



聲學

原理 與

Acoustic Principle

噪音

Noise Survey Control

量測控制



蔡國隆 · 王光賢 · 涂聰賢 編著

修訂版

聲學原理與噪音量測控制

蔡國隆 · 王光賢 · 涂聰賢 編著



 全華圖書股份有限公司

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

聲學原理與噪音量測控制 / 蔡國隆, 王光賢,

涂聰賢編著. -- 二版. -- 臺北市: 全華,

2005[民 94]

面; 公分

ISBN 978-957-21-5117-4(平裝)

1. 聲學

334

94017674

聲學原理與噪音量測控制

作者 / 蔡國隆 · 王光賢 · 涂聰賢

執行編輯 / 曾琬惠

發行人 / 陳本源

出版者 / 全華圖書股份有限公司

郵政帳號 / 0100836-1 號

印刷者 / 宏懋打字印刷股份有限公司

圖書編號 / 0561101

二版二刷 / 2011 年 1 月

定價 / 新台幣 480 元

ISBN / 978-957-21-5117-4 (平裝)

全華圖書 / www.chwa.com.tw

全華網路書店 Open Tech / www.opentech.com.tw

若您對書籍內容、排版印刷有任何問題，歡迎來信指導 book@chwa.com.tw

臺北總公司(北區營業處)

地址: 23671 新北市土城區忠義路 21 號

電話: (02) 2262-5666

傳真: (02) 6637-3695、6637-3696

中區營業處

地址: 40256 臺中市南區樹義一巷 26-1 號

電話: (04) 2261-8485

傳真: (04) 3600-9806

南區營業處

地址: 80769 高雄市三民區應安街 12 號

電話: (07) 862-9123

傳真: (07) 862-5562

全省訂書專線 / 0800021551

有著作權 · 侵害必究

¥147

序 言

聲學為物理學中最早發展的領域之一，廣泛的實用性與擴延性為其主要特點。但是也因為聲音存在於周圍環境，以致於大多數的時間我們會忽略噪音對我們的影響與危害。

本書撰寫的目的是提供基礎聲學的觀念以及教學使用。本書主要分為三部份：聲學概念、聲音量測以及噪音控制，共區分為十章節。第一、二章介紹聲音的基本觀念，屏除許多困難的公式，提供最基本的理論給讀者。第三、四章介紹聲音量測設備以及分析技術，在導入聲音量測之前可以對使用的設備以及技術具有初步的認知。第五至九章介紹聲音量測最基本的方法，包含產品聲壓、環境噪音、聲強、聲功率以及建築聲音的量測方法，主要參照各標準所規定的量測模式，讓讀者在真正執行量測時可獲得更精確的結果。第十章介紹聲音控制方法與實例，作為噪音改善的參考。

能夠完成此書，首先要感謝我的碩士班學生王光賢努力的蒐集資料外，也參與了其中幾章的撰寫；博士班學生涂聰賢對於我所寫的內容加以斟酌與審定；碩士班學生李東微、劉翰學的校稿，沒有他們的幫助就沒有這本書的誕生。另外，在此要感謝必凱科技公司提供如此完善的資料，使得本書的內容得以更加完美。

我並沒有提出更新穎的見解，書本上所列的資料完全可以由其他的參考書籍獲得。這本書完成的主要目的在於整理出所有可用的工具，也算是我這幾年教學所獲心得。

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。

本書首先以最基本的聲學概念引導讀者進入聲學工程此學問，藉由淺而入深的編排方式使讀者清楚了解聲學分析標準規定或相關測量學問，使讀者實際操作時更能了解其聲學標準規範。適用於大學、科大、技術學院之機械相關科系「聲學原理」課程使用以及對此課程有興趣者。

若您在這方面有任何問題，歡迎來函詢問，我們將竭誠為您服務。

目 錄

聲學原理與噪音量測控制

第 1 章 基礎聲學

1.1 波與聲波(Wave and Sound Wave)	1-2
1.2 聲音基本參數(Basic Parameter of Sound).....	1-7
1.3 聲波的傳遞方式(Propagation of Sound Wave)	1-8
1.4 影響空氣中聲波傳遞的因素(Influence Factor of Sound Wave in Air)	1-15
1.5 聲音大小的表示法(Representation of Sound Level)...	1-18
1.6 頻率與八度音(Frequency and Octave)	1-26
1.7 聲速與粒子速度(Sound Speed and Particle Velocity). 1-29	
1.8 音源(Sound Source)	1-33
1.9 音場特性(Characteristic of Sound Field).....	1-35
1.10 指向性(Directivity)	1-38
1.11 聲波的波動方程式(Wave Equation of Sound Wave). 1-41	
1.12 結構噪音(Structure – borne Noise)	1-44
1.13 其他聲音特性(Other Acoustic Characteristic)	1-53
1.14 問題(Question).....	1-56

