



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405061

引用格式:范昆龙,王生海,邱建超,等.基于凯恩方法的海上稳定廊桥动力学建模与仿真分析[J].科学技术与工程,2025,25(12):5209-5217.

Fan Kunlong, Wang Shenghai, Qiu Jianchao, et al. Dynamic modeling and simulation analysis of offshore stable corridor bridge based on Kane method[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(12): 5209-5217.

基于凯恩方法的海上稳定廊桥动力学 建模与仿真分析

范昆龙¹, 王生海^{1*}, 邱建超², 牛安琪¹, 仇伟晗¹, 陈海泉¹

(1. 大连海事大学轮机工程学院, 大连 116026; 2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所无锡分部, 无锡 214151)

摘要 由于海洋环境复杂多变以及串并联构型海上稳定廊桥动力学特性的复杂,海上稳定廊桥工作过程的动力学特性分析一直是相关研究过程中的重点和难点。针对这一问题,首先,基于矢量法和凯恩方法得出海上稳定廊桥各部件投影矩阵与 Jacobi 矩阵以及在广义坐标系下的动力学方程,运用凯恩方法和虚功原理得出海上稳定廊桥整体显式动力学模型;其次,基于 Simulink 搭建 MATLAB 与 Adams 联合仿真模型,并以 MSS 工具箱对船舶的模拟运动为激励进行分析。最后,在有、无人货物转运两种工况下,进行理论计算与仿真分析,验证所建立模型的正确性。进一步,研究不同质量的负载对支链驱动力的影响,以及对海上稳定廊桥的补偿效果进行分析。研究成果对海上稳定廊桥的研制和实船应用具有一定指导意义。

关键词 海上稳定廊桥; 动力学模型; 凯恩方法; 虚功原理; 联合仿真

中图分类号 U664.4⁺3;

文献标志码 A

Dynamic Modeling and Simulation Analysis of Offshore Stable Corridor Bridge Based on Kane Method

FAN Kun-long¹, WANG Sheng-hai^{1*}, QIU Jian-chao², NIU An-qi¹, QIU Wei-han¹, CHEN Hai-quan¹

(1. College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Wuxi Division of No. 703 Research Institute of CSSC, Wuxi 214151, China)

[Abstract] Due to the complexity and variability of the marine environment as well as the complexity of the dynamic characteristics of the offshore stabilized corridor bridge in a series-parallel hybrid configuration, the analysis of the dynamic characteristics of the offshore stabilized corridor bridge in the working process has always been a key point and a difficult point in the related research process. To address this problem, firstly, the projection matrix and Jacobi matrix of each component of the bridge were derived based on the vector method and Kane's method, as well as the dynamic equations under the generalized coordinate system, and the overall explicit dynamics model of the bridge was derived by using the Kane's method and the principle of virtual work. Secondly, a joint simulation model of MATLAB and Adams was constructed based on Simulink and the simulated motion of the vessel was simulated by the MSS toolbox to simulate the ship's motion as an excitation for analysis. Finally, theoretical calculations and simulation analysis were carried out under two working conditions, with and without personnel and cargo transfer, to verify the correctness of the established model. Further, the effects of loads of different masses on the driving force of the strut chain were investigated, and the compensating effect of the sea-stabilised corridor bridge was analysed. The research results are of guiding significance for the development of the sea-stabilised corridor bridge and its application on real ships.

[Keywords] offshore stabilization of corridor bridges; dynamical modeling; Kane's method; principle of virtual work; co-simulation

由于风、浪、流等载荷引起的船舶六自由度运动,使得船上人员和货物转运困难且危险,因此海上转运作业一直是海工领域所关注的重点问题^[1]。

在海上转运的设备中,以吊篮、直升机、海上稳定廊桥为主,但是因海上工况的影响,除海上稳定廊桥以外的其他方式对施工环境有着更高的要求。

收稿日期:2024-07-06; 修订日期:2025-02-14

基金项目:国家自然科学基金(52101396,52371362);国家重点研发计划(2022YFB4300802);中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132023510)

第一作者:范昆龙(2000—),男,汉族,河南商丘人,硕士研究生。研究方向:海上稳定廊桥技术。E-mail:15660766063@163.com。

*通信作者:王生海(1988—),男,土家族,湖北利川人,博士,副教授。研究方向:海上运动补偿技术、绳索驱动机器人技术。E-mail:shenghai_wang@dmmu.edu.cn。

海上稳定廊桥以其在不同海况下有着优秀的工作能力而被海工领域学者广泛研究。海上稳定廊桥由下部稳定平台与上部转运舷梯组成,由于海洋环境复杂多变和海上稳定廊桥机构动力学特性的复杂,其动力学一直是研究过程中的重点以及难点^[2-3]。

在对海上稳定廊桥分析中,常用的方法有:拉格朗日法^[4-5]、虚功原理^[6-9]、牛顿-欧拉法^[10-11]、凯恩方法^[12-13]等。王安琪^[14]通过拉格朗日动力学建立稳定平台动力学模型,通过牛顿-欧拉法建立串联舷梯动力学模型,但是对于所建立的模型而言计算较为复杂。邱建超等^[15]运用虚功原理与牛顿欧拉法建立 3-UPU /UP-RRP 串并混联海上稳定廊桥动力学建模,其中并联平台采用 3 支链模型,虚功原理结合超定方程计算得出各支链驱动力,解决了方程个数大于未知数的问题。王力航等^[16]通过凯恩方法建立了适用于非惯性系下 3UPS/S 并联稳定平台的动力学模型,由非惯性系 3 自由度运动扩展为惯性系下的 9 自由度运动。

基于此,首先利用矢量法和凯恩方法对海上稳定廊桥进行分析,得出海上稳定廊桥各部件投影矩阵与 Jacobi 矩阵,以及各部件投影至广义坐标系下动力学方程,运用凯恩方法结合虚功原理最终得出海上稳定廊桥显式动力学模型;其次,在 Simulink 环境中搭建 MATLAB 与 Adams 联合仿真模型,并以 MSS(marine systems simulator)工具箱对船舶的模拟运动为激励,在有、无人员货物转运两种工况下,进行联合仿真分析,验证所建立模型的正确性;最后,研究不同质量的负载在转运过程中对稳定平台中各支链驱动力的影响,以及对海上稳定廊桥补偿效果进行分析。以期对海上稳定廊桥的研制和实船应用起到一定指导意义。

1 海上稳定廊桥运动学分析

所研究的海上稳定廊桥采用六支链 Stewart 平台作为稳定平台对船舶运动进行补偿,串联舷梯中的转运平台通过回转装置与稳定平台相连。

1.1 海上稳定廊桥坐标系建立

为了使海上稳定廊桥的运动清晰的表示,建立图 1 所示的坐标系,定义 $o_w-x_wy_wz_w$ 为全局坐标系;定义 $o_s-x_sy_sz_s$ 为船固联坐标系,其中, y_s 轴指向船尾方向, z_s 轴垂直向下, x_s 轴方向根据右手定则可知;取下平台中心建立坐标系 $o_d-x_dy_dz_d$, 并与 $o_s-x_sy_sz_s$ 平行;取上平台中心建立坐标系 $o_u-x_uy_uz_u$, 并与 $o_d-x_dy_dz_d$ 平行, z_u 轴与 z_d 轴共线并垂直向下;取转运舷梯主臂末端中心点为原点建立坐标系 $o_t-x_ty_tz_t$,

