

多模块浮动机场的纵荡饱和控制*

夏淑炎 徐道临[†] 张海成

(湖南大学 机械与运载工程学院, 长沙 410082)

摘要 浮动机场是由多个浮体模块通过柔性连接器串联的超大型海洋平台. 本文研究近岛礁部署的浮动机场纵荡响应控制技术, 改善平台的稳定性和操作性. 为此提出一种基于模型的非线性 MIMO 控制方法, 抑制多模块浮体之间的纵荡响应. 首先, 采用网络动力学的方法建立浮动机场的动力学控制模型; 然后, 考虑作动器出力饱和约束条件下, 结合反步法和饱和辅助系统推导出作动器控制律. 数值仿真以五模块浮动机场为算例, 验证控制方法的可行性和有效性, 并与 PID 算法进行了比较.

关键词 多模块浮动机场, 非线性控制, 网络动力学, 反步法, 输出饱和

DOI: 10.6052/1672-6553-2018-049

引言

随着陆地资源的短缺, 各国开始把经济发展的目光投向海洋. 相比人工造岛, 超大型浮式结构物耗更小, 易于拆装和灵活部署, 环境友好. 超大型浮式结构物体量巨大, 尺度横跨数千米, 可作为深海资源开发平台、物资储运中继站、远海旅游休闲基地等的重大高端装备^[1]. 超大型海上浮动机场是其中重要应用场景之一, 引起了世界各国专家学者的高度关注. 九十年代, 美国海军推出的 Mobile Offshore Base (MOB) 工程^[2], 以及日本政府推出的 Megafloat 工程^[3], 极大地促进了超大型浮动机场的研究进程. 通常浮动机场结构可分为模块化和箱式一体化两种结构^[4]. 模块化浮动机场相比于箱式一体化结构, 更便于制造和安装, 可避免浮动结构体承受巨大的弯曲应力而被广为接受. 浮体模块又大致分为浮筒式和半潜式两种, 其中浮筒式模块适合于风浪不大的近海区域, 而半潜式模块则适用于有较大风浪的远海环境^[5].

为了避免台风或恶劣海况的影响, 通常考虑将模块化浮动机场停泊在远海岛礁泻湖中并沿主波浪方向部署. 因此, 浮体主要承受顶浪作用, 模块纵荡运动是其主要响应形式. 本文研究浮动机场纵荡响应控制技术, 抑制浮动机场的纵荡响应, 改善平

台的稳定性和操作性. 针对这类多模块浮动机场的稳定性控制研究仍处于空白状态, 相关研究很少. 在 Megafloat 工程中, 日本学者曾采用空气弹簧和 PID 控制技术来抑制多模块浮动机场响应, 试图抑制甲板的垂荡运动和减小结构应力水平^[6]. 另外一个间接相关技术是 Dynamic Positioning (DP)^[7], 通过一组推进器控制各浮体模块方位, 改善平台的拼装条件和远海定位等, 但不涉及平台振动控制. 近几年, 我们在浮动机场振动控制领域做了些初步尝试性工作. 多模块浮动机场是一个典型的非线性网络结构系统^[8], 该系统具有一个特殊的振幅死亡现象^[9], 即系统模块之间会相互约束导致微振幅状态. 基于振幅死亡机理, 采用半主动的控制方法^[10]可以在大部分海况下抑制多模块浮动机场的振动. 最优控制算法也可以抑制多模块浮动机场的振动^[11], 随着系统自由度的增加, 最优控制算法的优化速度会快速下降, 不能快速响应波浪激励.

本文针对浮动机场部署在泻湖里的特殊应用场景, 提出一种基于模型的非线性 MIMO 控制方法, 抑制多模块浮动机场的纵荡响应. 首先, 阐述作动器安装位置和布局, 然后, 运用网络动力学建模方法建立含有多作动器的浮动机场的动力学模型, 动力学方程具有高维度非线性特征; 考虑控制器输出饱和限制条件下, 结合饱和辅助系统和反步法推

2018-04-04 收到第 1 稿, 2018-05-15 收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目 (11472100, 11702088)

[†] 通讯作者 E-mail: dlxu@hnu.edu.cn

导出作动器解析控制律,在此需要处理饱和输出约束引起的非光滑函数控制技术难题;以5模块浮动机场为数值算例,验证方法在各种情况下的可行性和有效性,对比工程中普遍采用的PID方法,讨论了新方法的特点。

