

# ÔN ĐỊNH KHÍ ĐỘNG CỦA CẦU TREO BẰNG CÁC CÁNH MỎNG PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN CHỦ ĐỘNG

## ACTIVE CONTROLLING AERODYNAMICS OF BRIDGE BY WINGLETS

**Phan Đức Huỳnh**  
ĐH Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM  
**Nguyễn Hoàng Sơn**  
CĐ Kỹ thuật Cao Thắng TP. HCM

### TÓM TẮT

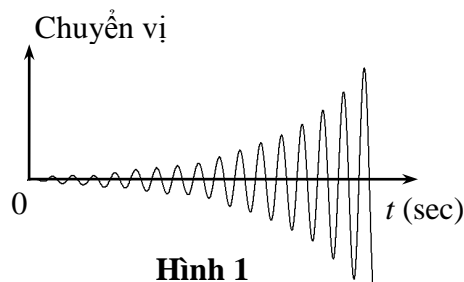
*Flutter và buffeting là hai hiện tượng nguy hiểm và thường gặp nhất xảy ra đối với cầu treo. Khi tần số dao động theo phương thẳng đứng (heaving) gần bằng với dao động của chuyển vị xoay (pitching) thì sẽ xuất hiện hiện tượng flutter, khi flutter xuất hiện thì chuyển vị của cầu sẽ tăng dần theo thời gian. Còn khi có dòng rối xuất hiện thì sẽ gây ra hiện tượng buffeting. Phương pháp điều khiển chủ động bằng cánh mỏng là một phương pháp mới, bằng cách lắp thêm hai cánh mỏng ở hai bên cầu, khi có chuyển vị của cầu thì các cánh mỏng sẽ được điều khiển một góc xoay thích hợp một cách chủ động để tạo ra những lực tác động lên cầu. Mục đích là tăng khả năng giảm chấn của kết cấu cầu từ đó tăng khả năng chống chịu của cầu đối với những hiện tượng trên.*

### ABSTRACT

*Flutter and buffeting are two hazard phenomena that commonly happen to suspension bridge. When the frequency of heaving is nearly equal to frequency of pitching, the flutter phenomenon will appear. While the flutter phenomenon is appearing, the displacement will be increased by the time. In addition the turbulent flow appears, it takes the buffeting phenomenon out. An active controlling method by winglets is a new method, it uses more two winglets to assemble in both sides of bridge, when having displacement, winglets will be controlled actively with suitable angle to create forces to suppress the vibration of bridge.*

## I. HIỆN TƯỢNG FLUTTER

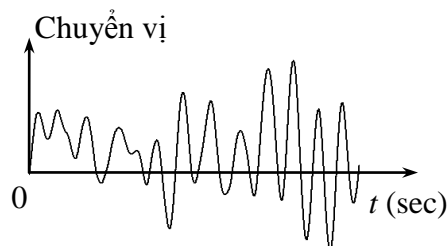
*Flutter* là hiện tượng khí đàn hồi (*aeroelasticity*) được gây nên bởi các lực tự kích, các lực này phụ thuộc vào chuyển động của vật thể trong dòng khí. Nếu một hệ nhúng trong dòng khí được cho bởi một nhiễu động nhỏ, dao động của hệ sẽ suy giảm hoặc phân kỳ phụ thuộc vào năng lượng lấy ra từ dòng khí nhỏ hơn hoặc lớn hơn năng lượng tiêu tán bởi giảm chấn cơ học của hệ. Khi đó vận tốc gió được gọi là vận tốc tới hạn hoặc vận tốc flutter mà tại đó biên độ dao động của cầu có dạng hàm mũ (H.1). Khi *flutter* xảy ra, tất cả các bậc tự do của hệ dao động cùng tần số được gọi là tần số *flutter*. *Flutter* có thể xảy ra cả trong dòng tầng và dòng rối.



