



中华人民共和国国家标准

GB/T 12058—1989

扬声器听音试验

Listening tests on loudspeakers

1989-12-29 发布

1990-07-01 实施

国家技术监督局 发布

本标准等效采用国际标准 IEC268-13(1985)《扬声器听音试验》。

本标准所述的听音试验是在与居住房间的“平均”声学特性相类似的房间内进行的。并给出了有关房间的尺寸、声学特性、扬声器与听音员的布置和环境条件等要求。本标准还包括有关音乐和语言节目素材的选择、数据处理和结果表示的要求。

1 主题内容与适用范围

本标准规定了对家用声系统设备的扬声器进行听音试验的方法。

本标准适用于家用扬声器系统和单元(可由生产厂家提供适用的箱体及必要附件)。

本标准给出有关扬声器听音试验的建立、执行和评价方面的各项规定。

2 引用标准

GB 9375 收音机、录音机听音试验

GB 4854 校准纯音听力计用的标准零级

GB 6278 模拟节目信号

GB 3785 声级计的电、声性能及测量方法

3 术语

本标准中所用的一些专用术语具体含义如下：

3.1 激励

某一节目段由某个扬声器重放。

3.2 节目段

听音试验中,在某段时间内由一只扬声器不间断地演示小段音乐或语言(20~40 s)。

3.3 重复

听音试验中,为了增加评定的可靠性,重复使用同样的激励。

3.4 可靠性

a. 个人内的可靠性是指某一听音员对同一激励重复评定的一致性。

b. 个人间的可靠性是指不同听音人员对同一激励评定的一致性。

3.5 交互作用

两个变量的交互作用是指一变量的效果因另一变量的不同而不同。在听音评定时扬声器和节目源之间的交互作用,是指两个(或更多的)扬声器的评定差值,对不同节目源来说是不同的。

4 实验条件

4.1 试听室

理想地讲,试听室应模拟我国的典型家庭听音环境。

本标准规定的试听室的性能要求及具体建议如下:

4.1.1 混响时间:250~4000 Hz 之间听音区域内混响时间 T_{60} 的平均值应在 0.3~0.6 s 范围内,最好为 0.4 ± 0.05 s,且 T_{60} 的各测量值偏离平均值不应大于 25%,在 250 Hz 以下,4000 Hz 以上,允许 T_{60} 偏离上述平均值超过 25%。但在 250 Hz 以下, T_{60} 不应超过 0.8 s。

4.1.2 试听室内声频响曲线应尽可能平滑,无明显声染色。

4.1.3 在 100~5000 Hz 频率范围内,室内不应有任何异常 共鸣和颤动回声。

4.1.4 环境条件

温度:18~35℃(优选 20℃);

相对湿度:25%~75%;

气压:86~106 kPa。

注:若听音用仪器设备性能不受影响,听音员无不舒适感觉,环境条件可以适当放宽。当有争议时,仍以本条的规定为准。

4.1.5 本底噪声;空场(无听音员)时,在试听室的听音区测得的本底噪声级应低于 35 dB(A 计权、慢档)。

4.1.6 室内灯光、色彩、坐椅等应使听音员感觉舒适。

4.1.7 试听室尺寸

图 1 给出了试听室尺寸的范围。下列数值为推荐尺寸:

体积 V	80m ³
高 h	2.8m
长 l	6.7m
宽 w	4.2m

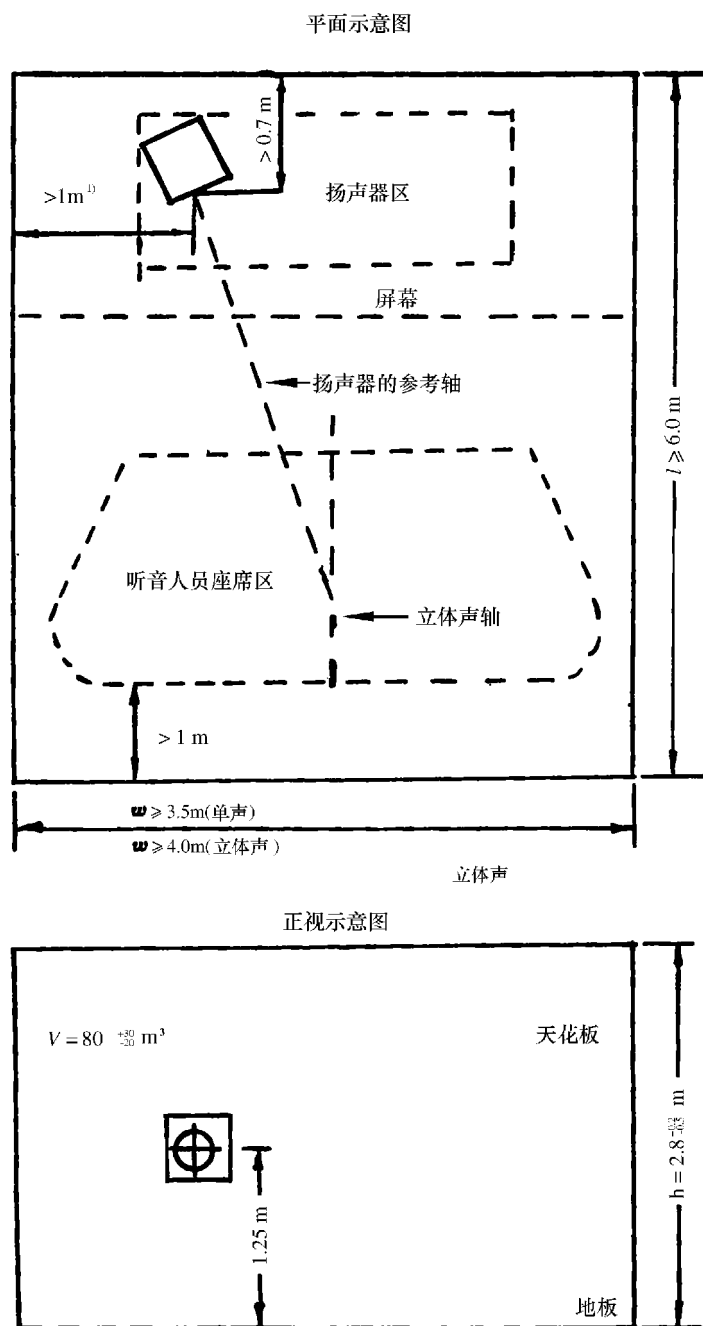


图1 试听室

注：1)参考 4.2.2 条。

4.2 扬声器的方位

在和制造厂的规定不相矛盾的情况下,各扬声器的参考轴应在距地面高 1.25 m 的水平面上,并指向试听室中线上靠近听音员座席区中央的一点。

被听扬声器要放在透声幕布后面(见图 1)。幕布应是透声不透光的布,在声频范围(约 100~8000 Hz)传声损失小于 1 dB(测量时扬声器与传声器相距 2 m,幕布置于其中间位置)。

4.2.1 单声道试验

被听扬声器的位置可在图 1 所示的扬声器区内调整。但至少距侧墙 1 m,距后墙 0.7 m。这些距离是从扬声器参考点(扬声器参考轴与扬声器前平面的交点)起测量的。有特殊用途的扬声器(如墙角式扬声器)必须按产品标准技术要求放置和试听。

各被听扬声器之间间隔至少相距 0.5 m。可能的话,听音试验时扬声器应当交换位置,以避免由于扬声器与具体的试听室位置有关联而产生总体结果的偏差。

4.2.2 立体声试验

进行多对扬声器的立体声听音试验时,扬声器放置位置的差异会对听音结果带来影响,为了保证扬声器放置位置相同,并满足转换时间的要求,若条件允许,可用一个机械装置来实现位置的转换。

扬声器应对称放置,至少应相距 2 m。在小试听室内,可能需要把扬声器移到距侧墙 0.5 m 以内,最近的听音员离两扬声器连线距离应不小于 2 m(垂直距离),一般情况下,最小听音距离为扬声器间距的 1.0~0.8 倍,两对称扬声器与最近听音位置所组成的角度是 55°~65°。

