

音源指向性對矩形室內樂廳音響性能之影響 The Effects of the Directivity of Sound Source for rectangular Chamber Music Halls

李宙燁¹、江維華²、趙以諾³

¹ 台灣科技大學建築研究所碩士

² 台灣科技大學教授

³ 台灣科技大學建築研究所博士生

台北市基隆路四段 43 號 106

電話：02-2737-6244 Fax: 02-2737-6244

Email: joya @ ms63.url.com.tw

摘要

本研究以 Odeon 5.0 版室內音響模擬軟體及二實際廳堂之現場量測實驗，評估音源指向性對室內樂廳音響性能之影響。在電腦模擬中，所有室內表面均為相對較大之平面；模擬之控制變因有尺度、比例、舞台設計、側牆設計、座席區設計、音源指向性與音源朝向。討論之音響參數為清晰度 C80 及早期音強指數 G80。

Abstract

Effects of directional source on room acoustics of rectangular chamber music halls were evaluated based on acoustical simulations using Odeon 5.0 software and field measurements. For computer simulation, all surfaces were plane and relatively large. Controlling variables included size, proportion, stage layout, side-wall layouts, seating layouts, directivity of the source, and aiming direction of the sound sources. Acoustical measure clarity (C80) and early strength (G80) was used.

壹、前言

至目前為止有關樂器指向性對音樂廳音響品質的研究仍處於初步探討的階段，由於樂器指向性的變化隨著發音頻率、演奏曲調、演奏方式等而變動，且觀眾所在位置與樂器指向的相對關係，亦會影響觀眾對音樂廳的音質感受。

音源在自由聲場中輻射聲音時，聲音強度分佈情況的一個重要特性為指向性，而音源尺度與聲音波長的大小比例關係是影響音源指向性程度的重要因素[文獻.1]，越高頻音的指向性越強，直達音能越集中於音源輻射軸線附近[文獻.2]。目前對於音樂廳音響性能的評估，多以無指向性音源做為發聲源，此量測方法之建立乃基於對交響樂廳之音響性能評估而設，而在以獨奏或重奏為主要演出型態的室內樂廳中，若同樣以無指向音源做量測，可

能過於忽略樂器指向性的影響。

1971年 Meyer 研究弦樂器的指向性及其對音樂廳管弦樂聲音之影響[文獻.3]，以無響室中測得之小、中、大提琴及低音提琴各頻帶指向性，討論舞台上樂團座位安排相對於各種樂器聲音傳遞的優缺點，並於貝多芬廳（Beethovenhalle）中以實際的交響樂團演奏進行量測，結果發現在不同觀眾席區位之音壓級，受樂器指向性影響在各頻帶有不同的差異，且各聲部因遮蔽效應的影響而有明顯的音壓級差，由此可見樂器的指向性足以影響觀眾對音樂廳的音質感受，且觀眾對音樂廳的音質感受與觀眾所在位置及樂器的主要指向之相對關係有明顯的關聯。其後，Eargle[文獻.4]、Matsuo[文獻.5]、Otondo[文獻.6]等人，亦對樂器的指向性、指向性音源在音樂廳音響性能評估的應用及利用電腦模擬技術對指向性音源的變動性影響等提出研究。

本研究基於江維華、許晏堃、陳世堂對獨奏及室內樂之舞台音響環境研究[文獻.7][文獻.8]，以矩形室內樂廳為主要的探討對象，進一步藉由指向音源與無指向音源所測得的音響參數數值差異，瞭解忽略音源指向性因素的室內音響評估方法可能存在的誤差。

貳、電腦模擬與廳堂實測

A. 電腦模擬

本研究在電腦模擬階段針對室內建築環境因子與樂器指向性間的交互作用對音樂廳音質影響作探討，模擬分廳堂尺度、舞台尺度、音源朝向、側牆斜角、室形設計五大組進行，先以近似傳統鞋盒型平面之矩形廳堂（圖 1）為對象，再探討室形長寬比降低後之影響。

