

中國音樂學院音樂廳聲學設計綜述

王靜波 章奎生

上海現代建築設計（集團）有限公司
現代都市建築設計院 章奎生聲學設計研究所 上海 200041

1 引言

中國音樂學院是以中國民族音樂教育和研究為特色的綜合性高等音樂學府，位於北京北四環健翔橋畔的安翔路 1 號。學院於 2005 年籌建排演廳及綜合教學樓工程，綜合樓內包括 937 座音樂廳、300 座演奏廳、錄音棚及排練廳等，同時還設有國樂展廳、圖書閱覽室等公共空間。項目各專業的初步設計於 2005 年 10 月完成，之後進行了各個專業的施工圖設計，2008 年 8 月工程建設基本完成，其中的音樂廳、演奏廳於 2008 年 10 月投入使用。

作為國內著名的音樂學府，音樂廳的功能定位於專業交響樂和室內樂演出、各類民族和西洋樂器的演奏，院方與歐美及亞太地區的一些音樂院校有著廣泛的交流，因此無論是學院領導、還是專業教師，在建設過程中，一直都對這座新建音樂廳的聲學效果給予了很高的期望和要求。

2 音樂廳功能及建築概況

從規模來說，937 座音樂廳屬於中型音樂廳，該廳主要以音樂演出為主，為中國音樂學院排演廳及綜合教學樓工程的一項重要組成部分。音樂廳平面形狀呈橢圓形，觀眾廳池座長度約 36 米，最大寬度約 28 米。觀眾座席環繞演奏區佈置，包括一個有起坡的、由欄板分隔的池座區和一層樓座區和兩邊側包廂，音樂廳的建築平面及剖面圖見圖 1a、圖 1b 和圖 2 所示。圖 3 為音樂廳內室內裝修完工後的圖片。

音樂廳舞臺演奏區的寬度約 18 米，最大深度約 10.5 米，面積約 150M²，可滿足一般交響樂團樂隊演出。廳內聲學有效體積約 8750M³，每座容積 9.3m³。通過合理的室內聲學設計，使音樂廳具有良好的音質效果，在各類使用功能條件下，均有較好的主觀音質效果。

