

# “水立方”比赛大厅室内声学设计

石慧斌 李晋奎 金迪锋

**摘要** / 从模型实验出发,对“水立方”比赛大厅的建筑声学设计做了较为详细的介绍,并结合其竣工验收测试结果,总结出声学解决方案与建筑美学效果相结合的几个关键点,以期对类似场馆的声学设计提供一些经验。

**关键词** / ETFE 膜气枕 混响时间 吸声材料 宽天沟

**ABSTRACT** / In light of the model test, this paper gives a detailed introduction to the architectural acoustic design for the “Water Cube” Contest Hall. Combining with the test results of acceptance check for the completed project, it summarizes several key points about the integration of the architectural aesthetic effect and acoustic solution. These experiences and lessons are expected to be useful for similar venues.

**KEY WORDS** / ETFE (Ethylene Tetra-Fluoro Ethylene) membrane air cushion, reverberation time, acoustic absorbent, wide gutter

## 1 建筑概况

国家游泳中心(水立方)位于北京市北四环外,北中轴线西侧,平面为 $177\text{m} \times 177\text{m}$ 的正方形,建筑高度为30m。“水立方”是一个关于水的建筑,“水”是建筑的灵魂。水立方概念并不是单一的创意,而是一系列的互为补充的设计理念。设计创意中所表现的水立方形式和特征意在使国家游泳中心成为一个水的世界。<sup>[1]</sup>建筑外立面采用ETFE膜结构,很好地实现了建筑的设计创意(图1)。

水立方室内设计延用了建筑设计通透轻盈的整体设计理念,尽可能直接采用ETFE膜气枕作为室内表面材料,使得室内空间充分地享受到自然光。水立方的室内声学设计是在实现以上建筑设计理念基础上进行的,要求室内声学设计以现代建筑的语言对美学问题做出响应,努力使它成为一个令人激动、快乐的和完善的体育设施,为所有进入和使用水立方的人们带来愉悦<sup>[1]</sup>。

## 2 模型测试

如国家游泳中心这般,ETFE膜气枕在大型建筑中大规模使用在国内外尚属首次,国内外还未有相关ETFE膜气枕声学性能的准确数据。因此,在国家游泳中心声学设计之初,为获得ETFE膜气枕声学性能参数,对ETFE膜气枕进行了模型测试。

### 2.1 ETFE 膜气枕模型

国家游泳中心采用的ETFE膜结构由双层ETFE膜气枕构成,每一层ETFE膜气枕又由三层或四层ETFE膜充气组成。其内外立面共由3099个气枕组成,总面积约10万 $\text{m}^2$ ,由24种基本形状排列而成;大小不一,其中最小的1-2 $\text{m}^2$ ,最大的达90 $\text{m}^2$ <sup>[2]</sup>。模型测试时,为节约投资,确定采用21.6 $\text{m}^2$ 的双层ETFE膜气枕,两个气枕间距3.6m(图2)。由于模型尺度很大,一般常用的混响室或隔声实验室无法对其进行测试,需

建立专门实验室对ETFE膜气枕进行模型测试。

### 2.2 模型实验室

模型实验室建于清华大学校园内,平面为正六边形,边长3.8m,每两组平行墙面间净距离6.4m,混响室面积35.5 $\text{m}^2$ 。实验室总高度为15.35m,分上下两部分,下部为混响房间部分,高6.6m;上部为模拟降雨部分,主体为位于塔顶的水槽,由上部钢架支撑(图3-5)。

### 2.3 模型测试项目

根据国家游泳中心声学设计中存在的问题,确定ETFE膜气枕声学测试的测试项目,它们包括ETFE膜气枕的:

