

浮式海洋热能转换系统的主动振动控制与扰动观测器设计

何修宇^{1,2} 王雪璇¹ 赵哲惟¹ 张爽^{1,2}

摘要 随着化石能源的日渐枯竭,海洋热能转换系统(Ocean thermal energy conversion, OTEC)是可以利用海水间的温差将清洁、可再生的海洋能转换为电能的能源系统,关于该系统的研究已引起了越来越多的关注与研究.在工作过程中,浮式海浪温差发电系统中用于传输深层低温海水的管道会受到外界环境的影响产生振动,而这些振动会直接影响系统的性能.本文将研究该柔性系统的振动控制问题,首先,建立一个偏微分方程和一组常微分方程组成的模型来描述 OTEC 系统的动力学特性,并直接基于系统的动力学模型设计主动的边界控制器以及边界扰动观测器,从而消除外界扰动的影响,以及减少 OTEC 系统中柔性管道的横向形变,抑制系统的振动.此外,本文还考虑了 OTEC 系统中存在的输出约束问题,并且在所设计边界控制律的作用下,从理论上证明 OTEC 系统的稳定性,保证 OTEC 系统中的柔性管道的形变量最终收敛于平衡点附近以及浮式平台固定在初始位置附近.最后,通过选择合适的控制参数来对 OTEC 系统进行数字仿真,利用所得到的仿真结果验证了所设计控制律的有效性.

关键词 浮式海洋温差热能转换系统, 振动控制, 分布参数系统, 边界控制, 扰动观测器, 输出约束

引用格式 何修宇, 王雪璇, 赵哲惟, 张爽. 浮式海洋热能转换系统的主动振动控制与扰动观测器设计. 自动化学报, 2019, 45(10): 1846–1856

DOI 10.16383/j.aas.c180197

Disturbance Rejection and Vibration Control for a Floating Ocean Thermal Energy Conversion System

HE Xiu-Yu^{1,2} WANG Xue-Xuan¹ ZHAO Zhe-Wei¹ ZHANG Shuang^{1,2}

Abstract With the demands of the renew resource, the ocean thermal energy conversion system which transfers the ocean resource to electrical energy draws lots of attentions. The flexible pipe which is used to transport cold water in the ocean thermal energy conversion (OTEC) system will generate the vibration under the external disturbances. A partial differential equation and some ordinary differential equations are presented to describe the dynamics of the float OTEC system, and active boundary control laws with disturbance observers are designed based on the dynamical model to reduce the transverse displacement. Besides, the output constraint problem of this system is handled with the control method. Further, the stability of the floating OTEC system and the effectiveness of the designed control laws are proven in theory and in numerical simulation.

Key words Floating ocean thermal energy conversion system, vibration control, distributed parameter system, boundary control, disturbance observer, output constraint

Citation He Xiu-Yu, Wang Xue-Xuan, Zhao Zhe-Wei, Zhang Shuang. Disturbance rejection and vibration control for a floating ocean thermal energy conversion system. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(10): 1846–1856

随着社会发展和世界人口的剧烈增长,能源问

题逐渐成为国际上第一热点问题.为解决即将来临的化石能源枯竭问题以及日益严重的环境污染问题,人们转向对可再生的清洁能源的探索,例如,太阳能、风能、地热能、海洋能、潮汐能等.海洋占地球表面近 70%,蕴含着极为丰富的能量,对于海洋能的开发吸引了越来越多的关注.

海洋温差能是一种典型海洋热能,资源蕴含量丰富,具有巨大的开发潜力.海洋热能转换系统(Ocean thermal energy conversion, OTEC)是一种能有效实现海洋热能-电能的能源转换系统^[1-3].该系统利用海洋不同深度海水间的温度差,通过将冷海水输送到洋表和温海水进行冷热交换来驱动涡轮机产生电能并汇集到海底电缆传输到主输电网

收稿日期 2018-04-05 录用日期 2018-09-29
Manuscript received April 5, 2018; accepted September 29, 2018
国家自然科学基金(61873297),北京科技大学中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-TP-15-005C1, FRF-TP-19-001C2),中国博士后科学基金(2019T120048)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61873297), Fundamental Research Funds for China Central Universities of University of Science and Technology Beijing (FRF-TP-15-005C1, FRF-TP-19-001C2), and China Postdoctoral Science Foundation (2019T120048)

本文责任编辑 姚鹏飞
Recommended by Associate Editor YAO Peng-Fei
1. 北京科技大学自动化学院 北京 100083 2. 北京科技大学人工智能研究院 北京 100083

1. School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083 2. Institute of Artificial Intelligence, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

中^[4]. 相比于其他可再生能源, OTEC 系统具有生产稳定、应用广泛等优点^[5-6], 此外, OTEC 系统在生产过程中还可以生成包括淡水、海洋营养物质等在内的副产物. 综上所述, OTEC 系统具有良好的发展前景, 并将在可见的未来得到广泛应用^[7].

海洋热能转换平台通常需要安装在广袤的海上, 远离海滨. 相比于固定的生产平台, 利用浮台或船只来安装转换装置具有很多的优势, 它不仅生产灵活, 能够随着海洋环境的变化而变更工作地点, 而且安装成本低廉, 维护便利. 然而, 在 OTEC 系统所处的深海环境中, 存在诸多的扰动, 如: 洋流、海浪以及向岸风等, 另外, 随着水深和管道重量的增加, 用于连接海面浮台与下端镇重物, 输送深层低温海水的柔性管道(上下跨度较大)可能会产生严重的形变以及剧烈的振动, 这都将导致柔性管道的过早疲劳, 甚至是损毁 OTEC 系统, 给生产和设备维护带来巨大的损失^[8]. 现有的针对 OTEC 的研究工作主要集中于发电效率的优化, 抑或是平台结构力学方面的研究, 而鲜有工作来研究用于输送海水的管道结构的振动抑制问题以及主动的振动控制设计. 因此, 如何设计有效的控制策略来解决 OTEC 系统中柔性结构的振动问题对于深入研究 OTEC 系统的研究具有一定的实际应用价值和理论指导意义.

从物理特性上来分析, OTEC 系统中的柔性管道因其大跨度特点, 可以视为一个典型的欧拉-伯努利梁结构, 即, 柔性结构的横截面一直与中轴线垂直, 柔性结构中的剪切形变量相较而言很小. 根据其无穷维的物理特性而言, 它是一个分布参数系统^[9-14], 通常用一组偏微分方程来描述其管道主体部分的动力学特性, 以及用一组常微分方程来描述其边界位置的力学特性^[15]. 针对于分布参数系统的研究, 主要是从两个方面着手, 即, 直接基于无穷维的系统模型^[16-17] 以及基于离散原系统后得到的有穷维模型^[18-19]. 相比于后一种方法, 直接基于系统的无穷维模型的方法在进行控制设计和稳定性分析时考虑了系统中所有状态量的动力学特性, 常用的控制方法包括分布式控制和边界控制. 它们由不同位置的信号组成并实施于不同的位置. 在文献 [20] 中, 作者研究了一类热传导方程, 并基于系统的无穷维模型设计了分布式控制器来解决系统的温度变化问题以及系统中存在的全变量约束问题. 然而, 该控制器由分布式输出状态量构成并作用整个系统中, 那么就需要无穷多个传感器和执行器来实现, 显然对于实际的系统而言具有很大的实现难度.

