

厅堂音质评价的新参量MTF与IACC

邵 龙

(同济大学声学研究所)

一、引言

厅堂音质评价参量可以以为是介于主观听觉感受与客观的可测量的声场参数之间的一座“桥梁”，它的发展不仅取决于心理声学进展，而且还与新技术新方法的应用有关。在进行厅堂传输特性的研究方面，近年来所发展的MTF调制传输函数方法已经得到了广泛的重视，它能够对厅堂内的语言传输特性作快速的定量分析，这种分析不仅包括了厅堂中各种因素如背景噪声、混响声等对语言清晰度的影响，而且对11个国家的语言特性均有良好的一致性，使得厅堂音质的量化评价又多了一个有力的工具。另一方面，多重相关因子分析技术在厅堂音质研究中的应用，已发现内耳听觉互相关度IACC与音质评价的空间感受有良好的对应关系，IACC作为反映空间感受的评价参量是一个独立参量，它不受声级、混响的影响，并已经在评价和预测厅堂音质的空间感方面得到了初步应用。很显然这两个参量的出现，将会大大促进厅堂音质评价研究工作的进展。

二、WTF调制传输函数——语言清晰度的评价参量

1. MTF(Modulation Transfer Function)基本原理

用MTF调制传输函数的方法来评价一

声学技术

个线性传输系统的优劣，比较早的应用是在光学方面^[1]，由此来评判一个光学系统的质量。1973年Houtgast和Steeneken^[2]首先提出将MTF作为厅堂语言清晰度的评价指标。它的基本出发点是将厅堂视为一线性的声信号传输系统，声信号在厅堂传输过程中，不可避免地要受到反射声及环境噪声的影响，使原信号的调制度发生变化，即信号包络起伏的相对平滑，调制系数的改变反映了信号经过系统后的畸变。而这种畸变经过进一步的研究，发现与语言传输指数STI有很好的—致性，故进而可以直接与语言清晰度SI相对应。

MTF调制传输函数作为语言评价参量的基本原理是这样的。设输入信号的声强为 $I_i(t)$

$$I_i(t) = \bar{I}_i(1 + \cos 2\pi Ft) \quad (1)$$

式中 I_i 为声强辐值， F 为调制频率。那么输出信号的声强

$$I_o = \bar{I}_o\{1 + m \cdot \cos[2\pi F(t - \theta)]\} \quad (2)$$

其中 m 为系统中调制系数的降低值。我们知道一个系统的输出信号等于这个系统的脉冲响应与输入信号的卷积，所以有

$$I_o(t) = \int_0^{\infty} I_i(t-t')r(t')dt' \quad (3)$$

式中 $r(t)$ 为系统平方脉冲响应。如将(1)式写成指数函数形式

$$I_i(t) = \bar{I}_i [1 + \text{Re}(e^{j2\pi Ft})] \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式, 可得:

$$I_o(t) = \int_0^\infty I_i [1 + \text{Re}(e^{2\pi jF(t-t')})] r(t') dt' \quad (5)$$

即

$$I_o(t) = I_i \left[\int_0^\infty r(t') dt' + \text{Re} \left\{ e^{2\pi jFt} \int_0^\infty e^{-2\pi jFt'} r(t') dt' \right\} \right] \quad (6)$$

令系数A, B分别为

$$A = \int_0^\infty r(t) dt$$

$$B = \int_0^\infty e^{-j2\pi Ft} r(t) dt$$

$$I_o(t) = A I_i \left[1 + \frac{1}{A} \text{Re}(B e^{2\pi jFt}) \right] \quad (7)$$

将(7)式代入(2)式, 便可得到调制传输函数的系数m

$$m = \frac{|B|}{A}$$

$$\text{即 } m(F) = \frac{\left| \int_0^\infty e^{-2\pi jFt} r(t) dt \right|}{\int_0^\infty r(t) dt}$$