4.3 听音员的位置

听音员应坐在规定的听音区域内,立体声听音试验应尽量安排在立体声听音区轴线上(如图 1 所示)。在单声道试验中,必须保证有一个听音员处在试听室轴线上,其他听音员可在图 1 所示的区域内随机安排。如有必要可以交换听音位置。

各听音员距侧墙至少 0.4 m,距后墙至少 1 m,听音员之间的间隔至少 0.6 m。

听音员的座椅靠背应不高于肩,以避免产生不必要的影响。

有多个听音员时,应避免互相“通信”。必要时可用透声幕隔离听音员,以减少视觉“通信”。

4.4 节目素材

节目素材的选择对听音试验结果有很大的影响。各节目段的选择相互间应有不同的特点,应按分离的独立变量处理,以度量被听扬声器音质的不同属性。

一般,至少应包括 5 种不同的节目段。其中一种是语言(优选男声语言),另一种应为用最強音演奏的丰满的交响乐曲,其他几种节目段应选取一些由少量乐器组合的演奏,如:

钢琴、小提琴和大提琴;

木管和弦乐器;

铜管乐器;

独唱和乐器伴奏;

打击乐器;

各声部合唱;

民乐;

自然声;

戏曲等。

再一种是重放声级很高的通俗音乐。

各节目段时间应大致相等(在 20~40 s 之间)。音乐段应尽可能地构成完整的音乐语句。每一节目段结束后,应留 5~15 s 无声段作记分用。成对比较法中各重复节目段间的间歇约 1~2 s。

节目带也应有必要的声级校准信号。

4.5 声级调整

4.5.1 节目的听音声级

每一节目段的重放声级的大小,原则上应为一般听音员优选的听音声级。有些实验证明,优选声级通常很接近在典型听音人员位置的实际演出的原语言、音乐的声级。

在试听室内,用高质量的扬声器重放每一节目段,由听音员对每段节目一一进行听音试验,就可以估计出一个平均的优选听音声级。

在一次听音试验中,常常可能包含多于一个的听音声级。原因之一是各个听音人员的优选听音声级间有很大不同。某些听音人员可能更喜欢比平均声级低得多的声级。另一原因是对较大扬声器优选的声级,对于某些小扬声器则可能就过载。若用另外的听音声级,则它们应在原声级以下,按 10 dB 一档选用。为了节省听音试验时间,这时的优选试验不需要用所有的节目段,而仅选择试验中一个或两个具有

最高重放声级的节目段进行优选试验。

4.5.2 扬声器的有关声级

试验中力求做到各对应节目段在各受试扬声器上听起来一样响。为了做到这一点,可在试听室内馈给受试扬声器试验信号,用声级计(A计权、慢档)在听音区中央人耳的高度处测量声级,使各受试扬声器产生的声级在声级计上读数一致。

试验信号符合 GB 6278 中规定的信号。声级计应符合 GB 3785。

有时测量得不到合适的响度平衡,这依赖于节目源的频谱和扬声器的频响。在这种情况下,建议通过主观方法仔细调节平衡。在非常重要的场合,可能需要对每个节目段进行单独的主观响度平衡。

4.6 电要求

要使听音试验正确指出各扬声器间的差异,仔细考虑某些电要求是重要的。试验中用的仪器设备(如录音机、调音台、功率放大器等)的技术指标应不影响受试扬声器的听音效果。

4.6.1 功率放大器

当驱动所有的试验扬声器达到最高声级时,功率放大器应工作在不削波、稳定以及不触发保护电路的情况下,实用的办法是在预备性试验时用示波器或峰值功率表监测放大器的输出。

4.6.2 切换系统

切换系统应不损坏功率放大器的性能,开关接点电阻,特别是功率放大器的输出电路中的接点电阻应当很低,应定期检查性能损伤。声级调整通过接在功率放大器输入端的电位器来完成。转换时不应出现干扰声,转换的寂静时间应短于 0.5 s。

应通过测量来确认设备的互联使其重要性能参数,如频响、本底噪声等不发生明显变化。

4.6.3 连线

从功率放大器输出端到扬声器的连线应尽量短,其总电阻(应从放大器输出端测量,即由所有选择开关接点到短路的扬声器端子间电阻)不应超过 $0.2\ \Omega$ 或受试扬声器额定阻抗的 $\frac{1}{40}$ 两者中较小的值。

4.6.4 频率响应

某些扬声器的设计要求在电信号通路中使用频率补偿,这一要求可以通过把专用器件插入系统或按产品标准的规定采用普通的均衡器调节信号通路频响而得到满足。在没有特殊规定的情况下,幅频响应的调节应在功率放大器之前进行。

在电信号通路中频响不平直的听音试验,均应在试验报告中说明,并标出频响。

5 听音试验方法和评价

5.1 听音员

听音员应有高保真听音经验,最好有听临场音乐的经验,对音乐基础知识有一定的了解。

在 125~8000 Hz 的频率范围内听音员的听阈级应低于 20 dBHL(见 GB 4 854),虽然不需要把听力损失超过上述范围的人排除在外,但对他们的听音评价结果应分别进行分析,检查其数据与正常听力人员的数据一起处理是否合适。

在听音经历类似的听音小组内,由于个人间可靠性通常相当高,所以在听音小组内听音员人数可适当减少,但不能少于 4 人。

在数据统计处理时应检查评定结果的可靠性[见附录 C(参考件)]。可靠性应认为是试验结果的重要因素。如果评判可靠性不满意,则听音试验要用更多的听音员。听音员人数较多时可分组进行。

5.2 试验持续时间

一次听音试验活动应限制在 1 h 左右,其中有一两次休息。总持续时间依赖于以下一些因素:试验方法、试验中所含系统数量,要求的听音员人数以及每个听音员所需要的重复演示。试验持续时间的估算在附录 B(参考件)中给出。对于综合性的听音试验,每个听音员可能需要多于一次试验活动。

听音员每天累计听音时间不应多于 2 h。

5.3 评定尺度

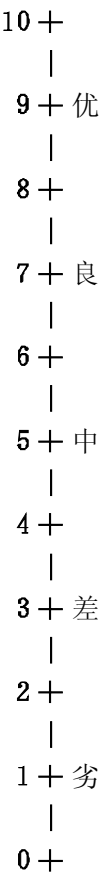
总音质要按保真尺度进行评定,在评定不同录音的重放时,因为有各种各样的音乐和录音方法,所以需要不同的标准。

a. 对用普通声乐器的音乐和自然嗓音歌唱及讲话的节目素材,听音员可 用自己类似的生活经历的记忆为参考,评判重放声与实际原声相符合的程度。这个“真实—自然”的标准适用于许多典型的古典音乐、民乐、戏曲和爵士音乐等的录音。

b. 另一方面,各类音乐的现代录音不要求极精确地(对听音员来说)再 现实际演出,在这些情况以及电子合成音乐的情况下,听音员只能把重放声与想象的预想概念联系起来。

对单个节目段落评分时需要向听音员推荐他应采用什么样的评定标准。

不管在什么情况下,都要求听音员按 0~10 的尺度报告评价结果。0 表示不能想象的最坏的重放,10 表示完全忠实于理想的重放。把 0 和 10 看成是定义尺度端点的“标志”,希望在实际评定中使用 1~9(含一位小数)。另外,附以评语说明,如“优、良、中、差、劣”或其它语言,这将帮助听音员对扬声器的音质进行评分。评定尺度表示如下:



用类似方法建立的其它评定尺度,如:明亮、丰满、清晰、平衡、柔和、力度、真实感、立体感,亦可使用。

5.4 试验方法的选择

5.4.1 单一激励法(S)

单一激励法是指各个激励分开的演示,(在下一激励出现前)由听音员完成,对上个激励的评定。按2.4条推荐的节目段的持续时间和间歇,激励演示的时间样式如图2所示:

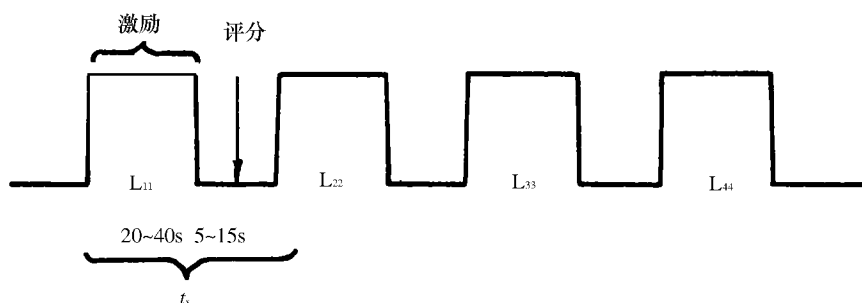


图 2

激励包含已知节目段(P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 等)由已知扬声器(L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 等)重放,例如: L_{11} 表示扬声器 L_1 重放节目 P_1 。

5.4.2 成对比较法(P)

成对比较法是指所有激励依次成对地演示,每对激励的演示是指某一确定的节目段首先是在一只扬声器上重放,而后又立即在另一扬声器上重放。在下一对激励出现前,听音员对上一对扬声器已完成一次评定。成对比较法激励演示的时间样式如图3所示:

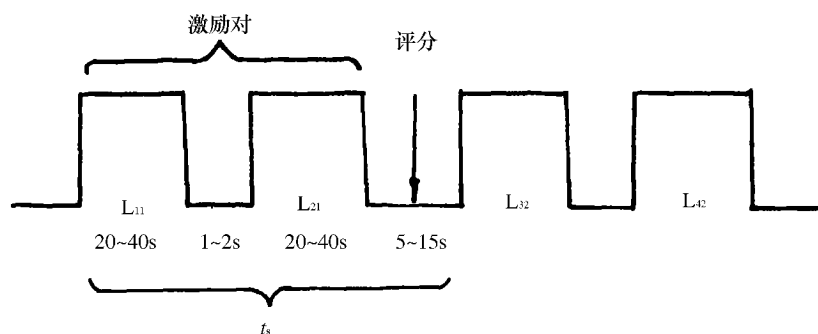


图 3

激励包含已知节目段(P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 等)由成对扬声器(L_1 与 L_2 或 L_3 与 L_4 等)重放。

5.4.3 试验选用S方法还是P方法,应根据扬声器数量,需重复的次数(每一激励重复演示以增加评定的可靠性)以及要求的试验时间来确定。S方法和P方法试验时间的计算与比较,见附录B(参考件)。

当被试听的扬声器的质量大致相同,需要比较细微的差别时,P方法更为优选。两种方法混合使用也是可以的,先用S方法对一大组扬声器进行听音试验,然后用P方法对质量相近的继续进行听音试验。

注:① 不管哪种试验方法,在某些或所有试验中都可以用一个或多个参考扬声器。这样便于在各不同试验中比较

试验结果。

② 推荐修正的 **P** 方法,不用数字的评判,只要求听音员说出一对扬声器中哪一个重放更保真。

最后得到的数据不是各扬声器的直接数字评价,而仅给出每一个扬声器优于另外扬声器的试验次数,这些次数能被用来表示扬声器排列等级,如果需要,这些等级排列数据可以通过采用“比较评判定律”方式或称非计量尺度方式转换成间隔尺度,这种简化的优选法,对于两扬声器之间差别的大小给出的信息往往比 **P** 方法要少。

③ 在暂不具备用 **S** 方法和 **P** 方法的条件时,可采用相对比较法,具体试验方法及其数据处理见 **GB 9375**。

为了减少由于实际操作、疲劳或其他随时间变化的因素对评价的影响,应采用随机的激励演示次序(即节目与扬声器的各种组合)。所进行的每次试验活动均应采用不同的次序。

在 **P** 方法中,随机演示次序的要求是激励对的次序,在每一对中,相应两个扬声器演示的次序应当平衡(即对每一节目段落 L_1-L_2 或 L_2-L_1 的次序应等同的产生)。

5.5 须知与预备性训练

在每次正规的听音试验之前,听音员应掌握试验中的工作情况和评价方法。特别是评定尺度的定义及怎样用它表示。须知内容要逐字采用〔见附录 A(参考件)〕。

须知应同时以口述(最好磁带录音)和书写形式给出。须知演示后,应进行一些预备性训练,以便适应评判情况。预备性试验中所用的激励应是正规试验中节目素材的代表。若整个试验要持续约一个小时,则训练活动至少为 **7~8 min**。对于要连续进行几个的试验活动,再次试验之前的预备训练次数可以相应的减少。在每次试验休息后,建议也可以进行适应性训练。

5.6 评定次数

最低要求是每个听音员对每种激励评定一次。为了估算听音员评价的可靠性,每种激励至少重复两次,最好重复三次或四次。

采用单一激励法时,为了产生满意的可靠性,可以根据听音试验时间的总长度和听音员人数来选择重复次数。

对 l 个扬声器使用 **P** 方法时,每种激励的重复次数自然为 $l-1$ 因为每一扬声器均要与 $l-1$ 个扬声器中的每个扬声器配对进行每一节目段的听音(对每个节目段扬声器成对演示的总数为 $l(l-1)/2$)若扬声器数量足够大,就可能不需要再重复而达到所要求的可靠性。

两种方法的评定次数和试验时间总长度的计算,见附录 B(参考件)。

5.7 数据的统计处理

附录 C(参考件)给出统计分析的说明。这里仅给出主要原则。

听音人员的评定数据以单个和(或)所有听音员一起填入适当的数据表中。对所有节目与扬声器组合进行算术平均,即扬声器对节目计算平均值,而节目又对扬声器计算平均值。直接观察这些数据表以及相应图示可得出扬声器一般的评定结果,以及扬声器与节目有关的评定结果。

若要求更详细的统计分析,则可通过数据的方差分析和有关统计检验来进行。这就可能对扬声器、节目、听音人员及这些因素之间的各种交互作用的评判的依从性进行评价。不管是各单个听音员(个人内可靠性),还是所有听音员一起(个人间可靠性)的数据方差分析都可用于估计试验数据的可靠性。

若听音试验中包含附加变量,如扬声器或听音员的位置,则所说的统计分析也可推而广之包括这些变量〔附录 C(参考件)中 C4 章〕。

5.8 试验报告内容

听音试验结果应作专门报告。报告原则上应包括下列主要内容:

- a. 被听样品的生产单位及型号;
- b. 试听室及其特性(尺寸、混响时间、本底噪声、环境条件等);
- c. 扬声器在试听室的位置;
- d. 电设备及任何频响的调整;

- e.** 节目素材(说明来源、名称、内容、节目片段的时间及总的时间等)和演示节目所用的声级;
- f.** 听音员数量及状况(姓名、性别、年龄、工作单位、职业等)以及他们在试听室内的位置;
- g.** 试验方法的说明;
- h.** 数据处理。

附 录 A
听 音 试 验 须 知
(参考件)

下列内容在做单一激励或成对比较试验时,可作为听音员须知的基础。重要的是对于这些类型的试验,所有听音员都要接受完成相同的准备工作。

A1 单一激励评定

“在这个试验中,你们将听到由若干扬声器重放的语言和音乐节目段。节目均将由随机排列次序的扬声器演示。每听一个节目,你们应根据节目的理想保真度来判断这个重放。对于某些音乐和语言,可用你们生活经验的记忆来评定该重放与原来记忆中的声音相符合的程度如何。对于其它类型的音乐,例如某种流行音乐和电子音乐,你们必须想象供你们听的节目来评定该重放与设想中的声音相符合的程度如何。”

