

引用格式: 祝培生, 莫方朔. 语音传输指数 STI 的测量[J]. 声学技术, 2021, 40(6): 801-806. [ZHU Peisheng, MO Fangshuo. Measurement of speech transmission index[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(6): 801-806.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.06.010

语音传输指数 STI 的测量

祝培生¹, 莫方朔²

(1. 大连理工大学建筑与艺术学院, 辽宁大连 116024; 2. 同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 语音传输指数(Speech Transmission Index, STI)是被广泛使用的言语可懂度客观评价参量。尽管国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)标准致力于提供一个确定的 STI 技术规范, 但经过近年的使用发现, 在自然声房间和厅堂的 STI 测量中, 仍有一些可能带来较大误差的影响因素没有考虑。这使得按当前标准测得的不同房间的数据之间缺少可比性。结合近年的研究进展, 对这些可能的影响因素做出分析并给出了解决方案, 以促进 STI 方法在建筑声学领域的应用与推广。

关键词: 言语可懂度; 客观评价; 自然声房间和厅堂; 语音传输指数; 影响因素

中图分类号: TU112.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-06-0801-06

Measurement of speech transmission index

ZHU Peisheng¹, MO Fangshuo²

(1. School of Architecture and Fine Art, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China;

2. School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The speech transmission index (STI) is a widely used objective evaluation parameter of speech intelligibility. Although the IEC standard commits to providing a definite STI technical specification, the application of STI in natural sound rooms and auditoria in recent years revealed that some factors that may cause relatively large errors have not been considered, which results in a lack of comparability between the measured data of different rooms according to current standards. Based on the research progress in recent years, these possible influencing factors are analyzed and solutions are proposed to promote the application of STI methods in the field of architectural acoustics.

Key words: speech intelligibility; objective evaluation; natural sound rooms and auditoria; speech transmission index; influencing factor

0 引言

语音传输指数(Speech Transmission Index, STI)是被广泛接受和使用的言语可懂度客观评价参量, 使用来自室内声学理论的调制传递函数(Modulation transfer function, MTF)进行测量与计算^[1-3]。STI 与一些较为公认的传统音质客观评价参量如混响时间(Reverberation Time, RT)、背景噪声、明晰度 C_{50} 等相比, 除能综合考虑混响时间、信噪比的影响外, 混响衰变的细节、房间反射声序列的分布等也可考虑^[4], 并与言语可懂度的主观感受直接对应^[5], 有着传统音质评价参量所不具备的优势。定义 STI 的国

际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)标准(v4.0)是 2011 年发布的^[1], 修改采用 IEC 标准^[1]的中国国家标准 GB/T 12060.16—2017^[3]于 2017 年 11 月 1 日发布, 2018 年 5 月 1 日正式实施。在 2020 年 9 月, IEC 发布了最新修订的 STI 技术标准(v5.0)^[2]。但由于 STI 方法定义复杂, 测量时影响因素较多, 推广与应用一直不太理想。当前除了在扩声系统、公共广播系统等领域的应用比较普遍之外, 在厅堂声学领域, 现行国际、国内标准采用 STI 作为控制指标的并不多。但这种情况也正在快速改变, 在 ISO 3382-3^[6]和国家标准 GB/T 36075.3—2018^[7]中, STI 已作为重要的控制性声学参量用于开放式办公室音质的客观评价; 英国教室声学设计标准 BB93^[8]也对开放空间内的 STI 限值给出了明确规定; 在正在制定的国际标准 ISO 18484《Acoustics-Indoor acoustic environment》中, STI 也是评价声舒适的重要指标之一。

2011 年发布的 IEC 标准^[1]与以前的版本相比, 在技术领域提升较大, 同时标准还致力于提供一个

收稿日期: 2020-12-01; 修回日期: 2021-01-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778100、11774266、51278078)。

