

TỐI ƯU HỆ TMD ĐỂ GIẢM DAO ĐỘNG TRONG CẦU ĐƯỜNG SẮT CAO TỐC

OPTIMIZATION OF TMD FOR REDUCING VIBRATIONS OF HIGH-SPEED RAILWAY BRIDGES

Mai Lữ

Khoa Công Trình Giao Thông

Đại học Giao Thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Tóm tắt: Bài báo nghiên cứu tối ưu hệ TMD để giảm dao động cộng hưởng trong cầu đường sắt cao tốc, đặc biệt là các kết cấu có đa đỉnh cộng hưởng gần nhau. Quá trình cực tiểu hàm đối tượng được dựa trên thuật toán DK để tối ưu các tham số của hệ cản TMD một cách trực tiếp và đồng thời trên các mode dao động khác nhau. Do đó, phương pháp trình bày có thể làm cho hệ TMD hoạt động hiệu quả hơn so với các phương pháp truyền thống trước đây.

Từ khóa: Đa đỉnh cộng hưởng, cầu đường sắt cao tốc, hệ cản TMD, phép lặp DK.

Chỉ số phân loại: 2.4

Abstract: This paper deals with the optimization of TMD systems to suppress multi-resonant dynamic structural response of high-speed railway bridges. Unlike the previous methods, the presented method minimizes the objective function using the DK-iteration algorithm. Therefore, the parameters of TMDs can be optimized directly and simultaneously on different modes contributing significantly to the multi-resonant peaks in order to make the TMDs more effective and robust.

Keywords: Multi-resonant response, high-speed railway bridge, tuned mass damper, DK-iteration.

Classification number: 2.4

1. Giới thiệu

Hệ cản TMD (tuned mass damper) hay gọi là hệ giảm chấn động lực đã được nghiên cứu ứng dụng thành công trong nhiều kết cấu công trình thực tế nhằm giảm dao động dưới các tải trọng gió và động đất. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào các kết cấu như nhà cao tầng, các trụ tháp cao, cầu cho người đi bộ,... Một số công trình nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc giảm dao động cho các công trình cầu đường sắt cao tốc.

Đối với các kết cấu cầu dầm liên tục, cầu dây văng, cầu dây võng, ... các tần số cơ bản có xu hướng tiến lại gần nhau, nghĩa là sự đóng góp của các mode cao trong các dao động là rất đáng kể và gây ra hiện tượng đa đỉnh cộng hưởng trong kết cấu nhịp dưới tác dụng tải trọng đoàn tàu cao tốc. Do đó, việc tối ưu hệ TMD cần xem xét hiện tượng này.

Nhóm nghiên cứu của Yau và Yang [1,2] cũng đã nghiên cứu vấn đề đa đỉnh cộng hưởng như trình bày ở trên cho cầu dây văng và cầu dầm thép. Nhóm đã sử dụng hệ TMD lai (hybrid TMD system) bao gồm nhiều hệ TMD nhỏ phối hợp với nhau để làm

giảm dao động cộng hưởng ở nhiều tần số khác nhau. Lời giải của nhóm nghiên cứu này dựa trên nghiên cứu của Den Hartog, hay thường được gọi là phương pháp điểm cố định trong miền tần số. Kết quả nghiên cứu đã cho thấy rằng hệ thống TMD lai có thể làm giảm các dao động cộng hưởng rất hiệu quả khi đoàn tàu vận hành ở tốc độ cao. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là phải tối ưu các TMD một cách độc lập theo từng mode đơn và sau đó mới phối hợp thành một hệ thống hoàn chỉnh. Điều này có thể làm suy giảm hiệu quả của hệ TMD.

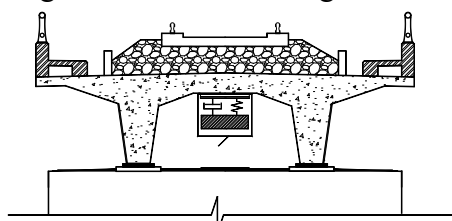
Trong bài báo này, các tham số của hệ TMD được tối ưu trực tiếp và đồng thời trên các mode khác nhau để tìm ra sự phối hợp giữa các tham số động học trong thiết bị TMD và làm cho chúng hoạt động hiệu quả ổn định nhất có thể. Lời giải của phương pháp đề xuất trong nghiên cứu này thu được bằng một thủ tục duy nhất dựa trên thuật toán lặp DK và thậm chí có thể xét các tham số động học không chắc chắn của hệ kết cấu (norm-bounded uncertainty parameters) trong tiêu chuẩn tối ưu H_∞ .

