書名: Serway's Essentials of College Physics (2007年出版) (第1版)
作者: Serway / Vuille
代理書局: 滄海書局 TEL.:(04)22088787

Chap. 14 Sound

§14.3 The Speed of Sound

If the liquid has a bulk modulus B and an equilibrium density ρ, the speed of sound is

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \qquad B \equiv -\frac{\Delta P \text{ (change in pressure)}}{\Delta V / V}$$

(the speed of a sound wave in a liquid)

In fact, the speed of all ~~most~~ machanical waves follows an expression of the general form

$$v = \sqrt{\frac{\text{elastic property}}{\text{inertial property}}}$$

The speed of a longitudinal wave in a solid rod, which is

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

For sound traveling through air, the relationship between the speed of sound and temperature is

$$v = (331\ \tfrac{m}{s})\sqrt{\frac{T}{273°K}}$$

where $331\ \frac{m}{s}$ is the speed of sound in air at 0°C and T is the absolute (Kelvin) temperature.

Example 14.1

§14.4 Energy and Intensity of Sound Waves

定義: Intensity 強度 $I \equiv \frac{1}{A\text{(面積)}} \cdot \frac{\Delta E \text{ (energy)}}{\Delta t \text{ (時間)}}$

$$I \equiv \frac{1}{A} \cdot P = \frac{P\text{(功率)}}{A}$$

threshold of hearing: $1 \times 10^{-12}\ W/m^2 = I_0$

定義: intensity level (or decibel level) $\beta \equiv 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$

Example 14.2

§14.5 Spherical and Plane Waves

Intensity $I = \frac{\text{average power}}{\text{area}} = \frac{P_{av}}{A} = \frac{P_{av}}{4\pi r^2}$

Example 14.3

§14.6 The Doppler Effect 都卜勒效應

(1) 觀察者移向固定的聲源

聲源(source)　　觀察者(observer)

$\xleftarrow{v_o}$

(Fig 14.8)

$$f' = f + \frac{v_o}{\lambda} = f\left(1 + \frac{v_o}{v}\right) = f\left(\frac{v + v_o}{v}\right)$$

其中 v_o：觀察者靠近聲源的速度

v：聲音傳播速率(在空氣中)

(2) 觀察者遠離固定的聲源

聲源　　觀察者 $\xrightarrow{v_o}$

(Fig 14.9)

$$f' = f - \frac{v_o}{\lambda} = f\left(1 - \frac{v_o}{v}\right)$$

其中 v_o：觀察者遠離聲源的速度

v：聲音傳播速率(在空氣中)

(3) 觀察者固定，聲源移動靠近觀察者.

聲源　　觀察者

原來 λ

觀察者

聲源移動距離 $= v_s T$　　後來 λ'

(Fig 14.10)

$$\lambda' = \lambda - v_s T \quad (\lambda > \lambda')$$

$$\text{原本頻率 } f = \frac{v\text{(聲音在空氣中傳播速率)}}{\lambda\text{(原來波長)}}$$

$$\text{後來頻率 } f' = \frac{v\text{(聲音在空氣中傳播速率)}}{\lambda'\text{(後來波長)}}$$

$\because \lambda' < \lambda \quad \therefore f' > f$

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - v_s T} = \frac{\frac{v}{\lambda}}{\frac{\lambda}{\lambda} - \frac{v_s T}{\lambda}} = \frac{f}{1 - \frac{v_s}{f\lambda}} = \frac{f}{1 - \frac{v_s}{v}}$$

$$= f\left[\frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}}\right]$$

其中 v_s：聲源移動速率(即聲源靠近觀察者之速率)

v：聲音在空氣中傳播速率

(4) 觀察者固定，聲源遠離靜止的觀察者.

$$\lambda' = \lambda + v_s T \quad (\lambda' > \lambda)$$

同理可得 $f' = f\left[\frac{1}{1 + \frac{v_s}{v}}\right]$

其中 v_s：聲源移動速率(即聲源遠離觀察者之速率)

v：聲音在空氣中傳播速率

綜合：(一般狀況若兩者均移動)

