

基于混沌理论及小波理论的短期负荷预测

李凌舟¹, 赵华阳², 席川¹

(1. 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072;

2. 中电投电力工程有限公司海阳核电项目部, 山东 海阳 265116)

摘要:分析了多种负荷预测的方法,着重分析了负荷的混沌特性与小波特性,同时分析了小波变换能够反应负荷的变化趋势与随机因素。利用 Matlab 工具,建立了基于小波理论与混沌理论相结合的负荷预测模型,并利用该模型对四川某地区短期电力负荷进行了有效的预测。

关键词:短期负荷预测;混沌理论;小波理论

Abstract: Many load forecasting methods are analyzed and the emphasis of these analyses are the chaotic character and wavelet character of short-term load. Meanwhile, wavelet transform which can reflect the change trend and random factor in the load is analyzed. Using Matlab tool, load forecasting model based on the chaos theory and wavelet theory is established. And using this model, the short-term load of an area in Sichuan province is forecasted.

Key words: short-term load forecasting; chaos theory; wavelet theory

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0001-04

0 引言

短期负荷预测直接影响着电力系统开停机的调控。在电力市场条件下,预测的精度直接关系到整个电力系统运行的经济效益,作为电力系统的一项基本工作,短期负荷预测一直受到广泛关注^[1]。

长期以来,人们对电力系统负荷预测,特别是短期负荷预测进行了大量的研究,提出了许多有效的方法。近年来,随着科学技术的迅速发展,预测理论技术也取得了长足的进展,新的预测方法,尤其是属于人工智能与模式识别领域的新方法不断出现,为电力负荷预测问题的研究提供了有力工具^[2]。

文献[8]应用了回归模型预测法,文献[3]应用了时间序列预测法,文献[6]应用了人工神经网络法,文献[5]应用了灰色预测法,文献[6]应用了模糊数学法,文献[7]应用了小波分析方法。各种不同方法的应用,为负荷的预测提供了多种预测手段。事实上,就现有的文献来看,中国电网的负荷记录,基本上都具有混沌特性,并且其关联维数常常为 2 点多(介于 2 和 3 之间)。

1 短期电力负荷的混沌特性

1.1 混沌特性

短期电力负荷具有很强的混沌特性。电力系统的短期负荷受到各种社会、自然因素影响,是典型的非线性系统,一般方法难于精确建模^[1]。而混沌理论,则打破以往传统分析中单一的确定性分析或随机性分析,建立将两者统一起来的有效分析方法,利用短期电力负荷的混沌特性,通过建立电力负荷的混沌模型,可以有效地进行短期电力负荷的预测。文献[1-8]已成功建立了电力负荷的混沌模型,并就长期、中短期、短期电力负荷进行了预测。

1.2 短期电力负荷混沌模型的预测方法

近年来,随着非线性系统研究的发展,基于混沌理论的非线性时间序列预测模型在短期电力负荷预测中的应用引起了人们的广泛兴趣,越来越多的基于混沌理论的预测方法应用于电力系统短期负荷预测,而且取得了较好的预测效果^[6-8]。

2 短期电力负荷小波分析和混沌模型

2.1 短期电力负荷仿真步骤

设计一个基于混沌时间序列的电力负荷预测系统,利用小波分解将电力负荷数据的高频分量与低频分量进行分解。判断分量的混沌特性,对于具有混沌特性的分量,采用混沌模型进行预测,其他分量采用

RBF网络利用样本进行训练并预测,最后进行小波重构。本程序电力负荷序列采用了四川省电力公司某供电局 30日的电力负荷数据。短期负荷预测流程图见图 1所示。小波分量预测流程图见图 2所示。

