

今

日

物

理



NOT FOR SALE



Longman 朗文

Complimentary
Copy

麥

思

源

2

第一章 波動



- 波動是甚麼？
- 波動有甚麼特徵？
- 波速與它的頻率和波長有何聯繫？
- 駐波是甚麼？



1.1 脈衝和波

波 (wave) 是從某些波源 (source) 向周圍區域發出的週期性擾動 (disturbance)，它們把能量從一處傳遞到另一處。例如海上快艇 (波源) 行進時發出的水波可把能量傳到堤岸 (接收器) (圖 1.1)。教師的口 (波源) 發出的聲波也可把能量傳到學生的耳朵 (接收器) (圖 1.2)。然而，在以上兩個例子中，水和空氣都沒有從波源移動至接收器。



a. 快艇產生的水波



b. 20 分鐘後到達岸邊的水波

圖 1.1 水波

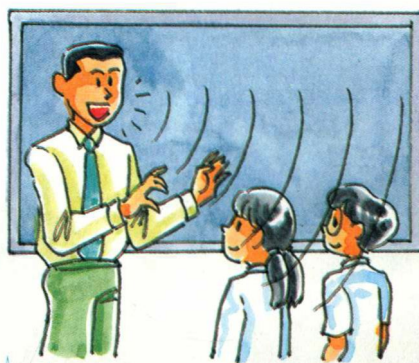


圖 1.2 聲波

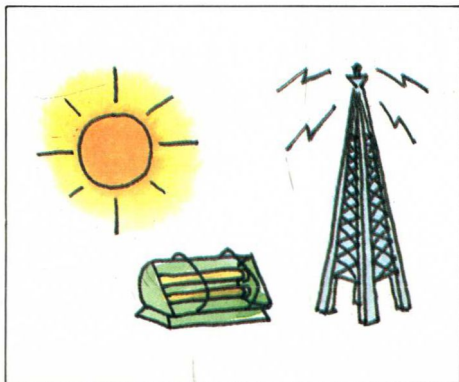


圖 1.3 電磁波的一些波源

水波和聲波都是**機械波 (mechanical wave)** 的例子。它們只能通過介質材料**傳播 (propagate)**。前者在水面傳播，後者能在任何介質材料中傳播。

太陽的能量藉着光和其他**電磁波 (electromagnetic wave)** 傳至地球 (圖 1.3)，這些波能在真空中傳播。無線電波和電視波也是電磁波，它們常用於傳送信息，當然亦傳遞能量。

本章將研究沿着繩、弦或長彈簧傳播的波的性質。像水波那樣在表面傳播的波或像聲音和光線那樣通過空間傳播的波，與沿着繩子傳播的波在許多重要特徵上是相同的。這些較複雜的波將在以後章節中論及。

如將一根軟螺旋彈簧的一端固定在支架上，並迅速抖動另一端，則會形成一個脈衝 (pulse)。此脈衝從被抖端沿着彈簧傳播到支架 (圖 1.4)。

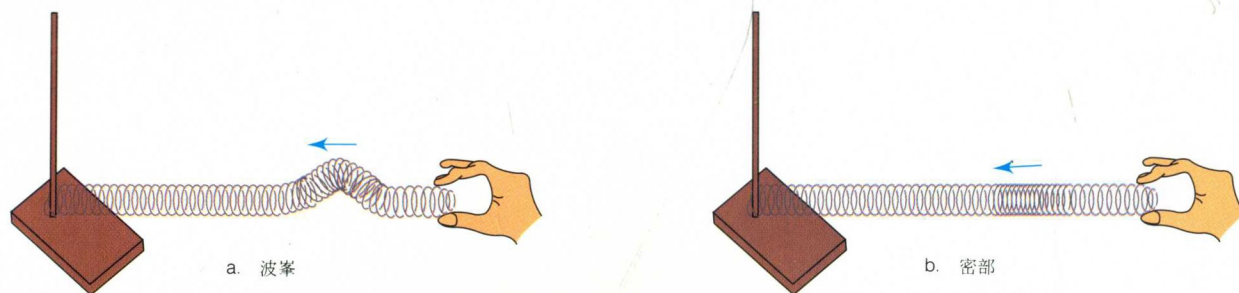


圖 1.4 沿着螺旋彈簧傳播的脈衝

仔細觀察可看出脈衝具有以下各特徵：

1. 脈衝以恆速率前進；
2. 脈衝既可以是波峰 (crest) [或波谷 (trough)]，亦可以是密部 (compression) [或疏部 (rarefaction)]；
3. 脈衝把能量從手 (波源) 傳遞到支架 (接收器)；
4. 脈衝並未把物質從彈簧一端傳遞到另一端。

橫波和縱波

如持續抖動彈簧的自由端，就會形成波 (一連串脈衝)。此波將沿着彈簧傳播。視乎抖動的方向 (垂直於彈簧方向或沿着彈簧方向)，形成的波可以是橫向的 (transverse) 或縱向的 (longitudinal) (圖 1.5)。