∴系统的调制传播函数系数m(F)实际上是系统平方脉冲响应的付氏变换与系统平方脉冲响应的积分比值。每对应一个调制频率F, 便可得到一个调制传输函数的系数。

当系统内存在噪声干扰时, 调制传输函数的系数便直接与信噪比有关。如设由于噪声干扰在接收点的总声强为

$$I_{\text{sum}} = I_o(t) + I_n \quad (8)$$

式中 I_n 为噪声声强

$$\begin{aligned} I_{\text{sum}} &= \bar{I}_o [1 + m \cos 2\pi F(t - \theta)] + I_n \\ &= (\bar{I}_o + I_n) \left[1 + m \frac{I_o}{I_o + I_n} \cos 2\pi F(t - \theta) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

由噪声引起的调制传输函数的调制系数

$$m_{\text{noise}} = \frac{I_o}{I_o + I_n} \cdot m \quad (10)$$

$$m_{\text{noise}} = M \left[1 + 10^{c-s/N/10} \right]^{-1} \quad (11)$$

一般情况下的调制系数为

$$\begin{aligned} m(F) &= \frac{\left| \int_0^\infty e^{-2\pi jFt} r(t) dt \right|}{\int_0^\infty r(t) dt} \\ &\cdot \left[1 + 10^{(-S/N)/10} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

经过系统后的调制函数降低量为 $\frac{m(F)}{1-m(F)}$ 。

语言的调制频率范围主要分布在0.63Hz至12Hz, 取1/3信频程为间隔, 则共有14个中心频率。对每一个调制频率的调制函数降低量, 可定义一个表观信噪比(Apparent S/N)和平均表观信噪比

$$(S/N)_{\text{app. } F} = 10 \lg \frac{m(F)}{1-m(F)} \quad (13)$$

$$\overline{(S/N)}_{\text{app. } F} = \frac{1}{n} \sum_{F=0.63}^n (S/N)_{\text{app. } F} \quad (14)$$

根据STI语言传输指数的定义, 对表观信噪比引进AMF听觉掩蔽衰减因子(Auditory Masking Attenuation Factor)及AMF听觉修正因子(Auditory Connection Factor)进行适当加权修改后, 便可得到STI与表观信噪比的关系。

$$STI = \frac{[(S/N)_{app} + 15]}{30} \quad (15)$$

式中(S/N)限制在±15dB

语言传输指数STI与语言清晰度的关系已经由大量的实验所证实，它们之间有良好的对应关系，其关系曲线见图1。图中(·)为系统内仅有噪声和带宽限制时的数据；(○)为仅有峰值削波，(t)为仅有自动增益控制与混响时的数据。由于MTF方法已经在调制传输函数与STI之间建立了对应关系，通过调制传输函数的系数变化便可以得出其相应的语言清晰度，从而利用MTF方法得到了一种新的厅堂音质评价参量。

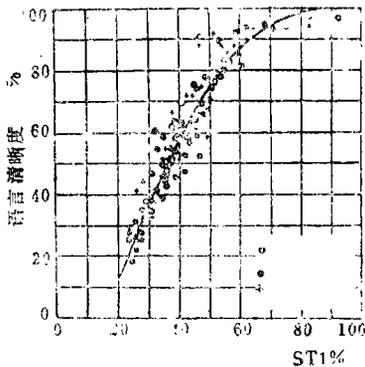


图1 STI与语言清晰度(PB-Word)关系曲线

2. MTF与RASTI

在MTF的标准测试方法中，一个完整的MTF分析要在125—8KHz的七个倍频程上，进行14个调制频率的分析，即每一个数据值是98个数据点的综合而得到的。在实际厅堂测量中，由98个数据点而得到的STI值，仅是厅堂中某一个位置的测量值，如此详尽的分析不仅是费时的，而且也是不必要的。为了能够进行快速测量起见，Houtgast^[3]于1984年又提出采用RASTI方法来进行厅堂语言清晰度测试。

RASTI(Rapid Speech Transmission Index)简化了测试方法，其测试信号是从粉红噪声中按人的语言长期平均能量谱的能量分布，取500Hz与2000Hz两个中心频

率的倍频程而得到，分别用4个和5个均匀分布的调制频率进行调制，见图2)。对500Hz倍频程的调制频率为1, 2, 4, 8Hz，对2000Hz频率的倍频程用0.7, 1.4, 2.8, 5.6和11.2Hz。

