

文章编号:1671-6833(2004)01-0031-06

# 体育场大悬挑屋盖的振动特性及风振应用

齐 辉<sup>1</sup>, 黄本才<sup>1</sup>, 张 昕<sup>1</sup>, 林颖儒<sup>2</sup>, 徐晓明<sup>2</sup>

(1. 同济大学固体力学教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 上海建筑设计研究院, 上海 200041)

**摘 要:** 体育场大悬挑屋盖振动的频谱比较密集, 空间振型特性复杂, 工程中常采用的风激振动的振型分解法与屋盖的振型特性密切相关. 以上海 8 万人体育场环状屋盖结构和湖南益阳体育场单侧悬挑屋盖结构为背景, 分析得到它们振型特性的规律, 反对称振型和对称振型交替出现. 并以益阳体育场屋盖为例, 在频域内分析了多振型和振型动位移交叉项(或耦合项)对风振动位移响应的影响, 得出第一阶竖向对称振型对总响应影响大, 特别是在屋盖前缘中部, 考虑前 10 阶振型, 第 1 阶竖向对称振型对总位移的影响达 90%, 振型动位移交叉项可以忽略.

**关键词:** 大悬挑屋盖; 振型分析; 多振型; 振型动位移交叉项

**中图分类号:** TU 351; TU 311

**文献标识码:** A

## 0 引言

除一般用动力有限元方法分析体育场悬挑屋盖的自振频率和振型外, 对预应力拉索屋盖, 文献[1]提出了一个实用的简化方法计算非线性索结构的固有频率, 文献[2]从理论上研究用有限元法分析几何非线性结构的可靠性. 一般认为体育场悬挑屋盖空间振动的频谱比较密集、空间振型分布复杂[3].

本文以上海 8 万人体育场环状屋盖结构和湖南益阳体育场单侧悬挑屋盖结构为背景, 分析它们的频谱和振型特性的规律. 上海 8 万人体育场为环状悬挑屋盖结构, 无斜拉索, 屋盖为梁和杆组成的线性结构; 湖南益阳体育场为单侧悬挑屋盖结构, 屋盖为梁、杆和预应力斜拉索组成的几何非线性结构体系, 两者振型特性的规律具有代表性. 本文运用有限元软件 ANSYS, 给出了上海 8 万人体育场屋盖前 10 阶自振周期和前 4 阶振型, 及益阳体育场屋盖前 10 阶自振周期和前 3 阶振型, 并分析了其振型的分布规律.

关于悬挑屋盖的风激动力响应, 国内外进行了一些工作, 取得了一定的成果. 文献[4]进行了一个预应力张拉悬挑屋盖的风激动力响应实例分析, 文献[5]运用模态力法研究了大跨屋盖多阶风

振响应. 屋盖的风激动力响应与它的自振特性密切相关, 但到目前为止, 还没有看到针对体育场悬挑屋盖振型动位移交叉项(或耦合项)对风激动力响应影响的研究. 本文以益阳体育场屋盖为例, 运用振型分析法在频域内研究了多振型, 特别是振型动位移交叉项对风振动力响应的影响.

## 1 上海 8 万人体育场振型分析

上海 8 万人体育场为大悬挑环状屋盖结构, 外圈呈圆形, 最大直径约为 270 m, 采用挑篷体系. 与看台浇筑在一起的 32 根钢筋混凝土柱撑起 32 榀钢结构主桁架, 挑向体育场中心, 屋盖结构呈南北对称, 最大悬挑在西部屋盖, 达 73.5 m. 柱最高 52.4 m, 最低 26.9 m. 主桁架间有钢桁架圈梁相连, 整个屋盖为空间钢结构体系.

上海 8 万人体育场屋盖为梁和杆组成的线性结构, 结构计算模型见图 1. 运用有限元软件 ANSYS, 采用命令行方式建模, 整个屋盖模型结点 5 100 个, 单元 10 948 个, 其中 6 828 个三维梁单元(Beam4)组成 32 榀钢结构主桁架, 4 120 个三维杆单元(Link8)组成主桁架之间的圈梁和连杆.

对上海 8 万人体育场屋盖模型进行无阻尼自由振动分析, 前 10 阶自振周期列于表 1, 可见其频谱是很密集的.

