

# 基于 QPSO 算法优化的区间二型模糊逻辑系统预测

陈 阳,王大志,宁 武

( 东北大学 信息科学与工程学院,辽宁 沈阳 110819 )

摘 要:设计了一类区间二型模糊逻辑系统,研究基于历史数据的预测问题.在区间二型模糊逻辑系统设计中,前件、后件、输入测量区间二型模糊的主隶属函数均选择成具有不确定标准偏差的高斯型二型隶属函数.量子粒子群优化( QPSO )算法用来调整所设计的区间二型模糊逻辑系统参数.部分欧洲智能技术网络( EUNITE )的负荷竞赛数据和美国田纳西州( WTI )原油价格数据用来测试所提出的模糊逻辑系统预测方法.定义综合评价误差和作为模糊逻辑系统的预测性能指标.仿真研究表明,所提出的区间二型模糊逻辑系统预测方法在收敛性和稳定性上均优于相应的一型模糊逻辑系统.

关 键 词:区间二型模糊逻辑系统;区间二型模糊集;量子粒子群优化算法;仿真;收敛性

中图分类号: TP 182 ; TP 11 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026( 2016 )10-1379-05

## Forecasting by Interval Type-2 Fuzzy Logic System Optimized with QPSO Algorithm

CHEN Yang , WANG Da-zhi , NING Wu

( School of Information Sciences & Engineering , Northeastern University , Shenyang 110819 , China.  
Corresponding author : CHEN Yang , E-mail : chenyanghanyun@163.com )

**Abstract :** A kind of interval type-2 fuzzy logic system was designed to investigate forecasting problems based on the historical data. In the process of designing the interval type-2 fuzzy logic system , the antecedent , consequent and input measurement primary membership functions of interval type-2 fuzzy sets were all Gaussian type-2 membership functions with uncertain standard deviation. The quantum particle swarm optimization algorithm was used to tune the parameters of the designed interval type-2 fuzzy logic system. Part of the load competition data of European network on intelligent technologies and the price data of West Texas Intermediate crude oil were used to test the proposed fuzzy logic system forecasting method. Comprehensive evaluation error sum was defined as the forecasting performance index of fuzzy logic system. Simulation studies showed that the proposed interval type-2 fuzzy logic system forecasting methods outperform their corresponding type-1 fuzzy logic system on convergence and stability.

**Key words :** interval type-2 fuzzy logic system ; interval type-2 fuzzy set ; quantum particle swarm optimization algorithm ; simulation ; convergence

预测活动在日常生活中起着至关重要的作用.系统运营商和决策者们需要通过精确预测来完成机组组合、经济负荷分配、电力系统安全及备用电源测定等任务.公共事业需通过预测来调整他们所制定的价格政策,而消费者们则需要利用预测手段来转换电力损耗时间以躲避高电价.

传统的时间序列预测方法<sup>[1]</sup>被广泛地应用,这些模型的特点是简单且计算量小.然而,这些线性模型限制了它们在非线性和季节性模式上的应用.为了解决带有不确定性的信息,开发新的方法是解决实际问题的关键.近几年,从人工智能领域获得的先进的非线性方法被广泛应用于预测.这

些模型包括神经网络<sup>[2]</sup>和模糊逻辑系统<sup>[3]</sup>. 最近对负荷预测的研究报告说明:区间二型模糊逻辑系统,比如神经网络等传统的非参数方法具有更加优良的逼近能力. 最近的理论和实际研究也证实了区间二型模糊逻辑系统比相应的一型模糊逻辑系统<sup>[4]</sup>更能恰当地处理不确定性. 随着模糊逻辑系统理论<sup>[5]</sup>的丰富与发展,基于区间二型模糊逻辑系统的预测应用会更加广泛.

