

# 风速谱的分析研究 及风致响应的计算分析

薛松涛<sup>1, 2</sup> 钱宇音<sup>1</sup> 陈镭<sup>1</sup> 王远功<sup>1</sup>

(1. 同济大学工程力学与技术系和泉研究室, 上海 200092)

(2. 日本近畿大学理工学部建筑学科, 日本大阪)

**摘要** 本文对六种不同的风速谱图进行了分析比较, 提出了一些可供实际工程应用的建议。并且以上海电视塔为算例, 采用 Davenport 风速谱计算结构的风致响应, 并与采用沿高度变化的风速谱得出的结果进行了比较。

**关键词** 风速功率谱密度函数, 风致响应, 自由度, 振型

## 1 引言

风速功率谱密度 (power spectral density of the wind speed) 是进行结构风振计算的重要参数。风速谱的主要区别在于紊流尺度是否随高度变化。本文作出六种不同的风速谱图, 并进行分析比较。

## 2 风速谱图的绘制及分析比较

### 2.1 风速功率谱密度函数

加拿大著名风工程专家 Davenport 提出的经验风速谱其表达式为

$$S_v(n) = \frac{4k\bar{v}_{10}x^2}{n(1+x^2)^{4/3}} \quad \text{式中 } x = \frac{1200n}{\bar{v}_{10}} \quad (1)$$

$\bar{v}_{10}$  是高度 10 米处的平均风速,  $n$  为频率,  $k$  为地面粗糙度系数。

西安热工所自 1978 年起对我国南部风速进行了实测, 根据实测资料得到经验公式为

$$S_v(n) = \frac{1.611k\bar{v}_{10}^2}{n} \exp\left[-\frac{(\lg x - 0.6)^2}{0.5408}\right] \quad \text{式中 } x = \frac{1200n}{\bar{v}_{10}} \quad (2)$$

文献[2]是 1986 年实测上海地区台风的风速谱, 采用计算机拟合出的水平风速谱经验公式为:

$$S_v(n) = 5.46k \frac{\bar{v}_{10}^2}{n} \frac{x^{2.4}}{(1+1.5x^2)^{1.4}} \quad \text{式中 } x = \frac{1200n}{\bar{v}_{10}} \quad (3)$$

美国学者 E. Simiu 也提出了沿高度变化的风速谱<sup>[6]</sup>, 其分段函数表达式分成两个

薛松涛, 男, 1963.12 出生, 工学博士, 教授  
国家杰出青年科学基金资助 (批准号: 59925820)

$$\text{当 } x \leq 0.2 \text{ 时, } S_v(n, z) = 200k\bar{v}_{10}^2 \frac{x}{n(1+50x)^{\frac{5}{3}}}, \text{ 当 } x > 0.2 \text{ 时, } S_v(n, z) = 0.26k\bar{v}_{10}^2 \frac{1}{nx^{\frac{2}{3}}} \quad (4)$$

$$\text{式中 } x = \frac{nz}{\bar{v}}$$

文献[3]根据上海地区大风的实测资料, 提出沿高度变化的水平风速谱的经验公式为:

$$S_v(n, z) = \left(\frac{z}{10}\right)^{-0.5\alpha} \frac{4.8k\bar{v}_{10}^2 x}{n(2+x^2)^{\frac{7}{8}}} \quad \text{式中 } x = \frac{300n}{\bar{v}_{10}} z^\alpha \quad (5)$$

其中,  $\alpha$  表示地面粗糙度。

文献[4]提出沿高度变化的水平风速谱的经验公式为

$$S_v(n, z) = \left(\frac{z}{10}\right)^{-0.3\alpha} \frac{5.46k\bar{v}_{10}^2}{n} \frac{x^{2.4}}{(1+1.5x^2)^{1.4}} \quad \text{式中 } x = 630 \cdot \frac{n}{\bar{v}_{10}} \cdot z^\alpha \quad (6)$$

$z$  为离地面的高度,  $k$  为一种表达地面粗糙度的系数。

## 2.2 六种风速谱的比较

取  $\alpha=0.20$ , 分别在高度为 80m, 110m, 150m, 190m 处将六种风速谱绘制于图 1:

