

聽力學精要

實用基礎及臨床入門指引

作者 Stanley A.Gelfand

Essentials of Audiology

監修 劉樹玉 中山醫學大學語言治療與聽力學系助理教授

譯者 古偉裕 中華民國耳鼻喉科專科醫師



合記圖書出版社 發行

聽力學精要

實用基礎及臨床入門指引

作者 Stanley A. Gelfand

Essentials of Audiology

監修 劉樹玉 中山醫學大學語言治療與聽力學系助理教授

譯者 古偉裕 中華民國耳鼻喉科專科醫師



合記圖書出版社 發行

國家圖書館出版品預行編目資料

聽力學精要—實用基礎及臨床入門指引 / Stanley
A. Gelfand作；古偉裕譯。— 初版。— 新北
市：合記，2014.03
面：公分
譯自：Essentials of audiology
ISBN 978-986-126-981-8(精裝)

1. 聽力學
416.812 103002770

聽力學精要—實用基礎及臨床入門指引

監修者 劉樹玉

譯者 古偉裕

創辦人 吳富章

發行人 吳貴宗

發行所 合記圖書出版社

登記證 局版臺業字第0698號

地址 新北市汐止區(221)汐平路二段1號

電話 (02)86461828

傳真 (02)86461866

網址 www.hochitw.com

60磅華紙清白道林 592頁

西元 2014 年 3 月 10 日 初版一刷

版權所有・翻印必究

敬告：本書內容之資料及數據僅供參考，如有任何疑問讀者須
自行請教醫師確認無誤後再使用。

總經銷 合記書局

郵政劃撥帳號 19197512

戶名 合記書局有限公司

北醫店 電話 (02)27239404

臺北市信義區(110)吳興街249號(臺北醫學大學附設醫院正對面)

臺大店 電話 (02)23651544 (02)23671444

臺北市中正區(100)羅斯福路四段12巷7號(臺大校本部對面巷內)

榮總店 電話 (02)28265375

臺北市北投區(112)石牌路二段120號(臺北榮總附近北護旁)

臺中店 電話 (04)22030795 (04)22032317

臺中市北區(404)育德路24號(中國醫大附設醫院立夫大樓斜對面)

高雄店 電話 (07)3226177

高雄市三民區(807)北平一街 1 號(高醫附設醫院旁)

花蓮店 電話 (03)8463459

花蓮市(970)中央路三段836號(慈濟大學正對面)

成大店 電話 (06)2095735

臺南市北區(704)勝利路272號(臺南成功大學附設醫院附近)

國家圖書館出版品預行編目資料

聽力學精要—實用基礎及臨床入門指引 / Stanley
A. Gelfand作；古偉裕譯。—初版。—新北
市：合記，2014.03
面：公分
譯自：Essentials of audiology
ISBN 978-986-126-981-8(精裝)

1. 聽力學
416.812 103002770

聽力學精要—實用基礎及臨床入門指引

監修者 劉樹玉

譯者 古偉裕

創辦人 吳富章

發行人 吳貴宗

發行所 合記圖書出版社

登記證 局版臺業字第0698號

地址 新北市汐止區(221)汐平路二段1號

電話 (02)86461828

傳真 (02)86461866

網址 www.hochitw.com

60磅華紙清白道林 592頁

西元 2014 年 3 月 10 日 初版一刷

版權所有・翻印必究

敬告：本書內容之資料及數據僅供參考，如有任何疑問讀者須
自行請教醫師確認無誤後再使用。

總經銷 合記書局

郵政劃撥帳號 19197512

戶名 合記書局有限公司

北醫店 電話 (02)27239404

臺北市信義區(110)吳興街249號(臺北醫學大學附設醫院正對面)

臺大店 電話 (02)23651544 (02)23671444

臺北市中正區(100)羅斯福路四段12巷7號(臺大校本部對面巷內)

榮總店 電話 (02)28265375

臺北市北投區(112)石牌路二段120號(臺北榮總附近北護旁)

臺中店 電話 (04)22030795 (04)22032317

臺中市北區(404)育德路24號(中國醫大附設醫院立夫大樓斜對面)

高雄店 電話 (07)3226177

高雄市三民區(807)北平一街1號(高醫附設醫院旁)

花蓮店 電話 (03)8463459

花蓮市(970)中央路三段836號(慈濟大學正對面)

成大店 電話 (06)2095735

臺南市北區(704)勝利路272號(臺南成功大學附設醫院附近)

獻給令人永遠懷念的Janice

前言

聽力學(audiology)是討論聽力及平衡異常的一門臨床專業學問。從廣義的角度來看，也是探討正常與異常聽覺及相關領域的科學。因此，有各種科別的專家會關注於聽力學知識，像是語言病理師、語言聽覺科學家、聾人及聽障者的教師、工程師、聲學家、工業衛生學者、生理學家、心理師、語言學家、物理學家、職業顧問，當然也包括聽力師。

聽力師是怎樣的職業呢？聽力師是從事聽力學臨床專業的人員。聽力師的主要工作與聽力及平衡異常病患的辨識、評估及處置有關，同時也要預防聽損的出現。聽力學業務的領域也包括前庭系統評估、及在進行手術時各種神經功能的生理學監測。

