

1-8-2019

Modeling and Co-simulation of Novel Electric Heave Compensation System

Zhang Qing

School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

Xia Hua

School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

Yang Ning

School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

Xianrong Qin

School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Co-simulation of Novel Electric Heave Compensation System

Abstract

Abstract: *This paper presents a novel large electric heave compensation system with gear and rack driving mechanism, as comparison to those traditional hydraulic heave compensation systems which have complex structure and poor compensation accuracy.* The mechanical-mathematical model of this compensation system is analyzed. According to the control requirement of the heave absolute displacement compensation, the relationship between the input angle of the motor and the excitation of the vessel's displacement is obtained through the motion equation of the system. A virtual prototype is built with ADAMS, and the dynamic behaviors are simulated in accordance with its configuration and working principle. The effectiveness of the heave compensation system as well as the design parameters is verified. Because the heave signal acquired by the vessel is unknown, it is necessary to introduce the feedback control for more accurate active compensation. The feedback control system model is built with Simulink, and the co-simulation is conducted with ADAMS. The simulation result shows that this electric compensation system can well achieve heave compensation function, and has advantage of high accuracy by PID control.

Keywords

heave compensation, dynamic model, PID control, co-simulation

Authors

Zhang Qing, Xia Hua, Yang Ning, Xianrong Qin, and Yuantao Sun

Recommended Citation

Zhang Qing, Xia Hua, Yang Ning, Qin Xianrong, Sun Yuantao. Modeling and Co-simulation of Novel Electric Heave Compensation System[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 2973-2981.

新型电动升沉补偿系统建模及联合仿真

张氢, 夏华, 杨宁, 秦仙蓉, 孙远韬

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对传统大型液压式升沉补偿系统结构复杂, 补偿精度差等不足, 提出了一种新型的大型电动齿轮齿条式升沉补偿系统, 根据其结构形式及工作原理, 建立补偿系统力学-数学模型。根据升沉补偿中吊重绝对位移保持不变的控制要求, 求解系统的运动方程, 得到了电机输入转角与母船位移激励之间的关系。在 ADAMS 中建立了虚拟样机并进行动力学仿真, 仿真结果验证了补偿系统及其设计参数的有效性。由于母船所受波浪的激励信号是未知的, 需引入反馈控制, 在 Simulink 中搭建了带反馈的控制系统模型, 并与 ADAMS 进行联合仿真, 仿真结果表明: 该电动升沉补偿系统通过 PID 控制, 能有效实现升沉补偿功能, 并具有补偿精度高的优点。

关键词: 升沉补偿; 动力学建模; PID 控制; 联合仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 08-2973-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808019

Modeling and Co-simulation of Novel Electric Heave Compensation System

Zhang Qing, Xia Hua, Yang Ning, Qin Xianrong, Sun Yuantao

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper presents a novel large electric heave compensation system with gear and rack driving mechanism, as comparison to those traditional hydraulic heave compensation systems which have complex structure and poor compensation accuracy. The mechanical-mathematical model of this compensation system is analyzed. According to the control requirement of the heave absolute displacement compensation, the relationship between the input angle of the motor and the excitation of the vessel's displacement is obtained through the motion equation of the system. A virtual prototype is built with ADAMS, and the dynamic behaviors are simulated in accordance with its configuration and working principle. The effectiveness of the heave compensation system as well as the design parameters is verified. Because the heave signal acquired by the vessel is unknown, it is necessary to introduce the feedback control for more accurate active compensation. The feedback control system model is built with Simulink, and the co-simulation is conducted with ADAMS. The simulation result shows that this electric compensation system can well achieve heave compensation function, and has advantage of high accuracy by PID control.

Keywords: heave compensation; dynamic model; PID control; co-simulation

引言

因海上环境恶劣, 海上吊装和施工设备会受到

风、浪、流、涌等的影响, 不仅会影响正常作业, 甚至会威胁到作业母船及人员安全并造成海上环境污染^[1]。



收稿日期: 2016-10-21 修回日期: 2017-01-11;
作者简介: 张氢(1967-), 男, 江苏南通, 博士, 教授, 研究方向为建设机械及其关键技术; 夏华(1990-), 男, 河南信阳, 硕士生, 研究方向为机械系统动力学; 杨宁(1991-), 男, 甘肃兰州, 硕士生, 研究方向为机械结构及动力学。

舰船在海浪的作用下, 有 6 个方向的运动即沿坐标轴方向的 3 个往复振荡和绕坐标轴的 3 个旋转振荡。升沉补偿系统正是为了补偿海浪在垂直于海平面方向上的运动对船体的影响^[2]。

