

现代声学与信号处理丛书

ARCHITECTURAL ACOUSTICS

Blending Sound Sources,
Sound Fields, and Listeners

建筑声学

声源 声场
与听众之融合

安藤四一[日] 著
吴硕贤 赵越喆 译



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

现代声学与信号处理丛书

建筑声学

声源 声场与听众之融合

安藤四一 [日] 著
吴硕贤 赵越喆 译

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

著作权合同登记: 天津市版权局著作权合同登记图字第 02 - 2005 - 27 号

Translation from the English language edition:

Architectural Acoustics by Yoichi Ando

Copyright © 1998 Springer - Verlag New York, Inc.

Springer is part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑声学·声源·声场与听众之融合 / (日) 安藤四一著; 吴硕贤, 赵越喆译. —天津: 天津大学出版社, 2006.4

(现代声学信号处理丛书)

ISBN 7 - 5618 - 2279 - 0

I. 建... II. ①安...②吴...③赵... III. 建筑声学 IV. TU112

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 029448 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内 (邮编: 300072)
电 话 发行部: 022—27403647 邮购部: 022—27402742
印 刷 保定市印刷厂
经 销 全国各地新华书店
开 本 170mm × 240mm
印 张 13.5
字 数 264 千
版 次 2006 年 4 月第 1 版
印 次 2006 年 4 月第 1 次
印 数 1—4 000
定 价 78.00 元

丛书前言

声音什么也不是，只不过是空气的冲击

——杰弗里·乔叟

于 14 世纪末

通常，声学形成物理学的一个基础性分支学科。在 20 世纪，声学领域有了很大的拓宽，声学越来越成为一门交叉学科。目前，现代声学专家不仅在物理系可以找到，而且在电子与机械工程系以及在数学系、海洋系甚至在生理学系均可找到。声学家们的工作领域从乐器跨越至与语言的感知有关的建筑学。今天，在乔叟作出他的卓越的评论的 600 多年后，我们认识到声音和声学是一门研究领域十分宽广的学科，可以不加夸张地说，它涵盖了在各种媒介中各种频率和各种强度的波动与振动。

本科学丛书，标题称为现代声学与信号处理 (MASP)，就涵盖了当今声学作为一门跨学科研究领域的方方面面。它为建筑声学、结构声学、振动、音乐声学、噪声、生物声学、生理与心理声学、语言学、海洋声学、水声学以及声信号处理等领域提供了科学的专题著作、研究生教材以及参考文献。

声学原本是一种通讯交流的工具。无论是语言或是音乐，是听音空间或是通过声纳或者超声——来发出信号和收听信号，我们都寻求一种最大限度地传播信息的同时又使噪声的影响最小化的能力。

信号的发生本身属于信号处理领域，涉及对各种接受到的声信号甚至以任何电子形式传输的信息的分析。鉴于声学对现代科学和工业的极端重要性，AIP 出版社现在作为斯普林格出版社的标记，发行了本丛书，使之成为一个新的充满希望的出版事件。

我们希望这套丛书的出版将对以美国物理协会的奠基成员之一的美国声学学会为代表的整个国际声学界有所助益，并且施惠于其他相关的学会和感兴趣的职业团体。

我们并且希望科学家和研究生们将会发现本丛书对其研究与教学工作有所裨益。正如詹姆斯·拉塞尔·洛韦尔曾经写到的那样：“就创造事物而言，惟一最难的事是开头。”本丛书的出版就是这样一种开头。

