板锥网壳结构的风振响应分析*

王　星，方继高，朱力壮

（宁波工程学院 建筑工程学院，浙江 宁波　315016）

摘　要：板锥网壳结构是一种受力性能合理，技术经济效益良好的新型空间结构形式。采用谐波法模拟了 Davenport 脉动风谱；采用时程分析法对板锥网壳结构进行了风振响应时程分析，并对板锥网壳结构的风振响应特性进行了全面和深入的研究，为板锥网壳结构的抗风设计提供理论上的依据，得出了可应用于工程实践的重要结论。

关键词：板锥网壳结构；风振响应；谐波法；时程分析法

中图分类号：TU356　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000 - 811X(2010)S0 - 0181 - 04

0　引言

板锥网壳结构是指用板片组成锥体单元，按网壳结构的曲面形状将锥体单元拼接成整体，各锥顶再用杆件有规律地相互连接所形成的一种新型结构形式(图 1 所示)。板锥网壳结构受力性能合理，可以充分利用板材的强度和刚度，发挥材料的最大效用，同时集承重、围护、装饰为一体，轻质高强，具有良好的技术经济效益，并且具有鲜明的建筑视觉效果，因此在国外得到了广泛的应用，但在国内还是个空白。

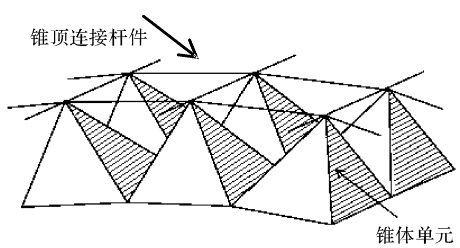

图 1　板锥网壳结构示意图

国外对板锥网壳结构主要注重于静力分析，且主要采用近似的等代方法[1]。文献[2]中采用有限元法对其进行了静力分析。板锥网壳结构的动力问题也是工程设计中的一个十分重要的问题，但由于其结构的复杂性，对于板锥网壳结构的风振响应分析目前尚未见到，这已不能适应工程应用的需要。

本文在人工脉动风速模拟和数值风洞试验的基础上进行了板锥网壳结构的风振响应时程分析，讨论了板锥网壳结构在水平脉动风作用下的风振系数，并且与无风状态下的结构内力和挠度进行了比较，对板锥网壳结构的风振响应特性进行了全面和深入的研究。

1　板锥网壳结构的内力风振系数

本文采用谐波法模拟 Davenport 水平脉动风速谱，选用锥板板边 8 单元划分的有限元模型，对以下算例进行时程分析。

该四角锥型板锥柱面网壳结构(图 2)的几何参数为：跨度 30 m，长度 45 m，矢高 5 m，厚度 1.5 m，网格划分 10 × 15。锥顶连接杆件 φ108 × 5.0(1 617.92 mm^2)，锥体三角形板片采用 3 mm 厚薄钢板，网壳置于 10 m 高的维护结构上，结构边界约束为两长边简支。

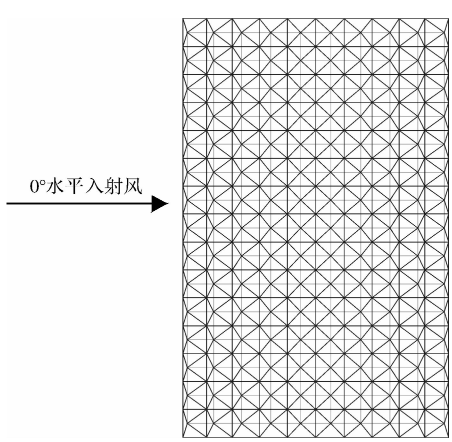

图 2　结构平面图

* 收稿日期：2010 - 09 - 25
基金项目：浙江省自然科学基金(Y107595)；宁波市自然科学基金(200901A6005082)
作者简介：王星(1970 -)，男，教授，研究方向为空间结构与钢结构. E-mail：wyuqi425@163.com