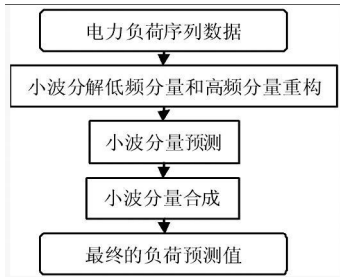


图 1 短期负荷预测流程图

2.2 电力负荷的小波分析

2.2.1 小波理论

小波理论源于傅里叶分析。经傅里叶变换处理后的信号只能在时域或者频域进行分析。经小波平移和伸缩变换处理后的信号,可在时频域对其局部细节进行多分辨分析。小波因而被形象地称为“数学显微镜”。小波变换的变换因子一般由连续小波函数见式(1)。

$$\psi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

其中, $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$; a 为伸缩尺度; b 为平移尺度。

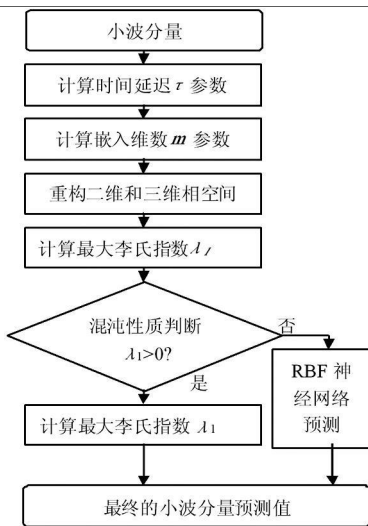


图 2 混沌模型预测流程图

若 $\psi(t)$ 满足可允许性条件,则

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(v)|^2}{|v|} dv < +\infty \quad (2)$$

其中, $\psi(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) e^{-ivt} dt$ 即函数 $\psi(t)$ 的傅里叶变换,那么 $\psi(t)$ 称为小波母函数,它可以进行小波变换。对于任意 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$,其小波变换如下。

$$W_{f(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式(2)可允许性条件的重要意义在于,如果 $\psi(t)$ 的傅里叶变换 $\psi(v)$ 在原点 $v=0$ 处连续,则必有 $\psi(0)=0$,即 $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt=0$ 。这说明函数 $\psi(t)$ 有“波动”的特点。又由于 $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$,于是 $\psi(t)$ 只在原点附近才有明显起伏,而在远离原点的地方必将迅速向零衰减,所以它被称为“小波”。从物理意义来看,参数 b 决定 t 的波动时间,参数 a 决定波动的幅度,这体现了小波变换“时域—频域”分析的思想。

已经证明,连续小波函数的线性组合在 $L^2(\mathbb{R})$ 中是稠密的,即其线性组合可以逼近任意 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$,这从理论上严密地保证了小波网络逼近的可靠性^[10]。

2.2.2 电力负荷的小波特性

电力负荷小波分解重构后,得到的低频近似子序列反映了负荷本质变化趋势,而高频细节子序列则能细致地刻画各种随机因数对于负荷波动的影响。因此,小波分析能够揭示负荷序列在不同层次上的详细结构,从而把握负荷波动非线性的本质。

2.3 RBF神经网络预测

由于电力系统负荷的小波分量的特性,在进行电力负荷的小波分量分析时,发现部分分量不具有混沌特性,故采用 RBF网络做为该部分分量的预测网络进行预测。

2.4 混沌模型预测

2.4.1 混沌理论

一般认为混沌(chaos)研究开始于 1963 年 Lorenz关于大气运动方程的数值研究。混沌时间序列是由混沌模型生成的具有混沌特性的时间序列,混沌时间序列分析的基础是相空间重构理论及相空间重构方法,故相空间重构参数的选取是非常重要的。

Packard等建议用原始系统中的某变量的延迟坐标来重构相空间, Takens证明了可以找到一个合适的嵌入维,即如果延迟坐标的维数, $m \geq 2d+1$, d 是动力系统的维数,在这个嵌入维空间里可以把有规律的轨迹(吸引子)恢复出来。亦即在重构的 \mathbb{R}^m 空间中的轨线上原动力系统保持微分同胚,从而为混沌时间序列的预测奠定了坚实的理论基础。

