

基于红外热像和权值直接确定神经网络的零值绝缘子识别方法

李唐兵¹, 龚磊², 姚建刚²

(1.江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330006; 2.湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 提出一种利用红外图像和神经网络权值直接确定法进行现场零值绝缘子识别的方法。识别的基本过程为: 对红外图像进行图像增强、去噪、分割, 在绝缘子串内截取矩形作为目标图像; 鉴于红外热像的灰度值与物体表面温度的关系, 直接提取了灰度标准偏差值、绝对偏差、四分差以及极差4个特征参数; 将这4个参数作为权值直接确定法神经网络的输入来训练模型, 并用于现场零值绝缘子的识别。该方法有效剔除了现场识别时输电线路的干扰, 且能满足现场识别实时性要求。实验结果验证了该方法的可行性与有效性。

关键词: 零值绝缘子; 红外热像; 图像分割; 权值直接确定法

中图分类号: TM216, TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2013)11-0707-05

On-site Identification of Zero Resistance Insulator Based on Infrared Thermal Image and One-step Weights-determination of Neural Network

LI Tang-bing¹, GONG Lei², YAO Jian-gang²

(1.Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330006, China; 2.Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A method using infrared thermal images and one-step weights-determination of neural network to identify the zero resistance insulators on-site is presented. The basic procedures are as follows: the infrared thermal images are intensified, denoised, segmented, and a rectangular which was regarded as object is intercepted in the insulators chain; in view of the relationship between gray value of infrared thermal images and temperature of object surface, four parameters which stand for standard deviation, absolute deviation, quartile and range of gray value, are extracted directly; these four parameters are used as the input of the neural network of one-step weights-determination to train the model, which could be used to identify the zero resistance insulators after being trained. This method can effectively avoid the interference of transmission lines, and can meet the real-time requirement when identifying on-site. Experimental results verify the feasibility and effectiveness of this method.

Key words: zero resistance insulators, infrared thermal image, image segmentation, one-step weights-determination method

0 前言

瓷绝缘子在长期运行中, 受环境、电气作用等因素影响, 易出现裂纹, 导致绝缘性能降低, 产生零值绝缘子, 直接引起绝缘子断串、导线落地以及母线失压等事故发生^[1]。因此, 零值绝缘子的检测显得十分必要。目前普遍使用短路叉、火花间隙放电叉等人工登杆塔方法, 检测劳动强度大、安全性差, 且易造成误检或漏检^[2]。为寻找更有效的零值绝缘子识别方法, 广大学者提出了许多新方法, 通

过检测绝缘子运行时的特征量来判断其运行状态, 常见的特征量有绝缘子表面电压、电晕脉冲、泄露电流等^[3-10], 尽管如此, 目前仍缺少一种非接触式、简单、经济且能用于现场的检测方法。

文献[6]提出的红外成像法具有简单、经济的特点, 但未考虑现场检测时可能存在线路等干扰的情况, 现场适用性尚待验证。本文在文献[6]的基础上做了改进, 提出一种红外图像与神经网络权值直接确定法相结合的方法: 先对现场拍摄的红外图像进行一系列图像处理, 然后从处理完成后的图像提取

收稿日期: 2013-07-03; 修订日期: 2013-08-24.

作者简介: 李唐兵 (1983-), 男, 硕士, 从事高电压外绝缘方面的技术研究工作, E-mail: tbing258@163.com。

基金项目: 江西省电力公司科技项目, 编号: 赣电科 201350617。

特征参数, 再将这些特征参数作为权值直接确定神经网络的输入, 从而实现零值绝缘子的识别。本文的改进之处主要有: ①截取目标区域及特征提取时, 避开了除绝缘子串的其余部分, 从而可以避免输电线路等干扰, 满足现场要求, 当利用文献[6]中的分割算法去对含有输电线路干扰的红外图像分割时, 会将输电线路和绝缘子串作为目标区域, 如图 1(b)、1(c)所示, 将输电线路作为目标区域的一部分是不被允许的; ②图像分割占了整个识别流程的大部分时间, 本文将图像分割结合智能算法, 缩短运行时间, 提高检测效率; ③分类器的优劣会影响训练耗时的长短以及识别的精度, 本文采用神经网络权值直接确定法, 不仅学习过程快, 且识别精度高。