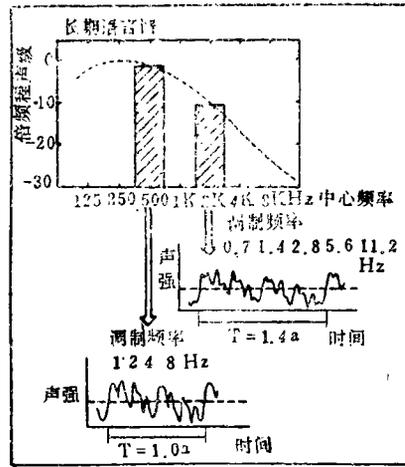


图2 RASTI测试信号说明

经过调制后的信号作为测试信号，由放大器放大后经扬声器馈入待测系统，在接收点位置由传声器接收，经放大后由分频器、解调制器进行解调，便可得到各调制频率所对应的调制系数及每一个调制频率的表观信噪比。再对9个表观信噪比值进行平均后，略作恰当修正便可得到RASTI值

$$RASTI = \frac{[(S/N)_{app} + 15]}{30} \quad (16)$$

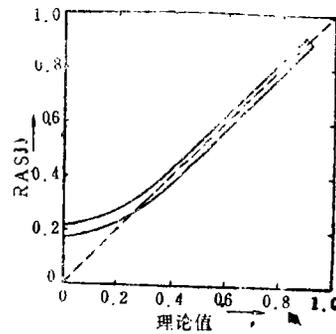


图3 RASTI与STI理论值之间的关系曲线

在对98点数据测量进行删除后的9个数据点，大大加快了测量速度，并且仍与STI

有良好对应关系。但STI<0.2时,由于随机噪声的起伏,使RASTI与STI开始偏离线性关系,见图3。在实际应用中,所测的RASTI一般均大于0.2。因此对语言清晰度的评价是没有影响的。在RASTI与语言清晰度的实验研究中,我们得到关系曲线如图4,并对不同RASTL值分档进行标定。

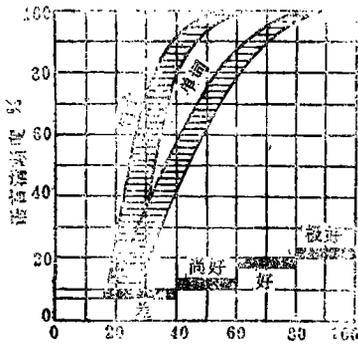


图4 RASTI与语言清晰度(PB—word)及句子可懂度之间的关系

RASTI方法作为一种厅堂音质的客观测量指标,已经得到了IEC的认可,并被IEC—268草案推荐为厅堂语言清晰度的客观评价方法。目前RASTI的方法应用于语言清晰度评价已经与11个国家的语言建立了较一致的结果^[3],并且测试仪器已经商品化了,如语言传输测试仪BK3361。

RBSTI方法尽管方便可靠,但它必须满足下列条件:

- ①必须是线性语言传输系统
- ②要求具有较宽的语言谱,至少200Hz到6KHz
- ③要求待测厅堂的背景噪声谱不可与语言谱相差太多,并不可包含纯音。
- ④厅堂混响时间并不随频率变化而有很大的变化。只有在满足了这四个条件后,我们才有可能得到正确的RASTI值。

进一步的研究已经表明,对于一个给定频带的声传输系统,其MTF值与输入信号无关,故输入信号可以用音乐及任何给定简单调制形状的信号。根据这一原理,可以扩

展MTF在声学中的应用,目前在用计算机预测语言清晰度方面得到了广泛的应用。如在矩形及边形厅堂用声像法,及用声线跟踪法、计算机模拟进行语言清晰度预测。由于采用了MTF方法,已经使厅堂音质的计算机模拟跳出了一般模式。如用声线跟踪法^{[4][5][6][7]}已经不再是仅仅考虑体积界面总的表面积和平均吸声系数,进一步扩展到了考虑声源的方向性,观众噪声和观众吸声等方面,厅堂内任一点的STI值均可得到,并可由计算机给出STI曲线。这样给厅堂的音质设计带来了很大方便。

