

脉动风的计算机模拟

王吉民¹, 李琳²

(1. 浙江科技学院 土木工程学系, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 采用线性滤波器法中的自回归模型, 模拟节点随机脉动风速时程, 运用 Matlab 编程有效地模拟具有时间相关性、空间相关性的脉动风速时程。通过对模拟所得的双坡屋面节点风速时程的统计分析, 显示了该算法具有较好的模拟精度和计算速度, 可满足工程应用的要求。

关键词: 随机模拟; 风速时程; AR 模型

中图分类号: TU312.1

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2005)01-0034-04

Digital simulation of turbulent wind field

WANG Ji-min¹, LI Lin²

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The method based on the application of linear filters to sequences of random numbers is used. Artificial wind time speed series with outstanding time and space correlativity are implemented by programming Matlab. Statistical analysis results of the double-slope roof structure show that AR model is efficient in simulating nodal wind speed time series which can be applied to engineering with regard to the simulation precision and efficiency.

Key words: random simulation; wind speed time series; AR model

随着工程结构日趋多样化、大型化、复杂化, 风荷载已成为结构设计计算、防灾减灾分析的重要设计荷载, 结构风振响应研究日益受到学术界、工程界的关注和重视。实际工程中通常所采用的风洞试验方法, 其测试手段复杂、耗时耗资巨大, 且仅仅针对特定的工程结构进行, 尚不能在实际风工程中普遍应用。基于数值模拟方法的风速时程曲线可满足某些统计特性的任意性, 且比实际记录更具代表性, 因而在实际工程中被广泛采用。人工模拟脉动风荷载

是一种被广泛应用的方法, 它可以考虑场地、风谱特性、建筑物的特点等条件的任意性。

进行脉动风的模拟, 关键问题是使用何种模拟方法来使模拟的风荷载能较好地反映结构受到的实际风荷载。对脉动风速的计算机模拟^[1~5]目前主要有两类方法: 一类是基于一系列三角函数加权叠加的谐波合成法(WAWS法), 另一类是采用自回归模型的线性滤波器法(AR法)。还有学者结合这两类方法而提出混合模拟方法。这些方法都是从模拟单

收稿日期: 2004-09-20

作者简介: 王吉民(1961—), 男, 浙江杭州人, 副教授, 工学博士, 从事结构工程领域的研究。

一脉动风的风速时程曲线发展到多个相关风速时程的模拟。在转化为离散时间信号处理时,随机数的生成算法、线性方程组的求解算法等方面将对模拟精度、模拟速度、模拟方法的稳定性产生较大影响。由于谐波合成法是用一系列具有随机频率的余弦函数序列来模拟的随机过程,当所需模拟的维数较大时,要在每个频率上进行大量运算,随机频率的生成相当耗时,运算效率低。而线性滤波器法(AR法)则具有计算量小、计算简捷、占用计算机内存少的优点,且模拟出来的风速时程与实际风速时程更吻合。本文基于自然风特性,采用AR模型来模拟具有随机性、时间相关性、空间相关性的多维脉动风速时程,并用Matlab编程来实现脉动风的计算模拟。

1 风速的随机模拟

从风速的实测记录来看,风速可以看作由两部分组成:周期在10 min以上的平均风和周期在几秒钟的脉动风。任意时刻 t 的风速向量可以认为是由平均风速和脉动风速两部分组成:

$$V(x, y, z, t) = U(z) + v(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中 U 、 v 分别为风速的平均分量和脉动分量, x 为沿着顺风向坐标。

沿高度变化的平均风速采用对数形式^[6]

$$U(z) = 2.5u_* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2)$$

式中: u_* 为剪切速度, z_0 为粗糙长度。

脉动风速向量 v 可写成如下形式:

$$v = Cu \quad (3)$$

这里 C 是一个下三角形矩阵,由互相关函数确定; $u(t)$ 是由互不相关的脉动风速过程组成的向量。

Iwatani提供了扩展自回归模型,生成 M 个随机过程^[7]

$$u(t) = \sum_{k=1}^p \Psi_k u(t - k\Delta t) + N(t) \quad (4)$$

(4)式中 p 为AR模型的阶数,它的阶数可由汉恩-昆定阶法^[8]确定。阶数一般在4~6之间,本文取 $p=4$ 。 Δt 的取值必须不小于0.1 s,否则与实际自相关函数相差很大。 $u(t - k\Delta t)$ 、 $N(t)$ 均为向量,它们可以分别表示为

$$u(t - k\Delta t) = [u^1(t - k\Delta t), \dots, u^M(t - k\Delta t)]$$

$$N(t) = [N^1(t), \dots, N^M(t)]^T$$

$\Psi_k (k=1, \dots, p)$ 为 $M \times M$ 的矩阵,可以由下式得到

$$R_u(j\Delta t) = \sum_{k=1}^p R_u[(j-k)\Delta t] \Psi_k^T \quad (j=1, \dots, p) \quad (5)$$

