

Cơ sở lí thuyết để xây dựng mô hình động học của cần trục tháp kiểu tháp cố định, đầu bằng

Th.S Nguyễn Anh Tuấn

Bộ môn Máy xây dựng-Trường ĐH Thủy lợi

Đặt vấn đề.

Trong những năm vừa qua, nhu cầu xây dựng các công trình có độ cao lớn ngày càng tăng, đặc biệt là ở các thành phố lớn như Hà Nội, Thành phố Hồ Chí Minh. Trong quá trình thi công các công trình cao tầng này, cần trục tháp đóng vai trò rất quan trọng trong thi công. Để vận hành cần trục tháp hiệu quả và an toàn, cần phải nắm được các vấn đề liên quan đến ứng xử động học của cần trục tháp khi hoạt động. Nghiên cứu này bước đầu đưa ra cơ sở lí thuyết nhằm xây dựng mô hình động học của cần trục tháp, để từ đó, tiến tới giải quyết vấn đề ổn định của nó khi hoạt động. Chúng ta xem cần trục tháp như là một rô-bốt có bốn bậc tự do (BTD), kết hợp với bộ phận buộc cáp, và vật nâng, rô-bốt chuyển thành một hệ động học với tổng cộng tám BTD. Theo đặc tính vật lí của cáp cần trục, nghiên cứu này sẽ rút ra các phương trình chuyển động và xây dựng các thuật toán để giải các phương trình đó trong từng khoảng thời gian trong quá trình hoạt động của cần trục.

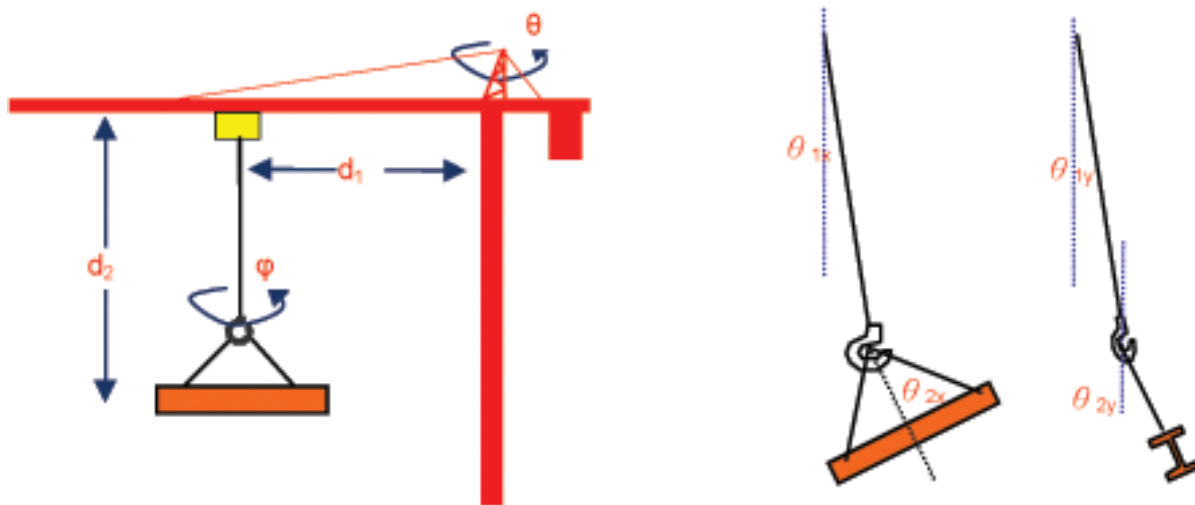
I. Xây dựng bài toán

Cần trục tháp trong xây dựng các công trình

cao tầng rất đa dạng và nhiều chủng loại, cụ thể như cần trục tháp loại cần gập, cần cố định nằm ngang, cần trục tháp di chuyển trên ray, cần trục tháp có tháp cố định,... Trong nghiên cứu này, chúng ta xét bài toán động học của cần trục tháp với tháp cố định, loại đầu bằng. Trong trường hợp cần trục tháp này, ta xét hệ tám bậc tự do như sau.

- Bốn BTD có thể được điều khiển bởi người vận hành cần trục là: sự quay cần, chuyển động hướng kính của xe con, chuyển động nâng hạ của móc cầu, chuyển động quay của móc so với cáp. Bốn BTD này gây ra ngoại lực cho hệ khi chúng chuyển động.