- 1) 吸声系数测试;
- 2) 隔空气声隔声量测试;
- 3) 雨噪声级测试。

在模型测试开始之前,针对每个测试项目确定了多种的测试条件(三个项目共计近80种测试条件),以获得丰富的实验数据,为提出合理科学的声学解决方案提供数据支持。

### 2.4 吸声系数测试结果

吸声系数检测<sup>[3]</sup>进行了近10种不同条件的测试,较为典型的测试结果如表1、表2所示。

### 2.5 模型实验小结

经过模型测试,我们对ETFE膜气枕构造的声学性能有了初步的了解,为水立方比赛大厅混响时间控制提供了基础数据。

单层ETFE膜气枕对低频声有一定吸收,而双层ETFE膜气枕的吸声性能不佳,当气枕为三层膜时NRC为0.05,与平板玻璃的吸声性能相当,由此可见双层ETFE膜气枕构造能为比赛大厅的混响时间控制提供的吸声量极为有限,必需在比赛大厅室内另外增加大面积、高吸声性能的吸声材料;当双层ETFE气枕(每个气枕3层ETFE膜)下附一层小孔透明薄膜时,能提高构造的吸声情况系数,尤其对中高频吸声性能

的提高更为明显,使其NRC达到0.35,这一结果为提高透明ETFE膜气枕构造的吸声性能提供了一种途径;在两个气枕中间加两层阳光板,会使构造吸声性能进一步减弱,特别是低频吸声性能减弱明显;在两个气枕中间加强吸声材料(岩棉或玻璃棉等),对构造吸声性能影响不大;在两个气枕上增加阻尼材料,对构造吸声性能影响不大。

3 比赛大厅室内声学解决方案

经过4年紧张而漫长的室内声学设计及施工,水立方终于2008年1月28日竣工交付使用了。作为参与其中的专业设计师,绷紧的神经终于可以放松下来,可以站在旁观者的角度来审视回味它的设计和建造过程。

其实在开始着手水立方比赛大厅声学设计之初,我们对游泳馆的声学设计认识还是停留在以往的经验上:设有跳水台的比赛大厅空间巨大;水面与磁砖地面使得大厅地面无法布置吸声材料;天花板上吊有大量吸声体,以弥补地面吸声的不足。面对声学性能不确定的ETFE膜气枕和水立方室内设计的轻盈、通透的装饰设计效果,的确有些惴惴不安。

3.1 比赛大厅概况

国家游泳中心比赛大厅平面为126.3m×116.7m的矩形,投影面积为13500m²,室内净高28.4m。赛时容积为280500m³,共17000座(其中11000座为临时性座椅,6000座为永久性座椅),每个座椅容积约为16.5m³。功能定位为举行大型国际比赛,国家队训练等。

3.2 比赛大厅混响时间设计允许值

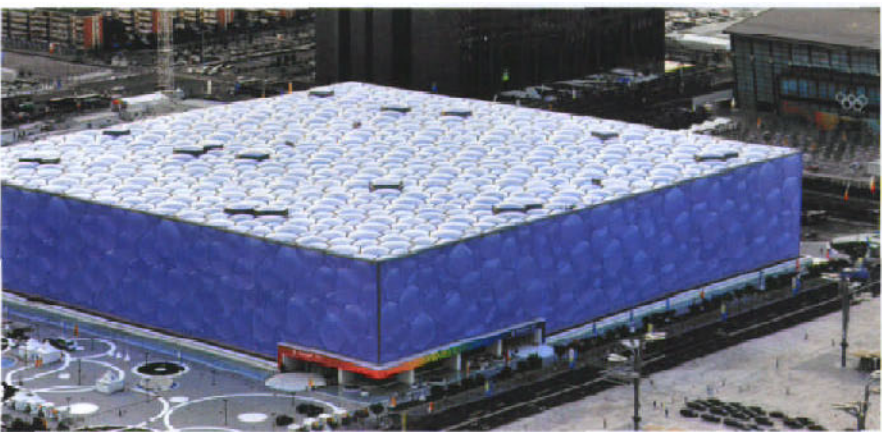
根据比赛大厅的使用要求、国家相关规范、ETFE膜结构的吸声性能以及声学专家讨论会会议意见确定,比赛大厅的中频满场混响时间控制在2.5s以内是可以满足使用要求的,同时要求频率特性基本平直,低频允许有一定的提升,具体设计允许满场混响时间频率特性如表3:

