

基于遗传优化神经网络的电力系统短期负荷预测

王武, 张元敏, 蔡子亮

(许昌学院电气与信息工程学院, 河南 许昌 461000)

摘要: 电力系统短期负荷预测是电力系统运行管理和实时控制所必须的基本内容, 预测结果的准确性对电力系统的安全、优质、经济运行具有重要意义。通过非参数预测法建立电力系统短期负荷预测模型, 以此作为 Elman 神经网络训练的样本集, 实现网络样本设计、结构设计及网络训练, 充分发挥 Elman 神经网络动态特性, 将改进的遗传算法和 Elman 神经网络相结合, 通过选择、交叉、变异等遗传操作, 实现了神经网络权值优化。采用基于遗传优化神经网络的电力系统短期负荷预测新算法, 提高了负荷预报精度, 具体算例证明了算法的可行性和有效性。

关键词: 遗传算法; 神经网络; 电力系统; 短期负荷预测; 优化

Neural network based genetic algorithm optimizing for short-term load forecasting

WANG Wu, ZHANG Yuan-min, CAI Zi-liang

(Electro-Information College, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: Short-term load forecasting is fundamental for running and controlling in power system and the veracity of forecasting result is crucial for power system's secure and favorable running. A new method for short-term load forecasting is presented based on neural network optimized by genetic algorithm(GA), short-term load forecasting model for power system is set up by non-parameters method as sample sets for Elman neural network(Elman NN).With GA's optimizing and Elman NN's dynamic feature, the weight optimization is realized by selection, crossing and mutation operations. The simulation indicates the method is feasible and effective.

Key words: genetic algorithm; neural network; power system; short-term load forecasting; optimization

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2008)09-0039-04

0 引言

电力系统负荷预测通常是指以月、周、日为时间单位的负荷指标预测, 是电力系统运行管理和实时控制所必须的基本内容, 预测结果的准确与否对电力系统的安全、优质和经济运行有显著影响。由于影响预测的因素众多、预测指标规律各异、变化趋势随机性强, 难以确定统一的预测模型, 从而提高预测精度有一定的难度。因此, 寻求有效的负荷预测方法, 提高预测精度具有重要的意义。

传统的随机时间序列预测方法是 80 年代以前的主要预测方法^[1], 但其建模所需统计特征难以确定, 对非平稳状态难以辨识。1970 年, Sijesen 采用谱分解技术进行负荷预测^[2], 开始将负荷预测应用于实际系统, Toyoda 将状态空间模型和卡尔曼滤波引入负荷预测^[3], 获得了负荷预测的在线应用; 80 年代末, Rahman 把专家系统引入到短期负荷预测

中^[4], 引起人们的极大关注。90 年代以来, 灰色预测模型和人工神经网络模型开始被用于电力负荷预测^[5], 并取得了成功的应用, 灰色预测模型的优点是建模时不需要计算特征量, 从理论上讲, 可以适用于任何非线性变化的负荷指标预测, 不足之处是其微分方程指数解比较适合于具有指数增长趋势的负荷指标, 而对于具有其他趋势的指标, 有时拟合灰度较大, 精度难以提高。支持向量机 (SVM) 应用于电力系统短期负荷预测也取得了广泛的应用研究^[6], 它基于统计学习理论, 通过结构风险最小化原理来提高泛化能力, 能够解决小样本、非线性、高维数和局部极小等问题, 在基于 ε -支持向量机的电力负荷预测方法中, 需要实现确定不敏感损失函数中的参数 ε , 而参数 ε 的选择在某些情况下非常困难。人工神经网络方法由于能不断学习新知识, 可处理复杂的非线性映射以及具有高度的鲁棒性, 因而被认为最有希望的负荷预测新方法^[7]; 传统的