則 $f' = f\left[\frac{1 \pm \frac{v_o}{v}}{1 \mp \frac{v_s}{v}}\right]$

observer 靠近(+) 遠離(−) 固定的 source.

source 靠近(−) 遠離(+) 固定的 observer.

v_o：觀察者移動的速率

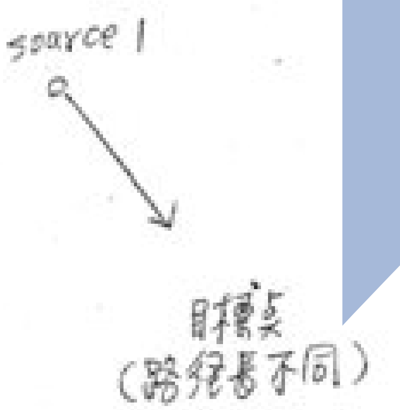
v_s：聲源移動的速率

v：聲音傳播速率

Example 14.4

§14.7 Interference of Sound Waves 聲波的干涉

建設性的干涉又稱為加強性干涉
破壞性的干涉又稱為抵消性干涉
當兩波相遇時，若為完全地同相 (exactly in phase) 則會產生建設性干涉 (例：波峰遇到波峰或波谷遇到波谷)
當兩波相遇時，若為完全地反相 (exactly out of phase) 則會產生破壞性干涉 (例：波峰遇到波谷)

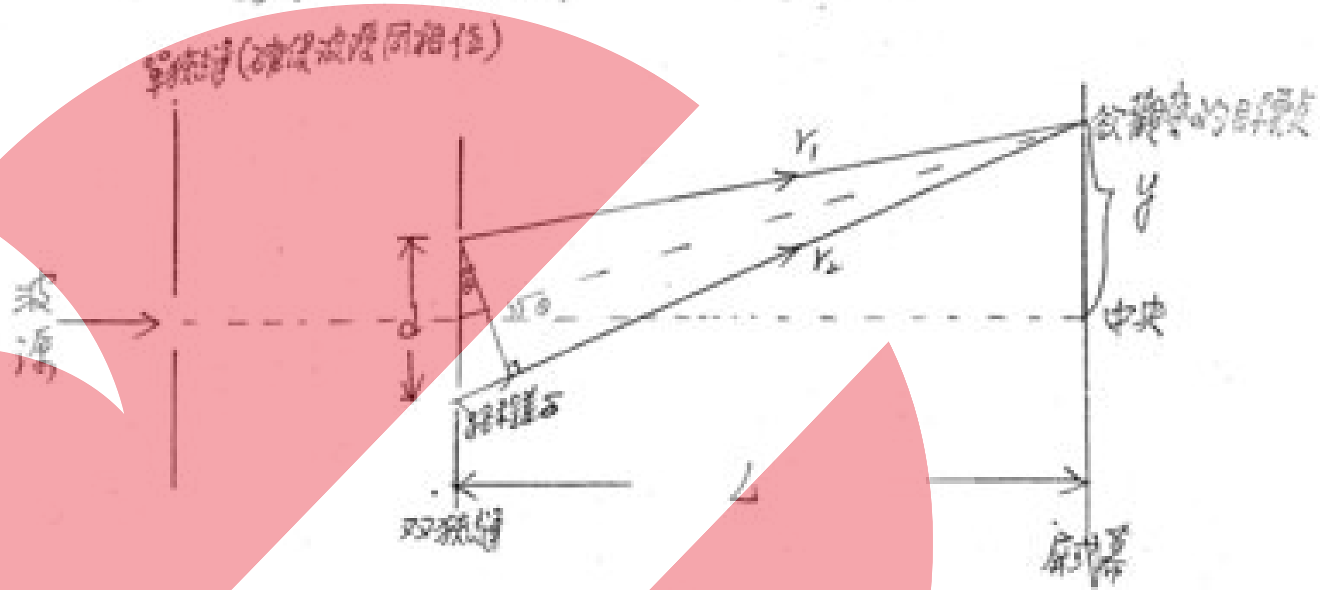


同相的兩波當路程差(路徑差)為波長之整數倍時，$\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \cdots$
則形成建設性干涉 (constructive interference).
若路程差(路徑差)為半波長的奇數倍時，則形成破壞性干涉.
$\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \cdots$
(destructive interference)