表3 比赛大厅赛时满场混响时间设计允许值<sup>[4]</sup>

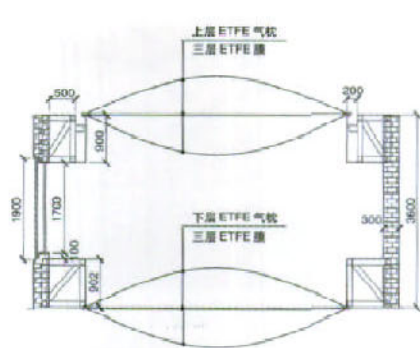
频率(Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
赛时混响时间	3.0	2.75	2.5	2.5	2.25	2.0
混响比	1.20	1.10	1.00	1.00	0.90	0.80

3.3 比赛大厅吸声材料布置情况

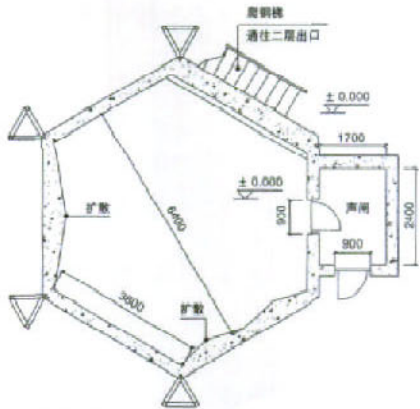
比赛大厅赛时总容积为280500m³,室内总表面积大约40306m²,室内表面尽可能



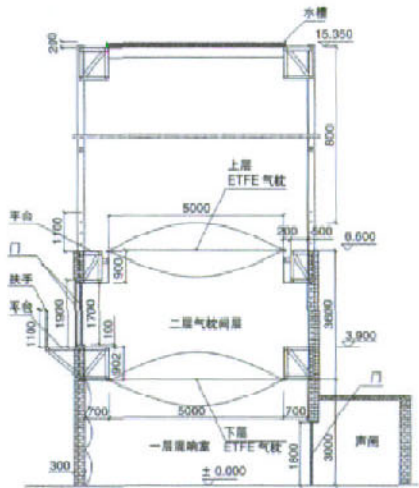
1 水立方外景



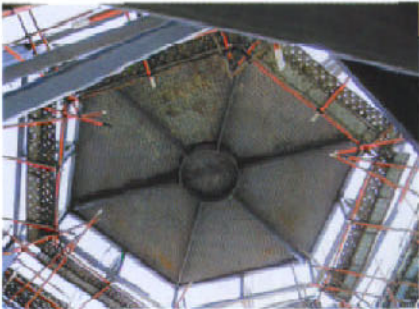
2 ETFE气枕模型剖面



3 实验室平面



4 实验室剖面



5 实验室顶部的模拟雨水槽

表1 ETFE膜气枕吸声系数

测试条件	频率	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz
1一个(上层)三层气枕		0.30	0.21	0.22	0.31	0.07	0.06
2两个三层气枕		0.16	0.10	0.09	0.02	0.00	0.00
3两个四层气枕		0.34	0.20	0.19	0.10	0.05	0.01

表2 ETFE膜气枕(采取措施)吸声系数

测试条件	频率	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz
4两个三层气枕+一层微孔膜(在底层气枕下)		0.25	0.20	0.30	0.30	0.48	0.63
5两个三层气枕+双层阳光板		0.04	0.01	0.09	0.09	0.04	0.02
6两个三层气枕+双层阳光板+岩棉		0.03	0.02	0.08	0.09	0.05	0.03
7两个三层气枕+texlon		0.14	0.14	0.13	0.05	0.01	0.00
8两个三层气枕+一层毯子+一层网+一层毯子+一层texlon		0.14	0.16	0.14	0.06	0.02	0.00