本文设计了一类基于高斯型区间二型隶属函数的区间二型模糊逻辑系统,用 QPSO 算法优化所设计系统的参数,用所设计的系统进行基于实际历史数据的预测问题研究. 仿真和分析结果表明利用该系统进行预测研究的有效性和可行性.

### 1 设计区间二型模糊逻辑系统

区间二型模糊逻辑系统由模糊规则来描述. 第  $l$  条规则由  $\tilde{R}^l$  表示如下:

$\tilde{R}^l$ : 如果  $x_1$  是  $\tilde{F}_1^l$  且  $x_2$  是  $\tilde{F}_2^l$  且...且  $x_p$  是  $\tilde{F}_p^l$ , 那么

$$Y^l = [\underline{y}^l \ \bar{y}^l] \quad l = 1 \ 2 \ \dots \ M. \tag{1}$$

其中  $\underline{y}^l$  和  $\bar{y}^l$  是后件部分的上级和下级系数;  $Y^l$  是区间二型后件模糊集的质心区间集;  $\tilde{F}_i^l$  ( $i = 1, 2, \dots, p$ ) 是第  $i$  个前件区间二型模糊集.

第  $l$  条规则的激发区间是一个一型模糊集,  $F^l = [\underline{f}^l \ \bar{f}^l]$ , 当采用非单点模糊化时,

$$\begin{aligned} \underline{f}^l(x) &= T_{i=1, \dots, l}^p \underline{f}_i^l(x_i) = T_{i=1}^p \underline{\mu}_{\tilde{F}_i^l}(\underline{x}_i^l) = \\ &= T_{i=1}^p [\underline{\mu}_{\tilde{X}_i^l}(\underline{x}_i^l) \wedge \underline{\mu}_{\tilde{F}_i^l}(\underline{x}_i^l)] \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \bar{f}^l(x) &= T_{i=1, \dots, l}^p \bar{f}_i^l(x_i) = T_{i=1}^p \bar{\mu}_{\tilde{F}_i^l}(\bar{x}_i^l) = \\ &= T_{i=1}^p [\bar{\mu}_{\tilde{X}_i^l}(\bar{x}_i^l) \wedge \bar{\mu}_{\tilde{F}_i^l}(\bar{x}_i^l)] \end{aligned} \tag{3}$$

在本文中,将每个前件的主隶属函数取成具有不确定标准偏差高斯型隶属函数,即

$$\mu_{\tilde{F}_i^l}(x_i) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - m_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right\} \quad \sigma_i^l \in [\sigma_{i1}^l \ \sigma_{i2}^l]. \tag{4}$$

将每个输入主隶属函数也取成具有不确定标准偏差高斯型隶属函数,即

$$\mu_{\tilde{X}_i^l}(x_i) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - x_i^l}{\sigma_i}\right)^2\right\} \quad \sigma_i \in [\sigma_{i1} \ \sigma_{i2}]. \tag{5}$$

通过结合  $M$  条模糊规则,区间二型模糊逻辑系统的输出区间集为

$$\begin{aligned} Y = [\underline{y}_l \ \bar{y}_r] &= \int_{y^1 \in [\underline{y}^1 \ \bar{y}^1]} \dots \int_{y^M \in [\underline{y}^M \ \bar{y}^M]} \times \\ &\times \frac{\sum_{l=1}^M \underline{f}^l y^l}{\sum_{l=1}^M \underline{f}^l} \quad (6) \end{aligned}$$

两端点  $y_l$  和  $y_r$  可由 Karnik - Mendel (KM<sup>[6]</sup>)等降型算法<sup>[7]</sup>计算. 最终输出取两端点的算术平均值.

### 2 QPSO 算法优化区间二型模糊逻辑系统参数

QPSO 算法是一种不必计算导数的全局收敛<sup>[8]</sup>迭代搜索算法. 一般来说,它优于原始的 PSO 算法<sup>[9]</sup>且有更少的参数需要调整. 每个粒子代表一个优化问题可能的解. 通过更新每个粒子的位置,获得当前所有粒子的个体最优位置和由所有粒子创建的全局最优位置.