2.4.2 电力负荷的混沌模型

在相空间重构中延迟时间和嵌入维数的选择至关重要,这两个参数的合理选择和优化直接关系到所

逼近的吸引子的真实性和可靠性。

(1) 延迟时间的选择

在实际操作中最佳延迟时间的选取方法主要有以下几种:①互信息法;②其他信息论的方法,如冗余度法、信息熵等方法;③自相关法和复自相关法;④预报效果法;⑤真实矢量场法;⑥波动积法;⑦填充因子法;⑧累积局部变形法;⑨简单轨道扩张法;⑩奇异值分数(SVF)法和 Jacob 矩阵行列式法^[11]。

(2) 嵌入维数的选择

在实际操作时,求取最佳嵌入维数的方法主要有以下几种:①关联指数饱和法;②奇异值分解(SVD);③伪最邻近点;④改进的伪最邻近点法;⑤预测效果法;⑥映象距离法;⑦真实矢量场法^[11]。

(3) 混沌时间序列的确定性检验

混沌时间序列的复杂变化是由随机因数引起或是由自身内在的确定性动力学机制支配,可用如下方法判别:① Poincare 映射;②功率谱;③ Lyapunov 指数。

3 程序及实现

3.1 小波分解重构

小波分解重构中,需要确定小波分解的尺度,结合文献[12]提到的研究方法,根据信号奇异点检测原理,常用信号的李氏指数大于零,所以其模极大值点的幅度随尺度增大而增大。由于多尺度变换把高频信号逐步剥离,可以认为信号的主干在高尺度的低频系数上,于是分别做了 db2、db3、db4、db5 小波对原始序列的高尺度变换,当分解尺度为 4 时,可以看到低频系数 a 如图 4 所示,图 3 和图 4 为 db3 及 db4 小波变换对比图。

由图 4 可见,db4(即 4 尺度分解)低频分量 a 能很好地反应本地区的基本负荷特性,因此本研究选取了该尺度的小波分解做为小波分量相空间重构的第一步。

3.2 小波分量相空间重构

本程序对于小波分量进行了相空间重构,部分重构图分别如图 5、图 6、图 7、图 8 所示。

在该仿真中,分析了各分量的混沌特性。其中,基于最大 Lyapunov 指数法的方法被用于该部分分析中, Lyapunov 指数是判断系统混沌行为的重要指标之一,即正的 Lyapunov 指数意味着混沌,同时 Lyapunov 指数也刻画了相空间相体积的收缩与膨胀过程。

3.3 负荷预测图

按照程序设计,经过仿真,这里的负荷预测图如图 9 所示。抽取了 600 个实际负荷曲线的样本集,经过该程序预测了最后 10 个负荷的值,其中无点线代表实际负荷曲线,有点线代表预测负荷曲线。