注:为了避免采用上述准则可能引起的混乱,试验人员可以提示听音员们哪些节目应根据原来记忆的声音的保真度来评定,哪些节目应根据“设想”中声音的保真度来评定。

“在所有情况中,均应按如下图所示 0~10 尺度来作保真度评定。在 0~10 之间保留一位小数的任何数,能用来表征重放中保真度的等级。你们仔细地听完一个节目段后就作评定,要力求始终记住不应将你们的音乐偏爱掺杂在评定中去,评定仅涉及到声重放的保真度。”

注:该须知也应给出有关近似的试验持续时间、间歇、预备性训练及有助于听音员其他细节的信息。

10+

|

9+ 优

|

8+

|

7+ 良

|

6+

|

5+ 中

|

4+

|

3+ 差

数字 10 表示一种完全忠实于理想的重放。不可能再作改进。

|
 2+
 |
 1+ 劣
 |
 0+

数字 0 表示一种与理想情况完全不相似的重放。是一种不能想象的最坏重放。

A2 成对比较法

“在这个试验中,你们将听到由若干扬声器重放的语言和音乐节目段。每次由二个不同的扬声器分别把每个节目演示一次。节目的次序和成对扬声器的组合均以随机方式变化。在每次成对演示结束时,你们应根据节目的理想保真度来评定两个扬声器中每一个的重放声。对于某些音乐和语言。你们能用亲身经验的记忆来评定该重放与原来记忆的声音相符的程度如何。对于另一些音乐,例如某 种流行音乐和电子音乐,你们就必须设想供你们听的节目,来评定该重放声与设想中的声音的保真程度如何。”

注:为了避免采用上述准则可能引起的混乱,试验人员可以提示听音员们哪些节目应根据原来记忆的声音的保真度来评定。哪些应根据“设想”中声音的保真度来评定。

“在所有情况中,均应按如下图所示的 0~10 尺度来作保真度评定。

10+
 |
 9+ 优
 |
 8+
 |
 7+ 良
 |
 6+
 |
 5+ 中
 |
 4+
 |
 3+ 差
 |
 2+

数字 10 表示一种完全忠实于理想的重放,不可能 再作改进。

1+ 劣
0+

数字 0 表示一种与理想情况完全不相似的重放,是一种不能想象的最坏重放。

在 0~10 之间保留一位小数的任何数,能用来表征重放声保真度的等级。应按相同的基础来评定每次成对演示中二个扬声器中的每一个。你们仔细地听完二者的演示后就写下你们的两次评定意见。对某些成对扬声器发出的声音不论多么相似,不要以相同的尺度数来评定,而必须用不同的尺度数来评定。最后,要力求记住不应将你们的音乐偏爱掺杂在评定中去,评定仅仅涉及到声重放的保真度”。

注:该须知也应给出关于近似试验持续时间、间歇、预备性训练及有助于听音员其他细节的信息。

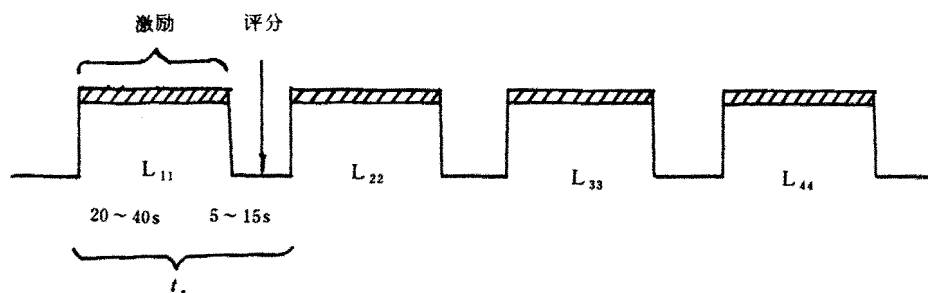
附录 B

试验长度的比较

(参考件)

按照 5.4 条确定的两种试验方法和 4.4 条推荐的节目段的持续时间和间歇,激励演示的时间样式,可用下列例子来阐明:

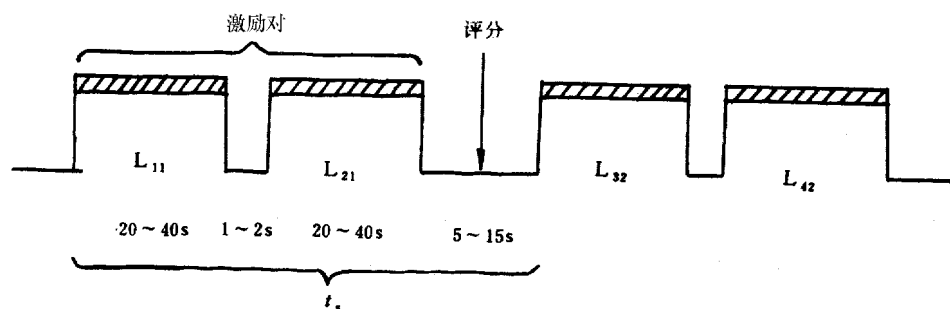
a. 单一激励评定(S)



激励包含由已知扬声器(L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 等)重放已知节目段(P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 等)。

例子: L_{11} 表示扬声器 L_1 重放节目 P_1 。

b. 成对比较法(P)



激励对包含由两个不同扬声器(L_1 与 L_2 或 L_3 与 L_4 等)重放已知节目段(P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 等)。

在下面的演示中,对 S 和 P 方法中的试验持续时间进行了比较,根据这些数据,使用者可针对具体目的选择更有效的方法。

已知值:

l ——扬声器的个数;

p ——节目片段数;

n ——每种激励的重复次数;

t_i ——须知的持续时间;

t_p ——预备性训练的持续时间;

假设 $t_i = 7\text{min}$

$$t_p = (l + p)\text{min}$$

N ——某一节目的演示次数〔见表 B2 注 1)〕;

t_s ——一个节目段的持续时间,包括间歇;

T ——每个听音员听每个节目的具体听音时间(表 B2);

$$T = N \cdot t_s$$

L ——每个听音员试验时间的总长度(表 B3)。

$$L = T \cdot p + t_i + t_p$$

(全部时间值仅仅是举例,是在许可的持续时间范围内选择的,主要供比较用。)

表 B1 演示时间 t_s 的计算

持续时间	S	P
激励 L_{11}	30	30
间歇	—	2
激励 L_{21}	—	30
间歇	15	15
t_s	45	77(每对)

表 B2 具体听音时间 T (每个听音员和每个节目)的计算

l	$l-1$	$n^{2)}$	N 次演示 ¹⁾		$T(N \cdot t_s)$ min	
			S ($l \cdot n$)	P $\frac{1}{2}l(l-1)$	S	P
1	0	4	4	—	3	—
2	1	3	6	3	4.5	3.85
3	2	4	12	6	9	7.7
4	3	3	12	6	9	7.7
5	4	4	20	10	15	12.85
6	5	4	24	15	18	19.25
7						
8						
9						
10	9	4	40	45	30	57.57

注: 1)演示次数 N ,对于 S 和 P 分别用 $l \cdot n$ 个单一激励或 $l(l-1)/2$ 成对激励来获得,只是当 $l < 4$ 时,对于 P 要做必要的增加。

2)该比较当然是依赖于 n 值。当 $2 \leq l \leq 5$ 时,以这样一种方式来选择 n 值。即对于 P 法,能够用最小重复数($l-1$)乘以一个整数(3、2 或 1)来得到所要求的重复数(3 或 4);当 $l > 5$ 时, $(l-1)$ 将比 n 大,这时 P 法的重复数大了,可靠性相应增加,因此 S 与 P 法之间的比较不再是相同条件了。

表 B3 $p=5$ 节目段时总试验长度 L 的计算

min

l	t_p ($l+p$)	L ($pT+t_1+t_p$)	
		S	P
1	6	28	—
2	7	37	34
3	8	60	54
4	9	61	55
5	10	92	82
6	11	108	115
7			
8			
9			
10	15	172	311

从表 B3 可知,当试验中被评扬声器数 $l \leq 5$ 时,用假设的持续时间、重复数和节目数, P 法的总时间长度较短;当被评扬声器数 $l \geq 6$ 时,则 S 法的总时间长度较短。

