

建築聲場清晰度與殘響時間模擬計算及實驗之比較

Calculation and Experiment Comparison of Acoustic Field Clarity and Reverberation Time

劉德源¹ ◎李君輝²

¹ 國立台灣海洋大學系統工程暨造船學系副教授

² 國立台灣海洋大學系統工程暨造船學系碩士

摘要

本文的研究目的在於建立一套合理的室內相關聲學參數設計方法，以提供建築物聲場初步設計或是已完工建物聲場改善的一個評估法則，藉由本研究方法之設計與建構提供建築師或是決策單位，作為建築音響環境未建造前之規劃與設計評估的參考。為確認建築聲學軟體 EASE 模擬計算建築聲響特性之正確性與輸入幾何環境、室內裝潢材、邊界牆材料參數之影響的靈敏度，文中選取系工系迴響室、演講教室、多功能育樂館三間聲場進行一系列之殘響時間、清晰度(C_{50}, C_{80})、快速語言傳輸指數(RaSTI)、輔音損失率(ALcons)等聲學特性模擬與量測分析比較，經由模擬計算與現場實測結果比較，發現軟體模擬計算確實可提供聲學建築音響設計之用，同時也提出現場驗證用之實驗分析方法。

關鍵字：建築聲學、殘響時間、清晰度

Abstract

The purpose of this research is to establish a reasonable method for designing acoustic parameters and provide the evaluative standard for the initial design of acoustic field in buildings or the improvement of acoustic field in buildings after construction. By means of the design and construction of the study method of the thesis, architects or policy-making bureau can take the thesis as the reference for the purpose of formulation and design in architectural acoustics environment before construction. The main contents of the thesis is to simulate and calculate the acoustic parameters of indoor building by acoustic software—EASE to confirm the accuracy of calculation, the sensitivity to room geometry, decorating materials and the effect of boundary materials. We choose three sound fields including the reverberation room of department of S.E.N.A, lecture room and multi-function gymnasium to process a series of analysis in simulation and experiment of acoustic parameters such as, reverberation time, sound pressure distribution, clarity (C_{50}, C_{80}), rapid speech transmission index(RaSTI) and articulation loss of consonant(ALcons). According to the comparison between simulation and experiment, it is found that the simulation and calculation of EASE is correct and can be referred as architectural acoustic design. The experimental method also can be used to verify the results.

Keywords : architectural Acoustics, reverberation time, clarity

壹、前言

近代的建築是將功能、人文藝術、高科技結合在一起的傑作。建築聲學在聲學工程設計中佔有一定地位和功用：在音樂廳、歌劇院、多功能體育館、錄音室和演講室…等，以及聲學實驗室之建築中，音值設計是首要的重點，這關係到這類建築是否能夠正常使用。各式建築，其聲響特性如殘響時間、音壓均勻度與清晰度皆由一定之最佳範圍。建築設計者主要之作品不外乎擁有一座自己設計永流千古優美良好之視聽建築環境，完成整座建築物之前，室內音響環境事先之設計模擬計算是相當重要的工作，目前市面上之建築聲學軟體如 EASE、CARA、ODEON 之聲學計算雖然可以知道建築完成前之聲場特性，但是建築完工後之驗收常與模擬計算有些差異，因此本文主要目的是討論電腦模擬計算的可靠度如何？文中亦採用實驗方法進行實驗分析，其正確性又如何？此外，當電腦模擬可靠時，是否可以建立一套建築音響特性設計分析流程？此為本文研究的主要目的。

貳、建築聲學相關理論研析

一、殘響時間理論

音源在室內發聲後，使室內聲場達到穩態，然後關閉聲源，聲源停止發聲後由於受到邊界影響，會有連續不斷之反射聲，使得聲音不會立刻消失之音衰減過程。此種聲音不會立刻消失的現象稱做「迴響」(Reverberation，亦稱做殘響或混響)，而迴響所持續的時間稱為「殘響時間」(Reverberation Time)。一般來說，室內聲學設計中的殘響時間稱為「規定殘響時間」，其定義為穩定聲壓衰減 60dB 所需之時間(或聲能密度減至穩態聲能密度之百萬分之一)，以 T_{60} 表示。