作者简介: 祝培生(1969—), 男, 辽宁清原人, 教授, 博士生导师, 研究方向为建筑声学。

通信作者: 祝培生, E-mail: 6199@vip.sina.com

广泛的、完整的、明确的 STI 技术标准,以促进 STI 方法的应用与推广^[1]。但经过近年的使用发现,尤其是在建筑声学领域的应用,有一些可能带来较大误差的影响因素并没有考虑。出现这种情况的原因可能是标准的制定者对扩声系统、公共广播系统等领域的影响因素考虑较多,但对建筑声学领域的影响因素考虑相对较少。即使在最新修订的 STI 技术标准(v5.0)^[2]中,这种情况也没有明显改变。尽管修改采用 IEC 标准^[1]的国家标准 GB/T 12060.16—2017^[3]已经做了一些改进,但仍有一些问题需要解决。因此有必要对按现行标准进行自然声厅堂 STI 测量时容易遇到的问题以及影响因素进行分析,以提高测量结果的准确性,促进 STI 方法的应用与推广。

1 STI 方法

从 20 世纪二三十年代人们就开始尝试对言语可懂度进行客观评价,第一个客观评价参量清晰度指数(Articulation Index, AI)^[9]在四五十年代提出, AI 在 1997 年发展成为言语可懂度指数 (Speech Intelligibility Index, SII)^[10]。到 70 年代,又提出了语音传输指数 STI^[5]和辅音损失比^[11](Articulation Loss of Consonants, ALcons%)等^[12]。自 STI 被提出以来,其一直处于完善与发展的过程中,一些改进成果,包括对其他成熟方法的借鉴^[13]被不断整合进来。与其他方法相比, STI 的适用范围较宽,具有较高的精度并易于使用^[1-3]。虽然 STI 方法也有一定的局限性,但在许多条件下被证明是非常有效的,因此为国际社会普遍接受。典型的 STI 应用场景包括^[1-3]:扩声系统、房间和厅堂(自然声或使用扩声系统)、通信电路;直接的言语交流环境(例如在交通工具内)、听力辅助系统等。

IEC 标准(v4.0)^[1]一共推荐了三个语音传输指数参量:完整 STI(Full STI),公共广播系统语音传输指数(Speech Transmission Index for Public Address systems, STIPA)和通信系统语音传输指数(Speech Transmission Index for Telecommunication systems, STITEL)。这些参量密切相关, STIPA 和 STITEL 是 STI 的简化版本。在 IEC 标准(v5.0)^[2]中,取消了 STITEL。对于语音传输指数参量的测量, IEC 标准^[1-2]推荐了两种方法:使用调制信号的直接法和基于系统脉冲响应的间接法。直接法测量 STI 耗时较长,主要在科研中使用^[1,3],在常规测量时使用较少。与直接法 STI 测量相比,直接法 STIPA 的测量

时间大大缩短,因此 IEC 标准^[1-2]将直接法 STIPA 推荐用于多种场合,包括扩声系统、自然声房间和厅堂的言语可懂度客观评价。与直接法 STI 相比,间接法 STI 的测量耗时较少,但在使用时受到一些条件的限制^[1-3]。

2 影响 STI 测量的因素

结合近年来的研究成果,在自然声房间和厅堂中 STI 测量时可能带来较大误差但标准^[1-3]并没有给出明确规定影响因素主要有声源特性、测试信号的声压级校准、测量方法与流程、不同语言体系等,下面逐一做出分析。

2.1 声源特性

按照 IEC 标准^[1]和国内标准^[3]规定, STI 测量应使用与人嘴指向性特征基本相同的扬声器(例如仿真嘴)作为测试声源,也可使用纸盆直径不超过 100 mm 的扬声器作为替代声源。在最新发布的 IEC 标准(v5.0)^[2]中,测试声源纸盆直径调整为不超过 65 mm。但也有标准^[6-7]使用十二面体声源作为 STI 的测试声源,例如在开放式办公室中的 STI 测量中。对于测试声源来说,最可能影响 STI 测量结果的声源特性是声源的指向性和频率响应^[14-15]。测试声源(系统)的均衡对测量结果有较大影响,频率响应不均衡带来的 STI 最大偏差可达到 0.172^[14],具体大小还取决于声源本身的频率响应情况。鉴于标准^[1-3]已对频率响应均衡作出了明确规定,本文不做深入讨论,下面重点分析声源指向性的影响。

