

混沌理论在电力系统负荷预测中的应用

杨红英, 叶昊, 王桂增
(清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 混沌理论适合描述确定性非线性系统的内在随机性, 具有对初始条件敏感、遍历性、规律性等特点, 作为确定论和概率论的桥梁, 其特性符合电力系统负荷预测的内在要求。因此, 近年来, 混沌理论在电力系统负荷预测中得到了越来越广泛的应用。在总结和归纳传统预测方法的基础上, 对混沌理论应用于电力系统负荷预测中的研究现状进行了综述, 其中包括混沌时间序列的主要思想、混沌时间序列分别与传统预测技术、神经网络以及模糊理论相结合在负荷预测中的应用, 并指出了这一技术的研究动向及应用前景。

关键词: 混沌理论; 负荷预测; 混沌时间序列; 神经网络; 模糊理论; Lyapunov 指数

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)16-0026-05

0 引言

负荷预测是电力系统的一项基本工作, 是调度安排开停机计划的基础, 对电网调度自动控制非常重要^[1]。几十年来, 人们从未间断过对电力系统负荷预测方法的研究, 并取得了很大的进展。目前, 解决电力系统负荷预测的问题, 人们常用的方法有: 回归分析、时间序列、专家系统、神经网络、模糊理论、小波分析等。这些方法的优势在于它们能从多个角度综合分析负荷预测中的问题, 并得到了相对令人满意的结果, 然而, 对于大型电力系统, 这些方法常常具有一定的局限性, 因为它们只是通过不同手段根据已获得数据的变换趋势来分析电力负荷, 而没有从本质上分析电力系统固有的物理特性之一: 混沌特性。电力系统是一个庞大、复杂、地域广阔的分布式系统, 易受突发事件的影响, 仅通过看似合理的数据解析公式难以有效地处理许多复杂的不确定性问题, 而新兴的混沌理论提供了一个解决电力系统负荷预测问题的新思路。

1977年, 第一次混沌国际会议在意大利召开, 标志着混沌科学的诞生^[2]。混沌理论作为一种强大的研究工具被用于社会生活的各个领域, 同时也引起了电力工作者的关注。混沌理论适合描述确定系统的内在随机性, 具有对初始条件敏感, 运动遍历性、规律性^[3]等特点, 这些正是进行电力系统负荷预测所需要的或是其他方法所欠缺的优势所在。

本文在总结和归纳传统预测方法的基础上, 对混沌理论在电力系统负荷预测中的应用进行了综述, 并分析了混沌理论与其他技术相结合用于负荷预测的可能性及其发展趋势。

1 传统负荷预测方法论述

早期的负荷预测的方法主要是回归分析和时间序列^[4]。时间序列模型包括 Box - Jenkins、Kalman 滤波、Wiener 滤波、谱分析、ARMA 模型等。这类方法一般计算量小, 计算速度较快, 但系统鲁棒性没有保障, 预测精度往往不高^[4]。

19世纪中后期, 专家系统在负荷预测技术中逐渐得到了成功的应用^[5-7]。文献[6]给出了微专家系统在长期负荷预测中的应用, 文献[7]则是专家系统用于短期负荷预测的一篇典型综述。基于专家系统的算法具有很强的鲁棒性和精确性^[7], 能够全面考虑到各种因素对负荷的影响, 对于突发性事件引起的负荷变化脱离正常模式的情况, 由经验发展而来的预测专家系统可以避开复杂的数值计算而使问题得到解决^[4]。这些系统可以非常简单, 但通用性较差, 需要专家和知识, 缺乏学习能力。

从20世纪初开始, 人工神经网络作为一种数学工具被引入电力系统负荷预测^[8], 并在负荷预测问题中得到了充分的发展和运用。它具有很强的自学习和容错能力, 能处理噪声和不完全数据, 并解决非线性问题^[9]。但此理论也有一定的不足, 其缺点在于: 系统复杂引起收敛速度慢, 并且系统有可能收敛到局部最小点或得不到最优解; 由于知识表达困难, 难以充分利用调度人员经验; 系统一般为一步预测, 每次预测都要根据新的知识重新调整系统参数, 计算量大。