二、清晰度指標

清晰度是指說聲音(語言或音樂)傳到聽眾時，聽眾能夠清楚的分辨出聲部與音符(音樂)以及正確聽到的音節(語言)。清晰度與殘響是一體的兩面，一者越大，另一者越小。Beranek[1]於 1965 年提出直達音以及在 50ms 內到達的反射音稱為早期音，把剩下的反射音稱為晚期音(殘響音)。將 50ms 或 80ms 時序前之早期聲能與 50ms 或 80ms 時序後之晚期聲能量之比值的對數再乘以 10 定義為清晰度指標。以鑑別聲場語言 C_{50} 或音樂 C_{80} 之清晰度，計算式如下：

$$C_{50} = 10 \text{Log} \left(\frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (1)$$

$$C_{80} = 10 \text{Log} \left(\frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (2)$$

其中 $P(t)$ 是瞬時聲音壓力。

三、MTF、STI-RASTI 理論

根據 Houtgast and Steeneken[2]之研究，我們可以理解在室內語音傳輸中，語音訊號為一個變頻(Modulation)訊號強度，語音訊號強度因噪音或環境影響而減弱，因而降低語言清晰度。調變轉移函數(Modulation Transfer Function, MTF)定義為聲音訊號經傳輸後接收訊號強度包絡的調變度相對於原訊號強度包絡強度的降低，它隨調變頻率不同而變化，按照這個定義，若輸入訊號的聲強為：

$$I_i = \bar{I}_i (1 + \cos 2\pi ft) \quad (3)$$

經傳輸後，調變度降為 m ，則輸出訊號的強度為：

$$I_c = \bar{I}_c \{1 + m \cos[2\pi f(t - \theta)]\} \quad (4)$$

式中， m 是調變度，它是調變頻率 f 的函數，所以也可以寫成 $m(f)$ ； θ 是延遲時間。如果輸入訊號的調變度是 1.0，則 $m(f)$ 就是調變轉移函數或稱調變降低因子(Modulation Reduction Factor)。 $m(f)$ 公式如下[3]：

$$m(f) = [1 + (2\pi f \frac{RT}{13.8})^2]^{-\frac{1}{2}} \cdot [1 + 10^{\frac{SNR}{10}}]^{-1} \quad (5)$$

其中 RT ：殘響時間(sec)。 SNR ：訊噪比(dB)。

而 STI 則是利用上述公式，將七個 1/1 倍頻(125Hz~8kHz)內 14 個調變頻率(1/3 倍頻帶 0.63Hz~12.5Hz)的調變指數降低(即具有 98 個數值的矩陣)，可得到 98 組 $m(f)$ 數據結果，並將 98 組數據結果按公式轉換成訊噪比。當訊噪比超過 15dB 範圍時，將 dB 值限制在其範圍內，然後將求得之 98 個訊噪比作平均，即得到 STI 。如果將調變轉移函數(MTF)限制在兩個 1/1 倍頻帶(500Hz 與 2kHz)，其中 500Hz 採用 1、2、4、8Hz 等四個調變頻率，2kHz 則採用 0.7、1.4、2.8、5.6、11.2Hz 等五個調變頻率，共九個調變指數降低(即具有九組數值)，可得到九組 $m(f)$ 數據結果，並將九組數據結果按公式轉換成訊噪比。當訊噪比超過 15dB 範圍時，將 dB 值限制在其範圍內，然後將求得之九個訊噪比作平均，即得到一個 0~1 範圍之簡化的快速語言傳輸指數 (Simplified Rapid STI, RASTI)。

