

模糊系统结合蚁群算法的金具温升建模

王刚¹,谭盛武¹,林生军¹,何子博²,常林晶¹,杨国华¹

(1. 平高集团有限公司,河南 平顶山 467001;2. 西安工业大学 材料与化工学院,陕西 西安 710021)

摘要:为了得到准确可靠的阀厅连接金具温升模型,运用模糊系统结合蚁群算法的方法进行建模。在分析基本蚁群算法与梯度下降法优缺点的基础上,将两种方法结合形成改进蚁群算法,即在基本蚁群算法基础上应用梯度下降算法。通过试验得到的训练数据分别用基本蚁群算法、梯度下降算法、改进蚁群算法训练模糊系统,改进蚁群算法的收敛效果优于其他两种方法;通过试验得到的测试数据对4种方法所得的模型进行测试,由改进蚁群算法训练模糊系统所得模型的测试效果是最好的。结果表明,若能通过试验得到足量训练数据,用改进蚁群算法训练模糊系统的方法对阀厅连接金具的温升进行建模是可行的。

关键词: 阀厅连接金具;模糊系统;基本蚁群算法;梯度下降法;改进蚁群算法

中图分类号:TM11

文献标志码:A

Modeling the Rise of Temperature of Fitting by Combining Fuzzy System and Ant Colony Algorithm

WANG Gang¹, TAN Shengwu¹, LIN Shengjun¹, HE Zibo², CHANG Linjing¹, YANG Guohua¹

(1. Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China;

2. School of Materials and Chemical Eng. of Xi'an Technological Univ., Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to get an accurate and reliable model of the rise of temperature of connection fitting in value hall of UHVDC, a method of fuzzy system combined ant colony algorithm was used. After analyzing the characteristics of basic ant colony algorithm and gradient descent algorithm, an improved ant colony algorithm was put forward by combining basic ant colony algorithm and gradient descent algorithm, in which gradient descent algorithm was processed after basic ant colony algorithm. Through training data obtained from experiment, the fuzzy system was trained by basic ant colony algorithm, gradient descent algorithm and improved ant colony algorithm respectively. The convergence effect of improved ant colony algorithm was better than that of other two algorithms. All models were tested by testing data obtained from experiment, and the prediction effect of the fuzzy system trained by improved ant colony algorithm was best of all models. The prediction results showed that if training data obtained from experiment was enough, the fuzzy system trained by improved ant colony algorithm was reliable to predict the rise of temperature of connection fitting.

Key words: connection fitting in value hall; fuzzy system; basic ant colony algorithm; gradient descent algorithm; improved ant colony algorithm

电力设备的温升指的是稳定后设备的温度与环境温度的差值。电力设备的温升过高危害较大,不仅会引起设备电阻增大导致能源损耗及设备的老化,严重时可能引起材料软化甚至爆炸,所以必须对电力设备的温升进行建模。电力设备温升的建模方

法主要有理论法和数值法。电力设备的温升与电流强度、环境温度等存在着复杂的非线性关系,某些影响因素之间存在着耦合效应,很多量具有不确定性,这些导致电力设备的温升与各影响因素之间的关系很难用确切的函数表达式描述。理论法与数值法往

收稿日期:2015-07-27

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2014AA051802);国家电网科技资助项目(SGNXJX00YJJS1400105)

作者简介:王刚(1980—),男,高级工程师,博士。研究方向:产品设计仿真。E-mail:wanggang2800@163.com

网络出版时间:2016-9-18 11:48:39

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20160918.1148.002.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