神经网络大多采用 BP 训练方法, BP 网络是一种静态神经网络, 存在诸如学习速度慢、存在局部极小等问题, 影响了负荷预测的在线实时性对时间的要求与全局寻优要求。为了克服上述缺陷, 本文采用 Elman 动态反馈型神经网络, 将改进的遗传算法引入神经网络, 对网络模型进行优化改进, 从而取得了较高的电力负荷预测精度。

1 短期负荷预测模型原理

电力负荷预测是一种时间序列预测^[8,9]。通常用于时间序列预测的方法有两种: 一是参数预测法, 二是非参数预测法。用人工神经网络进行时间序列是一种非参数预测方法, 它无须对信号模型做假设, 因此, 比参数方法有更广泛的应用范围。时间序列预测可以理解成一种由历史记录来计算未来趋势的数学映射, 通过 m 点历史数据对未来趋势进行提前 k 步预测的数学模型为:

$$X(i), X(i+1), \dots, X(i+k) = \\ p(X(i-1), X(i-2), X(i-m))$$

其中: $i = m+1, m+2, \dots, (N-m-k)/s$ 为子学习样本数目; N 为样本数据长度; s 为滑动点数 (通常取 1)。由于回归神经网络能够逼近样本数据中隐含的映射关系, 所以文中采用神经网络解决时间序列预测问题。

2 Elman 神经网络

Elman 神经网络是 Elman 于 1990 年提出的, 该模型在前馈网络的隐含层中增加一个承接层, 作为一步延时算子, 达到记忆的目的, 从而使系统具有适应时变特性的能力, 能直接反映动态过程系统的特性。

2.1 Elman 型回归神经网络模型

Elman 型回归神经网络一般分为四层: 输入层、中间层、承接层和输出层, 如图 1 所示:

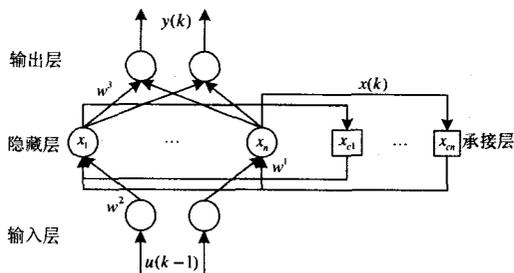


图 1 Elman 神经网络的模型

Fig.1 Elman network structure

输入层起信号传输作用, 输出层单元起线性加权作用。隐含层单元的传递函数可采用线性或非线性函数, 承接层又称上下文层或状态层, 它用来记忆隐含层单元前一时刻的输出值, 可以认为是一个一步延时算子^[10]。Elman 型回归神经网络的特点是隐含层的输出通过承接层的延迟与存储, 自联到隐含层的输出, 这种自联方式使其对历史状态的数据具有敏感性, 内层反馈网络的加入增加了网络本身处理动态信息的能力, 使系统具有适应时变特性的能力, 从而达到了动态建模的目的。所以文中采用了 Elman 型回归神经网络, 而没有采用传统的基于 BP 算法的静态前馈神经网络。克服了需要模型结构定阶、收敛速度慢、网络节点多、训练困难及外部噪声敏感等弊病^[11]。

2.2 Elman 型回归神经网络的学习过程

Elman 网络的非线性状态空间表达式为:

$$y(k) = g(w^3 x(k)) \\ x(k) = f(w^1 x_c(k) + w^2 u(k-1)) \\ x_c(k) = u(k-1)$$

其中: y, x, u, x_c 分别表示 m 维输出结点向量, n 维中间层结点单元向量, r 维输入向量和 n 维反馈状态向量。 w^3, w^2, w^1 分别表示中间层到输出层、输入层到中间层、承接层到中间层的连接权值。 $g(\cdot)$ 为输出神经元的传递函数, 是中间层输出的线性组合。 $f(\cdot)$ 为中间层神经元的传递函数, 常用 S 函数。

