模糊系统结合最小二乘的温升预测方法

王 刚， 张 博， 王 冠， 叶三排
(平高集团有限公司 技术中心，河南 平顶山 467001)

摘 要：针对金具温升过高现象，提出了新的温升预测方法。通过温升试验得到训练数据与测试数据，利用训练数据通过递推最小二乘结合遗传算法的方法对模糊系统进行训练，利用测试数据对训练后的模型进行检验，误差处于合理范围。训练与测试结果说明运用新方法预测金具温升是可行的。通过回归分析对金具温升进行预测，并与新方法进行比较，新方法的预测效果优于传统的回归模型，比较结果体现了新方法在温升预测方面的优势。

关键词：金具；温升试验；模糊系统；回归模型
DOI：10.15938/j.jhust.2017.06.010
中图分类号：TM11；TP18 **文献标志码：**A **文章编号：**1007-2683(2017)06-0052-05

The Method of Predicting the Rise of Temperature by Combining Fuzzy System and Recursive Least Square

WANG Gang， *ZHANG Bo*， *WANG Guan*， *YE San-pai*
(Technology Center，Pinggao Group Co.，Ltd.，Pingdingshan 467001，China)

Abstract: For the problem that the rise of temperature of fitting is too high to control，a new method of predicting the rise of temperature has been put forward. The training data and the testing data are obtained from the experiment of rising of temperature. Through training data，the fuzzy system is trained by recursive least square combined genetic algorithm. Then the model is tested by testing data. The error is in reasonable range. The result shows that the new method is feasible to predict the rise of temperature of connection fitting. Regression analysis is used to predict the rise of temperature of connection fitting and the result is compared with that of new model，the result of new model is better than that of traditional regression analysis model，the result of comparison reflects that the new method has advantages for predicting the rise of temperature.

Keywords: fitting； the experiment of the rise of temperature； fuzzy system；regression analysis model

0 引 言

温升预测的主要方法有理论法与数值法。理论法主要考虑对电力设备温升影响较大的因素，包括电流密度、表面辐射等，运用热学、电学等基础理论计算温升，数值法包括有限元法、有限差分法等，通过数值算法解微分方程组得到温升。电力设备的温升与电流密度、环境温度等很多因素相关，多为复杂的非线性关系，理论法和数值法往往需要进行假设和简化，这造成方法的应用受到限制[1-5]。近年来人们普遍使用智能方法预测温升。孙才新、陈伟根、

收稿日期：2016-02-24
基金项目：国家863高技术基金项目(2014AA051802)；国家电网科技项目(SGNXJX006YJJS1400105).
作者简介：张 博(1985—)，男，硕士，工程师；
王 冠(1983—)，男，硕士，工程师.
通信作者：王 刚(1980—)，男，博士，高级工程师，E-mail：wanggang2800@163.com.

苏小平、滕黎等运用神经网络预测了变压器绕组热点温度[6-9]。Pylvanainen 通过建立神经网络模型，对变压器顶层油温和绕组热点温度进行了预测[10]。文[11-13]通过多种神经网络模型对变压器绕组热点温度或顶层油温进行了预测。

人们经常用神经网络模型预测温升，模糊系统在温升预测应用较少，它不仅能像神经网络那样进行学习，而且可以结合相应领域的专家经验。换流站中的高端阀厅是直流特高压输电工程的重要组成部分，其内部连接金具经常温升过高，尚无较好地解决该问题的有效方法，本文针对该问题，提出了新的温升预测方法[14-19]。

1　模糊系统

M 型模糊系统集成了纯模糊系统与 TSK 模糊系统的优点，克服了两者相应的缺点，在交通、控制等领域应用广泛，其表达式为:

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

式中: M 为模糊规则数量; n 为 IF 部分条件的数目; $\bar{x}_i^l$，σ_i^l 为 IF 部分隶属度函数的中心和宽度; $\bar{y}_i^l$ 为 THEN 部分模糊集中心。

训练误差为

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

式中: N 为训练数据数目; x_0，y_0 为训练数据的输入和输出。

通过递推最小二乘法调整 $\bar{y}^l$，如下:

设 $\theta=(\bar{y}^1,y\bar{y}^2,\cdots y\bar{y}^M)^{\mathrm{T}}$，$\theta$ 是由模糊规则 THEN 部分模糊集中心 $\bar{y}^l(l=1\sim M)$ 组成的列向量。

$$b_k(x)=\frac{\prod_{i=1}^{n}\exp\left(-\left(\frac{x_i-\bar{x}_i^k}{\sigma_i^k}\right)^2\right)}{\sum_{l=1}^{M}\left(\prod_{i=1}^{n}\exp\left(-\left(\frac{x_i-\bar{x}_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right)\right)}$$

$$k=1\sim M$$

$\boldsymbol{b}(x)=(b_1(x),b_2(x),\cdots,b_M(x))^{\mathrm{T}}$，

$\boldsymbol{b}(x)$ 是由 $\boldsymbol{b}_k(x)(k=1\sim M)$ 组成的列向量。

这样式(1)转化为:

$$f(x)=\boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}(x)\theta$$

$p=1,2,\cdots,N$。(N 为训练数据的数量，也是算法的迭代次数)，递推最小二乘的迭代过程如下:

$$P(p)=P(p-1)-P(p-1)b(x_0^p)[\boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}(x_0^p)P(p-1)\boldsymbol{b}(x_0^p)+1]^{-1}\boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}(x_0^p)P(p-1)\tag{3}$$

$$K(p)=P(p-1)\boldsymbol{b}(x_0^p)[\boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}(x_0^p)P(p-1)\boldsymbol{b}(x_0^p)+1]^{-1}\tag{4}$$

$$\theta(p)=\theta(p-1)+K(p)[y_0^p-\boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}(x_0^p)\theta(p-1)]\tag{5}$$

$\theta(0)$ 由模糊规则 THEN 部分模糊集的初始中心组成，$P(0)=\sigma I$(σ 是个很大的常数)，x_0^p、y_0^p 为训练数据 p 的输入和输出，$\theta(p)$ 中的元素对应于模糊系统模糊规则 THEN 部分模糊集中心 $\bar{y}^l$。

递推最小二乘算法适合局部搜索，不适合全局搜索，遗传算法相反，擅长全局搜索，不擅长局部搜索。将二者结合对模糊系统进行训练以取长补短。

2　温升新模型

交流电的集肤效应使空间分布位置复杂的各软导线上的电流差异较大，相应的温升差异也较大。本文的研究对象是软导线的最高温升与电流强度、软导线数量的关系，系统输入是电流强度与软导线数量，输出是最高温升，利用模糊系统对输入与输出之间复杂的非线性关系进行建模。

试验依据国标 GB/T11022-2011[20]，试件为阀厅内常用的二通连接金具，软导线为国标 GB/T1179-2008[21]规定的 JL-1120。

系统输入参数如表 1 所示:

表 1　输入参数

电流强度 I/A	5 000	6 000	7 000	8 000
软导线数量 n/根	6	7	8	9	10

通过试验得到 48 组训练数据与 12 组测试数据。表 2 表 3 为训练与测试数据，Δt 表示最高温升。

表 2　训练数据

训练数据	电流强度 I/A	软导线数量 n/根	温升 Δt/℃
1	5 000	6	48.6
2	5 000	8	44.1
3	5 000	9	40.8
⋮	⋮	⋮	⋮
48	8 000	10	55.8

表 3　测试数据

训练数据	电流强度 I/A	软导线数量 n	温升 Δt/℃
1	5 000	7	42.2
2	6 000	8	63.3
3	7 000	9	53.8
⋮	⋮	⋮	⋮
12	8 000	7	58.2

IF 部分各语言变量的模糊集参数见表 4。

表4 IF部分模糊集参数

参数	电流强度 I/A				软导线根数 n				
	大 (B1)	比较大 (B2)	很大 (B3)	非常大 (B4)	很少 (C1)	少 (C2)	适当 (C3)	多 (C4)	很多 (C5)
$\bar{x}_i^l$	5 000	6 000	7 000	8 000	6	7	8	9	10
σ_i^l	400	400	400	400	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

将THEN部分的语言变量划分成13个模糊集，见表5。

表5 THEN部分模糊集初始中心

THEN部分模糊集	模糊集中心 $\bar{y}^l$/℃
D1	38
D2	42
D3	45
⋮	⋮

由专家经验得到的16条模糊规则，见表6。

表6 模糊规则

序号	模糊规则
1	if(I *is* B_1) and(n *is* C_1) then(Δt *is* D_4)
2	if(I *is* B_1) and(n *is* C_3) then(Δt *is* D_3)
3	if(I *is* B_1) and(n *is* C_4) then(Δt *is* D_2)
⋮	⋮
16	if(I *is* B_4) and(n *is* C_5) then(Δt *is* D_7)