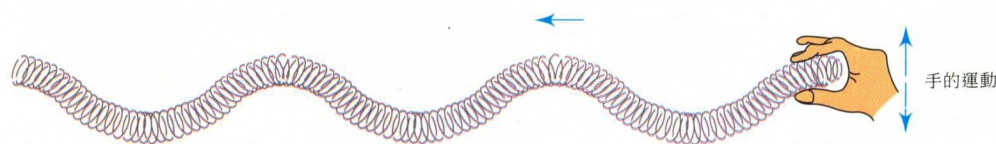


圖 1.5 a 橫波

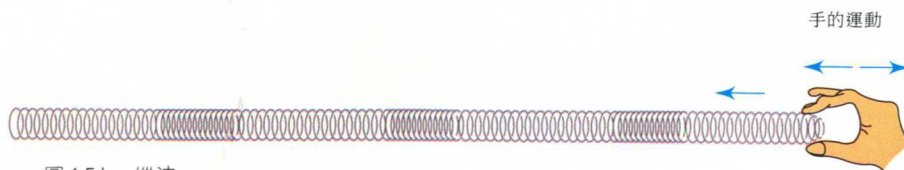


圖 1.5 b 縱波

在橫波中，波形 (waveform) 表現為波峰和波谷，介質質點的振動方向與波的傳播方向垂直。

在縱波中，波形表現為密部和疏部，介質質點的振動方向與波的傳播方向一致。

電磁波（參見第三章）是一種橫波，聲波（參見第四章）則是一種縱波。機械波在固體中傳播時，可以有橫向和縱向相混合的振動方式（圖 1.6）。

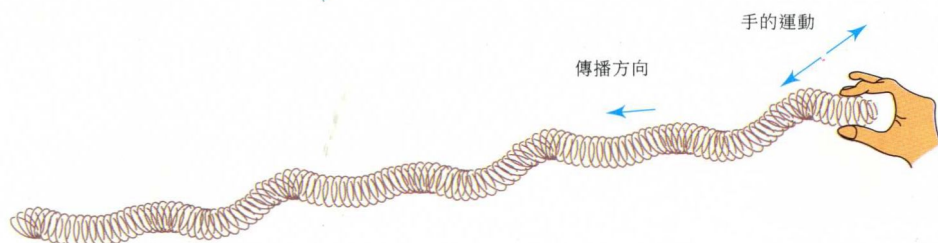


圖 1.6 一種兼具橫向和縱向方式的波

實驗 1.1 A

沿螺旋彈簧傳播的波

迅速抖動彈簧的一端使之產生脈衝，首先沿着與彈簧垂直的方向（圖 1.7 a），然後沿着彈簧的方向抖動。分別比較各種情況下簧圈的運動和脈衝的運動。試說明沿彈簧傳播的連續波是如何形成的。

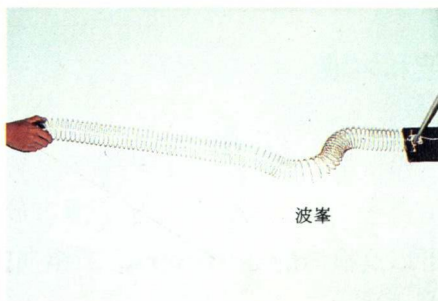


圖 1.7 a

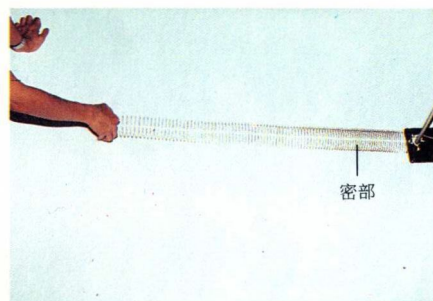


圖 1.7 b

1.2 沿繩子傳播的橫波

當橫波沿着一根水平繩子前進時，繩中各質點會偏離它們的靜止位置作向上或向下位移。

圖 1.8 示出一系列彼此相隔四分之一週期的「位移對距離」關係線圖。這些線圖顯示在繩子不同部位質點的橫向位移及運動方向。

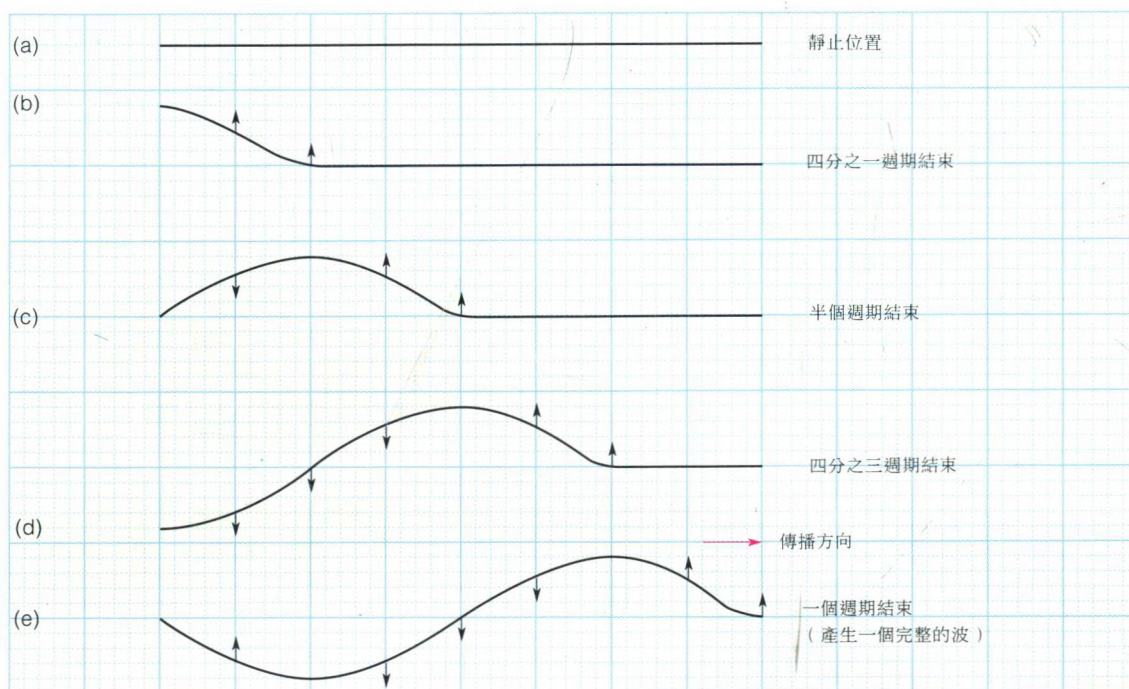


圖 1.8 一列橫波開始運動時最初幾個四分之一週期的位移 - 距離關係線圖

一個完整的正弦波形（常簡稱**完整波**），或一個波峯加一個波谷，是手使繩子經歷週期運動的一個循環，即手從它的靜止位置向上運動、接着向下運動、然後向上返回到它的起始位置所產生的。

