

海洋平台的时域低阶建模与主动控制研究¹⁾

刘 松* 蔡国平*,²⁾ 董兴建[†]

*(上海交通大学工程力学系, 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

[†](上海交通大学振动冲击噪声研究所, 上海 200240)

摘要 以海洋平台为对象, 开展时域低阶建模与主动控制的研究. 首先采用观测器/Kalman 滤波器的系统辨识方法, 根据系统的输入和输出时间历程数据计算出系统的 Markov 参数, 然后采用特征系统实现方法建立一个阶数较低的系统状态空间模型, 随后基于该低阶模型采用线性二次型高斯算法进行控制律的设计, 最后将该控制律引入到系统的有限元模型中进行反馈闭环控制, 验证控制律的有效性. 数值仿真结果显示, 所给方法是有效和可行的.

关键词 海洋平台, OKID, ERA, 主动控制

中图分类号: O313 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2011)04-0737-09

引 言

近年来, 陆地能源资源的稀缺制约了各国经济的可持续发展, 对资源的需求促使人们深入开发海洋资源. 海洋平台作为海洋石油天然气资源开发的基础性设施和海上生产作业以及生活的基地, 其安全性和重要性不言而喻. 海洋平台处于恶劣和复杂海洋环境下, 长时间遭受风、浪、流和潮等多种自然载荷的连续作用, 这些载荷会引起平台的持续振动, 一方面会加剧平台构件的疲劳破坏, 降低结构的可靠度和构件强度, 另一方面过大的振动会引起平台上工作人员的不适感和影响机器设备的正常运行. 因此, 对海洋平台振动控制的研究具有重要的理论意义和实际应用价值.

目前国内外众多学者对海洋平台的振动控制问题进行了研究. 最早人们是采用被动控制策略研究海洋平台的振动控制问题, 例如, Lee^[1]通过在导管架平台上设置黏弹性阻尼器研究了海洋平台的振动控制, Vandiver 等^[2]采用调谐液体阻尼器对海洋平台的减振效果进行了研究. 被动控制是通过阻尼器耗散结构的振动能量来达到对结构进行振动控制的目的, 该控制策略一般只对高频外部激励效果明显, 但对低频外部激励效果欠佳, 因此缺乏控制上的灵活性. 主动控

制策略是根据系统状态进行实时反馈控制, 具有控制效果不依赖于外部扰动特性的优点, 因此近几十年来海洋平台的主动控制得到了人们的普遍关注. 例如, Terro 等^[3]研究了导管架海洋平台的一种多回路反馈控制方法; 欧进萍等^[4-5]以渤海油田的海洋平台为对象, 研究了冰载荷和地震激励下的 ATMD(active tuned mass damper) 主动控制; 李华军等^[6-7]对渤海胜利油田的海洋平台进行了深入研究, 研究了波浪载荷的 ATMD 主动控制.

海洋平台结构复杂, 动力学分析常采用有限元方法, 但是该方法所建模型自由度非常庞大, 而主动控制的设计则要求模型阶数尽可能的低, 这就需要进行模型降阶或低阶建模, 采用低阶模型来近似代替原高阶系统, 而且低阶模型既要能真实地反映系统的主要特性, 又要有足够低的阶数, 以便控制设计. 目前关于海洋平台的主动控制多是基于假设模态法或将平台简化为单自由度, 模型精度差, 控制效果的真实有效性值得商榷. 在结构动力学建模方法中, 基于系统输入和输出数据的动力学建模又称为系统辨识建模, 它将结构系统作为一个整体进行处理, 直接获得系统的降阶模型, 主要包括频域辨识和时域辨识两类方法. 频域方法是对实测系统的频响函数进行拟合, 物理上简单直观, 得到的系统模型其

2010-06-01 收到第 1 稿, 2011-01-21 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金(11072146, 11002087), 教育部博士点基金(20070248032), 上海市教委科研重点项目(09ZZ17) 和海洋工程国家重点实验室自主研究课题(GKZD010807) 资助项目.

2) E-mail: caigp@sjtu.edu.cn

幅频特性与实测频响函数较符合, 但相频特性一般差距较大, 而且传递函数模型不便于向状态空间模型转换, 实现频域的 MIMO (multiple input multiple output) 辨识比较困难. 时域方法直接根据时域振动信号进行辨识, 从而得到适合控制器设计的数学模型, 其中基于观测器 / Kalman 滤波器的系统辨识方法 (observer / Kalman filter identification, OKID)^[8-9] 是 NASA Langley 研究中心的研究人员提出的一种时域 MIMO 辨识技术, 非常适合于辨识低阻尼结构的 Markov 参数, 即系统的脉冲响应采样值. 该方法一经提出便用于分析 Hubble 空间望远镜. 时域辨识建模所建模型为状态空间方程, 便于控制设计.

本文采用 OKID 方法研究海洋平台的时域低阶模型的辨识问题, 首先采用 OKID 方法辨识系统的 Markov 参数, 然后采用特征系统实现方法 (eigensystem realization algorithm, ERA) 建立低阶模型, 随后采用线性二次型高斯算法 (linear quadratic Gaussian, LQG) 进行控制律的设计, 最后通过数值仿真验证所给方法的有效性.

