

UD-IGA 网络构造法在短期负荷预测中的应用

赵宇红¹, 盛义发¹, 徐祖华¹, 张韵辉²

(1. 南华大学电气工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 深圳东方锅炉控制有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 电力系统短期负荷预测既是电力系统调度部门制定发电计划的依据, 也是制定电力市场交易计划的基础, 它对电力系统的运行、控制和计划都有着非常重要的影响。可由于负荷预测的复杂性、不确定性, 难以获得精确的预测值。为提高预测精度, 针对电力负荷的特点, 综合考虑历史负荷、天气、日类型等因素的影响, 将基于均匀设计(UD)和改进遗传算法(IGA)的网络构造法用于短期负荷预测。数据样本训练和实际预测结果表明, 该模型不仅可避免陷入局部极小点, 而且提高了预测精度和网络的训练速度。

关键词: 均匀设计; 改进遗传算法; 短期负荷预测

Application of network structure method based on UD-IGA in short-term load forecasting system

ZHAO Yu-hong¹, SHENG Yi-fa¹, XU Zu-hua¹, ZHANG Yun-hui²

(1. Institute of Electrical Engineering, Nanhua University, Hengyang 421001, China;

2. Eastern Boiler Control Co., Ltd, Shenzhen 518057, China)

Abstract: Electric power system short term load forecasting is not only the basis for the scheduling of generating sets, but also the basis to work out the transaction schedule in electricity market. It has great influence on the operating, controlling and planning of electric power system. Due to the complicacy and uncertainty of load forecasting, electric power load is difficult to be forecasted precisely. In order to improve the precision of electric power system short term load forecasting, according to the features of power load and considering the combined influence of historical load data, weather and day type, a neural network structure method which combines uniform design with improved genetic algorithm is used to short-term load forecasting in this paper. The training and testing results show that the model can not only avoid convergence to the local minimum, but also improve the training speed for the neural network and accuracy for load forecasting.

Key words: uniform design; improved genetic algorithm; short-term load forecasting

中图分类号: TM715

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)07-0066-04

0 引言

电力负荷预测^[1,2]是电力规划的基础。它为电力电网的发展速度、建设规模、电力工业布局、能源资源平衡、电网间的电力余额调剂以及电网资金和人力资源的需求提供可靠的依据, 对保证电力工业的健康发展乃至整个国民经济的发展均有十分重要的意义。

由于电力负荷变化受天气情况和人们的社会活动等因素的强烈影响, 存在大量的非线性关系。因此, 本文采用了擅长拟合非线性映射的神经网络用于建模, 目前, 神经网络学习的主要算法是 BP 算法, 该算法存在收敛速度慢、易陷于局部极小等

缺点。而遗传算法是一种有效利用在进化迭代中搜集到的启发性信息的自适应搜索算法, 大大减少了陷入局部解的可能性。遗传算法为解决人工神经网络所存在的问题, 继而提高人工神经网络对系统特性辨识的精度和速度, 提供了可能性。同时, 为了解决神经网络隐含层节点没有确定物理意义, 难以确定以及遗传算法初始参数众多, 难以配置的问题, 本文将前向 BP 神经网络结构设计与网络权值训练结合起来考虑, 在本文所提出的改进遗传算法(IGA)基础上, 建立了基于均匀设计(UD)和改进遗传算法的神经网络(NN)构造法, 并用于短期负荷预测。该方法克服了 BP 算法的局限性, 改善了遗传算法早熟收敛的现象, 同时将均匀设计的思想用于优化配置改进型遗传算法控制参数和神经网络隐含层节点个数, 以较少的试验次数得到一组较优的参数配置,

基金项目: 湖南省教育厅资助科研项目(06C718)

一定程度上可以避免配置的盲目性。经样本训练和实际预测, 结果证实模型精度较高, 收敛速度较快。

1 改进型遗传算法^[3,4]

1.1 改进型遗传算法出发点及思路

遗传算法作为一种通用的自适应全局优化概率搜索算法, 包括基因编码、群体初始化、个体评价、选择、杂交、变异等一系列生物演变过程, 由此实现对种群个体逐代择优从而最终获得较优个体。该算法以其简单通用、鲁棒性强、适应范围广以及隐含的并行性等显著特点, 受到广泛关注; 但是, 目前的遗传算法的研究尚处于初期, 它本身在理论上和方法上都尚待完善, 因而在应用上受到较大的限制。本文提出了一种改进型遗传算法(IGA), 算法的出发点为: (1) 维持群体的多样性, 防止出现早熟现象; (2) 改善遗传算法的局部搜索能力; (3) 加快搜索速度; (4) 减少陷入局部极值的机会。