另一类控制方法, 即边界控制^[21-24] 是由系统的边界位置的信号组成, 并最终作用于系统的边界位置上. 相较于分布式控制而言, 边界控制具有更好的可实施性. 在之前的研究中, 边界控制已经得

到了一定的研究与应用. 在文献 [22] 中, Endo 等在柔性机械臂的边界位置设计力控制器来控制柔性机械臂中的振动和角度位置. 在文献 [17] 中, Do 研究了三维空间下海洋柔性输油立管的振动问题, 设计一组边界控制器来减小柔性立管的三维结构振动. Paranjape 等运用基于 backstepping 的边界控制策略来研究柔性机翼的机械振动抑制问题^[25]. 在文献 [26] 中, Liu 等研究了一个空中加油机系统, 通过在管道末端位置安装边界控制器来完成输油管道的振动抑制问题. 除此之外, 边界控制还被运用于其他的一些分布参数系统中^[27-30]. 以上的系统通常只建立了一组偏微分方程来描述其自由运动端的动力学特性. 本文的研究是针对两端自由运动的 OTEC 系统来设计主动的振动控制器, 柔性系统本身复杂的数学模型以及系统无穷维的特性使得该主动控制的设计变得相对困难.

在实际的工作环境中, OTEC 系统还可能会受到系统所处环境空间的限制, 柔性结构中材料特性的限制或安全指标的限制等, 这些限制的存在对系统的控制性能提出了更高的要求. 如何在抑制 OTEC 系统结构振动的同时, 解决 OTEC 系统中可能存在的输出约束问题也为主动振动控制器的设计带来了更大的难度与挑战. 本文直接基于 OTEC 系统的动力学模型设计主动的边界控制器来分析闭环系统稳定性, 抑制柔性管道的振动以及解决系统中存在的输出约束问题.

与之前的研究相比, 本文的创新之处在于: 1) 在本文中分析了在外界扰动作用下 OTEC 系统的动力学特性, 建立了一个偏微分方程—常微分方程组耦合的系统模型, 并直接基于 OTEC 系统的无穷维模型来进行主动控制器的设计, 通过系统的边界位置信号来构成主动的边界控制器, 从而有效地减小系统中柔性管道的结构振动; 2) 本文研究了 OTEC 系统中可能存在的输出信号约束的问题, 通过对数障碍项引入系统的边界控制设计中来保证期望的边界输出信号不超出所给定的约束值, 同时保证系统中浮式平台在初始位置的约束范围内运动. 此外, 还针对系统的外界扰动设计扰动观测器用以减小外界环境扰动对系统的影响.

本文结构如下: 第 1 节给出了浮式 OTEC 系统的动力学特性分析以及建模, 并用 PDE-ODEs 耦合模型来描述 OTEC 系统中柔性管道的动力学特性, 另外还给出后文分析时所需要用到的预备知识. 在第 2 节中, 详细描述了运用李雅普诺夫直接法进行主动边界控制律设计的过程以及系统稳定性的分析过程. 在第 3 节中, 对浮式 OTEC 系统做了几组数字仿真实验, 来验证所设计控制策略理论证明的合理性. 第 4 节针对全文的研究工作做了总结和展望.

1 问题描述与系统建模

一个典型的浮式 OTEC 系统主要由 3 部分组成: 能量转换平台、传输深层低温海水的柔性管道以及安装在柔性管道下端用于固定的镇重物体, 如图 1 所示. 从 OTEC 系统柔性管道的物理特性来看, 可以将其视为一个典型的欧拉-伯努利梁结构. 本文中, 为了简化研究过程, 只研究柔性管道在水平方向上的振动, 多方向上的振动控制问题可以作为进一步的拓展研究.

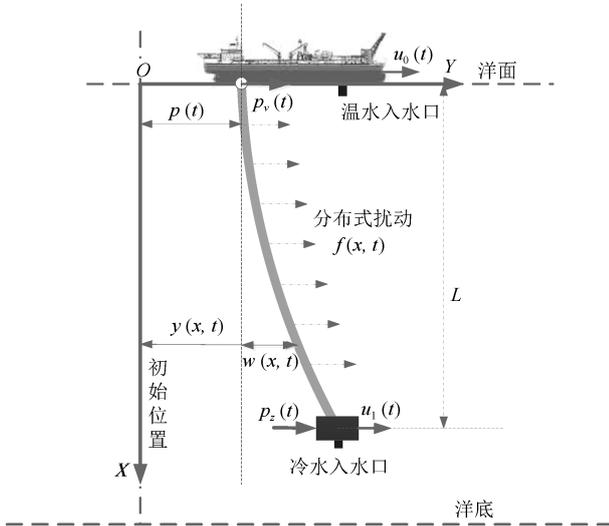


图 1 典型的浮式热能转换系统示意图

Fig. 1 Floating ocean thermal energy conversion system

定义 1. 为了简化分析, 对文中所用到的符号进行了简化, 即, $(*) = \frac{\partial(*)}{\partial t}$, $(\ddot{*}) = \frac{\partial^2(*)}{\partial t^2}$, $(*)' = \frac{\partial(*)}{\partial x}$, $(*)'' = \frac{\partial^2(*)}{\partial x^2}$, $(*)''' = \frac{\partial^3(*)}{\partial x^3}$ 以及 $(*)'''' = \frac{\partial^4(*)}{\partial x^4}$.

对于柔性系统而言, 哈密顿原理能够为系统提供一种确定动力学特性的有效方法. 它是基于柔性系统的能量方程分析的, 描述为

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta[E_k(t) - E_p(t) + W_{\text{non}}(t)]dt = 0 \quad (1)$$

其中, δ 是一个变分运算符, 其他的能量项将在接下来的部分给出. OTEC 的系统动能 $E_k(t)$ 描述为

$$E_k(t) = \frac{M_s}{2} \dot{y}^2(L, t) + \frac{\rho}{2} \int_0^L \dot{y}^2(x, t)dx + \frac{M_0}{2} [\dot{p}(t)]^2 \quad (2)$$

其中, M_s 和 M_0 分别描述了 OTEC 系统中柔性管道下端镇重物体和转换平台的质量, ρ 描述了单位柔性管道的均匀质量. 此外, $p(t)$ 和 $y(L, t)$ 描述了 OTEC 系统中柔性管道上下两端点的水平位移量, 即, 能量转换平台和镇重物体的位移.

OTEC 的系统势能 $E_p(t)$ 描述为

$$E_p(t) = \frac{EI}{2} \int_0^L [w''(x, t)]^2 dx + \frac{T}{2} \int_0^L [w'(x, t)]^2 dx \quad (3)$$

其中, EI 描述了柔性管道的抗弯刚度, $w(x, t)$ 描述了 OTEC 系统中柔性管道水平形变量, 其与系统位移量的关系为 $y(x, t) = p(t) + w(x, t)$. T 描述了柔性管道的张力. OTEC 系统所受到外界非保守力做的总虚功为

$$\delta W_{\text{non}}(t) = \delta W_f(t) + \delta W_d(t) + \delta W_c(t) \quad (4)$$

其中包括系统受到阻尼作用产生的虚功 $\delta W_d(t)$ 为

$$\delta W_d(t) = - \int_0^L c \dot{y}(x, t) \delta y(x, t) dx - d_0 \dot{p}(t) \delta p(t) - d_s \dot{y}(L, t) \delta y(L, t) \quad (5)$$

其中, c , d_0 和 d_s 分别为柔性管道、转换平台和镇重物体上的阻尼系数. 系统所受到外界环境扰动作用产生的虚功 $\delta W_f(t)$ 为

$$\delta W_f(t) = \int_0^L f(x, t) \delta y(x, t) dx + p_z(t) \delta y(L, t) + p_v(t) \delta p(t) \quad (6)$$

其中, $f(x, t)$, $p_z(t)$ 和 $p_v(t)$ 分别为作用在柔性管道、转换平台和镇重物体上的外界扰动. 系统所受到设计控制力作用产生的虚功 $\delta W_c(t)$ 为

$$\delta W_c(t) = u_1(t) \delta y(L, t) + u_0(t) \delta p(t) \quad (7)$$

其中, $u_0(t)$ 和 $u_1(t)$ 分别为作用在柔性管道上下端的控制作用力.