1 建立多模块浮动机场动力学模型

远海环岛礁的泻湖具有遮蔽风浪的作用,是部署浮动机场的理想之地。通常将浮动机场布放在主迎浪方向,可减少波浪力,且有利于平台的稳定性。顶浪环境中的浮动机场可简化为一个二维力学模型,如图1所示。浮动机场的模块通过柔性连接器连接,首尾两端的模块各有一个锚泊系统可阻止机场系统漂移。在第*i*个模块的质心,建立一个局部坐标系 (x_i, z_i, α_i) 。其 x_i 轴与静水平面重合, z_i 轴垂直向上, α_i 为横摇。顶浪向角与 x 轴方向一致。

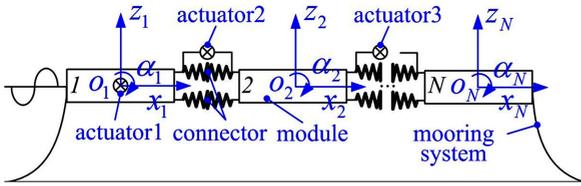


图1 多模块浮动机场示意图

Fig.1 A sketch of a multi-modular floating airport

本文采用网络建模方法^[10],建立浮动机场的动力学模型,其系统运动微分方程由各个模块的动力学方程组成:

$$(\mathbf{M}_i + \mathbf{\Omega}_i) \ddot{\mathbf{x}}_i + \mathbf{\Lambda}_i \dot{\mathbf{x}}_i + (\mathbf{S}_i + \mathbf{K}_i) \mathbf{x}_i = \mathbf{f}_{i,w} + \mathbf{f}_{i,c} + \mathbf{f}_{i,u} \quad (1)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, N$

其中, $\mathbf{x}_i = [x_i, z_i, \alpha_i]^T$ 代表第*i*个模块的纵荡、垂荡和横摇三个自由度的振动位移。符号 $\mathbf{M}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 、 $\mathbf{\Omega}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 、 $\mathbf{\Lambda}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 、 $\mathbf{S}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 和 $\mathbf{K}_i \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 分别代表第*i*个模块的质量矩阵、附加质量矩阵、附加阻尼矩阵、静水恢复力矩阵和锚泊系统刚度矩阵。符号 $\mathbf{f}_{i,w} = \bar{\mathbf{f}}_i \exp(-\sqrt{-1}(\omega t + \theta_i))$ 代表波浪力矢量。公式中 $\bar{\mathbf{f}}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 为波浪力幅值,符号 ω 和 θ_i 分别代表波浪圆频率和相位角。符号 $\mathbf{f}_{i,c} = \sum_{j=1}^N (\varepsilon \Phi_{ij} \mathbf{G}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j))$ 代表柔性连接器的作用力矢量,其中, ε 为连接器刚度, Φ 为网络系统的拓扑矩阵, $\mathbf{G}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 为耦合函数,代表连接器在三个自由度上的变形分量。符号 $\mathbf{f}_{i,u} = \sum_{k=1}^N u_k(v_k) \Gamma_{ik} \Psi(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_k)$ 表示作动器作用在第

*i*个模块上的控制力矢量,其中, u_k 为作动器实际控制力输出, v_k 为作动器理论控制力输出, Γ 为模块和作动器之间的拓扑矩阵,代表模块和作动器之间的位置关系,函数 $\Psi(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_k)$ 表示单位控制力在三个自由度上的分量。为了节省篇幅,除了最后一项 $\mathbf{f}_{i,u}$ 控制力,公式(1)中的矩阵、函数的表达式的具体推导过程省略,有兴趣的读者可以参考文献[10]。

控制所有模块纵荡响应,首先,需要设置一个作动器将某个浮体的纵荡响应稳定在静止状态;我们将在第一个模块上安装一个推进器,抑制第一模块的纵向运动。然后,每两个相邻模块之间(上连接器处)安装一个沿 x 方向的作动器,来稳定模块之间的相对纵向运动。 N 个浮体模块组成的浮动机场需要 N 个控制器,如图(1)所示。考虑到实际工程应用中,作动器输出控制力不可能无限大。所以,当作动器理论控制力 v_k 超过作动器控制力的极限阈值, u_{kM} ,实际控制力输出为 u_{kM} ,有如下关系:

$$u_k(v_k) = \begin{cases} \text{sign}(v_k) u_{kM}, & |v_k| \geq u_{kM} \\ v_k, & |v_k| < u_{kM} \end{cases} \quad (2)$$

