

大學叢書
普通物理學

上冊之二

薩本棟 著

中華教育文化基金董事會
編譯委員會編輯



第二編 聲學

(0.9) 聲學總說 聲學所討論者，爲聽官所感覺之現象。關於此等現象之問題，有爲生理學家及心理學家所注意者，亦有爲物理學家所詳究者。耳之構造及其效用等爲生理學的問題；吾人何以有聲音之感覺，爲心理學的問題；至於外界當有何種現象，方能使聽官感覺其爲聲，此等現象之發生，其傳播情形，及其特性等問題則爲物理學家所亟欲詳究者也。

古人對於聲學之智識，其現於古樂者頗多，惟聲學之得在物理學中佔一重要位置，則以 Newton 推算聲之傳播速度爲始。Newton 之公式雖有待於其後百年 Laplace 氏之改正，方臻準確，然在此百年中，波動現象之應用已爲 Huygens 等所力倡，而聲音各現象復爲波動之較易明瞭者，故聲學之基礎已於此時奠定。嗣後 Helmholtz 對於聲學特加研究，不但對於聲音之物理的性質，與其生理的感覺之關係，詳爲闡明，且樹立音樂之物理的基礎。Helmholtz 之後以 Lord Rayleigh 對於聲學之貢獻爲最多而且最重要。二十世紀初葉 Sabine 致力於建築聲學之研究，其有造於應用聲學及建築學者，實非淺鮮。輒近因廣播無線電，留聲機器，公衆演講設備等等，對於日常生活有較切近之影響，聲學一科已漸有脫離物理學之羽翼，而自成一種工程學之趨勢。至于頻率極高及響度極大之聲音之研究，近來亦有長足之進步；生理學家與心理學家對於此等問題，尤感興趣，蓋亦近代物理學發展之又一途徑也。

第二十一章 聲音之性質

(21.1) 振動的物體與聲音 試察發生聲音之器具，例如琴，鐘等等，則知聲乃自器具中之振動部分而出。此等振動常甚迅速，而非吾人肉眼所能追隨者，惟其振幅常達頗巨之值，故亦不難辨別物體之是否振動；例如琴絃或音叉發音時，其振動之部分將呈如圖 (136) 所示之外形。

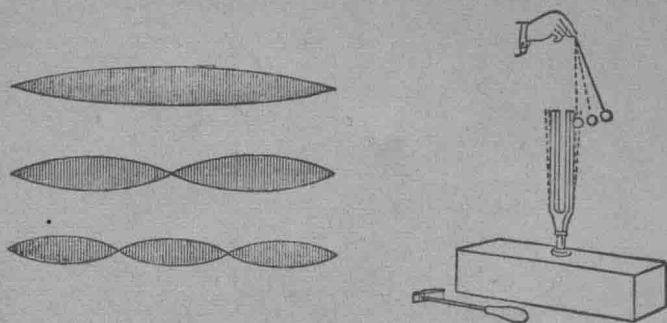


圖 136.

(21.2) 媒介質與聲音 聲音之發生，雖因物體之機械式的振動而來，然苟無彈性的媒介質以傳播此振動，使之影響於吾人之耳膜，則吾人亦無從辨其為聲音。傳播聲音之媒介質，以空氣為最常見。若將振動物體與耳膜間之媒介質消除，例如置鈴於瓶中，漸抽去其中之空氣而振動之，則所聞之鈴聲之大小將隨所抽去空氣之多寡而變更。除氣體外，固體與液體亦能傳播聲音；例如傾耳於地上，可聞及遠方之足音，又如沒首於池中，可聽得

水中他處之聲音皆是。

由上所述，則考究聲音時，當先查究發生聲音之振動的物體爲何，及在此振動物體與耳膜間之媒介質之作用。

(21.3) 振動物體發生波浪之情形 欲明媒介質傳播聲音之情形，可以尋常之鼓爲例。取一圓薄膜，緊張之于圓環上而擊其中心，則膜將振動如圖 (137)。茲考究膜振動時對於其前後空

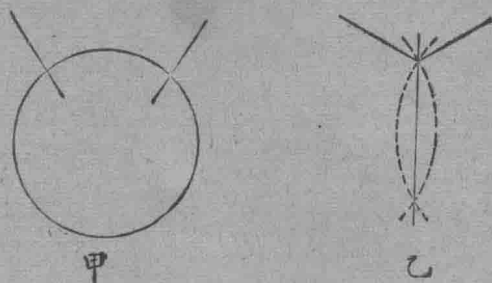


圖 137.

