

厅堂音质参量 IACC 测量的影响因素分析

范 力, 盛胜我

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘要: 厅堂音质设计所依据的各参量中, 双耳互相关系数(Inter-aural Cross Correlation Coefficient, IACC)被认为是可以较好描述主观空间感的客观参量。IACC 的实际测量结果受诸多因素的影响, 各种因素的影响程度及对测量的限制目前尚无定论。对 IACC 测量中最为直接的影响因素, 包括人工头制作、双耳转动方向、声源信号、滤波频带等, 进行实测并对结果做对比分析。实验表明各种因素对 IACC 测量值都有不同程度的影响, 在实际厅堂测量时需要注意这些影响。

关键词: 双耳互相关系数测量; 影响因素; 对比分析

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-01-0069-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.01.016

Analysis on the factors affecting the IACC measurement in halls

FAN Li, SHENG Sheng-wo

(Acoustic Institute of Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Among several acoustical parameters, it is well known that Inter-aural cross correlation coefficient (IACC) has a strong relationship with spatial impression. Many factors affect the measurement of IACC, but it is still unclear how much these factors influence the measurement result. From this view, the paper presents several most direct factors in measurement, including dummy head, ears orientation, and sound source signal filter band, to compare and analyze the measurement result. The experiments show that different factors influence the measurement result of IACC differently. So it is necessary to consider the influence of these factors on concert hall measurements.

Key words: IACC measurement; influence factors; comparative analysis

1 引言

室内声学的研究中, 厅堂音质参量可分为主观参量和客观参量, 其中客观参量又可以分为两类: 一类是时间、能量评价参量, 如混响时间、早期衰变时间等。另一类是方向性空间参量, 如侧向声能因子、双耳互相关系数。这类参量基于客观测量, 又在某种程度上与主观参量中的空间感有关, 对这类参量的研究是基于心理声学 and 室内声学的发展, 目前是室内声学研究中的热点之一^[1]。

对于双耳互相关系数(IACC)这一参量, 一些研究结论已经得到普遍认同。例如, Barron^[2]根据心理声学实验结果, 提出 IACC 实测值应以 80ms 为限分为早期与后期; 通常早期 IACC 更为重要, 记为 IACC₈₀。Takayuki Hidaka 和 Leo Beranek^[3]根据世界著名音乐厅的实测及这些音乐厅公认的评级, 提出

500Hz、1000Hz、2000Hz 三个频段的 IACC 及早期的 IACC 与音乐厅音质主观评价等级较为一致, 通常用 IACC_{E3} 来表示, 且 IACC_{E3} 与空间感主观参量 ASW 反相关^[4,5]。

然而, 对于 IACC 实际测量中的一些技术问题, 仍存在争议^[6]。这些争议包括: Morimoto^[7]提出 ISO 的规定或 Ando 等人对 IACC 的测量及频带处理方法不合理。而 Marshall^[8]则认为在低频范围内由 IACC 判断空间感 ASW 不合理。ISO 规定采用脉冲响应来计算 IACC, 但 Hidaka^[4]、Ando^[9]、Ryota Shimokura^[10]等人都采用音乐信号来计算 IACC。持不同观点的研究者一般都根据实验结果或测量理论给出了他们的理由。这些争议主要是由于 ISO 对于 IACC 的整个测量过程没有明确的规定, 不同研究者所采用的实验测量和数据处理方法各有不同。而对于不同测量方式所带来的不同影响因素对 IACC 值的影响程度, 至今尚没有定论。

本文针对 IACC 测量中的一些重要影响因素, 搭建了测试系统并进行了实验室测量。这些影响因素包括: 人工头制作的影响; 声源信号的影响; 双耳转动方向的影响; 不同数据处理方法以及所采用的

收稿日期: 2009-03-31; 修回日期: 2009-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助(10574100)