第 2 章 聲音感知之生理構造

2.1 耳朵與聽覺(Ear and Hearing)	2-2
2.2 聽覺範圍(Auditory Field)	2-5
2.3 聲音的心理特性(Psychological Characteristics of Sound)	2-6

2.4	聽覺障礙(Hearing Impairment)	2-12
2.5	聽覺損失指標(Hearing Loss Index)	2-14
2.6	實驗(Experiment)	2-15
2.7	問題(Question)	2-17

第 3 章 量測設備與特殊測試環境

3.1	麥克風(Microphone)	3-2
3.2	電容式麥克風特性(Characteristics of Condenser Microphone)	3-5
3.3	前置放大器(Preamplifier)	3-12
3.4	噪音計(Sound Level Meter)	3-13
3.5	噪音劑量計(Dose Meter)	3-21
3.6	校正器(Calibrator)	3-22
3.7	參考音源(Reference Sound Source)	3-24
3.8	類比數位處理過程(Analogue and Digital Signal Processing)	3-25
3.9	頻譜分析儀(Spectrum Analyzer)	3-26
3.10	無響室(Anechoic Chamber)	3-30
3.11	迴響室(Reverberation Chamber)	3-36
3.12	實驗(Experiment)	3-39
3.13	問題(Question)	3-42

第 4 章 頻率分析

4.1	時域訊號(Time Domain Signal)	4-2
4.2	傅立葉轉換(Fourier Transform)	4-7
4.3	數位濾波器(Digital Filter)	4-23
4.4	FFT 頻率分析特性(FFT Analysis Characteristic)	4-29

4.5	實驗(Experiment).....	4-42
4.6	問題(Question).....	4-45

第 5 章 聲壓量測

5.1	參數(Parameter)	5-2
5.2	聲壓量測過程與影響(Procedure and Influence in Sound Measurement)	5-5
5.3	聲壓量測依噪音源分類(Sound Pressure Measurement Classed by Sound Source)	5-9
5.4	聲壓量測標準(Sound Pressure Measurement Standard)	5-11
5.5	標準－ISO 11201(Standard－ISO 11201).....	5-13
5.6	標準－ISO 11202(Standard－ISO 11202).....	5-25
5.7	噪音分析(Noise Analysis)	5-28
5.8	實驗(Experiment).....	5-32
5.9	問題(Question).....	5-34

第 6 章 環境噪音量測與法規

6.1	國內噪音作業問題探討.....	6-2
6.2	環境噪音來源(The Source of Environmental Noise).....	6-4
6.3	環境噪音指標與量測(Environmental Noise Index and Measurement).....	6-6
6.4	室內噪音指標與量測(Indoor Noise Index and Measurement).....	6-8
6.5	交通噪音指標與量測(Traffic Noise Index and Measurement).....	6-15
6.6	航空噪音指標與量測(Aircraft Noise Index and	

Measurement).....	6-21
6.7 噪音暴露(Noise Exposure).....	6-25
6.8 噪音管制標準	6-31
6.9 噪音管制法施行細則	6-40
6.10 環境音量標準	6-46
6.11 機動車輛噪音管制辦法與標準	6-51
6.12 民用航空器噪音管制標準	6-53
6.13 實驗(Experiment).....	6-55
6.14 問題(Question).....	6-58

第 7 章 聲強量測

7.1 聲強(Sound Intensity)	7-2
7.2 聲強量測設備(Sound Intensity Measurement Equipment)	7-6
7.3 聲強量測限制(Limitation of SI Measurements)	7-12
7.4 噪音源定位(Noise Source Identification)	7-17
7.5 問題(Question).....	7-19

第 8 章 聲功率量測

8.1 聲功率原理(The Principle of Sound Power).....	8-2
8.2 聲功率量測方法與標準(The Method and Standard of Sound Power Measurement).....	8-7
8.3 聲功率量測－自由音場法(Sound Power Measurement－Free－field Method)	8-10
8.4 標準－ISO 3744 (Standard－ISO 3744).....	8-12
8.5 聲功率量測－迴響音場法(Sound Power Measurement－Reverberation－field Method)	8-27