3.4 预测误差分析

对于同一预测项目可以用均方误差的大小来衡

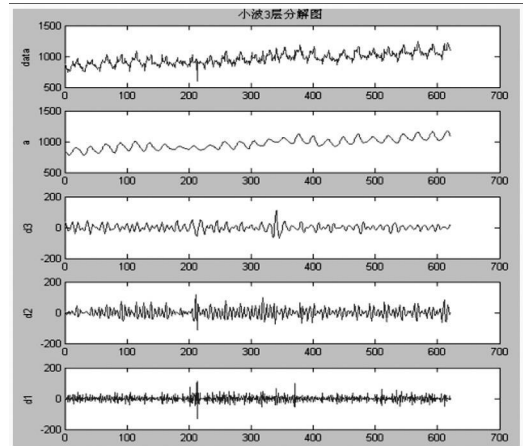


图 3 小波 3 尺度分解图

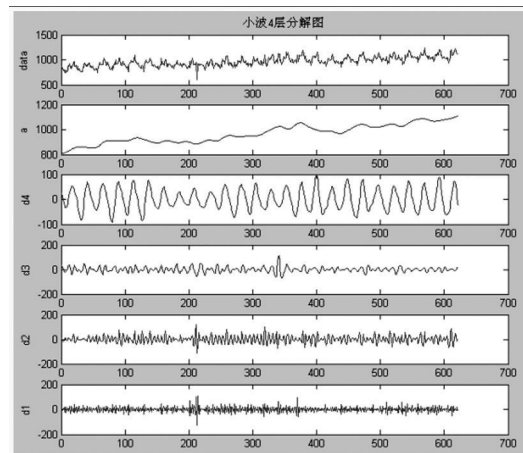


图 4 小波 4 尺度分解图

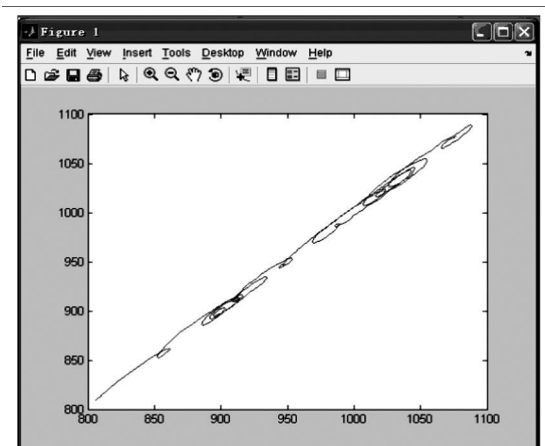


图 5 a 分量的二维相空间重构图

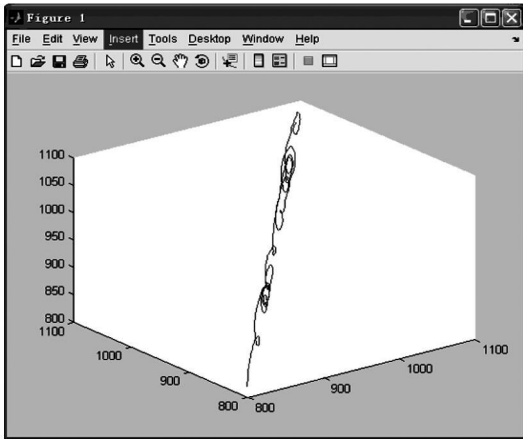


图 6 a 分量的三维相空间重构图

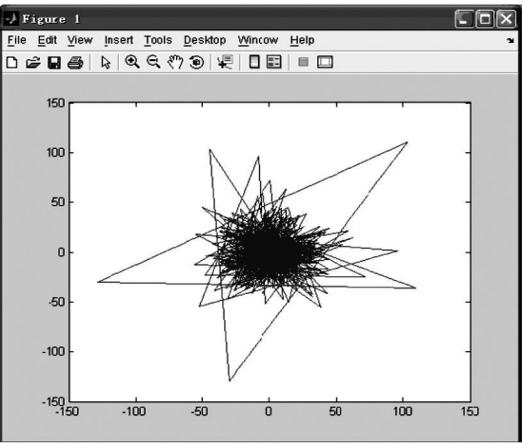


图 7 d1 分量的二维相空间重构图

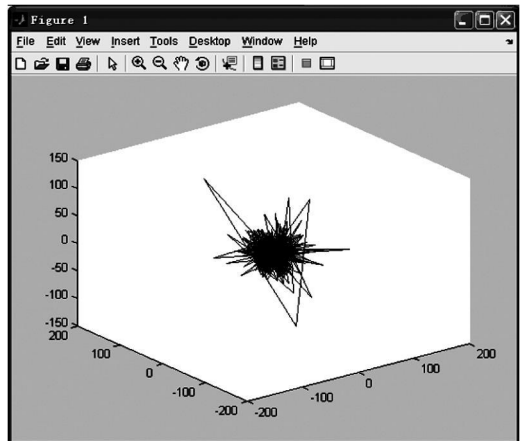


图 8 d1 分量的三维相空间重构图

量各种预测方法的好坏,但对于不同的预测项目,由于观测值不同,故只比较均方误差的大小不能说明问题。于是采用了平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error MAPE, 记其符号为 E_{MAP}) 做为比较标准。其计算公式为

$$E_{MAP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right| \times 100\%$$