作者简介: 范力(1984-), 男, 江苏无锡人, 硕士研究生, 研究方向为室内声学。

通讯作者: 范力, E-mail: flwe7@sina.com

不同倍频带滤波的影响等。这些因素都是实际测量最直接且不可避免需要考虑的因素，它们对 IACC 的影响程度必然制约测量精度及可靠性。对这些影响因素的分析可为今后的 IACC 测量工作提供参考，并为厅堂音质空间感等研究提供一定的依据。

2 IACC 的定义

双耳互相关系数 IACC 是用来评价空间感的客观音质参量，目前普遍认为 IACC 与空间感主观参量中的视在声源宽度(ASW)高度相关^[6]。在音乐厅实际测量中，IACC 越小，表示有较强的空间感。目前，IACC 已经作为一个有效的厅堂音质评价指标，根据 ISO3382 的规定^[6]，IACC 的定义如下：

$$IACC = \max |IACF_{t_1 t_2}(\tau)| \quad (1)$$

其中， $\tau \leq$ 双耳最大时间差(通常取 $\pm 1\text{ms}$)。 t_1 、 t_2 为信号的有效时间。 $IACF_{t_1 t_2}(\tau)$ 为双耳互相关函数，定义为：

$$IACF_{t_1 t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_l(t) \cdot P_r(t+\tau) dt}{\left[\int_{t_1}^{t_2} P_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} P_r^2(t) dt \right]^{1/2}} \quad (2)$$

双耳互相关函数 IACF 表征了双耳接收声信号的差异程度，与人对主观空间感知有关。而 IACC 则取了双耳最大时间差范围内 IACF 的最大值，目的是获得一个有效的单值评价量。其中， $P_l(t)$ 和 $P_r(t)$ 为双耳脉冲响应，分别为人工头或受试者左右耳耳道口处所接收到的脉冲响应声信号：

$$\begin{aligned} P_l(t) &= s(t) * r(t) * h_l(t) \\ P_r(t) &= s(t) * r(t) * h_r(t) \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $s(t)$ 为声源信号， $r(t)$ 为房间脉冲响应， $h_l(t)$ 和 $h_r(t)$ 为头相关脉冲响应。

3 测量系统介绍

实验采用的人工头是声望公司的 BHead200，该人工头是依据中国人的人头尺寸的统计数据制作的，外形上与欧美公司的人工头略有差别。测量采用 1/4 吋传声器置于人工头耳道内。测试过程中发现，传声器放置位置的不同会对双耳脉冲响应信号产生一定的影响。因此必须保证传声器的位置固定，且传声器膜片应与人工头耳道口齐平。测量系统要求双通路的频率及相位响应必须匹配一致。对本测量系统的可重复性，也在消声室中进行了验证。同一种情况下连续测量 20 次以上，各频段的 IACC 值的变化范围都在 0.1% 以下，满足测量要求。

4 实验结果和分析

本实验选取了 IACC 测量过程中的四个主要影响因素，在其他条件都不变且仅改变某一个影响因素的前提下，进行了 IACC 测量，并对结果进行了对比与分析。实验在消声室中进行，扬声器与人工头头中心距离为 2m，人工头耳道口与扬声器高音单元齐平。水平角 θ 的定义是人工头双耳连线的垂线与人工头-扬声器连线的夹角，它反映双耳转动的方向，如图 1 所示。

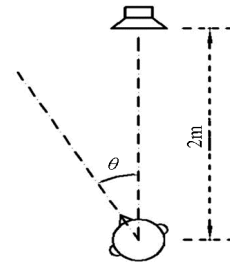


图 1 消声室 IACC 测量图示

Fig.1 Measurement of IACC in anechoic chamber

实验测量全部选择了早期 IACC，即 $IACC_{80}$ 作为研究对象。测量结果显示的频带范围基本选择了 250~8000Hz，计算结果则仅选择了 500Hz、1000Hz、2000Hz 三个最重要频带的 $IACC_{80}$ 值。