附 录 C

听音试验数据的统计处理

(参考件)

C 1 引言

本附录介绍本标准所述听音试验数据统计处理的一般方法。关于应用中的细节及更完整的原理,建议参阅有关统计学和实验设计法的文献。

本标准介绍的听音试验是在一定条件下,由实验人员控制某些因素(如:试听室条件、放音用设备等)不变,而改变另外一些因素(如:被评扬声器、节目等等),由听音员对每只扬声器重放每段节目(激励)进行评定。所有这些激励的演示次序应是随机的,原则上应随不同的听音员而异。为提高(并能估计)评定的可靠性,建议每位听音员对每一激励至少作两次独立的评定,而且,每位听音员所作的评定应与参加试验的其他听音员无关。

听音试验数据的统计处理可分为两个步骤:

a. 描述统计

为了便于观察试验结果,将试验数据列成适当的数据表,并计算某些公共统计量(如:算术平均值),也可以用作图的形式表示。观察这些图表便可得出有关被评扬声器的某些结论,如:各扬声器音质的优劣,每位听音员评定的重现性,各听音员以及不同节目对试验结果的影响等等。若想要从试验数据中得到更详细的信息和更确切的结论,可继续进行下一步骤的统计分析。

b. 推断统计

在这一步骤中,利用方差分析法和有关方法对试验数据作进一步分析,以检验不同扬声器和(或)不同节目评定值之间的差异在统计上是否显著,以及扬声器与节目之间是否存在交互作用。

为说明上述步骤,下面用四个扬声器和五段节目的听音试验的真实数据举例。

C2 描述统计

C2.1 个人数据表举例

在本听音试验中,对 4 个扬声器(L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4)及 5 段节目(P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5)的所有可能的 20 个组合,由某听音员(S_1)对每一组合评定三次得到表 C1 所列听音试验数据,这在实验设计上叫带重复二因子试验数据。例如:扬声器 L_1 和节目 P_1 的组合,即表 C1 左上方的方格中的“7、6、7”乃是三次评定的数据,其下面的“20”是这三个数据之和。表右边“节目的和”一栏表示节目评定数据之和,“节目的平均”一栏表示节目的平均;表 C1 下边“扬声器的和”栏表示扬声器评定数据之和,“扬声器的平均”栏表示扬声器的平均。必须指出的是,为了减少评定误差,对 20 个组合,每一组合评定三次,总共 60 次评定的次序必须按随机化程序进行,尤其不要让听音员知道他将评定的是哪段节目在哪个扬声器上的演示。

表 C1 带重复二因子试验数据

		扬 声 器				节 目	
		L_1	L_2	L_3	L_4	和	平均 值
节 目	P_1	7、6、7 20	5、5、5 15	6、7、5 18	3、3、4 10	63	5.3
	P_2	6、6、7 19	3、3、4 10	5、5、7 17	3、3、4 10	56	4.7
	P_3	7、8、8 23	2、2、2 6	7、7、7 21	3、3、3 9	59	4.9
	P_4	7、8、8 23	3、3、3 9	8、7、8 23	3、3、3 9	64	5.3
	P_5	6、7、6 19	5、5、4 14	6、6、6 18	5、5、5 15	66	5.5
扬 声 器	和	104	54	97	53	3 08	—
	平均值	6.0	3.6	6.5	3.5	—	—

直接观察表 C1,可得到有关试验的许多信息。由各方格内三次评定数据的重现性可看出该听音员在试验中显示出较高的稳定性(即个人内数据的可靠性较高)。由“扬声器的平均”栏可以看出扬声器 L_1 和 L_3 比 L_2 和 L_4 好。由“节目的平均”栏可看出节目 P_2 和 P_3 较难“保真的”重放。另外观察各个节目内扬声器评定值之和可看出扬声器之间的差异是随着节目而变化的。

C2.2 小组数据表举例

听音试验采用一组 4 个听音员 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 进行评定,所得数据列成表 C2,称为带重复的三因子试验数据。

观察表 C2 可得到与表 C1 相类似的信息:扬声器 L_1 和 L_3 优于 L_2 和 L_4 ,在扬声器和节目之间可能存在交互作用等等。

表 C2 带重复三因子试验数据

节目	听音员	扬声器				节目		
		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	小 计	和	平均
P ₁	S ₁	7、6、7 20	5、5、5 15	6、7、5 18	3、3、4 1 0	63	256	5.3
	S ₂	5、7、4 16	4、4、3 11	5、5、5 15	3、3、3 9	51		
	S ₃	6、7、7 20	4、5、4 13	5、7、7 19	5、5、5 15	67		
	S ₄	8、7、7 22	7、6、5 18	6、6、7 19	7、4、5 16	75		
	小计	78	57	71	50			
P ₂	S ₁	6、6、7 19	3、3、4 10	5、5、7 17	3、3、4 1 0	56	239	5.0
	S ₂	8、7、8 23	3、2、3 8	4、4、7 15	4、3、2 9	55		
	S ₃	6、8、8 22	4、3、3 10	6、7、8 21	3、3、3 9	62		
	S ₄	7、8、7 22	4、4、5 13	8、7、4 19	4、4、4 12	66		
	小计	86	41	72	40			
P ₃	S ₁	7、8、8 23	2、2、2 6	7、7、7 21	3、3、3 9	59	226	4.7
	S ₂	5、4、5 14	3、2、2 7	5、3、3 11	1、1、2 4	36		
	S ₃	7、7、9 23	4、4、3 11	7、7、9 23	3、4、4 11	68		
	S ₄	9、6、6 21	5、4、6 15	8、4、6 18	3、3、3 9	63		
	小计	81	39	73	33			
P ₄	S ₁	7、8、8 23	3、3、3 9	8、7、8 23	3、3、3 9	64	253	5.3
	S ₂	6、8、7 21	4、3、3 10	5、4、5 14	3、1、2 6	51		
	S ₃	6、7、8 21	3、4、3 10	6、6、7 19	1、4、2 7	57		
	S ₄	8、8、7 23	4、6、5 15	8、9、8 25	7、7、4 18	81		
	小计	88	44	81	40			
P ₅	S ₁	6、7、6 19	5、5、4 14	6、6、6 18	5、5、5 15	66	243	5.1
	S ₂	6、5、7 18	4、3、4 11	5、6、3 14	4、3、2 9	52		
	S ₃	6、5、6 17	3、3、3 9	4、5、5 14	5、4、4 13	53		
	S ₄	9、7、7 23	4、4、5 13	7、7、5 19	6、6、5 17	72		
	小计	77	47	65	54			
扬声器	和	410	228	362	217	1217		—
	平均	6.8	3.8	6.0	3.6	—		—

C3 推断统计

C3.1 方差分析法

关于此方法的基本原理和基本假定在许多统计学和实验设计法的文献中都有叙述。其中关于“独立误差”的假定是很重要的,为了满足这个假定,各种扬声器与节目组合的演示次序应是随机化的,对不同听音员应有不同的随机化程序,每位听音员对每个激励的评定应与其他各听音员的评定无关。方差分析将试验数据的总波动分解成听音试验中不同波动源造成的不同分量之和。波动源是指:扬声器、节目、听音员以及这些因子之间的各种交互作用。有关的统计检验按一定的概率(显著性水平)检验在不同的

扬声器之间和(或)不同的节目之间和(或)不同的听音员之间的评定值的差异是否是显著的,同样也可检验是否存在显著的交互作用。

C3.1.1 表 C1 数据的方差分析

关于表 C1 中数据的方差分析可以用二因子试验的方差分析进行。

设被评扬声器数为 l (此处为 4), 节目数为 p ($=5$), 听音员数为 s ($=1$), 重复数为 n ($=3$)。

首先, 由表 C1 得到:

总和 T = 所有数据之和

$$= (7+6+7) + (5+5+5) + \cdots + (5+5+5) = 308$$

修正项 $CT = T^2 / pln$

$$= 308^2 / (5 \times 4 \times 3)$$

$$= 1581.07$$

($df=1$)