Để đánh giá kết quả thu được, một số các mô phỏng bằng số thông qua cách sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để mô phỏng kết cấu và thiết bị cản với các tham số tối ưu được xác định dựa trên thuật toán đề xuất và đồng thời tiến hành so sánh kết quả với các phương pháp nghiên cứu trước đây.

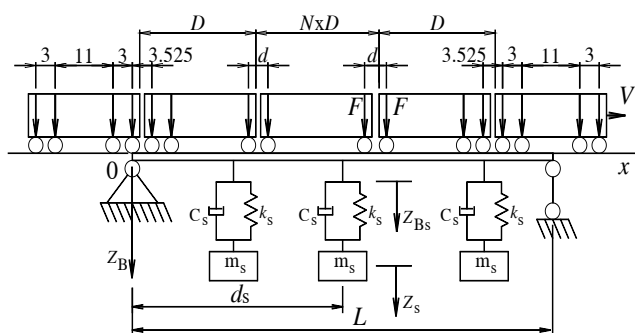
2. Cơ sở tính toán

***Mô hình động học của hệ thống**

Hệ thống dầm, TMDs và đoàn tải trọng được thể hiện như hình 1 và hình 2. Tất cả các tham số của đoàn tải trọng được thể hiện trong bảng 1. Tải trọng đoàn tàu được xem là tác dụng đứng tim cầu và di chuyển theo phương dọc với tốc độ không đổi.



Hình 1. Mặt cắt ngang cầu với TMD.



Hình 2. Mặt cắt ngang cầu với TMD.

Bảng 1. Các tham số của mô hình tải trọng đoàn tàu cao tốc HSLM-A8 (Eurocode).

Tên	N	D (m)	d(m)	F(kN)
A8	12	25	2.5	190

Ghi chú:

N là số toa tàu ở giữa;

D và d lần lượt là chiều dài toa và khoảng cách trục;

F là tải trọng trục.

Từ mô hình trên, phương trình dao động của hệ thống được dẫn ra như sau:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI_B \frac{\partial^2 Z_B(x,t)}{\partial x^2} \right] + m_B \frac{\partial^2 Z_B(x,t)}{\partial t^2} + c_B \frac{\partial Z_B(x,t)}{\partial t} \\ \qquad \qquad \qquad = F_v(x,t) + F_T(x,t) \\ m_{s_j} \ddot{Z}_{s_j} + c_{s_j} (\dot{Z}_{s_j} - \dot{Z}_{B_j}) + k_{s_j} (Z_{s_j} - Z_{B_j}) = 0; \quad j = 1 \dots N_T \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

EI_B , Z_B , m_B và c_B là độ cứng, chuyển vị đứng, khối lượng và tính chất cản của kết cấu nhịp;

$F_v(x,t)$ là tổng tải trọng theo phương đứng tác dụng lên dầm;

$F_T(x,t)$ là tổng tải trọng được tạo ra bởi các TMDs;

N_T là tổng số các TMDs;

m_{s_j} , c_{s_j} , k_{s_j} và Z_{s_j} là khối lượng, hệ số cản, độ cứng và chuyển vị của TMD thứ i.

$F_v(x,t)$ được xác định như sau:

$$F_v(x,t) = \sum_{i=1}^{N_t} \delta[x - (vt - a_i)] F_i H(t - t_i) \quad (2)$$

Trong đó:

N_v là tổng các trục tải trọng;

F_i là tải trọng của trục xe thứ i;

v là tốc độ chuyển động của đoàn tàu;

a_i là khoảng cách từ trục tải trọng thứ i đến trục tải trọng đầu tiên;

t_i là thời điểm mà trục bánh xe thứ i bắt đầu tác dụng lên dầm cầu.