Hình 1

## II. HIỆN TƯỢNG BUFFETING

Nếu cầu treo không xảy ra hiện tượng flutter ở vận tốc gió cao, hoặc không bị xoáy gây rung động ở tốc



Hình 2



bỏ qua trong tính toán. Xét trường hợp tổng các lực và mômen tác dụng lên trọng tâm của mặt cắt ngang, các lực tác dụng lên cầu như sau (H.5b):

$$L_T = L_0 + L_1 + L_2 \quad M_T = M_0 + M_1 + M_2 + eb(L_1 - L_2) \quad (2)$$

trong đó chỉ số dưới “0” là ký hiệu của thành phần lực tác dụng lên cầu; chỉ số dưới “1” và “2” là ký hiệu của thành phần lực tác dụng lên các cánh mỏng bên trái và bên phải.

Lực nâng và mômen xoắn trên một đơn vị chiều dài:

$$L_i = 1/2r\bar{U}^2 B_i q_i (dC_{L_i} / d\alpha) \quad M_i = 1/2r\bar{U}^2 B_i q_i (dC_{M_i} / d\alpha) \quad (i = 0, 1, 2) \quad (3)$$

trong đó  $C_{L_i}$  là hệ số lực nâng;  $C_{M_i}$  là hệ số mômen;  $\alpha$  là góc tới của gió;  $u(t)$  là vận tốc dòng rối theo phương của vận tốc gió trung bình;  $w(t)$  là vận tốc dòng rối theo phương vuông góc với phương của vận tốc gió trung bình;  $\theta_0$ ,  $\theta_1$  và  $\theta_2$  là góc tới của gió lên cầu và hai cánh mỏng. Giá trị của các góc tới  $\theta_i$  ( $i = 0, 1, 2$ ) được xác định bằng các công thức sau:

$$\begin{cases} \theta_0 = \alpha + \dot{h} / \bar{U} + w(t) / \bar{U} \\ \theta_1 = (\alpha + \alpha_1) + \dot{h}_1 / \bar{U} + w(t) / \bar{U} = \alpha + \dot{h} / \bar{U} + w(t) / \bar{U} - \dot{\alpha} eb / \bar{U} + \alpha_1 \\ \theta_2 = (\alpha + \alpha_2) + \dot{h}_2 / \bar{U} + w(t) / \bar{U} = \alpha + \dot{h} / \bar{U} + w(t) / \bar{U} + \dot{\alpha} eb / \bar{U} + \alpha_2 \end{cases} \quad (4)$$

trong đó  $e$  là hệ số xác định vị trí của các tấm mỏng. Các hệ số  $C_{L_i}$  và  $C_{M_i}$  phụ thuộc vào hình dạng tiết diện của kết cấu, và được xác định bằng thực nghiệm trong hầm gió. Đối với tiết diện là tấm phẳng, bằng thực nghiệm người ta tìm được :

$$dC_{L_i} / d\alpha = C'_{L_i} = C'_L \cong 2\pi \quad dC_{M_i} / d\alpha = C'_{M_i} = C'_M \cong \pi / 2 \quad (5)$$

Trong nghiên cứu này, các góc  $\alpha_1, \alpha_2$  là hàm của thành phần chuyển vị và vận tốc:

$$\begin{cases} \alpha_1 = X_1 \dot{h} / \bar{U} + X_2 B \dot{\alpha} / \bar{U} + X_3 \alpha + X_4 h / B \\ \alpha_2 = Y_1 \dot{h} / \bar{U} + Y_2 B \dot{\alpha} / \bar{U} + Y_3 \alpha + Y_4 h / B \end{cases} \quad (6)$$

với  $X_i$  và  $Y_i$  ( $i=1 \div 4$ ) là những tham số cần xác định.

