基于模糊小波网络的除冰机器人外观设计综合评价

崔彦彬，邹文珏
（华北电力大学，保定 071000）

摘要：目的 建立模糊小波网络的除冰机器人外观设计综合评价模型，使除冰机器人的外观设计更加科学化、符合实际需求。**方法** 以综合模糊小波网络获得对方案的客观权重和权威专家主观评判打分，经过 MATLAB 仿真计算出各项指标间的权重关系从而提炼出评价指标与综合评价结果之间的非线性关系。**结论** 经实例计算确定了最佳设计方案，证明基于模糊小波网络的除冰机器人外观设计综合评价模型能够降低评价过程中主观因素的影响，进而客观、全面地对除冰机器人外观设计做出评价，对除冰机器人外观设计方案的选择提供辅助和参考作用。

关键词：模糊小波网络；综合评价；除冰机器人；外观设计
中图分类号：TB472 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2018)20-0146-06
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.20.023

Comprehensive Evaluation of Deicing Robot Appearance Design Based on Fuzzy Wavelet Network

CUI Yan-bin, ZOU Wen-jue
(North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

ABSTRACT: The work aims to make the appearance design of the deicing robot more scientific and conform to the actual demand through the establishment of comprehensive evaluation model of deicing robot appearance design based on fuzzy wavelet network. The objective weight of the scheme and the subjective judgment of the authoritative expert were obtained by the integrated fuzzy wavelet network. After the MATLAB simulation, the weight relation between the indexes was calculated, thus extracting the non-linear relationship between the evaluation index and the comprehensive evaluation result. According to the example calculation, the best design scheme is determined. It is proven that the comprehensive evaluation model of the deicing robot appearance design based on fuzzy wavelet network can reduce the influence of subjective factors in the evaluation process, thus objectively and comprehensively evaluating the appearance design of deicing robot. It provides auxiliary and reference function for the appearance design scheme of deicing robot.

KEY WORDS: fuzzy wavelet network; comprehensive evaluation; deicing robot; appearance design

随着全球气候的变化，极端天气出现的频率逐渐升高，在由气候原因造成的输电事故中，以线路覆冰和积雪引发的次数最为频繁，发生概率远高于其它气候因素，冰雪灾害已经成为许多高纬度国家输电线路亟待解决的安全问题[1—3]。目前输电线路除冰机器人大量应用，但需由人工辅助完成除冰作业，且除冰机器人外观单一，美观度较差[4—6]。在除冰机器人外观设计方案完成后，设计师根据经验很难做出最优的选择。随着科学技术的进步和大众审美的提高，这就要求设计师在选择设计方案时更加科学规范[7]。模糊小波网络具有良好的学习能力和参数自调整能力[8]，因此基于模糊小波网络的综合评价模型对于新型的除冰机器人外观设计方案选择具有重大意义。

1 模糊小波网络原理

基于模糊小波网络的评价模型借助一种模糊规则把一个小波网络划分成几个子网络，一个任意模糊规则前提就是将样本空间分开成某个局部子空间，它们的结论是映射某个特殊尺度下的子网络，子网络被

收稿日期：2018-07-21
作者简介：崔彦彬（1961—），男，河北人，华北电力大学教授，主要研究方向为计算机辅助工业设计。

应用于获取性质和信号，并把这些信息综合逼近该信号[9—10]。与神经网络的不同之处在于，借助小波函数位移参数，使模糊小波网络模型的可靠性和泛化能力都得到了加强。

2　基于模糊小波网络的多指标综合评价模型

2.1　多指标综合评价模型原理

应用模糊小波网络解决除冰机器人外观设计中综合评价问题，首先，要细化除冰机器人外观设计的影响因素，建立相关评价指标体系；其次，对综合评价的各指标进行归一化，以避免不同量纲带来的扰动；然后，将归一化处理后的评价指标作输入，评价结果作输出，对模糊小波网络做出充足的训练，便可得到模糊小波网络对各评价指标的系数权重；基于这些评价指标的值，模糊小波网络便能求取出除冰机器人外观设计的客观评价结果，再参考专家学者的评判意见，保证评价结果满足实际问题在主观性与客观性上的要求。

