

## CHƯƠNG 5

### DAO ĐỘNG CƠ - SÓNG CƠ

#### 5.1- DAO ĐỘNG CƠ

Dao động cơ là chuyển động cơ trong đó trạng thái của hệ vật biến đổi tuần hoàn theo thời gian. Thí dụ: dao động của quả lắc đồng hồ, dao động của nền nhà máy khi động cơ chạy, dao động của mặt cầu khi xe lửa chạy qua...

Điều kiện để một hệ vật có thể thực hiện dao động là:

- Hệ phải có một vị trí cân bằng bền.
- Hệ phải chịu tác dụng của một lực kéo nó về vị trí cân bằng bền.
- Hệ phải có quán tính để tiếp tục vượt qua vị trí cân bằng bền.

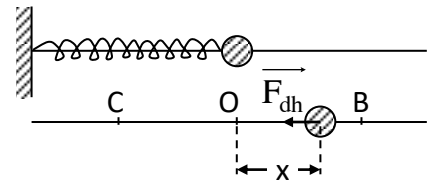
Tùy theo các loại lực tác dụng lên hệ, tính chất dao động của hệ có thể là *điều hòa*, *tắt dần*, *cưỡng bức*.

##### 5.1.1. Dao động cơ điều hòa

###### a. Dao động cơ điều hòa của con lắc lò xo

\* Mô tả dao động cơ điều hòa:

Xét một con lắc lò xo gồm một quả cầu nhỏ khối lượng  $m$  gắn vào đầu một lò xo có độ cứng  $k$  khối lượng không đáng kể, đầu kia của lò xo được giữ cố định. Quả cầu có thể trượt dọc không ma sát trên một thanh ngang xuyên qua nó (hình 5-1).



Hình 5-1

Kéo quả nặng rời khỏi vị trí cân bằng O một đoạn rồi buông tay, dưới tác dụng của lực đàn hồi  $F_{dh} = -kx$  thì con lắc sẽ dao động điều hòa xung quanh vị trí cân bằng O.

\* Thiết lập phương trình dao động cơ điều hòa:

Theo định luật Niuton 2:  $F = m.a$

Theo định luật Húc:  $F = F_{dh} = -k.x$

Do đó:  $m.a = -k.x$

Hay:  $a = -\frac{k}{m}.x$

Thay  $a = \frac{d^2x}{dt^2}$  và đặt  $\frac{k}{m} = \omega_0^2$

Ta được:  $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$  (5-1)

(5-1) là phương trình vi phân của dao động điều hòa.

Nghiệm của phương trình (5-1) có dạng:

$$x = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (5-2)$$

Trong đó  $A_0$  và  $\varphi_0$  là những hằng số phụ thuộc vào các điều kiện ban đầu.

Phương trình (5-2) được gọi là phương trình dao động cơ điều hòa. Nó cho biết độ dời  $x$  của hệ vật dao động cơ điều hòa phụ thuộc vào thời gian  $t$  theo qui luật hàm cosin hoặc sin.

*\* Khảo sát các tính chất của dao động cơ điều hòa:*

- Độ dời (hay ly độ dao động)  $x$ : Để xác định vị trí của con lắc lò xo ở thời điểm  $t$  so với vị trí cân bằng.

- Biên độ dao động  $A_0$ : Xác định giới hạn dao động của hệ vật.

Vì:  $|\cos(\omega_0 t + \varphi)| \leq 1$  nên  $|x| \leq A_0$

Do đó:  $A_0 = |x|_{\max} = \text{const}$

- Đại lượng  $(\omega_0 t + \varphi)$  gọi là pha của dao động. Nó xác định trạng thái dao động của hệ vật ở thời điểm  $t$ .

$\varphi$  là pha ban đầu của dao động ở thời điểm  $t = 0$ .

- Đại lượng  $\omega_0$  (đơn vị: rad/s) là tần số góc của dao động:  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

- Vận tốc và gia tốc:  $v = \frac{dx}{dt} = -\omega_0 A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (5-3)$

$$a = \frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega_0^2 A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = -\omega_0^2 x \quad (5-4)$$

*Nhận xét:* Trong dao động điều hòa, độ dời  $x$ , vận tốc  $v$  và gia tốc  $a$  của hệ đều biến đổi tuần hoàn theo thời gian  $t$  với cùng chu kỳ  $T_0$

- Chu kỳ  $T_0$  (s) là khoảng thời gian để hệ vật thực hiện được một dao động toàn phần:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

- Tần số  $f_0$  (Hz) là số dao động toàn phần trong 1 đơn vị thời gian.

$$f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

*\* Năng lượng của dao động cơ điều hòa*

Năng lượng dao động cơ điều hòa của con lắc lò xo bằng tổng động năng và thế năng của nó:

$$W = W_d + W_t$$

- Động năng tại thời điểm  $t$ :

$$W_d = \frac{1}{2} m.v^2 = \frac{1}{2} m\omega^2 A_0^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0)$$

- Thế năng tại thời điểm t: Chọn gốc tính thế năng tại vị trí cân bằng

$$W_t = \int_x^0 F_{dh}.dx = \int_x^0 -k.x.dx = \frac{k.x^2}{2} = \frac{1}{2} k.A_0^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0)$$

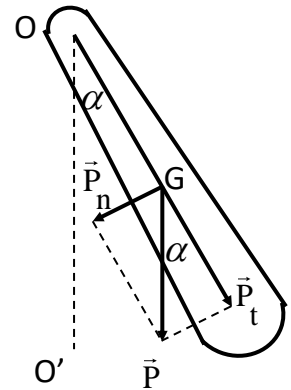
Vậy cơ năng của con lắc là:

$$W = W_d + W_t = \frac{1}{2} m.\omega^2.A_0^2 = \frac{1}{2} k.A_0^2 = const \quad (5-5)$$

**Nhận xét:** Trong dao động điều hòa, động năng và thế năng của con lắc lò xo luôn biến đổi tuần hoàn và chuyển hóa lẫn nhau, nhưng năng lượng dao động của nó luôn bảo toàn và tỷ lệ với bình phương biên độ dao động.

### **b. Dao động cơ điều hòa của con lắc vật lý**

Con lắc vật lý là một vật rắn khối lượng m có thể quay không ma sát quanh một trục ngang cố định đi qua điểm treo O của nó (hình 5-2). Kéo con lắc lệch khỏi vị trí cân bằng thẳng đứng OO' một góc  $\alpha$  rồi thả. Trọng lực  $\vec{P}$  có điểm đặt tại trọng tâm G của con lắc được phân tích thành hai thành phần:  $\vec{P}_n$  (nằm dọc theo phương OG, bị triệt tiêu bởi phản lực tại trục quay), và thành phần  $\vec{P}_t$  vuông góc với OG).



Hình 5-2

Thành phần  $\vec{P}_t$  có tác dụng kéo con lắc về vị trí cân bằng bên OO', luôn hướng ngược chiều với độ dời góc  $\alpha$ . Với  $\alpha$  nhỏ thì  $\sin \alpha \approx \alpha$ , ta có:  $P_t \approx -mg.\alpha$ .

Nếu không có lực ma sát và lực cản, dưới tác dụng của  $\vec{P}_t$  con lắc vật lý cũng dao động điều hòa quanh vị trí cân bằng bên của nó.

Áp dụng phương trình cơ bản của vật rắn quay quanh trục cố định:  $M = I\beta$  thay  $M = P_t.OG = -mg.\ell.\alpha$  ta được:

$$I.\frac{d^2\alpha}{dt^2} \approx -mg\ell.\alpha$$

Vậy, phương trình vi phân của dao động điều hòa của con lắc vật lý là:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \omega_0^2.\alpha = 0 \quad (5-6)$$

trong đó:  $\omega_0 = \sqrt{\frac{mgl}{I}}$  là tần số góc của dao động, với I là mômen quán tính của con lắc vật lý đối với trục quay O. Vậy, chu kỳ dao động điều hòa của con lắc vật lý là:

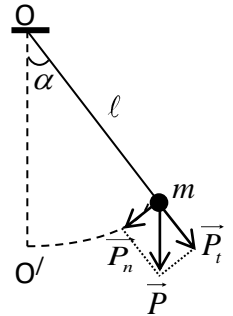
$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}} \quad (5-7)$$

### c. Dao động cơ điều hòa của con lắc đơn

Con lắc đơn gồm quả cầu nhỏ khối lượng  $m$  buộc ở đầu một sợi dây dài không giãn và khối lượng không đáng kể, đầu kia của sợi dây treo tại điểm  $O$  cố định. Kéo con lắc lệch khỏi vị trí cân bằng một góc nhỏ rồi thả, dưới tác dụng của thành phần  $\vec{P}_t$ , con lắc đơn sẽ dao động điều hòa quanh vị trí cân bằng  $OO'$ .

