

索—拱杂交结构动力反应分析

王 宏, 郭彦林, 崔晓强

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 以中山大学风雨球场工程为实例, 分析研究了索—拱杂交结构体系的自振特性以及结构的抗风、抗震性能。分析发现结构的自振频率呈密集型分布, 结构的风荷载脉动响应十分显著, 论述了索—拱杂交结构体系进行结构动力反应分析的重要性, 通过分析得到了结构的风振响应系数, 为结构设计提供了重要的参考资料。最后进行了结构时域内的地震反应分析, 结构表现出良好的抗震性能。

关键词: 索—拱杂交结构; 模态分析; 风振反应分析; 地震反应分析

中图分类号: TU312 **文献标识码:** A

1 前言

索—拱杂交结构体系是一种新型的结构形式, 对于大跨度的建筑结构, 它可以提供优雅的建筑造型。预应力的采用使结构的受力变得更加合理, 跨越的跨度更大, 从而使结构变得十分轻巧。结构的曲面造型、自重轻等方面的优点使得其成为传统框架结构很好的替代品。然而, 自重轻、曲面造型、荷载作用下结构反应的非线性特性同时又使得进行结构动力反应分析是必要的, 也是十分重要的。

索—拱杂交结构在国内外只有较少的工程实例, 如前苏联列宁格勒的泽尼特体育馆和北京的朝阳体育馆^[1]。中山大学风雨球场工程又为我国大跨度体育场馆提供了一个生动的工程实例, 其建筑平面尺寸为 70m×120m, 整个结构由 9 根索—桁结构(图 1)组成, 纵向通过屋面空间桁架、屋面水平支撑和柱间支撑连接, 从而形成空间整体结构共同抵抗外荷载作用。索—桁结构由主索、斜拉索、吊索、柱、空间拱形桁架和斜撑杆组成, 结构的荷载作用最终通过柱、斜拉索和斜撑杆传向结构基础。屋面结构采用 MIC-240 彩板拱壳结构。

本文对此结构进行了结构动力反应分析, 研究了结构的自振特性以及结构的抗风、抗震性能, 得到了结构的风振响应系数, 为结构设计提供了重要

的参考资料。

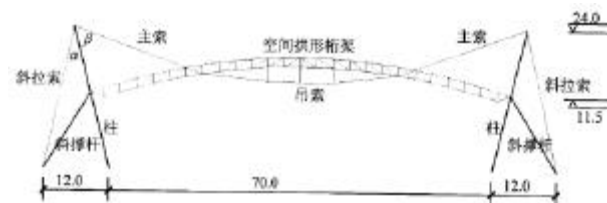


图 1 索—拱结构示意图(m)

Fig.1 A cable-truss structure

2 结构模态分析

了解结构的自振频率与振型特性是掌握索—拱杂交结构体系动力性能的基本途径之一。模态分析^[2]可以确定结构的固有频率和振型, 固有频率和振型是承受动态荷载结构设计中的重要参数, 也是后续进行结构风振谱反应分析的基础。本文采用子空间迭代法来求解结构体系前若干阶自振频率和振型。

子空间迭代法^[2]是利用瑞利—里兹变换, 将高阶方程投影到一个低维空间(子空间)中, 在子空间内求解一个低阶的广义特征方程, 并以求出的低阶特征矢量返回到原方程的一组正交里兹基矢量, 然后以迭代的形式同时迭代, 使其构成的低维空间接近于原方程中最小的一组特征值对应的特征矢量构成的低维空间, 原方程在这个近似的低维空

收稿日期: 2001-07-16; 修改日期: 2001-09-25

作者简介: 王 宏(1974), 男(汉族), 陕西人, 清华大学土木工程系博士研究生, 从事大跨度空间结构研究

郭彦林(1958), 男(汉族), 陕西人, 清华大学土木工程系教授、博士、博导, 从事钢结构研究和教学工作

崔晓强(1973), 男(汉族), 山东人, 清华大学土木工程系博士研究生, 从事大跨度空间结构研究

间中就能求近似的低阶特征对。

表 1 结构前十阶自振特性

Table 1 The first ten natural frequencies of the structure

振型序号	周期 T(s)	圆频率 W	工程频率 F(Hz)
1	0.312	20.127	3.2050
2	0.304	20.652	3.2886
3	0.156	40.272	6.4128
4	0.135	46.515	7.4069
5	0.117	53.823	8.5705
6	0.098	64.270	10.234
7	0.094	66.474	10.585
8	0.093	67.353	10.725
9	0.091	69.162	11.013
10	0.091	69.331	11.040

