

文章编号:1000-0887(2003)04-0398-07

# 基于 ARMA 模型和自由振动提取技术的 海洋平台结构参数识别

欧进萍, 何林, 肖仪清

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

(陈予恕推荐)

**摘要:** 用随机减量方法提取海洋平台结构在随机环境荷载非白噪声输入下的自由振动信号和用 ARMA(Auto Regressive Moving Average)模型对自由振动数据建模。为了消除平台输出信号中有色噪声的影响,在随机减量系统中加入了一个虚拟系统,并采用导通条件和前导点技术使自由振动提取过程仍在有色输入的状态下进行。同时为了消除参数识别的多值性,提出了采用 MA 系数修正技术识别海洋平台结构的频率和阻尼动力参数的方法,最后用该套技术对海洋平台结构试验模型进行了参数识别,结果表明该方法具有较好的效果和在线识别使用价值。

**关键词:** 海洋平台结构; ARMA; 自由振动信号提取; MA 参数修正; 参数识别

**中图分类号:** TU312.3      **文献标识码:** A

## 引言

海洋平台是 21 世纪海上结构工程重要研究对象之一。由于海洋平台服役环境恶劣,经常受到海水的腐蚀以及风、浪、流、冰的作用,因此振动控制和健康在线监测显得非常重要,而参数识别则是完成这一套技术的核心内容之一<sup>[1]</sup>。

海洋平台结构的风、浪、流、冰等动力作用是典型的非平稳随机过程,因而传统的基于传递函数来识别结构参数的方法受到很大的限制。时间序列方法仅用输出数据建立与系统特征值相对应的统计模型,进而识别系统的特征参数,克服了基于传递函数测量的传统频域识别方法的不足。在用时间序列 ARMA 模型建模海洋平台的输出数据时,假定了模型描述的系统所受的输入是白噪声,而实际的海洋平台输入特性的频谱范围却集中在几个频段之内,难以获得较为充分的模态信息。为了克服这种困难,传统的做法是加大布点密度,提高采样率和采样时间,以获取足够的信息。另一方面,海洋平台结构的强迫振动信号对参数识别结果影响很大;而且,设置耗能器等控制器件的海洋平台阻尼增加,特征信号衰减加快,识别结果几乎是强迫信号和噪声的叠加,极端时会导致识别失败。由于非平稳随机输入信号中的噪声一般已不属于加性噪声,常规线性滤波器改善信噪比的能力很有限,而非线性滤波器设计复杂,特别是目

• 收稿日期: 2001-01-15; 修订日期: 2002-08-05

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(59625815); 国家高技术应用发展资助项目

作者简介: 欧进萍(1959—),男,湖南人,教授,博士,博士生导师,副校长,已在国内外发表文章 110 多篇(E-mail:oujinping@hope.hit.edu.cn)。

前还没有耗时低(可用单指令单数据流实现)且性能稳定的非线性滤波器<sup>[2]</sup>,因此,对海洋平台结构参数识别这种实时性要求较高的场合,常规离线参数识别的线性滤波技术将使识别结果的重复性差,可靠度低。

鉴于此,为了提高海洋平台强振输出数据中特征模态信息的含量,压制强振信号对识别参数的影响,本文将提出一个新方法,即用随机减量法先在海洋平台的随机振动信号中提取自由振动信号,然后用 ARMA 模型建立输出数据的统计模型,最后识别结构的频率和阻尼等动力参数。

## 1 自由振动信号的提取

设海洋平台结构所受的环境激励荷载  $F(t)$  为平稳、零均值各态历经随机过程,则其位移响应  $X(t)$  也为平稳、零均值的随机过程。随机减量法就是在位移响应  $X(t)$  中以位移在某一常值  $A$  对应的时刻点  $t_i$  起,在一定条件下向后取  $T_i$  时间长度的数据,然后将各数据累加得到自由振动信息。

对于单自由度系统不妨设提取时刻点  $t_i$  对应的位移值为  $A$ ,相应的样本函数全体构成的子响应过程为  $X'(t)$ 、激励力为  $F'(t)$ ,则在  $t \geq t_i$  时

$$X'(t) = Aa(t) + \dot{X}'(t_i)v(t) + \int_{t_i}^t h(t-\tau)F'(\tau)d\tau, \quad (1)$$