1 海洋平台响应的计算

考虑图 1 所示导管架式海洋平台, 采用有限元方法可以建立系统的动力学方程为

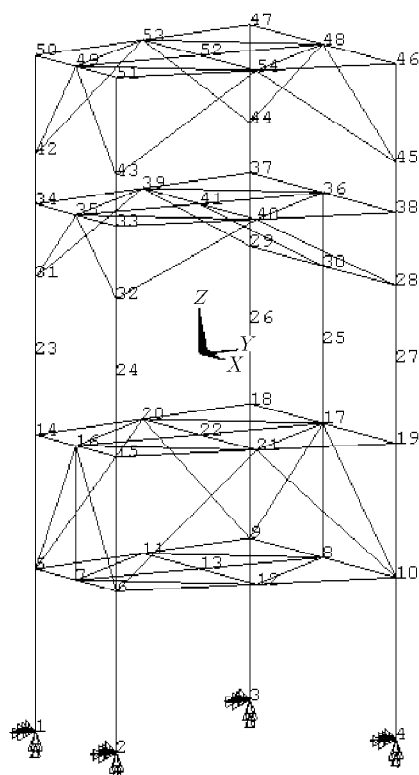


图 1 海洋平台模型示意图

Fig.1 Model of offshore platform

$$M\ddot{z}(t) + C_d\dot{z}(t) + Kz(t) = D_u u(t) \quad (1)$$

其中, $z(t)$ 为节点坐标列阵, M , C_d , K 分别为系统质量阵、阻尼阵和刚度阵, $u(t)$ 为施加的外部激励力或主动控制力, D_u 是与 $u(t)$ 施加位置有关的矩阵.

将方程 (1) 写成状态空间模型, 有

$$\dot{x}(t) = \bar{A}x(t) + \bar{B}u(t) \quad (2)$$

其中

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C_d \end{bmatrix}$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D_u \end{bmatrix}$$

对方程 (2) 进行离散化, 可得

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (3)$$

其中, $A = e^{\bar{A}\bar{T}}$, $B = \int_0^{\bar{T}} e^{\bar{A}t} dt \bar{B}$, k 代表采样步数, $\bar{T}$ 为数据采样周期.

应当说明的是, 本文重点是采用辨识技术研究结构的时域低阶建模问题, 辨识建模时要求输入信号为白噪声, 同时要求输入信号位置与后续的控制设计作动器的位置保持一致, 因此在辨识建模时 $u(t)$ 代表白噪声激励, 在控制律设计时 $u(t)$ 代表控制力, $u(t)$ 并非结构所承受的风、浪和流等外部激励.

当对结构施加已知的白噪声激励, 通过有限元模型可以计算得到结构的响应, 这样就能得到一组等周期采样的系统输入和输出时间序列, 然后采用下节将要介绍的 OKID 技术和 ERA 方法可以建立起一个阶数较低的状态空间模型.

2 系统辨识和控制律设计

2.1 OKID 技术

OKID 方法是一种时域辨识技术^[8-11]. 这种方法的特点是引入状态观测器, 首先计算观测器的 Markov 参数, 即其脉冲响应采样值, 然后求得原系统的 Markov 参数.

考虑如下离散后的平台结构的状态空间模型

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (4a)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \quad (4b)$$

其中, $\mathbf{x}(k)$ 为 $n \times 1$ 维状态向量, $\mathbf{u}(k)$ 为 $m \times 1$ 维输入向量, $\mathbf{y}(k)$ 为 $q \times 1$ 维输出向量. 矩阵 $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{D}$ 分别为状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵和直接影响矩阵. 由式 (4) 进行递推, 得到系统响应输出的第 kT 个时刻的一般表达式为

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{A}^k \mathbf{x}(0) + \sum_{\tau=0}^{k-1} \mathbf{C}\mathbf{A}^\tau \mathbf{B}\mathbf{u}(k-\tau-1) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) = \mathbf{C}\mathbf{A}^k \mathbf{x}(0) + \sum_{\tau=0}^{k-1} \mathbf{Y}_\tau \mathbf{u}(k-\tau-1) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \quad (5)$$

其中, $\mathbf{Y}_\tau = \mathbf{C}\mathbf{A}^\tau \mathbf{B}$ 和 $\mathbf{D}$ 为待辨识的系统 Markov 参数. 由方程 (5) 可看出, 当 $\mathbf{x}$ 的初始状态为零、输入 $\mathbf{u}$ 为脉冲输入时, 初始时刻 $k=0$ 的系统响应 $\mathbf{y}(0)$ 对应于矩阵 $\mathbf{D}$ 的列, $k \geq 1$ 时刻的系统响应为 $\mathbf{y}(k+1) = \mathbf{C}\mathbf{A}^k \mathbf{B} = \mathbf{Y}_k$. 可见, $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{Y}_\tau$ 为系统的脉冲采样值. 如果结构的初始条件为零或已知, 即 $\mathbf{x}(0)$ 已知, 则可以直接采用方程 (5) 进行系统 Markov 参数的辨识 [8,10-11]. 然而对于一个实际工程结构, 初始条件事实上很难精确给定, 即使没有任何外载荷作用下结构处于平衡位置, 严格意义上的零初始条件也是很难精确保证的, 结构总会因为制作等原因使得初始条件不严格为零, 这样根据系统的输入和输出数据和采用方程 (5) 进行系统 Markov 参数的辨识, 不可避免地会导致辨识误差的产生. 为了消除初始条件对系统 Markov 参数辨识的影响, OKID 构造了状态观测器, 首先经过推导得到与初始条件无关的观测器的 Markov 参数方程, 根据系统输入输出数据求解该方程得到观测器的 Markov 参数, 然后推导观测器 Markov 参数与原系统 Markov 参数之间的关系式, 由此得到原系统的 Markov 参数, 过程介绍如下.

