

基于模糊聚类与 RBF网络的短期负荷预测

王平, 张亮, 陈星莺

(河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用模糊聚类分析方法, 应用隶属度来描述负荷与影响负荷变化因素之间的关系, 得到一批与预测日在样本信息上类似的历史日; 改进 RBF网络的训练算法, 增强 RBF网络的局部逼近能力和泛化能力, 采用由模糊聚类分析获得的样本对 RBF网络进行训练, 在不需大量训练样本的前提下实现对短期负荷的预测。对浙江省某地区电网的实际负荷数据仿真结果表明: 该方法预测的日平均相对误差为 1.91%, 预测准确度为 97.41%。

关键词: 模糊聚类; 隶属度; RBF网络; 短期负荷预测

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)10-0064-04

0 引言

短期负荷预测^[1]是指预测未来一天至一周的电力负荷, 为电力系统预调度计划提供决策依据。它通过对已有的历史负荷和影响负荷变化的各种相关因素进行分析和研究, 采用有效的预测方法, 在满足一定精度的前提下, 对未来 24 h至 168 h的电力负荷作出预测。

模糊集理论^[2,3]是数学领域近年来发展较快的一个分支。模糊集将普通集合的特征函数灵活化, 使元素对集合的从属程度由只能取 {0, 1} 中的值扩充到 [0, 1] 中的任何值, 一个元素和一个集合的关系, 不一定是绝对的“属于”或“不属于”, 而需要考虑元素隶属于集合的程度是多少。所以, 模糊集合是经典集合的推广, 让精确的数学语言进入了模糊现象的禁区。短期负荷预测中, 影响负荷变化的因素与预测对象之间没有绝对的隶属关系, 只有相对的隶属程度。因此, 用模糊集来刻画影响因素与预测对象之间的关系, 是非常合理的。

基于模糊集理论的模糊聚类分析, 近年来研究较多, 并且已经在环境保护、地质勘探、气象预报等领域得到很多应用^[4]。但是, 把模糊聚类分析应用于电力系统短期负荷预测, 目前研究较少。

人工神经网络 (ANN)^[5]是近十几年来的研究热点, 把 ANN 应用于电力系统短期负荷预测, 研究的较多, 方法也较为成熟。但是, 单纯采用 ANN 进行短期负荷预测, 基本上都需要大量的训练样本, 来大范围映射负荷变化的因素与负荷值之间复杂的非线性关系, 使得训练的过程中误差较大^[7]。

本文在分析模糊聚类与 ANN 各自特点的基础上, 发挥它们各自的优势, 提出一种新的短期负荷预测方法: 基于模糊聚类分析与径向基函数网络 (RBF) 的短期负荷预测。在该方法中, 首先从历史样本中采样, 将影响负荷变化的影响因素 (气温、日类型、光照量、降雨量) 数值化, 进行模糊聚类分析, 得到一批与预测日样本信息类似的历史日样本信息; 然后将这些历史日样本信息及相应的历史日负荷值输入 RBF神经网络, 对网络进行训练; 最后, 将预测日样本信息输入训练好的 RBF网络, 实现对短期负荷的预测。该方法利用模糊聚类分析对类似信息的聚类能力, 从历史日中选取与预测日类似的一批样本, 利用 RBF网络的局部逼近能力, 保证了在历史样本较少的情况下也能成功进行短期负荷预测。采用该方法对浙江省某地区电网的短期负荷预测结果显示: 该方法的日平均相对误差为 1.91%, 预测准确度为 97.41%。

1 预测样本的模糊聚类分析

由 Tamura 首创的基于模糊等价关系的动态聚类分析方法^[2], 发展较早, 是一种实用的聚类分析方法。该方法的基本思想是将预测样本的各项指标进行量化, 形成指标特征值, 然后对指标特征值进行相似性标定, 形成模糊矩阵 R, 通过模糊计算, 形成具有自反性、对称性和传递性的模糊等价矩阵 $t(R)$, 最后选取水平值 λ 进行分类。

1.1 模糊相似矩阵 R 的建立

设 n 个样本组成的集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 每个样本有 m 个指标特征值 $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})$, 所

以集合 X 可用矩阵表示为 $X = \{x_{ij}\}_{m \times n}$, 其中 x_{ij} 为聚类样本 j 指标 i 的特征值, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。计算 x_j 的:

$$\text{均值: } \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ji} \quad (1)$$

$$\text{标准差: } S_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ji} - \bar{x}_j)^2} \quad (2)$$

$$\text{标准化值: } x_{ji} = \frac{x_{ji} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (3)$$

$$\text{相对隶属度: } r_{ji} = \frac{x_{ji} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (4)$$