**收稿日期:** 2003-09-20; **修订日期:** 2003-12-05

**基金项目:** 上海市建设技术发展基金资助项目(A9805132-1)

**作者简介:** 齐 辉(1979-), 男, 河南省南阳市人, 同济大学硕士研究生.

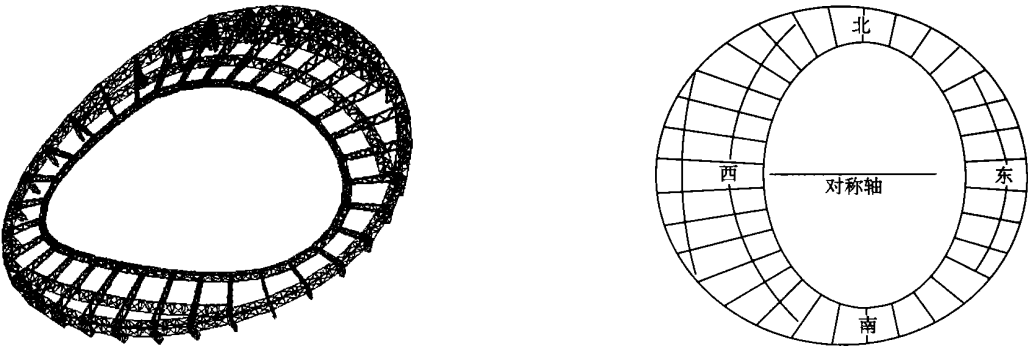


图 1 上海 8 万人体育场屋盖结构图  
Fig. 1 Roofing layout of Shanghai stadium

表 1 上海 8 万人体育场屋盖前 10 阶自振周期  
Tab. 1 Periods of the first ten modes of the roof of Shanghai stadium

序号	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶	9 阶	10 阶
$T_j$	0.728	0.538	0.530	0.430	0.429	0.400	0.371	0.353	0.338	0.334

由于篇幅所限,下面仅给出第 1 阶至第 4 阶振型分布图,见图 2.由图 2 看出,第 1 阶振型(图 2(a))沿对称轴呈反对称,西部桁架结构是竖向振型坐标值最大的位置,整个桁架结构有部分扭转振动;第 2 阶振型(图 2(b))为对称振动,基本上是西部桁架结构的竖向振动,而东部桁架基本保持不动;第 3 阶振型(图 2(c))为西部桁架结构并波及南北桁架结构的反对称振动,东部桁架结构也有微小的竖向振动;第 4 阶振型(图 2(d))为西部桁架结构的对称振动,西部桁架结构有两处结线,中部和两侧交替上下振动,其他桁架结构几乎不动.

此外,第 5 阶振型为西部桁架结构的反对称振动,东部桁架结构也有较小的反对称振动;第 6 阶振型主要为东部桁架结构并波及南北桁架结构的对称振动,西部桁架结构也有较小的对称振动;第 7 阶振型为西部连同南北桁架结构的反对称振动,西部的反对称振动也有两条结线,东部桁架结构几乎不动;第 8 阶振型主要为东部桁架结构的反对称振动,西部和南北桁架结构也有较小的竖向振动;第 9 阶振型为整个屋盖结构的反对称振动,东部桁架结构振型坐标值相对较大;第 10 阶振型为整个屋盖结构的对称振动,西部桁架结构有两条结线,且振型坐标值相对较大.

尽管此类环状体育场空间屋盖体系振型分布较为复杂,但由上述分析可以看出上海 8 万人体育场屋盖结构体系的振型分布还是相当有规律的,第 1 到第 5 振型和第 7 振型主要是屋盖悬挑

最大的西部桁架结构的反对称或对称振动,东部和南北桁架结构只有微小的振动;第 6 和第 8 振型主要为东部桁架结构的对称和反对称振型;第 9 振型和第 10 振型为整个屋盖结构的反对称和对称振型.对同一结构部位的振动,反对称振动形式在前,对称振动形式在后;对同一振动形式的局部振动,最先出现在悬挑最大的西部屋盖,随后才在东部屋盖出现.

2 湖南益阳体育场振型分析

湖南益阳体育场是湖南第九届全省运动会主体育场,南北长 205 m,东西宽 210 m.体育场屋盖南北对称,屋盖为单侧悬挑结构,最大悬挑 35.2 m.屋盖由梁、杆和斜拉索共同作用形成空间屋盖钢结构体系,见图 3.