1.1 板锥网壳结构不同行列锥体锥板中点内力风振系数

对计算结果进行了统计和处理，得到正放四角锥型板锥柱面网壳的内力风振系数如图3、图4所示。

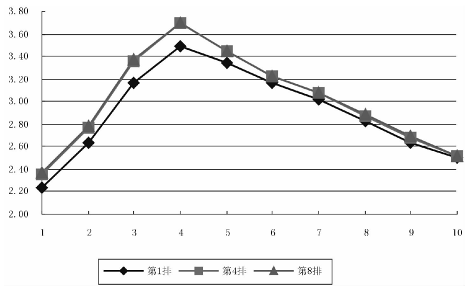

图3 板锥网壳结构不同跨锥板中点内力风振系数

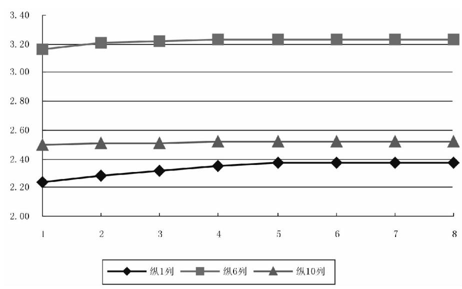

图4 板锥网壳结构不同列锥板中点内力风振系数

图中横坐标分别表示沿板锥网壳跨度方向和沿板锥网壳长度方向的锥体编号，纵坐标为内力风振系数。

分析图3、图4所示的不同锥列锥板中点最大内力风振系数，可以得到如下规律：

(1)沿板锥网壳跨度方向，内力风振系数大致沿着网壳的高度变化，在网壳顶附近内力风振系数达到最大，为3.70。不同跨的锥板中点内力风振系数略有不同，靠近网壳中心处锥板内力风振系数偏大，网壳边缘跨锥板中心处内力风振系数偏小，但二者的差值不大，最大差值出现在中间跨和第一跨的第三个锥体，其差值为0.21，仅占最大内力风振系数的5.7%。

(2)沿板锥网壳长度方向，内力风振系数大致变化不大，最大的差值出现在第1排的边缘跨锥体和中间跨(第8跨)锥体间，其差值为0.13，仅占最大内力风振系数的3.5%。因此可以认为沿板锥网壳长度方向，内力风振系数是一致的。取各排的平均值，可以得到第1排的内力风振系数为2.33，第6排的内力风振系数为3.22，第10排的内力风振系数为2.51，其值与图3中的曲线一致。

(3)支座处板锥网壳结构由于受到较强约束，其内力风振系数偏小，即使是在体形系数最大的第10排，其内力风振系数平均值与第1排平均值间的差值仅为0.18，是最大内力风振系数的4.9%。而远离约束的板锥网壳结构中间排锥体，如第4排，其内力风振系数可达到3.7，是体形系数最大处锥体内力风振系数的147%。可见支座约束对锥体内力风振系数的影响要比体形系数的影响大得多。

1.2 板锥网壳结构不同行列锥体间跨度方向上弦杆内力风振系数

对上述算例计算结果进行统计和处理，得到正放四角锥型柱面板锥网壳结构的不同行列锥体间跨度方向上弦杆内力风振系数如图5、图6所示。

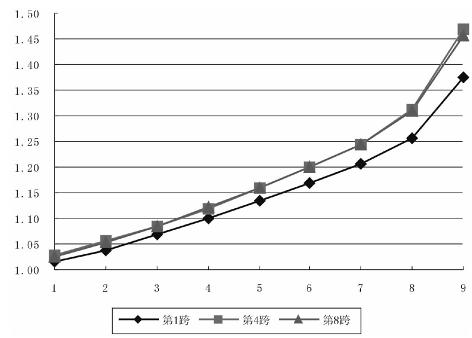

图5 板锥网壳结构沿跨度方向上弦杆内力风振系数

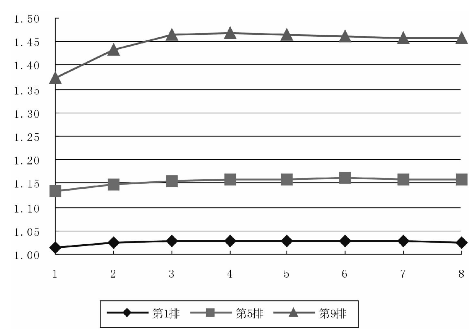

图6 板锥网壳结构沿长度方向上弦杆内力风振系数

分析图5、图6所示的不同锥列跨度方向上弦杆内力风振系数，可以得到如下规律：

(1)沿板锥网壳结构跨度方向，上弦杆内力风振系数随板锥网壳结构的体形系数变化而变化，在网壳体形系数最大的第10排，其上弦杆内力风振系数也最大，为1.47；在网壳体形系数最小的第1排，其上弦杆内力风振系数也最小，最小值为1.02。

(2)图5显示不同排的上弦杆内力风振系数略有不同，靠近网壳中心处上弦杆内力风振系数偏大，网壳边缘跨上弦杆内力风振系数偏小，但二者的差值不大，最大差值出现在连接网壳体形系数最大的第9排、第10排锥体的上弦杆，其差值最大为0.09，占最大上弦杆内力风振系数的6.1%。