1 红外热像检测零值绝缘子的原理

红外检测技术是对被检物体表面温度分布进行成像处理, 使其热分布成为热像图。正常绝缘子串的热像分布规律与电压分布规律相对应, 为不对称马鞍形, 且正常绝缘子间的温度比较接近; 零值绝缘子的出现, 会降低绝缘子串的电抗, 增加泄露电流, 电压分布规律和热像分布规律都会发生较大畸变, 零值绝缘子与邻近正常绝缘子的温差会明显增大^[6,11-13]。因此, 可利用正常与含有零值绝缘子的绝缘子串的不同温度分布特点来识别含零值的绝缘子串。

在获取绝缘子红外图像的基础上, 整个检测流程主要由图像处理、特征参数提取、利用神经网络进行识别 3 部分组成: 先对图像进行去噪、图像增强、图像分割、截取目标矩形操作, 去掉无关部分, 获得所要分析的绝缘子区域; 然后充分挖掘目标区域的温度信息, 提取特征参数; 最后将特征参数作为神经网络的输入, 进行零值识别。

2 现场零值绝缘子识别方法

2.1 红外图像处理

采用文献[14]提出的自适应混合消噪法对图像进行去噪操作, 还原图像特征; 鉴于图像对比度低的特点, 采用对数变换做图像增强处理, 为后面图像的有效分割奠定基础。

图像分割是特征参数提取的基础, 也是整个算法的关键。图像分割的方法有阈值法、区域法、边缘检测法、形态学分水岭法等^[15-16]。当图像中只有绝缘子串时, 一般的算法能将其分割出来。然而, 现场识别时, 不可避免地会拍到输电线路等干扰物, 如图 1(a)所示, 这会给图像分割带来困难。本文提

出的解决方案为: 先采用最大类间方差法 (Otsu) 对图像进行初步分割, 如图 1(b)、1(c)所示; 然后在初步分割的基础上, 在绝缘子串图像内截取矩形作为目标区域, 如图 1(d)所示。鉴于 Otsu 算法耗时长, 将其结合禁忌搜索算法, 使原来运行时间从 9 s 降至约 2 s, 相比于文献[6]中的二维最大熵阈值分割算法所需的 6 s, 本文算法可大大提高检测速度。限于篇幅, 具体实现过程不再详述; 将截取的矩形区域作为分析对象, 从而避开了干扰物的影响。

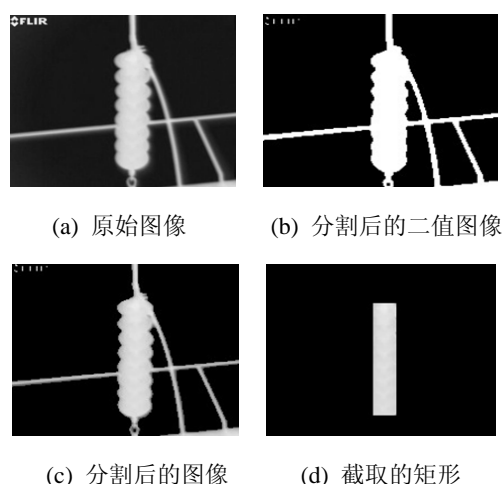


图 1 分割效果 Fig.1 Segmentation results

图 1(b)为初步分割后的二值图像, 在 MATLAB 环境中以二维矩阵形式存储, 其中白色部分为目标, 用 1 表示, 黑色部分为背景, 用 0 表示, 要在绝缘子串内截取矩形, 只需找到上下左右 4 个阈值即可。本文提出的方法前提为: 拍摄的绝缘子串尽量竖直。左阈值 t_{l1} 的计算方法为:

1) 先得到矩阵的维数, m 表示矩阵的行数, n 表示列数, 令 $k=1$;

