



音樂廳

的音響效果

汪育理

一八九五年，薩賓 (Wallace C. Sabine)，哈佛大學的一位年輕物理學家，應聘為佛格 (Fogg) 音樂廳想點改進的辦法，因為這座新完成的音樂廳音響效果壞得令人難以忍受。以前，聲學雖然已經有了相當的發展，但一直很少

人把它用在這方面，由於這位年輕的物理學家的努力，使音響學大放異彩，為世界帶來了無數效果優良的音樂廳。
決定音響效果的標準：音響好壞是一種主觀的、直覺的判斷，不容易以物

理條件定下嚴密的標準。薩氏提出的有三項：第一，強度。不只要細微的聲音傳得遠，還要求前後、左右座位不能有太大的差別。第二，失真程度。失真主要是由於共振，干涉，吸收不均等原因，改變了泛音 (Overtone) 間的相對強度所引起的。第三，干擾。來源是反響 (Reverberation)，回聲和噪音。反響是音波在牆壁、地板間多次反射的結果；回聲是單次反射的結果。

以上是最初的標準，近年來又增加了很多，這是集中音樂專家和物理學家，尋求物理量和音樂效果的各種關係後得到的結果。以下是 Beranek 所列的標準，按照它們的重要性排列：

一、親密度 (Acoustical Intimacy)：指聲源發出的聲波直接到達與一次反射後到達的時間差。

二、生動程度 (Liveness)：主要取決於中頻及高頻的反響時間 (250 Hz 以上)。

三、溫暖感 (Warmth)：這關連到低頻 (250, 125, 67 Hz) 與高頻 (500, 1000 Hz) 平均反響時間的比值。

四、直接聲波的強度：這與座位位置，演奏團體及座位與舞臺之間觀眾人數有關 (人體是很好的吸音物體)。

五、反響的強度：與音樂廳容積，反響時間，聲源強度有關。

以上五點是最重要的，次要條件有三：

一、平衡與混合 (Balance and Blend)：樂隊或合唱團表演時，良好的平衡與混合使音樂和諧優美。

二、擴散 (Diffusion)：使音樂不只從一個方向，而能從各方向傳來。

三、整體 (Ensemble)：指團體演奏時彼此呼應聯絡的難易度，聽到同伴的難易度 (除了與演奏者的訓練有關之外，音樂廳是決定性因素)。

以上這八項也並不十分完全，例如效果好壞不均 (某些地方好、某些地方差)、噪音等問題都沒有列進去。

聲音的吸收與反響：每種物質有不同的吸收率。打開的窗戶相當於完全吸收，其他物質的吸收都可折合成「相當多大開窗面積」來計算。然後將牆、地板、觀眾等的「開窗」面積相加，我們就可以得到整個廳的吸收率。吸收率是頻率的函數，不同物質與頻率的關係也不同。

反響時間是 512 Hz, 60 dB 的持續聲源關掉以後，聲音強度降到原來百萬分之一所需的時間，它與聲源位置及測量者位置幾乎無關，而與吸收率大致滿足 $k = aV$ 之關係， k 是個常數，約等於 $0.05V/(t^3)$ ， V 是音樂廳容積， a 表吸收率， t 表反響時間。由這個式子可以算出一個音樂廳的反響時間。

舉個例子來說，讓我們算一座 $20 \times 40 \times 40 \text{ft}^3$ 大的音樂廳的反響時間。設每面牆 800ft^2 吸收率 0.034 (每平方呎相當於 0.034 平方呎開窗)：地板 $40 \times 40 \text{ft}^2$ 吸收率 0.03，天花板 $40 \times 40 \text{ft}^2$ ，吸收率 0.034。

面	積	吸收率	數	目	總吸收率
牆	20×40	$\times 0.034$	$\times 4$		$= 110$
天花板	40×40	$\times 0.034$	$\times 1$		$= 55$
地板	40×40	$\times 0.03$	$\times 1$		$= 48$
座位	—	0.1 (每個)	$\times 50$		$= 5$
總計	—	4.7 (每個)	$\times 50$		$= 235$
				Σ	$= 453$

$$T = \frac{0.05 \times 32000}{453} = 3.45 \text{ sec}$$

這樣算出來的結果大致上與實驗是符合的。

至於多長的反響時間最好，還沒有一定的答案，一方面這是個較主觀的問題，一方面同一個人的觀點隨着音樂廳的大小也有不同。目前所能做的只有就公認較佳的音樂廳作實地測量做為新建音樂廳的參考。

音樂廳的改良：首先要談的是回聲。反射音波與直接音波到達時間相差超過 70 ms，且大得能被聽到時我們稱它為回聲。用水波槽及音樂廳縮小模型，可找出發生地點，這大抵是牆壁彎曲處或圓頂，產生類似凹面鏡的效果，只要在這些地方蓋上吸收率大的東西就可以消除。

通風設備造成的噪音常是令人困擾的問題。安置通風設備時必須盡量避免容易振動的地方，由阻滯係數、彈性係數、質量不難找出合適的地點。擴散不良時可安置大量不規則排列的反射板，牆上的小凹洞也有助於擴散。

弦樂器在失真嚴重的音樂廳裏往往有如狼嗥，如果原因是房屋結構，則必須重新設計牆壁，盡量使它形狀不對稱，有時亦可能是由不均勻的吸收所造成，這時就要重新選擇吸音的材料。