Mômen quán tính của quả cầu đối với trục quay tại  $O$  là  $I = m \cdot \ell^2$  nên theo (5-7) chu kỳ dao động của con lắc đơn bằng:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} \quad (5-8)$$



Hình 5-3

Chu kỳ dao động cơ điều hòa của con lắc đơn chỉ phụ thuộc vào chiều dài dây treo con lắc và gia tốc trọng trường, không phụ thuộc vào biên độ dao động.

### 5.1.2. Dao động cơ tắt dần

#### a. Mô tả dao động cơ tắt dần

Khi không bỏ qua được lực cản của môi trường thì hệ luôn phải thực hiện công để thắng lực cản của môi trường, do đó năng lượng và biên độ dao động hệ giảm dần theo thời gian. Như vậy, dao động của hệ vật là một dao động tắt dần.

Chẳng hạn khi ta đặt một hệ dao động điều hòa vào trong chất lỏng, hoặc dòng chất lưu. Khi đó xuất hiện lực ma sát của môi trường, bao gồm lực ma sát nhớt, ma sát dòng chảy chất lưu, tương tự như giảm xóc ô tô. Thực nghiệm chứng tỏ: nếu vận tốc  $v$  của hệ không lớn thì lực cản  $F_c$  của môi trường tỷ lệ và ngược chiều với vận tốc của hệ.

$$F_c = -r.v \quad (5-9)$$

Với  $r$  là hệ số cản (phụ thuộc vào bản chất và nhiệt độ) của môi trường.

#### b. Thiết lập phương trình dao động cơ tắt dần

Theo định luật Niuton 2:  $F_{hl} = m.a = m \frac{d^2 x}{dt^2}$

Mà:  $F_{hl} = -k.x - r.v$

Do đó:  $m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = -k.x - r.v$

Thay  $v = \frac{dx}{dt}$ ; đặt  $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$  và  $2\beta = \frac{r}{m}$ , ta được:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (5-10)$$

Khi  $\omega_0 > \beta$  thì nghiệm của phương trình (5-10) có dạng:

$$x = A_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (5-11)$$

Trong đó:  $A_0, \omega, \beta, \varphi$  là những hằng số phụ thuộc vào điều kiện ban đầu.

Phương trình (5-11) được gọi là phương trình dao động cơ tắt dần.

Trong đó: - Biên độ của dao động cơ tắt dần:  $A_t = A_0 \cdot e^{-\beta t}$

$$\text{- Tần số góc của dao động cơ tắt dần: } \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \quad (5-12)$$

Với  $\beta$  là hệ số tắt dần ( $\beta = \frac{r}{2m}$ ).

### c. Khảo sát tính chất của dao động cơ tắt dần

Phương trình (5-11) chứng tỏ độ dời  $x$  của dao động cơ tắt dần cũng thay đổi theo thời gian  $t$  với chu kỳ:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \quad (5-13)$$

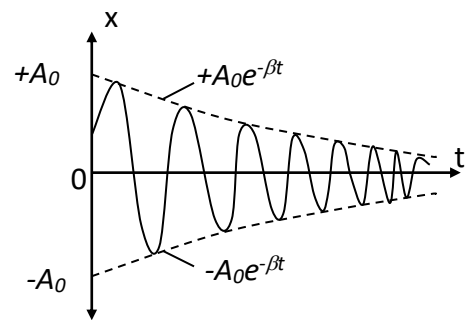
Ta thấy  $T > T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$  nên dao động cơ tắt dần diễn biến chậm hơn dao động riêng (dao động điều hòa) của cùng một hệ vật.

- Biên độ  $A_t = A_0 \cdot e^{-\beta t}$  không phải là hằng số mà giảm nhanh theo thời gian  $t$  theo quy luật hàm số mũ âm. Đồ thị biểu diễn phương trình (5-8) được biểu diễn bằng đường nét liền nằm nội tiếp giữa hai đường cong của hàm mũ  $+A_0 \cdot e^{-\beta t}$  và  $-A_0 \cdot e^{-\beta t}$  (hình 5-4).

Mức độ suy giảm của biên độ dao động cơ tắt dần được đặc trưng bởi một đại lượng  $\delta$  gọi là Giảm lượng lôga.

"Giảm lượng lôga  $\delta$  của một dao động cơ tắt dần có trị số bằng lôga tự nhiên của tỷ số giữa hai biên độ dao động kế tiếp cách nhau một chu kỳ  $T$ ".

$$\delta = \ln \frac{A_t}{A_{t+T}} = \ln \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = \beta T \quad (5-14)$$



Hình 5-4

Ta thấy, nếu hệ số cản  $r$  của môi trường càng lớn thì biên độ của dao động tắt dần càng giảm nhanh theo thời gian (vì  $\beta = \frac{r}{2m}$ ).

$$\text{- Khi } \omega_0 = \beta \text{ thì } r = 2\sqrt{k \cdot m} = r_{gh} \quad (5-15)$$

Điều kiện (5-15) gọi là giới hạn tắt dần. Khi đó  $\omega = 0$ , tức là hệ không còn dao động nữa mà trở về vị trí cân bằng của nó, dù cho ngay lúc đó ta có làm cho vật lệch khỏi vị trí cân bằng rồi thả ra.  $r_{gh}$  gọi là hệ số cản giới hạn.

- Khi  $r > 2\sqrt{k.m}$  thì điều kiện này được gọi là vượt quá giới hạn tắt dần. Lúc này không có sự dao động của hệ nhưng hệ trở về trạng thái cân bằng chậm chạp hơn so với giới hạn tắt dần.

- Khi  $r < 2\sqrt{k.m}$  thì điều kiện này được gọi là dưới giới hạn tắt dần, hệ dao động với biên độ giảm dần.

Vậy: Bất cứ hệ dao động nào khi lực cản có hệ số cản  $r \geq r_{gh}$  thì hệ không thể dao động được.

Trong dao động của một âm thoa hoặc dây đàn ghi ta, lực cản gây ra dao động tắt dần là rất nhỏ, nên các dao động đó được coi như dao động tuần hoàn. Sự tắt dần được coi là có ích đối với các dao động của hệ thống giảm xóc xe ô tô. Vận tốc của xe ô tô phụ thuộc lực tắt dần, tương ứng với tình trạng cái giảm xóc. Do đó, khi xe đi qua đoạn đường gập ghềnh, xe nảy lên, làm giảm vận tốc của nó, Đối với xe chở khách có tiện nghi tối ưu, hệ thống giảm xóc đạt tiêu chuẩn, thỏa mãn giới hạn tắt dần hoặc dưới giới hạn tắt dần một chút thì sự dao động của cái giảm xóc là dao động tắt dần rất nhanh. Nhưng đối với xe cũ thì hệ thống giảm xóc đã mòn nên giá trị của  $r$  giảm làm sự dao động tắt dần diễn ra lâu hơn, điều này không có lợi cho xe cũng như cho các hành khách. Tuy nhiên nếu  $r$  lớn quá mức làm hệ thống vượt quá giới hạn tắt dần, sự nén dãn của lò xo ở trạng thái không bình thường, điều này không tốt cho hoạt động của xe.

### 5.1.3. Dao động cơ cưỡng bức và hiện tượng cộng hưởng

#### a. Mô tả dao động

Muốn duy trì một dao động nào đó phải cung cấp năng lượng từ bên ngoài vào cho hệ vật bằng cách tác dụng lên nó một ngoại lực cưỡng bức tuần hoàn theo thời gian để bù sự tiêu hao do thắng lực cản:

$$F_{cb} = F_0 \cos \Omega t \quad (5-16)$$

Với  $F_0$  là biên độ và  $\Omega$  là tần số góc của lực cưỡng bức.