丛书主编 罗伯特·T. 贝耶

前 言

音乐厅声学可被认为是科学与艺术的汇集处。设想有多少科学家曾经对其发展作出过贡献。已知的这一领域的贡献涉及古希腊和古罗马的剧场声学，可追溯至公元前 25 年。该文献记叙了如何应用先进的设计来改善音质，包括在坐席之间挖洞并在洞穴中设置头部朝上的铜质容器。这样做依据的是一种以数学为基础的音乐理论。于 1962 年落成的纽约菲哈莫尼音乐厅是依据以混响时间为代表的时间因子设计的。该厅并未被公众很好地接受。不过，1978 年该厅关闭以便进行彻底的改建。最重要的目标是将音乐与声学以这样一种方式相互融合，使得每个听者的感觉都能与厅堂的音质协调一致。音乐厅声学作为本人的主要研究领域已有近 30 年的历史，这期间的头 20 年主要致力于采用物理和心理的方法来研究，其目的在于计算各个坐席处听者的总的主观优选值。研究工作的主要发现可归纳如下。（参看：Ando, Y., 《音乐厅声学》，斯普林格出版社，海德堡，1985）

(1) 音乐厅应当仅针对某种类型的音乐来设计，因为音质取决于音乐信号的自相关函数的有效期限以及声场的时间性声学因子。音乐家们在作曲时看来是考虑到厅堂音质的影响的。如：管风琴音乐是针对诸如诺特里穹顶大教堂之类的高大空间谱写的；莫扎特的弦乐四重奏是为宫廷沙龙音乐会的听众谱写的。

(2) 新近引进的空间因子 ($IACC$) 在声场的声学因子当中是描述主观优选及主观扩散度最有效的因子。

(3) 提出一种可由声场的 4 项独立的物理因子来在设计阶段对各坐席处的总的优选值作出预计的理论。这 4 项因子是：相对声压级 (LL)、直达声与第一个反射声之间的初始时延 (Δt_1)、后续混响时间 T_{sub} 及双耳互相关 $IACC$ 的数值。

在过去的十年间，我主要致力于探讨大脑的听觉功能以及个体间的听觉差别。研究表明，左半脑与时间因子 Δt_1 及 T_{sub} 相关联，而右半脑则主要由空间因子 $IACC$ 和 LL 来激活。在脑波中出现了与声场的主观优选相关的信息。令人惊讶的是，在脑波中体现的主观优选的个体间的差别主要是在时间因子上及 LL 上发现，而不是在 $IACC$ 上发现。

LL 上的个体间的差别与聆听声级有关。针对不同的 Δt_1 和 T_{sub} 的值，可以产生显著的个体间的差别。这多半是由于个体间大脑中的时间性活动的不同所导致的。这一证据表明主观优选的基本理论可以应用于其他各种不同的个体优选研究之中。其他基本的声场的主观属性也可由该理论加以描述。

因为此理论是基于大脑听觉模型的相关机理以及左右半脑的专门化确定的。

为达到使声源与音乐厅声场相融合的目的，首先应这样来设计声场，使得各坐席处的平均优选值达到最大。音乐家应为厅堂选择适当的音乐节目和布置舞台上的演奏位置，使得乐师们和听众的感受均达到最大优选值。1994年雾岛国际音乐厅引进了一种旨在满足个体优选的坐席选择系统。1995年5月，召开首届声学家和音乐家国际音乐和音乐厅声学专题研讨会（MCHA），正如本书所记叙的，共有106位专家参与该坐席选择系统的试验过程。

本人希望这种将声场的整体主观优选和个体主观优选的时间和空间值结合一体的理论将能够得到普遍化，使之适用于将自然、建成环境及人类相融合的进程之中。

安藤四一

感 谢

本书所记叙的研究工作是在神戸大学的理工研究生院完成的，并且部分在德国哥廷根大学第三物理研究所完成。在此，谨向上述两个单位及其成员表示我的谢意！特别要感谢曼弗里德·R. 施罗德教授自 1971 年起一再邀请本人到其研究所工作。1995 年夏季，在施罗德教授的建议下以及在研究所所长沃纳·劳特鲍恩的邀请下，我在哥廷根开始了本书初稿的写作。

我非常感谢布朗大学的罗伯特·T. 贝耶教授自从 1985 年我的第一本书《音乐厅声学》出版以来对我一再的热情鼓励以及对本书的英文用法所作的实质性修改。同时，我也对神戸大学的退休教授须田勇深表谢意，由于他 1979 年的一次谈话给我以启示，促成我开展了在第 5.2 节和 5.3 节所描述的研究工作。

