

音樂教育的聲學基礎

張蕙慧

音樂教育系

摘要

本論文參考許多物理學、聲學、音樂學、教育學、美學的研究成果，企圖透過文獻的分析去探討音樂教育的聲學基礎。除前言及結論外，全文共分五節：首先探討聲音的產生與傳播、聲音的基本要素等聲學的基本概念，作為全文的基礎。其次是探討節奏、和聲、旋律、樂律等基礎樂理與聲學的關係，作為音樂教育的基礎。然後分別從演唱教學、演奏教學、欣賞教學等三個方面探討音樂教育的實施所應具有的聲學基礎。研究結果顯示，音樂教育的各個層面都深受聲學的影響，只有對聲學有正確的認識，音樂教育才能得到良好的效果。相對地，音樂教育的實施對聲學的研究也提供了許多助益，兩者實具有相輔相成的關係，應善加聯繫，妥為運用才符合科際整合的精神。

關鍵詞：音樂教育 聲學 基礎樂理 演唱教學 演奏教學 欣賞教學



音樂教育的聲學基礎

壹、前言

音樂的創作是身心共同的產物，音樂的欣賞是身心共同的享受，但是音樂的素材一聲音，卻是經過選擇加工的物質材料，它具有物理的性能，自然也受到種種物理定理、條件的規範，物理與音樂教育當然也就息息相關了。所以本人在「兒童音樂教育與心理學關係析論」、「從生理學觀點討兒童音樂教育」兩篇論文脫稿之後，一直熱切期望接著撰寫一篇談論音樂教育與物理關係的文章。不過，由於本人對物理這門包羅萬象的學問所知有限，而且限於時間與篇幅，也不可能去作全面性的探討，因此，在此僅提出物理當中與音樂教育關係最密切的聲學作為研究的對象，希望這樣的研究，可以讓大家都對音樂教育的各種基礎有更全面，更清楚的了解。

貳、聲學的基本概念

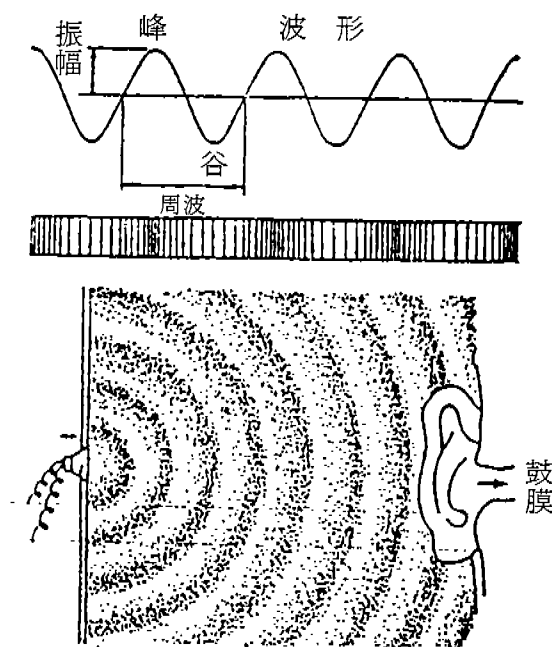
一、聲音的產生與傳播

構成音樂的基本素材是聲音，而聲音是由於物體的振動所產生的。這種振動經由空氣傳導，變成接連不斷的聲波，振撼著人們耳朵中的鼓膜，刺激聽覺神經後傳至大腦，便形成聲音的感覺。所以我們要聽到聲音必須具備三個條件：即聲源、介質和接受器。振動的物體就是聲源，空氣就是介質（注一），耳朵就是接受器，這三者是缺一不可的。

就物理的特性而言，聲波可以說是一種質點（如空氣分子）位移或速度的交替變化，或者說是空氣密度一再重複地改變其疏密度的振動狀態，逐漸擴大於周遭空間的一種波動現象。（鄭德淵譯，民78，頁1）聲波所呈現的是一種波浪狀態的曲線，最高點為波峰，最低點為波谷，波幅狹窄，物體在單位時間的振動次數就多。在一秒之間所產生的波數稱為頻率，以赫茲（HZ）為單位。波形的高度稱之為振幅，振幅大，聲波就深，聲音就強（先本段末，圖表1）。

在攝氏20度的溫度中，聲波以每秒340公尺的速度，在空間呈球狀形傳播，隨著空間的逐漸擴大，單位空間中的聲波能量越來越少，最後終於消失。在傳播的過程可能會遇到受阻、反射、折射、繞射和吸收等情形，因此產生了行波、駐波、音的衰減、共鳴、回聲等自然現象，這些在聲學中都已得到相當程度的研究。





圖表1 聲音的波形

資料來源：環境音樂美學（頁25）司有倫等譯，服部正等著，1991, 北京，中國人民大學出版社

二、聲音的基本要素

聲音的物理特性主要可分為頻率、音強、波形、音長等，人們透過生理和心理活動感知聲音，產生了音高、音量、音色、時值等的聽覺差異。大抵上，音高相當於頻率，音量相當於音強，音色相當於波形，時值相當於音長，這些就是聲音的四個基本要素：

（一）音高

音高又稱音調，就是音的高低，由頻率決定，音的高低與頻率的多少成正比。正常人耳所能聽到的頻率範圍約在16赫茲到20,000赫茲之間，超過此一範圍，高的稱為超聲，低的稱為次聲。在可聽聲之中，凡是振動波形是周期性，在頻譜（注二）上是分列，聽起來有一定音調的，就叫作樂音，反之，稱為噪音。音樂中的音高基本頻率範圍一般在16赫茲至7,000赫茲之間（相當於 $C_2 - a^5$ ），如歌唱為87赫茲至1,175赫茲，器樂為16赫茲至5,000赫茲，泛音可達10,000赫茲16,000赫茲。（曹理，1993，頁117）