氣所生之影響。當膜向前移動時，即將在其前之空氣層推出而壓縮之。此被壓縮之空氣層，復壓縮在其前面之氣層，如是依次進行，一壓縮 (compression) 乃向前傳播。迨膜之振動達其最大值時，方向後移動。此時，在其前之空氣亦隨之向後移動，而成一稀疏 (rarefaction)。是以在膜完成一次振動之時間內，一個壓縮與一個稀疏乃由之出發而傳播於其前後之空氣，此項壓縮與稀疏遂成爲空氣中之波浪。

(21.4) 聲波 振動的物體可鼓盪空氣以成稀密相間之縱

波，既如上述，惟如欲完全承認聲音係爲一種波動，尚須臚舉各種事實以表示聲音具有波浪之各種特性。此等特性如 (1) 聲音需相當之時間，方能自第一處達到第二處，(2) 聲音之傳播，須藉相當之媒介質，(3) 聲音可以反射，折射及互相干涉等現象，讀者當能就其經驗所知，而一一舉例以顯示之。

概括言之，聲音之發生，始於振動之物體，而振動之物體乃鼓盪其周圍之媒介質，以成稀密相間之擾動，此等擾動之傳播，復具有波浪所有之各特性，故知聲音係波浪之一種。

不但此也，聲波之傳播既可在氣體中進行，而氣體僅能傳遞壓力之增減，不能傳遞切力，故聲波必爲縱波。換言之，因氣體之切變彈性係數爲零，故不能傳播橫波，是以聲音乃稀密相間之縱波。

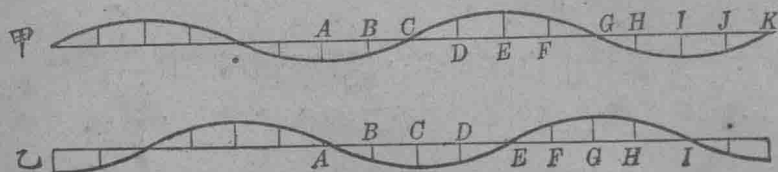


圖 138,

表示縱波之方法已如(20.4)節所述，以橫軸表傳播方向，而在此軸線上相當之各點豎立縱坐標，以表示在各該處空氣分子之位移；雖然，吾人須勿忘此等質點之移動方向，實與傳播方向一致。至各空氣分子之位移則極細微，因最大之聲音所生者僅二三毫米，其適足以鼓動耳膜而成聲音者，則僅爲 10^{-2} 厘米上下，故作圖之時，各縱坐標均須放大若干倍。在此種位移曲線上（見圖138 甲），斜度爲正號之部分，

例如自 A 經過 C 以至於 E ，均代表稀疏；而斜度為負號之部分，例如自 E 經過 G 以至於 I ，則代表稠密；至位移為零之各分子，其所在之位置，即為波浪中之最稀（例如 C 點）或最密（例如 G 點）之處。除以位移曲線表示聲波之情形外，有時亦以其稀密之程度（即其壓力之大小）為縱坐標而表示之。

此種壓力曲線可自位移曲線推求而得。例如 A 點之壓力係與平常價值相同，因在其左右鄰近各點之位移均相同故也。準此，在 E 及 I 各點之壓力，亦為平常之值。至 A 與 E 間之各點，其所受壓力則較平常之值為小，此蓋因自 A 至 C 各點之向後位移漸次遞減，而自 C 至 E 各點之向前位移則反漸次遞加，遂致各點互相分離而減小其間之壓力，惟自 E 至 G 及自 G 至 I 間之情形則反是，其各點乃互相擠緊，故此間之壓力較常態為大。此節所述之壓力曲線與表各質點速度之曲線，及其位移曲線，三者均可視作波形。若位移曲線係一正弦曲線，則壓力曲線與速度曲線亦為正弦曲線，惟其位相則與位移曲線不同耳，（見圖 138 乙）。

