[控制系统]

基于神经网络优化残差的灰色递阶模型在电量预测中的应用

文/贵州电网公司电网规划研究中心　李雪凌　刘文霞
北京清软创新科技有限公司　罗　欣　郭德华

为降低电网规划中电量预测误差，科学指导电网发展规划，研究了灰色递阶模型，通过模型参数的递推，使模型适用于规划态的长期预测。在此基础上，构建RBF神经网络对模型拟合残差进行非线性建模，修正模型预测结果。实例证明，该方法可有效降低预测误差，可为电力公司营销、发策、交易等多部门市场分析预测决策提供更加科学的决策依据，具有十分重要的意义。

电量预测是电力系统规划研究的基础和边界条件，是电网发展规划方案制订以及实施电网建设项目决策的重要依据，预测效果的优劣对电网规划质量影响至关重要。

灰色模型通过对原始数据的灰色生成过程，形成随机性弱化、规律性强化了的新数列，挖掘数据内在规律性，尤其适用于对数据的未来变化过程作描述，因此，在电量预测领域得到了广泛应用。但普通灰色预测模型自身存在一定缺陷：未来时刻越远，预测值的灰区间越大，预测值的实际意义越小；此外，一旦预测序列的生成数不完全满足指数规律，预测准确度就会发生较大的偏差。

本文引入灰色递阶模型解决灰色模型不适合长期预测的问题，并在此基础上利用神经网络对模型残差进行二次优化建模，提高模型的适应性和预测准确度。该模型通过科学预测未来电量需求，对提高电网规划的合理性、有效性与前瞻性，避免电网大面积故障、减少电网重复建设和保证用户电能供应，具有十分重要的意义。

灰色递阶模型

1. 灰色模型原理

灰色递阶模型是在灰色模型的基础上演变而来的。以GM（1，1）基础灰色模型作为基础，其由一个只包含单变量的一阶微分方程构成。设有变量为$x^{(0)}$的原始数据序列$x^{(0)}=[x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\cdots,x^{(0)}(n)]$，用1－AGO生成一阶累加生成序列$x^{(1)}=[x^{(1)}(1),x^{(1)}(2),\cdots,x^{(1)}(n)]$，其中

$$x^{(1)}(k)=\sum_{i=1}^{k}x^{(0)}(k) \tag{1}$$

设$x^{(1)}$序列满足一阶线性微分方程模型[4]

$$\frac{\mathrm{d}x^{(1)}}{\mathrm{d}k}+ax^{(1)}=u \tag{2}$$

微分项用离散形式表示为

$$\frac{\Delta x}{\Delta k}=\frac{x^{(1)}(k+1)-x^{(1)}(k)}{k+1-k}=x^{(1)}(k+1)-x^{(1)}(k) \tag{3}$$

式中，$x^{(1)}$取为时刻k和$k+1$的平均值，即$[x^{(1)}(k+1)+x^{(1)}(k)]$。依次可推出

$$\begin{bmatrix}x^{(0)}(2)\\x^{(0)}(3)\\\vdots\\x^{(0)}(n)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{1}{2}\left[x^{(1)}(1)+x^{(1)}(2)\right]\\-\frac{1}{2}\left[x^{(1)}(2)+x^{(1)}(3)\right]\\\vdots\\-\frac{1}{2}\left[x^{(1)}(n-1)+x^{(1)}(n)\right]\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\u\end{bmatrix} \tag{4}$$

式（4）可简化记为

$$Y_n = BA \tag{5}$$

利用最小二乘法进行求解，有

$$A = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \tag{6}$$

解方程得

$$x^{(1)}(k+1) = [x^{(1)}(1) - \frac{u}{a}]e^{-ak} + \frac{u}{a} \tag{7}$$

2. 灰色递阶模型

灰色递阶模型将普通灰色模型中的a和u看成是随时间变化的变量，先对这两者进行预测，然后再用灰色模型对原序列进行预测。本文采用推广梯度法进行递推，并对参数$a(k)$和进行$b(k) = u(k)/a(k)$跟踪。令$y(k) = x^{(1)}(k)$，则有

$$y(k) = [y(0) - b(k)]e^{-a(k)(k-1)} + b(k) \tag{8}$$

参数跟踪公式如下

$$a(k) = a(k-1) + \frac{\delta}{\alpha_{k-1}^2 + \beta_{k-1}^2}\alpha_{k-1} \times \{y(k) - [y(0) - b(k-1)] \times e^{-a(k-1)(k-1)} - b(k-1)\} \tag{9}$$

$$b(k) = a(k-1) + \frac{\delta}{\alpha_{k-1}^2 + \beta_{k-1}^2}\beta_{k-1} \times \{y(k) - [y(0) - b(k-1)] \times e^{-a(k-1)(k-1)} - b(k-1)\} \tag{10}$$

其中

$$\alpha_{(k-1)} = -a(k-1)[y(0) - b(k-1)]e^{-a(k-1)} \tag{11}$$

$$\beta_{(k-1)} = -e^{-a(k-1)(k-1)} + 1 \tag{12}$$

神经网络对残差的优化

当灰色递阶模型模拟出的拟合值与原始数据具有较大差异时，即表明预测序列的生成数并不完全满足指数规律，这时将无法达到理想的预测准确度。引入神经网络模型对残差进行优化建模，并与原模型预测值进行叠加，扩大了模型的适用范围。