<http://www.china-simulation.com>

• 2973 •

传统大型升沉补偿系统是集机、电、气、液、智能检测、自动控制为一体的复杂设备,具有技术含量高、投入巨大、风险高等特点^[3]。这类的大型海上吊装升沉补偿装置主要靠液压驱动,如果是被动式升沉补偿则往往补偿效率低,性能不稳定,还有严重的滞后现象^[4-5]。为了提高补偿效果,产生了很多种主动式升沉补偿系统^[6-8]。Kirstein^[8]设计了一种主动式升沉补偿系统,该系统装备了动力匹配单元和储能泵,通过回收能量来提高工作效率。徐小军^[9]等利用差动行星齿轮传动机构,提出了一种新型的主动式深沉补偿系统。陈爱国^[10]通过改变了执行机构为六自由度并联机器人,实现了舰船过驳波浪运动全方位的主动补偿。

本文研究的新型电动齿轮齿条式大型升沉补偿系统,属于主动式升沉补偿系统,且补偿功能由齿轮齿条与滑轮导向机构共同完成,系统采用全电驱动,具有结构简单、惯量小、响应快和能耗少等优点。

1 升沉补偿系统的组成及工作原理

本文的新型电动齿轮齿条式升沉补偿系统如图1所示,由钢丝绳、折线卷筒、摩擦卷筒组、齿轮齿条机构、滑轮导向机构、超级电容、电动机、减速箱及制动器和其它辅助系统组成。图中:1表示储缆绞车;2表示储缆绞车电机行星减速驱动系统;3表示摩擦卷筒;4表示摩擦卷筒电机行星减速驱动系统;5表示输出齿轮电机行星减速驱动系统;6表示齿轮齿条机构;7表示动滑轮;8表示定滑轮;9表示工作母船;10表示钢丝绳;11表示吊重。

该升沉补偿系统有两种工作模式,其工作原理如下:

(1) 收放功能:用于收起或下放吊重至指定工作水深。当母船进入到工作区域后,下放吊重时,保持齿轮齿条机构处于恒定的位置,电机驱动摩擦卷筒组带动钢丝绳下行。反之,要收起吊重时,电机驱使摩擦卷筒组反向转动,将钢丝绳缠绕在折线

卷筒上。

(2) 升沉补偿功能:用于补偿因海浪等引起的母船扰动对吊重在升沉方向上运动的影响。母船随海浪上浮、下沉时,吊重也随之上浮、下沉。

实际工程中,母船的运动观测由MRU(运动参考单元,包含多个加速度传感器与陀螺仪传感器)完成。当MRU观测到母船升沉数据后,系统会采用低通、卡尔曼滤波等技术过滤波浪中高频与噪声成分。PLC控制单元接收到母船升沉位移与主动补偿电机轴旋转角位移电信号后,依据制定好的控制策略向主动补偿电机变频驱动系统发出信号,控制行星减速箱输入轴正反向转动,使得钢丝绳按照与母船升沉相反的方向运动,以维持吊重绝对位置不变。

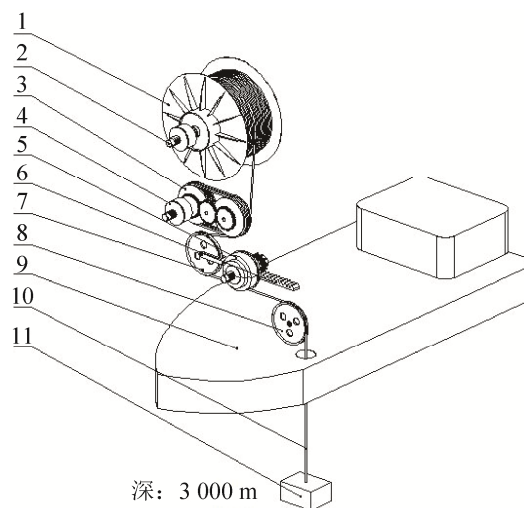


图1 电动升沉补偿系统简图

Fig. 1 Diagram of electric heave compensation system

根据大自然的规律,在数分钟的短期时间内,前后连续的若干个升沉波一般不会发生剧烈突变,因此在正式施工之前,通过一段时间的连续观测就能掌握并预测随后施工时段母船的升沉规律,最后再加上实时的测量就有可能更好地进行补偿工作。

大型升沉补偿系统整个机械系统的结构较大、具有较大的惯性,所以如何保证升沉补偿系统的机械传动部分能够准确、及时地对激励进行响应,即

整个补偿系统及其参数对跟踪升沉运动的有效性, 这是本文研究的主要内容。

2 升沉补偿系统动力学建模

2.1 控制系统方式

升沉补偿系统控制方式主要包括吊重位移补偿、升沉速度补偿和钢丝绳张力补偿^[11]。这三种补偿方式的反馈信号分别为吊重绝对位移、母船升沉速度与吊重补偿相对速度和钢丝绳张力信号。本文研究的电动升沉补偿系统主要实现吊重绝对位移保持不变的功能, 故采用的是吊重位移补偿方式。

