

大跨椭圆形辐射式双层悬索结构分析

徐珂¹, 田立强¹, 赵奕程²

(1 北京清城华筑建筑设计研究院, 北京 100083; 2 中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088)

[摘要] 某体育馆、游泳馆上部建筑造型平面呈椭圆形, 屋面结构采用悬索张拉结构, 两馆最大跨度均超过 120m。建立屋盖索结构和周边支撑钢结构有限元模型进行结构非线性分析, 分析结构在不同荷载分布情况下的几何非线性计算结果。将悬索结构等效成线性结构, 模拟索张拉后形成的结构刚度以此作为特征值分析和反应谱分析依据。结合工程特点进行温度分析和整体稳定性分析。

[关键词] 索结构; 几何非线性; 结构整体稳定; 屈曲分析; 抗震性能

Non-linear analysis of oval double and radiate large span suspended cable structure

Xu Ke¹, Tian Liqiang¹, Zhao Yicheng²

(1 Beijing THCA Architectural Design & Consulting Institute, Beijing 100083, China; 2 China JINGYE Engineering Corporation Ltd. 100088, China)

Abstract: A gymnasium, swimming pool upper building modelling plane is an oval, which suspension cable tension structure is used in roof, the two structures' maximum span are more than 120m. The three dimensional model including the cable roof and steel structure for bracing is built. The geometrical nonlinear analysis of the model above is carried out under the different load distribution situation. The suspension cable structure is equivalent to the linear structure, simulate formation structure stiffness is used to make buckling analysis and response spectrum analysis. In combination with the engineering characteristics, temperature and overall stability analysis to the structure is studied.

Keywords: cable structures; geometric nonlinearity; structural overall stability; buckling mode; seismic capability

0 工程概况

某体育馆、游泳馆上部屋面采用悬索结构, 由于屋面结构跨度均超过 100 米, 结构设计提出两种方案, 分别是双层辐射式悬索结构体系和索桁+单层网壳结构体系, 本文对双层辐射式悬索结构进行结构分析。两馆屋面悬索结构模型见图 1。两馆在平面上均为椭圆形, 在形状上是有差异的见图 2, 游泳馆更接近于方形。根据建筑造型要求中心均设置 40 米直径突起屋面。

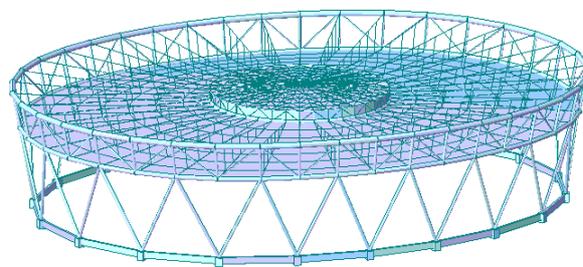


图 1 双层辐射式悬索结构模型

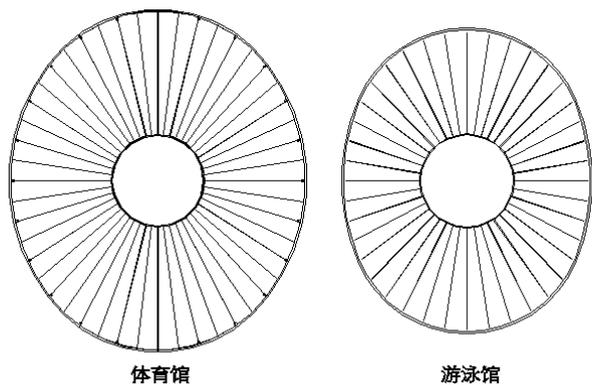


图 2 结构平面形状

两馆外围钢结构最高点离地面约 28m，钢柱脚间距 16~17m 左右，均为铰接连接，钢柱立面呈 V 字型布置，沿椭圆形外围连续布置，在环向上形成连续稳定结构体系。在结构剖面上采用相同悬索方案，外部设两道压力环，承重索和稳定索分别连接于压力环上，其中体育馆共 48 组索支撑在 24 组 V 型柱上，游泳馆共 40 组索支撑在 20 组 V 型柱上，典型剖面见图 3。屋面采用金属屋面板系统放置在下层稳定索处，具体结构尺寸见表 1。