1. RBF神经网络模型

人工神经网络是模仿生物脑结构和功能的一种信息处理系统，一经引入电力系统，负荷预测就成为其应用研究的一个主要领域。最常用的神经网络模型为BP模型，该算法的优势在于适用于多变量非线性函数的逼近，其劣势在于极易陷入到局部最小点中，无法实现最优预测。近年来，RBF神经网络凭借其具有唯一最佳逼近点的优势，在预测领域的应用越来越广泛。本文采用该模型进行残差优化。

RBF网络与BP网络类似，都是一个多层感知器的前馈网络，由输入层、隐含层和输出层组成。从输入层到隐含层为非线性变换，采用高斯函数

$$\varphi_i(x^b) = \exp[-\frac{x^b - c_i^2}{2\sigma_i^2}] \tag{13}$$

式中，x^b为样本的输入量；c^i为第i个隐含节点的中心；σ^i为中心点的宽度。

由隐含层到输出层为线性变换，输出y^b由式（14）计算所得

$$y^b = \sum_{i=1}^{h} w_{ij}\varphi_i(x^b) \tag{14}$$

式中，w_{ij}为第i个隐含节点与第j个输出节点之间的连接权重。

2. LMS学习算法

采用基于最陡下降的最小均方误差LMS学习算法，该算法计算量小、容易实现，已经得到了广泛应用。首先计算均方误差E

$$E = d - y^b \tag{15}$$

式中，d为期望输出。

通过下面的迭代过程求解权重和中心

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \mu_1 \frac{\partial E}{\partial w_i}(n) \tag{16}$$

$$c_i(n+1) = c_i(n) + \mu_2 \frac{\partial E}{\partial c_i}(n) \tag{17}$$

式中，μ_1，μ_2为学习因子。

当迭代过程中，均方误差满足迭代要求或迭代步数达到最大步数时，则停止迭代。

模型应用及效果

利用某省2000～2010年电量数据作为历史数据，2011～2013年电量数据作为预测结果验证数据。分别进行普通灰色建模和灰色递阶建模，2011～2013年预测结果如表1所示。

表1 模型预测结果

年份	实际值	普通灰色模型		灰色递阶模型	
		预测值	误差（%）	预测值	误差（%）
2011	944	925	2.0	927	1.8
2012	1 047	1 012	3.3	1024	2.1
2013	1 126	1 174	4.3	1152	2.3
平均误差			3.2		2.1

可见普通灰色模型和灰色递阶模型在第一年预测均保持了比较低的误差，但是在第二、第三年灰色递阶模型误差明显低于普通灰色模型，体现了灰色递阶模型对未来多年份预测的优势。

在此基础上，利用RBF神经网络，将采用灰色递阶模型2000～2010年的拟合结果与实际值的残差数据作为输入，0残差作为输出，最大步数为1 000，建立3层神经网络，优化后的结果如表2所示。

表2 RBF神经网络优化后的预测结果

年份	实际值	RBF神经网络残差优化后（%）	
		预测值	误差
2011	944	934	1.0
2012	1047	1035	1.1
2013	1126	1146	1.7
平均误差			1.3

优化后预测误差较优化前提高了0.8个百分点，效果显著。

结束语

采用灰色递阶模型代替传统灰色模型预测，解决了灰色预测在长期预测中结果失效的问题；引入RBF神经网络对模型残差进行寻优建模，解决了数据序列不符合指数模型趋势时预测效果欠佳的问题，扩大了模型的适用范围。实例验证，该方法可有效提高预测准确度，可为电力公司营销、发策、交易等多部门市场分析预测决策提供更加科学的决策依据。在电力规划过程中，既避免了由于电网建设不足导致无法为国家和社会提供可靠的电力供应，又避免了由于过度建设，浪费大量的国家资金，具有十分重要的意义。EA

（收稿日期：2014.11.19）

（上接第111页）

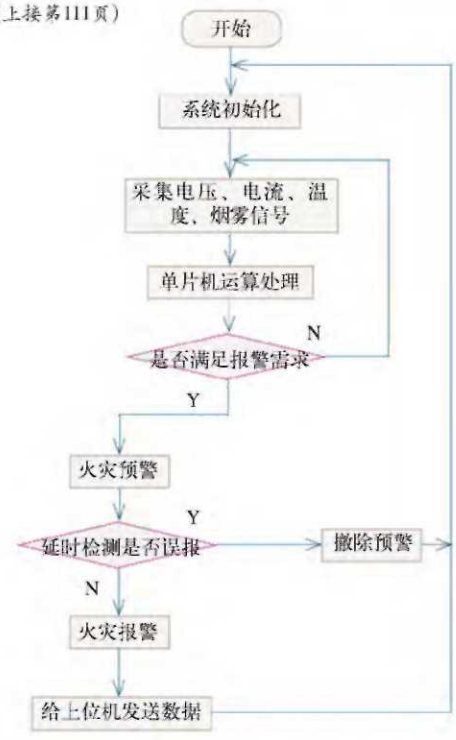

图6 火灾报警软件流程图

4. 复合式报警装置软件设计

软件设计如图6所示。开机后系统初始化，然后按照程序采集相关数据送入单片机进行处理，如果达到火灾预警条件，则进行延时再检测，防止误报情况出现，如再次符合报警条件，则立刻报警并向PC端传送数据，而后返回。

结束语

低压电气火灾给人们的生产生活带来巨大的危害，本文设计的复合式低压电气火灾报警装置经试验测试准确可靠，模拟火灾发生时，可及时发出警报，有一定的使用价值。EA

（收稿日期：2014.07.25）