

# 混沌、分形和小波理论在被动声信号 特征提取中的应用

丁庆海 庄志洪 祝龙石 张清泰

(南京理工大学电光学院 南京 210014)

1997 年 6 月 16 日收到

1997 年 10 月 20 日定稿

**摘要** 首先分析了空气动力性噪声信号的混沌特性及其非平稳性, 然后分析统计了坦克、直升机声信号的最大 Lyapunov 指数  $\lambda_1$ 、分维数  $D_B$  和不同尺度小波子空间的能量分布特征。最后, 利用这些特征矢量和 BP 神经网络对实测的坦克和直升机数据进行了分类。结果表明在不同信噪比情形下都取得了令人满意的分类正确率。

PACS 数: 43.60

## Application of the chaos, fractal and wavelet theories to the feature extraction of passive acoustic signal

DING Qinghai ZHUANG Zhihong ZHU Longshi ZHANG Qingtai

(School of Electronic and Optoelectronic Technology of NUST Nanjing 210014)

Received Jun. 16, 1997

Revised Oct. 20, 1997

**Abstract** Firstly, the chaos performance and the nature of nonstationary of the aerodynamic noise are discussed. Then, the distributions of the maximum Lyapunov exponent  $\lambda_1$ , the fractal dimension and the energy distribution indifferent wavelet scale space of the noise of the tank and helicopter are tested and analyzed statistically. Finally, these feature vectors and BP neural network are used to classify the realistic data of tank and helicopter. Results show that the classification system can achieve a satisfactory classification accuracy in different SNR.

## 引言

现在, 战场上被动声识别技术的研究正越来越引起人们的重视<sup>[1,2]</sup>。如各国竞相研究的智能雷弹, 就是利用被动声信号处理技术来识别目标是坦克还是直升机, 从而采用不同的攻击方式摧毁目标。为了进一步提高被动声识别率, 我们就有必要研究战场兵器噪声信号的非线性和非平稳特征。严格的声学及空气动力学理论早就证明: 一方面, 声信号是非平稳过程, 另一方面, 更严

格讲, 声信号既非一个确定性线性过程, 也非纯随机过程, 而是一个复杂的非线性过程, 其中存在着产生混沌的机制。本文主要研究坦克和直升机的噪声信号特征, 为战场上被动声识别坦克和直升机提供特征矢量。

## 1 空气动力性噪声信号产生混沌的机制及其非平稳特性分析

一般认为混沌是指确定性系统中出现的无规则性或不规则性。混沌系统必定是非线性的, 但非线性系统不一定存在混沌。混沌的一个主要特征是, 动力学特性对初始条件有敏感的依赖性, 这意味着其轨迹具有不可预测性。

从空气动力学角度进行的研究表明, 空气动力性噪声的产生过程是一个非线性过程。是由于气体的非稳定过程, 或者说气体的扰动、气体与物体的相互作用而产生的。主要包括旋转噪声、涡流噪声和周期性排气噪声。旋转噪声是由旋转的叶片周期性打击空气质点, 引起空气的压力脉动, 由此引起噪声。涡流噪声主要是由作用在桨叶上随机脉动力而引起的, 桨叶转动时, 使周围气体产生涡流, 这些涡流由于粘滞力的作用, 又分裂成一系列分立的小涡流, 这个涡流和涡流分裂使空气发生扰动, 形成压缩与稀疏过程, 从而产生噪声。周期性排气噪声主要是由发动机的排气与进气噪声以及冷却风扇噪声组成, 主要是由于气体的压力脉动引起的, 排气时气体与管道的摩擦将产生湍流, 也可以产生涡流噪声。而湍流和简单涡系统的声辐射已经证明包含着混沌行为。这一结果意味着空气动力性噪声信号中存在着混沌, 混沌程度与目标的运动状态有关。同时, 由于声信号中存在着大量的瞬态成份, 所以, 具有非平稳特性。图 1 为实测的国内某型号坦克和直升机声辐射信号典型样本曲线。