下面介紹的兩個物理量，可用於描述所有**週期運動 (periodic motion)**，包括單擺、旋轉箭頭等運動，以及當波在介質中傳播時質點的波動。

1. **週期 (period)** 定義為完成一個循環所需的時間；
2. **頻率 (frequency)** 定義為每秒的循環次數。

波的頻率有時定義為每秒內經過某一定點的完整波的個數。這等於每秒內由波源產生完整波的個數，或波源的頻率。

如果每秒內將繩的一端迅速地上下抖動 10 次，所形成波的頻率是每秒振動 10 次，或 10 赫茲 (10 Hz)。

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$$

這波的週期是 0.1 s。

一般而言，週期 (T) 與頻率 (f) 的關係式為

$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

表 1.1 列出一些常見波頻率的數量級。

表 1.1 一些波的頻率

波的類型	振動方式	頻率/Hz
可見光	橫波	$(4 \sim 7) \times 10^{14}$
調頻無線電波	橫波	10^8
調幅無線電波	橫波	10^6
汽笛聲	縱波	10^3
水波	橫波	10
抖動繩子形成的波	橫波	1
風暴引起的巨浪 (圖 1.9)	混合方式	1

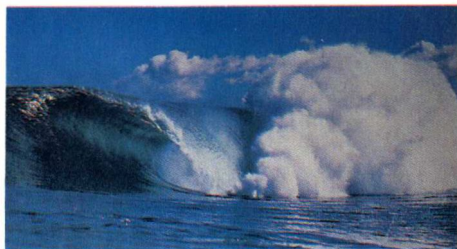


圖 1.9 海洋裏的風暴

圖 1.10 示出當波經過一根繩子時其中一段繩子的情況。

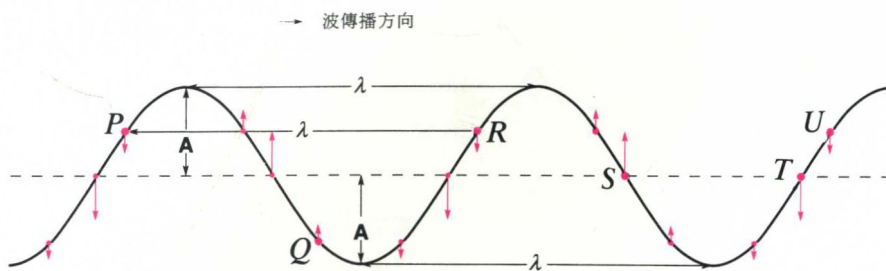


圖 1.10 位移 - 距離關係線圖
紅色箭頭指示質點的運動方向。

波的**振幅 (amplitude) (A)**是指波峯的高度或波谷的深度，它是質點偏離其平衡位置的最大位移。

繩上如 P 、 R 和 U 等點，它們具有相同的位移並以相同的速度運動，這些點的振動稱為**同相 (in phase)**。

波長 (wavelength) (λ) 是兩相鄰同相點之間的距離。同樣，它亦是從一波峯（或波谷）到下一波峯（或波谷）的距離。

繩上如 P 和 Q ，或 S 和 T 等點對，它們的**位移和速度各自大小相等而方向相反**，每一對點的振動稱為 **180° 異相 (180° out of phase)**。一對最接近而 180° 異相的點，沿着波傳播的方向彼此相隔半波長。

實驗 1.1 B

橫行波模型

轉動一個螺旋彈簧時，它的投影將仿照橫波的波動形式運動（圖 1.11 a）。因此，通過研究螺旋彈簧投影的運動，可分析橫波的運動。

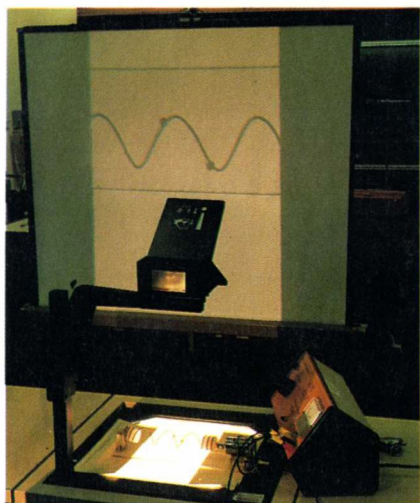


圖 1.11 b 用高映機投影

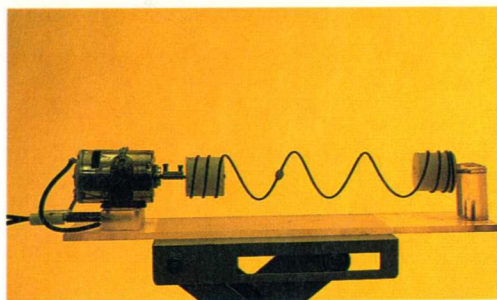


圖 1.11 a 橫行波模型

用高映機將螺旋彈簧投射在屏幕上（圖 1.11 b）。把幾粒膠泥小珠黏在簧圈上，以代表介質的質點。然後旋轉彈簧，觀察各對同相質點和 180° 異相質點的運動和位置，可看到以下情況：

- (1) 波形沿水平方向運動，而質點的運動方向與它垂直；
- (2) 在一個週期內，每一質點的運動恰好經歷一個循環。同時每一波峯則向前移動一個波長。

1.3 波動公式

橫波的速率是指其波峯前進的速率。因為波是一連串的脈衝，故波的速率與其中一個脈衝的速率相等。實驗表明，波速與該波所在的介質有關而與波的頻率* 和振幅無關。在下一頁，我們將證明波速 (v) 與其頻率 (f) 和波長 (λ) 的關係式是 $v = f\lambda$ 。