Vậy: Dao động của hệ vật trong môi trường có thêm tác dụng của lực cưỡng bức tuần hoàn gọi là dao động cơ cưỡng bức.

#### b. Thiết lập phương trình dao động cơ cưỡng bức

Lực tổng hợp tác dụng lên hệ là:

$$F_{ht} = F + F_c + F_{cb} = -k.x - r.v + F_0 \cos \Omega t$$

Mà theo định luật 2 Newton:  $F = m.a$

Do đó:  $m.a = -k.x - r.v + F_0 \cos \Omega t$

Thay:  $v = \frac{dx}{dt}$ ; đặt  $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$  và  $2\beta = \frac{r}{m}$ , ta được:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \cos \Omega t \quad (5-17)$$

Biểu thức (5-17) là phương trình vi phân của dao động cơ cưỡng bức. Nghiệm của (5-17) là tổng hai nghiệm: Nghiệm tổng quát của phương trình vi phân bậc 2 không vế phải biểu diễn dao động cơ tắt dần và nghiệm riêng của phương trình vi phân bậc 2 có vế phải biểu diễn dao động cưỡng bức:

$$x = A \cos(\Omega t + \phi) \quad (5-18)$$

Trong đó:  $A$ ,  $\phi$  phụ thuộc vào tần số góc  $\Omega$  của lực cưỡng bức.

$$A = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}} \quad (5-19)$$

$$\tan \phi = -\frac{2\beta \Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2} \quad (5-20)$$

### c. Khảo sát các tính chất của dao động cưỡng bức. Cộng hưởng

- Phương trình (5-18) cho thấy độ dời  $x$  của dao động cưỡng bức cũng biến đổi tuần hoàn theo thời gian với quy luật hàm cosin và có chu kỳ bằng chu kỳ của lực cưỡng bức:  $\tau = \frac{2\pi}{\Omega}$ .

- Biên độ của dao động cưỡng bức phụ thuộc vào tần số góc  $\Omega$  của lực cưỡng bức. Từ (5-19) ta thấy: Khi  $\Omega = \Omega_{ch} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$  (5-21)

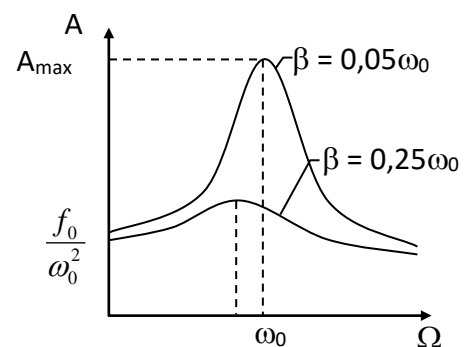
thì:  $A = A_{\max} = \frac{F_0}{2m\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$  (5-22)

Hiện tượng biên độ dao động cơ cưỡng bức đạt cực đại gọi là cộng hưởng cơ. Trị số  $\Omega_{ch}$  gọi là tần số góc cộng hưởng.

Đồ thị biểu diễn biên độ  $A$  của dao động cưỡng bức theo tần số góc  $\Omega$  của lực cưỡng bức được biểu diễn trên hình 5-5:

Ta thấy:

+ Nếu  $\beta \rightarrow 0$  thì  $\Omega_{ch} \rightarrow \omega_0$  và  $A_{\max}$  càng lớn.



Hình 5-5

+ Đặc biệt: Nếu  $\beta = 0$  thì  $\Omega \approx \omega_0$ , khi đó  $A_{max}$  sẽ có trị số cực đại ứng với một đỉnh rất nhọn của đường cộng hưởng. Do đó hiện tượng này gọi là cộng hưởng nhọn (hình 5-5).

- Ứng dụng: Hiện tượng cộng hưởng cơ rất quan trọng trong kỹ thuật. Chẳng hạn, do cấu tạo của rôto trong các động cơ điện thường không đối xứng hoàn toàn, nên trọng tâm của rôto không nằm đúng trên trục quay của nó. Khi rôto quay, trọng lực sẽ gây ra một mômen lực biến thiên tuần hoàn tác dụng lên rôto. Nếu vận tốc quay của rôto phù hợp với điều kiện cộng hưởng sẽ làm gãy trục động cơ hoặc làm bệ động cơ bị sụt nứt. Tương tự, dao động của các cánh máy bay chịu tác dụng của gió khi bay với vận tốc nào đó cũng có thể bị gãy do cộng hưởng. Để tránh sự cố này, người ta phải cho động cơ hoặc máy bay chuyển động vượt nhanh qua vận tốc nguy hiểm ứng với trị số của tần số góc cộng hưởng.

Trong ngành xây dựng, giao thông cũng rất cần chú ý hiện tượng này để tránh sập nhà, gãy cầu... Chẳng hạn khi có gió thổi thì sức gió chính là lực cưỡng bức tác dụng lên cầu treo. Do có lốc xoáy, có thể xảy ra tần số của gió bằng tần số riêng của cầu, hiện tượng cộng hưởng làm cầu bị gãy.

#### 5.1.4. Tổng hợp các dao động điều hòa

##### a. Tổng hợp hai dao động điều hòa cùng phương cùng tần số góc

Giả sử một chất điểm tham gia đồng thời hai dao động điều hòa cùng phương cùng tần số góc có dạng:

$$x_1 = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_2)$$

Dao động tổng hợp của chất điểm bằng tổng hai dao động thành phần:

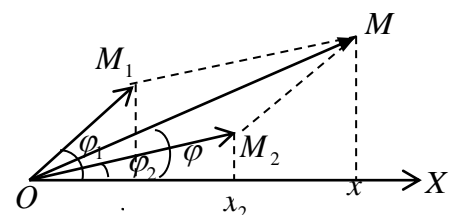
$$x = x_1 + x_2 = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_2) \quad (5-23)$$

Để tìm dạng của  $x$  ta sử dụng phương pháp giản đồ véc tơ Fresnel cho thuận tiện.

Vẽ hai véc tơ  $\overrightarrow{OM_1}$  có độ dài  $|\overrightarrow{OM_1}| = A_1$  và véc tơ  $\overrightarrow{OM_2}$  có độ dài  $|\overrightarrow{OM_2}| = A_2$  có góc chung tại O. ở thời điểm  $t = 0$ , chúng hợp với trục Ox các góc  $\varphi_1$  và  $\varphi_2$  bằng pha ban đầu.

Véc tơ tổng hợp  $\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OM_1} + \overrightarrow{OM_2}$  có phương là đường chéo của hình bình hành  $OM_1MM_2$ , có độ lớn là  $|\overrightarrow{OM}| = A$  và lập với trục Ox một góc  $\varphi$ .

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (5-24)$$



hình 5-6



$$\tan \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2} \quad (5-25)$$

Cho hai véc tơ  $\overrightarrow{OM_1}$  và  $\overrightarrow{OM_2}$  quay quanh gốc O theo chiều dương với vận tốc góc không đổi bằng tần số góc  $\omega$ , thì véc tơ tổng  $\overrightarrow{OM}$  cũng quay theo với tốc độ góc  $\omega$ . Ở thời điểm t, hình chiếu của  $\overrightarrow{OM_1}$ ,  $\overrightarrow{OM_2}$  và  $\overrightarrow{OM}$  lên phương Ox biểu diễn các độ dời  $x_1, x_2$  và x.

Theo phép chiếu véc tơ thì:  $x = x_1 + x_2 = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$

Vậy, phương trình của dao động tổng hợp là:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (5-25)$$

Biểu thức (5-25) cho thấy, dao động tổng hợp của hai dao động điều hòa cùng phương cùng tần số góc cũng là một dao động điều hòa cùng phương, cùng tần số góc, có biên độ và pha ban đầu thỏa mãn (5-24) và (5-25).

Ta thấy, A phụ thuộc vào hiệu pha  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  của hai dao động thành phần.