Elman 型回归神经网络采用下式进行权值修正, 学习指标采用误差平方和函数:

$$E(w) = \sum_{k=1}^n \left[y_k(w) - \tilde{y}_k(w) \right]^2$$

其中: $\tilde{y}_k(w)$ 为目标输出向量。

2.3 神经网络的样本设计、结构与训练

电力系统短期负荷是按时间顺序排列的数字序列, 具有统计意义上的关系, 这种关系很难用确定的函数或方程组来描述。基于神经网络对时间序列进行预测, 通常根据已有的样本数据对网络进行训练。如果希望用过去的 $N(N \geq 1)$ 个数据预测未来 $M(M \geq 1)$ 个时刻的值, 即进行 M 步预测, 可取 N 个相邻的样本为滑动窗, 并将它们映射为 M 个值, 这 M 个值代表在该窗之后的 M 个时刻上的样本预测值。我们采用表 1 所示的样本数据分段方法, 将训练数据分成 K 段长度为 $(N+M)$ 的有一定重叠的数据段, 每一段的前 N 个数据作为网络的输入, 后 M 个数据作为网络的输出。

表 1 样本数据分段方法

Tab.1 Segment method for sample data

N 个输入	M 个输出
X_1, X_2, \dots, X_N	$X_{N+1}, X_{N+2}, \dots, X_{N+M}$
X_2, X_3, \dots, X_{N+1}	$X_{N+2}, X_{N+3}, \dots, X_{N+M+1}$
...	...
$X_K, X_{K+1}, \dots, X_{N+K-1}$	$X_{N+K}, X_{N+K+1}, \dots, X_{N+M+K-1}$

电力系统的负荷受温度、时段、节假日以及环境等诸多因素的影响^[12], 此处只研究在历史数据情况下神经网络的预测功能, 进行一周的预测, 将一天分成四个时段, 给出如表 2 所示的电力系统的负荷数据, 此处给出归一化的结果, 将前 6 天的数据作为网络的训练样本, 每 3 天的负荷作为输入向量, 第 4 天的负荷作为目标向量。由此得到 3 组训练样本。第 7 天的数据作为网络的测试样本, 测试网络的预测精度。

表 2 电力负荷数据

Tab.2 Load data of power system

星期	负荷数据			
星期一	0.4213	0.4507	0.6653	0.8113
星期二	0.4179	0.4477	0.6781	0.7802
星期三	0.4317	0.4525	0.6806	0.8001
星期四	0.4357	0.4590	0.6819	0.8011
星期五	0.4401	0.4611	0.6901	0.8098
星期六	0.4412	0.4645	0.6988	0.8112
星期日	0.4415	0.4691	0.7201	0.8330

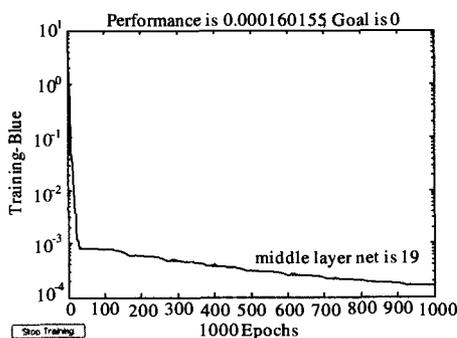


图 2 神经网络训练结果

Fig.2 Performance of neural network training

通过以上的样本设计, 神经网络的输入层有 12 个神经元, 输出层有 4 个神经元^[13]。通过实验, 选择出网络中间层神经元数目, 提高预测精度。给定训练步数为 1000, 通过实验, 在网络中间层为 19

个神经元时, 预测效果最好, 网络训练结果如图 2 所示, 可见经过 1000 次训练后, 网络的训练误差为 0.000 160 155, 预测误差已经非常小了。

3 基于遗传算法的神经网络权值优化

由于 Elman 神经网络的权值修正仍然采用 BP 神经网络的调整算法, 其学习结果对初始权向量异常敏感, 神经网络训练具有很大的盲目性, 并且有可能在网络权值参数优化时陷入局部极小, 使得网络的泛化能力及适应能力较差, 甚至带来死机和无法满足精度要求的情况。由于作为仿真, 文中的样本数据很少, 预测效果不错, 但是如果应用在非常大的样本空间里, 弊端就非常明显了。因此, 本文应用遗传算法对网络权值进行训练。