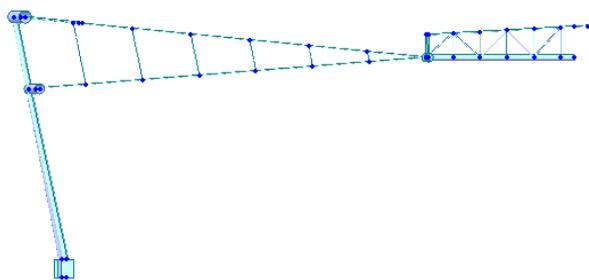


图 3 典型径向剖面图（半跨）

结构尺寸数据（单位：m） 表 1

	体育馆	游泳馆
椭圆长轴尺寸	145.0	130.0
椭圆短轴尺寸	125.0	105.0
长短轴比	1.16	1.23
索间压力环间距	9.0	8.0
下层 V 型柱高度	18.3	18.5

相比已有辐射式悬索工程实例^[1]，两馆有以下特点：（1）悬索跨度均超过 100 米，平面受压外环梁采用椭圆造型，受力比常见圆型造型复杂，对索力变化较为敏感；（2）承重索拱跨比为 1/23~1/29，稳定索拱跨比

为 1/30~1/37，索对竖向荷载的控制效率较低；（3）直径 40 米中心刚环占屋面跨度的 1/3 左右，与一般索托结构建议采用跨度 1/10 相比偏大，刚环在满足自身设计要求下，其刚度对实现整体结构控制目标有较明显影响。

1 设计条件

1.1 设计使用年限及结构安全等级

根据相关规范和任务要求，上部结构耐久性设计年限为 50 年，结构重要性系数为 1.1；结构安全等级为一级，结构安全系数 $\gamma_0=1.1$ ；抗震设防类别为重点设防类（乙类）。

1.2 恒荷载与活荷载

屋面恒荷载包括结构自重（计算程序生成），金属屋面、檩条、保温等恒荷载为 0.8kN/m²，马道恒荷载按 1.5kN/m 计算，暖通设备荷载沿马道布置。

屋面活荷载包括检修荷载 0.5kN/m²，马道活荷载按 2.0kN/m 考虑，40 米刚性环内考虑 10 个点吊挂活荷载，每个吊点 10kN。

基本雪压值按 100 年重现期考虑为 0.40 kN/m²，雪荷载除计算满布活荷外，结合规范要求及屋面特点，计算 3/4、1/2、1/4、对角 1/4 辐分布情况共 10 种；再结合荷载分布系数要求，其中不均匀分布方式在重分布区的分布系数为 1.25，在轻分布区分布系数为 0.75；而半跨均布分布方式在重分布区的分布系数为 1.00，在轻分布区分布系数为 0.00。合计 21 种活荷载分布情况。

1.3 风荷载

建筑物位于台风登陆地区，轻型屋面对风荷载较为敏感，且距离海边较近，基本风压值按 100 年重现期选取 $\omega_0=0.70\text{kN/m}^2$ ，地面粗糙度取 A 类，体形系数参照荷载规范和风洞试验报告结果，屋面风吸力取 0.6，结合屋面振动频率，风振系数为 1.65。风荷载作用方向分 0°、45°、90° 方向输入。

1.4 地震作用

抗震物抗震设防烈度为 6 度，设计基本地震加速度为 0.05g，设计地震分组为第一组，场地类别为 IV 类，场地特征周期在多遇地震和设防地震时 $T_g=0.65\text{s}$ ；罕遇地震时考虑地基刚度退化因素取 $T_g=0.70\text{s}$ 。整体结构阻尼比取 0.02，地震影响系数计算多遇地震作用时取 $\alpha_{\max}=0.04$ ，计算设防地震作用时取 $\alpha_{\max}=0.11$ ，计算罕遇地震作用时取 $\alpha_{\max}=0.25$ 。

1.5 温度作用

因外围钢柱和两道受压环处于室外环境，而上部索结构对边界支撑的位移变化较为敏感，因此计算中考虑

温度作用影响,根据年平均温度和极限温度情况,选择升温 and 降温各 25℃两种工况。

1.5 荷载组合

非地震设计的荷载组合根据规范要求设置恒荷载控制、活荷载控制、恒荷载有利三类荷载组合,其中恒荷载有利组合中,恒荷载分项系数取 0.9。温度作用作为分项系数取 1.2,组合系数取 0.6,当与其他可变荷载组合时取 0.3。

地震设计的荷载组合除按抗震规范式 5.4.1 计算外,还考虑双向和三向地震作用组合,考虑水平双向地震组合时,组合值比例采用 1:0.85;考虑三向(两水平向和竖向)地震作用时,组合值比例采用 1:0.85:0.65。