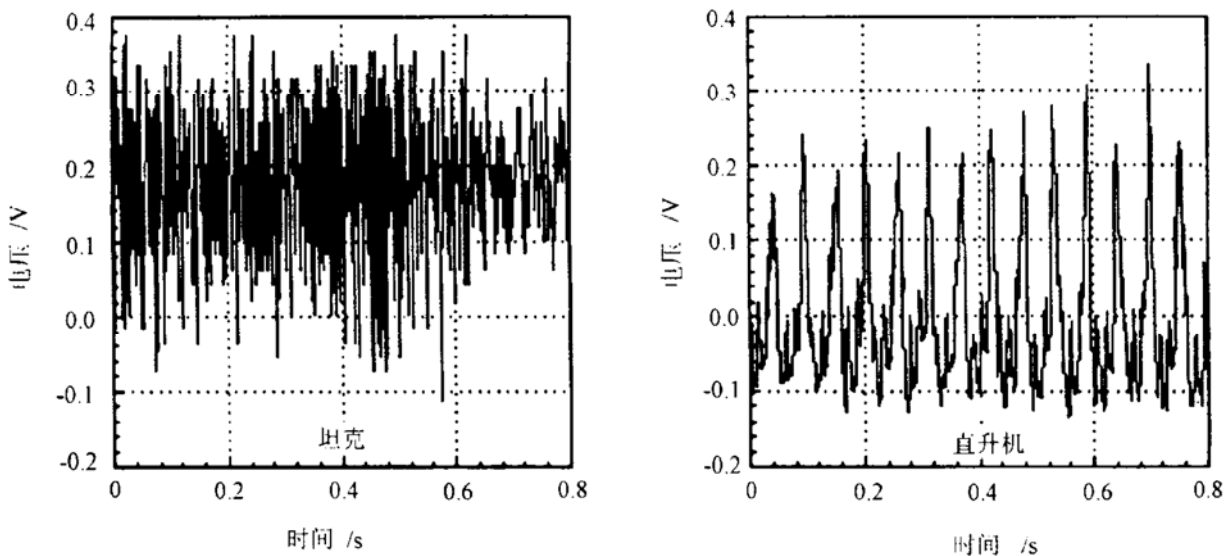


图 1 坦克和直升机声辐射信号典型样本曲线

## 2 相空间重构与 Lyapunov 指数<sup>[3-6]</sup>

### 2.1 相空间重构

相空间重构一般采用延时相图法。由于相空间是由系统的独立变量构成, 而实际的兵器声信号并非严格的混沌信号, 其中包含大量的谐波份量, 只是存在一定程度的混沌, 这就使得计算时

应取的延时  $\tau$  必须很大, 才能使得相邻样本点不相关。但太大的  $\tau$  值不利于计算, 特别是当样点数不够多时。为此, 最好先去掉样本间的相关性。我们利用文献 [6] 的方法去掉声信号样点间的相关性, 然后再用延时相图重构相空间, 此时的  $\tau$  可以取得很小。方法如下:

在声信号时间序列  $x(n)$  中任取一个时刻  $n$ , 假设  $n$  以前的  $P$  个样本点上的样值  $x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-P)$  为已知, 而时刻  $n$  的样值  $x(n)$  尚未知道。现在, 用这  $P$  个已知的样值取某种线性组合来预测未知的样值  $x(n)$ , 如果用  $\hat{x}(n)$  表示  $x(n)$  的线性预测值, 可写为:

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^P a_i x(n-i) \quad (1)$$

其中系数  $a_i$  称为预测系数。则预测误差为:

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n) = x(n) - \sum_{i=1}^P a_i x(n-i) \quad (2)$$

通过使其均方预测误差:

$$E = \sum_n e^2(n) = \left[ x(n) - \sum_{i=1}^P a_i x(n-i) \right]^2 \quad (3)$$

最小, 即:

$$\frac{\partial E}{\partial a_i} = 0 \quad (4)$$

可求出一组最佳的预测系数。由最佳预测时的正交性条件, 可得:

$$\sum_n e(n)x(n-i) = 0 \quad 1 \leq i \leq p \quad (5)$$

从而有

$$\sum_n e(n)e(n-j) = \sum_n e(n) \left[ x(n-j) - \sum_{i=1}^P a_i x(n-i-j) \right] \quad j \geq 1 \quad (6)$$