式中  $a(t)$  是系统在初位移为单位 1,初速度为零的自由振动; $v(t)$  是初位移为零,初速度为单位 1 的自由振动;最后一部分是系统  $F'(t)$  作用下的强迫响应信号,其中  $h(t-\tau)$  是系统的单位脉冲响应函数。

对应(1)取均值,当子响应过程  $X'(t)$  的容量足够大时,可得

$$E[X'(t)] = Aa(t). \quad (2)$$

式(2)说明子响应过程  $X'(t)$  的期望是系统的一个初位移为  $A$ ,初速度为零的自由振动响应。这样,就从理论上达到了从随机响应中提取自由振动响应的目的。

设从子响应过程  $X'(t)$  中容量为  $N$  的子样  $[x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_N(t)]$ ,构成子样统计过程

$$\bar{X}'(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t) = Aa(t) + \bar{V}'v(t) + \int_{t_i}^t h(t-\tau)\bar{F}'(\tau)d\tau, \quad (3)$$

式中,

$$\bar{V}' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{x}_i(t_i), \quad \bar{F}' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i(t).$$

当容量  $N$  足够大时,  $\bar{V}'$  和  $\bar{F}'$  都趋于零,因此子样过程的每一个样本函数都可看作是系统的一个具有低噪声、初位移为  $A$ 、初速度接近零的自由振动响应。

式(3)右端的 3 部分实际上反映了系统作线性振动时所包含的无激励自由振动、自由伴振动和稳态强迫振动这 3 种振动信息,并可在白噪声激励的假设下,提取自由振动信息。为了处理实际中的有色噪声输入,我们将原系统进行扩展,设置导通条件,以充分达到自由振动信号提取的目的。条件设置一般有两种方法,一是非线性滤波器的设置,二是延时处理;我们选择第二种方案,在原系统中加一虚拟的系统 I,选取时间  $\tau_0$ ,在  $t > \tau_0$  时,使系统 I 的瞬态响应衰减到与  $\bar{X}'(t)$  相比可以忽略的程度时,系统 II 的随机减量曲线可作为自由振动曲线的近似。由于系统 I 为假设的虚拟的系统,这一处理过程仍在有色噪声输入响应中进行,即对原输

出信号选择一个前导,使其频峰值附近的谱线变化平缓,不致使选取点以后的幅值过低,造成有用信号大量漏失。这种处理过程如图 1 所示。

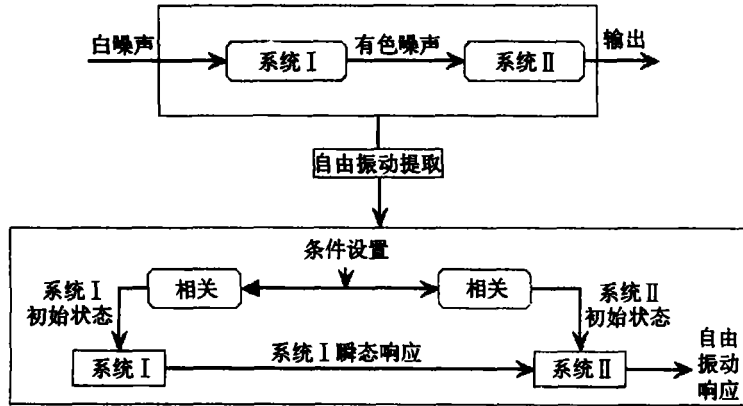


图 1 有色噪声输入时自由振动信号的提取

按照上面的技术路线,对于给定的响应过程,选取时间  $\tau_0$  和幅值范围  $[A_0, A_1]$ ,在此幅值范围内截取样本时间相同起点加速度正负交替的样本  $x_i(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ),将所有样本平移至坐标原点并取算术平均,则得到由初始位移引起的阶跃自由响应

$$\bar{X}'(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t), \quad (4)$$

式(4)中的  $\bar{X}'(t)$  就是从有色噪声输入响应信号中提取自由振动信号的实用方案。

对多自由度的情形,处理方法是—致的,设某一测点的初始选点条件为  $[A_0, A_1]$ ,并在这一条件下,同时对其它测点作自由振动信号的提取,得

$$\begin{Bmatrix} \bar{X}'_1(t) \\ \vdots \\ \bar{X}'_N(t) \end{Bmatrix} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \begin{Bmatrix} x_{1k}(t) \\ \vdots \\ x_{Nk}(t) \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