（二）音量

音量又稱力度、音重或音勢，即音的強弱輕重。由振幅（聲壓）決定，音量的強弱輕重與振幅的大小成正比。人們對強度的主觀感覺稱為響度，其計量單位為分貝（dB），它是根據1,000赫茲的音之不同強度的聲壓比值，再取其常用對數值的1/10而決定的。人們感受響度的區域極限在30-120分貝之間，超過120分貝時，人耳會產生明顯的壓覺和痛感，超過160分貝時，會震破耳膜，喪失聽力。通常管弦樂隊演奏時音量的變化約在40-100分貝之間。習慣

上音量爲八個等級：最弱(ppp)、更弱(pp)、弱(p)、中弱(mp)、中強(mf)、強(f)、更強(ff)、最強(fff)。

(三) 音色

音色又稱音品或音質，是音的一種品質、特色或個性，用以區別兩個同音高、同音量的聲音之間的不同。決定音色的要素主要是頻譜。每一種音色都是由許多不同頻率的振動疊加而成的複合振動狀態。音色不僅與頻譜中的基頻、諧波和分貝的數目、長短、相對強度、分音的不協和程度及瞬態有關，還與基頻和諧波在聽音區有關，甚至還與聽者的距離，聽者的年齡、職業、本人的經歷有關。（龔鎮雄等，1994，頁42）從聲學的觀點來說，音色就是顫動形式不同，或者說是由於音波式樣的不同，波紋的曲折不同，而音波形式的不同，則是隨著基音與泛音之間強弱比例的不同而產生的。不同的發音物體、發音方法或發音狀況都會產生不同的音色，如小提琴與鋼琴的音色迥殊，手彈與弓拉的音色有別，弦的鬆緊也會使音色變得不同。

(四) 時值

時值即音的長度，也就是物體振動時間的久暫。時值與時間之長短成正比，樂音之間的時間關係稱爲節奏，下文將會詳談。人們對相對時值比對絕對時值更爲注意，自十三世紀有量記譜法產生後，相對時值即有明確的記法，絕對時值則由樂曲的速度所決定，十九世紀拍節器發明之後，速度有了具體的計量方法。

音樂教育首先要培養的就是對音樂感受的能力，而這些能力無疑是以音高感、音量感、音色感及時值感爲基礎，進而去追求節奏感、旋律感、和聲感、音樂形成感、良好的音樂記憶和音樂想像力等。近代科學發達，對聲學的研究日趨精密，各種聲音要素既然是屬於物理性質，自然可以用各種儀器去測量其物理量，如用音量錶（vu錶）、水準記錄器以測量音強；用頻率表、週期計、閃光燈型音高測試器以測量頻率；用頻帶濾波器、聲波儀、電腦等以測量與音色有關的分音構造（詳見鄭德淵譯，民78，頁19-41）。這些研究，對音感教學應當有相當的助益。

參、基礎樂理的聲學基礎

一、音樂的基本表現手段

音樂雖以個別的音響爲基本素材，但決不是各個音響凌亂結合，而是很多有規律的音組合成爲具有一定形式與美感的整體。聲音的四個基本要素相互作用，並組織起來形成音樂，主要是通過：1.橫向的結合（主要體現在節奏和旋律上）。2.縱向的結合（主要體現在和聲和組織上）注三），3.表現性質（主要指強弱和音色）。（曹理，1993，頁95）在這些音樂的基

本表現手段中，尤以節奏、和聲、旋律最爲重要，它們並稱爲音樂的三大要素，今即簡論如下：

（一）節奏

節奏是音樂的骨幹，無論是簡單的民謠或是繁複的交響樂都脫離不了節奏。節奏包含了音的長短、強弱、快慢、延長、休止、抑揚、頓挫等方面的變化，是聲音在空間的一種表現形式。節奏的最小單位是節奏型，節奏型的分類，有分成六種模式的，有分成十六種模式的，也有分成五種類型的，不一而足。（注四）形成節奏的主要內容有拍子、速度和力度（邵淑雯，民82，頁921），其組合基本上是建立在勻稱與規律的原則上，是統一中有變化的（郭長揚，83，頁635）。其中節拍是以重拍和輕拍的各種關係，分別以不同的重音循環形成不同的節律。節拍本身充滿了數的結構力，在重輕律的運動中賦予音符以生命力。速度是音樂節拍和音符的時值現象，有緩板（52拍）、慢板（56拍）、稍慢板（66拍）、中板（96拍）快板（132拍）、急板（184拍）等等，它們形成音樂表現的動力。力度是樂曲演奏音量的強弱程度，力度變化包括橫向的變化和縱向各個聲部結合時的平衡和主次的區分，其強弱鬆緊的運動當然更具有聲學基礎。就是節拍、速度、力度彼此間的靈活配合，使得節奏成爲音樂三大要素中最重要的一個，也使得音符呈現不同的性格與表情，產生了音樂的藝術魅力。

（二）和聲

當兩個聲音同時進入人耳時，由於兩個聲音的強度和頻率的關係不同，會產生各種不同的現象，若兩音同時到達，強度大致相等，便產生和聲，和聲音程中的兩音如果頻率相差很小，便可明顯聽到拍音；如果頻率相差較大，一般稱之爲混合音。和聲音程可從聽覺感受上的愉快與否而分爲和諧與不和諧兩類（羅小平等，1989，頁14）。又可依其音響的色彩分爲大三和弦、小三和弦、增三和弦、減三和弦四個最基本的和弦，以及七和弦、九和弦、十一和弦、變和弦等不等的和弦。各種和弦都有其不同的音樂色彩，也都有其情感表現力，會使得整首樂曲表達得更爲豐富而深入。即使是不和諧的和聲，也會使得樂曲變得尖銳、緊張、激動、而與和諧的和聲產生相反相成的效果。所以在音樂上，和聲是十分重要的。人類早期的音樂只有一條單旋律，以後才逐漸有複調音樂、主調音樂等多聲部的音樂。和聲是多聲部音樂中各聲部結合的基礎，和弦則是和聲的基礎。其差別是和弦所指的是單組的聲音縱的結合，而和聲是指和弦的連接以及和弦之間的關係。和聲是注重樂曲的縱的聲音組合，而有別於對位的橫的聲音組織（郭長揚，民83，頁647）。和聲聲部縱向（同時性）排列的物理規律，可以從「泛音和弦表」中泛音的排列愈高則愈密，愈低則愈寬的現象發現出來（葉純之等，1988，頁23）而對比不同的和弦也可發現它們都各有其一定的頻率比，在頻譜上所顯示的基頻（注五）各有不同（龔鎮雄等，1944，頁45-46）。所以根據聲學的分析，對和聲與和弦的研究大助益。

