

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI**

Trần Ngọc An

**TÍNH TOÁN ỔN ĐỊNH KHÍ ĐỘNG FLUTTER CỦA DÀM CHỦ
TRONG KẾT CẤU CẦU HỆ DÂY BẰNG PHƯƠNG PHÁP BƯỚC LẶP**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ CƠ HỌC

Hà Nội – 2014

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI**

Trần Ngọc An

**TÍNH TOÁN ỔN ĐỊNH KHÍ ĐỘNG FLUTTER CỦA DÀM CHỦ
TRONG KẾT CẤU CẦU HỆ DÂY BẰNG PHƯƠNG PHÁP BƯỚC LẶP**

Chuyên ngành: Cơ kỹ thuật
Mã số: 62520101

LUẬN ÁN TIẾN SĨ CƠ HỌC

Người hướng dẫn khoa học:
GS.TSKH. Nguyễn Văn Khang

Hà Nội – 2014

MỞ ĐẦU

Cơ sở khoa học

Sau sự sụp đổ toàn bộ của cầu Tacoma Narow tại Mỹ vào năm 1940 do mất ổn định flutter, hiện tượng khí động học đã được tập trung nghiên cứu nhiều trong lĩnh vực xây dựng cầu. Đặc biệt, mất ổn định flutter được quan tâm nghiên cứu đối với các cầu dàn hồi nhịp lớn.

Chỉ trong hai thập kỉ cuối của thế kỷ 20, rất nhiều cầu nhịp lớn đã được xây dựng thành công trên thế giới. Các cây cầu với chiều dài nhịp siêu lớn với kết cấu thanh mảnh sẽ là xu hướng chính của các nghiên cứu và sự phát triển của kỹ thuật cầu đường trong các thập kỉ tới. Tuy nhiên các kết cấu càng dài, càng mảnh sẽ đối diện với rất nhiều khó khăn, đặc biệt là động lực học, động đất và các ứng xử khí động. Có thể thấy rõ ràng là các cầu có chiều dài nhịp lớn sẽ rất nhạy cảm với các ảnh hưởng khí động và dao động gây ra bởi gió.

Trong những năm gần đây, một số lượng lớn các cầu dây (dây văng và dây võng) đã và đang được xây dựng tại Việt Nam (cầu Mỹ Thuận, cầu Bình, cầu Bãi Cháy, cầu Cần Thơ, cầu Thuận Phước, cầu Phú Mỹ, cầu Cao Lãnh, cầu Vàm Cống, cầu Nhật Tân, cầu Rạch Miễu, ...). Việt Nam là một đất nước chịu ảnh hưởng nhiều của gió và bão. Do đó, rất cần thiết phải nghiên cứu mất ổn định flutter của cầu nhịp lớn.

Mục đích nghiên cứu của luận án

Về mặt toán học, phương trình mô tả dao động dầm chủ của cầu chịu tác dụng của gió trong trường hợp tuyến tính có dạng

$$\mathbf{M}(k)\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(k)\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(k)\mathbf{q} = \mathbf{0}$$

trong đó, $\mathbf{M}(k), \mathbf{B}(k), \mathbf{C}(k)$ phụ thuộc vào tần số thu gọn k

$$k = \frac{b\omega_F}{U}$$

tức là phụ thuộc vào tốc độ gió U và tần số dao động của mặt cắt cầu ω_F . Trong đó b là hằng số, có giá trị bằng một nửa chiều rộng danh định của dầm cầu.

Khi $\mathbf{M}(k), \mathbf{B}(k), \mathbf{C}(k)$ là hằng số, việc xác định tần số riêng của hệ là bài toán trị riêng tuyến tính. Trong bài toán dao động của cầu dưới tác dụng của gió, ω_F được xác định qua việc giải hệ các phương trình đại số phi tuyến. Vì vậy, bài toán này được gọi là bài toán trị riêng phi tuyến. Việc xác định vận tốc gió tới hạn thông qua xác định tần số ω_F là nội dung chính của luận án này.

Trong luận án cố gắng giải quyết ba vấn đề cơ bản sau đây:

- Phát triển phương pháp tính vận tốc gió flutter tới hạn của cầu trên cơ sở mô hình dao động uốn xoắn của dầm chủ.
- Xây dựng một số phần mềm chuyên dụng tính toán vận tốc gió tới hạn phục vụ cho việc kiểm định thiết kế và duy tu bảo dưỡng cầu treo.