2 结构计算模型

两馆整体模型应用 MIDAS、SAP200、ANSYS 三种有限元软件进行静力、反应谱、温度作用、构件应力计算。ANSYS 软件主要进行结构整体稳定性分析,梁构件采用 Beam188 单元,索构件采用 Link8 单元。不同软件分别对索采用施加初始张拉力、温度变化、初始应变模拟索的初始张拉预应力。

3 结构设计目标

表 2

控制内容	控制目标	备注
结构水平位移比	$\leq 1/300$	水平作用
钢构件长细比	≤ 150	
钢构件应力比	≤ 0.9	小震弹性计算
竖向主振型频率	$\geq 0.85\text{Hz}$	屋面罩棚
线性屈曲稳定系数	≥ 5	
钢管外径壁厚比	≤ 50	
屋面安装完毕后的最大挠度	$\leq 1/400$	风吸荷载作用
初始预应力后的最大挠度	$\leq 1/400$	恒荷载+屋面活荷载作用
索安全系数	≥ 2.50	
索最小控制内力	$\geq 10\%f_{pk}$	

抗震设防目标是多遇地震和设防地震作用下钢结构和索单元保持弹性;罕遇地震作用下允许少部分钢构

件进入弹塑性状态,索单元处于弹性^[2]。

4 主要构件选型

柱上两道受压环为上部索结构提供支座锚固点,结构设计为水平连续布置成封闭环,竖向支撑构件中断布置,与两道刚环连接采用铰接连接方式。环间竖向支撑结构采用桁架,保持压力环间稳定。受压环根据其受力情况,有两种截面形式选择,以体育馆为例:

4.1 采用圆钢管截面。上环截面采用直径 1.90 米壁厚 0.04 米钢管,下环截面为直径 1.50 米壁厚 0.04 米钢管。优点是施工速度快,施工工艺简便。缺点是两受压环用钢量合计约为 1500 吨,造价较高。

4.2 采用圆钢管混凝土组合截面。上环截面为直径 1.40 米壁厚 0.025 米钢管,下环截面为直径 1.20 米壁厚 0.025 米钢管,管内压力填充 C50 自密实混凝土。优点是钢量较经济,两受压环用钢量合计约为 700 吨。缺点是需要钢管内压力注入混凝土,需要等到混凝土强度达到设计强度以后方可进行索结构张拉工艺,施工周期较长,同时须在钢管上设置浇筑混凝土孔洞,后期焊接工作量较大。综合对比选择此截面进行设计。

屋面中心直径 40 米刚性中心环采用辐射空间桁架,桁架榀数与外部上下层索单元组榀数相同,连接节点对应布置方,刚性中心环高度大于 2.5 米,其中桁架下弦直接与索单元相接,实际受力以传递索力为主,考虑径向下弦拉力值较大,其轴向变形对索力及整体位移控制有较大影响,设计为施加预应力方钢管结构,由于杆件数量较多截面较大,采用截断一半方式继续延伸至中心,见图 4,中心处根据受力情况设置直径 4 米厚 40~50 毫米钢板平衡拉力。