（三）旋律

若干樂音有組織的進行，表現一定的音樂意義，就叫作旋律。旋律又名曲調，正如同節奏一樣，基本上是自然產生的，而有別於和聲從理性概念逐漸發展出來。而且它和節奏簡直是渾然一體，難以截然畫分。旋律除了節奏的聲音長短、強弱之外，另外加上聲音的高低；因此節奏可以沒有聲音的高低而單獨表現，而旋律則必須依附在節奏上唱奏出來，兩者有相輔相成的關係。旋律往往與和聲配合在一起，但是它也可單獨存在（郭長揚，民83，頁644）。可見旋律、節奏、和聲三者之間的關係十分密切，如果說節奏是音樂的骨架，那麼旋律就是音樂的靈魂。音樂有了旋律，才能構成樂節、樂句和曲式，也才能表達出美妙的形式、生動的內容，而為人所擊節欣賞，甚至廣為流傳。旋律是由節奏、音高兩方面隨著時間而橫向組織，綜合而成的，有時上升，有時下降，有時平直進行，時彎曲前進，宛如一條變化多端的線條，所以有「旋律線」之稱。旋律線的進行方式，主要有五種，即重複進行、級進、跳進、環繞型進行、波浪型進行。（注六）這些線條簡直可以像音波那樣以線條來加以表達，而且從微觀的角度來看，大線條中還有許音波的小線條呢！其中充滿力度、緊張度等物理變化，這就是音樂的奧秘。

節奏、和聲、旋律三者的交錯變化，產生了無數音樂作品，也產生了許多音樂理論，沒有這三大要素，就不可能有音樂，更不可能有音樂教育。所以研究音樂教育，除了可從心理上從事種種審美實驗外（詳見潘智彪譯，1987），也可從物理上利用儀器來作客觀的紀錄與分析，這種科學的研究，對於音樂教育的探討與改進，實在是有其不可忽略的價值。

二、樂律

我國古代有宮、商、角、徵、羽（相當於簡譜的12356）五個音階，後來加上變宮、變徵（相當於簡譜的7[#]4），成為七個音階，這種八度音程的七個音階為世界大多數民族和地區所通用。唯這些音階只是相對音高，而非絕對音高，要求得絕對音高，使調子固定，就有賴於樂律。所謂律，本來是古人用以吹出十二個不同高度標準音的竹管，因此這十二個標準音也就叫做十二律。從某一個音出發，如何生出音階中各個音，有不同的「生律」方法，就叫作「律制」。不同的律制所構成的音階各有不同，因此就形成不同的「音律」。從古以來，最重要的律制有三種：

（一）五度相生律（三分損益法）

這是最古老、最自然的一種律制。在西方，古希臘的畢達哥拉斯(Pythagoras)首先發明五度相生律，我國管子地員篇所講的「三分損益法」也與之不謀而合。其法是為了生成下一律而將一定張力的一定弦線或管長「三分損一」（即 $1 - 1/3$ 或 $1 \times 2/3$ ）以求得上方五度之律（傳統上稱為「下生」）；或「三分益一」（即 $1 + 1/3$ 或 $1 \times 4/3$ ）以求得下方四度之律（傳統上稱

爲「上生」)。所得到的都是簡單的分數比（見本段末，圖表2）。所以聲音聽起來格外和諧悅耳，直到今日，弦樂獨奏還在使用呢！可是按照這個方法所得出的十二個半音，未能回到原位C，而是比原位C高出1.0136倍的音，這在西方稱作「畢氏音差」，爲了這個音差，五度相生律會有無法轉調的困難。

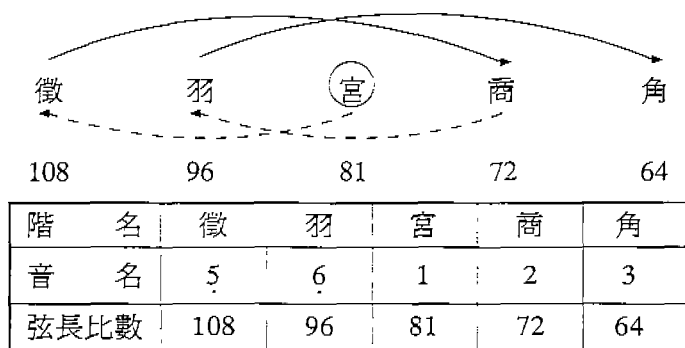
（二）純律（自然律）

這是在三分損益法的基礎上再增加5/4、6/5作爲生律要素，所得到的，是各音程間獲得了儘可能小的頻率比，從而產生了最諧和、最純正的音感。（戴念祖，1986，頁51）適合於無伴奏的合唱團使用，音樂表演者亦可根據純律原理臨時靈活調整聲音諧和的最佳值。但其缺點是音階結構比五度相生律複雜，轉調更爲不易。

（三）十二平均律

這是明朝朱載堉首先發明的，比西歐還早了幾十年。其法是精確規定八度的比例，並把八度分成十二個半音，使任意相鄰的兩個半音的音程值爲2的12次方根，即 $12\sqrt{2}$ （戴念祖，1986，頁47），亦1.05846倍。在十二平均律中，沒有一個音程是準確的小的頻率比，但每一個音程又多少靠近或近似小的頻率比。（見本段末，圖表3）十二平均律雖然犧牲了絕對的諧和，卻解決了兩千年不能解決的移調轉調問題，並解決了合奏中的音準問題。（葉純之等，1988，頁31）很適合於鍵盤樂器、樂隊合奏、帶「品」的樂隊使用，可說是當前最普遍流行的律制。它建立了精確的音程，拓展了大小調式（注七），影響了和聲學，對歐洲古典音樂、浪漫派音樂的蓬勃發展貢獻良多。