这里 $R_u(j\Delta t) = R_u^T(-j\Delta t)$, $R_u(j\Delta t)$,为有时滞 $j\Delta t$ 的互相关矩阵,由此可解出 Ψ_k 。

$N(t)$ 是一组具有零均值和给定互相关矩阵 R_N 的随机数系列, R_N 可由下式求得

$$R_u(0) = \sum_{k=1}^p \Psi_k R_u(k\Delta t) + R_N \quad (6)$$

解出 R_N 后则可由下式求出 $N(t)$:

$$N(t) = Cn(t) \quad (7)$$

其中 $n(t) = [n^1(t), \dots, n^M(t)]^T$ 为一组互相独立的具有零均值和单位方差的随机数系列。 C 满足下式:

$$R_N = CC^T \quad (8)$$

即 C 为 R_N 经过乔累斯基(Cholesky)分解后的三角形矩阵。

风速谱采用沿高度变化的Kaimal谱^[9]

$$S_u(n) = \frac{200u_*^2}{n} \frac{f}{(1+50f)^{5/3}} \quad (9)$$

(9)式中的无量纲数 f 称为莫宁坐标,或相似坐标,即

$$f = \frac{nz_i}{U(z_i)} \quad (10)$$

空间上任意两点 p_i 和 p_j 的风速互谱密度函数可表示为

$$S_u(p_i, p_j, n) = \gamma(p_i, p_j, n) \cdot \sqrt{S_u(p_i, n) \cdot S_u(p_j, n)} \quad (11)$$

其中 γ 为相干函数(Coherence Function),它与节点位置和频率有关。广泛采用的是指数衰减形式的函数^[10]。将Davenport提出的与频率、两点之间距离等参数有关的形式拓展到三维,则为

$$\gamma(i, j, n) = \exp \left\{ \frac{-2n \sqrt{C_x^2(x_i - x_j)^2 + C_y^2(y_i - y_j)^2 + C_z^2(z_i - z_j)^2}}{U(z_i) + U(z_j)} \right\} \quad (12)$$

(12)式中 C_x, C_y, C_z 为衰减系数,Borri. C.^[11]建议 $C_x = 6, C_y = 16, C_z = 10$ 。

功率谱密度和互相关函数之间满足维纳-辛钦(Wiener-Khinchin)公式,即

$$R_u(j\Delta t) = \int_0^\infty S_u^{ij}(n) \cos(2\pi j\Delta t) dn \quad (13)$$

2 计算实例及分析

采用matlab编程,通过调用其数学函数库标准

算法,达到了节省代码、减少出错的可能性,提高程序开发效率的目的。按照上述理论进行了顺风向脉动风速的模拟计算,将频域内以风速谱密度函数为特征的脉动风转化为时域内的风速曲线。以四周封闭、风向角为 0° 时的屋面实例,计算屋面上各风速模拟点处的风速时程曲线。

计算风向角为 0° 时薄膜结构迎风面上各点处的模拟脉动风速。将结构的迎风面均匀划分为 72 个区域(图 1、图 2),模拟每一个区域正中位置处的风速时程。图 1 中符号“+”表示各风速模拟点位置,模拟点的对应编号见图 2。结构 10 m 高处的平均风速为 $\bar{V}_{10}=42.43$ m/s。为了较精确地模拟脉动风作用,模拟过程中采用随高度变化的 Kaimal 谱。取 Kaimal 常数为 0.4,粗糙长度为 0.2 m,地貌为 B 类,地面粗糙度系数 $\alpha=0.16$ 。