(21.5) 聲覺之特性 聲音所生之感覺其差異厥有三端(1) 強度 (intensity) (2) 音調 (pitch) (3) 音品 (quality)。此三特性各有其相當之物理的事象與之對應，茲簡述之於次：

(1) 音之強度 聲音之強度 (intensity) 可視為媒介質所傳播能量多少之一種量度數。惟關於此種強弱之感覺，其情形極複雜，不特同一聲音對於兩人所生之強弱感覺不同，即對於同一之人，亦復視其健康狀況及心緒之不同而有差異。不過細察振動之物體，即知其振幅愈大，則所發之聲亦愈強；例如重擊鐘鼓，則得大聲，輕擊之則聲小。此外在距離聲源愈遠之處，所聞得之聲亦愈小，是蓋因聲波之振幅與強度均隨距離聲源之遠度而

遞減故也，（見前 20.7 節）。至於發音物體之面積，其大小亦與所生聲音之強弱有關；此亦為媒介質所傳播能量多寡之一問題。例如擊動一音叉後，音叉之動能有一定之值。今若執叉於手中，則所生之聲，頗為弱小，但音叉之振動則可繼續頗久。若將叉柄緊靠棹面，所生之聲，雖較強大，然音叉之振動不久即停。在後述情形之下，因棹面與音叉俱振，故被鼓動之空氣，其容積較大。此時，音叉所傳遞於空氣之能量，雖亦較大，然因摩擦阻力而消耗去之能量則亦增大，故有限之音叉能量，遂於較短之時間內消耗完淨。綜上言之，可知在一定距離之地點，所聞及發自一定振動物體之聲音，其強度乃由其振幅而定。

絕對測量聲音強度之法則，頗為繁複，惟兩個強度不同之聲音，則頗易比較。蓋兩音之強度，須增加一定之百分值，人耳方能辨別其大小；故比較兩音之強弱時，常以其強度之比為準。現今所用以表聲音強度階級（level of sound intensity）之單位，其名為斐耳（bel）；其常用之值，則為斐耳之十分之一，今名之為分斐（decibel）。分斐之定義如下：假設兩音之強度各為 I_2 及 I_1 而其強度階級之差等於 n 個分斐，則 n 之值係由下列方程定之：—

$$n = 10 \log_{10} \frac{I_2}{I_1} \dots \dots \dots (1)$$

例如 $I_2 = 10 I_1$ 時，二者強度階級之差為十個分斐（即一個斐耳）；若 $I_2 = 100 I_1$ 時，則二者強度階級之差為 20 分斐。

(2) 音之高低 笙笛之音，較洋號之音為高；皮鼓之音，則較二者為低。音調（pitch）之高低，其物理的原因，蓋純由振動之頻率而定。振動頻率多者，其所生之音亦較高，此事頗易表

顯，茲述兩簡單實驗如次：

在圖(139)中， D 為一圓盤，其周盤有四行之小穴。今疾轉此盤而同時自一管 P 向盤吹氣，則當管口對空穴較多之處吹氣時，所生之音亦較高；又如在同一之軸上裝置齒數不同之齒輪四個，

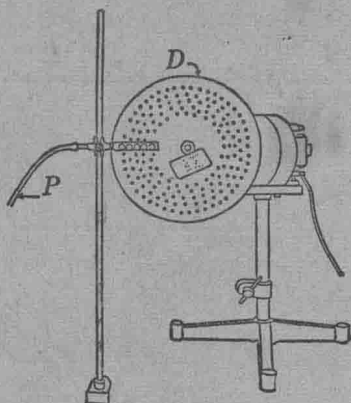


圖 139.