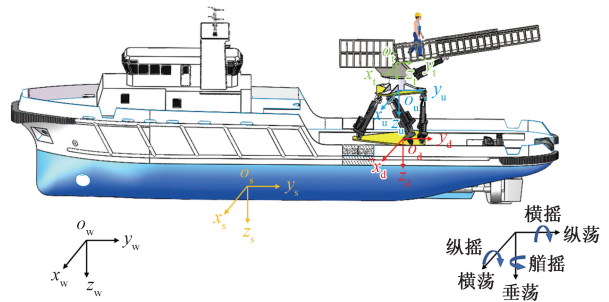


图 1 海上稳定廊桥坐标系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the coordinate system of the sea stable corridor bridge

并与 $o_d-x_dy_dz_d$ 平行, z_t 轴与 z_u 轴共线并垂直向下。因为稳定平台下平台与船体固联,因此在对于海上稳定廊桥位姿分析过程中,船舶因风、浪、流等载荷影响而产生的运动可转换为下平台的运动,下平台运动设为 $q_d^w = [p_d^w \theta_d^w]^T$, 其中, $p_d^w = [x_d^w \ y_d^w \ z_d^w]^T$ 为下平台在全局坐标系下的平移运动, $\theta_d^w = [\alpha_d^w \ \beta_d^w \ \gamma_d^w]^T$ 为下平台在全局坐标系下的旋转运动。

1.2 海上稳定廊桥位姿分析

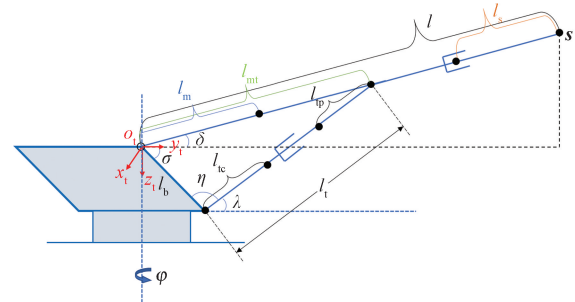
1.2.1 转运舷梯位姿分析

在分析中将转运舷梯简化为图 2 所示的示意图。

当对人员或货物进行转运时,舷梯末端点在全局坐标系中保持不变。舷梯末端在上平台坐标系中可表示为

$$s^i = s_o - p_u^w \quad (1)$$

式(1)中: s_o 为舷梯末端在坐标系 $o_t-x_ty_tz_t$ 中初始坐



l_m 为主臂质心到舷梯连接点距离; l_{mt} 为俯仰臂在主臂上的连接点到舷梯连接点距离; l_s 为次桥身质心到舷梯末端点距离; l 为舷梯长度; l_b 为俯仰臂下连接点到舷梯连接点距离; l_c 为俯仰臂驱动缸质心到下连接点距离; l_p 为俯仰臂驱动杆质心与主桥身上的连接点距离; l_t 为俯仰臂长度; s 为舷梯末端点在坐标系 $o_t-x_ty_tz_t$ 中坐标; δ 为舷梯臂与水平基准线夹角; η 为俯仰缸与转运平台侧边形成的夹角; λ 为俯仰缸与水平基准线夹角; φ 表示绕 z 轴的旋转

图 2 转运舷梯简化示意图

Fig. 2 Simplified schematic diagram of transshipment gantry

标; p_u^w 为上平台在全局坐标系下的平移运动。

由几何知识可以分别对 l_1, δ, η 求解, 则有

$$\delta = \arctan\left(\frac{|s_z^l|}{|s_y^l|}\right) \quad (2)$$

式(2)中: s_z^l 为舷梯末端在上平台坐标系 z 轴方向坐标; s_y^l 为舷梯末端在上平台坐标系 y 轴方向坐标。

$$l_1 = \sqrt{l_b^2 + l_{mt}^2 - 2l_b l_{mt} \cos(\delta + \sigma)} \quad (3)$$

式(3)中: σ 为转运平台侧边与水平基线的夹角。

$$\eta = \arccos\left(\frac{l_b^2 + l_1^2 - l_{mt}^2}{2l_b l_1}\right) \quad (4)$$

1.2.2 稳定平台位姿分析

在分析中将稳定平台简化为图3所示的稳定平台简化示意图。

欧拉角和旋转矩阵之间的关系可表示为^[5]

$$R = R_x R_y R_z \quad (5)$$

式(5)中: R_x 为绕 x 轴旋转的旋转矩阵; R_y 为绕 y 轴旋转的旋转矩阵; R_z 为绕 z 轴旋转的旋转矩阵。

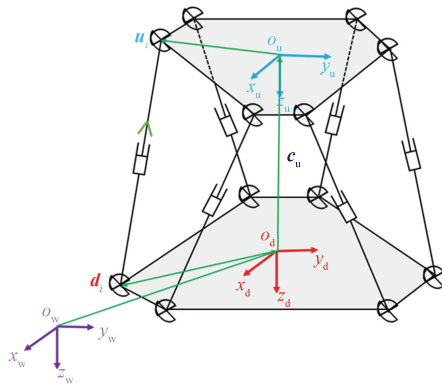
上平台运动在坐标系 $o_d-x_d y_d z_d$ 中可表示为 $q_u^d = [p_u^d \ \theta_u^d]^T$, 其中, $p_u^d = R_d(p_u^w - p_d^w)$, 表示上平台在下平台坐标系下平移运动; $\theta_u^d = \theta_u^w - \theta_d^w$, 表示上平台在下平台坐标系下旋转运动。因此稳定平台广义运动 $q = [(q_u^d)^T \ (q_d^w)^T]^T$, 也可写作 $q = [q_u^T \ q_d^T]^T$, 由稳定平台中上平台在下平台坐标系下平移运动与下平台在全局坐标系下平移运动表示。

下平台在 $o_w-x_w y_w z_w$ 坐标系中角速度可表示为

$$\omega_d^w = E_d^w \dot{\theta}_d^w \quad (6)$$

式(6)中: 欧拉角速度转换矩阵为 $E =$

$$\begin{bmatrix} c\beta c\lambda & -s\lambda & 0 \\ c\beta s\lambda & c\lambda & 0 \\ -s\beta & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 其中, } c = \cos; s = \sin; \theta_d^w \text{ 为下}$$



u_i 为上平台铰接点坐标; d_i 为下平台铰接点坐标; c_u 为在 $o_w-x_w y_w z_w$ 坐标系中下平台质心向量

图3 稳定平台简化示意图

Fig. 3 Simplified schematic diagram of stable platform

平台在全局坐标系下的旋转角度。

同理, 可以分别得出上平台在下平台坐标系下的旋转角速度 ω_u^d ; 上平台在全局坐标系下的旋转角速度 ω_u^w 。

上平台在 $o_w-x_w y_w z_w$ 坐标系中角速度也可表示为

$$\omega_u^w = R_d^w \omega_u^d + \omega_d^w \quad (7)$$

下平台铰接点在全局坐标系 $o_w-x_w y_w z_w$ 中可表示为

$$d_i^w = c_d + R_d^w d_i^d \quad (8)$$

式(8)中: c_d 为全局坐标系中下平台质心向量; d_i^d 为下平台铰接点在下平台坐标系下的坐标。

同理, 上平台铰接点和质心 o_u 在全局坐标系 $o_w-x_w y_w z_w$ 、上平台铰接点在 $o_d-x_d y_d z_d$ 坐标系中可表示为

$$u_i^w = c_u + R_d^w c_u + R_d^w R_u^d u_i^u \quad (9)$$

式(9)中: R_u^d 为上平台相对下平台的旋转矩阵; u_i^u 为上平台铰接点在上平台坐标系下的坐标。

$$u_p^w = c_u + R_d^w c_u + R_d^w R_u^d u_p^u \quad (10)$$

式(10)中: u_p^u 为上平台质心在上平台坐标系下的坐标。

$$u_i^d = c_u + R_u^d u_i^u \quad (11)$$

式(11)中: c_u 为下平台坐标系中上平台质心向量; u_i^u 为上平台铰接点在下平台坐标系下的坐标。

对式(8)求导可得下平台铰接点在全局坐标系 $o_w-x_w y_w z_w$ 下的速度, 即

$$v_{di}^w = \dot{c}_d + \omega_d^w R_d^w d_i^d = J_{di} \dot{q} \quad (12)$$

式(12)中: $J_{di} = [0 \ 0 \ I \ -S(R_d^w d_i^d)] J_E$, 其

$$\text{中, } J_E = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & & & \\ & E_u^d & & \\ & & I_{3 \times 3} & \\ & & & E_d^w \end{bmatrix}; \quad S(a) =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix}; \quad I \text{ 为单位矩阵; } E_u^d \text{ 为上平台相}$$

