

文章编号: 1005-9865 (2008) 01-0012-06

FPSO 纵摇运动预报研究

姚 宗, 陈 刚, 杨建民

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200030)

摘 要: FPSO 船体姿态运动(纵摇和横摇)会对 FPSO 与穿梭油轮的靠泊、FPSO 上直升机的起降、海上的补给等作业可能造成严重的影响。如能实现在一定时间内对 FPSO 船体姿态运动进行预报,则可大大提高这些作业的安全性和高效性。用 $AR(p)$ 模型拟合 FPSO 纵摇运动,然后运用 $AR(p)$ 模型的线性最小方差预报法进行预报,预报实例中用到的数据来自模型试验。结果表明,用时间序列法对 FPSO 纵摇运动进行极短期预报具有一定的精度和较小的计算量。

关键词: $AR(p)$ 模型; 预报; FPSO; 纵摇运动

中图分类号: P751 **文献标识码:** A

Study on prediction of FPSO pitch motion

YAO Zong, CHEN Gang, YANG Jian-min

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Operations, such as berthing a shuttle tanker beside FPSO, taking off or landing a helicopter on FPSO, and replenishment at sea, may be seriously affected by pitch and roll of FPSO. The ability of predicting the motions of FPSO in some time is very helpful for safety and efficiency of those operations. In this paper, $AR(p)$ model is used to match the pitch motion of FPSO. Then the motion can be predicted using $AR(p)$ Linear Minimum Variance method. The data in the process of practical prediction come from the model test. The results show that extreme short prediction of FPSO pitch motion using time series method is accurate and the calculation is simple.

Key words: $AR(p)$ model; prediction; FPSO; pitch motion

在海洋石油开发中,浮式生产储油船(FPSO)目前已成为世界海上油田工程的主流形式。直接系泊于海上的FPSO将遭受各种海况的作用,产生不同程度的六自由度运动:横摇、纵摇、艏摇、横荡、纵荡、垂荡。一般FPSO的单点锚泊系统对于减小横荡、纵荡和垂荡运动效果明显,但对于纵摇、横摇和艏摇运动几乎没有作用。严重的纵摇、横摇和艏摇运动会使FPSO与穿梭油轮的靠泊、FPSO上直升机的起降、海上的补给等作业带来很大的影响。在海上进行相关作业前,如能适当预报FPSO的这些姿态运动,则可大大提高作业的安全性和高效性。

目前,国内外船体运动预报的研究主要集中在船体姿态运动预报上,即对船体横摇和纵摇的预报研究。国内外船体姿态运动预报所采用的研究方法基本上可概括为两大类,即频域分析法和时域分析法。在频域分析法中,最有吸引力的方法是卷积法;在时域分析法中最有效且最容易实现的方法是时间序列分析法^[1]。卷积法因需精确的响应核函数和波高测量函数,故在实用中受到限制。目前人们对时间序列分析法最感兴趣,尽管它的预报精度和时间长度还不能满足更高要求,但是其优点也是很显著的。它不需要知道风浪流的任何先验信息和船舶航态的状态方程,仅仅利用船本身的历史数据寻求规律进行预报^[2]。国外对这一课题做了不少的研究工作。美国海军系统中心夏威夷实验室 I R Yumr 在 1981 年采用时间序列法预报船体的运

收稿日期: 2007-03-28

作者简介: 姚宗(1982-),男,江苏南通人,硕士研究生,主要从事海洋结构物水动力性能研究。

动以指导航母上飞机起降,减少事故的发生^[3]。国内也有很多人专门研究过这种方法^[4-8],也取得了一定的成果。

在海上,由于风标效应,FPSO 的纵摇运动是相当显著的,故此采用时间序列分析法专门对 FPSO 的纵摇运动进行了预报研究,FPSO 的纵摇运动数据来自模型试验。

1 FPSO 纵摇运动的时间序列模型及建模方法

1.1 AR(p) 模型

AR(p) (Autoregression) 模型的一般形式为:

$$X_t = a_1 X_{t-1} + a_2 X_{t-2} + \dots + a_p X_{t-p} + \epsilon_t \tag{1}$$

式中: $\{X_t, t = 1, 2, \dots\}$ 为时间序列; $\{\epsilon_t\}$ 是白噪声序列, $E \epsilon_t = 0, E \epsilon_t^2 = \sigma^2$,而且 $E X_s \epsilon_t = 0$,对一切 $s < t$ 成立; $\{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ 为 AR(p) 模型参数。