本书的大多数图先前都由我和（或）我的同事们发表过。在此，我对这些作者以及出版社同意让我在书中采用这些图表示感谢！我还要对范维·鲁德博士、查尔斯·伊林博士以及 AIP 出版社的编辑们鼓励我出版此书表示感谢！

最后，对自 1975 年以来波恩的洪堡基金会的慷慨支持表示感谢！正是这种支持使我得以集中精力完成写作本著作所必需的研究工作。

安藤四一

目 录

1 简介	(1)
2 观演空间声学简史回顾	(2)
3 声源信号和室内声场的物理特性	(7)
3.1 源信号分析	(7)
3.1.1 功率谱密度	(7)
3.1.2 声源的长时间自相关函数 (ACF)	(7)
3.1.3 源信号的短时移动自相关函数	(10)
3.2 不同演奏形式下钢琴信号的自相关函数	(16)
3.3 从点声源到两耳道口的声传输	(17)
3.4 声场物理因子	(18)
3.4.1 时间——单耳评价指标	(18)
3.4.2 空间——双耳评价指标	(19)
3.5 声场模拟	(21)
4 声场总体印象的主观优选	(23)
4.1 简单声场的主观优选	(23)
4.1.1 单个反射声的优选时延	(23)
4.1.2 单个反射声的优选方向	(25)
4.2 声学因子的正交性	(26)
4.3 最优设计客观参量	(29)
4.3.1 聆听声级	(29)
4.3.2 直达声后的早期反射声	(29)
4.3.3 早期反射声后的后续混响时间	(30)
4.3.4 双耳信号的不相似性 (IACC)	(30)
4.3.5 感觉级对优选反射声时延的影响	(30)
4.4 主观优选标度值的计算理论	(32)
4.4.1 主观优选理论	(32)
4.4.2 每一座位的主观优选计算	(33)
4.5 实际厅堂的主观优选验证	(35)
4.5.1 在一实际厅堂内进行的优选测试	(35)
4.5.2 多维分析结果	(37)
5 人类听觉系统	(40)
5.1 人耳系统	(40)

5.1.1	人头、耳廓和外耳道	(40)
5.1.2	鼓膜和听骨链	(42)
5.1.3	耳蜗	(45)
5.1.4	神经系统	(46)
5.2	听觉路径和人脑半球的电—生理响应的影响及其与 主观优选的关系	(48)
5.2.1	听觉脑干反应 (ABR)	(48)
5.2.2	慢速颅顶响应 (SVRs)	(55)
5.2.3	反射声初始时延和 IACC 同时变化时的 SVR	(61)
5.3	连续脑电波 (CBW) 对主观优选的影响	(63)
5.3.1	单个反射声的时延变化时的 CBW	(63)
5.3.2	后续混响时间变化时的 CBW	(65)
5.4	听觉—大脑系统: 一种建议的模型	(68)
5.4.1	背景资料	(68)
5.4.2	模型	(69)
5.4.3	模型的主观响应	(71)
6	基于模型的重要的声场主观属性	(72)
6.1	主观扩散度和 ASW 与 IACC 和/或 W_{IACC} 的关系	(72)
6.2	单个反射声声场的主观属性与源信号的 ACF 的关系	(76)
6.2.1	听者对单个反射声的优选时延	(76)
6.2.2	优选的混响时间频率特性	(77)
6.2.3	单个反射声的声染色	(79)
6.2.4	单个反射声的感知阈值	(79)
6.2.5	单个反射声的回声干扰	(81)
6.2.6	乐师对单个反射声的优选时延	(82)
6.3	响度与 ACF 有效持续时间的关系	(83)
6.4	语言易懂度和清晰度与时间因子 (TF) 和 IACC 的关系	(85)
7	声场对表演者的主观影响	(89)
7.1	表演者对舞台声场的主观优选	(89)
7.2	音乐节目的选择对表演的影响	(94)
7.3	最大化听众优选的表演位置选择系统	(95)
8	通过设计对声场进行被动控制	(97)
8.1	通过侧墙的布置来控制 IACC	(97)
8.2	通过顶棚的布置来控制 IACC	(99)
8.3	墙和顶棚的扩散体的影响	(101)
8.3.1	避免声像移动的用于扩散体设计的数论方法	(101)