2.2　多指标综合评价模型结构

模糊小波网络应用泰克·苏几建立完善的模糊推理方法[11—12]，设模糊系统总共具备 q 个输入，且只有一个输出 y，它的模糊规则形式是这样的：

$$R_i: \text{If } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } A_2^i \text{ and} \cdots \text{and } x_q \text{ is } A_q^i,$$

$$\text{Then } \hat{y}_i = \sum_{k=1}^{N_i} \omega_{m_i,b_{ik}} \psi_{m_i,b_{ik}}(x),$$

$$m_i \in Z, n_k \in R,\ \omega_{m_i,b_{ik}} \in R, x \in R^q \tag{1}$$

式中：R^i 代表第 $i(1\leqslant i\leqslant c)$条模糊规则；输入集 X 中的第 j 个变量为 $x_j(1\leqslant j\leqslant q)$；$N_i$ 的含义为第 i 个模糊规则所使用的小波数量；y_i 的含义为第 i 个模糊规则的输出，映射一个子网络，实际上是尺度因子一样的数个小波基函数的数学集合。b_{ik} 表示第 i 个子网络的平移因数；模糊语句 A^i_j 的表达式为隶属度函数 $\mu_{ij}(x_j)$，隶属函数可以转换成高斯型函数形式[13]:

$$\mu_{ij}(x_j) = \exp\left[\left(-\frac{x_j - p^i_{j1}}{p^i_{j2}}\right)^2\right] p^i_{j1}, p^i_{j2} \in R \tag{2}$$

式中：p^i_{j1} 和 p^i_{j2} 分别代表隶属度函数的中心和宽度。

通过模糊推理层计算出各模糊规则输入 x，x 后的合理性 $\mu_i(x)$使用归一算法，计算出个模糊规则的激活度 $\hat{\mu}_i(x)$，它的重要意义在于各小波子网络的输出在全部网络输出中的比例确定：

$$\mu_{ij}(x) = \prod_{j=1}^{q} \mu_{ij}(x_j),\ \hat{\mu}_i(x) = \mu_i(x) / \sum_{i=1}^{c} \mu_i(x) \tag{3}$$

式中：$\hat{\mu}_i(x)$ 满足 $0 \leqslant \hat{\mu}_i(x) \leqslant 1, \sum_{i=1}^{c} \mu_i(x) = 1$。

通过反模糊化层分析模糊小波网络得到：

$$y(x) = \sum_{i=1}^{c} \mu_i(x) y_i(x) \Big/ \sum_{i=1}^{c} \mu_i(x) = \sum_{i=1}^{c} \hat{\mu}_i(x) y_i(x) \tag{4}$$

式(1)—(4)所示的模糊小波网络完全能够换用单一的多层网络代替，见图 1，该网络由 4 层常规模糊神经网络构成：输入层、推理层、隶属度函数生成层以及反模糊化层，每层的神经元的数量都各不相同，分别是 q，$q\times c$，c 和 $c+1$，所以只要输入数 q 和模糊推理规则数即可确定，可以准确知道关于模糊小波网络的构造，WNN_i 是第 i 个小波子网络。