通过训练数据利用递推最小二乘结合遗传算法的方法训练模糊系统，整个训练过程误差 e 的变化见图1。

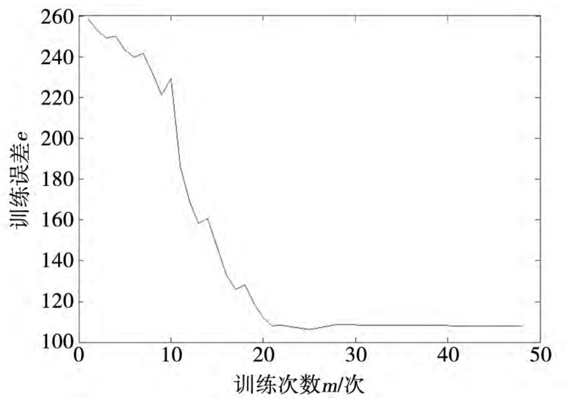

图1 模糊系统的训练误差

运用测试数据对训练过的系统进行检验，检验结果见表7。由表7得，绝对误差最大为6.9℃，出现在第12组测试数据，相对误差最大为11.86%，也出现在第12组测试数据，所有测试数据的绝对误差平均值为3℃，相对误差平均值为6%，在合理范围内，由新方法所得模型可靠性较高。

表7 模糊系统的预测结果

测试数据	电流强度 I/A	软导线数量 n	温升 Δt/℃	模糊系统预测值/℃	误差绝对值/℃	相对误差/%
1	5 000	7	42.2	44.8	2.6	6.16
2	6 000	8	63.3	61.6	1.7	2.69
3	7 000	9	53.8	50.6	3.2	5.95
4	8 000	7	67.8	65.1	2.7	3.98
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
12	8 000	7	58.2	65.1	6.9	11.86

3 回归分析预测温升及与模糊系统的比较

预测温升的回归分析模型为

$$\Delta t = 1.5763 \times 10^{-6} I^2 - 5.3032 \times 10^{-4} In - 0.1758n^2 - 0.0112I + 3.4378n + 66.7351$$

拟合优度 $R^2 = 0.92$，较理想。回归分析模型的预测结果如表8所示。

表 8　回归分析的预测结果

测试数据	电流强度 I/A	软导线数量 n	温升 Δt/℃	模糊系统预测值/℃	误差绝对值/℃	相对误差/%
1	5 000	7	42. 2	47. 08	4. 88	11. 56
2	6 000	8	63. 3	47. 1	16. 2	25. 59
3	7 000	9	53. 8	48. 9	4. 9	9. 11
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
6	6 000	8	63. 6	47. 1	16. 5	25. 94

由表 8 可知，绝对误差与相对误差最大值都出现在第 6 组测试数据，分别为 16. 5℃与 25. 94%，绝对误差平均值 7. 7℃，相对误差平均值为 13. 6%。两种模型的预测效果对比如图 2 ~ 图 6 所示。