三、IACC作为空间印象评价参量的发展

音质评价的另一重要方面就是听众所感觉到的空间感一些实验结果已经表明:早期反射声的强度及方向对人的主观感觉的影响是较大的,并由此产生了一些方向性的评价指标。但是这些评价指标忽略了一点,即它们都是单耳性的评价参量,而实际上人们的空间感或空间印象应该是由双耳听闻所引起的。声信号对人左右耳的入射角度不同,所得到的左右耳响应信号便不同,从而使人产生一种空间感的主观效应。换句话说,由于到达人左右耳的不同声信号,经过人脑相关处理后,产生了空间感觉。基于这个观点,新近推荐的方向性评价指标都是双耳性的,用人工头方法测量以分别得到左右耳的声信号。

1. IACC的基本原理及历史回顾

Danilenko^[8]于1986年提出采用双耳明晰度系数(Binaural distinctness coefficient)

$$D_b = \int_0^{t_s} P_e(t) \cdot P_r(t) dt / \int_0^{\infty} P_r(t) \cdot P_i(t) dt \quad (17)$$

此参量是受到Thiele的明晰度参量启发,从单耳扩展到双耳的。它采用左耳声信

号 $P_e(t)$ 和右耳声信号 $P_r(t)$ 直接相乘,并在不同的时间区间上积分得来的。

同样Kurer^[9]根据重心时间参量的概念,也将其从单耳性参量扩展至双耳性参量

$$t_{sn} = \frac{\int_0^{\infty} t |P_e(t) \cdot P_r(t)| dt}{\int_0^{\infty} |P_e(t) \cdot P_r(t)| dt} \quad (18)$$

实际上在对双耳信号的处理过程中,使用相关方法来替代直接相乘,从人耳听觉机理上来说是更为合理的。因此左右耳信号的互相关函数可以被定义为:

$$P_{re}(t) = \int_0^{\infty} P_e(t) \cdot P_r(t+\tau) dt \quad (19)$$

从类似的数学上的相关因子,这种相关程度可以由相关系数 Ψ 来表示

$$\Psi = \frac{\overline{P_1 P_2}}{(\overline{P_1^2} \overline{P_2^2})^{1/2}} \quad (20)$$

式中 P_1 为左耳信号 $P_e(t)$, P_2 为右耳信号 $P_r(t)$ 这样便得到了两信号相关程度的表达式,内耳互相关系IACC(Inter aural cross correlation)

$$K(\tau) = \frac{\int_0^{\infty} P_e(t) P_r(t+\tau) dt}{[\int_0^{\infty} P_e^2(t) dt \int_0^{\infty} P_r^2(t) dt]^{1/2}} \quad (21)$$

Damaske^[10]1968年推荐使用 $|K(\tau)|$ 的最大值作为厅堂音质评价指标,作为反映左右耳信号的相关性。而Keet^[11]则建议采用限制积分时间的方法来排除扩散声能的影响,例如将 t_g 取为50ms,并且取 $\tau=0$

$$|K(0)|_{t_g} = \frac{\int_0^{t_g} P_e(t) P_r(t) dt}{[\int_0^{t_g} P_e^2(t) dt \int_0^{t_g} P_r^2(t) dt]^{1/2}} \quad (21)$$

此式称为‘短时相关系数’,这样从正前方入射的声信号将有最大值。

Gattlob^[12]1973年将Damaske和Keet的方法综合起来,采用Damaske的方法取K

的最大值及限制 $\tau \leq 1ms$,这样所得到的结果作为评价参量,这样便得到了至今仍在进行广泛研究的空间感评价参量IACC。

现在IACC已经成为一个可实际进行测量应用的指标,我们可以清楚地看到,它是用声信号到达听者两耳的强度差、时间差及相位差来决定声音的方位感及空间感的。其归一化指标为

$$IACC = \frac{\int_0^{\infty} \phi_{lr}(\tau) dt}{\int_0^{\infty} \phi_{le}(\tau) dt \int_0^{\infty} \phi_{lr}(\tau) dt} \quad (23)$$