总平方和 SS_T = 所有数据平方之和 - CT

$$= (7^2 + 6^2 + 7^2) + (5^2 + 5^2 + 5^2) + \cdots + (5^2 + 5^2 + 5^2) - 1581.07$$

$$= 200.93$$

$$(df_T = lpn - 1 = 4 \times 5 \times 3 - 1 = 59)$$

扬声器平方和 $SS_L = [(L_1 \text{ 之和})^2 + \cdots + (L_l \text{ 之和})^2] / pn - CT$

$$= (104^2 + 54^2 + 97^2 + 53^2) / (5 \times 3) - 1581.07$$

$$= 148.93$$

($df_L = l - 1 = 4 - 1 = 3$)

节目的平方和 $SS_P = [(P_1 \text{ 之和})^2 + \cdots + (P_p \text{ 之和})^2] / ln - CT$

$$= (63^2 + 56^2 + 59^2 + 64^2 + 66^2) / (4 \times 3) - 1581.07$$

$$= 5.43$$

$$(df_P = p - 1 = 5 - 1 = 4)$$

扬声器与节目的交互作用

$SS_{L \times P} = [(P_1 \times L_1 \text{ 之和})^2 + \cdots + (P_p \times L_l \text{ 之和})^2] / n - CT - SS_L - SS_P$

$$= (20^2 + 15^2 + \cdots + 15^2) / 3 - 1581.07 - 148.93 - 5.43$$

$$= 35.24$$

$$df_{L \times P} = (l - 1)(p - 1) = (4 - 1) \times (5 - 1) = 12$$

误差平方和

$SS_E = SS_T - SS_L - SS_P - SS_{L \times P}$

$$= 200.93 - 148.93 - 5.43 - 35.24$$

$$= 11.33$$

$$df_E = lp(n - 1) = 4 \times 5 \times (3 - 1) = 40$$

其次, 把上述计算结果列成方差分析表, 得到表 C3。表中, “均方”栏由自由度除对应的平方和得到。例如 $MS_L = SS_L / df_L = 148.93 / 3 = 49.64$ 。“均方的期望值”栏表示均方所包含的内容, 例如扬声器的均方 MS_L 是扬声器之间的差异引起的方差 σ_L^2 加上误差方差 σ_E^2 的估计。均方 MS_E 表示方格内重复评定的波动, 是误差方差 σ_E^2 的估计。在表 C3 中, MS_E 即 $\sigma_E^2 = 0.28$ 很低, 反映出听音员的三次评定是很稳定的。

表 C3 表 C1 数据的方差分析表

波动源	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	均方的期望值 E(MS)	F_0
扬声器(L)	148.93	3	49.64	$\sigma_E^2 + p n \sigma_L^2$	177.29**
节目(P)	5.43	4	1.36	$\sigma_E^2 + l n \sigma_P^2$	4.36**
交互作用 L×P	35.24	12	2.94	$\sigma_E^2 + n \sigma_{L \times P}^2$	10.50**
误差(E)	11.33	40	0.28	σ_E^2	—
总和 T	200.93	59	—	—	—

从表 C3“均方的期望值”栏看出,要知道某因子(变量)各水平之间的波动即差异是否 是显著性的,必须把该均方与误差均方进行比较。这种比较叫做 **F** 检验。若 $F_0 = MS/MS_E \geq F(df_1, df_2; \alpha)$ (此值叫做临界值,可从 **F** 分布的百分位点表查出,其中 df_1 和 df_2 分别是分子均方 **MS** 和分母均方 **MS_E** 的自由度, α 是显著性水平),则在显著性水平 α 下认为差异是显著的。显著性水平 α 的含义是,当判断差异为显著时,风险率小于 $100\alpha\%$ 。 α 通常取为 $\alpha=0.05$ 或 0.01 ,这里取 $\alpha=0.01$ 。例如,对扬声器来说, $F_0 = 49.64/0.28 = 177.29 > F(3, 40; 0.01) = 4.31$ 。这说明 4 个扬声器(评定值)之间是有显著性差异的。当 F_0 值大于或等于 $F(df_1, df_2; 0.01)$ 时,在 F_0 值右上角打上 ** 以示显著性。

这样,从表 C3 知道,节目间以及扬声器与节目的交互作用也是显著的。交互作用的显著性 意味着 20 个组合的平均评定间有显著性差异,换句话说,扬声器随节目而变化。

扬声器的显著 **F** 比值说明在所有可能的 $4(4-1)/2$ 对扬声器中至少有一对,其差异是显著的。要判断究竟哪些对有显著性差异,需进行具体的比较检验(见 C3.2 条)。

C3.1.2 表 C2 数据的方差分析

关于表 C2 中数据的分析,可以用有关三因子(扬声器、节目、听音员)试验的方差分析法。这里扬声器数 $l=4$,节目数 $p=5$,听音员数 $s=4$,评定次数 $n=3$ 。

从表 C2 数据得到:

总和 **T** = 所有数据之和

$$= (7+6+7) + (5+5+5) + \dots + (6+6+5) \\ = 1217$$

修正项 **CT** = $T^2/lpsn$

$$= 1217^2 / (4 \times 5 \times 4 \times 3) \\ = 6171.20$$

($df=1$)

总平方和 **SS_T** = 所有数据平方和 - **CT**

$$= (7^2 + 6^2 + 7^2) + \dots + (6^2 + 6^2 + 5^2) - 6171.20 \\ = 857.80$$

($df_T = lpsn - 1 = 4 \times 5 \times 4 \times 3 - 1 = 239$)

扬声器平方和 **SS_L** = $[(L_1 \text{ 之和})^2 + (L_2 \text{ 之和})^2 + \dots + (L_l \text{ 之和})^2] / psn - CT$

$$= (410^2 + 228^2 + 362^2 + 217^2) / (5 \times 4 \times 3) - 6171.20 = 465.75$$

($df_L = l - 1 = 4 - 1 = 3$)

节目平方和 **SS_P** = $[(P_1 \text{ 之和})^2 + (P_2 \text{ 之和})^2 + \dots + (P_p \text{ 之和})^2] / lsn - CT$

$$= (256^2 + 239^2 + 226^2 + 253^2 + 243^2) / (4 \times 4 \times 3) - 6171.20 \\ = 11.94$$

$$(df_p = p - 1 = 5 - 1 = 4)$$

$$\begin{aligned} \text{听音员平方和 } SS_s &= [(S_1 \text{ 之和})^2 + \dots + (S_s \text{ 之和})^2] / lpn - CT \\ &= [(63+56+59+64+66)^2 + (51+55+36+51+52)^2 + (67+62+68+57+53)^2 + (75+66+63+81+72)^2] / (4 \times 5 \times 3) - 6171.20 \\ &= 105.25 \end{aligned}$$

$$(df_s = s - 1 = 4 - 1 = 3)$$

扬声器与节目交互作用平方和

$$\begin{aligned} SS_{L \times P} &= [(L_1 \times P_1 \text{ 之和})^2 + (L_1 \times P_2 \text{ 之和})^2 + \dots + (L_l \times P_p \text{ 之和})^2] / sn - CT - SS_L - SS_P \\ &= (78^2 + 86^2 + \dots + 54^2) / (4 \times 3) - 6171.20 - 465.75 - 11.94 \\ &= 47.36 \end{aligned}$$

$$(df_{L \times P} = (l - 1)(p - 1) = (4 - 1)(5 - 1) = 12)$$

扬声器与听音员交互作用平方和

$$\begin{aligned} SS_{L \times S} &= [(L_1 \times S_1 \text{ 之和})^2 + (L_1 \times S_2 \text{ 之和})^2 + \dots + (L_l \times S_s \text{ 之和})^2] / pn - CT - SS_L - SS_s \\ &= [(20+19+23+23+19)^2 + (16+23+14+21+18)^2 + \dots + (16+12+9+18+17)^2] / (5 \times 3) - 6171.20 - 465.75 - 105.25 \\ &= 17.33 \end{aligned}$$