注:隔空气声隔声量和雨噪声级的测试结果在此省略

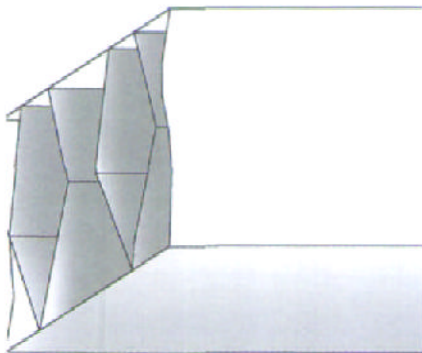




6 比赛大厅会场材料布置



10 比赛大厅东立面



7 钛科丝板构造



8 临时天花与宽天沟



9 宽天沟与马道

地大面积采用ETFE膜气枕外露,经模型实验得知该气枕构造只对低频声有所吸收,而对中高频声几乎为全反射材料,其声学特性与平板玻璃相似。因此,在对比赛大厅进行吸声处理时,采取了以下两个方面的措施:

1) 利用尽可能多的表面进行吸声处理(图6)。

a) 临时天花——临时观众席以上部分,共 5133m<sup>2</sup>,为比赛大厅内最为完整与面积最大的可处理吸声面。

b) 中部天花——ETFE 气枕夹具,为了得到更多的吸声面积,将气枕夹具加宽到 800mm(原 400mm),形成宽天沟,共设置了 1772m<sup>2</sup>的吸声面,分散布置于 ETFE 气枕间。

c) 天花马道——将马道下部的风管用吸声材料 U 形三面贴附,可产生 2393m<sup>2</sup>的吸声面积。

d) 比赛大厅电梯井的外墙面——共有吸声面积 1867m<sup>2</sup>。

e) 临时观众席后墙——共有吸声面积 523.6m<sup>2</sup>。

f) 东、西立面——在 B1 层与首层,比赛大厅的东侧与西侧的观众席看台通道的天花与侧面,共计面积 753m<sup>2</sup>。

g) 固定座椅席入口侧立面设置为吸声面,共 360m<sup>2</sup>。

h) 东立面的 ETFE 膜气枕上挂吸声材料,可提供吸声面积 1734m<sup>2</sup>。

2) 采用吸声频带宽,吸声系数大的吸声材料。

各吸声表面材料分布如下:

钛科丝吸音板(Techstyle)布置的面积有:a),h)共 6867m<sup>2</sup>;

艾音科微孔吸声材料(Basotect)布置的面积有:c)共 2393m<sup>2</sup>;

穿孔铝合金板,布置的面有:b)共 1772m<sup>2</sup>;

穿孔铝蜂窝板,布置的面有:d)、e)、f)共 3143m<sup>2</sup>;

经过以上处理后,计算可知比赛大厅混响时间可以达到设计值,满场混响时间计算值与设计值比较如表4所示。

### 3.3 比赛大厅 ODEON 软件模拟

国家游泳中心比赛大厅设计方案确定

以后,再利用计算机声场模拟软件 ODEON 6.5来进行声场模拟,以此来修正传统声学设计的不足。

ODEON 软件在计算之前应输入:三维的闭合空间模型、各围合面的声学特性、声源特性及位置、接收点的位置、坐席接收面的位置。

ODEON 软件计算时应确定的参数有:声源声线根数、反射次数、截止混响时间、动态范围等。在计算机软件模拟过程中,采用了自然声状态模拟和扩声系统状态模拟二种方式,其满场混响时间模拟结果如表5所示。从以上结果可以看出,声学设计方案可以达到设计允许要求。

### 3.4 吸声构造与建筑美学的结合

上世纪70年代以来,“简约”的设计倾向成为现代建筑的一个明显特征的潮流,这种设计趋势是以尽可能少的手段与方式感知和创造,即要求除去一切多余和无用的元素,以简洁的形式客观理性地反映事物的本质。