遗传算法是基于自然选择和自然基因的搜索算法, 通常由三个基本操作组成: 选择、交叉和变异。GA 通常应用于神经网络权值训练, 网络结构的设计以及寻找最优学习规则。由于通过实验已经确定了网络的结构, 所以, 此处我们只用遗传算法进行神经网络权值修正^[14]。

对于文中设计的网络, 输入层有 12 个神经元, 输出层有 4 个神经元, 中间层有 19 个神经元, 此处充分保留 Elman 神经网络的动特性, 对其承接层到中间层的连接权值不予优化, 只优化输入层到中间层共 $12 \times 19 = 228$ 条边和中间层到输出层的 $19 \times 4 = 76$ 条边。具体做法为:

- 1) 编码: 将权值 w_{ij} 编成长度为 l 的二进制代码字符串。
- 2) 决定初始种群, 把神经网络的节点编号, 将连接权 w_{ij} 组成一组数据, 代表一个个体, 若干个数据组构成初始种群。
- 3) 适应度计算, 以神经网络的输出节点误差的网络能量函数 E 为基础, 选定 $F = C/E$, 其中 C 为一常数, E 为网络的能量函数。
- 4) 选择操作, 把上一代群体中适应度最大的 10% 直接进入下一代群体中, 另外的 90% 有适应度决定。
- 5) 交叉操作, 采用单点交叉, 交叉概率取 0.8。
- 6) 变异操作, 采用基本位变异算子, 防止丢失有用的可能解, 保证算法的全局收敛, 变异概率设为 0.02。
- 7) 令 $t = t + 1$, 继续计算适应度。
- 8) 判断终止条件, 满足则停止, 否则返回 4)。
- 9) 结束过程。找出最佳权值串, 作为神经网络

络权值,过程结束。

同样以表2的负荷数据作为研究内容,不改变神经网络结构,采取遗传算法优化神经网络的权值,取交叉概率为0.8,变异概率为0.02,神经网络的训练结果如图3所示,经过1000次训练后,网络的训练误差为0.000 101 058,预测误差与GA优化之前相比,又减小很多,提高了负荷的预报精度^[15]。值得注意的是,如果样本的空间变得更大,网络结构更为复杂,单纯BP算法收敛速度将会更慢,而应用遗传算法进行权值优化就更为必要;但是要注意群体的规模要取适中,规模太大,运算量过大,收敛速度减慢,如果选得过小,则可能出现过早收敛并不易求得全局最优解,根据经验,群体规模一般取10~160,在本算例中,规模选为36时仿真效果较好;交叉概率的选择也要注意,交叉概率过大,虽然能够提高搜索效率,但很有可能丧失好的个体,交叉概率的经验取值范围是0.40~0.99,本算例中交叉概率取为0.8;从实验的过程看,在样本空间很大的时候,适当的缩小规模,稍微提高交叉概率,系统的整体搜索效率会提高,并且也能保证较高的预报精度。

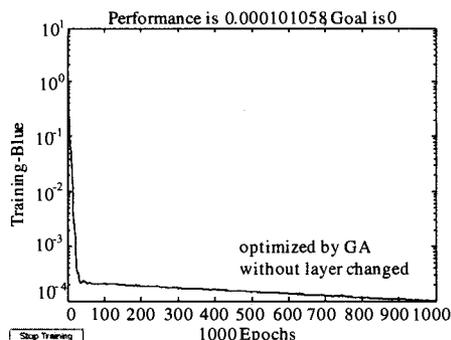


图3 遗传算法优化神经网络的训练结果

Fig.3 Performance of NN training optimized by GA

4 结论

本文根据电力系统短期负荷预测模型的原理,实现了Elman回归动态神经网络的预测模型,给出了具体的样本设计和网络实现方法。通过遗传算法进行神经网络权值优化,使系统的预测精度更高,仿真实验表明了算法的可行性。论文作为电力系统负荷分析和预测的一种方法初探,把气象、温度等因素尚未考虑进去,若将各种因素全面考虑分析,文中探讨的模型将更具有实用性和科学性。

