

## THÍ NGHIỆM KỸ THUẬT HÀNG KHÔNG 3

# Khảo sát lực và moment khí động trên cánh 2D & 3D

## 1 Mục đích thí nghiệm

- Đo đạc và xác định đặc điểm khí động lực học của cánh 3D: lực nâng, lực cản và moment ngóc chúc, tâm áp suất, tâm khí động cho 3 cánh hình chữ nhật với sải cánh khác nhau.
- Ôn tập lại lý thuyết cánh 2D và 3D
- Xây dựng đồ thị so sánh hệ số lực nâng, lực cản, moment ngóc chúc cho 3 loại cánh có tỉ lệ bình diện cánh AR khác nhau.

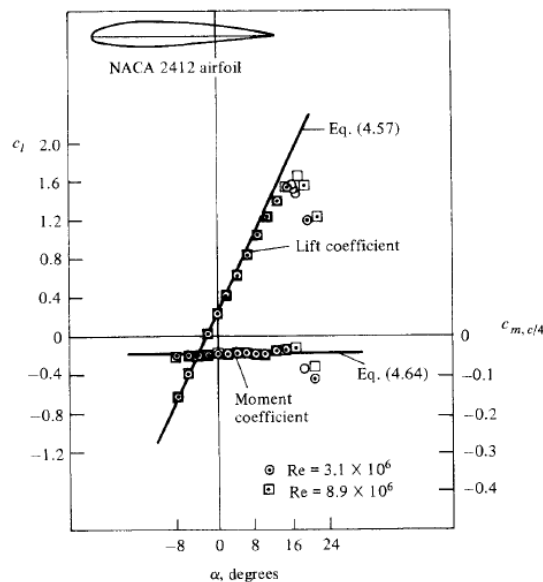
## 2 Cơ sở lý thuyết

### 2.1 Lý thuyết cánh 2D

#### 2.1.1 Giản đồ lực nâng theo góc tới

Trong tìm hiểu lý thuyết cánh cũng như thực tiễn, một khía cạnh khá quan trọng mà chúng ta cần tìm hiểu đó là  $C_{l,max}$ . Khi  $C_l$  tăng tuyến tính đến giá trị  $C_{l,max}$  sẽ gây ra hiện tượng mất lực nâng (stall).

Giản đồ Hình 2-1 cho ta thấy rằng,  $C_l$  sẽ có dạng tăng tuyến tính theo góc tới và sẽ giảm khi đạt  $C_{l,max}$ , góc tới  $\alpha_s$  tương ứng được gọi là góc tương ứng với trạng thái mất lực nâng trên cánh. Trong khi đó, hệ số moment ngóc chúc tại vị trí  $c/4$  sẽ là hằng số và thay đổi đột ngột khi góc tới  $\alpha_s$ .



Hình 2-1 Biểu đồ thể hiện hệ số lực nâng và hệ số moment tại vị trí  $c/4$  [1]

### 2.1.2 Một số kết quả của lý thuyết cánh 2D [1]

#### 2.1.2.1 Cánh đối xứng

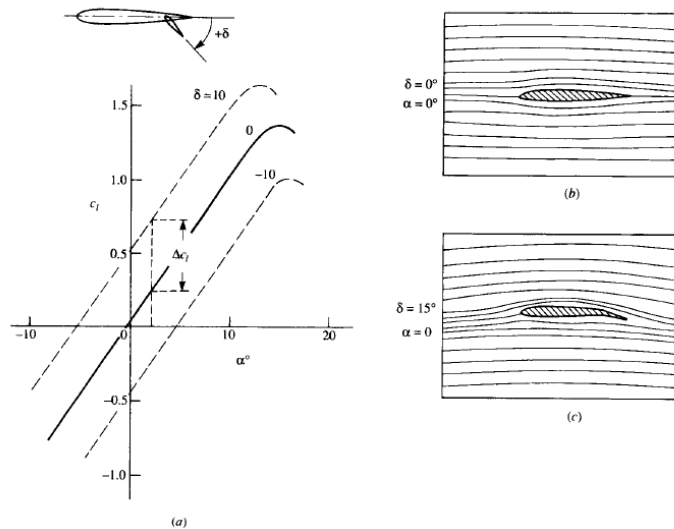
- $C_l = 2\pi\alpha$
- Lift slope (độ dốc đường lực nâng) =  $dC_l/d\alpha = 2\pi$
- Tâm áp suất (center of pressure) và tâm khí động lực học (aerodynamic center) đều nằm ở vị trí  $c/4$  (quarter-chord)
- $C_{m,c/4} = C_{m,ac} = 0$