8.3.2	由不平坦表面产生的声扩散反射	(102)
8.3.3	提供合乎要求的声反射的阶状构造	(104)
8.4	靠近顶棚的反射体	(106)
8.4.1	各种单个反射板形状的声反射转移函数	(106)
8.4.2	反射板阵列的转移函数	(107)
8.4.3	由挑棚提供的侧向反射声分量	(109)
8.5	地面构造和坐席布置	(111)
8.5.1	低频声衰减以及声波入射角的影响	(111)
8.5.2	地面下空穴的作用	(111)
9	单个听者的主观优选及座位的选择	(114)
9.1	听者依据独立因子的优选	(114)
9.1.1	获得个体优选的简单方法	(114)
9.1.2	个体优选示例	(115)
9.1.3	单个听者优选的表示方法	(119)
9.2	光对单个听者主观优选的影响	(124)
9.2.1	对优选聆听声级的影响	(124)
9.2.2	对优选初始时延的影响	(125)
9.3	优选判断中的个体间差异	(126)
9.4	对各位聆听者的坐席选择系统	(129)
9.4.1	坐席选择系统有助于单个听者的优选	(129)
9.4.2	单个听者优选测试的结果	(129)
9.4.3	对大多数听众的优选条件	(133)
10	声学设计的案例研究	(140)
10.1	音乐厅设计	(140)
10.2	多功能厅	(151)
10.2.1	圆形厅堂	(151)
10.2.2	具有可移动舞台塔楼的大厅	(155)
10.2.3	具有可变耦合体积的厅堂	(155)
11	室内声场的声学测量	(157)
11.1	双耳脉冲响应	(157)
11.2	混响时间	(159)
11.3	音乐厅各座位处的声学因子测量	(161)
11.4	建议的 IACC 测量方法	(162)
11.5	将森林视为声学空间的物理特性	(164)
12	一般化的物理环境规划理论	(169)
12.1	一般化的物理环境设计理论	(169)

12.1.1 左右脑半球的专门化	(169)
12.1.2 物理环境的设计	(171)
12.1.3 建议的物理环境因子集	(173)
12.2 物理环境规划的例子	(174)
12.2.1 环境和人的生命的离散周期	(174)
12.2.2 音乐厅的物理环境	(174)
12.2.3 儿童游戏场地与住宅设计	(176)
附录 I 因子分析法	(178)
附录 II 电声系统设计	(179)
II.1 双通道扬声器重放系统的 IACC	(179)
II.2 控制时间因子的系统	(180)
附录 III 时变声场: 单个反射声的可变时延	(181)
符号表	(183)
参考文献	(186)
译后记	(202)

1

简介

自从我的第一本书《音乐厅声学》于 1985 年出版后，又进行了大量的研究工作。例如为确定听觉一大脑系统的模型、正交物理因子和个体主观优选理论而进行的脑半球行为的研究。本书详尽地介绍了概念、理论背景和主观评价，此外还介绍了对声场的主观优选及其在音乐厅和多功能厅堂设计中的应用。书中特别强调了在音乐厅中应加强对个体的“最优选”座位的选择。

同样有趣的是，这一理论可应用于更广泛的物理环境，如在光环境和热环境中考虑空间性和时间性因子。

本书适用于声学、心理学、生理学和音乐艺术等各种专业的本科生和研究生以及建筑、有关工程和音乐厅、剧场的“声场协调员”等专业人员使用。对音乐厅、剧场以及电声系统设计应用有兴趣的读者，建议您首先阅读第 10 章和 11 章，进而阅读第 4、6、7 和 8 章所描述的导则。