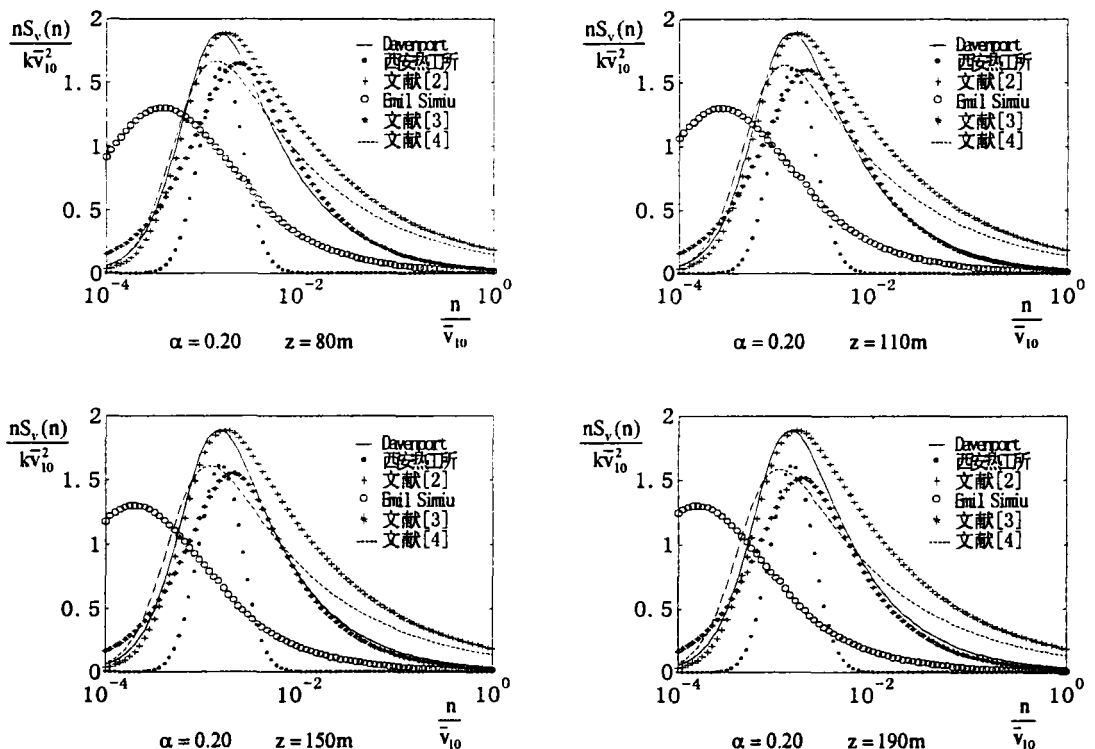


图 1  $\alpha=0.20$  时四种高度下的风速谱图

将六种风速谱的峰值和峰值出现处 ( $n/\bar{v}_{10}$ ) 列于表 1

表 1

$\alpha=0.20$		$z=80m$	$z=110m$	$z=150m$	$z=190m$
Davenport	谱的峰值	1.8898382	1.8898382	1.8898382	1.8898382
	峰值所在处	0.0014532	0.0014532	0.0014532	0.0014532
西安热工所	谱的峰值	1.6108542	1.6108542	1.6108542	1.6108542
	峰值所在处	0.0015078	0.0015078	0.0015078	0.0015078
文献[2]	谱的峰值	1.8902452	1.8902452	1.8902452	1.8902452
	峰值所在处	0.0016536	0.0016536	0.0016536	0.0016536
Emil Simiu	谱的峰值	1.3029070	1.3029091	1.3029028	1.3029147
	峰值所在处	0.0003777	0.0002709	0.0002017	0.0001586
文献[3]	谱的峰值	1.6539996	1.6021238	1.5532144	1.5169224
	峰值所在处	0.0022631	0.0021412	0.0019888	0.0019167
文献[4]	谱的峰值	1.6685564	1.6369505	1.6068000	1.5841284
	峰值所在处	0.0013251	0.0012308	0.0011645	0.0011018

可看出范存新修正的风速谱<sup>[4]</sup>和田浦等人得出的实测风速谱<sup>[3]</sup>都是随高度变化的风速谱，田浦风速谱<sup>[3]</sup>是实测得出，在 80 米处，两者峰值大小相差 0.8724%。

以田浦风速谱<sup>[3]</sup>为例，该谱是随高度变化的实测的曲线，该曲线在高度相差 110 米的情况下，峰值所在位置相差 8.288%，峰值大小相差 16.85%。（即 80 米和 190 米高度两者峰值作比较）。

再取  $\alpha=0.28$ ，分别在高度为 80m, 110m, 150m, 190m 处将六种风速谱绘制于图 2:

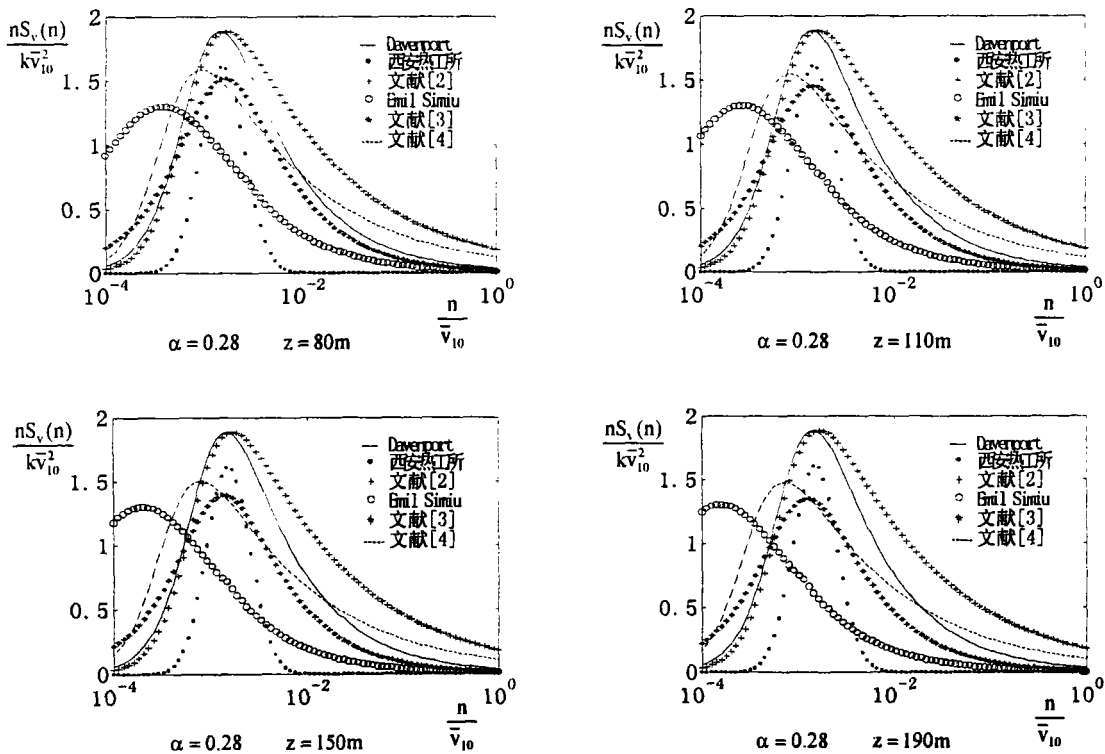


图 2  $\alpha=0.28$  时四种高度下的风速谱图

将六种风速谱的峰值和峰值出现处 ( $n/\bar{v}_{10}$ ) 列于表 2

表 2

$\alpha=0.28$		z=80m	z=110m	z=150m	z=190m
Davenport	谱的峰值	1.8898382	1.8898382	1.8898382	1.8898382
	峰值所在处	0.0014532	0.0014532	0.0014532	0.0014532
西安热工所	谱的峰值	1.6108542	1.6108542	1.6108542	1.6108542
	峰值所在处	0.0015078	0.0015078	0.0015078	0.0015078
文献[2]	谱的峰值	1.8902452	1.8902452	1.8902452	1.8902452
	峰值所在处	0.0016536	0.0016536	0.0016536	0.0016536
Emil Simiu	谱的峰值	1.3029070	1.3029091	1.3029028	1.3029147
	峰值所在处	0.0003777	0.0002709	0.0002017	0.0001586
文献[3]	谱的峰值	1.5219897	1.4556131	1.3937291	1.3484009
	峰值所在处	0.0015937	0.0014531	0.0013498	0.0012537
文献[4]	谱的峰值	1.5873286	1.5454336	1.5056719	1.4760757
	峰值所在处	0.0009331	0.0008509	0.0007759	0.0007341

Davenport 谱、石沅等人得出的实测风速谱<sup>[2]</sup>、田浦等人得出的实测风速谱<sup>[3]</sup>、范存新修正的风速谱<sup>[4]</sup>，从图 1 和图 2 中都可以看出这四条曲线比较吻合，而西安热工所和 E. simiu 的风速谱与以上四种风速谱的曲线相差较大，仅供使用时参考。

范存新修正的风速谱<sup>[4]</sup>和田浦等人得出的实测风速谱<sup>[3]</sup>都是随高度变化的风速谱，田浦风速谱<sup>[3]</sup>是实测得出，从图中可看出范存新风速谱<sup>[4]</sup>的曲线与田浦风速谱<sup>[3]</sup>的曲线吻合较好，在 80 米处，峰值大小相差 4.116%。

从图 1、图 2 中都可以看出，四张沿不同高度风速谱图差别并不明显。以田浦风速谱<sup>[3]</sup>为例，该谱的曲线是随高度变化的，且是实测得出，该曲线在高度相差 110 米的情况下（即 80 米高度和 190 米高度作比较），峰值所在处相差 11.41%。所以根据本文的比较分析认为风速谱随高度虽有一定变化但影响不大，在结构工程中高度为 200 米以下可以不考虑风速谱沿高度变化，而采用不随高度变化的风速谱。