作用于 OTEC 系统所有非保守力所做的虚功为

$$\delta W_{\text{non}}(t) = \delta W_d + \delta W_f(t) + \delta W_c(t) \quad (8)$$

运用哈密顿原理, 并结合式 (2)~(4) 和式 (8), 可以得到系统的主控方程为

$$\rho \ddot{y}(x, t) + EI y''''(x, t) + c \dot{y}(x, t) = T y''(x, t) + f(x, t) \quad (9)$$

$\forall (x, t) \in (0, L) \times [t_0, \infty)$, 以及边界条件

$$\begin{aligned} y'(0, t) &= y''(L, t) = 0 \\ M_0 \ddot{p}(t) + EI y''''(0, t) + d_0 \dot{p}(t) &= u_0(t) + p_v(t) \end{aligned} \quad (10)$$

$$M_s \ddot{y}(L, t) + T y'(L, t) + d_s \dot{y}(L, t) = \frac{1}{2} [\tilde{P}_z(t)]^2 + \frac{1}{2} [\tilde{P}_v(t)]^2 \quad (17)$$

$$EI y'''(L, t) + u_1(t) + p_z(t) \quad (11)$$

$\forall t \in [t_0, \infty)$.

假设 1. 假设 OTEC 系统中柔性管道所受到的分布式扰动 $f(x, t)$ 在 $L^2 [0, L]$ 范数中是有界的, 即

$$\int_0^L f^2(x, t) dx \leq F, \quad \max_{(x, t) \in (0, L) \times [t_0, \infty)} |f(x, t)| < \infty$$

上式说明了环境扰动具有有限的能量.

假设 2. 对于 OTEC 系统边界位置所受的海洋环境扰动 $p_z(t)$ 以及 $p_v(t)$, 假设它们是有界的, 并且存在两个个未知的正实数 P_z, P_v 为扰动的界值, 即 $|p_z(t)| \leq P_z$ 以及 $|p_v(t)| \leq P_v$.

性质 1^[31-32]. 对于两个正实函数 $\psi_1(x, t), \psi_2(x, t)$, 其中 $(x, t) \in [0, L] \times [t_0, \infty)$, 满足

$$\psi_1 \psi_2 \leq |\psi_1 \psi_2| \leq \frac{1}{2} [\psi_1]^2 + \frac{1}{2} [\psi_2]^2 \quad (12)$$

$$\psi_1 \psi_2 = |(\sqrt{\sigma} \psi_1) (\frac{1}{\sqrt{\sigma}} \psi_2)| \leq \frac{\sigma}{2} [\psi_1]^2 + \frac{1}{2\sigma} [\psi_2]^2 \quad (13)$$

其中, σ 是一个正的常数.

性质 2^[33]. 对于实函数 $\varphi_1(t)$, 其中, $t \in [t_0, \infty)$, 下列不等式成立

$$0 \leq |\varphi_1(t)| - \varphi_1(t) \tanh(\frac{\varphi_1(t)}{\xi}) \leq \varrho \xi \quad (14)$$

其中, $\xi > 0$, ϱ 是一个满足等式 $\varrho = e^{-(\varrho+1)}$ 的正的常数, 例如, $\varrho = 0.2785$.

2 控制设计与系统稳定性分析

针对 OTEC 系统, 本文设计主动的边界控制器, 用来减小柔性管道的弹性形变, 补偿输入约束的非线性特性对系统的影响, 保证系统的稳定.

构造李雅普诺夫函数为

$$H(t) = H_1(t) + H_2(t) + H_3(t) \quad (15)$$

函数中各部分为

$$H_1(t) = \frac{\rho}{2} \int_0^L [\dot{y}(x, t)]^2 dx + \frac{EI}{2} \int_0^L [y''(x, t)]^2 dx + \frac{T}{2} \int_0^L [y'(x, t)]^2 dx \quad (16)$$

$$H_2(t) = \frac{1}{2} M_s u_a^2(t) \ln \frac{2W_L^2}{W_L^2 - [w(L, t)]^2} + \frac{1}{2} M_0 u_b^2(t) \ln \frac{2Y_0^2}{Y_0^2 - [y(0, t)]^2} +$$

$$H_3(t) = \alpha \rho \int_0^L x \dot{y}(x, t) y'(x, t) dx \quad (18)$$

其中 α 是一个正常数.

$H_2(t)$ 中的辅助函数由边界信号构成, 定义为

$$u_a(t) = -k_1 y'''(L, t) + k_2 \dot{y}(L, t) + k_3 y'(L, t) \quad (19)$$

$$u_b(t) = \dot{y}(0, t) + k_4 y'''(0, t) \quad (20)$$

设计合适的边界控制律为

$$u_1(t) = - \frac{M_s u_a(t) w(L, t) \dot{w}(L, t)}{k_2 \{W_L^2 - [w(L, t)]^2\}} - \frac{\ln \frac{2W_L^2}{W_L^2 - [w(L, t)]^2}}{\ln \frac{2W_L^2}{W_L^2 - [w(L, t)]^2}} - \frac{k_a u_a(t)}{2W_L^2} - k_c u_a(t) - \frac{\tanh[\frac{u_a(t)}{\xi_1}] \hat{P}_z(t) - EI y'''(L, t) + d_s \dot{y}(L, t) + T y'(L, t) + \frac{k_1 M_s}{k_2} \dot{y}'''(L, t) - \frac{k_3 M_s}{k_2} \dot{y}'(L, t)}{k_2} \quad (21)$$

$$u_0(t) = - \frac{M_0 u_b(t) y(0, t) \dot{y}(0, t)}{Y_0^2 - [y(0, t)]^2} - \frac{\ln \frac{2Y_0^2}{Y_0^2 - [y(0, t)]^2}}{\ln \frac{2Y_0^2}{Y_0^2 - [y(0, t)]^2}} - \frac{k_b u_b(t)}{2Y_0^2} - k_d u_b(t) - \frac{\tanh[\frac{u_b(t)}{\xi_0}] \hat{P}_v(t) + EI y'''(0, t) + d_0 \dot{p}(t) - k_4 M_0 \dot{y}'''(0, t)}{k_4} \quad (22)$$

其中, ξ_0 和 ξ_1 是两个正的常数. $\hat{P}_z(t)$ 和 $\hat{P}_v(t)$ 是两个边界扰动观测器, 分别设计为

$$\dot{\hat{P}}_z(t) = k_2 u_a(t) \tanh[\frac{u_a(t)}{\xi_1}] \times \ln \frac{2W_L^2}{W_L^2 - [w(L, t)]^2} - \epsilon_1 \hat{P}_z(t) \quad (23)$$

$$\dot{\hat{P}}_v(t) = u_b(t) \tanh[\frac{u_b(t)}{\xi_0}] \times \ln \frac{2Y_0^2}{Y_0^2 - [y(0, t)]^2} - \epsilon_2 \hat{P}_v(t) \quad (24)$$

引理 1. 通过选择合适的参数, 能够保证上文中所构造的李雅普诺夫函数 (15) 是一个有界的正函数, 其上下界值表示为

$$\varpi_1[G(t) + H_2(t)] \leq H(t) \leq \varpi_2[G(t) + H_2(t)] \tag{25}$$

其中, $\varpi_1 = \min(1, \frac{1}{2} \min([\rho - \alpha\rho L], EI, [T - \alpha\rho L])) > 0$ 以及 $\varpi_2 = \max(1, \frac{1}{2} \max([\rho + \alpha\rho L], EI, [T + \alpha\rho L]))$.