* 在現階段，一般波動現象中頻率對波速的影響通常可略去不計，但光線透過三稜鏡產生的色散現象是個例外。

從圖 1.8 a 至 1.8 e 可見，波在一個週期移動一個波長的距離。所以波速可由下式給出：

$$\text{速率} = \frac{\text{距離}}{\text{時間}} = \frac{\text{波長}}{\text{週期}}$$

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

$$\text{由式 (1)} \quad f = \frac{1}{T}$$

$$\therefore v = f\lambda$$

(2)

例題 1

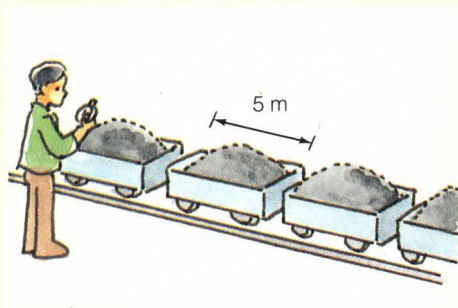


圖 1.12 a

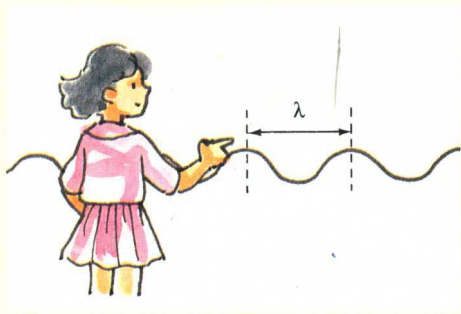


圖 1.12 b

- (a) 貨車的每節車卡長 5 m (圖 1.12 a)，在 10 s 內有 20 節車卡從觀察者前面經過，貨車的速率是多大？
- (b) 一水波的波長是 0.5 m，如 10 s 內有 20 個完整波從一觀察者前面經過 (圖 1.12 b)，水波的速率是多大？
- (c) 某聲波的頻率是 256 Hz，它的波長是 1.3 m，這聲音在空氣中的速率是多大？
- (d) 光在空氣中的速率是 $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ，求波長是 $6.0 \times 10^{-7} \text{ m}$ 的綠光的頻率。

解：

- (a) 速率 = 車卡長 $\times$ 1 s 內經過的車卡數

$$\begin{aligned} &= 5 \text{ m} \times \frac{20}{10 \text{ s}} \\ &= 5 \text{ m} \times 2 \text{ s}^{-1} \\ &= 10 \text{ m s}^{-1} \end{aligned}$$

- (b) 速率 = 波長 $\times$ 頻率

$$\begin{aligned} v &= \lambda \times f \\ &= 0.5 \text{ m} \times \frac{20}{10 \text{ s}} \\ &= 1 \text{ m s}^{-1} \end{aligned}$$

- (c) 聲音的速率

$$\begin{aligned} v &= f\lambda \\ &= 256 \text{ s}^{-1} \times 1.3 \text{ m} \\ &= 332.8 \text{ m s}^{-1} \end{aligned}$$

- (d) 由 $v = f\lambda$ 得，

$$\begin{aligned} f &= \frac{v}{\lambda} \\ &= \frac{3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{6.0 \times 10^{-7} \text{ m}} \\ &= 5 \times 10^{14} \text{ Hz} \end{aligned}$$

例題 2

- (a) 以 2.5 Hz 頻率抖動一根長繩的一端，由此產生一行波（圖 1.13）。求此波的
- 週期，
 - 波長，
 - 速率，
 - 振幅。

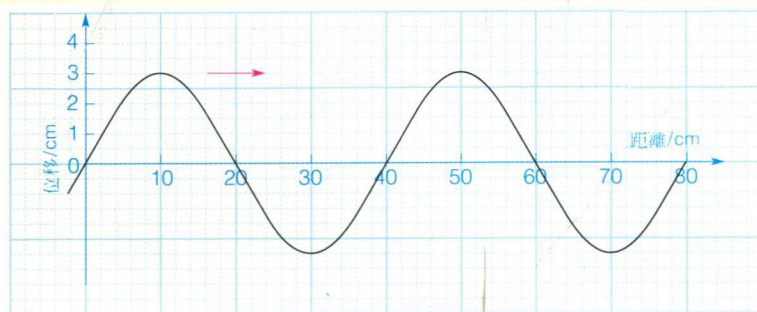


圖 1.13

- (b) i. 在方格紙上畫出 0.1 s 後的波形；
 ii. 在方格紙上畫出 0.2 s 後的波形。
- (c) 如抖動的頻率增至原來的 2 倍，振幅減至原來的一半，求波的
- 新速率，
 - 新週期，
 - 新波長。
- (d) 用同樣的位移標度在方格紙上畫出新的波形。

解：

(a) i. 週期 $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2.5 \text{ Hz}} = \frac{1}{2.5 \text{ s}^{-1}} = 0.4 \text{ s}$

ii. 根據線圖，波長

$$\lambda = 40 \text{ cm}$$

iii. 速率 $v = f \lambda = 2.5 \text{ s}^{-1} \times 40 \text{ cm} = 100 \text{ cm s}^{-1} = 1 \text{ m s}^{-1}$