模擬之音源與測點分佈大致如圖 1 所示，廳堂尺度組中三種廳堂之室形、比例、音源測點的相關位置，均以等比例放大縮小，舞台容積與觀眾席容積比均為 0.1，舞台之寬度與深度比均為 1.8，舞台高度與舞台面積的平方根比為 0.7，舞台側牆向外展斜 15 度，天花板向上展斜 10 度。本實驗組之主要控制變因為廳堂之室容積（分別為 1000m^3 、 500m^3 、 250m^3 (4:2:1)），使用之音源為無指向音（omni）、小號（trumpet）及人聲（tlkraise）。

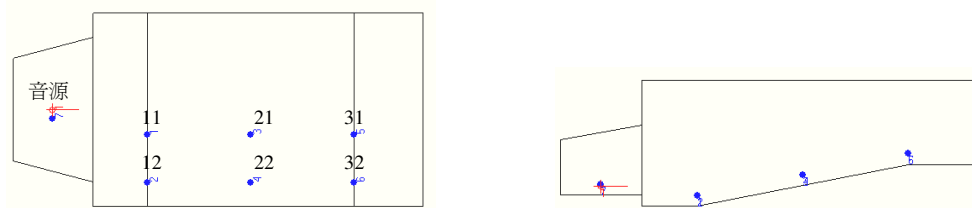


圖 1 矩形廳音源及測點分佈

模擬結果發現 C80 與 G80 值均隨音源高頻指向性的增強而增加，而在較大的廳堂中，增加之幅度較大，指向性越強的樂器在不同大小的廳中測得之 C80 差異越小。由於音源朝向設定與觀眾席中軸平行，靠中軸之座位 C80 及 G80 明顯高於側邊座席，且其差異隨指向性的增強而增加，後部靠側邊之測點 32，受音源指向性之影響最明顯。

在舞台尺度組中，因 Barron 建議之弦樂四重奏適當之室內樂廳大小為 500 ~ 600 席，故以中型廳作為基本模型，以相同比例形狀的舞台，容積分別為 1000m^3 及 500m^3 ，模擬比較發現相同的音源對觀眾席後部位置之 C80 與 G80，因舞台容積改變所產生之影響不大，而指向性強之音源對後部座位之 C80 有明顯提升效果；對觀眾席前部靠舞台位置而言，音源的指向性越強，測得之 C80 與 G80 受舞台容積之影響越小。觀眾席前部與中後部位置間之 C80 與 G80 差異，因舞台容積的增加而減少。

在音源朝向組中，音源朝向設定，加入與廳堂中軸線夾角 45 度及 90 度（順時針方向為正），向左右偏移之狀況，於中型廳小舞台之模擬模型中發現，指向性較強的高頻音部分，對音源指向角度改變所產生之 G80 與 C80 值變動，較低頻音來的明顯，且大致而言指向角度偏離廳堂中軸越大，後部位置所得之 G80 與 C80 值越小。而指向性強的小號音源較人聲音源而言，各音源朝向模式之測值差異度相對較大。觀眾席前部側邊測點 12 之 G80 與 C80 值，受不同音源指向特性與音源朝向改變之影響最為劇烈，尤其指向性強之小號音源，其差異更為顯著，最大差異達 6.1dB。

側牆斜角組中，舞台側牆斜角分別為 5° 、 15° 、 25° ，以小號 (Trumpet) 作為模擬音源，討論音源朝向 0° 、 45° 及 -45° 之狀況，結果發現以本模擬中三種舞台側牆角度及音源朝向狀況，舞台側牆斜角大小似乎並未對指向音源之 C80 及 G80 造成太大的影響。

在室形設計組中，討論室形設計及觀眾席分割方式對觀眾席音響性能影響，音源為小號 (trumpet)，分別討論朝向 0° 、 -45° 、 45° 三種狀況。

首先探討中型廳舞台側牆延伸至觀眾席之影響 (圖 2)，發現舞台側牆向觀眾席延伸，有利於觀眾席 C80 的提升，對 G80 影響則不顯著，音源轉向所造成之差異較原廳大，即當舞台上之表演者有轉向之動作時，對觀眾席造成之 C80 變動會較側牆未延伸之狀況大。觀眾席後方及側邊測點之 C80 上升較大。