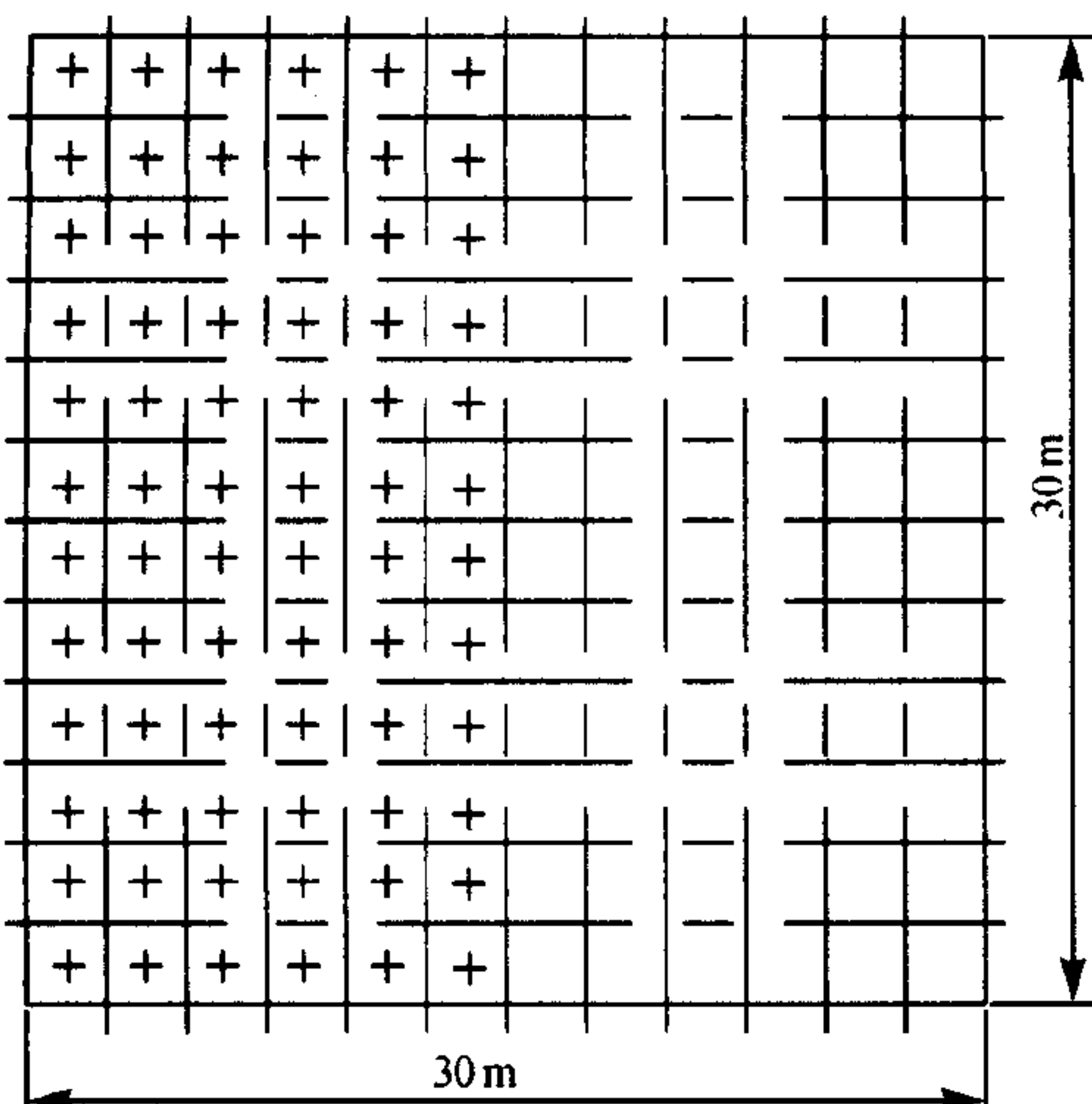


图 1 风速模拟点的位置图