Thay các công thức (3)÷(6) vào phương trình (2), ta được phương trình mô tả dao động của cầu:

$$\begin{cases} \ddot{h} + 2\xi_h \omega_h \dot{h} + \omega_h^2 h = -L_T / m = -Q\pi / (mB) (H_1 \dot{h} / \bar{U} + H_2 B \dot{\alpha} / \bar{U} + H_3 \alpha + H_4 h / B + H_5) \\ \ddot{\alpha} + 2\xi_\alpha \omega_\alpha \dot{\alpha} + \omega_\alpha^2 \alpha = M_T / I_\alpha = Q\pi / (4I_\alpha) (K_1 \dot{h} / \bar{U} + K_2 B \dot{\alpha} / \bar{U} + K_3 \alpha + K_4 h / B + K_5) \end{cases} \quad (7)$$

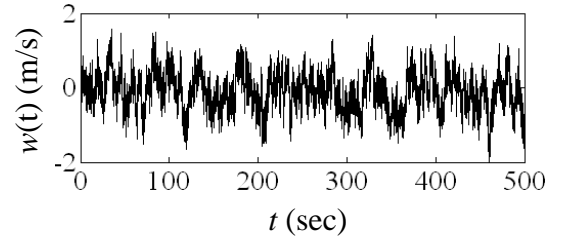
với:  $Q = r\bar{U}^2 B^2$ . Trong đó,  $m$  là khối lượng trên một đơn vị chiều dài;  $I_\alpha$  là moment quán tính trên một đơn vị chiều dài;  $\xi_h$  và  $\xi_\alpha$  là các hệ số giảm chấn của bậc tự do  $h$  và  $\alpha$ ;  $\omega_h$  và  $\omega_\alpha$  là các tần số riêng; các hệ số  $H_i$  và  $K_i$  ( $i=1 \div 5$ ) được xác định như sau:

$$\begin{aligned} H_1 &= 2k + kX_1 + kY_1 + 1 & K_1 &= 2k^2 + (k^2 + 2ke)X_1 + (k^2 - 2ke)Y_1 + 1 \\ H_2 &= kX_2 + kY_2 & K_2 &= (k^2 + 2ke)X_2 + (k^2 - 2ke)Y_2 - 2ke^2 \\ H_3 &= 2k + kX_3 + kY_3 + 1 & K_3 &= 2k^2 + (k^2 + 2ke)X_3 + (k^2 - 2ke)Y_3 + 1 \\ H_4 &= kX_4 + kY_4 & K_4 &= (k^2 + 2ke)X_4 + (k^2 - 2ke)Y_4 \\ H_5 &= (2k + 1)w(t) / \bar{U} & K_5 &= (2k^2 + 1)w(t) / \bar{U} \end{aligned} \quad (8)$$

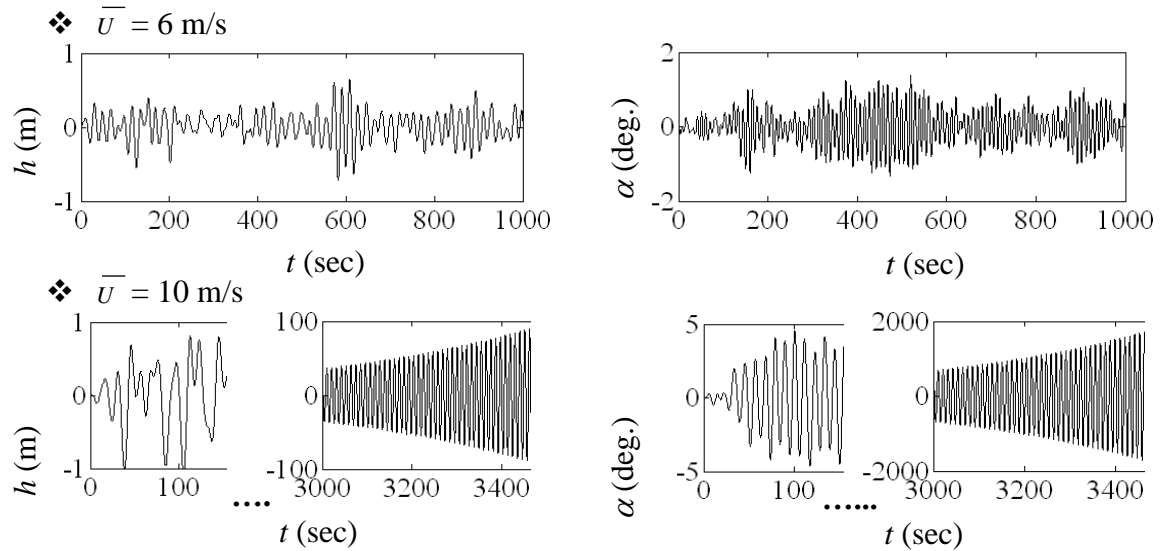
với  $k = B_1/B = B_2/B$ . Các giá trị  $X_i$  và  $Y_i$  ( $i=1 \div 4$ ) được tính được từ phương trình (8), góc xoay  $\alpha_1$  và  $\alpha_2$  có thể xác định theo công thức (6).

