

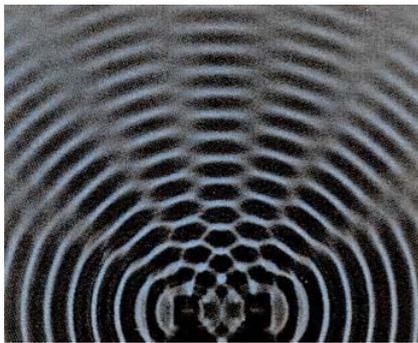
2-8 水波的干涉與繞射

兩繩波在同一條繩子上相向行進，在交會重疊時發生干涉現象。兩水波在水面上傳播，在交會時也會發生干涉現象，但由於水波為水面上的二維傳播，不論觀察水波槽實驗中的干涉圖樣，或是分析其干涉的原因都會比較複雜。

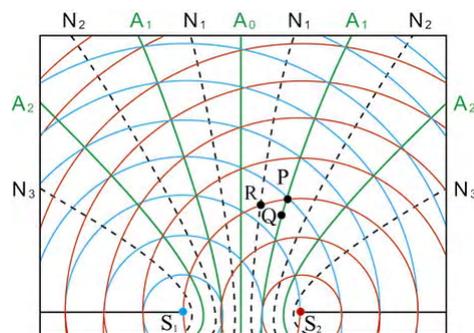
1. 水波的干涉

在水波槽實驗裝置中，若起波器為兩個振動頻率相同的點波源，且能同時產生波峰或波谷時，稱為同相，則可以得到如圖 2-69 所顯示的干涉圖樣（interference pattern）。圖中類似輻射狀的灰色曲線保持穩定不動，這些曲線之間為亮區和暗區交錯出現，並且顯現出向外移動的動態現象。

圖 2-69(b)所示為此干涉圖樣的分析圖，圖中 S_1 和 S_2 為兩點波源，藍色和紅色的兩組同心圓形波前分別表示以 S_1 和 S_2 為中心所發出的波峰連線，在相鄰兩同心圓形波前之間的中點即為波谷。



(a)

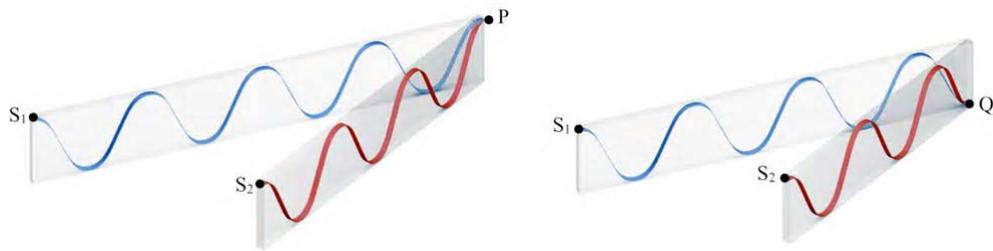


(b)

▲圖 2-69 水波槽干涉現象的觀察：(a)水波槽中兩個同相的點波源所形成的干涉圖樣；(b)干涉圖樣的分析： A_0 、 A_1 、 A_2 分別表示中央腹線、第一腹線、第二腹線； N_1 、 N_2 、 N_3 分別表示第一節線、第二節線、第三節線。藍色的同心圓形波前為 S_1 所發出的波峰連線；紅色的同心圓形波前為 S_2 所發出的波峰連線；黑色實線為兩波干涉後所形成的腹線；黑色虛線則為節線。

2.腹線的產生

圖 2-69(b)中，藍色波前和紅色波前的交點，例如 P 點，為來自兩點波源的波峰重疊處，應產生完全建設性干涉。如圖 2-70 所示，自 S_1 及 S_2 到達 P 點時皆為波峰，則疊加後能使其向上的合成位移為最大，使光線會聚，在水波槽底下的白紙上顯現出亮區；而其鄰近的 Q 點則為兩波谷的重疊處，產生的也是完全建設性干涉，但使其向下的合成位移為最大，使光線發散，在白紙上則顯現出暗區，如圖 2-71 所示。當兩點波源的水波繼續前進，在任何時刻到達 P 點或 Q 點時恆為同相，這些位置恆能維持完全建設性干涉。圖 2-69(b)中繪出的黑色實線係將這些產生完全建設性干涉的各點連接而成，稱為**腹線**（antinodal line）。



▲圖 2-70 兩波峰重疊處，產生完全建設性干涉，能使其向上的合成位移為最大。

▲圖 2-71 兩波谷重疊處，也產生完全建設性干涉，能使其向下的合成位移為最大。

波自點波源出發到達某點的距離稱為波程，因此由兩點波源發出的波分別到達某點時，其所行進距離的差值則稱為**波程差**（path difference）。由圖 2-69(b)中可以看出兩點波源 S_1 和 S_2 至 P 點的波程分別為 $\overline{S_1P} = 4\lambda$ 和 $\overline{S_2P} = 3\lambda$ ，故其波程差等於 $\overline{S_1P} - \overline{S_2P} = 4\lambda - 3\lambda = \lambda$ 。