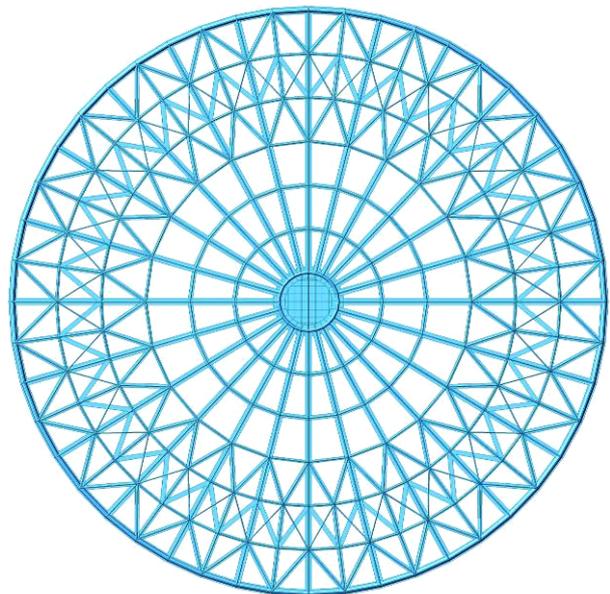


图 4 屋面中心直径 40 米刚性中心环平面

5 静力非线性分析

结构静力非线性分析以体育馆为例进行如下内容的计算：

5.1 初始形态分析

初始形态分析方法采用非线性有限元法，应用Midas 有限元软件通过试算，仅考虑结构自重工况的情况承重索预应力的分布状态见图 5，稳定索预应力分布状态见图 6。

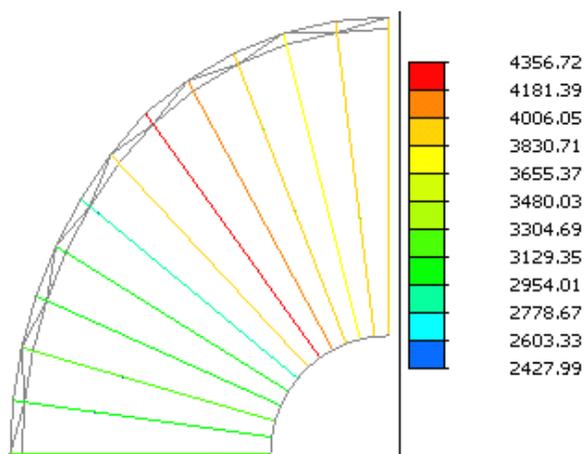


图 5 承重索预应力 (kN)

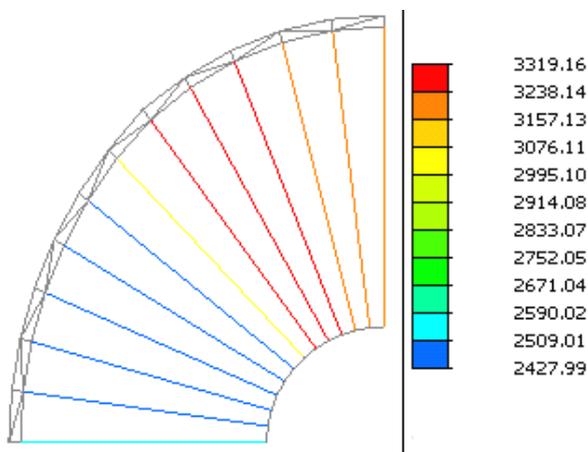


图 6 稳定索预应力 (kN)

在预应力状态下结构的竖向位移见图 7，结构在上述预应力状态下结构变形很小，将此状态作为结构受力分析的初始状态。

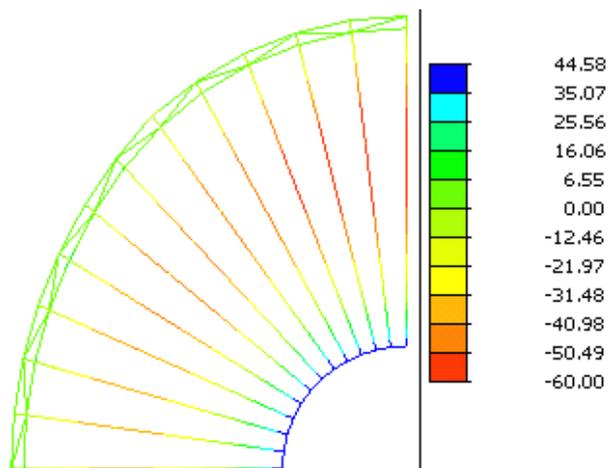


图 7 预应力状态下结构的竖向位移 (mm)

5.2 结构体系初始形态生成

为实现上述结构的初始形态，采用如下的方法模拟结构的生成过程：

(1) 在地面安装直径 40 米刚性中心环及稳定索，通过牵引索对稳定索施加预应力，用以提升屋面结构，当稳定索内力值接近初始形态时的预应力值时，停止提升屋面，并临时固定稳定索。