iv. 根據線圖，振幅

$$A = 3 \text{ cm}$$

- (b) i. 0.1 s (即 $\frac{1}{4}$ 週期) 後。

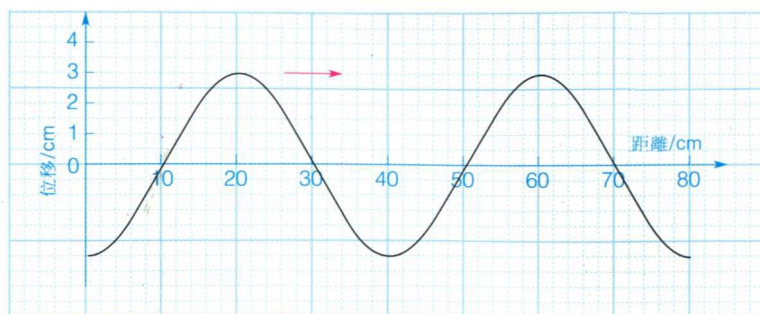


圖 1.14

- ii. 0.2 s (即 $\frac{1}{2}$ 週期) 後。

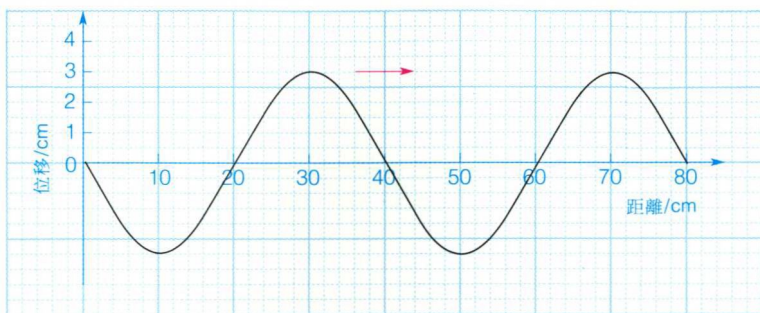


圖 1.15

- (c) i. 速率不變，即 $v' = 1 \text{ m s}^{-1}$

$$\text{ii. 新週期 } T' = \frac{1}{f'} = \frac{1}{5 \text{ s}^{-1}} \\ = 0.2 \text{ s}$$

- iii. 由 $v' = f' \lambda'$ ，得新波長

$$\lambda' = \frac{v'}{f'} = \frac{100 \text{ cm s}^{-1}}{5 \text{ s}^{-1}} \\ = 20 \text{ cm}$$

(d)

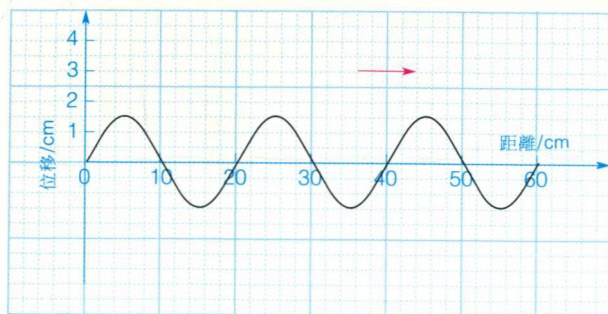


圖 1.16

例題 3

浮在水面上的兩軟木塞相距 0.4 m (圖 1.17)。一水波用 2 s 時間從 A 傳播到 B ，軟木塞 A 在 0.25 s 內從它的靜止位置升高 5 cm ，達到最高位置。

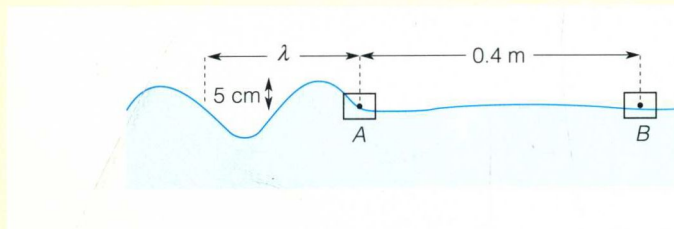


圖 1.17

- (a) 軟木塞 B 完成一次全振動需多少時間？
- (b) 求
 - i. 波的頻率，
 - ii. 波的速率，
 - iii. 波的振幅，
 - iv. 波長。
- (c) A 與 B 相隔多少波長？它們間的相位差是多少？
- (d) 某一瞬間 A 在它的最低位置，此時 B 的位移是多大？

解：

- (a) 對於軟木塞 A ，四分之一週期是 0.25 s 。

$\therefore$ 週期 $T = 1\text{ s}$ 。

B 與 A 完成一次全振動的時間相同。

- (b) i. 頻率 $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1\text{ s}} = 1\text{ Hz}$

ii. 速率 $v = \frac{\text{距離}}{\text{時間}} = \frac{0.4\text{ m}}{2\text{ s}} = 0.2\text{ m s}^{-1}$