※ 若我們知道路徑差多少，則可由建設性干涉或破壞性干涉推得波長大小。反之，由路徑差多少計算它是波長的整數倍或半波長的奇數倍，即可得知是建設性干涉或破壞性干涉。

Example 14.5

§24.2 Young's Double-Slit Experiment 楊氏 雙狹縫



其中 d：雙狹縫寬度
L：雙狹縫與屏距離
δ：路程差 (path difference)
y：欲觀察的目標點到屏中央的距離

由圖得知：$\delta = r_2 - r_1 = d\sin\theta$

又由干涉原理得知：若 $\delta = m\lambda$ (波為整數倍) $(m = 0, 1, 2, 3, \cdots)$
則為建設性干涉(加強性干涉)(出現亮紋(線))
若 $\delta = (m+\frac{1}{2})\lambda$ (半波為奇數倍) $(m = 0, 1, 2, 3, \cdots)$
[或 $\delta = (m-\frac{1}{2})\lambda$，$(m = 1, 2, 3, \cdots)$]
則為破壞性干涉(抵消性干涉)(出現暗紋(線))

∴ 若為建設性則 $\delta = d\sin\theta = m\lambda \Rightarrow \sin\theta = \frac{m\lambda}{d}$
若為破壞性則 $\delta = d\sin\theta = (m+\frac{1}{2})\lambda \Rightarrow \sin\theta = \frac{(m+\frac{1}{2})\lambda}{d}$

θ 很小 ∴ $\theta \doteqdot \sin\theta \doteqdot \tan\theta$

又由圖中得知：$\begin{cases} \sin\theta = \frac{\delta}{d} \\ \tan\theta = \frac{y}{L} \end{cases}$ ∴ $\frac{\delta}{d} \doteqdot \frac{y}{L}$

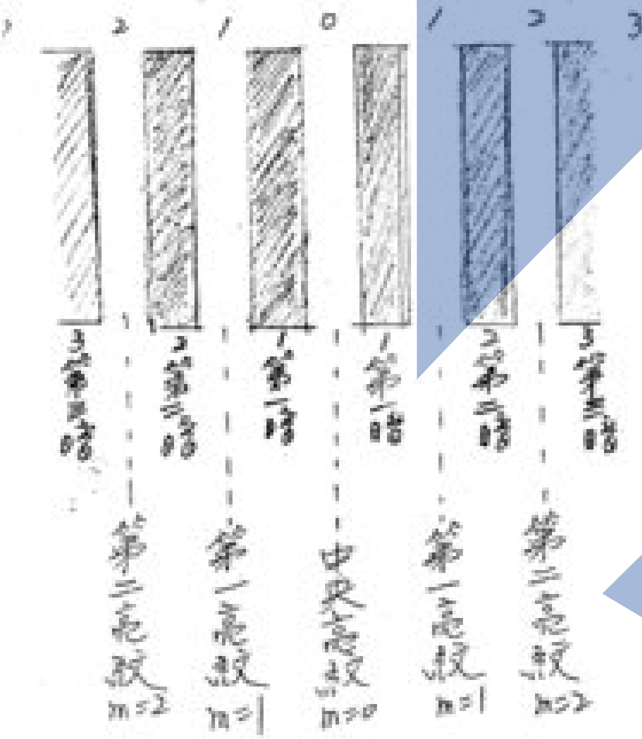
∴ $\delta = \frac{d \times y}{L}$

若為建設性 則 $\frac{d \times y}{L} = m\lambda$ $(m = 0, 1, 2, 3, \cdots)$

若為破壞性 則 $\frac{d \times y}{L} = (m + \frac{1}{2})\lambda$ $(m = 0, 1, 2, \cdots)$

