

斜拉网格结构的风振响应分析

吴建华¹,梁 佶²,岑 伟³

(1. 浙江科技学院 建筑工程学院,杭州 310023;2. 云南省城乡规划设计研究院,昆明 650228;
3. 中南大学 土木系,长沙 410083)

摘 要: 在简要介绍脉动风荷载的生成及拉索的多单元有限元模型的基础上,采用随机振动的动力时程法计算某斜拉网格结构的风振响应,并进行了参数分析。计算结果表明,与无拉索的网格结构相比,斜拉网格结构的脉动响应较小。在斜拉网格中考虑拉索本身风振与不考虑拉索本身风振,结构的风振响应差别较小。拉索的脉动响应主要与其所处的位置有关。

关键词: 斜拉网格结构;脉动风;多单元;风振响应

中图分类号: TU311.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-8798(2006)01-0035-04

Wind-Excited Vibration of the Cable-Stayed Spatial Latticed Structure

WU Jian-hua¹, LIANG Ji², CEN Wei³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;
2. Urban Rural Planning and Design Institute of Yunnan, Kunming 650228, China;3. Department of
Civil Engineering, Zhongnan University, Changsha 410083, China)

Abstract: The random wind and multi-element model of the cable were introduced. The wind-excited vibration of the cable-stayed spatial latticed structure was analyzed by the method of dynamic time-history, and effects of parameters were discussed. The numerical results showed that the wind-excited response of the cable-stayed spatial latticed structure is smaller than that of the spatial latticed structure, and the wind-excited vibration of cables has a little influence on the structure. The response of the cable depends on its position.

Key words: cable-stayed spatial latticed structure; random wind; multi-element model; wind-excited vibration

斜拉网格结构是斜拉结构的一个分支,它是塔柱、网格结构和斜拉索协同工作的一种空间组合结构。它的工作机理是利用斜拉索作为网格结构的弹性支承点,以减小网格结构构件的内力。

收稿日期: 2005-08-01

基金项目: 浙江省教育厅科研基金资助项目(20010438)

作者简介: 吴建华(1964—)男,浙江义乌人,副教授,国家一级注册结构工程师,主要从事结构加固设计、钢结构和力学等方面的教学与研究。

斜拉网格结构已有广泛的应用,在静力和抗震等研究方面,许多学者已做了不少工作^[1-3],但在结构风振方面的研究还不多,而且没有考虑拉索本身风振的影响^[4-6]。本文在多单元法^[7,8]分析单索的基础上,对斜拉网格结构进行了风振响应研究,探讨了竖向风作用和考虑拉索的风振作用对结构风振响应的影响。

1 风荷载的表达

风荷载由伯努利方程导出,对于结构中任意一个节点 i 有:

$$P = \frac{1}{2} \mu_s \rho A V_{ij}^2 \quad (1)$$

式(1)中: μ_s 为 i 点的体型系数, ρ 是空气密度, A 为节点的相关面积, V_{ij} 为 i 点的风速,此风速考虑了 i, j 两点空间相关性,通常假设为 $V_{ij} = \bar{v}$ (平均风) + v (脉动风)。其中,平均风的高度变化规律用对数关系式表达^[9],而脉动风考虑空间相关性,通过互谱函数用 AR 方法^[10-12] 计算模拟而得。

对于两个点 i, j 之间风速互谱密度的实数部分可以用下式表达出来^[9]:

$$s_{ij}^u(n) = \sqrt{s_u^u(n) s_u^j(n)} \cdot \text{coh}(i, j, n) \quad (2)$$

式(2)中: $s_u^u(n)$ 和 $s_u^j(n)$ 为风速自谱密度函数, $\text{coh}(i, j, n)$ 为相干函数,且

$\text{coh}(i, j, n) =$

$$\exp \left\{ \frac{-2n[36(x_i - x_j)^2 + 256(y_i - y_j)^2 + 100(z_i - z_j)^2]^{1/2}}{(\bar{v}_i + \bar{v}_j)} \right\} \quad (3)$$

取自回归阶数 4, 时间步长 0.1 s, 总时间步 1 024 步,按 B 类地貌,空气密度 $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$, 水平风采用沿着高度变化的 Kaimal 谱,地面粗糙长度为 0.2; 竖向风采用 Panofsky 谱,地面粗糙度系数为 0.037 5,求得 10 m 高度处,单点脉动风的模拟值如图 1 ~ 4 及表 1 所示。