对下平台欧拉角速度转换矩阵; E_d^w 为下平台相对全局坐标系欧拉角速度转换矩阵。

对式(9)求导可得上平台铰接点在全局坐标系下的速度, 即

$$v_{ui}^w = \dot{c}_u + \omega_d^w \times R_d^w c_u + R_d^w \dot{c}_u + \omega_d^w \times R_d^w R_u^d u_i^u + R_d^w \omega_d^d \times R_u^d u_i^u = J_{ui} \dot{q} \quad (13)$$

式(13)中:

$$J_{ui} = [R_u^d \ -S(R_u^d u_i^u) R_d^w \ I \ -S(R_d^w R_u^d u_i^u) -S(R_d^w c_u)] J_E$$

对式(10)求导可得上平台质心在全局坐标系 $o_w-x_wy_wz_w$ 下的速度,即

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{up}^w &= \dot{\mathbf{c}}_d + \boldsymbol{\omega}_d^w \times \mathbf{R}_d^w \mathbf{c}_u + \mathbf{R}_d^w \dot{\mathbf{c}}_u + \\ &\quad \boldsymbol{\omega}_d^w \times \mathbf{R}_d^w \mathbf{R}_u^d \mathbf{u}_p^u + \mathbf{R}_d^w \boldsymbol{\omega}_u^d \times \mathbf{R}_u^d \mathbf{u}_p^u \\ &= \mathbf{J}_p \dot{\mathbf{q}} \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)中: \mathbf{J}_p 为上平台质心在全局坐标系下的雅可比矩阵,

$$\mathbf{J}_p = [\mathbf{R}_d^w \quad -\mathbf{S}(\mathbf{R}_u^d \mathbf{u}_p^u) \mathbf{R}_d^w \quad \mathbf{I} \quad -\mathbf{S}(\mathbf{R}_d^w \mathbf{R}_u^d \mathbf{u}_p^u) - \mathbf{S}(\mathbf{R}_d^w \mathbf{c}_u)] \mathbf{J}_{E0}$$

将 $\boldsymbol{\omega}_u^w$ 用广义坐标可表示为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega}_u^w = \mathbf{J}_\omega^1 \dot{\mathbf{q}} \\ \boldsymbol{\omega}_u^w = \mathbf{J}_\omega^2 \dot{\mathbf{q}} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中: $\mathbf{J}_\omega^1 = \mathbf{E}_u^w [\mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{I}_{3 \times 3}]$; $\mathbf{J}_\omega^2 = [\mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{R}_d^w \quad \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{I}_{3 \times 3}] \mathbf{J}_{E0}$

建立支链(图4)坐标系,结合式(8)、式(9)、式(11),得出 $o_w-x_wy_wz_w, o_d-x_dy_dz_d$ 坐标系下支链长度矢量和支链长度分别为

$$\mathbf{L}_i^w = \mathbf{u}_i^w - \mathbf{d}_i^w \quad (16)$$

$$\mathbf{L}_i^d = \mathbf{u}_i^d - \mathbf{d}_i^d \quad (17)$$

$$l_i = |\mathbf{L}_i^d| \quad (18)$$

支链在 $o_d-x_dy_dz_d$ 坐标系下的单位向量,以及在 $o_w-x_wy_wz_w$ 下的单位向量导数分别为

$$\mathbf{e}_i^d = \frac{\mathbf{L}_i^d}{|\mathbf{L}_i^d|} \quad (19)$$

$$\dot{\mathbf{e}}_i^w = \frac{\mathbf{P}_i}{l_i} \dot{\mathbf{L}}_i^w \quad (20)$$

式(20)中: \mathbf{P}_i 为投影矩阵,且 $\mathbf{P}_i = \mathbf{I} - \mathbf{e}_i^w (\mathbf{e}_i^w)^T$ 。

为使计算简洁,在下平台坐标系下计算支链长度,计算公式为

$$\begin{aligned} l_i &= (\mathbf{e}_i^d)^T \dot{\mathbf{u}}_i^d \\ &= (\mathbf{e}_i^d)^T (\dot{\mathbf{c}}_u + \boldsymbol{\omega}_u^d \mathbf{R}_u^d \mathbf{u}_i^u) \\ &= \mathbf{J}(i, :) \dot{\mathbf{q}}_u \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)中:

$$\mathbf{J}(i, :) = [(\mathbf{e}_i^d)^T \quad -(\mathbf{e}_i^d)^T \mathbf{S}(\mathbf{R}_u^d \mathbf{u}_i^u)] \mathbf{J}_{Eu}, \quad i = 1, 2, \dots, 6。$$

在对支链运动进行分析时,以上、下平台铰接点在全局坐标系中速度为基准进行计算,即

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{udi} &= \begin{bmatrix} \mathbf{v}_u^w \\ \mathbf{v}_d^w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{ui} \\ \mathbf{J}_{di} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ &= \mathbf{J}_{udi} \dot{\mathbf{q}} \end{aligned} \quad (22)$$

在支链中,驱动缸与驱动缸以相同的角速度运动,因此角速度的计算公式为

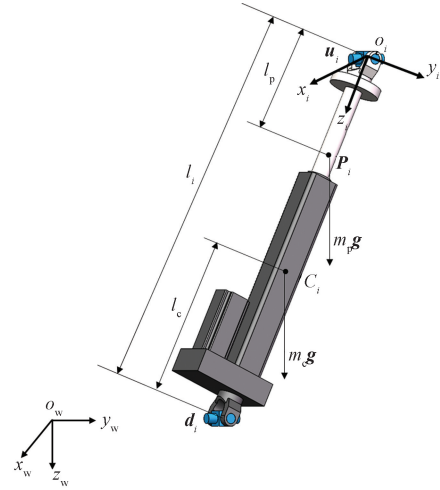


图4 驱动支链示意图
 l_i 为支链长度; l_c 为支链缸质心到下铰接点距离; l_p 为支链杆质心到上铰接点距离; c_i 为支链缸质心; \mathbf{P}_i 为支链杆质心; m_c 为支链缸质量; m_p 为支链杆质量; \mathbf{d}_i 为下铰接点; \mathbf{u}_i 为上铰接点; \mathbf{g} 为重力加速度