- Nếu hai dao động thành phần cùng pha:  $\varphi_1 - \varphi_2 = 2k\pi$  thì  $A = A_1 + A_2 = A_{\max}$

- Nếu hai dao động thành phần ngược pha:  $\varphi_1 - \varphi_2 = (2k+1)\pi$  thì  $A = |A_1 - A_2| = A_{\min}$

### **b. Tổng hợp hai dao động điều hòa có phương vuông góc và cùng tần số góc**

Giả sử một chất điểm tham gia đồng thời hai dao động điều hòa x và y có phương vuông góc và có cùng tần số góc  $\omega_0$ :

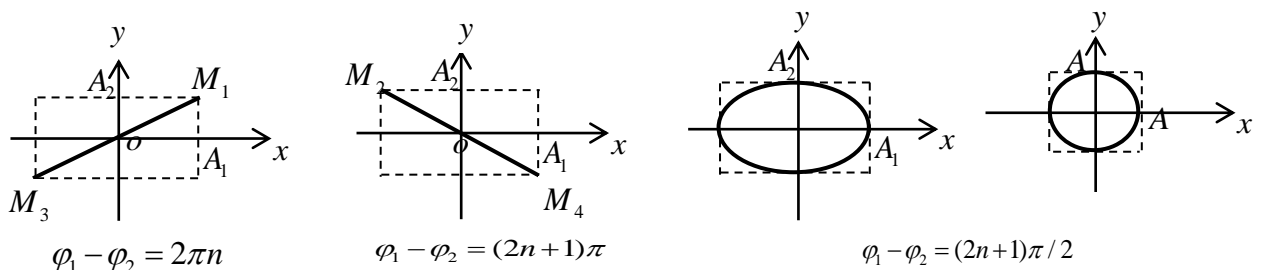
$$x = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1)$$

$$y = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_2)$$

Biến đổi toán học, ta tìm được phương trình quỹ đạo chuyển động tổng hợp của chất điểm có dạng:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - 2 \cdot \frac{x}{A_1} \cdot \frac{y}{A_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) = \sin^2(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (5-26)$$

Như vậy, chuyển động tổng hợp của hai dao động điều hòa có phương vuông góc và có cùng tần số là một chuyển động có quỹ đạo là một đường elip (khi  $A_1 \neq A_2$ ), hoặc tròn (khi  $A_1 = A_2$ ); trừ trường hợp hiệu pha bằng một số chẵn lần hoặc lẻ lần  $\pi$  sẽ là một dao động điều hòa có quỹ đạo là một đường thẳng đi qua vị trí cân bằng tại gốc tọa độ O.



## 5.2 - SÓNG CƠ

### 5.2.1. Sóng cơ trong môi trường đàn hồi

#### a. Sự tạo thành sóng cơ

Các môi trường chất (khí, lỏng, rắn) được cấu tạo bởi những phần tử liên kết với nhau bằng những lực tương tác đàn hồi nên gọi chung là *môi trường đàn hồi*. Khi một phần tử O bất kỳ của môi trường được kích thích, dao động xung quanh vị trí cân bằng thì nó kéo các phần tử lân cận dao động theo. Kết quả là dao động của phần tử O lan truyền ra xa dần trong môi trường.

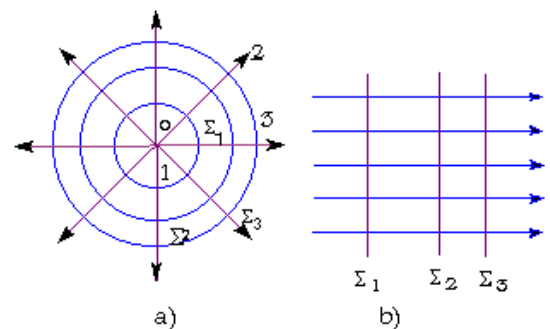
Vậy: *Quá trình lan truyền dao động cơ trong một môi trường đàn hồi được gọi là sóng đàn hồi hay sóng cơ.*

Phần tử O được kích thích gây nên sóng nên được gọi là *nguồn sóng* hay *tâm sóng*. Phương truyền sóng gọi là *tia sóng*. Phần môi trường có sóng truyền qua gọi là *trường sóng*. Tập hợp những điểm trong trường sóng tại đó các phần tử dao động cùng pha gọi là *mặt sóng*. Mặt sóng ngoài cùng trong trường sóng gọi là *mặt đầu sóng*.

Trong môi trường đồng tính và đẳng hướng, sóng truyền đều đặn theo mọi phương nên các tia sóng luôn vuông góc với mặt đầu sóng.

Nếu nguồn sóng ở gần miền quan sát thì mặt đầu sóng có dạng mặt cầu. Sóng đó gọi là *sóng cầu* (hình 5-8a). Nếu nguồn sóng ở rất xa miền quan sát thì mặt đầu sóng có dạng mặt phẳng. Sóng đó gọi là *sóng phẳng* (hình 5-8b).

Chú ý rằng, chỉ có trạng thái sóng được truyền đi còn các phần tử trong môi trường thì vẫn dao động tại chỗ quanh vị trí cân bằng; sóng cơ không truyền được trong chân không vì chân không không có phần tử môi trường.



Hình 5-8

#### b. Sóng ngang và sóng dọc

Tùy theo phương dao động của các phần tử môi trường đàn hồi mà người ta chia sóng cơ thành hai loại: sóng ngang và sóng dọc.

- Sóng ngang là sóng trong đó các phần tử môi trường dao động theo phương vuông góc với tia sóng.

- Sóng dọc là sóng trong đó các phần tử môi trường dao động dọc theo tia sóng.

Thực nghiệm chứng tỏ, sóng ngang chỉ truyền được trong chất rắn, còn sóng dọc truyền được cả trong chất rắn, chất lỏng và chất khí.

#### c. Các đặc trưng của sóng cơ

- *Vận tốc sóng  $v$* : là quãng đường mà sóng truyền đi được trong một môi trường đàn hồi sau một đơn vị thời gian.

Trị số của  $v$  phụ thuộc khối lượng riêng  $\rho$  của môi trường đàn hồi:  $v \sim 1/\sqrt{\rho}$ . Người ta đã xác định rằng, vận tốc truyền sóng ngang theo một sợi dây căng được tính theo công thức:  $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$  trong đó  $F$  là sức căng của dây và  $\mu$  là mật độ dài của dây.

Đối với chất khí,  $v$  còn phụ thuộc vào nhiệt độ  $T$  của môi trường:  $v \sim \sqrt{T}$ . Ví dụ: vận tốc âm truyền trong không khí ở  $0^\circ\text{C}$  là  $331(\text{m/s})$ , nhưng khi truyền trong không khí ở  $20^\circ\text{C}$  là  $343(\text{m/s})$ .

Trong chất rắn, sóng dọc có vận tốc lớn hơn sóng ngang. Dựa vào sự khác nhau đó người ta có thể xác định được vị trí của tâm địa chấn do các vụ động đất hoặc các vụ thử vũ khí hạt nhân gây ra bằng cách ghi độ sai lệch về thời gian truyền trong lớp vỏ trái đất của sóng dọc và sóng ngang phát ra từ tâm địa chấn.

- *Chu kỳ  $T$  và tần số  $f$*  của sóng cơ có trị số đúng bằng chu kỳ và tần số dao động của một phần tử trong trường sóng. Các đại lượng này đặc trưng cho tính tuần hoàn của sóng theo thời gian.

Trong kỹ thuật và đời sống, sóng cơ hay gặp nhất là *sóng âm*. Thực nghiệm chứng tỏ, tai người chỉ có thể nghe thấy những sóng âm có tần số từ 20Hz đến 20.000Hz. Những âm có  $f > 20.000\text{Hz}$  gọi là *siêu âm*. Chùm tia siêu âm có đặc tính là: kích thước nhỏ, ít lệch phương truyền, bị phản xạ mạnh trên các mặt phân cách giữa hai môi trường khác nhau, bị hấp thụ mạnh trong chất khí và bị hấp thụ yếu hơn trong chất lỏng và chất rắn. Những đặc tính này của siêu âm được ứng dụng trong kỹ thuật thăm dò độ sâu của đáy sông hoặc đáy biển, phát hiện các chương ngại vật dưới biển giúp cho các tàu biển tránh được va chạm vào các đá ngầm hoặc các tảng băng trôi, kiểm tra các vật đúc bằng kim loại để phát hiện các vết nứt hoặc lỗ hổng nhỏ do các bọt khí tạo nên trong các vật đó.

- *Bước sóng  $\lambda$* : là quãng đường mà sóng truyền đi được sau mỗi chu kỳ  $T$ . Bước sóng đặc trưng cho tính tuần hoàn của sóng trong không gian.

