

北海机场新航站楼网壳屋盖结构的地震反应分析*

Seismic Sespense Analysis of Net Shell Roof Structure of New Building of Beihai Airdrome

谢开仲** 秦 荣 彭文立 罗月静
Xie Kaizhong Qin Rong Peng Wenli Luo Yuejing

(广西大学土木建筑工程学院 南宁市大学路 100号 530004)
(College of Civil Architectural Engineering, Guangxi University,
100 Daxuelu, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要 在介绍北海机场新航站楼工程概况基础上,用有限元法分析其网壳结构的动力反应,用子空间迭代法分析其网壳结构的振动规律和动力特性,用时程分析法和反应谱法分析其网壳结构的地震反应。得出北海机场新航站楼网壳结构的振型主要是水平的,呈对称和反对称,高阶不规则振型比较复杂,自振频率频谱稍密,周期性不明显;最大内力杆件出现在拱脚附近,位移最大的杆件是刚度较小的次拱上;地震反应主要受水平方向控制,其中又以侧向刚度较小的 Y 方向为主,竖向地震反应相对很小。

关键词 网壳结构 地震反应 有限元分析 子空间迭代 时程分析 反应谱分析

中图法分类号 TU311.3

Abstract Dynamic response is analyzed by the finite element method on the net shell of a main part project of Beihai Airdrome, and the law and dynamic characteristic of this structure are also analyzed by subspace iteration method. The seismic response of the dome is obtained by means of the spectrum method and time history method. Our conclusions are the main vibrations of the net shell of main part project of Beihai Airdrome are horizontal, symmetrical and anti-symmetrical; higher and irregular vibrations are complicated; the spectrum of natural vibration frequencies is dense and its periodicity is inconspicuous; the member of maximal internal force is at the foot of the shell and the maximal displacement is at minor arch of less rigidity; seismic response is mainly excited in horizontal direction especially the side direction of less rigidity; and vertical seismic response is minor.

Key words net shell roof structure, seismic sespense, finite element method, subspace iteration method, time history method, spectrum method

1 工程概况

北海机场新航站楼是轻型大跨轻钢网壳屋盖结构,坐落在广西壮族自治区北海市。新航站楼总建筑面积 29364 m²,其中主楼 21074 m²,指廊 8290 m²。主楼部分为三层,其中包括一夹层,另在 12 m 及 17.5 m 处设有机房;指廊共两层。主楼拱形屋面顶标高为 24.9 m;指廊屋面顶标高为 12.88 m。屋盖结构为主、

次钢拱体系(截面形式为工字形),主拱截面高和翼缘宽度沿长度均匀变化。从平面上看,主拱结构由 5 个边长为 69 m 的等边三角形组成一梯形,梯形平面长度为 207 m,宽度为 59.7 m。每个三角形由 3 个半径为 36.944 m 的圆形呈 60 度角相交而形成的拱形伞状体。拱顶标高为 24.8 m,各拱之间设置桁架杆系支撑。

2 基本假设

基本假定 [1,2]:

(1) 网壳的节点均为完全刚接的空间节点,每个节点具有 6 个自由度;

2003-06-30 收稿,2003-08-07 修回。

* 国家自然科学基金项目(19872020)。

** 广西大学在读博士研究生 南宁 530004 (Doctor student, Guangxi University Nanning, 530004)

- (2) 质量集中在各节点上, 只考虑线性位移加速度引起的惯性力, 不考虑角加速度引起的惯性力;
- (3) 作用在质点上的阻尼力与对地面的相对速度成正比, 但不考虑由角速度引起的阻尼力;
- (4) 支承网壳的基础按地面的地震波运动;
- (5) 结构的振动变形很小, 仍属小变形范畴, 分析时可应用线性叠加原理;
- (6) 振动时地基的各部分作同一运动; 将结构的整个地基视为一个刚体, 可不考虑地面运动相位差的影响;
- (7) 假定结构的阻尼很小, 可忽略结构各振型之间的耦联影响

3 分析模型

利用有限元法及 ANSYS程序进行地震反应分析。主拱和次拱采用工字梁单元, 支撑用钢管梁单元, 为了更准确地加外荷载, 模型的层面板采用膜单元, 抗风墙用壳单元来模拟。共有 2157个梁单元, 232个膜单元, 1302个节点, 7个拱支座固结, 拱顶采用固结, 侧面的竖向杆件为抗风桁架, 与主拱及地面均为铰接。