其中, u_{kM} 为作动器可输出的最大控制力,理论控制力 v_k 由控制律决定。

安装第一个浮体上的作动器编号为1,提供 x 方向的控制力;第*i*个浮体和第*i*+1个浮体之间的作动器编号为*i*+1。作动器和模块之间的拓扑矩阵是描述第*k*个连接器是否对第*i*个模块存在作用关系,依据模块串联和连接器的配置,拓扑矩阵可以被定义为

$$\Gamma_{ik} = \begin{cases} 1, & k=i \text{ or } k=i+1 \leq N \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

函数 $\Psi(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_k)$ 代表作动器输出的单位控制力在三个自由度上的投影。由于第一个作动器和其他作动器安装位置不同,所以,函数 $\Psi(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_k)$ 可以表示为

$$\Psi(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_k) = \begin{cases} [1, 0, 0]^T, & k=i=1 \\ \mathbf{H}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_k), & k=i+1 \\ \mathbf{H}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{k-1}), & k=i \neq 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中,函数 $\mathbf{H}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{k-1})$ 表示除第一个作动器外,其它作动器输出单位控制力在三个方向上的投影,其表达式为

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \begin{bmatrix} \Delta x_1 / l_1 \\ \Delta z_1 / l_1 \\ \Delta x_1 / l_1 \times \Delta \alpha_{x_1} - \Delta z_1 / l_1 \times \Delta \alpha_{z_1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

上式中,符号 l_1 、 Δx_1 、 Δz_1 、 $\Delta \alpha_{x_1}$ 和 $\Delta \alpha_{z_1}$ 分别代表浮体 i 和浮体 j 运动后作动器两个安装点之间的距离、安装点之间的水平距离、安装点之间的垂直距离、作动器在浮体 i 上安装点相对浮体 i 质心的垂直距离和作动器在浮体 i 上安装点相对浮体 i 质心的水平距离。上述变量可由模块质心位移 $\mathbf{x}_i = [x_i, z_i, \alpha_i]$ 和 $\mathbf{x}_j = [x_j, z_j, \alpha_j]$ 表示为:

$$l_1 = \sqrt{\left[S_i \times \delta_1 + \delta_2 \times (\alpha_j - \alpha_i) + (x_j - x_i) \right]^2 + \left[S_i \times \frac{L}{2} \times (\alpha_j + \alpha_i) + (z_j - z_i) \right]^2}$$

$$\Delta x_1 = S_i \times \delta_1 + \delta_2 \times (\alpha_j - \alpha_i) + (x_j - x_i)$$

$$\Delta z_1 = S_i \times \frac{L}{2} \times (\alpha_j + \alpha_i) + (z_j - z_i)$$

$$\Delta \alpha_{x_1} = \frac{\delta_2}{2} - S_i \times L \times \frac{\alpha_i}{2}$$

$$\Delta \alpha_{z_1} = S_i \times \frac{L}{2} + \delta_2 \times \frac{\alpha_i}{2} \quad (6)$$

其中, $S_i = \text{sign}(j-i)$, 表示符号函数; 符号 δ_1 表示当浮动机场处于静止状态时, 作动器两个安装点之间的初始水平距离; 符号 δ_2 表示作动器安装点与浮体质心的初始垂直距离; 符号 L 代表浮动机场单个模块的长度。函数 $\mathbf{H}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{k-1})$ 是一个非线性几何函数。

由于浮动机场模块尺寸和连接器尺寸相差巨大, 所以, 模块微小的运动将引起连接器的大幅变形, 使得系统存在强几何非线性。浮动机场由 N 个模块组成, 每个模块有三个自由度, 整体系统共有 $3N$ 个自由度。因此, 总体来讲, 浮动机场系统是一个高维度非线性网络系统。此浮动机场具有非线性网络的典型特征^[8], 其中, 振幅死亡现象^[9]和突跳现象^[12]对动力学稳定性影响最为关键。振幅死亡现象是指系统在特定参数下, 振动会被抑制; 而突跳现象则是指系统在振幅死亡状态和大振幅振动状态的转换之间没有过渡期, 响应突变迅速。所以, 需要用主动控制的方法把系统的振动响应始终都控制在非常小的范围内。