2) 分别计算矩阵第 k 列和第 $k+1$ 列中 1 的个数 $f(k)$ 和 $f(k+1)$, 若 $f(k) \geq f(k+1)$ 且 $f(k) \geq \alpha * m$ 时, 则终止算法, 令 $t_l = k$, 得到左阈值。否则, 转步骤 3);

3) 令 $k := k+1$, 转步骤 2)。

步骤 2) 中系数 α 根据绝缘子占图片高度的比例来确定, 本文取为 0.5。很明显, 上述方法是根据目标与背景所占高度的变化关系和一个约束条件进行的。右阈值 t_r 的计算与左阈值类似。前面得到 t_l 和 t_r 的方法并不能完全剔除背景, 需根据式(1)、(2)进行修正以得到修正后的左阈值 t_{l1} 和右阈值 t_{r1} 。修正后, 丢掉了绝缘子串两边的部分的信息。

$$t_{l1} = t_l + 0.15 * |t_r - t_l| \quad (1)$$

$$t_{r1} = t_r - 0.15 * |t_r - t_l| \quad (2)$$

上阈值 t_t 计算方法为:

- 1) 令 $k=1$;
- 2) 计算第 k 行中第 t_{11} 列到第 t_{1l} 列所含 1 的个数 $g(k)$;
- 3) 若 $g(k) \geq 0.98 * (t_{1l} - t_{11})$, 令 $t_t = k$; 得到上阈值。否则, 转步骤 4);
- 4) 令 $k=k+1$, 转步骤 2)。

用类似的方法计算得到下阈值 t_b , 在得到上下左右 4 个阈值后, 将二值图像中 4 个阈值所围成的区域赋值为 1, 其余为 0, 再根据该二值图可得最终的分割图, 即图 1(d)所示。

2.2 选取特征参数

特征参数的选取必须满足 2 个条件: 一方面, 要有较强的独立性, 不受提取绝缘子红外特征时的条件和环境的影响; 另一方面, 特征参数的提取不能使现场识别操作变得复杂。

由于绝缘子红外热像背景复杂, 存在输电线路等干扰, 同时又与拍摄时的气候和条件有关, 因此, 本文完全舍弃了背景, 红外特征参数完全来自目标矩形。又由文献[17]可知, 物体表面的温度与红外热像的灰度值正相关, 故本文直接用灰度信息表征温度信息, 提取的特征参数有: 灰度标准偏差值 h_1 、灰度绝对偏差 h_2 、灰度四分差 h_3 以及灰度极差 h_4 。由于外界因素, 如湿度、污秽等级, 对绝缘子的影响已表现在绝缘子串表面温度上, 故不再采取外界因素作为神经网络的输入。

2.3 神经网络权值直接确定法及其应用

神经网络权值直接确定法^[18], 是一种基于矩阵伪逆的直接计算网络最优权值的方法。该方法输入层和输出层神经元均采用线性恒等激励函数, 且所有神经元阈值都固定为 0, 输入层与隐层神经元之间的对应权值固定为 1, 隐层神经元与输出层神经元之间的对应权值记为 ω_j , $j=0,1,2, \dots, n-1$ 。本文采用的权值直接确定法结构如图 2 所示, 采用前面所述的 4 个特征参数作为网络的输入。

在训练过程中, 网络计算误差函数定义如下:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left[\varphi_i - \sum_{p=1}^{n-1} \omega_p \phi_p \left(\sum_{l=1}^4 h_{il} \right) \right]^2 \quad (3)$$

式中: ϕ_i 为第 i 组样本对应的实际值, m 为训练样本个数。则神经网络权值迭代公式可设计为:

$$\omega_j(k+1) = \omega_j(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial \omega_j} = \omega_j(k) - \eta \sum_{i=1}^m \left\{ \left[\sum_{p=0}^{n-1} \omega_p(k) \phi_p \left(\sum_{l=1}^4 h_{il} \right) - \varphi_i \right] \phi_p \left(\sum_{l=1}^4 h_{il} \right) \right\} \quad (4)$$