整体模型的钢结构如图 1所示, 主拱和次拱模型的钢结构如图 2所示

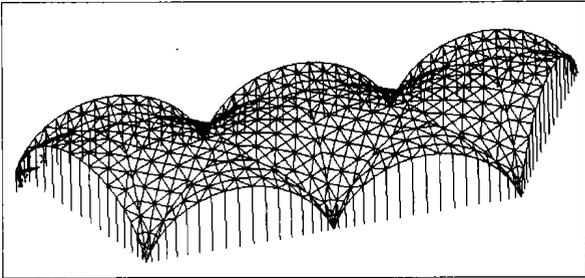


图 1 整体模型
Fig. 1 Whole structure

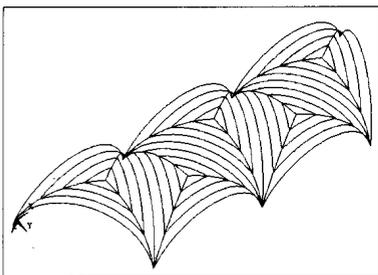


图 2 主拱和次拱模型
Fig. 2 Main archs and subordinate archs

4 模态分析——确定自振频率及振型

对该网壳结构用空间迭代法^[3]进行模态分析, 求得前 20阶自振频率和振型, 列如表 1 前 6阶振型如图

所示

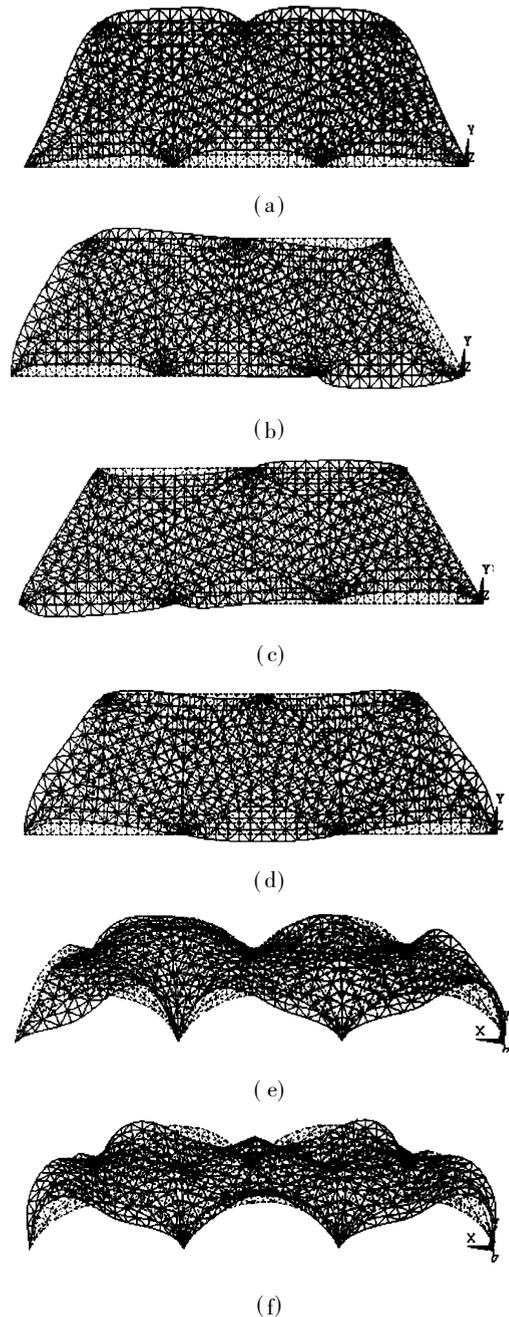


图 3 前 6阶振型

Fig. 3 First 6 vibration modes shapes

(a) 第 1阶振型; (b) 第 2阶振型; (c) 第 3阶振型; (d) 第 4阶振型; (e) 第 5阶振型; (f) 第 6阶振型

(a) First vibration mode shape; (b) Second vibration mode shape; (c) Third vibration mode shape; (d) Fourth vibration mode shape; (e) Fifth vibration mode shape; (f) Sixth vibration mode shape