湖南益阳体育场屋盖结构的数值模型见图 3.同样运用有限元软件 ANSYS,采用命令行方式建模,模型共有结点 1 748 个,单元 4 271 个,包括 3 种单元类型,其中 1 933 个三维梁单元(Beam4)组成屋面主体和六根柱子,屋盖圈梁和梁之间的连杆由 2 290 个三维杆(Link 8)单元组成,48 根斜拉索由 48 个索单元(Link 10)组成,斜拉索的预应力通过索单元(Link 10)的初始应变参数施加.益阳体育场屋盖属几何非线性结构体系.

先分析得到屋盖几何非线性模型在自重作用下的位移状态,再以此作为平衡状态进行振型分析.屋盖前 10 阶自振周期列于表 2,前 3 阶振型见图 4.

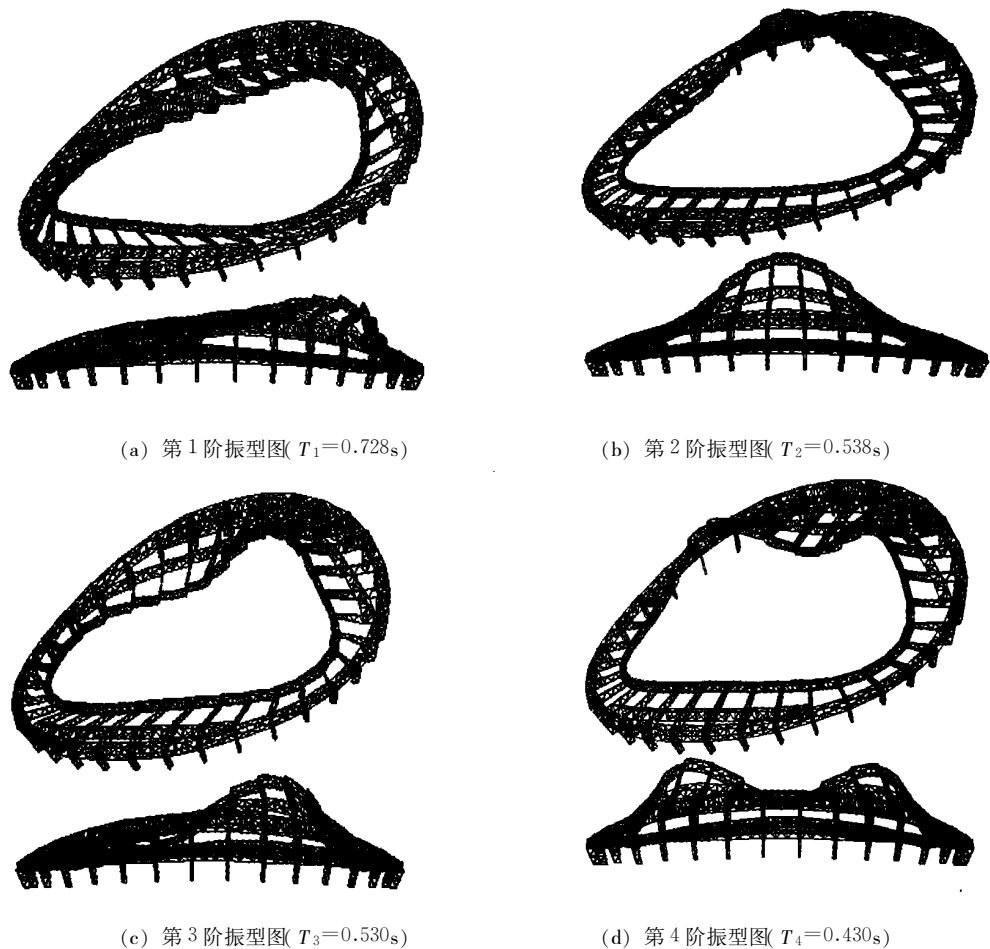


图 2 上海 8 万人体育场屋盖第 1 阶至第 4 阶振型  
Fig. 2 The 1<sup>st</sup> to 4<sup>th</sup> modal shape of the roof of Shanghai stadium