证明. 构造一个函数 $G(t)$ 为

$$G(t) = \int_0^L [\dot{y}(x, t)]^2 dx + \int_0^L [y'(x, t)]^2 dx + \int_0^L [y''(x, t)]^2 dx$$

运用性质 1, 将构造的函数 $H_3(t)$ 变形为

$$|H_3(t)| \leq \frac{\alpha\rho L}{2} \left[\int_0^L \dot{y}^2(x, t) dx + \int_0^L y'^2(x, t) dx \right]$$

将上式展开并结合式 (16) 得

$$-\alpha_1 G(t) \leq H_1(t) + H_3(t) \leq \alpha_2 G(t) \tag{26}$$

其中, $\alpha_1 = \frac{1}{2} \min([\rho - \alpha\rho L], EI, [T - \alpha\rho L])$ 和 $\alpha_2 = \frac{1}{2} \max([\rho + \alpha\rho L], EI, [T + \alpha\rho L])$.

进一步, 式 (26) 推导为

$$\varpi_1[G(t) + H_2(t)] \leq H(t) \leq \varpi_2[G(t) + H_2(t)] \tag{27}$$

其中, $\varpi_1 = \min(1, \alpha_1) > 0$ 以及 $\varpi_2 = \max(1, \alpha_2)$. □

引理 2. 上文中所构造的李雅普诺夫函数 (15) 的时间导数是一个有界限的函数, 其界值表示为

$$\dot{H}(t) \leq -\varpi H(t) + \eta \tag{28}$$

其中, $\varpi = \min(\frac{3\alpha EI}{2}, v_1, v_2, v_3, \frac{2v_4}{M_s}, \frac{2v_5}{M_0})/\varpi_1$ 和 $\eta = [L/2\varrho_1 + \alpha L^2/2\varrho_2]F + \frac{\epsilon_1}{2}P_z^2 + \frac{\epsilon_2}{2}P_v^2 + \varrho[\epsilon_1 P_z + \epsilon_2 P_v]$ 是两个正的常数.

证明. 对构造的李雅普诺夫函数求导为

$$\dot{H}(t) = \dot{H}_1(t) + \dot{H}_2(t) + \dot{H}_3(t) \tag{29}$$

其中, $H_1(t)$ 的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{H}_1(t) &= \rho \int_0^L \dot{y}(x, t)\ddot{y}(x, t) dx + \\ &EI \int_0^L y''(x, t)\dot{y}''(x, t) dx + \\ &T \int_0^L y'(x, t)\dot{y}'(x, t) dx \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\frac{EI}{2k_1 k_2} [u_a(t)]^2 - \frac{EI k_2}{2k_1} [\dot{y}(L, t)]^2 - \\ &\frac{EI k_1}{2k_2} [y'''(L, t)]^2 - \frac{EI k_3}{2k_1 k_2} [y'(L, t)]^2 + \\ &\frac{EI}{2k_4} [u_b(t)]^2 - \frac{EI k_4}{2} [y'''(0, t)]^2 - \\ &\frac{EI}{2k_4} [\dot{y}(0, t)]^2 + \frac{EI k_3}{k_2} y'''(L, t)y'(L, t) + \\ &[T - \frac{EI k_3}{k_1}] \dot{y}(L, t)y'(L, t) - \\ &[c - \frac{\varrho_1}{2}] \int_0^L [\dot{y}(x, t)]^2 dx + \\ &\frac{1}{2\varrho_1} \int_0^L [f(x, t)]^2 dx \end{aligned} \tag{30}$$

其中, ϱ_1 是一个正的常数. $H_2(t)$ 的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{H}_2(t) &= M_s u_a(t)\dot{u}_a(t) \ln \frac{2W_L^2}{W_L^2 - [w(L, t)]^2} + \\ &M_s [u_a(t)]^2 \frac{w(L, t)\dot{w}(L, t)}{W_L^2 - [w(L, t)]^2} + \\ &M_0 u_b(t)\dot{u}_b(t) \ln \frac{2Y_0^2}{Y_0^2 - [y(0, t)]^2} + \\ &M_0 [u_b(t)]^2 \frac{y(0, t)\dot{y}(0, t)}{Y_0^2 - [y(0, t)]^2} + \\ &\tilde{P}_z(t)\dot{\tilde{P}}_z(t) + \tilde{P}_v(t)\dot{\tilde{P}}_v(t) \leq \\ &-k_a k_2 [u_a(t)]^2 - k_b [u_b(t)]^2 - \\ &k_c k_2 [u_a(t)]^2 \ln \frac{2W_L^2}{W_L^2 - [w(L, t)]^2} - \\ &k_d [u_b(t)]^2 \ln \frac{2Y_0^2}{Y_0^2 - [y(0, t)]^2} - \frac{\epsilon_1}{2} [\tilde{P}_z(t)]^2 - \\ &\frac{\epsilon_2}{2} [\tilde{P}_v(t)]^2 + \frac{\epsilon_1}{2} P_z^2 + \frac{\epsilon_2}{2} P_v^2 + \\ &\varrho[\epsilon_1 P_z + \epsilon_2 P_v] \end{aligned} \tag{31}$$

以及 $H_3(t)$ 的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{H}_3(t) &= \alpha\rho \int_0^L x\dot{y}(x, t)y'(x, t) dx + \\ &\alpha\rho \int_0^L x\dot{y}(x, t)\dot{y}'(x, t) dx = \\ &-\alpha EILy'(L, t)y'''(L, t) - \\ &\frac{3\alpha EI}{2} \int_0^L [y''(x, t)]^2 dx + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\alpha L T}{2} [y'(L, t)]^2 + \frac{\alpha \rho L}{2} [\dot{y}(L, t)]^2 - \\ & \frac{\alpha}{2} \int_0^L [T - L \varrho_2 - c L \varrho_3] [y'(x, t)]^2 dx - \\ & \frac{\alpha}{2} \int_0^L \left[\rho - \frac{c L}{2 \varrho_3} \right] [\dot{y}(x, t)]^2 dx + \\ & \frac{\alpha L}{2 \varrho_2} \int_0^L [f(x, t)]^2 dx \end{aligned} \quad (32)$$