式 (1)、(2)、(3) 是对样本数据的预处理, 使得实际样本指标值差异较大的数据具有可比性, 并且使所有样本值标准化在 $[0, 1]$ 闭区间中。式 (4) 中, r_{ji} 称为样本 j 的指标 i 对某种模糊概念聚类的相对隶属度, 由该式得到样本指标对某种模糊概念的相对隶属度矩阵 $R = \{r_{ij}\}_{n \times n}$ 。

1.2 样本的模糊分类

采用基于模糊等价关系的动态聚类分析方法对样本进行分类, 要求模糊相似矩阵 R 具有自反性、对称性和传递性。而式 (4) 一般只具备自反性和对称性, 不具备传递性。

模糊集理论^[2]指出, 从一个传递矩阵 R , 通过求 R 的传递闭包可以构造一个模糊等价矩阵, 且运算次数不超过 n 次。

采用平方法^[2]求传递闭包简洁、有效。具体做法为: $R \cdot R = R^2, R^2 \cdot R^2 = R^4, \dots$, 经过不超过 n 的有限次运算, 存在一个自然数 $s (2^s \leq n)$, 使得 $R^{2^s} = R^{2^{s+1}}$, $t(R) = R^{2^s}$ 就是所求的模糊等价矩阵, 该矩阵满足传递性要求。这里:

$$R \cdot R = R^2 \triangleq (r_{ij}^2)_{n \times n} \quad (5)$$

$$r_{ij}^2 = \bigvee_{l=1}^n (r_{il} \cdot r_{lj}) \quad (6)$$

式 (5)、(6) 中, $i, j = 1, 2, \dots, n$, “ \bigvee ” 表示取大, “ \cdot ” 表示取小。

由于 $t(R)$ 是模糊等价矩阵, 所以选取不同的水平值 α 对 $t(R)$ 进行截取, 便得到样本的一系列模糊分类。

2 径向基函数 (RBF) 网络

RBF 网络^[5,6]通常由三层组成, 如同 1.1 所示, 由输入层、径向基层 (隐层) 和输出层组成。其中, 输入层传递输入信号到隐层, 隐层由径向基作用函数构成, 输出层通常由线性函数构成。

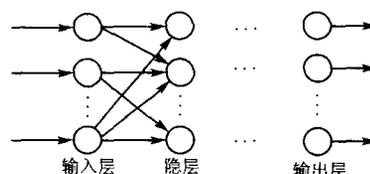


图 1 径向基函数网络

Fig 1 Radial basis function network

不同于反向传播 (BP) 网络的隐层节点作用函数 (通常是 Sigmoid 函数^[5]), RBF 网络隐层的作用函数通常采用高斯函数:

$$R_i(x) = \exp\left[-\frac{x - c_i}{b_i}\right] \quad (7)$$

式 (7) 中, $i = 1, 2, \dots, m$, m 是隐层神经元的个数; x 是 n 维输入向量; c_i 是第 i 个径向基函数的中心, 与 x 同维; b_i 决定了第 i 个隐层神经元对输入向量的感知程度。

由式 (7) 可见, $R_i(x)$ 在 c_i 处取得唯一的最大值, 当 x 偏离 c_i 时, $R_i(x)$ 迅速衰减。径向基函数的这个特点, 使得只有当输入信号落在一个很小的区域时, 网络才能作出非零响应, 保证了 RBF 网络对输入信号优良的检测能力、局部逼近能力和泛化能力。

RBF 神经网络的训练算法很多, BP 网络的反向传播算法也可用于 RBF 网络的训练。但是, 为了充分发挥 RBF 网络对输入信号的局部逼近能力和泛化能力, 本文设计的训练算法为: 由模糊聚类分析结果, 将 c_i 分别固定为与预测日模糊值较接近的历史日样本信息, b_i 的最大值不超过样本各指标特征值差值的最大值 M , 最小值不超过样本各指标特征值差值的最小值 m ; 初始化 $b_i (m < b_i < M)$ 和隐层与输出层的连接权 $W_{ij} (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n)$, n 为输出层神经元的个数; 由样本输入, 计算网络的实际输出, 根据实际输出与期望输出的差值来修正 b_i 和 W_{ij} , 采用梯度下降算法, 但要求 b_i 满足 α 中的约束。

3 预测算法流程

为降低问题求解规模, 对一天中每一个预测点分别建立预测模型, 算法如下:

1) 将样本的各项指标数值化。对日类型指标, 工作日取 1, 休息日取 2; 对光照量指标, 晴天取 1, 多云取 2, 阴天取 3, 雨天取 4; 对降雨量指标, 无雨取 0, 小雨取 1, 中雨取 2, 大雨取 3, 暴雨取 5; 对最高

