

Mô hình động lực học mô phỏng dao động cần cầu tháp

ThS. NGUYỄN THỨC TRĂNG
Học viện Kỹ thuật Quân sự

Tóm tắt: Bài báo trình bày việc xây dựng mô hình động lực học để mô phỏng dao động của khối hàng trong cần cầu tháp, qua đó tăng cường hiểu biết về sự hoạt động của cần cầu cho các nhà quản lý, khai thác và công nhân vận hành cần cầu tháp.

Abstract: This paper presents the construction of models to simulate the dynamics of the oscillating mass in every tower cranes, thereby enhancing the understanding of the operation of cranes for managers, operators and tower crane operators.

1. Đặt vấn đề

Khi cần cầu hoạt động, một trong những thách thức lớn nhất của nhân viên vận hành cũng như các nhà quản lý và khai thác cần cầu đó là kiểm soát sự lắc lư của đối tượng được vận chuyển [2]. Hàng hóa mà cần cầu vận chuyển thường có kích thước và khối lượng lớn. Khi cần cầu chuyển động có gia tốc, sẽ xuất hiện lực quán tính. Ngoài chuyển động theo cùng cần cầu, lực quán tính theo sẽ gây ra chuyển động tương đối của hàng hóa đối với cần cầu, đó là dao động (sự lắc lư) của đoạn dây cáp treo xung quanh vị trí cân bằng của nó. Nếu vận hành cần cầu không hợp lý thì cho dù cần cầu dừng hẳn, dao động đó có thể có biên độ lớn và kéo dài trong nhiều giây, thậm chí tới vài phút. Hơn nữa, trước khi được hạ xuống một vị trí xác định, hàng hóa vận chuyển phải đứng yên hoàn toàn để tránh lật đổ gây tai nạn cho đội ngũ công nhân tháo dỡ đúng đắn và những rủi ro khác.

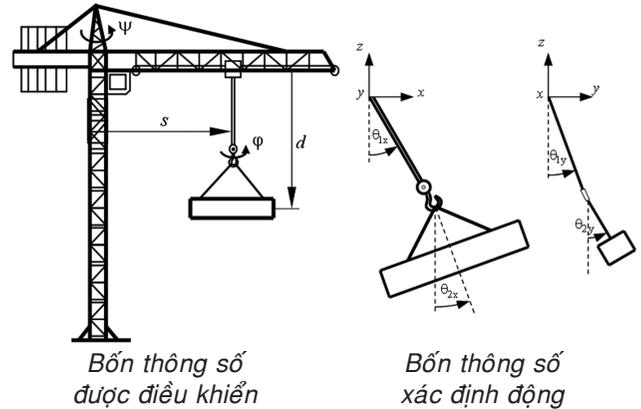
Để có thể kiểm soát được sự lắc lư của khối hàng được cẩu, đòi hỏi các nhà quản lý khai thác và nhân viên vận hành cần cầu phải được đào tạo chuyên sâu về lý thuyết cũng như thực tiễn trong xây dựng. Bài báo tập trung đề xuất một mô hình động lực học để mô tả dao động của khối hàng hóa của cần cầu tháp khi cần cầu hoạt động.

2. Mô hình cần cầu tháp

Khi cần cầu tháp hoạt động, bốn thông số luôn được nhân viên vận hành và nhân viên tháo móc kiểm soát nghiêm ngặt [1] (có thể gọi là bốn thông số điều khiển), đó là (Hình 1): Khoảng cách s từ xe đẩy đến cột cần cầu; chiều dài d của đoạn dây cáp treo hàng; góc quay ψ của cần quanh cột; góc quay φ của móc treo hàng quanh cáp treo (thông số φ được kiểm soát bởi nhân viên tháo móc, hầu hết trong các cần cầu tháp thì móc được phép xoay một góc nhỏ để hoàn thành nhiệm vụ xây dựng khác nhau).

Bốn thông số khác để xác định vị trí của móc đối với xe đẩy và của khối hàng đối với móc (đây là bốn bậc tự do để mô tả dao động cần cầu), chúng bao gồm: Góc lắc θ_{1x} của cáp treo quanh xe đẩy theo phương song song với cần (phương x); góc lắc θ_{2x} của khối hàng quanh móc theo phương song song với cần;

góc lắc θ_{1y} của cáp treo quanh xe đẩy theo phương vuông góc với cần (phương y); góc lắc θ_{2y} của khối hàng quanh móc theo phương vuông góc với cần.