往需要对研究对象进行简化,并做一定假设,这些都使由理论与数值法所得模型的精度与应用难以满足工程要求^[1-3]。中国电网向特高压、大容量、高可靠性方向发展。直流特高压输电具有输送容量大,损耗相对较小,送电距离远等优点,符合未来中国电网发展方向,是中国电力远距离大规模输送的较好选择^[4-9]。换流站阀厅是直流特高压输电工程的重要组成部分,在已运行的换流站中,阀厅连接金具温升过高是个亟待解决的难题,若能得到合理的阀厅连接金具温升模型,对控制阀厅连接金具温升具有重要意义。近年来,智能方法成为电力设备温升建模的重要研究方向。在智能方法中,人们使用较多的是神经网络,利用神经网络的数据提取能力对温升进行建模。陈实等^[10]通过神经网络对锂电池表面温度进行了建模。陈伟根等^[1,11]分别运用回归神经网络和支持向量机对变压器绕组热点温度进行了建模。李孟励^[12]运用 BP 神经网络预测了变压器绕组热点温度。苏小平^[2]提出了基于神经网络的变压器绕组热点温度计算方法。滕黎^[3]运用支持向量机神经网络对变压器热点温度进行了建模并预测。He^[13]运用神经网络对变压器顶层油温进行了预测。Pradhan^[14]通过神经网络对变压器的温度进行了监测。Assuncao^[15]通过神经网络对变压器顶层油温进行了建模和仿真。

文献[10-15]所用的神经网络方法只能提取数据信息,无法利用专家经验,人工智能中的模糊系统不仅可以提取数据信息,还可以结合积累的专家经验。本文将梯度算法与蚁群算法结合得到改进算法,利用积累的专家经验及试验所得数据通过模糊系统结合改进算法的方法对直流特高压阀厅连接金具的温升进行建模,并检验所得模型可靠性,检验结果证明了所提方法的有效性。

1 模糊系统结合蚁群算法的建模方法

本文的模糊系统^[16]如下:

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}_l^l \left[\prod_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right) \right]}{\sum_{l=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right) \right)} \quad (1)$$

式中, M 为模糊规则数量, n 为条件数量, \bar{x}_i^l 为 IF 部分隶属度函数中心, σ_i^l 代表 IF 部分隶属度函数的宽度, \bar{y}_i^l 为 THEN 部分模糊集中心。

误差为:

$$e = \sum_{p=1}^N \frac{1}{2} [f(x_0^p) - y_0^p]^2 \quad (2)$$

式中, N 为训练数据的数量。

设计模糊系统的目标是减小误差 e , 被调整的参数为模糊规则 THEN 部分模糊集中心 \bar{y}^l , 运用梯度下降算法调整 \bar{y}^l , 算法过程如下:

$$\bar{y}^l(q+1) = \bar{y}^l(q) - \alpha \frac{\partial e}{\partial \bar{y}^l} \quad (3)$$

式中: $l = 1, 2, \dots, M; q = 0, 1, 2, \dots; \alpha$ 为步长。

设

$$\begin{cases} f = \frac{a}{b}, & a = \sum_{l=1}^M \bar{y}^l z^l, & b = \sum_{l=1}^M z^l; \\ z^l = \prod_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right) \end{cases}$$

式(2)对 \bar{y}^l 求偏导:

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{y}^l} = \sum_{i=1}^N (f - y) \frac{\partial f}{\partial a} \frac{\partial a}{\partial \bar{y}^l} = \sum_{i=1}^N (f - y) \frac{1}{b} z^l \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得到 \bar{y}^l 的学习算法为:

$$\bar{y}^l(q+1) = \bar{y}^l(q) - \alpha \sum_{i=1}^N (f - y) \frac{1}{b} z^l \quad (5)$$

蚁群算法是根据蚂蚁觅食的群体行为而设计的一种全局优化算法,具有较强的通用性和鲁棒性,已在通信、水利等领域得到了广泛应用^[17]。蚁群算法为每只蚂蚁设置了一个禁忌表(*tabu*),用来存放蚂蚁不能再过的顶点,当一只蚂蚁 t 时刻从顶点 v_i 向顶点 v_j 转移时,按式(6)的概率选择目标:

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \times [\mu_{ij}(t)]^\beta}{\sum [\tau_{ij}(t)]^\alpha \times [\mu_{ij}(t)]^\beta}, & v_j \notin \text{tabu}_k; \\ 0, & v_j \in \text{tabu}_k \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻 v_i 到 v_j 上的信息素量, $\mu_{ij}(t)$ 为启发函数, α 为信息启发式因子, β 为期望启发式因子。

信息素按式(7)进行更新:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (7)$$

式中: ρ 为信息素挥发系数, $0 \leq \rho \leq 1$; $\Delta\tau_{ij}(t)$ 为第 t 次蚂蚁留在 v_i 到 v_j 上的信息素量, $\Delta\tau_{ij}(t) = 0$ 。