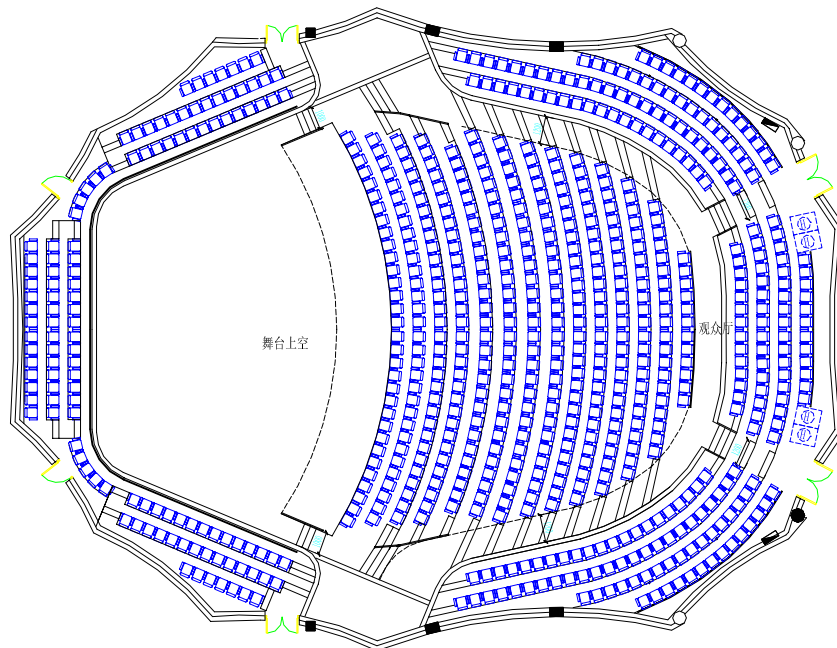


圖 1a. 音樂廳觀眾廳池座平面圖

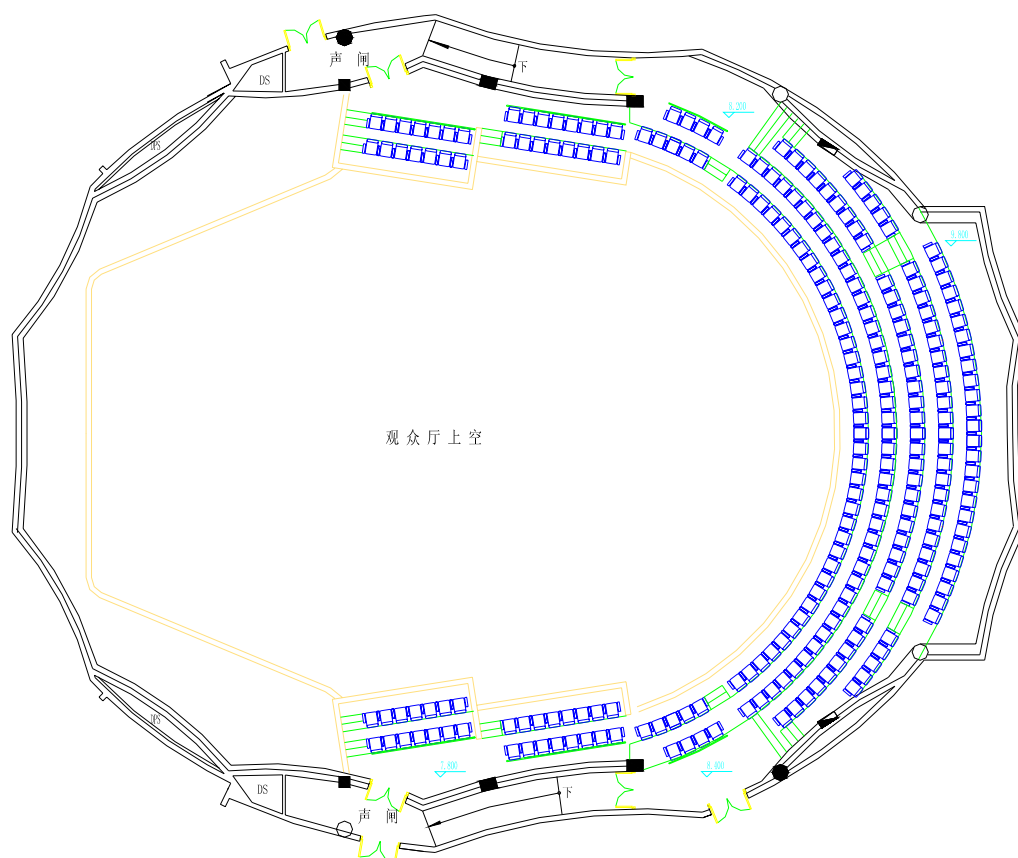


圖 1b.音樂廳觀眾廳樓座平面圖

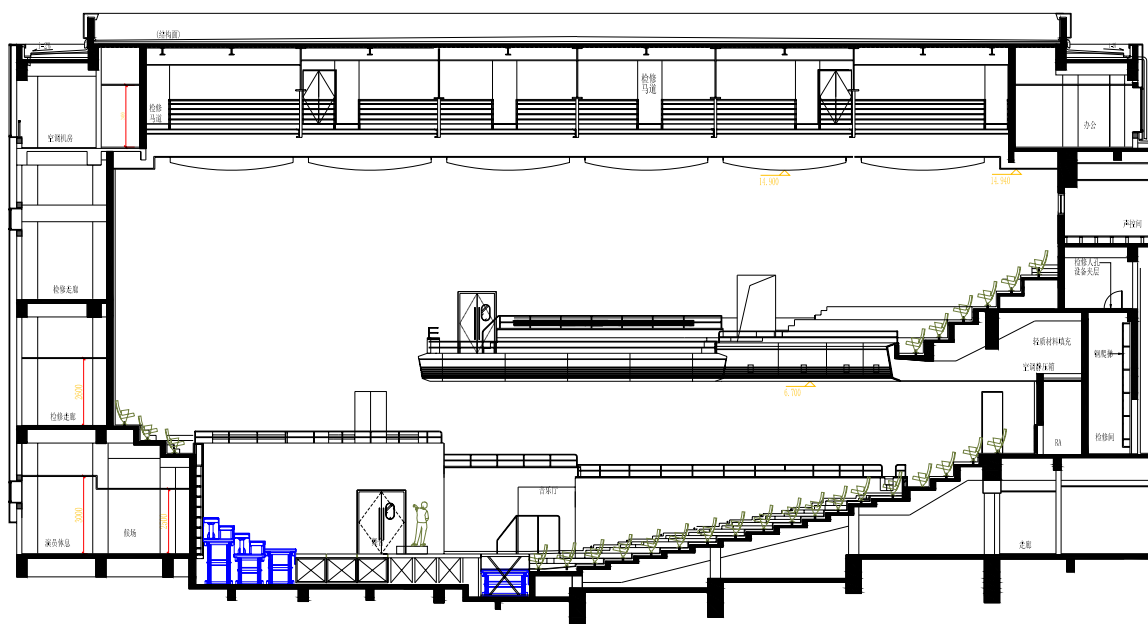


圖 2.音樂廳觀眾廳剖面圖



圖 3.音樂廳內室內裝修完工後實際效果

3 室內聲學設計

3.1 觀眾廳平面、剖面形式的確定

音樂廳內部的平面形狀呈橢圓形，按照基本的幾何聲學原理，橢圓形內凹的“硬質”牆面對聲音反射均勻地分佈是不利的，聲音往往彙聚在特定的區域，形成局部聲聚焦，使得聲場分佈不均勻，表現為廳內不同位置處，聲音的響度及音質的主觀感受差別很大。當今音樂廳設計，所關注的已不僅僅是混響時間的把握，混響取決於空間的體積、形狀和材料構造等，儘管這是非常重要的。同時需將注意力放在建築幾何學和其他一些聲學概念上，如響度、明晰度、聲音的自然親切感和舒適感，以及聲音的擴散感、反射聲的紋理等等，所有這一切都會影響音樂廳最終的音質整體效果。在建築方案階段，聲學設計就建築內部的形體、廳的寬度及長度的最佳範圍向建築師提出了一些建議，並對音樂廳的側牆、兩端端牆的幾何形式進行了優化設計，以期在三維的空間內，有效地將早期反射聲引導到觀眾區的主要區域，合理的觀眾廳寬度尺度，有利於向觀眾區提供足夠的早期側向反射聲。對於中型音樂廳，需要有效地控制廳內的聲場力度，因此合適的體量是非常重要的。