Hình 1: Tám bậc tự do cần cầu tháp

Phần cáp treo đáp ứng giả định về lý thuyết của con lắc [4], lý do là: Khối lượng của hàng hóa vận chuyển thường lớn hơn nhiều so với khối lượng dây cáp; khi cần cầu hoạt động bình thường, biên độ dao động của cáp treo cũng như hàng hóa là tương đối nhỏ.

Sử dụng tám thông số nêu trên, ta hoàn toàn có thể mô tả được hành vi của cần cầu tháp trong quá trình vận hành.

3. Thiết lập phương trình động lực học cần cầu tháp

Để xây dựng phương trình động lực học, ta đưa ra những nhận xét sau: Cần cầu tháp chủ yếu được sử dụng trong các công trình xây dựng nhà cao tầng. Để chống rung lắc trong hoạt động và gây đổ khi mưa bão, khi phần cột cần cầu đủ cao thì trên một đoạn cột sẽ có một mối liên kết cứng với mặt sàn nhà. Mặt khác, cần cùng với dây đỡ tải tạo thành một khâu tam giác trong mặt phẳng thẳng đứng. Vì vậy, ta có thể coi cột và cần những phần tử tuyệt đối cứng, từ đó bỏ qua biến dạng và chuyển vị của chúng khi cần cầu mang tải.

Ký hiệu: $\dot{\psi}, \ddot{\psi}$ lần lượt là vận tốc góc, gia tốc góc của cần; \dot{s}, \ddot{s} là vận tốc, gia tốc trượt tương đối của xe đẩy dọc theo cần; \dot{d}, \ddot{d} là vận tốc, gia tốc của cáp nâng hạ. Các thông số điều khiển gây ra lực quán tính cho móc và tải khi chúng chuyển động.

Cáp cần cầu có thể được mô phỏng bởi hệ thống con lắc có hai bậc tự do. Tại mỗi thời điểm chuyển động, hệ thống con lắc tham gia chuyển động theo hai hướng độc lập: Hướng x song song với cần, hướng y vuông góc với mặt phẳng chứa cần và cột. Trong mỗi hướng, hệ thống gồm hai phần: Phần một là từ xe đẩy đến móc, phần hai là từ móc đến đối tượng vận chuyển (Hình 2). Do đó, ta biểu thị θ_{1x}, θ_{2x} là hai

tọa độ suy rộng đủ của hệ thống con lắc trong hướng x; θ_{1y}, θ_{2y} là hai tọa độ suy rộng đủ trong hướng y.

Dùng phương trình Lagrange loại hai để lập phương trình vi phân chuyển động tương đối của hệ con lắc trong hướng x:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_{q_i}, \quad q_i = \theta_1, \theta_2 \quad (1)$$

Sau đó, suy ra phương trình vi phân chuyển động theo hướng y. Động năng hệ con lắc là:

$$T = \frac{1}{2}(m_1 l_1^2 + J_{G1}) \dot{\theta}_1^2 + \frac{m_2}{2} (\dot{x}_B^2 + \dot{z}_B^2) + \frac{J_{G2}}{2} \dot{\theta}_2^2;$$

$$T = \frac{1}{2}(m_1 + m_2) l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}(m_2 l_2^2 + J_{G2}) \dot{\theta}_2^2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

Tính đạo hàm rồi xem $\cos(\theta_1 - \theta_2) = 1$, $\sin(\theta_1 - \theta_2) = \theta_1 - \theta_2$, sau đó bỏ đi các vô cùng bé bậc cao ta nhận được:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_1} \equiv (m_1 + m_2) l_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_2 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_2} \equiv m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_1 + (m_2 l_2^2 + J_{G2}) \ddot{\theta}_2$$

Tính lực suy rộng: Khi cần cầu được điều khiển, các thông số điều khiển s, d, ψ biến thiên sẽ xuất hiện các lực quán tính theo, lực quán tính Coriolis. Các lực quán tính này cùng với lực cản của gió tạo thành lực ngoài tác động vào các khối lượng m_1, m_2 . Ngoài ra, còn có hai mô men M_{C1}, M_{C2} cản lắc các đoạn dây l_1, l_2 tương ứng.