图4 驱动支链示意图

Fig. 4 schematic diagram of driving branch chain

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_i^w &= \mathbf{e}_i^w \frac{\dot{l}_i^w}{l_i} \\ &= \frac{1}{l_i} \mathbf{S}(\mathbf{e}_i^w) \mathbf{J}_l \mathbf{v}_{udi} \\ &= \mathbf{J}_{oli} \mathbf{v}_{udi} \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)中: $\mathbf{J}_l = [\mathbf{I}_{3 \times 3} \quad -\mathbf{I}_{3 \times 3}]$; \mathbf{J}_{oli} 为上、下平台铰接点角速度在全局坐标系下的雅可比矩阵。

联立式(13)、式(14)、式(22)、式(23)可以得出支链驱动杆质心、支链驱动缸质心在全局坐标系下速度为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{lpi}^w &= \mathbf{v}_{ui}^w - \boldsymbol{\omega}_i^w (l_p \mathbf{e}_i^w) \\ &= \mathbf{v}_{ui}^w - \frac{l_p}{l_i} \mathbf{P}_i (\mathbf{v}_{ui}^w - \mathbf{v}_{di}^w) \\ &= \mathbf{J}_{lpi} \mathbf{v}_{udi} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{lci}^w &= \mathbf{v}_{di}^w + \boldsymbol{\omega}_i^w (l_c \mathbf{e}_i^w) \\ &= \mathbf{v}_{di}^w + \frac{l_c}{l_i} \mathbf{P}_i (\mathbf{v}_{ui}^w - \mathbf{v}_{di}^w) \\ &= \mathbf{J}_{lci} \mathbf{v}_{udi} \end{aligned} \quad (25)$$

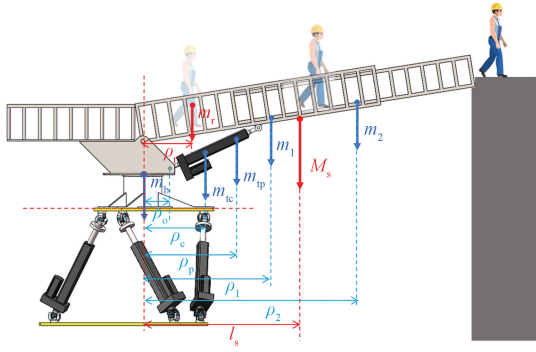
式中: $\mathbf{J}_{lpi} = [\mathbf{I} - \frac{l_p}{l_i} \mathbf{P}_i \quad \frac{l_p}{l_i} \mathbf{P}_i]$;

$$\mathbf{J}_{lci} = [\frac{l_c}{l_i} \mathbf{P}_i \quad \mathbf{I} - \frac{l_c}{l_i} \mathbf{P}_i]。$$

2 海上稳定廊桥动力学分析

2.1 转运舷梯动力学分析

对转运舷梯物理性质进行分析,建立图5所示的示意图。



$m_b, m_{tc}, m_{tp}, m_1, m_2, m_r$ 分别为回转机构与转运平台、俯仰电动缸、俯仰电动杆、主桥身、次桥身、负载的质量; $\rho_c, \rho_p, \rho_1, \rho_2, \rho_r$ 分别为俯仰电动缸、俯仰电动杆、主桥身、次桥身、负载的质心距上平台质心的沿轴的距离

图5 转运舷梯示意图

Fig. 5 Schematic diagram of transfer gangway

转运舷梯对稳定平台中上平台所产生的力与力矩可分别表示为

$$\mathbf{F} = (M_s + m_b)\mathbf{g} \quad (26)$$

$$\mathbf{T} = [M_s \mathbf{g} l_s \cos\varphi \quad M_s \mathbf{g} l_s \sin\varphi \quad 0]^T \quad (27)$$

式中: $M_s = m_{tc} + m_{tp} + m_1 + m_2 + m_r$; $l_s = \frac{m_{tc}\rho_c + m_{tp}\rho_p + m_1\rho_1 + m_2\rho_2 + m_r\rho_r}{M_s}$ 为等效质心相对 z 轴的距离; \mathbf{g} 为重力加速度。

2.2 稳定平台动力学分析

基于前述运动学模型并结合转运舷梯动力学,采用凯恩方法及虚功原理进行动力学建模。首先,通过凯恩方法投影矩阵将力与力矩投影到广义坐标上,利用虚功原理建立总体动力学模型并进行整合,从而建立完整动力学模型。

首先,对上平台进行分析,上平台惯性力、力矩可表示为

$$\mathbf{F}_u = \mathbf{J}_{pu}^T (\mathbf{F} + m_u \mathbf{g} - m_u \dot{\mathbf{v}}_p) \quad (28)$$

$$\mathbf{T}_u = (\mathbf{J}_{\omega u}^2)^T [\mathbf{T} - \mathbf{I}_u^w \dot{\boldsymbol{\omega}}_u^w - \boldsymbol{\omega}_u^w (\mathbf{I}_u^w \boldsymbol{\omega}_u^w)] \quad (29)$$

式中: \mathbf{J}_{pu} 为上平台投影矩阵; $\mathbf{J}_p = [\mathbf{J}_{pu} \quad \mathbf{J}_{pd}]$; $\mathbf{I}_u^w = \mathbf{R}_d^w \mathbf{R}_u^d \mathbf{I}_u (\mathbf{R}_d^w \mathbf{R}_u^d)^T$ 。

对于每个支链驱动缸而言,其惯性力可表示为

$$\mathbf{F}_{ci} = \mathbf{J}_{udiu}^T \mathbf{J}_{lci}^T (m_c \mathbf{g} - m_c \dot{\mathbf{v}}_{lci}^w) \quad (30)$$

对于每个支链驱动杆而言,其惯性力可表示为

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{J}_{udiu}^T \mathbf{J}_{lpi}^T (m_p \mathbf{g} - m_p \dot{\mathbf{v}}_{lpi}^w) \quad (31)$$

对于每个支链驱动缸与杆其惯性力矩可表示为

$$\mathbf{T}_i = -\mathbf{J}_{udiu}^T \mathbf{J}_{\omega li}^T [\mathbf{I}_{pc}^w \dot{\boldsymbol{\omega}}_i^w + \boldsymbol{\omega}_i^w (\mathbf{I}_{pc}^w \boldsymbol{\omega}_i^w)] \quad (32)$$

式(32)中: $\mathbf{I}_{pc}^w = \mathbf{R}_{\omega i} \mathbf{I}_{pc} \mathbf{R}_{\omega i}^T$, 其中 \mathbf{I}_{pc} 为支链驱动杆与驱动缸转动惯量之和; $\mathbf{R}_{\omega i} = [\mathbf{e}_i^w \mathbf{r} \quad \mathbf{e}_i^w (\mathbf{e}_i^w \mathbf{r}) \quad \mathbf{e}_i^w]$, 其中 $\mathbf{r} = [0 \quad 0 \quad 1]^T$ 。

联立式(28)~式(32),结合虚功原理并进行整

合,最终得出动力学方程为

$$\mathbf{J}^{-T} (\mathbf{M}_u \ddot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{C}_u \dot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{G} + \mathbf{M}_d \ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}_d \dot{\mathbf{q}}_d) = \boldsymbol{\tau} + \Delta\boldsymbol{\tau} \quad (33)$$

式(33)中: $\mathbf{M}_u, \mathbf{M}_d$ 为惯性力项; $\mathbf{C}_u, \mathbf{C}_d$ 为科氏力项; $\boldsymbol{\tau}$ 为驱动力; $\Delta\boldsymbol{\tau}$ 为扰动力;