聽力師的養成與其它學術專業一樣，要經過適當的教育訓練，才能執行聽力學業務或才可被稱為聽力師。在美國，必須要經由美國聽語學會(the American Speech-Language-Hearing Association, ASHA)發給聽力學臨床能力證書(the Certificate of Clinical Competence in Audiology, CCC-A)，或具備聽力學國家級證照才能證明為受過完整訓練並可被賦予執行聽力學業務的專門人員。美國聽力學會會士(Fellow of the American Academy of Audiology, FAAA)是

經由美國聽力學會所授予的專業人士，必須要具備美國聽語學會證書或國家級證照。對於執行聽力學業務的最低學歷需求，正從碩士學位逐漸提高至博士學位，目前正處於過渡期，現行的門檻要求至少在畢業前得修過75個學分、畢業後接受臨床經驗指導一年(臨床研究員年度Clinical Fellowship Year)、並成功地通過國家考試。到了2012年，最低學歷要求將會是聽力學臨床博士(AuD)或同等學位，到時許多碩士學位的聽力師都會進階而擁有博士學位。實際上，如剛才所說的，未來在美國的碩士學位計劃會逐漸式微，已經有78個提供聽力學博士或關於博士學位的計劃。

對於有志於語言病理學及聽力學這兩個相關專業的讀者而言，聽力學入門在教育上是很重要的基本面。《聽力學精要》可提供正準備進入這些領域的讀者一本綜合性的入門教科書。本書盡量滿足這兩群截然不同領域讀者的需求。將要繼續從事聽力學研究的人士，也需對此領域有概括性綜合瞭解，並對基本原理有踏實的認知，未來從事聽力師臨床業務時才能有穩固的基礎。語言病理治療師對於聽力學知識的需求也是同等重要的，並不是只有看得懂聽力檢查報告而已。語言病理治療師常發現

其工作內容與聽力師不只有密切關聯，也需執行某些聽力學方面的業務，尤其是篩檢時的應用，以及常規進行與聽力學相關的判讀及轉介，在在都需要對這些內容有所瞭解。況且，語言病理治療師也經常要直接且持續處理聽損病患的問題，必須要對家屬、教師及其他專業人員解釋聽覺異常的特性及處置方式，尤其在學校環境或長期照護中心會出現這些狀況。此外，人工電子耳及其它跨科別的計畫也會使語言病理治療師及聽力師之間的互動範圍及深度增加，而使聽力學知識在語言病理治療師的養成上更具有重要性。作者謹記著這些想法，希望對於將來會成為語言病理治療師的讀者，在未來完成聽力學課程好幾年之後，回想起本書時仍能認為這是一本很有用的參考書。（當然，我也希望至少某些語言病理治療科系的讀者，能藉由閱讀這本書而更能提高對聽力學專業的興趣。）

《聽力學精要》試著以入門性的層級內容提供讀者關於聽力學的綜合概述，包括像是聲學、解剖生理學、聲音的感知、聽覺異常，以聽損的本質、測量方法、篩檢、臨床評估、及臨床上的處置。本書可提供大學生在言語、語言及聽力方面的核心知識，也可滿足欲學習或複習基礎聽力學的新進研究生所需。本書預期將會被安排在大學前三學期的課程內，視大專院校的溝通科學及疾病討論課程如何安排。本人謹記著這些想法，試著能準備一本對授課教師而言，內容夠廣泛的教科書，以便於他們挑選適合課程深度及廣度的教材。例如，可以依難易度的等級，來指定或選擇第九章的不同段落來討論遮蔽的內容。不太可能在一次的大學課堂上指定閱讀全部章節。不過，若有需要進一步研究時，就可用到這些內容，以提供作為學期報告或獨立研究的基礎資料，或將來可作

為參考用。我們也是因為同樣的理由而提供較廣泛的參考資料表單。

本書第三版的編輯是為提供初學讀者，獲得此專業領域持續發展的最新知識，並藉由經驗改善書中的內容及其呈現方式。自從第二版發行後至今，已出現許多新的學術進展及變化，其中有許多內容仍能傳達出雖然進展緩慢、但有條理且很精細的重要想法，在現行臨床科學上仍會隨著時間而進展。其它內容則與各概念指引的變化、專家層次研究、影響臨床實務的標準及法規，以及技術性層面有關。還有更令人耳目一新的進展，像是人工電子耳、助聽器、全面新生兒篩檢，以及電生理學評估的領域。當然，也會有一些在書本付梓後才問世的重要知識，這常會令教科書作者感到扼腕，不過也更讓人覺得聽力學是新奇有趣的學術領域。