## 1. Trường hợp không điều khiển.

Trong trường hợp này, hệ số  $k = 0$ . Để tìm đáp ứng  $h$  và  $\alpha$  của hệ phương trình vi phân chuyển động (7), phương pháp Runge-Kutta bậc 2 được sử dụng với các thông số:  $m=21000\text{kg/m}$ ;  $\rho=1.25\text{kg/m}^3$ ;  $B=35.5\text{m}$ ;  $I_\alpha = 22 \times 10^5 \text{kgm}^2$ ;  $\xi_h = \xi_\alpha = 0.01$ ;  $f_h = 0.056\text{Hz}$ ;  $f_\alpha = 0.1\text{Hz}$ . Vận tốc dòng rối  $w(t)$  được dẫn ra từ phổ Von – Karman có cường độ rối là 5% [3]. H.5 cho thấy ví dụ của dòng rối  $w(t)$  tại vận tốc trung bình 10m/s.

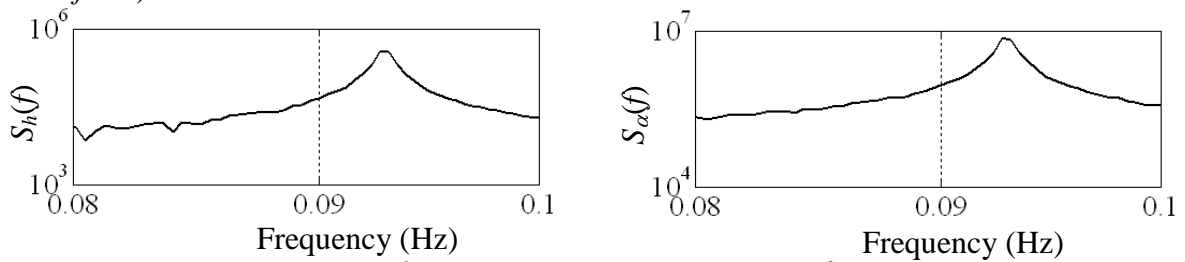


**Hình 5.** Dòng rối  $W$  tại  $\bar{U} = 10 \text{ m/s}$



**Hình 6.** Đáp ứng của  $h$  và  $\alpha$  tại một vài vận tốc  $\bar{U}$

Theo H.6, hiện tượng *flutter* xuất hiện tại vận tốc  $\bar{U} = 10 \text{ m/s}$ , đồng thời ta cũng tìm được tần số của  $h$  và  $\alpha$ :  $f_h = f_\alpha = 0.092\text{Hz}$  (H.7) bằng phương pháp biến đổi *FFT* (*Fast Fourier Transform*).s