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_u &= \mathbf{J}_{pu}^T m_u \mathbf{J}_{pu} + (\mathbf{J}_{\omega u}^2)^T \mathbf{I}_u \mathbf{J}_{\omega u}^1 + \\ &\quad \sum_{i=1}^6 \mathbf{J}_{udiu}^T (m_p \mathbf{J}_{lpi}^T \mathbf{J}_{lpi} + m_c \mathbf{J}_{lci}^T \mathbf{J}_{lci} + \mathbf{J}_{\omega li}^T \mathbf{I}_{pci}^w \mathbf{J}_{\omega li}) \mathbf{J}_{udiu}; \\ \mathbf{C}_u &= \mathbf{J}_{pu}^T m_u \dot{\mathbf{J}}_{pu} + (\mathbf{J}_{\omega u}^2)^T \mathbf{I}_u \dot{\mathbf{J}}_{\omega u}^1 + (\mathbf{J}_{\omega u}^2)^T \mathbf{S}(\boldsymbol{\omega}_u^w) \mathbf{I}_u \mathbf{J}_{\omega u}^1 + \\ &\quad \sum_{i=1}^6 \left\{ \mathbf{J}_{udiu}^T (m_p \mathbf{J}_{lpi}^T \mathbf{J}_{lpi} + m_c \mathbf{J}_{lci}^T \mathbf{J}_{lci} + \mathbf{J}_{\omega li}^T \mathbf{I}_{pci}^w \mathbf{J}_{\omega li}) \dot{\mathbf{J}}_{udiu} + \right. \\ &\quad \mathbf{J}_{udiu}^T [m_p \mathbf{J}_{lpi}^T \dot{\mathbf{J}}_{lpi} + m_c \mathbf{J}_{lci}^T \dot{\mathbf{J}}_{lci} + \mathbf{J}_{\omega li}^T \mathbf{I}_{pci}^w \dot{\mathbf{J}}_{\omega li} + \\ &\quad \left. \mathbf{J}_{\omega li}^T \mathbf{S}(\boldsymbol{\omega}_i^w) \mathbf{I}_{pci}^w \mathbf{J}_{\omega li}] \mathbf{J}_{udiu} \right\}; \\ \mathbf{G} &= -\mathbf{J}_{pu}^T m_u \mathbf{g} - \mathbf{J}_{pu}^T \mathbf{F} - (\mathbf{J}_{\omega u}^2)^T \mathbf{T} - \\ &\quad \sum_{i=1}^6 \mathbf{J}_{udiu}^T (\mathbf{J}_{lpi}^T m_p + \mathbf{J}_{lci}^T m_c) \mathbf{g}; \\ \mathbf{M}_d &= \mathbf{J}_{pu}^T m_u \mathbf{J}_{pd} + (\mathbf{J}_{\omega u}^2)^T \mathbf{I}_u \mathbf{J}_{\omega d}^1 + \\ &\quad \sum_{i=1}^6 \mathbf{J}_{udiu}^T (m_p \mathbf{J}_{lpi}^T \mathbf{J}_{lpi} + m_c \mathbf{J}_{lci}^T \mathbf{J}_{lci} + \mathbf{J}_{\omega li}^T \mathbf{I}_{pci}^w \mathbf{J}_{\omega li}) \mathbf{J}_{udid}; \\ \mathbf{M}_d &= \mathbf{J}_{pu}^T m_u \mathbf{J}_{pd} + (\mathbf{J}_{\omega u}^2)^T \mathbf{I}_u \mathbf{J}_{\omega d}^1 + \\ &\quad \sum_{i=1}^6 \mathbf{J}_{udiu}^T (m_p \mathbf{J}_{lpi}^T \mathbf{J}_{lpi} + m_c \mathbf{J}_{lci}^T \mathbf{J}_{lci} + \mathbf{J}_{\omega li}^T \mathbf{I}_{pci}^w \mathbf{J}_{\omega li}) \mathbf{J}_{udid}; \\ \mathbf{C}_d &= \mathbf{J}_{pu}^T m_u \dot{\mathbf{J}}_{pd} + (\mathbf{J}_{\omega u}^2)^T \mathbf{I}_u \dot{\mathbf{J}}_{\omega d}^1 + (\mathbf{J}_{\omega u}^2)^T \mathbf{S}(\boldsymbol{\omega}_u^w) \mathbf{I}_u \mathbf{J}_{\omega d}^1 + \\ &\quad \sum_{i=1}^6 \left\{ \mathbf{J}_{udiu}^T (m_p \mathbf{J}_{lpi}^T \mathbf{J}_{lpi} + m_c \mathbf{J}_{lci}^T \mathbf{J}_{lci} + \mathbf{J}_{\omega li}^T \mathbf{I}_{pci}^w \mathbf{J}_{\omega li}) \dot{\mathbf{J}}_{udid} + \right. \\ &\quad \mathbf{J}_{udiu}^T [m_p \mathbf{J}_{lpi}^T \dot{\mathbf{J}}_{lpi} + m_c \mathbf{J}_{lci}^T \dot{\mathbf{J}}_{lci} + \mathbf{J}_{\omega li}^T \mathbf{I}_{pci}^w \dot{\mathbf{J}}_{\omega li} + \\ &\quad \left. \mathbf{J}_{\omega li}^T \mathbf{S}(\boldsymbol{\omega}_i^w) \mathbf{I}_{pci}^w \mathbf{J}_{\omega li}] \mathbf{J}_{udid} \right\}. \end{aligned}$$

3 海上稳定廊桥实例分析

在对海上稳定廊桥联合仿真分析中,选取在4级海况等级下对其进行分析^[17],其中4级海况下采用的典型波浪参数为:有效波高2 m。根据预设的4级海况条件采用MSS(maritime simulation system)工具箱对船舶在4级海况下的运动响应进行数值模拟^[18],最终得出波浪表面模拟图与船舶六维运动曲线,分别如图6、图7所示。

在进行理论计算与仿真分析的过程中,所采用的样机主要设备参数如表1所示。

3.1 海上稳定廊桥虚拟样机计算分析

为了验证所构建的动力学模型的有效性和准确性,采用在Simulink环境下的MATLAB编程与Adams动力学软件进行联合仿真,以此对所建立的动力学模型进行验证。如图8所示,在Simulink环境中构建的联合仿真的架构图。

