

693313

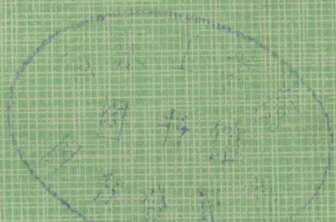
世界名著

水下音響學

Underwater Acoustics

Leon W. Camp 著

張去疑 合譯
唐明道



國家科學委員會補助
國立編譯館出版

維新書局印行

序

本書內容之特性以及寫作本書之目的可以從其原起之敘述而獲得最佳之瞭解。許多年來我們已經在洛杉磯加州大學之工程與物理科學補習學校內開授“水下音響學”的短期課程。這種短期課程包括一種集中講授：每天兩次講演，每次三小時，一連繼續十天。學生們則為一群成熟的工程師，他們大部份都已經接觸到擴展音響技術應用的工作。雖然在課堂內所化的時間以及所討論的材料係相當於一個平常學期的材料，但是參加受訓者都缺乏必須的機會以使這些經驗作為他職業背景的一部份。因此教員的工作乃是以講義及參考資料的方法提供本課程及有關工具的全貌作為學生繼續使用之指導。教員先生亦會遭遇一項特殊問題，此項特殊問題乃是由於他學生們過於的廣泛教育程度以及不同的職業所引起的。

不論介質是什麼，應用音響學的科目關聯到幾種不同的說法：即在其所屬之工學院中此項科目究應屬於那一系所管。所以我們很容易瞭解在選擇材料作課本時即有一個相關的問題存在。除去一種詞彙以外，任何其他努力必然在針對讀者興趣及觀點上講會產生各節不詳盡的探討。除了由幾位作者共同編纂很多冊的一套著作以外，另外的方法不是對基本原理作一般介紹就是對有限的主題作更完整之探討。

一項基本原理的一般複習最適應一般工程師的需要，這類工程師已經完正規訓練但亦遭遇新的問題。關於基本原理我們現在已有幾本優良的書籍，但事實上這些書籍離去今日的實用很遠，並且與現用之

2 水下音響學

機器設備相去更遠。

聲源及接收機為音響系統之原動力及感測器，故因此佔有本著作之中心部份。聲源與接收機在紙上可用數學模型及相等電路來代表，這些模式及相等電路可作性能分析之重要輔助。然而，其趨勢乃是去注重這些數學模型及相等電路而不注重機械模式。為了材料能獲最佳利用並使達成高功率聲源所需之可靠性起見，我們必須造成一種完整而能表示出感受疲勞所生位移，應力及面積之機械模型。

我們希望本書能帶給學生們對於轉換技術以及對最常用轉換器元件之設計與性能測核一種瞭解。本書對組列設計傳輸問題，聲音接收以及信號處理亦有介紹。顯然，因為這些題目任何一項詳細的討論必須另一冊書，所以本書中對這些問題將沒有高深的研討。

作者第一要感謝洛杉磯加州大學的工程與科學補習學校，並且要感謝班迪克公司的電動學部份 (Electrodynamics Division of Bendix Corporation) 因為他們給予作者時間與機會在這科目的補習教育中去探討與實習。同時，作者亦非常欣賞司頓 (Stern) 博士所作之貢獻，司頓博士提供了音響學之古典基礎；而且我們都感謝海軍部及 Tracor 因為他們幫助勃朗博士作研究因此使我們完成聲納信號處理之一章並准許我們將其出版。

作者里昂凱普 (Leon Camp)
於加州聖他蒙尼加

1970年4月

目 錄

1. 振動力學

1.1	符號與單位	2
1.1.1	分貝	3
1.2	簡諧振動器	4
1.2.1	相位	6
1.3	複數	8
1.4	以薄環作諧振器	10
1.4.1	帶有阻尼的環	12
1.5	受迫振動	15
1.5.1	以受激勵的振動器作為聲源	17
1.6	振動系統的諧（共）振	20
1.7	相位問題	23
	問題	25

2. 分佈系統

2.1	簡介	27
2.2	均勻的棒	28
2.2.1	具有邊界條件的均勻棒	32
2.2.2	平面波的能流	34
2.3	傳播問題	38
2.3.1	界層對垂直入射的反射	38
2.3.2	諧振棒	41