本书特别关注的是获得科学结果和听觉一大脑系统模型的过程，而不仅仅是介绍一种最终的设计方法。因而，这种过程将有助于对科学和艺术融合有兴趣的研究者弄明白将来工作的正确路线。

观演空间声学简史回顾

探寻影响声场主观评价因子的维度和正交因子的建筑声学研究最早可以追溯到 Vitruvius (公元前 25 年) 的工作。在《古代建筑声学》一书中, 描述了混响、干涉、回声干扰、语言清晰度等概念。Vitruvius 的著名陈述“发出第四、第五阶等音符的青铜容器制品”, 由音乐理论计算, 可倒转嵌入壁龛, 由不小于半英尺高的楔形物两面支撑, 面向舞台。剧场座位间也建有龛状物。显然, 当时作了大量科学尝试并更多地致力于耳朵以下空间的研究。本书中也讨论了地板结构和座位的声学设计。

由于电声技术的缺乏, 从 1 ~ 19 世纪所报道的建筑声学研究远少于古代。

1857 年, Henry 首次提到了应用于现代科学中的脉冲的概念。在他所讨论的情况下, 来自齿轮一个齿的单个脉冲是噪声, 来自相继一系列齿的连续脉冲是一连续的声音。如果所有齿的间距相同, 齿轮的转速一致, 结果将是一悦耳的乐音。并且, 他建议与良好音质有关的因子应蕴涵下面的条件:

- (1) 房间尺度;
- (2) 声音的力度或脉冲的强度;
- (3) 反射面的位置;
- (4) 反射面的材料性能。

令人感到有趣的是这些条件在某种程度上与本书中描述的 4 个正交因子有关。

Sabine (1990) 开创了建筑声学这门科学。他发现了混响声和定量计算混响时间的公式。关于绝对衰变率的首次精心的实验是在波士顿公立图书馆报告厅中进行的。那是一个大房间。讲台上放置 4 根具有相同音高的管风琴管, 每根管都有独自的送风装置, 并且每根管都有特有的电风动值。于是, 1 根、2 根、3 根或 4 根管可以同时开始或停止。那么最短可听时间就可以加以测量。相应的可听声持续时间 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 分别为 8.68 s、9.14 s、9.36 s 和 9.55 s。其间的时间差为

$$\begin{aligned}
 t_2 - t_1 &= 0.45[\text{s}], \\
 t_3 - t_1 &= 0.67[\text{s}], \\
 t_4 - t_1 &= 0.86[\text{s}].
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

利用这些时间差可得到声强的指数衰变率。由此，他最终推导出著名的混响时间公式

$$T_{60} = KV/A, \tag{2.2}$$

式中： K 是常数，当声速为 342 m/s 时， $K = 0.159$ ； V 是房间的体积 (m^3)； A 是房间的吸声量。

Sabine 承认纽约联邦神学院的小教堂是一个令人非常满意的实例，但没给出任何解释 (Sabine, 1912)。就该教堂顶棚的形状而论，就像一个船底，如本书第 8.2 部分所述，将有效地降低 $IACC$ 的值。看来，Sabine 无意中注意到了房间空间形状的重要性。