#### 2.1.2.2 Cánh không đối xứng

- $C_l = 2\pi[\alpha + (1/\pi)\int_0^\pi (\frac{dz}{dx})(\cos\theta_0 - 1)d\theta_0]$

- Lift slope =  $dC_l/d\alpha = 2\pi$
- Tâm khí động lực học nằm ở vị trí  $c/4$
- Tâm áp suất thay đổi theo  $C_l$

### 2.1.2.3 Cánh flap



Hình 2-2 Biểu đồ thể hiện sự thay đổi hệ số lực nâng khi thay đổi góc flap [1]

Hình 2-2 minh họa xu hướng biến đổi của hệ số lực nâng  $c_l$ , khi góc flap tang (lệch xuống) thì hệ số lực nâng sẽ tăng. Sự thay đổi này có thể giải thích do sự ảnh hưởng của sự gia tăng độ cong cánh (camber line).

## 2.2 Lý thuyết cánh 3D [1]

Lực cản trên cánh 3D trong chế độ dưới âm thanh gồm 3 thành phần: Lực cản ma sát  $D_f$ , lực cản áp suất  $D_p$  và lực cản cảm ứng  $D_i$

- Nghĩa là  $C_D = \frac{D_f + D_p + D_i}{q_\infty S} = C_{D,p} + C_{D,i}$
- Với:
- $C_{D,p}$  là profile drag coefficient
- $C_{D,p} = \frac{D_f + D_p}{q_\infty S}$
- $C_{D,i} = \frac{D_i}{q_\infty S}$
- Hệ số lực cản cảm ứng
- $C_{D,i} = \frac{C_L^2}{\pi AR} (1 + K_D)$

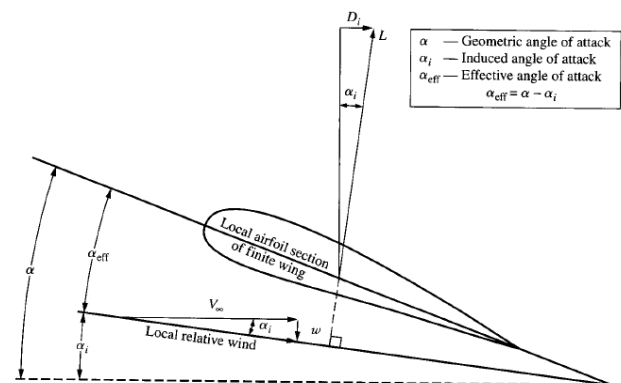
AR: tỉ lệ bình diện cánh (Aspect Ratio)

Độ dốc đường lực nâng

$$C_{L,\alpha} = \frac{\tilde{C}_{L,\alpha}}{[1 + \frac{\tilde{C}_{L,\alpha}}{(\pi AR)}](1 + K_L)}$$

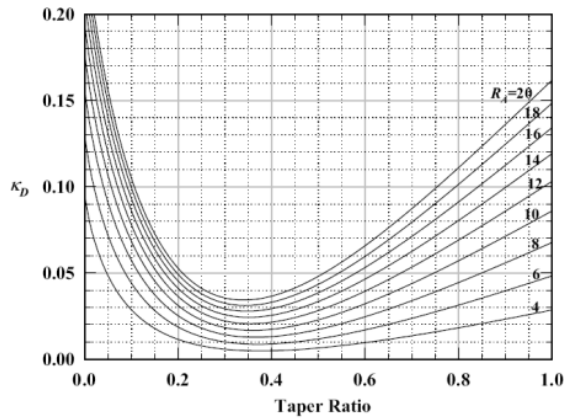
Trong đó:

+  $\tilde{C}_{L,\alpha} = 2\pi$  là độ dốc đường lực nâng cánh 2 chiều



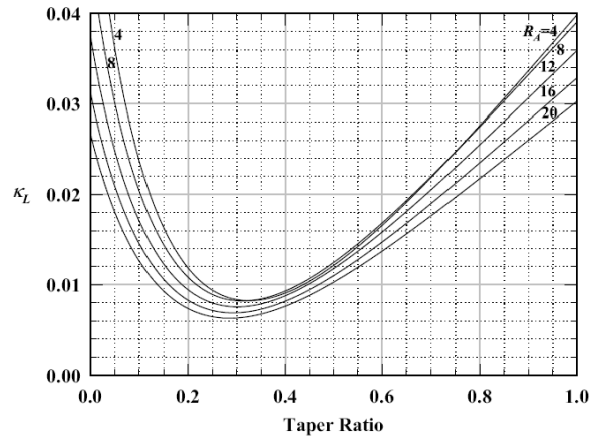
Hình 2-3 Sơ đồ phân tích lực trên cánh 3D với thành phần lực cản cảm ứng  $D_i$