2 水下音響學

2.3.3 等效半波複諧器.....	45
2.3.4 複合縱振動器的品質因數.....	50
問題.....	52
附註.....	54

3. 波動聲學

3.1 敘述質點性質的方法.....	55
3.1.1 拉氏 (Lagrangian) 解說	55
3.1.2 歐勒 (Eulerian) 解說	56
3.1.3 在歐勒解說中質點性質的時間導數.....	56
3.2 在三維中的波動方程式.....	57
3.2.1 連續方程式.....	58
3.2.2 牛頓第二運動定律.....	60
3.2.3 聲學近解法.....	61
3.2.4 壓力與凝縮的關係.....	62
3.2.5 凝縮與壓力起伏的波動方程式.....	63
3.2.6 速度起伏的波動方程式.....	63
3.2.7 摘要.....	64
3.3 速度位能.....	64
3.4 波動方程式的平面波解.....	65
3.4.1 平面波解的物理意義.....	66
3.4.2 幾個解的實例與特殊關係.....	66
3.5 聲比阻抗.....	68
3.6 流體中波動的速度.....	68
3.7 聲平面波在界壁處的反射與傳播.....	69
3.7.1 正入射——兩種媒質.....	69
3.7.2 正入射——三種媒質.....	72
3.7.3 斜入射——兩種媒質.....	73

3.8	波動方程式對球形擴張波的解	74
3.9	單源	75
3.9.1	源的強度	76
3.9.2	一個單極源的輻射	76
3.9.3	一個兩極源的輻射	77
3.9.4	在無限大的障板中活塞源的輻射	79
3.9.5	活塞源的輻射阻抗	82
	問題	86

4. 基本射線音響學

4.1	簡介	88
4.2	聲音射線的路徑	89
4.2.1	圓形聲音路徑的方程式	89
4.2.2	聲音路徑與速度梯度的關係	90
4.2.3	獲得恒速梯度剖面圖射線路徑的幾何方法	91
4.2.4	聲音在海水中的速度	92
4.2.5	射線路徑數例	93
4.3	聲音在海中的衰減	94
4.4	單一質點散射的簡化原理	96
4.5	水中交混回響	97
4.5.1	「列」長與「乒」長	97
4.5.2	體積交混回響的簡化原理	99
4.5.3	表面交混回響的簡化原理	100
	問題	102

5. 電聲換能器

5.1	電聲換能器如同一個雙口網路	103
5.2	動圈式換能器	105

4 水下音響學

5.3 聲源的等效電路	108
5.4 用作水聽器的動圈換能器	112
5.5 運動阻抗與導納	113
5.6 運動圖與效率	117
5.7 最大效率與功率限制	119
附註	124

6. 磁致伸縮與壓電系統

6.1 簡介	126
6.2 磁場	127
6.3 帶有空隙的磁路	129
6.4 渦流	133
6.5 磁致伸縮	136
6.6 機電耦合係數	138
6.7 極化	140
6.8 磁致伸縮渦卷	141
6.9 等效電路	143
6.10 自由氾濫式渦卷聲源的設計與性能	146
6.10.1 自由氾濫式渦卷的帶寬與頻率	151
6.10.2 高功率下的性能	152
6.11 機電物態方程式	153
6.12 薄壁陶環	156
6.12.1 片段式陶環	160
6.13 壓電陶質縱向振動器	163
6.14 壓電陶質縱向振動器的變化	167
6.14.1 側面連接電極的棒	167
6.14.2 連接對稱負載的壓電棒	169
6.14.3 一端自由的壓電陶質棒	170

6.14.4 複合壓電共振器	171
6.15 壓電彎曲圓盤換能器	172
6.16 無線電工程師協會 (IRE) 對壓電晶體所訂的標準	173
問題	177
附註	179

7. 輻射圖型

7.1 簡介	182
7.2 記錄有指向性的圖型	183
7.3 一點點源的圖型	184
7.3.1 兩點的源	184
7.3.2 多點源	187
7.3.3 一條連續的綫源	189
7.4 分段的綫源	190
7.5 圖型控制	192
7.6 以平面作為聲源	201
7.6.1 源的控制	203
7.7 分裂的波束與複圖型	203
7.7.1 準形列與轉向束	206
7.8 指向性指數	208
7.8.1 指向性因數的計算	211
7.9 換能器表面的繞射效應	212
問題	212
附註	213