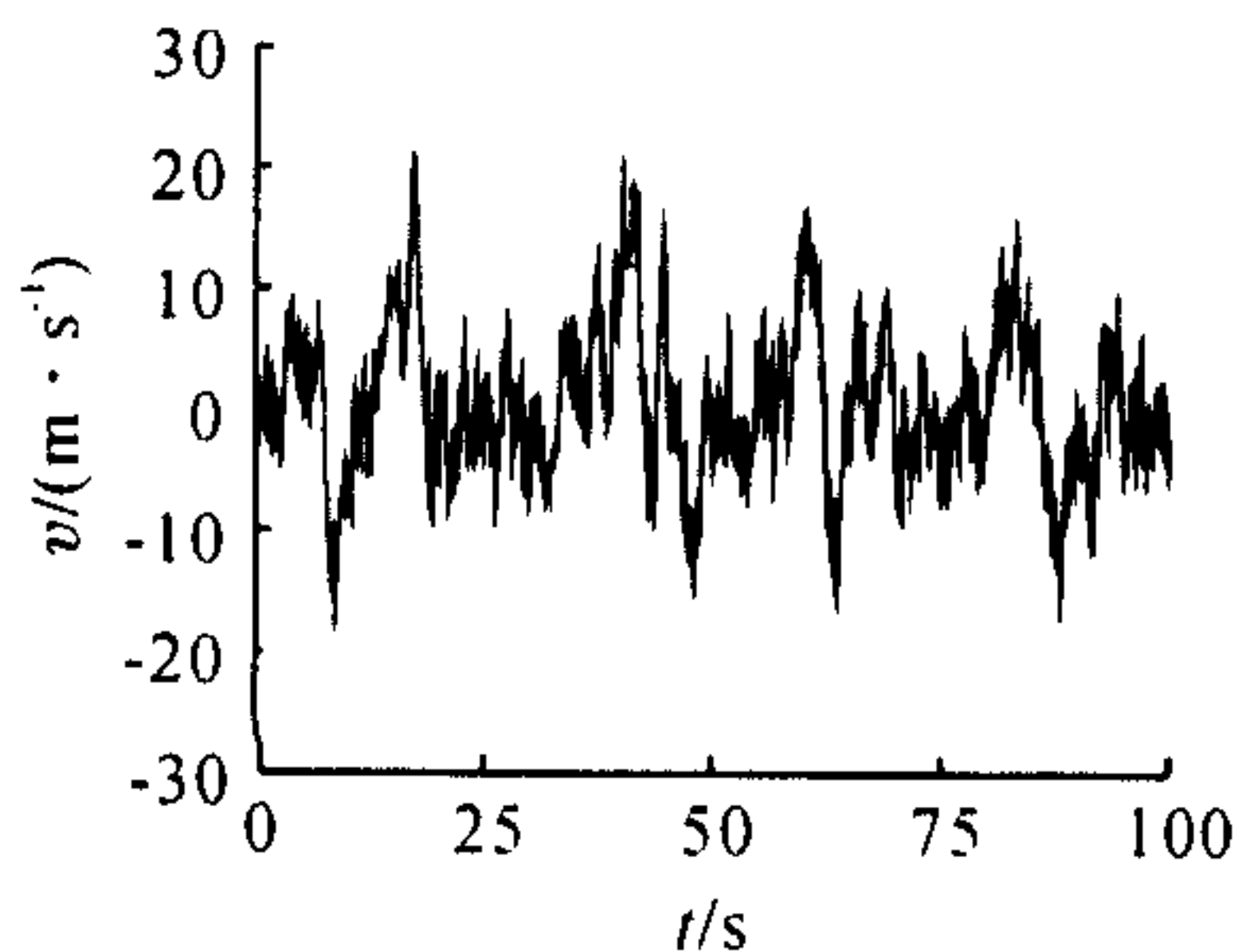


图 1 水平脉动风速时程

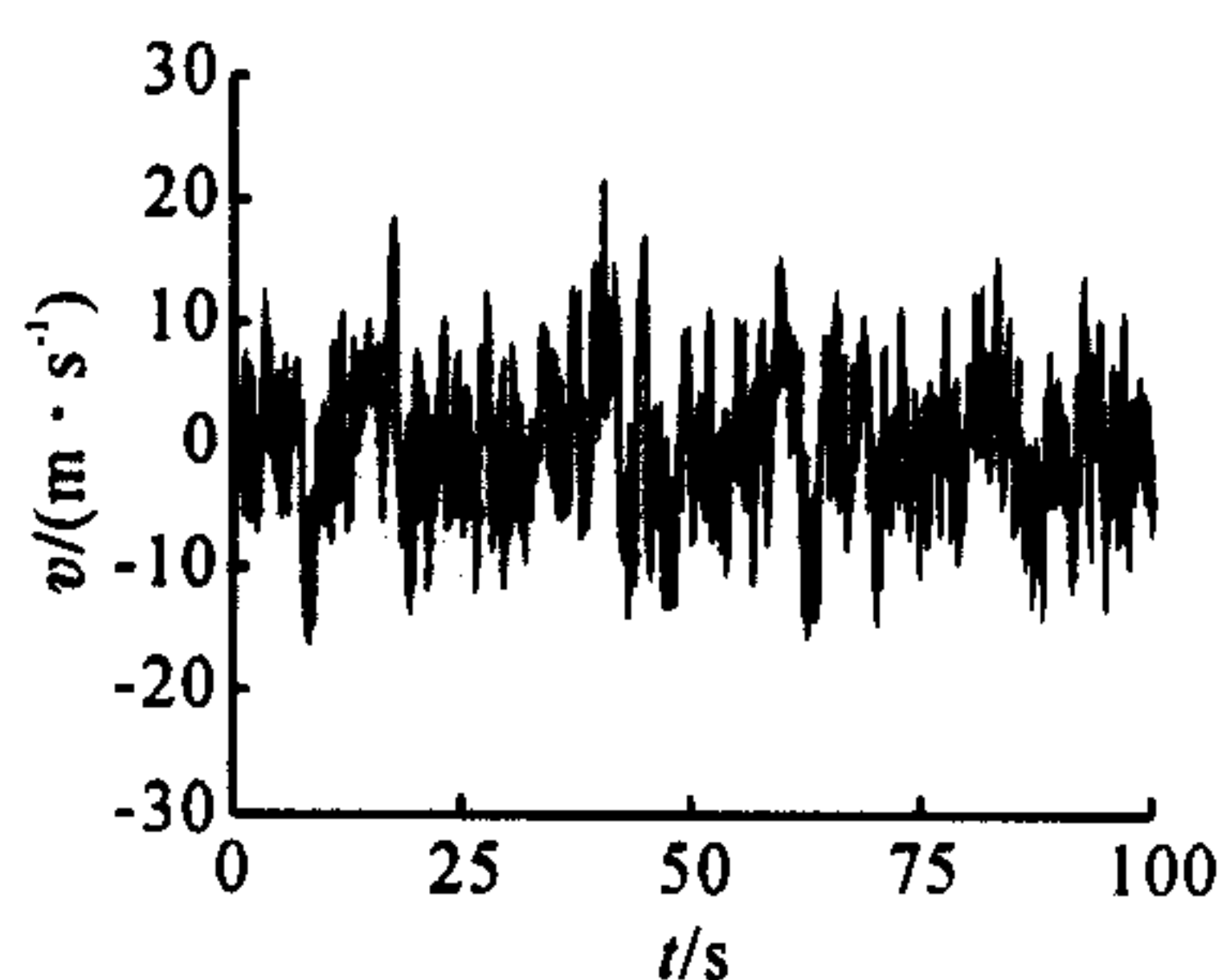


图 2 竖向脉动模拟风速时程