特別是完整規模的交響樂隊演出，為了降低樂隊產生的高聲功率級的聲音，取得很好的音樂融合、平衡的效果，足夠的體積是絕對必需的。如不能提供足夠的體量，往往會在演奏台的後方開放一些空間，以吸收低音樂器和定音鼓等的聲能量。因此不少新建的大型音樂廳都在演奏台區域考慮一些構造或空間形態可變的形式。作為音樂學院的音樂廳，由於投資或建築空間本身的限制，對於演奏台區域還是以常規固定的方式處理，而重點考慮的是確保音樂廳內有足夠體量的聲學有效空間。

作為現代室內建築裝修風格的音樂廳，本廳的吊頂採用常規的平緩形式，為外凸的圓弧狀天花排列，弧形輪廓內還配有條狀的凹槽，猶如鋼琴的琴鍵。總體上這樣和緩的天花既有效地提高了廳內的體量、也能夠使得聲音均勻分佈，從視覺效果來看，和中型音樂廳的建築形態是非常和諧的。

音樂廳主要的特徵參數

聲學有效容積：約 8750M³

座位數：937 座

每座容積：9.3m³

最大寬度：約 28 米

池座長度：約 36 米

樓座最後排到演奏台中心距離：約 27 米

3.2 室內聲學音質參數的電腦類比分析

在建築初步設計階段，配合建築師對整個音樂廳的建築形體基本確定後，聲學設計著手對音樂廳的室內聲學音質參數進行了電腦類比分析，室內聲學設計中採用了由丹麥技術大學開發的室內聲學類比軟體 Odeon，對觀眾廳內的混響時間、明晰度、側向反射能量因數、聲場強度等室內音質參量進行了分析，同時也可對觀眾廳內特定參考點的反射聲序列的時間分佈、相對強度等狀況有一直觀的分析。圖 4a.~ 圖 4d.為部分室內聲學參數的類比分析分佈。