樂律學是聲學重要的一環，也是樂理的重要成分，其研究涉及數學與物理的方法。在數學上，運算其數值過程十分繁複，但在物理上區別其生律方法卻十分簡單，那就是各種律制是基於不同的頻率比關係而生成的。



圖表 2 五度相生律

資料來原：音樂與數學（頁29）童忠良等著，1993，北京，人民音樂出版社

序 號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
中國古代律名	黃鐘	大呂	太簇	夾鐘	姑洗	仲呂	蕤賓	林鐘	夷則	南呂	无射	應鐘	清黃鐘
今日音名	C	#C	d	#d	e	f	#f	g	#g	a	#a	b	c ¹
產生法	1	$2^{1/12}$	$2^{2/12}$	$2^{3/12}$	$2^{4/12}$	$2^{5/12}$	$2^{6/12}$	$2^{7/12}$	$2^{8/12}$	$2^{9/12}$	$2^{10/12}$	$2^{11/12}$	2
頻率倍數	1	1.05946	1.12246	1.18920	1.25992	1.33483	1.41421	1.49830	1.58740	1.68179	1.78179	1.88774	2
與主音的頻率比	1	$\frac{89}{84}$	$\frac{449}{440}$	$\frac{44}{37}$	$\frac{63}{50}$	$\frac{303}{227}$	$\frac{140}{90}$	$\frac{433}{289}$	$\frac{100}{63}$	$\frac{37}{22}$	$\frac{98}{55}$	$\frac{168}{89}$	$\frac{2}{1}$
音分值	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
相鄰兩律間音程	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
頻率	261.63	277.18	293.66	311.13	329.63	349.23	369.99	392.00	415.30	440.00	466.16	493.88	523.26

圖表 3 十二平均律各參數

資料來原：朱墉墉—明代的科學和藝術巨星（頁53）戴念祖著，1986，北京，人民出版社

肆、演唱教學的聲學基礎

一、發聲的原理

聲樂與器樂是音樂的兩大領域。聲樂並不像器樂那樣借助於外物，而是以精巧靈活的人體本身作為樂器。人體樂器主要分為：1.呼及器官：由肺、氣管、胸腔、橫隔膜組成，為歌唱提供了發聲的原動力。2.振動器官：由喉頭和聲帶組成，這是歌唱的發音體。3.共鳴器官：包括胸腔、喉腔、咽腔、口腔、鼻腔，可以調節聲音，造成不同的音色。4.調音器官：包含脣、舌、牙、齒、喉、顎，是咬字吐音的關鍵。這些器官的結構遠比任何樂器都要複雜，卻能彼此牽制，互相協調，形成一個有機整體，為演唱發音提供了絕佳的工具。

在人體器官中最特殊、最重要的當數振動器官的發聲體—聲帶。聲帶是喉頭中兩條具有彈性的薄韌帶，它的運動取決於喉內肌與喉外肌的收縮。由於聲帶有節律的運動，氣流通過，造成空氣稠密稀疏等相間的振蕩而形成音波，音波經喉、咽、口、鼻等共鳴腔的擴大與美化，就造成了人的噪音或美妙動人的歌聲。聲帶的運動可以決定人聲的音高，並直接影響音色與音區等，其發音功能不僅具有生理性能，從聲學的角度來看，又具有物理性能。（余篤剛，1993，頁76）聲帶既然如此重要，當然要善加運用，善加保護，才不致影響歌唱的品質。

聲帶所發生的樂聲音響，不僅具有音樂樂音音響，而且具有語言音響，是綜合性的，而不像器樂是屬於一性的。這兩種音響都具有物理的音響屬性，也就是說都具有音高、音強、音長、音色等基本性能，所以可以加以有機的綜合，從而發揮特殊的音響運動效果。

二、音質的優劣



美妙的歌聲除了在曲調方面須具有旋律、節奏、和聲之美外，在演唱方面更須具有音質、字音、行腔之美（余篤剛，1993，頁170-355）。單以音質而言，精巧的呼吸，完美的共鳴、寬廣的音域、宏亮的音響、豐富的音色都是造成音質之美的不可或缺的因素，其中尤以完美的共鳴與寬廣的音域更值得在此一提。

任何物體都有自身的振動頻率，如果從外面給物體加以一定周期性的力，當這個外加力的頻率與物體固有頻率相接近時，原物體的振動就會大為加強，這就是共鳴，又稱之為助振。在樂器中，如提琴、豎琴都有共鳴箱，鋼琴也有共鳴板。人體本身就是完美的共鳴箱，其共鳴的方式主要有三種，即：1.口腔共鳴：是其他共鳴的基礎，聲音在口腔中的振動位置應儘可能靠前，以便與其他共鳴構成聯繫。2.頭腔共鳴（鼻腔共鳴）：不僅增加音色的美好，而且有助於高音的演唱。3.胸腔共鳴：可以使音量格外洪亮。從聲學的原理講，共鳴可以改善音色，也能加大音量。（葉雅歌，頁110-111）所以在聲樂方面，如何獲得良好的共鳴是相當重要的。