$$(df_{L \times S} = (l - 1)(s - 1) = (4 - 1) \times (4 - 1) = 9)$$

节目与听音员交互作用平方和

$$\begin{aligned} SS_{P \times S} &= [(P_1 \times S_1 \text{ 之和})^2 + (P_1 \times S_2 \text{ 之和})^2 + \dots + (P_p \times S_s \text{ 之和})^2] / ln - CT - SS_P - SS_s \\ &= (63^2 + 51^2 + \dots + 72^2) / (4 \times 3) - 6171.20 - 11.94 - 105.25 \\ &= 42.86 \end{aligned}$$

$$(df_{P \times S} = (p - 1)(s - 1) = (5 - 1) \times (4 - 1) = 12)$$

扬声器与节目与听音员交互作用平方和

$$\begin{aligned} SS_{L \times P \times S} &= [(L_1 \times P_1 \times S_1 \text{ 之和})^2 + (L_1 \times P_1 \times S_2 \text{ 之和})^2 + \dots + (L_l \times P_p \times S_s \text{ 之和})^2] / n - CT - SS_L - SS_P - SS_s - SS_{L \times P} - SS_{L \times S} - SS_{P \times S} \\ &= (20^2 + 16^2 + \dots + 17^2) / 3 - 6171.20 - 465.75 - 11.94 - 105.25 - 47.36 - 17.33 - 42.86 \\ &= 45.98 \end{aligned}$$

$$(df_{L \times P \times S} = (l - 1)(p - 1)(s - 1) = (4 - 1) \times (5 - 1) \times (4 - 1) = 36)$$

$$\begin{aligned} \text{误差平方和 } SS_E &= SS_T - SS_L - SS_P - SS_s - SS_{L \times P} - SS_{L \times S} - SS_{P \times S} - SS_{L \times P \times S} \\ &= 857.80 - 465.75 - 11.94 - 105.25 - 47.36 - 17.33 - 42.86 - 45.98 = 121.33 \end{aligned}$$

$$(df_E = lps(n - 1) = 4 \times 5 \times 4 \times (3 - 1) = 160)$$

在作 F 检验之前,要分两种情形来考虑:

a. 在本试验中采用 4 个听音员进行评定。如果只使用 4 个听音员,而且试验结果只对于这 4 个听音员有效,那么听音员这个因子(变量)与扬声器和节目一样,在此试验中属于固定模型。因此,如表 C3 那样, F 比都采取各因子(及它们的交互作用)的均方 MS 作分子,误差均方 MS_E 作分母的形式。

b. 如果这 4 个听音员是从一个有多于 4 个听音员的总体随机地抽出来的,而且试验结果可以推广到整个总体,那么听音员这个因子属于随机模型。由于扬声器等因子是固定模型,因此整个试验属于混合模型。混合模型的方差分析表取表 C4 的形式。混合模型试验的 F 比的分母要由“均方的期望值”确定,例如,要检验各扬声器之间是否有显著性差异,必须找出其期望值比扬声器均方 MS_L 的期望值只少一项 $ps\sigma_L^2$ 的均方。从表 C4 知道,欲求的均方是 $MS_{L \times S}$ 。于是 $F_0 = MS_L / MS_{L \times S} = 155.25 / 1.93 = 80.44 > F(3, 9; 0.01) = 6.99$ 。其余由此类推。

表 C4 表 C2 数据的方差分析表(混合模型)

波动源	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	均方的期望值 E (MS)	F_0
扬声器(L)	465.75	3	155.25	$\sigma_E^2 + p n \sigma_L^2 + p m \sigma_L^2$	80.44**
节目(P)	11.94	4	2.99	$\sigma_E^2 + l n \sigma_P^2 + l m \sigma_P^2$	0.84
听音员(S)	105.25	3	35.08	$\sigma_E^2 + l p n \sigma_S^2$	46.16**
L×P	47.36	12	3.95	$\sigma_E^2 + n \sigma_L^2 \times p \times s + m \sigma_L^2 \times p$	3.09**
L×S	17.33	9	1.93	$\sigma_E^2 + p n \sigma_L^2 \times s$	2.54**
P×S	42.86	12	3.57	$\sigma_E^2 + l n \sigma_P^2 \times s$	4.70**
L×P×S	45.98	36	1.28	$\sigma_E^2 + n \sigma_L^2 \times p \times s$	1.68
误差(E)	121.33	160	0.76	σ_E^2	—
总和T	857.80	239	—	—	—

(上述有关方差分析的计算一般借助于计算器进行便可以了。当听音试验数据量较大时,使用计算机进行计算也是很方便的。这里要指出的是,在各种计算中若使用的精度不同,可能会使结果稍有不同。本附录中的计算均取小数二位。)

表 C4 中的结果可以简便地解释如下:

扬声器:对不同扬声器的平均评定之间至少存在一个显著差异。具体的比较检验可以用来阐明哪些差异是显著的(见 C3.2 条)。

节目:在不同节目的平均评定之间不存在显著的差异。

听音员:在不同听音员的平均评定之间至少有一个显著的差异。

交互作用:扬声器与节目的交互作用是显著的,即不同扬声器的评定值随节目的不同而不同,这有待于更详细地研究(可借助进一步的检验见 C3.2 条)。

扬声器与听音员,以及节目与听音员的交互作用也都显著,这说明不同扬声器之间,以及不同节目之间的差异是随听音员的不同而不同。

扬声器×节目×听音员三者的交互作用是非显著的。

C3.1.3 每位听音员仅对每种情况作一次评定时 的方差分析

为提高平均评定值的可靠性,以及便于估计可靠性(见 C5 章),已在引言中推荐每位听音员对每一个扬声器与节目组合至少作两次独立评定。

然而,有时可能达不到每个听音员对每一组合作一次以上的评定。如被评扬声器和(或)节目太多,或胜任的听音员没有时间对每一组合听音一次以上,或有时得到较多的听音员,使他们对每个扬声器与节目组合作一次评定,比由数量较少的听音员对每一组合作多次评定要容易些,或者,可能从以往某些听音试验中获悉,这些听音员一般具有令人满意的个人内的可靠性,即使只让他们对每一情况作一次评定,仍然对他们的评定能力表示信任。因此有可能对每种激励只作一次评定。这样,在类似表 C1 所示的个人数据表中,每一方格内只有一个值,在类似表 C2 的小组数据表中,每个方格(方格=扬声器×节目×听音员组合)也将只有一个值。方差分析和有关检验仍然可以进行。

a. 当在个人数据表中每个方格(即扬声器与节目的组合)只有一个评定值,亦就是 $n=1$ 的情形,叫做二因子试验数据表。按二因子试验设计的结构,通常把二因子交互作用当作误差项看待。因此在二因子试验数据的方差分析表中只出现扬声器平方和 SS_L 、节目平方和 SS_P 和误差平方和 SS_E 以及相应的均方。 SS_E 的计算类似 C3.1.1 条得到,即 $SS_E = SS_T - SS_L - SS_P$,其自由度是 $df_E = df_T - df_L - df_P = (lp - 1) - (l - 1) - (p - 1) = (l - 1)(p - 1)$ 。可见检验扬声器和节目的 F 比的分母都是 MS_E 。

b. 同样地,当在小组数据中每个方格(即扬声器、节目与听音员的组合)只有一个评定值时,亦就

是 $n=1$ 的情形,叫做三因子试验数据表。同理根据数据的结构,把三因子交互作用当作误差项看待。于是在三因子试验数据的方差分析表中不出现交互作用平方和 $SS_{L \times P \times S}$,而用误差平方和 SS_E 代替之。由 C3.1.2 条推出, $SS_E = SS_T - SS_L - SS_P - SS_S - SS_{L \times P} - SS_{L \times S} - SS_{P \times S}$; $df_E = df_T - df_L - df_P - df_S - df_{L \times P} - df_{L \times S} - df_{P \times S} = (lp s - 1) - (l - 1) - (p - 1) - (s - 1) - (l - 1)(p - 1) - (l - 1)(s - 1) - (p - 1)(s - 1) = (l - 1)(p - 1)(s - 1)$ 。