與先前的版本一樣，在準備這本教科書時，會收集許多從事臨床實務、研究、教學及指導學生的聽力師們之意見。也會特別留意正研習或剛完成入門性聽力學課程讀者的意見及想法，包括使用本書第二版及其它書籍的讀者。他們的建議很顯然亦可影響本書的內容，特別是在課文的風格。因為他們的看法，所以這一版的編輯盡可能保存有爭議性及非正式性的內容；只列出在課堂上證明為真實的樣例及插圖；有些討論主題，像是臨床遮蔽、聲導抗及聽力篩檢的部份會分別在不同章節討論；關於聽力學處置的內容會分成兩個章節；而將聽力學歷史的部份省略掉。在前一版中所使用而能被接受的專一性別代名詞（他、她）用法，在本版本中也會繼續使用，避免引起非必要的不安，目的是為了讓讀者能更清楚明白文意。較長的語句或太過正式的風格，會使得課文給讀者的親和度感不夠大（至少要能減少給讀者的冷

漠感)。讓臨床人員及病患以不同性別來進行臨床測驗及互動上的描述時，這種方式會讓讀者更容易領會其內容。在本課文中以不同性別的方式討論時，更可維持在性別上的公平性。

若沒有一些特別人士的協助，就無法完成《聽力學精要》這本書。作者尤其要感謝皇后學院語言學及溝通異常科系及紐約市立大學研究所聽語科學及聽力學博士及正修習博士學位課程的同事及學生。我也要特別對Thieme醫學出版社的工作人員致謝，感謝他們在籌劃這本書的過程中所提供的協助、配合及支持，我是個過於苛求且有拼字障礙的不良作者。我想要對下述人員表達我的感謝，並對我所無意間漏掉的人員表達歉意，感謝他們給我的影響、洞察、建議、鼓勵、協助、支持及友誼：Moe Bergman、Arthur Boothroyd、Birgitta

Brandenburg、Helen Cairns、Beth Campbell、Grace R. Caputo、Joseph Danto、Lillian及Sol Gelfand、Irving Hochberg、Ivy Ip、Gertrude及Oscar Katzen、Arlene Kraat、Harry Levitt、John Lutolf、Maurice Miller、Neil Piper、Dominik Pucek、Brian Scanlan、Torsten Scheihagen、Teresa Schwander、Shlomo Silman、Carol Silverman、Helen、Harris，以及Gabe Topel、Robert Vago、Barbara Weinstein及Mark Weiss。

最後，我要對Janice表達最大的感謝，她帶給我的回憶對我而言是永遠的祝福及鼓舞；及對我的好孩子Michael、Jessica、Joshua及Erin，感謝他們的愛、鼓勵、支持、智慧及超乎想像的耐心。

Stanley A. Gelfand

Essentials of Audiology

3rd edition

by Stanley A. Gelfand

ISBN 978-1-60406-044-7

Copyright © 2009 of the original English language edition by Thieme Medical Publishers, Inc., New York, USA.

All Rights Reserved. This book, including all parts thereof, is legally protected by copyright. Any use, exploitation, or commercialization outside the narrow limits set by copyright legislation without the publisher's consent is illegal and liable to prosecution. This applies in particular to photostat reproduction, copying, mimeographing or duplication of any kind, translating, preparation of microfilms, and electronic data processing and storage.

Copyright © 2014 for the Taiwanese edition by Ho-Chi Book Publishing Co.

All Rights Reserved. Published by arrangement with Thieme Medical Publishers, Inc., New York, USA.

Ho-Chi Book Publishing Co.

Head Office	No.1, Sec. 2, Xiping Rd., Xizhi Dist., New Taipei City 221, Taiwan TEL: (02)8646-1828 FAX: (02)8646-1866
1st Branch	No.249, Wuxing St., Xinyi Dist., Taipei City 110, Taiwan TEL: (02)2723-9404 FAX: (02)2723-0997
2nd Branch	No.7, Ln. 12, Sec. 4, Roosevelt Rd., Zhongzheng Dist., Taipei City 100, Taiwan TEL: (02)2365-1544 FAX: (02)2367-1266
3rd Branch	No.120, Sec. 2, Shipai Rd., Beitou Dist., Taipei City 112, Taiwan TEL: (02)2826-5375 FAX: (02)2823-9604
4th Branch	No.24, Yude Rd., North Dist., Taichung City 404, Taiwan TEL: (04)2203-0795 FAX: (04)2202-5093
5th Branch	No.1, Beiping 1st St., Sanmin Dist., Kaohsiung City 807, Taiwan TEL: (07)322-6177 FAX: (07)323-5118
6th Branch	No.836, Sec. 3, Zhongyang Rd., Hualien City, Hualien County 970, Taiwan TEL: (03)846-3459 FAX: (03)846-3424
7th Branch	No.272, Shengli Rd., North Dist., Tainan City 704, Taiwan TEL: (06)209-5735 FAX: (06)209-7638

本書經原出版者授權翻譯、出版、發行；版權所有。
非經本公司書面同意，請勿以任何形式作翻印、攝影、
拷錄或轉載。

目錄

(Content)

