

TÍNH TOÁN DAO ĐỘNG CỦA CẦU TRỤC CÓ KẾ ĐẾN KHỐI LƯỢNG CỦA MÓC TREO - RÒNG RỌC

CALCULATING CRANE VIBRATION CONSIDERING MASS OF HOOK - PULLY SYSTEM

HOÀNG MẠNH CƯỜNG

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: cuonghm@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo này trình bày việc tính toán dao động của hệ cầu trục, trong quá trình dịch chuyển các tải trọng, khi cả dầm chính và xe tời dịch chuyển cùng lúc, trong đó có kể đến khối lượng của móc cầu - ròng rọc. Đầu tiên, một mô hình dao động đã được đề xuất, việc thiết lập phương trình vi phân chuyển động cho mô hình này được thực hiện bằng áp dụng phương pháp Lagrange. Việc giải hệ các phương trình vi phân được thực hiện bằng phương pháp tính toán số. Các kết quả thu được là dao động của tải trọng và móc cầu trong quá trình vận hành của cầu trục.

Từ khóa: Cầu trục, dao động, động lực học.

Abstract

This paper presents the calculation of vibration of the cranes during moving loads when both the main beam and the trolley move simultaneously. There, Including the weight of the suspension hook - pulley. The first oscillation model was proposed; the formulation of dynamic equations for this model is done by the Lagrange method. We will obtain a system of ordinary differential equations and partial derivative differential equations. Solving the system of differential equations is done by numerical methods. The results obtained are the oscillation of load and oscillation of suspension hook - pulley during the operation of the cranes.

Keywords: Crane, vibration, dynamics.

1. Mở đầu

Cầu trục là một thiết bị được sử dụng phổ biến trong các xưởng sản xuất để nâng hạ, dịch chuyển các vật có khối lượng lớn. Trong quá trình vận hành, việc dịch chuyển dầm chính và xe tời cùng lúc, sẽ giảm thời gian di chuyển vật nặng đến vị trí mong muốn. Tuy nhiên, nếu sự vận hành không hợp lý sẽ dẫn đến tải trọng dao động, điều này, ngoài việc có thể sẽ mất nhiều thời gian hơn mà còn gây nguy

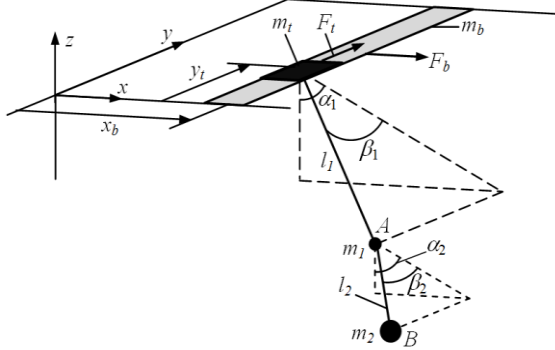
hiểm cho người vận hành. Do đó, việc thiết kế các quy luật điều khiển hợp lý nhằm giảm dao động cho tải trọng là rất cần thiết. Muốn vậy, việc tính toán, phân tích động lực học cầu trục phải được thực hiện trước tiên. Đã có nhiều công trình được công bố liên quan đến hệ cầu trục [1, 2, 3, 4, 6], ở đó, các tác giả tập trung vào nghiên cứu về động lực học và điều khiển cho cầu trục 2D và 3D. Tuy nhiên, trong các công trình đó hầu hết bỏ qua khối lượng của móc cầu dẫn đến mô hình dao động thu được là các hệ 2 bậc tự do và 4 bậc tự do. Đối với các trường hợp tải trọng lớn, điều này có thể chấp nhận được, trong một số trường hợp tải trọng không quá lớn và không được móc trực tiếp vào móc cầu, thì khối lượng móc cầu - ròng rọc cũng ít nhiều ảnh hưởng đến quá trình vận hành.

Trong nghiên cứu này, tác giả tập trung tính toán dao động của hệ cầu trục khi đồng thời dịch chuyển cả dầm chính và xe tời. Trong đó, có kể đến khối lượng của móc cầu - ròng rọc, đây là cơ sở để thiết kế các quy luật điều khiển hợp lý, tạo ra sự ổn định và chính xác cao hơn trong quá trình vận hành cầu trục.