假设 FPSO 纵摇运动的观测序列 $\{X_t, t = 1, 2, \dots\}$ 服从 AR(p) 模型。

1.2 对 FPSO 纵摇运动的观测序列 $\{X_t, t = 1, 2, \dots\}$ 进行 AR(p) 模型拟合

假定有已测定的一段观测样本序列 $\{X_t, t = 1, 2, \dots, n\}$,对其进行 AR(p) 模型拟合主要包括判断模型的阶数 p 和估计模型的参数 $\{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ 。

1.2.1 观测样本序列中心化处理

由于上述 AR(p) 模型是针对零均值平稳序列的,而现在要研究的 FPSO 纵摇运动变量——纵摇角的均值在多数情况下不为零,因此首先应对观测样本序列 $\{X_t, t = 1, 2, \dots, n\}$ 进行中心化处理,即将它们同时减去其样本均值 \bar{X} 。

计算样本均值:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t \tag{2}$$

中心化后的样本序列:

$$X_t = X_t - \bar{X}, \quad t = 1, 2, \dots \tag{3}$$

1.2.2 模型阶数估计

样本自协方差函数为:

$$\hat{\gamma}_k = \frac{1}{n-k} \sum_{j=1}^{n-k} X_j X_{j+k}, \quad k = 0, 1, \dots, \sqrt{n} \tag{4}$$

若 \sqrt{n} 为小数,则取整,下同。

样本自相关函数为:

$$\hat{\rho}_k = \frac{\hat{\gamma}_k}{\hat{\gamma}_0}, \quad k = 1, 2, \dots, \sqrt{n} \tag{5}$$

样本偏相关函数用以下迭代公式求出。

$$\hat{\rho}_{1,1} = \hat{\rho}_1 \tag{6}$$

$$\hat{\rho}_{k+1,k+1} = \frac{\hat{\rho}_{k+1} - \sum_{j=1}^k \hat{\rho}_{k+1-j} \hat{\rho}_{j,k}}{1 - \sum_{j=1}^k \hat{\rho}_{j,j} \hat{\rho}_{j,k}} \tag{7}$$

$$\hat{\rho}_{j,k+1} = \hat{\rho}_{j,k} - \hat{\rho}_{k+1,k+1} \hat{\rho}_{k-j+1,k}, \quad j = 1, 2, \dots, k \tag{8}$$

用式(6)、(7)和(8)迭代计算出样本偏相关函数列 $\hat{\rho}_{1,1}, \hat{\rho}_{2,2}, \hat{\rho}_{3,3}, \dots, \hat{\rho}_{k,k}$,并同时得到以下矩阵:

$$\begin{bmatrix} \hat{\rho}_{1,1} & & & \\ \hat{\rho}_{1,2} & \hat{\rho}_{2,2} & & \\ \dots & \dots & \ddots & \\ \hat{\rho}_{1,k} & \hat{\rho}_{2,k} & \dots & \hat{\rho}_{k,k} \end{bmatrix} \tag{9}$$

用 BIC 准则方法来确定模型的阶数 p, BIC 准则函数为:

$$BIC(k) = \log \hat{\sigma}^2(k) + \frac{k \log n}{n}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \tag{10}$$

式中: \hat{p} 表示真值 p 的某个上界, 在计算时可取为 \sqrt{n} (取整值); $\hat{E}_t^2(k)$ 表示假定 p 取 k 时, 对残差方差 $E_t^2 = \sigma^2$ 的估计。 $\hat{E}_t^2(k)$ 的算法如下:

$$\hat{E}_t^2(k) = \hat{\sigma}_0^2 - (\hat{a}_{1,k} \hat{a}_1 + \hat{a}_{2,k} \hat{a}_2 + \dots + \hat{a}_{k,k} \hat{a}_k), \quad k = 1, 2, \dots, \quad (11)$$