参考文献

- [1] 牛东晓,曹树华,赵磊,等.电力负荷预测技术及其应用[M].北京:中国电力出版社,1998.188-204.
NIU Dong-xiao, CAO Shu-hua, ZHAO Lei, et al. Power Load Forecast Technology & Application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.188-204.
- [2] Sijesen D P. Short Term Load Forecasting in Power System[A]. In: Proc. 25th Annual ISA Conf[C]. Philadelphia: 1970.26-29.
- [3] Toyoda H, Chen M, Inoue Y. An Application of State Estimation to Short-Term Load Forecasting[J]. IEEE Trans on Power Appar Syst, 1970, 89(5): 1678-1688.
- [4] Rahman S, Bhatnagar R. An Expert System Based Algorithm for Short Term Load Forecast[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(2): 392-399.
- [5] NIU Dong-xiao. Adjustment Gray Model for Load Forecasting of Power Systems[J]. IEEE Trans on PWRs, 1990: 1535-1547.
- [6] 王锡淮,朱思峰.基于支持向量机的船舶电力负荷预测[J].中国电机工程学报,2004,24(10):36-39.
WANG Xi-huai, ZHU Si-feng, Ship Power Load Forecasting Using Support Vector Machine[J]. Proceedings of CSEE, 2004, 24(10): 36-39.
- [7] Khotanzad A. Afkhami-Rohani R, Maratukukulam D. ANNSTLF-Artificial Neural Network Short-time Load Forecaster-generation Three[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(4): 1413-1422.
- [8] Pandit S M, Wu S M. Time Series and System Analysis with Applications[M]. New York: 1993.56-103.
- [9] 张海涛,陈宗海,朱六璋,等.基于改进FLN的短期电力负荷预测算法[J].电工技术学报,2004,5(5):92-96.
ZHANG Hai-tao, CHEN Zong-hai, ZHU Liu-zhang, et al. Forecasting Algorithm of Short-term Electric Power Load Based on Improved FLN[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 5(5): 92-96.
- [10] 徐丽娜.神经网络控制[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1999.35-45.
- [11] Narendra K S, Parthasarathy K. Identification and Control for Dynamic Systems Using Neural Networks[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1990, 1(1): 4-27.
- [12] 张勇军,任震,等.电压无功优化的强多样性遗传算法[J].电力自动化设备,2003,23(1):18-21.
ZHANG Yong-jun, REN Zhen, et al. Diversity Enhancing Genetic Algorithm for Voltage and Reactive Power Optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 18-21.
- [13] 闻新,等. MATLAB神经网络仿真与应用[M].北京:科学出版社,2003.120-140.
WEN Xin, et al. MATLAB Neural Networks Simulation and Application[M]. Beijing: Science Press, 2003. 120-140.

(下转第47页 continued on page 47)

的激励契约会使得部分效率低的代理人选择不参与市场;当考虑代理人的参与约束时,委托人提出的激励契约会使得效率最低的代理人收益为零,此时代理人获得的收益整体要高于不考虑参与约束时的水平,而委托人的期望收益相应降低。