其中, ϱ_2 和 ϱ_3 是两个正的常数. 将式 (30) ~ (32) 代入式 (29), 整理得到:

$$\begin{aligned} \dot{H}(t) \leq & - \int_0^L \left[c + \frac{\alpha \rho}{2} - \frac{c L}{2 \varrho_3} - \frac{\varrho_1}{2} \right] [\dot{y}(x, t)]^2 dx - \\ & \frac{\alpha}{2} \int_0^L [T - L \varrho_2 - c L \varrho_3] [y'(x, t)]^2 dx - \\ & \frac{3 \alpha E I}{2} \int_0^L [y''(x, t)]^2 dx - \\ & \frac{\alpha}{2} \left[\frac{E I k_3}{k_1 k_2} - T L \right] [y'(L, t)]^2 + \\ & E I \left[\frac{k_3}{k_2} - \alpha L \right] y'(L, t) y'''(L, t) - \\ & \left[k_2 k_a - \frac{E I}{2 k_1 k_2} \right] [u_a(t)]^2 + \\ & \left[k_b - \frac{E I}{2 k_4} \right] [u_b(t)]^2 - \frac{E I k_1}{2 k_2} [y'''(L, t)]^2 - \\ & k_c k_2 [u_a(t)]^2 \ln \frac{2 W_L^2}{W_L^2 - [w(L, t)]^2} - \\ & k_d [u_b(t)]^2 \ln \frac{2 Y_0^2}{Y_0^2 - [y(0, t)]^2} - \\ & \left[\frac{E I k_2}{2 k_1} - \frac{\alpha \rho L}{2} \right] [\dot{y}(L, t)]^2 - \\ & \frac{E I}{2 k_4} [\dot{y}(0, t)]^2 - \frac{E I k_4}{2} [y'''(0, t)]^2 + \\ & \left[T - \frac{E I k_3}{k_1} \right] \dot{y}(L, t) y'(L, t) - \\ & \frac{\epsilon_1}{2} [\tilde{P}_z(t)]^2 - \frac{\epsilon_2}{2} [\tilde{P}_v(t)]^2 + \frac{\epsilon_1}{2} P_z^2 + \\ & \frac{\epsilon_2}{2} P_v^2 + \left[\frac{1}{2 \varrho_1} + \frac{\alpha L}{2 \varrho_2} \right] \int_0^L [f(x, t)]^2 dx + \\ & \varrho [\epsilon_1 P_z + \epsilon_2 P_v] \end{aligned} \quad (33)$$

通过选择合适的参数 k_1, k_2, k_3, k_4 以及函数 $\varphi(x)$ 使得下列式子成立

$$\begin{aligned} v_1 &= c + \frac{\alpha \rho}{2} - \frac{c L}{2 \varrho_3} - \frac{\varrho_1}{2} > 0 \\ v_2 &= T - L \varrho_2 - c L \varrho_3 > 0 \\ v_3 &= k_2 k_a - \frac{E I}{2 k_1 k_2} \geq 0 \\ v_4 &= k_b - \frac{E I}{2 k_4} \geq 0 \\ \frac{\alpha}{2} \left[\frac{E I k_3}{k_1 k_2} - T L \right] - \frac{E I |k_3 - k_2 \alpha L|}{2 k_2 \varrho_4} - \\ & \frac{|T k_1 - E I k_3|}{2 k_1 \varrho_5} \geq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left[\frac{E I k_2}{2 k_1} - \frac{\alpha \rho L}{2} \right] - \frac{|T k_1 - E I k_3| \varrho_5}{2 k_1} & \geq 0 \\ \frac{E I k_1}{2 k_2} - \frac{E I |k_3 - k_2 \alpha L| \varrho_4}{2 k_2} & \geq 0 \end{aligned}$$

那么, 可以得到

$$\begin{aligned} \dot{H}(t) \leq & - \varpi_3 [G(t) + H_2(t)] + \eta \leq \\ & - \varpi H(t) + \eta \end{aligned} \quad (34)$$

其中, $\varpi_3 = \min(\frac{3 \alpha E I}{2}, v_1, v_2, \frac{2 k_c k_2}{M_s}, \frac{2 k_d}{M_0}, \epsilon_1, \epsilon_2)$, $\varpi = \varpi_3 / \varpi_2$ 和 $\eta = [\frac{1}{2 \varrho_1} + \frac{\alpha L}{2 \varrho_2}] F + \frac{\epsilon_1}{2} P_z^2 + \frac{\epsilon_2}{2} P_v^2 + \varrho [\epsilon_1 P_z + \epsilon_2 P_v]$. \square

定理 1. 当柔性系统中的初始状态值有界时, 基于有关外界扰动的假设 1, 我们可以得出 OTEC 系统中柔性管道的弹性形变和振动减小, 具体为

$$\begin{aligned} |w(x, t)| \leq & \sqrt{\frac{L}{\varpi_1 T} \left[H(t_0) e^{-\varpi(t-t_0)} + \frac{\eta}{\varpi} \right]}, \\ & \forall (x, t) \in [0, L] \times [t_0, \infty) \end{aligned} \quad (35)$$

证明. 将式 (28) 两端乘以 $e^{\varpi(t-t_0)}$, 并积分得到

$$H(t) \leq \left[H(t_0) - \frac{\eta}{\varpi} \right] e^{-\varpi(t-t_0)} + \frac{\eta}{\varpi} \quad (36)$$

基于上式且运用性质 2, 关于 OTEC 系统的弹性形变的不等式可以推导为

$$\begin{aligned} \frac{\varpi_1}{L} [w(x, t)]^2 \leq & \varpi_1 \int_0^L [y'(x, t)]^2 dx \leq \varpi_1 G(t) \leq \\ & \left[H(t_0) - \frac{\eta}{\varpi} \right] e^{-\varpi(t-t_0)} + \frac{\eta}{\varpi} \end{aligned} \quad (37)$$

进一步地, 上式变形为

$$|w(x, t)| \leq \sqrt{\frac{L}{\varpi_1 T} \left[\left[H(t_0) - \frac{\eta}{\varpi} \right] e^{-\varpi(t-t_0)} + \frac{\eta}{\varpi} \right]} \leq \sqrt{\frac{L}{\varpi_1 T} \left[H(t_0) e^{-\varpi(t-t_0)} + \frac{\eta}{\varpi} \right]} \quad (38)$$

□

说明 1. OTEC 系统中柔性管道的弹性形变最终收敛于系统的平衡位置附近, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |w(x, t)| \leq \sqrt{\frac{L\eta\varpi_2}{\varpi_1\varpi_3 T}} \quad (39)$$

说明 2. 在上文中所设计的边界控制器 (21) 和 (22) 都是由柔性结构的边界信号做成, 以及所有的组成信号都能由安装在柔性结构边界处的传感器检测或通过向后差分算法计算得到. 信号 $y(L, t)$ 和 $p(t)$ 可以由激光位移传感器检测得到, $y'(L, t)$ 可以由倾角计检测得到, $y'''(0, t)$ 和 $y'''(L, t)$ 可以由剪切力传感器检测得到. 此外, 它们的时间导数信号 $\dot{p}(t)$, $\dot{y}(L, t)$, $\dot{y}'(L, t)$, $\dot{y}'''(0, t)$ 和 $\dot{y}'''(L, t)$ 可以基于检测的信号并通过向后差分算法计算得到.

说明 3. 由式 (36) 可以看出, $H(t)$ 是一个有上界的函数, 那么, 组成 $H(t)$ 的正实函数 $H_2(t)$ 也是有界的, 从该函数的表达式 (17) 可以推导知道期望的输出信号 $y(0, t)$, $w(L, t)$ 不会趋近所设定的约束值 Y_0 , W_L . 如果系统中的边界初始值 $y(0, 0)$, $w(L, 0)$ 在所设定的约束范围内, 那么, 在上文所设计边界控制器 (21) 和 (22) 的作用下, 所期望的输出信号 $y(0, t)$, $w(L, t)$ 就一直不会达到设定的约束界值 Y_0 , W_L , 即, OTEC 系统中存在的输出约束问题得到了解决.

3 数字仿真

在上一节中, 在 OTEC 系统的两端设计了两个边界控制器, 并通过理论的证明验证了所设计控制器的有效性. 为了进一步地对设计控制器进行验证, 我们将运用有限差分法 (Finite differential method, FDM) 来对 OTEC 系统进行数字仿真, 通过所得到的仿真结果来显示控制器的控制性能. 在表 1 中列出了 OTEC 系统的各个参数, 系统的初始值设定为 $y(x, 0) = x/L$ 以及 $\dot{y}(x, 0) = 0$.

