

# 船舶电力负荷预测混沌时间序列分析法

王兴元<sup>\*1</sup>, 赵敏<sup>2</sup>, 樊印海<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学 电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 沈阳工程学院 电气工程系, 辽宁 沈阳 110136;

3. 大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 为提高船舶电力系统安全稳定性, 提出对船舶电力负荷时间序列进行预测. 首先分析船舶电力负荷是否为混沌时间序列, 利用相空间重构对船舶电力负荷时间序列的最大 Lyapunov 指数进行了定量计算, 由计算结果发现船舶电力负荷具有混沌特性. 在此基础上, 提出了船舶电力负荷预测模型, 该模型将混沌局域预测与灰关联相结合, 并将相点间的关联性大小经过加权的方式作用于船舶电力负荷预测模型. 实际船舶电力系统的计算分析表明, 灰关联加权局域预测模型具有较高的预测精度, 是一种有效的用于船舶电力负荷混沌时间序列的预测模型.

**关键词:** 船舶电力负荷; 混沌; 局域预测; 灰关联; 加权

**中图分类号:** TP271.8 **文献标志码:** A

## 0 引言

随着船舶向大型化和多功能化发展, 以及电力推进的不断使用, 对船舶电力系统提出的要求越来越高. 船舶电力系统处于动态变化的运行情况比较多, 系统的动态变化范围也比较大, 这些直接影响了船舶电网的稳定, 因此需要及时对船舶电力负荷的变化作出预测.

混沌体系一个主要特征就是其轨迹对于初始点的敏感依赖性. Lyapunov 指数就是表征这个性质的参数<sup>[1]</sup>. 本文引进 Lyapunov 指数来判定船舶电力负荷的混沌性<sup>[2]</sup>, 从整体上反映船舶电力负荷系统的混沌量水平; 确定其具有混沌特性后, 利用灰关联加权局域预测方法进行船舶电力负荷的预测.

## 1 船舶电力负荷时间序列混沌特性分析

### 1.1 相空间重构

系统任一分量的演化是由与之相互作用的其

他分量所决定, 所以单一变量的时间序列隐含着整个系统的运动规律. 只需研究一个分量, 用该分量的延迟坐标来重构相空间. 在这个相空间恢复原有动力系统, 即可研究其吸引子的性质<sup>[3]</sup>. 根据 Packard 等和 Takens 提出的重构相空间理论<sup>[3~5]</sup>, 将单变量时间序列  $X(1), X(2), \dots, X(n)$  嵌入  $m$  维相空间得到一系列相点

$$Y_j(m, \tau) = (X(j) \quad X(j + \tau) \quad \dots \\ X(j + (m - 1)\tau)); \\ j = 1, 2, \dots, n - (m - 1)\tau \quad (1)$$

式中:  $\tau = k\Delta t$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) 为延迟时间,  $\Delta t$  为采样时间;  $m$  为相空间维数, 由吸引子的关联维数  $D_2$  确定, 取  $m \geq 2D_2 + 1$ . 令  $N = n - (m - 1)\tau$ , 表示由时间序列的  $n$  个  $X$  点构成  $m$  维相点的个数.

根据 Takens 嵌入定理, 当  $\tau$  选择合适, 且  $m \geq 2D_2 + 1$  时, 存在确定性映射  $F^m$ , 使得

$$Y_{i+1} = F^m(Y_i) \quad (2)$$

### 1.2 Lyapunov 指数

通过最大 Lyapunov 指数大于零可判断系统

收稿日期: 2007-11-12; 修回日期: 2009-12-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60573172); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070141014).

作者简介: 王兴元<sup>\*</sup>(1964-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wangxy@dlut.edu.cn; 樊印海(1946-), 男, 教授, 博士生导师.

为混沌系统. 小数据量法定义最大 Lyapunov 指数为最近邻域发散速率的平均值<sup>[6]</sup>. 其算法的具体步骤如下:

**步骤 1** 根据时间延迟  $\tau$  和嵌入维数  $m$  重构相空间  $\{Y_j, j = 1, 2, \dots, M\}$ .

**步骤 2** 找相空间中每个点  $Y_j$  的最近邻点  $\hat{Y}_j$ , 并限制短暂分离, 即

$$d_j(0) = \min_j \|Y_j - \hat{Y}_j\| \mid j - \hat{j} \mid > P \quad (3)$$

**步骤 3** 对相空间中每个点  $Y_j$ , 计算出该邻点对的  $i$  个离散时间步后的距离  $d_j(i)$ , 即

$$d_j(i) = \|Y_{j+i} - \hat{Y}_{j+i}\|; \quad i = 1, 2, \dots, \min(M-j, M-\hat{j}) \quad (4)$$

**步骤 4** 对每个  $i$ , 求出所有  $j$  的  $\ln d_j(i)$  平均  $y(i)$ , 即

$$y(i) = \frac{1}{q\Delta t} \sum_{j=1}^q \ln d_j(i) \quad (5)$$

其中  $q$  是非零  $d_j(i)$  的数目, 并用最小二乘法作出回归直线, 该直线的斜率就是最大 Lyapunov 指数  $\lambda$ .