(2) 安装承重索，通过牵引索对承重索施加预应力，用以继续提升屋面，当屋面达到初始形态位置时，停止提升屋面。

(3) 完成屋面提升后，承重索、稳定索在自重状态下的内力形成。

上述过程通过施工阶段分析模拟索单元找形找力，计算得到索预应力分布情况与结构初始状态内力接近。

5.3 非地震组合作用下结构强度

经计算构件在非地震组合作用下构件应力比见图 8：

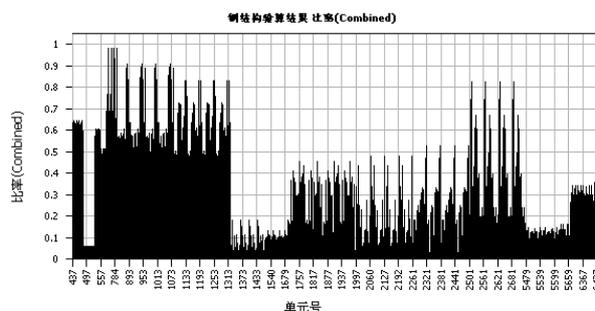


图 8 非地震组合作用下构件应力比

在恒荷载与活荷载组合，恒荷载与风吸荷载组合，恒荷载、活荷载与升温作用组合，恒荷载、活荷载与降温作用组合，恒荷载、风荷载与升温作用组合，恒荷载、

风荷载与降温作用组合下, 承重索内力及应力比和稳定索内力及应力比(索的应力比为所内力与索的破断荷载的比值)见表 3:

表 3

荷载工况	恒荷载与活荷载组合	恒荷载与风吸荷载组合
承重索内力	5482	4040
承重索应力比	37.8%	27.8
稳定索内力	2822	3532
稳定索应力比	23.1%	29.0%
荷载工况	恒荷载、活荷载与升温作用组合	恒荷载、风荷载与升温作用组合
承重索内力	5480	4033
承重索应力比	37.8%	27.8%
稳定索内力	2810	3521
稳定索应力比	23.0%	28.9%
荷载工况	恒荷载、活荷载与降温作用组合	恒荷载、风荷载与降温作用组合
承重索内力	5484	4043
承重索应力比	37.8%	27.8%
稳定索内力	2832	3543
稳定索应力比	23.2%	29.1%

从表 3 数据对比可以得出, 在非地震作用组合下承重索的内力由恒荷载与活荷载组合控制, 稳定索的内力由恒荷载与风荷载组合控制, 而温度作用对索的内力影响不大。

5.4 非地震组合作用下结构变形

屋面索结构从预应力初始状态至屋面活荷载加载完毕后, 屋面向下竖向最大位移量在 300~310mm, 最大挠度为 1/410; 从安装屋面完毕即仅有恒荷载情况至风荷载加载完毕, 屋面在风吸力作用下, 向上竖向最大位移量在 300~315mm, 最大挠度为 1/403, 均能够满足屋面挠度的要求。在上述变化中, 承重索与稳定索的内力与索破断荷载比值在 10%~40%之间变化。

在恒荷载、活荷载、风荷载作用下, 外环上下受压环间水平位移差小于 21mm, 层间位移比小于 1/400, 对环间构件侧向刚度变化影响较小。

由于风吸荷载和屋面活荷载作用方向相反, 结构在不同受荷阶段的应力状态有较大变化, 可能对结构基本刚度有一定影响, 因此考虑钢结构基本刚度为

90%情况下, 计算结构受力情况, 对结构位移量增大、杆件内力均有影响, 除部分构件因内力较小而变化较大外, 重要构件影响比例在 10%以内, 说明结构整体刚度主要由索单元的几何刚度形成。

5.5 与 ANSY 有限元软件、SAP2000 有限元软件计算结果的对比

鉴于本工程的重要性, 采用 ANSYS、SAP2000 有限元软件对上述工况下构件应力比、索的内力及结构变形进行对比计算。经比较, 结构内力基本一致。表 4 仅列出在恒荷载与活荷载组合时以上三种软件承重索、稳定索的内力对比。

表 4

软件名称	恒荷载与活荷载组合 (单位: kN)		
	MIDAS	ANSYS	SAP2000
承重索内力	5482	5208	5396
稳定索内力	2822	2729	2773

索内力差距在 5%以内, 其它荷载组合和位移情况也基本接近。

6 地震作用反应谱分析

6.1 结构周期

反应谱分析方法为结构各个振型响应的结果线性组合, 因此在悬索结构的分析时需将悬索结构等效成线性结构, 模拟索张拉后形成的结构刚度以此作为特征值分析和反应谱分析依据。取非线性分析的内力结果及索张力作为单元初始内力, 比较结构在线性等效后与非线性分析的竖向位移结果差别, 来判断结构刚度模拟的准确性。

经过比较非线性分析的位移结构与线性等效后的位移结构基本一致, 可以认为线性等效后的结构刚度与非线性分析的结构刚度基本一致, 故可以采用线性等效后的结构进行地震作用反应谱分析。