OTEC 系统中所受到的分布式扰动 $f(x, t)$ 借鉴之前的工作^[34-35] 直接给出

$$f(x, t) = \frac{1}{2} \rho_s C_D(x, t) U^2(x, t) D + A_D \cos(4\pi f_v t) \quad (40)$$

表 1 浮式 OTEC 系统的参数

Table 1 Parameters of floating OTEC system

参数	参数值	参数	参数值
L	1 000 m	ρ	500 kg/m
EI	2.5×10^4 N·m ²	T	1×10^7 N
M_s	9.0×10^4 kg	M_0	9.5×10^6 kg
c	2 N·s/m ²	d_s	2.0×10^3 N·s/m ²
d_0	9.0×10^2 N·s/m ²		

由上式可知, 作用于柔性输水管上的分布式扰动 $f(x, t)$ 由两部分组成, 即, 一个平均的作用力以及一个振荡的作用力, 其中, ρ_s 是海水密度, D 为柔性管道的直径, C_D 为拉力系数. θ 是相位角以及 A_D 为幅值, 其大小通常为分布式扰动中第 1 项的 20%. 涡流频率 f_v 表示为 $f_v = S_t U(x, t)/D$, 其中, S_t 为斯特劳哈尔数, 时变海洋涌流 $U(x, t)$ 和洋表涌流 $U(t)$ 设定为 $U(x, t) = \frac{x}{1000} U(t)$.

边界扰动 $p_z(t)$ 和 $p_v(t)$ ^[36-37] 设定为

$$\begin{aligned} p_z(t) &= 1.024 \times 10^3 \times U(t)^2 \\ p_v(t) &= [8 \sin(0.2t) + 5 \sin(0.5t) + 2 \sin(0.7t)] \times 10^3 \end{aligned} \quad (41)$$

其中, $U(t) = \bar{U} + \sum_{i=1}^4 U'_i \sin(\omega_i t)$ 且式中各参数在表 2 中列出.

表 2 扰动参数

Table 2 Parameters of ocean disturbances

参数	参数值	参数	参数值
U'_1	0.8 m/s	ω_3	2.946 rad/s
U'_2	1.0 m/s	ω_4	4.282 rad/s
U'_3	1.0 m/s	D	0.15 m
U'_4	1.0 m/s	ρ_s	1 024 kg/m ³
\bar{U}	0.5 m/s	S_t	0.2
A_D	1.0	C_D	1.0
ω_1	0.867 rad/s	ω_2	1.827 rad/s

针对 OTEC 系统并基于以上设定的环境与系统参数, 我们将做 3 组仿真实验, 然后将 3 组的仿真结果进行对比分析:

1) 不施加控制. 首先, 在这种情况下, 针对 OTEC 系统不施加任何控制, 即, $u_1(t) = u_0(t) = 0$, 得到了 3 个仿真结果来描述系统的运动情况. 通过描绘柔性输水管道运动的三维图 (如图 2 所示), 我们看到柔性输水管道的呈现一个发散式的增长. 通过观察结构两端位置的运动情况, 如图 3(a) 和图

4(a) 可以看到, 系统下端位置的振动也是呈现发散式增长, 海洋表面的浮式平台漂移偏离了原始的位置. 由以上的仿真图, 我们可以看到该系统处于一个不稳定状态, 不断增大的柔性结构振动可能会导致系统的损毁, 同时, OTEC 系统在外界海洋扰动的影响下会偏离初始的位置. 处于系统安全的考虑, 需要提出有效的方法来减小系统的振动, 保证系统的工作安全.

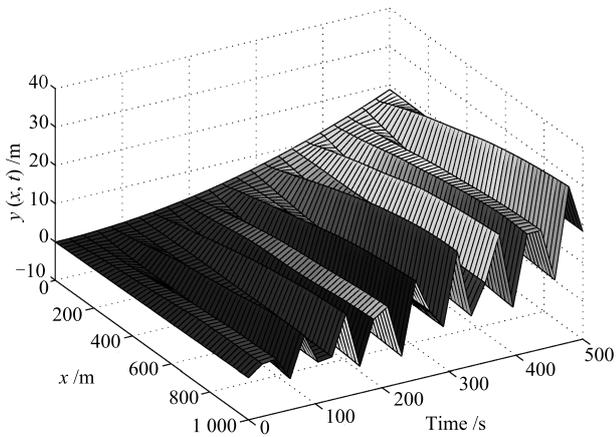
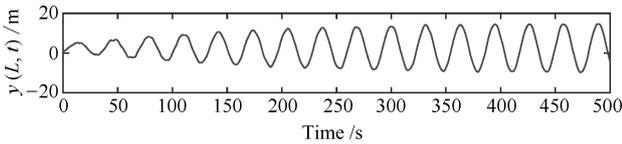


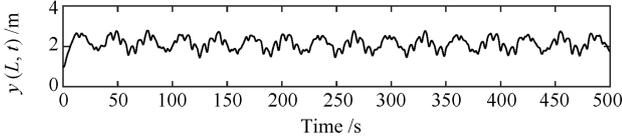
图 2 不加控制器下的柔性输水管道的位移量

Fig. 2 Displacement of the flexible pipe without control



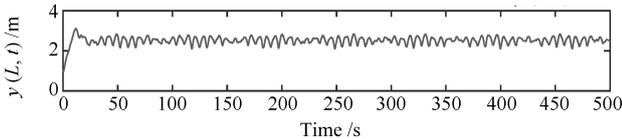
(a) 未施加控制下的下端镇重物的位移量: $y(L, t)$

(a) Displacement of the ballast without control: $y(L, t)$



(b) 施加 PD 控制下的下端镇重物的位移量: $y(L, t)$

(b) Displacement of the ballast under PD control: $y(L, t)$



(c) 施加主动振动控制下的下端镇重物的位移量: $y(L, t)$

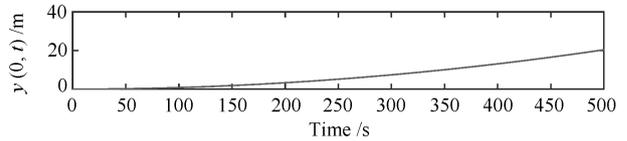
(c) Displacement of the ballast under active vibration control: $y(L, t)$

图 3 柔性输水管道下端镇重物的位移量

Fig. 3 Displacement of the ballast

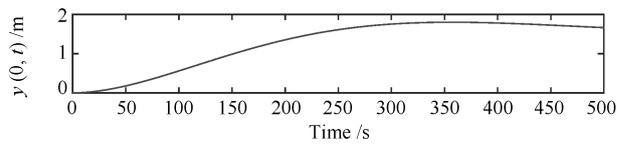
2) PD 控制. 在工程中, 比例-微分 (Proportional-derivative, PD) 控制器是十分常用的一种控

制方法. 在这种情况下, 我们在柔性输水管道的端点位置施加典型的 PD 控制器来分析其对系统振动抑制的情况. 我们将该控制器设计为: $u_1(t) = -100 \times y(L, t) - 100\,000\dot{y}(L, t)$ 和 $u_2(t) = -200y(0, t) - 50\,000\dot{y}(0, t)$. 同样地, 我们得到了系统各位置运动情况的仿真图, 从仿真得到的图 5 和图 3(b) 可以看出, OTEC 系统中柔性结构的形变量得到了一定的减小. 系统上端的浮式平台也被控制在原始点附近位置做类周期往复运动, 如图 4(b) 所示. 将这种情况与未施加任何控制的情况相比较, 可以看到 PD 边