温度指标和最低温度指标,分别取实际值。

2) 选取预测日及预测日前 2 周的历史日作为样本,形成样本集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{15}\}$ 。 x_{15} 代表预测日, x_{14} 代表预测日前 1 天, x_{13} 代表预测日前 2 天, ..., x_1 代表预测日前 14 天。

3) 对样本集 X 进行模糊聚类分析,形成模糊等价矩阵 $t(R)$;选取水平值 λ 对进行截取,原则为在预测日样本所在的模糊子集样本数 $n \geq 5$ 的前提下尽量抬高 λ 值,形成 RBF 网络的训练样本 ($X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$),其中预测日样本 x_i ($1 \leq i \leq n$) 不参与网络训练,将 X 中历史日样本对应的负荷值一起,对 RBF 网络进行训练。

4) 对训练好的 RBF 网络,输入预测日样本 x_i ,得出预测结果。

4 实例分析

采用上述算法,对浙江省某地区电网 2002 年某日负荷进行了 24 点的预测,原始样本数据及分类结果如表一所示(其中 2 月 15 日为待预测日),并且将本文方法与 BP 网络算法进行比较,预测结果比较如表 2 所示。

表 1 原始样本数据及分类结果

Tab 1 Primitive sample data and classification result

| 日期 | 日类型 | 光照量 | 降雨量 | 最高温度 | 最低温度 | 分类结果 |
|------|-----|-----|-----|------|------|------|
| 2.1 | 工作日 | 阴 | 小 | 13 | 5 | II |
| 2.2 | 工作日 | 阴 | 小 | 18 | 9 | III |
| 2.3 | 工作日 | 多云 | 无 | 15 | 10 | II |
| 2.4 | 工作日 | 晴 | 无 | 21 | 9 | I |
| 2.5 | 休息日 | 晴 | 无 | 23 | 11 | I |
| 2.6 | 休息日 | 晴 | 无 | 19 | 7 | I |
| 2.7 | 工作日 | 多云 | 无 | 16 | 10 | I |
| 2.8 | 工作日 | 晴 | 无 | 20 | 10 | I |
| 2.9 | 工作日 | 多云 | 无 | 18 | 7 | II |
| 2.10 | 工作日 | 多云 | 无 | 16 | 8 | II |
| 2.11 | 工作日 | 多云 | 无 | 18 | 5 | II |
| 2.12 | 休息日 | 多云 | 小 | 15 | 8 | III |
| 2.13 | 休息日 | 雨 | 小 | 16 | 7 | III |
| 2.14 | 工作日 | 雨 | 小 | 17 | 9 | III |
| 2.15 | 工作日 | 雨 | 小 | 15 | 9 | III |

由表 1 可见,聚为 I 类的各日多为晴天,气温偏高;聚为 II 类的多为多云天气,基本上没有降雨;聚为 III 类的各日多为雨天,有少量的降雨。模糊聚类分析方法能够将样本信息相近的各日聚类为模糊子集,为 RBF 神经网络的训练提供与预测日信息相近的样本。

对表 2 的预测结果数据进行分析:24 点日负荷

预测合格点数为 22 个,日预测平均相对误差为 1.93%,准确度为 97.41%。可见:采用该算法进行负荷预测,能够在历史样本较少的情况下取得较为满意的预测精度和预测效果;并且与普通 BP 神经网络算法相比,在历史样本较少的情况下预测精度比较高。

表 2 电力负荷预测结果比较

Tab 2 Comparison of the load forecasting result

| 预测点 | 实际值 /MW | 预测值 /MW | 相对误差 / (%) |
|-------|---------|---------|--------------|
| 0:00 | 439 | 457,461 | -4.10, -5.01 |
| 1:00 | 444 | 450,449 | -1.35, -1.11 |
| 2:00 | 436 | 443,446 | -1.61, -2.29 |
| 3:00 | 434 | 435,437 | -0.23, -0.69 |
| 4:00 | 439 | 442,443 | -0.68, -0.91 |
| 5:00 | 466 | 476,479 | -2.15, -2.79 |
| 6:00 | 505 | 524,526 | -3.76, -4.16 |
| 7:00 | 552 | 563,564 | -1.99, -2.16 |
| 8:00 | 590 | 611,610 | -3.56, -3.39 |
| 9:00 | 611 | 643,644 | -5.24, -5.40 |
| 10:00 | 583 | 585,588 | -0.34, -0.85 |
| 11:00 | 500 | 501,505 | -0.20, -1.00 |
| 12:00 | 548 | 548,551 | -0.01, -0.56 |
| 13:00 | 568 | 581,580 | -2.29, -2.11 |
| 14:00 | 568 | 562,559 | 1.06, 1.59 |
| 15:00 | 573 | 568,562 | 0.87, 1.92 |
| 16:00 | 598 | 591,589 | 1.17, 1.50 |
| 17:00 | 627 | 623,618 | 0.64, 1.43 |
| 18:00 | 642 | 625,624 | 2.65, 2.81 |
| 19:00 | 612 | 602,597 | 1.63, 2.45 |
| 20:00 | 553 | 561,562 | -1.45, -1.63 |
| 21:00 | 501 | 537,535 | -7.19, -6.79 |
| 22:00 | 525 | 524,520 | 0.19, 0.95 |
| 23:00 | 465 | 574,575 | -1.94, -2.16 |