2 作动器控制律

鉴于浮动机场运动方程的非线性特性, 本文采

用反步法^[13,14]求解作动器输出力的控制律。反步法是一种基于李雅普诺夫稳定性定理的算法, 适用于强非线性控制问题。通过构建李雅普诺夫函数, 采用迭代方法, 逐步消除系统状态与目标状态之间误差为目标, 从中求得系统所需要的控制力输出。考虑作动器的输出有限, 其实际控制输出力可能满足不了理论要求的控制力, 所以, 在使用反步法的同时, 需要引入饱和辅助系统, 当作动器输出控制力无法满足要求时, 来保证整个控制系统的稳定性。

本文的控制目标是抑制纵荡运动, 所以, 设定目标状态为静止, 则浮体模块的受控运动误差系统为

$$\begin{aligned} e_{1i} &= x_i \\ e_{2i} &= \dot{x}_i - \kappa_{1i} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, e_{1i} 为第 i 个模块纵荡运动和目標状态之间的误差。根据反步法, 通过控制 \dot{x}_i , 若使 e_{1i} 渐进稳定趋零, 此时需要 $\dot{x}_i = \kappa_{1i}$, 为一个虚拟控制中间量。 \dot{x}_i 是系统纵荡运动的速度, 是由系统运动所决定的, 所以定义第二个误差函数 $e_{2i} = \dot{x}_i - \kappa_{1i}$ 。通过确定合适的作动器控制力输出, 而使得 e_{2i} 渐进稳定趋零。根据反步法, 设立第一个李雅普诺夫函数

$$V_{1i} = \frac{1}{2} e_{1i}^2 \quad (8)$$

对其时间求导, 得到

$$\dot{V}_{1i} = e_{1i} \dot{e}_{1i} = e_{1i} (e_{2i} + \kappa_{1i}) \quad (9)$$

设定虚拟控制中间量为 $\kappa_{1i} = -k_{1i} e_{1i}$, k_{1i} 为待定参数, 代入公式(9), 有

$$\dot{V}_{1i} = -k_{1i} e_{1i}^2 + e_{1i} e_{2i} \quad (10)$$

公式(10)中右边第一项为负定, 但无法判断第二项的正负, 为此需要引入第二个李雅普诺夫函数。但在此之前, 需要先引入一个饱和辅助系统来解决作动器的饱和输出限制(非光滑函数)所带来的失稳问题。公式(7)中第二个式子对时间求导, 得到

$$e_{2i} = \ddot{x}_i - \kappa_{1i} \quad (11)$$

式中, $\kappa_{1i} = -k_{1i} \dot{e}_{1i} = -k_{1i} \dot{x}_i$, 纵荡加速度 \ddot{x}_i 为矢量 $\ddot{\mathbf{x}}_i$ 的第一个元素, 根据公式(1)可知

$$\ddot{\mathbf{x}}_i = \frac{[-\Lambda_i \ddot{\mathbf{x}}_i - (\mathbf{S}_i + \mathbf{K}_i) \dot{\mathbf{x}}_i + \mathbf{f}_{i,w} + \mathbf{f}_{i,c} + \mathbf{f}_{i,u}]}{\mathbf{M}_i + \mathbf{\Omega}_i} \quad (12)$$

为了方便后面的推导, 令

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_i &= (\mathbf{M}_i + \mathbf{\Omega}_i)^{-1} \cdot \\ &(-\Lambda_i \ddot{\mathbf{x}}_i - (\mathbf{S}_i + \mathbf{K}_i) \dot{\mathbf{x}}_i + \mathbf{f}_{i,w} + \mathbf{f}_{i,c}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_i &= (\mathbf{M}_i + \mathbf{\Omega}_i)^{-1} \mathbf{f}_{i,u} \\ &= (\mathbf{M}_i + \mathbf{\Omega}_i)^{-1} \sum_{k=1}^N u_k(v_k) \Gamma_{ik} \mathbf{\Psi}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_k) \end{aligned} \quad (13)$$