经过计算,该仿真的均方根误差 (root mean

square error RMSE) 为 0.9028%, 表明预测模型比均值预测模型好。MAPE 值为 2.6109%, 符合高精度预测模型范围。

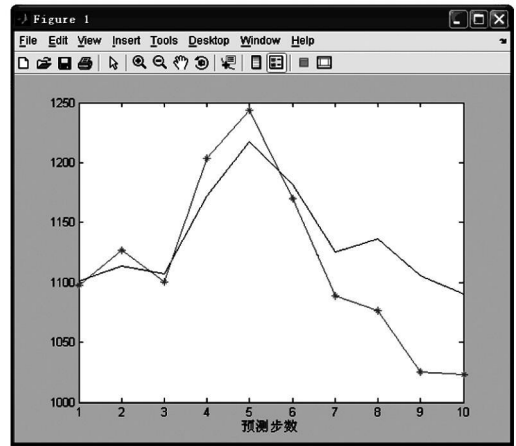


图 9 负荷预测图

4 结论及展望

本课题着重研究了电力负荷序列的混沌特性及小波特性和,并利用混沌仿真方法与小波方法相结合的仿真算法,进行了负荷预测,取得了很高的预测效果。

参考文献

- [1] 郑永康,陈维荣,蒋刚,等.基于混沌理论的短期负荷局部多步预测法[J].电力系统及其自动化学报,2007,19(4):76-79.
- [2] 杨正领,林孔元.电力系统负荷记录混沌特性成因的探讨[J].电力系统自动化,2002,26(10):18-23.
- [3] 杨正领.时间序列中的混沌判定、预报及在电力系统中的应用[D].天津:天津大学,2002.
- [4] 李鹰,赵振江,吴松涛.灰色模型在普通日短期电力负荷预测中的应用[J].长沙电力学院学报:自然科学版,2003,18(1):15-17.
- [5] 李国辉.基于灰色理论与BP神经网络的电力负荷预测[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2005.
- [6] 姜勇.基于模糊聚类的神经网络短期负荷预测方法[J].电网技术,2003,27(2):45-49.
- [7] 顾洁.应用小波分析进行短期负荷预测[J].电力系统及其自动化学报,2003,15(2):40-44,65.
- [8] 姚李孝,刘学琴,伍利,等.基于广义回归神经网络的电力系统中长期负荷预测[J].电力自动化设备,2007,27(8):26-29.
- [9] 丁军威,孙雅明.基于混沌学习算法的神经网络短期负

(下转第 29 页)

由谐波电流或等效干扰电流通过感性耦合在平行接近的双线电话回路中产生的杂音电动势,应按不同的运行方式进行计算。

4.2.1 双极回路运行方式

直流输电线路在双极回路运行方式下,应分别计算进入大地回路的和极导线的谐波电流在双线电话回路中产生的杂音电动势。

$$e_{m,r} = \lambda_m Z_m I_{iqr} \downarrow BK_{m800} \times 10^3$$

$$e_{m,e} = \lambda_m Z_e' I_{iqe} \downarrow BK_{m800} \times 10^3$$

式中, e_m 和 $e_{m,e}$ 分别为由大地回路的和极导线的谐波电流在双线电话回路中产生的杂音电动势, mV; λ_m 为双线电话杂音敏感系数,按实际情况取值; Z_m 为直流输电线路双极大回路与双线电话回路的 800 Hz 感性耦合阻抗, Ω/km ; I_{iqr} 为直流输电线路双极回路进入大地回路的谐波电流的等效干扰电流, A; \downarrow 为直流输电线路与电话回路的接近长度, km; B 为电信线路传播效应的衰减系数,按实际情况计算; K_{m800} 为各种金属接地导体 800 Hz 的磁综合屏蔽系数; Z_e' 为直流输电线路双极回路极导线与双线电话回路的 800 Hz 感性耦合阻抗, Ω/km ; I_{iqe} 为直流输电线路双极回路极导线的谐波电流的等效干扰电流, A。