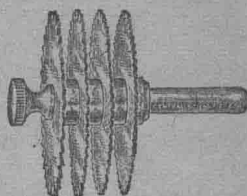


圖 140.

如圖(140)，疾轉此組之輪，以紙片次第輕觸齒輪之周，則生高低不同之音。較高之音，乃當紙片與齒數較多之輪相接觸時所發。若四齒輪之齒數與 D 盤四行之穴數各相等，今裝置二者於同一軸上，且同時作上述之兩實驗，即可決定頻率相同之聲音，不論其強弱或音品之異同，其高低悉相同。惟頻率及波長有如(20.5)節所述之關係，故如傳播速度不更變，音之高低亦可視為乃由其波浪之長短定之。波長愈短則音調愈高。

(3) 音之品質 鋼琴所生之音，與笙笛所生者迥異。此蓋

因各樂器所生之音，其品質 (quality) 有別故也。音之大小及高低，乃各由音波之兩特性(振幅與頻率)決定之，至於音之品質，則僅視聲波之第三特性

(即波形)而定。圖(141)

示三種之波形，*A* 為正弦曲線，乃音叉或笛所生之波形；*B* 之波形，

與由提琴所發生者頗相

似；*C* 則為開管所生之

波形，(見後24.7)節。

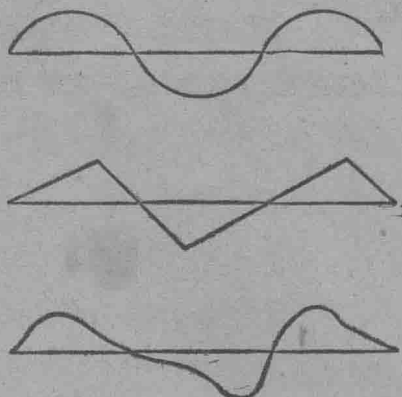


圖 141.

此三波之振幅均相同，其波長(即頻率)亦相等，惟因其形式不同，故吾人亦能辨別之。

(21.6) 樂音與噪音 多數之聲，無一定之頻率，其所生之波浪，亦無一定之波長。例如槍聲，雷鳴，街聲等等，雖略有高低之別，然實不能指定其頻率如何。換言之，此等聲音，不由一定有週期性的波浪所構成。至於各種樂器，其所生之音均有一定之頻率。茲名無一定頻率之聲音為噪音 (noise)；有一定頻率之聲音為樂音 (musical sound)。

(21.7) 聲波之機械的效應 考究聲波之方法，常利用其所生之機械的效應。靈焰 (sensitive flame) 即此種設備之較簡單者。取一小玻管，熱之於火，以便將管拉長而後斷之，使其一端

成一長而細之形狀。今若令煤氣自管端噴出而燃之，圖(142)，且調節此管內之氣流，使火焰適達幾不穩定之程度，則當高調音波傳至管口時，火焰立即陷於不穩狀態，而隨波浪壓力之變更而伸縮。自此靈焰伸縮之情形，即可知聲波品質之大概。



圖 142.

將前段所述之氣管與一小匣通聯，匣中以一薄橡皮膜分之爲二半，一方與煤氣管聯接，其他一方則與一喇叭口相接如圖(143)。如是當喇叭口所收集之聲波衝擊橡皮膜，使之振動時，則匣內壓力亦隨之變更，以使火焰之高低，隨聲波以

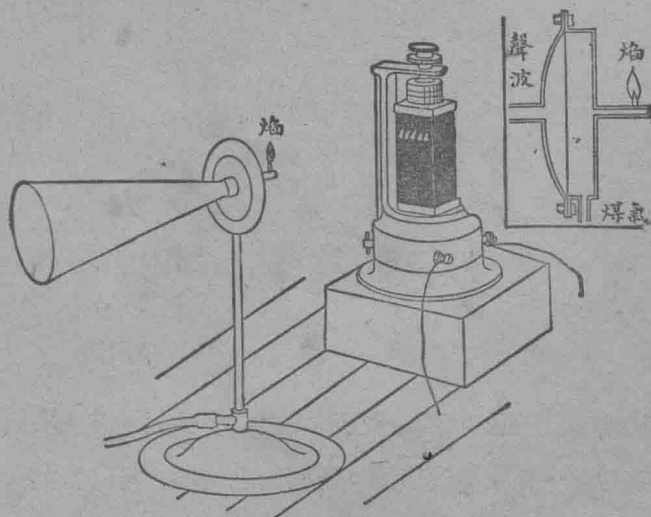


圖 143.