- Điều khiển thụ động vận tốc flutter của cầu treo bằng phương pháp cơ học và phương pháp khí động học.

Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- ***Đối tượng nghiên cứu của luận án***

Nghiên cứu dao động flutter của mô hình mặt cắt dầm cầu 2D. Từ đó, nghiên cứu điều khiển thụ động dao động flutter của dầm chủ treo.

- ***Phạm vi nghiên cứu của luận án***

Để giải các phương trình dao động uốn-xoắn 2 bậc tự do, có bốn phương pháp: phương pháp trị riêng phức, phương pháp khái niệm số phức, phương pháp sử dụng tiêu chuẩn Routh-Hurwitz, phương pháp bước lặp. Hệ dao động uốn-xoắn 2 bậc tự do thông thường được lấy đối với một đơn vị chiều dài kết cấu chịu tác dụng của lực tự kích. Luận án trình bày áp dụng của phương pháp bước lặp để tính toán sự mất ổn định flutter của một số cầu treo có chiều dài nhịp lớn. Phần quan trọng của luận án trình bày ứng dụng phương pháp bước lặp để tính toán điều khiển thụ động dao động flutter của dầm chủ cầu treo bằng phương pháp cơ học (lắp bộ TMD) cũng như bằng phương pháp khí động học (lắp hai cánh vẫy). Những nghiên cứu này có thể giúp ích cho các nhà thiết kế, chế tạo có công cụ hiệu quả trong việc tính toán các bộ tắt chấn cơ học ứng dụng trong các giải pháp giảm dao động dầm chủ cầu treo dưới tác dụng của gió.

Phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp mô hình hóa: xây dựng mô hình cơ học và mô hình tính toán của kết cấu cầu hệ dây.
- Phương pháp mô phỏng số: Phát triển phương pháp bước lặp của Matsumoto tính toán vận tốc flutter tới hạn của cầu khi có lắp bộ điều chỉnh rung (cơ học và khí động học) và khi không lắp.
- Phương pháp thực nghiệm: Tham gia làm thực nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của bộ TMD đến vận tốc gió tới hạn của mô hình cầu trong phòng thí nghiệm trường Đại học Kỹ thuật Hamburg.

Những kết quả mới đạt được

- Phát triển ý tưởng phương pháp bước lặp của M. Matsumoto tính vận tốc gió tới hạn của mặt cắt cầu 3 bậc tự do [116] sang tính toán mô hình mặt cắt cầu có lắp bộ điều chỉnh rung 4 bậc tự do.
- Xây dựng 2 chương trình tính toán vận tốc gió tới hạn: Flutter-BK01 và Flutter-BK02, dựa trên phần mềm MATLAB tính toán vận tốc flutter tới hạn của cầu dưới tác dụng của gió.
- Bước đầu tối ưu các tham số của bộ giảm chấn khối lượng-cản (TMD) cho dầm chủ cầu hệ dây, từ đó đưa ra những nhận xét, khuyến nghị việc lắp đặt bộ tắt chấn cơ học sao cho đạt hiệu quả mong muốn. Kết quả này có thể áp dụng trong những giải pháp giảm dao động dưới tác dụng của gió của một cầu treo bất kỳ.

- Áp dụng các kết quả nghiên cứu để tính toán cho một mô hình mặt cắt dầm cầu cụ thể. Các kết quả thu được là hợp lý giữa tính toán lý thuyết và thực nghiệm.

Bố cục của luận án

Luận án gồm năm chương và phần “Kết luận và Kiến nghị” với 133 trang, 58 hình vẽ và đồ thị, 9 bảng biểu. Chương 1 là chương tổng quan. Chương 2 trình bày nhận dạng tác dụng của gió và mô hình dao động flutter của dầm chủ trong kết cấu cầu hệ dầm. Chương 3 trình bày việc tính toán ổn định flutter của dầm chủ cầu treo theo mô hình mặt cắt hai bậc tự do bằng phương pháp bước lặp. Chương 4 trình bày việc tính toán điều khiển thụ động dao động flutter của dầm chủ cầu treo bằng phương pháp cơ học. Chương 5 trình bày việc tính toán điều khiển thụ động dao động flutter của dầm chủ cầu treo bằng phương pháp khí động.

