

修訂版

聲學理論與應用

—主動式噪音控制—

白明憲 編著



 全華科技圖書股份有限公司 印行

聲學理論與應用

白明憲 編著

序 言

“聲學”(acoustics)是指聲音的科學，也是物理學中的一門老學問，其基本理論在一個世紀之前，英國的雷利爵士(Lord Rayleigh)和德國的赫姆茲(Helmholtz)兩位科學界的元老已奠下完備的基礎。然而近年來，不論國內外，由於環保意識、勞工安全意識、產品品質意識的抬頭，人們期盼更寧靜的居家生活和工作環境，人們不但希望製造出性能更好的產品，同時也希望製造出更寧靜的產品——事實上，聲音已成爲品質的一部份了。例如今日的汽車設計就很注重噪音、振動、粗糙度(noise, vibration and harshness, NVH)的改善。另外，與聲學有關的應用也遍及許多領域。例如工業噪音防治、非破壞性檢測(non-destructive testing, NDT)、醫療診斷、建築聲學設計、樂器設計、通訊、語音辨識與合成、電聲換能器、音響工程、主觀聲學、地震偵測、水下資源探勘、機械故障監測診斷、消音器設計、主動式噪音控制等範疇，不一而足。

雖然聲學應用的重要性與日俱增，學術界與產業界對聲學相關的課程需求日殷，國內中文的聲學教材卻又相對稀少。國外雖然不乏原文的聲學專書，卻各有所偏，有些又過於艱澀，使得讀者在專業隔閡之外，加上語言障礙，研讀常會發生事倍而功半的現象。筆者自返國任教近十載，從事聲學與振動相關之教學與研究工作。有感於國內鮮有本土化的聲學教材，因此著手將過去課堂的講義整理成書，希望能對國內聲學教育盡一己貢獻之力。本書的目的旨在：

1. 提供大專院校及工業界，有關聲學的入門教材。
2. 介紹初學者對聲學理論廣泛的基本觀念。
3. 建立讀者將聲學理論化為應用的橋樑。

本書的架構大體分為理論與應用篇兩個部份。理論篇的內容主要包含聲場統御方程式、反射與透射現象、聲學輻射原理等；應用篇的內容則主要包含聲學濾波器與消音器設計、建築聲學、噪音診斷與防治、主動噪音控制等。因為本書著重在聲學的一些核心觀念的介紹，所以內容方面採重點選擇性的方式，以免過度流於瑣碎。其他領域，諸如彈性波、氣動聲學(aeroacoustics)、心理聲學、生理聲學、樂器聲學、非線性聲學、水下聲學、語音等，因限於篇幅，只好割愛。對於一些理論的證明，因過於繁雜而予以省略(或代以文獻的引用)，以免影響讀者對重點的掌握。

本書倉促付梓，疏漏之處，在所難免。祈望各界學者先進惠以斧正，以便爾後之修訂。在此要感謝全華科技圖書公司施顧問議訓之協助，俾使本書能付梓出版。本書第五章電聲換能器的撰寫受到1996年筆者在賓州州立大學訪問期間向CAV Prof Gary Koopmann的諸多請益以及Dr. William Thompson Jr.在Applied Research Lab 所開課程助益頗多，特此感謝。另外，感謝本屆研究生陳修弘、林育正、羅偉賓、曾平順、蘇怡賓、歐昆應、黃大隆、林靜臣、黃河潤等諸先生的協助，和從前各屆研究生之研究成果，無法逐一詳列，謹此致歉。最後要感謝妻子春美對個人研究工作的無限體諒與鼓勵，謹以此書獻給我的家人春美、瓊寧、皓天。

白明憲 謹識
於國立交通大學
機械工程學系

第二版序言

在本書第一版出刊之後，即獲得聲學領域的學者專家先進熱烈的迴響與指正，至今匆匆已過一年餘。在這段期間，筆者立即將這些寶貴的意見整理彙總，並且著手進行本書的修訂改寫工作。經過三年的努力，總算完成此第二版的修訂。修訂版除了改正初版的許多打字錯誤之外，並在內容上有所增補。比較顯著的改寫或補充內容如次：

1. 第一章：將複數相位子的概念推廣到窄頻信號表示法；介紹聲場之時間/空間域與頻率/波數域之四維傅利葉轉換關係。
2. 第三章：加入邊界元素法基本概念的介紹；補充陣列相關的時間/空間域信號處理觀念。
3. 第五章：補充動圈式揚聲器的機電常數估測與壓電換能器一節。
4. 第七章：增加"音線法"的簡介。
5. 第八章：補充氣動聲學和風扇噪音的分析與防治。
6. 第九章：加入數位信號處理的基本觀念、主動結構聲場控制(ASAC)的介紹。