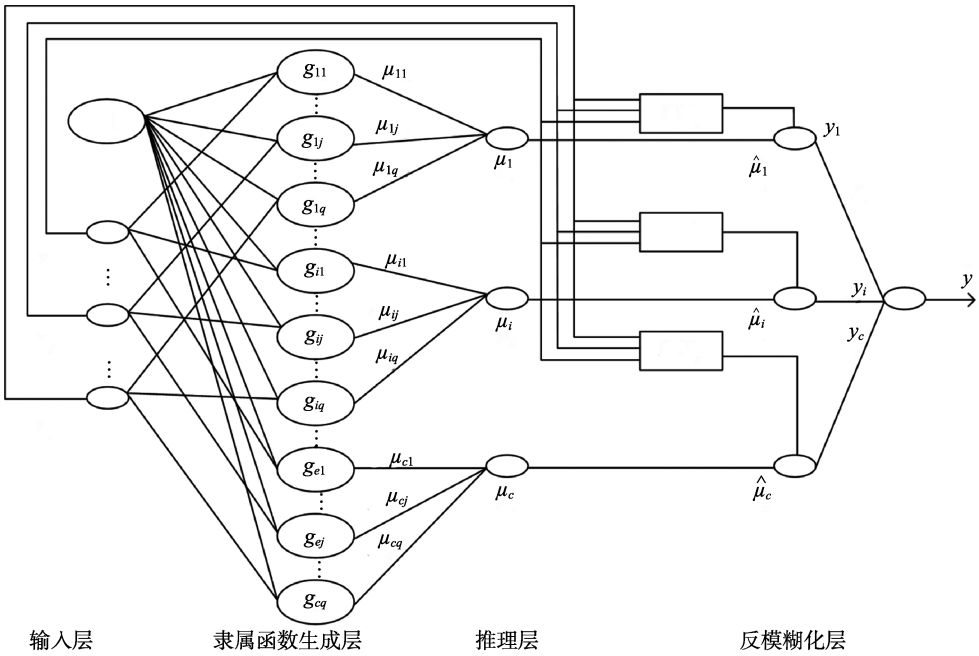

图 1　模糊小波网络结构图

Fig.1 Structure diagram of fuzzy wavelet network

3 建立基于模糊小波网络的多指标综合评价模型

3.1 指标属性值的归一化处理

评价体系基本可以划分成两大类——成本类和效益类，同时各指标量纲不同。指标的归一化处理能够规避类型上的差异以及量纲的差别给评价结果带来的扰动，进而推导出标准化初始决策矩阵。

1）效益型指标：

$$r_{ij}=\frac{y_j^{\max}-y_{ij}}{y_j^{\max}-y_j^{\min}},\quad i=1,2,\cdots,n;\ j=1,2,\cdots,m \tag{5}$$

式中：

$y_j^{\max}=\max(y_{ij}),\ 1\leqslant i\leqslant n;\ \ y_j^{\min}=\min(y_{ij}),\ 1\leqslant i\leqslant n$

2）成本型指标归一化：

$$r_{ij}=\frac{y_j^{\max}-y_{ij}}{y_j^{\max}-y_j^{\min}},\quad i=1,2,\cdots,n;\ j=1,2,\cdots,m \tag{6}$$

归一化处理后的标准决策矩阵为：

$$R=(r_{ij})_{n\times m}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$i=1,2,\cdots,n;\quad j=1,2,\cdots,m$

3.2 模糊小波网络的学习算法

给定 L 个训练样本对，$x_l(l=1,2,\cdots,L)$的含义是第 l 个训练样本的输入，y_1 以及 $\hat{y}_1$ 的含义则是该网络的实际输出和理想输出。运用 BP 算法计算模糊小波网络的参数，其意义在于令 y_l 与 $\hat{y}_1$ 二者之间的误差达到最低，计算过程如下：

1）选择小波基。采用 Morlet 母小波，其表达式为：

$$\psi_{(t)}=\cos(1.75t)\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$$

该小波类型为高斯波，其调制波的类型为余弦，在时域、复频域它们同时具备较高的分辨率，针对样本信号其频率进行研究，在样本信号的频率密集段产生小波函数的尺度 m_i，然后产生模糊小波网络的模糊规则数，借助样本信号中的时间密集段确定小波函数在任一尺度上平移因数的初始值。

2）初始化网络权值。式(1)和(2)可以得到待进行初始化模糊神经网络中的 p^i_{j1} 和 p^i_{j2}，以及 $\omega_{mi,bik}$。

随机确定模糊小波网络的 $\omega_{mi,bik}$，以公式(4)为依据进行计算：

$$\overline{\mu_{il}}=|y_i(\hat{X}_l)|\Big/\sum_{i=1}^{c}|y_i(\hat{X}_l)| \tag{8}$$

利用下面的公式得到：

$$p^i_{j1}=\sum_{l=1}^{L}\overline{\mu_{il}}x_{j1}\Big/\sum_{l=1}^{L}\overline{\mu_{il}} \tag{9}$$

$$p^i_{j2}=\sqrt{2\sum_{l=1}^{L}\overline{\mu_{il}}(x_{j1})\Big/\sum_{l=1}^{L}\overline{\mu_{il}}} \tag{10}$$

3）引入训练样本对，获得网络输出及训练误差：

$$E=\frac{1}{2}\sum_{l=1}^{L}(y_l-\hat{y}_l)^2$$

假如 E 满足精度要求直接跳转至 Step5，否则继续；

4）训练网络。调整网络参数 p^i_{j1}，p^i_{j2}，$\omega_{mi,bik}$ 以及 b_{ik}，按照 BP 网络算法将其调整如下：

$$p^i_{j1}=p^i_{j1}+\Delta p^{i(new)}_{j1} \tag{11}$$

$$p^i_{j2}=p^i_{j2}+\Delta p^{i(new)}_{j2} \tag{12}$$

$$b_{ik}=b_{ik}+\Delta b^{(new)}_{ik} \tag{13}$$

$$\Delta p^{i(new)}_{j1}=-\eta\frac{\partial E}{\partial\mu_i}\frac{\partial\mu_i}{\partial p^i_{j1}}+\alpha\Delta p^{i(old)}_{j1} \tag{14}$$