升沉补偿系统的外扰动主要来自于船在波浪、涌等作用产生的浮沉运动, 并通过钢丝绳传递到吊重上, 从而影响吊重的绝对位移。根据吊重绝对位移保持不变的控制要求, 以设置的吊重位移与吊重实际位移的差值作为 PID 控制的反馈信号, 输入为补偿电机的转角, 使吊重位移产生相应的变化, 进而消除位移偏差, 达到控制的要求。控制系统的框图如图 2 所示。

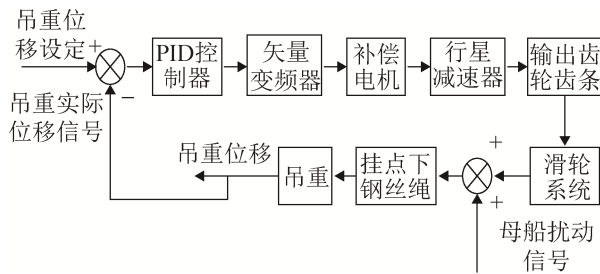


图 2 闭环控制系统框图
Fig. 2 Closed-loop control system diagram

2.2 升沉补偿系统力学建模

考虑实际系统的复杂性, 建立力学模型时做了以下假设: 只考虑船体在垂直于海平面的平面内做竖向位移, 忽略其它方向的位移; 钢丝绳等效为弹簧—阻尼模型; 忽略洋流对钢丝绳的影响; 忽略滑轮系统的惯性及阻尼; 忽略悬挂点以上部分钢丝绳的特性。

该升沉补偿系统为二自由度系统, 广义坐标取为吊重的升沉位移 $x_1(t)$ 与减速系统的输出转角

$x_2(t)$, 强迫位移激励为母船的升沉位移 $u_1(t)$ 和电动机的转角 $u_2(t)$, 得到简化力学模型如图 3 所示。

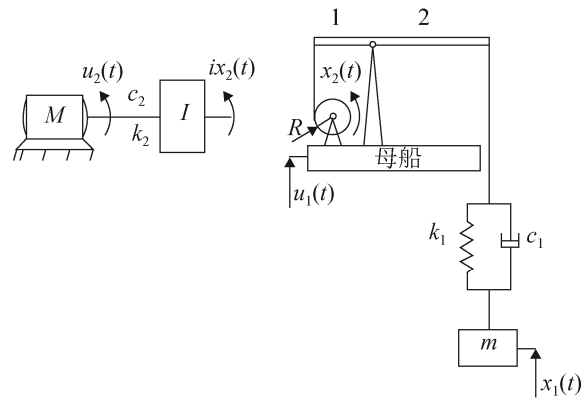


图 3 电动升沉补偿系统力学模型
Fig. 3 Mechanical model of electric heave compensation system

图 3 中: m_{eq} 为等效负载质量; I 为等效转动惯量; R 为输出齿轮分度圆半径; i 为补偿行星减速器总传动比; k_1 为悬挂点以下部分钢丝绳的刚度; c_1 为悬挂点以下部分钢丝绳-吊重系统的阻尼系数; k_2 为从电机轴到输出齿轮部分的扭转刚度; c_2 为从电机轴到输出齿轮部分的阻尼系数。

将强迫位移激励 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 等效为相应的激励力:

$$f_{eq1}(t) = k_1 u_1(t) + c_1 \dot{u}_1(t) \quad (1)$$

$$f_{eq2}(t) = k_2 u_2(t) + c_2 \dot{u}_2(t) \quad (2)$$

根据能量法可列出上述二自由度系统的运动方程。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i} = p_i(t), i=1,2 \quad (3)$$

式中: E_k 为系统的动能函数; E_p 为系统的势能函数; E_D 为系统的散逸函数; q_i 为广义坐标; $p_i(t)$ 为对应于非势力的广义力。

系统的动能函数为:

$$E_k = \frac{1}{2} m_{eq} \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} I i^2 \dot{x}_2^2 \quad (4)$$

系统的势能函数为:

$$E_p = \frac{1}{2} k_1 (2R x_2 - x_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (i x_2)^2 \quad (5)$$

系统的散逸函数为:

$$E_D = \frac{1}{2} c_1 (2R\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2} c_2 (\dot{x}_2)^2 \quad (6)$$

所以, 系统的特性矩阵分别为:

$$M = \begin{bmatrix} m_{eq} & 0 \\ 0 & i^2 I \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & -2Rc_1 \\ -2Rc_1 & i^2 c_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & -2Rk_1 \\ -2Rk_1 & i^2 k_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由此可得系统的运动方程为:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & i^2 I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & -2Rc_1 \\ -2Rc_1 & i^2 c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -2Rk_1 \\ -2Rk_1 & i^2 k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_1 u_1(t) + c_1 \dot{u}_1(t) \\ k_2 u_2(t) + c_2 \dot{u}_2(t) \end{Bmatrix} \quad (10)$$

为简化起见, 将运动方程改写为:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & i^2 I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q(u_1) \\ Q(u_2) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