四、輔音損失率

Peutz[4]已經確定了輔音損失率(Al_{cons})對於室內語音理解度的影響。因此他發展了一套準則來決定清晰度： Al_{cons} 如下式

$$Al_{cons} \approx 0.652 \left[\frac{r_{QH}}{r_H} \right]^2 \cdot RT\% \quad (6)$$

r_{QH} ：音源到聽眾的距離。 r_H ：殘響半徑，如果是指向性音源就變為臨界距離 r_R 。 RT ：殘響時間。

參、建築聲場模擬計算及實驗之比較

一、迴響室聲場模擬計算及實測之比較

以下為迴響室音響特性，平均殘響時間、平均聲壓分佈經模擬與實驗結果之比較：

(一) 平均殘響時間

1、未放置吸音材空無一物之殘響時間，如圖 1 所示，低頻區可達到 20 秒以上，整體趨勢滿足迴響室殘響的特性。

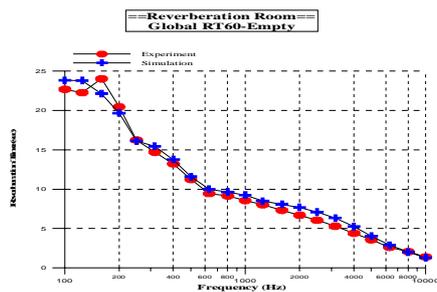


圖 1 迴響室空無一物之平均殘響時間

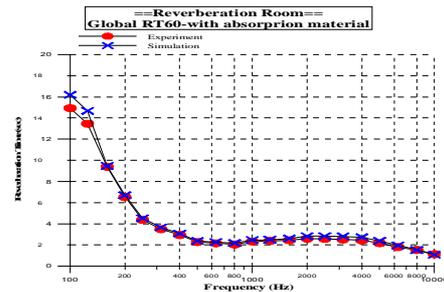


圖 2 迴響室放置吸音材之平均殘響時間

2、放置吸音材(多孔材)之殘響時間，如圖 2 所示，因有吸音材相較於空無一物房間，所有頻率之殘響時間，皆降低一些，顯示空迴響室與置放材料時之迴響室殘響時間計算與實驗相當吻合。

二、演講教室聲場模擬計算及實測之比較

本節就演講教室音響特性模擬與實驗之比較，其中音響特性皆作整體的評估，因此採用平均值，其特性有殘響時間、聲壓分佈、語言清晰度、音樂清晰度、快速語言傳輸指數與輔音損失率，比較如下：

(一) 平均殘響時間(空席)，如圖 3 所示，室內殘響時間幾乎都在 1.1 秒內，顯示殘響時間模擬與實驗值十分接近。

(二) 平均語言清晰度(空席)，如圖 4 所示，模擬與實驗之值皆大於 0，且模擬之語言清晰度(500Hz、1kHz 與 2kHz 之平均值)為 4.07dB 與實驗之值 5.75dB，兩者相差 1.68dB。

(三) 平均音樂清晰度(空席)，如圖 5 所示，模擬與實驗之值皆大於 0，且模擬之音樂清晰度(500Hz、1kHz 與 2kHz 之平均值)為 8.27dB 與實驗之值 10.49dB，兩者相差 2.22dB。

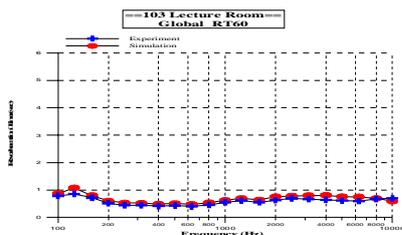


圖 3 演講教室平均殘響時間

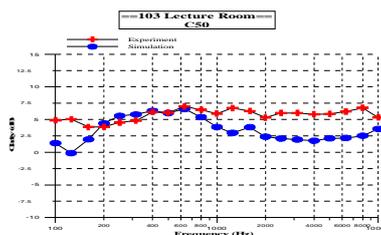


圖 4 演講教室平均語言清晰度

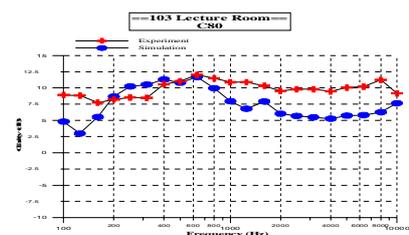


圖 5 演講教室平均音樂清晰度

(四) 平均快速語言傳輸指數(空席)，如圖 6 所示，模擬與實驗之值趨勢很相近且兩者之值

介於 0.6~0.8 之間。快速語言傳輸指數之模擬與實驗趨勢相同，模擬之平均值為 0.65，實驗之平均值為 0.70，兩者相差 0.05。

(五) 平均輔音損失率(空席)，如圖 7 所示，模擬與實驗之值趨勢很相近且兩者之值在 10% 之間。輔音損失率之模擬與實驗趨勢相同，模擬之平均值為 5.05%，實驗之平均值為 3.9%，兩者相差 1.15%。