反应谱分析采用 Ritz 向量法, 共计算 120 阶模态, 振型参与质量 X、Y、Z 均达到 90%以上, 满足规范要求。结构主要周期、频率见表 5。第 1 阶振动模态为为索单元整体扭转振型, 但振型参与质量很少, 对反应谱分析的结果贡献很小, 说明承重索平面外稳定性不够, 需设置环向小索加强承重索平面外刚度。结构主振型出现在第 2 阶 Z 向屋面整体振动模态、第 17 阶 X 向振动模态、第 31 阶 Y 向振动模态分别见图 9、图 10、图 11, 模型中 X 向为短轴布置, 模态分布情况符合结构实际刚度分布, 其余前 15 阶模态主要为屋面 Z 向整体振动或索单

元局部振动。

表 5

模态号	频率 (Hz)	周期 (sec)	说明
2	1.0295	0.9713	Z 向振动第一周期
17	2.0481	0.4883	X 向振动第一周期
31	2.3706	0.4218	Y 向振动第一周期

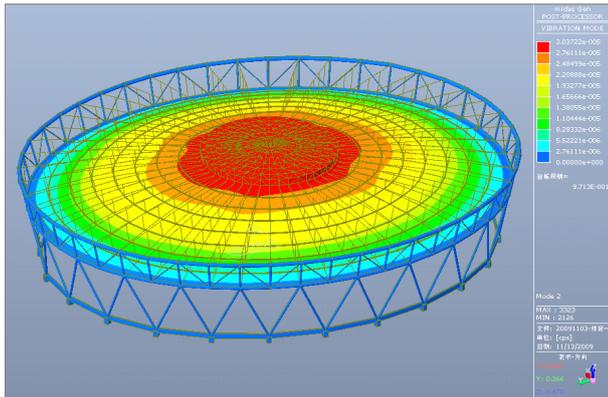


图 9 第 2 阶振型图 (T2= 0.9713s 屋面 Z 向振动)

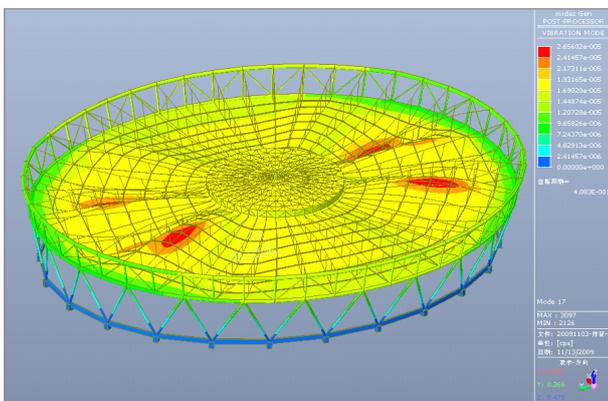


图 10 第 17 阶振型图 (T17=0.4883s 结构 X 向振动)

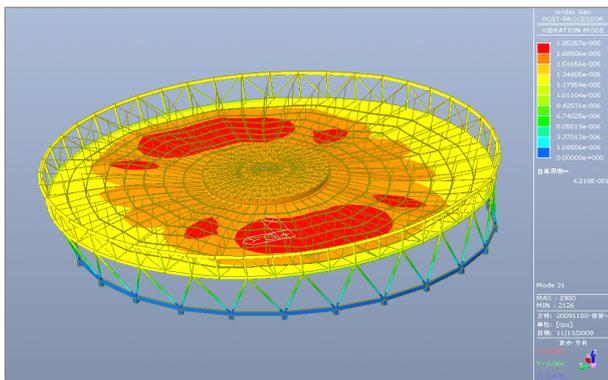


图 11 第 31 阶振型图 (T31=0.4218s 结构 Y 向振动)

6.2 与 ANSYS 有限元软件、SAP2000 有限元软件计算结果的对比

对于地震作用 Midas、ANSYS、SAP2000 计算结果基本相同，表 6 列出了各软件屋面竖向振动模态的周期。

表 6

软件名称	MIDAS	ANSYS	SAP2000
周期(sec)	0.9713	0.9787	0.9180
频率(Hz)	1.030	1.022	1.090

通过表 6 数据可以看出结构屋面竖向振动周期、频率比较接近，数值差距不超过 10%，频率均大于 1Hz。

6.3 地震作用下索内力分析

通过计算，在多遇地震水平作用下，索内力最大值为 33.68kN，与等效重力荷载代表值作用下的索内力相比很小，两者之比小于 1%。在竖向地震作用下的索内力也较小，索内力最大值为 29.41kN，与等效重力荷载代表值作用下的索内力之比小于 1%。

