

# 以水波槽探討都卜勒效應

## 高中組物理科第一名

高雄立左營高中

作者：陳信宏、黃勤凱  
謝欣宏

指導教師：林明良

### 一、研究動機

火車錯車時，常聽到來車的汽笛聲因靠近而顯得較高，相遇時即急速下降，遠離時頻率已變低。根據教科書解釋，當聲源靠近時，都卜勒效應的視頻  $f$  為

$$f = f_0 (V + v) / (V - u)$$

其中  $V$ ：聲速， $v$ ：聽者速度， $u$ ：波源速度， $f_0$ ：實際聲頻，因此視頻變高；當聲源遠離時，視頻  $f$  為

$$f = f_0 (V - v) / (V + u)$$

因此視頻變低。上述解釋說明：靠近時視頻為一定值的較高頻，遠離時為一定值的較低頻。然而實情卻是：相遇時聲音由高降低作連續的變化。何以會有這樣的差異？

由此推測：除了波源速度、觀測者速度會影響都卜勒效應的視頻外，一定尚有變因會對其產生影響！這些變因為何？

### 二、研究目的

- (一) 探討影響都卜勒效應視頻的變因。
- (二) 提出理論解釋。
- (三) 嘗試以電腦輔助測量實驗數據。
- (四) 學習以電腦處理數據並歸納出關係式的技巧。

### 三、研究設備器材

- |            |                |               |
|------------|----------------|---------------|
| 1.水波槽      | 2.圓形波起波器       | 3.滑車          |
| 4.滑車軌道     | 5.直流電源供應器      | 6.雷射          |
| 7.唱盤       | 8.微電腦(無敵XT-80) | 9.磁碟機         |
| 10.列表機     | 11.光敏電阻(CDS)   | 12.IC(74LS32) |
| 13.萬用實驗電路板 | 14.平面鏡         | 15.磁碟片        |

## 四、研究過程

### (一)實驗裝置設計

#### 1.原理說明

- (1)光與聲波的都卜勒效應在實驗室中不易觀測，因此使用水波槽，以水波為研究對象。
- (2)水波的頻率不易以肉眼測量，尤其是波源移動後視頻的測量更是困難，因此以感應器(SENSOR)代替肉眼。
- (3)光線射過高低起伏的水波會形成如透鏡般的會聚與發散效果，若以光敏電阻作為感測器，感應其明暗的變化，則可測得波的振動頻率。
- (4)但是普通燈光會發散，明暗變化不大，當變化頻率較大時，CDS無法感測，故改以雷射取代普通燈光。如圖一所示，雷射會因折射現象而隨波的起伏搖擺，CDS即測知頻率。
- (5)為了記錄短時間內頻率的變化，決定以微電腦讀取並記錄資料。微電腦的遊戲搖桿介面為簡單的類比信號輸入介面，遊戲控制信號是以5V電壓加於150K歐姆可變電阻而產生，當可變電阻值改變時，搖桿(PDL)值即隨之在0-255之間改變。又光敏電阻之電阻值會隨光的明暗而變化，若用其代替搖桿的可變電阻，則PDL值的變化週期即光的明暗週期，亦即水波的週期。
- (6)然而經由實驗發現，光敏電阻值變化不明顯，故利用邏輯“或匣”(OR GATE)，將其中一個輸入端接地形成低電位，另一輸入端接+5V並以光敏電阻接地。則當CDS無光照射而電阻變大時，此輸入端形成高電位，因而輸出端出現

高電位，此時 PDL 值變小；當 CDS 有光照射而電阻變小時，此輸入端形成低電位，因而輸出端出現低電位，此時 PDL 值變大。因此可以用軟體記錄 PDL 值變化而計算出頻率。

(7) XT-80 有四組搖桿輸入，74LS32 IC 也有四組或匣 (OR GATE)，前述計頻裝置只需佔用其中一組，因此可再各取一組接 CDS，作為計頻程式的啟動裝置。