前言	v
Chapter 1 聲學及聲音的測量 (Acoustics and Sound Measurement)	1
Chapter 2 聽覺系統的解剖生理學 (Anatomy and Physiology of the Auditory System)	34
Chapter 3 測量原理及聽覺本質 (Measurement Principles and the Nature of Hearing)	83
Chapter 4 聽檢儀及測驗環境 (The Audiometer and Test Environment)	109
Chapter 5 純音聽檢 (Pure-Tone Audiometry)	127
Chapter 6 聽覺系統及相關異常 (Auditory System and Related Disorders)	157
Chapter 7 聲導抗評估 (Acoustic Immittance Assessment)	205
Chapter 8 言語聽檢 (Speech Audiometry)	239
Chapter 9 臨床遮蔽 (Clinical Masking)	274
Chapter 10 聽覺診斷行為測驗 (Behavioral Tests for Audiological Diagnosis)	302
Chapter 11 聽覺生理檢查法 (Physiological Methods in Audiology)	332
Chapter 12 嬰幼兒聽覺評估 (Assessment of Infants and Children)	361
Chapter 13 聽力篩檢 (Audiological Screening)	381
Chapter 14 非器質性聽損 (Nonorganic Hearing Loss)	405
Chapter 15 聽力學處置I (Audiological Management I)	426
Chapter 16 聽力學處置II (Audiological Management II)	444
Chapter 17 噪音效應及聽力保護 (Effect of Noise and Hearing Conservation)	487
附錄	527
作者索引	537
主題索引	556

Chapter 1

聲學及聲音的測量

(Acoustics and Sound Measurement)

由於我們耳朵所接收聽到的為聲音(sound)，因此在開始探討聽力學之前，先來複習聲音的性質。研究聲音的科學稱為聲學(acoustics)，這是屬於物理學中的一門學問，要遵循基本的物理學原理。

◆ 物理量化單位(Physical Quantities)

基本的物理量化單位包括質量(mass)、時間(time)及長度(length)(或距離distance)。其它的量化單位會依這三種基本單位，組合衍生出各種不同的單位。表1.1將這些基本及衍生出的量化單位做摘要整理。這些基本量化單位會以習慣上常使用的單位名詞來表示，這些名詞可被測量並能重複運用。質量(mass, M)的單位是公斤(kilogram, kg)或公克(gram, g)；長度(length, L)的單位是公尺(meter, m)或公分(centimeter, cm)；而時間(time, t)的單位是秒(second, sec或s)。雖然我們以公斤來表示質量大小，但要注意質量並不同於重量(weight)。物體的質量與其密度(density)有關，而其重量卻與地心引力相關。若有兩個外觀大小相同的物體，其中密度較大者，質量就會較大。同一個物體的質量在地球及月球上是相同的，但是會因為在月球的地心引力較低，而有較輕的重量。

若依公尺—公斤—一秒(meter-kilogram-second, MKS)單位制來表示數據時，質量是以公斤為單位，長度則是以公尺為單位。而若依公分—公克—一秒(centimeter-gram-second, cgs)單位制來表示時，質量是以公克為單位，長度則

是以公分為單位。這兩種系統又各衍生出不同的量化單位。例如在MKS制中，作用力(force)及機械功(work)的單位分別是牛頓(newton)和焦耳(joule)；而在cgs制中，分別是以達因(dyne)及爾格(erg)來表示這兩個單位。在此我們多以MKS制為主，由於這是國際科學界所共同採用的標準單位制，所以稱為國際單位制(System Internationale, SI)。因為有些傳統聽力學界人士仍使用cgs制，所以在本書中我們也常會同時提供等值的cgs制數值。在表1.1中，這些量化單位會以等值的MKS及cgs製作摘要整理。另外，為了利於查詢，我們將科學標記(scientific notation)與傳統數字記號(conventional number)之間的相關性，及在記錄公尺制單位時，所常用到的字首(prefix)及其代表意義，整理在表1.2及1.3中。

量化單位可以是純量或向量。純量(scalar)可用來描述完整的大小(數量或尺寸)，但是向量(vector)則同時具有方向及大小的性質。例如長度屬於純量，1公尺長的物體其長度永遠不變；但是當我們要描述兩個相距1公尺的硬幣在位置上的差異時，會用到向量，因為需要描述距離的大小及其相對方向(從 x_1 點到 x_2 點)。這種量化單位稱為位移(displacement, d)。若衍生出的量化單位中，其組成元素包含一個或數個向量，則這些衍生出來的單位也屬於向量。例如速度這個量化單位是由位移所衍生出來，所以是一種向量；加速度也是一種向量，因為與速度有關。我們要知道該如何區分純量和向量，因為在進行計算時，會以不同的方式處理。

表1.1 主要的物理量化單位 (Physical Quantities)