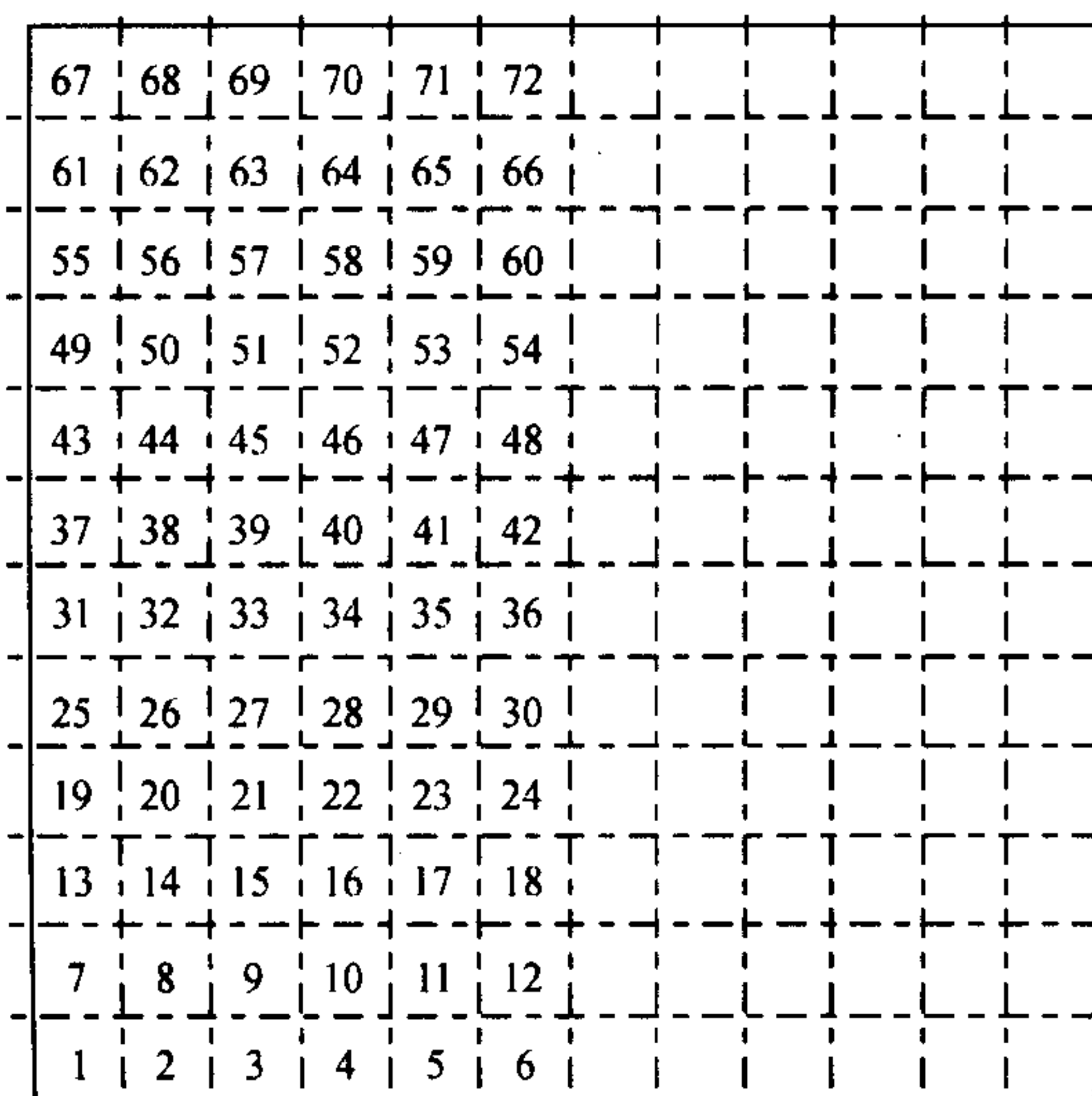
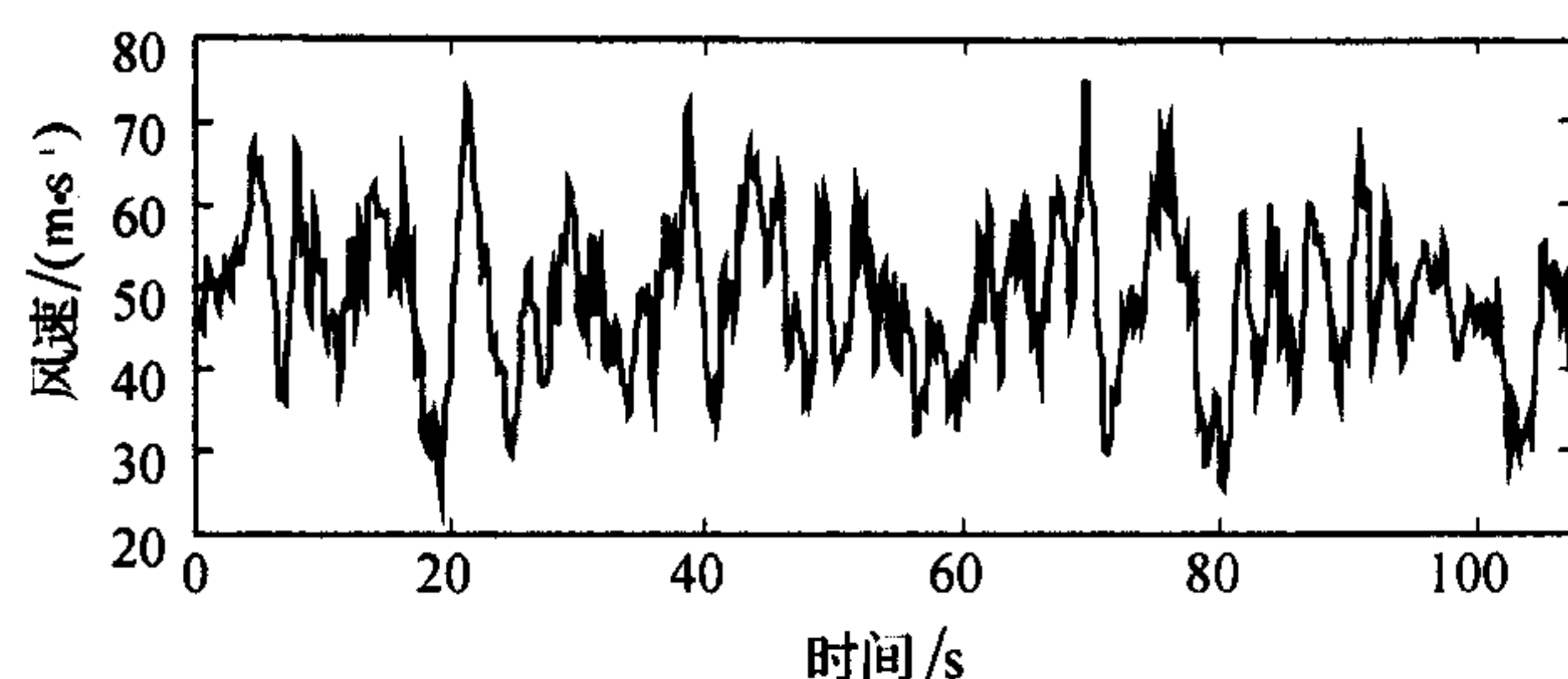