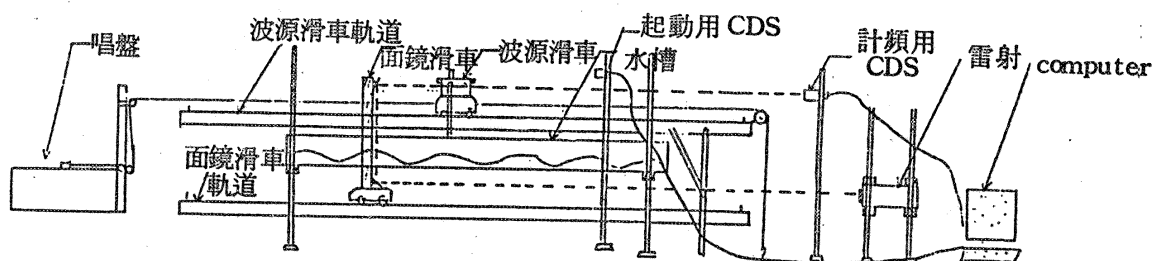
(8) 將圓形波起波器裝置在滑車上，就可形成運動的波源；同理，將雷射裝於滑車上即形成運動的觀測者。不過，雷射太笨重，因此將平面鏡以 45 度斜角裝於滑車上，用以反射雷射，使其垂直通過水波槽，而作頻率觀測。

(9) 滑車以唱盤帶動，因唱盤轉速穩定，設其角速度為  $\omega$ ，則其切線速率為

$$v = R\omega, R: \text{轉動半徑}$$

因此以不同大小橡皮塞裝在唱盤轉軸處，繞以細線帶動滑車，波源或觀測者即以等速移動。

## 2. 裝置及功能說明 (略)



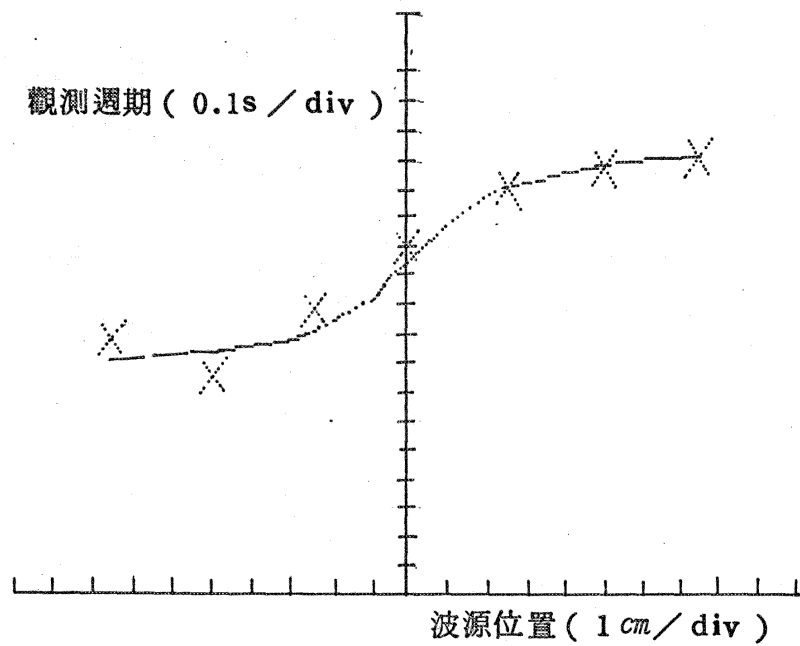
圖一 實驗裝置圖

(二) 計測程式設計 (略)

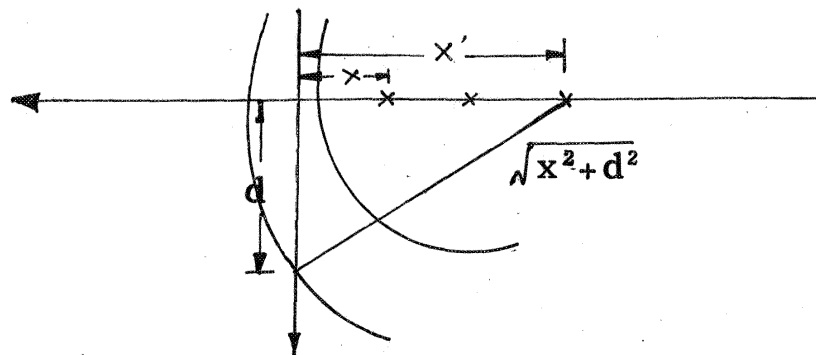
(三) 實驗設計及推理

1. 波在同一介質中傳播時的都卜勒效應

(實驗構想、步驟、記錄、數據分析略)