8.6	聲功率量測－聲強法(Sound Power Measurement－Sound Intensity Method)	8-30
8.7	標準－ISO 9614－1 (Standard－ISO 9614－1).....	8-33
8.8	測試法規－ISO 7779(Test Code－ISO 7779)	8-41
8.9	實驗(Experiment).....	8-50
8.10	問題(Question).....	8-51

第 9 章 建築聲學量測

9.1	迴響與迴響時間(Reverberation and Reverberation Time)	9-2
9.2	室內迴響時間量測－ISO 3382(Measurement of The Reverberation Time of Rooms).....	9-5
9.3	吸音係數量測(Sound Absorption Coefficient Measurement)	9-10
9.4	迴響室法吸音係數量測－CNS 9056(Method for Measurement of Sound Absorption Coefficients in a Reverberation Room)	9-17
9.5	聲音穿透損失量測－CNS 8466(Sound Transmission Loss Measurement).....	9-20
9.6	實驗(Experiment).....	9-25
9.7	問題(Question).....	9-30

第 10 章 噪音控制原理與實務

10.1	噪音控制計劃與步驟(The Steps in a Noise Control Program)	10-2
10.2	噪音源改善(Improvement Noise Source).....	10-3

10.3	傳遞路徑改善(Improvement Noise Transmission Path)	10-7
10.4	噪音控制實例(Noise Control Practical Examples) ..	10-19
10.5	主動式噪音控制簡介(Active Noise Control)	10-33

附錄 A 與聲音量測相關的 ISO 標準列表

附錄 B 波動方程式解

B.1	起始與邊界條件(Initial and Boundary Conditions).....	B-1
B.2	波動方程式解(The solution of Wave Equation)	B-2
B.3	兩端固定、不受外力的弦(Both End Fixed String Without Force).....	B-4

附錄 C 建築材料吸音係數



Chapter 1

基礎聲學

聲音存在於日常生活中，人們無時無刻都會感覺到聲音的存在。聲音產生是因為在靜態大氣壓力之下空氣粒子的震盪，聲波經由一個空氣粒子傳送到另外一個空氣粒子，形成空氣粒子的波動。透過空氣作為傳遞介質的聲波，波動能量傳遞到耳朵後，經由耳鼓膜振動傳遞到聽覺神經而讓我們感受到聲音。

聲音對人而言是重要的，甚至有些聲音是人們希望或是人為製造的。舉例而言，人與人溝通最主要的方式是談話，交談就是一種聲音；某些聲音如電話鈴響或是鬧鐘聲響等，是人為製造產品時特別設計的，目的是要讓人們被告知個別情況的發生。樂器演奏產生音樂的樂音、唱歌的歌聲是用來表達出情感，並且讓人覺得舒服。另外，聲音還有預警的功能，例如：救護車來之前會先用聲音警示，火車、船都會用汽笛通知。

噪音指的是不想聽的聲音，或者是令人不愉快的聲音，如飛機起降的聲音、割草機的聲音等。事實上很難清楚定義噪音與聲音的差別，最主要的原因是聲音

的感受和心理有關，針對不同的人在不同的時間、地點，對聲音與噪音的感受性以及分辨性都不同。因此，判斷聲音是否為噪音具有相當的主觀性。另外，所處的環境聲音大小也會影響人對於噪音的承受度。

雖然很難去定義什麼是噪音，但是根據許多法規的規定，聲音超過管制的標準，或是過大的聲音都定義為噪音。我國噪音管制法內定義「發生之聲音超過噪音管制標準稱為噪音」；而勞工安全衛生設施規則第三百條內亦有如下的定義：「勞工工作場所因機械設備所發生之聲音超過 90 分貝時，雇主應採取工程控制、減少勞工噪音暴露時間」；美國職業安全衛生署定義「聲音大到足以傷害聽力都稱為噪音」。過大的聲音以及過長的暴露量對人的聽覺都會造成永久的傷害，這些聲音皆可稱之為噪音。為了瞭解噪音對人的影響，最簡單的方法是利用聲音的大小以及暴露於聲音環境的時間長短來定義噪音。

1.1 波與聲波(Wave and Sound Wave)