构造如下状态观测器

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) - \mathbf{F}[\mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k)] =$$

$$(\mathbf{A} + \mathbf{F}\mathbf{C})\hat{\mathbf{x}}(k) + (\mathbf{B} + \mathbf{F}\mathbf{D})\mathbf{u}(k) - \mathbf{F}\mathbf{y}(k) \quad (6a)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \quad (6b)$$

其中, $\hat{\mathbf{x}}(k)$ 为状态估计; $\hat{\mathbf{y}}(k)$ 为观测器输出, $\mathbf{y}(k)$ 为系统的真实输出; $\mathbf{F}$ 为观测器的增益矩阵, 通过 $\mathbf{F}$ 来调配 $\mathbf{A} + \mathbf{F}\mathbf{C}$ 的特征值, 使得观测器的状态 $\hat{\mathbf{x}}(k)$ 逼近系统真实状态 $\mathbf{x}(k)$. 对方程 (6) 进行递推, 观测

器第 kT 个时刻的响应输出的一般表达式可写为

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{C}(\mathbf{A} + \mathbf{F}\mathbf{C})^k \hat{\mathbf{x}}(0) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) + \sum_{\tau=0}^{k-1} \hat{\mathbf{Y}}_\tau [\mathbf{u}^\mathrm{T}(k-\tau-1) \quad \mathbf{y}^\mathrm{T}(k-\tau-1)]^\mathrm{T} \quad (7)$$

其中, $\hat{\mathbf{Y}}_\tau$, $\mathbf{D}$ 为观测器的 Markov 参数, $\hat{\mathbf{Y}}_\tau$ 表达如下

$$\hat{\mathbf{Y}}_\tau = [\mathbf{C}(\mathbf{A} + \mathbf{F}\mathbf{C})^\tau (\mathbf{B} + \mathbf{F}\mathbf{D}) - \mathbf{C}(\mathbf{A} + \mathbf{F}\mathbf{C})^\tau \mathbf{F}] = [\hat{\mathbf{Y}}_\tau^{(1)} \quad \hat{\mathbf{Y}}_\tau^{(2)}] \quad (8)$$

其中, $\hat{\mathbf{Y}}_\tau^{(1)} = \mathbf{C}(\mathbf{A} + \mathbf{F}\mathbf{C})^\tau (\mathbf{B} + \mathbf{F}\mathbf{D})$, $\hat{\mathbf{Y}}_\tau^{(2)} = -\mathbf{C}(\mathbf{A} + \mathbf{F}\mathbf{C})^\tau \mathbf{F}$.

选择 $\mathbf{F}$, 将 $\mathbf{A} + \mathbf{F}\mathbf{C}$ 的极点配置在 z 平面的原点, 得到最小拍状态观测器, 即观测误差 $\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k)$ 经历最少采样周期 (拍) 后等于零的状态观测器. 此时 $\mathbf{A} + \mathbf{F}\mathbf{C}$ 的特征方程为 $\lambda^n = 0$, 根据 Hamilton-Cayley 定理则有 $(\mathbf{A} + \mathbf{F}\mathbf{C})^n = \mathbf{0}$. 方程 (4a) 与 (6a) 相减, 并代入方程 (4b), 可得状态误差方程为

$$\mathbf{x}(k+1) - \hat{\mathbf{x}}(k+1) = (\mathbf{A} + \mathbf{F}\mathbf{C})[\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k)] \quad (9)$$

对状态误差方程进行递推, 有

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) - \hat{\mathbf{x}}(k+1) &= (\mathbf{A} + \mathbf{F}\mathbf{C})[\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k)] = \\ &(\mathbf{A} + \mathbf{F}\mathbf{C})^2[\mathbf{x}(k-1) - \hat{\mathbf{x}}(k-1)] = \dots \end{aligned} \quad (10)$$

可见, 当 $k \geq n$ 时, 由于有 $(\mathbf{A} + \mathbf{F}\mathbf{C})^n = \mathbf{0}$, 观测器的状态 $\hat{\mathbf{x}}(k)$ 将收敛于真实状态 $\mathbf{x}(k)$, 则由方程 (4b) 与方程 (6b) 相减可知, 观测器的输出 $\hat{\mathbf{y}}(k)$ 收敛于真实输出 $\mathbf{y}(k)$. 另外由方程 (8) 可知, $\tau \geq n$ 时, $\hat{\mathbf{Y}}_\tau = \mathbf{0}$. 因此, 当 $k \geq n$ 时, 方程 (7) 变成如下形式

$$\mathbf{y}(k) = \sum_{\tau=0}^{n-1} \hat{\mathbf{Y}}_\tau [\mathbf{u}^\mathrm{T}(k-\tau-1) \quad \mathbf{y}^\mathrm{T}(k-\tau-1)]^\mathrm{T} + \mathbf{D}\mathbf{u}(k), \quad k \geq n \quad (11)$$