国家游泳中心的整体设计中很容易辨认出一种现代的简约思想的痕迹,从而一

表4 比赛大厅满场混响时间允许值与设计值之比较

频率(Hz)	125	250	500	1 K	2 K	4 K
允许值	3.0	2.75	2.5	2.5	2.25	2.0
设计值	2.67	2.46	2.02	2.18	1.95	1.71
差值	-0.33	-0.29	-0.48	-0.32	-0.30	-0.29

表5 比赛大厅满场混响时间允许值与模拟值之比较

频率(Hz)	125	250	500	1 K	2 K	4 K
允许值	3.0	2.75	2.5	2.5	2.25	2.0
自然声状态模拟值	3.92	2.96	2.09	2.03	1.71	1.50
扩声系统状态模拟值	3.80	3.03	2.06	2.06	1.80	1.56

些传统的声学设计手法与构造不再适合比赛大厅的室内声学设计，必须从新的角度寻找新的材料与构造，以适合国家游泳中心的整体设计风格。

在最终室内声学解决方案确定之前，设计人员对声学材料的选择与声学构造的实现，进行了多次的研究与讨论。

1) 临时观众席上天花

设计之初曾计划使用穿孔铝合金板，考虑到这部分天花在奥运会后将要拆除，金属天花将会造成相对浪费。后来确定采用透光率高的钛科丝吸音板(Techstyle)，该板主材为玻璃纤维，分为上下两层，中间有助(图7)，面层包无纺布料。选用该材料一是由于其吸声系数较大，NRC 达到 0.85 以上，另一方面是由于其面密度比较小，为 1.3kg/m<sup>2</sup>，还有较强的透光性和防潮性能。比赛大厅施工完成后，临时观众席的采光也可满足使用要求，达到了较为轻盈通透的视觉效果(图10)。

2) 宽天沟

天花中部 8000 多 m<sup>2</sup> 的面积，ETFE 膜气枕直接外露，为避免中部天花与游泳池、跳水池及池边硬面产生颤动回声，也为进一步增加天花的有效吸声面积，按传统做法吊挂下垂式吸声体解决声学问题，却破坏了室内的建筑效果。经多次讨论，最终决定将固定内层气枕用的气枕夹具加宽至 800mm，形成宽天沟，并在宽天沟上附加穿孔铝合金板吸声构造(图8、9)。宽天沟总面积为 1770m<sup>2</sup> 左右，约占中部天花面积的 20%，且均匀布置，同时气枕充气后外凸的造型也有利于中部天花的声扩散，这都使得建成后比赛池及池边硬地面区域未能产生颤动回声。宽天沟的构造，既保留了中部天花气枕外露的美学要求，也增加了天花的有效吸声面积，同时避免了颤动回声的产生，可谓一举三得。

3) 马道

马道主要功能为检修设备。比赛大厅的马道上还吊有空调风管，截面大小不一，有粗有细。为增加吸声面积，同时改善马道的视觉效果，在马道与空调管道外三面加挂 100mm 厚艾音科微孔吸声材料(Basotect)。该材料为一种防潮海绵状高分子微孔高效吸声材料，为纯白色，质轻，容重为 8kg/m<sup>3</sup>。在吊挂时，分割为 3m 一块，每块之间留有 100mm 的空缝，使得马道整体更加轻盈(图9)。

4) 东立面

从 ODEON 计算机模拟结果看，如果东立面不布置吸声材料(钛科丝吸声板) 混响时间将会达到 2.8 秒左右，将不能达到设计允许值，如果东立面布置吸声材料，混响时间将控制在 2.5 秒以内，而且通过 ODEON 模拟结果中的反射声序列可以看出，东立面的反射声对混响时间的延长起到了关键的作用。因此，东立面必须进行吸声处理。东立面施工完成后，半透光的钛科丝吸声板保证了东向采光的亮度，又增加了东向外墙的整体隔声性能，也达到了声学与建筑室内效果的统一(图10)。