■ 1.1.1 波(Wave)

當一靜止的氣體、流體或是固體受到干擾而產生微小的擾動，這些擾動會隨著傳遞介質向四周擴散，隱含於擾動運動中的能量也會隨著擾動向四周擴散，但是在這個過程中，受擾動的介質粒子僅會在原處附近運動，這種僅傳遞擾動能量而不傳遞受擾動的介質粒子的現象稱之為波。

因為介質具有恢復原平衡狀態的能力，因此在波產生後，隱含在介質運動中的動能(kinetic energy)以及介質中恢復平衡狀態能力的位能(potential energy)會產生能量的互相交替，而逐漸地將能量傳離波源，最後介質則會逐漸的恢復到原本的平衡狀態。因此，要能夠提供波動傳遞的介質必須要具有可承受壓縮的彈性介質，在完全剛性的介質中，波動無法傳遞。

波的種類可分為縱波(longitudinal wave)與橫波(transverse wave)兩種，說明如下：

- (1) 縱波：又稱為壓力波(compression wave)，介質受到壓力應變後擾動所產生的波動，方向與粒子運動方向平行，如聲波，彈簧波等。

(2) 橫波：又稱為剪力波(shear wave)，介質受到剪力應變後擾動所產生的波動，方向與粒子運動方向垂直，如繩波等。

■ 1.1.2 聲波(Sound Wave)

聲波的產生是因為傳遞介質受到聲音能量的擾動後，介質的彈性特質產生聲音能量傳遞的波動現象，因此任何具有可壓縮性的介質，如空氣、水等皆可傳遞聲波。雖然在一般的流體力學上，水被視為不可壓縮流體，但是實際上仍具有可壓縮性；甚至於一般視為剛體的固態物質，仍具有微量可壓縮變形的特性，因此聲波可以在氣體、液體以及固體中傳遞。在真空中或完全的剛性介質中，聲波則無法傳遞。

聲波在空氣中的剪力非常小，因此可視為只有縱波的形式存在。而當聲波在水中傳遞時，水為具有黏滯性的液體，故聲波在水中同時具有壓力與剪力兩種型式，因此水中的聲波具有兩種波的特性。同樣的，在固體中聲波亦同時具有兩種型式。

討論聲音在空氣中的傳遞，聲音能量使空氣分子產生振動，在振動的過程中，空氣粒子一下擠壓一下稀疏，如此往返的運動把波動向前傳遞，而傳遞的介質並不隨波動向前移動仍舊在原地振盪。如圖 1.1，當敲擊一音叉時，如果我們可以看見空氣分子，就會看見扮演波動傳遞的空氣分子產生密集與疏張的分佈。



圖 1.1 利用音叉產生聲音

聲音能量經由空氣粒子傳遞，因為在傳遞聲音能量時空氣粒子疏密的變化，其空氣壓力也不相同。因此，聲音振幅與壓力振幅的表示方式及單位皆相同。一個大氣壓力大約等於 100000 Pascal，而人耳朵可以聽到的聲壓量從 10^{-6} 到 10^2

Pascal，因此就兩者間比較，聲音僅具有微弱的量。我們所討論的聲壓變化量事實上只是在一個大氣壓力下聲音壓力的微量變化，這個變化和我們所處位置的大氣壓力大小無關。

■ 1.1.3 波的參數(Parameters of The Wave)

以下的定義與術語常用來描述波的現象：

- (1) 循環(cycle)：從平衡位置往正向移動後，回歸到平衡位置，再往負向移動後，再回歸到平衡位置，稱之為一個循環。
- (2) 波長 λ (wavelength)：表示兩波峰(或是波谷)間的距離，一個完整波動循環的長度稱為波長。
- (3) 波數 k (wave number)：波數為波長的倒數，表示 2π 內所包含的波動循環數目，如式(1.1)。