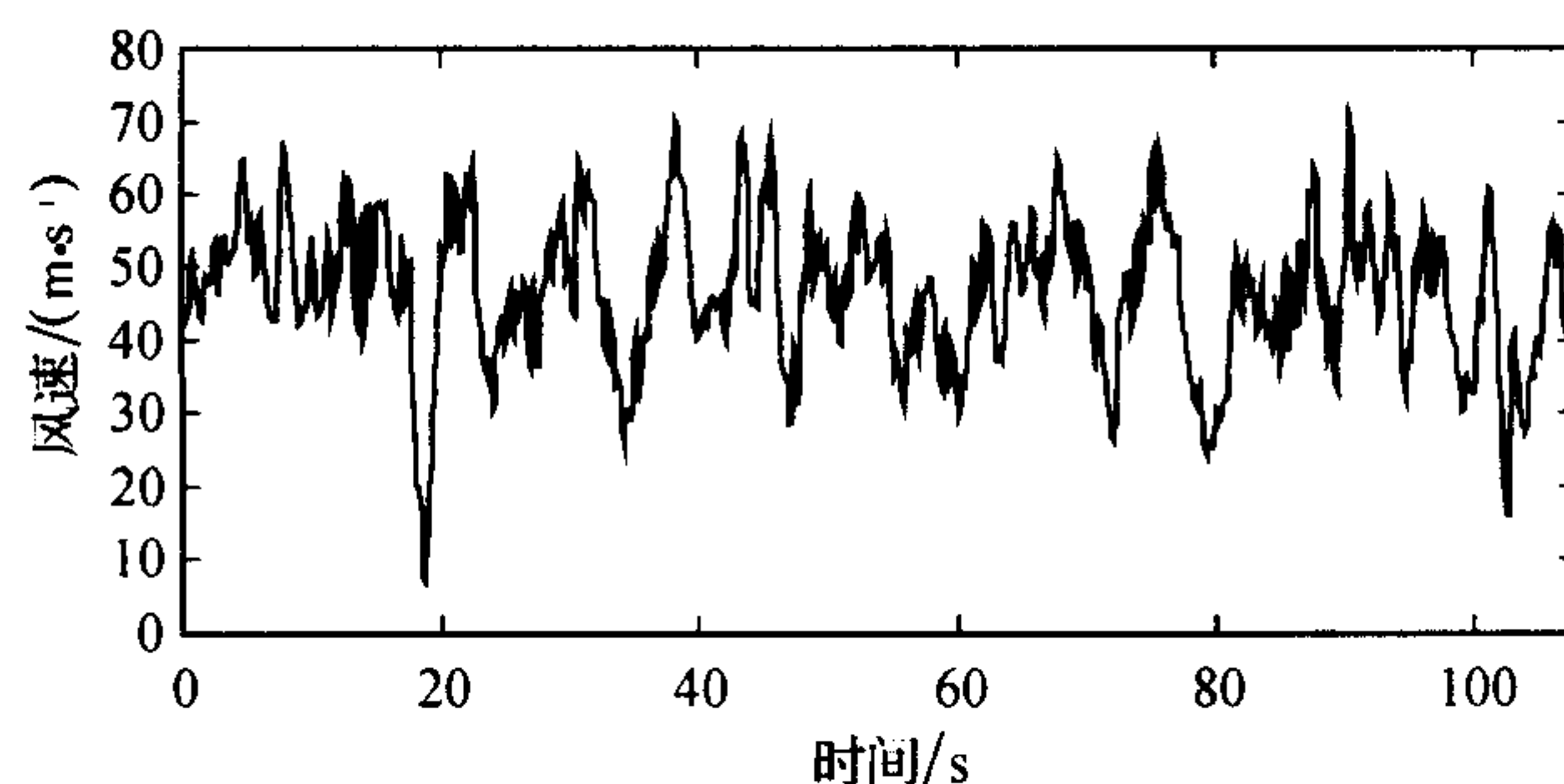