分析表 和图 3可知, 该屋盖的自振频率和振型具有如下特点: 该屋盖网壳结构的振型主要是水平的, 呈对称和反对称, 高阶不规则振型比较复杂。第 1阶振型是水平振型, 第 2阶是顺时针水平扭曲, 第 3阶是逆时针扭曲, 第 4阶是弯曲, 第 5阶以上振型曲面比较

复杂,第 8 阶以上趋于不规则振型。自振频率因跨度较大,所以较网架小,周期性不明显,频谱较密集,前 7 阶自振频率比较接近,呈台阶式的趋势,第 4 阶振型自振频率与前 3 阶相差稍大,后面高阶不规则振型自振频率也较相近。

表 1 该网壳结构前 20 阶的自振频率

Table 1 Frequencies of 20 vibration modes of the net shell

阶数 Mode	频率 Frequency	阶数 Mode	频率 Frequency	阶数 Mode	频率 Frequency
1	1.552	8	3.466	15	4.978
2	1.579	9	3.509	16	5.090
3	1.633	10	3.695	17	5.382
4	1.914	11	3.741	18	5.593
5	2.540	12	4.085	19	5.628
6	2.644	13	4.198	20	5.757
7	3.418	14	4.834		

5 地震反应分析

5.1 时程分析法^[3]

采用逐步积分法 (Newmark- β 法)^[3]对该网壳结构的地震反应进行计算。时程分析采用 EL-Centro 波和天津波^[4],如图 4 所示,水平输入地震波峰值取 0.2g,竖向输入地震波峰值取 0.1g,输入地震波时间间隔为 0.02s,记录时间为 5s,计算中采用粘滞阻尼理论^[5]来描述阻尼 (阻尼比 $\zeta = 0.02$)。

通过 2 条地震波的时程分析,可以知道该屋盖的杆件是受轴力为主,弯矩和剪力都相当小,剪力可忽略不计。各主拱和次拱杆件中最大的位移和内力列如表 2。从表 2 可知最大位移出现在网壳中间刚度较小的次拱上,轴力和弯矩轴大值均出现在拱脚附近。

5.2 振型分解反应谱法^[6]

参照《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99-98)选取阻尼比为 0.02 的地震影响系数 α 曲线,并考

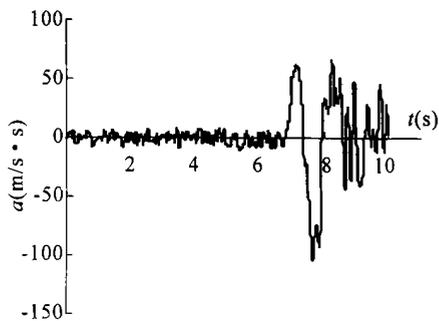
表 2 主拱和次拱的时程分析结果

Table 2 Time history method result of main archs and subordinate archs

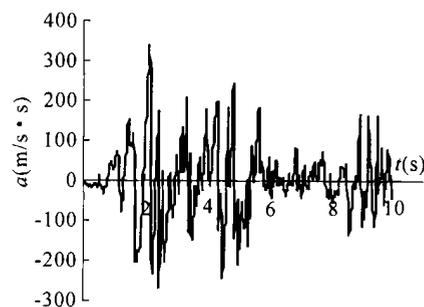
地震波 Seismic waves	方向 Direction	节点最大位移 Maximum displacement of nodes (mm)			拱顶最大位移 Maximum displacement of vaults (mm)			单元最大内力 Maximum internal force of elements	
		ux	uy	uz	ux	uy	uz	轴力	弯矩
								Axial forces (kN)	Moments (kN·m)
天津波 Tianjin seismic waves	X	5.40	-4.85	-9.14	3.88	3.55	3.43	-469.61	-14.29
	Y	16.46	-36.39	39.36	-0.93	-20.40	12.69	1054.70	76.08
	Z	1.24	1.59	-4.33	0.58	0.80	2.06	127.35	-4.95
EL-Centro 波 EL-Centro seismic wave	X	-5.91	-6.15	11.55	-4.92	-4.65	4.49	-456.26	19.10
	Y	11.15	-23.18	27.12	-0.62	-13.12	-10.07	693.25	44.60
	Z	1.16	1.42	-3.69	-0.79	-0.92	2.11	-118.47	4.71