(注:后者为 BP 网络算法预测结果)

5 结论

本文所提出的短期负荷预测方法,利用模糊聚类对相近样本信息的聚类能力以及 RBF 神经网络的局部逼近能力和泛化能力,兼取模糊聚类和 RBF 神经网络的各自优点进行短期负荷预测。在预测样本信息中考虑日类型、气温、雨量等因素的影响,采用浙江省某地区电网实际数据进行仿真,能够在历史信息较少的情况下获得较高的预测效果,结果令人满意。

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.
N U Dong-xiao, CAO Shu-hua, ZHAO Lei, et al. Power

- Load Forecasting Technology and Application [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [2] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
CHEN Shou-yu Engineering Fuzzy Theory and Application [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998.
- [3] 杨伦标, 高英仪. 模糊数学原理及应用 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1998.
YANG Lun-biao, GAO Ying-yi Principle and Application of Fuzzy Maths [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1998.
- [4] 曹鸿兴, 陈国范. 模糊集方法及其在气象中的应用 [M]. 北京: 气象出版社, 1998.
CAO Hong-xing, CHEN Guo-fan Fuzzy Method and the Application in Weather [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1998.
- [5] 陈允平, 等. 人工神经网络原理及其应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
CHEN Yun-ping, et al Artificial Neural Network Theory and Application [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [6] 张涛, 赵登福, 周琳, 等. 基于 RBF神经网络和专家系统的短期负荷预测方法 [J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(4): 3-6.
ZHANG Tao, ZHAO Deng-fu, ZHOU Lin, et al Short Term Load Forecasting Using Radial Basis Function Networks and Expert System [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(4): 3-6.
- [7] 鞠平, 姜巍, 赵夏阳, 等. 96点短期负荷预测方法及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(22): 32-36.
JU Ping, JIANG Wei, ZHAO Xia-yang, et al Ninety-six Points Short-term Load Forecasting—Theory & Applications [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(22): 32-36.
- [8] 张艳杰, 刘耀年, 祝滨, 等. 基于模糊聚类及统计相关的短期负荷预测 [J]. 电网技术, 2002, 26(11): 35-39.
ZHANG Yan-jie, LU Yao-nian, ZHU Bin, et al Short-term Load Forecasting Method Based on Integrating Fuzzy Cluster Pocongnition with Statistic Correlation [J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 35-39.

收稿日期: 2005-10-19; 修回日期: 2006-12-01

作者简介:

王平 (1962 -), 男, 副教授, 主要从事控制理论与控制工程, 电力系统及其自动化方面的研究; E-mail wangp@hhu.edu.cn;

张亮 (1982 -), 男, 硕士研究生, 主要从事控制理论与先进算法方面的研究;

陈星莺 (1964 -), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制、电力系统经济运行 (优化)、电力市场与电力经济等方面的研究与分析。

Short-term load forecasting based on fuzzy cluster and RBF network

WANG Ping, ZHANG Liang, CHEN Xing-ying
(Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, a short-term load forecasting method based on fuzzy cluster and RBF network is presented. By using fuzzy cluster theory, membership degree is applied to describe the correlative relation among the loads and their influencing factors, and gain a set of historical days which have similar information of the day to be forecasted. By training RBF network using the information of selected days, short-term load forecasting without large number of samples can be realized. The results of calculation example show that the daily mean error is 1.91% and daily precision is 97.41%.

Key words: fuzzy cluster; membership degree; radial basis function network; short-term load forecasting

(上接第 54 页 continued from page 54)

Research on matchmaking tradeoff competition mechanism in regional electricity market, part one: a MCP competition mechanism based on transmission price and loss

ZHANG Sen-lin
(Electricity Trade Center, China Southern Power Grid Co., Ltd, Guangzhou 510620, China)

Abstract: This paper presents a new matchmaking tradeoff competition mechanism. It solves the problems of transmission price between provincial networks in a regional electricity power market. Based on theoretical analysis, trade procedure and example are also established, which can supply a theoretical reference for the competition mechanism design in regional electricity market.

Key words: transmission price; matchmaking tradeoff; competition mechanism; electricity market