量化單位	公式	MKS (國際單位制SI) 制單位	cgs制單位	註
質量	M	公斤 (kg)	公克 (g)	1 kg=10 ³ g
時間	t	秒 (s)	s	
面積	A	m ²	cm ²	1 m ² =10 ⁴ cm ²
位移	d	公尺 (m)	公分 (cm)	1 m=10 ² cm
速度	v=d/t	m/s	cm/s	1 m/s=10 ² cm/s
加速度	a=v/t	m/s ²	cm/s ²	1 m/s ² =10 ² cm/s ²
作用力	F=Ma =Mv/t	kg · m/s ² 牛頓 (newton, N)	g · cm/s ² 達因 (dyne)	1牛頓 (N) = 10 ⁵ 達因
壓力	p=F/A	N/m ² 巴斯卡 (pascal, Pa)	dyne/cm ² 微巴 (μbar)	2 × 10 ⁻⁵ N/m ² 或 20 μPa (參考值) 2 × 10 ⁻⁴ dyne/cm ² 或 μPa (參考值)
機械功	W=Fd	N · m 焦耳 (joule)	dyne · cm 爾格 (erg)	1J=10 ⁷ erg/s
功率	P=W/t =Fd/t =Fv	joule/s 瓦特 (watt, W)	erg/s 瓦特	1 w=1J/s =10 ⁷ erg/s
強度	I=P/A	w/m ²	w/cm ²	10 ⁻¹² w/m ² (參考值) 10 ⁻¹⁶ w/cm ² (參考值)

速度 (Velocity)

每個人都知道當一輛車的車速為「時速55英哩」時，表示它能在一個小時的時間內行進55英哩。**速度 (velocity, v)** 等同於在一段時間 (t) 內的位移量 (d)：

$$v = \frac{d}{t}$$

若以公尺 (meter) 為單位來計算位移的距離，而以秒數 (second, sec) 來計算時間的話，則速度就可用每秒鐘的公尺數 (m/sec) 來記錄。速度是速率 (speed) 的向量性同義詞，依位移量而判斷，且同時具有大小及方向性質。當我們開車外出時，通常可藉目的地的里程數減去出發地的里程數，而得到兩地間的距離 (例如：若出發時里程數為10,422英哩，到達目的地時變成10,443英哩，則車輛行經的距離為10,443－10,422=21英哩)。同樣的方法也可用來計算行進時所花費的時間 (例如：若出發時的時間是1:30，而到達時間是2:10，則行進所花費的時間

為2:10－1:30=40分鐘)。在物理學上，也大多用此方法進行運算。當物體出現位移時，若在 t_1 時間點從 x_1 點位置出發，而於 t_2 時間點到達 x_2 點位置，則可藉由兩地間的距離 ($x_2 - x_1$) 除以行進所花費的時間 ($t_2 - t_1$) 而得到平均速度：

$$v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

瞬間速度 (instantaneous velocity) 的定義是物體在某一特定時間點時的速度。從數學的角度來看，這表示當兩點之間的距離趨近於零時，由時間及位移所推算得到的速度值，也就是位移對於時間的微分導數值 (derivative)：

$$v = \frac{dx}{dt}$$

加速度 (Acceleration)

有開車經驗的人都知道，車輛在上高速公路時會加速，當要離開高速公路或轉彎時會減速。「加速」及「減速」表示速度隨著時間

表1.2 標準記號(Standard Notation)及科學記號(Scientific Notation)的表示法。

標準記號	科學記號
0.000001	10^{-6}
0.00001	10^{-5}
0.0001	10^{-4}
0.001	10^{-3}
0.01	10^{-2}
0.1	10^{-1}
1	10^0
10	10^1
100	10^2
1000	10^3
10,000	10^4
100,000	10^5
1,000,000	10^6
3600	3.6×10^3
0.036	3.6×10^{-2}
0.0002	2×10^{-4}
0.00002	2×10^{-5}

而產生變化。在單位時間內的速度變化即為**加速度**(acceleration, a)。假設物體在兩點之間運動，在第一點時的時刻為 t_1 、速度為 v_1 ，而在第二點的時刻為 t_2 、速度為 v_2 。兩點之間的速度差($v_2 - v_1$)除以時間差($t_2 - t_1$)即可得到平均加速度：

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

若以較簡易的方式表示，加速度可寫成

$$a = \frac{v}{t}$$

由於速度是單位時間的位移量，我們可以將 v 用 d/t 代替表示，使得

$$a = \frac{d/t}{t}$$

因此再簡化成

$$a = \frac{d}{t^2}$$

如此一來，若依MKS制，加速度的單位即為每平方秒的公尺數(m/sec^2)。若依cgs制的單位時，加速度則為每平方秒的公分數(cm/sec^2)。

瞬間加速度(*instantaneous velocity*)的定義是物體在某一特定時間點時的加速度值，也就是速度對於時間的微分導數值，以下列公式表示之：

$$a = \frac{dv}{dt}$$

由於速度是位移的一階微分導數值(*first derivative*)，進一步可發現加速度是位移的二階微分導數值(*second derivative*)：

$$a = \frac{d^2x}{dt^2}$$

作用力(Force)

靜止的物體若沒受到外力影響，就不會產生移動；而運動中的物體若沒受到外力，則仍會

表1.3 依公尺制的字首(Prefix)表示法

字首	符號	定義	與公尺單位相乘	
			標準記號(Standard Notation)	科學記號(Scientific Notation)
micro	μ	百萬分之一	1/1,000,000 或 0.000001	10^{-6}
milli	m	千分之一	1/1000 或 0.001	10^{-3}
cent	c	百分之一	1/100 或 0.01	10^{-2}
deci	d	十分之一	1/10 或 0.1	10^{-1}
deka	da	十倍	10	10^1
hecto	h	百倍	100	10^2
kilo	k	千倍	1000	10^3
mega	M	百萬倍	1,000,000	10^6