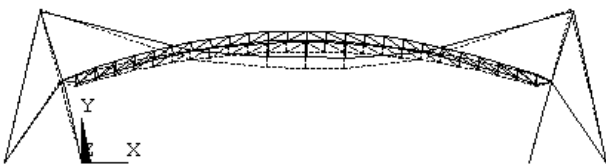


图 2 第一振型

Fig.2 First Mode

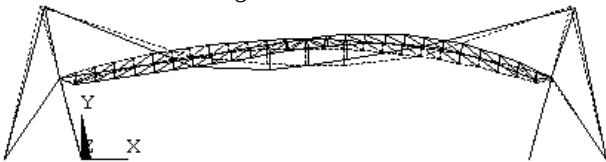


图 3 第二振型

Fig.3 Second Mode

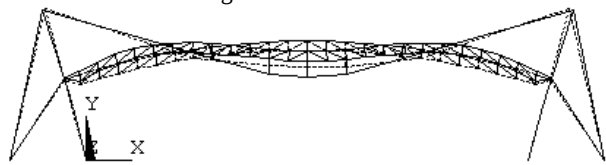


图 4 第三振型

Fig.4 Third Mode

由于结构体系中索单元的存在，索中预应力的存在对结构的刚度影响很大，使得结构具有明显的非线性特性，而对于这样的非线性结构体系，结构的固有特性随着结构平衡状态的改变而不同，这样要确定对应于结构任一平衡状态的固有特性显然是非常困难的。本文选择结构最具代表性的平衡状态，即结构在其自重和索中预应力共同作用下结构的平衡状态来分析结构的固有特性。表 1 列出了结构的前十阶自振频率和周期，可以发现结构的自振频率呈密集型分布，这也是这种结构体系的一个显

著特点。图 2、3、4 给出了结构的前三阶振型。从振型图中可以看出，结构的振型主要是沿着结构竖向的振动。

3 结构风振反应分析

风荷载是索—拱杂交结构体系最重要的荷载之一。由于这种结构体系具有自重轻，自振频率低，在风荷载作用下易于产生较大的变形和振动，是一种风敏感型结构。另外，这个结构处于易受强台风袭击的珠海地区，因此为了保证结构的抗风安全，了解结构的抗风特性，本文进行了结构的风振反应分析。

3.1 风荷载

自然风在流动过程中受到地面各障碍物的影响，其速度呈现出随机脉动特性。就任意位置上的风速而言，它虽然是一个随机过程，但可以认为，自然风是由平均风和脉动风两部分所组成，其风速含有一个平均分量和一个脉动分量。因此在自然风作用下，结构的风荷载是由两部分组成：一是平均风作用下的静风荷载，二是由于自然风的紊流成分诱发导致的随机动荷载^{[1][3]}。

$$p = m_s m_z A w_0 + m_s A w_p \quad (1)$$

其中： m_s 为风载体型系数； m_z 为风压高度变化系数； w_0 为基本风压； w_p 为脉动风压； A 为受风荷载面积。式(1)中第一项是静风荷载，它属于静力荷载，对结构的作用可通过静力分析求得，第二项是随机动荷载，它对结构的作用应该采用随机振动理论来求解。

基本风压 w_0 根据我国建筑结构荷载规范 (GBJ9-87) 确定。

脉动风速为零均值随机过程，脉动风功率谱是应用随机振动理论进行结构风振反应分析计算所必须具备的，它需由强风观测得到的风速记录得出。本文采用 Davenport 风谱进行结构风振反应分析，Davenport 脉动风速谱^{[1][3]}如式(2)所示，它不随高度的改变而变化。

$$\begin{cases} S_v = 4K\bar{v}_{10} \frac{x^2}{n(1+x^2)^{4/3}} \\ x = \frac{1200n}{\bar{v}_{10}} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 S_v 为脉动风速谱， n 为风速频率， $\bar{v}_{10}$ 为 10 米高度处的平均风速， K 为地面粗糙度系数。根据珠海市气象局提供的气象资料，珠海市风速频率 $n = 0.1 \sim 0.2 H_z$ ，10 米高度处的平均风速