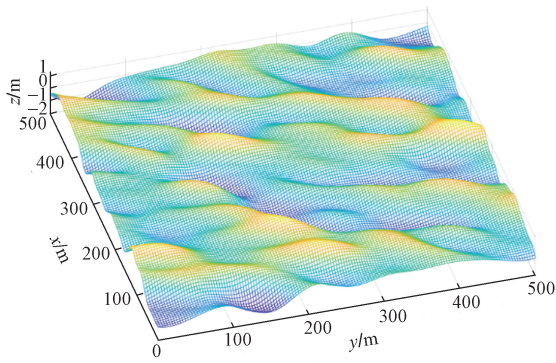


图6 某一时刻海浪表面模拟图

Fig. 6 Simulation of wave surface at a certain moment

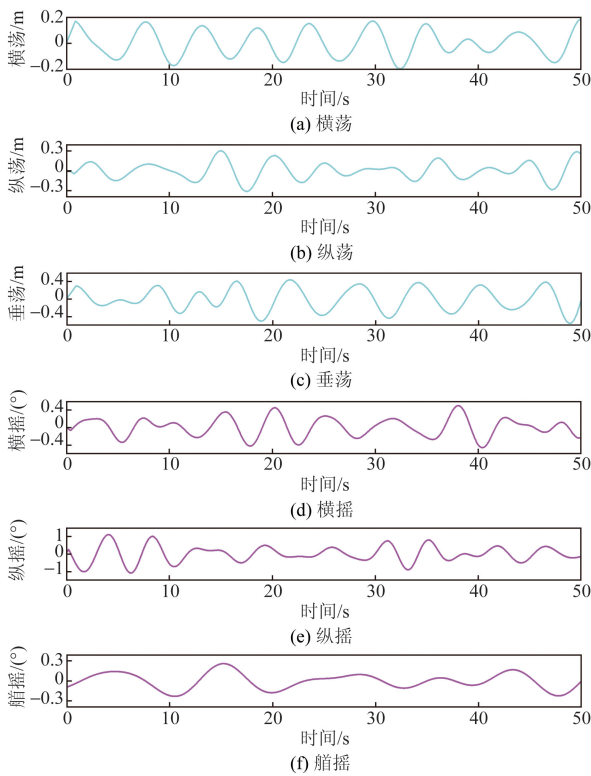


图7 船舶运动曲线

Fig. 7 Ship motion curves

表1 设备参数

Table 1 Device parameters

参数	数值
电动缸/kg	520.1
电动杆/kg	390.5
上平台/kg	550.1
下平台/kg	607.8
回转机构/kg	831.9
转运平台/kg	849.5
主桥身/kg	1 320.1
次桥身/kg	1 252.3

在对稳定平台进行验证中,在上述运动激励下通过 MATLAB 计算得出 6 条支链的速度并与 Adams 仿真数据进行对比,得出速度对比图(图 9)与速度

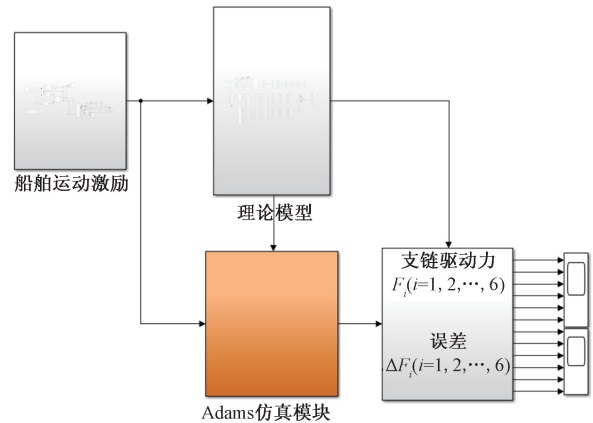
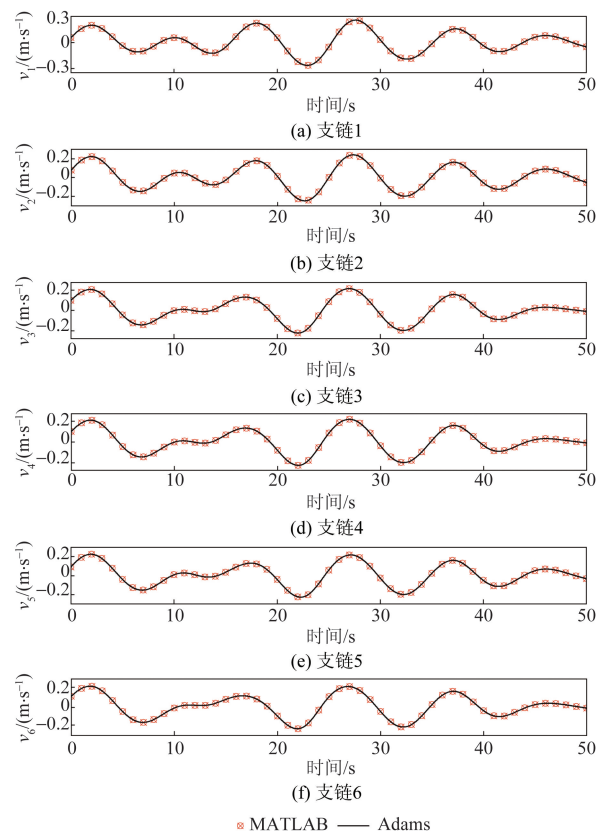


图8 MATLAB 与 Adams 联合仿真

Fig. 8 MATLAB and Adams co-simulation



$v_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 为每条支链速度

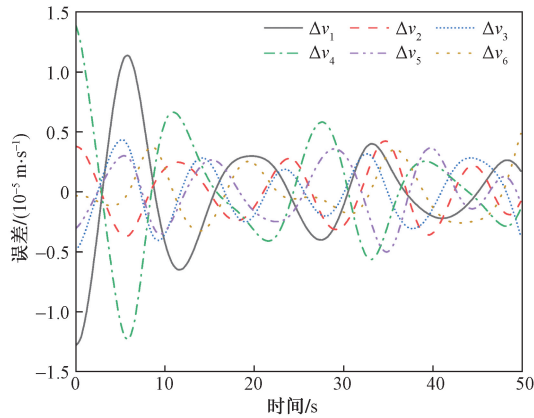
⊗MATLAB—Adams

图9 支链速度对比图

Fig. 9 Comparison of branch chain speed

误差图(图 10)。可以看出,6 条支链速度中最大误差仅为 0.007 5%,验证了运动学模型的正确性,为动力学分析提供可靠的运动学模型。

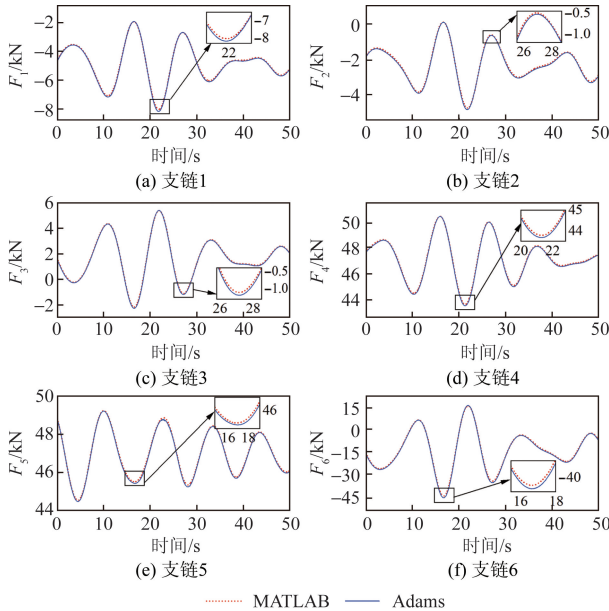
在 Simulink 环境中,对所建立的模型在未对负载转运和对负载(质量为 300 kg)转运两种工况分别进行动力学验证分析。图 11、图 12 分别为两种工况驱动力计算数据对比,两种线型分别对应 MATLAB 计算数据与 Adams 仿真数据。图 13 为两



$\Delta v_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 为支链 MATLAB 计算数据与 Adams 仿真数据的误差

图 10 支链速度误差图

Fig. 10 Branch chain speed error diagram



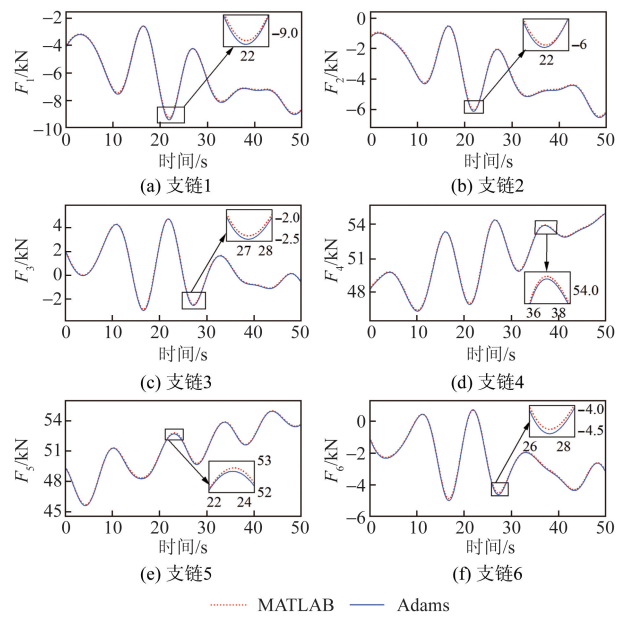
$F_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 为支链驱动力