1 TỔNG QUAN

1.1 Cầu hệ dây và gió

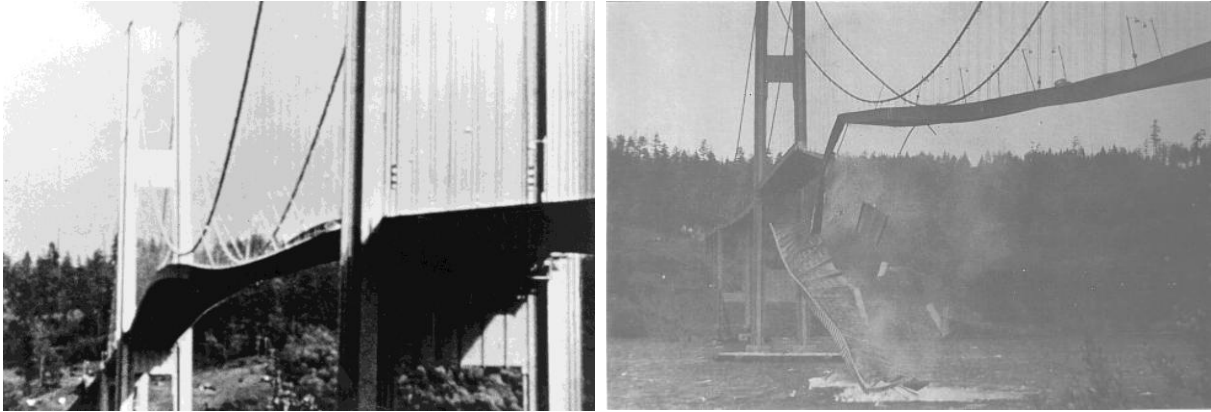
Hiện nay, các kết cấu cầu hệ dây (dây văng và dây võng) được xây dựng ngày càng nhiều tại Việt Nam với khả năng vượt nhịp lớn cùng với ưu điểm về mặt kiến trúc mỹ quan. Tuy nhiên, do có dạng kết cấu thanh mảnh nên các công trình cầu dây văng, dây võng rất nhạy cảm với tác động của gió bão. Theo tài liệu [16], các cầu dây văng, dây võng có khẩu độ trên 150m cần phải thực hiện thiết kế ổn định khí động cầu. Trên thực tế đã có những bài học sinh động về việc cầu bị phá hủy do gió bão [16]. Một trong những trường hợp nổi tiếng đầu tiên là trường hợp cây cầu Brighton Chain Pier, xây dựng năm 1822 tại Anh, bị phá hủy phần dầm cầu bởi một cơn bão vào năm 1836 (cầu có chiều dài 352m, rộng 3.9m, có 5 tòa tháp bằng gang, cách nhau 78m làm nhiệm vụ đỡ phần dầm cầu).



Hình 1.1 Hình ảnh cầu Brighton Chain Pier sau khi bị bão phá hủy vào năm 1836
(nguồn: Internet)

Trường hợp nổi tiếng nhất là trường hợp cây cầu Tacoma Narrows cũ, bị phá hủy vào năm 1940. Đây là một cây cầu treo ở bang Washington, Mỹ, kéo dài qua eo biển giữa Tacoma và bán đảo Kitsap. Tại thời điểm xây dựng, cây cầu này (khẩu độ nhịp 853m, bề rộng 12m) là cây cầu treo có chiều dài nhịp chính lớn thứ ba trên thế giới, sau cầu Golden Gate và cầu George Washington.

Cầu Tacoma được bắt đầu xây dựng vào tháng 9 năm 1938. Ngay trong thời gian xây dựng, dầm cầu đã có chuyển động vuông góc với hướng gió, dẫn đến các công nhân xây dựng đặt cho cầu biệt danh Galloping Gertie. Một số biện pháp nhằm ngăn chặn sự chuyển động nhưng không hiệu quả và nhịp chính của cây cầu cuối cùng sụp đổ dưới tác dụng của gió vào sáng ngày 07 tháng 11 năm 1940 (www.en.wikipedia.org).