Biểu thị P_{1x}, P_{2x} là lực ngoài lần lượt tác động vào móc và đối tượng vận chuyển trong hướng x (Hình 3); W_x là lực cản của gió đối với đối tượng vận chuyển theo hướng x, bỏ qua lực cản của gió trên móc. Ta có:

$$P_{1x} = P_x(t) = -m_1(-s\dot{\psi}^2 + \ddot{s}) \quad (3)$$

$$P_{2x} = P_x(t) = -m_2(-s\dot{\psi}^2 + \ddot{s}) + W_x$$

Trong đó: P_{1y}, P_{2y} - Lực ngoài lần lượt tác động vào móc và đối tượng vận chuyển trong hướng y; W_y - Lực cản của gió đối với đối tượng vận chuyển trong hướng y. Ta sẽ có:

$$P_{1y} = P_y(t) = -m_1(-s\ddot{\psi} - 2\dot{s}\dot{\psi}) \quad (4)$$

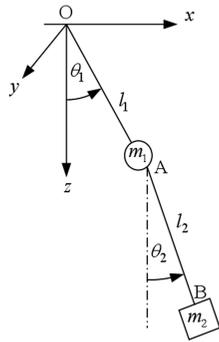
$$P_{2y} = P_y(t) = -m_2(-s\ddot{\psi} - 2\dot{s}\dot{\psi}) + W_y$$

Còn giá trị các mô men cản: $M_{C1} = k_1 \theta_1$, $M_{C2} = k_2(\theta_2 - \theta_1)$. Do đó, lực suy rộng (sau khi thay $\sin \theta_i = \theta_i$; $\cos \theta_i = 1$):

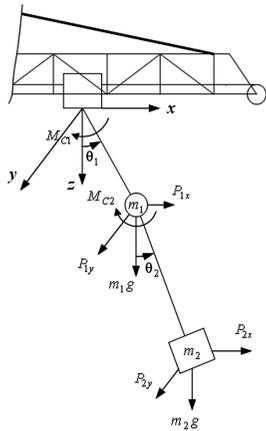
$$Q_{\theta_1} = -m_1 g l_1 \theta_1 - m_2 g (l_1 \theta_1 + l_2 \theta_2) - (k_1 + k_2) \theta_1 + P_{1x} l_1 + P_{2x} (l_1 + l_2)$$

$$Q_{\theta_2} = -m_2 g l_2 \theta_2 - k_2 \theta_2 + P_{2x} l_2 \quad (5)$$

Mặt khác, theo nghiên cứu của Caughey về giảm sóc để mô phỏng sự phân rã của biên độ góc: Với vật có khối lượng không đổi m và độ cứng không đổi k, khi



Hình 2: Mô hình phần dây cáp treo



Hình 3: Lực bên ngoài

đó cần liên tục c cho bởi:

$$c = 2\sqrt{km} \cdot \xi \quad (6)$$

Trong đó, ξ - Hệ số giảm sóc.

Từ kết quả trong các phương trình trên, ta nhận được phương trình vi phân mô tả dao động của hệ theo hướng x như sau:

$$\begin{bmatrix} (m_1 + m_2) l_1^2 + J_{G1x} & m_2 l_1 l_2 \\ m_2 l_1 l_2 & m_2 l_2^2 + J_{G2x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{1x}(t) \\ \ddot{\theta}_{2x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11x} & c_{12x} \\ c_{21x} & c_{22x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{1x}(t) \\ \dot{\theta}_{2x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + (m_1 l_1(t) + m_2 l_2) g & -m_2 g l_2 \\ 0 & -k_2 + m_2 g l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{1x}(t) \\ \theta_{2x}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_1(-s(t)\dot{\psi}^2(t) + \ddot{s}(t)) l_1(t) - (m_2(-s(t)\dot{\psi}^2(t) + \ddot{s}(t)) + W_x)(l_1(t) + l_2) \\ -m_2(-s(t)\dot{\psi}^2(t) + \ddot{s}(t)) l_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Từ phương trình theo hướng x và lực ngoài theo hướng y, ta suy ra được phương trình vi phân mô tả dao động hệ thống cáp treo theo hướng y như sau:

$$\begin{bmatrix} (m_1 + m_2) l_1^2 + J_{G1y} & m_2 l_1 l_2 \\ m_2 l_1 l_2 & m_2 l_2^2 + J_{G2y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{1y}(t) \\ \ddot{\theta}_{2y}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11y} & c_{12y} \\ c_{21y} & c_{22y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{1y}(t) \\ \dot{\theta}_{2y}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + (m_1 l_1(t) + m_2 l_2) g & -m_2 g l_2 \\ 0 & -k_2 + m_2 g l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{1y}(t) \\ \theta_{2y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_1(-s(t)\dot{\psi}(t) - 2\dot{s}(t)\dot{\psi}(t)) l_1(t) - (m_2(-s(t)\dot{\psi}(t) - 2\dot{s}(t)\dot{\psi}(t)) + W_y)(l_1(t) + l_2) \\ -m_2(-s(t)\dot{\psi}(t) - 2\dot{s}(t)\dot{\psi}(t)) + W_y l_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Phương trình (7) và (8) cho thấy các thông số dao động thay đổi trong mỗi bước thời gian. Nói cách khác, khi giải các phương trình này, ta phải tính toán lại ma trận khối lượng, ma trận độ cứng sau mỗi bước thời gian.

4. Hướng giải các phương trình động lực học

Hệ các phương trình (7), (8) có thể giải bằng cách chuẩn hóa các ma trận M, C và K qua các bước sau:

4.1. Tìm trị riêng và véc tơ riêng

M, C, K và P là các ma trận cấp hai, nên sẽ có hai véc tơ riêng và được biểu diễn bằng ma trận sau đây:

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

4.2. Xác định ma trận đại diện q

Bất kỳ bộ N véc tơ độc lập đều có thể sử dụng như một cơ sở để đại diện cho N véc tơ độc lập khác, do đó θ có thể được đại diện bởi q như sau:

$$\theta = \phi q = \begin{bmatrix} \phi_{11} q_1 & \phi_{12} q_2 \\ \phi_{21} q_1 & \phi_{22} q_2 \end{bmatrix}$$

Phương trình (7) và (8) được viết lại như sau:

$$M\dot{\phi}q + C\dot{\phi}q + K\phi q = P \quad (10)$$

4.3. Xác định ma trận đường chéo

Gọi ϕ^t là ma trận chuyển của ϕ , từ phương trình (10), ta được các ma trận đường chéo:

$$M' = \phi^t M \phi; \quad C' = \phi^t C \phi; \quad K' = \phi^t K \phi \quad \text{và} \quad P' = \phi^t P \phi \quad (11)$$

Vì M', C', K' và P' là các ma trận đường chéo, nên mỗi phương trình (7) và (8) đều được phân tích thành hai phương trình vi phân thường sau đây:

$$M'_{11} \ddot{q}_1 + C'_{11} \dot{q}_1 + K'_{11} q_1 = P'_{11}$$

$$M'_{22} \ddot{q}_2 + C'_{22} \dot{q}_2 + K'_{22} q_2 = P'_{22} \quad (12)$$

4.4. Giải các phương trình vi phân (12)

Sau khi chuẩn hóa ma trận, mỗi phương trình (7), (8) trở thành hai phương trình vi phân thường. Có thể giải các phương trình đó theo phương pháp Newmark's như sau:

4.4.1. Các bước của phương pháp Newmark's

Xét phương trình:

$$m(t)\ddot{q}(t) + c(t)\dot{q}(t) + k(t)q(t) = p(t).$$

Trong mỗi bước thời gian t_i , có tính đến sự liên

tục của phương trình chuyển động, bao gồm: $m(t_i)$, $c(t_i)$, $k(t_i)$, $p(t_i)$, $q(t_i)$, $\dot{q}(t_i)$, Δt và tìm dịch chuyển cũng như vận tốc của bước thời gian tiếp theo, bao gồm $\dot{q}(t_{i+1})$ và $q(t_{i+1})$.

Phương pháp Newmark's - một phương pháp bước thời gian, được tính đến những điều kiện sau đây của phương trình:

Trong đó, γ và β - Các tham số đặc trưng cho sự tăng tốc và sự ổn định sau mỗi bước thời gian. Giả sử sự tăng tốc sau mỗi bước thời gian là không đổi. Theo [3] lựa chọn: $\gamma = 0.5$ và $\beta = 0.25$.