20世纪后期至今, 人们对人工神经网络进行了改进, 提出了各种神经网络与模糊集理论结合的方法^[10,11]。此外, 神经网络与自组织理论结合、神经

网络与小波理论结合等方法,也大大改进了神经网络的性能。随着预测技术的发展,由专家系统、人工神经网络相互结合形成的人工智能技术(Artificial intelligence Techniques)^[12],以及由神经网络、模糊逻辑、遗传算法等相互结合而形成的计算智能技术(Computational Intelligence Techniques)^[13]等都被用于负荷预测。文献[13]是在这方面成就比较突出的一篇文章,具体地综述了这方面的发展。混合方法(Hybrid methods)的结合运用成为新的潮流。

到目前为止,负荷预测的方法数以百计,但其中绝大部分都是短期负荷预测,中长期负荷预测却很少被提及。中长期电力负荷预测的研究工作始于20世纪80年代,其中的经典方法有:趋势外推法、回归分析法。由于电力系统受到多方面不确定性因素影响,因此,近年来灰色理论预测方法、模糊预测方法也被引入到负荷预测中,并且取得了一些成果^[14]。由于研究的比较少,算法和体系都很不完善,文献[14]是这方面的一篇典型文章。

2 混沌预测方法

非周期、复杂和不规则的现象一般被认为是随机的不确定性现象,经典的研究方法一般是随机或统计信号处理理论。然而,上面的物理现象经常能够被确定性的微分方程描述,这就是系统的确定性混沌^[13]。电力系统负荷是典型的非线性时间序列,大量事实证明它具有混沌特性行为^[15],即属于混沌时间序列。因此,电力系统负荷预测可以用混沌理论进行研究,文献[16]综述了混沌理论在整个电力系统中的应用。

混沌是确定性非线性系统中不需要附加任何随机因素亦可出现的随机行为。自1980年,Packard^[17]提出重构相空间理论(phase space reconstruction theory)、Takens^[18]证明可以找到一个合适的嵌入维(embedding dimension)以来,人们开始用时间序列研究混沌,并把这一方法引入电力系统的负荷预测。作为一种新兴的研究非周期、不规则现象的方法,混沌的引入为这一领域的研究提供了新的思路。1994年, Mori and Urano 提出了一种用混沌时间序列分析短期负荷预测的方法^[19]。几年后,国内学者也提出了基于混沌时间序列的负荷预测方法^[20]。混沌时间序列方法成为电力系统负荷预测的一大研究方向。

2.1 混沌与传统预测技术结合在负荷预测中的应用

在混沌理论得到广泛重视的同时,部分学者在

传统预测技术的基础上努力寻求传统预测技术与混沌理论的结合点,并且取得了一些成果。1999年的文献[21]、2001年的文献[22]、2003年的文献[23]都提出了基于混沌负荷预测的局域预测法。2001年,文献[24]将混沌和回归分析结合起来,在一维Lyapunov指数预报模型的基础上提出了混沌相空间模线性回归模型,并将该模型应用于短期负荷预报。2002年,吕金虎等^[1]在局域法的基础上又提出加权一阶局域法,并将其应用于电力系统负荷预测。2003年,文献[25、26]探讨了相空间参数的优化选取,提出了采用负荷记录的“平衡点+混沌”拆分可以降低预测误差的方法,并指出电力系统中可能含有双周期成分以及“双周期+混沌”的思想。