改變。此時，若以一旋轉頗速之多面鏡觀察此火焰，則可辨別品質不同各音波之壓力變化情形（見圖 144）。

聲波衝擊薄膜所生

之振動，常可藉一接於膜上之小桿而觀察之。

D. C. Miller 氏所造之音波顯示器 (phenodeik)

即係利用此法，（見圖 145）。

氏以一細絲 f 接

於一薄玻片 p 之中心，

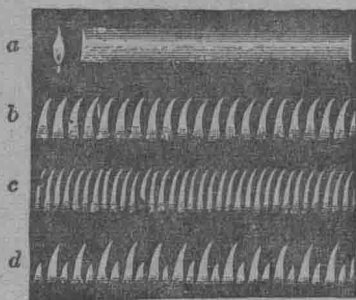


圖 144.

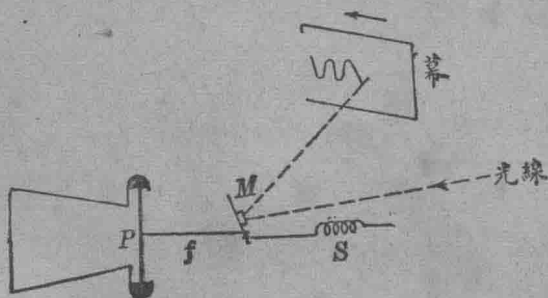


圖 145.

維持之於其平衡位置。當玻片受聲波之影響而振動時，其振動自細絲傳達於軸，使鏡隨波而動。鏡轉動之情形，可將自其面上所反射之光線，映於移動之幕上見之。

第二十一章 問題

(21.1) 聲音之發生，是否均由振動之物體而來，試申述之。

(21.2) 自聲源至耳膜，是否必須有物質為其媒介，人耳方能聞及聲音？

(21.3) 振動物體發生波浪之情形如何，試舉例以說明之。

(21.4) 試舉例以證聲音傳播具波浪進行之各特性。

(21.5) 聲波為縱波抑為橫波，試舉事實以證之。

(21.6) 試述表示聲波之位移曲線與壓力曲線之方法。

(21.7) 聲覺之特性有三，試臚舉之，與各特性相對應之物理的現象為何，試說明之。

(21.8) 聲波之長短與音之高低有何關係？

(21.9) 將音叉之柄靠於棹上，與緊握之於手中，其所生之音，孰為較大？試述其理。

(21.10) 樂音與噪音之區別何在？

(21.11) 試申述聲波所生之機械的效應與其應用。

(21.12) 當一長隊伍之兵士步行之時，各兵士均隨軍樂以整其步伐，問前後各兵士之步伐是否完全一致？

第二十一章 習題

(21.1) 有頻率相等之兩音，其一之強度階級較其他多 5 分斐，問二者強度之比如何？又其振幅之比如何？

(21.2) 常人語言之時，所需之功率平均約為 10 微瓦 (micro-watt)；惟大聲狂呼之時，所需之功率則約為 1000 微瓦；低聲耳語之時，則僅費 0.001 微瓦。問大聲狂呼較尋常談話大若干分斐？又問低聲耳語較尋常談話小若干分斐？又問自最大至最小

之語聲，其階級之差爲若干分斐？

(21.3) 吾人所聞及之聲音，其強度如超過一定之值時，則生痛苦之感覺，此感覺之始點 (threshold of feeling) 視頻率之大小而異。反之，強度亦須較一最小之值爲大，人耳方能辨其爲聲，此聞聽之起點 (threshold of audibility) 亦視頻率之大小而有差別。下表列舉在感覺始點與聞聽始點時，聲音之功率與頻率，試作圖線以表示此等關係。