- Bốn BTD động học khác được xác định bởi động học của cáp, móc, vật và các phần tử được treo ở xe con. Chúng bao gồm: sự quay của cáp song song với cần, sự quay của cáp vuông góc với cần, sự quay của bộ phận buộc cáp so với cáp trong mặt phẳng song song với cần, và sự quay của bộ phận buộc cáp nâng so với cáp trong mặt phẳng vuông góc với cần. Bốn BTD động học này được sử dụng để xây dựng các phương trình chuyển động của hệ động học.



Hình 1. Tám bậc tự do của cần trục tháp

Như biểu diễn ở hình vẽ 1, θ biểu thị góc quay của cần, d_1 khoảng cách giữa tháp cần trục và xe con, và d_2 biểu thị chiều dài của cáp nâng tính từ ròng rọc đến vật. Ngoài ra, chúng ta biểu diễn φ là góc quay của móc theo trục Z (quay ngang). Trong hầu hết các cần trục tháp, móc được phép quay để thực hiện các nhiệm vụ xây dựng khác nhau. Bậc tự do này thường được kiểm soát bởi công nhân trên công trường khi vật nâng di chuyển tới vị trí theo yêu cầu.

$\dot{\theta}$ và $\ddot{\theta}$ tương ứng là vận tốc góc và gia tốc góc, \dot{d}_1 và \ddot{d}_1 tương ứng là vận tốc và gia tốc của xe con, \dot{d}_2 và \ddot{d}_2 tương ứng là vận tốc và gia tốc của cáp nâng hạ vật.

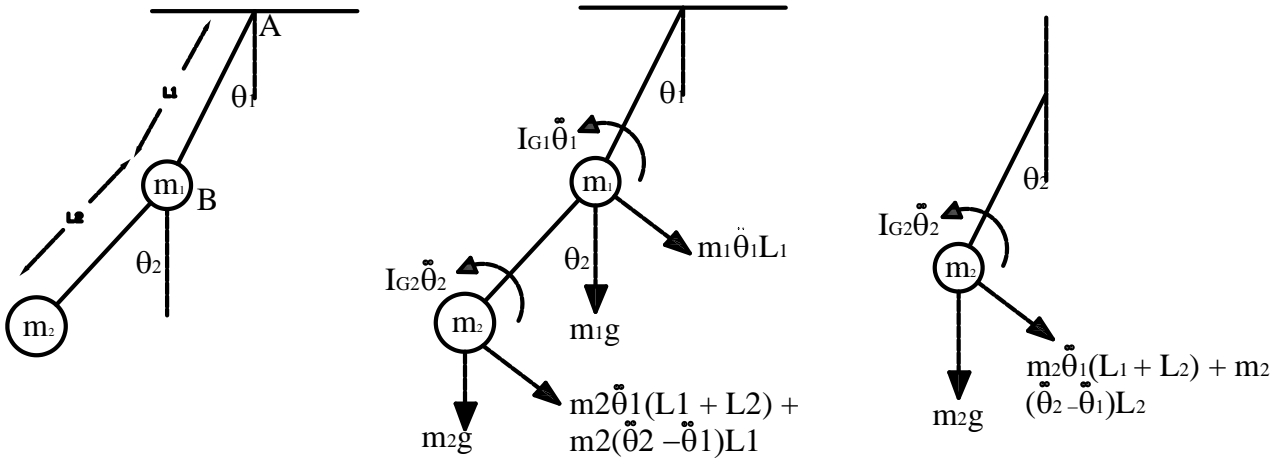
Cơ cấu cáp được mô phỏng như hệ con lắc, bởi vì khối lượng của các phần tử xây dựng lớn hơn rất nhiều khối lượng của cáp nên dẫn đến

ứng xử động học tương tự như con lắc. Mặt khác, trong hoạt động của cần trục tháp, biên độ dao động θ tương đối nhỏ, thoả mãn giả thuyết của lý thuyết con lắc.

Cáp của cần trục tháp được mô hình bằng một hệ con lắc hai BTD theo cả hai trục X và Y. Trong mỗi trục, hệ này là tổ hợp của hai phần, một là từ xe con đến móc và hai là từ móc đến vật. Chúng ta biểu diễn θ_{1x} và θ_{2x} là hệ con lắc hai BTD theo trục X, và θ_{1y} và θ_{2y} theo trục Y. Với tám thông số này, chúng ta có thể hoàn toàn miêu tả được động học của cần trục tháp.