式(5)即为多自由度系统初始位移阶跃自由振动信号。

## 2 振动方程 ARMA 模型的建立及参数识别

对于  $N$  自由度线性粘滞振动系统,其复模态传递函数可写成:

$$\mathbf{H}_{lp}(s) = \sum_{r=1}^N \left( \frac{A_{lpr}}{s - s_r} + \frac{A_{lpr}^*}{s - s_r^*} \right) \quad (l, p = 1, 2, \dots, N), \quad (6)$$

式中  $A_{lpr}$  为第  $r$  阶复模态留数,  $s_r$  为第  $r$  阶特征值, \* 表示复共轭。

对式(6)作 Laplace 逆变换,并离散化,得相应的脉冲响应函数为

$$h_{lp}(m\Delta_t) = \sum_{r=1}^N (A_{lpr} Z_r^m + A_{lpr}^* Z_r^{*m}), \quad (7)$$

式中  $m$  为采样点号,  $\Delta_t$  为采样间隔,  $Z_r = e^{s_r \Delta_t}$ 。

对式(7)进行  $Z$  变换,整理后可得

$$\begin{aligned} (1 + \varphi_1 Z^{-1} + \varphi_2 Z^{-2} + \dots + \varphi_{2N} Z^{-2N}) X(Z) = \\ (\theta_0 + \theta_1 Z^{-1} + \theta_2 Z^{-2} + \dots + \theta_{2N-1} Z^{-2N+1}) a(Z), \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中  $Z$  为  $Z$  变换因子。

对式(8)进行  $Z$  的逆变换,得到时域内的有理差分形式:

$$\begin{aligned} X_i + \varphi_1 X_{i-1} + \varphi_2 X_{i-2} + \cdots + \varphi_{2N} X_{i-2N} = \\ a_i + \theta_1 a_{i-1} + \theta_2 a_{i-2} + \cdots + \theta_{2N-1} a_{i-2N+1}. \end{aligned} \quad (9)$$

显然,式(9)是外源自回归滑动平均(ARMAX)模型<sup>[3]</sup>在外源项  $X$  取零时的特殊形式. 取式(9)左端的  $p$  项,右端的  $q$  项,即构成 ARMA( $p, q$ ) 模型.

设 ARMA( $p, q$ ) 模型中 AR 特征根和振动系统的特征根分别为  $\lambda_i, \mu_i (i = 1, 2, \dots, p)$ , 则有如下的关系<sup>[4]</sup>:

$$\mu_r = \frac{1}{\Delta_i} \ln(\lambda_r), \mu_r^* = \frac{1}{\Delta_i} \ln(\lambda_r^*), \mu_{r(1,2)} = -\xi_r \omega_r \pm i \omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2}, \quad (10)$$

式中  $\Delta_i$  为采样间隔,  $\omega_r$  为第  $r$  阶模态固有频率,  $\xi_r$  为第  $r$  阶阻尼比, \* 表示复共轭.

由式(10)可得第  $r$  阶模态固有频率为

$$\omega_r = \frac{1}{\Delta_i} \sqrt{\frac{1}{4} (\ln \lambda_r \lambda_r^*)^2 + \left[ \arccos \frac{(\lambda_r + \lambda_r^*)}{2\sqrt{\lambda_r \lambda_r^*}} \right]^2}. \quad (11)$$

同理,可得第  $r$  阶阻尼比为

$$\xi_r = -\ln(\lambda_r \lambda_r^*) \left\{ \ln(\lambda_r \lambda_r^*) + 4 \arccos \left[ \frac{(\lambda_r + \lambda_r^*)}{2\sqrt{\lambda_r \lambda_r^*}} \right] \right\}^{-\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

式中  $\lambda_r$  的计算是经过两阶段法<sup>[5-8]</sup> 求出  $\varphi_i$  和  $\theta_i$  系数后,由下列多项式方程解出的特征根

$$\lambda^n - \varphi_1 \lambda^{n-1} - \varphi_2 \lambda^{n-2} - \varphi_3 \lambda^{n-3} - \cdots - \varphi_n = 0. \quad (13)$$