室內聲場電腦類比分析對舞臺演奏區上空加裝聲反射板情形下，對舞臺及觀眾廳區域音質參量的影響也做了分析。

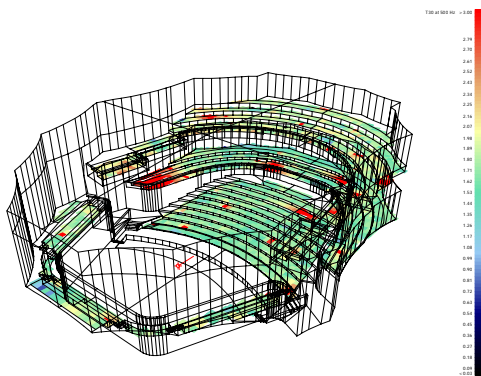


圖 4a. 混響時間

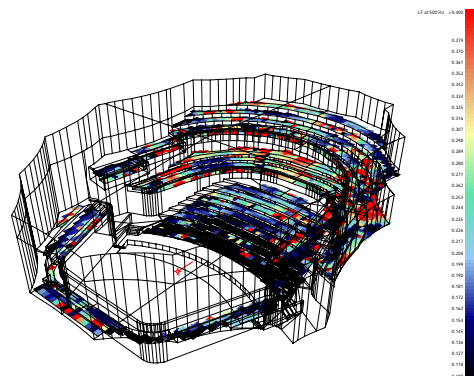
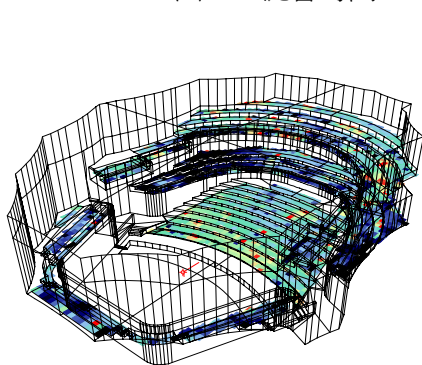


圖 4c. 側向能量因數



明晰度

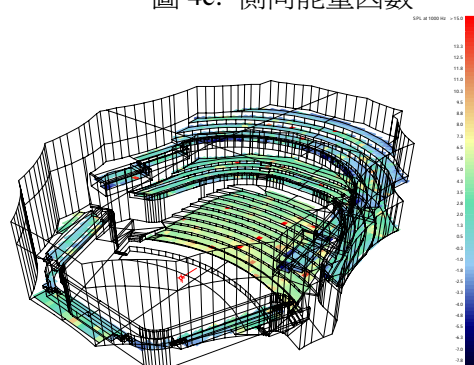


圖 4d. 聲場力

關於音樂廳演奏臺上方的聲反射板，一般認為除了加強樂師之間的相互聽聞、取得演奏時良好的聽聞平衡感，對前中區的聽眾也起到提供一定程度的早期反射聲的作用。但也有觀點認為，演奏臺上方的聲反射板作用並不大，某些情況下甚至會有一些負面效果。根據音樂廳的規模、使用功能的不同，音樂廳演奏台上空反射板的形式也存在不同的設計理念，形式上也有很大的不同。近年來比較有代表性的是以美國 Artec 聲學和劇院顧問公司設計的模式，即演奏臺上方的聲反射板是由整體一塊巨大、可上下調節的反射板構成，在很多由 Artec 顧問公司擔任聲學設計的大型、中型音樂廳中都可看到這一風格的聲反射板。