Bước sóng  $\lambda$  liên hệ với vận tốc truyền sóng  $v$  và chu kỳ  $T$ , tần số  $f$  bởi hệ thức:

$$\lambda = v.T = \frac{v}{f} \quad (5-26)$$

### 5.2.2. Phương trình sóng, năng lượng sóng

#### a. Phương trình sóng

Xét một sóng phẳng truyền theo phương Oy trùng với tia sóng. Giả sử dao động của phần tử nằm tại điểm O (gốc tọa độ) có dạng:

$$x_o = A \cos \omega t \quad (5-27)$$

Xét một phần tử tại điểm M cách O một đoạn  $\overline{OM} = y$  trên phương Oy. Sóng truyền từ O tới M mất một thời gian là  $\tau = \frac{y}{v}$ , do đó dao động của phần tử tại M có dạng:

$$x = A \cos \omega \left( t - \frac{y}{v} \right)$$

hay:

$$x = A \cos \left( \omega t - 2\pi \frac{y}{\lambda} \right) \quad (5-28)$$

Biểu thức (5-28) được gọi là phương trình sóng phẳng. Nó mô tả độ dời x của một phần tử môi trường có tọa độ y ở thời điểm t nằm trên phương truyền sóng Oy theo chiều dương, với A là biên độ sóng phẳng và  $(\omega t - 2\pi \frac{y}{\lambda})$  là pha của sóng.

- Đối với sóng cầu, biên độ sóng giảm tỷ lệ nghịch với khoảng cách y nên phương trình sóng cầu có dạng:

$$x = k \frac{A}{y} \cos \left( \omega t - 2\pi \frac{y}{\lambda} \right) \quad (5-29)$$

Các phương trình nêu trên chứng tỏ sóng là một quá trình tuần hoàn theo cả không gian y và thời gian t (cứ sau một chu kỳ  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  trạng thái dao động của một phần tử lại lặp lại như cũ; cứ cách nhau một khoảng  $\lambda = v.T$  thì các phần tử dao động giống hệt nhau).

### **b. Năng lượng sóng**

Khi dao động của nguồn sóng truyền đi theo mọi phương trong môi trường đàn hồi tạo thành sóng cơ, thì năng lượng của nguồn sóng cũng được truyền đi theo sóng. Như vậy, *sóng cơ mang năng lượng*.

Năng lượng sóng  $dW$  có trong thể tích nhỏ  $dV$  của môi trường truyền sóng có khối lượng riêng  $\rho$  sẽ bằng tổng động năng của các phần tử dao động nằm trong thể tích  $dV$  và tổng thế năng tương tác giữa chúng. Dựa vào lý thuyết đàn hồi, người ta đã chứng minh được:

$$dW = \rho dV . \omega^2 A^2 \sin^2 \left( \omega t - 2\pi \frac{y}{\lambda} \right) \quad (5-30)$$

Năng lượng sóng chứa trong một đơn vị thể tích được gọi là mật độ năng lượng sóng  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = \frac{dW}{dV} = \rho . \omega^2 A^2 \sin^2 \left( \omega t - 2\pi \frac{y}{\lambda} \right) \quad (5-31)$$

Vì giá trị trung bình  $\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 \left( \omega t - \frac{y}{\lambda} \right) dt = \frac{1}{2}$  nên mật độ năng lượng trung bình của sóng bằng:

$$\overline{\omega_0} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 \quad (5-32)$$

Để đặc trưng cho quá trình truyền năng lượng sóng cơ trong môi trường đàn hồi, người ta dùng một đại lượng vật lý gọi là *véc tơ Umôp – Poanhting*:

$$\vec{P} = \overline{\omega_0} \cdot \vec{v} \quad (5-33)$$

Véc tơ này hướng theo chiều của véc tơ vận tốc sóng  $\vec{v}$  và có trị số bằng năng lượng sóng trung bình truyền qua một đơn vị diện tích đặt vuông góc với phương truyền sóng sau mỗi đơn vị thời gian.

### 5.2.3. Sóng âm

#### a. Khái niệm

Sóng âm được định nghĩa tổng quát là những sóng dọc trong môi trường. Sóng âm có thể truyền qua chất khí, chất lỏng hay chất rắn.

Sóng âm đơn giản nhất là những sóng có dạng hình sin, có tần số, biên độ và bước sóng xác định. Tai người nhạy cảm đối với các sóng âm trong miền tần số từ 20Hz đến 20000Hz, gọi là miền nghe được. Các sóng âm có tần số nhỏ hơn 20Hz được gọi là *sóng hạ âm*. Các sóng âm có tần số lớn hơn 20000Hz được gọi là *sóng siêu âm*.

Thanh quản người có thể phát ra các âm có tần số nằm trong khoảng từ 50Hz đến 3500Hz. Trong không khí, ở nhiệt độ 15°C, vận tốc truyền âm khoảng 340m/s. Như vậy sóng âm trong không khí có bước sóng từ 1,7cm đến 17m.

#### b. Các đại lượng đặc trưng sinh lý của âm

Tai người có thể phân biệt được ba đặc tính sinh lý của âm, đó là: độ cao, âm sắc, độ to.

*Độ cao của âm*: là cảm giác thanh trầm của tai đối với sóng âm. Độ cao của âm phụ thuộc vào tần số của âm. Tần số lớn thì âm nghe càng cao (càng thanh), tần số càng thấp thì âm nghe càng trầm.

*Â m sắc*: Âm sắc của âm đặc trưng cho sắc thái của âm, giúp ta phân biệt được giọng nói của người này với người khác, hay âm phát ra từ nguồn này với nguồn khác. Ví dụ, âm la của đàn ghi ta khác với âm la của đàn măng-đô-lin, vì chúng có âm sắc khác nhau.

*Độ to của âm*: Để đặc trưng cho độ mạnh của âm người ta dùng hai đại lượng: Cường độ âm và mức cường độ âm.

Cường độ âm  $I$  có trị số bằng tốc độ trung bình mà sóng âm truyền năng lượng qua một đơn vị diện tích (mật độ năng thông trung bình của âm):

$$I = |\vec{P}| = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A^2 \quad (5-34)$$

Mức cường độ âm  $L$ : Vì tai người có thể nghe thấy trong một phạm vi rất rộng (tỉ lệ cường độ giữa âm mạnh nhất có thể chịu đựng được đến âm yếu nhất có thể ghi nhận

được là  $10^{12}$ ) nên người ta thường sử dụng một thang cường độ *logarit*. Mức cường độ âm  $L$  của sóng âm được định nghĩa bởi phương trình:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (dB) \quad (5-35)$$

Trong phương trình này  $I_0$  là cường độ mốc tiêu chuẩn, được chọn là  $10^{-12} \text{ (W/m}^2\text{)}$ , xấp xỉ ngưỡng nghe của người tại 1000Hz.

Mức cường độ âm được thể hiện theo công thức (5-35) có đơn vị là *đềxiben*, ký hiệu là *dB*. Một *đềxiben* bằng  $(1/10)\text{Ben}$ , đơn vị này do nhà phát minh ra điện thoại Alexander Garaham Bell đặt. Ben có giá trị rất lớn nên để thuận tiện người ta hay dùng đơn vị *đềxiben*.

Ví dụ sau cho thấy mức cường độ âm theo *đềxiben* của những âm thông thường:

Nguồn âm	Mức cường độ âm $L \text{ (dB)}$	Cường độ âm $I$
Ngưỡng đau	120	1
Giao thông đường phố tan tằm	70	$10^{-5}$
Nói chuyện bình thường	65	$3,2 \cdot 10^{-6}$
Tiếng xe ô tô yên tĩnh	50	$10^{-7}$
Tiếng radio trong nhà	40	$10^{-8}$
Tiếng nói thầm trung bình	20	$10^{-10}$
Ngưỡng nghe ở 1000Hz	0	$10^{-12}$

#### 5.2.4. Giao thoa sóng - sóng dừng

##### a. Giao thoa sóng

Giao thoa sóng là hiện tượng giao nhau của hai hay nhiều sóng kết hợp tại một miền nào đó trong môi trường đàn hồi.