为了消除  $\arccos$  的多值性,采用 MA 系数修正的方法<sup>[4]</sup>对式(11)和(12)重新计算,得

$$\omega_r = \sqrt{a_r^2 + b_r^2}, \xi_r = \frac{a_r}{\omega_r}, \quad (14)$$

式中

$$\begin{aligned} a_r &= \frac{\ln(-\varphi_{r2})}{-2\Delta_i}, \\ b_r &= a_r \sqrt{-(\varphi_{r1}^2 + 4\varphi_{r1})} \left[ \frac{\varphi_{r1} - 2(1 - \varphi_{r2}) \left( \theta_{r1} + \frac{1}{\theta_{r1}} \right)}{(1 - \varphi_{r2}^2) + 2\varphi_{r1}(1 + \varphi_{r2}) \left( \theta_{r1} + \frac{1}{\theta_{r1}} \right)} \right]. \end{aligned}$$

于是,利用自由振动信号提取技术和 ARMA 建模的方法对海洋平台结构参数识别的步骤可总结如下:

- 1) 根据结构响应的实际情况,选取恰当的起始时刻  $\tau_0$ , 位移初始范围  $A_0, A_1$ , 从输出信息中提取自由振动信号  $\bar{X}'(t)$ ;
- 2) 建立  $\bar{X}'(t)$  的 ARMA( $p, q$ ) 最优阶模型,采用两阶段法对  $\varphi_i, \theta_i$  进行估计:第一阶段先对  $\varphi_i, \theta_i$  的初值进行初步估计;第二阶段在初值的基础上用近似的极大似然法和改进的平方和方法分别对  $\varphi_i, \theta_i$  参数作精确估计;
- 3) 计算特征根  $\lambda_r$  和  $a_r, b_r$  之值;
- 4) 计算结构的模态固有频率  $\omega_r$  和阻尼比  $\xi_r$ ;
- 5) 模型检验、更新和数据的后处理.

### 3 试验检验

为了验证本文参数识别方法的效果和正确性,结合我们正在研究的海洋平台结构冰振控

制课题,我们进行了渤海 JZ20-2MUQ 平台结构耗能减振振动台模型试验,并采用本文提出的参数识别方法对结构模型进行了动力参数识别。

JZ20-2MUQ 平台是一个近海 4 腿钢质导管架平台,平台顶部距离海床 54.9 m,总重量约 2 000 t。由于振动台面尺寸、承载能力等因素的限制,模型试验的几何相似系数取为 1/10,又根据振动台的承载能力,质量相似系数取为 1/450。这样,由几何相似系数、材料相似系数以及质量相似系数构成了模型结构的基本相似系数,由这几个相似系数可导出时间相似系数为 1/4.47。此模型的照片如图 2 所示。