Với  $K_D$  được ước lượng từ bảng sau



Hình 2-4 Hệ số  $K_D$  xác định lực cản cản ứng cho cánh hình thang, không có độ xoắn theo lý thuyết đường lực nâng của Prantle [2]

$K_L$  được ước lượng từ bảng sau



Hình 2-5 Hệ số  $K_L$  xác định độ dốc đường lực nâng cho cánh hình thang, không có độ xoắn theo lý thuyết đường lực nâng của Prantle [2]

### 2.3 Các công thức sử dụng

Moment tại vị trí  $c/4$  được tính theo công thức sau

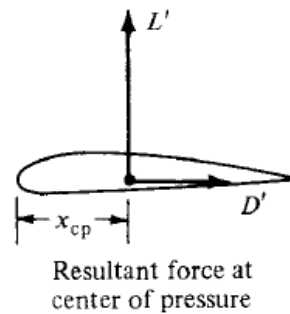
$$M_{c/4} = (\text{Fore lift} - \text{Aft lift}) \times 0.06(\text{m})$$

Xác định tâm áp suất

Tâm áp suất (Center of Pressure): là vị trí mà có moment góc chúc bằng không.

Công thức tổng quát tính vị trí tâm áp suất:

$$\frac{x_{CP}}{c} = \frac{x}{c} - \frac{C_{m,x}}{C_N}$$



Resultant force at center of pressure

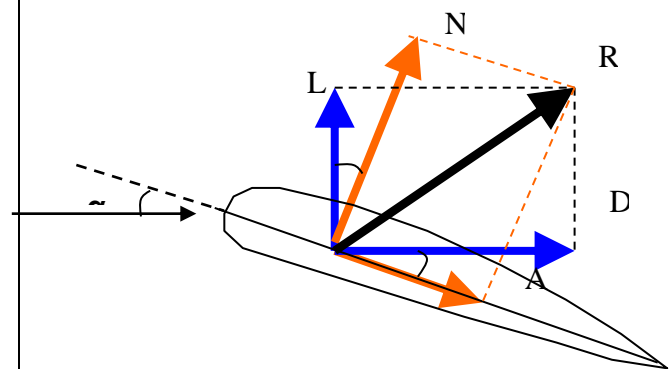
- Tìm hệ số  $C_N$  và  $C_A$

$$C_L = C_N \cos \alpha - C_A \sin \alpha$$

$$C_D = C_A \cos \alpha + C_N \sin \alpha$$

$$\Rightarrow \begin{cases} C_N = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \\ C_A = C_D \cos \alpha - C_L \sin \alpha \end{cases}$$

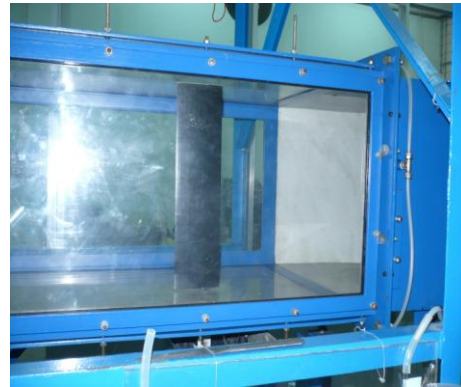
$$\Rightarrow N = L \cos \alpha + D \sin \alpha$$



### 3 Mô tả thiết bị

#### 3.1 Ống khí động

**Ống khí động** (hầm gió) có các đặc trưng tiêu biểu: (1) loại hở, (2) vận tốc tối đa của không khí trong tiết diện khảo sát là 38 m/s (137 km/h), (3) Số Mach 0.1, (4) tiết diện khảo sát kín có kích thước 400 mm (cao) x 500 mm (rộng) x 1000 mm (dài).