綜合考慮造價、土建結構、機械等方面的可行性，本音樂廳聲反射板採用比較傳統的形式，在演奏臺上方懸吊了 12 塊聚碳酸酯透明聲反射板。最初考慮做成矢徑 2000mm、矢高 200mm 的球切面形式，但考慮到製作成本等因素，最終形式改為等邊梯形狀的 15—20 毫米厚 Degussa Flexiglas 聚碳酸酯透明聲反射板。各反射板之間保持較大的間距，反射板主要對

中高頻的聲音起作用，而低頻聲則繞過反射板，由厚實的吊頂進行反射，並形成整個大廳的混響。

室內聲學模擬分析對有、無聲反射板的狀態進行了分析，並比較了反射板懸掛在不同高度，一些室內音質參數的變化情況。

以明晰度 C80 為例，隨著聲反射板高度降低，池座各測點的 C80 值均有增大的趨勢；而高度提升，C80 值均有減小的趨勢。有聲反射板的 C80 值高於無聲反射板的 C80 值，各個測點均有這樣的特性；

完工後對演奏台上空聲反射板高度調整時，採用了一定規模樂隊進行實際演奏，根據樂師們的主觀音質感受來確定聲反射板懸吊的高度。有趣的是，最終確定的高度與模擬分析中得出的合適高度是完全一致的。

3.3 音樂廳竣工後的室內聲學音質測試

通過測試音樂廳內不同位置處傳聲器和測量聲源之間的脈衝回應，對脈衝回應進行分析得出所測的主要音質參量，同時對音樂廳的本底雜訊進行了測定。

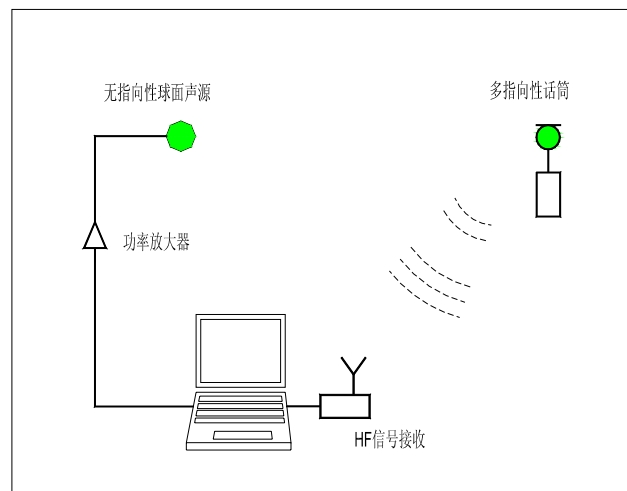


圖 5. 音樂廳脈衝回應測試系統圖

3.3.1 主要音質參數測試結果

表 1. 接收點部分室內聲學參數類比計算平均值

頻帶	125	250	500	1000	2000	4000
混響時間 RT_{30}						
---空場無吸聲簾幕	2.026	2.186	2.510	2.544	2.144	1.430
---空場有吸聲簾幕	1.909	1.908	1.989	1.995	1.743	1.224
·空場吸聲簾幕調節幅度	0.117	0.278	0.521	0.549	0.401	0.206
---65%滿場無吸聲簾幕	1.840	2.014	2.037	2.060	1.820	1.340
明晰度 Clarity						
---空場無吸聲簾幕	-3.36	-1.75	-1.04	-1.4	-1.03	1.92
---空場有吸聲簾幕	-3.03	-0.88	-0.21	-0.12	0.31	2.84
---65%滿場無吸聲簾幕	-3.87	-2.01	-1.21	0.08	0.01	1.83
側向能量因數 LEF						
---空場無吸聲簾幕	0.16	0.25	0.24	0.29	0.35	0.38
聲場強度 G						
---空場無吸聲簾幕	1.58	2.84	2.27	1.76	3.51	3.08