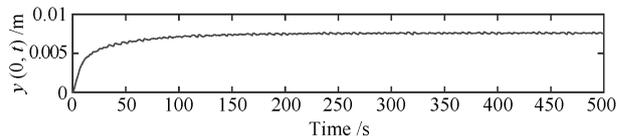
(a) 未施加控制下的转换平台的位移量: $y(0, t)$

(a) Displacement of the platform without control: $y(0, t)$



(b) 施加 PD 控制下的转换平台的位移量: $y(0, t)$

(b) Displacement of the platform under PD control: $y(0, t)$



(c) 施加主动振动控制下的转换平台的位移量: $y(0, t)$

(c) Displacement of the platform under active vibration control: $y(0, t)$

图 4 上端浮式平台的位移量

Fig. 4 Displacement of the floating platform

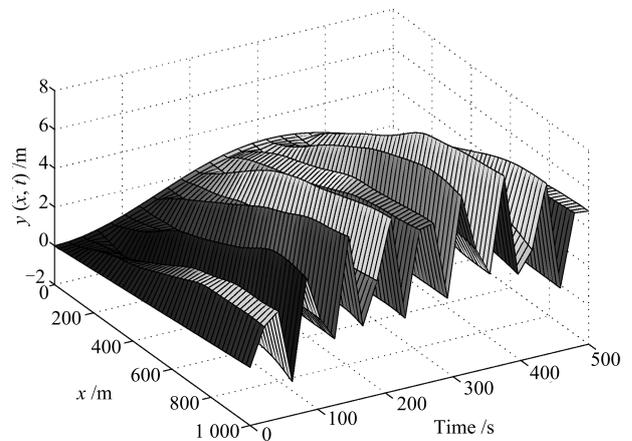


图 5 施加 PD 控制器下的柔性输水管道的位移量

Fig. 5 Displacement of the flexible pipe with PD controllers

界控制器能够一定程度上保证系统的稳定性以及固定 OTEC 装置平台的工作位置, 但是效果并不特别理想.

3) 所设计边界控制. 在这种情况下, 我们将设计主动边界控制器 (22) 和 (21) 施加到柔性输水管道上. 通过上一节中确定的控制增益范围结合实际的仿真结果, 选定各控制增益为: $k_a = 0.01$, $k_b = 1000$, $k_c = 10^6$, $k_d = 10^6$, $k_1 = 500$, $k_2 = 0.7$, $k_3 = 155$ 以及 $k_4 = 1$. 作为比较, 我们也得到一个三维图和两个端点位置的运动图, 图 6 描绘了在本文所设计控制器的作用下, 系统中柔性管道的形变量的变化情况, 从图形的变化可以很容易地看出, 柔性输水管道的形变量得到了减小. 同时, 系统中柔性管道的下端负载的形变量也减小到了零附近, 如图 3(c) 图. 除此之外, 从图 4(c) 的下图可以看出, 系统的浮式平台也在出现大幅振荡往复之后逐渐向初始位置运动. 最后, 给出了控制器的变化图, 如图 7 所示.

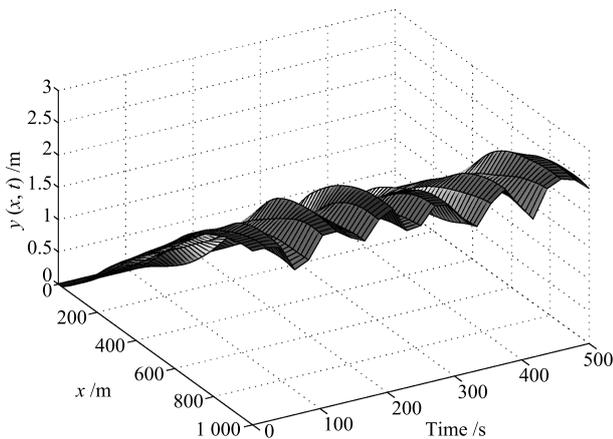


图 6 施加所设计控制器下的柔性输水管道的位移量
Fig. 6 Displacement of the flexible pipe with the designed controllers

通过以上三种情况下系统动力学特性的相互比较, 可以清楚地看到, 构造的 PD 控制器和本文所设计的控制器都能够减小由外界扰动引起的 OTEC 系统中柔性管道的剧烈振动. 通过比较这两种控制器的控制性能, 可以看到本文所设计的控制器具有更好的控制效果, 能够得到更好的瞬态和稳态特性, 此外, 该控制器还能保证海洋表面系统的浮式工作平台固定在初始的工作点附近. 总体上来说, 通过仿真实验, 得到了和理论分析一致的结果, 从分析的结果中均可以看到所设计的主动边界控制能够有效地抑制 OTEC 系统中的不良振动, 保证系统的稳定.

4 结论

本文针对 OTEC 系统中柔性管道的振动问题

设计了主动的边界控制器, 利用柔性结构边界位置的信号组成控制器并实施在边界位置上来抑制整段柔性管道的形变以及保证系统满足存在的输出约束问题. 通过理论和数字仿真的分析与研究验证了所设计的振动控制器的有效性. 然而, 本文只是考虑了 OTEC 系统在水平方向的振动, 忽略了柔性结构在其他两个方向的振动以及各方向上振动的耦合关系. 三维空间下浮式 OTEC 系统的振动研究是一个具有挑战性的工作. 此外, 对于浮式的平台, 锚链常用固定洋表浮式平台, 柔性管道结构和柔性锚泊结构的耦合也是今后能够继续研究的方向. 此外, 本文中设计的边界控制是由可测量值构成. 然而, 在控制器的执行过程中可能还会存在超出最大功率等输入约束的影响, 我们也将接下来的工作中综合考虑输入约束对系统的影响以及进行设计抗输入约束的主动振动控制设计的研究.

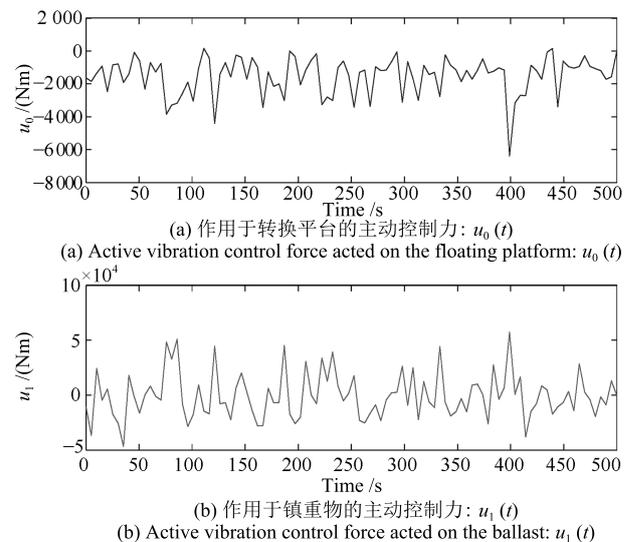


图 7 设计的主动振动控制力
Fig. 7 Designed vibration control forces

References

- 1 Yeh R H, Su T Z, Yang M S. Maximum output of an OTEC power plant. *Ocean Engineering*, 2005, **32**(5): 685–700
- 2 Straatman P J T, Wilfried G J H M van Sark. A new hybrid ocean thermal energy conversion-offshore solar pond (OTEC-OSP) design: a cost optimization approach. *Solar Energy*, 2008, **82**(6): 520–527
- 3 Yuan H, Mei N, Hu S, Wang L, Yang S. Experimental investigation on an ammonia-water based ocean thermal energy conversion system. *Applied Thermal Engineering*, 2013, **61**(2): 327–333
- 4 Tchanche B F, Pétrissans M, Papadakis G. Heat resources and organic rankine cycle machines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **39**: 1185–1199