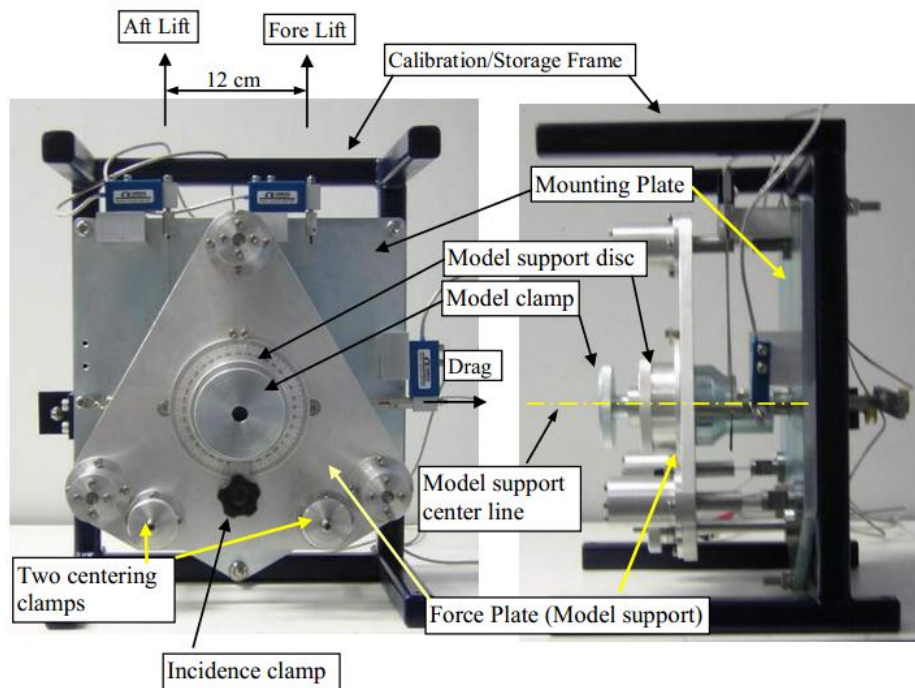


Hình 3-1 Ống khí động hở tại PTN KTHK

#### 3.2 Cân khí động

##### 3.2.1 Mô tả cân khí động (FM101 Three Component Balance)

Cân khí động là thiết bị phổ biến trong thực nghiệm khí động lực học. Cân khí động FM101 cung cấp một hệ thống hỗ trợ dễ sử dụng cho các mô hình hầm gió để đo ba thành phần lực và moment khí động tác động lên mô hình: lực nâng, lực cản và moment ngóc chúc. Cân khí động có cấu tạo như hình dưới



Hình 3-2 Cân khí động

Hình 3-2 cho thấy việc xây dựng và xác định các thành phần chính của sự cân bằng bao gồm khoảng cách giữa hai cảm biến đo lực nâng. Ba lực được xác định sơ bộ là: **fore lift**, **aft lift**,

**drag.** Khoảng cách giữa **Fore Lift** và **Aft Lift** là 120mm và chúng cách 60mm kể từ đường trung tâm của hệ thống. Nghĩa là nó đang ở vị trí đối xứng qua đường trung tâm.

$Lift\ force = Force\ lift + Aft\ lift$

Hệ thống có đường kính trung tâm khoảng 12mm, được lắp vào khoan của đĩa hỗ trợ mô hình và được bảo đảm bằng một ống kẹp chặt bởi các mô hình kẹp. Đĩa hỗ trợ chế độ có thể tự do xoay 360 độ trong tầm lực điều chỉnh góc tới của mô hình, trong khi vị trí của nó có thể bị khóa bằng một kẹp tỷ lệ.

Tấm lực được khóa ở vị trí của hai kẹp tâm, và những nên luôn luôn được thắt chặt khi không sử dụng, hoặc khi thay đổi mô hình, để tránh thiệt hại cho các thành phần tải. **KHÔNG THẮT QUÁ CHẶT HAI KẸP TÂM**, chỉ xoắn nhẹ là đủ để khóa các tấm lực. Thắt quá chặt có thể làm hỏng flexures.

Các lực tác dụng lên các tấm lực được truyền bằng cách cấp linh hoạt để căng các thành phần tải đo tương ứng các lực **Force lift**, **Aft lift** và **Drag**. Dây cáp cho lực cân, nằm theo chiều ngang, hoạt động trên một đường thẳng đi qua trung tâm của mô hình hỗ trợ, trong khi hai loại cáp dọc của **Aft lift** và **Force lift** hoạt động theo chiều dọc thông qua các điểm xử lý với khoảng cách bằng nhau từ đường trung tâm của mô hình.