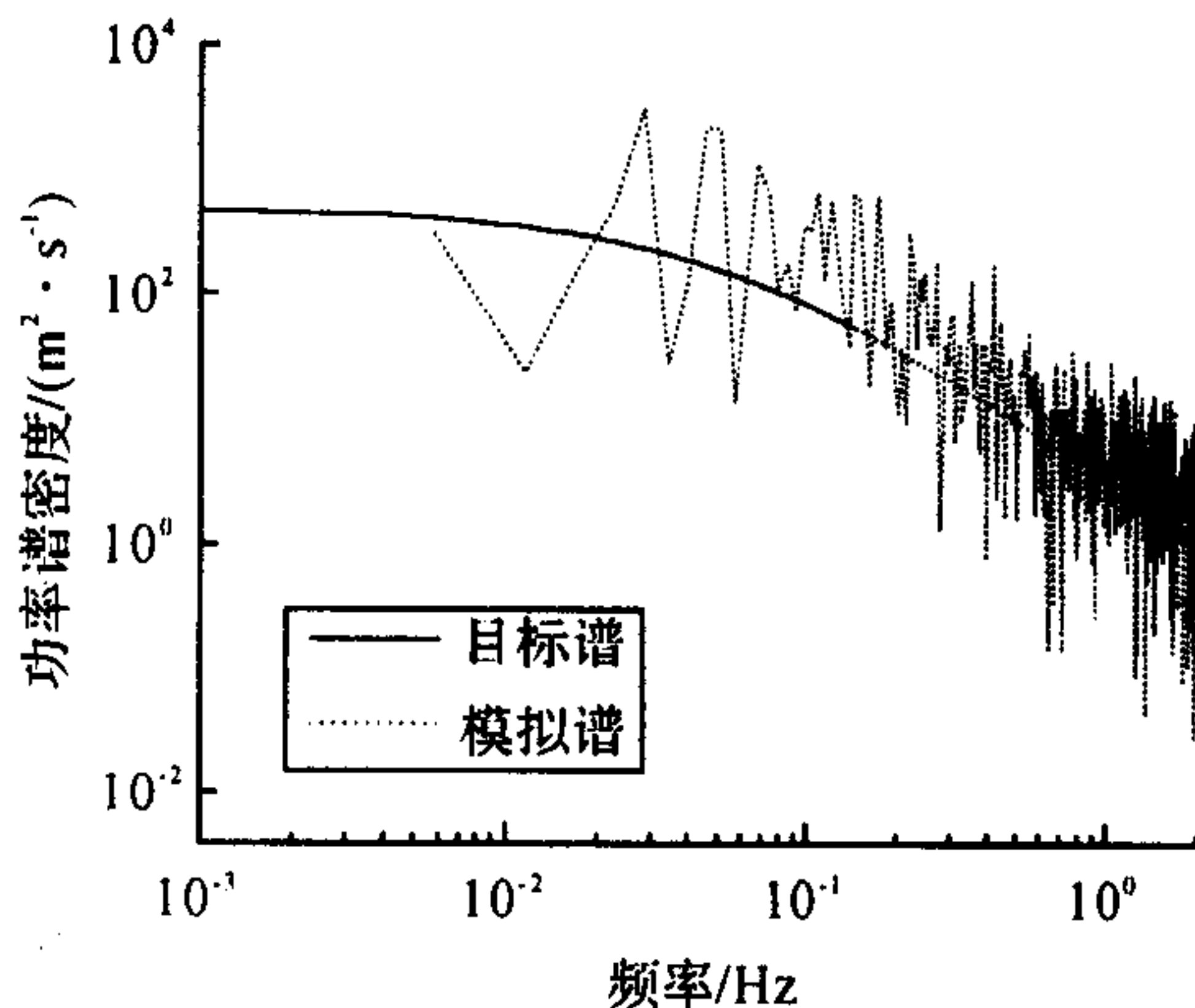


图 3 水平脉动风速模拟谱和目标谱

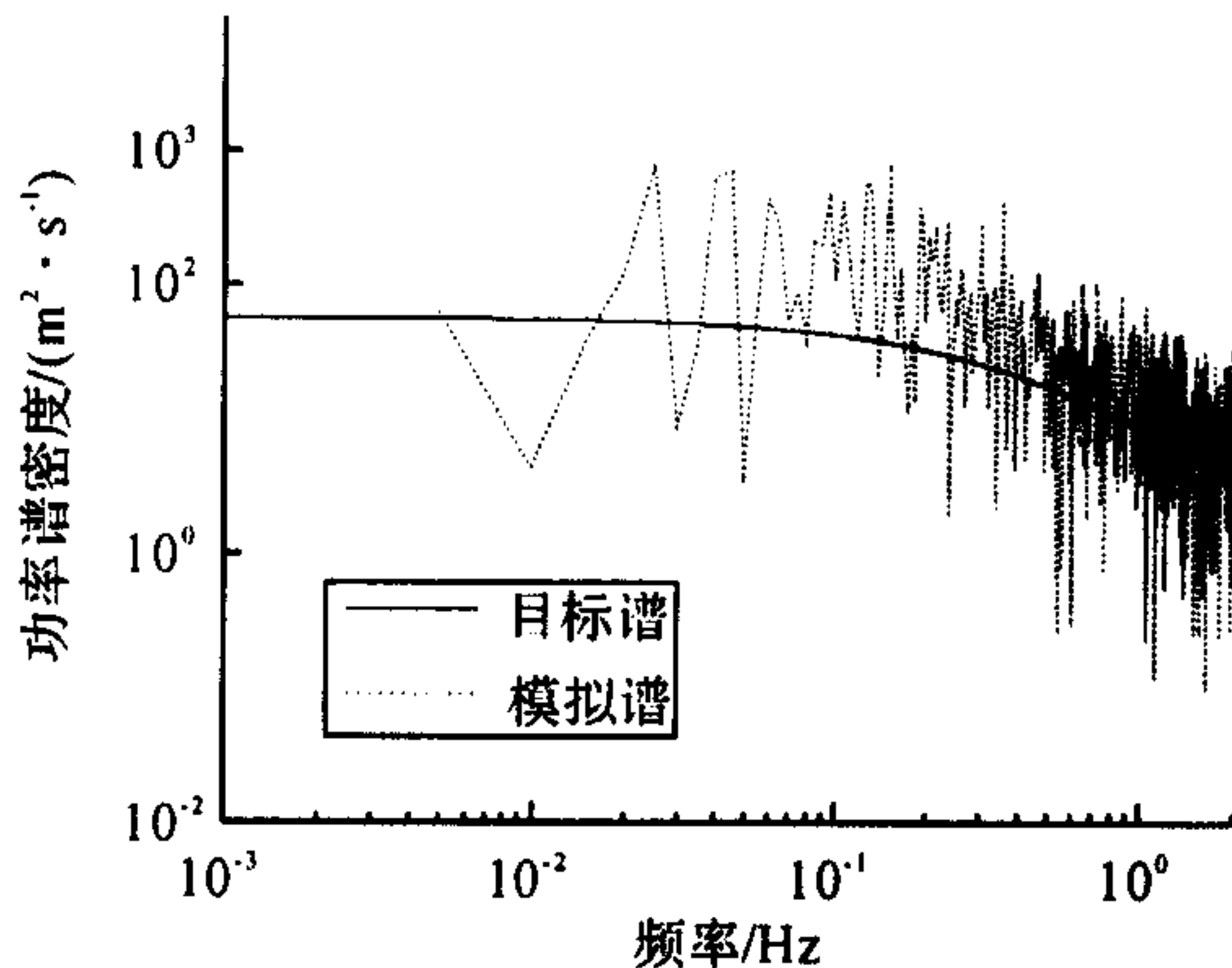


图 4 竖向脉动风速模拟谱和目标谱

表 1 模拟脉动风速时程统计数据

工况	目标风速		模拟风速	
	均值	均方差	样本均值	样本均方差
水平脉动风	0.00	5.966 1	0.211 4	6.170 6
竖直脉动风	0.00	5.728 0	0.246 6	5.977 7

2 斜拉网格结构的风振分析

本文采用多单元法分析拉索,用多段直线杆单元和抗弯刚度很小的梁单元来模拟曲线索。通过 AR 法模拟各点风速,对如图 5 所示斜拉网格结构进行风振响应分析。其中水平风的基本风速为 25 m/s,风向如图 5(a) 所示,即沿负 y 方向,索和结构各部分的体型系数参照规范取值;竖向风静风载近似取水平风的 0.18 倍。