图 2 风速模拟点位置编号图

如上所述,采样时间间隔 Δt 要求不小于 0.1 s,故本文取 $\Delta t=0.106$ s,确定自回归阶数 $p=4$,时间步 $N=1\,024$ 。采用 AR 法模拟得到了考虑时间和空间相关的各点水平脉动风速时程样本曲线。屋面上部分结点的风速模拟结果参见图 3。



(a)7号点处的模拟风速时程曲线



(b)42号点处的模拟风速时程曲线

图 3 风速模拟时程曲线

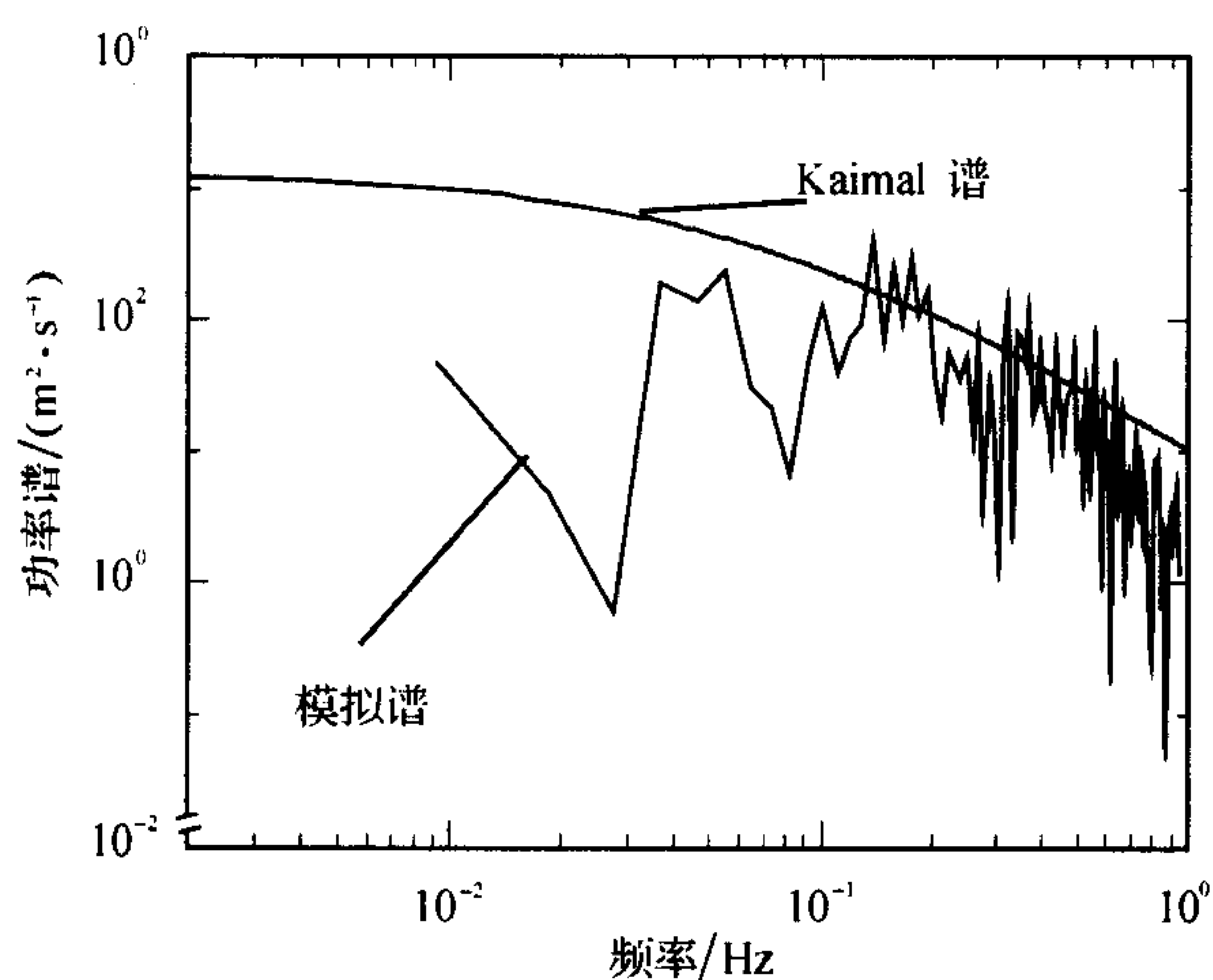
把上述各结点的模拟风速时程经快速傅立叶变换(FFT),可以得到其频域内的谱密度,它同(9)式的谱密度函数比较绘于图 4 中。