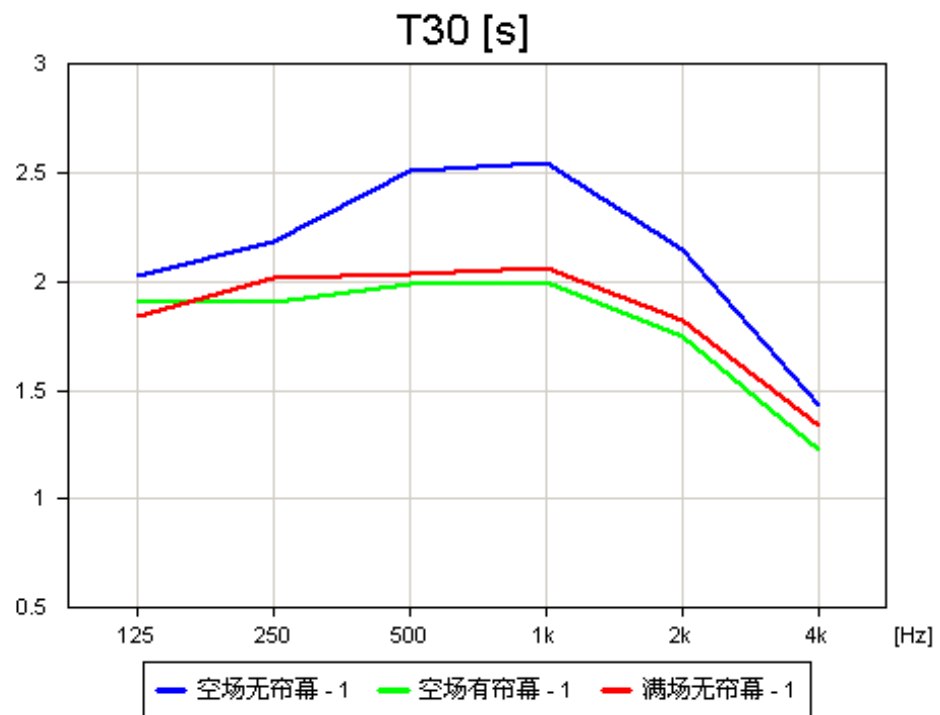


圖 6.音樂廳三種條件下混響時間頻率特性

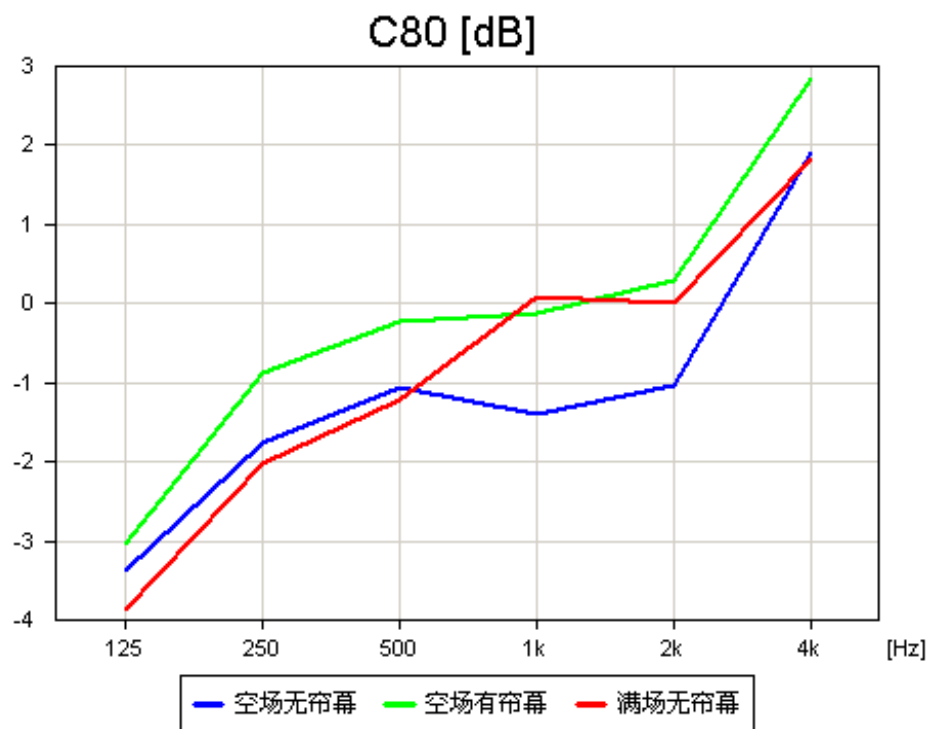


圖 7. 音樂廳三種條件下明晰度 C80 頻率特性

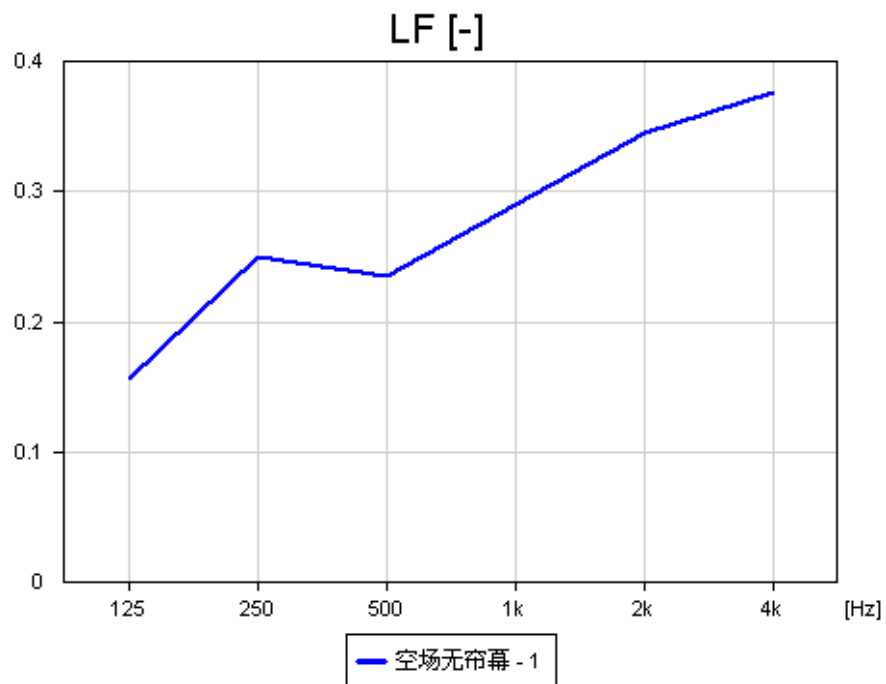


圖 8.音樂廳空場側向能量因數頻率特性