一如初版序所言，本書之目的在於提供學界及業界一套聲學的入門教材。尤其是後者，筆者今年甫承辦一項"教育部產學產學合作教育中心"的計畫，主題為噪音與振動工程，而本書即列

爲重要的教材。希望本書在修訂之後，內容能夠更趨周延，同時更能符合學界及業界的實際需要。

白明憲 謹識
於國立交通大學
機械工程學系

編輯部序

「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所提供給您的，絕不只是一本書，而是關於這門學問的所有知識，它們由淺入深，循序漸進。

「聲學」是指聲音的科學，泛指一切有關聲音的學問，本書作者有感於現今的社會裡聲學的應用重要性與日俱增，學術界與產業界對聲學相關的課程需求日殷，但國內中文的聲學教材卻非常稀少，因此將自己十餘年的教學與研究經驗及課堂上的講義編著成書，希望對國內聲學教育盡綿薄之力。本書主旨在：1.提供學界及業界聲學的入門中文教材。2.建立初學者對聲學理論廣泛的基本觀念。3.介紹與聲學相關的各種應用。4.介紹主動式噪音控制的新科技。讀者在讀完本書後可輕鬆地建立對聲學的理論架構和實務基礎。

同時，為了使您能有系統且循序漸進研習相關方面的叢書，我們以流程圖方式，列出各有關圖書的閱讀順序，以減少您研習此門學問的摸索時間，並能對這門學問有完整的知識。若您在這方面有任何問題，歡迎來函連繫，我們將竭誠為您服務。

目 錄

第 1 章 聲場統御方程式	1-1
1-1 前 言	1-1
1-2 狀態方程式(equation of state)	1-5
1-3 連續性方程式(equation of continuity)	1-6
1-4 動量方程式(equation of momentum)	1-7
1-5 波動方程式(wave equation)	1-10
1-6 速度位能(velocity potential)	1-13
1-7 聲場能量密度(acoustic energy density)	1-15
1-8 聲速(speed of sound)	1-17
1-9 簡諧分析(harmonic analysis)	1-19
1-10 平面波(plane waves)	1-27
1-11 球面波(spherical waves)	1-32
1-12 分貝(dB, decibel)	1-35
習 題	1-37

第2章 反射與透射現象

2-1

2-1 前 言	2-1
2-2 流體間之透射：正向入射(normal incidence)	2-3
2-3 多層流體間之透射	2-6
2-4 斜向入射(oblique incidence)	2-9
2-5 流體與固體界面：吸音材料	2-14
2-5-1 單層界面：斜向入射	2-14
2-5-2 吸音材料(sound-absorbing materials)	2-16
2-6 隔音板(partition)	2-21
習 題	2-30

第3章 聲學輻射、散射與繞射

3-1

3-1 前 言	3-1
3-2 預備知識	3-2
3-2-1 脈動球(pulsating sphere)	3-2
3-2-2 格林函數(Green's function)	3-4
3-2-3 聲學互易性(acoustic reciprocity)與簡單 聲源(simple sources)	3-15
3-3 基本聲源模型	3-20
3-3-1 偶極子	3-20
3-3-2 陣列(array)	3-25
3-3-3 線聲源(continuous line source)	3-32
3-3-4 屏障活塞(baffled piston)	3-35

3-4 集中參數輻射模式 (lumped parameter radiation model).....	3-48
3-5 聲場與結構互制現象.....	3-51
3-5-1 輻射阻抗(radiation impedance).....	3-51
3-5-2 聲場與結構耦合.....	3-58
3-6 平板聲學輻射.....	3-60
3-6-1 平板彎曲振動.....	3-60
3-6-2 無限平板之聲學輻射.....	3-63
3-6-3 有限平板之聲學輻射.....	3-70
3-6-4 點激振無限平板的聲學輻射.....	3-76
3-7 散射(scattering).....	3-79
3-8 繞射(diffraction).....	3-83
習題.....	3-88

第4章 管路與密閉空間聲場 4-1

4-1 前言.....	4-1
4-2 一維管路聲場.....	4-2
4-2-1 管路聲場與共鳴現象.....	4-2
4-2-2 駐波(standing wave)與阻抗管 (impedance tube).....	4-5
4-2-3 其他效應.....	4-10
4-2-4 號角(horn).....	4-14
4-3 三維管路聲場：波導(waveguides).....	4-17
4-4 三維密閉空間聲場(enclosed field).....	4-25
習題.....	4-33

第5章 機電聲類比與換能器原理

5-1

5-1 前 言.....	5-1
5-2 電路類比(circuit analogy).....	5-2
5-2-1 機械系統.....	5-3
5-2-2 動性類比與阻抗類比間的轉換.....	5-9
5-2-3 聲學系統.....	5-11
5-2-4 基本換能機制.....	5-18
5-3 機電雙埠(electro-mechanical two-ports).....	5-26
5-4 揚聲器(loudspeaker).....	5-38
5-5 麥克風.....	5-51
5-5-1 動圈式麥克風(moving-coil microphone).....	5-51
5-5-2 靜電式麥克風(electrostatic microphone).....	5-54
5-6 壓電換能器(piezoelectric transducers).....	5-64
習 題.....	5-84