方程 (11) 严格成立, 与系统的初始条件无关, 因此在求解 Markov 参数时可以不考虑初始条件的的影响, 这一点在数据采样时很容易做到. 采用递推最小二乘法 [12] 解方程 (11), 可以得到观测器的 Markov 参数 $\hat{\mathbf{Y}}_\tau$ 和 $\mathbf{D}$. 原系统与观测器的 Markov 参数存在如下关系 [10]

$$\mathbf{Y}_\tau = \mathbf{C}\mathbf{A}^\tau \mathbf{B} = \hat{\mathbf{Y}}_\tau^{(1)} + \sum_{k=0}^{\tau-1} \hat{\mathbf{Y}}_k^{(2)} \mathbf{Y}_{\tau-k-1} + \hat{\mathbf{Y}}_\tau^{(2)} \mathbf{D} \quad (12)$$

根据原系统的输入输出数据, 首先通过解方程 (11) 得出观测器的 Markov 参数, 然后根据方程 (12) 的递推关系得到原系统的 Markov 参数, 亦即原系统的脉冲响应采样值, 最后采用第 3.2 节将要介绍的特征系统实现算法 (ERA) 可以得到系统的最小实现. 由以上过程可以看到, 在整个计算过程中, 并不需要知道 F 矩阵的具体值.

2.2 特征系统实现算法 (ERA)

特征系统实现算法^[10,13]是一种成熟的时域模态参数识别算法, 它利用系统脉冲响应数据通过 Hankel 分块矩阵的奇异值分解, 来寻找系统状态空间的最小实现 (A_r, B_r, C_r, D_r) .

构造 $(s+1) \times (f+1)$ Hankel 分块矩阵为

$$H(\tau) = \begin{bmatrix} Y_\tau & Y_{\tau+1} & \cdots & Y_{\tau+f} \\ Y_{\tau+1} & Y_{\tau+2} & \cdots & Y_{\tau+f} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{\tau+s} & Y_{\tau+s+1} & \cdots & Y_{\tau+s+f} \end{bmatrix} \quad (13)$$

将 $H(\tau)$ 写成如下形式

$$H(\tau) = \bar{V}_s A^\tau \bar{W}_f \quad (14)$$

其中, $\bar{V}_s = [C^T (CA)^T (CA^2)^T \cdots (CA^s)^T]^T$, $\bar{W}_f = [B \ AB \ A^2B \ \cdots \ A^f B]$ 分别为系统的可观和可控矩阵. 由控制理论知, 对于阶次为 n 的系统, 系统状态矩阵的最小维数为 $n \times n$. 对于 Hankel 分块矩阵 $H(\tau)$, 如果 $s+1 \geq n$, $f+1 \geq n$, 并且系统可控和可观, 则 $\bar{V}_s$ 和 $\bar{W}_f$ 的阶次都为 n , 因此有 $H(\tau)$ 的阶次为 n . 令 $\tau=0$, 对 $H(0)$ 进行奇异特征值分解, 有^[10,13]

$$H(0) = U N V^T \quad (15)$$

其中, U 和 V 为酉阵, N 为奇异值对角阵, 形式为

$$\left. \begin{aligned} N &= \text{diag}(d_1, d_2, \cdots, d_r, d_{r+1}, \cdots) \\ d_1 &\geq d_2 \geq \cdots \geq d_r \geq d_{r+1} \geq \cdots \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

假定所要建立的低阶模型的阶数为 r , r 可以由奇异值截断阈值 ε 确定

$$\frac{d_r}{d_1} \geq \varepsilon, \quad \frac{d_{r+1}}{d_1} \leq \varepsilon \quad (17)$$

取 U_r 和 V_r 分别为 U 和 V 的前 r 列, $N_r = \text{diag}(d_1, d_2, \cdots, d_r)$, 并且定义如下矩阵

$$\left. \begin{aligned} E_q^T &= [I_q \ 0_{q \times sq}] \\ E_m^T &= [I_m \ 0_{m \times fm}] \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

其中, I_q 和 I_m 分别为 q 阶和 m 阶单位阵, $0_{q \times sq}$ 和 $0_{m \times fm}$ 为相应维数的零阵. 则系统的最小实现 (A_r, B_r, C_r, D_r) 可以确定如下^[8-9,11]

$$\left. \begin{aligned} A_r &= N_r^{-1/2} U_r^T H(1) V_r N_r^{-1/2} \\ B_r &= N_r^{1/2} V_r^T E_m \\ C_r &= E_q^T U_r N_r^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

因此, 系统的低阶模型可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}(k+1) &= A_r \bar{x}(k) + B_r u(k) \\ y(k) &= C_r \bar{x}(k) + D_r u(k) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

其中, $\bar{x}(k)$ 为低阶模型状态列阵, $D_r = D$, D 已经在解方程 (11) 时得出.

2.3 LQG 最优控制器设计^[14]

LQG 是一种线性二次型最优控制, 它是根据系统的输出数据和采用 Kalman 滤波器, 来估计出系统的状态值, 以用于控制反馈.

考虑到系统的测量噪声和动态噪声随机干扰, 低阶模型方程 (20) 可写为

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}(k+1) &= A_r \bar{x}(k) + B_r u(k) + G w(k) \\ y(k) &= C_r \bar{x}(k) + D_r u(k) + v(k) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

其中, $w(k)$ 为动态噪声, $v(k)$ 为随机量测噪声, 假定两者都是零均值的白噪声, 满足

$$\left. \begin{aligned} \text{Cov}[w(i), w(j)] &= Q_0 \delta_{ij} \\ \text{Cov}[v(i), v(j)] &= R_0 \delta_{ij} \\ \text{Cov}[w(i), v(j)] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

其中, δ_{ij} 为克罗内克符号, Q_0 和 R_0 为对角阵.