蚁群算法的全局搜索能力较强,局部搜索能力较弱,而梯度下降算法^[18]的局部搜索能力较强,全局搜索能力较弱,将两者结合形成改进蚁群算法。改进蚁群算法通过基本蚁群算法在全局范围内搜索较优的 THEN 部分模糊集中心,每次应用基本蚁群算法后,对产生的较优个体进行梯度下降算法的局部搜索,以找到最优个体。

运用模糊系统结合蚁群算法的方法进行温升建模的步骤如下:

1) 通过试验得到能代表样本空间(问题特征)

的训练数据和与训练数据不同用于对模糊系统进行测试的测试数据。

2)对模糊系统进行初始化。需要初始化的有各语言变量的模糊集划分、模糊规则、模糊规则中各相关参数(各模糊集中心与宽度等)。

3)通过训练数据运用梯度下降算法、基本蚁群算法、改进蚁群算法训练模糊规则 THEN 部分模糊集中心,确定其合理值。

4)训练完成后,通过与训练数据不同的测试数据测试模糊系统,检验其可靠性。

2 基于模糊系统的金具温升建模

2.1 试验设计

阀厅连接金具的温升受很多因素影响,比如电流强度、软导线数量等,阀厅连接金具的最高温升经常出现在软导线上,这主要是由于软导线空间分布位置非常复杂,集肤效应导致各软导线承载的电流存在很大差异,各软导线的温升差异也就较大。本文主要研究的是电流强度、软导线数量与软导线最高温升的关系,运用模糊系统进行建模,选取电流强度、软导线数量作为模糊系统的输入,软导线的最高温升作为模糊系统的输出。

试验主要参考标准为 GB/T11022—2011^[19],试件为阀厅二通连接金具,软导线的直径 43.5 mm。测量温升的仪器为 GTM-3 通用温升测试装置与 1 级允差 T 型热电偶。通过铜板和铜线使频率 50 Hz 的正弦交流电通过阀厅二通连接金具,将 1 级允差 T 型热电偶埋于各软导线上,热电偶与 GTM-3 通用温升测试装置相连,从 GTM-3 温升测试装置读出各软导线的最高温升。试验过程中的试件如图 1 所示。



图1 试验中的试件

Fig.1 Sample in the experiment

根据特高压输电电流的取值范围等得电流强度的取值为 5 000、6 000、7 000、8 000 A,软导线数量取值为 6、7、8、9、10 根,从试验数据中选出的训练数

据应能代表样本空间的特征。

试验采用全因子法设计以保证样本空间的全面性和准确性,共得到 $4 \times 5 = 20$ 组样本数据,选出 16 组足以代表样本空间特征(问题特征)的样本数据作为训练数据训练模糊系统模糊规则 THEN 部分模糊集中心,其余与训练数据不同的 4 组数据用来测试模糊系统,检验其可靠性,称之为测试数据。

为了保证数据的准确性,重复进行 3 次试验,得到 $16 \times 3 = 48$ 组训练数据, $4 \times 3 = 12$ 组测试数据。训练数据的软导线最高温升取值为 $38.6 \sim 71.3$ °C,共 48 个值。测试数据的软导线数量取值为 7、8、9 根,测试数据的软导线最高温升取值为 $41.3 \sim 67.8$ °C,共 12 个值。

2.2 模糊系统初始化

由积累的专家经验得模糊规则 IF 部分语言变量进行模糊集划分:电流强度 I 的模糊集划分为大(A_1)、比较大(A_2)、很大(A_3)、非常大(A_4),相应的模糊集中心 \bar{x}_i^I 依次为 5 000、6 000、7 000、8 000,相应的宽度 σ_i^I 为 400;软导线数量 n 的模糊集划分为很少(B_1)、少(B_2)、适当(B_3)、多(B_4)、很多(B_5),相应的模糊集中心 \bar{x}_i^n 依次为 6、7、8、9、10,相应的宽度 σ_i^n 为 1.2。

模糊规则 THEN 部分被划分为 13 个模糊集 C_1 、 C_2 、 C_3 、 \dots 、 C_{13} ,各模糊集中心依次为 38、42、45、48、51、53、55、58、61、63、65、68、70,由积累的专家经验得 16 条模糊规则,模糊规则见表 1。