虑放大系数 $\zeta(T)$ 的影响。网壳结构根据规范^[1]抗震设防是 7 度,所以计算中水平地震最大影响系数 α_{max} 为 0.08 (小震), α_{max} 为 0.50 (大震); 而竖向地震最大影响系数取水平方向值的一半。取前 50 阶振型进行组合。计算结果如表 3 和表 4 所示。

从表 3 和表 4 结果可知,北海机场主航道工程屋盖网壳结构的地震反应主要受水平方向控制,其中又以侧向刚度较小的 Y 方向为主; 竖向地震反应相对较小,但因为是空间屋盖结构,其地震反应的结果分析也十分关键。



(a)



(b)

图 4 地震波

Fig. 4 Seismic waves

(a) 天津波; (b) EL-Centro 波;

(a) Tianjin seismic wave; (b) EL-Centro seismic wave

表3 主拱和次拱的反应谱分析结果

Table 3 Spectrum method result of main archs and subordinate archs

地震波 Seismic waves	方向 Direc- tion	节点最大位移 Maximum displacement of nodes (mm)			拱顶最大位移 Maximum displacement of vaults (mm)			单元最大内力 Maximum internal force of elements	
		ux	uy	uz	ux	uy	uz	轴力	弯矩
								Axial forces (kN)	Moments (kN·m)
小震 Slight earthquake	X	0.62	0.82	0.95	0.32	0.48	0.69	51.85	1.65
	Y	0.95	2.07	2.32	0.28	1.57	0.71	58.09	3.92
	Z	0.19	0.23	0.61	0.03	0.12	0.35	17.00	0.65
大震 Violent earthquake	X	3.80	5.02	5.79	1.87	2.93	4.05	317.84	10.03
	Y	6.79	14.81	16.59	1.96	11.22	5.03	415.19	28.01
	Z	1.05	1.31	3.44	0.18	0.78	1.94	94.51	3.70

表4 反应谱分析的支座反应

Table 4 Spectrum method reaction of structure

反力 Reaction	方向 Direction	力 Forces (kN)			弯矩 Moments (kN·m)		
		X	Y	Z	M _x	M _y	M _z
小震 Slight earthquake	X	74.88	81.57	180.50	496.16	362.88	34.77
	Y	80.85	202.74	403.52	1490.50	383.46	28.72
	Z	28.14	72.68	61.35	256.81	157.77	7.64
大震 Violent earthquake	X	424.89	469.51	1058.30	2950.00	2138.20	204.89
	Y	576.31	1445.70	2883.50	10643.00	2700.40	205.09
	Z	158.95	410.98	366.91	1504.20	901.11	43.47

6 结论

本文通过有限元法对北海机场新航站楼大楼屋盖网壳结构进行地震反应分析, 可得以下几点结论:

(1) 该结构的振型主要是水平的, 呈对称和反对称, 高阶不规则振型比较复杂。自振频率频谱稍密, 周期性不明显。

(2) 内力和位移最大的杆件都不是出现在拱顶, 最大内力杆件出现在拱脚附近, 位移最大的杆件是刚度较小的次拱上。2个地震波作用的结果比较接近, 很有参考价值。

(3) 类似北海机场这样大矢跨比的网壳的地震反应主要受水平方向控制, 其中又以侧向刚度较小的Y方向为主; 竖向地震反应相对很小, 但因为是大空间屋盖结构, 其地震反应的结果分析也十分关键。

参考文献

- 1 JGJ7-91.网架结构与施工规程, 1991.
- 2 尹德钰, 刘善维, 钱若军. 网壳结构设计. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- 3 秦荣. 计算结构动力学. 桂林: 广西师范大学出版社, 1997.
- 4 谢开仲. 大跨度钢管混凝土拱桥非线性动力分析的QR法. 南宁: 广西大学硕士学位论文, 2002.
- 5 韩庆华, 刘锡良. 大矢跨比开孔单层球面网壳结构的抗震分析与设计. 空间结构, 2001, 9.
- 6 沈祖炎, 陈扬骥. 网架与网壳. 上海: 同济大学出版社, 1997.

(责任编辑: 邓大玉)