根据分离定理, 控制器的设计可以分为独立的两部分: Kalman 最优状态估计 $\hat{x}(k)$ 的设计和反馈增益矩阵 K_1 的设计. 首先采用线性二次型最优控制 (LQR) 设计 K_1 . 忽略方程 (21) 中的噪声项, 并定义如下随机系统的加权二次型性能指标

$$J = \frac{1}{2} E \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} [\bar{x}^T(k) Q \bar{x}(k) + u^T(k) R u(k)] \right\} \quad (23)$$

其中, Q 为 $r \times r$ 维正定或半正定对称矩阵, R 为 $m \times m$ 维正定对称矩阵, $E[\cdot]$ 为期望值, 最优控制律为

$$u(k) = -K_1 \bar{x}(k) \quad (24)$$

反馈增益 K_1 的形式为

$$K_1 = (R + B_r^T P_1 B_r)^{-1} B_r^T P_1 A_r \quad (25)$$

其中, P_1 为如下 Riccati 方程的解

$$\begin{aligned} A_r^T P_1 A_r - A_r^T P_1 B_r (R + B_r^T P_1 B_r)^{-1} \cdot \\ B_r^T P_1 A_r + Q - P_1 = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

然后考虑最优状态估计 $\hat{x}(k)$. Kalman 滤波器形式为

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) = A_r \hat{x}(k) + B_r u(k) + \\ L[y(k) - C_r \hat{x}(k) - D_r u(k)] \end{aligned} \quad (27)$$

其中, $\hat{x}(k)$ 是最优状态估计, $\hat{x}(0) = E[\bar{x}(0)]$, L 是 Kalman 滤波器的增益矩阵

$$L = A_r P_2 C_r^T (C_r P_2 C_r^T + R_0)^{-1} \quad (28)$$

其中, P_2 为如下 Riccati 方程的解

$$\begin{aligned} A_r^T P_2 A_r - A_r^T P_2 C_r^T (C_r P_2 C_r^T + R_0)^{-1} \cdot \\ C_r P_2 A_r + G Q_0 G^T - P_2 = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

选择 Q 和 R 值, 计算反馈增益矩阵 K_1 和最优状态估计 $\hat{x}(k)$, 用 $\hat{x}(k)$ 代替 $\bar{x}(k)$, 根据方程 (24) 计算出反馈控制力, 然后将反馈控制力加入到有限元模型中进行控制反馈.

3 仿真计算

本节进行数值仿真, 验证本文所给方法的有效性. 海洋平台为胜利油田埕岛中心二号平台中的生活平台^[15], 为导管架式桩腿结构, 由导管架、桩腿和甲板结构组成, 桩腿插入海底部分超过 60 m, 结构模型及节点编号如图 1 所示. 为简化计算, 桩腿按海底泥线下 6 倍桩径处固结, 另外将平台 15.5 m 以上的甲板及设备层和生活层简化为 15.5 m 处 4 个角点上的集中质量块. 首先采用有限元软件 ANSYS10.0 建立起平台的有限元模型, 所用单元及单元参数如表 1 所示. 平台由 4 个导管组成的水平面、梯形分布的 4 个桩腿以及其他支持导管构成, 桩腿长 15.5 m, 采用表 1 中单元 5. 下面 3 个导管架平面中连接各边

中点的导管 (Y 方向的导管除外) 为单元 3, Z 方向的导管为单元 1. 构成顶层平面的以及支撑顶层平面各边中点的斜导管采用单元 4, 余下的导管都采用单元 2, 4 个集中质量采用单元 6. 结构共 54 个节点, 126 个管单元, 4 个质量块单元, 自由度为 300, 顶端 46, 47, 51 和 50 节点上有集中质量.

结构材料为钢材料, 杨氏模量为 206 GPa, 泊松比为 0.3, 材料密度为 7800 kg/m³. 利用第 1 节的有限元方法可以给出平台的输入输出时间历程, 以此来模拟实验的输入输出数据, 进而通过 OKID 辨识和 ERA 方法建立起系统的低阶状态空间模型, 然后基于此模型设计控制律, 将控制律加入到第 1 节的有限元模型进行控制反馈, 验证控制设计的有效性. 参考文献 [16], 白噪声激励力和主动控制力加在 47 节点上, 方向由 47 节点指向 33 节点.

表 1 模型单元及其参数

Table 1 Elements and parameters of the model

No.	Type	Outside diameter/mm	Wall thickness/ mm	Mass/ t
1	PIPE16	1 716	20	
2	PIPE16	609	12	
3	PIPE16	457	9	
4	PIPE16	800	22	—
5	PIPE16	1 400	34	—
6	MASS21	—	—	500

白噪声激励力和主动控制力的位置和方向保持一致. 以下数值仿真中, 数据采样周期取值为 0.1 s. 对 47 节点施加白噪声激励力, 计算 46 节点 X 方向的位移响应. 激励力为系统输入, 位移响应为系统输出, 然后使用 OKID 方法进行辨识, 得到系统的 Markov 参数, 亦即脉冲响应采样值, 据此可以得出海洋平台系统的单位脉冲响应曲线, 如图 2 中虚线所示. 采用第 1 节的有限元方法 (FEA) 计算相应位置的单位脉冲响应, 如图中实线所示. 可看出, OKID 方法结果与原有限元方法所得结果吻合很好. 在 OKID 分析过程中, 同时可以得到直接影响矩阵 D_r .