Davenport 风速谱是不随高度变化的风速谱与不随高度变化且是实测得出的石沅风速谱的曲线吻合较好，峰值所在处相差 12.12%，峰值大小相差 0.02153%，相当接近，本文通过计算分析认为，Davenport 风速谱相对而言比较简单便于计算，故被许多国家的规范广泛采用。从图 1、图 2 中也可以看出 Davenport 风速谱的形状和分布规律比较合理。

### 3 风致响应的分析计算

以上海电视塔为例，根据折算刚度的变化，将结构质量集中于 23 个质点<sup>[5]</sup>。采用

$$\text{Davenport 风速谱 } S_v(n) = \frac{4k\bar{v}_{10}x^2}{n(1+x^2)^{4/3}}, \quad x = \frac{1200n}{\bar{v}_{10}} \quad \text{则} \quad \frac{S_v(z, n_1)}{\sigma_v^2(z)} = \frac{S_v(n_1)}{\int_0^\infty S_v(n)dn} \quad [1]=0.1228$$

得到脉动增大系数:  $\xi_1 = \sqrt{1 + \frac{S_v(z, n_1) \frac{\pi n_1}{6\zeta_1}}{\sigma_v^2(z)}} \quad [1] = \sqrt{1 + 0.1228 \frac{\pi \times 0.3718}{4 \times 0.015}} = 1.8412$

脉动影响系数:

$$u_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{\beta_i} \mu_{s_i} \mu_{z_i} l_{z_i} \Phi_{1i} \Delta H_i}{\sum_{i=1}^n M_i \Phi_{1i}^2} \eta_{z_1} \quad [1]$$

$$= (0.8445 \times 1.6536 \times 8.016 \times 0.002 \times 38 + 0.6559 \times 2.7415 \times 6.932 \times 0.074 \times 34 + 0.5860 \times 3.4345 \times 6.427 \times 0.095 \times 26 + 0.5487 \times 3.9178 \times 8.205 \times 0.176 \times 22 + 0.5156 \times 4.4368 \times 0.870 \times 0.361 \times 35.05 + 0.4880 \times 4.9520 \times 0.508 \times 0.754 \times 26.95) \times 0.7 \times 0.73 / (66 \times 0.00161304^2 + 43.5 \times 0.00544562^2 + \dots + 9 \times 0.81141^2 + 12 \times 1^2) = 2.7056$$

而  $\bar{w}_0 = \frac{\bar{v}_{10}^2}{1700} = \frac{8^2}{1700} = 0.03765 \text{KN} / \text{m}^2$

所以在 187.55 米处统计动位移  $y_{d,187.55} = \frac{\xi_1 u_1 \Phi_{1i} \bar{w}_0}{\omega_1^2} = \frac{1.8412 \times 2.7056 \times 1 \times 0.03765}{(6.28 \times 0.3718)^2} = 0.03440 \text{m}$

静位移  $y_{m,187.55} = \Phi_{1i} q_{m1} = \frac{u_{m1} \Phi_{1i} \bar{w}_0}{\omega_1^2} = \frac{6.6440 \times 1 \times 0.03765}{(6.28 \times 0.3718)^2} = 0.04588 \text{m} \quad [5]$

其中,  $y$  是表示顶点处的水平位移。

取保证系数  $\mu = 2.2$ , 相当于保证率为 0.98610, 此时在考虑保证率的情况下顶点的总位移计算值应为  $y_{187.55} = y_{m,187.55} + \mu \cdot y_{d,187.55} = 0.04588 + 2.2 \times 0.03440 = 0.1256 \text{m}$

本文采用 Davenport 谱计算出的顶点位移为 0.1256m, 与采用石沅风速谱<sup>[2]</sup>得到的结果 0.1686m<sup>[5]</sup>和采用范存新修正风速谱<sup>[4]</sup>得到的结果 0.1589m<sup>[4]</sup>相比较, 可以看出本文的结果偏小, 由此可知采用 Davenport 谱是偏安全的。

### 参 考 文 献

[1] 张相庭. 结构风压和风振计算. 同济大学出版社, 1985

[2] 石沅, 陆威, 钟严. 上海地区台风结构特征研究. 第二届全国结构风效应学术会议论文集, 1988

[3] 田浦等. 台风风谱的研究. 第二届全国结构风效应学术会议论文集, 1988

[4] 范存新. 电视塔结构风振和风振控制研究及凝汽器水室和整体的结构分析和计算. 同济大学硕士学位论文

[5] 张相庭. 在 8615 号台风下上海电视塔风致响应的分析研究. 第三届全国结构风效应学术会议论文集, 1989

[6] E. Simiu. Wind Spectra and Dynamic Alongwind Response A. S. C. E. Vol. 100, ST. 9, 1974