8. 換能器數值的估計

8.1 簡介	214
8.2 校準程序	215

6 水下音響學

8.3	互易性	216
8.3.1	互易校準	218
8.4	聲源數值的估計	220
8.5	換能器的功率限制	223
8.6	水聽器的性能限制	229
8.6.1	熱生噪聲	229
8.6.2	等效的噪聲壓力級	230
8.7	水聽器靈敏度	232
	問題	235
	附註	236

9. 收聽與回響測距

9.1	聲納	238
9.1.1	被動式聲納	239
9.2	噪聲	239
2.9.1	噪聲對信號的掩蔽	240
9.3	檢察範圍	243
9.4	回響測距	243
9.4.1	測距方程式	247
9.4.2	回響測距的聲源	248
9.4.3	目標強度	250
9.4.4	交混回響	251
9.4.5	都卜勒效應	253
9.4.6	都卜勒對聽覺識別的效應	254
9.5	聲納應用符號的複習	258
	問題	258
	附註	260

10. 聲納信號的處理

10.1	簡介	262
10.2	信號處理器的使用	269
10.2.1	不連貫 (Incoherent) 時間處理器	272
10.2.1.1	在被动式聲納上的應用	282
10.2.1.2	在一種面積顯示上觀察被动式聲納的輸出	286
10.2.1.3	聲納接收機各參變數的選擇	286
10.2.1.4	主動式聲納	287
10.2.1.5	一個主動式聲納的範例	290
10.2.1.6	其他不連貫處理器的論述	295
10.2.2	連貫處理器	298
10.2.2.1	簡單式匹配濾波器	300
10.2.2.2	多用式匹配濾波器——重摹式相互關連器 (Correlator)	302
10.2.2.3	重摹式 (Replica) 相互關連器的使用	305
10.2.2.4	最佳處理器的範例	308
10.2.2.5	不連貫處理器與匹配濾波器之比較	313
10.2.2.6	隨頻帶寬度而變之從屬性	317
10.2.3	摘要	317
10.3	實際情況的考慮	318
10.3.1	正規化 (Normalization)	319
10.3.2	信號結構	320
10.3.3	顯示	321

附錄1	324
附錄2	336
附錄3 雜表	345
問題解答	353
索 引	359

第一章

振動力學

53.567

7

聲音與振動的關係沒有任何地方較水下音響學中的論證更為明瞭，在水下音響學中，聲波的產生與接收包含以機械裝置所發展的振動。其中有趣而頗為驚人的項目是用來產生我們所關心的聲音位準（或聲音水準）所需的振動位移（Displacement）量。一個三倍於可見光線波長的巔值（或尖峯）位移振幅形成一個相當高的位準（Level），而一個弱的位準僅代表小於原子間隔的距離。我們在水中應用週期性與非週期性的聲音，但頻率的概念對兩者均可適用。由於介質的性質和用以響應的儀表性能，其可能的頻率範圍遠較在空氣中者為大。

第一章介紹簡單振動系統的基本數學。其討論範圍局限於機電的裝置，因為這是應用最廣而且適用於許多目的。對於激勵（Excitation）方法的討論將延至稍後的章節中。依照機電源（Electromechanical Source）的作用，我們可將其納入三部份；電的部份連同兩個或更多的端點（Terminals）；機械部份連同兩個或更多的端點；和介於兩者之間的部份，在該部份具有將某一組端點的事件（Events）轉換至另一組的端點並成為相對事件的能力。此一中間部份（Midsection）的性能須藉兩組端點的數據予以判斷。

在電端點處較易量度的情形使其成為系統的平易入門，而我們一旦將系統設計完成後，決定一個等效電路的等效變換因數將是分析的有力幫助。但是最初關於中間部份的設計則是力學中的問題，故以簡諧振動器（Harmonic Vibrator）力學開始討論較為適當。

2 水下音響學

對於在空氣中應用的體積細小與結構脆弱的聲音接收及發射儀表熟習的人可能對於在水中相同作用的笨重裝置感到驚異。在設計中這個對比的兩種本源必須與兩個介質極端不同的物理特性有關，第三點是基因於水中較大功率的實際應用。在水中某一頻率的平面波經過相等面積的發射所需的聲壓約為空氣中者的 60 倍，但是運動振幅的情況却相反。因此在空氣中適於使用具有較大順應性與位移振幅的揚聲器，但在水中則以小位移而堅硬的壓電棒（Piezoelectric Bar）作為聲源較為適合。兩種介質中聲音速度的不同也有大小不同的輻射面的要求，因為用來解釋輻射面尺寸而具有意義的單位為在介質中輻射聲波的波長。由於水中聲速約為空氣中者四又二分之一倍，所以在水中就方向性來說一個等效的輻射器可能具有一個相當於空氣中的四又二分之一自乘的面積。