以相同速度持續進行。此常識就是牛頓第一運動定律(first law of motion)中，描述慣性(inertia)的特點，即物體會維持在其正進行中的狀態。所謂的「外在影響力(outside influence)」會使得靜止的物體開始運動，或運動中的物體改變速率或方向，我們稱為作用力(force, F)。請注意作用力會使得運動中的物體改變速度，或使靜止的物體運動，後者也是一種速度的改變(從零至某速度)。先前曾提到速度的變化即是加速度。因此作用力是一種能使物體產生加速度的外力(觀念上為一種「推力」或「拉力」)。實際上所需的推力或拉力大小值，取決於要去影響的質量大小及所要產生的加速度大小而定。換言之，作用力等於質量乘以加速度：

$$F = Ma$$

由於加速度為速度除以時間(v/t)，所以我們可將作用力變換為下列形式：

$$F = \frac{Mv}{t}$$

關於 Mv 這樣的量化單位稱為動量(momentum)，因此也可認為作用力等於動量除以時間。

作用力的大小是以 $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ 為單位，這是因為它是質量(單位是 kg)與加速度(單位是 m/s^2)的乘積值。作用力的單位稱為牛頓(newton, N)，而1牛頓是讓質量1公斤的物體產生 1m/s^2 的加速度所需要的作用力大小，所以 $1\text{ N} = 1\text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ 。(「牛頓」聽起來似乎是個充滿學術意味的字眼，但這個名稱卻能讓運算簡化；畢竟「1牛頓」唸起來比「1公斤·公尺/平方秒」來得簡單多了)。而2N的作用力可使得質量1公斤的物體產生 $2\text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ 的加速度，或使得質量2公斤的物體產生 $1\text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ 的加速度。4N的作用力可使得質量2公斤的物體產生 $2\text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ 的加速度；要使得質量9公斤的物體產生 $7\text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ 的加速度則需要63N。若採cgs單位制時，作用力的單位稱為達因(dyne)，1達因是能夠讓質量1公克的物體產生 1cm/s^2 的加速度所需要的作用力大

小；即 $1\text{ dyne} = 1\text{ g} \cdot \text{cm/s}^2$ ，而 10^5 達因(dyne)等同於1牛頓(N)。

通常在同一時間內會有許多不同作用力作用於同一物體上，因此我們所表示的作用力指的是淨力(net force)或合力(resultant force)，也就是在某物體上所有作用力的「總結」效果。若以3N的作用力往右方推動一物體，第二個具有8N的作用力也往右方推動此物體，則可以得到總共 $3 + 8 = 11\text{ N}$ 往右方的淨力。換言之，若兩作用力將同一物體往同樣方向推動，則淨力即為此兩作用力的總合。相反地，若以4N的作用力推動一物體往右方，而同時有9N的作用力推動此物體往左方，則可以得到 $9 - 4 = 5\text{ N}$ 往左方的淨力。亦即，若兩作用力將同一物體互相往反方向推動，則淨力即為此兩作用力的差值，物體將會往較大作用力的行進方向產生加速度。若兩作用力大小相同，彼此往相反方向互相推動，則淨力為零。淨力為零的作用力將不會使物體的動作產生變化。當淨力為零時的狀態稱為力的平衡(equilibrium)。在這種情況下，運動中的物體會持續運動，靜止狀態(即非運動中)的物體將會持續維持靜止。

摩擦力(Friction)

現實生活中，在運動中的物體都會漸漸地慢下來，而最終會停止。這是因為在現實生活中，任何運動中的物體總會與其它物體或介質(medium)互相接觸。一物體若在另一物體上滑動時，將會產生相反於運動方向的作用力，稱為阻力(resistance)或摩擦力(friction)。

摩擦力或阻力所形成的相反作用力由兩種參數來決定，第一種影響摩擦力的因素是物體的材質。簡單地說，兩物體間的摩擦力若在「粗糙」的材質時會較大，而在「平坦或光滑」的材質時則會較小，可以用摩擦係數(coefficient of friction)的量化單位來表示其程度。第二種影響摩擦力的因素可藉由前後摩擦手掌來體會，先緩慢地摩擦，之後再快速地摩擦。因為機械能會轉換成熱能，所以磨擦手掌會產生熱量。這個概念在稍後我們會再來探

討，但目前我們可以用熱能大小作為阻力大小的指標。當較快速地相互摩擦時，雙手會覺得較熱。因此可以得到一個概念，即摩擦力的大小取決於動作的速度大小。若以量化單位來表示時，即為：

$$F = Rv$$

在此 F 是摩擦力， R 是物體間的摩擦係數，而 v 是動作的速度。

彈性及恢復力 (Elasticity and Restoring Force)