则公式(12)可以表示为 $\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{a}_i + \mathbf{b}_i$, 令 \mathbf{a}_i^1 代表矢量 \mathbf{a}_i 的第一个元素, 令 \mathbf{b}_i^1 代表矢量 \mathbf{b}_i 的第一个元素, 则公式(11)可以表示为

$$\dot{e}_{2i} = \mathbf{a}_i^1 + \mathbf{b}_i^1 - \kappa_{1i} \quad (14)$$

由于存在作动器饱和约束, 为了保证非线性控制系统的稳定性, 引入饱和辅助系统^[15]

$$\begin{aligned} \dot{\chi}_i &= -c_i \chi_i - \\ &\frac{(|e_{2i} \mathbf{v}_i^1| + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M ((u_k(v_k) - v_k)^2 \Gamma_{ik}))}{\chi_i} + \\ &\sum_{k=1}^M ((u_k(v_k) - v_k) \Gamma_{ik}) \end{aligned} \quad (15)$$

其中, c_i 为待定参数. 符号 \mathbf{v}_i^1 为矢量 \mathbf{v}_i 的第一个元素, 矢量 \mathbf{v}_i 的表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_i &= (\mathbf{M}_i + \mathbf{\Omega}_i)^{-1} \cdot \\ &\left(\sum_{k=1}^M (u_k(v_k) - v_k) \Gamma_{ik} \mathbf{\Psi}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_k) \right) \end{aligned} \quad (16)$$

饱和辅助系统是一个嵌套在反步法中的虚拟系统, 类似于反步法中不确定干扰的观测器, 当控制输出无法满足理论输出要求时, 可消除非光滑控制输出对控制系统稳定性的影响.

接下来可根据反步法的常规步骤, 引入第二个李雅普诺夫函数

$$V_{2i} = \frac{1}{2} (e_{1i}^2 + e_{2i}^2 + \chi_i^2) \quad (17)$$

对其求导, 得到

$$\dot{V}_{2i} = -k_{1i} e_{1i}^2 + e_{1i} e_{2i} + e_{2i} \dot{e}_{2i} + \chi_i \dot{\chi}_i$$

把公式(14)和公式(15)代入到公式(18)中, 得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2i} &= -k_{1i} e_{1i}^2 + e_{1i} e_{2i} + e_{2i} (\mathbf{a}_i^1 + \mathbf{b}_i^1 - \kappa_{1i}) + \\ &\left(-c_i \chi_i - \frac{(|e_{2i} \mathbf{v}_i^1| + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M ((u_k(v_k) - v_k)^2 \Gamma_{ik}))}{\chi_i} + \sum_{k=1}^M ((u_k(v_k) - v_k) \Gamma_{ik}) \right) \chi_i \end{aligned} \quad (19)$$

定义矢量

$$\boldsymbol{\zeta}_i = (\mathbf{M}_i + \mathbf{\Omega}_i)^{-1} \left(\sum_{k=1}^M v_k \Gamma_{ik} \mathbf{\Psi}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_k) \right) \quad (20)$$

则有

$$\boldsymbol{\zeta}_i - \mathbf{b}_i = \frac{\sum_{k=1}^M ((v_k - u_k(v_k)) \Gamma_{ik} \mathbf{\Psi}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_k))}{(\mathbf{M}_i + \mathbf{\Omega}_i)} = -\mathbf{v}_i \quad (21)$$

$\boldsymbol{\zeta}_i^1$ 为矢量 $\boldsymbol{\zeta}_i$ 的第一个元素, 等式右边取绝对值, 则有不等式

$$|e_{2i} \mathbf{v}_i^1| \geq -e_{2i} (\boldsymbol{\zeta}_i^1 - \mathbf{b}_i^1) \quad (22)$$

将不等式(22)代入公式(19), 有

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2i} &\leq -k_{1i} e_{1i}^2 + e_{1i} e_{2i} + \\ &e_{2i} (\mathbf{a}_i^1 + \boldsymbol{\zeta}_i^1 - \kappa_{1i}) - c_i \chi_i^2 - \\ &\frac{1}{2} \sum_{k=1}^M ((u_k(v_k) - v_k)^2 \Gamma_{ik}) + \\ &\chi_i \sum_{k=1}^M ((u_k(v_k) - v_k) \Gamma_{ik}) \end{aligned} \quad (23)$$