Thủ tục của phương pháp Newmark's như sau:

$$\text{Bước 1: } \ddot{q}(t_i) = \frac{p(t_i) - c\dot{q}(t_i) - k(t_i)q(t_i)}{m(t_i)}$$

$$\text{Bước 2: } \hat{k} = k(t_i) + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}c(t_i) + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)^2}m(t_i)$$

$$\text{Bước 3: } a = \frac{1}{\beta\Delta t}m(t_i) + \frac{\gamma}{\beta}c(t_i)$$

$$\text{và } b = \frac{1}{2\beta}m(t_i) + \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)c(t_i)$$

$$\text{Bước 4: } \Delta\hat{p} = \Delta p(t_i) + a\dot{q}(t_i) + b\ddot{q}(t_i)$$

$$\text{Bước 5: } \Delta q = \frac{\Delta\hat{p}}{\hat{k}}$$

$$\text{Bước 6: } \Delta\dot{q} = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\Delta q - \frac{\gamma}{\beta}\dot{q}(t_i) + \Delta t\left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{q}(t_i)$$

Bước 7: Cập nhật

$$q(t_{i+1}) = q(t_i) + \Delta q, \quad \dot{q}(t_{i+1}) = \dot{q}(t_i) + \Delta\dot{q}$$

4.4.2. Giải véc tơ riêng

Sử dụng phương pháp lặp để tìm véc tơ riêng cho ma trận M và K, các thủ tục như sau:

Bước 1: Khởi tạo véc tơ riêng x_1 ứng với trị riêng λ_1 ;

Bước 2: Tính gần đúng véc tơ riêng tiếp theo

$$\bar{x}_{j+1} = K^{-1}Mx_j$$

Bước 3: Tính gần đúng trị riêng

$$\lambda^{(j+1)} = \frac{\bar{x}_{j+1}^T M x_j}{\bar{x}_{j+1}^T M \bar{x}_{j+1}}$$

$$\text{Bước 4: Tính } x_{j+1} = \frac{\bar{x}_{j+1}}{\sqrt{\bar{x}_{j+1}^T M \bar{x}_{j+1}}}$$

Bước 5: Nếu $\frac{|\lambda^{j+1} - \lambda^j|}{\lambda^{j+1}} < \text{mức cho phép}$ thì trở lại \bar{x}_{j+1} ; ngược lại về bước 3.

5. Kết luận

Bài báo xây dựng được một mô hình, thiết lập được phương trình động lực học để mô tả hành vi của cần cẩu tháp khi nó hoạt động. Bên cạnh đó, bài báo cũng đã chỉ ra hướng giải quyết các phương trình động lực học. Mô hình này có thể tiếp tục phát triển cho mục đích giáo dục, chẳng hạn như chương trình đào tạo cho các nhà khai thác cần cẩu, hoặc tài liệu cho sinh viên. Để có thể đạt được mục tiêu này, đòi hỏi các nhà khai thác cũng như nhân viên vận hành cần cẩu phải hiểu biết sâu hơn nữa về hành vi của cần cẩu. Giải bài toán mô phỏng trên mô hình này sẽ giúp các nhà điều hành hiểu sâu sắc sự hoạt động của cần

cẩu, góp phần làm cho cần cẩu tháp hoạt động hiệu quả và an toàn hơn □

Tài liệu tham khảo

[1]. Nguyễn Văn Hợp, Phạm Thị Nghĩa, Lê Thiện Thành, *Máy trục vận chuyển*, NXB. GTVT, 2000.

[2]. Amatucci, E., Bostelman, R., Dagalakis, N., Tsai, T, *Summary of Modeling and Simulation for NIST RoboCrane Applications*, Proceedings of the 1997 Deneb International Simulation Conference and Technology Showcase, Detroit, MI. September, 1997.

[3]. Chopra, K. A. (2000), *Dynamics of Structures: theory and applications to earthquake engineering*, Prentice - Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.

[4]. Leung, W.T., and Tam, *Models for Assessing Hoisting Times of Tower Cranes*, Journal of construction engineering and management, 125(6), pp.385 - 391, 1999.

[5]. Tam, CM, Tong, KL and Chan, *Genetic Algorithm for Optimizing Supply location around tower crane*, Journal of construction engineering and management, 113(2), pp.315- 321, 2001.

Ngày nhận bài: 10/3/2014

Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2014

Người phản biện: PGS. TS. Nguyễn Văn Bang
TS. Trần Văn Bình

XUÂN CẢNH

Thiên nhiên

Thiên nhiên xã hội hòa đồng

Ra đây thưởng thức vô cùng sống vui

Tuổi già dạo cảnh ngắm trời

Người xe qua lại, cho đời vui lây

Sự đời có rủi có may

Tự mình tìm kiếm những ngày giữa thu

Khi hao hụt, có khi bù

Biết cách sống đẹp, tha hồ dài lâu

Tinh hoa chất lọc mai sau

Đức lưu quang để dành sau hưởng phần.