Các dây cáp từ ba thành phần tải lực được kết nối bằng dây cắm 5 chân, nó có đưa vào các ổ cắm 5 chân vào tấm chắn sau của màn hình hiển thị và bảng điều khiển.

Ở mặt sau của thiết bị hiển thị và bảng vận hành cũng có 3 ổ cắm 2 chân: 0-10V tín hiệu đầu ra tương tự bằng cách này người dùng có thể sử dụng tín hiệu này để tham gia với giao diện khác.

### 3.2.2 Nguyên lý hoạt động của cân khí động

#### 3.2.2.1 Cảm biến đo lực

Cảm biến đo lực (Load cell) là thiết bị dùng để chuyển đổi lực thành tín hiệu điện. Có thể phân loại loadcells theo:

- Phân loại Loadcell theo lực tác động: chịu kéo (shear loadcell), chịu nén (compression loadcell), dạng uốn (bending), chịu xoắn (Tension Loadcells).
- Phân loại theo hình dạng: dạng đĩa, dạng thanh, dạng trụ, dạng cầu, cầu bi, cầu trụ, dạng chữ S...

**Cảm biến lực LCEB loadcell sử dụng trong cân khí động học FM101** có các thông số nhà sản xuất đưa ra như sau:

Model : LCEB-50      Date: 14-May-13

Capacity: 50lbf      Serial: 700530

Output compression: 3.21967mV/V

#### PERFORMANCE DATA

Nominal Output-mV/V.....	3
Input Resistance-ohms.....	350+50/-3.5
Output Resistance-ohms.....	350±3.5
Recommended Excitation-VDC.....	10
Non-Linearity-%Rated Output.....	<±0.03
Hysteresis-%Rated Output.....	<±0.02
Temp. Range Compensated.....	(-15 to 65 <sup>0</sup> C) 0 to 150 <sup>0</sup> F
Temperature effect on zero-% Rated Output/100 <sup>0</sup> F.....	±0.15
Zero Balance-%Rated Output.....	<±1

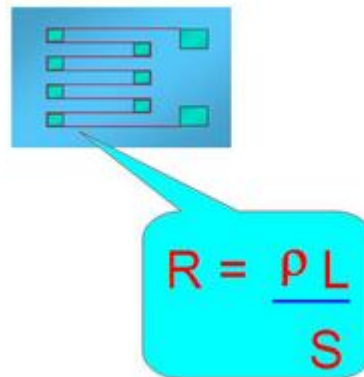




Hình 3-3 Cảm biến lực LCEB

### 3.2.2.2 Cấu tạo của cảm biến đo lực

Strain gauge: là thành phần cấu tạo chính của một loadcell, nó bao gồm một sợi dây kim loại mảnh đặt trên một tấm cách điện đàn hồi. Để tăng chiều dài của dây điện trở strain gauge, người ta đặt chúng theo hình ziczac, mục đích là để tăng độ biến dạng khi bị lực tác dụng qua đó tăng độ chính xác của thiết bị cảm biến sử dụng strain gauge.



$R$  = Điện trở strain gauge (Ohm)

$L$  = Chiều dài của sợi kim loại strain gauge (m)

$S$  = Tiết diện của sợi kim loại strain gauge (m<sup>2</sup>)

$\rho$  = Điện trở suất vật liệu của sợi kim loại strain gauge

Khi dây kim loại bị lực tác động sẽ thay đổi điện trở

Khi dây bị lực nén, chiều dài strain gauge giảm, điện trở sẽ giảm xuống.

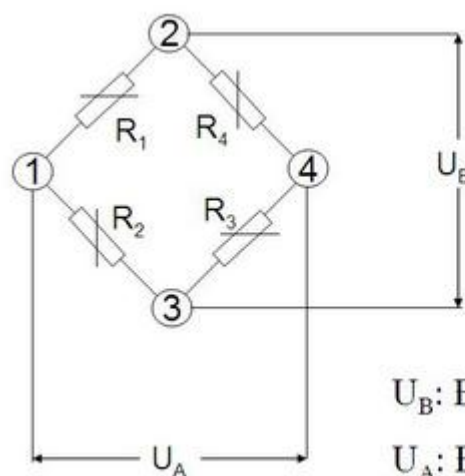
Khi dây bị kéo dãn, chiều dài strain gauge tăng, điện trở sẽ tăng lên

Điện trở thay đổi tỷ lệ với lực tác động.