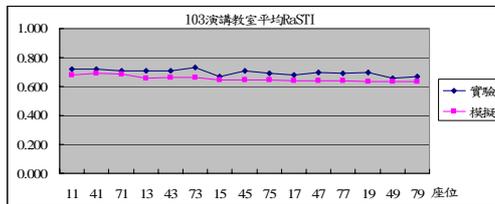


圖 6 演講教室平均快速語言傳輸指數

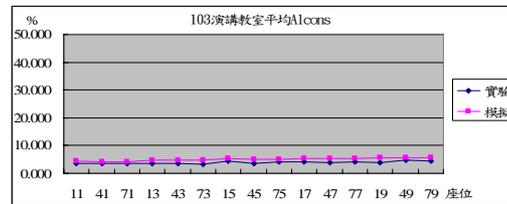


圖 7 演講教室平均輔音損失率

三、多功能育樂館聲場模擬計算及實測之比較

以下為多功能育樂館音響特性，而各音響特性皆作整體的評估，因此採用平均值，音響特性有殘響時間、聲壓分佈、語言清晰度、音樂清晰度、快速語言傳輸指數與輔音損失率，模擬與實驗比較如下：

(一) 平均殘響時間(空席)，如圖 8 所示，低頻區約 4.5 秒左右。殘響時間模擬與實驗趨勢相近且差距很小。

(二) 平均語言清晰度(空席)，如圖 9 所示，模擬與實驗之值趨勢相同，越往高頻越大。語言清晰度模擬與實驗有差距不過趨勢相近，越往高頻，值越高，此外計算之語言清晰度(500Hz、1kHz 與 2kHz 之平均值)為-3.05dB 與實驗之值-4.05dB，兩者相差 1dB。

(三) 平均音樂清晰度(空席)，如圖 10 所示，模擬與實驗之值趨勢相同，越往高頻越大。音樂清晰度與語言清晰度一樣共同現象，此外計算之音樂清晰度(500Hz、1kHz 與 2kHz 之平均值)為-1.91dB 與實驗之值-2.52dB，兩者相差 0.61dB。

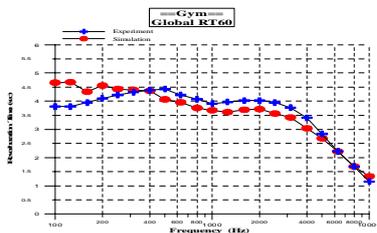


圖 8 多功能育樂館平均殘響時間

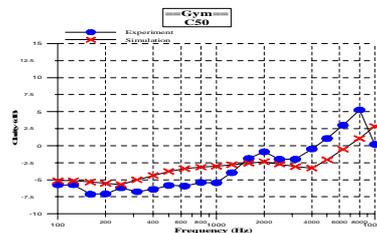


圖 9 多功能育樂館平均語言清晰度

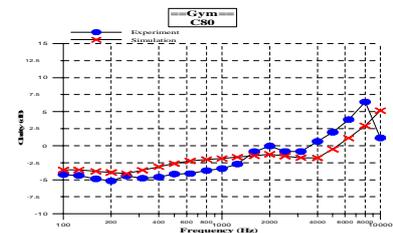


圖 10 多功能育樂館平均音樂清晰度

(四) 平均快速語言傳輸指數(空席)，如圖 11 所示，模擬與實驗之趨勢一致且值越往後列變化越小。快速語言傳輸指數之模擬平均值為 0.40，實驗之值為 0.42，兩者相差 0.02，不過趨勢相同。