Hình 1.2 Hình ảnh cầu Tacoma Narrows dao động và đổ sụp (nguồn: internet)

Một ví dụ khác là cây cầu Volga-I nối hai bờ tả ngạn và hữu ngạn của con sông Volga ở địa phận thành phố Volgograd. Cây cầu Volga được đưa vào hoạt động sau gần 13 năm xây dựng (1994-2009). Cây cầu Volga-I dài 8.213,4 mét, trong đó hai đầu dẫn có tổng chiều dài 7.000m và đoạn cầu bắc qua sông Volga dài 1.213,4m. Kinh phí xây dựng cầu lên tới 13,5 tỷ rúp (khoảng 450 triệu USD). Trong chiều 20/5/2010, cầu Volga-I đã dao động trong biên độ gần 1-2m do gió quá to. Theo kết luận của Ủy ban điều tra đặc biệt, nếu gió đạt vận tốc 15-17 m/giây thì biên độ dao động của cầu vào khoảng 0,4m. Sau sự cố chiều 20/5, cầu không bị lún, không bị nứt hoặc biến dạng và không cần phải sửa chữa. Tuy nhiên, để khắc phục tình trạng Volga-I "nhảy múa" cần phải gắn thêm vào cầu các thiết bị điều hòa phong thủy lực và các bộ ngắt gió để điều chỉnh kết cấu phong thủy lực của cầu. Đồng thời, cần phải lắp đặt bổ sung hệ thống giám định và cảnh báo về biên độ dao động của cầu để kịp thời thực thi những biện pháp phòng ngừa, kể cả cấm giao thông qua cầu, khi có giông bão lớn (www.baomoi.com).

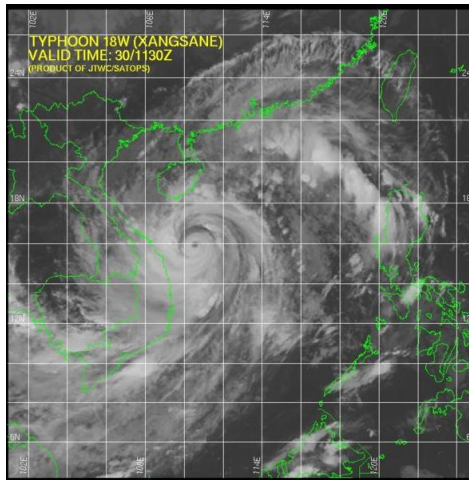


Hình 1.3 Hình ảnh cây cầu Volga-I “nhảy múa” (nguồn: internet)

Việt Nam là một trong những nước chịu ảnh hưởng nhiều của gió bão. Nếu nói đến mức độ tàn phá của gió bão thời gian gần đây nhất có thể kể đến siêu bão Xangsane, được hình thành từ vùng biển phía đông quần đảo Philippines vào cuối tháng 9 năm 2006, với sức gió tối đa kéo dài 10 phút vào khoảng 165 km/h (90 hải lý/h, 105 dặm/h), gió giật tới 205 km/h (110 hải lý/h, 125 mph) (www.vi.wikipedia.org).

Lần đầu tiên trong lịch sử ngành dự báo khí tượng thủy văn Việt Nam, rút kinh nghiệm từ bài học của cơn bão Chanchu (2006), cơ quan chức năng đã sử dụng khái niệm cấp 13 và trên

cấp 13 trong thang sức gió Beaufort. Con bão số 6 (Xangsane-2006) đổ bộ vào Đà Nẵng, một phần Quảng Ngãi, Quảng Nam và Thừa Thiên - Huế đã gây thiệt hại nặng nề cho các tỉnh này (www.vi.wikipedia.org).



Hình 1.4 Hình ảnh cơn bão Xangsane trước khi đổ bộ vào Đà Nẵng (nguồn: internet)

1.2 Mô hình dao động của cầu dây võng và cầu dây văng dưới tác dụng của gió

Trong vài chục năm trở lại đây nhiều cầu dây võng và cầu dây văng đã được xây dựng ở nhiều nước trên thế giới: Nhật, Trung Quốc, Hàn Quốc, Italia, Mỹ, Đức, Anh,... Khẩu độ nhịp chính dài từ hàng trăm đến hàng nghìn mét. Ở nước ta trong những năm gần đây nhiều cầu treo dây văng, dây võng đã được xây dựng. Chẳng hạn như Cầu Kiên, Cầu Bính ở Hải Phòng, Cầu Bãi Cháy ở Quảng Ninh, Cầu Cần Thơ, Cầu Rạch Miễu, cầu Vàm Cống ở Đồng bằng sông Cửu long, cầu Rồng, cầu Thuận Phước ở Đà Nẵng, cầu Nhật Tân ở Hà Nội,...