在设计过程中,通常创建一个目标函数  $J(\varphi)$ ,它取决于设计参数  $\varphi$ .

本文假设  $\varphi$  有  $N_\varphi$  个元素. QPSO 算法优化  $\varphi$  基于准则  $\min_{\varphi_m} J(\varphi_m)$ . 第  $m$  ( $m = 1 \ 2 \ \dots \ N_m$ ) 个种群的当前位置(向量)定义为

$$\varphi_m = \text{col}(\varphi_{m,1} \ \varphi_{m,2} \ \dots \ \varphi_{m,N_\varphi}). \tag{7}$$

一个最优位置种群  $p_m = \text{col}(p_{m,1} \ p_{m,2} \ \dots \ p_{m,N_\varphi})$  计算如下:

$$\begin{aligned} p_{m,j}(g+1) &= \eta \times p_{m,j}(g) + \\ &+ (1-\eta) \times p_{\text{gbest},j}(g). \end{aligned} \tag{8}$$

其中  $j = 1 \ 2 \ \dots \ N_\varphi$ ;  $g = 1 \ 2 \ \dots \ G-1$  为迭代次数;  $p_{m,j}(1)$  由  $\varphi_{m,j}(1)$  初始化;  $\eta$  是一个在  $(0, 1]$  内均匀分布的随机变量;  $p_{\text{gbest},j}$  表示整个种群在历史中所创建的全局最优位置 ( $m = 1 \ 2 \ \dots \ N_m$ ) 即

$$p_{\text{gbest}}(g) = \arg_{p_m(g)} \min_{m=1 \ 2 \ \dots \ N_m} J(p_m(g)). \tag{9}$$

将种群最优位置平均数  $m(g)$  引入到 QPSO 算法中,即

$$m(g) = \frac{1}{N_m} \sum_{m=1}^{N_m} p_m(g). \tag{10}$$

每次迭代结束后,每个粒子获得一个新的位置,即

$$\begin{aligned} \varphi_{m,j}(g+1) &= p_{m,j}(g) \pm \\ &\pm \beta |m(g) - \varphi_{m,j}(g)| \ln(1/\rho). \end{aligned} \tag{11}$$

其中  $\beta$  称为收缩系数,用其来调整控制算法的收敛速度;  $\rho$  是一个在  $(0, 1]$  内均匀分布的随机变量,加号或减号可随机选择来产生粒子的新位置.

### 3 仿真研究

#### 3.1 数据

在本节中,基于欧洲智能技术网络(EUNITE)的负荷竞赛数据(从 1997 年 1 月 1 日到 1998 年 12

月 9 日凌晨 3 点 ) 和美国田纳西州( WTI )原油价格数据( 从 2011 年 1 月 1 日到 2011 年 12 月 30 日 ) 的两个仿真例子阐述通过所设计和优化的区间二型模糊逻辑系统预测研究的有效性.

3.2 仿真

例 1 首先 , 考虑 EUNITE 负荷竞赛数据 ( 从 1997 年 1 月 1 日到 1998 年 12 月 9 日凌晨 3 点 ) , 所有的设计基于 708 个噪音数据点  $x(1)$  ,  $x(2)$  , ... ,  $x(708)$  , 仿真结果如图 1 所示.