(五) 平均輔音損失率(空席)，如圖 12 所示，模擬與實驗之趨勢相同且值越往後列變化越小。輔音損失率模擬與實驗趨勢相同，且模擬平均值為 20.51%，實驗之值為 18.56%，兩者相差 1.95%。

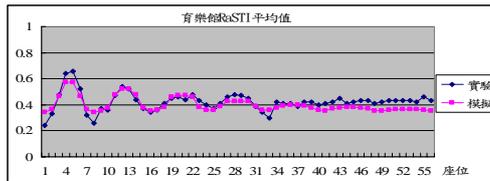


圖 11 多功能育樂館平均快速語言傳輸指數

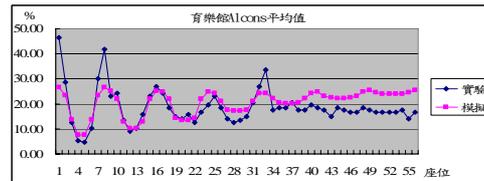


圖 12 多功能育樂館平均輔音損失率

肆、結論

綜合本文聲場模擬計算與實驗可得以下結論：

一、系工系迴響室未加吸音材與加吸音材兩者之殘響時間模擬計算與實驗結果相當接近，其次室內空無一物時之聲壓分佈經模擬計算與實驗結果，其趨勢仍很接近。因為迴響室是擴散相當好之聲場，清晰度相當不好，本文未做分析比較，迴響室之幾何空間裝潢佈置很簡化，結果皆在預期中，足以說明本文中數值模擬計算與實驗過程是正確的。

二、演講教室之裝潢比較複雜，進行模擬計算與實驗，首先輸入音源位置與音量大小必需一致，其次裝潢材料與座椅吸音特性之正確性扮演很重要之角色，本次模擬計算輸入之座椅與邊牆材之吸音係數因為無法事先實驗獲得，僅採用經驗預估值，其結果顯示，以整體而言，殘響時間趨勢很相近，整體之聲壓分佈之模擬與實驗比較發現差距雖大但趨勢一致，語言、音樂清晰度之模擬與實驗的變動在中高頻稍顯得大些，但其平均值卻很相近(絕對誤差 3dB 以內)，快速語言傳輸指數與輔音損失率趨勢走向一致，整體平均值很相近，絕對誤差分別為 0.05 與 1.15%。

三、多功能育樂館屬於多功能用途的廳堂，其幾何空間與裝潢材更為複雜，進行模擬計算與實驗，首先輸入音源位置與音量大小必需一致，此外邊牆與裝潢材之吸音係數，與前面相同使用經驗預估值，其結果顯示，殘響時間趨勢相同；整體之聲壓分佈之模擬與實驗比較發現變動較大，音源於實驗與模擬之指向性為差異原因之一。語言、音樂清晰度之模擬與實驗趨勢一致，平均值也很相近(絕對誤差 1dB 以內)，快速語言傳輸指數與輔音損失率模擬與實驗趨勢一致，整體平均值很相近，絕對誤差分別為 0.02 與 1.95%。

四、經由三間聲場之音響特性模擬計算與實驗比較分析，可以確認在聲場邊界材之吸音特性、幾何形狀建模和喇叭型號位置輸入正確情況下：EASE 軟體可以正確進行各種音場特性之模擬以符合音響特性之要求，並可以節省因設計不良事後再進行修改補強之龐大成本，同時實驗量測技術，本文也詳述具有相當之可靠性，可作為音響建築完工後音響特性之再驗證。

伍、參考文獻

- [1] L.L. Beranek, Concert and Opera Halls:How they Sound, ASA, (1996).
- [2] T. Houtgast and H.J.M Steneken, A multi-language evaluation of the RaSTI-Method for estimating speech intelligibility in auditoria, Acustica, Vol 54, pp. 185-199, (1984).
- [3] 馬大猷、沈豪，聲學手冊，第 652-655 頁，北京，科學出版社(1984)。
- [4] V.M.A. Peutz, Articulation Loss of Consonants as a Criterion for Speech Transmission in a Room, J Audio Engineering. Society H.11, pp. 915-919, (1971).