以下分别讨论几种重要的影响因素。

4.1 人工头制作的影响

ISO3382 中并未严格规定测量 IACC 使用的人工头的种类或型号，但所使用的人工头应具有耳廓和耳道，且在测量报告中应明确说明所使用人工头的型号。目前常用的人工头内部大多是空心的，或者仅加了简单的隔声板。此时，空心头壳受到声波作用而产生振动，会产生双耳的串音干扰，从而影响测量结果。为了检验这种影响的程度，做了以下的实验研究。

实验采用内部为空心 and 实心(填满砂石)两种人工头，测量了两种情况下的 $IACC_{80}$ 。对测量值进行倍频程滤波，并分别选取了 0° 、 45° 、 90° 三个水平角情况下的测量结果(见图 2)。根据图 2，对于各个水平角的测量，空心人工头相比于实心人工头，在低频段 $IACC_{80}$ 值基本吻合，而从 500Hz 或 1000Hz 开始，各种水平角测量情况下的 $IACC_{80}$ 值都有不同程度的下降。由于低频本来就存在绕射等现象，因此双耳上的声音信号差别很小，空心与实心的情况差别并不大。而对于人工头填充砂石后，在 500Hz 以上 IACC 值的提高，主要是由于消除了人工头双耳间高频串音干扰的影响；同时，在头壳内填入砂

石后,增加了人工头的阻尼,头壳受声波振动的影响变小。另外,在实际测量中,填充砂石后的测量结果更稳定。因此,对于测量所使用的人工头,有必要进行填充以避免串音或振动的影响。

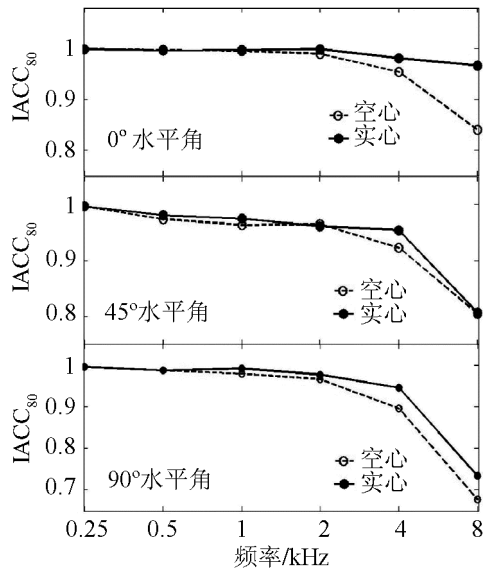


图2 三种情况下不同人工头的 $IACC_{80}$ 值比较
Fig.2 Comparison of $IACC_{80}$ in three angles with different dummy heads

4.2 不同声源信号的影响

ISO3382 中规定测量 IACC 使用脉冲响应法。在使用扬声器作为声源的情况下,为便于得到脉冲响应,可使用相关测量法。为满足相关测量法的要求,声源信号通常使用自相关函数为 δ 函数的信号,这类信号包括白噪声、MLS 或线性扫频信号等。

在国外研究者进行的 IACC 测量工作中,这三种信号都有使用。如 T. Hidaka、L. Beranek、M. Barron 等人使用的是宽带白噪声, G. Marshall、H. Tachibana 等人使用了扫频信号, J. S. Bradley、G.Soulodre 等人使用的是 MLS 信号^[11]。他们的测量对象是不同的音乐厅,因此测量结果并没有可比性。根据之前的各类研究,这三种信号用于发射-接收点(本文中均指扬声器到人工头中心)的位置相对固定的脉冲响应测量,原理上并没有差别。但由于引入了扬声器响应、人工头特征、水平角等因素,对于这三种信号用于 IACC 测量时测量数值是否存在差异及测量的可行性,值得进行研究。