II. Thiết lập các phương trình động học và các bước giải.

Tiếp theo đây, chúng ta sẽ đi xây dựng phương trình động học của cần trục tháp.



Hình 2: Cân bằng động học

Ở đây chúng ta bắt đầu từ việc rút ra các hệ chuyển động không tắt dần hai BTD trong cáp của cần trục tháp. Dạng của phương trình chuyển động hai BTD là:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Để đơn giản hoá quá trình này, chúng ta xét một trục trước, và tổng quát hoá trong không gian ba chiều. Để có phương trình chuyển động hai BTD, chúng ta cần đưa thêm vào hai phương trình cân bằng động học. Đầu tiên, chúng ta phá bỏ liên kết tại nút A, tổng mômen tại A bằng 0, ta có

$$\begin{aligned} \sum M_A &= 0 \\ I_{G1}\ddot{\theta}_1 + m_1\ddot{\theta}_1L_1^2 + k_1\theta_1 + m_1gL_1\sin\theta_1 \\ &+ I_{G2}\ddot{\theta}_2 + m_2\ddot{\theta}_1(L_1 + L_2)^2 + \\ &+ m_2(\ddot{\theta}_2 - \ddot{\theta}_1)L_2(L_1 + L_2) + k_2(\theta_2 - \theta_1) \\ &+ m_2g(L_1\sin\theta_1 + L_2\sin\theta_2) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Tương tự, phá bỏ liên kết tại nút B, tổng mômen tại B cũng bằng 0

$$\begin{aligned} \sum M_B &= 0 \\ I_{G2}\ddot{\theta}_2 + m_2((L_1 + L_2)\ddot{\theta}_1 + L_2(\ddot{\theta}_2 - \ddot{\theta}_1))L_2 \\ &+ k_2(\theta_2 - \theta_1) + m_2gL_2\sin\theta_2 = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Viết lại dưới dạng ma trận, ta có ma trận độ cứng và ma trận khối lượng như sau:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{G1} + (m_1 + m_2)L_1^2 & m_2L_2L_1 \\ m_2L_1L_2 & I_{G2} + m_2L_2^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2(m_1 + m_2)gL_1 & 0 \\ -k_2 & k_2 + m_2gL_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Để giải phương trình chuyển động này, chúng ta cần tách hệ hai BTD này thành hai hệ một BTD. Để đơn giản cho việc biểu diễn, viết lại phương trình (1) dưới dạng ma trận:

$$M\ddot{\theta} + K\theta = 0 \quad (6)$$

Ở đây, M là ma trận khối lượng, K là ma trận độ cứng và $\theta = [\theta_1 \ \theta_2]$ là ma trận chuyển vị. Để giải phương trình hai BTD, chúng ta cần pháp tuyến hoá các ma trận M và K như sau

1. Tìm giá trị riêng và véc-tơ riêng

Giá trị riêng của một ma trận 2x2 như sau:

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix}$$

2. Xác định ma trận q

Một bộ các véc-tơ độc lập N bất kỳ có thể được sử dụng làm cơ sở để biểu thị véc-tơ khác bất kỳ. Do đó, θ có thể được biểu thị bởi q như sau:

$$\theta = \phi q = \begin{bmatrix} \phi_{11}q_1 & \phi_{12}q_2 \\ \phi_{21}q_1 & \phi_{22}q_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Phương trình (6) có thể được viết lại dưới dạng ma trận:

$$M\phi\ddot{q} + K\phi q = 0$$

3. Xác định ma trận chéo

Nhân trước ϕ' với phương trình (8), sẽ đạt được các ma trận chéo M' và K'

$$\phi'M\phi\ddot{q} + \phi'K\phi q = 0$$

$$M'\ddot{q} + K'q = 0 \quad (9)$$

Do M' và K' là các ma trận chéo, chúng ta có thể phân tích hệ hai BTD này thành hai hệ phương trình vi phân tầm thường như sau:

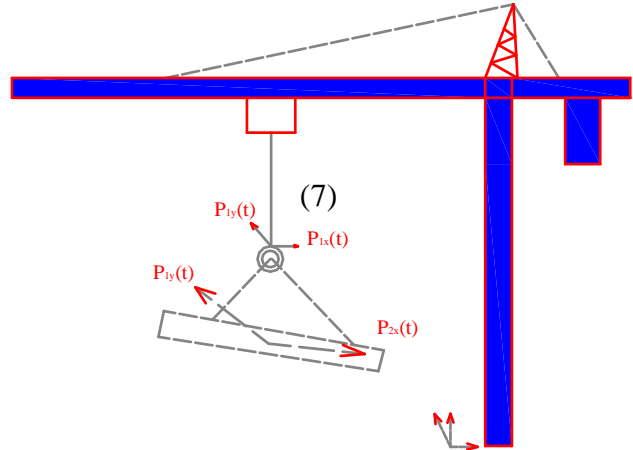
$$\begin{aligned} M'_{11}\ddot{q}_1 + K'_{11}q_1 &= 0 \\ M'_{22}\ddot{q}_2 + K'_{22}q_2 &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Các ngoại lực của hệ động học này được xác định bằng các chuyển động của cần trục tháp. Theo định luật 2 của Newton, chúng ta có thể chuyển gia tốc của chuyển động xe con và chuyển động quay cần thành các ngoại lực.

Theo hình 3, chúng ta biểu diễn gia tốc của

xe con là \ddot{d} và gia tốc góc của cần là $\ddot{\theta}$. Biểu diễn $P_{1x}(t)$ là hàm theo thời gian của ngoại lực theo phương X tác dụng lên móc và $P_{2x}(t)$ là hàm theo thời gian của ngoại lực theo phương X của vật treo. W_x là tải trọng gió theo phương X. Chúng ta bỏ qua ảnh hưởng của gió lên móc, mà chỉ xét tải trọng gió lên vật. Xét gia tốc của chuyển động xe con và lực li tâm do chuyển động quay:

$$\begin{aligned} P_{1x}(t) &= -m_1(-d_1\dot{\theta}^2 + a) \\ P_{2x}(t) &= -m_2(-d_1\dot{\theta}^2 + a) + W_x \end{aligned} \quad (11)$$



Hình 3: Các ngoại lực

Biểu diễn $P_{1y}(t)$ là hàm theo thời gian của ngoại lực theo phương Y tác dụng lên móc và $P_{2y}(t)$ là hàm theo thời gian của ngoại lực theo phương Y của vật treo. W_y là tải trọng gió theo phương Y. Xét ảnh hưởng của gió, gia tốc góc của chuyển động quay cần trục tháp, di chuyển xe con, chúng ta có thể tìm được các ngoại lực như sau:

$$\begin{aligned} P_{1y}(t) &= -m_1d_1\ddot{\theta} \\ P_{2y}(t) &= -m_2d_1\ddot{\theta} + W_y \end{aligned} \quad (12)$$

Bây giờ chúng ta mở rộng phương trình dao động tự do (phương trình 1) bằng việc đưa vào các ngoại lực, và xét các chuyển động theo các phương X và Y riêng rẽ. M_x và K_x là ma trận khối lượng và ma trận độ cứng theo phương X, và M_y và K_y là ma trận khối lượng và ma trận độ cứng theo phương Y. Do đó chúng ta có thể rút ra phương trình (13) như sau:

$$\begin{aligned} M_x \ddot{\theta} + K_x \theta &= P_x \text{ Với } P_x = \begin{bmatrix} P_{1x}(t) & P_{2x}(t) \end{bmatrix} \\ M_y \ddot{\theta} + K_y \theta &= P_y \text{ Với } P_y = \begin{bmatrix} P_{1y}(t) & P_{2y}(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

Theo quá trình phân tích trong phần trước, chúng ta có thể biểu diễn phương trình này với các ma trận độ cứng chéo và ma trận khối lượng chéo với các ngoại lực:

$$\begin{aligned} M'_x \ddot{q}_x + K'_x q_x &= \phi'_x P_x = P'_x \\ M'_y \ddot{q}_y + K'_y q_y &= \phi'_y P_y = P'_y \end{aligned} \quad (14)$$