### 3.2.2.3 Nguyên lý hoạt động chung của loadcell

Hoạt động dựa trên nguyên lý cầu điện trở cân bằng Wheatstone. Giá trị lực tác dụng tỉ lệ với sự thay đổi điện trở cảm ứng trong cầu điện trở, và do đó trả về tín hiệu điện áp tỉ lệ.

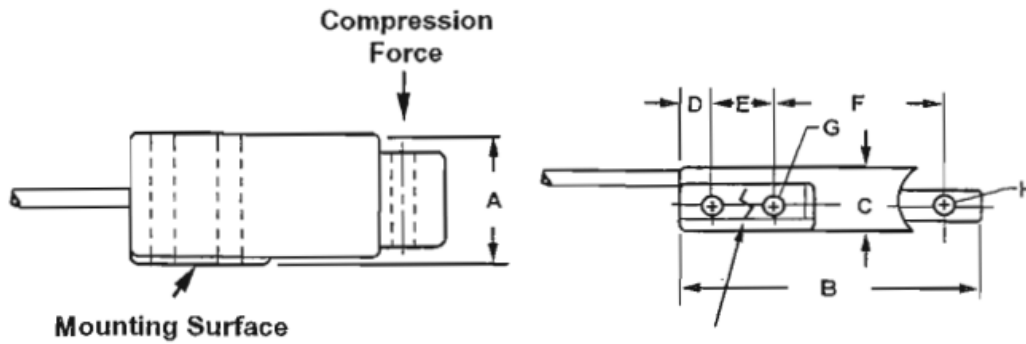
Cấu tạo chính của **loadcell** gồm các điện trở strain gauges  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  kết nối thành 1 cầu điện trở Wheatstone như hình dưới và được dán vào bề mặt của thân loadcell. Một điện áp kích thích được cung cấp cho ngõ vào loadcell (2 góc (2) và (3) của cầu điện trở Wheatstone) và điện áp tín hiệu ra được đo giữa hai góc (1) và (4).



$U_B$ : Điện áp cung cấp

$U_A$ : Điện áp tín hiệu ra

Hình 3-4 Nguyên lý cầu điện trở cân bằng Wheatstone



Hình 3-5 Sơ đồ tác dụng lực lên cảm biến

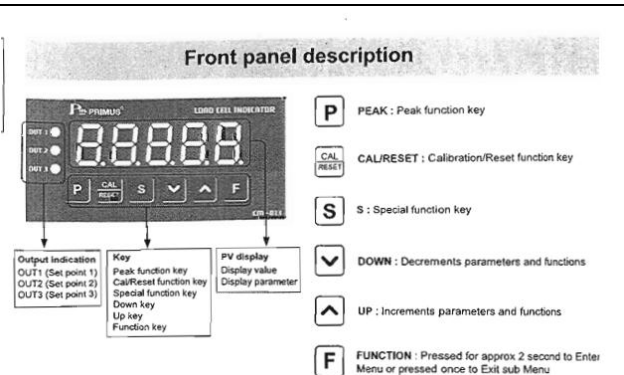
Khi có tải trọng hoặc lực tác động lên thân [loadcell](#) làm cho thân loadcell bị biến dạng (giãn hoặc nén), điều đó dẫn tới sự thay đổi chiều dài và tiết diện của các sợi kim loại của điện trở strain gauges dán trên thân loadcell dẫn đến một sự thay đổi giá trị của các điện trở strain gauges. Sự thay đổi này dẫn tới sự thay đổi trong điện áp đầu ra. Nói cách khác loadcell đã chuyển đổi lực tác dụng thành tín hiệu điện. Các load cell cũng được gọi là "đầu dò tải" (load transducer) bởi vì nó cũng có thể chuyển đổi một tải trọng (lực tác dụng) thành tín hiệu điện.



Tín hiệu điện tử ngõ ra của loadcell có thể là một sự thay đổi điện áp, thay đổi tín hiệu dòng, tín hiệu số hoặc thay đổi tần số tùy thuộc vào loại loadcell và mạch sử dụng, phổ biến nhất là loadcell thay đổi điện áp.

### 3.2.2.4 Đo lực bằng cân khí động học 3 thành phần

Nguyên lí hoạt động của cân khí động học là nó dựa vào nguyên lý của cảm biến đo lực loadcell. Khi đặt mô hình vào đúng vị trí bên trong hầm gió, gió thổi, khi đó xuất hiện lực Drag và hai lực Aft lift và Force lift (nếu có), lực này tác động lên thanh trụ gắn với mô hình được đặt bên trong Model support center line. Hai lực **Aft lift** và **Force lift** sau khi tác động lên thanh trụ sẽ truyền tới dây cáp, làm nén dây cáp gắn với 2 cảm biến loadcell. Còn lực Drag sau khi tác động lên thanh trụ sẽ truyền tới dây cáp, làm kéo dây cáp này. Khi đó các loadcell có tác dụng chuyển đổi lực tác dụng thành tín hiệu điện. Việc chuyển đổi tín hiệu điện thành tín hiệu số được thực hiện bởi bộ chỉ thị CM-013 Loadcell Indicator.