Để nghiên cứu ảnh hưởng của gió đến công trình cầu, đầu tiên ta phải xây dựng mô hình dao động của cầu dưới tác dụng của gió. Đến nay người ta xây dựng hai loại mô hình: mô hình mặt cắt và mô hình toàn cầu [35, 79, 94, 96, 141, 149, 153, 154].

Về mặt cơ học mô hình mặt cắt là mô hình hệ dao động hai bậc tự do (dao động uốn và dao động xoắn) hoặc mô hình hệ dao động ba bậc tự do (dao động uốn, dao động xoắn, dao động ngang). Do dao động ngang ít có ảnh hưởng lớn nên người ta thường sử dụng mô hình hai bậc tự do. Bài toán dao động của cầu dưới tác dụng của gió là bài toán phức tạp cho nên người ta thường hay sử dụng mô hình hai bậc tự do để nghiên cứu và tính toán.

Mô hình toàn cầu còn ít được nghiên cứu [35, 96, 141, 153, 154]. Phương pháp phần tử hữu hạn và phương pháp khai triển theo các dạng riêng là hai phương pháp thích hợp để xây dựng mô hình và tính toán dao động toàn cầu.

Một vấn đề hết sức phức tạp trong việc xây dựng mô hình dao động của cầu dây là xác định tương tác giữa kết cấu và dòng khí. Các lực tác dụng lên kết cấu cầu là hàm một mặt phụ thuộc vào tốc độ gió thổi, hướng gió thổi, mặt khác lại phụ thuộc vào hình dạng mặt cắt, và chuyển động, vận tốc, gia tốc của các phần tử kết cấu. Sau nhiều năm nghiên cứu người ta đã đưa ra các tham số khí động đặc trưng cho tác dụng của gió [149, 153]. Các tham số khí động

này được ký hiệu là A_i^*, H_i^* ($i=1, \dots, 4$) hoặc a_m, a_{nr}, a_r, a_{rr} . Các phương pháp xác định các tham số khí động có thể là các phương pháp thực nghiệm hoặc các phương pháp tính toán [138, 155, 165]. Có thể nói việc xác định được các tham số flutter A_i^*, H_i^* đã giúp cho việc nghiên cứu và tính toán ổn định và dao động của kết cấu cầu hệ dây có những bước phát triển thuận tiện.

1.3 Các phương pháp tính vận tốc flutter tới hạn

Dao động uốn xoắn của công trình dưới tác dụng của gió được gọi là dao động flutter. Đối với kết cấu cầu hệ treo, mất ổn định flutter là hiện tượng mất ổn định khí động cần quan tâm hàng đầu. Từ thực nghiệm, người ta thấy khi chịu tác dụng của gió bình ổn, dao động uốn và dao động xoắn của cầu đều thực hiện với cùng một tần số và gọi là tần số flutter (ω_F). Giữa tần số flutter và vận tốc gió U có quan hệ với nhau theo công thức [149]

$$U = \frac{\omega_F B}{K} \quad (1.1)$$

trong đó, B là bề rộng danh định của dầm cầu, K là tần số thu gọn. Do đó, bài toán xác định tần số flutter là bài toán vận tốc tới hạn (U_F) của gió. Trong phạm vi lý thuyết dao động tuyến tính, khi vận tốc gió $U > U_F$ thì biên độ dao động flutter tăng lên vô hạn, khi $U < U_F$ thì biên độ dao động flutter giảm về không. Chú ý rằng trong các tài liệu kỹ thuật người ta còn sử dụng các ký hiệu $k = K/2$ hoặc $b = B/2$.