当取 $k=0$ 时, $\hat{E}_t^2(0) = \hat{\sigma}_0^2$ 。

将上述 $\text{BIC}(k)$ 在 $k=0, 1, 2, \dots, \hat{p}$ 中的最小值之解 \hat{p} 作为模型阶数 p 的估计, 即 \hat{p} 满足:

$$\text{BIC}(\hat{p}) = \min_k \text{BIC}(k) \quad (12)$$

1.2.3 模型参数估计

用尤尔-沃克 (Yule-Walker) 法估计模型的参数 $\{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ 。将样本自协方差函数 $\hat{\gamma}_0, \hat{\gamma}_1, \dots, \hat{\gamma}_{\hat{p}}$ 代替 $\text{AR}(p)$ 序列自协方差函数 $\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_p$ 诸量, 相应的 $\text{AR}(p)$ 序列模型参数 a_1, a_2, \dots, a_p 以待估计模型参数 $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_{\hat{p}}$ 代替后, 得到新的尤尔-沃克方程为:

$$\begin{cases} \hat{a}_1 \hat{\gamma}_0 + \hat{a}_2 \hat{\gamma}_1 + \dots + \hat{a}_{\hat{p}} \hat{\gamma}_{\hat{p}-1} = \hat{\gamma}_1 \\ \hat{a}_1 \hat{\gamma}_1 + \hat{a}_2 \hat{\gamma}_0 + \dots + \hat{a}_{\hat{p}} \hat{\gamma}_{\hat{p}-2} = \hat{\gamma}_2 \\ \dots \\ \hat{a}_1 \hat{\gamma}_{\hat{p}-1} + \hat{a}_2 \hat{\gamma}_{\hat{p}-2} + \dots + \hat{a}_{\hat{p}} \hat{\gamma}_0 = \hat{\gamma}_{\hat{p}} \end{cases} \quad (13)$$

利用式 (4) 求得的样本自协方差函数 $\hat{\gamma}_0, \hat{\gamma}_1, \dots, \hat{\gamma}_{\hat{p}}$, 可求解上述尤尔-沃克方程, 得模型参数 $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_{\hat{p}}$ 。

取 $K = \hat{p}$, 利用式 (11) 可得到残差方差 $E_t^2 = \sigma^2$ 的估计:

$$\hat{E}_t^2 = \hat{E}_t^2(\hat{p}) \quad (14)$$

最后获得的拟合模型为:

$$X_t = \hat{a}_1 X_{t-1} + \hat{a}_2 X_{t-2} + \dots + \hat{a}_{\hat{p}} X_{t-\hat{p}} + \hat{E}_t \quad (15)$$

式中: $E_t = 0, E_t^2 = \hat{E}_t^2(\hat{p})$ 。

2 FPSO 纵摇运动的预报方法及预报性能指标

2.1 观测样本序列 $\{X_t, t=1, 2, \dots, n\}$ 的线性最小方差预报

假定已测得 FPSO 纵摇运动的观测序列 $\{X_t, t=1, 2, \dots, n\}$, 现在需要预报 FPSO 纵摇运动序列值 $\{X_t, t=n+1, n+2, \dots\}$ 。

由于假定 FPSO 纵摇运动的观测序列 $\{X_t, t=1, 2, \dots, n\}$ 服从 $\text{AR}(p)$ 模型, 且模型已经拟合出, 故可应用平稳 $\text{AR}(p)$ 序列的线性最小方差预报方法对 FPSO 纵摇运动进行预报。平稳 $\text{AR}(p)$ 序列的线性最小方差预报方法如下:

$$\hat{X}_{n+k}(\hat{p}) = \hat{a}_1 \hat{X}_{n+k-1}(\hat{p}) + \hat{a}_2 \hat{X}_{n+k-2}(\hat{p}) + \dots + \hat{a}_{\hat{p}} \hat{X}_{n+k-\hat{p}}(\hat{p}), \quad k=1 \quad (16)$$