图 3 益阳体育场屋盖结构和结点位置图  
Fig. 3 Roofing layout of Yiyang stadium and sketch of nodal points

表 2 益阳体育场屋盖前 10 阶自振周期

Tab. 2 Periods of the first ten modes of the roof of Yiyang stadium

序号	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶	9 阶	10 阶
$T_j$	0.717	0.715	0.552	0.542	0.541	0.511	0.483	0.478	0.455	0.436

从表 2 看出, 益阳体育场屋盖的前 10 阶自振周期从 0.717s 到 0.436s, 振动频谱结构比上海 8 万人体育场更加密集, 第 1 阶振型(图 4(a))为沿

屋盖对称轴的反对称振动, 有比较大的水平振动, 主要是因为屋盖沿展向两端端部没有约束; 第 2 阶振型(图 4(b))为对称竖向振动, 在屋盖对称轴

处和沿屋盖展向两边端部的竖向振动显著;第 3 阶振型(图 4(c))为反对称竖向振动;第 4 阶为沿屋盖悬挑方向的竖向对称振动;第 5 阶和第 7 阶为竖向反对称振动;第 6 阶和第 8 阶为竖向对称振动;第 9 阶和第 10 阶分别为屋盖两个前缘角部的竖向反对称和对称振动.高阶振型的形状更加复杂,但振型的总体规律还是反对称振型、对称振型交替出现.

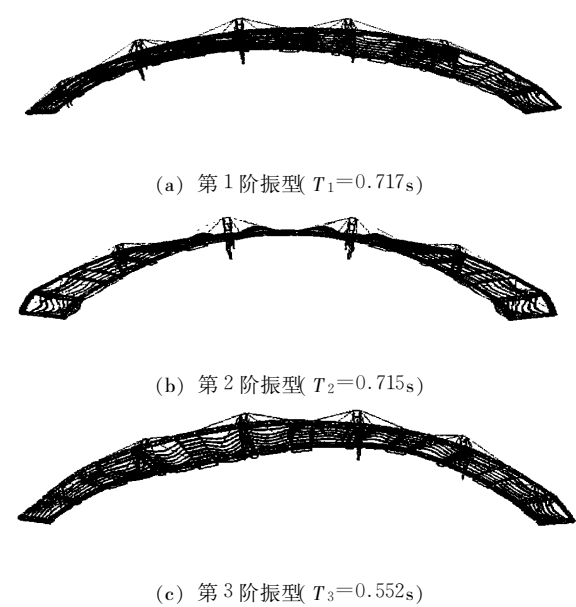


图 4 益阳体育场屋盖第 1 阶至第 3 阶振型  
Fig.4 The 1<sup>st</sup> to 3<sup>d</sup> modal shape of the roof of Yiyang stadium

3 益阳体育场屋盖考虑多振型和振型交叉项的风振动力响应

随机振动<sup>[9]</sup>和风工程<sup>[7,9]</sup>中,在小阻尼和频率稀疏的条件下,一般都忽略振型响应的交叉项

(或耦合项)的影响.由于体育场悬挑屋盖频谱密集,在这里我们考虑了多振型和振型动位移响应的交叉项,并分析了多振型和振型动位移响应的交叉项对风激动力响应的影响.由于篇幅的关系,本文略去了一些公式和详细计算过程<sup>[9]</sup>,主要给出有关的结果.

益阳体育场风洞试验是在中国船舶科学研究中心低速风洞实验室进行的.以风洞试验测得的 90°风向脉动风压为基础,利用 Matlab 信号处理工具箱<sup>[10]</sup>,得到益阳体育场屋盖前 10 阶竖向振动的广义力谱(或模态力谱),按随机振动的原理和方法,进而可得到前十阶竖向振动的振型位移谱,竖向振型位移谱包括自谱和互谱,由振型位移自谱可得到自谱动位移根方差,由振型位移互谱可得到互谱动位移均方值,互谱动位移均方值即为振型动位移交叉项(或耦合项).由自谱动位移根方差和互谱动位移均方值最终可得到结点竖向几何动位移响应.需要说明的是,互谱为复函数,但可以证明模态位移互谱虚部对动位移响应无影响,只需要考虑模态位移互谱的实部.