2. Thiết lập phương trình vi phân dao động của cầu trục

Xét mô hình dao động của cầu trục được cho như trên Hình 1. Trong đó, dầm chính cầu trục được xem như vật rắn chuyển động tịnh tiến dưới tác dụng của lực F_b , dầm có khối lượng m_b , chịu tác dụng của phản từ cân với hệ số b_b , xe tời được coi như một chất điểm có khối lượng m_t , chịu tác dụng của lực F_t dọc theo trục dầm chính, phản từ cân đặt lên xe tời có độ cân b_t . Cụm móc cầu - ròng rọc và tải trọng cũng được coi như các chất điểm với khối lượng tương ứng là m_1 và m_2 . Gọi l_1 là chiều dài dây cáp nối từ xe tời tới cụm móc cầu - ròng rọc, l_2 là chiều dài dây nối từ vật nặng tới móc cầu. Từ hình vẽ cho thấy, cơ hệ có 6 bậc tự do, ta chọn hệ tọa độ suy rộng đủ là: $q_1 = x_b$; $q_2 = y_t$; $q_3 = \alpha_1$; $q_4 = \beta_1$; $q_5 = \alpha_2$; $q_6 =$

β_2 . Trong đó, x_b là dịch chuyển của dầm chính, y_t là dịch chuyển của xe tời dọc trục của dầm chính, α_1 và β_1 là góc lắc của dây cáp nối từ xe tời tới cụm móc cầu - ròng rọc, α_2 và β_2 là góc lắc của dây treo từ tải trọng tới cụm móc cầu - ròng rọc. Khi đó động năng, thế năng, hàm hao tán được xác định như sau:



Hình 1. Mô hình dao động của cần trục 6 bậc tự do

Động năng của hệ:

$$T = \frac{1}{2} m_b \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_t (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2) + \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_A^2 + \dot{y}_A^2 + \dot{z}_A^2) + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_B^2 + \dot{y}_B^2 + \dot{z}_B^2) \quad (1)$$

Trong đó:

$$\begin{cases} x_A = q_1 + l_1 \cos q_4 \sin q_3 \\ y_A = q_2 - l_1 \sin q_4 \\ z_A = -l_1 \cos q_4 \cos q_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_B = x_A + l_2 \cos q_6 \sin q_5 \\ y_B = y_A - l_2 \sin q_6 \\ z_B = z_A - l_2 \cos q_6 \cos q_5 \end{cases} \quad (3)$$

Thế năng của cơ hệ:

$$\Pi = -m_1 g l_1 \cos q_3 \cos q_4 - m_2 g (l_1 \cos q_3 \cos q_4 + l_2 \cos q_5 \cos q_6) \quad (4)$$

Hàm hao tán:

$$\Phi = \frac{1}{2} b_b \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} b_t \dot{q}_2^2 \quad (5)$$

Các lực suy rộng của các lực hoạt động không thể:

$$\begin{aligned} Q_1^* &= F_b, \quad Q_2^* = F_t, \quad Q_3^* = 0, \quad Q_4^* = 0, \\ Q_5^* &= 0, \quad Q_6^* = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Thay các biểu thức động năng, thế năng, hàm hao tán vào phương trình Lagrange loại II [8]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + Q_i; \quad (i = \overline{1, 6}) \quad (7)$$

Ta được hệ 6 phương trình vi phân mô tả dao

động của cầu trục dịch chuyển tải trọng trong không gian có dạng:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{U}(t) \quad (8)$$

Trong đó:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} & m_{14} & m_{15} & m_{16} \\ 0 & m_{22} & 0 & m_{24} & 0 & m_{26} \\ m_{31} & 0 & m_{33} & 0 & m_{35} & m_{36} \\ m_{41} & m_{42} & 0 & m_{44} & m_{45} & m_{46} \\ m_{51} & 0 & m_{53} & m_{54} & m_{55} & 0 \\ m_{61} & m_{62} & m_{63} & m_{64} & 0 & m_{66} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ g_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} F_b \\ F_t \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

với:

$$m_{11} = m_b + m_t + m_1 + m_2, \quad m_{13} = m_{31} = (m_1 + m_2) l_1 C_3 C_4,$$

$$m_{14} = m_{41} = -(m_1 + m_2) l_1 S_3 S_4$$

$$m_{15} = m_{51} = m_2 l_2 C_5 C_6, \quad m_{16} = m_{61} = -m_2 l_2 S_5 S_6,$$

$$m_{22} = m_t + m_1 + m_2,$$

$$m_{24} = m_{42} = -(m_1 + m_2) l_1 C_4, \quad m_{26} = m_{62} = -m_2 l_2 C_6,$$