**Hình 7.** Phổ năng lượng của  $h$  và  $\alpha$  tại vận tốc  $\bar{U} = 10 \text{ m/s}$

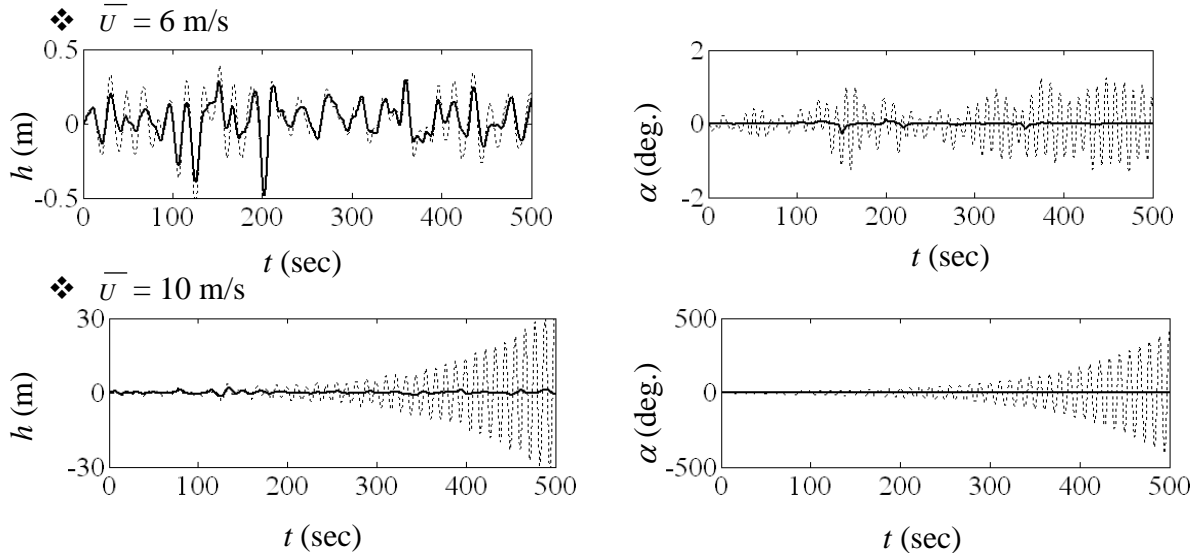
## 2. Trường hợp điều khiển.

Trong trường hợp này, chọn hệ số  $k = 0.1$ ,  $e = 1.2$ . Các thông số khác của cầu tương tự như trường hợp không điều khiển.

Đầu tiên, phương pháp “*thử và sai*” được sử dụng cho các hệ số  $H_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , ở đây  $H_1$  và  $K_2$  liên quan đến giảm chấn của hệ và  $K_3$  liên quan đến vận tốc *flutter* [4]. Các hệ số khác được cho bằng 0. Các giá trị của  $K_1$ ,  $K_2$  và  $K_3$  được chọn sao cho đáp ứng của hệ đối với dòng rối là nhỏ và vận tốc *flutter* lớn. Để tránh hiện tượng *stalling* (hiện tượng giảm lực khi góc tới lớn) thì các góc tới  $\theta_1, \theta_2$  được giới hạn giá trị trong khoảng từ  $-10^0$  đến  $+10^0$ .

Ban đầu, khảo sát hai giá trị  $H_1$ ,  $K_2$  trước, các giá trị  $H_i$  và  $K_i$  khác được cho bằng 0, ở đây cho  $H_1 = -100 \div 100$ ,  $K_2 = -200 \div 200$ . Khi chưa điều khiển thì  $\bar{U}_{flutter} = 10 \text{ m/s}$ , nhưng khi