然后根据 OKID 方法计算出的 Markov 参数, 采用 ERA 方法构造 Hankel 分块矩阵来得到海洋平台的最小实现 (A_r, B_r, C_r, D_r) , 即系统的低阶模型.

对 Hankel 分块矩阵 $H(0)$ 进行奇异值分解, 奇异值分布如图 3 所示.

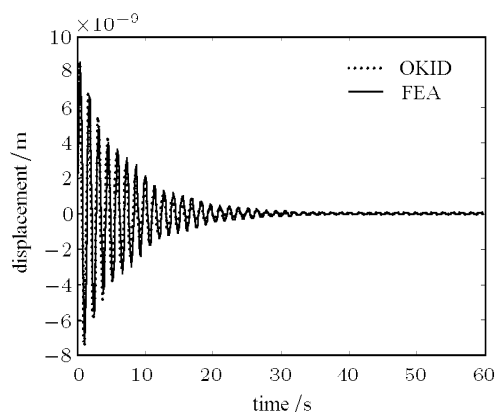
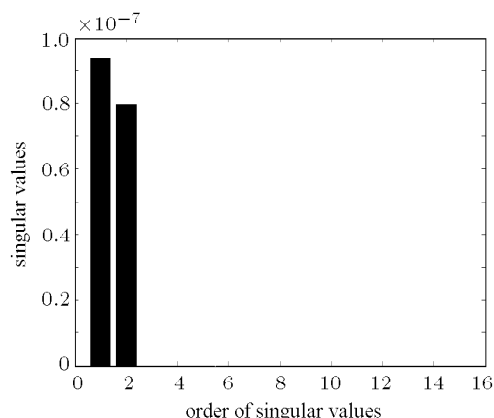


图 2 OKID 方法和有限元方法计算出的系统的单位脉冲响应

Fig.2 Impulse response of system by OKID and FEA

图 3 $H(0)$ 的奇异值分布Fig.3 Singular values of $H(0)$

横轴代表奇异值阶数, 纵轴为各阶奇异值的数值, 前 2 阶奇异值之和占总奇异值的 99.26%, 所以将系统的阶次定为二阶, 所得系统最小实现为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_r &= \begin{bmatrix} 0.87787 & 0.45401 \\ -0.41640 & 0.88171 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_r &= \begin{bmatrix} -6.9717 \times 10^{-5} \\ -3.5275 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_r &= [-1.0584 \times 10^{-4} \quad 3.9999 \times 10^{-4}] \\ D_r &= 3.3681 \times 10^{-9} \end{aligned}$$

在此对所得到的系统最小实现模型进行验证.

对最小实现模型施加幅值为 10 kN, 频率为 0.5 Hz 的外部正弦激励力的输入, 计算模型的输出, 结果如图 4 中虚线所示. 采用第 2 节的有限元方法计算在 47 节点施加同样的激励力后, 46 节点 X 方向的位移响应, 结果如图 4 中实线所示, 可以看出, 两者

吻合很好, 表明辨识所得低阶模型可以表征原有限元模型.

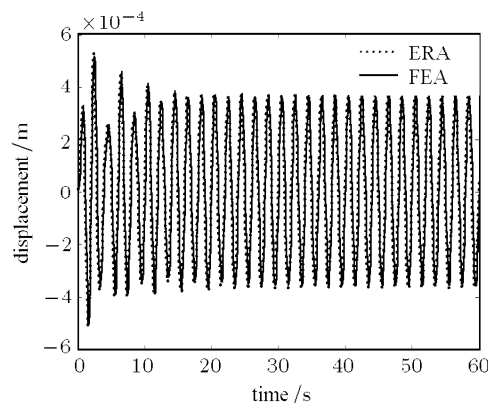
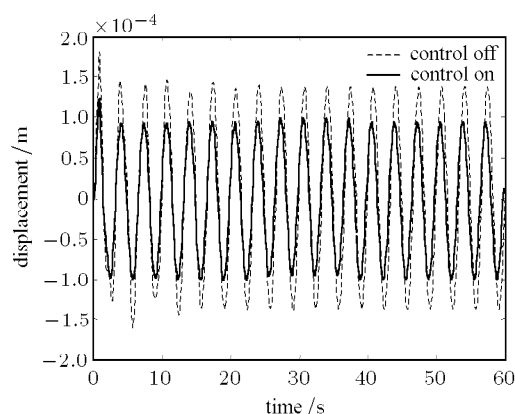


图 4 辨识系统与原系统响应的比较

Fig.4 Displacement response to sine excitation

基于 ERA 方法所得到的低阶模型, 设计 LQG 控制律, 参数选取如下 $R = 10^{-7}$, $Q = \bar{H}\bar{H}^T$, 其中 $\bar{H} = [1 \ 0]^T$, $Q_0 = 10^{-3}$, $R_0 = 10^{-10}$. 假定在 19 节点 X 方向施加幅值为 10 kN, 频率为 0.3 Hz 的正弦外部激励力, 主动控制力仍作用在 47 节点 (方向指向 33 节点), 此时顶端 46 节点 X 方向的位移响应应如图 5(a) 所示, 控制力时程如图 5(b) 所示, 可看出控制效果良好.