在圖 2-69(b)中，Q 點位於 P 點的同一腹線上。兩點波源 S_1 和 S_2 至 Q 點的波程分別為 $\overline{S_1Q} = (4 - \frac{1}{2})\lambda$ 和 $\overline{S_2Q} = (3 - \frac{1}{2})\lambda$ ，其波程差仍然等於 λ 。當腹線上各點與兩點波源之間的波程差恆為 λ 時，此腹線稱為第一腹線；若腹線上各點與兩點波源之間的波程差恆為 2λ 時，此腹線則稱為第二腹線，其餘類推。兩點波源連線的垂直平分線稱為中

央線，中央線上各點與兩點波源之間的波程相等，故其波程差皆應為零，所以也是一條腹線，有時稱為中央腹線。

位於同一腹線上的任意各點，假設為 A 點，與兩點波源之間的波程差必定為一定值；而不同腹線上某點的波程差則為波長的整數倍，即

$$|\overline{S_1A} - \overline{S_2A}| = n\lambda, \quad n=0, 1, 2, 3, \dots \quad \text{2-12 式}$$

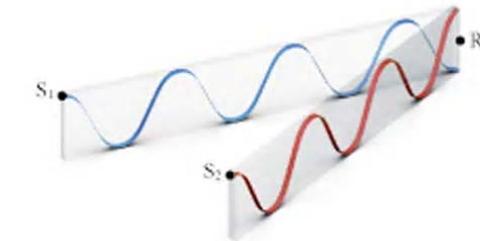
上式中若 $n=0$ ，則此腹線為中央腹線；若 $\overline{S_1A} > \overline{S_2A}$ ，則 A 點位在中央線右側的第 n 條腹線上；若 $\overline{S_1A} < \overline{S_2A}$ ，則 A 點位在中央線左側的第 n 條腹線上；左右兩側的腹線對稱於中央線。腹線位在圖 2-69(a) 上亮暗相間的區域，由於波源振動時，持續產生波峰和波谷向外移動，因此亮暗相間的區域看起來也好像是在逐漸往外移動。

3. 節線的產生

圖 2-69(b) 中繪出的黑色虛線

，為兩波的波峰和波谷重疊時產生完全破壞性干涉的各點連接而成。事實上，在此線上各點的合成位移於任何時刻皆應為零，如

圖 2-72 所示，故質點恆靜止不動，



▲圖 2-72 波峰與波谷重疊處，產生完全破壞性干涉，能使其合成位移為零。

將這些產生完全破壞性干涉的點連接而成的線則稱為**節線**（nodal line）。

圖 2-69(a) 的照片中，因為節線上各點不能使光線會聚或發散，在水波槽下方的白紙上則形成穩定不動的灰色線條，即是節線。

例如圖中的 R 點為 S_1 點波源產生的波谷和 S_2 點波源產生的波峰重疊處，由於自兩點波源至 R 點之間的波程差等於 $\overline{S_1R} - \overline{S_2R} = 3\frac{1}{2}\lambda -$

$3\lambda = \frac{1}{2}\lambda$ ，兩波在此點造成完全破壞性干涉，使得質點的振動位移為零，

如圖 2-72 所示。節線上各點與兩點波源之間的波程差恆為 $\frac{1}{2}\lambda$

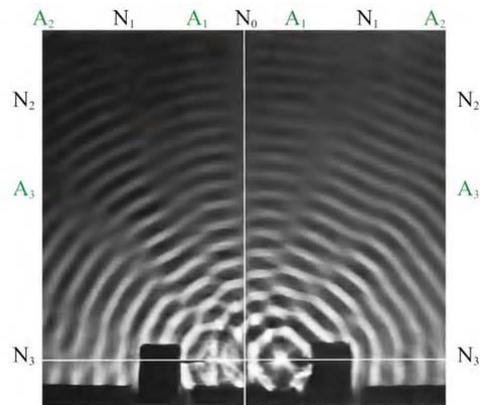
時，此節線稱為第一節線；若節線上各點與兩點波源之間的波程差恆為 $\frac{3}{2}\lambda$ 時，此節線則稱為第二節線，其餘類推。

位於同一節線上的任意各點，假設為 N 點，與兩點波源之間的波程差必定為一定值；而不同節線上某點的波程差應等於二分之一波長的奇數倍，即

$$| \overline{S_1N} - \overline{S_2N} | = (n - \frac{1}{2}) \lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{2-13 式}$$