電腦的運用：在建築之前，使用電腦可先造出完成後的音響效果。將沒有反響的訊號，回聲時間及大小 (可由建築材料及結構算出)，反響先算出後送進電腦，輸出端接上揚聲器，放在沒有回聲的房間裏，我們就可以聽出類似實際的效果。隨頻率變化，擴散好壞也可以算出來。這樣一方面可減少完成後修改的麻煩，一方面由比較理論和實際的差異，可作為改進理論的參考。

理條件定下嚴密的標準。薩氏提出的有三項：第一，強度。不只要細微的聲音傳得遠，還要求前後、左右座位不能有太大的差別。第二，失真程度。失真主要是由於共振，干涉，吸收不均等原因，改變了泛音 (Overtone) 間的相對強度所引起的。第三，干擾。來源是反響 (Reverberation)，回聲和噪音。

反響是音波在牆壁、地板間多次反射的結果，回聲是單次反射的結果。以上是最初的標準，近年來又增加了很多，這是集中音樂專家和物理學家，尋求物理量和音樂效果的各種關係後得到的結果。以下是 Beranek 所列的標準，按照它們的重要性排列：

一、親密度 (Acoustical Intimacy)：指聲源發出的聲波直接到達與一次反射後到達的時間差。

二、生動程度 (Liveness)：主要取決於中頻及高頻的反響時間 (250 Hz 以上)。

三、溫暖感 (Warmth)：這關連到低頻 (250, 125, 67 Hz) 與高頻 (500, 1000 Hz) 平均反響時間的比值。

四、直接聲波的強度：這與座位位置，演奏團體及座位與舞臺之間觀眾人數有關 (人體是很好的吸音物體)。

五、反響的強度：與音樂廳容積，反響時間，聲源強度有關。

以上五點是最重要的，次要條件有三：

一、平衡與混合 (Balance and Blend)：樂隊或合唱團表演時，良好的平衡與混合使音樂和諧優美。

二、擴散 (Diffusion)：使音樂不只從一個方向，而能從各方向傳來。

三、整體 (Ensemble)：指團體演奏時彼此呼應聯絡的難易度，聽到同伴的難易度 (除了與演奏者的訓練有關之外，音樂廳是決定性因素)。

以上這八項也並不十分完全，例如效果好壞不均 (某些地方好、某些地方差)、噪音等問題都沒有列進去。

聲音的吸收與反響：每種物質有不同的吸收率。打開的窗戶相當於完全吸收，其他物質的吸收都可折合成「相當多大開窗面積」來計算。然後將牆、地板、觀眾等的「開窗」面積相加，我們就可以得到整個廳的吸收率。吸收率是頻率的函數，不同物質與頻率的關係也不同。

反響時間是 512 Hz, 60 dB 的持續聲源關掉以後，聲音強度降到原來百萬分之一所需的時間，它與聲源位置及測量者位置幾乎無關，而與吸收率大致滿足 $k = \alpha V$ 之關係， k 是個常數，約等於 $0.057 \text{ (ft}^3\text{)}$ ， V 是音樂廳容積， α 表吸收率， τ 表反響時間。由這個式子可以算出一個音樂廳的反響時間。

舉個例子來說，讓我們算一座 $20 \times 40 \times 40 \text{ ft}^3$ 大的音樂廳的反響時間。設每面牆 800 ft^2 吸收率 0.034 (每平方呎相當於 0.034 平方呎開窗)：地板 $40 \times 40 \text{ ft}^2$ 吸收率 0.03，天花板 $40 \times 40 \text{ ft}^2$ ，吸收率 0.034。

面	積	吸收率	數	目	總吸收率
牆	20×40	$\times 0.034$	$\times 4$		$= 110$
天花板	40×40	$\times 0.034$	$\times 1$		$= 55$
地板	40×40	$\times 0.03$	$\times 1$		$= 48$
座位	—	0.1 (每個)	$\times 50$		$= 5$
總計	—	4.7 (每個)	$\times 50$		$= 235$
				Σ	$= 453$

$$V = 32000 \text{ ft}^3 \quad \therefore T = \frac{0.05 \times 32000}{453} = 3.45 \text{ sec}$$

這樣算出來的結果大致上與實驗是符合的。

至於多長的反響時間最好，還沒有一定的答案，一方面這是個較主觀的問題，一方面同一個人的觀點隨着音樂廳的大小也有不同。目前所能做的只有就公認較佳的音樂廳作實地測量做為新建音樂廳的參考。

音樂廳的改良：首先要談的是回聲。反射音波與直接音波到達時間相差超過 70 ms，且大得能被聽到時我們稱它為回聲。用水波槽及音樂廳縮小模型，可找出發生地點，這大抵是牆壁彎曲處或圓頂，產生類似凹面鏡的效果，只要在這些地方蓋上吸收率大的東西就可以消除。

通風設備造成的噪音常是令人困擾的問題。安置通風設備時必須盡量避免容易振動的地方，由阻滯係數、彈性係數、質量不難找出合適的地點。擴散不良時可安置大量不規則排列的反射板，牆上的小凹洞也有助於擴散。

弦樂器在失真嚴重的音樂廳裏往往有如狼嗥，如果原因是房屋結構，則必須重新設計牆壁，盡量使它形狀不對稱，有時亦可能是由不均勻的吸收所造成，這時就要重新選擇吸音的材料。

電腦的運用：在建築之前，使用電腦可先造出完成後的音響效果。將沒有反響的訊號，回聲時間及大小 (可由建築材料及結構算出)，反響先算出後送進電腦，輸出端接上揚聲器，放在沒有回聲的房間裏，我們就可以聽出類似實際的效果。隨頻率變化，擴散好壞也可以算出來。這樣一方面可減少完成後修改的麻煩，一方面由比較理論和實際的差異，可作為改進理論的參考。