一個人所發的音，從最低到最高的範圍，叫作聲音的音域。這是由頻率的高低決定的，也就是取決於聲帶的長短、厚薄、鬆緊。音域的寬窄因人而異，同樣一個人也隨著年齡而不同，如三歲時約為 d^1-a^1 ，六歲時約為 c^1-c^2 （曹理，1993，頁134），小學中年級約為 c^1-d^2 ，高年級約為 $c^1-d^2(e^2)$ ，初中階段約為 $(b^b)c^1-c^2(e^2)$ （廖家驊，1993，頁165）。一般成人在歌唱時其音域大多不超過一個半八度，女高音則從 e^1-g^2 ，女中音從 $g-c^2$ ，男高音從 c 到 g^1 ，男低音從 G 到 c^1 （薛良，民76，頁80）。歌唱的訓練就是在加強聲帶的伸縮性，拓寬可用音域，向高音區發展，而又不忽略中聲區和低音區的和諧統一。如此，則既能有高音頭聲區的明亮，又能有中音聲區的柔和、低音的胸聲區的渾厚，可以大為豐富音色的表現力。一般經過發聲訓練的人，大致可增加五度左右的音域，可以適應唱兩個八度以上的音。

三、美聲唱法

美聲唱法是近四百年來盛行不衰的演唱風格和演唱技巧。它採用胸腹混合式的橫隔膜呼吸法，重視起音，統一聲區，要求聲音的連貫，音量的變化，音質的明亮、豐滿，音色的靈活、微顫，因而產生一種具有金屬色彩，富於共鳴的聲音，剛柔兼備，美感十足，所以稱之為美聲唱法。這種演唱技巧，在美學、聲學和生理學方面都有相當的根據。科學發達的今日，我們可以利用X光射線攝影、錄音機以及頻率紀錄儀器，來確切了解喉頭位置的移動、泛音頻率基音頻率的轉變，與音質變化之間到底有些什麼關係，使得這種歌唱法得到更深刻的研究。

現代歌唱教學求精巧的呼吸、正確的發聲、清晰的咬字、適當的姿勢，或許多少都受到美聲唱法的影響吧！例如小學中、高年級以上的學生進行頭聲發聲的訓練，而避免採用胸

聲、假聲、破裂聲的發聲（注八），就是非常正確的發聲方法。因為採取頭聲發聲時，聲帶處於短、窄、薄的狀態，聲門不致大開，只有聲帶邊緣部分和連接部分振動，即使長久歌唱也不會疲勞，而且聲音清澈明朗，準確優美，可以不費力地傳到遠方，還能唱出極弱(pp)的聲音（曹理，1993，頁199），所以是種值得提倡的技巧。

伍、演奏教學的聲學基礎

一、樂器的構造

自古以來，聲樂與器樂雖然並稱為音樂的兩大類，但無論種類之繁多、音域之廣闊、音色的豐富、強弱的變化、聲部的多重、技巧的複雜，器樂都是遠遠超過聲樂的。我國古代把樂器按照材料為八音一金、石、絲、竹、匏、土、革、木（注九），近代則依發音方式和聲學原理分為體鳴樂器、氣鳴樂器、膜鳴樂器、弦鳴樂器和電鳴樂器（注十），每大類之下又可加以層次分類，真可說是種類繁多，無法細數。

每種樂器雖然構造各有不同，但就整體而言，主要可分為：1.聲源：即振動源，如提琴的振動源是振動弦線，大鼓的振動源是圓膜，這是任何樂器都不可短少的。2.發聲體：有些樂器的發聲體就是振動源，如鼓膜、鐘體，有些樂器則另有發聲體，如喇叭、笛子是靠管形成駐波，而聲音傳播出去。3.共鳴體：如提琴、豎琴等許多弦樂器都需有共鳴箱才能聽到聲音，共鳴體對改善音色也大有幫助。4.附件：如手風琴的變音器，提琴的指板、琴馬等。（龔鎮雄等，1994，頁57-58）所以每一件樂器本身簡直就是一件聲學儀器呢！

樂器結構的不同，會直接影響到音調與音色，如短笛發的音要比長笛高一個八度，這是因為管長可以決音調，管子越長，吹出的音調越低，管子越短，吹出的音調越高。即使是同樣長的管子，開管（如笛子）和閉管（如木管樂器）所形成的聲波的頻率和諧波數也有不同，音色自然隨之而異。此外，粗的管子比細的管子聲音來得響亮，這是因為管子越粗，吹氣時力量越大，空氣的振動能量也越大，聲量自然較大。至於管壁的厚薄，外徑和內徑的大小、形狀、變化程度，側孔、吹孔的大小、形狀，管尾等也都與音調有關。這是在從事演奏教學時不可不知的。

二、樂器的研究

我國早在石器時代就有樂器，商周時期樂器的發展已十分可觀，單在詩經裡提到的樂器就有二十九種之多。民國六十七年，在湖北隨縣曾侯乙墓出土的65個編鐘，每一件都能發出兩個不同的樂音，有標準音高，能跨越五個八度的音域，並提供了旋宮轉調的自由，簡直是世界上最早的一架鋼琴式的旋律樂器（劉昭民，民76，頁126-130）。戰國時代成書的周禮，

其中春官宗伯典同條對於鐘的形狀和聲音的十二種關係作了簡要的描寫（劉昭民，民76，頁44），考工記鳧氏節對於編鐘的規範、音響和調音等問題也都有總結性的論述，磬氏節對於製磬調音的技術，韞人節對於鼓的聲學特性更有相當正確的認識（聞人軍，1988，頁53-59）。可見樂器之學在我國一向十分發達，而且有關於共鳴、反射的研究，弦的振動、管的音調的探討等，也都是通過樂器來進行的，可以說，我國聲學發展史中，主要的成果就是樂器的研究。

西洋的樂器種類更多，音域更廣，音量更大，變音更多，音準更精確，音色更豐富，對於樂器的結構、特性、製造工藝和材料等也都有精湛的研究，形成一門淵博的樂器學。尤其近代科技發達，對於樂器的聲學研究更是突飛猛進，如根據研究發現，弦樂器的振動模式有四種，即橫振動、縱振動、扭轉振動、倍頻振動，每種振動的能量、基頻和主要諧波成分都不同，因此音色也就各有不同（龔鎮雄等，1994，頁68-69）。又如研究樂器的聲響，可以從泛音構造，時間性梯度曲線，雜音、顫音的變化等去作物理量的測驗（鄭德淵譯，民78，頁16-18）。諸如此類，不僅對於樂器的研究與改良有直接的幫助，對於演奏教學的實施也有間接的裨益。