升沉补偿的目标是使得吊重的绝对位移、速度保持为零, 则令:

$$x_1 = \dot{x}_1 = \ddot{x}_1 = 0 \quad (12)$$

$$\text{得: } \begin{cases} c_{12} \dot{x}_2 + k_{12} x_2 = Q(u_1) \\ i^2 \ddot{x}_2 + c_{22} \dot{x}_2 + k_{22} x_2 = Q(u_2) \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)解一阶微分方程可得:

$$x_2(t) = C_1 e^{-\left(\frac{k_{12}}{c_{12}} t + C_2\right)} + e^{-\left(\frac{k_{12}}{c_{12}} t + C_2\right)} \int \frac{1}{c_{12}} Q(u_1) e^{\left(\frac{k_{12}}{c_{12}} t + C_2\right)} dt \quad (14)$$

求导得:

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{k_{12} C_1}{c_{12}} e^{-\left(\frac{k_{12}}{c_{12}} t + C_2\right)} - \frac{k_{12}}{c_{12}} e^{-\left(\frac{k_{12}}{c_{12}} t + C_2\right)} \int \frac{1}{c_{12}} Q(u_1) e^{\left(\frac{k_{12}}{c_{12}} t + C_2\right)} dt + \frac{k_{12}}{c_{12}} Q(u_1) \quad (15)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{k_{12} C_1}{c_{12}} e^{-\left(\frac{k_{12}}{c_{12}} t + C_2\right)} +$$

$$\frac{k_{12}}{c_{12}} e^{-\left(\frac{k_{12}}{c_{12}} t + C_2\right)} \int \frac{1}{c_{12}} Q(u_1) e^{\left(\frac{k_{12}}{c_{12}} t + C_2\right)} dt -$$

$$\frac{k_{12}}{c_{12}} \frac{1}{c_{12}} Q(u_1) + \frac{k_{12}}{c_{12}} \frac{dQ(u_1)}{dt} \quad (16)$$

式中: C_1 、 C_2 为任意常数。

将式(14)~(16)带入到式(13)中, 再解一阶微分方程可得 $u_2(t)$ 关于 $u_1(t)$ 的表达式, 得:

$$u_2(t) = -\frac{i}{2R} u_1(t) \quad (17)$$

相关参数取值如表 1 所示。

表 1 模型相关参数
Tab. 1 Parameters related model

名称	符号	数值
输出齿轮分度圆半径/m	R	0.33
补偿用行星减速器传动比	i	102.75
等效负载质量/kg	m_{eq}	3.1×10^4
钢丝绳-吊重系统刚度/(N/m)	k_1	28 067
钢丝绳-吊重系统阻尼/(Ns/m)	c_1	1 281.25
等效转动惯量/ kgm^2	I	18
从电机轴到输出齿轮部分的扭转刚度/(Nm/rad)	k_2	280 670
从电机轴到输出齿轮部分的阻尼系数/(Nms/rad)	c_2	1 281.25

3 升沉补偿系统动力学分析

为了验证补偿系统能够实现补偿功能, 进一步对该新型电动齿轮齿条式升沉补偿系统进行动力学仿真。

3.1 虚拟样机的建立

建立行星减速器、齿轮齿条、滑轮组、吊重、母船及钢丝绳等部件三维实体模型并装配, 忽略在升沉补偿过程中不参与运动的摩擦卷筒、储缆绞车等。钢丝绳在三维模型中只起定位作用。

虚拟样机由如图 4 所示的 3 个部分组成, 关键部分是传动系统和缠绕系统。虚拟样机中除了钢丝绳为柔性体, 其它部分均为刚体。刚体的建模只需

将三维模型导入 ADAMS 中定义材料属性即可。钢丝绳的建模方法是将钢丝绳离散为多刚体, 多刚体之间通过轴套力相互联系。

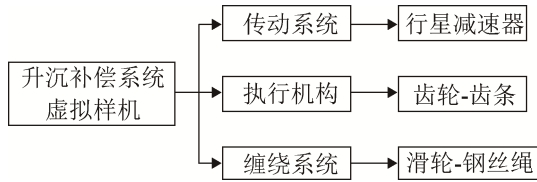


图 4 升沉补偿系统虚拟样机组成

Fig. 4 Virtual prototype of heave compensation system

3.1.1 缠绕系统建模

缠绕系统建模步骤如下:

- (1) 确定位置: 在 PRO/E 中建立缠绕系统的三维模型, 确定钢丝绳和滑轮之间的位置关系。
- (2) 创建离散钢丝绳刚体: 在确定的位置创建一定直径、长度的钢丝绳离散刚体。
- (3) 复制、移动钢丝绳离散体: 使用宏命令实现循环复制、移动, 完成钢丝绳的多刚体模型。
- (4) 添加轴套力: 上述建立的离散体是独立存在的, 需利用宏命令对相邻的两个离散体添加轴套力, 使其产生联系, 形成具有能够模拟钢丝绳动态特性的柔性体。