公式(23)可以化简为

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2i} &\leq -k_{1i} e_{1i}^2 + e_{1i} e_{2i} + e_{2i} (\mathbf{a}_i^1 + \boldsymbol{\zeta}_i^1 - \kappa_{1i}) - \\ &(c_i - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (\Gamma_{ik})) \chi_i^2 \end{aligned} \quad (24)$$

令控制力输出函数 $\boldsymbol{\zeta}_i^1$ 满足表达式

$$\boldsymbol{\zeta}_i^1 = -e_{1i} - k_{2i} (e_{2i} - \chi_i) - \mathbf{a}_i^1 + \kappa_{1i} \quad (25)$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2i} &\leq -k_{1i} e_{1i}^2 - k_{2i} e_{2i}^2 + k_{2i} e_{2i} \chi_i - \\ &\left(c_i - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (\Gamma_{ik}) \right) \chi_i^2 \\ &\leq -k_{1i} e_{1i}^2 - \frac{1}{2} k_{2i} e_{2i}^2 - \\ &\left(c_i - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (\Gamma_{ik}) - \frac{1}{2} k_{2i} \right) \chi_i^2 \end{aligned} \quad (26)$$

其中, k_{1i} 、 k_{2i} 都为待定参数. 只要设定系统参数满足条件

$$c_i - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (\Gamma_{ik}) - \frac{1}{2} k_{2i} \geq 0 \quad (27)$$

使得第二个李雅普诺夫函数的导数为负定. 控制力满足公式(25)且控制参数满足不等式(27)构成了抑制纵荡的控制律, 从而保证系统的纵荡运动渐进稳定到目标状态, 也就是静止状态.

3 数值算例

作动器输出的控制力由公式(25)决定, 控制

系统参数设置必须满足不等式(27),这些条件构成了系统控制的控制律.我们将通过数值算例来验证此控制方法的有效性,同时将本文中提出的控制算法与业界普遍采用的PID算法进行了对比,评估算法的优劣.PID算法在海洋工程中被广泛应用^[16],它由比例环节,积分环节和微分环节组成,通过改变三个环节的反馈系数来调节算法的控制效果,可以说PID算法是一种不基于模型的控制算法.

数值算例是基于一款5模块浮动机场模型,模块的布局、物理性质和几何属性、连接器特性及安装位置可参看文献[10].作动器安装位置和上连接器安装位置重合.顶浪周期设置为14s,连接器刚度为 $5 \times 10^5 \text{ N/m}$,控制系统的待定参数设置为: $k_{i1} = 1$ 、 $k_{i2} = 1$ 、 $c_i = 3$.在PID算法中,比例环节反馈系数为 $\tilde{P} = 5$,积分环节反馈系数为 $\tilde{I} = 5$,微分环节反馈系数为 $\tilde{D} = 3$.作动器输出力和PID算法输出信号之间的放大系数为 1×10^5 .用四阶龙哥库塔法求解浮动机场微分方程的时域响应.图(2)给出了没有控制力输入时、反步法控制时、以及PID方法控制时,浮动机场系统第三个模块的时域响应,因为其它模块和第三个模块的时域响应类似.