頻 率	聞 聽 起 點 (微微瓦)	感 覺 起 點 (瓦)
64	35	$1. \times 10^{-4}$
128	1.06	1.6×10^{-3}
256	0.036	6.3×10^{-3}
512	0.0024	1.6×10^{-2}
1,024	0.00065	1.6×10^{-2}
2,048	0.00040	4×10^{-3}
4,096	0.00042	5×10^{-4}
8,192	0.015	*** ** *
16,384	41.	*** ** *

〔暗示：作此等圖時，可先以功率爲 1 微瓦之音爲標準，再計各音較標準值大或小若干斐耳。而後以頻率之對數爲橫坐標，斐耳數爲縱坐標，繪畫曲線，庶免數目相差太甚而有不易作圖之患。〕

第二十二章 聲音之傳播

(22.1) 聲音之傳播速度 最初測定聲音傳播速度之實驗，多在距離已知之兩高地點行之。例如在甲點鳴炮，而在乙點觀察炮火出現時，與聞到炮聲時所需之時間，即可計得聲音在空氣中之傳播速度。惟甲乙兩處之距離既遠，風之速度，對於所測得之傳播速度，頗有影響，故較準確之測驗結果，均用在甲乙兩處互換放炮所觀察之速度之平均。根據此種實驗結果，Derham 氏在 1708 年已斷定聲音在空氣中之速度，每秒約為 1142 呎。彼以為溫度與聲音之傳播速度無關，故未有紀載；其後法國之科學院 (Académie des Sciences) 於 1738 年特組委員會，而測得 337 米/秒之結果，其所紀載之溫度則為 6°C 。此為舊時以實驗方法測量聲音傳播速度之較聞名者。至於理論方面，Newton 首先根據力學原理，以為 (20.10) 節公式所得之結果，可用之以推算聲波在空氣中之傳播速度。在此公式中，彼認氣體之彈性係數 E 即等於其壓力（見前 18.7 節），故以

$$E = 1.014 \times 10^6 \quad \text{達因/方厘米}$$

$$\rho = 0.00129 \quad \text{克/立方厘米}$$

$$\text{而得} \quad v = \sqrt{\frac{1.014}{0.00129}} \times 10^3 = 28 \times 10^3 \text{ 厘米/秒 或 } 920 \text{ 呎/秒。}$$

此值與上述實驗所得之結果相差頗為不小。至於 Newton 所執以說明此差異之理由則殊欠妥當。Newton 之後約百年 (1816)，

Laplace 氏始指出 Newton 公式之錯誤。Laplace 以爲聲波在空氣中進行，其壓縮與稀疏相繼而生，需時過於短促，故因壓縮而增加之溫度，與因稀疏而引起之冷卻，均不能即行傳達於其四周；於是聲波之傳播情形，非等溫的 (isothermal) 實爲絕熱的 (adiabatic)，故所用之彈性係數，亦須爲絕熱的。惟體氣之絕熱的彈性係數，等於其等溫的彈性係數乘以 γ ， γ 表定壓的比熱 (specific heat at constant pressure) 與定容的比熱 (specific heat at constant volume) 之比數。空氣之 γ 約等於 1.41 (見後 27.8 節)，故上述公式應爲：

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{1.41 \times 1.014}{0.00129}} \times 10^3 \dots \dots \dots (1)$$

$$= 332 \text{ 米/秒 或 } 1090 \text{ 呎/秒。}$$

此值與此後較準確之實驗結果甚爲符合。

(22.2) 傳播速度與氣體之密度及其溫度之關係 自上列公式觀之，在各種氣體中，聲音之傳播速度與氣體密度之平方根成反比；例如聲音在氧中之傳播速度僅爲其在氫中之 $\frac{1}{4}$ 。又自公式(1)觀之，聲音在一定氣體中之傳播速度，純視此氣體之溫度而定，蓋氣體之壓力 P 與其密度 ρ 之比，在一定之溫度下，依 (18) 章第 (3) 方程，不稍改變故也。是以如溫度相同，則在壓力較小之高山上，與在壓力較大之深谷中，聲音之傳播速度均係完全相同。