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \dots\dots\dots(1.1)$$

- (4) 週期 T (period)：表示兩波峰、或是在任何波動間相鄰兩個相位點間的時間差，亦即循環一次所需要的時間。
- (5) 頻率 f (frequency)：表示單位時間內波動循環的次數，為週期的倒數，如式(1.2)。

$$f = \frac{1}{T} \dots\dots\dots(1.2)$$

- (6) 角頻率 ω (angular frequency)：表示 2π 內波動循環的次數。角頻率為頻率乘上圓徑度，如式(1.3)。

$$\omega = 2\pi f \dots\dots\dots(1.3)$$

- (7) 波速 c (wave velocity)：表示波前進的速度。波速為波長除以週期，即波長乘以頻率，如式(1.4)。

$$c = f \times \lambda = \frac{\omega}{k} \dots\dots\dots(1.4)$$

- (8) 相位 φ (phase)：表示某瞬時間兩質點的相對位置。在隨時間變化的波形中，相位表示兩質點的時間差。
- (9) 振幅 A (amplitude)：表示由平衡點到波峰或波谷的最大位移量。對於時間域上的訊號，通常會利用圖 1.2 中所列出的參數來作為振幅的表示方法。

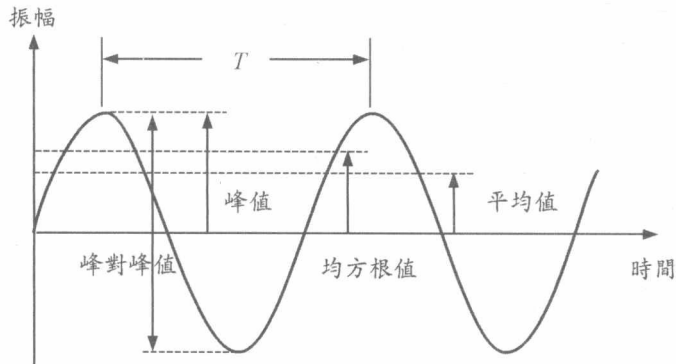


圖 1.2 振幅大小的參數

- ① 峰值(peak value)：表示量測時間內由零點到最高點的振幅大小值。
- ② 峰對峰值(peak to peak value)：表示量測時間內由振幅最低點到最高點的振幅大小值。
- ③ 平均值(average value)：表示量測時間內所有振幅絕對值的平均數，如式(1.5)。

$$\text{Average} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad \dots\dots\dots (1.5)$$

- ④ 均方根值(RMS value)：表示量測時間內所有振幅的平方、平均後開根號的值，如式(1.6)。

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad \dots\dots\dots (1.6)$$

- ⑤ 波峰因數(crest factor)：表示峰值與均方根值的比值，如式(1.7)。波峰因數很大時，表示波形中所含的峰值高但是其均方根值小，此意謂著波形中含有一個以上的衝擊訊號。

$$F_c = \frac{A_{peak}}{A_{rms}} \dots\dots\dots (1.7)$$

⑥ 波形因數(form factor)：表示均方根值與平均值的比值，如式(1.8)。

$$F_f = \frac{A_{rms}}{A_{average}} \dots\dots\dots (1.8)$$

■ 1.1.4 聲波在時間與空間的變化(Sound Wave in Time and Space)

圖 1.3 表示單一頻率的聲音波動現象，在一固定位置點觀察介質振盪的位移量隨時間變化關係。假設波形為餘弦函數，則整個波形可以由式(1.9)表示，其中 $p(t)$ 代表聲壓隨時間變化函數， ϕ_t 為時間起始相位。

$$p(t) = p_0 \cos(\omega t + \phi_t) \dots\dots\dots (1.9)$$

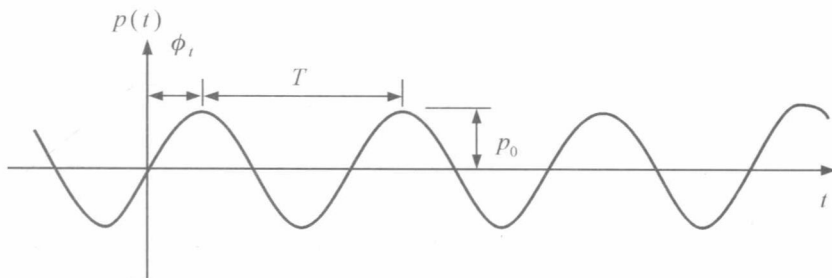


圖 1.3 聲波隨時間 t 的變化

圖 1.4 表示單一頻率的聲音波動在某一瞬時間的波形隨位置變化的關係。波形上任何一點稱之為相位點(phase point)，相同相位點所形成的面稱之為波前(wave front)。假設波形為餘弦函數，則整個波形可以由式(1.10)表示，其中 $p(x)$ 代表聲壓隨位置變化函數， ϕ_x 為空間起始相位。