$$m_{33} = (m_1 + m_2) l_1^2 C_4^2,$$

$$m_{35} = m_{53} = m_2 l_1 l_2 C_4 C_6 (C_3 C_5 + S_3 S_5),$$

$$m_{36} = m_{63} = -m_2 l_1 l_2 C_4 S_6 (C_3 S_5 - S_3 C_5),$$

$$m_{44} = (m_1 + m_2) l_1^2, \quad m_{45} = m_{54} = m_2 l_1 l_2 S_4 C_6 (C_3 S_5 - S_3 C_5),$$

$$m_{55} = m_2 l_2^2 C_6^2, \quad m_{66} = m_2 l_2^2,$$

$$m_{46} = m_{64} = m_2 l_1 l_2 (C_4 C_6 + C_3 C_5 S_4 S_6 + S_3 S_4 S_5 S_6),$$

$$c_1 = b_b \dot{q}_1 - \dot{q}_3^2 (m_1 + m_2) l_1 C_4 S_3 - \dot{q}_4^2 (m_1 + m_2) l_1 C_4 S_3 -$$

$$-(\dot{q}_5^2 + \dot{q}_6^2) m_2 l_2 C_6 S_5 -$$

$$-2 \dot{q}_3 \dot{q}_4 (m_1 + m_2) l_1 C_3 S_4 - 2 \dot{q}_5 \dot{q}_6 l_2 m_2 C_5 S_6$$

$$c_2 = b_t \dot{q}_2 + \dot{q}_4^2 (m_1 + m_2) l_1 S_4 + \dot{q}_6^2 l_2 m_2 S_6$$

$$c_3 = -l_1 C_4 [2\dot{q}_3 \dot{q}_4 (m_1 + m_2) l_1 S_4 + \\ + \dot{q}_5^2 m_2 l_2 C_6 (C_3 S_5 - S_3 C_5) + \\ + \dot{q}_6^2 m_2 l_2 C_6 (C_3 S_5 - S_3 C_5) + \\ + 2\dot{q}_5 \dot{q}_6 m_2 l_2 S_6 (C_3 C_5 + S_3 S_5)]$$

$$c_4 = \dot{q}_3^2 (m_1 + m_2) l_1^2 S_4 C_4 - \dot{q}_6^2 l_1 l_2 m_2 S_4 C_6 + \\ + (\dot{q}_5^2 + \dot{q}_6^2) m_2 l_1 l_2 C_6 S_4 \cos(q_3 - q_5) + \\ + 2\dot{q}_5 \dot{q}_6 m_2 l_1 l_2 S_6 S_4 \sin(q_3 - q_5)$$

$$c_5 = -m_2 l_2 C_6 [2\dot{q}_5 \dot{q}_6 l_2 S_6 - \\ - (\dot{q}_3^2 + \dot{q}_4^2) l_1 C_4 (C_3 S_5 - S_3 C_5) + \\ + 2\dot{q}_3 \dot{q}_4 l_1 S_4 (C_3 C_5 + S_3 S_5)]$$

$$c_6 = l_2 m_2 [\dot{q}_5^2 l_2 C_6 S_6 - \dot{q}_4^2 l_1 C_6 S_4 + \\ + (\dot{q}_3^2 + \dot{q}_4^2) l_1 C_4 S_6 (C_3 C_5 + S_3 S_5) + \\ + 2\dot{q}_3 \dot{q}_4 l_1 S_4 S_6 (C_3 S_5 - S_3 C_5)]$$

$$g_1 = 0, \quad g_2 = 0, \quad g_3 = (m_1 + m_2) g l_1 C_4 S_3,$$

$$g_4 = (m_1 + m_2) g l_1 C_3 S_4,$$

$$g_5 = m_2 g l_2 C_6 S_5, \quad g_6 = m_2 g l_2 C_5 S_6$$

Trong đó ta đưa vào các ký hiệu:

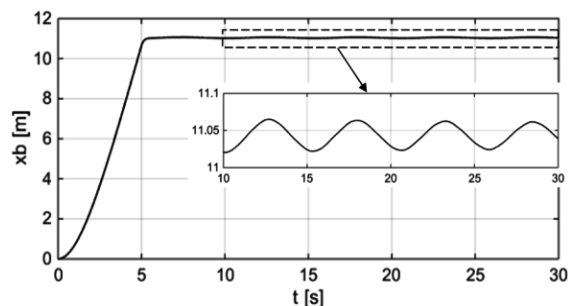
$$C_i = \cos q_i, \quad S_i = \sin q_i, \quad (i = 3, 4, 5, 6)$$

Hệ (8) là hệ các phương trình vi phân phi tuyến, để giải các hệ này ta phải sử dụng các phương pháp số. Trong công trình này, tác giả sử dụng thuật toán Newmark [7] tìm nghiệm của phương trình vi phân phi tuyến (8). Việc xây dựng chương trình tính toán được thực hiện dựa trên ngôn ngữ lập trình MATLAB®, dưới đây là một số kết quả tính toán.