Để tính toán vận tốc tới hạn flutter của gió, người ta thường sử dụng các phương pháp sau:

- Phương pháp trị riêng phức
- Phương pháp khái niệm số phức
- Phương pháp sử dụng tiêu chuẩn Routh – Hurwitz
- Phương pháp bước lặp

Để tính dao động uốn xoắn của dầm thường sử dụng phương pháp số. Hệ dao động uốn-xoắn 2 bậc tự do thông thường được lấy đối với một đơn vị chiều dài kết cấu chịu tác dụng của lực tự kích. Phương pháp trị riêng phức ban đầu được sử dụng trong việc giải quyết bài toán flutter nhiều bậc tự do của cánh mỏng, lực nâng và momen khí động được biểu diễn dưới dạng phức theo hàm tuần hoàn Theodorsen $C(k)$ [40, 70, 163, 164]. Khi tính toán khí động học của cầu, phương pháp này tiếp tục được áp dụng đối với các mặt cắt có dạng không khí động, lực nâng và momen khí động được biểu diễn dưới dạng số thực theo công thức của Scanlan [67, 149]. Lời giải bài toán flutter hai bậc tự do của mặt cắt không khí động được trình bày trong phụ lục D của tài liệu [67]. Ý tưởng của phương pháp này là tìm dao động uốn và dao động xoắn dưới dạng

$$h = h_0 e^{i\omega_F t}, \quad \alpha = \alpha_0 e^{i\omega_F t} \quad (1.2)$$

và thay vào hệ phương trình dao động uốn xoắn. Điều kiện để hệ này có nghiệm không tầm thường ($h_0, \alpha_0 \neq 0$) là định thức của hệ phải bằng 0. Tách phương trình đặc trưng thành hai phương trình thực và ảo, giải đồng thời hai phương trình này, nghiệm chung của hệ phương trình thực và ảo chính là vị trí tới hạn flutter.

Về phương pháp sử dụng tiêu chuẩn Routh-Hurwitz, có thể tham khảo trong tài liệu [146]. Phương pháp khái niệm số phức có thể tham khảo trong tài liệu [153].

Phương pháp bước lặp-SBS (Step-by-Step) được M. Matsumoto và các đồng nghiệp trình bày trong các tài liệu [110, 111, 112, 113, 114]. Ý tưởng phương pháp này là giả thiết dao động xoắn có dạng

$$\alpha = \alpha_0 \sin \omega_F t \quad (1.3)$$

và thay vào phương trình dao động uốn để tìm dao động uốn h , sau đó thay h tìm được vào phương trình dao động xoắn. Biểu diễn phương trình dao động xoắn dưới dạng chuẩn để tìm được tần số flutter ω_F và độ cản Loga δ_F . Tính toán chi tiết của phương pháp bước lặp-SBS được L.T. Hoa trình bày trong tài liệu [81]. Tuy nhiên, phương pháp bước lặp-SBS chỉ cho kết hợp lý so với thực nghiệm với vận tốc gió nhỏ (tại vị trí tới hạn và dưới tới hạn), nguyên nhân là dao động xoắn được giả thiết là không cản trên toàn bộ miền vận tốc gió. Do đó, M. Matsumoto và các đồng nghiệp, trong các tài liệu [115, 116], đã đưa ra phương pháp bước lặp-RSBS (Revised Step-by-Step), thay đổi chủ yếu là ở bước đầu tiên, M. Matsumoto giả thiết dao động xoắn có dạng

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\zeta_F \omega_F t} \sin \omega_F t \quad (1.4)$$

Cũng trong tài liệu [116], M. Matsumoto đề xuất dùng phương pháp bước lặp-RSBS để giải quyết bài toán flutter 3 bậc tự do (có xét đến thành phần dao động uốn ngang).

1.4 Nội dung của luận án

Do tính phức tạp của mô hình bài toán dao động của cầu dưới tác dụng của gió, trong luận văn này chỉ sử dụng mô hình mặt cắt để nghiên cứu tính toán mất ổn định flutter của cầu. Trong quá trình nghiên cứu chúng tôi thấy phương pháp bước lặp của GS. M. Matsumoto (Trường Đại học Kyoto) là một phương pháp mới đề xuất trong vòng 10 năm gần đây và còn nhiều vấn đề có thể nghiên cứu phát triển. Vì vậy trong luận văn đã nghiên cứu sử dụng và phát triển phương pháp bước lặp tính toán vận tốc flutter của mô hình cầu. Trong luận văn cũng sử dụng và phát triển phương pháp bước lặp để nghiên cứu bài toán điều khiển thụ động kết cấu cầu dây sử dụng các bộ giảm chấn khối lượng-cản (TMD) và sử dụng các cánh vẫy bị động.