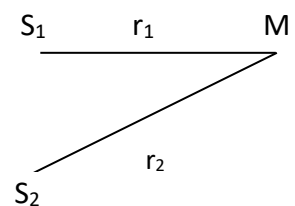
Hai sóng kết hợp là hai sóng có cùng tần số và có hiệu pha không đổi theo thời gian. Khi đó trong miền giao thoa sẽ xuất hiện những điểm dao động mạnh nhất, gọi là các cực đại giao thoa nằm xen giữa những điểm dao động yếu nhất gọi là các cực tiểu giao thoa.

Giả sử có hai nguồn sóng  $S_1$  và  $S_2$  phát ra hai sóng cùng phương, cùng tần số, có pha ban đầu bằng không cùng truyền tới điểm M cách  $S_1$  và  $S_2$  các khoảng  $r_1$  và  $r_2$ .

Sóng do  $S_1$  và  $S_2$  truyền tới M có dạng:

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t - 2\pi \frac{r_1}{\lambda})$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega t - 2\pi \frac{r_2}{\lambda})$$



Hình 5-9

Sóng tổng hợp tại M cũng cùng phương cùng tần số với

sóng tại nguồn và có dạng:

$$x = x_1 + x_2 = A \cos(\omega t + \varphi)$$

với A là biên độ sóng tổng hợp tại M:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (5-36)$$

trong đó:  $\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}$

- Nếu  $\varphi_1 - \varphi_2 = 2k\pi$  với  $k = 0, 1, 2, \dots$

hay những điểm thỏa mãn điều kiện:  $r_2 - r_1 = k\lambda$  (5-37)

thì tại đó có cực đại. Biên độ sóng tổng hợp tại các điểm đó luôn bằng:

$$A = A_{\max} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2} = A_1 + A_2 \quad (5-38)$$

- Nếu  $\varphi_1 - \varphi_2 = (2k + 1)\pi$  với  $k = 0, 1, 2, \dots$

hay những điểm thỏa mãn điều kiện:  $r_2 - r_1 = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$  (5-39)

thì tại đó có cực tiểu. Biên độ sóng tổng hợp tại các điểm đó luôn bằng:

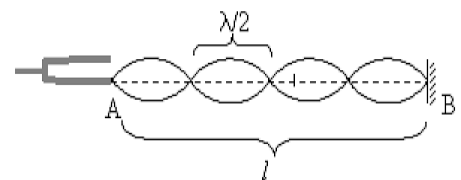
$$A = A_{\min} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2} = |A_1 - A_2| \quad (5-40)$$

Như vậy, hiện tượng giao thoa của hai sóng chỉ xảy ra khi hai sóng được phát đi từ hai nguồn dao động cùng tần số và có hiệu pha ban đầu không thay đổi theo thời gian (hai nguồn kết hợp).

### b. Sóng dừng

- Sóng dừng là hiện tượng giao thoa của hai sóng phẳng có cùng biên độ và tần số, truyền ngược chiều nhau theo cùng một phương y.

Có thể tạo ra sóng dừng trên sợi dây như sau: sợi dây mềm và mảnh có đầu B cố định, đầu A được kích thích dao động bởi một bộ rung điện từ. Sóng từ đầu A truyền tới B, rồi bị phản xạ truyền ngược trở lại. Sóng tới và sóng phản xạ giao thoa nhau tại mọi điểm trên sợi dây. Kết quả, trên sợi dây ta sẽ quan sát thấy một sóng dừng ổn định gồm các *nút sóng* và các *bụng sóng* nằm xen kẽ, cách đều nhau (hình 5-10).

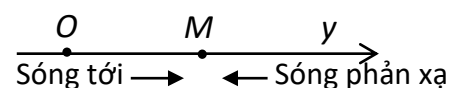


Hình 5-10

Giả sử tại O hai sóng đồng pha, sóng tới từ O truyền theo chiều dương của trục Oy đến điểm M cách O một khoảng bằng y sẽ gây ra một dao động:

$$x_1 = A_0 \cos(\omega t - 2\pi \frac{y}{\lambda})$$

Sóng phản xạ truyền theo chiều âm của trục Oy, khi tới M sẽ gây ra một dao động:



Hình 5-10

$$x_2 = A_0 \cos(\omega t + 2\pi \frac{y}{\lambda})$$

Sóng tổng hợp tại M có dạng:

$$x = x_1 + x_2 = 2A_0 \cos \frac{2\pi y}{\lambda} \cos \frac{2\pi t}{\lambda} \quad (5-41)$$

Phương trình (5-41) gọi là phương trình sóng dừng, trong đó biên độ sóng dừng là:

$$A = \left| 2A_0 \cos \frac{2\pi y}{\lambda} \right| \quad (5-42)$$

Theo (5-42), độ lớn của biên độ A phụ thuộc vào vị trí của điểm M nằm trên phương truyền sóng.

- Những điểm thỏa mãn điều kiện  $\frac{2\pi y}{\lambda} = k\pi$  hay:  $y = k \frac{\lambda}{2}$  với  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  sẽ có biên độ cực đại  $A_{\max} = 2A_0$ : đó là các *bụng sóng*.

- Những điểm thỏa mãn điều kiện  $\frac{2\pi y}{\lambda} = (2k+1) \frac{\pi}{2}$  hay:  $y = (2k+1) \frac{\lambda}{4}$  với  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  sẽ có biên độ cực đại  $A_{\min} = 0$ : đó là các *nút sóng*.

Kết quả cho thấy các vị trí nút sóng và bụng sóng hoàn toàn cố định; khoảng cách giữa hai bụng sóng kế tiếp hoặc giữa hai nút sóng kế tiếp bằng nửa bước sóng ( $\lambda/2$ ), còn khoảng cách giữa một nút sóng đến một bụng sóng liền kề bằng  $\lambda/4$ .

### 5.2.5. Hiệu ứng Dopple

Trong thực tế, có thể ta đã thấy một hiện tượng như sau: khi một chiếc ô tô tiến lại gần người quan sát với một tiếng còi phát ra âm thanh, độ cao của nó dường như tăng lên, và yếu đi khi chiếc xe đi ra xa người quan sát. Hiện tượng này được mô tả năm 1842 bởi nhà khoa học người Áo Christian Dopple, gọi là Hiệu ứng Dopple: *Hiện tượng tần số của sóng âm bị thay đổi khi nguồn phát chuyển động tương đối so với người quan sát gọi là hiệu ứng Dopple*. Hiện tượng này cũng xảy ra tương tự đối với những sóng điện từ, bao gồm sóng cực ngắn, sóng vô tuyến và ánh sáng khả kiến.

Để phân tích hiệu ứng Dopple về âm, chúng ta sẽ tính toán mối quan hệ giữa độ dịch chuyển tần số và các vận tốc của nguồn và máy thu đối với môi trường mà sóng âm truyền qua (thường là không khí). Để đơn giản ta xét trường hợp vận tốc của nguồn âm và máy thu cùng phương. Gọi  $\vec{v}_s$  và  $\vec{v}_L$  là vận tốc của nguồn và của máy thu, gọi  $\vec{v}$  là vận tốc truyền âm. Chọn chiều dương là chiều truyền sóng âm (tức là  $v$  luôn dương).

#### a. Máy thu chuyển động, nguồn đứng yên

- Trường hợp máy thu M (chẳng hạn là tai người) chuyển động lại gần nguồn S đứng yên: nguồn phát ra sóng âm có tần số  $f_s$  và bước sóng  $\lambda = v / f_s$ . Các đỉnh sóng do nguồn phát ra lan truyền với tốc độ  $v + v_L$  đối với máy thu, vì vậy, máy thu nhận được sóng có tần số là:



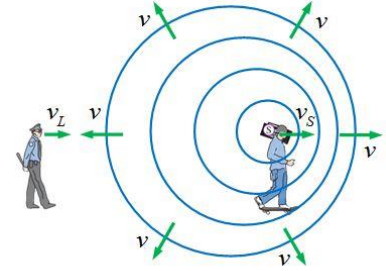
$$f' = \frac{v+v_L}{\lambda} = \frac{v+v_L}{v} f_s > f_s \quad (5-43)$$

- Tương tự, nếu máy thu chuyển động ra xa nguồn âm thì:  $f' = \frac{v-v_L}{v} f_s < f_s$

Vậy, khi người nghe chuyển động về phía nguồn thì nghe thấy âm có tần số cao hơn so với trường hợp người nghe đứng yên. Như vậy, khi người nghe chuyển động ra xa nguồn âm thì nghe thấy tần số âm thấp hơn.