本实验在其他条件都不变的前提下,用三种声源信号分别测量,得到了多个水平角的 $IACC_{80}$,对测量值进行倍频程滤波,同样选取了 0° 、 45° 、 90° 三个水平角情况下的测量结果(见图3)。由图3可见,在不同的水平角情况下,三种声源信号测量结果相近。MLS 和线性扫频的测量结果符合得非常好,而白噪声的测量结果在水平角逐渐接近 90° 时稍有偏

差。三种声源信号都可以测得基本一致的 IACC 值,可见声源这一因素对实际测量结果的影响并不大。

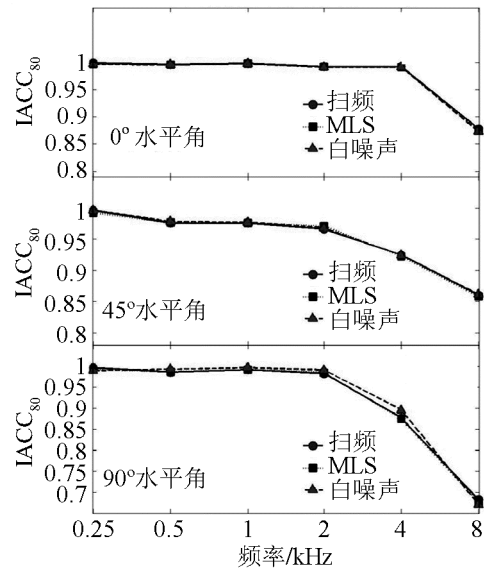


图3 三种水平角情况下不同声源信号的 $IACC_{80}$ 值比较
Fig.3 Comparison of $IACC_{80}$ in three angles with 3 types of sources

但在实际测量中,采用白噪声作为声源信号,往往信噪比不够。而采用 MLS 作为声源信号则存在一些不可克服的缺点,如受时变影响大、抗非线性畸变能力差等。而扫频信号虽然计算工作量较大,但系统对信号的响应稳定,重复性好,随机起伏小,且用非周期相关计算可以在一定程度上克服系统的非线性失真,从而获得更高的信噪比^[12]。因此,考虑到可操作性、可重复性^[13]以及数据处理等因素,线性扫频信号应该是目前测量 IACC 的各种声源信号中最为方便可行的。

4.3 双耳转动方向的影响

在一个音乐厅中进行现场 IACC 测量时,需要进行多测点测量。实际测量时,有两种方法:一种是改变测点位置后调整扬声器与人工头角度,始终保证人工头正对扬声器,即水平角始终为 0° ,见图4(a);另一种是改变测点后,扬声器与人工头角度都固定不变,即水平角不固定,见图4(b)。以往的测量过程中,两种方式都有采用。第一种测量方法有利于直达声的前向定位,即保证直达声到双耳的时刻是一致的,这有利于后续的一些数据处理。但由于现场测量时,随着测点的不同,扬声器与人工头的距离或测点的地面高度有所变化,要始终保证人工头正对扬声器方向并不容易。第二种测量方法则相对来说更容易控制,尤其是在一些测点位于厅堂内分布较多时的 IACC 值。

ISO 中并没有规定实际厅堂中测量时应采用哪种方式。但在测量过程中人工头的水平角的角度不

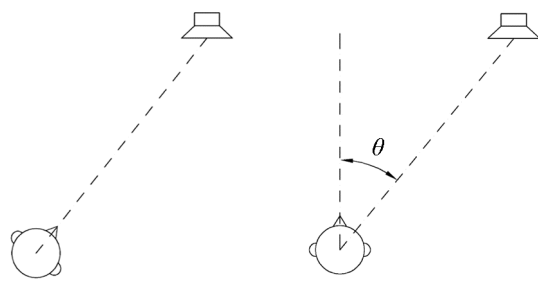


图 4 (a) 测量方式一 (b) 测量方式二
Fig.4 (a) Measurement method I (b) Measurement method II

同显然会对 IACC 值有一定的影响, 应对该因素的影响程度作进一步研究, 具体实验如下。

消声室内测量时, 在其他条件都不变的情况下仅改变水平角的大小。从水平角 0° 开始逆时针旋转人工头, 每隔 5° 测量一次 IACC 值。考虑到对称性, 测量 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围即可。对测量值进行倍频程滤波, 选取最为重要的 500Hz、1000Hz、2000Hz 三个倍频带的 IACC₈₀ 与水平角的关系, 测量结果见图 5。