$\bar{v}_{10} = 35.7 \text{ m/s}$ 。

3.2 计算结果及分析

本文进行了结构在脉动风荷载作用下的随机风振反应分析，并与静风荷载作用下的静力分析结果进行了对比分析。考虑到这种索—拱杂交结构体系自振频率呈密集型分布，在分析中我们考虑了结构前 20 阶振型的影响。表 2 列出了同时考虑水平风荷载和竖向风荷载作用下结构中的一些主要构件在平均风作用下和脉动风作用下的反应值以及二者的比值。

表 2 结构构件在风荷载作用下的响应
Table 2 The wind-induced response of the structural components

	平均风作用 $\bar{x}$	脉动风作用 s	$s/\bar{x}$
跨中挠度(mm)	244.24	50.73	0.21
主索应力(MPa)	98.27	5.6	0.06
斜索应力(MPa)	163.95	27.8	0.17
斜撑杆应力(MPa)	179.33	36.56	0.20
柱底反力 F_x (kN)	822.37	141.89	0.17
柱底反力 F_y (kN)	3017	507.69	0.17
索底反力 F_x (kN)	2588.8	508.12	0.20
索底反力 F_y (kN)	4034.8	735.24	0.18
柱弯矩(kN·m)	245.57	87.56	0.36

由表中数据可以看出，对于风雨球场这种索—拱杂交结构体系，风荷载的脉动风响应比较显著。在水平风荷载和竖向风荷载组合作用下，结构的脉动风响应和平均风响应之比最大达到 36%，也就是说，如果在结构分析中只考虑结构的平均风作用，而不考虑结构的脉动风响应，这样得到的结果对于结构是不安全的。并且从表中数据还可以看出，在同样的风荷载作用下，对于结构的不同构件，其脉动风响应和平均风响应的比值也是不同的。这样通过对结构进行随机风振反应分析，我们可以找出结构中在风荷载作用下最不利的结构构件，从而在结构设计中做到区别对待，达到安全和经济的双重目的。

脉动风是风力中的动力成分，它使结构产生振动，即顺风向振动。脉动风对结构的作用，可以转化为一个等效静力风压，也就是说，可以采取对平均风压乘以一个大于 1 的风振响应系数 b_z ，作为考虑脉动风对结构产生的动力影响。在脉动风压作用下，结构的顺风向风振响应系数 b_z 定义为“总

风力的概率统计值与静风力的统计值的比值”。对于本文这样一个特定的结构体系，定义风振响应系数 b'_z 为“结构在总的风荷载作用下的概率响应与静风作用下的概率响应的比值”。根据前述分析可知，对于结构中的不同构件具有不同的风振响应系数，为了便于结构设计，在风雨球场索—拱杂交结构体系结构设计中，建议对柱取风振响应系数 $b'_z = 1 + 0.36 = 1.36$ ；其余构件取风振响应系数 $b'_z = 1.2$ 。

另外，从表 1 中可以看出，珠海市的风速频率小于结构体系的自振频率(即风荷载的振动主周期大于结构体系的自振周期) 这表明结构体系在风荷载作用下不会发生共振，其响应应为限幅随机振动。

4 结构地震反应分析

地震也是索—拱杂交结构体系的另外一种重要的荷载作用，建造在地震区的结构按照我国《建筑抗震设计规范》(GBJ11-89)必须进行抗震设计。索—拱杂交结构体系属频谱密集型结构，并且风雨球场结构跨度为 70m，对于这样大跨度的索—拱杂交结构本文采用时程反应分析法进行结构地震反应分析，考虑结构的非线性特性，从而准确地掌握结构的抗震性能。