Hàm $\delta(x-a)$ là hàm Dirac Delta và hàm $H(t-t_i)$ được định nghĩa bằng hiệu của hai hàm Heaviside $H(t-t_i) = H_0(t-t_i) - H_0[t - (t_i + v/l_B)]$.

Lời giải giải tích cho hệ thống phương trình dao động (1) là không thể thực hiện được. Do đó, phương pháp số sẽ được sử dụng để xác định các dao động của kết cấu nhịp có lắp đặt hệ TMD dưới tác dụng của tải trọng của đoàn tàu cao tốc HSLM-A8. Để tìm lời giải này, phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng để mô phỏng hệ thống nhiều bậc tự do (MDOF) và phương pháp gia tốc trung bình để giải trực tiếp hệ thống phương trình dao động này.

***Hàm mục tiêu và thuật toán lập DK**

Phần này sẽ xây dựng cơ sở lý thuyết để tối ưu các tham số của TMD.

Hệ phương trình (1) có thể viết lại trong không gian mode như sau:

$$\begin{cases} m_{Bi} \ddot{q}_{Bi}(t) + c_{Bi} \dot{q}_{Bi}(t) + k_{Bi} q_{Bi}(t) = F_{vi}(t) + F_{Ti}(t); & i=1 \dots N_B \\ m_{sj} \ddot{Z}_{sj} + c_{sj} (\dot{Z}_{sj} - \dot{Z}_{Bj}) + k_{sj} (Z_{sj} - Z_{Bj}) = 0; & j=1 \dots N_T \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó:

m_{Bi} , c_{Bi} và k_{Bi} là các khối lượng, hệ số cản và độ cứng của mode dao động thứ i đối với dầm chính.

Lực mode thứ i được tạo ra bởi hệ TMD được viết như sau:

$$F_{Ti} = \sum_{j=1}^{N_T} \phi_{Bi}(d_j) \left[k_{sj} (Z_{sj} - Z_{Bj}) + c_{sj} (\dot{Z}_{sj} - \dot{Z}_{Bj}) \right]$$

Và ngoại lực tác động ứng với mode dao động thứ i được xác định như sau:

$$\begin{aligned} F_{vi} &= \int_0^{l_B} \sum_{k=1}^{N_v} F_k \delta[x - (vt - a_k)] H(t - t_k) \phi_{Bi}(x) dx \\ &= \sum_{k=1}^{N_v} F_k H(t - t_k) \phi_{Bi}(vt - a_k) \end{aligned}$$

Nói chung, lực mode của TMD F_{Ti} có thể làm cho hệ phương trình (3) bị "kết lại" (coupled) với nhau bởi vì lực này phụ thuộc vào tất cả các tọa độ mode dao động của dầm. Tuy nhiên, theo nghiên cứu trước đây của Gawronski [4] cho thấy rằng "Hàm truyền của hệ thống kết cấu ở tần số cộng hưởng thứ i xấp xỉ bằng hàm truyền của mode dao động thứ i ở tần số cộng hưởng đó". Điều đó có nghĩa là sự đóng góp của các mode dao động khác với mode dao động thứ i tới hàm truyền của cả hệ kết cấu ở mode cộng hưởng thứ i có thể bỏ qua. Ngoài ra, mục tiêu của phương pháp trình bày là thiết lập hàm truyền của kết cấu và sau đó cực tiểu hàm truyền này trên dải tần số quanh các điểm cộng hưởng để xác định các tham số tối ưu của TMD. Do đó, việc xấp xỉ ở trên hoàn toàn có thể chấp nhận được trong suốt quá trình giải bài toán tối ưu. Đối với mode dao động thứ i , phương trình (3) có thể được viết lại một cách xấp xỉ như sau:

$$\begin{cases} m_{Bi} \ddot{q}_{Bi} + c_{Bi} \dot{q}_{Bi} + k_{Bi} q_{Bi} = F_{vi} + F_{Ti} \\ m_{sj} \ddot{Z}_{sj} + c_{sj} [\dot{Z}_{sj} - \phi_{Bi}(d_j) \dot{q}_{Bi}] + \\ + k_{sj} [Z_{sj} - \phi_{Bi}(d_j) q_{Bi}] \approx 0 \end{cases} \quad (4)$$

Khi đó, các phương trình (4) đã được tách rời và có thể sử dụng nguyên lý chồng

chất mode thông thường như trong các bài toán cơ bản của động lực học kết cấu.