### **b. Nguồn chuyển động, máy thu chuyển động**

Giả sử nguồn và máy thu chuyển động cùng hướng. Tốc độ truyền sóng vẫn là  $v$  nhưng bước sóng không bằng  $v/f_s$ . Trong một chu kỳ truyền sóng ( $T=1/f_s$ ), sóng đi được một quãng đường  $vT=v/f_s$  và nguồn dịch chuyển được quãng đường là  $v_s T=v_s/f_s$ . Bước sóng là khoảng cách giữa hai đỉnh sóng liên tiếp, và nó được xác định bởi độ dịch chuyển *tương đối* của nguồn sóng và sóng. Tuy nhiên có sự khác nhau về bước sóng giữa phía trước và phía sau nguồn. Ta xét trường hợp nguồn và máy thu chuyển động cùng hướng (hình 5-12).



Hình 5-12

Trong vùng phía trước của một nguồn chuyển động, bước sóng là:

$$\lambda = \frac{v}{f_s} - \frac{v_s}{f_s} = \frac{v-v_s}{f_s} \quad (*)$$

Trong vùng phía sau của một nguồn chuyển động, bước sóng là:

$$\lambda = \frac{v}{f_s} + \frac{v_s}{f_s} = \frac{v+v_s}{f_s} \quad (**)$$

Thay (\*) và (\*\*) vào (5-41) ta tìm được tần số mà máy thu thu được khi nguồn và máy thu cùng chuyển động:

$$f' = \frac{v+v_L}{\lambda} = \frac{v+v_L}{v-v_s} f_s \quad (\text{máy thu ở phía trước nguồn}) \quad (5-44)$$

$$f' = \frac{v+v_L}{\lambda} = \frac{v+v_L}{v+v_s} f_s \quad (\text{máy thu ở phía sau nguồn}) \quad (5-45)$$

### **c. Hiệu ứng Dopple về sóng điện từ**

Trong hiệu ứng Dopple về âm thanh, các vận tốc  $v_L, v_s$  luôn luôn được đo tương đối đối với không khí hoặc trong môi trường ta đang nghiên cứu. Cũng có hiệu ứng Dopple về sóng điện từ trong không gian trống rỗng, như sóng ánh sáng hoặc sóng vô tuyến.

Theo thuyết tương đối, tốc độ sóng là tốc độ ánh sáng  $c$ , và nó giống nhau đối với cả nguồn và máy thu. Xét một trường hợp là máy thu đứng yên còn nguồn thì chuyển

động ra xa máy thu với vận tốc là  $v_s$ . Nguồn phát ra sóng có tần số  $f_s$ , máy thu nhận được sóng đó nhưng có tần số là  $f'$  cho bởi:

$$f' = \sqrt{\frac{c - v_s}{c + v_s}} \cdot f_s \quad (5-46)$$

Khi nguồn chuyển động thẳng ra xa máy thu thì quy ước  $v$  dương do đó  $f' < f$ , khi nguồn chuyển động thẳng vào gần máy thu thì  $v$  âm do đó  $f' > f$ .

Biểu thức (5-46) là biểu thức hiệu ứng Dopple về ánh sáng.

Một ứng dụng quan trọng của hiệu ứng Dopple đối với sóng vô tuyến là thiết bị Rada được gắn ở phía trên của xe cảnh sát để kiểm tra tốc độ của các xe khác. Sóng điện từ được phát ra bởi thiết bị bị dội lại từ một xe chuyển động, sóng dội ngược trở lại thiết bị có tần số bị thay đổi theo hiệu ứng Dopple. Việc truyền và dội lại của tín hiệu được liên kết để tạo ra các nhịp, từ đó tính toán được tốc độ xe chạy, tốc độ này được hiển thị cho người điều khiển nhìn thấy.

Hiệu ứng Dopple được sử dụng để quan sát vệ tinh, tên lửa và những phương tiện không gian khác. Trong thiên văn học, hiệu ứng Dopple về sóng điện từ, bao gồm cả ánh sáng thấy được là rất quan trọng. Nhà thiên văn học so sánh bước sóng của ánh sáng từ các ngôi sao với ánh sáng phát ra bởi các nguyên tố tương tự trên trái đất. Từ việc ước tính về sự thay đổi tần số, sẽ đưa ra những thông tin về quỹ đạo và khối lượng các ngôi sao.

## CÂU HỎI THẢO LUẬN CHƯƠNG 5

**H1.** Giả sử khối lượng của quả lắc đồng hồ tăng lên gấp đôi trong khi ta vẫn giữ nguyên kích thước của nó thì đồng hồ quả lắc sẽ chạy nhanh hơn hay chậm hơn? (xét hai trường hợp: khối lượng thanh treo không đáng kể và khối lượng thanh treo đáng kể).

**H2.** Một tàu lượn dao động điều hòa trên đệm không khí với biên độ  $A$ . Nếu ta làm dao động của nó chậm lại và biên độ giảm đi một nửa. Khi đó mỗi đại lượng sau đây bị ảnh hưởng thế nào: chu kì, tần số và tần số góc, cơ năng toàn phần, tốc độ cực đại, gia tốc cực đại, thế năng và động năng tại  $x = \pm A/4$ ?

**H3.** Tại sao các phương tiện làm tắt dần thường được dùng trong chế tạo máy? cho ví dụ.

**H4.** Khi thiết kế các công trình xây dựng trên những vùng có động đất xảy ra, tần số dao động riêng của trái đất liên quan thế nào tới tần số dao động của các công trình? Tại sao? Tần số dao động của các công trình nên lớn hơn hay nhỏ hơn giới hạn tắt dần?

**H5.** Khi sóng truyền xuôi theo một sợi dây bị kéo căng, biên độ sóng có bị giảm không? điều gì sẽ xảy ra với năng lượng sóng?

**H6.** Khi hai sóng giao thoa nhau, có sự hao hụt năng lượng không?

**H7.** Nếu hai sóng chỉ khác nhau về biên độ và đi ngược chiều nhau qua một môi trường thì chúng có tạo ra sóng dừng không? Năng lượng có được truyền đi không? có nút dao động không?

## ÔN TẬP CHƯƠNG 5

### A- Mục đích, yêu cầu

1. Nắm được định nghĩa dao động cơ và điều kiện để một hệ có thể dao động cơ.
2. Nắm được phương trình dao động điều hòa cho ba trường hợp: Dao động cơ điều hòa, dao động cơ tắt dần, dao động cơ cưỡng bức. Nắm được hiện tượng cộng hưởng cơ.
3. Nắm được bản chất sóng cơ và các đặc trưng của nó.
4. Thiết lập được phương trình sóng cơ. Vận dụng để tính được biên độ dao động tổng hợp trong sự giao thoa các sóng kết hợp.

### B - Câu hỏi ôn tập nội dung trọng tâm lý thuyết

1. Định nghĩa dao động cơ. Nêu điều kiện để một hệ có thể dao động cơ.
2. Viết phương trình dao động cơ điều hòa. Biểu thức tính chu kỳ riêng của con lắc lò xo, con lắc đơn, con lắc vật lý. Biểu thức năng lượng dao động cơ điều hòa.
3. Viết phương trình dao động cơ tắt dần. Nêu ý nghĩa của giảm lượng lôga trong dao động cơ tắt dần.
4. Viết phương trình dao động cơ cưỡng bức. Nhận xét sự phụ thuộc của  $A$ ,  $\varphi$  vào tần số  $\Omega$  của ngoại lực kích thích.
5. Hiện tượng cộng hưởng cơ là gì. Nêu điều kiện để có cộng hưởng cơ. Nêu đặc điểm của họ đường cong cộng hưởng. Nêu tác dụng và tác hại của hiện tượng cộng hưởng cơ trong kỹ thuật và đời sống.
6. Tổng hợp hai dao động điều hòa cùng phương cùng tần số.
7. Trình bày sự tạo thành sóng cơ trong môi trường đàn hồi. Nêu những tính chất và những đại lượng đặc trưng cho sóng cơ.
8. Thiết lập phương trình sóng cơ. Viết biểu thức mật độ năng lượng trung bình của sóng cơ.
9. Hiện tượng giao thoa sóng là gì? Nêu các điều kiện về hiệu pha  $\Delta\varphi$  để có được biên độ sóng tổng hợp là cực đại hoặc cực tiểu.
10. Thế nào là sóng dừng? Viết biểu thức biên độ sóng dừng và biểu thức xác định vị trí có biên độ sóng cực đại, cực tiểu.
11. Hiệu ứng Dopple là gì? Viết biểu thức tính tần số thu được trong các trường hợp: Nguồn dịch chuyển, máy thu dịch chuyển, cả nguồn và máy thu đó dịch chuyển. Nêu nhận xét. Nêu một số ứng dụng của hiệu ứng Dopple.