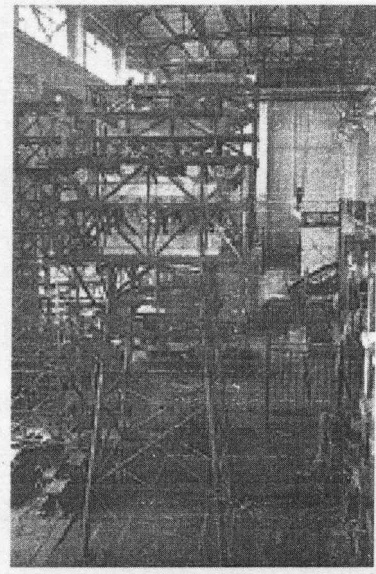


图 2 海洋平台模型

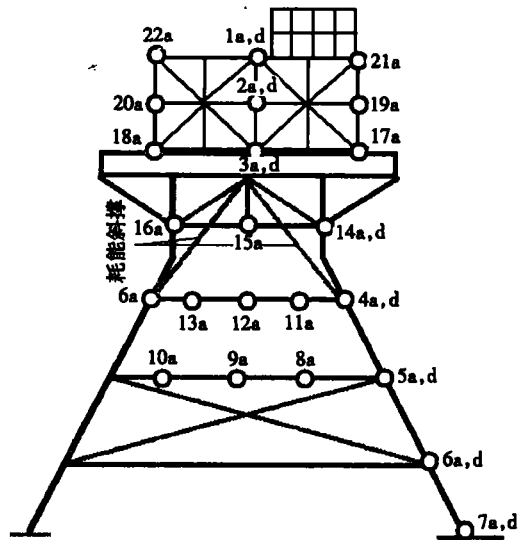


图 3 模型尺寸及测点布置

本次试验中,模型结构有 4 种形式,如图 3 所示,分别为:1) 原始模型结构;2) 附加粘弹性耗能器的模型结构;3) 附加粘滞耗能器的模型结构。4) 附加钢梁斜撑的模型结构。对于每一种模型结构有 4 种振动台输入,分别是 El Centro 波(1940, SN), Taft 波(1952, N21E), 天津波(1976, EW)和正弦波。模型上布置位移(图中 d)和加速度传感器(图中 a),如图 3 所示,布置位移传感器是为了检验由加速度作积分计算位移时的精度。

根据海洋平台地震输入响应的实际情况,我们对模型的所有工况进行幅值分析,确定自由振动提取初始时间  $\tau_0$  的基准选在 2 s,根据实时信号左右调整,  $A_0$ 、 $A_1$  分别选为序列方差和二倍方差。表 1 列出了测点 1 的 El Centro 波自由振动信号提取选点幅值和衰减比例的情况。

表 1  $\tau_0$  为 2 s 时 El Centro 波输入的结构振动幅值和衰减比例

工况	最大值 $A_{max}/mm$	选点时刻值 $A_R/mm$	衰减比例 $\gamma/(%)$
粘滞耗能斜撑 1	3.8	1.5	39
粘弹性耗能斜撑	3.2	1.5	47
原始模型	6.8	2.6	38
粘滞耗能斜撑 2	6.2	3.2	52
粘滞耗能斜撑 3	3.7	0.3	8

注 表 1 中的“1、2、3”表示粘滞耗能器中不同的粘滞油体标号。

从表 1 中我们可以看出衰减比例基本在 40%左右,经过 2 s 的衰减后,振幅仍有较大的波

动,使前导信号中的有效信息保持较为丰满,有利于自由振动信号的提取。经实际处理我们获得了较好的处理效果。图4和图5分别为1号测点的El Centro波输入下的响应和提取的自由振动信号。为满足后续处理,每个自由振动信号的提取长度为300点,后补零扩至1024点。

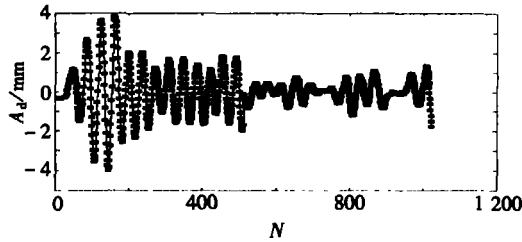


图4 原始响应信号

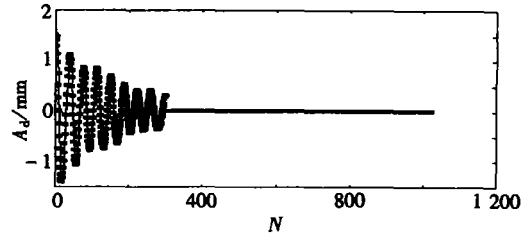


图5 提取的自由振动信号

为了检验识别结果的精度,我们对海洋平台结构模型在振动台上用正弦扫频和半功率谱法测出海洋平台模型无控时的第一阶频率和阻尼比分别为4.5 Hz和0.0055,这与表2中的数据Ⅱ识别结果很一致,特别是阻尼的识别精度得到了很大的提高。经过大量实测和分析表明,采用数据Ⅱ比数据Ⅰ的识别结果有较大的改善。

表2 El Centro波输入下海洋平台结构前三阶频率和阻尼比识别值

工况	阶数	原始模型		粘滞耗能斜撑 1		粘滞耗能斜撑 2		粘滞耗能斜撑 3		粘弹耗能斜撑	
		频率	阻尼	频率	阻尼	频率	阻尼	频率	阻尼	频率	阻尼
		$\omega_r / \text{Hz}$	$\xi_r$	$\omega_r / \text{Hz}$	$\xi_r$	$\omega_r / \text{Hz}$	$\xi_r$	$\omega_r / \text{Hz}$	$\xi_r$	$\omega_r / \text{Hz}$	$\xi_r$
数据Ⅰ	1	4.559	0.031	3.908	0.037	4.373	0.0106	3.643	0.051	4.327	0.003
	2	14.15	0.010	8.783	0.025	15.11	0.0437	7.446	0.021	15.86	0.042
	3	15.26	0.161	13.55	0.089	27.16	0.0789	13.33	0.053	24.48	0.039
数据Ⅱ	1	4.217	0.005	4.273	0.034	4.6798	0.0432	4.123	0.062	4.818	0.019
	2	15.76	0.052	11.06	0.349	9.5708	0.0145	11.17	0.211	7.800	0.164
	3	15.18	0.022	14.17	0.361	11.846	0.2412	20.74	0.022	18.46	0.152