上式中若 $\overline{S_1N} > \overline{S_2N}$ ，則 N 點位在中央線右側的第 n 條節線上；若 $\overline{S_1N} < \overline{S_2N}$ ，則 N 點位在中央線左側的第 n 條節線上，左右兩側的節線對中央線恰能呈現對稱現象。

在上述的水波槽實驗中，兩個點波源以相同頻率同時振動，且能同時產生波峰或波谷時，稱為**同相波源**。如果這兩個相同頻率的點波源不能同時產生波峰或波谷，而是相差半個週期，當其中的一個點波源產生波峰時，另一個點波源恰是產生波谷，則稱為**反相波源**（或稱為 **180°異相波源**）。此時在水波槽中仍可產生穩定的干涉圖樣，但是前者（同相波源）產生節線的位置現在（反相波源）成為腹線，而原來腹線的位置則成為節線，如圖 2-73 所示，注意圖中兩波源位置的中央線，現在成為中央節線。在實際觀察時，兩個相同頻率的點波源，只要產生波峰或波谷的時間差保持一定，兩者具有固定的相位差，都可以在水波槽中產生穩定的干涉圖樣，我們稱這兩個點波源為**同調波源**（coherent sources）。



▲圖 2-73 180°異相點波源的干涉圖樣， N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_3 分別表示中央節線、第一節線、第二節線、第三節線； A_1 、 A_2 、 A_3 分別表示第一腹線、第二腹線、第三腹線。



想一想

在水波槽實驗中，兩點波源干涉所形成的節線，屬於數學上的何種曲線？

4. 水波的繞射

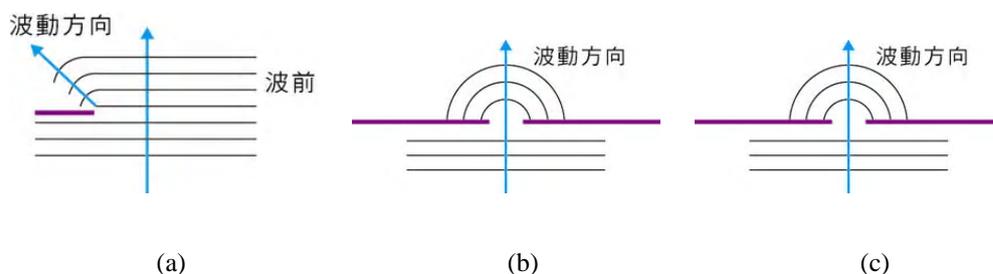
在海邊觀看浪時，可以看到許多不同的波紋。當海浪在傳播過程中遇到礁石或防波堤等障礙物時，可以繞過這些障礙物，進入其背後的遮蔽區域內，產生繞射的特殊波紋，如圖 2-74。由於海浪受到地形或地物（島嶼、突堤等海工建物）



▲圖 2-74 海浪由障礙物開口進入石滬內時的繞射波紋。

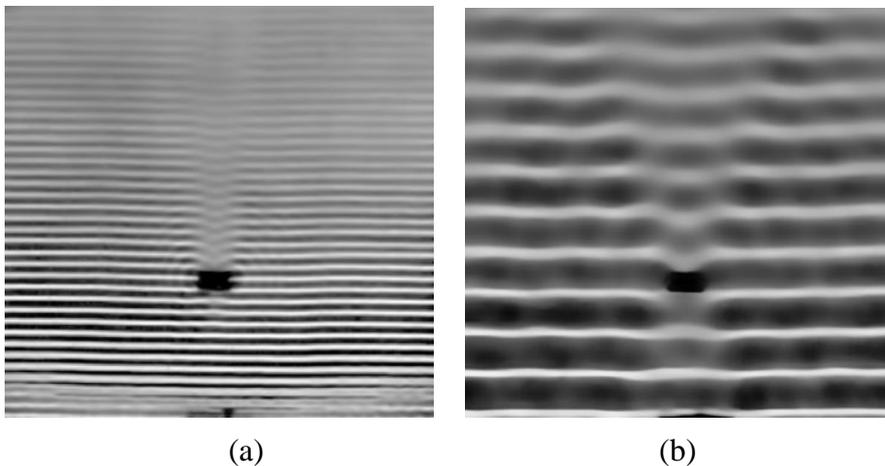
等的影響，產生反射、折射、繞射等現象，觀察並研究這些特性，對海上運輸、海洋工程建設、近海污染物擴散漂移的管控皆有極大的幫助。

水波在行進中，到達障礙物的邊緣時，可以繞過這個障礙物，進入其遮蔽區域內，如圖 2-75(a)；若遇到小型障礙物時，仍然可以繞過這些障礙物，在其後方繼續前進，如圖 2-75(b)；也可以在通過孔隙或細縫後，往各方向傳播，如圖 2-75(c)；這些現象稱為波的繞射（diffraction）。