$$\Delta p^{i(new)}_{j2}=-\eta\frac{\partial E}{\partial\mu_i}\frac{\partial\mu_i}{\partial p^i_{j2}}+\alpha\Delta p^{i(old)}_{j2} \tag{15}$$

$$\Delta\omega^{(new)}_{m_i,n_k}=-\eta\frac{\partial E}{\partial\hat{y}_i}\frac{\partial\hat{y}_i}{\partial\omega_{m_i,n_k}}+\alpha\Delta\omega^{(old)}_{m_i,n_k} \tag{16}$$

$$\Delta b^{(new)}_{ik}=-\eta\frac{\partial E}{\partial\hat{y}_i}\frac{\partial\hat{y}_i}{\partial b_{ik}}+\alpha\Delta b^{(old)}_{ik} \tag{17}$$

式中：η 和 α 分别是惯性常数、学习速率，然后跳转至 3）。

5）获得调整后的网络参数及权重 p^i_{j1}，p^i_{j2}，$\omega_{mi,bik}$ 以及 b_{ik}。

学习算法流程见图 2：

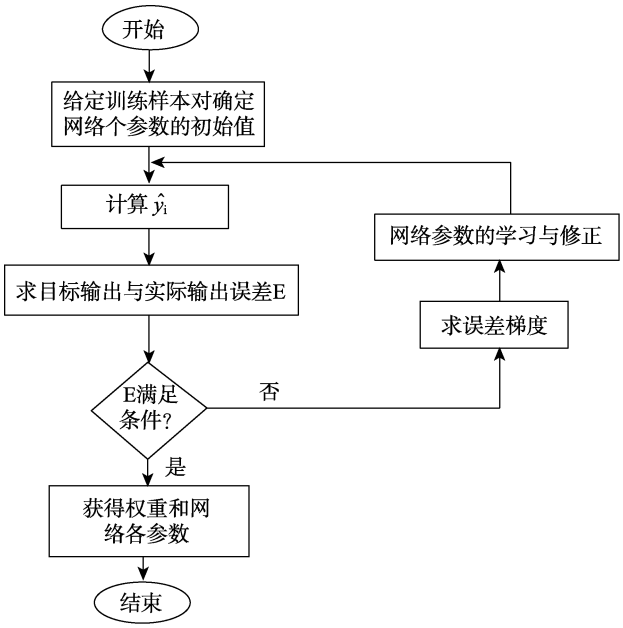

图 2 模糊小波网络算法学习流程图

Fig.2 Flow chart of fuzzy wavelet network algorithm learning

4 建立模型与结果分析

模糊小波网络对工业设计中的非线性系统建模具有极强的辨识精度、控制效果，模糊小波网络应用

于除冰机器人外观设计评价方案的最优方案选择之中，能较好地解决传统模糊综合评判方法中人为确定权重以及单因素评判矩阵主观因素的影响。

4.1　建立评价指标体系

通过互联网、书籍、除冰机器人市场调研等渠道收集设计样本，并与机器人技术研究者及产品外观设计师进行访谈，确定了 4 个具有代表性的除冰机器人外观设计方案，见图 3，采用模糊小波网络和专家打分对这 4 个方案进行综合评价。

对于除冰飞行器外观设计方案我们从实用性、经济性、美观性、安全性、创新性、战略发展 6 个方面进行综合评价，选择人机交互性、控制性能、除冰作业完成度、生产及使用成本等 14 个评价指标组成评价指标体系[14]，具体评价指标见表 1。

4.2　实例计算

1）基于表 1 中的除冰机器人外观设计综合评价指标，我们采用专家评判方法对现有的除冰机器人外观设计方案进行评价，得到其主观综合评价得分见表 2。

a 方案1　　b 方案2

c 方案3　　d 方案4

图 3　除冰机器人外观设计的 4 种方案

Fig.3 Four schemes for the appearance design of deicing robot

表 1　除冰机器人外观设计的综合评价指标

Tab.1 Comprehensive evaluation index of appearance design of deicing robot

评价准则	评价指标
实用性	人机交互度
	控制性能
	移动灵活性
	除冰作业完成度
	监测能力
经济性	生产成本
	使用成本
美观性	造型
	色彩
安全性	可靠性
创新性	原理创新性
	结构创新性
战略发展	利用协调度
	开发价值