式中: $j=0,1,2, \dots, n-1$; 学习率 $\eta > 0$; 迭代次数 $k=0,1,2, \dots$ 。式(4)可以简化为如下矩阵向量表述形式:

$$\omega(k+1) = \omega(k) - \eta X^T [X\omega(k) - \gamma] \quad (5)$$

其中权值列向量 ω 、输入受激励矩阵 X 和目标输出向量 γ 分别定义如下:

$$\omega = [\omega_0 \quad \omega_1 \quad \dots \quad \omega_{n-1}]^T \in R \quad (6)$$

$$X = \begin{bmatrix} \phi_0(\sum_{l=1}^4 h_{1l}) & \phi_1(\sum_{l=1}^4 h_{1l}) & \dots & \phi_{n-1}(\sum_{l=1}^4 h_{1l}) \\ \phi_0(\sum_{l=1}^4 h_{2l}) & \phi_1(\sum_{l=1}^4 h_{2l}) & \dots & \phi_{n-1}(\sum_{l=1}^4 h_{2l}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_0(\sum_{l=1}^4 h_{ml}) & \phi_1(\sum_{l=1}^4 h_{ml}) & \dots & \phi_{n-1}(\sum_{l=1}^4 h_{ml}) \end{bmatrix} \in R^{m \times n} \quad (7)$$

$$\gamma = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \dots \quad \varphi_m]^T \in R^m \quad (8)$$

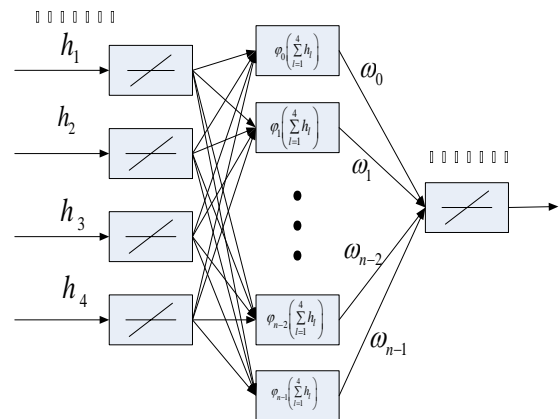


图2 权值直接确定法结构图

Fig.2 Structure diagram of weights direct determined neural network method

当网络训练达到稳态后, 即迭代次数 k 足够大时, $\lim_{k \rightarrow +\infty} \omega(k+1) = \lim_{k \rightarrow +\infty} \omega(k) = \omega$, 由式(5)可得:

$$-\eta X^T (X\omega - \gamma) = 0 \quad (9)$$

考虑到 $\eta > 0$, 则有:

$$X^T (X\omega - \gamma) = 0 \quad (10)$$

由矩阵伪逆思想, 即可得:

$$\omega = (X^T X)^{-1} X^T \gamma \quad (11)$$

ω 即为图 3 所示神经网络的稳态最优权值。由上述分析可知, 该神经网络利用矩阵伪逆可以一步直接计算得到网络的最优权值。

本文隐层神经元采用三角正交基作为激励函

数^[19]。

3 实验结果及分析

3.1 实验设计

在封闭的人工雾室内模拟 110 kV 线路的现场运行，采用标准 XP-160 瓷绝缘子，取 7 只绝缘子连成一串，接地端编为 1 号，按从接地端到高压端依次编号。本实验的电气接线如图 3 所示。交流耐压设备型号为 YDJ/30 kVA/100 kV，数字高压表型号为 WT1911B，红外摄像仪型号为 FLIR P30。

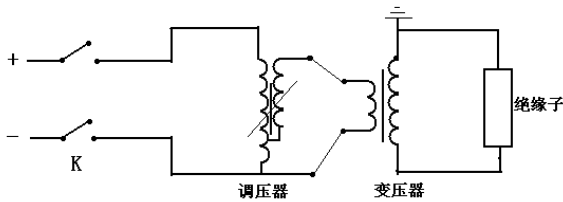


图 3 电气接线图

Fig.3 Electrical connection diagram

先通过调节交流耐压设备，对正常绝缘子串施加 64kV 工频电压，运行 4h，处于热稳态后，距离 4.5 m 拍摄红外图像。然后用一只零值绝缘子，依次从 1 号到 7 号位置轮流替换一只正常绝缘子，其余绝缘子保持不变。在处于热稳态后，拍摄红外图像。在 75%~90%湿度范围，各不同污秽等级下重复进行以上操作。