波源位置對觀測週期關係圖 (觀測者位置 6 cm)



圖二 觀測者所見的為波源在現在位置之前所產生

### (1) 結果與討論

(a) 觀測者所見之波並非波源在現在位置所產生，而是在這之前，設其位置為  $x'$ ，則應作如下之修正：(如圖二)，設波傳到觀測者需時  $\Delta t$ ， $d$  為觀測者位置， $x$  為波源現在位置， $x'$  為被觀測到之波其產生的位置， $V$  為波傳播之速度， $u$  為波源速度。

$$\Delta t = \sqrt{(x'^2 + d^2)} / V$$

$$x' = x + u\Delta t$$

$$x' - x = (u/V) \sqrt{(x'^2 + d^2)}$$

平方後移項

$$[1 - (u/V)^2]x'^2 - 2x x' + [x^2 - (ud/V)^2] = 0$$

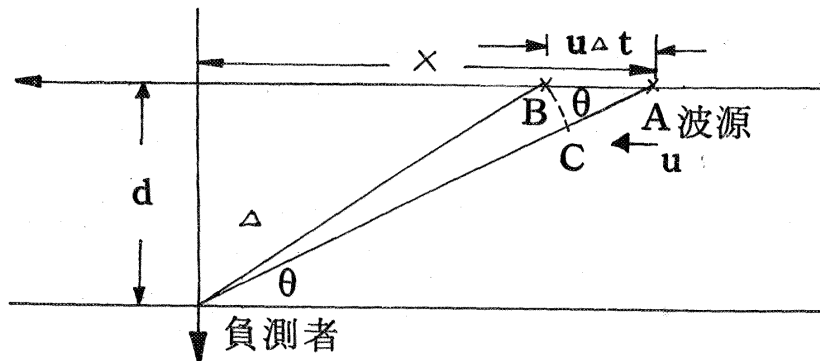
解得

$$x' = \{ x - \sqrt{[x^2 - (1 - (u/V)^2)(-ud/V)^2 + x^2]} \} / [1 - (u/V)^2]$$

- (b)當波源位置在 $-15\text{ cm}$ 處時，此時觀測者測得週期為波源剛起動（甚至未起動），未穩定時之週期，若以(a)法求 $x'$ ，結果大於波源起動之位置，因此不能併入處理。
- (c)波源接近觀測者時，視頻由高漸下降，若觀測者距運動線越近，或波源速度越大，其變化越顯著。 $T - T_0$ 與 $\cos\theta$ 成正比，與波源速度成正比。
- (d)水深愈深，波速變大，頻率變化愈不明顯， $T - T_0$ 與波速成反比。
- (e)實際頻率愈低，視頻變化愈大。
- (f)觀測者速度愈大時，頻率變化亦愈大。
- (g)實驗測得之視頻為一週期內之平均，因此波源位置為0時之頻率不一定與靜止時之頻率相等，當波源頻率愈大則平均與瞬時二值之差異愈小。

(2)理論推理

(a)觀測者靜止，而波源運動：（圖三）



圖三 觀測者靜止，波源運動時

$u$ ：波源速度

$V$ ：波速

$T_0$ ：波源振動週期

T：觀測者測得週期

設  $\Delta t$  時間後，波源由 A 移至 B，則 AB 間距離為  $u\Delta t$ ，若  $\Delta t \rightarrow 0$ ，則  $\Delta\theta \rightarrow 0$ ，因此  $\angle BCA \doteq 90^\circ$ ，故  $AC = u\Delta t \cos\theta$ 。波源由 A 傳至觀測者比由 B 傳至觀測者多走 AC 距離，但 B 落後  $A\Delta t$  秒，設觀測者測得之週期為 T，則