表 2　专家打分统计表

Tab.2 Expert scoring statistical table

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
人机交互度	94.8	93.1	93.3	92.9
控制性能	95.4	91.7	95.7	94.2
移动灵活性	97.3	97.9	96.4	95.6
除冰作业完成度	98.1	94.7	97.8	96.3
监测能力	95.7	95.9	93.1	96.7
生产成本	97.9	98.2	96.1	94.3
使用成本	96.2	95.9	95.3	97.1
造型	98.4	97.9	97.3	99.0
色彩	95.9	96.4	95.2	96.1
可靠性	99.3	98.1	97.4	98.8
原理创新性	98.9	95.6	93.9	96.1
结构创新性	97.9	97.2	95.7	96.5
利用协调度	96.4	96.7	93.9	97.1
开发价值	99.8	98.1	97.6	95.4

2）根据表 2 和式 7 得标准化决策矩阵。

$$R=\begin{bmatrix}0.94 & 0.77 & 0.42 & 0.57 & 0.89 & 1.00 & 0.80 & 0.43 & 1.00 & 0.50 & 0.50 & 1.00 & 0.50 & 1.00\\ 0.44 & 1.00 & 0 & 0.71 & 0.88 & 1.00 & 0 & 0 & 0.50 & 1.00 & 0 & 0.50 & 0.50 & 0\\ 0 & 0 & 0.29 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.40 & 0.29 & 0 & 0.50 & 0.50 & 0 & 0 & 1.00\\ 1.00 & 0.71 & 1.00 & 0.88 & 0 & 0.50 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.88\end{bmatrix}$$

3）获得专家打分综合矩阵。

$$\omega_1=\begin{bmatrix}0.080 & 0.043 & 0.074 & 0.052 & 0.081 & 0.053 & 0.076 & 0.086 & 0.105 & 0.088 & 0.066 & 0.056 & 0.070 & 0.070\end{bmatrix}$$

4）模糊小波网络初始化。

通过对评价指标的频谱分析和小波变换系数的大小来决定选取小波基函数的个数，其中 6 个子小波网络的小波基函数分别是 16，14，14，10，6，8。学习训练阶段来调整小波基函数，然后利用 Traingd 训练网络，其中学习速率 $\eta=0.25$，惯性常数 $\alpha=0.6$,学习误差 E=0.00005，m_i 取 9 个值，使用 C++和 MATLAB 作为工具。

5）由模糊小波网络获得客观评价矩阵。

$$\omega_2=\begin{bmatrix}0.074 & 0.073 & 0.064 & 0.069 & 0.084 & 0.080 & 0.076 & 0.070 & 0.064 & 0.076 & 0.065 & 0.065 & 0.076 & 0.065\end{bmatrix}$$

6）确定综合评价矩阵。

$$\omega=\begin{bmatrix}0.083 & 0.044 & 0.066 & 0.050 & 0.095 & 0.060 & 0.081 & 0.084 & 0.094 & 0.094 & 0.060 & 0.051 & 0.075 & 0.063\end{bmatrix}$$

7）获得加权标准决策矩阵。

$$P=\begin{bmatrix}0.077 & 0.034 & 0.027 & 0.029 & 0.095 & 0.053 & 0.081 & 0.067 & 0.040 & 0.094 & 0.030 & 0.025 & 0.075 & 0.032\\ 0.036 & 0.044 & 0 & 0.036 & 0 & 0.052 & 0.081 & 0 & 0 & 0.047 & 0.060 & 0 & 0.037 & 0.032\\ 0 & 0 & 0.019 & 0.050 & 0.095 & 0.060 & 0.081 & 0.034 & 0.028 & 0 & 0.030 & 0.025 & 0 & 0\\ 0.083 & 0.031 & 0.66 & 0 & 0.083 & 0 & 0.041 & 0.084 & 0.094 & 0.094 & 0 & 0.051 & 0.075 & 0.063\end{bmatrix}$$