分别对上述各点的模拟谱和目标谱的风速时程进行统计分析,得到了各点的平均值和均方差,表 1 分别列出了这两种谱的平均值和均方差的计算结果。

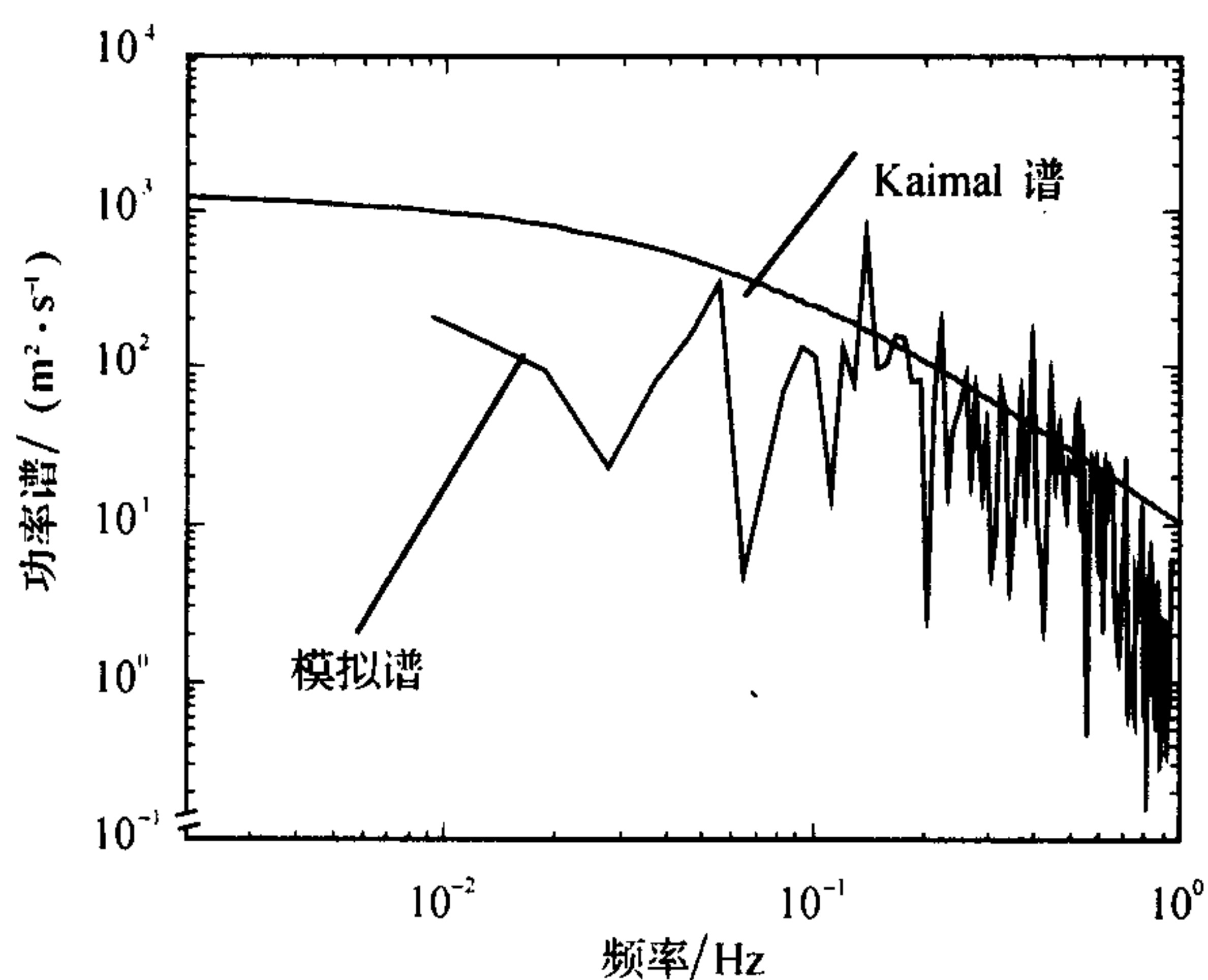
表 1 模拟脉动风速过程的统计数据

点号	模拟谱		Kaimal 谱	
	平均值	均方差	平均值	均方差
7	43.369	9.2019	43.234	9.9663
24	46.489	9.7894	45.854	10.055
33	44.607	9.9177	44.380	10.008
42	46.079	9.8788	45.854	10.055
52	45.320	9.8136	44.900	10.026
62	44.046	9.5038	43.827	9.9887

由表 1 可以看出模拟谱与目标谱的统计值比较吻合,由此说明本文所采用的随机过程模拟理论是可靠的,风速时程曲线的计算机仿真程序是正确的、有效的。



(a) 7号点的模拟风速功率谱密度曲线



(b) 42号点的模拟风速功率谱密度曲线

图4 模拟风速的功率谱密度曲线

3 结束语

综上所述,本文所采用的随机过程模拟理论是可靠的,按AR模型模拟得到的风速时程模拟曲线精度较高,能够满足随机过程的统计要求,反映出脉

动风的基本特性。相对于其他方法,该方法的计算量小,适合于工程应用。

参考文献:

- [1] Paola M D. Digital simulation of wind field velocity [J]. Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, (74-76): 91-109.
- [2] Shinozuka M, Jan C M. Digital simulation of random processes and its application [J]. Journal of Sound and Vibration, 1972, 25(1): 111-128.
- [3] 王之宏. 风荷载的模拟研究 [J]. 建筑结构学报, 1994, 15(1): 44-52.