初始值为:

$$\hat{X}_{n-j}(\hat{p}) = X_{n-j}, \quad \text{当 } j=0, 1, \dots, \hat{p}-1 \quad (17)$$

式中: $\hat{X}_{n+k}(\hat{p})$ 表示使用 \hat{p} 个已知观测值 $\hat{X}_n, \hat{X}_{n-1}, \dots, \hat{X}_{n-\hat{p}+1}$ 对未知值 \hat{X}_{n+k} 的 k 步线性最小方差预报。

由于 $\hat{X}_{n+k}(\hat{p})$ 为使用对原始观测样本序列 $\{X_t, t=1, 2, \dots, n\}$ 进行中心化处理后的观测样本序列 $\{X_t, t=1, 2, \dots, n\}$ 而得到的预报值, 故需对预报值 $\hat{X}_{n+k}(\hat{p})$ 进行还原处理, 以得到合理的预报值 \hat{X}_{n+k} 。处理过程如下:

$$\hat{X}_{n+k} = \hat{X}_{n+k}(\hat{p}) + \bar{X}, \quad k=1 \quad (18)$$

2.2 预报性能指标

设 $X_{j, n+k}$ 的预报值为 $\hat{X}_{j, n+k}$, 其中 j 为不同时间段的观测样本序列编号, n 为观测样本序列中的数据个数, k 为预报步数。

为考察所用预报方法预报步 k 的背离程度, 定义均方误差参数 σ_k 为:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{j=1}^l [X_{j, n+k} - \hat{X}_{j, n+k}]^2} \quad (19)$$

式中: l 为不同时间段观测样本序列的总数,定义相对误差参数 k 为:

$$k = \frac{\max_j |X_{j, n+k}|}{|X_j|} \times 100 \% \tag{20}$$

3 FPSO 纵摇运动的预报实例及分析

本实例所要分析的 FPSO 纵摇角数据来源,先在海洋工程水池中做 FPSO 船模试验,再经过适当处理后换算为实船纵摇角数据。实船为一艘 10 万吨级的 FPSO,船模缩尺比为 1/64。试验分 20 组进行,每组试验中 FPSO 船模均只受随机波浪作用。经过采样量化后每组试验均获得 250 个纵摇角数据,换算到实船后的采样时间间隔为 0.8 s。

对 20 组试验数据均进行了预报研究,每组数据的前 200 个作为观测样本序列,200 个之后的数据作为与预报值比较的数据。下面首先详细叙述第 1 组试验数据的处理过程。

用第 1 组试验数据的前 200 个纵摇角数据作为观测样本序列,按式(2)~(15)进行了 AR(p)模型拟合;用式(16)~(18)完成了模型预报。以上的计算过程均用 VC++ 语言编程,并且在计算机上运行完成。

图 1 给出了第 1 组 250 个 FPSO 纵摇角数据的曲线图。图 2 为估计模型阶数 p 时的 BIC(k)值随 k 变化图。由图 2 可见,当 $k=3$ 时 BIC(3)达到最小值,此时可估计模型的阶数 $p=3$ 。