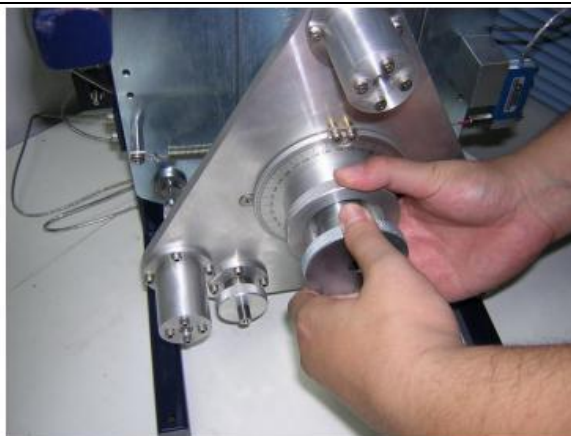


Hình 3-6 Bộ chỉ thị CM-013 Loadcell Indicator

### 3.2.3 Cách hiệu chỉnh, xây dựng đường đặc tính hoạt động của cân khí động

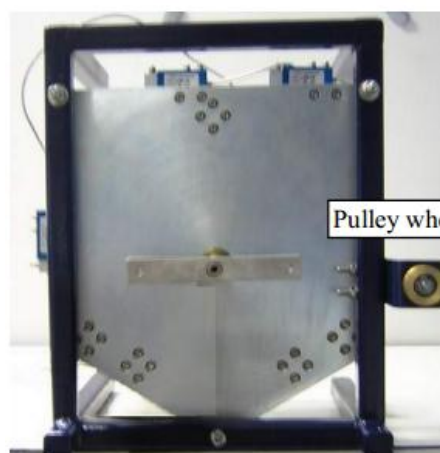
#### 3.2.3.1 Lắp đặt mô hình cho quá trình hiệu chỉnh:

- Khóa tấm lực (force plate) bởi 2 kẹp tâm (two centering clamps)
- Một tay giữ Model Support Disc, tay kia điều chỉnh Model clamp
- Chèn hoặc kéo mô hình từ Model Support Disc
- Mở khóa Incidence clamp và điều chỉnh Model Support Disc về vị trí “0” (hoặc thay đổi góc tới đối với mô hình). Sau đó khóa lại bằng Incidence clamp.
- Một tay giữ Model Support Discs, tay kia khóa chặt Model Clamp



#### **Hiệu chỉnh**

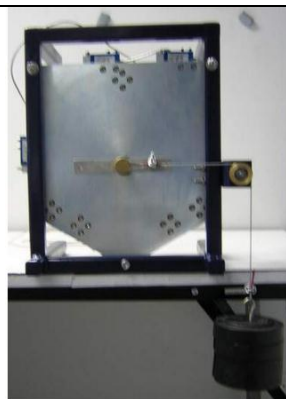
- Gắn cố định tâm khí động vào bộ khung chuyên dụng (thiết kế cho việc xác định đường đặc tính hoạt động), đặt bộ khung trên mặt bàn. Lắp ròng rọc như bố trí trên Hình 3-7
- Dùng cáp tín hiệu liên kết cân khí động và thiết bị hiển thị.
- Dùng thước giọt nước để kiểm tra các bộ khung nằm ngang, vuông góc với mặt bàn.
- Lắp đặt thanh chữ T vào vị trí lắp đặt mô hình, trục thanh T song song mặt bàn. Bật thiết bị hiển thị chờ vài phút cho hệ thống ổn định. Nhấn F3 để đi tới màn hình thiết lập đường đặc tính.