该算法采用 Disruptive 选择策略增加种群迭代过程中的多样性, 采用自适应变异算子增强算法的局部收敛性; 同时, 自适应交叉和变异概率的采用也有助于提高种群迭代过程中的多样性。

1.2 算法的设计

1) 编码

IGA 采用直观的实数编码, 既方便了后面将进行的遗传操作, 又具有直观性和实用性。

2) 初始种群的生成

3) 选择操作

标准遗传算法(SGA)所采用的选择算子在对应相应个体适应度的意义上是单调的, 即个体被选择的概率在一定意义上是与它的适应度成正比的, 舍弃了劣值个体。而本文依据种群偏差度定义了一种能给种群带来多样性的选择算子, 其描述如下:

对于给定的适应度量 f , 令

$$U(X_j) = |f(X_j) - \bar{f}(X)| \quad (1)$$

其中: $\bar{f}(X) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f(X_k)$ 表示种群平均适应度; N 是群体规模, $f(X_j)$ 是群体中第 j 个个体的适应度, $U(X_j)$ 表示个体 j 与群体适应度均值的偏差度。Disruptive 选择按照如下概率公式对每个个体进行选择:

$$P\{Y_i = X_j\} = \frac{U(X_j)}{\sum_{k=1}^N U(X_k)} \quad i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,M \quad (2)$$

从几何上, 这意味着离平均适应度越远的个体被选择的机会越高, 从而与个体的适应度对应不具有单调性, 能带来种群更多样性。

4) 交叉操作

由于算法采用实数编码, 对应的交叉操作通过算术交叉来实现。算术交叉是指由两个个体的某种线性组合生成新个体的繁殖操作, 一般用于实数编码。可设:

$$C(X_1, X_2) = \mu X_1 + (1 - \mu) X_2 \quad (3)$$

其中: X_1, X_2 分别为种群中两个不同的个体, 取

$$\mu = \begin{cases} \xi > 1, & \text{当 } F(X_1) \geq F(X_2) \\ \xi < 0, & \text{当 } F(X_1) < F(X_2) \end{cases} \quad (4)$$

5) 变异操作

本文采用自适应变异算子, 其具体描述如下:

设先在父体向量 $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 中随机选择一个分量, 假设是第 k 个, 然后在它的定义区间 $[a_k, b_k]$ 中均匀随机地选取一个数 x'_k 代替 x_k , 以得到变异后的个体 $y=(x_1, x_2, \dots, x'_k, \dots, x_n)$ 。其中

$$x'_k = \begin{cases} x_k + \Delta(T, b_k - x_k), & \text{如果 } \text{random}(0,1) = 0 \\ x_k - \Delta(T, b_k - x_k), & \text{如果 } \text{random}(0,1) = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\text{random}(0,1)$ 是 $(0,1)$ 之内的随机数, $\Delta(T, y) \in [0, y]$ 是服从均匀分布的一个随机数, 要求随着 T 的减小, $\Delta(T, y)$ 趋于 0 的可能性越大, 从而使得算法对适应度大的个体在较小范围内搜索, 而适应度小的个体在较大范围内搜索, 这样使得变异能根据解的质量自适应地调整搜索区域, 从而能较明显地提高搜索的能力。

函数 $\Delta(T, y)$ 的具体表达式可以取为:

$$\Delta(T, y) = y \cdot (1 - r^{\lambda}) \quad (6)$$

$$T = 1 - \frac{f(x)}{f_{\max}} \quad (7)$$

其中: r 是 $[0, 1]$ 上的随机数, λ 起着调节局部搜索区域的作用, 其取值一般为 $2 \sim 5$ 。 $f(x)$ 表示个体 x 的适应度, f_{\max} 是待求解问题的最大适应度值, 对于许多问题, f_{\max} 是难以确定的。可使用粗略的上限或当前群体中的最大适应度值。

6) 交叉 P_c 、变异概率 P_m 的选择

遗传算法的参数选择是影响其行为和性能的关键, 且直接影响算法的收敛性。为了在保持群体多样性的同时, 保证算法的收敛性, 较理想的方式是自适应改变 P_c 和 P_m 。当种群各个体的适应度趋向一致或趋于局部最优时, 使 P_c 和 P_m 增加; 而当种群适应度较分散时, 使 P_c 和 P_m 减少。同时, 对