$$T / T_0 = (\Delta t - u\Delta t \cos\theta / V) / \Delta t$$

所以 
$$T = (1 - u \cos\theta / V) T_0$$

$$= T_0 (V - u \cos\theta) / V$$

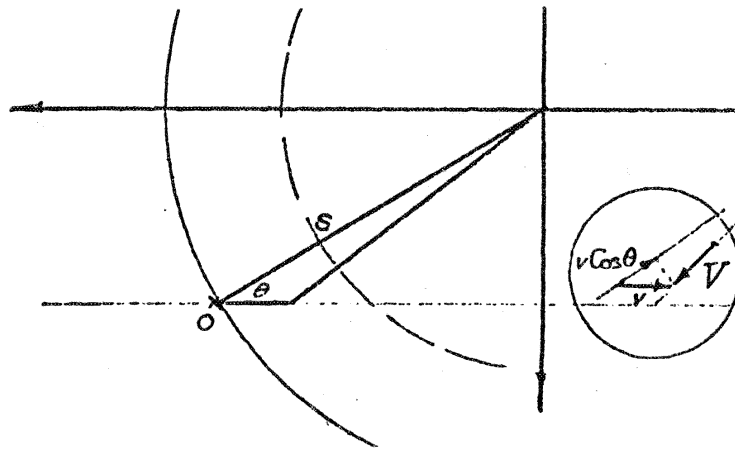
而 
$$\cos\theta = x / \sqrt{(x^2 + d^2)}$$
，

故 
$$T = T_0 [V - ux / \sqrt{(x^2 + d^2)}] / V$$

$$f = f_0 [V / (V - u \cos\theta)]$$

$$= f_0 V / [V - ux / \sqrt{(x^2 + d^2)}]$$

(b) 波源靜止，而觀測者運動：(圖四)



圖四 波源靜止，觀測者運動時

設若觀測者 O 靜止，波前 s 傳至 O 需時  $\Delta t$ ， $\Delta t \rightarrow 0$ ，今 O 以  $v$  之速度運動，因此 O 遇到 s 之時間  $\Delta t'$  為  $sO / (v \cos\theta + V)$ ，

所以 
$$T / T_0 = \Delta t' / \Delta t$$

$$= [sO / (v \cos\theta + V)] / [sO / V]$$

$$= V / (V + v \cos\theta)$$

亦即  $T = [ V / ( V + v \cos \theta ) ] T_0$

故  $f = [ ( V + v \cos \theta ) / V ] f_0$

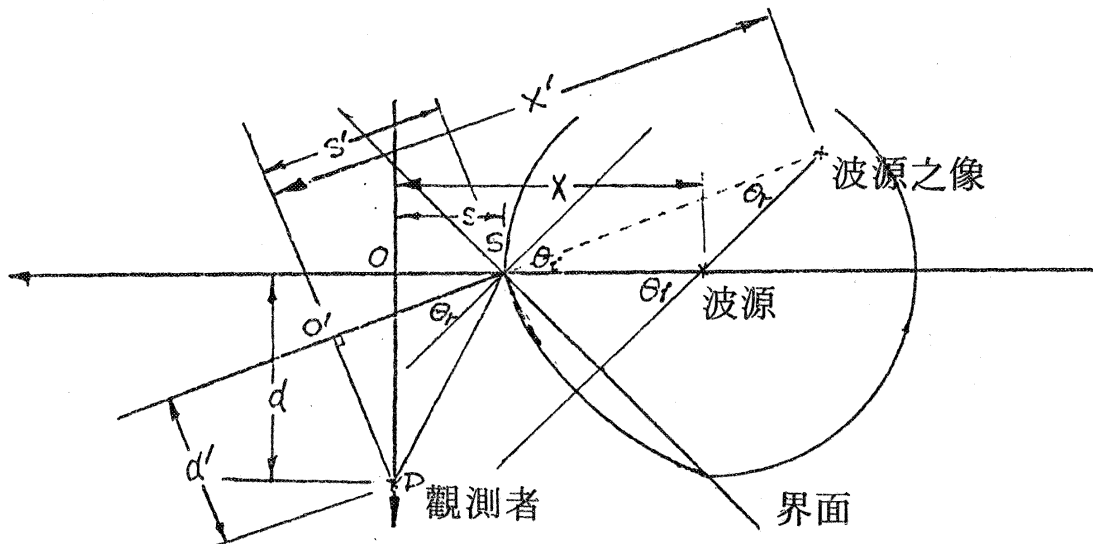
(c)以上推論均為瞬時之視頻，實驗測得者為平均視頻，當頻率愈高時，或視頻變化較小時，兩者愈接近。