注 “1、2、3”表示粘滞耗能器中不同的粘滞油体标号。

## 4 结 论

本文提出把海洋平台结构的强振信息经过自由振动信号提取后再建立时序统计ARMA模型来识别结构动力参数的方法。本文的研究得到如下主要结论:

1) 海洋平台结构在环境荷载作用下的响应有很强的不平稳性,直接用ARMA方法建立输出数据的特征模型来识别频率和阻尼等动力参数将受到强振信号很大的干扰,强振的响应与识别结果的相关性很强,特别是阻尼的识别误差很大。采用本文提出的自由振动信号提取的方法可以很好的削弱这种相关性,得到很好的频率和阻尼识别值。

2) 在海洋平台结构的参数识别中,强振信号变成我们不需要的噪声,而且它不是加性噪声,因而线性滤波器对此不能取得满意的效果。用自由振动信号提取的方法预处理海洋平台结构的输出信号本质上是对它进行了滤波,它等效于非线性分段滤波器,但却有明确的物理意义,且计算量小,有很好的在线识别使用价值。

3) 用本文提出的方法对大型复杂结构进行参数在线识别,需要有一定的先验信息,以便

于合理确定自由振动信号提取时的初始时刻值和振动幅值的选择,使提取的信号最优化。

### [参 考 文 献]

- [1] Doebbling S W, Farrar C R, Prime M B, *et al.* A review of damage identification methods that examine changes in dynamic properties[J]. *J Shock Vibration Dig*, 1998, 30(20):91—105.
- [2] 陈贺新. 非线性滤波器与数字图像处理[M]. 北京:国防工业出版社, 1997.
- [3] 莱纳·荣. 系统辨识——使用者的理论[M]. 袁震东, 院荣耀, 陈树中 译. 上海:华东师范大学出版社, 1990.
- [4] 何林, 欧进萍. 基于 ARMAX 模型及 MA 参数修正的框架结构动态参数识别[J]. 振动工程学报, 2002, 15(1):47—51.
- [5] 扬位钦, 顾岚. 时间序列分析与动态数据建模[M]. 北京:北京工业学院出版社, 1986.
- [6] 何林. 结构损伤识别动态数据系统参数辨识的研究[D]. 硕士学位论文. 西安:西安工程学院, 1999.
- [7] 孟昭秦, 李貅, 何林. 结构振动数据数学模型的线性及非线性的刻划[J]. 西安工程学院学报, 1997, 5(6):58—63.
- [8] 孟昭秦, 何林, 刘仕军. 结构损伤线性及非线性特征谱模式识别及应用[J]. 西安工程学院学报, 1999, 14(10):48—52.

## Parameters Identification in Offshore Platform Using ARMA Model and Technology of Extracting Free Vibration Signal

OU Jin-ping, HE Lin, XIAO Yi-qing

(School of Building Engineering Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China)

**Abstract:** A procedure for identifying the dynamic parameter of offshore platform is presented. The present procedure consists of two key features. First uses random decrement (RD) technology to extract free vibration signal in strong noise environment in which it may not white noise. Second technology which called autoregressive moving average (ARMA) is used to model the data treated by the random decrement method. In order to get rid of the color noise in the output signal response from the offshore platform an imaginary system is added in RD system and make the course of extracting performed under the state of color input by choosing the breakover condition and lead time. For eliminating multi-values of parameters identified, an updating moving average method is used. The dynamic parameters of structure under arbitrary input are identified. Example of the method as applied to a scale-model offshore platform is used to evaluate the technology of efficiency and the value of on-line.

**Key words:** offshore platform structure; ARMA; extracting free vibration signal; MA parameter updating; parameter identification