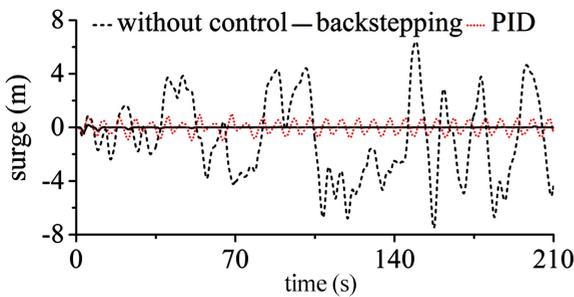


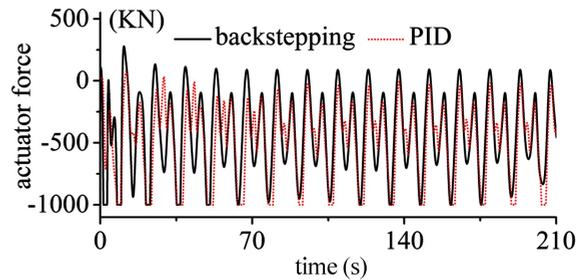
图2 浮动机场第三个模块的纵荡响应

Fig.2 Surge response of the third module

由图2可知,当没有作动器控制力输入时,浮动机场系统处于大振幅振动状态(如黑色虚线所示).尽管作用在浮动机场的波浪力为简谐振动,但是浮动机场模块的振动并不是简谐振动,原因是机场模块的振荡处于高阶谐波或混沌状态,且浮动机场三个自由度上的振动都很剧烈.事实上,文章^[8]的研究表明,当浮动机场一个自由度处于大振幅振动状态,浮动机场其他自由度的振动也将处于大振幅状态,这是由非线性网络协同效应的特点所决定的.当有作动器控制力输入时,纵荡响应明显被抑

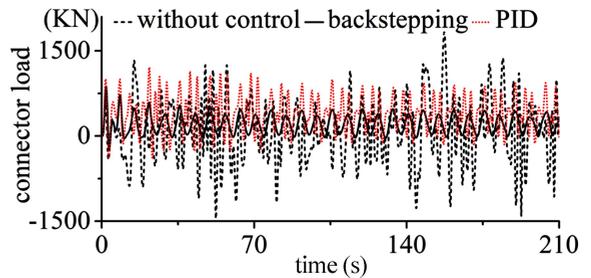
制并最终消除.在相同的饱和约束下,反步法的控制效果(黑色实线)要比PID方法的控制效果(红色点线)更好.反步法的控制效果在系统达到稳态后几乎没有波动,可以把模块的纵荡振动彻底消除;但PID算法控制不能完全消除模块纵荡,仍会存在微幅振动.需要指出,本文没有考虑控制浮动机场模块的垂荡和横摇运动,当作动器介入纵荡控制后,垂荡和横摇运动也会相应地减少但不能消除,其机理也是因为非线性网络协同效应导致相互约束.

图3给出了第3个作动器输出的控制力和第二个模块与第三个模块之间连接器载荷随时间的变化曲线.



(a) 控制力随时间变化

(a) actuator force versus time



(b) 连接件载荷随时间变化

(b) the connector load versus time

图3 第三个作动器的控制力输出和第二个模块与第三个模块之间连接器的载荷

Fig.3 Output force of the third actuator and connector load between the second and the third modules

由于作动器控制力输出被约束在 $\pm 1000 \text{ kN}$ 之内,所以如图3(a)所示,无论是反步法还是PID控制算法所决定的作动器输出都处于 $\pm 1000 \text{ kN}$ 以内.可以看到作动器输出力曲线的下限有明显的截断,说明输出约束极限的存在.图3(b)显示了第二个模块和第三个模块之间连接器的载荷.没有作动器控制力输入时,连接器载荷最大,其次是PID算法

的控制力,反步法控制的连接器载荷最小.原因是反步法能够较精确地控制浮体模块运动,高效地减少模块相对运动导致连接器的载荷最小.其它连接器的载荷与此类似,不在文中给出.

控制方法可适用于不同波浪频率下的浮体运动控制.图4给出了浮动机场纵荡响应振幅随波浪周期的变化.由图可知,受控的纵荡响应几乎被完全抑制.但是在12~14s周期内,仍存在小幅度振动,原因是作动器的输出能力(本文设置在1000kN上)不足以克服波浪激励产生的浮体振荡.当增加作动器功率,即可完全控制纵荡.在本文仅考虑浮动机场在远海泻湖内锚泊的应用场景,因此,在顶浪作用下控制浮动机场的纵荡运动是主要关注对象.控制算法可以拓展到不同方向运动控制,如垂荡和横摇等,只要增加不同方向的作动器数量即可.尽管本文仅展示了纵荡控制,反步法和饱和辅助系统相互结合可以推导出多向控制技术,本质上相同.