从反应谱的分析结果看，结构的抗震性能标准可以定得比普通结构高，而竖向荷载及风对屋面产生的吸力设计是体育馆索结构设计的关键。鉴于工程的重要性和较大的结构跨度，在进行竖向地震作用计算时，结构构件的竖向地震力取 20%重力荷载代表值和反应谱分析结果的包络值进行计算^[3]。

7 温度作用分析

温度作用分三种情况分析：

7.1 对钢结构和索结构同时进行升温或降温

经计算温度作用对整体结构影响较小，其中钢结构轴力变化在 2% 以内。由于温度造成钢结构和索结构同时膨胀或紧缩，温度作用对索单元轴力影响也很小，温度产生内力与满荷载工况内力之比不到 2%。在这种情况下竖向荷载及风对屋面产生的吸力设计仍是体育馆索结构设计的关键。

7.2 仅对钢结构进行升温或降温

由于温度变化造成钢结构单独膨胀或紧缩，对索单元实际长度有较大影响，索结构为被动受力，通过索力对比，此类温度作用对索单元轴力影响较大，温度产生内力与满荷载工况内力之比在 5~13%。

7.3 仅对索结构进行升温或降温

由于温度变化造成索结构单独膨胀或紧缩，而钢结构保持原有结构形状，对索单元实际长度有较大影响，索结构为主动受力，通过索力对比，此类温度作用对索单元轴力影响较大，温度产生内力与满荷载工况内力之比在 5~15%。

后两种情况如考虑温度作用与其它荷载组合系数为 0.6，设计内力变化在 10%以内，在这种情况下应注意温度作用引起的索力变化是否在控制目标之内。

层受压环压力逐步增大，表 8 为下压环前十阶屈曲特征值。

8 结构整体稳定分析

屈曲分析有助于发现结构在特定载荷下的稳定性以及确定结构失稳的临界载荷，本项分析为线性屈曲分析，计算采用 ANSYS 软件分析。由于活荷载和风吸荷载方向相反，因此分两种工况进行分析。

8.1 考虑初始荷载组合为 1.0 恒+1.0 活+1.0 自重+1.0 预应力，在活荷载不断增大的情况下，外环上层受压环压力逐步增大，表 7 为上压环前十阶屈曲特征值。

表 7

阶数	特征值	阶数	特征值
1	9.0535	6	9.9094
2	9.0666	7	9.9808
3	9.0870	8	10.020
4	9.1070	9	10.666
5	9.8901	10	10.676

在活荷载工况下，结构屈曲主要是承重索对应外环上层钢管混凝土构件的平面外屈曲，该构件也是结构中主要承受竖向向下荷载的构件。由于结构的对称性，使得各阶屈曲模态对应的荷载系数非常接近，图 12 为第 1 阶模态。

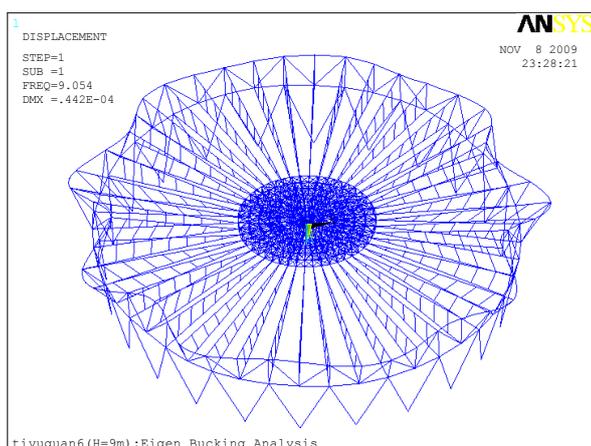


图 12 上压环第 1 阶屈曲模态 (特征值 K=9.0535)

8.2 考虑初始荷载组合为 1.0 恒+1.0 风吸+1.0 自重+1.0 预应力，在风荷载不断增大的情况下，外环下

表 8

阶数	特征值	阶数	特征值
1	9.1675	6	10.106
2	9.1679	7	10.174
3	9.2636	8	10.210
4	9.2683	9	10.833
5	10.102	10	10.952

在风吸荷载工况下，结构屈曲主要是稳定索对应外环下层钢管混凝土构件的平面外屈曲，该构件也是结构中主要承受压力的构件。由于结构的对称性，使得各阶屈曲模态对应的荷载系数比较接近。为表示清楚，图 13 中仅表示外环下层的钢管混凝土及稳定索。