三、演奏要點

實施演奏教學，首先要對各種樂器的性能與特色有所了解，例如短笛的整個音域有三個八度，鋼琴的發聲頻率範圍從27.5-4,186赫茲，超過七個八度，音域更是寬廣，但是低音號、低音管、倍低音號、大胡等特大的樂器，振動頻率都較低，音域較窄，這是在選擇樂器時不可不知的（見本段末，圖表4），否則就難免強人所難了。又如長笛的音色柔和優美，短笛的音色活潑華麗，小提琴的音色變化多端，大提琴的音色渾厚飽滿，琵琶的音色古色古香，二胡的音色意境寬廣，這也是在決定使用什麼樂器來表達何種情感時首先必須了解的。

每種樂器都有其演奏的技巧，如小提琴的手、指、腕、臂上都有工夫，弓法、弓位、運弓角度和力度、撥奏速度、力量、位置、觸點大小等都會影響音質（龔鎮雄等，1994，頁62.85）。又如鋼琴，除了講究觸鍵技巧以控制琴錘擊弦的速度和力度量的比例關係（注十一）外，還得注意踩三個踏瓣以控制力度和音色（注十二），甚至連手指離鍵的速度也對演奏的效果有所影響。

樂器合奏，首先必須有一個共同的標準音高（注十三），其次就是要注意到樂器的搭配。會產生不和諧的拍音和泛音的樂器不宜合奏。而在一個大的樂隊中，為什麼第一小提琴、第二小提琴、中提琴、大提琴和大貝司之間有一定數量比例？為什麼弦樂器與管樂器之間又有一定數量比例？這些都是有其聲學上的考慮的。通過各種配器手法，能使器樂曲呈現出千姿百態、斑駁陸離的氣象。



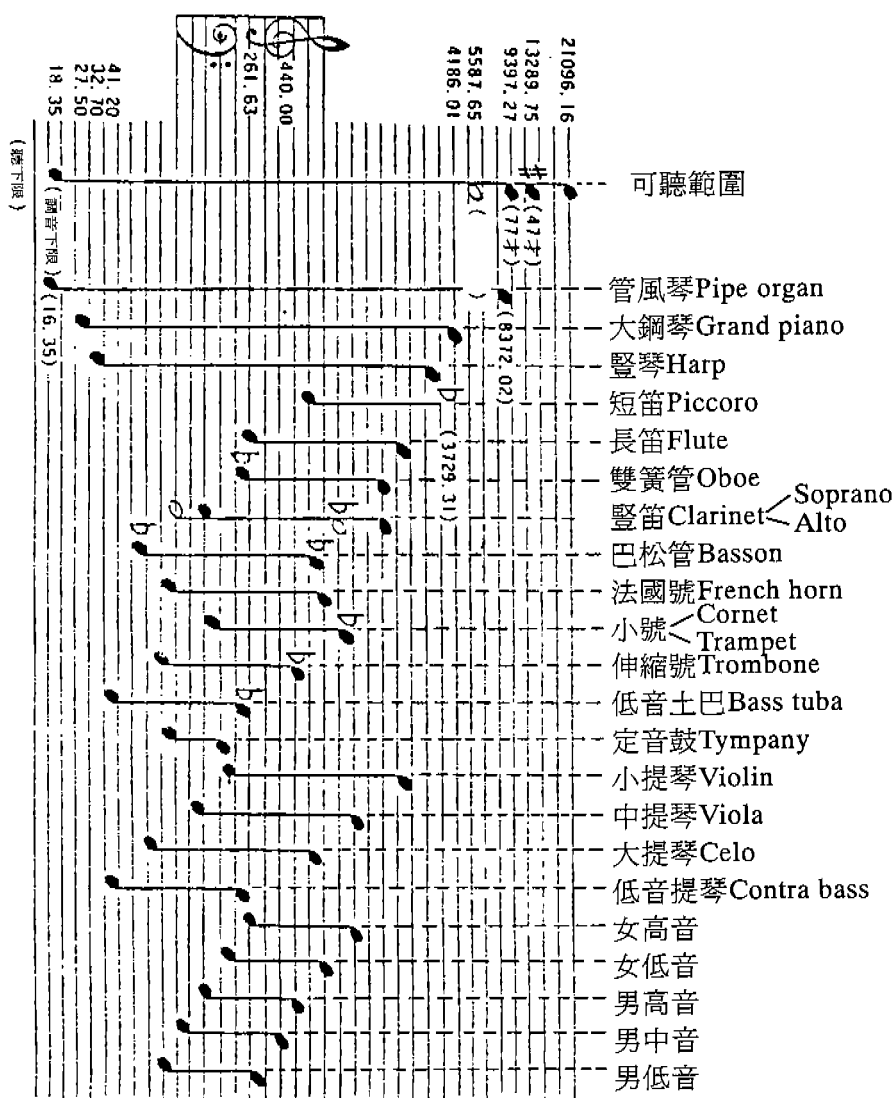


表4 各種樂器的音域及可聽範圍與音高鑑別

資料來源：樂器的音響學（頁6）鄭德淵譯，民78，幼獅文化事業公司

陸、欣賞教學的聲學基礎

一、欣賞的工具

音樂欣賞的教學內容包含聲樂、器樂、音樂故事的聆賞，音色、節奏及曲調美的體會，樂曲結構及風格的認識等。其中聲樂、器樂的聆賞固然偶有觀賞現場演出的機會，但大部分可能還是以電化教學器材為主，例如電影、電視、音響、碟影機、錄放音機乃至電腦等，都是我們經常可以接觸到的視聽媒體。它是以電子學及無線電電子學為基礎發展出來而應用廣