- [4] 舒新玲, 周 岱. 风速时程 AR 模型及其快速实现 [J]. 空间结构, 2003, 9(4): 27-32.
- [5] 赵 臣, 张小刚, 吕伟平. 具有空间相关性风场的计算机模拟 [J]. 空间结构, 1996, 2(2): 21-25.
- [6] 埃米尔·希缪, 罗伯特·H·斯坎伦. 风对结构的作用——风工程导论 [M]. 刘尚培, 项海帆, 谢霁明译. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [7] Attilio Iannuzzi, Paolo Spinelli. Artificial Wind Generation and Structural Response [J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(12): 2382-2398.
- [8] 田静恬, 杜金观, 史久恩. 动态数据处理——时间序列分析 [M]. 北京: 气象出版社, 1986.
- [9] Kaimal J C, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. Spectral Characteristics of Surface Layer Turbulence [J]. J Royal Meteoroid Soc, 1972, 98: 563-589.
- [10] Davenport A G. The Spectrum of Horizontal Gustiness Near the Ground in High Winds [J]. J Royal Meteoroid Soc, 1961, 87: 194-211.
- [11] Borri C, Facchini L, Spinelli P. Numerical simulation of stationary and non-stationary stochastic processes: a comparative Analysis for turbulent wind fields [R]. New Delhi, India, 1995.