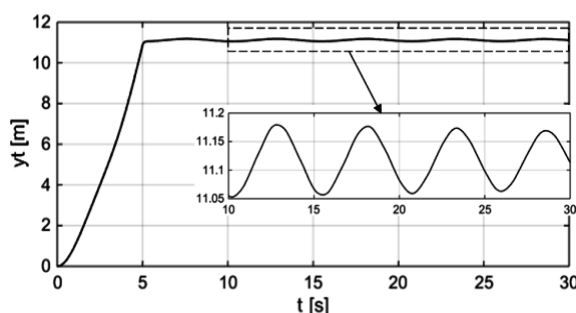
3. Các kết quả tính toán số

Để tính toán số, ta cho giá trị của các tham số như sau: $l = 28(\text{m})$, $l_1 = 5(\text{m})$, $l_2 = 2(\text{m})$, $m_b = 15730(\text{kg})$, $m_t = 2200(\text{kg})$, $m_1 = 180(\text{kg})$, $m_2 = 1000(\text{kg})$, $b_b = 1400(\text{Ns.m})$, $b_t = 200(\text{Ns.m})$.

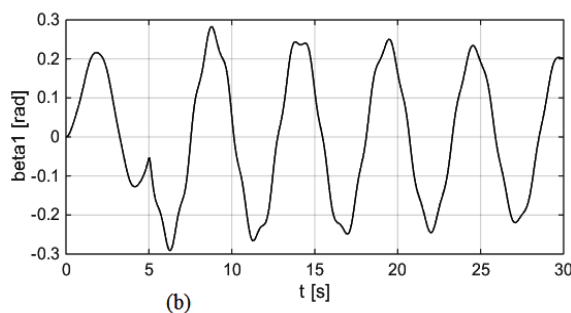
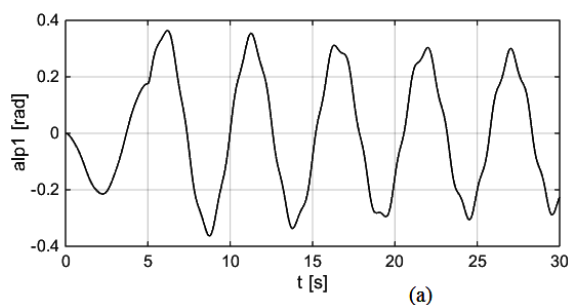
Với các số liệu như trên sau khi tính toán ta được một số kết quả được cho trong các Hình 2 đến 5. Từ các hình vẽ cho ta thấy, khi vận hành cầu trục, việc dừng dầm chính và xe tời một cách đột ngột khi đến vị trí mong muốn sẽ làm các dây cáp dao động từ đó cũng dầm cho dầm và xe tời dịch chuyển theo, điều này sẽ làm giảm hiệu suất vận hành, và gây nguy hiểm cho người sử dụng. Đặc biệt, từ các Hình 4 và 5 cho ta thấy, dao động của dây cáp tời và dây treo tải trọng hoàn toàn khác nhau, điều này chứng tỏ khối lượng của cụm móc cầu - ròng rọc có ảnh hưởng đến việc vận hành của cầu trục. Do đó, cần thiết phải có một kỹ thuật điều khiển phù hợp để nâng cao hiệu suất khi vận hành cầu trục.