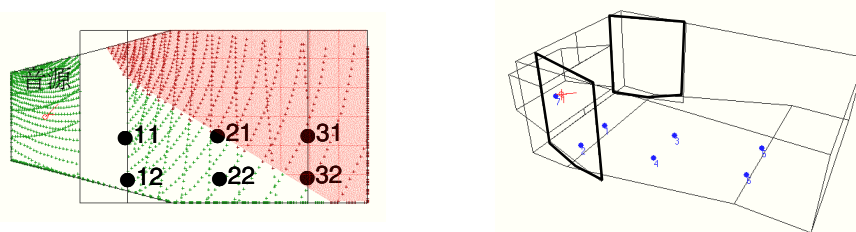


圖 2 典型鞋盒廳之舞台側牆延伸至觀眾席模式之平面圖、透視圖，及音源及測點分佈

維持室容積不變將室形比例加寬，形成一接近正方形的寬廳，模擬結果發現，廳堂寬度增加時 C80 呈衰減現象，當音源朝前時，寬廳之 C80 較鞋盒廳衰減約 1dB，當音源轉向 45° 時，C80 衰減幅度減少，在 4kHz 頻帶寬廳中音源轉向 -45° 之狀況 C80 較鞋盒廳衰減約 2dB。寬廳與鞋盒廳模式 C80 較明顯之差異出現在觀眾席前部位置，在寬廳前部位置之 C80 與 G80 較鞋盒廳低。

寬廳舞台側牆向觀眾席延伸 (圖 3)，對觀眾席之 C80 與 G80 影響，與原寬廳室形相比，差異均在 1dB 以內，並不顯著。原因可能是該廳側牆延伸之距離不足，音源朝向 45° 狀況，無法藉由該延伸面獲得較大之反射效果。在後部位置處之 C80 與 G80 才有與原寬廳

室形較大之差異出現，在音源轉向 45°狀況後側 32 位置之 C80 較原廳上升 3.5dB；G80 之差異均在 2dB 以內，中部位置之差異最大較原廳低約 2dB。

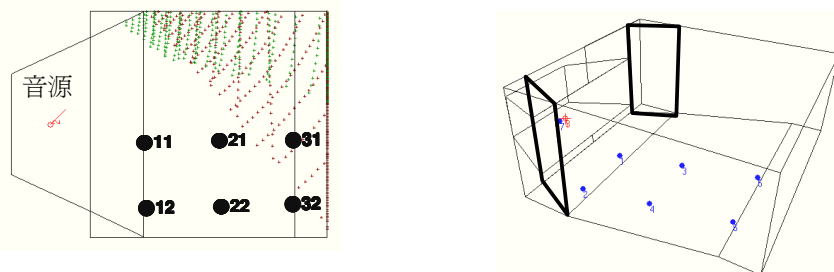


圖 3 寬廳之舞台側牆延伸至觀眾席模式之平面圖、透視圖，及音源及測點分佈

為了使聲音能有效反射回觀眾席，觀眾席側牆常採用折版式設計（圖 4），寬廳側牆折版式設計，造成觀眾席 C80 下降，各頻帶 6 個測點平均之 C80 與原寬廳室形最大差異，發生在音源轉向 45°狀況下 4kHz 頻帶 C80 差約 2dB；觀眾席前、中部側邊位置之 C80 與原廳有較大差異，在音源朝向 45°狀況，位置 22 之 C80 較原廳低約 2.8dB；G80 與原廳差異不明顯，僅在音源朝向 -45°狀況下，G80 較原廳高約 3.4dB。

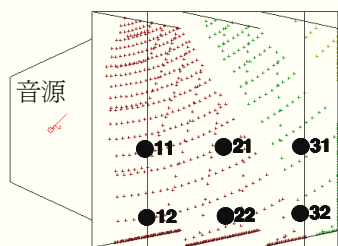


圖 4 觀眾席側牆折版式設計

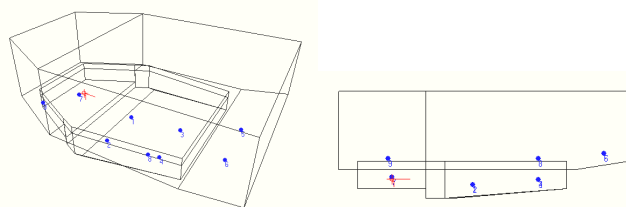


圖 5 觀眾席分割式設計

討論觀眾席的分割式設計，在考量音源指向條件下，對觀眾席音響效果的影響，模型設定如（圖 5）所示。在不同音源朝向狀況下測得之 C80 與 G80 差異，較原寬廳室形小；觀眾席前部位置及舞台側牆上方位置之 C80 受音源朝向轉變之影響較大，當音源轉向 -45°時，在測點 12 處之 C80 衰減達 6.8dB，而舞台側牆上方位置之 C80 較觀眾席中後部位置平均低約 7~8dB，音源朝向 45°時該處之 C80 升高約 5.3dB。G80 與 C80 有相似趨勢，但變動之幅度較小。