我們需要花費一點力氣(外來作用力)才能壓縮或是延展一組彈簧，在外力放開後，被壓縮或延展的彈簧會自行恢復為原本的形狀。彈簧的壓縮及延展是物體形變(deforming)的樣例，而恢復原本的形狀則是彈性的表現。若以較正式的說法，**彈性(elasticity)**為形變後的物體恢復原形的一項特，請要注意形變及彈性之間的差別。橡皮筋及鹹水糖(saltwater taffy)都能夠被延伸(形變)，但僅有橡皮筋能恢復原形。換言之，橡皮筋具有彈性的特點，不在於它能夠被延伸，而是在於它能恢復成原形。形變後的物體若越容易恢復原形，則此物體就越具有彈性(勁度stiffness)。從生活經驗中可得知，若使用簡單的運動器材，剛開始要壓縮彈簧(例如「握力訓練器」)時較容易，但若持續壓縮下去則會漸漸變得吃力。同樣地，剛開始要延展彈簧時(例如展開「胸肌訓練器」的彈簧)，會比持續展開下去來得容易。換言之，當彈簧狀的物體(彈性物)其形變越大時，相對的作用力就越大。彈性或彈簧狀物體形變時所產生的相反作用力就稱為**恢復力(restoring force)**。若從彈簧被壓縮或延展至與其原形的差距來觀察，可發現恢復力會隨著位移量而增加。從量化的角度來看，恢復力(restoring force, F_r)取決於物質的勁度(stiffness, S)與其位移量大小的乘積值，關係如下所示：

$$F_r = Sd$$

壓力 (Pressure)

很少有人能直接將一根針插入木頭內，但是幾乎每個人都能將圖釘輕易地推入同樣的一塊木頭。圖釘是個很簡單器械，可藉由它來示範如何將作用力經由大面積的施力點(頭部)，下傳到非常小的面積點(釘尖)。換言之，可藉由作用力相對於作用面積的大小，而產生一個新的量化單位，稱為**壓力(pressure, P)**，壓力等於作用力除以作用面積(area, A)。即

$$P = \frac{F}{A}$$

由於作用力是以牛頓為單位，而依MKS制面積是以平方公尺為單位，所以壓力的單位是每平方公尺的牛頓數(N/m^2)。壓力的單位為**巴斯卡(pascal, Pa)**，所以 $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。若依cgs單位制，壓力的單位是每平方公分的達因數(dynes/cm^2)，有時又稱為**微巴(microbars, $\mu \text{ bars}$)**。

機械功及機械能 (Work and Energy)

就物理的觀點而言，當作用力對物體施力並產生位移時，就會製造**機械功(work)**。其大小等於作用力及位移的乘積值，或表示成

$$W = Fd$$

由於作用力是以牛頓為單位，而位移是以公尺為單位，所以機械功的量化單位是牛頓一公尺($\text{N} \cdot \text{m}$)。舉例來說，若 2 N 大小的作用力，要讓物體位移 3 公尺，則其所需要的機械功為 $6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。只有當有位移出現時才會存在機械功，若無位移(即 $d=0$)時就不會有機械功，這是因為機械功等於作用力乘以位移的距離，若位移為零，零被任何數乘都會等於零。依MKS單位制，機械功的單位為**焦耳(joule, J)**。一焦耳等於 1 牛頓的作用力讓物體產生 1 公尺位移所

需要的能量大小，或者說 $1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$ 。若機械功依cgs單位系統，機械功的單位為爾格(erg)，即 $1\text{erg} = 1\text{dyne} \cdot \text{cm}$ ，一焦耳等同於 10^7ergs 。

通常**機械能**(energy)的定義是能夠產生機械功的能力。在靜態時，物體具有**位能**(potential energy)，而在運動中的物體具有**動能**(kinetic energy)。物體的總機械能等於位能加上動能的總合，而機械功等於這兩種形式的機械能間互相轉換的能量。換言之，當機械功轉換完成後，機械能並未消失；而是由一種形態的能量轉換成另一種形態。可以用擺動的鐘擺來舉例，鐘擺在擺盪到最旁端時會有最大的位能，此時的動能為零；另一方面，鐘擺的位能在中間點時最大，因為這時候其速度最快。除了這兩種狀況外，當鐘擺加速時(往下擺動)，機械能會由位能轉變成動能；而當鐘擺減速時(往上擺動)，機械能會由動能變成位能。

功率(Power)

施行機械功的效率稱為**功率**(power, P)，因此功率可定義為機械功除以時間，即

$$P = \frac{W}{t}$$

功率的單位是**瓦特**(watt, w)，1瓦特等於1單位的機械功除以1單位的時間。因此，1瓦特等於1焦耳除以1秒鐘，或可用 $1\text{w} = 1\text{J/sec}$ 來表示。也可用cgs單位制來表示功率，此時的機械功單位是爾格(erg)。因為 $1\text{J} = 10^7\text{erg}$ ，因此也可以 $1\text{w} = 10^7\text{erg/sec}$ 來表示。

功率也可用其它形式來表示。舉例來說，由於 $W = Fd$ ，我們可用 Fd 來替換功率公式中的 W ，而變成

$$P = \frac{Fd}{t}$$

我們知道 $v = d/t$ ，因此我們可以用 v 來替代

公式中的 d/t ，而使得公式變成：

$$P = Fv$$

換言之，功率也等於作用力乘以速度。

音強(Intensity)