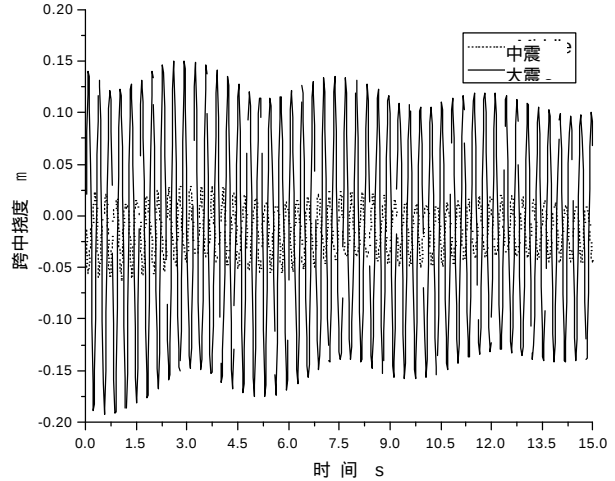


图 5 跨中挠度时程反应

Fig.5 Time-history response of deflection at the mid-span
时程反应分析法又称动态分析法，它是将地震波按时段数值化后，输入结构体系的振动微分方程，采用逐步积分法进行结构动力反应分析，分析中可以记入结构的非线性影响。对于索—拱杂交结构体系，在荷载作用下具有明显的非线性特征，所以要准确地分析这种结构的抗震性能，就必须采用

时程反应分析法。

我国《建筑抗震设计规范》采用的抗震设计方法为“三水准、两阶段”的设计方法。抗震设计的目标即“小震不坏、中震可修、大震不倒”，为了满足三水准要求，采用两阶段的设计方法，第一阶段要求结构满足第一水准的强度要求，然后分析结构变形，使其不超过规定限值，从而自动满足第二水准的变形要求；第二阶段分析大震作用下结构的变形，使其不超过规定限值，从而满足第三水准的防倒塌要求。对于风雨球场索—拱杂交结构，本文进行地震反应分析主要是为了检验结构在地震作用下的安全性，从而了解这种结构体系的抗震性能，根据珠海地区的抗震设防烈度，分别进行了结构在中震和大震作用下结构的动力反应，为了进行比较，地震作用下结构中一些主要构件的内力也一并进行了分析。在地震反应分析中，分析的是结构在自重和水平地震荷载组合作用下结构总的反应。

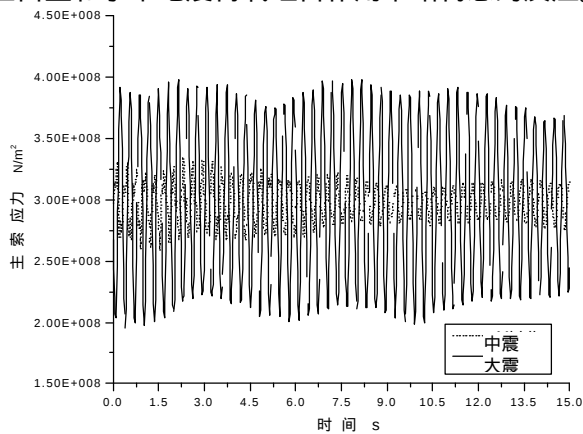


图 6 主索应力时程反应

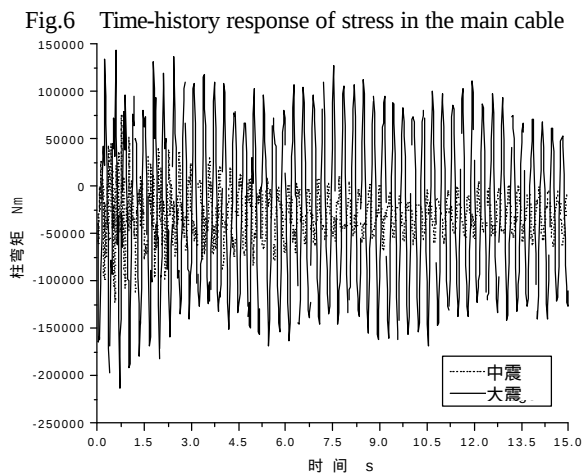


图 7 柱弯矩时程反应

Fig.7 Time-history response of moment in the column

选用 1940 年记录的 El-Centro(NS)地震波，将其峰值加速度调整到相当于珠海地区的抗震设防要求来进行结构的水平地震反应分析，分析中时间间隔取 $\Delta t = 0.02s$ ，波的持时取 15s。图 5、6、7、8 分别表示了结构自重和水平地震作用下，结构中跨中挠度、主索应力、柱中最大弯矩和斜撑杆应力的动力反应值。