表1 部分模糊规则
Tab.1 Partial fuzzy rules

序号	模糊规则
1	if (I is A_1) and (n is B_1) then (Δt is C_4)
2	if (I is A_1) and (n is B_3) then (Δt is C_3)
3	if (I is A_1) and (n is B_4) then (Δt is C_2)
4	if (I is A_1) and (n is B_5) then (Δt is C_1)
5	if (I is A_2) and (n is B_1) then (Δt is C_7)
6	if (I is A_2) and (n is B_2) then (Δt is C_6)
7	if (I is A_2) and (n is B_4) then (Δt is C_5)
8	if (I is A_2) and (n is B_5) then (Δt is C_4)
9	if (I is A_3) and (n is B_1) then (Δt is C_{10})
10	if (I is A_3) and (n is B_2) then (Δt is C_9)
11	if (I is A_3) and (n is B_3) then (Δt is C_8)
12	if (I is A_3) and (n is B_5) then (Δt is C_7)
13	if (I is A_4) and (n is B_1) then (Δt is C_{13})
14	if (I is A_4) and (n is B_3) then (Δt is C_{12})
15	if (I is A_4) and (n is B_4) then (Δt is C_{11})
16	if (I is A_4) and (n is B_5) then (Δt is C_7)

表 1 中,模糊规则 1 的含义为如果电流 I 大 (A_1),软导线数量 n 为很少 (B_1),则温升为 C_4 。

2.3 模糊系统的训练

用梯度下降算法、基本蚁群算法、改进蚁群算法训练模糊系统,其对应参数保持一致。为了把收敛过程表达地更清楚,每迭代 20 次取出相应的误差点,3 种算法的误差收敛情况见图 2。

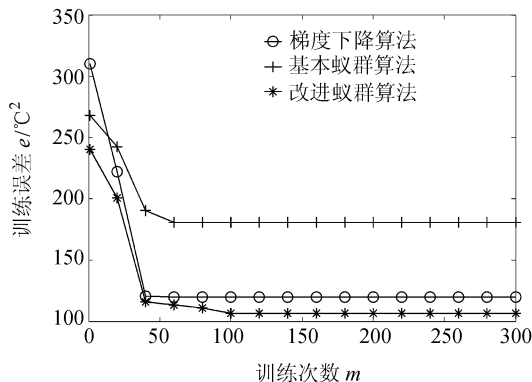


图 2 模糊系统训练

Fig. 2 Training of fuzzy system

由图 2 可得:改进蚁群算法训练模糊系统稳定后的误差为 $106.6\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,梯度下降算法训练模糊系统稳定后的误差为 $119.8\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,基本蚁群算法训练模糊系统稳定后的误差为 $180.6\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ 。改进蚁群算法训练模糊系统的收敛效果优于其他两种方法,这主要是因为梯度下降算法拥有较强的局部搜索能力,但它的全局搜索能力较弱,基本蚁群算法拥有较强的全局搜索能力,但它的局部搜索能力较弱,改进蚁群算法结合了两者的优点,克服了梯度下降算法与基本蚁群算法相应的缺点,所以它的收敛效果最好。训练完成后各模糊集中心依次为 37.4、40.8、43.5、47.1、51.3、52.8、54.3、57.2、60.9、62.1、64.8、67.8、71.3。

2.4 回归分析与模型测试

通过回归分析建立阀厅连接金具的温升模型。回归函数为全因子多项式。回归分析建模的条件为矛盾方程组系数矩阵的秩与回归函数待定系数的个数相等。当回归函数为 1 次和 2 次全因子多项式时,待定系数个数依次为 3、6,矛盾方程组系数矩阵的秩依次也为 3、6,满足条件,可以建立基于回归分析的阀厅连接金具温升模型。