## BÀI TẬP CHƯƠNG 5

### A. BÀI TẬP THÍ DỤ

**Bài tập 1:** Một con lắc lò xo gồm một quả cầu nhỏ khối lượng 10g treo vào đầu một lò xo gắn cố định vào một giá đỡ. Con lắc dao động điều hòa không vận tốc ban đầu với biên độ 50mm. Tại thời điểm ban đầu quả cầu đi qua vị trí có li độ 25mm, theo chiều âm của trục tọa độ. Biết rằng cứ mỗi phút con lắc lại thực hiện được 150 dao động.

- Viết phương trình dao động, phương trình vận tốc và gia tốc.
- Tính năng lượng của con lắc.
- Tính trị số lớn nhất của lực kéo về tác dụng lên quả nặng và trị số lớn nhất của lực đàn hồi của lò xo.

*Hướng dẫn giải:*

Chọn trục Ox theo phương thẳng đứng, gốc O tại vị trí cân bằng, chiều dương hướng xuống dưới. Chọn gốc thời gian lúc quả cầu bắt đầu dao động.

- Phương trình dao động của quả cầu có dạng:  $x = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$

Theo đề, biên độ dao động là:  $A = 50\text{mm} = 5\text{ cm}$

$$\text{Tại } t = 0 \text{ thì } x = 2,5\text{ cm và } v < 0, \text{ do đó } \begin{cases} \cos \varphi = \frac{1}{2} \\ \sin \varphi > 0 \end{cases} \Rightarrow \text{pha ban đầu: } \varphi = \frac{\pi}{6}$$

$$\text{Chu kỳ dao động: } T = \frac{\Delta t}{N} = \frac{60}{150} = 0,4(\text{s})$$

$$\text{Suy ra tần số góc của dao động: } \omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0,4} = 5\pi (\text{rad/s})$$

$$\text{Vậy, phương trình dao động của quả cầu là: } x = 5 \cos(5\pi t + \frac{\pi}{6}) (\text{cm})$$

$$\text{Phương trình vận tốc: } v = x' = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) = -25\pi \sin(5\pi t + \frac{\pi}{6}) (\text{cm/s})$$

$$\text{Phương trình gia tốc: } a = v' = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi) = -125\pi^2 \cos(5\pi t + \frac{\pi}{6}) (\text{cm/s}^2)$$

$$\text{b. Hệ số đàn hồi của lò xo là: } k = m\omega_0^2 = 0,01 \cdot (5\pi)^2 = 2,465 (\text{N/m})$$

$$\text{Năng lượng của con lắc: } W = \frac{1}{2} kA^2 = \frac{1}{2} \cdot 2,465 \cdot (0,05)^2 = 3 \cdot 10^{-3} (\text{J})$$

$$\text{c. Biểu thức của lực kéo về: } F = m \cdot a = -m \cdot \omega_0^2 x = -kx$$

$$\text{Trị số lớn nhất của lực kéo về là: } |F|_{\max} = k |x|_{\max} = kA = 2,465 \cdot 0,05 \approx 0,123 (\text{N})$$

$$\text{Biểu thức của lực đàn hồi của lò xo là: } F_{dh} = -k(\Delta l + x)$$

với  $\Delta l$  là độ giãn ban đầu của lò xo. Từ vị trí cân bằng của quả cầu, ta có:  $P - F_{dh} = 0$

suy ra: 
$$\Delta l = \frac{mg}{k} = \frac{0,01 \cdot 9,8}{2,465} \approx 0,04 \text{ (m)}$$

Vậy, trị số cực đại của lực kéo về tác dụng lên quả cầu:

$$|F_{dh}|_{\max} = k(\Delta l + |x|_{\max}) = k(\Delta l + A) = 2,465 \cdot (0,04 + 0,05) \approx 0,22 \text{ (N)}$$

**Bài tập 2:** Một con lắc đơn có độ dài 1m dao động tắt dần. Cứ sau mỗi phút, biên độ của nó lại giảm đi một nửa. Lấy gia tốc trọng trường  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ . Hãy xác định:

- Hệ số tắt dần và giảm lượng loga của dao động tắt dần.
- Số phần trăm năng lượng dao động bị giảm sau mỗi phút.

*Hướng dẫn giải:*

Ta có: 
$$\frac{A_{t+\Delta t}}{A_t} = \frac{A_0 e^{-\beta(t+\Delta t)}}{A_0 e^{-\beta t}} = e^{-\beta \Delta t} = \frac{1}{2}$$

Hệ số tắt dần: 
$$\beta = \frac{\ln 2}{\Delta t} = \frac{0,693}{60} = 0,01155$$

Tần số góc riêng: 
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}} = \sqrt{\frac{9,8}{1}} = 3,13 \text{ (rad/s)}$$

Chu kỳ dao động: 
$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{3,13^2 - (11,55 \cdot 10^{-3})^2}} \approx 2 \text{ (s)}$$

Giảm lượng loga: 
$$\delta = \beta T = 11,55 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 23,1 \cdot 10^{-3}$$

Năng lượng dao động tỉ lệ với bình phương biên độ:

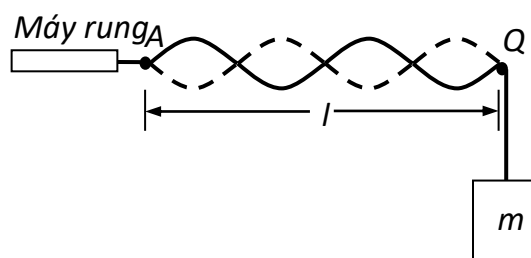
$$\frac{W_{t+\Delta t}}{W_t} = \left( \frac{A_0 e^{-\beta(t+\Delta t)}}{A_0 e^{-\beta t}} \right)^2 = \left( e^{-\beta \Delta t} \right)^2 = e^{-2\beta \Delta t}$$

Số % năng lượng giảm đi sau thời gian 1 phút:

$$n = 1 - \frac{W_{t+\Delta t}}{W_t} = 1 - e^{-2\beta \Delta t} = 1 - e^{-2 \cdot 11,55 \cdot 60} = 0,75$$

**Bài tập 3:** Một sợi dây buộc vào một máy rung tại A và vắt qua một giá đỡ B được căng bằng một vật nặng có khối lượng m (Hình 5-12). Khoảng cách  $l$  giữa A và B là 1,2m, mật độ dài của dây là 1,6g/m và tần số  $f$  của máy rung được giữ không đổi là 120Hz. Biên độ chuyển động tại A là đủ nhỏ để có thể coi điểm đó là một nút. Tại B cũng là một nút. Biết tốc độ  $v$  của sóng trên dây được cho bởi biểu thức:  $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$  với  $F$  là lực căng sợi dây,  $\mu$  là mật độ dài của dây. Hỏi với khối lượng m nào thì trên dây có 4 bụng sóng?

*Hướng dẫn giải:*



Điều kiện để có sóng dừng trên sợi dây có hai đầu cố định là:  $l = k \frac{\lambda}{2} = k \frac{v}{2f}$

với  $k = 1, 2, 3, \dots$  và  $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{mg}{\mu}}$

Vậy, để trên dây có 4 bụng sóng, ứng với  $k = 4$  thì khối lượng của dây phải là:

$$m = \frac{4l^2 f^2 \mu}{k^2 g} = \frac{4 \cdot (1,2)^2 (120)^2 (1,6 \cdot 10^{-3})}{4^2 \cdot 9,8} = 0,846 \text{ (kg)}$$