在接收点位置处,传声器接收到的声信号包含直达声和反射声两部分。对于在自由场校准过的声源,声源主辐射方向前方 1 m 处的直达声声压级是完全相同的,都为 60 dBA^[3],因而在接收点位置处的直达声声压级也是相同的。然而由于指向性的影响,不同声源在接收点位置处的反射声声压级是不同的。这时,具有较大指向性指数(Directivity Index, DI)的声源(例如纸盆直径为 100 mm 的声源),在接收点位置处的反射声声能较低,具有较小 DI 的声源(例如十二面体声源),在接收点位置处的反射声声能较高。依据 IEC 标准^[1-2],调制传递函数 MTF 按照公式(1)计算:

$$m_k(f_m) = \frac{\left| \int_0^\infty h_k(t)^2 e^{-j2\pi f_m t} dt \right|}{\int_0^\infty h_k(t)^2 dt} \cdot \left[1 + 10^{-R_{SNA}/10} \right]^{-1} \quad (1)$$

式中: k 是倍频带; $h_k(t)$ 是倍频带 k 的脉冲响应;

f_m 是调制频率; $R_{SN,k}$ 是 k 倍频带的信噪比。依据式(1), 反射声对 STI 的贡献可分为两部分^[14-15]: 首先, 所有反射声都可以提高信噪比 $R_{SN,k}$, 这会相应地提高 STI。当背景噪声较低(信噪比较高)时, 与仿真嘴相比, 较小 DI 的声源在接收点处带来较多的反射声, 这些额外的反射声对提高信噪比有贡献, 但由于信噪比已经很高, 因此对 STI 的贡献并不大; 当背景噪声较高(信噪比较低)时, 与仿真嘴相比, 较小 DI 的声源在接收点处带来较多反射声, 这些额外反射声带来的信噪比提升对 STI 的贡献较大(信噪比在 0 dB 附近时, 信噪比变化对 STI 的影响最大, 这可从式(1)推导得到^[14])。其次, 从式(1)中可以看到, 当不考虑噪声的影响时, 所有反射声都会导致测试信号调制深度的降低, 这时较多的反射声会导致调制深度较大的降低, 进而使 STI 减小。反射声的这两种影响交互作用, 使得在背景噪声较低(信噪比较高)时, 具有较小 DI 的声源测得的结果偏低, 具有较大 DI 的声源测得的结果偏高; 当背景噪声较高(信噪比较低)时, 具有较小 DI 的声源测得的结果偏高, 具有较大 DI 的声源测得的结果偏低。当然, 测点处反射声的情况还与房间的声学条件有关。

上述现象已在研究中得到验证。在 Zhu 等的一个研究中^[14], 对比了 3 个声源(仿真嘴 GRAS 44AA; 监听音箱 GENELEC 8020B; 十二面体声源 B&K 4292L)的 STI 测量结果。由于声源指向性的影响, 具有最小 DI 的 4292L 测得的结果, 当背景噪声较高时(信噪比约为 -5 dB)STI 是最高的, 当背景噪声较低时(信噪比约为 20 dB)STI 基本上是最底的; 具有最大 DI 的 8020B(纸盆直径约 100 mm)测得的结果, 当背景噪声较高时(信噪比约为 -5 dB)STI 是最底的, 当背景噪声较低时(信噪比约为 20 dB)STI 基本上是最高的; 8020B 测得的结果与仿真嘴 44AA 相比, 最大偏差达到了 -0.065(出现在信噪比约为 5 dB 时); 4292L 测得的结果与仿真嘴 44AA 相比, 最大偏差达到了 0.068(出现在信噪比约为 5 dB 时)。在 Zhu 等的另一个研究中^[15], 将当前常用的两个商用 STI 测量系统(DIRAC Room Acoustics Software (v6.0)^[16]; NTi XL2 Audio and Acoustic Analyzer^[17])的声源与标准声源仿真嘴 GRAS 44AA 做了对比, 这三个声源(GRAS 44AA; DIRAC 的 Echo Speech Source 4720, 纸盆直径约 55 mm; NTi 的 Audio TalkBox, 纸盆直径约 100 mm)都满足 IEC 标准(v4.0)^[1]的要求, GRAS 44AA 和 4720 也满足 IEC 标准(v5.0)^[2]的要求。最大的 STI 偏差出现在具有最