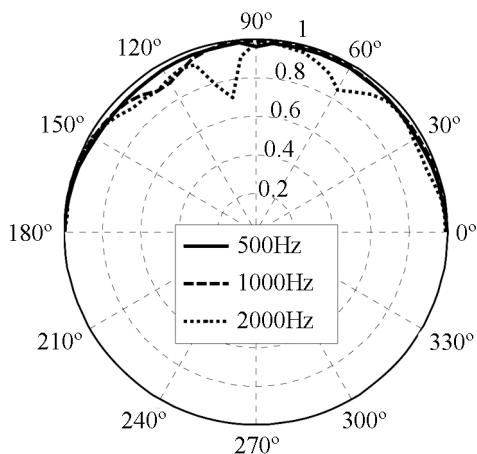


图 5 三个倍频带滤波 IACC₈₀ 与水平角的关系
Fig.5 Comparison of IACC₈₀ in three octave bands with different angles

很明显, IACC₈₀ 值随水平角的变化曲线与频率有关。随着频率的升高, IACC₈₀ 值相对于水平角度的变化范围增加。这一方面是因为高频声波的测量不稳定。另一方面也与使用人工头测量有关。水平角较小时, 双耳可直接接收到扬声器的声信号而不受头部影响, 因此无论低频还是高频, 双耳信号的差异性很小, IACC₈₀ 的值都一致地接近于 1。而水平角较大时, 由于绕射作用, 低频影响不大, 高频则受头部特征影响, 容易产生散射或反射, 在一定程度上改变了双耳脉冲响应的波形相似性。尤其是在 2000Hz 时, IACC₈₀ 值在 90° 附近的波动范围较大。这可以解释为: 转过 90° 后, 人工头朝向扬声器的部分由面部变为后脑, 头部特征改变, 对高频声波散射的变化直接造成 IACC₈₀ 值的波动范围加大。

根据这一结论, 两种测量方式的 IACC 显然是

不同的。IACC 本身是一个基于人双耳的评价参量且用于表征人的主观空间感, 因此作者认为测量时应考虑到人在实际厅堂中的听音习惯, 即保证人工头始终正对前方, 即在观众座位上不同测点位置测量的 IACC 应采用人工头与扬声器间水平角不固定的方式。但采用这种测量方式, 应注意在仅考虑有效频率范围内的 IACC 测量中, 有必要对不同测点位置的水平角度的影响予以考虑。尤其是在较高频段, 如果在水平角 $30^\circ \sim 150^\circ$ 范围内测量, 应进行多次测量平均以避免 IACC 值的不稳定。当然, 当人工头与扬声器的距离较远时(远大于本实验所采用的 2m), 上述水平角因素的影响程度有待进一步的实验验证。

4.4 滤波方式的影响

实验中测得的双耳脉冲响应信号需进行一定的数据处理方可得到 IACC 值。这一过程包括对双耳脉冲响应信号的滤波和计算双耳脉冲响应的归一化互相关函数在双耳时延差内的最大值。计算归一化互相关函数最大值的方法在 20 世纪 70 年代后就已经在研究者中得到一致认可。但对于滤波的方式则一直没有统一的想法。最早着手 IACC 测量研究的 Ando^[9] 在其实验过程中没有使用滤波器, 采用的是全频带的 IACC 值。之后大部分研究者在实验中则采用了倍频程滤波的方式。ISO3382 中也规定采用倍频程滤波, 但 Masayuki Morimoto 和 Kazuhiro Iida^[7] 则提出, 相比于倍频程滤波, 采用 1/3 倍频程滤波的 IACC 值能更好地与 ASW 相关。不同的滤波方式是实验测量值不同精度的表现。采用 1/3 倍频程滤波肯定会比采用倍频程滤波的精度更高。但实际的影响程度有多大, 是否有必要采用更高精度的滤波方式, 可以通过实验来验证。