欲求傳播速度與溫度之關係，可令 P_0 及 ρ_0 各表當溫度爲 0°C 時之氣壓與密度， P 及 ρ 表當溫度爲 t 時之氣壓與溫度，如是則依後 (26.12) 節公式：

$$\frac{P}{\rho} = \frac{P_0}{\rho_0} (1 + \alpha t) \dots \dots \dots (2)$$

α 表氣體之壓力係數。以此式代入前節之公式則知聲音之傳播速度與溫度之關係為：

$$V = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0} (1 + \alpha t)} = V_0 \sqrt{(1 + \alpha t)} \dots \dots \dots (3)$$

此中之 V_0 表當溫度為 0°C 時，聲音之傳播速度。由此知溫度愈高，聲音傳播愈速。在房溫上下，溫度每增高一度，傳播速度約增大 60 厘米/秒。

(22.3) 聲音在液體及固體中之傳播速度 前節之公式乃縱波傳播速度之普遍方程式，故亦可應用之以求聲音在液體或固體中之速度。最近實驗結果表示不太大之聲音，在水中之傳播速度，可以下列方程表之：—

$$V = 1410 + 4.21t - 0.037t^2 \quad \text{米/秒。}$$

此中之 t 表攝氏溫度。此與用方程 (1) 所計得者頗近。惟在水中之聲波，其傳播速度與聲源之強度頗有關係。轟烈之炸爆聲，在水中之傳播速度，常較上述之值為大，其值約自 1700 米/秒乃至 2000 米/秒不等。

在長桿中之聲波，其速度亦可以上列方程計得之，惟用此方程時， E 之值須以桿之 Young 氏彈性係數代入。例如某鋼桿之 Young 氏彈性係數為 19.7×10^{11} ，其密度為 7.8，則聲音在此鋼中之傳播速度約為

$$V = \sqrt{\frac{19.7 \times 10^{11}}{7.8}} \times \frac{1}{100} = 5030 \text{ 米/秒}$$

(22.4) 聲音之反射——回音與混響 回音 (echo) 現象甚為常見，其成因乃由聲波遇相當之阻礙物時反射而來。有些回音，頗具特殊性質，然均可自反射面之位置及其性質而求得其說

明。例如反射之音，其頻率有時較原音大一倍，此蓋因原音本有較高之頻率，惟強度較弱，故為頻率較低之基音 (fundamental) (見後23.6節) 所遮蓋，至反射之後，則因反射面之性質，頻率較低之基音多被吸收 (absorbed) 或散射 (scattered) 而頻率較高之諧音 (harmonic) (見後23.6節) 乃反得因反射而露現。又如對多數平行之牆或障礙物發聲，其回音常有一定之頻率。此蓋因自各層物面所反射之回音，其達到耳鼓之時刻，有一定之間隔故也。

在多種室內言語時，聞聽頗感困難。此乃因聽者所收及之聲音，不僅為音源所發出之聲，其中亦雜有由室內牆壁，天花板或地板所反射之聲波故也。此等往返的反射之混響 (reverberation) 互相干涉，固常可使聽者所聞及之聲，較為強大，然因此之故，室內之音，亦常較為混雜。例如發言者，或樂器，在每秒內常生數音，今當首次發出之音尚在室內交混回響之時，他音已繼之而出，如是，前後各音互相干涉，遂使聽者不易辨別之。室內混響，對於聞聽，有害殊甚，惟苟完全消除之，則強度亦因而頓減。欲聽悅耳之音樂，固不宜有過多之混響，以害清聽，然亦不可無相當之混響，以資調和 (見後23.7節)。因此之故，此事在建築學中，頗為重要。自 Sabine 等加以研究後，現今已知如何改進聽音困難之房屋，及預計其建築之方法以謀聽聞之清晰，茲在下數節略述其梗概。

(22.5) 混響時間 混響之發生，乃由室內牆壁所反覆反