根据上述计算模型的内力风振系数值，本文对此类模型的内力风振系数进行了比较处理，推荐采用如下风振系数进行设计计算：

上弦杆建议采用 1.5 的内力风振系数。

锥板的内力风振系数沿跨度方向按网壳高度变化，而不同跨间内力风振系数变化不大，故对小跨网壳可利用简化原则，统一取最大内力风振系数 3.7。对于更大跨网壳，可以通过其体形系数计算出不同排锥体的内力风振系数，按实际计算情况选取。

2　板锥网壳结构的风振响应时程分析

采用上述算例的几何尺寸和约束条件，本文分别计算了锥板为 3 mm 薄钢板和 18 mm 钢丝网水泥板的正放四角锥型板锥柱面网壳，首先对比了在受恒、活荷载的无风状态下静内力和在受恒、活荷载的有风状态下的最大风振内力（表 1、表 2），然后对比了在有风和无风状态下的动静位移（表 3）。

表 1　板锥网壳结构中间跨锥板中点折算应力及动静内力比

跨数	应力/(N/m^2)					
	静内力		风振内力		风振内力/静内力	
	3 mm 钢板	18 mm 钢丝网水泥板	3 mm 钢板	18 mm 钢丝网水泥板	3 mm 钢板	18 mm 钢丝网水泥板
1	1.52×10^7	1.61×10^6	2.54×10^7	1.45×10^6	1.662	0.900
2	1.41×10^7	1.38×10^6	2.25×10^7	1.17×10^6	1.599	0.847
3	1.26×10^7	1.12×10^6	2.30×10^7	98.7×10^6	1.832	0.883
4	1.08×10^7	8.63×10^5	2.73×10^7	68.3×10^6	2.523	0.791
5	89.9×10^7	64.1×10^6	3.88×10^7	95.8×10^6	4.313	1.495
6	89.9×10^7	64.1×10^6	4.84×10^7	1.30×10^6	5.387	2.025
7	1.08×10^7	86.3×10^6	5.18×10^7	1.55×10^6	4.788	1.796
8	1.26×10^7	1.12×10^6	5.44×10^7	1.85×10^6	4.326	1.652
9	1.41×10^7	1.38×10^6	5.29×10^7	2.06×10^6	3.751	1.494
10	1.52×10^7	1.61×10^6	9.49×10^7	3.44×10^6	6.223	2.134

表 2　板锥网壳结构中间跨上弦杆轴力及其动静内力比

杆号	轴力/N					
	静内力		风振内力		风振内力/静内力	
	3 mm 钢板	18 mm 钢丝网水泥板	3 mm 钢板	18 mm 钢丝网水泥板	3 mm 钢板	18 mm 钢丝网水泥板
1	-2.40×10^4	-2.81×10^4	-2.39×10^4	-2.80×10^4	0.997	0.996
2	-5.03×10^4	-5.90×10^4	-4.98×10^4	-5.83×10^4	0.991	0.987
3	-7.31×10^4	-8.57×10^4	-7.20×10^4	-8.43×10^4	0.985	0.984
4	-8.84×10^4	-0.104×10^4	-8.65×10^4	-0.101×10^4	0.978	0.979
5	-9.38×10^4	-0.110×10^4	-9.12×10^4	-0.107×10^4	0.973	0.975
6	-8.84×10^4	-0.104×10^4	-8.55×10^4	-0.101×10^4	0.967	0.970
7	-7.31×10^4	-8.57×10^4	-7.04×10^4	-8.28×10^4	0.963	0.965
8	-5.03×10^4	-5.90×10^4	-4.81×10^4	-5.66×10^4	0.957	0.959
9	-2.40×10^4	-2.81×10^4	-2.26×10^4	-2.66×10^4	0.945	0.946

表 3　板锥网壳结构中间跨上弦节点位移及其动静位移比

节点	位移/mm					
	静内力		风振内力		风振内力/静内力	
	3 mm 钢板	18 mm 钢丝网水泥板	3 mm 钢板	18 mm 钢丝网水泥板	3 mm 钢板	18 mm 钢丝网水泥板
1	0.05	0.07	0.04	0.05	0.735	0.790
2	−1.95	−2.32	−2.30	−2.70	1.179	1.167
3	−5.22	−6.28	−5.19	−6.24	0.994	0.994
4	−8.42	−10.16	−8.29	−10.01	0.984	0.985
5	−10.36	−12.51	−10.12	−12.25	0.977	0.979
6	−10.36	−12.51	−10.06	−12.19	0.972	0.974
7	−8.42	−10.16	−8.13	−9.84	0.965	0.968
8	−5.22	−6.28	−5.00	−6.03	0.957	0.960
9	−1.95	−2.32	−1.83	−2.18	0.939	0.941
10	0.05	0.07	0.32	0.36	6.046	5.244