于适应度高于种群平均适应度的个体, 对应较低的 P_c 和 P_m , 使该解得以保护进入下一代; 而低于平均适应度的个体, 对应较高的 P_c 和 P_m , 使该解淘汰。 P_c 和 P_m 按照如下公式进行自适应调整:

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f' \geq f_{\text{avg}} \\ k_2, & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (8)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_3(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_4, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: f_{\max} 、 f_{avg} 分别为各代种群最大适应度和平均适应度, f' 为要交叉的两个个体中较大的适应度, f 为要变异个体的适应度。设 $k_1, k_2 \in (0, 1)$, $k_3, k_4 \in (0, 0.5)$ 就可以进行自适应调整了。

2 基于均匀设计的改进的神经网络构造法

为了解决神经网络隐含层节点没有确定物理意义, 难以确定以及遗传算法初始参数众多, 难以配置的问题, 本文将前向 BP 神经网络结构设计与网络训练结合起来考虑, 建立起基于均匀设计(UD)和改进遗传算法(IGA)的神经网络(NN)构造法, 该方法既具有遗传算法的优点, 同时将均匀设计的思想用于优化配置改进型遗传算法控制参数和神经网络隐含层节点个数, 以较少的试验次数得到一组较优的参数配置, 一定程度上可以避免神经网络参数配置的盲目性。

2.1 均匀试验设计方法^[5]

均匀设计法是由我国著名数学家王元院士和方开泰教授, 将数论和多元统计分析相结合, 所创立的一种新型实验方法。该方法主要是通过对均匀设计表的设计来体现的。均匀设计表是一种规格化的表格, 是均匀试验设计的基本工具。均匀设计表以 $U_m(q^s)$ 表示, 表中“U”表示均匀设计; m 表示试验次数; q 表示每个因素有 q 个水平; s 表示表中列数, 表示最多可安排 s 个因素。

下面介绍构造均匀试验设计表的基本步骤:

第一步 给定试验次数 m , 寻找比 m 小的正整数 h , 且使 m 和 h 的最大公约数为 1, 符合这些条件的正整数组成一个生成向量 $H=(h_1, h_2, \dots, h_n)$;

第二步 均匀设计表的第 j 列由下面方法产生 $u_{ij}=j \cdot h_i[\text{mod } m]$ 。这里, $[\text{mod } m]$ 表示同余运算, 若 $j \cdot h_i$ 超过 m , 则用它减去 m 的一个适当倍数, 使差落在 $[1, m]$ 之中。

2.2 均匀试验设计法在神经网络结构选择中的应用

均匀试验设计法在神经网络参数优化问题中应用的具体步骤如下:

(1) 制定因素水平表;

(2) 选择均匀设计表;

(3) 安排试验: 根据因素水平表所确定的因素水平代号对应到均匀设计表中安排因素和水平的位置形成试验计划。

3 基于均匀设计(UD)和改进遗传算法的神经网络(NN)构造法在短期负荷预测中的应用

BP 算法是 BP 网络学习的主要算法。但由于它本质上是一种梯度法, 因此不可避免存在局部极小值问题, 从而也影响了网络的容错性能。而遗传算法作为全局优化的一种通用方法, 保持了一个潜在解的群体, 实现了多个方向上的搜索。同时, 它是一种有效利用在进化迭代中搜集到的启发性信息的自适应搜索算法, 从而大大减少了陷入局部解的可能性, 继而可提高人工神经网络对系统特性辨识的精度和速度。

3.1 网络结构的设计

其模型为前向多层网络, 网络中有输入层、输出层和隐含层各一层。网络结构选为 $32-n-24$, 其中输入层节点三十二个(分别为预测日与其前一天的日期类型、预测日一天的气象因素 T_{\max} 、 T_{\min} 、 T_{av} 与实际负荷数据 $\{L(h), h=1, 2, \dots, 24\}$ 、预测日的天气预报 T_{\max} 、 T_{\min} 、 T_{av}); 输出层节点二十四(预测日的预测负荷数据 $\{L'(h), h=1, 2, \dots, 24\}$)。隐含层节点数为 n , 由于隐含层的节点确定以及 GA 算法控制参数的确定没有系统的方法, 本文将采用改进遗传算法和均匀设计法相结合来确定。这样在考虑影响短期负荷变化的主要因素的基础上, 再通过对 BP 网络的训练, 可以得到预报日基本正常负荷值。

3.2 网络结构的优化

为了获得有效的动态性能的辨识, 本文将改进的遗传算法用于短期负荷预测模型的参数辨识中。改进遗传算法采用直观的实数编码, 以每一权重值的每一自然数字作为基因, 所有权重值的顺序排列组成一个染色体。同时按照均匀设计试验表设计神经网络结构和 GA 算法控制参数, 采用改进遗传算法对神经网络进行训练, 得出较优的神经网络结构。