iii. 振幅 $A = 5\text{ cm}$

iv. 由 $v = f\lambda$ ，波長

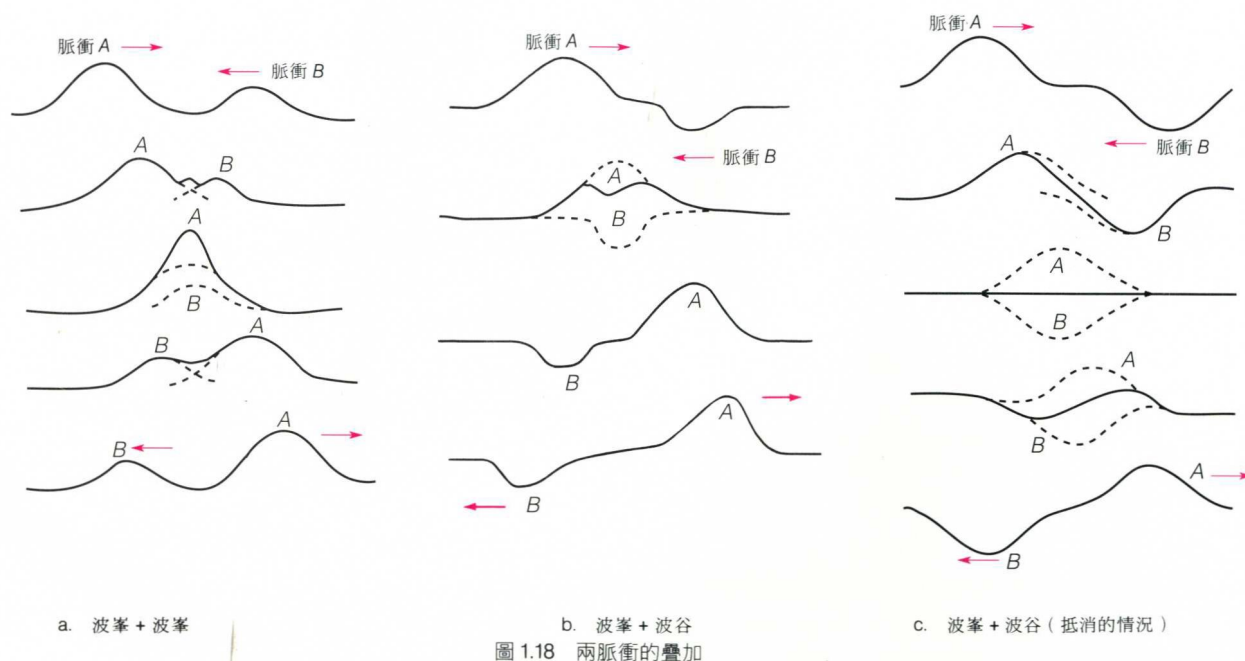
$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{0.2\text{ m s}^{-1}}{1\text{ s}^{-1}} = 0.2\text{ m}$$

- (c) $\therefore A$ 與 B 相隔 2 個波長， $\therefore A$ 與 B 同相。

- (d) B 的位移與 A 的位移相同，即低於靜止位置 5 cm 。

1.4 兩脈衝的疊加

兩脈衝若以相反方向前進，相遇時將**相疊**起來。如果波峯與波峯相遇或波谷與波谷相遇，**疊加 (superposition)** 將產生一個大的合振幅（圖 1.18 a）。此時，兩脈衝發生**相長干涉 (constructive interference)**。



另一方面，如果波峯與波谷相遇，疊加將產生一個小的合振幅（圖 1.18 b），或甚至完全相抵消（圖 1.18 c）。此時，兩脈衝發生**相消干涉 (destructive interference)**。

相遇以後，兩脈衝互相穿過對方，好像從未相遇過。

實驗 1.2 A

脈衝的疊加

同時迅速抖動一根長彈簧的兩端，以產生前進方向相反的兩脈衝（圖 1.19）。觀察這兩脈衝的干涉情況。

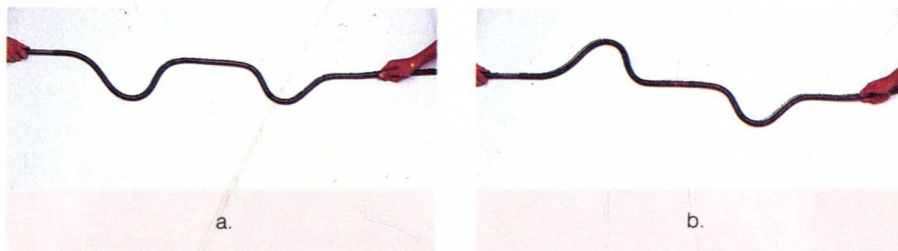


圖 1.19 長彈簧上的脈衝

1.5 駐波

兩脈衝的干涉僅發生在它們相遇的一瞬間。然而，兩列頻率相同、前進方向相反的波之干涉，卻能形成穩定的干涉圖形，由這種干涉情況形成的波動稱為**駐波** (stationary wave 或 standing wave)。