5) 穿孔铝合金蜂窝板

观众席背墙和电梯井外墙均布置了大块穿孔铝合金蜂窝板构造，穿孔率 16%。铝合蜂窝板表面平整，不易变形，为乳白色，很好地与大厅的主色调融为一体。

晚上，站在大厅西侧地面，从泳池中可以看到众多 ETFE 气枕的倒影；从众多的 ETFE 气枕上也可以看到两个游池的凸面镜成像，美不胜收。

3.5 比赛大厅声学材料的环保与防潮

作为 2008 年北京奥运会的主要场馆，国家游泳中心比赛大厅使用的声学材料均为新型环保、防潮材料。其中马道下部风管周边使用的艾音科微孔吸声材料和临时座椅上方吊顶、东立面 ETFE 膜气枕立面吊挂的钛科丝吸音板均为新型吸声材料，在大型游泳场馆中首次使用，均达到了环保与防潮要求。在穿孔铝蜂窝板后贴吸声毡，为环保吸声材料。穿孔铝合金板后填的离心玻璃棉，均用透声防水膜包裹，也达到了玻璃棉材料使用的环保要求。

4 跟踪测试

2007 年年初至 2008 年 1 月期间，进行了 4 次中期测试，对比赛大厅室内装饰进行了声学复核，并提出相应调整建议，为声学效果的最后实现进行过程控制。

2008 年 3 月，国家游泳中心宣布竣工后 2 个月，进行了声学竣工测试。

表6 比赛大厅满场混响时间对比表

频 率	125Hz	250Hz	500Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
满场混响时间允许值	3.00	2.75	2.50	2.50	2.25	2.0
满场混响时间设计值	2.67	2.46	2.02	2.18	1.95	1.71
满场混响时间模拟值	3.80	3.03	2.06	2.06	1.80	1.56
空场混响时间实测值	2.55	2.71	2.98	3.32	2.66	1.86
满场混响时间换算值	2.26	2.29	2.17	2.21	1.68	1.29

说明：以上满场混响时间换算值为实测空场值经过 80% 观众满场换算后得到

测试使用 B & K 公司生产的 PULSE

3560 多分析系统，分别采用噪声阻断法(借用现场扬声器)和脉冲积分法进行测试。

表 6 为比赛大厅满场混响时间设计允许值，计算机模拟值，空场实测值与满场换算值的数据对比。

从以上数据可以看出，满场混响时间的设计值、模拟值和换算值之间基本吻合。

5 总结

国家游泳中心声学设计从模型测试、声学解决方案的提出到施工配合，对我们来讲又是一次经验的积累：模型实验所得 ETFE 膜气枕的吸声系数详实可靠，为国家游泳中心比赛大厅室内声学问题的圆满解决提供了坚实的基础，也为今后 ETFE 膜气枕构造在其它工程上的大规模使用提供了重要的声学参数；提出的声学解决方案较为圆满地解决了国家游泳中心的声学问题，中期测试为比赛大厅室内施工进行了必要的复核调整和过程控制，竣工实测数据表明比赛大厅现场混响时间与计算机模拟值、设计值三者较为吻合，也说明了前期模型实验检测工作的重要性和检测结果的真实性；比赛大厅的声学解决方案达到了声学设计与建筑美学设计的高度统一，为今后声学设计与美学设计的结合工作开辟了新的途径与方法；比赛大厅的声学解决方案体现了绿色奥运、人文奥运、科技奥运的奥运理念，很好地解决了吸声材料的环保问题。

参考文献

[1] 郑方. 国家游泳中心——水立方建筑空间与表达[J]. 世界建筑, 2008(6): 32-41.  
[2] 陈先明, 赵志雄, 张欣. 国家游泳中心 ETFE 膜结构技术在水立方中的应用[J]. 建筑技术, 2008(3): 195-198.  
[3] 中华人民共和国广播电视部 编. 混响室法吸声系数测量规范 GBJ47-83 ISO354: 2003(E) "Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room"  
[4] 中国建筑科学研究院 编. 体育馆声学设计及测量规程 JGJ/T 131-2000 J42-2000.