几何动位移响应与结点的振型坐标有关,所选的六个结点的位置见图 3,其中 3 个结点位于屋盖前缘,结点号和对应的结点坐标(单位:m)分别为 115(-72, 48, 29), 213(-39, 34, 37)和 311(-4, 28, 40),另外 3 个结点位于屋盖对称轴附近,结点号和对应的结点坐标(单位:m)分别为点 295(-4, -1, 32), 301(-4, 10, 35)和 307(-4, 22, 38).这里只给出了这 6 个有代表性的结点的竖向动位移根方差.每个点的结果分为考虑前一阶振型,前两阶振型直到考虑前 10 阶振型 10 种工况,每种工况包括考虑振型动位移交叉项和忽略交叉项的影响,结果见表 3 和表 4.

表 3 90°风向屋盖前缘结点竖向动位移根方差  
Tab.3 Root mean square values of the vertical dynamic displacement of the angle 90°wind direction of nodal points at the front edge of the roof

		mm									
结点号	项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
115	多振型	1.72	1.80	1.80	3.83	3.89	7.52	7.54	7.54	7.54	7.56
	多振型及交叉项	1.72	1.81	1.81	3.84	3.78	8.13	8.08	8.08	8.07	8.08
213	多振型	1.76	13.60	13.70	13.92	13.93	14.09	14.09	14.47	14.47	14.47
	多振型及交叉项	1.76	13.57	13.57	13.85	13.84	13.98	13.98	14.32	14.31	14.32
311	多振型	0.18	22.41	22.41	22.44	22.44	22.45	22.45	22.95	22.95	22.95
	多振型及交叉项	0.18	22.40	22.39	22.40	22.40	22.37	22.37	23.37	23.37	23.39

表 4 90°风向屋盖对称轴附近处结点竖向动位移根方差

Tab .4 Root mean square values of the vertical dynamic displacement of the angle 90° wind direction of nodal points around the symmetric axis of the roof mm

结点号	项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
295	多振型	0.03	1.36	1.36	2.56	2.56	2.56	2.56	4.37	4.37	4.43
	多振型及交叉项	0.03	1.36	1.36	2.53	2.53	2.51	2.51	4.92	4.92	5.21
301	多振型	0.09	10.35	10.35	10.53	10.53	10.53	10.53	11.54	11.54	11.55
	多振型及交叉项	0.09	10.35	10.34	10.47	10.47	10.45	10.45	12.07	12.07	12.20
307	多振型	0.14	18.44	18.44	18.50	18.50	18.51	18.51	19.12	19.12	19.13
	多振型及交叉项	0.14	18.44	18.43	18.45	18.45	18.43	18.43	19.58	19.58	19.62

由表 3 和表 4 可以看出,第 1 阶振型产生的竖向动位移很小,因为第 1 阶振型是反对称振动,振型水平坐标值较大,但竖向振型坐标值较小;第 2 阶振型,也即沿悬挑方向竖向一波对称振动,对屋盖动位移影响最大,特别是靠屋盖前缘中部更大,例如点 311,301,307 和 213,考虑前 10 阶后,第 2 阶振型对总动位移的影响达到 90%,可认为屋盖前缘和屋盖中部的较大区域,可只考虑沿悬挑方向的竖向一波振型.而在屋盖两端(点 115)和靠后缘(点 295)的一小部分区域,高阶振型有一定影响.点 115 考虑前 10 阶振型比考虑前 6 阶只增大 0.5%,点 295 考虑前 10 阶振型比前 6 阶增大了 40%,但其总位移仅增大了 1.9 mm,可以认为在 90°风向下,益阳体育场屋盖考虑前 6 阶振型即可.由于屋盖两端和靠后缘动位移较小,从结构设计的角度看,甚至可以只考虑第 2 阶振型产生的动位移.

从上述两表还可以看出,在 90°风向下,考虑前 6 阶振型动位移交叉项后,大多使屋盖的动位移减小,其原因是振型几何位移交叉项的均方值可为负值引起的.总的来说,高阶振型交叉项对总动位移的影响不大,例如点 311 考虑第 1 阶到第 7 阶的振型动位移交叉项后都使动位移减少,而考虑与第 8~10 高阶振型相关的动位移交叉项后将使总动位移增大,但增大不超过总动位移的 2%.点 307 和 301 考虑前 10 阶振型间的交叉项后分别增大 3%和 6%,点 295 考虑前 10 阶振型间的交叉项后增大 17%,但总位移仅增大 0.8 mm.