1.1 符號與單位

在討論的進行中，我們試行將符號加以闡述並且對大多數在這方面的工作人員所瞭解與使用的聲學專門名詞詳加說明。作者應用「試行」一詞，因為決定大多數工作人員所同意者經常是不容易的。我們假定美國標準協會（American Standards Association）的公佈是這類資料的最佳來源。竭力論辯一套為大家一律接受和一致的符號與單位是不必要的。嘗試訂定一套新的而且是合理的符號與單位將使閱讀產生某些困擾。事實是我們涉及力學，電學與聲學等三種學科的規律，所產生的問題較存在於任何單獨一種者更為困難；例如： I 為一符號，對於這三種科學長期的應用已固定於明確的但相當不同的意義；因此在某一討論當中若出現兩個或更多這樣的符號勢將形成某種混亂的局面。

音響學家對於「MKS」制單位的採用經已減低興趣，這種情形可能的解釋是科學的主要部門已長期應用另一系統，該系統是與基於

生理效應 (Physiological Effect) 而有幾分武斷的定義中的參照水準相關聯。最近發展的水下聲工學已開始採用這種系統。在檢討已往的數據時必須留心，因為他們常以混合的單位表示之而且並無明確的界限，因此可能難作解釋。

在系統中由機械的量變換為相似的電量或作相反的變換時進行的容易可明確地說明「MKS」制的優點。變換因數 (Conversion Factor) 不需轉換 (Transduction) 係數或機電變量器。可惜對於聲壓參照的選擇尚未達成一致。普通使用達因/平方厘米 (dynes / cm^2)、微巴 (microbars)、0.0002 達因/平方厘米、牛頓/平方米 (newtons / m^2) 或微牛頓/平方米等。我們經常會發現距離聲源一碼的壓力級是以這些來自米制的參照之一表示。一致的意見似乎贊成微巴，在本書中我們使用此一單位來表示發射與接收響應中的壓力級。但一般說來，牛頓/米² 被用來表示聲壓。

1.1.1 分 貝

在聲學中一個數量的水準具有特殊的意義。它是某一數量對性質相同的參照量的比率之對數。分貝 (Decibel) 是一個單位，就是上述水準的 10 分之 1 並以 10 為對數的底 (Base)。我們應該對參照量加以確定或作澈底瞭解。要表明分貝符號的若干優點之一，可利用描繪聲壓的水準作為其他變數的函數問題，其中兩者的比率可自 1:1 至 1:10000。以分貝表示壓力水準使作圖簡單和顯露，而在直線的標度 (Scale) 中是不大可能的。

在實用上，分貝標度的方便是使其用途更廣的一種誘力；例如，在發射的問題中，平面波通過介質 1 的間界 (界壁) (Boundary) 而進入介質 2，我們可以將 I_1 與 I_2 強度的比率以分貝差適當地表出，如：

$$10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log I_1 - 10 \log I_2$$

而且

$$I_1 = \frac{p_1^2}{\rho_1 c_1} \quad I_2 = \frac{p_2^2}{\rho_2 c_2}$$

式中 p 為有效 (rms) 壓力, ρ 為密度, 而 c 為相關介質中聲音傳播速度; 我們也可以寫作

$$10 \log \frac{I_1}{I_2} = 20 \log \frac{p_1}{p_2} + 10 \log \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}$$