大指向性差异的 TalkBox 和 44AA 之间, 达到了 0.072(出现在信噪比约为 -5 dB 时); 即使纸盆直径较小的 4720 与 44AA 之间的 STI 差异也达到了 0.045(出现在信噪比约为 20 dB 时)。考虑到 STI 的 1 个最小可觉差(Just Noticeable Difference, JND)大约为 0.03^[9], 由此可以看到即使满足标准要求, 由声源指向性带来的偏差还是比较大的。

这些研究结果表明, 满足标准^[1-3]的声源仍然可能带来较大的 STI 偏差。当选择一个在自然声房间测量的系统时, 声源特性的影响应该加以考虑, 否则不同房间的测量结果之间会没有可比性。一个纸盆直径较小的声源, 更容易获得与仿真嘴相近的指向性特征, 但是声源的声功率较低, 低频的衰减也较大, 在较大房间和厅堂的自然声条件下无法测得准确的脉冲响应。一个纸盆直径较大的声源, 更容易获得较大的声功率和更好的低频表现, 但是声源的指向性较强, 会对测量结果带来明显影响。在测试声源的性能取得较大技术进步之前, 这个问题并没有理想的解决方法。但换个角度来看, STI 只是一个客观度量工具, 稳定的测量结果才是更应关心的问题。我们需要的是一个明确的规定, 例如采用确定尺寸的测试声源, 这样不同测量数据之间才有较好的可比性。从这点来说, 当前声源的选择, 可以选用直径较大的纸盆, 这样可以兼顾较大房间和厅堂的自然声 STI 测量。办公空间的 STI 测量就明确规定使用十二面体声源^[6-7], 数据之间有较好的可比性, 也并不影响对办公空间的评价。

对于扩声系统的测量, 按照标准^[1-3]规定, 将声源设置在扩声系统话筒的主轴上, 摆放在通常说话人的位置(距离), 设置话筒位置处测试信号的声压级为系统正常使用时的工作语音声级, 测点处的声压级调整为听众正常听音时的声压级, 信号校准的方式与自然声房间和厅堂并不相同^[3]。由于声源指向性带来的测点处声压级差异可通过扩声系统的增益来补偿, 并且扩声情况下信噪比普遍较高, 因此声源指向性对扩声条件下的 STI 测量影响较小。当然扩声系统的测试信号在自由场中校准也是应该鼓励的。

2.2 测试信号的声压级校准

对于扩声系统的测量, 尽管测试信号的声压级采用了现场校准的方式^[1-2], 但对 STI 的测量影响较小。对于自然声房间和厅堂的测试信号声压级校准, IEC 标准^[1-2]默认同扩声系统一样, 在现场校准。国内标准^[3]对此做了修改, 明确规定测量使用自然声的房间和厅堂的言语可懂度时, 测试信号的声压