Để tổng kết các phương trình trên, giải các phương trình vi phân sau, sẽ tìm được các thông số động học của cáp cần trục:

$$\begin{aligned} M_{11x} \ddot{q}_{1x} + K_{11x} q_{1x} &= \phi_{11x} P_{1x} + \phi_{21x} P_{2x} \\ M_{22x} \ddot{q}_{2x} + K_{22x} q_{2x} &= \phi_{12x} P_{1x} + \phi_{22x} P_{2x} \\ M_{11y} \ddot{q}_{1y} + K_{11y} q_{1y} &= \phi_{11y} P_{1y} + \phi_{21y} P_{2y} \\ M_{22y} \ddot{q}_{2y} + K_{22y} q_{2y} &= \phi_{12y} P_{1y} + \phi_{22y} P_{2y} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{G1x} + (m_1 + m_2)L_1(t)^2 & m_2 L_2 L_1(t) \\ m_2 L_1(t)L_2 & I_{G2x} + m_2 L_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{x1}(t) \\ \ddot{\theta}_{x2}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11x} & c_{12x} \\ c_{21x} & c_{22x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{x1}(t) \\ \dot{\theta}_{x2}(t) \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + (m_1 + m_2)gL_1(t) & 0 \\ -k_2 & k_2 + m_2 gL_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{x1}(t) \\ \theta_{x2}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -m_1(d_1(t)\omega(t)^2 + a(t)) \\ -m_2 d_1(t)\omega(t)^2 + W_x(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{G1y} + (m_1 + m_2)L_1(t)^2 & m_2 L_2 L_1(t) \\ m_2 L_1(t)L_2 & I_{G2y} + m_2 L_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{y1}(t) \\ \ddot{\theta}_{y2}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11y} & c_{12y} \\ c_{21y} & c_{22y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{y1}(t) \\ \dot{\theta}_{y2}(t) \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + (m_1 + m_2)gL_1(t) & 0 \\ -k_2 & k_2 + m_2 gL_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{y1}(t) \\ \theta_{y2}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -m_1 d_1(t)\alpha(t)^2 \\ -m_2 d_1(t)\alpha(t)^2 + W_y(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

Các phương trình (17) và (18) là các phương trình chuyển động theo thời gian. Nói cách khác, thuật toán phải tính và xây dựng lại các ma trận khối lượng, ma trận độ cứng, ma trận cần, ma trận ngoại lực theo gia số thời gian.

Bước tiếp theo là tách hệ động học. Các véc-tơ riêng φ sẽ được tính bằng việc sử dụng phương pháp lặp ngược. Việc sử dụng các véc-tơ riêng φ có thể chuyển sang hệ động học trong hệ tọa độ trục giao do đó chúng ta tìm được ma trận khối lượng chéo $[M]_x$ hoặc $[M]_y$, ma trận độ cứng chéo $[K]_x$ hoặc $[K]_y$, ngoại lực tương ứng $[P]_x$ hoặc $[P]_y$.

Sau khi tách hệ chuyển động, thuật toán thu được bốn phương trình vi phân tầm thường, và áp dụng phương pháp Newmark để giải các

Đưa vào hệ số cần để mô phỏng biên độ tất dần. Ở đây chúng ta ký hiệu ξ là hệ số cản. Nếu có hằng số độ cứng K và hằng số khối lượng m , chúng ta có thể đạt được hằng số cản $c = 2\sqrt{km}\xi$.

III. Công cụ thuật toán để giải phương trình

Thuật toán để giải phương trình chuyển động theo thời gian cho cần cầu tháp được phát triển trong nghiên cứu này có thể tính toán góc quay của cáp cần trục bằng các thông số hoạt động của cầu và lực của môi trường. Việc giải các phương trình sau thường không thể thực hiện được. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp số để giải các phương trình vi phân này. Các phương trình sau cần được giải:

phương trình này. Bốn phương trình này biểu diễn hệ động học của cáp cần cầu trong dạng dao động thứ 1 và dạng dao động thứ 2 tương ứng theo các trục X và Y. Cuối cùng thuật toán này sẽ chuyển dạng dao động thứ 1 và dạng dao động thứ 2 này thành các góc quay của cáp.

1. Thuật toán của phương trình vi phân tầm thường.

Thuật toán của phương trình vi phân tầm thường cần để giải bài toán một BTĐ theo mỗi bước thời gian. Phương trình chuyển động là:

$$m(t)\ddot{u}(t) + c(t)\dot{u}(t) + k(t)u(t) = p(t) \quad (19)$$

Trong bước thời gian t_i , thuật toán phải tính các hằng số các phương trình chuyển động, bao gồm $m(t)$, $c(t)$, $k(t)$, $p(t)$, $u(t)$, $\dot{u}(t)$, Δt , và tìm chuyển vị và vận tốc của bước thời gian tiếp

theo, bao gồm $\dot{u}(t_{i+1})$ và $u(t_{i+1})$

Trong nghiên cứu này, phương pháp Newmark, phương pháp bước thời gian, được áp dụng cho các phương trình sau:

$$\begin{aligned}\dot{u}(t_{i+1}) &= \dot{u}(t_i) + [(1-\gamma)\Delta t]\ddot{u}(t_i) + (\gamma\Delta t)\ddot{u}(t_{i+1}) \\ u(t_{i+1}) &= u(t_i) + (\Delta t)\dot{u}(t_i) + [(0.5) - \beta(\Delta t)^2]\ddot{u}(t_{i+1}) \\ &\quad + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{u}(t_i)\end{aligned}$$