2.2 混沌与神经网络结合在负荷预测中的应用

由于混沌和神经网络相互结合,其优势互补能够更好地解决负荷预测问题,因此混沌和神经网络相结合的方法在90年代中后期成为了负荷预测研究的热点。将混沌和神经网络相结合进行研究主要有两种思路,其一是利用混沌映射的内在随机性和空间遍历性进行搜索。1993年, Luonan Chen^[27]提出利用混沌神经网的自组织混沌传输能力来实现全局最优。2000年1月,文献[28]通过在NN学习过程中引入权空间的混沌机制提出了混沌学习算法,从而使系统在学习过程中能够逃离局域极值,使算法达到能量的全局最小或它的近似值。利用基于NN(神经网络)的混沌学习算法进行日负荷预测在速度、收敛性和预测精度上均取得明显好于BP(误差反向传播)算法,并可用于在线预测。2003年3月,文献[29]为了克服传统神经网络预测方法的缺陷,通过借鉴免疫网络规划,提出了一种基于人工免疫网络的短期负荷预测模型,并在模型中采用了自适应混沌变异算子来达到增加变异范围、优化变异效果的目的。

将混沌和神经网络相结合进行研究的第二种思路是利用相空间重构后的数据样本信息进行统计分析。90年代,这方面已经有了一定的发展。1996年,韩国科学家 Jae - Gun Choi^[30]提出了用混沌时间序列结合人工神经网络对电力系统的负荷进行每日预测的方法。文章利用K临近法(k-th nearest neighborhood method)来寻找最优嵌入维和延迟时间并在伪相平面上构造了混沌吸引子,然后将其作为人工神经网络的输入进行预测,预测的平均错误率为1.3%~1.5%。同年,日本科学家 Hiroyuki Mori^[15]也提出了将混沌时间序列和神经网络(多层感

知器模型 multi-layer perception, MLP) 相结合的思想, 强调了必须用 Lyapunov 谱证明系统的混沌性后才能进行相空间重构, 并对电力系统负荷进行了一步预测。1998 年, 文献[14] 提出了一种混沌和资源分配网络 (resource-allocating network, RAN) 结合的方法, 分别给出了 1 h、24 h、168 h 预测结果。1999 年, 美国科学家 F. CAMASTRA 和 A. M. COLLA^[31] 利用 Grassberger-Proccaccia 算法和 Takens 理论得到相似的关联维来确定神经网络节点和 AR-MA 模型阶次, 并对电力系统的负荷进行每小时 (one-hour-ahead) 一步预测。

2000 年以后, 这方面的研究又有了进一步的进展。2001 年 9 月, 文献[32] 利用混沌理论的分析方法, 在相空间中对训练样本进行预处理, 通过一种改进的 BP 网络对负荷进行预报, 同时给出了其与一般训练样本预处理技术的比较结果, 证实了该方法有效性。2003 年, 希腊学者^[33] 也提出了用混沌时间序列和多层感知器 (multi-layer perception, MLP) 来解决每日预测问题, 得到的预测误差约为 4.6%。同一时期, 国内学者在这方面也做了一些有益的探索。文献[34] 提出, 根据在相空间重构拓扑近邻点的时间演化原理, 得到了可以克服伪近邻点在高嵌入维对局域动力学估计的不利影响的优化近邻点 (optimal neighbor points, ONP) 预测方法, 并在此基础上与递归性时延神经网络 (Time Delay Neural Network, TDNN) 模型相融合来进行短期负荷预测。仿真测试证实, 此模型能有效、稳定地提高预测精度, 并且有很强的适应能力, 为基于相空间理论预测法应用于实际取得了有效的进展。可以预见, 这一方向的研究将仍然是负荷预测研究的重要方面之一。

2.3 混沌与模糊理论相结合在负荷预测中的应用

2001 年, 文献[35] 用温度、温度增长和天气三个变量作为系统的模糊输入, 提出了用混沌模糊思想来分析时间序列的方法, 得到了理想的结果。2003 年, 希腊学者在综述[13] 中给出了混沌和模糊理论的具体结合方法。此外, 由于一般的重构方法很难对非线性系统给出正确的结果, 一种结合了混沌时间序列和局部模糊重构 (local fuzzy reconstruction, LFR) 的负荷预测技术在文献[36~38] 中被提出。实践证明, 混沌和模糊理论相互结合, 能够更好地解决非线性问题, 目前这方面的文章还不是很多, 研究正处于初期阶段。