Theo nghiên cứu [5], sau một số phép biến đổi toán học, từ hệ thống phương trình (4) có thể xây dựng hàm truyền hệ thống cho mode thứ i là T_{wzi} như sau:

$$T_{wzi} = \frac{Z_{ui}}{W_{ui}} = C_i (sI - A_i)^{-1} B_{1ui} + D_{11ui} \quad (5)$$

Trong đó:

Đại lượng z_{ui} chứa các tham số đầu ra như chuyển vị, gia tốc của kết cấu... và w_{ui} chứa các tham số đầu vào như tải trọng tác dụng;

Các ma trận A_i , B_i , C_i , D_i là các ma trận trạng thái của toàn bộ hệ thống;

I là ma trận đơn vị.

Chi tiết các ma trận này được trình bày chi tiết trong [5].

Trong nghiên cứu này, phương pháp lặp DK [3] được sử dụng để cực tiểu hàm truyền T_{wzi} trong miền tần số, từ đó có thể xác định được các tham số tối ưu của các TMD và được viết như sau:

$$\min_K \left(\begin{array}{l} \min_{D_1 \in D} \|\alpha_1 D_1 T_{wz1} D_1^{-1}\|_{\infty}; \dots \\ \dots; \min_{D_{NB} \in D} \|\alpha_{NB} D_{NB} T_{wzNB} D_{NB}^{-1}\|_{\infty} \end{array} \right) < \gamma \quad (6)$$

Trong đó:

N_B là số mode dao động cần xem xét; hệ số α_i , với $i=1, \dots, N_B$ là hệ số điều khiển mức độ ảnh hưởng giữa các mode với nhau trong tiến trình tối ưu;

K là ma trận chứa các tham số tối ưu của hệ TMD;

γ là hằng số cận trên;

D là tập hợp của các ma trận D_i , với D_i là ma trận tỉ lệ dạng đường chéo làm cho γ nhỏ nhất có thể.

Theo [3], bằng cách cực tiểu hàm mục tiêu (6) theo ma trận biến thiết kế K (và cố định ma trận D) hoặc theo ma trận biến D (và cố định K), kết quả tối ưu của các tham số TMDs sẽ được tìm thấy. Để bắt đầu tiến trình giải lặp, ma trận D phải được chọn trước, và thường được chọn là ma trận đơn vị. Khi đó, thuật toán lặp DK trong [3] được tóm tắt:

i. K-step: Cực tiểu (6) và cố định D, có thể sử dụng thuật toán tối ưu Nelder - Mead Simplex để tìm lời giải tối ưu, tức là tìm K.

ii. D-step: Tìm D bằng cách cực tiểu (6) và cố định K, với K mới tìm được.

iii. So sánh D: Với D ở bước trước đó. Nếu sai số chấp nhận được thì ngừng tiến trình giải lặp, ngược lại thay thế giá trị trước đó D bởi giá trị sau cùng và quay lại bước thứ 1.

3. Kết quả áp dụng

Dựa trên cơ sở lý thuyết được dẫn ra ở trên, trong mục này sẽ tiến hành áp dụng mô hình trên một công trình cụ thể để đánh giá phân tích. Ngoài ra, hiệu quả của các TMD với các tham số hệ thống được tối ưu từ thuật toán tối ưu đề xuất sẽ được so sánh với các TMD có các tham số tối ưu thu được từ thuật toán đề xuất của Yau và Yang [1,2].

Kết cấu nhịp dầm liên tục hai nhịp phân tích trong nghiên cứu này được lấy từ công trình cầu đường sắt cao tốc thực tế đã được nghiên cứu bởi Giáo sư Karoumi và cộng sự [6]. Các thông số động học cơ bản của kết cấu nhịp dầm liên tục được liệt kê trong bảng 2. Kết cấu dầm có tiết diện không đổi và được lắp hệ TMDs phía dưới đáy dầm như hình 3. Hệ thống mô hình đoàn tàu cao tốc HSLM-A8, với các thông số tải trọng trong bảng 1.

Bảng 2. Các tham số động học của dầm.