[或 $\frac{d \times y}{L} = (m - \frac{1}{2})\lambda$ $(m = 1, 2, 3, \cdots)$]

(P.628 Fig 24.1)



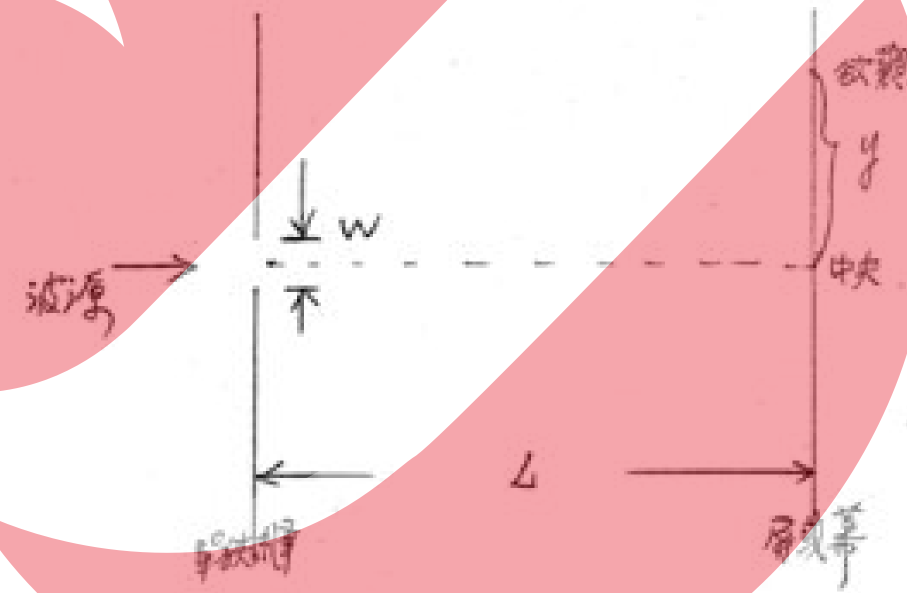
Example 24.1

§ 24.6 Diffraction 繞射

§ 24.7 Single-Slit Diffraction 單狹縫繞射

單狹縫繞射 $\sin\theta = \frac{\lambda}{a}$ 其中 λ：波長
a：單狹縫寬度

圓形開口繞射 $\sin\theta = 1.22\frac{\lambda}{D}$ 其中 λ：波長
D：圓形開口直徑



設 y_m：第 m 條亮線到中央線的距離 (m 為正整數)

y_n：第 n 條暗線到中央線的距離 (n 為正整數)

L：單狹縫到屏的距離

w：單狹縫寬度 (= D 或 = d 或 = a)

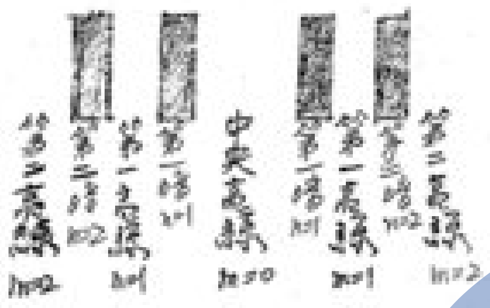
則 (1) 當 $\sin\theta = \frac{n\lambda}{w}$ 時為破壞性干涉(暗紋)

$\therefore \frac{y_n}{L} = \frac{n\lambda}{w}$ $\therefore y_n = \frac{n\lambda L}{w}$

(2) 當 $\sin\theta = \frac{(m+\frac{1}{2})\lambda}{w}$ 時為建設性干涉(亮紋)

$\therefore \frac{y_m}{L} = \frac{(m+\frac{1}{2})\lambda}{w}$ $\therefore y_m = \frac{(m+\frac{1}{2})\lambda L}{w}$