当  $p \rightarrow \infty$  时, 将 (5) 式代入 (6) 式后可得:

$$\sum_n e(n)e(n-j) = 0 \quad j \geq 1 \quad (7)$$

(7) 式表明在预测器阶数足够高时, 线性预测产生的误差序列样点间是不相关的, 因而从理论上说, 其延时相图能更好地重构相空间。上一节已定性指出, 空气动力性噪声的混沌特性主要是由随机脉动激励信号产生的, 而线性预测误差信号实际上就相当于该激励信号。从这一角度看, 上述相空间重构法可去掉声信号中的谐波成份, 所以是更合理的。

## 2.2 Lyapunov 指数

在重构相空间的基础上, 我们可以分析其时空演化特性 Lyapunov 指数  $\lambda$ 。Lyapunov 指数  $\lambda$  是用来衡量动力学系统相邻轨迹平均发散率的一个物理量。它是区分系统处于混沌状态还是非混沌状态的最直接的特征矢量之一。它反映的是系统中的微小扰动随时间变化所表现出来的发散或收敛特性, 当  $\lambda < 0$  时, 相空间运行轨迹收缩, 对初始条件不敏感, 相当于没有混沌; 当  $\lambda = 0$  时, 相空间运行轨迹稳定, 初始误差既不放大也不缩小; 当  $\lambda > 0$  时, 相空间运行轨迹迅速分离,

长时间动态行为对初始条件敏感, 这就是混沌状态。它可通过研究相空间中的小点球的演变来确定。该小球将随时间演变成主轴为  $r_i(t)$  的椭球, 则第  $i$  个 Lyapunov 指数定义为:

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log \frac{r_i(t)}{r_i(0)} \quad (8)$$

式中  $r_i(t)$  是  $t$  时刻按长度排在第  $i$  位的超椭球轴的长度,  $r_i(0)$  是初始球的半径。换言之, 在平均的意义下, 随时间的演变, 小球的半径会作如下的改变:

$$r_i(t) \propto r_i(0)e^{\lambda_i t} \quad (9)$$

我们分别统计了三种不同型号的坦克与两种型号直升机噪声信号在不同速度和距离的最大 Lyapunov 指数  $\lambda_1$  的分布。Lyapunov 指数  $\lambda_1$  的含义是相空间演化轨迹变化快慢程度, 可近似理解为噪声产生系统状态的变化。从实验数据中我们发现, 总得说来, 坦克噪声信号最大 Lyapunov 指数  $\lambda_1$  的分布比直升机大, 同一目标, 速度快, 距离近指数  $\lambda_1$  就相对大一些。这是因为速度快, 坦克发动机排气与进气噪声以及冷却风扇噪声引起的气体压力脉动就强, 排气时气体与管道的摩擦程度大, 对于直升机, 旋转的叶片速度越快, 周期性打击空气质点引起的空气压力脉动就越强, 作用在桨叶上随机脉动力也越大, 产生的涡流噪声也就越强。至于距离越远, 计算的值相对近距离略小, 这可能是由于声信号中混沌成份有所衰减的原因。对于直升机, 虽然其噪声主要由旋转噪声组成, 但由于我们采用去相关技术将信号中谐波成份去掉, 再重构相空间, 然后计算指数  $\lambda_1$ , 所以, 在实际计算中仍然可以得到反映其混沌程度的 Lyapunov 指数  $\lambda_1$ 。表 1 为坦克与直升机噪声最大 Lyapunov 指数  $\lambda_1$  的分布。

表 1 坦克与直升机噪声最大 Lyapunov 指数  $\lambda_1$  的分布

类型	速度	$\lambda_1$ (10m)	$\lambda_1$ (50m)
坦克	40 km/h	3.6 ~ 4.8	3.4 ~ 4.5
	30 km/h	3.0 ~ 3.5	3.1 ~ 3.6
	20 km/h	2.7 ~ 3.2	2.5 ~ 3.3
直升机	250 km/h	2.5 ~ 3.1	2.3 ~ 2.8
	180 km/h	1.9 ~ 2.8	1.7 ~ 2.4
	60 km/h	1.6 ~ 2.1	1.5 ~ 1.8