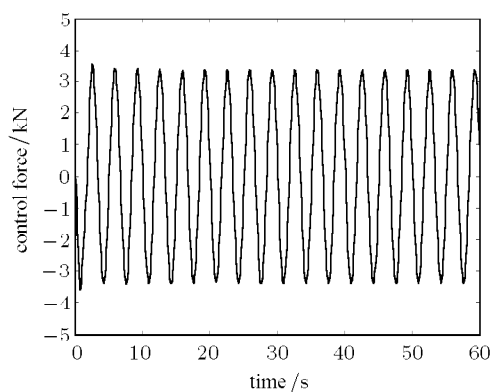
在 19 节点 X 方向分别施加幅值为 10 kN 的脉冲激励力和幅值为 10 kN, 0.01 dB 的白噪声激励力, 顶端 46 节点 X 方向的位移响应和控制力时间历程如图 6 和图 7 所示. 由以上结果可看出, 在 3 种不



(a)

图 5 正弦力作用下的控制效果和控制力时程

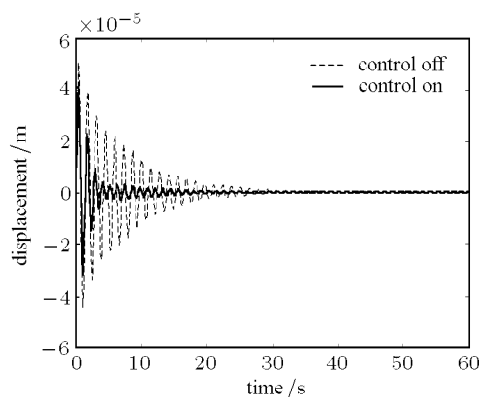
Fig.5 Displacement response to sine excitation and time histories of control force



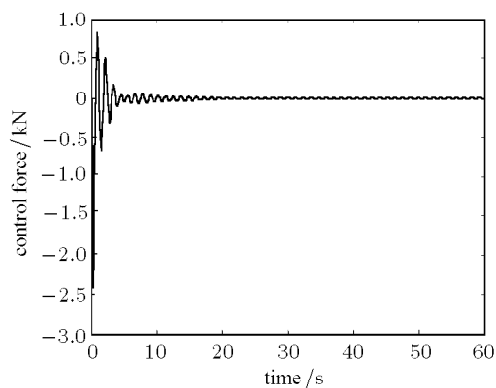
(b)

图 5 正弦力作用下的控制效果和控制力时程 (续)

Fig.5 Displacement response to sine excitation and time histories of control force (continued)



(a)

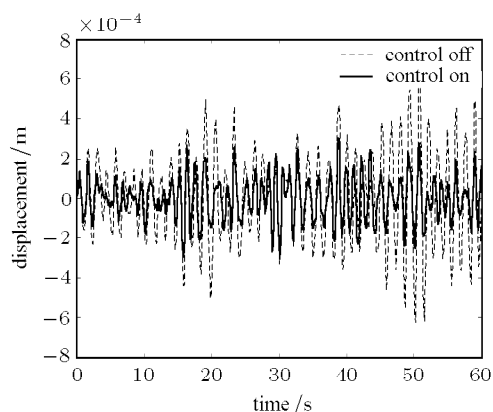


(b)

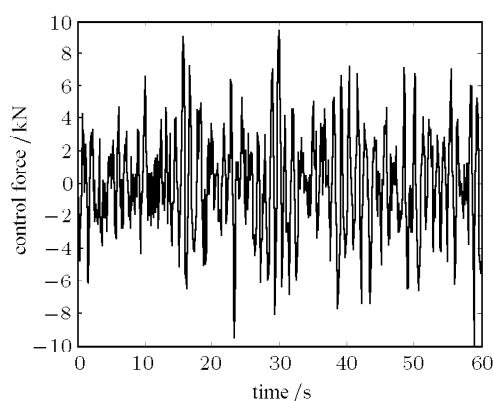
图 6 脉冲激励力作用下的控制效果和控制力时程

Fig.6 Displacement response to sine excitation and time histories of control force

同形式激励力的作用下, 基于辨识所得的低阶模型的控制设计都可取得良好的效果, 表明本文所给方法是可行和有效的。



(a)



(b)

图 7 白噪声激励作用下的控制效果和控制力时程

Fig.7 Displacement response to random excitation and time histories of control force

4 结论与讨论

本文以渤海胜利油田海洋平台为对象, 研究了基于输入和输出的系统时域低阶建模与主动控制问题, 低阶建模采用 OKID 技术和 ERA 方法, 控制设计采用 LQG 方法. 研究结果显示, OKID 方法能够有效地辨识出系统的 Markov 参数, ERA 方法能够得到系统的最小实现 (即低阶模型), 基于低阶模型的 LQG 控制设计能够有效地抑制海洋平台的振动. 本文方法也同样适用于其他线性结构的动力学建模与主动控制的研究.

有几点问题值得讨论与说明: (1) 本文所给方法是根据系统的输入输出数据进行时域低阶建模, 因此所建模型与作动器和传感器的位置有关, 不同的作动器和传感器位置会导致所建模型不同, 模型阶数也有可能不同; (2) 在采用所建低阶模型对系统进行主动控制设计与实现时, 传感器和作动器的

位置与数量应与辨识建模时所采用的保持一致; (3) 采用不同的传感器和作动器位置和数量, 会导致 B_r , C_r 和 D_r 形式的不同, 但是 A_r 的特性几乎不变或变化很小. 辨识得到 A_r 后, 可以对 A_r 进行分析得出结构的固有频率, 不同传感器和作动器位置和数量所建的模型不会改变系统的固有频率; (4) 在采用本文所给方法对某一结构进行辨识建模时, 虽然不需预先知道结构的物理参数和结构形式, 但需合理估计传感器和作动器的位置与数量, 这将能保证辨识建模的精确性和控制的有效性.