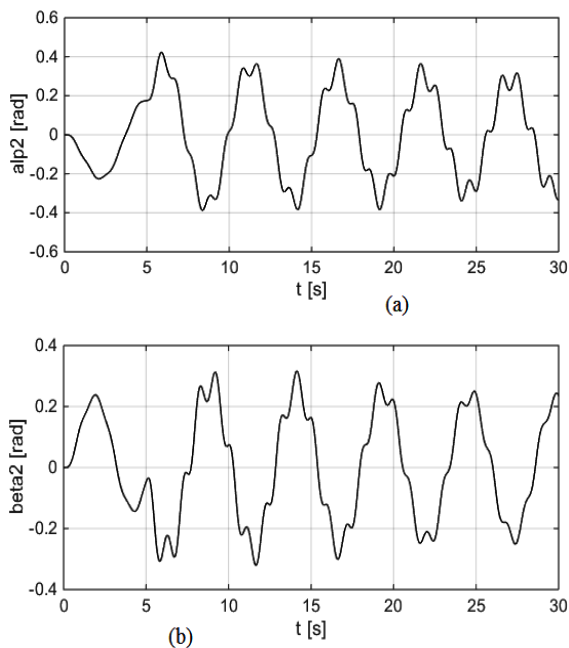
Hình 2. Dịch chuyển của dầm chính cầu trục



Hình 3. Dịch chuyển xe tời



Hình 4. Dao động của dây cáp tời:
a) góc lắc α , b) góc lắc β_1



Hình 5. Dao động của dây treo tải trọng:
a) góc lắc α_2 , b) góc lắc β_2

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, tác giả đã tập trung tính toán dao động của hệ cầu trục, trong đó có kê khối lượng của cụm chi tiết móc cầu - ròng rọc. Mô hình dao động thu được là hệ có 6 bậc tự do. Để thiết lập phương trình vi phân chuyển động, phương pháp Lagrange đã được sử dụng, khi đó thu được hệ 6 phương trình vi phân phi tuyến. Việc giải hệ phương trình này được thực hiện bằng phương pháp tính toán số. Các kết quả thu được là dịch chuyển dầm chính cầu trục, dịch chuyển của xe tời, dao động của dây cáp tời và dao động của dây treo tải trọng. Các kết quả tính toán này sẽ là cơ sở để thiết kế quy luật điều khiển cho cầu trục nhằm giảm dao động của dầm chính và dao động xe tời khi dừng khởi động ở vị trí mong muốn đồng thời cũng giảm dao động của tải trọng, từ đó nâng cao được hiệu suất vận hành của cầu trục.

Lời cảm ơn

Bài báo là sản phẩm của đề tài nghiên cứu khoa học cấp Trường năm học 2019-2020: “*Tính toán dao động uốn của dầm cầu trục dưới tác dụng của tải trọng di động bằng phương pháp Ritz*”, được hỗ trợ kinh phí bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Tường Xuân Thường, Dương Minh Đức, Nguyễn Tùng Lâm, “*Điều khiển chống rung cho cầu trục ba chiều bằng phương pháp Hybrid Shape*”, Hội nghị toàn quốc lần thứ 3 về Điều khiển và Tự động hoá - VCCA, 2015.
- [2] Le Anh Tuan, Hoang Manh Cuong, and Soon-Geul Lee, “*Second-order Sliding Mode Control of 3D Overhead Cranes*”, ICCAIS 2013, pp.291-296, 2013.
- [3] Dongkyoung, C., “*Nonlinear Tracking Control of 3-D Overhead Cranes Against the Initial Swing Angle and the Variation of Payload Weight*” IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 17, No. 4, pp.876-883, 2009.
- [4] Tuan Anh Le, Gook-Hwan Kim, Min Young Kim, Soon-Geul Lee, “*Partial Feedback Linearization Control of Overhead Cranes with Varying Cable Lengths*”, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 13, No. 4, pp.501-507, 2012.
- [5] Nguyễn Văn Khang, Hoàng Hà, Nguyễn Minh Phương, “*Calculating Transverse Vibration of Beam Bridges Under the Action of Some Moving Bodies in VietNam*” Proceedings of National Conference on Engineering Mechanics and Automation, Bach Khoa Publishing, HaNoi 2006, Vol. 1, pp.157-171, 2006.
- [6] Le Anh Tuan, Soon-Geul Lee, Luong Cong Nho, Dong Han Kim: “*Model Reference Adaptive Sliding Mode Control for Three Dimensional Overhead Cranes*”, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 14, No. 8, pp.1329-1338, 2013.
- [7] Nguyễn Văn Khang, *Động lực học hệ nhiều vật*, NXB Khoa học và kỹ thuật, 2017.
- [8] Nguyễn Văn Khang, *Dao động kỹ thuật*, NXB Khoa học và kỹ thuật, 2005.

Ngày nhận bài:	15/3/2020
Ngày nhận bản sửa:	16/4/2020
Ngày duyệt đăng:	20/4/2020