### 3 噪声信号时域波形的分维特征<sup>[6,7]</sup>

分形理论是描述混沌信号的另一种手段。定量刻划分形特征参数是分维。对于一些随时间变化的量的维数我们常用计盒维数来计算。 $n$  维欧氏空间子集  $F$  的计盒维数  $D_B$  定义为:

$$D_B = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N_\delta(F)}{\log(1/\delta)} \quad (10)$$

假定上述极限存在, 其中  $N_\delta(F)$  有多种定义形式, 本文选取为覆盖  $F$  的边长为  $\delta$  的最小立方体个数。式 (9) 表明, 曲线  $\log(1/\delta) - \log N_\delta(F)$  在  $\delta \rightarrow 0$  时的渐近线是直线, 其斜率就是  $D_B$ 。在实际计算中, 因为时间抽样率有限, 要使  $\delta \rightarrow 0$  是有困难的。在实践中多采用多点直线拟合来计算  $D_B$ 。具体过程为: 取  $M$  个较小的  $\delta$  值  $\delta_i$ , 计算:

$$x_i = \log(1/\delta_i) \quad y_i = \log N_{\delta_i}(F) \quad (11)$$

然后由  $M$  个点  $(x_i, y_i)$  按最小均方误差拟合出一条直线  $y = kx + b$ , 此直线的斜率  $k$  即为  $D_B$  的估算值。记:

$$E = \sum_{i=1}^M (kx_i + b - y_i)^2 \quad (12)$$

命  $\partial E/\partial k = 0, \partial E/\partial b = 0$ , 可解得:

$$D_B = k = \frac{\left(\sum_{i=1}^M y_i\right) \left(\sum_{i=1}^M x_i\right) - M \left(\sum_{i=1}^M x_i y_i\right)}{\left(\sum_{i=1}^M x_i\right)^2 - M \sum_{i=1}^M x_i^2} \quad (13)$$

在计算  $N_\delta(F)$  时, 先将原始噪声信号归一化到单位正方形区域, 即:  $F = \{x(t) | [x(t)] = 0, \max[x(t)] = 1, 0 \leq t \leq 1\}$ ,  $x(t)$  表示归一化后的噪声信号, 取小正方形的边长为  $\delta$ , 易知在区间  $I_j = [(j-1)\delta, j\delta]$  内, 覆盖  $F$  的最小正方形数为:

$$N_j = [\max_{t \in I_j} x(t) - \min_{t \in I_j} x(t)] / \delta \quad (14)$$

式中  $[x]$  表示不小于  $x$  的最小整数。因此, 在  $[0,1]$  区间内覆盖  $F$  的总正方形个数为:

$$N_\delta(F) = \sum_{j=1}^{[1/\delta]} N_j \quad (15)$$

表 2 为坦克和直升机的声信号的计盒维数  $D_B$  的统计结果。计算  $D_B$  时,  $\delta$  取 0.01, 0.02, 0.04, 0.08 四个值。

表 2 坦克与直升机噪声信号的计盒维数  $D_B$

类型	速度	$D_B$ (10m)		$D_B$ (50m)	
		均值	方差	均值	方差
坦克	40 km/h	1.77	0.062	1.65	0.71
	30 km/h	1.73	0.059	1.61	0.65
	20 km/h	1.70	0.056	1.56	0.056
直升机	250 km/h	1.48	0.038	1.43	0.052
	180 km/h	1.43	0.032	1.38	0.043
	60 km/h	1.41	0.045	1.36	0.04

从表 2 可以看出,  $D_B$  的变化规律与最大 Lyapunov 指数  $\lambda_1$  的变化规律基本类似, 其原因也类似于前面的解释。

#### 4 噪声信号小波子空间的能量特征 [8]

坦克、直升机声信号是一种非平稳过程。因此, 对声信号进行分析处理需要一种适合于非平稳过程的信号处理工具。而小波变换就适合于分析非平稳信号。

设按如下方式生成的函数族  $\{\psi_{a,b}\}$  满足:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (16)$$

其中  $\psi$  是基本小波, 对  $f \in L^2$ , 则信号  $f$  的连续小波变换  $W_f(b, a)$  定义为

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \psi \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \tag{17}$$