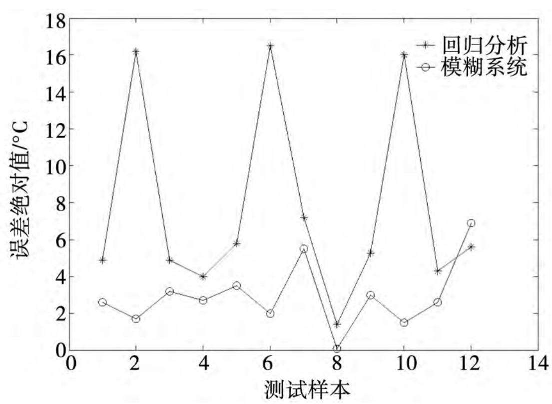

图 2　各点预测的误差绝对值

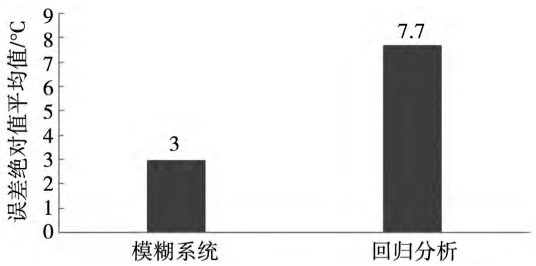

图 3　误差绝对值平均值

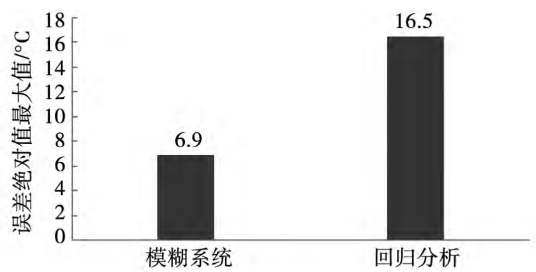

图 4　误差绝对值最大值

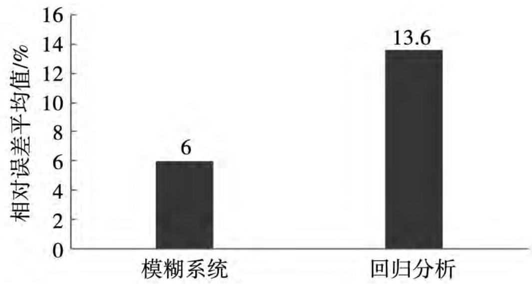

图 5　相对误差平均值

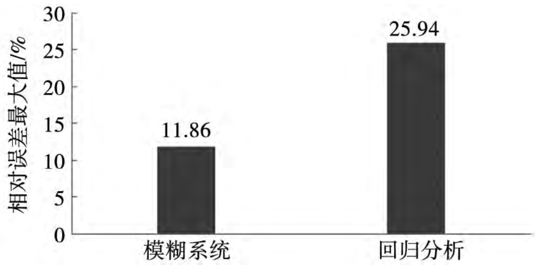

图 6　相对误差最大值

由图 2 ~ 图 6 可得，与传统的回归分析温升预测模型相比，新方法所得温升模型的绝对误差平均值下降了 4. 7℃，最大值下降了 9. 6℃，相对误差平均值下降了 7. 6%，最大值下降了 14. 08%，新模型的预测效果优于传统模型，这主要是由于金具最高温升与电流强度、软导线数量之间存在着复杂的非线性关系，传统模型无法体现这种复杂关系，新方法所得模型能够反映阀厅连接金具的最高温升与电流强度、软导线数量之间的复杂关系，所以新方法所得模型的预测效果优于传统模型。

4　结　论

1) 通过递推最小二乘结合遗传算法的方法对模糊系统进行训练，运用此方法预测阀厅连接金具的温升，并检验所得模型可靠性，结果合理。

2) 用传统的回归分析模型对阀厅连接金具的温升进行预测，并与新方法所得模型进行比较，新方法所得模型的预测效果较好。

3) 结果说明运用新方法预测阀厅连接金具温升是可行的。

参 考 文 献:

[1] 丁树业，李珊珊，张睿，等. 永磁驱动电机接线盒结构优化热性能分析 [J]. 电机与控制学报，2015，19(12)：53－59.

[2] 陈萍，唐任远，韩雪岩，等. 抑制永磁体局部温升最高点的不均匀轴向分段技术 [J]. 电机与控制学报，2016，20(7)：17－59.

[3] 陈卫杰，苗立杰，丁树业. 循环泵屏蔽电机定子端部温升过高数值计算 [J]. 电机与控制学报，2016，20(2)：83－89.

[4] 张炳义，王森，冯桂宏. 基于流固祸合的无人机主推进电机温度场研究 [J]. 电机与控制学报，2014，18(6)：116－120.

[5] 周小涵，曾艳华，范磊，等. 基于正交试验的寒区隧道温度场影响因素敏感度研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2016，43(11)：154－160.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] PYLVANAINEN J. K，NOUSIAINEN K，VERHO P. Studies to Utilize Loading Guides and ANN for Oil-immersed Distribution Transformer Condition Monitoring [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2007，22(1)：201－207.

[11] QING H，SI J，TYLAVSKY J D. Prediction of top oil Temperature for Transformers Using Neural Networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2003，15(4)：1205－1211.

[12] GALDI V，IPPOLITO L，PICCOLO A，et al. Neural Diag-nostic System for Transformer Thermal Overload Protection [J]. Proc. Inst. Elect. Eng. Elect. Power Application，2003，147(5)：415－421.

[13] ASSUNCAO T，SILVINO J L，RESENDE P. Transformer top-oil Temperature Modeling and Simulation [J]. Transactions on Engineering，Computing and Tech-nology，2006，15(10)：240－245

[14] 吴萍，张健，屠竞哲，等. 溪洛渡—浙西特高压直流投运后系统稳定特性及协调控制策略 [J]. 电网技术，2014，38(7)：1873－1878.

[15] 邹国平，姚晖，何文林，等. 溪洛渡—浙西1800 kV特高压直流输电工程受端电网直流偏磁治理 [J]. 高电压技术，2016，42(2)：543－550.

[16] 姚良忠，吴靖，王志冰，等. 未来高压直流电网发展形态分析 [J]. 中国电机工程学报，2014，34(34)：6007－6018.

[17] 刘杰，汤广福，贺之渊，等. 特高压直流换流阀分布电容分析与测试 [J]. 中国电机工程学报，2016，36(14)：2581－2587.

[18] 刘振亚. 特高压直流电气设备 [M]. 北京：中国电力出版社，2009.

[19] 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.

[20] 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，2011.

[21] GB/T1179－2008. 圆线同心绞架空导线 [S]. 北京：中国标准出版社，2008.

（编辑：关 毅）