轴套力是一个六分量的弹簧结构, 用于抵抗外力与外力矩。轴套力满足式(18)^[12-13]:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & & & & & \\ & K_{22} & & & & \\ & & K_{33} & & & \\ & & & K_{44} & & \\ & & & & K_{55} & \\ & & & & & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & & & & & \\ & C_{22} & & & & \\ & & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{55} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \\ T_{x0} \\ T_{y0} \\ T_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: F, T 分别为力和力矩; $R, \theta, V, \dot{\theta}$ 分别为 I-Marker、J-Marker 标记之间的相对位移、转角、

速度和角速度; K, C 分别为刚度和阻尼系数; 下标 x, y, z 分别表示 x, y, z 方向; 下标 x_0, y_0, z_0 分别为 x, y, z 方向的初始值。

K, C 取值如表 2 所示。

表 2 轴套力参数名称及数值
Tab. 2 Names and value of bushing parameters

名称	符号	数值
拉伸刚度系数/(N/mm)	K_{11}	1.68×10^6
剪切刚度系数/(N/mm)	K_{22}, K_{33}	1.35×10^6
扭转刚度系数/(N/mm)	K_{44}	4.02×10^5
抗弯刚度系数/(N/mm)	K_{55}, K_{66}	2.51×10^5
拉伸阻尼系数/(Ns/mm)	C_{11}, C_{22}, C_{33}	1×10^5
扭转阻尼系数/(Ns/mm)	C_{44}, C_{55}, C_{66}	1×10^5

(5) 定义旋转: 上述建立的钢丝绳呈一条直线, 实际要绕滑轮改变方向并传递力, 所以得将钢丝绳旋转到设计的位置, 然后给钢丝绳和滑轮施加接触。

(6) 定义接触: 根据 Impact 函数, 接触力计算公式为^[14]:

$$F_n = K\delta^e + Cv \quad (19)$$

式中: F_n 为法向接触力; K 为赫兹接触刚度; δ 为接触点的法向穿透深度; e 为力的指数, 即刚度项的贡献因子; C 为阻尼系数; v 为接触点的法向相对速度, 是 δ 的导数。

参数取值如表 3 所示。

表 3 接触力参数名称及数值
Tab. 3 Names and value of contact parameters

名称	符号	数值
赫兹接触刚度/(N/mm)	K	1×10^4
法向穿透深度/mm	δ	0.1
刚度项的贡献因子	e	1.3
阻尼系数/(Ns/mm)	C	10

通过上述步骤完成缠绕系统的建模。本文仿真采用的模型中钢丝绳总绳长 15 m, 水下部分长 3.5 m。建立 3 000 m 的钢丝绳模型同样也可通过该方法, 不过整个模型的计算时间将大大增加。

3.1.2 其余部分建模

将三维模型导入 ADAMS 中, 通过定义材料属性、添加约束关系、添加重力、添加接触力, 可

建立如图5所示完整的虚拟样机。

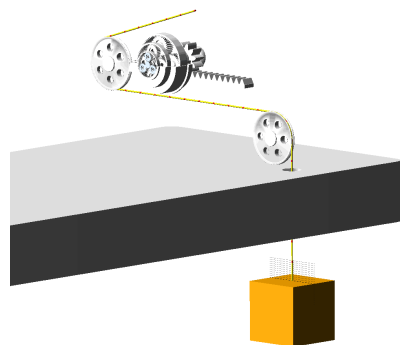


图5 电动升沉补偿系统 ADAMS 动力学模型
Fig. 5 Dynamic model of electric heave compensation system

根据实际的运动情况确定约束的类型。分别对母船-大地、齿条-母船添加移动副；由旋转关系分别添加了太阳轮-箱体、输出轴-箱体、行星架-行星轮、动滑轮-动滑轮轴、定滑轮-定滑轮轴的转动副。由连接关系分别添加了母船-定滑轮轴、齿条-动滑轮轴、母船-箱体、箱体-齿圈、箱体-轴承、输出齿轮-输出轴、太阳轮-行星架、吊重-钢丝绳底端、母船-钢丝绳顶端的固定副。

齿轮之间的接触力定义如下^[15-16]：

$$F_{\text{impact}} = \begin{cases} 0 & , q \geq q_0 \\ K(q_0 - q)^e - C \times \frac{dq}{dt} \times \\ \text{step}(q, q_0 - q, 1, q_0, 0) & , q < q_0 \end{cases} \quad (20)$$

式中：Step 为阶跃函数； q_0 为两物体间的初始距离； q 为物体碰撞过程中的实际距离； $q_0 - q$ 为碰撞过程中物体的实际变形量； e 为碰撞力指数； C 为阻尼系数； K 为接触刚度系数。