级应在自由场中校准, 设定仿真嘴或测试扬声器(主辐射轴方向)前 1 m 处的等效连续声压级为 60 dBA。如果在现场校准, 由于反射声的影响, 工作语音声级可能被明显低估, 这种低估还与房间的声学条件有关, 使得不同房间和厅堂的测量数据之间没有可比性。在 Zhu 等的一个研究中^[15], 进行了自由场校准和现场校准对 STI 测量结果影响的对比。在 4 个房间中, 以标准声源仿真嘴 44AA 为例, 现场校准和自由场校准的声压级差分别为实验室中 3.2 dB(中频混响时间为 1.87 s); 办公室中 3.1 dB(中频混响时间为 0.73 s); 教室中 1.3 dB(中频混响时间为 1.25 s); 会议室 1.1 dB(中频混响时间为 1.15 s)。1 dB 的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)变化最大可带来约 0.033 的 STI 偏差^[2,18]。SNR 变化对 STI 的影响同时还取决于混响时间的长短、信噪比的大小, 图 1 给出了 SNR 的不确定度为 1 dB 时, 不同 SNR 情况下的 STI 不确定度绝对值与混响时间(Reverberation Time, RT)的关系^[2,18], 数据是在房间理想指数衰变声学条件下计算得到的。根据图 1 可知, 在混响时间较短、信噪比较低的情况下, SNR 的变化对 STI 的影响较大。以基本满足正常使用时的 SNR 为 9 dB 情况为例, 实验室中 3.2 dB 的信号声压级差可带来约 0.024 的 STI 偏差; 办公室中 3.1 dB 的信号声压级差可带来约 0.045 的 STI 偏差, 超过了 1 个 JND; 教室中 1.3 dB 的信号声压级差可带来约 0.013 的 STI 偏差; 会议室中 1.1 dB 的信号声压级差可带来约 0.011 的 STI 偏差。由此可见, 测试信号的自由场声压级校准对于自然声房间和厅堂的 STI 测量也非常重要。

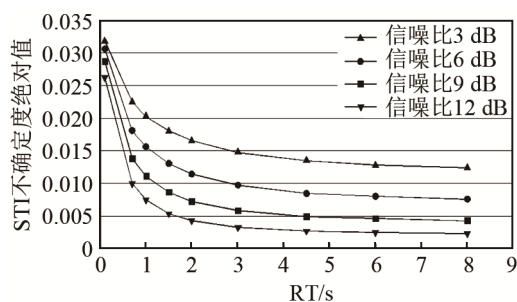


图1 SNR 不确定度为 1 dB 时, 不同 SNR 情况下的 STI 不确定度绝对值与 RT 的关系

Fig.1 Uncertainty in absolute value of STI vs RT with 1 dB uncertainty in SNR at various SNRs

2.3 测量方法与流程

对于 STI 的测量, 主要有直接法 STI、直接法 STIPA 和间接法 STI 可供选择^[1-2]。对于扩声系统来说, 直接法 STIPA 是比较合适的方法。这是因为由于效果器的作用, 很多时候扩声系统并不是一个线

性时不变系统, 间接法 STI 并不适用于存在非线性失真的声传输通路, 而直接法 STI 的测量时间较长, 无法进行商业测量。研究表明^[15,19], STIPA 和 STI 之间的差异较小, 基本不随 SNR 的变化而变化, 最大偏差为 0.018, 小于 1 个 JND。这种差异主要受测量系统或者房间的频率响应影响。

对于自然声房间和厅堂的 STI 测量, IEC 标准^[1-2]同时推荐了直接法 STI、直接法 STIPA 和间接法 STIPA、间接法 STI。依据相关研究^[15,19], 直接法 STI 和间接法 STI 测量结果没有区别, 两者同样稳定、准确, 间接法 STI 也完全可以满足科研需求。这也是可以解释的, 当直接法的测试信号具有无限多个调制周期时, 直接法测量结果就会无限接近于使用脉冲响应计算 MTF 得到的间接法测量结果。由于间接法 STIPA 与间接法 STI 测量时间、流程基本相同, 因此间接法 STI 成为自然声房间和厅堂测量的一个最佳选择。

