为 α 的点处,网壳中心截面示意图如图4所示. FLUENT完成迭代,其结果收敛后,便能立刻显示中心截面关键点的风压数值.网壳结构中心截面的风压分布曲线($v = 40$ m/s)如

图5所示,其横坐标是 α ,纵坐标是比值 P_n/P_0 .

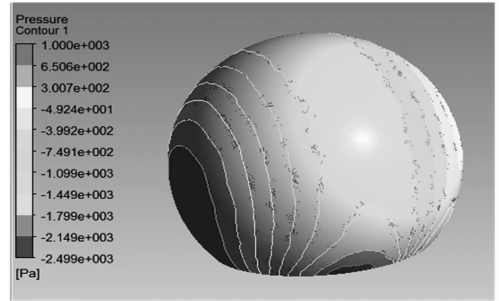


图3 球面风压分布

Fig.3 Wind pressure distribution on spherical surface

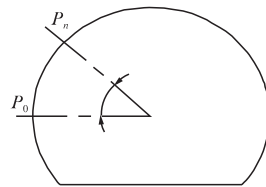


图4 网壳中心截面示意图

Fig.4 Diagram of the shell center cross-section

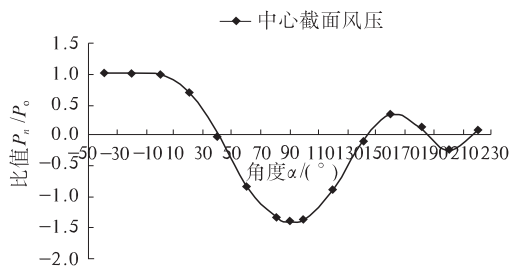


图5 网壳中心截面风压分布

Fig.5 Wind pressure distribution of shell center cross-section

1.5 风压分析结果的对比如验证分析

为判定所采用风场模型的合理性,笔者将分析的结果与文献[7]中给出的球形结构中心截面风场的数据进行对比.假设当时的最大风级为12级,速度为32 m/s.分析结果和其对比曲线对比如图6所示.

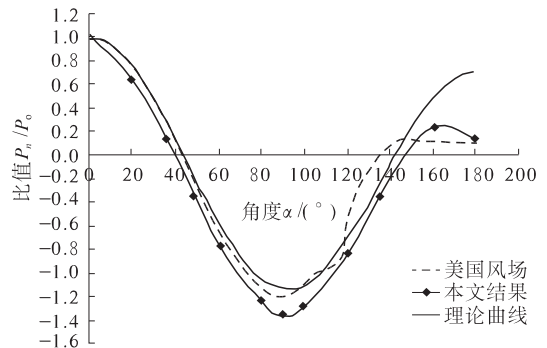


图6 中心截面的风压曲线对比2

Fig.6 The wind pressure curve of center cross-section comparison of 2

对比曲线发现:网壳表面的风压分布情况和参考曲线的趋势相对一致.迎风面的分布情况基本无任何不同,背风面的分布规律却有稍微的偏差,分析其产生的原因主要有:(1)采用划分几何模型网格方法存在差异;(2)影响网壳结构风压分布的矢高不尽相同;(3)风场求解域的几何模型不同.综合上述分析,判定风场计算结果可靠,且精度也可符合后续分析要求.

2 网壳结构梁截面尺寸的优化设计

采用理想球面的风压模型建模方法,进行实际网壳结构风场分析,由于仅研究网壳结构的静态性能,故将风场数值模拟计算的结果传向 ANSYS Workbench 的 Static Structural 中,即进行单向流固耦合^[9],网壳三维模型导入 Static Structural 的 Geometry 后,再次重构模型中的所有线体和面体.重构结束后,在 Static Structural 分析的 Model 的 Static Structural(A5)下定义要满足的刚度和强度条件,不断迭代计算,实现对网壳结构梁截面尺寸的优化设计,以获得满足设计要求条件下的最小截面尺寸.

因为网壳结构的梁长度已经确定,要确定最小截面尺寸,故其优化设计的目标函数为梁的截面积,设计变量为梁的宽度和厚度.

设计变量为

$$\mathbf{x} = [B, H]^T, B \in (0.06, 0.08), H \in (0.01, 0.03);$$

$$\text{目标函数为 } f(x) = B \cdot H. \quad (3)$$

约束条件为:杆件最大组合应力 $|\sigma_{\max}| \leq 200$ MPa;杆件最小组合应力 $|\sigma_{\min}| \leq 200$ MPa;杆件最大变形为 $D_{\max} \leq 16.25$ mm.

梁优化设计迭代后,通过多次比较,得到比较理想的梁截面尺寸.

3 网壳实物加载实验

网壳的结构设计往往要经实验以测试其性能,通常需要根据实际工况去做静载实验测试.笔者通过在已选好的节点做单点及三点水平加载实验,得到节点位移和杆件应变随载荷的变化曲线,进而评估整个网壳的受力情况,确认了其结构模型设计的合理性.

3.1 实验流程

网壳结构的静载实验加载程序依次按预加载实验、标准荷载实验、破坏实验的流程实施.

3.2 实验环境及仪器

实验地点为空旷的户外,微风且温度适宜的天气,可忽略环境因素对实验的干扰.实验时,在选取做实验的节点上拧好吊环,拉力经拧紧在液压缸上的钢丝绳进行加载,位移百分表量取节点变化位移.