8）确定正理想方案和负理想方案。

$$A^+=\{0.083 \quad 0.044 \quad 0.066 \quad 0.050 \quad 0.095 \quad 0.060 \quad 0.081 \quad 0.084 \quad 0.094 \quad 0.094 \quad 0.060 \quad 0.051 \quad 0.075 \quad 0.063\}$$

$$A^-=\{0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\}$$

9）计算距离和相对贴近度。

$S_1^+=0.089$；$S_2^+=0.197$；$S_3^+=0.195$；$S_4^+=0.108$，

$S_1^-=0.224$；$S_2^-=0.149$；$S_3^-=0.160$；$S_4^-=0.240$，

e_1=0.717；$e_2=0.430$；$e_3=0.451$；$e_4=0.690$。

由以上结果得：$e_1>e_2>e_3>e_4$，综合权威专家打分评价结果和模糊小波网络客观评价结果，减小了使用单一评价方法带来的误差，得出方案 1 为最优除冰机器人外观设计方案。

5 结语

经实例计算，方案 1 为最佳设计方案。可见模糊小波网络综合评价具有较好的通用性，应用模糊小波网络的除冰机器人外观设计评价模型经过 MATLAB 仿真计算出各指标之间的客观权重关系，并结合权威专家的评价打分，能够客观、全面的对除冰机器人外观设计做出评价，从而达到优化的效果，提高设计师选择最佳方案的准确度，进而提升产品设计水平。

参考文献：

[1] 张文亮. 湖南电网 2008 年冰雪灾害调研分析[J]. 电网技术, 2008, 32:1—5.
ZHANG Wen-liangi. Hunan Power Grid in 2008 Snow and Ice Disaster Investigation and Analysis[J]. Power Grid Technology, 2008, 32: 1—5.

[2] 苑吉河. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高电压技术, 2004, 30:6—9.
YUAN Ji-he. Domestic and Foreign Research Status of Transmission Line Wire Icing[J]. High Voltage Technology, 2004, 30: 6—9.

[3] 饶宏. 南方电网直流融冰技术研究[J]. 南方电网技术, 2008(2): 148—152.
RAO Hong. Study on DC melting technology of China Southern Power Grid[J]. South China Power Grid Technology, 2008(2): 148—152.

[4] 魏长增. 工业设计与产品语义学[J]. 包装工程, 2003, 24(2): 81—83.
WEI Chang-zeng. Industrial Design and Product Semantics[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(2): 81—83.

[5] 窦金花, 覃京燕. 基于情境感知多维数据可视化的产品服务系统创新设计研究[J]. 包装工程, 2017, 38(2): 87—91.
DOU Jin-hua, QIN Jing-yan. Research on Innovation Design of Product Service System Based on Context Aware Multidimensional data Visualization[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(2): 87—91.

[6] 金海明. 工业产品造型设计评价的探讨[J]. 包装工程, 2007, 28(7): 151—152.
JIN Hai-ming. Discussion on Evaluation of Modeling Design of Industrial Products[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(7): 151—152.

[7] 吴雪松. 诠释新产品概念的设计方法研究[J]. 包装工

程, 2010, 31(18): 34—37.
WU Xue-song. A study of Design Methods for Interpreting New Product Concepts[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(18): 34—37.

[8] 吴翔. 基于小波网络的机械产品性能模糊综合评价[J]. 武汉理工大学学报, 2005(5):788—790.
WU Xiang. Fuzzy Comprehensive Evaluation of Mechanical Product Performance Based on Wavelet Networks[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005(5): 788—790.

[9] 胡玉玲. 基于模糊神经网络的动态非线性系统辨识研究[J]. 系统仿真学报, 2007. 19: 560—567.
HU Yu-ling. Study on Dynamic Nonlinear System Identification Based on Fuzzy Neural Network[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19: 560—567

[10] 王新. 模糊小波神经网络的研究及其应用[J]. 工矿自动化, 2008(6): 143—146.
WANG Xin. Fuzzy Wavelet Neural Network Research and Its Application[J]. Mining Industry Automation, 2008(6): 143—146.

[11] 李永明. 模糊系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Li Yong-ming. Fuzzy System Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2005.

[12] 王国俊. 非经典数理逻辑与近似推理[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
WANG Guo-jun. Nonclassical Mathematical Logic and Approximate Reasoning[M]. Beijing: Science Press, 2000.

[13] 李俊民. 一类非线性动态系统的自适应模糊小波神经网络控制[J]. 工程数学学报, 2006, 23: 37—44.
LI Jun-min. Adaptive Fuzzy Wavelet Network Control for a Class of Nonlinear Dynamic Systems[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2006, 23: 37—44.

[14] 张利霞. 架空电缆除冰机器人的设计[J]. 包装工程, 2013, 34(12): 38—41.
ZHANG Li-xia. Design of Overhead Cable Deicing Robot[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(12): 38—41.