接触刚度 K 计算公式为：

$$K = \frac{4}{3} R^{\frac{1}{2}} E^* \quad (21)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (22)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2} \quad (23)$$

式中：右边外啮合为“+”，内啮合为“-”； R 为综合曲率半径； R_1, R_2 为两啮合齿轮在接触点的曲率

半径； ν_1, ν_2 为两啮合齿轮材料的泊松比； E_1, E_2 为两啮合齿轮材料的弹性模量。

参数取值如表4所示。

表4 齿轮接触力参数名称及数值
Tab. 4 Names and value of gear contact parameters

名称	符号	数值
泊松比度	ν_1, ν_2	0.29
弹性模量/(N/mm ²)	E_1, E_2	2.07×10^5
碰撞力指数	E	1.5
阻尼系数/(Ns/mm)	C	50

3.2 母船激励

尽管实际情况中，波浪的信号并非标准的正弦信号，但不规则的波浪可由大量均匀微小的规则波叠加而成。其中最基本的规则波可用正弦波来模拟^[17]。一方面，由于船体质量很大，其响应会自动忽略波浪的高频、短波长成分；另一方面，通过运动单元观测到母船的升沉数据后，系统采用滤波技术过滤波浪中的高频及噪声成分。因此升沉补偿系统实际需要跟踪的是以某个卓越长周期为主的波浪升沉运动，因此其运动实际类似于对简谐运动的跟踪与补偿。仿真中采用的母船激励是对母船升沉运动起重要影响作用的正弦波，即升沉波浪中的长周期、大波长、大波高的正弦波，其它运动形式的波浪激励分析方法类似。

假设母船的升沉行程为 ± 1 m、升沉周期 10 s，则母船输入位移为 $u_1(t) = 1000 \sin 0.628 t$ ，单位：mm，相应的电机输入转角为 $u_2(t) = -155.7 \sin 0.628 t$ ，单位：rad，以下仿真都采用此处定义的输入函数。

3.3 仿真结果及分析

假设波浪的激励已知，由理论计算得出补偿电机的输入，在仿真中同时输入母船位移激励和电机转角激励，分析吊重位移与母船位移之间的关系，便能验证补偿系统的有效性。

对行星减速器输入轴定义转动运动，对母船定义上下的平移移动，设置合适的仿真时间及仿真步长。在后处理中画出吊重及母船的 y 向位移曲线，

如图 6 所示。

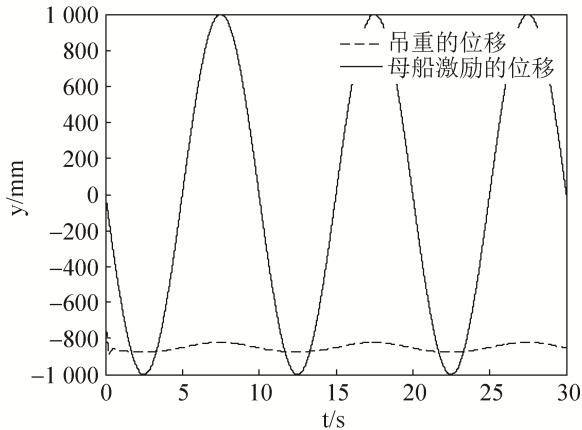


图 6 吊重与母船 y 向位移曲线

Fig. 6 y direction displacement curve of load and ship

由图 6 可得: 母船激励的运动为沿 y 方向做正弦运动, 幅值为 1 m, 而吊重振动的幅值约为 50 mm, 说明通过电机输入转角的作用, 确实对吊重的运动起到了补偿效果, 使得吊重运动的幅值仅为母船运动幅值的 5%, 一定程度上达到了升沉补偿的效果。

4 ADAMS 和 Simulink 联合仿真

从 ADAMS 仿真结果可以看出补偿电机的转角输入对吊重的运动起到了补偿效果, 但存在以下问题: 实际情况下, 不仅母船的运动不是标准的正弦运动, 而且存在各种扰动作用。所以必须建立反

馈控制系统, 考虑到在 ADAMS 中仿真的方便性, 依然采用正弦函数作为激励, 通过测量吊重、母船等的运动参数, 控制补偿电动机的转角输入, 以减小吊重升沉运动的幅值和速度。

4.1 建立联合仿真模型

通过 ADAMS 中的 Controls 模块给该模型添加控制部分, 并将 ADAMS 和控制设计仿真软件连接起来。联合仿真是在前述仿真的基础上进行的。通过定义输入、输出的状态变量, 确定如图 7 所示的仿真回路, 即 ADAMS 中的输入变量是电机的转角, 同时也是 Simulink 的输出变量; ADAMS 中的输出变量是吊重的升沉位移、母船的升沉位移, 同时也是 Simulink 的输入变量。