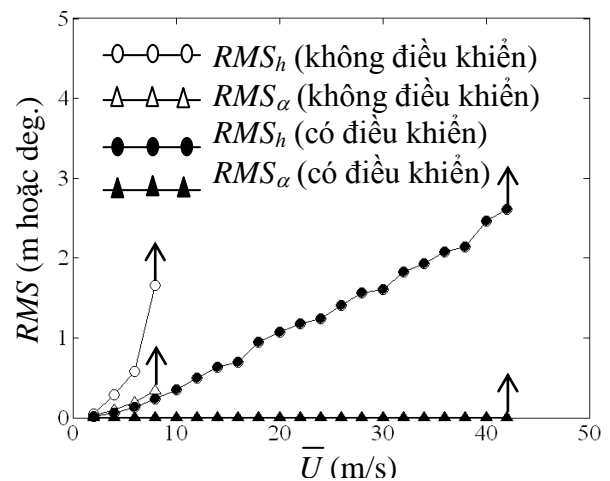
điều khiển tương ứng với từng giá trị  $H_1, K_2$  thì sẽ cho ra những giá trị  $\bar{U}_{flutter}$  khác nhau, kết hợp so sánh *RMS* (root mean square) của  $h$  và  $\alpha$  lúc không điều khiển và điều khiển thì thấy giá trị  $H_1 = 0.4, K_2 = -15$  là cho  $\bar{U}_{flutter}$  lớn nhất ( $\bar{U}_{flutter} = 36\text{m/s}$ ). Kế tiếp khảo sát thêm giá trị  $K_3$  ứng với trường hợp  $H_1 = 0.4, K_2 = -15$ . Cho  $K_3 = -300 \div 300$ , kết quả tính toán cho thấy giá trị  $K_3 = -20$  cho  $\bar{U}_{flutter}$  lớn nhất ( $\bar{U}_{flutter} = 44\text{m/s}$ ). H.8 so sánh đáp ứng theo thời gian của  $h$  và  $\alpha$  cho hai trường hợp điều khiển và không điều khiển tại một vài giá trị vận tốc trung bình. Kết quả cho thấy biên độ dao động của cầu sẽ giảm khi điều khiển.



Chú thích : ..... Không điều khiển      ——— Có điều khiển

**Hình 8.**  $h$  và  $\alpha$  khi có điều khiển và không điều khiển

H. 9 so sánh đáp ứng *RMS* (Root Mean Square) của hệ không điều khiển và có điều khiển. Mũi tên hướng lên chỉ tại vận tốc đó biên độ dao động là rất lớn, tương ứng với trường hợp bất ổn định. Kết quả cho thấy hệ điều khiển có thể làm tăng vận tốc flutter và làm giảm đáp ứng *RMS*, cũng như tăng độ ổn định khí động lực học của cầu. Tuy đáp ứng của thành phần *pitching* được điều khiển rất tốt nhưng đáp ứng của thành phần *heaving* vẫn còn khá lớn.



**Hình 9.** So sánh *RMS* của  $h$  và  $\alpha$

#### IV. KẾT LUẬN

Mô hình điều khiển chủ động hồi tiếp với các cánh mỏng có bề rộng bằng 10% bề rộng cầu có thể làm tăng vận tốc flutter và làm giảm biên độ dao động của cầu trong dòng rối. Khi có chuyển vị của cầu thì các cánh mỏng sẽ được điều khiển một góc xoay thích hợp một cách chủ động để tạo ra những lực tác động lên cầu.

Khi chưa có các cánh mỏng thì hiện tượng flutter xảy ra tại vận tốc gió 10m/s, nhưng khi điều khiển hai cánh mỏng với các hệ số  $K_1 = 0.4, K_2 = -15, K_3 = -20$  thì có thể tăng vận tốc flutter lên tới 44(m/s), đồng thời biên độ dao động của cầu do ảnh hưởng dòng rối là nhỏ khi so sánh với trường hợp không điều khiển.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Kobayashi, H. and Phan, D.-H., “Bridge deck flutter control by control surfaces”. *Proc. 6<sup>th</sup> Asia-Pacific Conf. on Wind Engineering*. Seoul, Korea, 2005.
2. Paola, M.D., “Digital Simulation of Wind Field Velocity”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **74-76**, 91-109, 1998.
3. Phan, D.-H., “Control flutter & buffeting by winglets and flaps”. Doct. thesis, Japan, 2007.
4. Simiu, E. and Scanlan, R.H., *Wind Effects on Structures: An Introduction to Wind Engineering*, John Willey & Sons, 1996.
5. Strommen, E.N., *Theory of Bridge Aerodynamics*. Springer Publications, 2005