泛的新科技產品，用之於音樂，就是所謂音樂電聲。

音樂電聲主要是透過電源用電振蕩，產生不同頻率的振動，然後通過電—聲換能，變成機械波，傳入耳中。也可以將聲音信號變成電信號以後再加以調制，如放大、降噪、人工混響、人工延時、速度控制。（龔鎮雄等，1994，頁109-110）經過電子技術處理的音樂，往往可以具有極高的存真度，與原音幾無二致，而且可以大大改善原音的不足，取得十分理想的音響效果。有時也可以任意模擬或創造任何音響，大幅拓展了人們欣賞的領域，也提升了人們欣賞的水準。這對於欣賞教學而言，可說是十分重要的利器。不過，在使用時須特別注意音量、光線、時間、距離的控制，才能確保欣賞的品質，也才不致影響學生的身心健康。

二、欣賞的環境

通常，音樂欣賞教學是在音樂教室或視聽教室舉行，教室大小應適中，同時應有適當的隔音設備。如果是在音樂廳聆賞現場演奏或演唱，那麼欣賞環境的講求就更為嚴格了。

欣賞環境首先要解決的是反射與吸音的問題。音樂廳的大廳，有的做成長方形，有的是扇形。頂棚有的高，有的低，四邊的牆壁常常用木板做成「孔隔」、「窩狀」，這些都是通過聲音的反射來控制聲音的音質及其在大廳內的分布。還有，帷幕、座椅、頂板、牆壁、地毯等都有吸音的問題。（龔鎮雄等，1994，頁13）因為聲波在空間傳播的過程有吸收、反射、折射、繞射、共鳴等現象，對於音樂表演與欣賞都具有直接而普遍的影響。吸收率高的場所，高音及高泛音都容易被減弱，而使得充實而光輝的音響變得乾澀晦暗，例如雙簧管的高泛音有妖媚幽雅的性質，如高泛音被奪去，聽起來便跟笛音一樣。（葉純之等，1988，頁36）相反地，反射率太高的場所，會有過多的回聲（共鳴），每一次反射都會改變聲音的性質，回聲愈多，樂音就越失真。但是適當的回聲（注十四），卻可以令聽眾覺得舒暢和省力，並能掩飾音樂力度和速度的不同，也是不可缺少的。如何合理解決吸收率和反射率之間的矛盾，正是音樂聲學要解決的主要問題。

其次，欣賞環境的溫度對於演奏、演唱的效果也有所影響，這是因為聲音的傳播速度與傳播介質的溫度有關，介質溫度越高，傳播的速度越快。例如，冬天吹笛子時，會由於人的氣息給予的熱量而使管內的空氣溫度升高。這樣，由於管樂器的音調與空氣中的聲速成正比，就會使樂器的頻率變高，如果溫度相差攝氏十度，笛子的音調會改變約1/3個半音，可能會使得整個樂隊的演奏出現不堪設想的局面。所以，如果能控制室溫在攝氏二十二度左右，以符合國際公定標準音高的前提，那是最好不過的了。當然，樂隊裡容易發熱的管樂器在演奏過程中也得注意經常重新調音才行。這些都與音樂欣賞教學有關，不可不知。



柒、結論

綜觀以上各節的探討，可以發現：

（一）聲學是研究聲音的發生、傳播、接收，聲的性質及聲與其他物質相互作用的學問，它是物理學重要的一環。無論古今中外，在研究聲學時，往往要以器樂，聲樂等作為研究的對象，可以說聲學的發展是離不開音樂的。

（二）樂音的產生、傳播，樂器的製造、使用，音樂現象的實驗、測量往往涉及聲學的種種理論，所以音樂包含許多聲學內容，也需使用許多聲學的方法加以研究。可以說聲學是音樂的基礎，如果抽離這個基礎，音樂就無所依存了。

（三）音樂教育除了心理基礎、生理基礎外，也須以物理，尤其是聲學作為基礎。本論文對於演奏、演唱、欣賞教學的物理基礎都有所闡述，至於音感、認譜、創作教學則可以涵蓋在基礎樂理一節之中，同時，它們也與演奏、演唱、欣賞教學息息相關，所以都未曾另闢專節加以討論。

（四）今日科技日益發達，科際關係也日趨密切，要研究音樂教育，除了整合心理學、生理學、物理學外，也可與文學、美學、社會學……等切取連繫，如此，必能使音樂教育更發達，更進步。

附註：

一、固體、液體亦可擔任介質。如內耳中的淋巴液即是液體介質；中耳的鎚骨、砧骨、鐮骨、聽小骨即是固體介質。唯介質通常以空氣為主。

二、頻譜是將聲壓（或聲壓級）、聲功率或聲強按頻率的分布製成的圖譜。

三、組織(texture)指主旋律和伴奏、複調音樂的聲部層次等。

四、節奏型的分類，十一、二世紀西洋作曲家分為六種模式，近代音樂家克瑞斯頓(Paul Creston)分為十六種模式，詳見駱正榮，民81，頁50-51。大陸學者有分為五種類型者，詳見曾田力，1994，頁45-53。

五、在簡諧振動中頻率最低的叫作基頻，與諧波（頻率為基頻的整數倍）、分音（頻率不是基頻整數倍高頻振動）共同構成實際的樂音。

六、重複進行即相同的音（同高度音）的多次反複。級進是相臨兩個音之間的聯接。跳進，是間隔一個以上的音之間的聯接。環繞型進行是指以一個音為中心，上下頻繁繞動的音的進行，或在一個較窄的音域裡，音做上下頻繁的繞行，是時間長，音域寬的大起伏旋律線，也是一種較大的綜合式進行，把前面幾種進行的方式都包括在內。詳見曾田力，1994，

頁18-36。

七、若干高低不同的樂音，圍繞某一有穩定感的中心音，按一定的音程關係組織在一起，成爲一個有機的體系，稱爲調式。三級音爲大三度者爲大調式，三級音爲小三度者爲小調式。

八、胸聲的聲帶處於長、寬、厚的狀態，發聲較爲費力，容易傷及聲帶。假聲的聲帶不拉緊，聲帶1/3處呈一梭形縫，耗氣較多而音質虛浮。破裂音是聲區的突然轉換，聲音從胸聲突然轉爲假聲，程度較輕者爲換音，程度較重者爲破裂音。