除非 $\rho_2 c_2 = \rho_1 c_1$, 否則壓力的平方不與強度成比例而且在分貝中表示壓力比是沒有意義的。

1.2 簡諧振動器

這種基本振動系統我們已在聲音的敘述中用來作為介紹基本概念的工具。該系統的功用不限於一, 因為這種概念的許多部份不但與產生聲音的振動機械共通, 而且與這種機械產生的聲波相關聯。簡單的振盪器為一抽象概念, 我們通常以附着於他端固定的彈簧上的質量 m 代表之。該彈簧除了應該無重量外尚須順從虎克定律 (Hook's Law); 即每一單位長度的伸長與產生伸長的力具有直線的關係。因此, 當質量自均衡位置受外力而發生位移時, 一端固定的彈簧施出一個與位移方向相反而大小成比例的力。我們可以坐標 x 作為起自均衡處的位移量, 而當彈簧伸張時 x 值為正, 在縮短時 x 為負。勁度 (Stiffness) 因數 s 為使彈簧伸長或壓縮單位距離時所需的力。假如位移力 f 僅足以維持該質量靜止於 x 點, 在 m 上的合力應為零:

$$sx + f = 0 \quad f = -sx \quad (1.1)$$

或者彈簧所施之力是反抗位移的力, 所以它是在與位移相反的方向。

在 x 點使力 f 降為零，而留下一 sx 為唯一作用於質量 m 的力。這種情形可藉線性二階 (Linear Second-Order) 微分方程描述之：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -sx \quad (1.2)$$

令 $\omega_0^2 = s/m$ ，上式可寫作

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0 \quad (1.3)$$

此方程的一解為正弦函數

$$x = A \cos \omega_0 t \quad (1.4)$$

我們可用圖表方式在 (x, t) 坐標系統上藉長度 A 而以角速度 ωt 旋轉的半徑在一個圓的水平直徑上之投影以代表方程 (1.4)，如圖 1.1 所示。 A 的投影代表一個質量環繞平衡位置 O 的振動。運動是週期性的；也就是每一繞轉 (Revolution) 或一週 (Cycle) 需要一個固定的時間，即週期 T ，而運動是反覆的。近來就通俗的使用對每秒完成的週數即頻率 f ，已繼德國物理學家之後採用赫 (Hz) 的說法。因此我們便有每秒赫週，與每秒千赫 (KHz) 週，這就是大概在水下聲

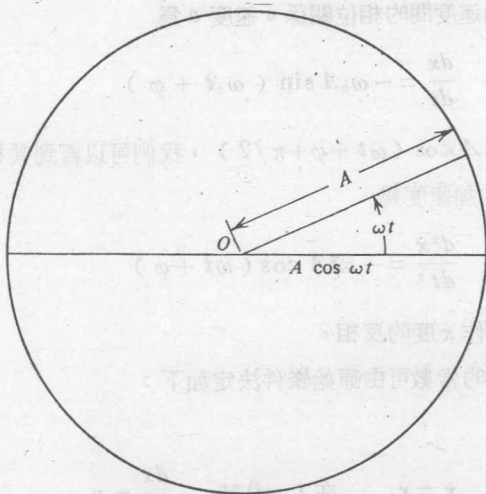


圖 1.1 簡單的振動

6 水下音響學

學中所需的。角速度 ω 即每秒內涵蓋的徑數也是 $2\pi f$ ，並且因為 $\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{s/m}$ ， $f_0 = (1/2\pi) \sqrt{s/m}$ ，其中 f_0 稱為振動的自然頻率。同時 f_0 的倒數為週期 $T = 2\pi \sqrt{m/s}$ 。自 (1.4) 式中，質量由平衡位置的最大位移為 A ， A 就是位移振幅。振動的自然頻率 f_0 是與 A 無關的。

1.2.1 相 位

相位 (Phase) 在水下音響學中比較在聲學的其他部門成為更加重要的部份。角 $\omega_0 t$ 是運動的相位參考其原始位置的一個量。當運動本來具有起始相角 (Phase Angle) φ 時，我們當會選用其他開始時間。其位移將由下式產生之

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (1.5)$$

此式包含對二階微分方程全解所必需的兩個函數，它們也描述運動是如何開始的。藉取 (1.5) 式的導數，我們可以知道介於質量 m 的位移、速度、與加速度間的相位關係。速度 v 為

$$\frac{dx}{dt} = -\omega_0 A \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (1.6)$$

將上式展開得 $A \cos(\omega t + \varphi + \pi/2)$ ，我們可以看到其相角超前位移 $\pi/2$ 。 m 的加速度為

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.7)$$

其相位與位移作 π 度的反相。

(1.5) 式的常數可由原始條件決定如下：

令

$$x = x_0 \quad \text{在 } t=0 \text{ 時} \quad \frac{dx}{dt} = v_0$$