B. 廳堂實測

現場量測所欲探討的是演奏區位的變動、舞台上小型獨立反射版的設立及指向性音源朝向改變對廳堂音響效果的影響。以台科大演講廳（室容積約 2800m³，可容納 365 席）及台北縣文化局演藝廳（室容積約 8500m³，可容納 831 席）進行實驗，量測模式如（表 1），分別以 12 面體喇叭及 Pioneer CS V11 指向性喇叭作為音源，輸出音訊為 Sweep Sine。

表 1 現場量測模式設定

模式	音源位置		反射版		音源朝向					總組數
	前 F	中 B	無 N	有 Y	前 F	左 L	右 R	上 T	無 O	
變因數	2		2		5					20

二廳中均可發現指向性音源與無指向音源量測結果上之差異，在台科大演講廳中，主要差異出現在高頻 2kHz~4kHz，且觀眾席前部位置之差異幅度較後部位置大，舞台上無反射版狀況下，在觀眾席前部 A 位置處全頻帶 C80 平均最大差異，在音源朝前狀況下，無指向較指向音源低約 2.3dB，而 4kHz 頻帶則達 4.9dB；在北縣文化局演藝廳中，無指向音源高頻部分 C80，並無特別低於指向音源測值之現象，可能因此廳較科大演講廳寬，前部測點與音源之偏角較大，且側牆無法提供有效反射音所致。

指向性音源朝向的改變（由向前轉向其他方向），對觀眾席高頻部分 C80 有較明顯影響，在科大演講廳大部分的轉向狀況，均造成 C80 衰減；文化局演藝廳中，指向音源朝向改變造成 C80 變動幅度較科大演講廳大。

舞台反射版的設立在二廳中有不同的影響效果，在科大演講廳當舞台上設置立式反射版後，使觀眾席前部座席 A 位置處，在大部分的音源朝向狀況下，C80 均較無反射版時有微幅之下降，降幅均在 2dB 以內，較明顯的差異則是在音源朝右之狀況；在文化局演藝廳中，舞台上立式反射版設立後，觀眾席 A 位置在音源朝左之狀況下，1kHz 頻帶之 C80 有明顯提升，而音源朝前及朝右之狀況下，則有平均約 2.7dB 之降幅。

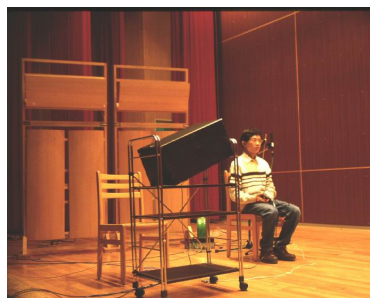


圖 6 舞台反射版及指向音源（朝上模式）設置狀況

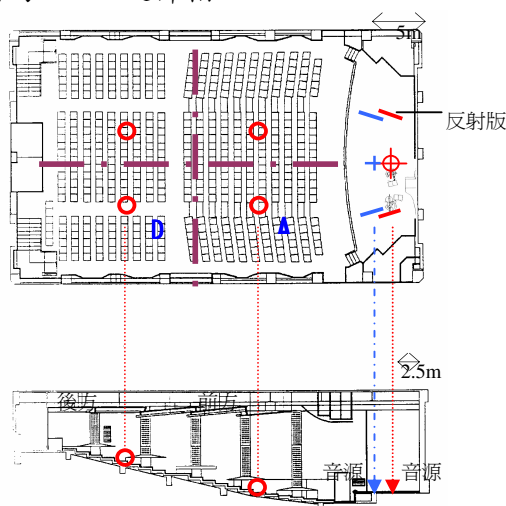


圖 7 台科大演講廳音源、反射版及測點分佈

在台科大演講廳中，以無指向音源與指向性音源，在觀眾席前後部位置測得之 G80，有極大之差異存在，且其差異隨頻率增加而增大，因此對 G80 而言，以無指向性音源測得之數值，與考量樂器指向性之狀況所得的數值間會有極大之出入，舞台上無反射版狀況，在觀眾席前部 A 位置處，於音源朝前之狀況下，測得之高頻（2kHz~4kHz）G80 值，較無指向性音源之量測結果平均高出約 16dB。在北縣文化局的量測結果中，同樣可看出指向性音源與無指向音源量測結果的差異趨勢與台科大類似。