實驗 1.2 B

長彈簧上的駐波

同步抖動長彈簧的兩端，使產生駐波圖形。若保持一端不動，僅抖動彈簧的另一端（圖 1.20），是否也能形成駐波？

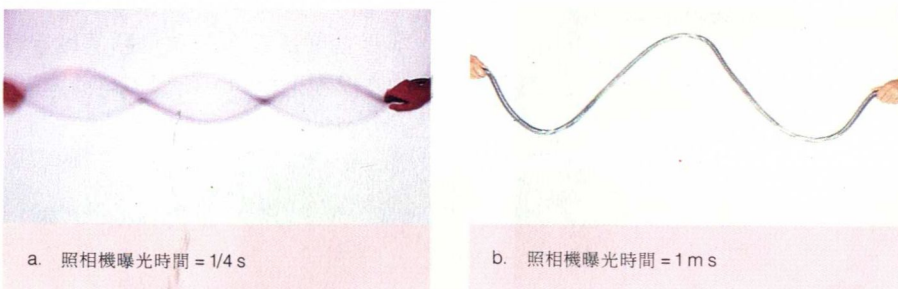


圖 1.20 駐波圖形

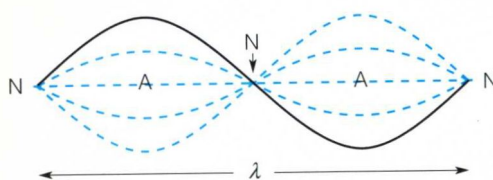
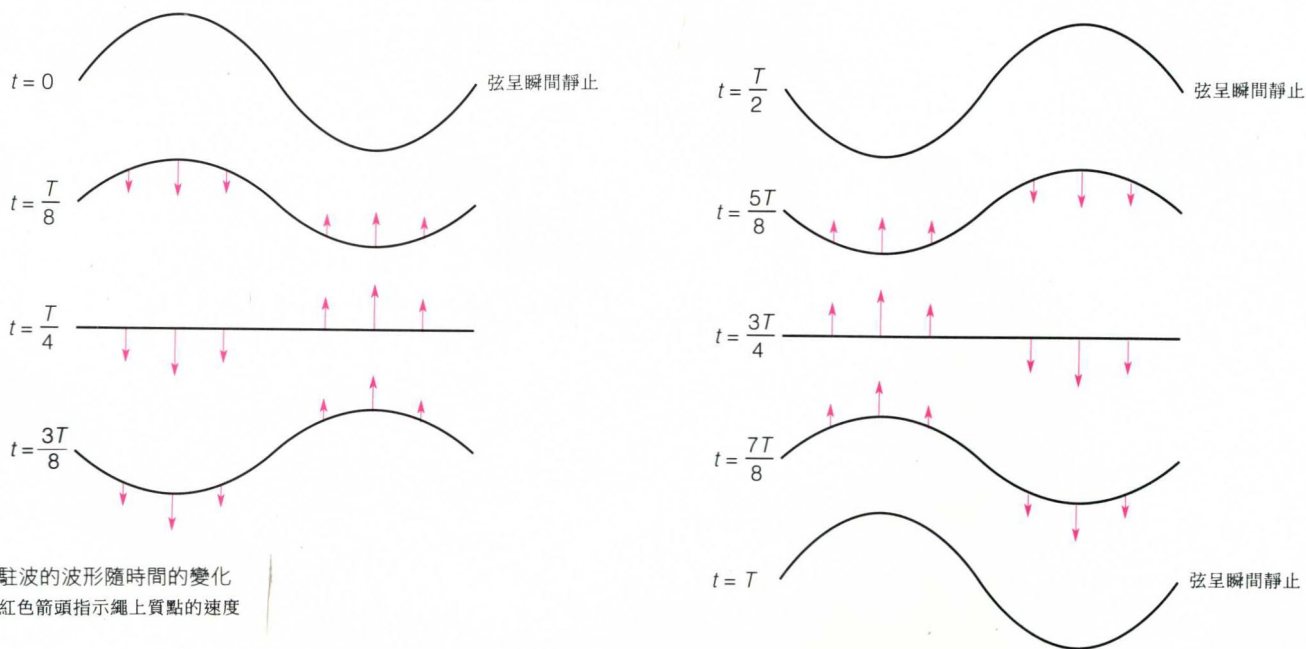


圖 1.21 駐波的波節 (N) 和波腹 (A)

駐波 (圖 1.21) 上振幅最小的振動點 (常為零或接近零) 稱為**波節 (node) (N)**。兩波節中間是兩波峯或兩波谷相遇處。這些點以最大的振幅振動，稱為**波腹 (antinodes) (A)**。

仔細觀察可看出**兩相鄰波節 (波腹) 相隔二分之一波長**。

如果用錄像機拍攝駐波，然後慢速播映，就能清楚地觀察到弦線形狀的連續變化，如圖 1.22 所示。

圖 1.22 駐波的波形隨時間的變化
紅色箭頭指示繩上質點的速度

實驗 1.2C

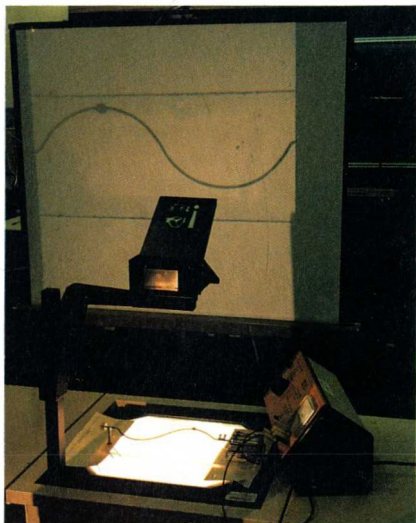


圖 1.23 b

橫駐波模型

當一 $\$$ 形金屬線以 $\$$ 符號形狀繞軸旋轉時 (圖 1.23 a)，其投影的變化與橫駐波的波形變化相同。所以，可通過研究這 $\$$ 形的投影來分析橫駐波。

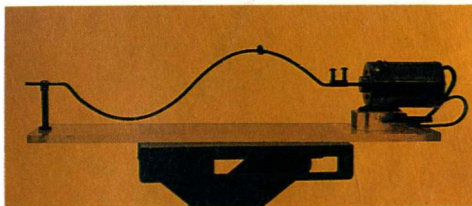


圖 1.23 a 橫駐波模型

用一高映機 (圖 1.23 b) 將 $\$$ 形投射到屏幕上。把一些膠泥小珠黏在這 $\$$ 形上以表示弦線上的質點，觀察它們的運動，注意波節和波腹處質點振動的振幅。