图 11 未转运时驱动力对比

Fig. 11 Comparison of driving forces when not transported

种工况下驱动力误差图,两种线型分别对应未转运、转运两种工况下误差曲线。

从图 13 中可以看出,在两种工况下, MATLAB 计算数据与 Adams 仿真数据误差在可接受范围,进一步验证动力学模型的正确性。其中,未进行转运时,支链 1 在 21.3 s,驱动力为 -7 865.54 N 时,误差为 150.87 N;支链 2 在 21 s,驱动力为 -4 398.84 N 时,误差为 110.11 N;支链 3 在 17.6 s,驱动力为 -1 493.03 N 时,误差为 110.22 N;支链 4 在 21.1 s,驱动力为 43 808.50 N 时,误差为 107.38 N;支链 5 在 18.2 s,驱动力为 45 904.83 N 时,误差为 112.29 N;支链 6 在 17.5 s,驱动力为 -3 900.60 N 时,误差为 130.09 N。进行转运时,支链 1 在 21.3 s,驱动力为



$\Delta F_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 为支链驱动力 MATLAB 计算数据与 Adams 仿真数据误差

图 12 转运时驱动力对比图

Fig. 12 Comparison diagram of driving force during transit

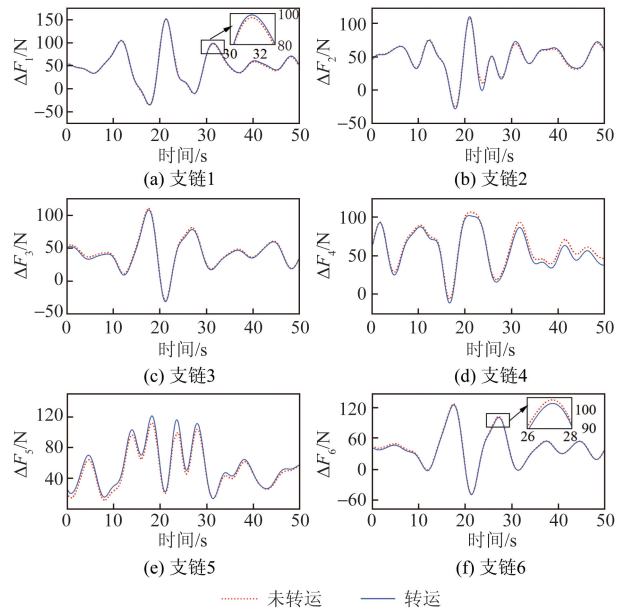


图 13 驱动力误差对比图

Fig. 13 Comparison chart of driving force error

-9 200.96 N 时,误差为 151.74 N;支链 2 在 21 s,驱动力为 -5 723.03 N 时,误差为 112.28 N;支链 3 在 17.6 s,驱动力为 -2 280.39 N 时,误差为 107.81 N;支链 4 在 21.1 s,驱动力为 47 081.35 N 时,误差为 102.89 N;支链 5 在 18.2 s,驱动力为 48 854.39 N 时,误差为 121.14 N;支链 6 在 17.5 s,驱动力为 -4 635.99 N 时,误差为 128.25 N。并且对于两种工况其误差变化最大为 8.01 N,说明所建立的动力学模型的可靠性,具有实际工程应用价值。

进一步,当海上稳定廊桥对不同质量的人员或货物进行转运过程中,各支链驱动力响应如图14所

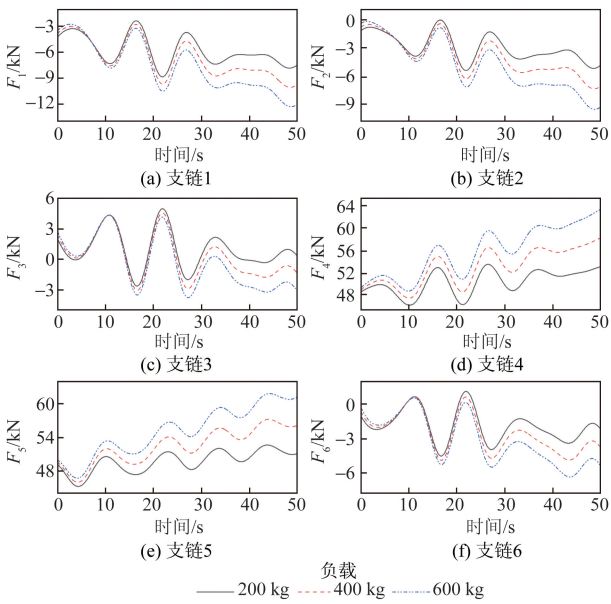


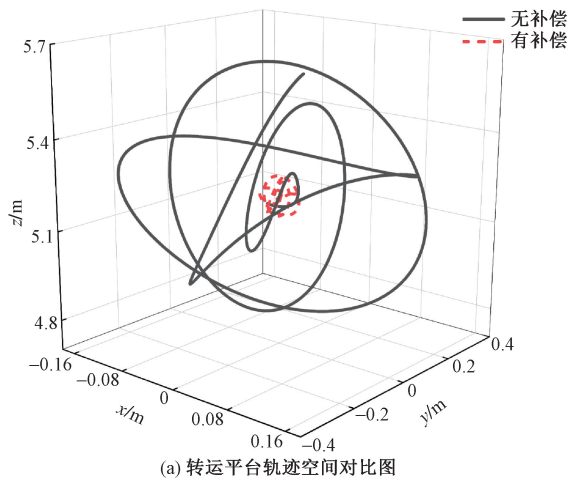
图 14 不同负载下驱动力对比图

Fig. 14 Comparison of driving forces under different loads

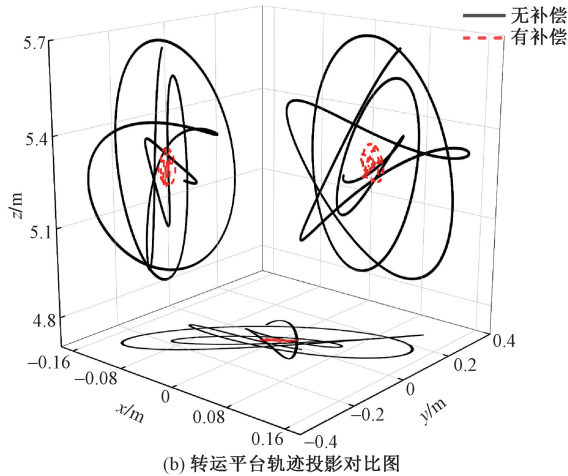
示,不同线型分别代表负载为 200、400、600 kg 时各支链的驱动力。可以看出,负载越大对于支链驱动力的影响就越大,其中对于支链 4、5 (靠近舷梯,并在其下方的两条支链)的影响最大,并且支链 4、5 驱动力为 6 条支链中最大的支链,因此在实际工作中应考虑支链 4、5 的最大承载能力,从而制定安全工况范围。