3 总结与展望

本文在总结和归纳传统预测方法的基础上介绍了基于混沌理论方法的负荷预测研究现状, 所有研究表明这种方法具有一定的潜力, 值得进一步研究。混沌方法在处理非线性问题方面的强大功能, 使得基于其理论的负荷预测方法无论在处理能力、计算速度, 还是在预测精度上, 都得到了很大的提高。

目前, 混沌理论虽然已经在电力系统的负荷预测研究中得到了较大的发展, 但是离实用化阶段尚有一段距离。由于电力系统是一个多变而复杂的系统, 单一的方法很难满足预测的需求, 多种预测方法的结合成为当前的一大研究趋势。随着混沌理论与各种智能技术方法的结合及进一步的深入研究, 可以预见混沌理论在电力系统负荷预测中的应用会受到越来越多的重视。

参考文献:

- [1] 吕金虎, 张锁春. 加权一阶局域法在电力系统短期负荷预测中的应用[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(5): 767-770.
Lü Jin-hu, ZHANG Suo-chun. Application of Adding-weight One-rank Local-region Method in Electric Power System Short-term Load Forecast[J]. Control Theory and Application, 2002, 19(5): 767-770.
- [2] 王东生, 曹磊. 混沌、分形及其应用[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1995.
WANG Dong-sheng, CAO Lei. Chaos, Separation and Their Application[M]. Hefei: University of Science and Technology of China, 1995.
- [3] 尤勇, 盛万兴, 王孙安. 一种新型短期负荷预测模型的研究及应用[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 15-18.
YOU Yong, SHENG Wan-xing, WANG Sun-an. The Study and Application of the Electric Power System Short-term Load Forecasting Using a New Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 15-18.
- [4] 严华, 吴捷, 马志强, 等. 模糊集理论在电力系统短期负荷预测中的应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 25(22): 67-72.
YAN Hua, WU Jie, MA Zhi-qiang, et al. Application of Fuzzy Set Theory to Short-term Load Forecasting in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 25(22): 67-72.
- [5] Saitoh H. Rule-based Short-term Load Forecasting Emphasizing Temperature Effects[J]. Proc of ESAP91. Japan: 1991.