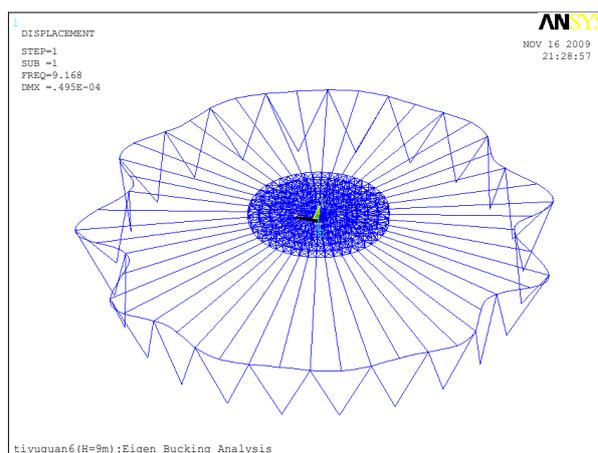


图 13 下压环第 1 阶屈曲模态 (特征值 K=9.1675)

9 重要节点有限元分析

40 米刚性中心环是悬索结构的中部支撑点，由于承重索和平衡索的拉力较高，通过刚性环下层径向拉杆转递至中心处，为考察中心处结构安全性，采用通用有限元计算软件对此节点进行有限元分析。因计算工况下节点双轴对称，各径向拉杆内力对称，因此采用 1/4 模型进行计算，有限元模型见图 14:

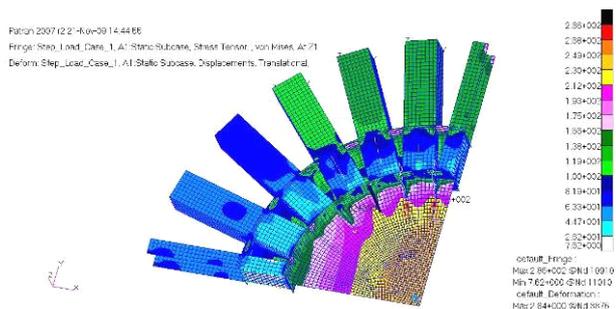


图 13 节点整体模型应力云图

节点模型中 *mises* 应力最高值为 286MPa，位于中心圆板与工字梁连接劲板尖角处，此处应力集中比较严重，实际设计需增加节点板降低应力。

径向方钢管 *mises* 应力最高值约为 200MPa，远低于 Q345 钢的屈服强度；方管其余部位 *mises* 应力值基本上在 150 MPa 以下，因此方钢管在计算工况下处于安全状态。

中心圆板大部分面积 *mises* 应力值位于 150 MPa~260 MPa，圆心周围有较大面积 *mises* 应力约为 250 MPa，考虑到此钢板的重要性，建议加厚为 45mm。经计算，中心圆板加厚为 45mm 时，其中心部位 *mises* 应力值可以下降到 220 MPa。

10 结论

(1) 通过对整体模型的振型分析，结构的振动形态良好、匀称，结构的刚度和质量分布均匀，该结构体系工作性能良好。

(2) 由于屋面结构自重较轻，屋面荷载和风荷载对结构安全性起控制作用，应根据实际屋面荷载分布和风洞报告结果，调整索单元预应力。

(3) 两道外受压环是索单元外部支撑点，其平面呈椭圆形状，在变半径处内力分布呈突变状态，设计时应加强处理，并考虑浇筑混凝土预留孔对节点的影响。中心刚环是索单元内部支撑点，其径向刚度应与索预应力相匹配，避免中心刚环变形过大造成钢索应力分布差异过大。

(4) 由于地震作用不起控制作用，本工程水平地震作用抗震设防标准可按提高一度标准设防，竖向地震作用按提高亮度标准设计。

(5) 本方案钢材理论用量为 2050 吨（体育馆），按屋面覆盖面积 14891m² 计算，单位用钢量为 138kg/m²，与对比方案节省约 25% 钢材用量。钢索理论用量为 45 吨，单位用量 3.1kg/m²，与对比方案节省约 45% 钢索用量。

参考文献

- [1] 沈世钊 等. 悬索结构设计（第二版）[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [2] 傅学怡 等. 国家游泳中心水立方结构设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [3] GB 50011-2001 建筑抗震设计规范（2008 年版）[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