从计算结果中可以发现如下规律：

（1）在脉动风荷载作用下，采用3 mm 钢板做锥板的板锥网壳结构，其锥板的应力变化值比较大，其最大的动静内力比可以达到6.2，而采用18 mm钢丝网水泥板的板锥网壳结构最大的动静内力比仅为2.134，说明风的脉动对薄板的影响比较大。

（2）脉动风荷载作用下 3 mm 钢板的锥板中心节点的最大应力仅为 94.9 MPa，18 mm 钢丝网水泥板的锥板中心节点的最大应力也只有 3.44 MPa，说明虽然脉动风会带来较大的风振内力，但结构仍具有足够的强度富余。

（3）由于本算例中模型的体形系数均为负，故风荷载对结构的作用是吸力，于是极大的影响了结构的受力形式。计算得到的上弦杆轴力在风荷载作用下反而要小于无风情况，但其值相差不大，采用3 mm 钢板做锥板的板锥网壳结构最大差值为5.5%，采用18 mm钢丝网水泥板的板锥网壳结构最大差值为5.35%，该最大差值均出现在结构体形系数最大处。

（4）风荷载对结构的吸力作用对网壳的挠度也产生了有利影响。在无风、恒活荷载作用下，网壳的最大挠度出现在跨中，采用3 mm 钢板做锥板的板锥网壳结构的最大挠度为 10.36 mm，采用18 mm钢丝网水泥板的板锥网壳结构最大挠度为12.51 mm；当结构作用了风荷载后，由于风的吸力，减少了网壳的挠度，使网壳跨中最大挠度分别减少为10.12 mm 和12.25 mm。

（5）不同材料的网壳模型，锥板的加厚有利于网壳的整体刚度提高，同时能减少网壳锥板的应力，但是对上弦杆轴力影响不大，也就是说锥板材料的改变影响的只是锥板自身的受力，即局部受力，而对网壳整体受力性能并无多大影响。材料变重以后，使结构挠度增大，但影响不大，3 mm薄钢板和18 mm钢丝网水泥板的重量相差一半，而网壳挠度却只相差2.15 mm，仅为最大挠度的20%。

3 结论

本文在人工脉动风速模拟和数值风洞试验的基础上进行了正放四角锥型板锥柱面网壳结构的风振响应时程分析，讨论了板锥网壳结构在水平脉动风作用下的风振系数，并且与无风状态下的结构内力和挠度进行了比较，得出如下结论：

（1）板锥网壳锥板内力风振系数变化较大，主要表现为单跨中内力风振系数大致沿板锥网壳跨度方向的高度变化而变化，其最小内力风振系数为2.24，最大为3.7，各跨之间内力风振系数相差不大，故在设计时锥板时，对小跨板锥网壳，可统一按锥板最大内力风振系数取，当跨度较大时可对结构按跨度方向划分不同分区，取不同锥板内力风振系数；

（2）板锥网壳中上弦杆沿网壳跨度方向，其内力风振系数在1.02～1.5之间，体形系数较大处弦杆内力风振系数也较大，由于风向的不可确定性，上弦杆内力风振系数可统一取为1.5；

（3）正放四角锥型柱面板锥网壳结构在风荷载作用下的锥板内力跟无风状态下的锥板内力相差较大，主要是由于脉动风对薄板的影响造成的；由于风荷载的吸力作用，使板锥网壳结构的挠度较之静荷载状态下有所减少，对网壳的变形是有利影响。

参考文献：

[1] R C Gilkie. A Comparison between the Theoretical and Experimental Analysis of Stressed Skin System of Construction in Plastics and Aluminium [C]//Space Structures. London：Blackwell Scientific Publications Ltd，1967.

[2] 王星，董石麟. 板锥网壳结构的静力特性分析[J]. 建筑结构，2000，30(9)：28－30.

[3] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海：同济大学出版社，2001.

[4] 李元齐，董石麟. 大跨度网壳结构抗风研究现状[J]. 工业建筑，2001，31(5)：50－53.

[5] 李杰. 随机结构系统[M]. 北京：科学出版社，1996.

[6] 王之宏. 风荷载的模拟研究[J]. 建筑结构学报，1994，15(1)：44－52.

（下转第 190 页）