Các thông số γ và β là biến số gia tốc theo bước thời gian và xác định tính chính xác và tính ổn định của phương pháp. Bởi vì việc giả định gia tốc trong khoảng t_i và t_{i+1} là hằng số, chọn $\gamma=0,5$ và $\beta=0,25$.

Các bước của phương pháp Newmark như sau:

- Bước 1:

$$\ddot{u}(t_i) = \frac{[p(t_i) - c\dot{u}(t_i) - k(t_i)u(t_i)]}{m(t_i)}$$

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

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

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

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

- Bước 5: $\Delta u = \frac{\Delta\hat{p}}{\hat{k}}$

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

- Bước 7:

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

2. Thuật toán giải véc-tơ riêng.

Bài toán véc-tơ riêng, rút ra từ dao động tự do của một hệ không có cản có thể được biểu diễn ở dạng toán học $Kq = \lambda Mq$. Áp dụng phương pháp lặp ngược để tìm véc-tơ riêng của ma trận khối lượng m và ma trận độ cứng k . Các bước được tiến hành như sau:

- Bước 1: Cho giá trị véc-tơ riêng ban đầu x_1 và giá trị riêng ban đầu λ_1

- Bước 2: Giải phép xấp xỉ của véc-tơ riêng $\bar{x}_{j+1} = K^{-1}Mx_j$

- Bước 3: Thương số Rayleigh để tính xấp xỉ giá trị riêng $\lambda^{(j+1)} = \frac{\bar{x}_{j+1}^T M x_j}{\bar{x}_{j+1}^T M \bar{x}_{j+1}}$

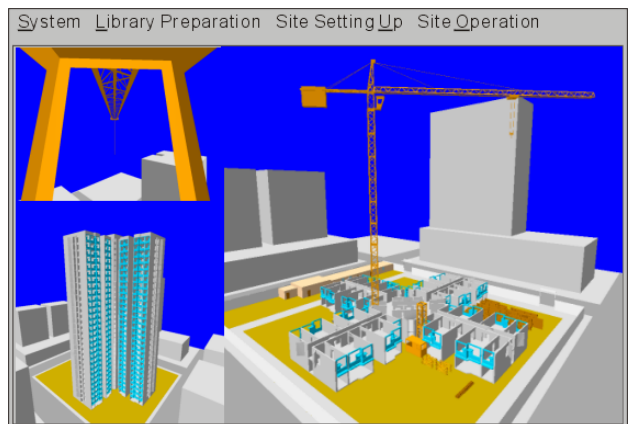
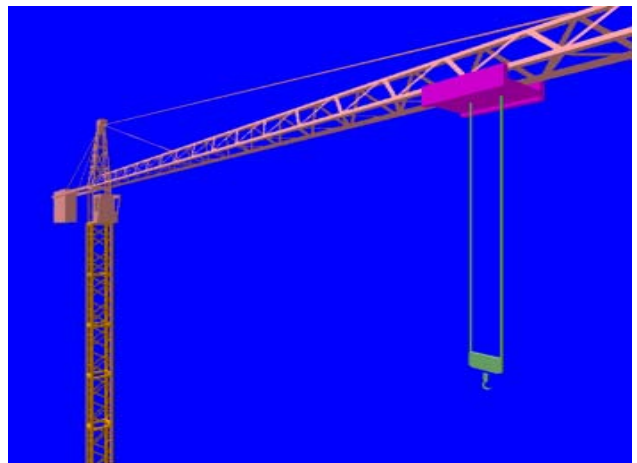
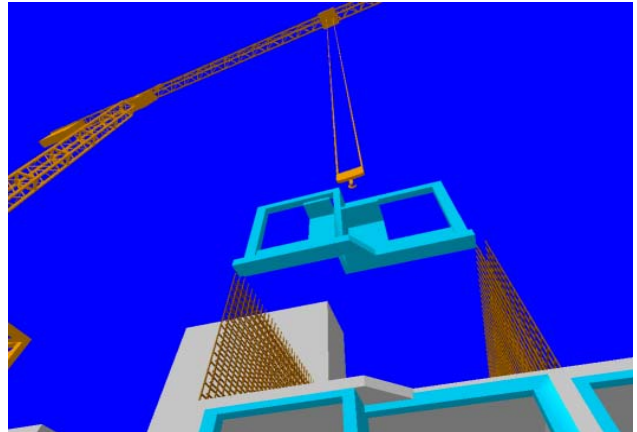
- Bước 4: Pháp tuyến hoá ma trận khối lượng