- 5 Rajagopalan K, Nihous G C. Estimates of global ocean thermal energy conversion (OTEC) resources using an ocean general circulation model. *Renewable Energy*, 2013, **50**: 532–540
- 6 Nihous G C. An estimate of Atlantic ocean thermal energy conversion (OTEC) resources. *Ocean Engineering*, 2007, **34**(17): 2210–2221
- 7 Wang L, Huang C B. Dynamic stability analysis of a grid-connected solar-concentrated ocean thermal energy conversion system. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010, **1**(1): 10–18
- 8 He W, Ge S S, How B V E, Choo Y S. *Dynamics and Control of Mechanical Systems in Offshore Engineering*. London, UK: Springer, 2014.
- 9 Wang J M, Ren B, Krstic M. Stabilization and gevrej regularity of a Schrödinger equation in boundary feedback with a heat equation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, **57**(1): 179–185
- 10 Wu H N, Wang J W. Static output feedback control via PDE boundary and ODE measurements in linear cascaded ODE — beam systems. *Automatica*, 2014, **50**(11): 2787–2798
- 11 Luo B, Wu H N, Li H X. Adaptive optimal control of highly dissipative nonlinear spatially distributed processes with neuro-dynamic programming. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2015, **26**(4): 684–696
- 12 Wang J W, Wu H N, L H X. Stochastically exponential stability and stabilization of uncertain linear hyperbolic PDE systems with Markov jumping parameters. *Automatica*, 2012, **48**(3): 569–576
- 13 Endo T, Matsuno F, Jia Y M. Boundary cooperative control by flexible Timoshenko arms. *Automatica*, 2017, **81**: 377–389
- 14 Guo B Z, Jin F F. The active disturbance rejection and sliding mode control approach to the stabilization of the Euler-Bernoulli beam equation with boundary input disturbance. *Automatica*, 2013, **49**(9): 2911–2918
- 15 Jin F F, Guo B Z. Lyapunov approach to output feedback stabilization for the Euler-Bernoulli beam equation with boundary input disturbance. *Automatica*, 2015, **52**(1): 95–102
- 16 He W, Zhang S, Ge S S. Boundary control of a flexible riser with application to marine installation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, **60**(12): 5802–5810
- 17 Do K D. Stochastic boundary control design for extensible marine risers in three dimensional space. *Automatica*, 2017, **77**(3): 184–197
- 18 Bhikkaji B, Moheimani S O R, Petersen I R. A negative imaginary approach to modeling and control of a collocated structure. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, **17**(4): 717–727
- 19 Wang F Y, Gao Y Q. On Frequency sensitivity and mode orthogonality of flexible robotic manipulators. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, **3**(4): 394–397
- 20 Zhang S. Sliding mode control for an inhomogeneous heat equation with global constraint. *Asian Journal of Control*, 2017, **19**(6): 2116–2126
- 21 He W, He X Y, Ge S S. Vibration control of flexible marine riser systems with input saturation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, **21**(1): 254–265
- 22 Endo T, Sasaki M, Matsuno F, Jia Y M. Contact-force control of a flexible timoshenko arm in rigid/soft environment. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2016, **62**(5): 2546–2553
- 23 Do K D, Sasaki M, Matsuno F, Jia Y M. Modeling and boundary control of translational and rotational motions of nonlinear slender beams in three-dimensional space. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, **389**: 1–23
- 24 Cai X S, Krstic M. Nonlinear stabilization through wave PDE dynamics with a moving uncontrolled boundary. *Automatica*, 2016, **68**: 27–38
- 25 Paranjape A A, Guan J, Chung S J, Krstic M. PDE boundary control for flexible articulated wings on a robotic aircraft. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, **29**(3): 625–640
- 26 Liu Z J, Liu J K, He W. Modeling and vibration control of a flexible aerial refueling hose with variable lengths and input constraint. *Automatica*, 2017, **77**: 302–310
- 27 Zhao Z J, Liu Z J, Li Z F, Wang N, Yang J F. Control design for a vibrating flexible marine riser system. *Journal of the Franklin Institute*, 2017, **354**(18): 8117–8133
- 28 Zhao Z J, Liu Y, Guo F, Fu Y. Modelling and control for a class of axially moving nonuniform system. *International Journal of Systems Science*, 2017, **48**(4): 849–861
- 29 Liu Z J, Liu J K, He W. Robust adaptive fault tolerant control for a linear cascaded ODE-beam systems. *Automatica*, 2018, **98**: 42–50
- 30 He X Y, He W, Shi J, Sun C Y. Boundary vibration control of variable length crane systems in two dimensional space with output constraints. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, **22**(5): 1952–1962
- 31 Rahn C D. *Mechatronic Control of Distributed Noise and Vibration*. New York, USA: Springer-Verlag, 2001.
- 32 Hardy G H, Littlewood J E, Polya G. *Inequalities*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1959.
- 33 Polycarpou M M, Loannou P A. A robust adaptive nonlinear control design. *Automatica*, 1996, **32**(3): 423–427
- 34 Blevins R D. *Flow-induced Vibration*. New York, USA: Van Nostrand Reinhold, 1977.
- 35 Faltinsen O M. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.
- 36 Skjetne R, Fossen T I, Kokotović P V. Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory. *Automatica*, 2005, **41**(2): 289–298

- 37 Tee K P, Ge S S. Control of fully actuated ocean surface vessels using a class of feedforward approximators. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, **14**(4): 750–756



何修宇 北京科技大学自动化学院控制科学与工程专业博士研究生. 2016 年获得电子科技大学自动化工程学院控制科学与工程专业工学硕士学位. 主要研究方向为分布参数系统, 海洋控制论, 机器人. E-mail: bhilly@163.com

(**HE Xiu-Yu** Ph.D. candidate at the School of Automation and Electrical

Engineering, University of Science and Technology Beijing. He received his master degree in control science and engineering from the School of Automation Engineering and Center for Robotics, University of Electronic Science and Technology of China in 2016. His research interest covers distributed parameter system, marine cybernetics, and robotics.)



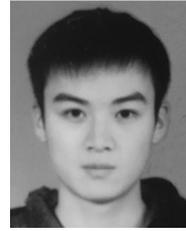
王雪璇 北京科技大学自动化学院智能科学与技术专业本科生. 主要研究方向为机器学习, 智能控制, 柔性结构边界振动控制.

E-mail: m17801001261_2@163.com

(**WANG Xue-Xuan** Undergraduated student at the University of Science and Technology Beijing. Her

research interest covers machine learning, intelligent

control, and boundary vibration control.)



赵哲惟 北京科技大学自动化学院智能科学与技术专业本科生. 主要研究方向为机器学习, 智能控制, 柔性结构边界振动控制.

E-mail: zhaozhewei@hotmail.com

(**ZHAO Zhe-Wei** Undergraduated student at the University of Science and Technology Beijing. His research inter-

est covers machine learning, intelligent control, and boundary vibration control.)



张爽 北京科技大学自动化学院副教授. 2012 年获得新加坡国立大学博士学位. 主要研究方向为机器人控制, 智能控制以及分布参数系统控制. 本文通信作者.

E-mail: zhangshuang.ac@gmail.com

(**ZHANG Shuang** Associate professor at the School of Automation and

Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing (USTB). She received her Ph.D. degree from the Department of Electrical and Computer Engineering, the National University of Singapore (NUS), Singapore, in 2012. Her research interest covers robotics, intelligent control, and distributed parameter systems. Corresponding author of this paper.)