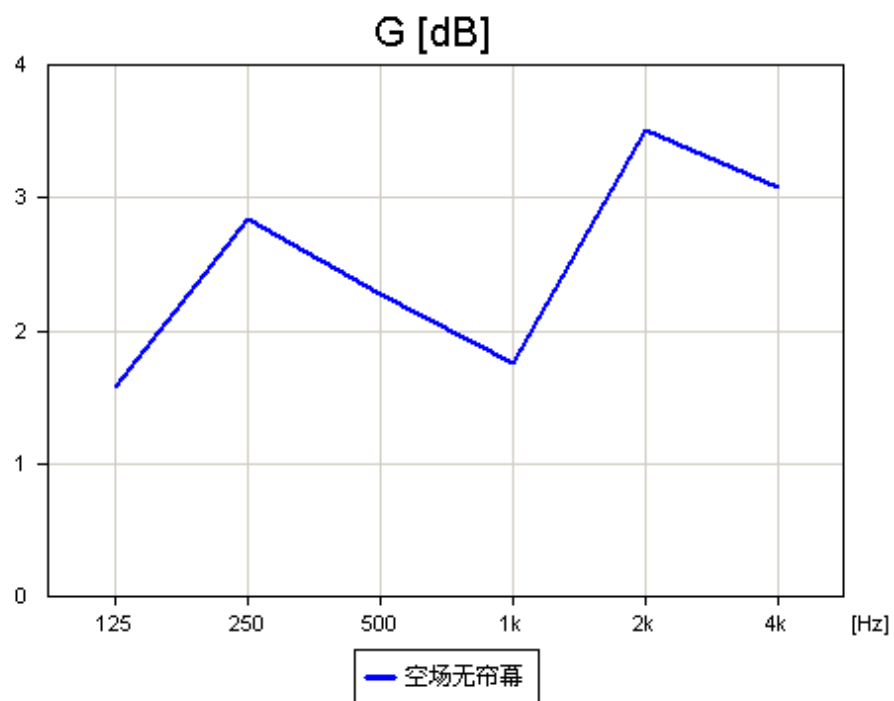


圖 9.音樂廳空場聲場強度頻率特性

3.2.2. 廳內本底雜訊測量結果

表 2. 音樂廳本底雜訊頻率特性測量結果（空調系統正常運行）

倍頻帶聲級(dB)								計權聲級(dB)			
63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	A	B	C	Lin
36	25	18	16	14	13	12		22		41	