式中 $|\tau| \leq 1ms$

若我们设声源为 $s(t)$,在声场中左右耳所接收到的信号分别为 $E_l(t)$ 和 $E_r(t)$,那么其左右耳的相关函数为

$$\begin{aligned} \phi_{lr}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\tau}^T E_l(t+\tau) E_r(t) dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\tau}^T [h_l(t) * s(t)] [h_r(t+\tau) * s(t+\tau)] dt \\ &= \phi_{lr}(\tau) * \phi_{ss}(\tau) \end{aligned} \quad (24)$$

式中 $\phi_{lr}(\tau)$ 为人耳接收到信号的脉冲响应互相关, $\phi_{ss}(\tau)$ 为声源信号的自相关。对于从不同方向入射来的声信号,IACC有不同的数值。当仅有正前方入射的声信号时 $IACC=1$,当两耳接收的声信号在水平入射角为 $\pm 55^\circ$ 左右时,IACC有最小值。

Ando^[13]在对IACC进行了大量实验研究后,认为IACC参量与人们的主观感觉之间有很好的 consistency。声场的主观偏爱值随IACC增加而下降,即在厅堂中空间感的主观感的主观感觉较好时,所测得的IACC值往往较小。Ando的研究还表明,^[1]IACC与声信号源相对独立,它不受听音声级范围及音乐主题变化的影响,见图5。在 $15^\circ-60^\circ$ 角度间的IACC变化迅速,所以这个角度的入射声对主观听觉尤为重要,最佳听感的入射角度在 $55^\circ \pm 20^\circ$;^[2]IACC与听音声级对最佳主观听感的作用是相互独立的,见图6,

IACC对改变最佳听感的作用远比声级的作用大。^[3] IACC与混响时间对主观听感的影响也是相对独立的, IACC的最小值决定最佳听感、最大值 $\tau = 0$ 保证声源的定位性。由于IACC本质上与声级、混响时间无关。所以它是独立于声级、混响时间之外的另一个评价参量。

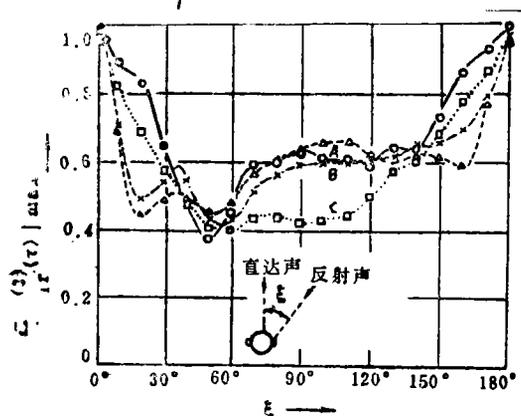


图5 具有不同音乐主题A—D时的IACC与反射声(单次)入射角度的关系曲线

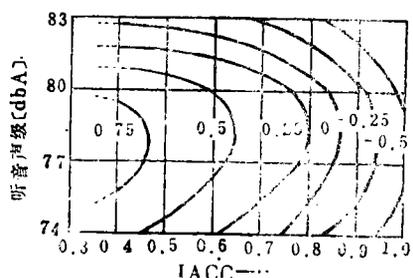


图6 以等最佳偏爱值为参量的 IACC 与听音声级关系曲线

近年来, IACC 作为客观评价参量的作用, 已经愈来愈受到了人们的重视。IACC 不仅被人用在预计、评价厅堂音质的空间感方面, 而且在根据IACC与人的主观感觉的研究结果, 进行厅堂音质设计的指导方面都得到了应用。见图7、8