$$x_{j+1} = \frac{\bar{x}_{j+1}}{\left(x_{j+1}^T M \bar{x}_{j+1}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

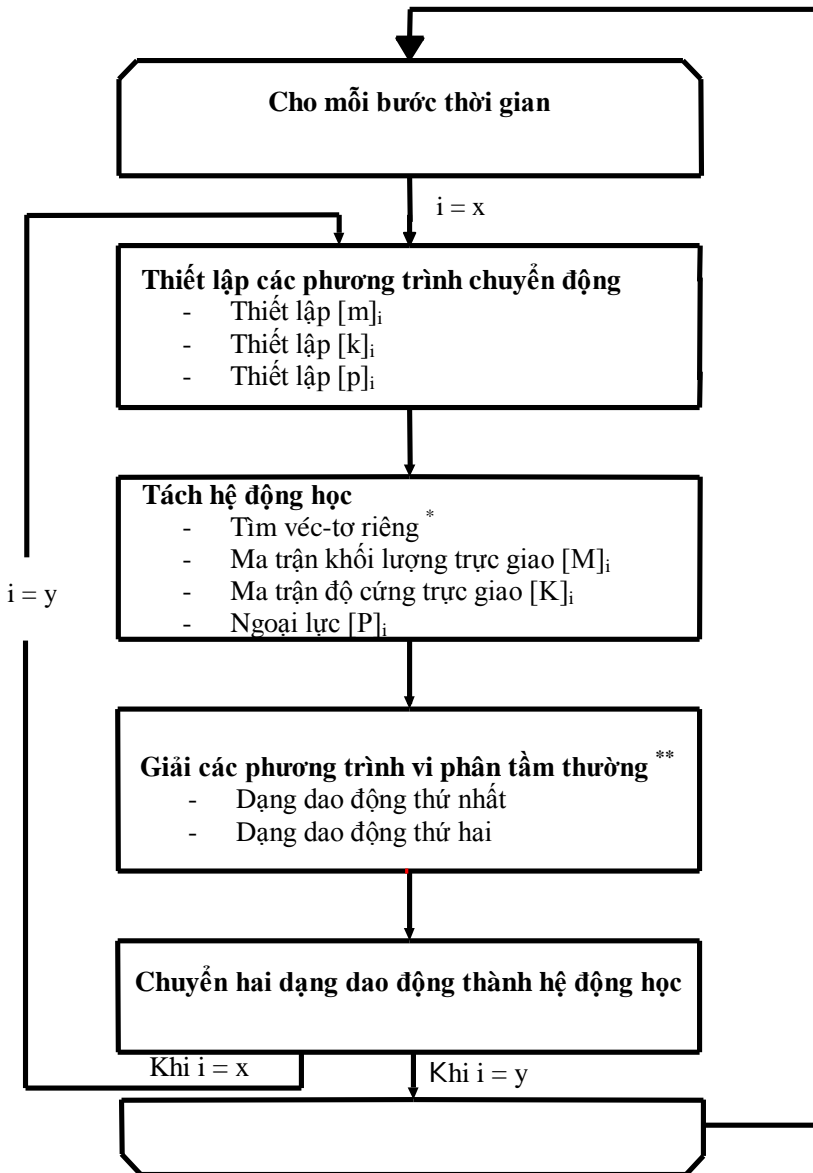
- Bước 5: Nếu $\frac{|\lambda^{j+1} - \lambda^j|}{\lambda^{j+1}} < \text{sai số}$, quay trở lại

\bar{x}_{j+1} , hay thực hiện bước 2

3. Sơ đồ thuật toán và một số hình ảnh kết quả mô phỏng



Các thông số
(Gia tốc góc, gia tốc xe con, chiều dài cáp, tải trọng gió theo phương X và Y)