为了采用尽量多的实验数据保证精度, 本实验部分采用了水平角因素的实验部分中 0° 、 30° 、 60° 、 90° 四个角度的脉冲响应实测值, 选取 500Hz、1000Hz、2000Hz、4000Hz 四个频带的倍频程滤波和 1/3 倍频程滤波后的 IACC₈₀ 值作为比较对象, 比较结果列于表 1 中。很明显, 在不同水平角情况下, 四个频段的结果是一致的。对双耳脉冲响应信号进行 1/3 倍频程滤波后得到的 IACC₈₀ 的值比倍频程滤波后的值都有不同程度的增大。而相比于 1/3 倍频程滤波, 倍频程滤波后的 IACC 值波动范围也更大。对测量得到的双通道的脉冲响应进行滤波的过程实质是一个改变精度的过程, 低频的滤波频带较窄, 滤波后计算的 IACC 值接近于两个同频率纯音信号计算 IACC 的情况(两个同频率纯音信号的 IACC 值为 1), 而高频滤波频带较宽, 滤波后的脉冲响应

信号波动幅度变大,使得后续计算的 IACC 值也产生一定的波动且精度下降;采用 1/3 倍频程滤波使得滤波频带变窄,尤其是高频,既提高了滤波精度,也使后续计算的 IACC 值更稳定,且更接近于 1。根据这个结论,对于高频测量,有必要采用 1/3 倍频程滤波来提高测量精度。但对某一个频段,虽然基于同一个信号的两种滤波方式对计算后的 IACC 值的影响程度不同,但 IACC 值的变化趋势却是一致的,或者说这两种滤波方式并不改变 IACC 的值相应于水平角度的变化趋势。对于不同情况下 IACC 值与空间感 ASW 或其他主观参量的关系,若仅仅是考虑 IACC 的变化趋势与 ASW 的变化趋势是否有关系,那么按照上述结果,采用倍频程滤波与 1/3 倍频程滤波对这一关系并没有影响。

表 1 倍频程与 1/3 倍频程滤波的 IACC₈₀ 对比
Table 1 Comparison of IACC₈₀ between octave band and 1/3 octave band

频率/Hz	500	1000	2000	4000
0°水平角, 倍频程滤波	0.997	0.998	0.988	0.989
0°水平角, 1/3 倍频程滤波	0.998	0.998	0.990	0.992
30°水平角, 倍频程滤波	0.970	0.980	0.950	0.948
30°水平角, 1/3 倍频程滤波	0.995	0.995	0.987	0.976
60°水平角, 倍频程滤波	0.980	0.986	0.971	0.929
60°水平角, 1/3 倍频程滤波	0.996	0.996	0.974	0.970
90°水平角, 倍频程滤波	0.959	0.991	0.981	0.968
90°水平角, 1/3 倍频程滤波	0.994	0.998	0.995	0.987

4 结论

IACC 作为厅堂客观音质参量中唯一的双耳评价指标,考虑了人自身特性,直观上非常易于理解其与主观听感的联系。同时,其测量方法并不复杂,可以作为很有效的音质评价参量。基于消声室测量的 IACC 受诸多因素的影响,且影响程度也不一样。

(1) 对于 IACC 测量时使用的人工头,如果头壳为空心,测量时可能会存在串音干扰,且易受声波影响产生振动,这都会影响 IACC 值。对人工头内部进行填充处理以隔声隔振是必须的。