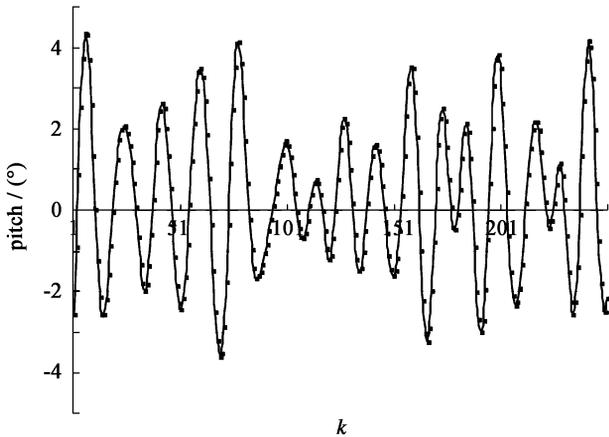


图 1 第一组试验纵摇角测量值
Fig. 1 Measured value of pitch in test 1

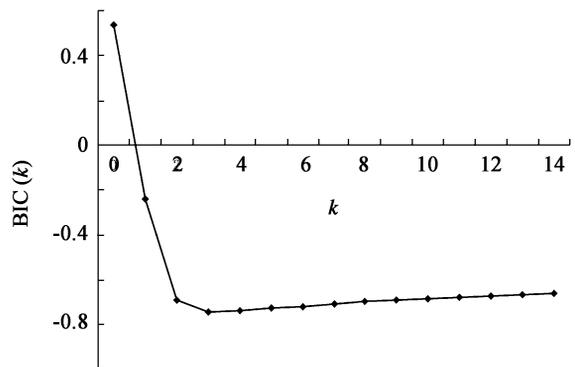


图 2 BIC(k) 值
Fig. 2 Value of BIC(k)

表 1 中给出了第一组试验中第 200 个纵摇数据之后的纵摇角测量值以及用模型预报得到的相应时刻纵摇预报值,限于篇幅,表 1 中只列出了部分数据值。

为了便于比较,把表 1 中的数据绘制成纵摇角随时间变化的曲线图(见图 3)。根据图 3 及表 1,可以发现在最初 10 s 左右时间之内的纵摇角预报曲线与实际曲线契合得比较好,但是在此以后的纵摇角预报曲线与实际曲线分离得越来越严重,大概在 22 s 以后纵摇角预报曲线与实际曲线已经完全背离。从图 3 还可以发现,刚开始时,预报曲线波峰波谷的出现与实际曲线波峰波谷的出现在时间上大体一致,但是随着时间的推移,两者的偏差越来越大。

其余 19 组试验数据的处理分析过程与第 1 组试验数据的处理分析过程完全一样,故在此不作叙述。

为了考察所用预报方法预报步(k)的精确程度,对所有 20 组数据处理结果进行了统计分析,计算了均方误差 k 和相对误差 k 。

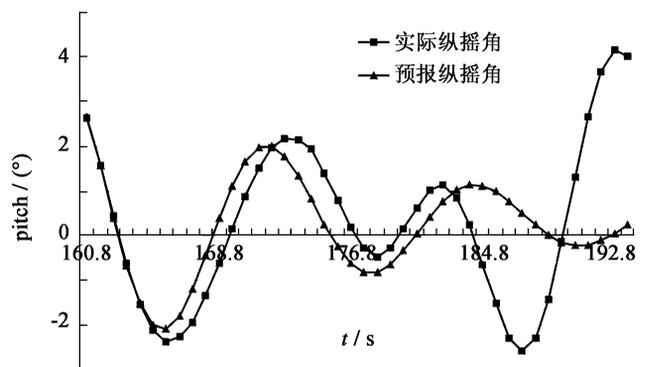


图 3 第一组试验中 200 个之后的纵摇角测量值曲线和预报值曲线
Fig. 3 Measured value curve of pitch following the 200th and the predicted value curve in test 1

表 1 第一组试验中 200 个之后的纵摇角测量值和预报值

Tab. 1 Measured value of pitch following the 200th and the predicted value in test 1

| 序号 (k) | 时间/ s | 实际观测值/ (°) | 预报值/ (°) |
|------------|-------|------------|-----------|
| 201 | 160.8 | 2.616 04 | 2.637 51 |
| 202 | 161.6 | 1.567 88 | 1.559 29 |
| 203 | 162.4 | 0.439 84 | 0.384 58 |
| 204 | 163.2 | -0.632 03 | -0.691 55 |
| 205 | 164.0 | -1.528 11 | -1.519 02 |
| 206 | 164.8 | -2.120 04 | -1.993 46 |
| 207 | 165.6 | -2.376 06 | -2.075 18 |
| 208 | 166.4 | -2.263 74 | -1.786 44 |
| 209 | 167.2 | -1.935 52 | -1.203 84 |
| 210 | 168.0 | -1.343 95 | -0.441 40 |
| 211 | 168.8 | -0.632 03 | 0.369 77 |
| 212 | 169.6 | 0.144 06 | 1.102 85 |
| 213 | 170.4 | 0.872 01 | 1.654 06 |
| 214 | 171.2 | 1.512 07 | 1.956 33 |
| 215 | 172.0 | 1.952 26 | 1.986 09 |
| 216 | 172.8 | 2.160 15 | 1.763 05 |
| 217 | 173.6 | 2.144 10 | 1.343 33 |
| 218 | 174.4 | 1.928 54 | 0.807 77 |
| 219 | 175.2 | 1.400 10 | 0.247 53 |
| 220 | 176.0 | 0.784 11 | -0.250 60 |