本文建立的模型没有考虑市场情况对代理人行为的影响,实际上代理人的售电量和售电价与市场情况相关,如何在设计激励契约时考虑代理人市场行为将是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] Carlos Silva, Bruce F, Zheng C Z. Application of Mechanism Design to Electric Power Markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16 (1): 1-8.
- [2] ZOU Ben-guo, WANG Da-peng, LI Lei, et al. Research of Incentive Revelation Mechanism in Power System Optimal Security Control[A]. In: Proceedings of the CSEE, 2006 International Conference on Power System Technology[C]. 2006.1-5.
- [3] 谢俊, 陈星莺. 激励相容的输配分开电力市场竞价机制初探[J]. 电网技术, 2006, 30 (8): 60-64.
XIE Jun, CHEN Xing-ying. A Preliminary Study on Incentive Compatible Bidding Mechanism for Electricity Market with Separated Power Transmission and Distribution[J]. Power System Technology, 2006, 30(8):60-64.
- [4] 郭金, 曹福成, 谭忠富, 等. 电网公司与供电公司激励机制设计[J]. 继电器, 2005, 33 (8): 18-21.
GUO Jin, CAO Fu-cheng, TAN Zhong-fu, et al. Incentive Mechanism Design Between Power Network Corporation and Power Supply Corporation[J]. Relay, 2005, 33 (8): 18-21.
- [5] 陈志文, 杜松怀. 电力市场中可中断负荷的定价方法[J]. 水电能源科学, 2007, 25(1): 42-45.
CHEN Zhi-wen, DU Song-huai. Pricing Methods of Interruptible Load in Power Market[J]. Water Resources and Power, 2007, 25(1): 1-5.
- [6] 刘坤, 王先甲, 方德斌, 等. 区域电力市场中电网公司与调峰电厂的最优合同设计[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 27-30.
LIU Kun, WANG Xian-jia, FANG De-bin, et al. Optimal Contract Design Between Network Corporation and Regulating Power Station in Region Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 27-30.
- [7] Murat F, Fernando L A. Designing Incentive Compatible Contracts for Effective Demand Management[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (4): 1255-1260.
- [8] 林伟明, 康重庆, 钟金, 等. 基于委托-代理机制的可靠性管理模式[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (1): 19-24.
LIN Wei-ming, KANG Chong-qing, ZHONG Jin, et al. Reliability Management Model Based on Principal-agent Mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (1): 19-24.
- [9] 李海英, 李渝曾, 张少华. 一种激励相容的输电阻塞管理模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (19): 36-40.
LI Hai-ying, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua. An Incentive Compatible Model for Transmission Congestion Management[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (19): 36-40.
- [10] Bernheim D, Whinston M. Common Marketing Agency as a Device for Facilitating Collusion[J]. The Road Journal of Economics, 1985, 16(2).
- [11] Bernheim D, Whinston M. Common Agency[J]. Econometrica, 1986, 54(4): 923-942.
- [12] 于立宏, 管锡展. 多委托人激励理论: 一个综述[J]. 产业经济研究, 2005, (3): 54-63.
YU Li-hong, GUAN Xi-zhan. A Survey on Multiprincipals Incentive Theory and Its Applications[J]. Industrial Economics Research, 2005, (3): 54-63.
- [13] Calzolari G, Scarpa C. Non-intrinsic Common Agency[J]. 1999.

收稿日期: 2008-02-12; 修回日期: 2008-03-25

作者简介:

韩冰(1982-), 女, 博士研究生, 主要从事水电参与与电力市场竞争等方面的研究; E-mail:hdhanbing@163.com

张粒子(1963-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力市场、人工智能及专家系统和电力系统分析与控制等领域的教学和科研工作。

(上接第 42 页 continued from page 42)

- [14] Krishnakumar K, Goldberg D E. Control System Optimization Using Genetic Algorithms[J]. Guidance Control Dyn, 1994, (15): 735-740.
- [15] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. 210-225.
WANG Xiao-ping, CAO Li-ming. Genetic Algorithms Theory, Applications & Realization of Software[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. 210-225.

作者简介:

王武(1978-), 男, 助教, 硕士, 主要从事控制理论与控制工程、智能控制、电力系统分析与计算; E-mail:jhwilz@tom.com

张元敏(1963-), 男, 副教授, 从事电工电子方向的教学研究工作;

蔡子亮(1965-), 男, 副教授, 主要从事电力系统自动化方向的研究。

收稿日期: 2007-02-05; 修回日期: 2007-05-21