## 2 基于灰关联的局域加权线性预测模型

局域预测的关键是确定预测状态的最近邻域点<sup>[7]</sup>, 而最近邻域点采用欧氏距离来确定.

$$d_{in} = \|Y_n - Y_i\| = \sqrt{\sum_{p=1}^M \sum_{j=1}^{d_p} (x_p, n - (j-1)\tau_p)^2} \leq \epsilon \quad (6)$$

式中:  $\epsilon$  为一极小正数;  $Y_n$  为相空间中时刻  $n$  的预测状态点;  $Y_i$  为与相点  $Y_n$  的最近邻域点. 由式(6)可见预测精度取决于欧氏距离所确定的最近邻域点性态, 若最近邻域点与原相点相关性程度大, 预测精度高, 反之则低<sup>[8]</sup>. 设待预测点为  $Y_{N+1}$ , 预测的起始点为  $Y_N$ , 最近邻域点中除  $Y_N$  外所有相点与  $Y_N$  的关联度为

$$r_{Ni} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}) / (\Delta_{Ni}^j + \Delta_{\max}) \quad (7)$$

其中  $\rho$  为分辨系数, 取值范围为  $[0, 1]$ . 取阈值  $\delta$  为

区间  $(0, 1)$  内的一个较大值, 当  $r_{Ni} \geq \delta$  则称相点  $Y_i$  为中心点  $Y_N$  的相关点. 设  $Y_N$  所有相关点为  $Y_{k_i}$ , 相点  $Y_{k_i}$  的权值为<sup>[9,10]</sup>

$$\omega_i = r_{Nk_i} / \sum_{j=1}^p r_{Nk_j} \quad (8)$$

采用线性逼近, 则式(2)可变换为

$$Y_{k_i+1} = A + Bx_{k_i}; \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (9)$$

其中  $A, B$  为待求系数矩阵. 则负荷预测的线性逼近函数形式为

$$Y_{k_i+1} = a_1 + \sum b_{1j} x_{k_i - (j-1)\tau}; \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (10)$$

其中  $a_1, b_{1j}$  为拟合参数, 采用加权最小二乘法求取为

$$\sum \omega_i (x_{k_i+1} - a_1 - \sum b_{1j} x_{k_i - (j-1)\tau})^2 = \min \quad (11)$$

依次对式(11)的参数  $a_1, b_{1j}$  求偏导, 这样就完成了对混沌预测模型参数的确定.

## 3 算例分析

船舶在航行中不同工况下各种用电负荷运行功率、起动次数或工作持续时间上具有随机性<sup>[11]</sup>. 为验证本文所提模型对船舶电力负荷预测的有效性, 现以某船舶电力负荷时间序列样本为例进行计算分析<sup>[12]</sup>. 取其电力负荷样本  $N = 4000$ , 首先确定相空间重构所需的重构参数. 经计算, 嵌入维数  $m = 11$ , 时间延迟  $\tau = 7$ . 用时间延迟  $\tau$  和嵌入维数  $m$  对样本空间进行相空间重构, 完成相空间重构后依据本文所述方法计算船舶电力负荷最大 Lyapunov 指数  $\lambda$ , 计算表明初始状态点个数与所选邻域点个数的取值对计算结果有很大影响. 对邻域点保持短暂分离有效减少了计算量. 依据小数据量法计算该船舶电力负荷的最大 Lyapunov 指数, 其  $y(i)$  与  $i$  的对应关系见图 1.

图 1 曲线呈锯齿状, 其原因是船舶电力负荷数据含有噪声. 对负荷数据进行降噪处理后图形会光滑一些. 曲线  $y(i) - i$  直线部分的斜率  $\lambda_1 = 0.042$ , 即该船舶的 Lyapunov 指数为 0.042, 由

$\lambda > 0$  可知船舶电力负荷时间序列为混沌体系, 且此系统最大可预测时间长度

$$T_{\max} = 1/\lambda_1 = 1/0.042 = 23.8$$

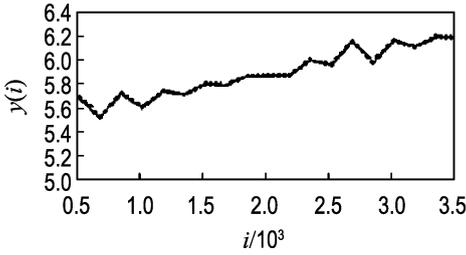


图 1  $y(i)-i$  曲线  
Fig. 1  $y(i)-i$  curve

完成船舶电力负荷混沌特性分析后对其进行预测, 预测步骤如下: ①根据欧氏距离确定最近邻域点, 并将其与关联度结合, 保证了距离最近, 且与预测点的性态最接近. 其中距离约束最大值取为 0.3, 关联度约束取值为 0.6. ②将相点间的关联性大小经过加权的方式作用于船舶电力负荷的预测模型. 船舶电力负荷预测结果如图 2 所示(图中  $P_f$  为预测负荷,  $P_a$  为实际负荷).