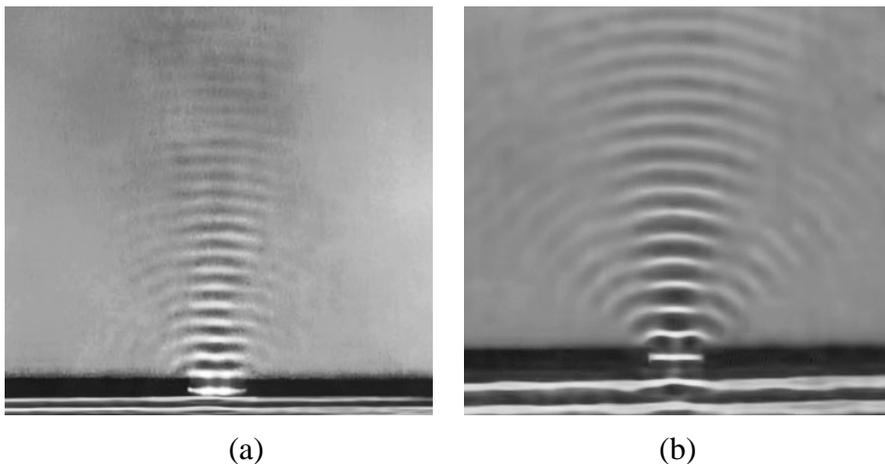


▲圖 2-75 水波繞射現象的示意圖：(a)經過障礙物邊緣的繞射；(b)經過小型障礙物的繞射；(c)通過孔隙或細縫的繞射。圖中紫色粗線條代表障礙物。

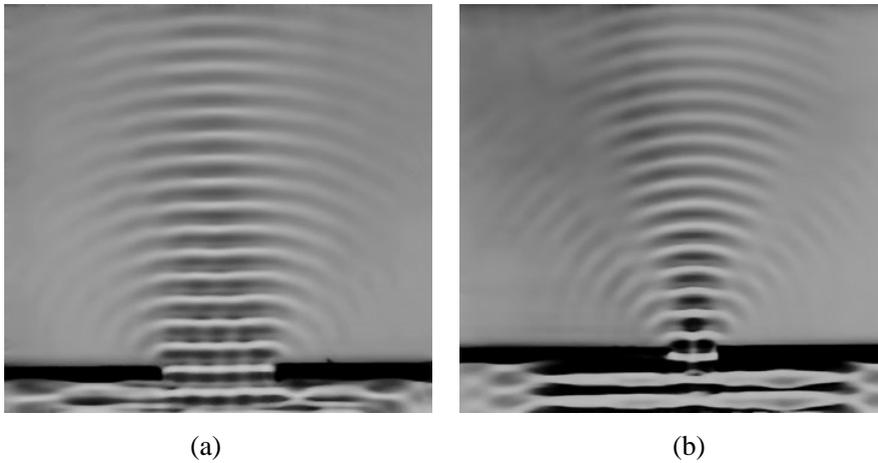
觀察水波槽的實驗，可以看到繞射現象的明顯程度與障礙物的大小或孔隙的開口大小有關，也和水波的波長（或頻率）有關。圖 2-76 所示為波長不同的水波對同一障礙物的繞射情形，照片中顯示圖 2-76(b)的波長較長，水波在障礙物正後方的繞射角度也較大；而圖 2-76(a)的波長較短，水波在障礙物後方的繞射角度也較小。圖 2-77 所示為不同波長的水波通過同一個小孔的繞射情形，圖中顯示波長大者產生的繞射現象較為明顯。圖 2-78 所示則為波長相同的水波通過開口大小不同的孔隙後產生的繞射情形，在此圖中則顯示開口小者產生的繞射現象較為顯著。



▲圖 2-76 對相同的障礙物而言，圖(a)中的水波波長較短，產生的繞射現象較不明顯；圖(b)中的水波波長較長，產生的繞射現象較為明顯。



▲圖 2-77 對開口大小相同的小孔而言，圖(a)中的水波波長較短，產生的繞射現象較不明顯；圖(b)中的水波波長較長，產生的繞射現象較為明顯。



▲圖 2-78 波長相同的水波分別通過開口較大(a)和開口較小(b)的孔隙時，開口較小者所產生的繞射效應較為明顯。

我們可以發現，當水波行進中遇到障礙物或孔隙時，若水波的波長遠小於障礙物或孔隙的大小，則看似水波直進，而不易觀察到明顯的繞射；但若水波的波長接近障礙物或孔隙的大小時，則水波產生明顯的繞射現象。