Knudsen (1929) 建议，对于语言，最适宜的混响时间应比音乐短。同时，MacNair (1930) 推荐低频域的混响时间要更长些以便补充音乐的响度。

Békésy (1934) 报告说一个庭院的声场，如图 2.1 所示，好于他所经历的任何一厅堂的声场。这清楚地说明侧向反射声的重要性 (图 7.9)。

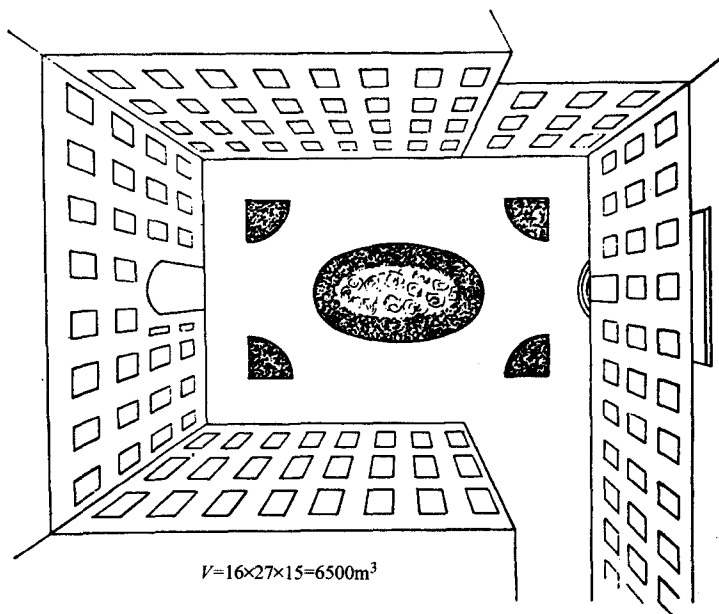


图 2.1 具有优良音质的庭院 (Békésy, 1934; Békésy, 1967)

1949 年，Hass 通过移动磁带录音机的磁头位置从而调整早期反射声的时延来研究回声干扰效应。他的研究表明语言回声干扰是时延的函数。后来，Bolt 和 Doak (1950) 提出用回声干扰百分数作为干扰程度的参数。

鉴于生物在包括声、视和热的物理环境中形成和进化的事实, 我们的感觉器官和大脑在创生进化前受生存的物理环境因素影响很大. 表 2.1 中列出了从 1960 年起几位作者发现的对主观属性有重大影响的物理因子. 在对全世界大量现存的音乐厅进行调研后, Beranek (1962) 从对有经验的听音者的问卷调查得到的数据中, 提出了 8 个声场因子的评价标度. 自从赛宾发现混响理论之后, 人们把大量的注意力放在了声场的时间因子上. 显然, 双耳效应对听者而言是不会令人满意的.

Venekalasen 和 Christoff (1964) 提出了来自侧墙反射声的重要性. West (1966) 发现 $2H/W$ (H 、 W 分别是厅堂的高度和宽度) 和一主观范畴数值标度的相关系数为 0.71. Damaske (1967/1968) 通过环绕试听者布置一系列扬声器的办法来研究主观扩散度. Keet (1968) 报告了视在声源宽度 (ASW) 的变化与双耳互相关系数和声压级的关系. Marshall (1968a, b) 强调从正好 90° 方向到达的早期侧向反射声的重要性. Barron (1971) 探讨了声场的“空间感”或“环绕感”与双耳互相关系数的关系. Damaske 和 Ando (1972) 将 $IACC$ 定义为在人双耳时延的最大可能范围内, 双耳互相关函数的最大绝对值, 即

$$IACC = |\phi_r(\tau)|_{\max} \quad |\tau| \leq 1 \text{ ms}, \quad (2.3)$$

并给出了计算声场双耳互相关函数的方法.

表 2.1 在实际或仿真声场中通过系统的主观判断实验得到的重要物理因子

作者	年份	主观判断法	声系统	因子数目	发现和/或提出的重要的主观因子
Beranek*	1962	问卷调查	在实际厅堂中听音	8[6] [†]	(1)初始时延 ITD (2)响度 (3)混响时间 RT (4)混响时间频率特性等
Keet	1968	视在声源宽度	模拟	2	(1)声压级 SPL (2)短时互相关系数 $ICC^\ddagger$
Barron	1971	空间印象	直达声和早期反射声模拟	2	(1) SCC (2)声压级 SPL (3)频谱
Damaske 和 Ando	1972	主观扩散度和声源的方位	人工头和扬声器	2	(1)双耳互相关系数 $IACC$ (2) $IACC$ 的双耳时延 τ_{IACC}
Yamaguchi	1972	不相似性	两个麦克风和耳机	3[2]	(1)声压级 SPL (2)混响时间频率特性
Edward	1974	不相似性	人工头和耳机	3	(1)混响时间 RT (2)音量级 (3)早期回声图