L(m)	m_B (kg/m)	ζ_B (%)	ω_1 (rad/s)	ω_2 (rad/s)
20	3.4×10^4	2.5	21.1	33.0

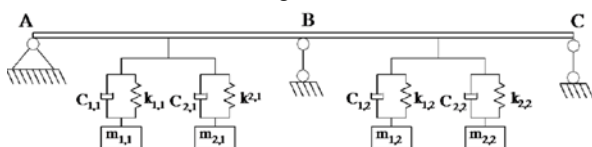
Ghi chú:

L là chiều dài một nhịp;

m_B là khối lượng trên đơn vị chiều dài;

ζ_B là tỉ số cản của dầm dọc;

ω_i là tần số dao động tự nhiên.



Hình 3. Bố trí hệ thống TMD.

Các TMD có khối lượng tổng cộng khoảng 2% khối lượng mode đầu tiên. Các tham số của hệ TMDs được tối ưu bằng thuật

toán đề xuất trong nghiên cứu này và được liệt kê chi tiết trong bảng 3.

Bảng 3. Các tham số tối ưu của TMD được xác định bằng phương pháp lặp DK.

	x_s/L	m_s (kg)	k_s (N/m)	c_s (Ns/m)
TMD _{1,1}	1/4	3408.8	1.54×10^6	0.84×10^4
TMD _{2,1}	1/4	3408.8	3.65×10^6	1.31×10^4
TMD _{1,2}	3/4	3408.8	1.42×10^6	0.74×10^4
TMD _{2,2}	3/4	3408.8	3.75×10^6	1.35×10^4

Trong đó:

x_s là khoảng cách từ TMD thứ s đến đầu dầm;

$L=2L_B$ với L_B là chiều dài một nhịp;

m_s là khối lượng của TMD thứ s;

k_s và c_s là độ cứng và hệ số cản của TMD thứ s.

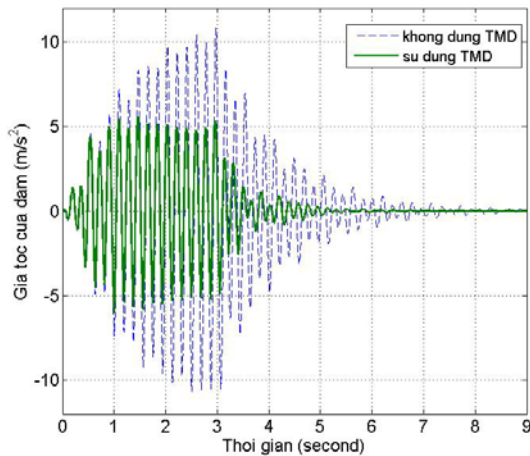
Để đánh giá hiệu quả của phương pháp trình bày, nghiên cứu này sẽ sử dụng phương pháp tối ưu được công bố gần đây nhất của Giáo sư Yau và các cộng sự [1,2] và được gọi là phương pháp DHOP (Modified Den Hartog's Optimization Procedure). Thuật toán tối ưu của nhóm tác giả Yau dựa trên lý thuyết của Den Hartog's. Quá trình tối ưu gồm hai tiến trình. Đầu tiên, là quá trình cực tiểu và "làm bằng" các đỉnh cộng hưởng (equalizing the response peaks), sau đó các tham số của TMDs được hiệu chỉnh lại một lần nữa để xét tính chất cản của kết cấu. Ngoài ra, phương pháp này chỉ xét trường hợp TMD đặt tại giữa của các nhịp, nếu các TMD được phân bố tại các vị trí khác nhau thì phương pháp DHOP không có khả năng tìm các tham số tối ưu của hệ TMDs. Các thông số tối ưu của TMD theo phương pháp tối ưu DHOP trình bày trong bảng 4.

Bảng 4. Các tham số TMD bằng phương pháp DHOP.

	x_s/L	m_s (kg)	k_s (N/m)	c_s (Ns/m)
TMD _{1,1}	1/4	4010.4	1.75×10^6	1.09×10^4
TMD _{2,1}	1/4	2807.2	3.04×10^6	0.72×10^4
TMD _{1,2}	3/4	4010.4	1.75×10^6	1.09×10^4
TMD _{2,2}	3/4	2807.2	3.04×10^6	0.72×10^4

Bảng 5. Chuyển vị và gia tốc lớn nhất của dầm chính.