* Phương pháp lặp ngược
** Phương pháp Newmark

Hình 4. Sơ đồ thuật toán

IV. Kết luận

Trong thực tế, thường không thể thực hiện việc treo vật tại móc cầu theo đúng trọng tâm của từng bộ phận, nên xuất hiện các dao động trong vật. Hơn nữa, vật liệu xây dựng thường lớn và nặng, xuất hiện các lực quán tính do sự thay đổi vận tốc (gia tốc) trong khi cần trục hoạt động. Do sự tắt dần rất nhỏ trong hệ động học này, các dao động đó có biên độ rất lớn và có thể kéo dài nhiều giây hoặc nhiều phút. Các dao động này rất nguy hiểm trong quá trình vận hành cầu tháp. Khi vưon tới vị trí cuối cùng, phần tử kết cấu phải đứng yên hoàn toàn (không chuyển động). Để đạt được yêu cầu này, cần phải hiểu rõ dao động của các bộ phận trong quá trình cần trục hoạt động. Đây là một vấn đề rất phức tạp về mặt lí thuyết cũng như trong thực tế vận hành cầu tháp bởi vì khi hoạt động, cần trục chịu tác động của rất nhiều yếu tố. Những yếu tố này sẽ gây ra sự mất ổn định của cần trục khi hoạt động. Kết quả của nghiên cứu này bước đầu đã xây dựng được các phương trình mô tả động học của cần trục tháp cột cố định và đưa ra thuật toán giải cho các phương trình này. Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc nghiên cứu sâu hơn nhằm tìm ra các phương pháp tối ưu hơn để kiểm soát sự mất ổn định trong quá trình cần trục tháp hoạt động, đồng thời cho phép tiếp tục phát triển và hoàn thiện một mô hình mô phỏng hoạt động của cần trục tháp nhằm hiểu biết rõ hơn về động học của nó.

Tài liệu tham khảo

4. TS. NGUYỄN ĐĂNG CƯỜNG, TS. LÊ CÔNG THÀNH, BÙI VĂN XUYÊN, TRẦN ĐÌNH HOÀ, *Máy nâng chuyên và Thiết bị cửa van*, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội 2003
5. TRƯƠNG QUỐC THÀNH, PHẠM QUANG DŨNG, *Máy và Thiết bị nâng*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 1999
6. NGUYỄN VĂN KHANG, *Dao động kỹ thuật*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 1998.
7. GS.TS. NGUYỄN VĂN PHÁI, GVC. TS. TRƯƠNG TÍCH THIỆN, Th.S. NGUYỄN TUỜNG LONG, Th.S. NGUYỄN ĐỊNH GIANG, *Giải bài toán Cơ kỹ thuật bằng chương trình ANSYS*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2003.
8. WOJCIECH BLAJER, KRZYSZTOF KOLODZIEJCZYK, 2006. *Dynamics and Control of Rotary Cranes: Executing a Load Prescribed Motion*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics 44, 4, pp, 929-948, Warsaw 2006
9. ABDEL-RAHMAN E. M., NAYFEH A. H., AND MASOUD Z. N., 2003. *Dynamic and Control of Crane: A review*, Journal of Vibration and Control 9, 7, 863-908
10. KAMMAN J., AND HUSTON R., 2001. *Multibody Dynamics Modeling of Variable length Cable System*, Multibody System Dynamics 5, 3, 211-221
11. VON SCHWERIN, R. 1999. *Multibody system simulation: Numerical method, Algorithms, and Software*. Springer Verlag, Berlin
12. BRAESS, D. 1997. *Finite Element: Theory, Fast Solvers, and Applications in Solid Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge UK.

Abstract:

Theoretic fundamental s for buil ding dynamics model of fl at top tower cranes

In recent years, demands of high buildings are increasing, especially in big cities of Vietnam such as Hanoi, Hochiminh city. Tower cranes always play an important role in building the high structures. The objective of the research is to get more knowledge of the dynamic behaviors of tower crane. The research considers a tower crane as a four degrees-of-freedom robot. Combined with the rigging and piece, the robot translates to a dynamic system with a total of eight degrees of freedoms. According to the physics characteristics of the crane cable, the research will build the quotations of motion and develop a solver to solve these quotations in each time step during crane operation.

Phản biện: PGS. Nguyễn Đăng Cường