九、八音，金是金屬樂器，如鐘、鐃。石是石製樂器，如磬、磬。絲是絃樂器，如琴、瑟。竹是管樂器，如簫、笛。匏是葫蘆樂器，如笙、竽。土是陶質樂器，如埙、缶。革是皮質樂器，如鼓、鼗。木是木製樂器，如柷、敔。

十、絃鳴樂器即絃樂器，如小提琴、鋼琴。氣鳴樂器包括管樂器、自由簧樂器，如笛、雙簧管。體鳴樂器是以樂器本體爲聲源體，如編鐘、鐃。膜鳴樂器以樂器的膜爲發聲體，如鼓。電鳴樂器電氣樂器，如電子琴、電腦音樂。

十一、鋼琴觸鍵的力量應在75克—85克之間。好的鋼琴一秒鐘內一個鍵可以擊12次爲合格。

十二、鋼琴踏瓣有三，右邊的制音踏瓣是控制制音器用的，又叫強音踏瓣或延音踏瓣。左邊的弱音踏瓣是用來減弱音量的。中間的踏瓣也是起弱音的作用。

十三、1939年公定在攝氏22度時a'的標準音高爲440周/秒，但實際上有許多管弦樂隊及室內樂仍用a'=445周/秒，以求音的明亮。其他各音也都有其標準音高。

十四、據實驗顯示，最佳回聲時間平均爲1.5秒左右，此爲維也納古典樂派所重視。但不同的音樂對象有不同的最佳值，如巴羅克音樂爲一秒，浪漫派爲二秒，歌劇爲1.2-1.4秒。

參考書目

一、中文部分

(一) 書籍

于培杰(1990)論藝術形式美。上海：華東師範大學出版社。

王光祈(民66)東西樂制之研究。臺北市：臺灣中華書局。

司有倫等譯，部部正等著(1991)·環境音樂美學。北京：中國人民大學出版社。

余篤剛(1993)聲樂藝術美學。北京：高等教育出版社。

沈建軍(1987)音樂與智力。武昌：華中工學院出版社。

秦西炫(1988)音樂的奧秘。北京：中國文聯出版公司。



- 張 前、王次炤(1992)・音樂美學基礎。北京：人民音樂出版社。
- 張統星(民72)音樂科教學研究。臺北市：全音樂譜出版社。
- 曹 理(1993)普通學校音樂教育學。上海：上海教育出版社。
- 曾田力(1994)音樂一生命的沈醉。北京：北京大學出版社。
- 童忠良、王忠人、王斌清(1993)・音樂與數學。北京：人民音樂出版社。
- 楊蔭瀏(民74)中國古代音樂史稿。臺北市：丹青圖書有限公司。
- 聞人軍(1988)考工記導讀。成都：巴蜀書社。
- 廖家驊(1993)音樂審美教育。北京：人民音樂出版社。
- 鄭德淵譯，安藤由典著(民78)・樂器的音響學。臺北市：幼獅文化事業公司。
- 潘智彪譯，C. W. Valentine著(1987)・實驗審美心理學。廣州：三環出版社。
- 葉純之、蔣一民(1988)・音樂美學導論。北京：北京大學出版社。
- 葉雅歌(不詳)歌唱發音的科學基礎。臺北市：天同出版社。
- 劉昭民(民76)中華物理學史。臺北市：臺灣商務印書館。
- 戴念祖(1986)・朱載堉一明代的科學和藝術巨星。北京：人民出版社。
- 薛 良(民76)・歌唱的藝術。臺北市：丹青圖書有限公司。
- 羅小平、黃 虹(1989)・音樂心理學。廣州：三環出版社。
- 龔鎮雄、董 馨(1994)・音樂中的物理。長沙：湖南教育出版社。

(二) 期刊論文

- 郝芷人(民75)・五行與樂律。中國文化月刊84,26-55。
- 邵淑雯(民82)・音樂對心理效應之探討。復興崗學報49,414-445。
- 郭長揚(民83)・音樂美感教學的啓導。臺北師院學報7,635-653。
- 張 絢(民83)・中西歌唱藝術的比較。國教天地105,34-40。
- 張蕙慧(民76)・兒童音樂欣賞教學。國教世紀22(5),2-6。
- 張蕙慧(民84)・兒童音樂教育與心理學關係析論。國立新竹師範學院學報8,137-164。
- 陳友新(民83)・國小教師對器樂宜有的認識、研習、應用。國教園地49,65-74。
- 駱正榮(民81)・國小音樂創作教學探討一節奏感部分。國教世紀27(6),48-61。

二、英文部分

- Abeles, H. F., Hoffer, C. R., & Klotman, R. H.(1984). Foundations of music education, New York: Schirmer Books.
- Campbell, D. M. & Greated, C. A. (1987). The musician's guide to acoustics. New York:

Schirmer Books.

Reimer, B.(1989). A philosophy of music education(2nd ed.). Englewood Cliffs, NJ:
Prentice Hall.

Uszler, M., Gordon, S. & Mach, E. (1991). The well-tempered keyboard teacher. New York:
Schirmer Books.



ACOUSTIC FOUNDATIONS OF MUSIC EDUCATION

Hwei-Hwei Chang

Department of Music Education

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the musical acoustics of music education through the analysis of research literature on physics, acoustics, musicology, education and aesthetics.

In addition to preface and conclusion, this text included the basic concepts of musical acoustics, the relationship between music fundamentals and musical acoustics, and the acoustic foundations of performing and listening to music.

The results, showed that each aspect of music education was deeply influenced by musical acoustics. Only with the exact recognition to musical acoustics, music education would fruit well. On the contrary, the practice of music education would be beneficial to the research of acoustics too. Therefore, the connection between music education and musical acoustics should be put into practice appropriately in order to agree with the spirit of uniting with the relation between subjects.

Keywords: music education musical acoustics music fundamentals singing instruction playing instruments instruction listening instruction