参 考 文 献

- 1 Lee HH. Stochastic analysis for offshore platform with added mechanical dampers. *Ocean Engineering*, 1997, 24(9): 817-834
- 2 Vandiver JK, Shuhei M. Effect of liquid storage tanks on the dynamic response of offshore platform. *Applied Ocean Research*, 1979, 1(2): 67-74
- 3 Terro MJ, Matmoud MS, Abdel-Rohman M. Multi-loop feedback control of offshore steel jacket platforms. *Computers and Structures*, 1999, 70(2): 185-202
- 4 欧进萍, 龙旭, 肖仪清等. 导管架式海洋平台结构阻尼隔振体系及减震效果分析. *地震工程与工程振动*, 2002, 22(3): 115-122 (Ou Jinping, Long Xu, Xiao Yiqing, et al. Damping isolation system and its vibration-suppressed effectiveness analysis for offshore platform jacket structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, 22(3): 115-122(in Chinese))
- 5 欧进萍, 王刚, 田石柱. 海洋平台结构振动的 AMD 主动控制试验研究. *高技术通讯*, 2002, 12(10): 85-90 (Ou Jinping, Wang Gang, Tian Shizhu. Experimental research on AMD control of structural vibration of offshore platform. *High Technology Letters*, 2002, 12(10): 85-90(in Chinese))
- 6 陆建辉, 彭林慧, 李华军. 海洋石油平台 TMD 振动控制及参数优化. *青岛海洋大学学报*, 1999, 20(4): 733-738 (Lu Jianhui, Peng Linhui, Li Huajun. Parametric study and optimized design of a passive tuned mass damper for an offshore oil platform. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1999, 20(4): 733-738(in Chinese))
- 7 稽春艳, 李华军. 随机波浪作用下海洋平台主动控制的时滞补偿研究. *海洋工程*, 2004, 22(4): 95-101 (Ji Chunyan, Li Huajun. Studies on time delay compensation for active control of offshore platforms under stochastic wave loading. *The Ocean Engineering*, 2004, 22(4): 95-101 (in Chinese))
- 8 Juang JN, Phan M, Horta LG, et al. Identification of observer/Kalman filter Markov parameters: theory and experiments. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1993, 16(2): 320-329
- 9 Phan M, Horta LG, Juang JN, et al. Improvement of observer/Kalman filter identification (OKID) by residual whitening. *Journal of Vibration and Acoustics, ASME*, 1995, 117(2): 232-239
- 10 Juang JN, Phan M. Identification and Control of Mechanical Systems. New York: Cambridge University Press, 2001
- 11 董兴建. 高速旋转压电柔性梁的动力学分析与控制. [博士论文]. 上海: 上海交通大学, 2005(Dong Xingjian. Dynamic analysis and control of a piezoelectric flexible beam rotating at high speed. [PhD Thesis]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2005 (in Chinese))
- 12 傅志方. 振动模态分析与参数辨识. 北京: 机械工业出版社, 1990(Fu Zhifang. Vibration Modal Analysis and Parameter Identification. Beijing: China Machine Press, 1990 (in Chinese))
- 13 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用. 北京: 科学出版社, 2001(Li Debao, Lu Qiuhai. Experimental Modal Analysis and Its Application. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese))
- 14 Dong XJ, Meng G, Peng JC. Vibration control of piezoelectric smart structures based on system identification technique: numerical simulation and experimental study. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 297(3-5): 680-693
- 15 蒋济同. 海洋平台的模态参数识别与损伤诊断研究 [博士论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2003(Jiang Jitong. Study on mode parameter identification and damage detection for offshore platforms. [PhD Thesis]. Qingdao: Ocean University of China, 2003 (in Chinese))
- 16 管有海. 海洋平台磁流变阻尼器半主动控制技术研究 [硕士论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2002(Guan Youhai. Studies on semi-active vibration control of offshore platforms by MR damper. [Master Thesis]. Qingdao: Ocean University of China, 2002 (in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)

TIME-DOMAIN DYNAMIC MODELING AND ACTIVE CONTROL OF OFFSHORE PLATFORM¹⁾

Liu Song* Cai Guoping*,²⁾ Dong Xingjian[†]

**(Department of Engineering Mechanics, State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)*

†(Institute of Vibration Shock & Noise, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract This paper presents the studies on low-order time-domain dynamic modeling and active control of an offshore platform. Firstly, based on the input-output data of the system, the method of observer/kalman filter identification (OKID) is used to identify the Markov parameters of the system. Then a low-dimensional state-space model of the system is established by using the eigensystem realization algorithm (ERA). The linear quadratic Gaussian (LQG) controller is designed based on the low-dimensional state-space model. Finally, the controller designed is introduced into the finite element model of the system to verify the effectiveness of the controller. Numerical results indicate the effectiveness and feasibility of the studies in this paper.

Key words offshore platform, OKID, ERA, active control

Received 1 June 2010, revised 21 January 2011.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11072146, 11002087), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20070248032), the Key Scientific Project of Shanghai Municipal Education Commission (09ZZ17) and the Research Project of State Key Laboratory of Ocean Engineering of China (GKZD010807).

2) E-mail: caigp@sjtu.edu.cn