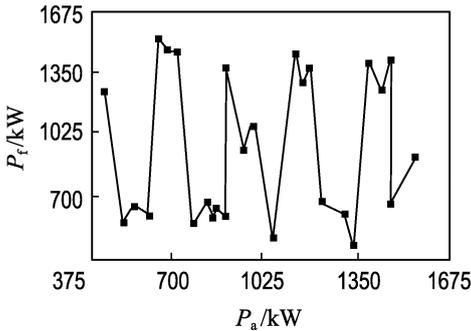


图 2 预测结果  
Fig. 2 Forecasting result

为了比较本文船舶电力负荷预测模型相对于一般混沌局域预测模型所具有的优势, 就该船舶电力负荷时间序列采用这两种方法分别对其进行预测, 计算其预测误差(如表 1 所示). 比较预测误差可以明显看出本文的预测方法优于局域预测法. 灰关联加权局域预测模型具有较高的预测精

度, 是一种有效的应用于船舶电力负荷时间序列的预测模型.

表 1 两种方法预测误差结果

Tab. 1 The forecasting error results of two methods

时日	误差/%		时日	误差/%	
	局域预测	灰关联加权局域预测		局域预测	灰关联加权局域预测
1	0.43	0.27	7	-1.46	-1.12
2	-0.56	-0.12	8	0.67	0.19
3	0.33	0.17	9	-3.65	-2.41
4	-2.67	-1.65	10	0.16	0.04
5	0.90	0.23	11	1.69	0.62
6	2.16	1.76	12	1.33	0.89

### 4 结 论

船舶电力系统是一个独立的电力系统, 若及时对船舶电力负荷进行预测, 由此再对船舶发电机组进行调速和调压, 合理安排电网内部发电机组的起停, 可保证船舶电网的安全稳定性. 对船舶电力负荷最大 Lyapunov 指数的定量计算表明, 船舶电力负荷是具有内在确定性和短期可预测性的混沌信号. 针对混沌局域预测法的局限性, 将灰关联度与欧氏距离相结合, 并将相点间的关联性大小经过加权的方式作用于船舶电力负荷的预测模型, 计算结果表明灰关联加权局域预测是一种有效的用于船舶电力负荷混沌时间序列的预测方法.

### 参考文献:

[1] 吴国祯. 分子振动的混沌理论[M]. 北京: 科学出版社, 2003

[2] 黄润生, 黄 浩. 混沌及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005

[3] PACKARD N H, CRUTCHFIELD J P, FARMER J D, et al. Geometry from a time series [J]. **Physical Review Letters**, 1980, 45(9):712-716

[4] TAKENS F. Detecting strange attractors in turbulence [M] // **Lecture Notes in Mathematics**.

Berlin: Springer, 1981

- [5] 吕金虎. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版, 2002
- [6] ROSENSTEIN M T, COLLINS J J, DE LUCA C J. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1993, **65**(1-2):117-134
- [7] SUGIHARA G, MAY R M. Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series [J]. *Nature*, 1990, **334**:734-741
- [8] 蒋传文, 袁智强, 侯志俭, 等. 高嵌入维混沌负荷序列预测方法研究[J]. 电网技术, 2004, **28**(3):25-28
- [9] 岳毅宏, 韩文秀, 张伟波. 基于关联度的混沌序列局部加权线性回归预测法[J]. 中国电机工程学报, 2004, **24**(11):36-40
- [10] 雷绍兰, 孙才新, 周 濂, 等. 电力短期负荷的多变量时间序列线性回归预测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, **26**(2):16-20
- [11] 王锡淮, 朱思锋. 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):44-48
- [12] 吴晓平, 宋业新, 汪 玉. 基于模糊 SOFM 网分类的船舶电力负荷估算模型[J]. 中国造船, 2003, **44**(1):26-31

## Ship power load forecasting based on chaos time series analysis method

WANG Xing-yuan<sup>\*1</sup>, ZHAO Min<sup>2</sup>, FAN Yin-hai<sup>3</sup>

( 1. School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China;

3. Information Science and Technology College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China )

**Abstract:** Ship power load time series forecasting is proposed in order to improve ship power system safety and stabilization. Firstly, chaos character of ship power load is analyzed, and the largest Lyapunov exponent is calculated by the reconstruction of phase-space. Computational result shows that ship power load presents chaotic character. On the basis of these analyses, ship power load forecasting model is presented. The local forecasting of chaos time series and the gray correlation are combined, and the values of expressing correlation act on ship power load forecasting model by means of adding-weight. The analysis for practical ship power system shows that the gray correlation adding-weight local forecasting model has superior predictive capability, and it is a valid prediction model for ship power load chaos time series.

**Key words:** ship power load; chaos; local forecasting; gray correlation; adding-weight