## 2. 波與觀測者分別在不同介質中時的都卜效應

(實驗構想、步驟、記錄、數據分析略)

### (1) 理論推理

如圖五，觀察折射後之波形，發現其似乎為另一波源之圓形波，亦即為波源之像，其運動方向因折射而改變，因而改變觀測者與像波源之距離，而影響視頻。



圖五 波經折射後觀測者所見之都卜勒效應相當於該波之像的運動所產生

當介面與波源運動線不垂直時，在介質二所見波源進行方向已非原來方向，因此觀測者與波源進行方之距離改為  $d'$ ，設

$u$ ：波源速度       $V_1$ ：第一介質中的波速

$V_2$ ：第二介質中的波速

$n_{12}$ ：第一介質到第二介質中的折射率

$x'$ ：波源像之位置

$\theta_i$ ：入射角       $\theta_r$ ：折射角

$$n_{12} = V_1 / V_2$$

$$= \sin \theta_i / \sin \theta_r$$

所以  $\theta_r = \arcsin [ \sin\theta_i / n_{12} ]$

又  $\phi = \arctan [ d / s ]$

由  $\Delta SOD$

$$d' = \sin(\phi - \theta_i + \theta_r) \sqrt{(s^2 + d^2)}$$

$$s' = \cos(\phi - \theta_i + \theta_r) \sqrt{(s^2 + d^2)}$$

$$x' = s' + [(x - s) \sin\theta_i / \sin\theta_r]$$

$$= n_{12}(x - s) + \cos(\phi - \theta_i + \theta_r) \sqrt{(s^2 + d^2)}$$

因此視頻  $f$  變為

$$f = f_0 (V / V - \cos\theta')$$

其中  $\cos\theta' = x' / \sqrt{(x'^2 + d'^2)}$

因此經折射後之視頻，可用像的運動處理。

## 五、結論與討論

- (一) 當我們不在聲源的運動線上時，所聽到的聲音，會因聲源的靠近而由高逐漸下降，作連續性變化，而不是一定值的較高頻。當聲源遠離時，則繼續下降至較低頻。
- (二) 折射對都卜勒效應的影響，可以物體的像運動來考慮。經過折射後所見之都卜勒效應是像產生的效應。
- (三) 本實驗使用簡單支架裝置計頻 CDS，因此位置調整費時，若使用螺旋微調（橫直二軸均可），則可節省調整時間。
- (四) CDS 位置放在雷射搖擺路徑之外側端點，則一個水波週期內，CDS 接受的光明暗變化一次。
- (五) 電腦讀取數據部分的程式，若改成機器語言撰寫，將可提高頻率測量的精確度。
- (六) 讀取數據的迴圈內不能使用條件敘述，因為條件成立與否執行所需的時間並不相同。
- (七) 本實驗中使用的感測裝置，尚可用來測量速度或加速度，就如同振動計時器一樣。
- (八) 遊戲搖桿輸入是簡單的類比 / 數位輸入介面，使微電腦很容易變成測量工具。



## 六、參考資料

- 1.于傑民，物理現象淺解……都卜勒效應，科學月刊第二卷第三期，p.6 ~ 7, ( 1971 )
- 2.物理學大辭典，復文書局， p.3446 ~ 3455 。
- 3.任家勤，林重信，物理實驗，東華書局， p.26 ~ 33, ( 1983 )。
4. Willald Bascom 著，易定華譯，海浪和海灘，新科學文庫，台灣商務印書館， p.30 ~ 34 。
- 5.姚修慎譯，數值方法，儒林圖書公司， p.167 ~ 200, ( 1985 )。
- 6.林高輝，簡易讀圖裝置……使列表機成爲讀圖機，電子情報89期， p.381 ~ 384, ( 1986 )。

## 評 語

- 1.實驗設計獨特，具有創意，對探討都卜勒效應較複雜的實驗，提出新穎方法，並使能順利執行，甚爲難得。
- 2.對電腦模擬之構想甚爲新穎，特別 Doppler Effect 之頻率變化，很爲生動，所得數據完整。
- 3.作者具有良好的研究潛力。