据检验当 3 次或 3 次以上全因子多项式作为回归函数时,无法满足回归分析建模条件。当全因子多项式作为回归函数时,全因子多项式的次数越高,模型精度越高。所以回归函数取为 2 次全因子多项式,所得温升模型为:

$$\Delta t = 1.5763 \times 10^{-6} I^2 - 5.3032 \times 10^{-4} I n -$$

$$0.1758 n^2 - 0.0112 I + 3.4378 n + 66.7351。$$

式中, I 为电流强度, n 为软导线数量。拟合优度 R^2 为 0.92,拟合效果较理想。

用测试数据对 4 种方法所得模型进行测试,包括梯度下降算法训练模糊系统、基本蚁群算法训练模糊系统、改进蚁群算法训练模糊系统、回归分析模型,结果见图 3。

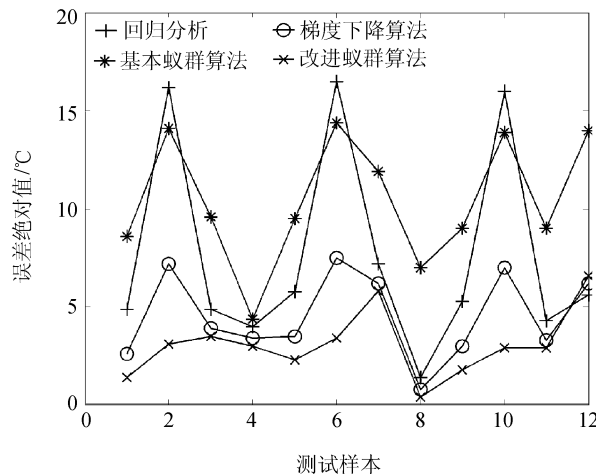


图 3 各点预测的误差绝对值

Fig. 3 Absolute values of error of every point

由图 3 可得,在 4 种模型中,回归分析模型与基本蚁群算法训练模糊系统所得模型的预测效果较差,改进蚁群算法训练模糊系统所得模型的预测效果是各模型中最好的。

各模型预测的误差绝对值最大值与平均值见图 4、5,相对误差最大值与平均值见图 6、7。

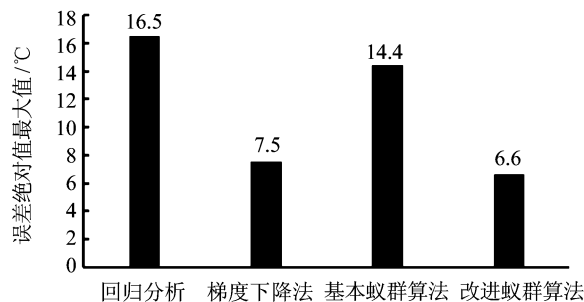


图 4 误差绝对值最大值

Fig. 4 Most value of absolute value of error

由图 4~7 可得:回归分析与基本蚁群算法训练模糊系统所得模型的预测效果较差;改进蚁群算法训练模糊系统所得模型的误差绝对值最大值为 $6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均值为 $3.09\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对误差最大值为 11.34% ,平均值为 5.56% 。改进蚁群算法训练模糊系统所得模型的预测效果是各模型中最好的,与梯度下降算法训练模糊系统相比,误差绝对值平均值下降了