3.3 实验步骤

(1)首先开始网壳预加载实验,以获取荷载与变形关系几乎不变时的初试荷载.

(2)然后进行网壳标准荷载实验,荷载值有次序地按照设定好的规律分步加载,持荷时间需使实验仪器的读数在一定时间稳定.加载至标准荷载时,延长持荷时间.

(3)最后进行破坏实验,荷载大于等于标准荷载且小于破坏荷载的 0.9 倍时,照标准荷载值的 0.1 倍逐步加载;当荷载值大于破坏实验值的 0.9 倍时,取标准荷载值的 5% 逐步加到破坏实验,此时持荷时间与标准荷载实验相同,加至破坏实验荷载时持荷时间变为 1~2 h,每隔 15 min 测取一次荷载和变形值,确保该时间段内变形值无较大变化.

(4)重复以上实验步骤多次.

3.4 单点和三点加载实验与仿真分析

单点加载所选节点的位移实验数据和仿真结果的曲线比较如图 7 所示.

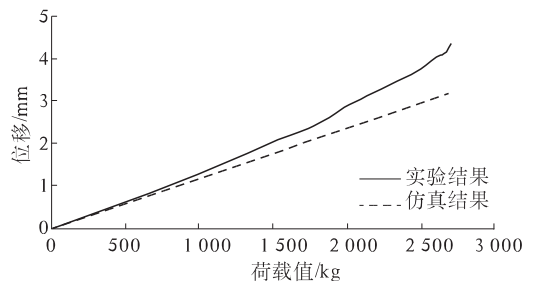


图7 单点加载位移随荷载值变化曲线

Fig. 7 Single point displacement curve with load value

三点加载仿真分析时,只有拉力荷载的位置和大小不一样,其他设置均与单点加载设置的一样.三点加载所选节点的实验结果和仿真结果曲线相比较,结果如图 8 所示.

从上面两图可以发现,单点加载和三点加载的实验所得到的曲线均大体是线性变化,且其与仿真分析的输出数据误差在可以接受的范围内,证明了笔者创建的网壳模型比较正确与合适.

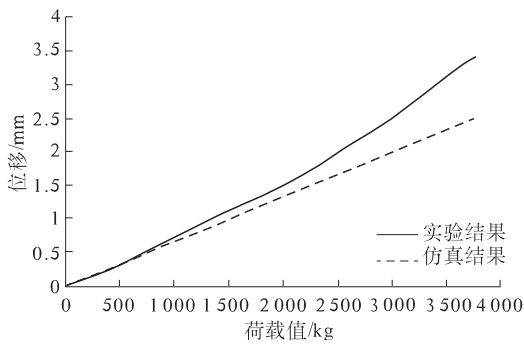


图8 三点测点的位移随荷载值变化曲线

Fig.8 Three point displacement curve with load value

4 结论

(1) 选用理想球面网壳风场分析的模型, 经过对实际网壳模型的分析, 获取了球面网壳表面的风压分布情况.

(2) 将仿真得到的网壳中心截面的风压分布曲线与已有的有关文献中的风压分布曲线经过比较, 间接验证了所建风场模型的准确性及合理性.

(3) 采取单向流固耦合的方法, 将流体计算结果耦合到梁膜混合模型的结构分析中, 并得到梁截面优化设计尺寸, 该分析过程是合理的.

(4) 通过所做的网壳实验, 分析了节点位移的变化规律. 将获得的实验结果与仿真结果相比较, 验证了所建的结构分析模型的正确性.

参考文献:

- [1] 张文福, 王秀丽. 空间结构[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 5-30.
- [2] 董石麟, 姚谏. 网壳结构的未来与展望[J]. 空间结构, 1994, (1): 3-10.
- [3] 沈祖炎, 陈扬骥. 网壳与网壳[M]. 重庆: 同济大学出版社, 1997: 169-197.
- [4] 王文龙. 大气风场模型研究及应用[D]. 湖南: 国防科技大学航天科学与工程学院, 2009: 30-50.
- [5] 吴扬. 模拟试验风场建模及应用技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 2011: 73-80.
- [6] 孙晓颖, 武岳, 林斌, 等. 大庆石油学院体育馆屋面风荷载的风洞试验及 CFD 数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报, 2006, 22(3): 558-563.
- [7] ALAN F K, DONALD P. Design of metal space frame[M]. New York: Arcadia Publishing, 1965: 72-74.
- [8] 宋学官, 蔡林, 张华, 等. ANSYS 流固耦合分析与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 3-3.

Single-Layer Spherical Shell Structure Analysis and Experimental Study

MA Yong-tao, CHEN Tian-yue, LI Wei, YUAN Tao

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This paper studies the structural design of the single-layer spherical shell. with the wind loads of shell bearing for design load, using FLUENT software to get the shell surface wind pressure distribution. The calculated surface wind pressure is applied to the shell structural analysis model, with unidirectional fluid-solid coupling (FSI) technology. Through the nonlinear calculation of structural analysis, we the stress distribution and deformation of shell under the wind load conditions. With minimizing beam section size of shell as optimization goal, we obtained the size of beam section which satisfies the design requirements. Through field tests, we got the shell node displacement load curve, and compared the results of the experiment with simulation curves under the same conditions to verify the correctness of the shell structures model.

Key words: single-layer spherical shell; FLUENT; fluid solid coupling; dimension optimization; experimental analysis