Hình 3-7 Cân khí động lắp vào bộ khung (mặt sau)

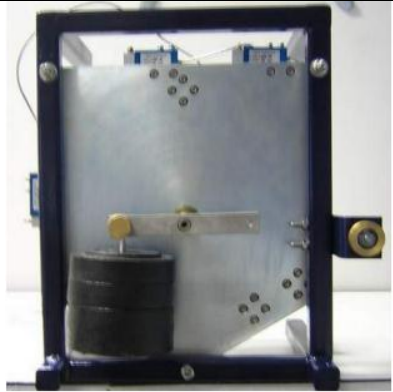
#### 3.2.3.2 Xác định đặc tính thành phần lực cản: Newton - Volt

- Tháo và điều chỉnh núm đồng với vai trò trung tâm trên cánh tay hiệu chuẩn.
- Chạy dây xung quanh ròng rọc
- Treo móc trọng lượng ở đầu kia của dây. Nhấn F3 để thiết lập không
- Đưa khối lượng 4kg trên móc. Nhấn F4 để thiết lập 4000gm

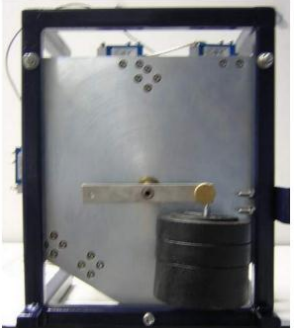




### 3.2.3.3 Xác định đặc tính thành phần lực nâng Fore-Lift: Newton -Volt

<ul style="list-style-type: none"><li>- Tháo và điều chỉnh núm đồng với vai trò trung tâm trên cánh tay hiệu chuẩn</li><li>- Treo móc trọng lượng trên núm. Nhấn F3 để thiết lập không</li><li>- Đưa khối lượng 4 kg trên móc. Nhấn F4 để thiết lập 4000gm.</li></ul>	
---	--

### 3.2.3.4 Xác định đặc tính thành phần lực nâng Aft lift: Newton-Volt

<ul style="list-style-type: none"><li>- Tháo và điều chỉnh núm đồng với vai trò trung tâm trên cánh tay hiệu chuẩn</li><li>- Treo móc trọng lượng trên núm. Nhấn F3 để thiết lập không</li><li>- Đưa khối lượng 4 kg trên móc. Nhấn F4 để thiết lập 4000gm</li></ul>	
--	--

## 4 Tiến hành thí nghiệm

- Đo đạc các kích thước hình học của các loại cánh, của các thanh trụ liên kết cánh và cân khí động
- Vẽ hình, xác định các kích thước cơ bản của biên dạng cánh, loại biên dạng cánh
- Đối với mô hình cánh 2D có bề mặt phụ tạo lực nâng tại cạnh sau (cánh có flap):
  - Thí nghiệm tại một vận tốc cố định (lựa chọn trong khoảng 20 m/s – 30 m/s)
  - Đầu tiên, thí nghiệm với góc flap  $\delta = 0^\circ$ , thay đổi góc tới cánh (5 giá trị) từ 0 đến  $30^\circ$
  - Tiếp theo, điều chỉnh góc flap  $\delta = 10^\circ$ , thay đổi góc tới cánh (5 giá trị) từ 0 đến  $30^\circ$
  - SV có thể làm thêm trường hợp góc flap  $\delta = 5^\circ$ , với quy trình tương tự như trên.
  - Thu thập số liệu, vẽ gian đồ lực nâng, lực cản theo góc tới cánh cho các trường hợp cánh có và không sử dụng hiệu ứng bề mặt tạo lực nâng
- Đối với mỗi cánh 3D, thay đổi các thông số sau:
  - Vận tốc 10 m/s và 30 m/s
  - Thay đổi góc tới từ  $-10^\circ$  đến  $40^\circ$

**Bảng số liệu**

Loại Cánh	Vận tốc (Hz)	Góc tới $\alpha$ (độ)	D (gr)	Fore-Lift (gr)	Aft-Lift (gr)

## 5 Xử lý số liệu và báo cáo kết quả thí nghiệm

- Hiệu chỉnh ảnh hưởng lực cản của thanh trụ gắn cánh trong ống khí động
- Lập bảng tính toán các giá trị liên quan

- Vẽ đồ thị diễn tả xu hướng của hệ số lực nâng, lực cản, hệ số moment  $C_{mc}/4$ , tâm áp suất theo góc tới. So sánh với lý thuyết cánh 3D.
- Đánh giá ảnh hưởng của tỉ lệ bình diện cánh lên hệ số lực cản cảm ứng.

## 6 Tài liệu tham khảo

- [1] J. D. Anderson, Fundamentals of Aerodynamics, McGraw-Hill, 2001.
- [2] W. Phillips, "Chapter 1- Overview of Aerodynamics," in *Aerodynamics of Flights*.