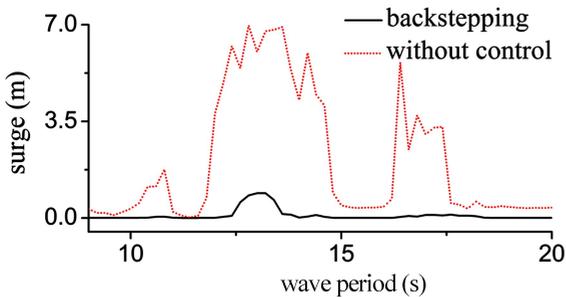


图4 机场系统纵荡响应振幅随波浪周期的变化

Fig.4 Development of surge motion amplitude with the wave period for airport system

4 小结

本文给出了一种基于模型的非线性控制方法,控制多模块浮动机场的纵荡响应;阐述了多控制器的布局,运用网络动力学方法建立多模块浮动机场的动力学受控模型.为了更贴合实际工程应用,考虑作动器的输出力具有饱和约束,采用反步法并结合饱和和辅助系统推导了作动器输出的控制律.数值仿真结果表明,该方法可以有效地抑制浮动机场的纵荡运动,并且相比传统PID算法控制效果更佳.本文所展示的控制方法可以拓展到多自由度控制,对其它工程控制问题也有一定的参考意义.

参 考 文 献

- 1 Cui W. Theory of hydroelasticity and its application to very large floating structures. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2007
- 2 Palo P. Mobile off shore base:hydrodynamic advancements and remaining challenges. *Marine Structure*, 2005, 182: 133~147
- 3 Suzuki H. Overview of megafloat:concept, design criteria, analysis and design. *Marine Structure*, 2005, 182: 111 ~ 132
- 4 Wang C M, Tay Z Y. Very large floating structure:applications, research and development. *Procedia Engineering*, 2011, 14:62~72
- 5 Lamas-Pardo M, Lglesias G, Carral L. A review of very large floating structures (VLFS) for coastal and offshore uses. *Ocean Engineering*, 2015, 109:677~690
- 6 Hirayama T, Ma N. Dynamic response of a very large floating structure with active pneumatic control. *The Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, 1997, 1:269~276
- 7 Sørensen A J, Sagatun S I, Fossen T I. Design of a dynamic positioning system. *Control Engineering Practice*, 1996, 4:359~368
- 8 Xu D L, Zhang H C, Lu C, et al. Analytical criterion for amplitude death in nonautonomous system with piecewise nonlinear coupling. *Physical Review E*, 2014, 89(4-1): 042906
- 9 Bareli K. Coupling of chemical oscillators. *The Journal of Physical Chemistry*, 1984, 88(16):3616~3622
- 10 Xia S Y, Xu D L. On retaining a multi-module floating structure in an amplitude death state. *Ocean Engineering*, 2016, 121:134~142
- 11 Xu D L, Xia S Y, Zhang H C, et al. Adaptive optimal control of multi-modular floating platforms in random seas. *Nonlinear Dynamics*, 2018, 1(2):863~876
- 12 Zhang H C, Xu D L, Lu C, et al. Amplitude death of a multi-module floating airport. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 79(4):2385~2394
- 13 Kanellakopoulos I, Kokotovic P V, Morse A S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems. *American Control Conference*, 1991, 36: 1241 ~ 1253
- 14 邱香. 非线性主动悬架 backstepping 控制研究. 动力学

- 与控制学报, 2016, 33(3): 54~59 (Qiu X. Research on backstepping control of nonlinear active suspension. *Journal of Dynamics and Control*, 2016, 33(3): 54~59 (in chinese))
- 15 Chen M, Ge S S, Choo Y S. Neural network tracking control of ocean surface vessels with input saturation. In: IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2009, 1: 85~89
- 16 Lackner M. Controlling platform motions and reducing blade loads for floating wind turbines. *Wind Engineering*, 2009, 33: 541~554

SURGE MOTION SATURATION CONTROL OF A MULTI-MODULAR FLOATING AIRPORT*

Xia Shuyan Xu Daolin[†] Zhang Haicheng

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract A multi-modular floating airport is composed of several floating modules which are connected by flexible connectors. This paper presents the control of surge motions of the floating airport that is deployed in a lagoon in order to improve the stability and operation conditions. A nonlinear model-based MIMO control method is proposed to suppress surge motions of a multi-modular floating airport. The network modeling method is used to build the mathematical model of the controlled floating airport. Considering the saturation of actuator output, the backstepping method combining with an auxiliary system is introduced to derive the control law for the actuators. To verify the feasibility and efficiency of the method, numerical simulation is carried out in comparison with PID control algorithm.

Key words multi-modular floating airport, nonlinear control, network method, backstepping method, output saturation