影响短期负荷预测网络辨识精度的可调因素很多, 通过分析筛选, 确定影响比较显著的 7 个因

素作为优化对象,即 k_1, k_2, k_3, k_4 , 群体规模 M , 最大进化代数 G , 隐含层节点数 n 。同时,为兼顾精度与试验速度,确定每个因素为 10 个水平。根据因素和水平,选取均匀设计表 $U_{10}^*(10^8)$ 来安排试验^[6]。根据因素水平表所确定的因素水平代号对应到均匀设计表中安排因素和水平的位置形成试验计划。具体如表 1 所示。

表 1 神经网络结构参数和 GA 算法控制参数优化的因素水平表

Tab. 1 Structure parameters of neural network and factor level table of GA algorithms control parameters

水平	因素						
	隐含层节点数 n	群体规模 M	最大进化代数 G	k_1	k_2	k_3	k_4
1	6	20	100	0.1	0.1	0.05	0.05
2	13	30	200	0.2	0.2	0.1	0.1
3	20	40	300	0.3	0.3	0.15	0.15
4	27	50	400	0.4	0.4	0.2	0.2
5	34	60	500	0.5	0.5	0.25	0.25
6	41	70	600	0.6	0.6	0.3	0.3
7	48	80	700	0.7	0.7	0.35	0.35
8	54	90	800	0.8	0.8	0.4	0.4
9	61	100	900	0.9	0.9	0.45	0.45
10	68	110	1000	0.95	0.95	0.5	0.5

假设性能指标为训练样本实际输出与预测输出的均方误差平方和。设样本数为 S , 则有

$$J = \frac{1}{2S} \sum_{k=1}^S (\hat{y}(k) - y(k))^2 \quad (10)$$

可将适应度函数取为: $f = \frac{1}{J + M}$, 优化的目的是使得 J 达到某个满意的指标。

表 2 用于单隐层神经网络训练的均匀设计及训练结果
Tab.2 Uniform design used in single hidden neural network and training results

水平	因素							最优性能指标
	隐含层节点数 n	群体规模 M	最大进化代数 G	k_1	k_2	k_3	k_4	
1	6	30	300	0.4	0.5	0.35	0.45	0.0811
2	13	50	600	0.8	0.95	0.15	0.35	0.0393
3	20	70	900	0.1	0.4	0.5	0.25	0.07529
4	27	90	100	0.5	0.9	0.3	0.15	0.0706
5	34	110	400	0.9	0.3	0.1	0.05	0.04024
6	41	20	700	0.2	0.8	0.45	0.5	0.01955
7	48	40	1000	0.6	0.2	0.25	0.4	0.03961
8	54	60	200	0.95	0.7	0.05	0.3	0.0523
9	61	80	500	0.3	0.1	0.4	0.2	0.0414
10	68	100	800	0.7	0.6	0.2	0.1	0.03334

按照表 1 中试验方案进行单隐层神经网络训练,训练结果如表 2 所示,表中对应数值均为每种试验方案经过 100 次试算后的平均值。

从表 2 中综合比较可见,方案 6 训练结果较好。由此所得到的网络用于预测短期负荷,相对误差较小,性能指标相对较优。作为对比,对同一对象采用本文算法、SGA 算法和 BP 算法进行辨识,结果如表 3 所示。从表 3 可见,采用本文算法对加速收敛速度,提高辨识精度有着明显的效果。

表 3 算法的比较

Tab.3 Comparison of different algorithms

算法	训练次数/步	最小均方误差	cpu 计算时间/s
本文算法	700	0.0195 5	63.582 8
SGA	700	0.024 979	92.056 7
BP	700	0.038 341	212.844

3.3 预测结果

以某地区电网每小时用电负荷为数据,用本文所建的基于均匀设计的混合算法的预测模型所编制的负荷预测软件进行了用电负荷预测,在实际应用中取得了良好的效果。图 1、图 2 为一天 24 小时的预测结果:

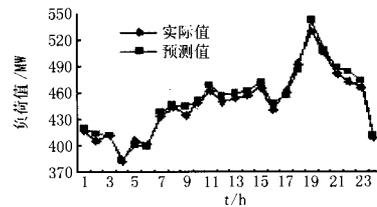


图 1 负荷预测曲线

Fig.1 Load forecasting curves

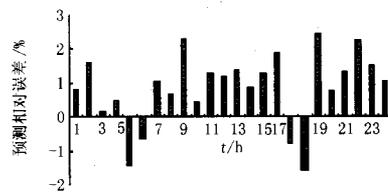


图 2 预测误差

Fig.2 Forecasting error

从以上两图可以看出,该日的负荷预测曲线和实际负荷曲线形状大致相同,相对误差主要集中在 2% 以内,最大相对误差为 2.45%,最小相对误差为 0.09%,预测准确度较高。

(下转第 76 页 continued on page 76)

可靠性、选择性、灵敏性和速动性的要求。但在电力系统生产中,由于接线错误、电流互感器端头标记标反、相序接反和极性标反等原因造成差动保护误动作的事故时有发生,给电力企业安全生产造成重大损失。因此,在设计、施工及以后的检修改造过程中,必须严格按照规程要求,认真分析,把好每一个技术关,确保电流互感器型号、变比等各方面正确,以保证差动保护能真正起到它的保护作用。不能依靠投运后带负荷试验时发现问题。掌握正确的分析方法和试验手段,及时防止此类事故的发生。将有助于提高全系统继电保护和自动装置的运行水平。

参考文献

- [1] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社.
National Power Dispatch and Communication Center. The Practical Question and Answer about Power System Relay Protection(Second Edition)[M]. Beijing: China Electric Power Press.
- [2] 文洪. 差动保护二次回路验证的方法[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版), 2002, (2): 36-38.
WEN Hong. Methods to Verify Correct Wiring of Differential Protection Current Loop[J]. Journal of Changsha University of Electric Power(Natural Science), 2002, (2): 36-38.
- [3] 倪红叶. 六角图法检测变压器差动保护接线的正确性[J]. 重庆工业高等专科学校学报, 2001, (3): 39-41.
NI Hong-ye. The Correctness of Using Hexangular Cartographic Mapping to Check the Differential Protection Connecting on Transformer[J]. Journal of Chongqing Polytechnic College, 2001, (3): 39-41.
- [4] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
YUAN Ji-xiu, SHENG He-le, WU Ju-ye. Directory of Current Transformer for Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [5] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
WANG Wei-jian. Relay Protection of Electric Main Equipment Their Principle and Application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- 收稿日期: 2006-09-17; 修回日期: 2006-11-28
- 作者简介:
张浩(1977-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护设备的调试和研究; E-mail: yjzhou@whu.edu.cn
胡文波(1968-), 男, 本科, 工程师, 主要从事电力系统安全生产管理工作;
张艳(1975-), 女, 本科, 工程师, 主要从事电力系统继电保护设备的调试和研究。
- (上接第 69 页 continued from page 69)
- #### 4 结论
- 针对 BP 算法存在的缺陷, 如训练速度慢, 易收敛于局部极小点及全局搜索能力弱等, 利用遗传算法能够进行全局最优化搜索这一特点, 本文提出了一种基于均匀设计(UD)和改进遗传算法的神经网络(NN)构造法, 并将该方法应用于电力系统短期负荷预测, 仿真结果证明了该方法在预测精度和收敛速度方面均得到了较大改进, 可以满足短期负荷预测的需要。
- #### 参考文献
- [1] 于尔铿, 刘广一, 周京阳. 能量管理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
YU Er-keng, LIU Guang-yi, ZHOU Jing-yang. Energy Management System[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [2] 康重庆, 夏清, 张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 1-11.
KANG Chong-qing, XIA Qing, ZHANG Bo-ming. Power System Load Forecasting: Current Status and Future Prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 1-11.
- [3] 王小平, 曹立明. 遗传算法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
WANG Xiao-ping, CAO Li-ming. Genetic Algorithm[M]. Xi'an: Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002.
- [4] Skok M, Krajcar S. Genetic Algorithm and GIS is Enhanced Long Term Planning of Large Link Structured Distribution System[A]. In: IEEE Proceedings of the 2002 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering[C]. Kunming: 2002. 55-59.
- [5] 何大阔, 王福利, 张春梅. 基于均匀设计的遗传算法参数设定[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(5): 409-411.
HE Da-kuo, WANG Fu-li, ZHANG Chun-mei. Establishment of Parameters of Genetic Algorithm Based on Uniform[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2003, 24(5): 409-411.
- [6] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 12-15, 71.
FANG Kai-tai. Uniform Design and the Uniform Design Table[M]. Beijing: Science Press, 1994. 12-15, 71.
- 收稿日期: 2005-12-28
- 作者简介:
赵宇红(1973-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用。E-mail: gsx1666@163.com