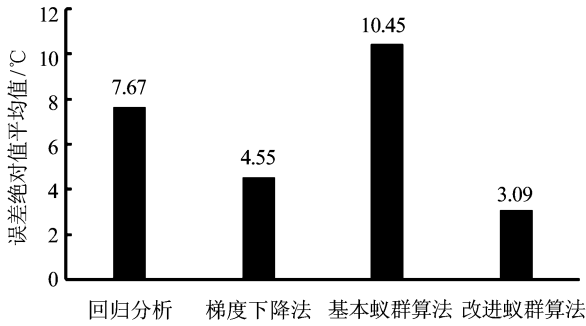


图5 误差绝对值平均值

Fig.5 Mean value of absolute value of error

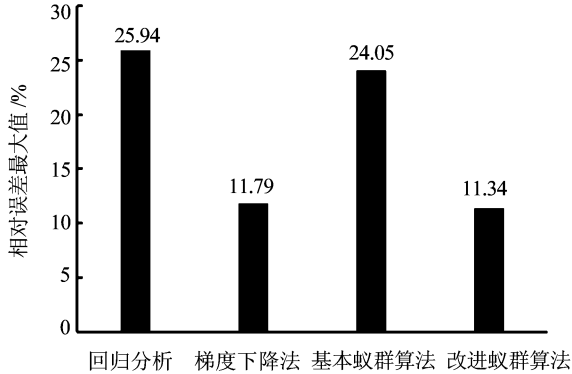


图6 相对误差最大值

Fig.6 Most value of relative error

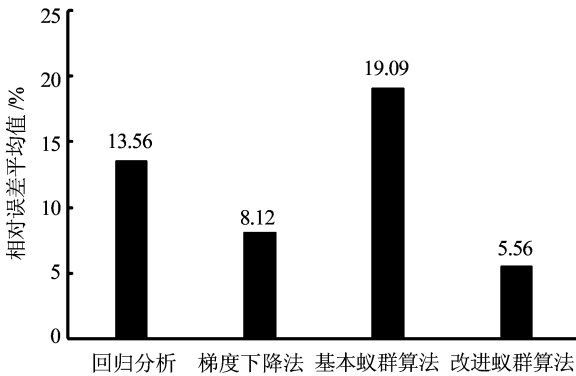


图7 相对误差平均值

Fig.7 Mean value of relative error

1.46 °C, 相对误差平均值下降了 2.56%, 误差绝对值最大值下降了 0.9 °C, 相对误差最大值下降了 0.45%; 与基本蚁群算法训练模糊系统相比, 误差绝对值平均值下降了 7.36 °C, 相对误差平均值下降了 13.53%, 误差绝对值最大值下降了 7.8 °C, 相对误差最大值下降了 12.71%; 与传统的回归分析模型相比, 误差绝对值平均值下降了 4.58 °C, 相对误差平均值下降了 8%, 误差绝对值最大值下降了 9.9 °C, 相对误差最大值下降了 14.6%。

基于 2 次全因子多项式的回归分析无法体现电流强度、软导线数量与软导线最高温升的关系, 所以回归分析的预测效果较差。基本蚁群算法的全局搜

索能力较强, 但局部搜索能力较弱, 所以由基本蚁群算法训练模糊系统所得模型的预测效果也不理想。梯度下降算法的局部搜索能力较强, 全局搜索能力较弱。改进蚁群算法集成了基本蚁群算法与梯度下降算法的优点, 克服了各自的缺点, 基于改进蚁群算法训练模糊系统的温升模型能够较准确体现电流强度、软导线数量与软导线最高温升的关系, 所以此模型的预测效果是所有模型中最好的, 它的各测试点预测值见表 2。

表 2 改进蚁群算法训练模糊系统的预测结果

Tab.2 Predictive results of fuzzy system trained by improved ant colony algorithm

测试数据	电流强度 I/A	软导线数量 n	温升 $\Delta t/^\circ C$	预测值 $/^\circ C$	误差绝对值 $/^\circ C$	相对误差 $/\%$
1	5 000	7	42.2	43.6	1.4	3.32
2	6 000	8	63.3	60.2	3.1	4.90
3	7 000	9	53.8	50.3	3.5	6.51
4	8 000	7	67.8	64.8	3	4.42
5	5 000	7	41.3	43.6	2.3	5.57
6	6 000	8	63.6	60.2	3.4	5.35
7	7 000	9	56.1	50.3	5.8	10.34
8	8 000	7	65.2	64.8	0.4	0.61
9	5 000	7	41.8	43.6	1.8	4.31
10	6 000	8	63.1	60.2	2.9	4.60
11	7 000	9	53.2	50.3	2.9	5.45
12	8 000	7	58.2	64.8	6.6	11.34

由表 2 可知: 在对第 12 组测试数据进行测试时, 误差绝对值达到最大为 6.6 °C, 相对误差也达到最大为 11.34%, 误差绝对值平均值为 3.09 °C, 相对误差平均值为 5.56%。无论是绝对误差还是相对误差, 最大值还是平均值, 都在合理范围内, 故改进蚁群算法训练的模糊系统温升模型可靠性较高。

3 结论

将梯度下降算法与基本蚁群算法结合得到改进蚁群算法, 分别用梯度下降算法、基本蚁群算法、改进蚁群算法训练模糊系统的方法对阀厅连接金具的温升进行建模。改进蚁群算法训练模糊系统的收敛效果优于其他两种方法。