(2) 目前常用的脉冲响应测量声源都可用于 IACC 测量,且测量结果基本一致。但考虑到可重复性及可操作性等技术因素的影响,选用线性扫频信号进行测量会有一定的优越性。

(3) 对于实际厅堂的 IACC 测量,采用人工头与扬声器的方向都固定的方式更为合理。在一定的测量距离(发射-接收点距离)内,30°~150°的水平角内的测量情况会对 IACC 的值产生影响,尤其是高

频 IACC 的值波动幅度较大。这种情况下的低频 IACC 测量有必要进行多次测量的平均以避免测量的不稳定引入误差。

(4) 使用不同的滤波方式对于 IACC 值随不同测量位置的变化趋势并没有影响,因此不同滤波方式并不能作为影响 IACC 与 ASW 关系的因素。但不同的滤波方式对于 IACC 值的精度及稳定性会有明显影响。在 IACC 测量精度要求较高的情况下,有必要采用 1/3 倍频程滤波的方式。

综上所述,本文所探讨的各种客观因素对于 IACC 的测量有不同程度的影响。虽然 ISO3382 给出了 IACC 的定义及推荐的测量方法,但目前对该参量的测量仍存在一些争议。因此有必要对该参量测量中的各种影响因素进行详细与完备的分析与讨论。本文做了一些影响因素的实验研究,有助于进一步完善厅堂音质参量 IACC 的测量方法。

参 考 文 献

- [1] 王季卿. 音乐厅音质设计进展述评[J]. 应用声学, 2003, 22(1): 1-7. WANG Jiqing. Overview of the progress of concert hall acoustical design[J]. Applied Acoustics, 2003, 22(1): 1-7.
- [2] Barron M. The subjective effect of first reflections in concert halls[J]. J. Sound Vib, 1971, 15: 475-494.
- [3] Hidaka T, Beranek L. Interaural cross-correlation, lateral fraction, and low- and high-frequency sound levels as measures of acoustical quality in concert halls[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1995, 98: 988-1007.
- [4] Okano T, Beranek L. Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACCE), lateral fraction (LFE), and apparent source width (ASW) in concert halls[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1998, 104: 255-265.
- [5] 白瑞纳克. 音乐厅与歌剧院[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002. Leo Beranek. Concert halls and opera houses[M]. New York: Springer Publishing Company, 2002.
- [6] ISO3382: Acoustics--Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters[S]. 1997.
- [7] Morimoto M, Iida K. Appropriate frequency bandwidth in measuring interaural cross-correlation as a physical measure of auditory source width[J]. Acoustical Science and Technology, 2005, 26: 179-184.
- [8] Marshall A H, Barron M. Spatial responsiveness in concert halls and the origins of spatial impression[J]. Applied Acoustics, 2001, 62(2): 91-108.
- [9] Ando Y. Subjective preference in relation to objective parameters of music sound fields with a single echo[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1977, 62: 1436-1441.
- [10] Ryota Shimokura, Alessandro Cocchi. Calculation of IACC of any music signal convolved with impulse responses by using the interaural cross-correlation function of the sound field and the autocorrelation function of the sound source[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 35:122-125.
- [11] Bradley J S. An international comparison of room acoustics measurement systems[M]. Canada: Institute for Research in construction, 1996.
- [12] 赵跃英, 盛胜我. 实施厅堂音质参量测量标准(ISO3382)中的若干问题[J]. 声学技术, 2006, 25(5): 482-484. ZHAO Yueying, SHENG Shengwo. Issues of room acoustics measurement in conforming the international standard ISO3382[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(5): 482-485.
- [13] 赵跃英, 盛胜我. 室内声学测量中数字化声源性能的分析[J]. 声学技术, 2003, 23(3): 143-147. ZHAO Yueying, SHENG Shengwo. Characteristics of modern digital sound sources for room acoustical measurement[J]. Technical Acoustics, 2003, 23(3): 143-147.