3.2 实验结果及分析

隐层神经元个数由训练样本个数确定。用 400 个训练样本对权值直接确定神经网络进行训练，隐层神经元个数取为 85，训练样本准确率为 95.25%。另取 100 个测试样本进行测试，准确率为 87%。表 1 为部分测试数据及输出结果。

为验证权值直接确定神经网络的有效性，本文将该方法与部分改进的 BP 神经网络进行了比较，比较的内容为训练数据准确率、测试数据准确率以及训练时间，结果如表 2 所示。

由表 1、表 2 可得：

1)本文采用的特征参数可以有效地用来进行零值绝缘子的识别。

2)虽然神经网络权值直接确定法隐层神经元个数众多，但无论从准确率还是训练时间来看，都要优于其他算法。

3)本文提出的零值绝缘子识别方法，运行速度快，能满足现场零值绝缘子识别的实时性要求。

本文方法的准确率低于文献[6]，原因在于：

1)本文在为避开输电线路等干扰而截取目标矩形时，丢失了绝缘子串两旁的部分信息。

2)提取特征参数时，本文没有从背景提取参数用作对比分析。

总之，本文所提方法的准确率虽然略低于文献[6]，但能解决文献[6]中的在现场检测时不能避免输电线路干扰和检测流程耗时长的问题，现场适用性得到了提高。

表 1 部分测试数据及输出结果

Table 1 Partial test data and output results

序号	标准 偏差	极差	四分 差	绝对 偏差	输出	实际值
1	15.47	95	20	12.21	0	0
2	28.71	110	50	24.39	1	1
3	17.15	115	23	13.65	0	0
4	26.33	89	49	22.75	1	1
5	16.23	65	28	14.09	0	0
6	38.69	182	55.5	31.74	1	1
7	17.56	74	31.7	15.48	0	0
8	43.74	203	60	35.78	1	1
9	18.29	131	24	14.12	0	0
10	48.77	201	68	39.77	1	1
11	20.89	136	28	16.82	0	0
12	40.70	192	47	30.75	1	1

注：输出 0 表示不含零值绝缘子，1 表示含零值绝缘子

表 2 部分算法的比较

Table 2 Comparison of partial algorithms

算法	训练数据 准确率/%	测试数据 准确率/%	训练 时间/s
BFGS 法	92.25	81	35.47
LM 下降法	93.75	85	22.12
有自适应 Lr 的梯度下降法	91	82	27.06
权值直接确定法	95.25	87	0.09

4 结论

本文提出的方法以降低部分准确率来实现对背景干扰的剔除，具有较好的户外适用性，能实现现场零值绝缘子的准确、快速、安全识别。实验结果证明了该方法的可行性和有效性。本文的缺点在于识别时要使绝缘子串尽量竖直，这对拍摄红外图像时提出了一点小要求。

参考文献:

- [1] 姚境, 汪飒, 胡凯, 等. 传感器在高压输电线路绝缘子检测中的应用[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(10): 1-8.
Yao Jing, Wang Feng, Hu Kai. Application of sensor in high voltage transmission line insulators detection [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(10): 1-8.
- [2] 胡岳, 江秀臣, 仲雁兵. 无线通信式低零值绝缘子手持检测仪[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 280-284.
Hu Yue, Jiang Xiuchen, Zhong Yanbing. Design of a hand-held faulty insulator detector based on wireless communication[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(2): 280-284.
- [3] Shen Xiaojun, Jiang Xiuchen, Cheng Yangchun, et al. A novel method for live detection of faulty direct current insulators[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(1): 24-30.
- [4] 张海龙, 关根志, 周金, 等. 基于改进 ART2 神经网络的绝缘子故障在线诊断[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(10): 41-45.
Zhang Hailong, Guan Genzhi, Zhou Jin, et al. Application of improved ART2 neural network for the on-line diagnosis of faulty insulators[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2008, 35(10): 41-45.
- [5] He Wei, Yang Fan, Wang Jingang, et al. Inverse application of charge simulation method in detecting faulty ceramic insulators and processing influence from tower[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(4): 723-726.
- [6] 姚建刚, 关石磊, 陆佳政, 等. 相对温度分布特征与人工神经网络相结合的零值绝缘子识别方法[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 170-175.
Yao Jiangang, Guan Shilei, Lu Jiazhang, et al. Identification of zero resistance insulators by combining relative temperature distribution characteristics with artificial neural network[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(2): 170-175.
- [7] Wen Kangzhen, Wen Yuanfang, Lu Jianshuang. Distinguishing between perfect and faulty insulators by bispectrum and classifier[C]// *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu: APPEEC*, 2010.
- [8] Jae-Kyung Lee, Joon-Young Park, Byung-Hak Cho, et al. Development of inspection tool for live-line insulator string in 154 kV power transmission lines[C]// *European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona*: 2009.
- [9] Hyunuk Ha, Sunsinn Han, Jangmyung Lee. Fault detection on transmission lines using a microphone array and an infrared thermal camera[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(1): 267-275.
- [10] Joon-Young Park, Jae-Kyung Lee, Byung-Hak Cho, et al. Development of insulator diagnosis algorithm using least-square approximation[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, 27(1): 3-12.
- [11] 陈林华, 梁曦东. 特高压交流瓷绝缘子串电压分布的计算分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 376-381.
Chen Linhua, Liang Xidong. Computational analysis on voltage distribution along ceramic insulator string of UHV transmission line[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(2): 376-381.
- [12] 蒋兴良, 黄斌, 苑吉河, 等. 电网络法计算交流特高压绝缘子串电压分布[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 7-10.
Jiang Xingliang, Huang Bin, Yuan Jihe, et al. Calculation of voltage distribution along insulator String of UHV AC transmission line by electric-network method[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(1): 7-10.
- [13] Cheng Yangchun, Li Chengrong. Study of corona discharge pattern on high voltage transmission lines for inspecting faulty porcelain insulators[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(2): 945-952.
- [14] 何洪英, 姚建刚, 罗滇生. 红外图形的自适应混合消噪方法[J]. 计算机工程与应用, 2010(6): 7-9.
He hongying, Yao Jiangang, Luo Diansheng. Mixed denoising method for infrared image[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010(6): 7-9.
- [15] 陈芳, 姚建刚, 李佐胜, 等. 绝缘子串红外图像中单个绝缘子盘面的提取方法[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 220-224.
Chen Fang, Yao Jiangang, Li Zuosheng, et al. The method to extract shed surface image of a single insulator from infrared image of a insulator string[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(5): 220-224.
- [16] 惠阿丽. 基于线调频小波分维的红外图像边缘检测[J]. 红外技术, 2011, 33(7): 424-428.
Hui Ali. Edge detection of infrared image using chirplet dimension[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(7): 424-428.
- [17] 何洪英, 姚建刚, 蒋正龙, 等. 利用红外图像特征和径向基概率神经网络识别不同湿度条件下绝缘子的污秽等级[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 117-123.
He Hongying, Yao Jiangang, Jiang Zhenglong, et al. Contamination grades recognition of insulators under different humidity using infrared image features and RBPNN[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2006, 26(8): 117-123.
- [18] 张雨浓, 杨逸文, 李巍. 神经网络权值直接确定法[M]. 广州: 中山大学出版社, 2010.
- [19] 张雨浓, 旷章辉, 肖秀春, 等. Fourier 三角基神经网络的权值直接确定法[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(5): 112-115.
Zhang Yunong, Kuang Zhanghui, Xiao Xiuchun, et al. A direct-weight-determination method for trigonometrically-activated fourier neural networks[J]. *Computer Engineering & Science*, 2009, 31(5): 112-115.