- [6] Hung C Q, Batanov D N, Lefevre T. KBS and Macro-level Systems: Support of Energy Demand Forecasting [J]. *Computers in Industry*, 1998; 87-95.
- [7] Rahman S, Bhatnagar R. An Expert System Based Algorithm for Short-term Load Forecasting [J]. *IEEE PWRS*, 1988, 3(2).
- [8] Lee K, Cha Y, Park J. Artificial Neural Network Methodology for Short Term Load Forecasting, NSF Workshop on Artificial Neural Network Methodology in Power System Engineering [Z]. Clemson University, 1990.
- [9] Kalogirou S A. Applications of Artificial Neural Networks in Energy Systems [J]. *A Review Energy Conversion & Management*, 1999.
- [10] Chow M, Tram H. Application of Fuzzy Logic Technology for Spatial Load Forecasting [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1997, 12:1360-1366.
- [11] Dash P K, Liew A C, Rahman S. Peak Load Forecasting Using a Fuzzy Neural Network [J]. *Electric Power Systems Research*, 1995, 32(1):19-23.
- [12] Metaxiotis K, Kagiannas A, Askouris A, et al. Artificial Intelligence in Short Term Electric Load Forecasting; a State-of-the-art Survey for the Researcher [J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44:1525-1534.
- [13] Tzafestas S, Tzafestas E. Computational Intelligence Techniques for Short-term Electric Load Forecasting [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2001, 31:7-68.
- [14] 罗治强, 张焰, 朱杰. 中压配电网中长期负荷预测方法研究与应用 [J]. *华东电力*, 2003, (1):9-12.
LUO Zhi-qiang, ZHANG Yan, ZHU Jie. A Study on Methods for Mid-long Term Power Load Prediction in MV Distribution Net and Its Application [J]. *East China Electric Power*, 2003, (1):9-12.
- [15] Mori H, Urano S. Short-term Load Forecasting with Chaos Time Series Analysis [C]. *Proceedings of International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems*. France; 1996.
- [16] 王东风, 韩璞, 于朝辉. 电力系统中的混沌研究与混沌应用 [J]. *电力科学与工程*, 2003, (3):74-78.
WANG Dong-feng, HAN Pu, YU Zhao-hui. Chaos Study and Applications in Electric Power System [J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2003, (3):74-78.
- [17] Packard N H. Geometry from a Time Series [J]. *Physics Review Letters*, 1980, 45(9):712-718.
- [18] Takens F. Determining Strange Attractors in Turbulence [A]. In *Lecture Notes in Mathematics, Dynamical Systems and Turbulence*. Berlin; 1981.
- [19] Mori H, Urano S. Chaotic Time Series Analysis for Short-term Power System Load Forecasting [A]. *Proc of the 3rd Int'l Conf on Fuzzy Logic Neural Nets and Soft Computing (IIZUKA '94)*. Iizuka; (Japan). 1994. 441-442.
- [20] 梁志珊, 王丽敏, 付大鹏. 应用混沌理论的电力系统短期负荷预测 [J]. *控制与决策*, 1998, 13(1):87-90.
LIANG Zhi-shan, WANG Li-min, FU Da-peng. Short Term Load Forecasting Using Chaos Theory [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1):87-90.
- [21] 蒋传文, 权先障, 李承军, 等. 混沌理论在电力负荷预测中的应用 [J]. *武汉交通大学学报*, 1999, 23(6):608-611.
JIANG Chuan-wen, QUAN Xian-zhang, LI Cheng-jun, et al. Application of Chaotic Theory in Power Load Forecasting [J]. *Journal of Wuhan Transportation University*, 1999, 23(6):608-611.
- [22] 温权, 张永传, 程时杰. 负荷预报的混沌时间序列分析方法 [J]. *电网技术*, 2001, 25(10):13-16.
WEN Quan, ZHANG Yong-chuan, CHENG Shi-jie. Chaotic Time Series Analysis to Load Prediction [J]. *Power System Technology*, 2001, 25(10):13-16.
- [23] 姜勇. 电力系统短期负荷的特征指数相空间重构预测法 [J]. *继电器*, 2003, 31(3):11-14.
JIANG Yong. Short Term Load Forecasting Using Restructuring Algorithm of Phase Space Based on Characteristic Index [J]. *Relay*, 2003, 31(3):11-14.
- [24] 吉国力, 程军, 米红. 应用混沌相空间模线性回归模型研究短期负荷预报 [J]. *系统工程理论与实践*, 2001, (6):138-140.
JI Guo-li, CHENG Jun, MI Hong. Short Term Load Forecasting Using Chaos Phase Space Mode Linear Regression Model [J]. *System Engineering Theory and Its Applications*, 2001, (6):138-140.
- [25] 杨正瓴, 林孔元. 短期负荷预测相空间重构法参数优选的数值测试与分析 [J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(16):40-44.
YANG Zheng-ling, LIN Kong-yuan. Improving Precision of Short Term Load Forecasting by Numerical Testing in Local Linearization Method of Phase Space Reconstruction [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(16):40-44.
- [26] 杨正瓴, 林孔元, 余贻鑫. 短期负荷预报的双周期加混沌法中的子模型优选理论探讨 [J]. *电网技术*, 2003, 27(5):33-36.
YANG Zheng-ling, LIN Kong-yuan, YU Yi-xin. Short Term Load Forecasting by Synthesizing Double Periods and Chaotic Component; Optimization by Sub-models [J]. *Power System Technology*, 2003, 27(5):33-36.
- [27] CHEN Luo-nan. Application of Chaotic Simulation and Self-organizing Neural Net to Power System Voltage Stability Monitoring [J]. *IEEE*, 1993.
- [28] 丁军威, 孙雅明. 基于混沌学习算法的神经网络短期