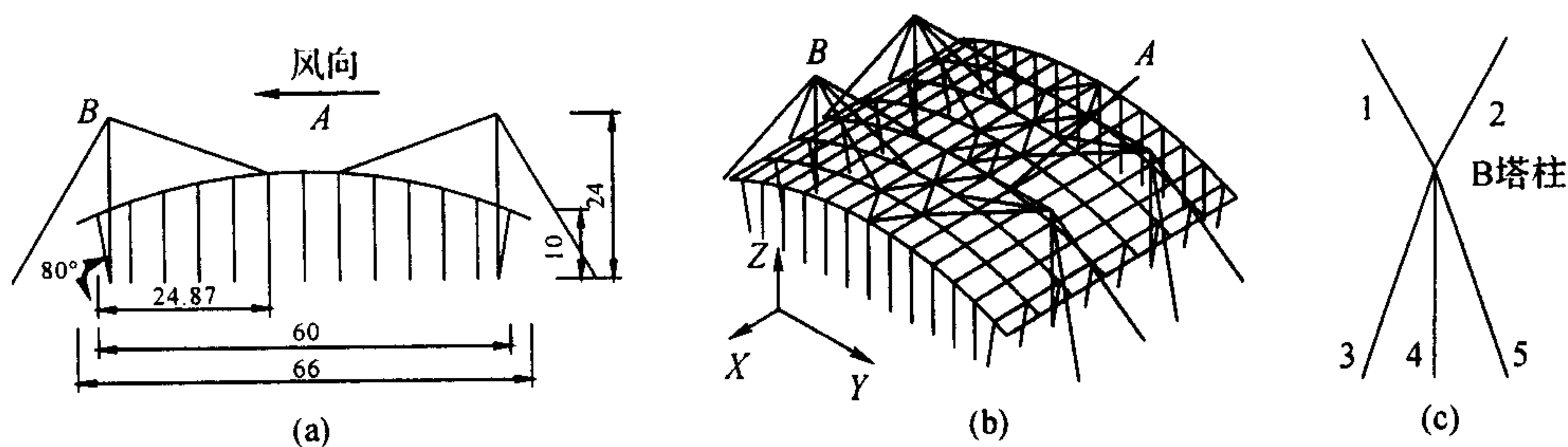


图 5 斜拉网格结构

结构的基本参数为:跨度 60 m, 横向长度 56 m, 塔柱高 24 m, 矢跨比 1/10。网格构件为工字钢, 跨度方向主梁截面为 800 mm×250 mm×25 mm, 拉索位置的横向次梁为 300 mm×300 mm×15 mm, 其余横向次梁为 200 mm×200 mm×10 mm, 柱距 8 m, 柱高 10 m, 截面为 600 mm×20 mm 圆钢管, 与地面夹角 80°。塔柱截面为 800 mm×20 mm 圆钢管。拉索的布置如图 5(a), 5(c) 所示, 拉索预应力统一施加 0.4% 的初应变。

结构分别在水平风载和水平加竖向风载作用时, A 点和 B 点处柱顶及拉索响应的均值和方差的计算结果见表 2、3。其中, 以结构在自重作用下的平衡状态为初态, 在不考虑索风振时, 斜拉网格结构的

拉索用单根拉杆等代; 考虑索风振时, 斜拉网格结构的拉索用多单元法模拟(20 个杆单元)。

表 2 无拉索网格与斜拉网格结构风振响应的均值 \bar{x} 和方差 σ

结构响应位置	B 点水平位移 /mm		A 点竖向位移 /mm		
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	
水平风	无拉索网格	0.00	0.00	126.46	31.57
	斜拉网格	10.31	2.07	87.29	24.17
	斜拉网格 (考虑索风振)	10.28	2.06	87.344	24.16
水平风 + 竖向风	无拉索网格	0.00	0.00	164.14	46.37
	斜拉网格	10.58	2.77	113.31	34.12
	斜拉网格 (考虑索风振)	10.59	2.76	113.37	34.11

表 3 B 塔柱处 5 根拉索轴力风振响应的均值 \bar{x} 和 σ 方差

工况		1 号索 /kN		2 号索 /kN		3 号索 /kN		4 号索 /kN		5 号索 /kN	
		\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
水平风	不考虑索风振	880.09	25.06	961.63	12.46	410.21	4.00	264.07	12.77	326.24	11.06
	考虑索风振	880.04	25.04	961.58	12.46	410.37	4.01	264.37	12.74	326.4	11.06
水平风+ 竖向风	不考虑索风振	852.77	35.51	947.78	18.04	412.6	5.85	250.23	18.87	314.78	16.14
	考虑索风振	852.74	35.49	947.73	18.03	412.74	5.85	250.56	18.82	314.93	16.13

注: 索的最大风振位移响应, 1、2、3 号索在其与网格连接处, 4、5 号索在柱顶。

由表 2、3 可以得到以下结论:

(1) 在结构中, 网格部分的脉动响应较显著, 而塔柱和拉索的脉动响应不显著。与无拉索的网格结构相比, 斜拉网格结构的脉动位移响应减小。A 点在斜拉网格中的脉动响应, 比在无拉索网格中的脉动响应减少了约 1/3。

(2) 拉索的风振对斜拉网格结构的风振响应影

响不显著, 其对均值和方差的影响程度不超过 0.8%。拉索的脉动响应与位置有关, 如 3 号索由于距边柱较近, 脉动响应较小。

为了深入探讨斜拉网格结构的风振特性, 在考虑水平与竖向风力共同作用的情况下, 对结构风振响应作参数分析。以下仅通过改变斜拉索的初应变(即改变其预应力水平)对结构进行分析, 结果如表 4、5 所示。