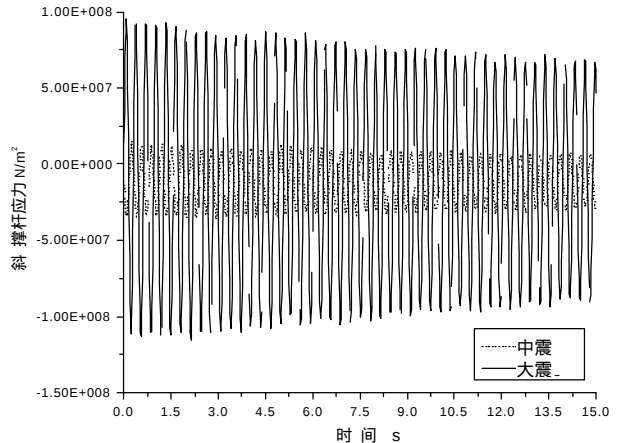


图 8 斜撑杆应力时程反应

Fig.8 Time-history response of stress in the inclined bar

从图 5-8 中可以看出：在中震和大震作用下，结构构件均未进入塑性阶段，也就是说，这种索—拱杂交结构体系，由于其结构自重比较轻，在地震荷载作用下，结构具有良好的抗震性能。另外从中震和大震的比较分析中可以发现，结构具有很强的非线性特征，而这种非线性主要是由于结构中索单元的非线性所引起，因此分析索—拱杂交结构体系必须考虑结构几何非线性的影响。

和风振反应分析相比较，索—拱杂交结构体系，相对于地震荷载，结构在风荷载作用下的响应更为重要，这也充分体现了这种结构属风敏感型结构的特点。所以对于索—拱杂交结构体系，进行结构动力反应，特别是结构的动力风振反应分析是非常重要的。

5 结论

本文通过对中山大学风雨球场索—拱杂交结构体系的动力反应分析得出以下认识：

- (1) 索—拱杂交结构体系的自振频率分布十分接近，呈密集型分布；
- (2) 索—拱杂交结构体系的风荷载脉动响应十分显著，设计时不容忽视；
- (3) 结构体系自振频率大于珠海市风速频率，结构不会发生共振；

(4) 索—拱杂交结构体系具有良好的抗震性能；

参考文献：

- [1] 沈世钊, 徐崇宝, 赵臣. 悬索结构设计[M]. 中国建筑工业出版社, 北京, 1997.
Shen Shizhao, Xu Chongbao, Zhao Chen. Design of suspension structures [M]. Beijing, China, 1997.

- [2] Ray W Clough, Joseph Penzien. Dynamics of structures [M]. New York, McGraw-Hill Book Co. Inc, 1993.

- [3] 张相庭. 结构风压和风振计算[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.

Zhang Xiangting. Structural wind pressure and wind-induced vibration [M]. Tongji University Press, Shanghai, China, 1985.

DYNAMIC ANALYSIS OF CABLE-TRUSS HYBRID STRUCTURES

WANG Hong , GUO Yan-lin , CUI Xiao-qiang

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper presents the dynamic analysis of a cable-truss hybrid structure by employing ANSYS, a finite element analysis package. The dynamic response of a typical cable-truss structure located in Zhuhai City is investigated. The importance of dynamic analysis for cable-truss hybrid structure is discussed. Results indicate that the natural frequencies of the structure concentrate in a small range. This is a very important characteristic of the structure. The wind induced vibration coefficient of the structure is determined, which is very helpful for structural design. It is shown that the wind-induced response is very important for the cable-truss hybrid structure. The seismic analysis is also carried out by step-by-step method in the time domain. The results indicate that the structure has good aseismic performance.

Key words: cable-truss hybrid structure; modal analysis; wind response analysis; seismic analysis