- 负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 32-35.
DING Jun-wei, SUN Ya-ming. Short-term Load Forecasting Using Chaotic Learning Algorithm for Neural Network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 32-35.
- [29] 尤勇, 盛万兴, 王孙安. 基于人工免疫网络的短期负荷预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 26-29.
YOU Yong, SHENG Wan-xing, WANG Sun-an. Short-term Load Forecasting Using Artificial Immune Network [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 26-29.
- [30] Park Jae-gyun, Park Jong-keun, Kim Kwang-ho, et al. A Daily Peak Load Forecasting System Using a Chaotic Time Series[J]. IEEE, 1996.
- [31] Camastra F, Colla M. Neural Short-term Prediction Based on Dynamics Reconstruction[J]. Neural Processing Letters, 1999, (9): 45-52.
- [32] 蒋传文, 侯志俭, 李承军. 基于混沌理论的电力负荷短期预报的神经网络方法[J]. 水电能源科学, 2001, 19(3): 59-61.
JIANG Chuan-wen, HOU Zhi-jian, LI Cheng-jun. Short-time Power Load Neural Network Forecasting Method Based on Chaos Theory[J]. International Journal of Hydro Electric Energy, 2001, 19(3): 59-61.
- [33] Michano S P, Tsakoumis A C, Fessas P, et al. Short-term Load Forecasting Using a Chaotic Time Series[J]. IEEE, 2003.
- [34] 张智晟, 孙雅明, 王兆峰, 等. 优化相空间近邻点与递归神经网络融合的短期负荷预测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 44-49.
ZHANG Zhi-sheng, SUN Ya-ming, WANG Zhao-feng, et al. A New STLF Approach Based on the Fusion of Optimal Neighbour Points in Phase Space and the Recursive Neural Network [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 44-49.
- [35] Lim Young-do. A Predictive Demand of the Maximum Electric Power Using Chaos-fuzzy[A]. International Fuzzy Systems Conference, IEEE. 2001.
- [36] Iokibe T, Mochizuki N. Short-term Prediction Based on Fuzzy Logic and Chaos[A]. Proc of FAN Symp. Tsukuba; (Japan) 1994. 77-82.
- [37] Iokibe T, Kanke M, Fujimoto Y, et al. Short-term Prediction on Chaotic Time Series by Local Fuzzy Reconstruction Method[A]. Proc of the 3rd Internat Conf on Fuzzy Logic, Neural Nets and Soft Computing. Iizuka (Japan); 1994. 491-492.
- [38] Iokibe T, Fujimoto Y, Kanke M. Short-term Prediction of Chaotic Time Series by Local Fuzzy Reconstruction Method[J]. J Intell Fuzzy Systems, 1997, 5: 3-21.

收稿日期: 2004-11-29

作者简介:

杨红英(1980-), 女, 博士研究生, 主要研究方向混沌理论与应用、电力负荷预测 E-mail: yanghy02@mails.tsinghua.edu.cn

Applications of chaos theory to load forecasting in power system

YANG Hong-ying, YE Hao, WANG Gui-zeng

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Chaos theory can demonstrate the inherent randomness of a deterministic nonlinear system. As the bridge of deterministic and stochastic manner, it has the characteristics of the sensitivity to initial conditions, ergodicity, orderliness and so on. All of these characteristics meet the intrinsic requirements of electric load forecasting. Based on conventional prediction technique, this paper surveyed the applications of the chaos theory in power system load forecasting, including the key issues of chaotic time series and electric load forecasting based on the combinations of chaotic time series with traditional prediction technique, neural networks, and fuzzy theory respectively. Its development and applications were proposed.

Key words: chaos theory; load forecasting; chaotic time series; neural networks; fuzzy theory; Lyapunov exponent

(上接第 21 页 continued from page 21)

Analysis of the single-phase-to-ground fault for 220 kV transmission line

LI Rong

(Yulin Power Supply Bureau, Yulin 537000, China)

Abstract: A single-phase-to-ground short happened on power-system in Yulin in 2003. The reason of the fault was found by fault analysis. Some proposals were put forward to improve the relay protection.

Key words: single-phase-to-ground fault; fault analysis; measure