3.2 海上稳定廊桥补偿效果分析

对转运平台中心在上述运动激励下 50 s 内运动轨迹进行分析,得出图 15 所示的转运平台有无运动补偿时运动轨迹对比,通过对各坐标轴上下幅值对比,可以看出,转运平台运动补偿在 x 轴方向达到 89.1%、在 y 轴方向达到 89.6%、在 z 轴方向达到 92.5%;在对人员转运过程中,对人在全局坐标系下运动轨迹进行分析,得出图 16 所示的人在全局坐标系下有无运动补偿时运动轨迹对比,通过对全局坐标系下各坐标轴上下幅值对比,可以看出,在 x 轴方向运动补偿达到 85.1%、在 y 轴方向运动补偿达到 89.4%、在 z 轴方向运动补偿达到 91.6%。说明海上稳定廊桥可以有效保证人员转运的安全。



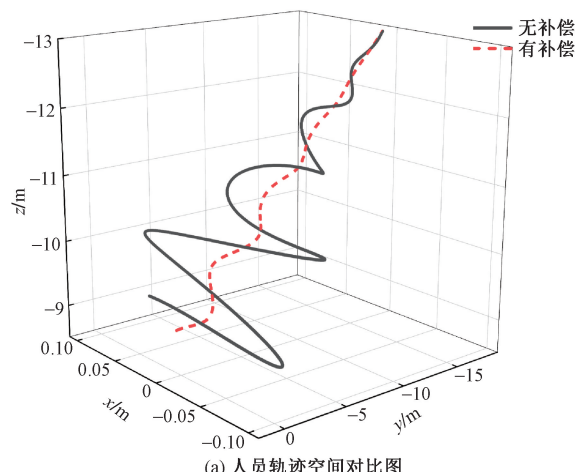
(a) 转运平台轨迹空间对比图



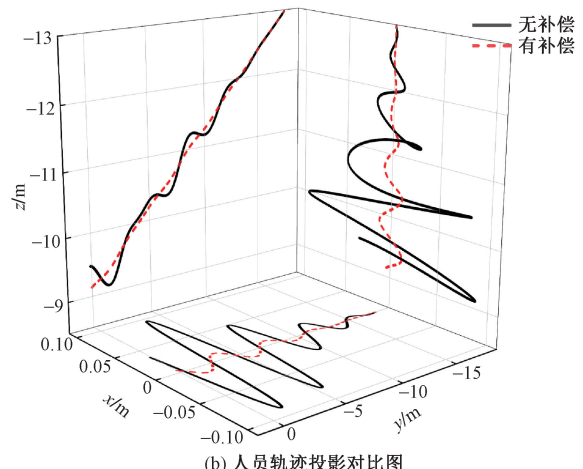
(b) 转运平台轨迹投影对比图

图 15 转运平台轨迹对比图

Fig. 15 Trajectory comparison diagram of transfer platform



(a) 人员轨迹空间对比图



(b) 人员轨迹投影对比图

图 16 人员运动轨迹对比图

Fig. 16 Comparison diagram of personnel movement trajectory

4 结论

针对海上稳定廊桥在用于海上人员和货物转运时所表现出的动力学特性和建模难题,经过动力学建模和仿真分析,得出以下结论。

(1)运用凯恩方法和虚功原理建立在广义坐标系下海上稳定廊桥显式动力学模型。

(2)运用MSS工具箱模拟4级海况,并在此运动激励下通过MATLAB与Adams联合仿真,得出支链速度中最大误差仅为0.0075%,动力学模型中支链驱动力最大误差为1.91%,说明各支链驱动力理论计算和仿真数据基本一致,验证了所建立理论模型的正确性。

(3)对有、无补偿时转运平台与人员的运动轨迹进行分析,其中转运平台的运动补偿达到89.1%,人员转运过程中运动补偿达到85.1%,说明海上稳定廊桥可以有效保证人员转运的安全。

参 考 文 献

- [1] Yin L, Qiao D, Li B, et al. Modeling and controller design of an offshore wind service operation vessel with parallel active motion compensated gangway [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112999.
- [2] Wang A, Wei Y, Han H, et al. Ocean wave active compensation analysis of inverse kinematics for hybrid boarding system based on fuzzy algorithm [C]//OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). New York: IEEE, 2018: 1-6.
- [3] 范昆龙, 王生海, 仇伟晗, 等. 3UPU-UP 并联平台可操作性与工作空间分析[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(16): 6935-6942.
Fan Kunlong, Wang Shenghai, Qiu Weihan, et al. 3UPU-UP parallel platform operability and workspace analysis[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(16): 6935-6942.
- [4] 陈丽. Stewart 平台 6-DOF 并联机器人完整动力学模型的建立[J]. *燕山大学学报*, 2004(3): 228-232.
Chen Li. Wholly dynamic modeling of 6-DOF Stewart platform parallel robot[J]. *Journal of Yanshan University*, 2004(3): 228-232.
- [5] Bingul Z, Karahan O. Dynamic modeling and simulation of Stewart platform[M]. London: Intech Open Access Publisher, 2012.
- [6] Qiu J, Qiu W, Niu A, et al. Modeling and analysis of offshore gangway under dynamic load[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(1): 77-85.
- [7] Yang X, Wu H, Chen B, et al. Dynamic modeling and decoupled control of a flexible Stewart platform for vibration isolation [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 439: 398-412.
- [8] Niu A, Wang S, Sun Y, et al. Dynamic modeling and analysis of a novel offshore gangway with 3UPU/UP-RRP series-parallel hybrid structure[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 113122.
- [9] 陈子明, 刘晓檬, 张扬, 等. 对称两转一移 3-UPU 并联机构的动力学分析[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(21): 46-53.
Chen Ziming, Liu Xiaomeng, Zhang Yang, et al. Dynamics analysis of a symmetrical 2R1T 3-UPU parallel mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(21): 46-53.
- [10] Dasgupta B, Mruthyunjaya T. A Newton-Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1998, 33(8): 1135-1152.
- [11] Oftadeh R, Aref M M, Taghirad H D. Explicit dynamics formulation of Stewart-Gough platform: a Newton-Euler approach [C]//2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2010: 2772-2777.
- [12] Wu Y, Yu K, Jiao J, et al. Dynamic modeling and robust nonlinear control of a six-DOF active micro-vibration isolation manipulator with parameter uncertainties [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 92: 407-435.
- [13] Chen W, Wen Y, Tong X, et al. Dynamics modeling and modal space control strategy of ship-borne Stewart platform for wave compensation[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2023, 15(4): 041015.
- [14] 王安琪. 基于混联机构的海浪主动补偿系统建模及控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
Wang Anqi. Research on model and control method of ocean wave active compensation system based on hybrid mechanism[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [15] 邱建超, 陈海泉, 仇伟晗, 等. 船载串并混联海上稳定廊桥动力学建模与分析[J]. *中国造船*, 2023, 64(1): 146-160.
Qiu Jianchao, Chen Haiquan, Qiu Weihan, et al. Dynamic modeling and analysis of shipborne series-parallel hybrid offshore gangway[J]. *Shipbuilding of China*, 2023, 64(1): 146-160.
- [16] 王力航, 郭菲, 卢文娟, 等. 3UPS/S 舰船稳定平台非惯性系动力学建模[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(1): 20-29.
Wang Lihang, Guo Fei, Lu Wenjuan, et al. Non-inertial system dynamic modeling of 3UPS/S ship stability platform[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(1): 20-29.
- [17] 邱建超. 串并混联海上稳定廊桥动力学建模与实验研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.
Qiu Jianchao. Dynamic modeling and experimental study of series-parallel hybrid offshore gangway [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023.
- [18] Fossen T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.