4 结论

(1) 体育场悬挑屋盖的振动频谱结构比较密集,空间振型特性复杂,但总的来说,对上海 8 万人体育场和湖南益阳体育场悬挑屋盖,整体振动

是反对称振型、对称振型交替出现.

(2) 本文分析了益阳体育场屋盖 90°风向下前 10 阶振型的风激竖向动力响应,其前 6 阶振型的影响较大一些.益阳体育场屋盖的第 2 阶竖向对称一波振动振型对动力响应影响最大,从工程设计角度出发,仅考虑该竖向对称一波振动振型可满足设计的需要,这一结论可能对一般体育场单侧悬挑屋盖是适用的,但还需要做更多的工作.

(3) 振型动位移的交叉项可使总几何动位移增加或减少.由益阳体育场屋盖 90°风向分析结果看出,低阶振型动位移交叉项大多使屋盖动位移稍有减少,考虑高阶振型交叉项稍有增大,振型动位移交叉项对屋盖总的竖向几何动位移的影响很小.

参考文献:

[ 1 ] KWAN ASK . A simple technique for calculating natural frequencies of geometrically nonlinear prestressed cable structures [ J ] .Computers and Structures , 2000, 74: 41 ~ 50.

[ 2 ] IMAI A K, FRANGOPOLB DM . Geometrically nonlinear finite element reliability analysis of structural systems I : theory [ J ] .Computers and Structures , 2000, 77: 677 ~ 691.

[ 3 ] 林颖儒,徐晓明,黄本才,等.上海虹口足球场大悬挑钢屋盖结构自振特性和风振动力响应分析[ J ] .空间结构, 2001,( 7 ) :12~17.

[ 4 ] BORRI C, MAJOWECKI M, SHINELLI P . Wind response of a large tensile structure : the new roof of the Olympic stadium in Rome [ J ] Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , 1992,( 41~44 ) :1435 ~1446.

[ 5 ] 楼文娟,庞振钱,孙炳楠.模态力法确定大跨屋盖风振响应及风振系数[ A ] .中国风工程学会.工程及

[ 6 ] 工业空气动力学学术会议论文集 C] ·北京:中国风工程学会,2002. 196~200.

[ 7 ] 星谷胜. 随机振动分析[ M] ·北京:地震出版社, 1977. 108~132.

[ 8 ] 埃米尔·希缪, 罗伯特·H·斯坎伦·风对结构的作用 [ M] ·刘尚培, 译·上海:同济大学出版社,1992. 138~150.

[ 9 ] 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. 115~137.

[ 10 ] 齐 辉·体育场大悬挑屋盖线性与非线性风振响应研究[ D] ·上海:同济大学,2004. 7~25.

[ 11 ] 陈亚勇·MATLAB 信号处理详解[ M] ·北京:人民邮电出版社,2001. 131~168.

Characteristic of Vibration and Application of Wind Induced Vibration of Large Cantilevered Roof of Stadium

QI Hui<sup>1</sup>, HUANG Ben -cai<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, LIN Ying -ru<sup>2</sup>, XU Xiao -ming<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>·Key Laboratory of Solid Mechanics of MOE, Tongji University, Shanghai 200092,China ;<sup>2</sup>Shanghai Institute of Architectural Design and Research , Shanghai 200041,China)

**Abstract :** The frequencies of large cantilevered roofs of stadiums are quite close and the characteristics of spatial modes are complex . The mode superposition method used in the analysis of wind induced vibration in engineering has great correlation to the modal characteristics of roofs . In the paper we present the modal characteristics of the two different roofs ; one is the circular roof of Shanghai Stadium and the other is the single -sided cantilevered roof of Yiyang Stadium in Hunan province , and draw out the antisymmetric model shape and symmetric model shape appear alternately . In frequency domain we study the effect of the multi -mode and the cross part (or coupling term) of mode dynamic displacements on the wind induced response of the roof of Yiyang Stadium . We can conclude that the first vertical symmetric modal shape has much effect on the total response and the cross part of mode dynamic displacements can be neglected .

**Key words :** large cantilevered roof ; mode analysis ; multi -mode ; cross part of mode dynamic displacement