	Δ (mm)	a (m/s ²)
Không lắp TMD	15.34	11.49
Phương pháp DHOP	8.24	6.88
Phương pháp DK	8.28	6.02



Hình 4. Gia tốc tại giữa nhịp thứ 2 của dầm chính ở tốc độ cộng hưởng.

Như các kết quả được thể hiện trên hình 4 và trong bảng 4, các chuyển vị lớn nhất của dầm có lắp đặt các TMDs được tối ưu bằng phương pháp trước đây DHOP và phương pháp đề xuất DK là không khác nhau nhiều. Trong khi đó, gia tốc lớn nhất của dầm trong trường hợp dùng phương pháp DK giảm hơn 14% so với trường hợp tối ưu theo phương pháp trước đây. Tính hiệu quả này là do các thông số của TMD được tối ưu theo phương pháp đề xuất có thể tối ưu một cách đồng thời các mode dao động khác nhau mà ảnh hưởng đáng kể trong quá trình cộng hưởng để tìm ra được sự kết hợp giữa các tham số trong hệ cản và làm cho hệ TMDs làm việc hiệu quả hơn. Trong khi đó, phương pháp đề xuất của Giáo sư Yau thì các TMD được tối ưu một riêng lẻ và tính trên từng mode khác nhau sau đó phải dùng tiến trình thứ hai là kết hợp toàn bộ hệ và kể tới tính cản của kết cấu nhịp. Do đó, tiến trình thứ hai có thể làm lệch các tham số tối ưu thật sự của hệ TMD. Trong khi đó, phương pháp đề xuất đã khắc phục hoàn toàn các nhược điểm này và dẫn đến hệ TMDs làm việc hiệu quả hơn.

4. Kết luận

Trong bài báo này đã trình bày phương

pháp tiếp cận mới để xác định các tham số tối ưu của hệ TMD được lắp đặt trong cầu dầm đường sắt tốc độ cao. Dựa trên các phân tích về lý thuyết và mô phỏng tính toán đã cho thấy rằng việc sử dụng hệ TMDs có thể làm giảm ứng xử động học của kết cấu nhịp ở vùng tốc độ cộng hưởng rất hiệu quả, có thể đưa dao động lớn nhất của kết cấu nhịp vào vùng an toàn theo quy định của các tiêu chuẩn. Vì vậy, đây là một giải pháp khá phù hợp cho việc nâng cấp cải tạo công trình để tiết kiệm kinh phí và không ảnh hưởng quá trình lưu thông hiện trạng trong quá trình sửa chữa. Ngoài ra, cách tiếp cận mới của phương pháp đề xuất có thể làm cho TMD hiệu quả hơn khi phân tích trên các kết cấu đa đỉnh cộng hưởng. Kết quả này đã chứng minh trong cầu dầm liên tục □

Tài liệu tham khảo

- [1] J.D. Yau, Y.B. Yang (2004), *Vibration reduction for cable-stayed bridges traveled by high-speed trains*, J. Finite Elem. Anal. Des. 40(2004)341–359.
- [2] J.D. Yau, Y.B. Yang, *A wide band MTMD system for reducing the dynamic response of continuous truss bridges to moving train loads*, J. Struct. Eng. 26 (2004) 1795–1807.
- [3] S. Skogestag and I. Postlethwaite (1996), *Multivariable feedback control, analysis and design*. John Willey and Sons, Chichester.
- [4] W. K. Gawronski (2004), *Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures*. Springer.
- [5] M. Luu (2014), *Structural Control Systems in High-speed Railway Bridges*, PhD Thesis.
- [6] R. Karoumi and J. Wiberg (2006), *Kontrol av Dynamiska Effekter av Passerande Tag Pa Botniabanans Broar - Sammanfattning*. Stockholm - Royal Institute of Technology - KTH, Structural Design and Bridges.

Ngày nhận bài: 5/1/2018

Ngày chuyển phản biện: 9/1/2018

Ngày hoàn thành sửa bài: 25/1/2018

Ngày chấp nhận đăng: 31/1/2018