第6章 聲學濾波器與消音器設計

6-1

6-1 前 言.....	6-1
6-2 赫姆茲共鳴器與機電聲類比.....	6-2
6-3 聲學濾波器(acoustic filter)與聲源等效電路.....	6-8
6-4 轉移矩陣(tranfer matrix).....	6-13
6-4-1 基本聲學單元.....	6-13
6-4-2 雙埠與聲學濾波器分析.....	6-20
6-5 反應型消音器實例.....	6-24
6-6 耗散型消音器.....	6-33

習 題.....	6-35
----------	------

第7章 建築聲學	7-1
-----------------	------------

7-1 前 言.....	7-1
7-2 擴散聲場模式.....	7-2
7-3 直接聲場(direct field)與殘響聲場 (reverberant field).....	7-8
7-4 聲功率量測.....	7-11
7-5 防音罩(enclosure).....	7-17
7-6 透射損失(transmission loss).....	7-20
7-7 音線法.....	7-21
習 題.....	7-25

第8章 噪音診斷與防治	8-1
--------------------	------------

8-1 前 言.....	8-1
8-2 噪音診斷(noise diagnostics).....	8-5
8-2-1 噪音型態.....	8-5
8-2-2 噪音量測基礎.....	8-7
8-2-3 噪音量測指標.....	8-11
8-2-4 噪音源辨識(noise source identification).....	8-15
8-2-5 氣動力噪音(aerodynamic noise).....	8-28
8-3 噪音防治.....	8-38
8-3-1 噪音問題構成要素.....	8-38
8-3-2 防治對策與一般性原則.....	8-39
8-3-3 噪音診斷與防治流程.....	8-42
8-3-4 防治元件.....	8-45

習 題.....	8-56
----------	------

第9章 主動噪音控制	9-1
-------------------	------------

9-1 前 言.....	9-1
9-2 ANC 物理.....	9-8
9-2-1 消音機制.....	9-8
9-2-2 二次控制目標函數.....	9-10
9-2-3 ANC 問題之複雜性.....	9-19
9-3 ANC 控制系統分析與設計.....	9-22
9-3-1 標準控制架構 (standard control framework).....	9-22
9-3-2 空間前饋結構 (spatially feedforward structure).....	9-31
9-3-3 ANC 結構的選擇.....	9-38
9-3-4 控制演算法.....	9-43
9-4 ANC 系統實現.....	9-51
9-4-1 ANC 系統架構.....	9-51
9-4-2 換能器位置與數量.....	9-56
9-4-3 系統識別.....	9-59
9-5 結論與展望.....	9-62
習 題.....	9-63

中英文對照表	中-1
---------------	------------

附 錄	附-1
------------	------------

A. 介質特性.....	附-1
--------------	-----

第 1 章

ACOUSTICS

聲場統御方程式

1-1 前言

聲學(acoustics)這個名詞的意義乃泛指一切有關聲音(sound)的學問，在一世紀前，物理學家雷利(Rayleigh, 1945)和赫姆茲(Helmholtz)就已建立其基礎理論。而聲波(acoustic wave)則是以一種壓力波的形式在可壓縮的介質(compressible medium)中傳遞。在約10Hz~20kHz的範圍，人耳可對此種壓力波產生感覺。在此頻率範圍的聲音稱為可聽見聲(audible sound)；在此頻率範圍之下的聲音稱為低音波(infra sound)；在此頻率範圍之上的聲音稱為超音波(ultra sound)。有些動物如狗或蝙蝠可聽見低音波與超音波。基本上，人耳對聲音高低的感覺與頻率的對數尺度有正向的關係。在可聽見聲的範圍，32~512Hz 為樂音之低音部份(bass)，一般重低音補償之中心頻率在 64~128Hz 的範圍；電話音訊大約是在 512~2048Hz的區間；而 2048~8192 稱為“臨場範

圍”(presence range)，如果缺乏此頻率範圍的聲音，雖不致影響語音辨識的正確性，卻會產生“不在場”的感覺；至於8192~16384 Hz則稱為“清晰範圍”(brilliance range)，此頻率範圍對樂音的清晰度極為重要(Leach, 1999)。

聲波是一種“機械波”(mechanical wave)，故需倚靠介質傳遞。如果該介質的“黏滯性”(viscosity)極小(例如空氣)，聲波復以疏密波或“縱波”(longitudinal wave)的形式傳遞(圖 1-1)，亦即介質分子振動方向與波傳方向相同。欲描述此種波動現象，需借助介質連續性的考慮、力之平衡、及熱力學原理，以推導聲場之基本統御方程式—“波動方程式”(wave equation)。在推導之前需要一些流體力學方面的預備知識。