沿着一根長彈簧前進的脈衝或波會在末端發生反射（圖 1.24）。在某些頻率，入射波與反射波會發生干涉，形成一駐波（圖 1.25）。所以，駐波亦可由單一的波源產生。

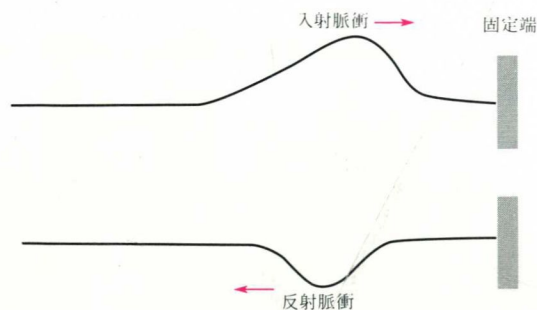


圖 1.24 一脈衝在固定末端的反射



圖 1.25 用振動產生器在弦線上產生駐波
在高頻時，波形看起來似由多個相連的環構成。這是由視覺暫留產生的一種錯覺。

例題 4

一駐波形成於一端固定的一根 1 m 長的弦線上，弦線的另一端連接在以 5.0 Hz 頻率振動的波源上。圖 1.26 示出一極端位置的波形。

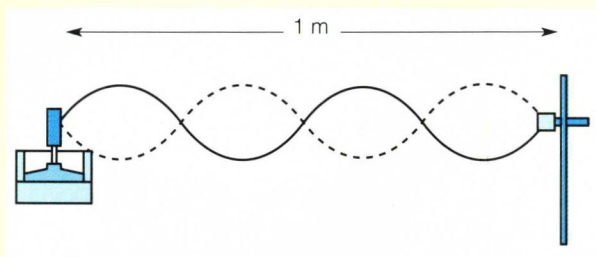


圖 1.26

- 標出波節和波腹。
- 波的波長有多大。
- 畫出 0.05 s 後和 0.1 s 後弦線的形狀。

解：

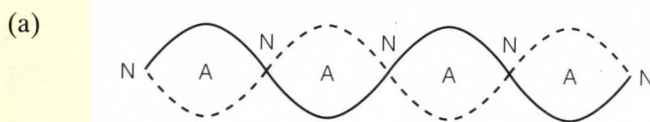


圖 1.27

- 波長 $\lambda = 0.5 \text{ m}$

(c) 波的週期 $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{5 \text{ s}^{-1}} = 0.2 \text{ s}$

0.05 s (即四分之一週期) 後, 弦線在它的靜止位置, 形成一直線。

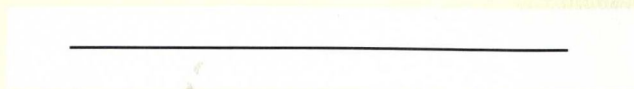


圖 1.28 a

0.1 s (即半週期) 後弦線的形狀如下所示。

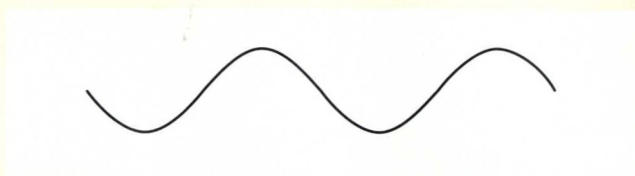


圖 1.28 b

(選修) 圖 1.29 顯示兩行波的干涉如何形成一駐波。波 1 向右運動, 把它的位移記作 y_1 ; 波 2 向左運動, 把它的位移記作 y_2 。一旦這兩波在繩上相遇, 則不能分別觀察它們, 僅能看到合成波。它的合位移可用代數方法相加獲得: $y = y_1 + y_2$ 。

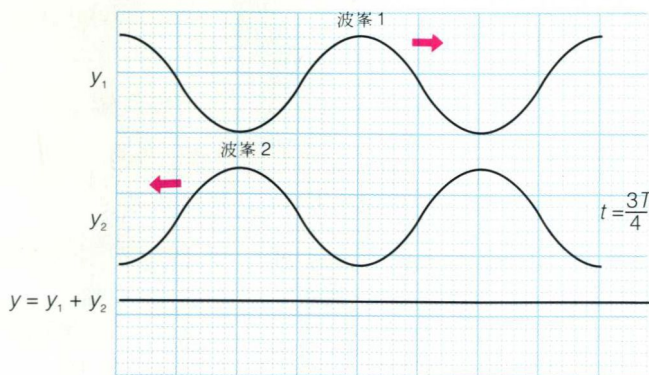
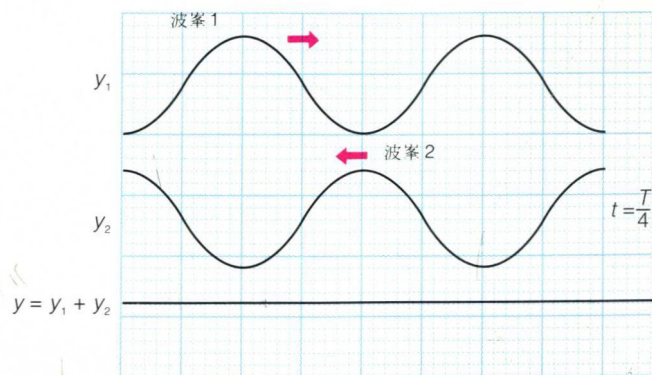
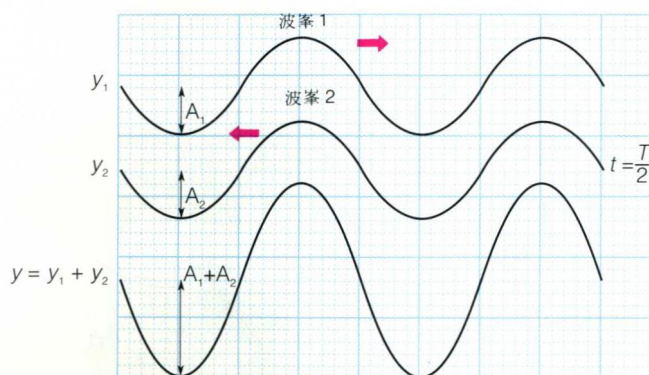
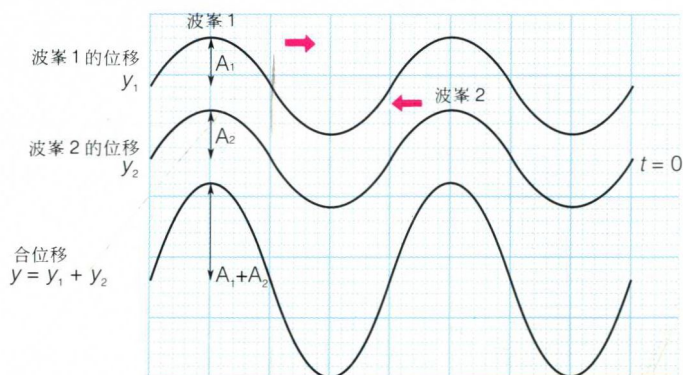


圖 1.29 同一繩上兩列前進方向相反、振幅和波長均相同的波之疊加