(P.637 Fig 24.14) (單狹縫繞射實驗)



§14.8 Standing Waves 駐波

(P.369 Fig 14.15)

結論：① 繩長(弦長) L 必須為半波長的整數倍。

$L = \frac{\lambda}{2}$ (圖b), $\frac{2\lambda}{2}$ (圖c), $\frac{3\lambda}{2}$ (圖d), ……

② 相鄰兩腹點之距離為波長的一半。

③ Fig 14.15 是屬於兩端點為閉口的橫向駐波。
(駐波也是一種干涉的現象)

第一諧音稱為 1st harmonic 或 fundamental 基頻

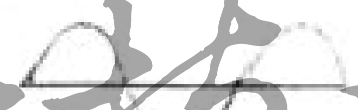
繩長(弦長) $L = \frac{\lambda_1}{2}$
頻率 f_1

第二諧音稱為 2nd harmonic 或 1st overtone 第一泛音

繩長(弦長) $L = \lambda_2$
頻率 $f_2 = 2f_1$

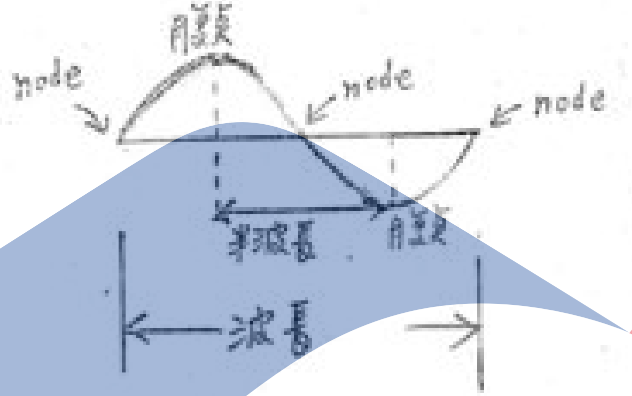
第三諧音稱為 3rd harmonic 或 2nd overtone 第二泛音

繩長(弦長) $L = \frac{3}{2}\lambda_3$
頻率 $f_3 = 3f_1$



(註):
腹點 (antinode) — 位移最大
節點 (node) — 位移 = 0

駐波 (standing wave):
某些部份維持靜止不動，且看起來不會前進的波；是入射波和其反射波發生干涉的結果。



弦長(繩長)與波長之關係式可以表成：$L = \frac{n\lambda_n}{2}$

$\therefore \boxed{\lambda_n = \frac{2L}{n}}$ $(n = 1, 2, 3, \cdots)$

由 v(波速) $= f\lambda$ $\therefore f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L}$ $(n = 1, 2, 3, \cdots)$

$(f_n = nf_1 = n\frac{v}{2L})$

又 $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ $\therefore \boxed{f_n = nf_1 = n\frac{v}{2L} = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}}}$

(註：此公式適用於兩端為閉口(節點)的駐波)

Example 14.7

§14.10 Standing (駐) Waves (波) in Air Columns (空氣柱)

(A) 兩端開口的管子

管長必須為半波長的整數倍。 (由 Fig 14.19 (a) 可看出)

$L = \frac{\lambda}{2}, \frac{2\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \cdots$ [即 $L = n \times (\frac{1}{2}\lambda_n)$]

$f_n = n\left(\frac{v}{2L}\right)$ $(n = 1, 2, 3, 4, \cdots)$

(B) 一端開口，一端閉合的管子

管長必須為四分之一波長的奇數倍。(由 Fig. 14.19 (b) 可看出)

$L = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \cdots$ [即 $L = n \times (\frac{1}{4}\lambda_n)$, $n = 1, 3, 5, \cdots$]

$f_n = n\left(\frac{v}{4L}\right)$ $(n = 1, 3, 5, \cdots)$

(註：開口端為腹點 A，閉口端為節點 N)(腹點又稱為反節點)

Example 14.8