它对应于  $f(t) \in L^2(R)$  在函数  $\psi_{a,b}(t)$  上的分解, 在实际应用中, 往往需要把连续小波及其变换离散化。为了方便, 常常是进行二进制离散, 即取:  $a = 2^{-j}, b = k2^{-j}b_0, j, k \in ZZ$ , 离散化后的小波和相应的小波变换称为二进小波和离散二进小波变换。小波变换可以描述为函数  $f(t) \in L^2(R)$  通过一带通滤波器的输出响应。因此, 小波变换将一信号分解为对数坐标中一个具有相同大小的多通道频带集合。其分辨率随尺度因子  $a$  的变化而改变: 当  $a$  较小时, 频域分辨率较差, 时域分辨率较好; 当  $a$  增加时, 频域分辨率增加, 而时域分辨率则减小。小波变换由于其良好的时间 - 尺度定位特性, 使得它不但能很好地反映信号的频域特征, 而且又能较好地给出其时间域上的特征描述, 而且, 采用小波变换提取的特征具有稳定性。

我们首先利用信号的多尺度分解及其快速算法对声信号作小波变换, 其中, 信号采样频率为 2.5 kHz, 点数为 4096, 采用十二个尺度, 并计算出前十个尺度细节信号的能量值。选取 Daubechies 构造的有限脉冲响应滤波器  $\{h_n(k)\}_{k=0}^{N-1}, N = 4$ , 作为低通滤波器, 相应取:

$$g_N(k) = (-1)^k h_N(N - k - 1) \tag{18}$$

作为高通滤波器, 在工程应用时, 可根据具体的应用环境选用不同长度的小波基。图 2 为直升机和坦克小波变换后不同尺度系数图, 表 3 为直升机和坦克特征矢量分布统计均值。

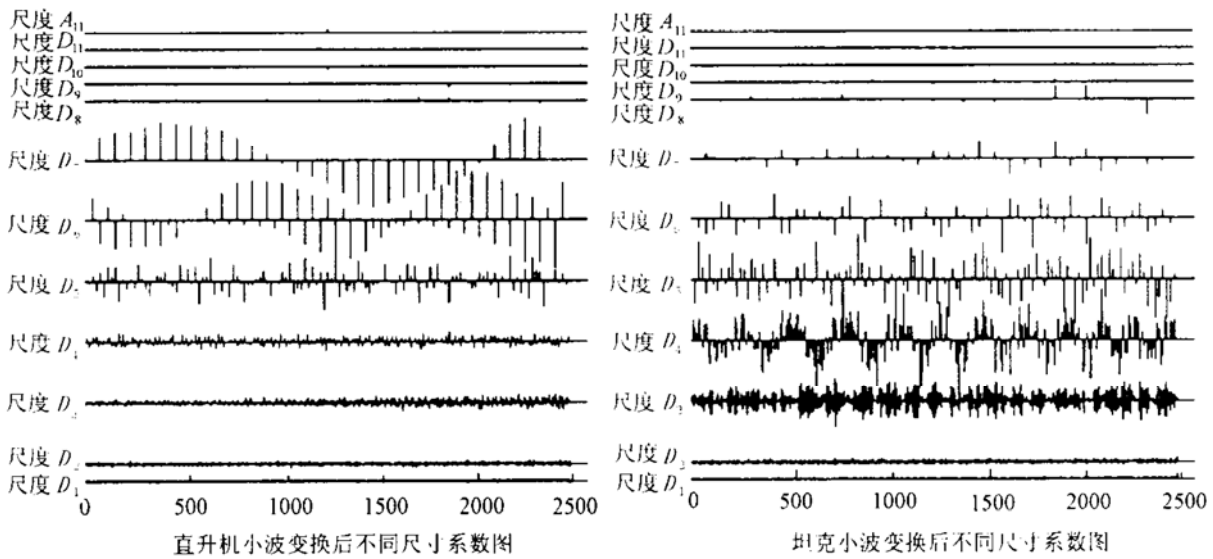


图 2 直升机和坦克小波变换后不同尺度系数图

表 3 坦克和直升机尺度特征矢量统计均值

各个尺度细节信号的能量值										
尺度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
直升机	0.0052	0.0145	0.0361	0.0496	0.174	0.377	0.341	0.000311	0.000172	0.000204
坦克	0.0152	0.0385	0.295	0.491	0.0866	0.0604	0.00617	0.000814	0.000288	0.0000343