根据式(19),均方误差 k 为:

$$k = \sqrt{\frac{1}{20} \sum_{j=1}^{20} [X_{j,200+k} - \hat{X}_{j,200+k}]^2}$$

式中: $X_{j,200+k}$ 中为第 j 组试验 200 步之后第 k 步的 FPSO 纵摇角测量值, $\hat{X}_{j,200+k}$ 为第 j 组试验 200 步之后第 k 步的 FPSO 纵摇角预报值。

根据式(20),相对误差 k 为:

$$k = \frac{k}{\max_j \{ |X_{j,200+k}| \}} \times 100\%$$

均方误差 k 和相对误差 k 的计算结果见表 2,限于篇幅,表 2 中只给出了部分值。

表 2 均方误差 k 和相对误差 k Tab. 2 Mean square error k and relative error k

| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| k / (°) | 0.096 | 0.223 | 0.393 | 0.555 | 0.713 | 0.805 | 0.827 | 0.813 | 0.788 |
| k / (%) | 2.48 | 6.29 | 10.25 | 16.14 | 21.95 | 22.37 | 23.03 | 26.32 | 27.43 |

根据计算得到的均方误差 k 和相对误差 k 数据,绘制出均方误差 k 和相对误差 k 随时间步数 k 的变化曲线图,分别见图 4 和图 5。

由表 2 以及图 4 和图 5 可见,随着预报步数的增加,预报的均方误差和相对误差都呈增长趋势。5 步(即 4 s)之内,预报值与测量值的偏差量较小但呈较快的上升趋势,预报的均方误差可以在 0.7° 以内,预报的相对误差可以在 20% 以内;5 步到 10 步(即 4 s 到 8 s),预报值与测量值的偏差出现一定的稳定性,预报的均方误差在 0.8 左右,预报的相对误差在 24% 左右;11 步到 14 步(即 8.8 s 到 11.2 s),预报值与测量值的偏差量出现第二次较快上升,预报均方误差在 0.9 到 1.245° 之间,预报的相对误差在 30% 到 40% 之间;15 步到 17 步(即 12 s 到 13.6 s),预报值与测量值的偏差出现第二次的稳定期,预报的均方误差在 1.25 左右,预报的相