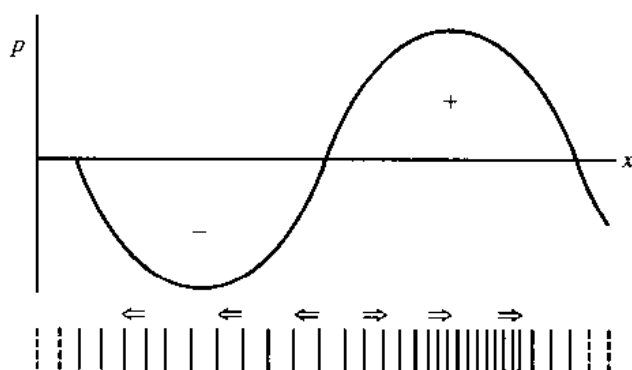


圖 1-1 平面疏密波

首先要介紹的就是“尤拉座標”(Eulerian coordinates)及“拉格蘭治座標”(Lagrangian coordinates)。兩者主要的區別在於前者以在空間中固定的“控制體積”(control volume)為基礎；後者則以隨著介質流動的控制體積為基礎(圖 1-2)。因此，對前者而言，一個物理量(例如質量 M)同時是位置 x 與時間 t 的函數： $M =$

$M(\mathbf{x}, t)$ ；對後者而言，位置 $\mathbf{x}$ 又是時間 t 的函數，故 $M=M(t)$ 。兩種座標系統皆可用來描述流體的運動。不過對一些物理上“守恆律”(conservation laws)的使用(例如質量守恆)，拉格蘭治座標可能比較方便。在拉格蘭治座標底下，一個物理量對時間的變化率稱為“物質導數”(material derivative)，亦即

$$\frac{DM}{Dt} = \frac{\partial M}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) M \quad (1-1)$$

其中 $\mathbf{u}$ 為流體速度，“ ∇ ”為“梯度”(gradient)。另外，在拉格蘭治座標之下，微分與積分的運算不可直接交換，必須加上一個修正項：

$$\frac{D}{Dt} \int_V \alpha dV = \int_V \left[\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) \right] dV \quad (1-2)$$

其中 V 為控制體積， α 為某一物理量，“ $\nabla \cdot$ ”為“散度”(divergence)。上式即為所謂的“雷諾傳輸原理”(Reynold's transport theorem)。該定理的詳細推導可參見文獻(Currie, 1974)。

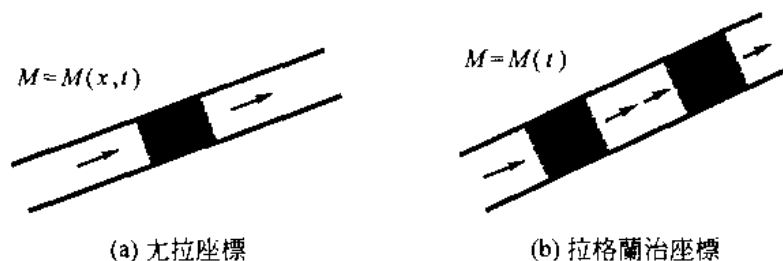


圖 1-2 控制體積

在正式推導聲場的統御方程式之前，吾人先定義下列符號：

- ρ ： 瞬間密度
- ρ_0 ： 平衡密度
- ρ' ： 微擾密度， $\rho' = \rho - \rho_0$
- p ： 瞬間壓力
- p_0 ： 平衡壓力
- p' ： 微擾壓力或聲壓(sound pressure)， $p' = p - p_0$
- $\mathbf{u}$ ： 瞬間粒子速度(particle velocity)
- $\mathbf{u}_0$ ： 平衡粒子速度
- $\mathbf{u}'$ ： 微擾粒子速度， $\mathbf{u}' = \mathbf{u} - \mathbf{u}_0$

在此應注意的是人耳會對聲波產生感覺，是由於上述微擾壓力 p' 的部份，而平衡壓力 p_0 (亦稱靜壓力)並不會產生聲音。另一點值得注意的是所謂粒子速度指的不是介質分子的速度，而是較巨觀的“連體”(continuum)概念中的一個單元，在這單元的體積中的任何聲學變數皆可視為定值。密度與壓力皆為“純量”(scalar)；粒子速度則為向量。在下一節的推導當中，吾人將使用一般“線性聲學”(linear acoustics)中常見的假設：介質為“均質”(homogeneous)，“等向性”(isotropic)，“無黏滯性”(inviscid)，“絕熱”(adiabatic)。同時所有擾動相較於平衡值皆屬極小擾動。