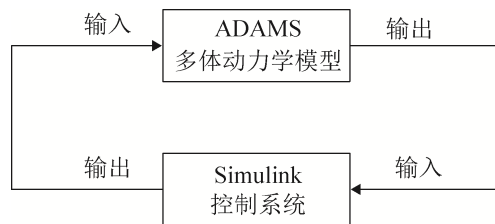


图 7 ADAMS&Simulink 联合仿真回路

Fig. 7 ADAMS&Simulink co-simulation loop

4.2 PID 控制

PID 控制由比例环节、积分环节和微分环节组成。在 Simulink 中搭建 PID 控制模型如图 8 所示^[18]。

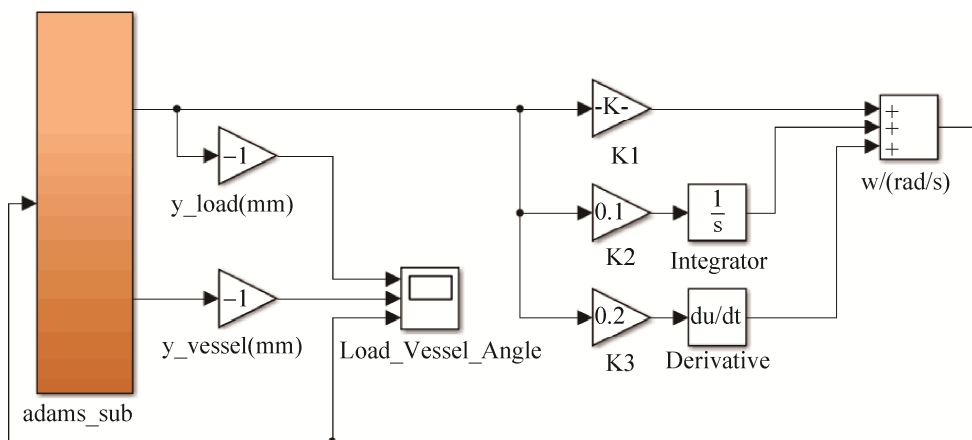


图 8 PID 控制系统模型

Fig. 8 PID control system model

PID 差分方程:

$$U(k) = K_P E(k) + K_I \sum_{j=0}^k E(j) T_u + K_D (E(k) - E(k-1)) \quad (24)$$

式中: U 为控制器输出信号; E 为偏差信号; K_P 为比例增益; K_I 为积分增益; K_D 为微分增益; T_u 为采样周期; k 为采样序号。

通过试凑法确定了 PID 参数, PID 控制中参数分别为: $K_P = -2.5$ 、 $K_I = 0.1$ 、 $K_D = 0.2$ 。

4.3 联合仿真结果与分析

在 ADAMS 中输入母船激励, 经过联合仿真后, 得到如图 9 所示的吊重位移、母船位移和电机角速度曲线。

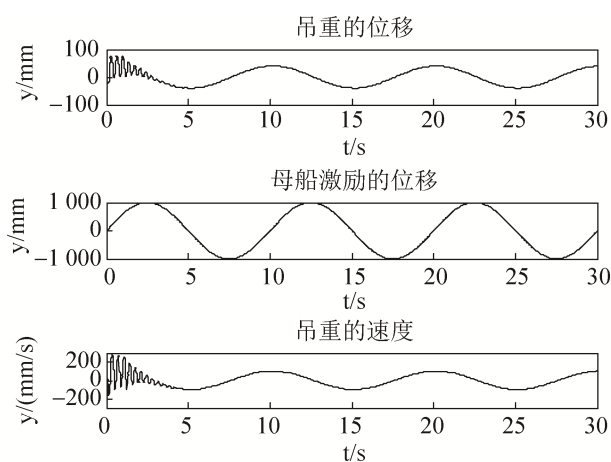


图 9 联合仿真结果
Fig. 9 Results of co-simulation

从图 9 可以看出, 在 30 s(3 个升沉周期)时间内, 母船升沉行程为 ± 1000 mm, 通过 PID 反馈控制系统进行补偿作用后, 吊重的残留升沉行程仅为 ± 40 mm, 补偿效率为 96%, 实现了升沉补偿的功能。

5 结论

(1) 本文研究的新型的大型电动齿轮齿条式升沉补偿系统, 相比于液压升沉补偿系统具有结构简单优点。由控制要求和系统的数学模型, 得到电机输入与波浪激励之间的关系。在 ADAMS 中定

义电机转角输入和母船激励输入, 进行仿真, 仿真结果验证了补偿系统及其设计参数的有效性。由于实际工程中波浪不是标准的正弦波和未知干扰的存在, 还需引入反馈控制。

(2) 在 Simulink 中建立反馈控制系统, 结合 ADAMS 进行联合仿真。对比了只进行纯运动仿真结果和联合仿真结果发现: 通过 PID 反馈控制, 提高了升沉补偿系统补偿精度。

参考文献:

- [1] 陈张建. 波浪补偿执行器设计研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
Chen Zhangjian. The design research on wave compensation actuator[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013.
- [2] 王生海. 垂直方向主动式波浪补偿控制系统设计研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
Wang Shenghai. The design research on active compensation control system in vertical direction[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013.
- [3] 任克忍, 沈大春, 王定亚, 等. 海洋钻井升沉补偿系统技术分析[J]. 石油机械, 2009, 37(9): 125-128.
Ren Keren, Shen Dachun, Wang Dingya, et al. Technical analysis of ocean drilling and heave compensation system[J]. Petroleum Machinery, 2009, 37(9): 125-128.
- [4] 王志勇, 谌志新, 徐志强. 深水勘察装置波浪补偿系统设计[J]. 中国工程机械学报, 2013, 11(1): 55-58.
Wang Zhiyong, Shen Zhixin, Xu Zhiqiang. Wave compensation system design for deep-water mining equipment [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2013, 11(1): 55-58.
- [5] Hatleskog J T. Drill string compensators and riser tensioning system for offshore drilling[J]. Institute of Marine Engineers Transactions (S0309-3948), 1983, 95(42): 2-11.
- [6] Haney J D, Carey D W, Rhodes Q Z. Low power/high performance active heave compensation[J]. Sea Technology (S0093-3651), 2002, 43(7): 23-34.
- [7] Korde U A. Active heave compensation on drill-ships in irregular waves[J]. Ocean engineering (S0029-8018), 1998, 25(7): 541-561.
- [8] Kirstein H. Active heave compensation systems on board of vessels and offshore rigs[J]. MT Meerestechnik (S0025-3324), 1986, 17(2): 59-61.
- [9] 徐小军, 陈循, 胡永攀. 基于行星传动调速的波浪补

- 偿系统设计与样机研制[J]. 中国机械工程, 2013, 24(5): 604-609.
- Xu Xiaojun, Chen Xun, Hu Yongpan. Design of heave compensation system and prototype development based on planetary transmission speed governor[J]. China Mechanical Engineering(S1004-132X), 2013, 24(5): 604-609
- [10] 陈爱国. 新型舰船过驳升沉补偿系统关键性技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- Chen Aiguo. Study on the key technique of new wave-movement compensative system for sealift ships [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [11] 汤磊. 升沉补偿器的关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- Tang Lei. Research on key technology of heave compensation equipment [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [12] 李爱平, 蒋超平, 刘雪梅. 以 ADAMS 为平台的钢丝绳动张力仿真分析[J]. 现代制造工程, 2010(1): 43-46.
- Li Aiping, Jiang Chaoping, Liu Xuemei. Simulation of dynamic tension of wire rope based on ADAMS[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2010(1): 43-46.
- [13] 贾尚雨, 谢小鹏, 梁广炽. 起重机钢丝绳的动力学建模与仿真[J]. 煤矿机械, 2010, 31(4): 58-61.
- Jia Shangyu, Xie Xiaopeng, Liang Guangchi. Dynamics modeling and simulation of crane wire rope[J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(4): 58-61.
- [14] 柴建平, 白硕玮. 基于 UG 和 ADAMS 的斜齿轮动力学仿真[J]. 煤矿机械, 2011, 32(4): 77-79.
- Chai Jianping, Bai Shuwei. Dynamic Emulate of Bevel Wheel Based on UG and ADAMS[J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(4): 77-79.
- [15] 傅友宾. 基于 PRO/E 和 ADAMS 的变速器动力学仿真[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- Fu Youbin. Investigation on dynamic simulation of transmission based on Pro/E and ADAMS[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [16] 程结结. 基于 Pro/E 的齿轮减速器虚拟装配和仿真研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2013.
- Chen Jiejie. Research on virtual assembly and Simulation of gear reducer based on Pro/E[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science & Technology, 2013.
- [17] 祝力, 王海涛, 张乔斌. 海浪动态仿真研究[J]. 船海工程, 2006, 35(5): 82-85.
- Zhu Li, Wang Haitao, Zhang Qiaobin. Research on dynamic simulation of seas[J]. Ship & Ocean Engineering, 2006, 35(5): 82-85.
- [18] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 Matlab 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 10-40.
- Liu Jinkun. Advanced PID control and its Matlab simulation[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005: 10-40.

《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心, 发布了 2017 版《中国学术期刊国际引证年报》, 《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”。

《年报》(2017 版)采用的统计源期刊为 20192 种, 涵盖 WoS 收录的 SCI 期刊 8874 种、SSCI 和 A&HCI 期刊 4645 种, ESCI 期刊 5578 种; 增补期刊 1762 种。参照中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标, 计算期刊影响力指数(CI), 对国内 6210 种学术期刊排序, 遴选了人文社科、自然科学与工程技术两个类别的 TOP10% 为国际影响力品牌学术期刊。TOP5% 以内的期刊为“最具国际影响力学术期刊”、TOP5-10% 之间的为“国际影响力优秀学术期刊”。