对误差在 39 % 左右;18 步(即 14.4 s)以后,预报的均方误差和相对误差都将继续增长,预报值与测量值的偏差已经相当大。

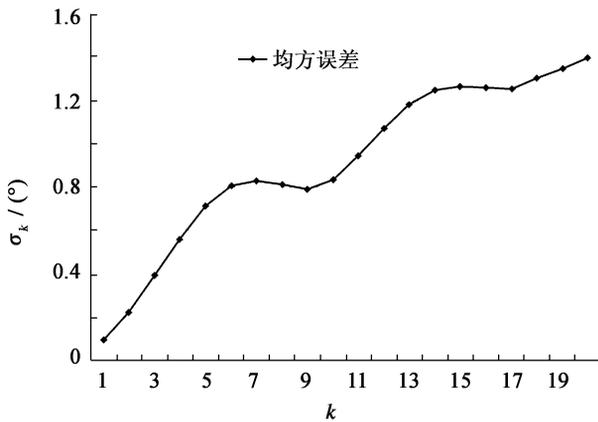


图 4 均方误差 σ_k - 时间步数 k 曲线

Fig. 4 Mean square error σ_k -time number k

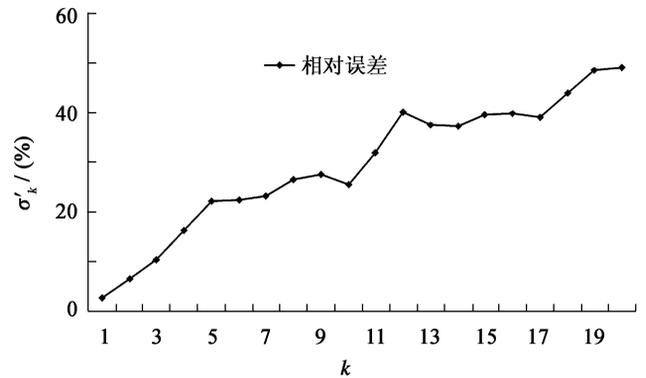


图 5 相对误差 σ'_k - 时间步数 k 曲线

Fig. 5 relative error σ'_k -time number k

4 结 语

通过以上 FPSO 纵摇运动的预报实例及分析可以得到以下结论:

1) AR(p) 模型是描述 FPSO 纵摇运动的一个较为恰当模型,在此基础上建立的纵摇数据线性最小方差预报方法在 0~4 s 范围内的相对误差从 0 开始上升,其值在 20 % 以内。4~8 s 范围内的相对误差稍有上升且呈现一定的稳定性,其值在 24 % 左右。8 s 以后一定时间内的相对误差也呈现这种一段时间上升一段时间又平稳的趋势。用这种方法对 FPSO 纵摇运动作极短期预报是具有一定的可行性。

2) 用 AR(p) 模型拟合并预报 FPSO 纵摇运动的方法只需 FPSO 纵摇角的历史观测数据,而且算法简单、存储量小,能满足实时处理的要求,是一种值得推荐的 FPSO 纵摇数据实时处理方法。

3) 随着预报时间的增加,这种方法的预报精度逐渐降低,原因主要出在两个方面:一是在复杂海况下的 FPSO 纵摇运动是非线性动态过程,而 AR(p) 模型是一种平稳线性模型;二是在预报计算的时候,计算第二步预报值时要用到第一步预报值,计算第三步预报值时要用到第一、二步预报值,依此当预报步数愈大,预报值与真实值相差愈远。

4) 与参考文献[3]和[4]中用 AR(p) 模型拟合并预报舰船的极短期姿态运动相比,本文中用该模型拟合并预报 FPSO 极短期姿态运动的精度稍微偏低了一点,原因主要在于本文中的 FPSO 船体为单点系泊,锚泊系统增强了 FPSO 船体姿态运动的非线性。

参考文献:

- [1] 安鸿志. 时间序列分析[M]. 上海: 华东师范大学出版社,1987.
- [2] 赵希人,彭秀艳,等. 舰船运动极短期建模预报的研究现状[J]. 船舶工程,2002,(3):4-8.
- [3] Yumori, Isao Roy. Real time prediction of ship response to ocean waves using time series analysis[A]. In: Oceans 81 Conference Record[C]. Piscataway, NJ: IEEE,1981. 1082-1089.
- [4] 彭秀艳,魏纳新,等. 大型舰船姿态运动极短期预报的一种 AR 算法[J]. 船舶工程,2001,(5):5-10.
- [5] 马洁,李国斌. 船舶横摇运动的时间序列预报[J]. 北京机械工业学院学报,2006,21(1):4-7.
- [6] 赵源,滕大予. 多维 AR(p) 模型在预报舰船运动中的应用[J]. 现代防御技术,2003,31(4):52-60.
- [7] 赵希人,彭秀艳,等. 具有艏前波观测的大型舰船姿态运动极短期预报[J]. 船舶力学,2003,7(2):39-44.
- [8] 彭秀艳,尹中凤,等. 船舶运动预报仿真系统设计[J]. 仪器仪表学报,2005,26(8):458-460.