从表 3 可以看出, 坦克和直升机声信号小波变换后不同尺度细节信号的能量值的分布明显不同, 直升机声信号小波变换后在尺度六和尺度七细节信号的能量值较大, 这对应着直升机主旋翼和尾桨频率成份, 坦克声信号小波变换后在尺度四细节信号的能量值较大, 对应着坦克发动机转

动频率, 这些, 都明显反映了目标的物理特征, 而且这些统计值具有相对的稳定性。所以, 可以将其作为特征矢量来识别坦克和直升机。因此, 小波变换是适合于提取各种目标声信号特征的。

## 5 检验结果 [9]

将实测的直升机、坦克辐射噪声信号进行预处理后, 得到 12 个特征矢量, 包括最大 Lyapunov 指数  $\lambda_1$ 、分维数  $D_B$  和十个不同尺度小波子空间的能量, 进行归一化处理后作为 BP 神经网络分类器的输入矢量。分类器 BP 神经网络的输入神经元个数与特征矢量个数相等为 12, 隐层神经元个数为 14, 输出层神经元个数等于要识别的目标类别数, 此处取为 2, 分别代表坦克和直升

表 4 五种不同 SNR 情形下的识别结果

SNR (dB)	识别精度 /%	
	坦克	直升机
$\infty$	96.75	99.50
30	94.25	97.75
20	91.25	96.50
10	74.25	78.75
5	63.75	68.50

机。在五种不同 SNR 情形下做实验, 不同的信噪比 (SNR) 通过将计算机产生的高斯白噪声加到实测的声信号中获得。每种 SNR 情形下目标噪声数据都分为两组, 一组用来训练 BP 神经网络, 一组用来检验, 各有 120 个样本组成。五种不同 SNR ( $\infty$ , 30, 20, 10, 5) 情形下的识别结果如表 5 所示, 其中 SNR= $\infty$  表示没有加白噪声。

从表中数据可知, 采用这些特征矢量并利用 BP 神经网络可在较宽的 SNR 范围内保持较高的识别率, 因此, 该方法在被动声目标识别中具有良好的应用前景。

## 6 结束语

本文探讨了混沌、分形和小波理论在声信号特征提取中的应用, 研究表明, 坦克与直升机等空气动力性噪声信号具有混沌与分维特征, 不同的噪声源和不同的运动状态具有不同的混沌与分维特性。同时, 不同噪声源小波变换后在不同尺度空间细节信号的能量特征不同。这为我们采用混沌、分维和小波理论进行目标特征提取提供了基础。但同时必须指出的是, 小波变换后的各个子空间上的能量特征具有相对的稳定性, 是适合声信号特征提取的。而采用单一的混沌、分形特征, 如 Lyapunov 指数和分维度等, 只能作为被动声识别的一种辅助特征, 不能完全取代传统的特征。分类结果表明, 采用这些特征并利用 BP 神经网络作为分类器, 可在一较宽的信噪比范围内保持较高的识别率。

## 参 考 文 献

- 1 栗 萍等. 声目标识别技术及其在坦克目标识别中的应用. 兵工学报, 1996: (1)
- 2 李在庭等. 直升机声信号特征提取和识别技术. 兵工学报, 1996: (1)
- 3 Wolf A, Swift J B, Swinney H L, Vastano J A. Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica*, 1985; **16D**: 285—317
- 4 裴留庆, 顾勇. 混沌与噪声. 电子学报, 1991; **19**(6): 80—90
- 5 胡光锐. 语音处理与识别. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1994. 12
- 6 韦 岗, 陆以勤, 欧阳景正. 混沌分形理论与语音信号处理. 电子学报, 1996; **24**(1): 34—39
- 7 曾文曲, 刘世耀. 分形几何——数学基础及其应用. 东北工学院出版社, 1991. 8
- 8 Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE trans. on PAMI*, 1989; **11**: 674—692
- 9 徐秉铮, 张百灵, 韦 岗. 神经网络理论与应用. 广州: 华南理工大学出版社, 1994. 12