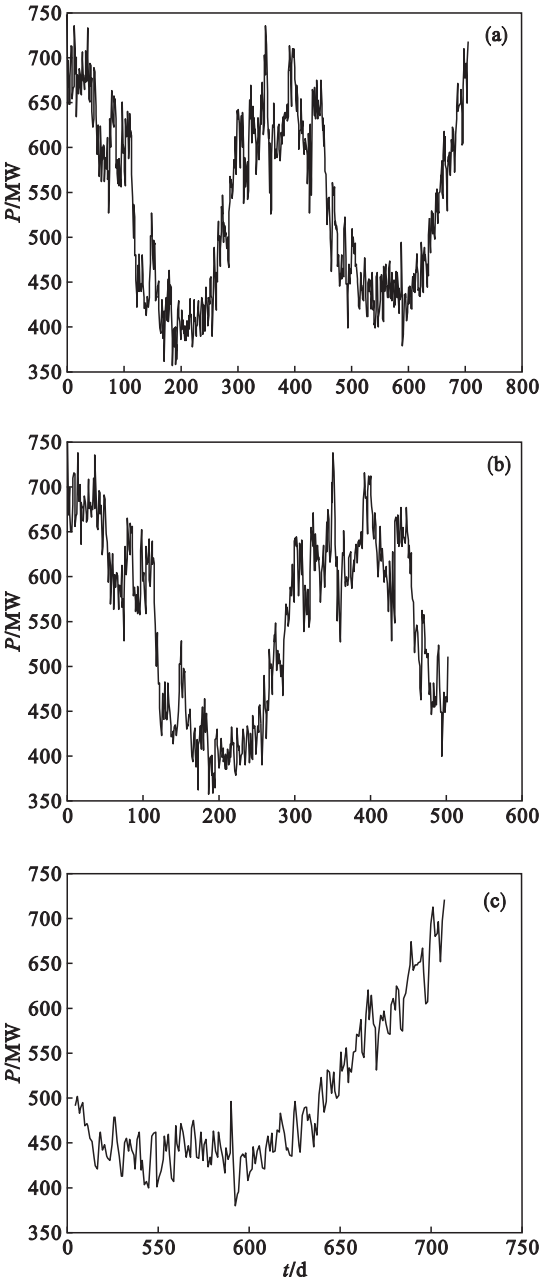


图 1 功率与时间的关系

Fig. 1 Relation between power and time

( a )—EUNITE 负荷竞赛数据 ; ( b )—训练通过  $x(1)$  ,  $x(2)$  , ... ,  $x(504)$  中 500 个输入输出数据对完成 ;  
( c )—测试通过  $x(505)$  ,  $x(506)$  , ... ,  $x(708)$  中 200 个输入输出数据对完成.

定义如下的评价指标来衡量模糊逻辑系统的预测效果 , 称它为综合评价误差和 ( comprehensive evaluation error sum , CEES ) :

$$CEES = \frac{1}{2} \sum_{i=D-p+1}^{N-2p} [y^{(i)} - f(x^{(i)})]^2. \quad (12)$$

其中 :  $N$  为全部数据点个数 ;  $D$  为训练数据点个数 ;  $p$  为模糊规则前件个数 ;  $f(x^{(i)})$  为模糊逻辑系统预测输出 ;  $y^{(i)}$  为实际输出.

采用区间二型非单点模糊逻辑系统、单点一型模糊逻辑系统及非单点一型模糊逻辑系统进行仿真研究. 将“  $T$  ”取为乘积  $t$ - 范数 , 选择 30 个种群  $\beta=2.1$ .

训练和测试经过 1 000 次迭代运算. 在每次迭代后 , 测试数据被用来检验三种模糊逻辑系统的预测评价指标 ( CEES ). 区间二型模糊逻辑系统 ( FLS ) 和另两种一型 FLS ( 单点一型 FLS 和非单点一型 FLS ) 的 CEES 迭代次数仿真图和预测结果 ( 1 000 次迭代后 ) 仿真图分别如图 2 和图 3 所示.