双线电话回路总的杂音电动势 e_m 为

$$e_m = \sqrt{e_{m,r}^2 + e_{m,e}^2}$$

4.2.2 单极大回路运行方式

在单极大回路运行方式下,双线电话回路中产生的杂音电动势计算按以下公式计算。

$$e_{m,r} = \lambda_m Z_m I_{iqr} \downarrow BK_{m800} \times 10^3$$

4.2.3 单极金属回路运行方式

在单极金属回路运行方式下,在双线电话回路中产生的杂音电动势按以下公式计算。

$$e_{m,e} = \lambda_m Z_e' I_{iqe} \downarrow BK_{m800} \times 10^3$$

直流输电线路在单极大回路运行方式下的干扰影响为最大,在单极金属回路运行方式下的干扰影响为最小。若单极大回路不作为一种正常运行方式,而只是在调试、试运行或当直流系统发生故障和检修时采用,由于运行时间不长,其产生的干扰影响

时间很短,可不考虑。因此可用双极回路运行方式来检验直流输电线路对电信线路是否存在干扰影响。

直流输电线路对架空明线电信线路的干扰影响较大,但对电缆电信线路的干扰影响较小。中国目前的电信线路多为电缆和光缆,特别是在发达地区,架空明线已很少了。因此只要注意将直流输电线路与电信线路离开适当距离,交越角度大于 45° ,则在一般情况下可以避免干扰影响,或采取适当的防护措施,则可不必装设直流滤波器以抑止谐波电流。

5 结 论

以上对高压直流输电技术的基本问题如电晕损失、无线电干扰、导线表面电场强度的计算及其对电信线路的影响等问题做了阐述。主要对特高压直流输电线路高海拔及平原地区直流导线起晕场强、导线场强、无线电干扰的计算及分析的研究现状进行了综述,有利于中国发展高压直流输电技术。

参考文献

- [1] 张桂怀. 高压直流输电线路电场强度的计算 [J]. 内蒙古电力, 1992(4): 1-4.
- [2] 马仪, 李明. 输电线路工程导线电晕质量控制分析 [J]. 云南电力技术, 2003, 31(3): 51-53.
- [3] 鄢光旭. 超高压直流输电无线电干扰问题的探讨 [J]. 检验检疫科学, 2003, 13(3): 43-44.
- [4] 曾南超. 高压直流输电在我国电网发展中的作用 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 11-12.
- [5] 舒印彪. 中国直流输电的现状 & 展望 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 1-2.
- [6] 常卫中, 李施雄. 交直流高压输电线路并行传输时的无线电干扰特性 [J]. 电网技术 1998, 22(5): 10-13.
- [7] 马为民. 直流高压输电线路对通信线路影响的计算 [J]. 电信科学, 1996, 12(5): 25-31.
- [8] 林晓宇, 陈仕修, 张晓敏. 高压输电线路电晕放电电磁辐射影响分析 [J]. 电力环境保护, 2004, 20(3): 60-62.
- [9] 陈水明, 王磊, 何金良. 多回高压输电线路产生的无线电干扰分析 [J]. 电波科学学报, 2002, 17(6): 677-681.

(收稿日期: 2009-09-18)

(上接第 4 页)

荷预测 [J]. 电力系统自动化, 2000(1): 32-35.

[10] 冯再勇, 钟康惠, 马永旺. 小波网络和 BP 网络在负荷预测中的比较研究 [J]. 江汉大学学报, 2007, 35(2): 51-55.

[11] 雷绍兰. 基于电力负荷时间序列混沌特性的短期负荷

预测方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2005.

[12] 孙云, 李志强, 吴国忠. 电力系统短期负荷预测应用中小波函数选取的方法 [J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2007, 6(1): 35-38.

(收稿日期: 2009-08-04)