当前间接法 STI 测量产生的较大误差主要是由不规范的信噪比修正导致的^[15]。间接法 STI 测量一般分两部分进行, 一部分是脉冲响应测量, 另一部分是计算 STI 时用于信噪比修正的工作语音声级和背景噪声测量。当前存在的主要问题是, 包括一些商业测量系统, 工作语音声级的测量没有使用与直接法测试信号频谱完全相同的标准信号。在现场使用一段语音测量工作语音声级会存在两个问题: 首先如果语音信号没有经过自由场校准, 测得的工作语音声级会有偏差, 见 2.2 节; 其次, 一段语音信号由于存在起伏和静音部分, 与一段稳定信号测得的声压级并不相同, 同时这段语音信号的频谱与语言长时平均频谱之间还会有差异。这会使间接法 STI 测量结果出现较大偏差。在 Zhu 等的研究中^[14-15,19-21], 采用了一个经过标准语言谱调整的 7 个 1/2 倍频带载波合成的信号(没有经过调制频率调制)测量工作语音声级, 这个信号的声压级也在自由场中进行了校准, 这样测点处的工作语音声级、频谱与直接法 STI 测量时完全相同, 测量结果也是完全相同的。

尽管间接法测量结果同样准确, 所需时间较短, 但是由于测量包含两个过程, 系统也需是线性时不变系统, 这对测试人员提出了一定的技术要求。而直接法 STIPA 测量只包含一个过程, 这也是 STIPA 获得广泛使用的原因之一。经过简单操作就可获得测量结果, 这也是间接法 STI 测量系统的发展方向。当前很多测量系统都提供了基于脉冲响应的间接法 STI 测量, 但这些系统很少提供一个标准

的工作语音声级测试信号和一个标准声源，使得很难获得准确的测量结果。DIRAC 测量平台(包括 Echo Speech Source)^[16]则是这些测量系统中的一个很好例外，它提供了一种易于操作的间接法解决方案，使用一个经过工厂校准的声源发出测试信号，整个测试只需一个操作过程。但即使 DIRAC 这样的测量平台，可能也有需要改进的地方，在 Zhu 等的研究中^[15]，DIRAC 的测量结果在背景噪声较高时出现了较大偏差，进一步的研究发现信噪比修正存在问题。DIRAC 使用测得的脉冲响应计算信噪比，这与使用标准工作语音声级和背景噪声计算得到的信噪比明显不同。对于 DIRAC 来说，只需在多段连续的测试信号中插入一段标准化的工作语音信号用于计算信噪比，就可很好解决这个问题^[15]。

当前间接法 STI 推广的当务之急是为这些测量系统匹配一个标准声源，并在声源中整合一个标准的工作语音信号。对于直接法 STIPA 的测量，尽管理论上与直接法 STI 差异不大，但现有的 STIPA 测量系统过于追求缩短测试时间，例如一个测试只需要 10~15 s，使用 7 个载波频带同时混合的信号，在接收信号的包络提取上可能就需要更好的处理技术，否则在背景噪声较高时，测量结果容易出现偏差^[15]。

2.4 不同语言体系

由不同语言体系带来的影响在 STI 方法中主要体现在四组修正系数上^[1-3]：语言频谱、听觉掩蔽效应、绝对言语接收阈、倍频带权重因子和冗余因子。研究表明，这些修正系数中不同语言频谱的影响较大，其他系数的影响相对较小^[20]。在 IEC 标准(v4.0)^[1]中，使用汉语语言频谱替代西方语言频谱，可带来最大约 0.054 的 STI 差异^[20]。IEC 最新标准(v5.0)^[2]对西方语言频谱进行了调整，调整后的西方语言频谱在低频有了较大衰减，这与汉语语言频谱相似，在高频与汉语语言频谱的差异也有一定减小，因此由语言频谱带来的影响还会降低。表 1 给出了汉语语言频谱^[20]和 IEC 标准^[1-2]推荐的西方语言频谱对比。表 1 中各倍频带声压级(单位 dB)被归一化为总声级 0 dB(A)。一般来说，IEC 标准定义的 STI 只是一个国际上普遍采用的基础度量工具，不是一个具体的评价标准，如果在用于不同语言体系时确有明显差异，可在规定不同房间和厅堂的 STI 限值的具体评价标准中做出调整，例如在教室中西方语言体系下的 STI 建议值为 0.62^[1-3]，依据汉语的主、客观评价对应关系曲线，国内标准可以规定为其他的值。也有研究表明，尽管汉语语言体系与西方语言