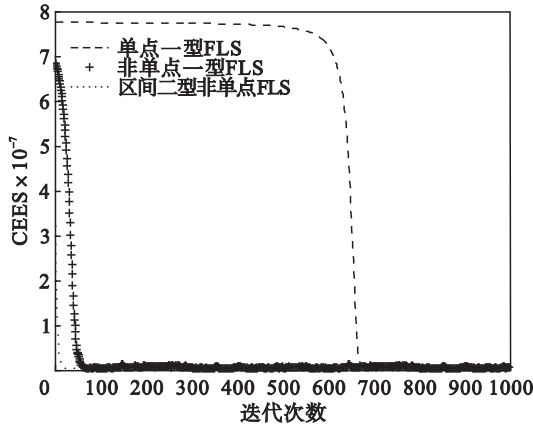


图 2 EUNITE 负荷竞赛数据综合评价误差与迭代次数仿真图

Fig. 2 Simulation graphs of iterations and CEES for EUNITE load competition data

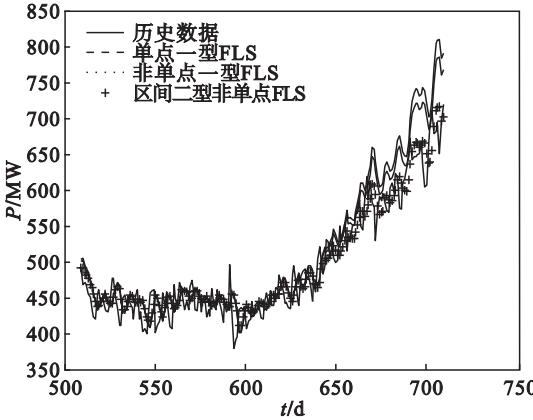


图 3 EUNITE 预测结果仿真图( 经过 1 000 次迭代后 )

Fig. 3 Simulation graphs of forecasting results for EUNITE( after 1 000 times of iteration )

例2 考虑美国 WTI 原油价格数据(从 2011 年 1 月 3 日到 2011 年 12 月 30 日,节假日除外)。所有的设计是基于 260 个噪音数据点  $x'(1), x'(2), \dots, x'(260)$  (注:为了区别前面的数据点,用“一撇”表示)。