從混響時間實測結果來看，音樂廳空場條件下，側牆可調吸聲簾幕在使用與非使用狀態下，中頻 500Hz 平均混響時間分別為 1.99 秒和 2.51 秒，可調幅度為 0.52 秒，可見本音樂廳所設置的吸聲簾幕具有明顯的效果。這對於使用擴聲類的音樂活動或在其他電聲設備使用的情況下，通過牆面吸聲簾幕的使用，可以提高使用時的語言清晰度，這在使用電聲系統的條件下是必須的。

在接近滿場演出條件下（測試時的上座率約為 70%），中頻 500Hz 平均混響時間為 2.0 秒，如在完全滿座條件下，滿場混響時間估計約在 1.85—1.95 秒，上述實測混響時間與設計預期值完全吻合，達到設計預期的混響時間指標。滿場混響時間的頻率特性也和設計預期的相吻合。

實測音樂廳的明晰度 C80 結果表明，音樂廳空場情況下，在牆面有、無吸聲簾幕的情況下，C80 值的變化幅度非常明顯，中頻有 1.3dB 左右的變化幅度，並且在整個頻率範圍內均有較為明顯的數值變化幅度，這表明牆面有、無吸聲簾幕對於廳內的明晰度 C80 有明顯的改變，這樣實際使用時，可很好地滿足特定使用場合下對音樂豐滿度和語言清晰度的不同要求；側向能量因數 LF 的測量結果表明，該廳具有較好的側向反射聲分佈，因而音質方面具有較好的空間感，這與該廳的合適的寬度、牆體有利於聲學的建築形態是有直接關係的；聲場強度 G 的測量結果表明，該廳具有非常合適的聲音自然響度，符合中型音樂廳聲場強度 G 的數值規律。對於中型音樂廳合適地控制聲場強度是非常重要的；廳內本底雜訊測試表明，該廳本底雜訊達到設計要求，即 NR-20 雜訊曲線。

4 結語

本廳於 2008 年 10 月完工後即投入使用，先後舉行過 2008 北京國際低音提琴音樂節（2008 International Double Bass Festival）、中國音樂學院歌劇大師班彙報音樂會等若干場演出活動，包括交響樂、室內樂、獨奏、獨唱等。據校方的介紹，音樂節期間，來自國內外的音樂人士對音樂廳的音質給予了很高的評價。荷蘭飛利浦唱片公司的錄音師聆聽了現場音樂會的效果後，向校方表示，擬將投資一些錄音設備，將此音樂廳作為他們在北京現場錄音的場地。而一般非專業的人士認為，廳內不同位置的聲音效果都很好，即使在大廳的最後排，也能夠非常清晰地聽到臺上不同樂器的演奏，樂隊演出聲音的平衡感、融合度都非常好。

當然，客觀地評價一座音樂廳的室內音質，有待於在建成後相當長的一段時間內聽取各方的意見，這些人士包括熟悉世界各地不同音樂廳特點的樂隊指揮、演奏者、專業的音樂鑒賞家和評論家，以及有很好音樂素養的聽眾。

音樂廳的設計建造是一項多專業的協同設計，聲學專業理應從建築方案階段就深入其中，協同建築師尋求最佳的建築、聲學方案，並在整個設計、施工過程中，關注於所有與聲學相關的問題，尋求穩妥並有創新的解決方案。

參考文獻

- [1] Cremer L., Mueller H. 《室內聲學設計原理及其應用》 王季卿等譯，同濟大學出版社，1995 年
- [2] Leo Beranek 《Concert Halls and Opera Houses》 Second Edition