体系完全不同，使用汉语与英语这两种不同语言的主体在感受和理解上也存在文化差异，汉语语言体系和西方语言体系的言语可懂度主、客观评价对应关系并没有明显差异^[20,22]。影响言语可懂度主、客观评价结果的因素较多，二者的对应关系比较复杂，这仍需要进一步的研究。

表 1 汉语语言频谱和 IEC 标准推荐的西方语言频谱
Table 1 Chinese language spectrum and western language spectrums recommended by IEC standards

语言体系	频谱幅值/dB(A)							总声压级/dB(A)
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz	8 000 Hz	
汉语	-3.0	3.8	-2.2	-6.9	-10.9	-14.8	-18.8	0
IEC 标准(v4.0)	2.9	2.9	-0.8	-6.8	-12.8	-18.8	-24.8	0
IEC 标准(v5.0)	-2.5	0.5	0.0	-6.0	-12.0	-18.0	-24.0	0

2.5 传声器指向性

标准^[1-3]推荐采用全指向性和扩散声场型传声器，并明确说明使用指向性传声器会导致不同和不相关的测量结果。但实际上即使是全指向性传声器，也有一定的指向性特征^[15]。因此可以认为系统的指向性是两个换能器(声源和传声器)的共同作用。另外，在测量过程中传声器附近是否有人存在也是一个影响因素，因为可能使用手持式测量仪器^[15]。这方面标准并没有给出明确的说明^[1-2,5]。在 Zhu 等的研究^[15]中进行了 4 种传声器设置的对比：传声器垂直指向上方(附近有人或没有人)和传声器指向信号声源(附近有人或没有人)。结果表明，4 种传声器设置条件下相互之间的 STI 差值都非常小，最大的 STI 差值仅为 0.011，小于 1 个 JND；传声器指向信号声源时，附近有人和没有人的 STI 差值的平均值为 0.004；传声器垂直指向上方时，附近有人和没有人的 STI 差值的平均值为 0.008；附近没有人时，传声器指向信号声源与垂直指向的 STI 差值的平均值为 0.007。这些 STI 差值的平均值均大于 0，说明传声器的指向性以及附近是否有人确实会影响 STI 的测量结果，但与声源指向性、频率响应均衡、测试信号的声级校准以及测量方法等对 STI 的影响相比，这些偏差相对较小，不在一个数量级上^[15]。

3 结 论

尽管 IEC 标准致力于提供一个广泛的、完整的、明确的 STI 技术规范，但经过近年的使用发现，有

一些可能带来较大误差的影响因素并没有给出明确规定,使得按当前标准测量获得的数据之间缺少可比性,尤其是在建筑声学领域的应用。结合近年的研究成果,本文对这些可能的影响因素做出了分析并给出了解决方案。这些问题完全可以通过对测试声源、信号等的选用给出更加清晰明确的限定,并采用规范化的测试流程来解决。随着这些问题的解决,STI 今后必将作为一个通用的声学参量而获得广泛使用,对于剧院、多功能厅、体育馆、教室等的传统建筑声学测量也会向该领域迅速拓展。