(续)

作者	年份	主观判断法	声系统	因子数目	发现和/或提出的重要的主客观因子
Schroeder, Gottlob 和 Siebrasse	1974	成对比较优选	人工头和扬声器	4[2]	(1)混响时间 RT (2)双耳互相关系数 $IACC$
Ando	1977	成对比较优选	用扬声器模拟直达声和第一个反射声	2	(1)初始时延 ITD (2)双耳互相关系数 $IACC$
Ando	1983	成对比较优选	扬声器模拟	4	(1)聆听声压级 LL (2)初始时延 ITD (3)后续混响时间 T_{sub} (4)双耳互相关系数 $IACC$
Cocchi, Farina 和 Rocco	1990	优选	厅堂中的实际声场	4	(1)聆听声压级 LL (2)初始时延 ITD (3)后续混响时间 T_{sub} (4)双耳互相关系数 $IACC$
Sato, Mori 和 Ando	1997	成对比较优选	某厅堂实际声场, 开关扬声器, 座位固定	4	(1)聆听声压级 LL (2)初始时延 ITD (3)双耳互相关系数 $IACC$ (4) $IACC$ 的双耳时延 τ_{IACC}

* 括号内的数值表示可被认为是重要因子的维度。

† Beranek (1996) 后来建议 6 个因子, 两个附加的因子在正交性方面存在疑问。关于混响时间的频率特性, 对主观判断而言低于 500 Hz 的频率范围不是关键的, 所以其优选范围可以很宽 (Ando, Okano 和 Takezoe, 1989)。

‡ 短时互相关系数。

通过不相似性检验, Yamaguchi (1972) 报道对于厅堂中的录音声场来说, 声压级及其频率特性是显著的因子。Edward (1974) 也检验了录音声场的不相似性, 指出早期回声图, 混响时间和音量是重要的因子。Schroeder、Gottlob 和 Siebrasse (1974) 报道了成对比较试验的结果, 即询问试听者在所听到的两个音乐信号中, 更喜欢哪一个。试验在消声室中进行, 通过人工头录音及带有滤波器的双扬声器系统在人的双耳处重发声场空间信息。他们发现两个显著因子, RT 和 $IACC$ 对主观优选有强烈影响。Wilkens (1977) 指出重要的主观属性为力度和声源扩展感以及明晰度和音色的感觉。

Ando 和 Kageyama 研究了主观优选与物理因子的关系。这些物理因子可通过到达双耳的声信号的数学表达式计算 (Ando, 1977; Ando and Kageyama, 1977)。1983 年, Ando 发表了主观优选与 4 个正交声场物理因子关系的理论, 使得计算每一座位处的标度值成为可能 (又见 Ando, 1985, 1986)。这

一理论首先被 Cocchi, Farina 和 Rocco (1990) 在现存的厅堂中证实. Sato, Mori 和 Ando (1997) 在一实际的厅堂中通过开关舞台上扬声器而不是变换座位的成对比较判断, 再次更明确地证实了这一理论. 他们建议用 $IACC$ 的双耳时延, 即 τ_{IACC} 来避免声像移位或控制声场平衡.

迄今, 这一理论已成为建立在大量受试者的普遍主观属性基础上的理论. 尽管存在一定的个体差异 (Sakai, Singh and Ando, 1997), 在应用这一理论时, 可通过调整每一正交因子的权重系数来进一步提高每一个体的满意度 (Ando and Singh, 1996; Singh and Ando, 尚未出版). 在雾岛音乐厅建成后, 其采用的座位选择系统 (Sakurai, Korenaga and Ando, 1997) 就是这一应用的典型例证 (Ando and Setoguchi, 1995).