IACC是从双耳听闻的观点出发而提出的一个客观指标与听者的空间方位感等主观感受符合得较好。尽管IACC与空间感受有较好的一致性。可它并不一定是决定空间印

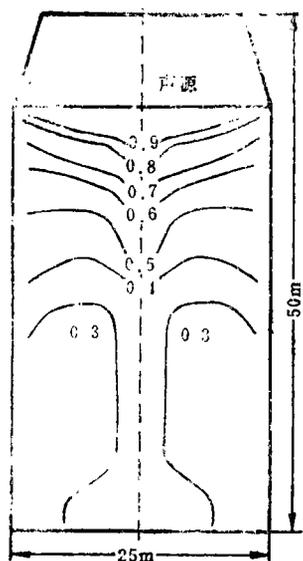


图7 由计算机计算得到的Boston交响音乐厅等 IACC值分布曲线图

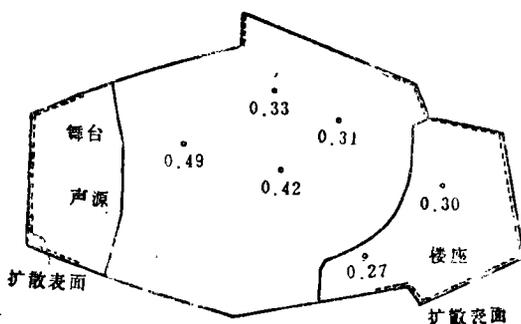


图8 由计算机模拟设计的日本Kobe大学音乐厅内的 IACC值分布图

象的唯一客观参量。IACC在实际测量中还存在着一一些问题。如对于不同的延迟时间、方向和强度上的反射声的不同组合, 就能得到相同的IACC值, 但所得到的空间印象却有可能不相同。尽管IACC作为评价指标目前尚不完善, 但是从IACC指标的提出以及相关技术的使用都代表着厅堂音质评价参量发展的方向。

四、结束语

MTF方法和IACC方法都是近年来得到迅速发展的厅堂音质评价参量。它们在厅堂音质的定量化评价方面, 代表了厅堂音质评

价参量发展的方向。然而真正要使厅堂音质评价工作能够进一步完善,并不仅仅决定于信号处理等技术手段的提高,而在很大程度上将取决于心理、生理声学研究的进展。

本文曾请同济大学研究所钟祥璋先生审在此谨致感谢!

参 考 文 献

- [1] Baker, L.R., "Issue devoted to image evaluation by means of Optical Transfer Functions" *Optica Acta*, 18(1971), p81.
- [2] Houtgast, T. and Steeneken, H.J. M., 'The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility' *Acustica*, 28(1973), p66.
- [3] Houtgast, T. and Steeneken, H.J. M., 'A multi-language evaluation of the RASTI method for estimating speech intelligibility in auditoria' *Acustica*, 54(4)(1984), p185.
- [4] Houtgast, T. and Steeneken, H.J. M., 'Predicting speech intelligibility in rooms from the Modulation Transfer Function, I: mirror image computer model applied to rectangular rooms' *Acustica*, 46(1980), p73.
- [5] Wattel, E., et al., 'predicting speech intelligibility in rooms from the Modulation Transfer Function, II: mirror image computer model applied to pyramidal rooms' *Acustica*, 48(1981), p820.
- [6] Van Rietschote, H. F. et al., 'predicting speech intelligibility in rooms from the Modulation Transfer Function, IV: a ray-tracing computer model' *Acustica*, 49(1981), p245.
- [7] Van Rietschote, H. F. et al., 'predicting speech intelligibility in rooms from the Modulation Transfer Function, V: the merits of the ray-tracing model versus general room acoustics' *Acustica*, 53(1983), p73.
- [8] Danilenko, L., Dissertation, TH Aerlin, (1968).
- [9] Kurer, R., Dissertation, TU Berlin, (1972).
- [10] Damaske, P., 'Subjektive Untersuchung von Schallfeldern' *Acustica* 19(1967/68), p199.
- [11] Keet, W. de V., Dissertation, Capetown, (1969).
- [12] Gottlob D., 'Comparison of objective acoustic parameters in concert halls with results of subjective experiments' Dissertation, Göttingen(1973).
- [13] Yoich Ando, 'Concert Hall Acoustics', Springer Series in Electrophysics 17.

(上接第24页)

cutting device. United States Patent 1965, No.3,213,537.

- [4] Mayev R G. Development of ultrasonic investigations in medicine

and biology in the USSR.

Ultrasound in medicine and biology 1985 11(1): 1

- [5] 丁东编 关于超声手术刀某些实验的报导《声学技术》1986(4): 39