當指向性音源之朝向轉變時（由向前轉向其他方向），在台科大演講廳的量測中，觀眾席之 G80 會出現衰減之現象，舞台上立式反射版設立，對觀眾席的 G80 有小幅的提升效果，大致在 2dB 的範圍內；北縣文化局的量測結果中，觀眾席之 G80 受指向性音源朝向轉變影響，較台科大之幅度大，舞台反射版設立後，明顯使得音源轉向對 G80 之影響減小。

參、結論

電腦模擬結果發現，不同尺度之鞋盒型室內樂廳中，音源指向性對 T30 不造成影響；EDT 值則隨音源指向性增強而縮短；音源指向性越強則 C80 與 G80 越高，且較大廳堂中影響較顯著；觀眾席後部位置 C80 受音源指向性之影響明顯，在小廳中強指向音源會使後部位置之 C80 高於中部位置。

指向音源朝向偏離中軸角度越大，造成 C80 與 G80 衰減越明顯；小號音源朝向轉變，對前部側邊及後部位置影響較大，人聲則對中部中央位置影響較大。舞台側牆向觀眾席延伸對後部及側邊位置 C80 有提升效果，但卻造成中央位置 C80 與 G80 下降，且音源轉向之差異增大。觀眾席側牆折版式設計，可有效提升寬廳觀眾席前部位置 G80，但廳堂擴散性不足是 C80 下降的原因（第一段側牆影響明顯），寬廳觀眾席分割式設計，可改善音源朝向變動造成之 C80 與 G80 差異，此模式中舞台前方之矮牆，並未對舞台側牆上觀眾席達到提供有效反射音之效果，是反射路徑過長所致。

在現場實測中發現，舞台上獨立反射版的設立可有效使觀眾席前部 C80 與 G80，因音源朝向改變造成之差異減小，而在較寬的廳中，音源朝向改變造成的差異較大，與電腦模擬有相似之趨勢。

肆、致謝

感謝江維華博士在本論文所給予之細心指導與協助，使本論文得以在諸多不確定因子交雜影響下，理出頭緒，順利完成。趙以諾及吳啟哲先生在相關專業知識與研究資料上所提供的協助與指教，在此表示由衷的感激。

伍、參考文獻

- (1) Cyril M. Harris, Vern O. Knudsen, "Acoustical Designing in Architecture", Acoustical Society of America. (1950).
- (2) 車世光、王炳麟、秦佑國著，"建築聲環境"，台北，淑馨出版社，民國 80 年。
- (3) J. Meyer, "Directivity of the Bowed Instruments and Its Effect on Orchestral Sound in Concert Halls", Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, West Germany.(1971).
- (4) John M. Eargle, "Music, Sound, and Technology - Second Edition", Van Nostrand Reinhold. (1995)
- (5) M. Matsuo, H.Furuya and K. Fujimoto, "An Acoustical Evaluation of Concert Halls Considering the Directional Characteristics of Sound Source - Acoustical Measurement Using Directional Sound Sources", The Seventh Western Pacific Regional Acoustics Conference, Kumamoto, Japan.(2000)
- (6) F. Otondo, Jens Holger Rindel, "New Method for the Directional Representation of Musical Instrument in Auralizations", Technical University of Denmark. (2000)
- (7) Weihwa Chiang, Shin-tang Chen, Ching-tung Huang, "Subjective Assessment of Stage Acoustics for Solo Chamber Music Performances", Acustica,88. (2002)
- (8) Weihwa Chiang, Yan-kuan Shu, "Acoustical Design of Stages with Large Plane Surfaces in Rectangular Recital Halls", Applied Acoustics, accepted. (2003)