假想一個狀況，準備將一湯匙量的油倒入靜止的水池中。在即將要倒入的那一瞬間前，油的總量僅佔滿湯匙面。倒入水池後，隨著時間過去，油在水池的表面會擴散開來，因此油面會漸漸變得比在湯匙內時來得稀薄。當擴散的範圍越大時，油面就會變得越淡，覆蓋在水池表面的油量比例就會越來越少，但是油的總量依然不變。很顯然地，油的總量與油在擴散後的濃度，在本質上意義是不同的。

聲音也有類似的現象。眾所周知，聲音會由聲源往外散布，隨著離聲源的距離越遠，逐漸形成一越來越大的球形，如圖1.1所示的同心圓。想像聲源是極小的振動體(圖中同心圓的圓心)，會產生有限的功率，如同前例中，油的總量是固定的。隨著離聲源的距離越來越遠，聲音的功率會被分散到逐漸擴展的表面，類似於浮油在擴展後，表面逐漸變得稀薄。在圖中，當離聲源的距離越遠，線條就越淡薄，可表達出這個概念。若我們針對固定面積(例如一平方英吋)的區域來測量功率值，就會發現隨著距離聲源越遠，落在一平方英吋面積的功率比例會越少。就像圖中的卵圓形區域會因距聲源越遠而逐漸變淡一樣。

上述所提的例子可表示出一個新的量化單位，稱為**音強**(intensity, I)，即在特定面積上的功率值。具體而言，音強為單位面積的功率值，或以功率來除以面積，可表示成

$$I = \frac{P}{A}$$

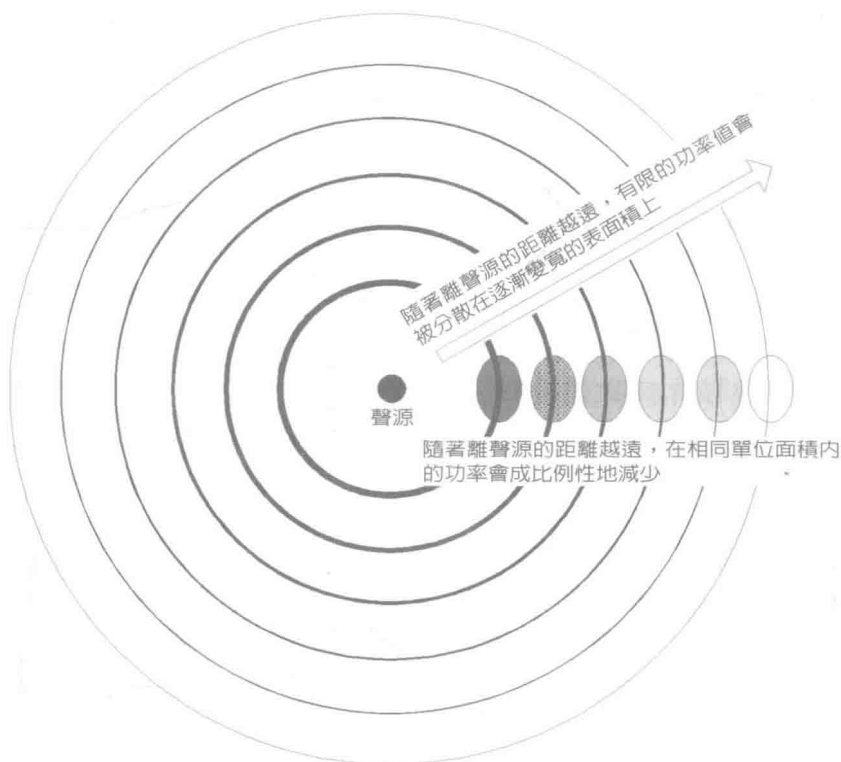


圖1.1 由於固定的功率散布到漸增的面積範圍，因此隨著距聲源越遠，音強（功率除以面積）會逐漸減少，在圖中以變薄的線條來表達此概念。隨著距離聲源越來越遠，同樣單位面積內的功率會越來越少（以卵圓形內的顏色變淡來表達）。

依MKS制，功率是以瓦特為單位，面積是以平方公尺為單位，所以音強可以用每平方公尺的瓦特數(w/m^2)來表示。若依cgs制，音強的單位是每平方公分的瓦特數(w/cm^2)。

根據平方反比定律(inverse square law)，距離聲源越遠，音強就會減少。這表示音強的大小會隨著距離的平方成反比。舉例來說，當距離加倍，由1公尺變成2公尺時，在2公尺處的音強值是1公尺處的四分之一(因為 $1/2^2 = 1/4$)。同樣地，當距離變成3倍，由1公尺變成3公尺時，音強值會變成九分之一(因為 $1/3^2 = 1/9$)。

要記得此一重要的關係式，功率與音壓的平方值成正比，即

$$P = p^2$$

所以音壓與功率的平方根值成正比，即

$$p = \sqrt{P}$$

此外，音強與音壓的平方成正比

$$I \propto p^2$$

即音壓與音強的平方根成正比

$$p \propto \sqrt{I}$$