表 4 索初应变与风振位移响应的均值 \bar{x} 和方差 σ

索初应变 /%	B 点位移 /mm 不考虑索风振		B 点位移 /mm 考虑索风振		A 点位移 /mm 不考虑索风振		A 点位移 /mm 考虑索风振	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
2	18.01	3.40	17.97	3.39	115.51	33.01	115.65	33.03
3	13.86	2.89	13.86	2.88	114.30	33.32	114.33	33.31
4	10.58	2.87	10.59	2.86	113.31	34.12	113.37	34.11
5	8.17	2.77	8.18	2.76	112.13	35.33	112.10	35.31

表 5 索初应变与 5 根拉索轴风振力响应的均值 \bar{x} 和方差 σ

索初应变 %		1 号索 /kN		2 号索 /kN		3 号索 /kN		4 号索 /kN		5 号索 /kN	
		\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
2	不考虑索风振	444.50	34.75	482.69	18.15	205.66	5.66	133.68	19.10	166.56	15.81
	考虑索风振	444.80	34.60	482.94	18.08	205.77	5.53	134.45	18.71	166.71	15.81
3	不考虑索风振	647.97	34.87	714.99	18.05	309.25	5.71	191.70	18.93	240.43	15.85
	考虑索风振	647.85	34.82	714.94	18.02	309.41	5.68	192.10	18.82	240.53	15.85
4	不考虑索风振	852.77	35.51	947.78	18.04	412.60	5.85	250.23	18.87	314.78	16.14
	考虑索风振	852.46	35.49	947.61	18.03	412.80	5.85	250.47	18.82	314.85	16.13
5	不考虑索风振	1058.88	36.60	1181.05	18.12	515.71	6.07	309.23	18.90	389.59	16.64
	考虑索风振	1058.43	36.58	1180.80	18.11	515.94	6.08	309.40	18.87	389.64	16.63

计算结果表明,拉索预应力提高后,网格部分的脉动响应有所增加,而塔柱和拉索的脉动响应则减小,而拉索的脉动响应主要与其位置有关。总体看拉索预应力对结构的脉动响应的影响不显著。其次,在不同的拉索预应力下,拉索风振对结构各部分风振响应的影响均很小。

3 结 论

(1) 在斜拉网格结构中,网格部分的脉动响应较显著;与无拉索的网格结构相比,斜拉网格结构的脉动响应较小。

(2) 在索的不同预应力水平下,考虑拉索风振与不考虑索风振,结构的风振响应差别较小。拉索的脉动响应主要与其所处的位置有关。

参考文献:

[1] 董石麟. 预应力大跨度空间钢结构的应用与展望[J]. 空间结构,2001,7(4):3-13.

[2] 黄炳生,吕志涛,黄林,等. 斜拉空间网格结构在我国的研究和应用[J]. 南京建筑工程学院学报,2000,53(2):59-63.

[3] 周岱,刘红玉,李春祥. 拉索-网壳结构的动力特性和非

线性动力反应[J]. 振动与冲击,2002,21(1):7-12.

[4] 周岱,舒新玲,周笠人. 大跨空间结构风振响应及其计算与试验方法[J]. 振动与冲击,2002,21(4):7-18.

[5] 黄本才,王国砚,林颖儒,等. 体育场屋盖结构静动力风荷载实用分析方法[J]. 空间结构,2000,6(3):33-39.

[6] 朱川海,黄本才,顾明. 基于 ANSYS 二次开发研究斜拉索挑篷结构的非线性风致响应[J]. 结构工程师,2002(4):40-47.

[7] BEN Kahla N. Dynamics of a single guy cable[J]. Computers and Structures, 1995,54(6):1197-1211.

[8] RAID Karoumi. Some modeling aspects in the nonlinear finite element analysis of cable supported bridges [J]. Computers and Structures,1999,71:397-412.

[9] SIMIU E,SCANLAN E H. Wind Effect on Structure [M]. New York:McGraw-Hill,1986.

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

[11] IANNUZZI A,SPINELLI P. Artificial Wind Generation and Structural Response[J]. Journal of Structural Engineering ASCE,1987,113(12):2382-2398.

[12] 王吉民,李琳. 脉动风的计算机模拟[J]. 浙江科技学院学报,2005,17(1):34-37.