QPSO 算法用来优化模糊逻辑系统参数,每 4 个输出被注入模糊逻辑预测器,产生一个输出。

在第 2 个例子中,仍然将“ $T$ ”取为乘积  $t$ -范数,种群数为 30  $\beta=2.1$ 。仿真结果如图 4 所示。

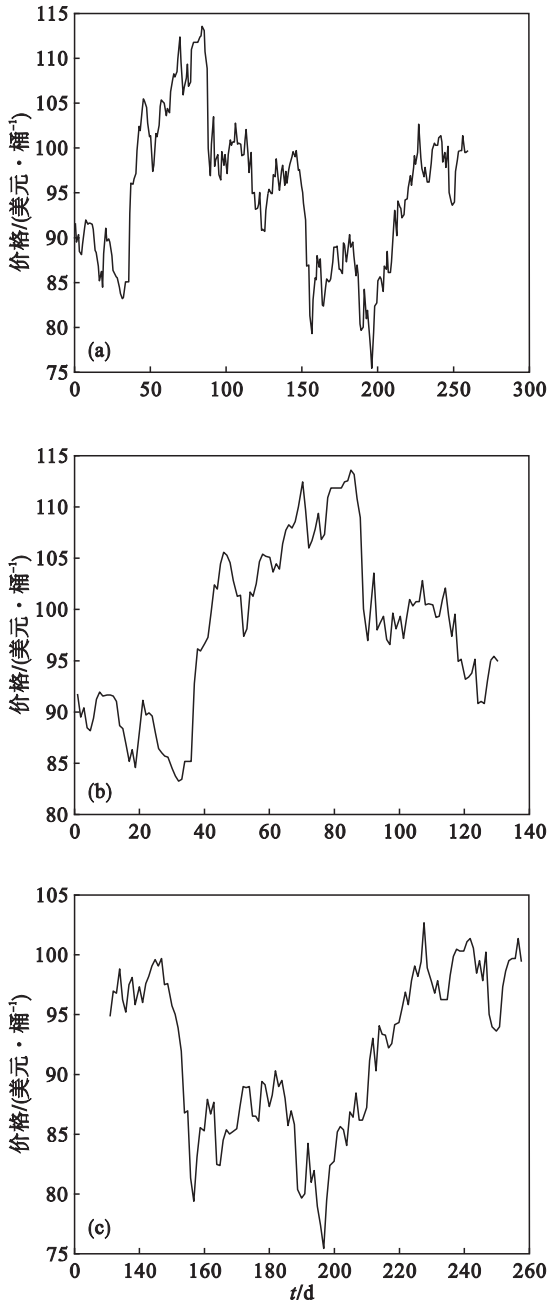


图 4 产量与时间关系

Fig. 4 Relation between output and time

(a)—WTI 原油价格数据;(b)—训练通过  $x'(1), x'(2), \dots, x'(130)$  中 126 个输入输出数据对完成;  
(c)—测试通过  $x'(131), x'(132), \dots, x'(260)$  中 126 个输入输出数据对完成。

经过 1 000 次训练和测试迭代运算,三种模糊逻辑系统的 CEES 迭代次数仿真图和预测结果仿真图分别如图 5 和 6 所示。

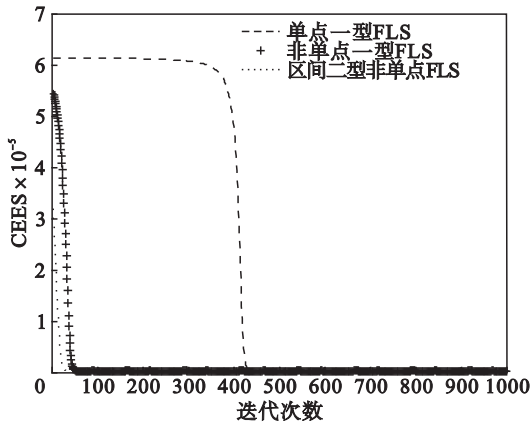


图 5 WTI 原油价格综合评价误差和迭代次数仿真图  
Fig. 5 Simulation graphs of iterations and CEES for the price of WTI crude oil

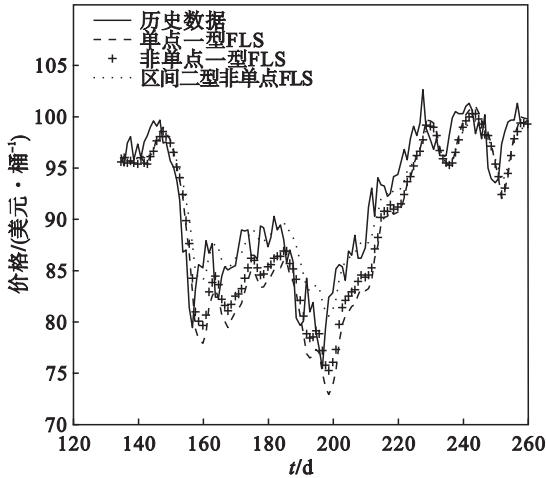


图 6 WTI 原油价格预测结果仿真图(经过 1 000 次迭代后)  
Fig. 6 Simulation graphs of forecasting results for price of WTI crude oil (after 1 000 times of iteration)

3.3 讨论

由例 1 和例 2 知,经过 QPSO 算法优化的三类模糊逻辑系统的 CEES 几乎都是先单调递减,然后达到相对稳定的状态,区间二型非单点 FLS 的收敛速度最快,稳定性最好。

从以上分析可知,利用 QPSO 算法优化的区间二型模糊逻辑系统在预测领域的应用比相应的一型模糊逻辑系统更具有有效性和可行性。但区间二型模糊逻辑系统的设计<sup>[10-12]</sup>更加复杂,增加了应用难度。

4 结 论

本文设计了一类区间二型非单点模糊逻辑系  
(下转第 1402 页)