用回归分析对阀厅连接金具的温升进行建模。通过测试数据检验 4 种模型可靠性, 回归分析模型的预测效果较差, 由改进蚁群算法训练模糊系统所得温升模型的预测效果是各模型中最好的。

各模型的收敛和预测结果说明若能通过试验得到足量训练数据,由改进蚁群算法训练模糊系统的方法对直流特高压阀厅连接金具的温升进行建模是可行的。

下一步的工作主要是研究更多因素对温升的影响,建立包含更多因素的温升模型,同时对优化算法展开研究,努力寻找更高效的训练模糊系统的算法,以提高建模速度与精度。

参考文献:

- [1] Chen Weigen, Xi Hongjuan, Su Xiaoping, et al. Application of generalized regression neural network to transformer winding hot spot temperature forecasting[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 16-21. [陈伟根, 奚红娟, 苏小平, 等. 广义回归神经网络在变压器绕组热点温度预测中的应用[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 16-21.]
- [2] Sun Xiaoping. Investigation into the calculation model and prediction method of hot-spot temperature for oil-immersed transformers[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. [苏小平. 油浸式变压器绕组热点温度计算模型及预测方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.]
- [3] Teng Li. Studies on thermal circuit calculation and genetic support vector machine prediction for hot-spot temperature of oil-immersed transformer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. [滕黎. 油浸式变压器热路计算及热点温度遗传支持向量机预测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.]
- [4] 刘振亚. 特高压直流电气设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [5] Yuan Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3. [袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.]
- [6] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [7] Zhang Wenliang, Yu Yongqing, Li Guangfan, et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(22): 1-7. [张文亮, 于永清, 李光范, 等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 1-7.]
- [8] Liu Zhenya, Shu Yinbiao, Zhang Wenliang, et al. Study on voltage class series for HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 1-8. [刘振亚, 舒印彪, 张文亮, 等. 直流输电系统电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 1-8.]
- [9] Shu Yinbiao, Liu Zehong, Gao Liying, et al. A preliminary exploration for design of ± 800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6400 MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8. [舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ± 800 kV 6400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.]
- [10] Chen Shi, Fang Kaizheng, Mu Daobin, et al. Application of neural network model to predicting surface temperature of lithium-ion battery[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(4): 421-424. [陈实, 方凯正, 穆道斌, 等. 神经网络模型在锂离子电池表面温度预测中的应用研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(4): 421-424.]
- [11] Chen Weigen, Teng Li, Liu Jun, et al. Transformer winding hot-spot temperature prediction model of support vector machine optimized by genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 44-51. [陈伟根, 滕黎, 刘军, 等. 基于遗传优化支持向量机的变压器绕组热点温度预测模型[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 44-51.]
- [12] Li Mengli. Studies on the prediction method of transformer winding hot spot temperature based on BPNN[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. [李孟励. 基于BP神经网络的变压器绕组热点温度预测方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.]
- [13] He Q, Si J, Tylavsky D J. Prediction of top-oil temperature for transformers using neural networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(4): 1205-1211.
- [14] Pradhan M K, Ramu T S. Online monitoring of temperature in power transformers using optimal linear combination of ANNs[C]//Proceedings of the Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Piscataway: IEEE, 2004: 70-73.
- [15] Assuncao T, Silvino J L, Resende P. Transformer top-oil temperature modeling and simulation[J]. Transactions on Engineering, Computing and Technology, 2006, 15(10): 240-245.
- [16] 王立新. 模糊系统和模糊控制教程[M]. 王迎军, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [17] Dai Shugui, Chen Wenlan, Pan Yinrong, et al. A hybrid ant colony algorithm for multiple depot vehicle routing problem[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(6): 154-158. [戴树贵, 陈文兰, 潘荫荣, 等. 多配送中心车辆路径安排问题混合蚁群算法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(6): 154-158.]
- [18] Wu Hao, Yang Jianguo, Zhang Hongtao. Synthetically modeling for the thermal error and cutting force induced error on a CNC turning center[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(2): 165-169. [吴昊, 杨建国, 张宏韬. 精密车削中心热误差和切削力误差综合建模[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(2): 165-169.]
- [19] GB/T11022-2011 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.