参 考 文 献

- [1] International Electrotechnical Commission. Sound system equipment-Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index: IEC 60268-16:2011[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2011.
- [2] International Electrotechnical Commission. Sound system equipment-Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index: IEC 60268-16:2020[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2020.
- [3] 声学 室内声学参量测量 第三部分: 开放式办公室 声系统设备 第 16 部分: 通过语音传输指数客观评价言语可懂度: GB/T 12060.16—2017[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [4] KUTTRUFF H. Room acoustics[M]. Sixth edition. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [5] HOUTGAST T, STEENEKEN H J M. The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Predictor of Speech Intelligibility[J]. Acta Acustica united with Acustica, 1973, **28**(1): 66-73.
- [6] Acoustics—measurement of room acoustic parameters—part 3: open plan offices: ISO 3382-3:2012[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 声学 室内声学参量测量 第 3 部分: 开放式办公室: GB/T 36075.3—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [8] Education D F. Acoustic design of schools: performance standards: Building Bulletin 93[EB/OL]. http://www.adrianjamesacoustics.co.uk/papers/BB93_December_2014v14.pdf.
- [9] FRENCH N R, STEINBERG J C. Factors governing the intelligibility of speech sounds[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1947, **19**(1): 90-119.
- [10] American National Standards Institute. Methods for the calculation of the speech intelligibility index: ANSI S3.5-1997[S]. New York: American National Standards Institute, 1997.
- [11] PUETZ V M A. Articulation loss of consonants as a criterion for speech transmission in a room[J]. AES: Journal of the Audio Engineering Society, 1971, **19**(11): 915-919.
- [12] 祝培生, 莫方朔, 路晓东, 等. 语言清晰度客观评价方法: 对 IEC 60268-16(4.0 版, 2011.6)规范的解读[J]. 电声技术, 2012, **36**(5): 40-45.
ZHU Peisheng, MO Fangshuo, LU Xiaodong, et al. Objective rating methods of speech intelligibility—the interpretation on the IEC 60268-16(4.0 版, 2011.6) standard[J]. Audio Engineering, 2012, **36**(5): 40-45.
- [13] 祝培生, 莫方朔, 王季卿. 汉语语言可懂度客观评价的 STI 与 SII 方法实验对比研究[J]. 大连理工大学学报, 2014, **54**(2): 189-196.
ZHU Peisheng, MO Fangshuo, WANG Jiqing. Experimental comparison between STI and SII methods for objective rating of Chinese speech intelligibility[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2014, **54**(2): 189-196.
- [14] ZHU P S, MO F S, KANG J. Influence of sound source characteristics in determining objective speech intelligibility metrics[J]. Applied Acoustics, 2015, **89**: 188-198.
- [15] ZHU P S, TAO W Q, MO F S, et al. Experimental comparison of speech transmission index measurement in natural sound rooms and auditoria[J]. Applied Acoustics, 2020, **165**: 107326.
- [16] DIRAC Room Acoustics Software, Lyngby (Denmark)[EB/OL]. <https://www.bksv.com/en/products/Analysis-software/acoustic-application-software/building-acoustics/room-acoustic-measurement-dirac>.
- [17] Speech Intelligibility STIPA, NTi Audio [EB/OL]. <https://www.nti-audio.com/en/applications/evacuation-systems/speech-intelligibility-stipa>.
- [18] BRADLEY J S, REICH R, NORCROSS S G. A just noticeable difference in C50 for speech[J]. Applied Acoustics, 1999, **58**(2): 99-108.
- [19] 祝培生, 莫方朔, 康健. 语言传输指数直接与间接测量方法实验对比[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, **42**(11): 1759-1764.
ZHU Peisheng, MO Fangshuo, KANG Jian. Experimental comparison between direct and indirect measurement methods for speech transmission index[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, **42**(11): 1759-1764.
- [20] ZHU P S, MO F S, KANG J. Relationship between Chinese speech intelligibility and speech transmission index under reproduced general room conditions[J]. Acta Acustica United With Acustica, 2014, **100**(5): 880-887.
- [21] ZHU P S, MO F S, KANG J, et al. Comparisons between simulated and in situ measured speech intelligibility based on (binaural) room impulse responses[J]. Applied Acoustics, 2015, **97**: 65-77.
- [22] PENG J X, BEI C X, SUN H T. Relationship between Chinese speech intelligibility and speech transmission index in rooms based on auralization[J]. Speech Communication, 2011, **53**(7): 986-990.