若三因子都是固定模型,则按上述 a 项进行检验。或此试验是混合模型,那么在从表 C4 各项 E (MS)中删掉 n 和 $\sigma_{L \times P \times S}^2$ 后,按表 C4 的原则进行检验即可。

C3.2 具体的比较检验

要想知道被评扬声器间是否有任何差异,可用方差分析和 F 检验首先对数据进行分析,若扬声器的 F 检验是非显著的,则可认为扬声器间音质无明显差异。若 F 检验是显著的,则在扬声器之间至少存在一个显著差异。要想知道哪些差异是显著的,可采用具体的比较检验。(同样对节目或听音员的显著 F 比值也可用类似的方法进行研究。)此处仅讨论一次只包含两个扬声器的比较(在四个扬声器的试验中,有六种可能的比较: $L_1-L_2, L_1-L_3, L_1-L_4, L_2-L_3, L_2-L_4$ 和 L_3-L_4)。

有若干种不同的检验可用于具体的比较。这里推荐一种称为 Tukey 的 HSD (Honestly Significant Difference) 法,也称 q 检验法。在被评扬声器中只要任意二个扬声器的平均值之间的差的绝对值超过 HSD 计算值,便认为其差异是显著的。HSD 的定义如下:

$$HSD = q(k, df; \alpha) \sqrt{V/R}$$

式中 $q(k, df; \alpha)$ 可由 t 化极差分布表查到,其中 k 是被评项目数, df 是误差方差自由度, α 是显著性水平, V 是检验该项目所用的误差方差的估计,以及 R 是该项目的重复评定次数。

对表 C1 个人数据表的情形,由表 C3 知,扬声器数目 $k=4$,误差方差自由度 $df=40$,误差方差估计 $V=MS_E=0.28$,扬声器重复评定次数 $R=np=3 \times 5$,且从表 C6 查得 $q(4, 40; 0.01)=4.70$,于是有

$$\begin{aligned} HSD &= q(4, 40; 0.01) \sqrt{MS_E / np} \\ &= 4.70 \times \sqrt{0.28 / (3 \times 5)} = 0.66 \end{aligned}$$

查看表 C1 底栏的平均值可知 L_1 与 L_2, L_1 与 L_4, L_2 与 L_3 及 L_3 与 L_4 之间的(绝对)差异全都超过 HSD 计算值 0.66,因此是显著的,而 L_1 与 L_3 及 L_2 与 L_4 之间的差异是不显著的。

对表 C2 小组数据表和混合模型情况(即表 C4 情形),由于 $k=4, df=9, V=MS_{L \times S}=1.93, R=np s=3 \times 5 \times 4$ 以及 $q(4, 9; 0.01)=5.95$,我们有

$$\begin{aligned} HSD &= q(k, df, \alpha) \sqrt{MS_{L \times S} / np s} \\ &= q(4, 9; 0.01) \sqrt{1.93 / (3 \times 5 \times 4)} \\ &= 5.95 \times \sqrt{1.93 / 60} \\ &= 1.07 \end{aligned}$$

查看表 C2 底栏的平均值可知, $L_1-L_2, L_1-L_4, L_2-L_3$ 和 L_3-L_4 的差异是显著的,而 L_1-L_3 及 L_2-L_4 的差异是不显著的。

若表 C2 小组数据为固定模型,则用 MS_E 代替 $MS_{L \times S}$ 。这时 MS_E 的自由度为 160,于是

$$\begin{aligned} HSD &= q(k, df, \alpha) \sqrt{MS_E / np s} \\ &= q(4, 160; 0.01) \sqrt{0.76 / (3 \times 5 \times 4)} \\ &= 4.48 \times \sqrt{0.76 / 60} \\ &= 0.50 \end{aligned}$$

查看表 C2 底栏可知,除了以上对混合模型列出的显著差异外, L_1-L_3 的差异也是显著的,这是以其结论只限于试验的四个听音员(固定模型)为条件的。

对 C3.1.3 条的情形,即对每种激励只作一次评定,这时 $n=1$,按上述公式同样可计算得相应的 HSD 值。

C4 包括附加变量的听音试验

除扬声器和节目外,研究人员有时可能需要听音试验中包含更多的独立变量。例如,用不同声级演示某些节目或每个节目,以及改变扬声器和(或)听音员的位置等等。附加的变量越多分析便越复杂,这时的数据表应是表 C1 和 C2 的扩展,即是包含了附加变量的数据表。而方差分析和有关的统计检验也是先前所述方法的直接推广。

若在某试验中包含了附加变量,则听音条件的总数有时会变得很大,要让全体听音员在各种条件下进行评定,不是太麻烦,便是不切实际。在这种情况下,一种供选择的设计是让一些听音员在某些听音条件下参与试验,另一些听音员在另一些条件下参与试验。根据情况可以考虑多种不同的组合,把听音员分成更多个小组在不同条件下参与试验等等。

C5 可靠性

这里提出的方法是利用方差分析所得信息来估计听音员个人内的可靠性及个人间的可靠性。如所选听音员在以往的听音试验中表现出令人满意的可靠性,对他们的评定表示信任,则可不进行本节的估计。

C5.1 个人内的可靠性

简单的方法是直接观察个人数据表中每个方格内几次重复评定值之间的波动,波动越小则可靠性越高。关于扬声器显著的 F 检验也可看成是评定中可靠性较好的标志。另外一个个人数据方差分析表中的 MS_E 值,它反映了对应听音员的“误差方差”,此值越低,个人内可靠性越高。另外可计算不同波动源(扬声器、节目、扬声器与节目的交互作用以及误差)所占方差的比例,看大部分的方差是由哪种波动引起的,“误差”引起的方差占多少比例(其值越小越好)。还有一个是对每个扬声器与节目组合的平均评定值进行可靠性估计,对个人数据和相应的方差分析,这种可靠性指数(γ_w , w 表示内部)按下式计算:

$$\gamma_w = 1 - \frac{MS_E}{(SS_L + SS_P + SS_{L \times P}) / (df_L + df_P + df_{L \times P})}$$

代入表 C3 的数据便得:该听音员的 $\gamma_w=0.97$,即有很高的可靠性(上限为 1.00)。根据若干次听音试验的数据,建议将 0.50 作为 γ_w 的近似下限。但 γ_w 并非判断可靠性是否合格的唯一根据。推荐综合考虑上述各种方法。若某一听音员的可靠性不能令人满意,可给予更多的实践和(或)让其对每种情况作更多次评定,若仍不能令人满意,可将其数据作废。

C5.2 个人间可靠性

直接观察并比较小组数据表中各个听音员的数据便可粗略估计个人间的可靠性。较正式的方法可由 C5.1 条有关方法的延伸来估算¹⁾。

注: 1) 详见 Alf Gabrielsson Statistical Treatment of Data from Listening Tests on Sound-reproducing Systems, (1979), Reports from Technical Audiology, Karolinska Institute Stockholm, No. 92。

C6 F 分布和 t 化极差 q 分布的百分位点表($\alpha=0.01$)

关于本文中使用的 F 和 q 检验的分布表在许多统计学和实验设计的文献中均可找到,这里仅给出显著性水平为 0.01 的 F 和 q 分布表,见表 C5 和表 C6。

C7 结果表示及说明

若数据处理仅作 C2 章所述的描述统计,则推荐列成类似于表 C2 所示的那种完整的小组数据表,这便于研究人员了解(数据)围绕平均值的离散程度,以得到数据可靠性的印象,需要时,研究人员也可

对数据进行进一步计算和分析。当然,研究人员通过自己的数据分析所得到的结论,应清楚地加以说明。另外对数据表中相应的结果也可用作图的方式表示,如下图所示:

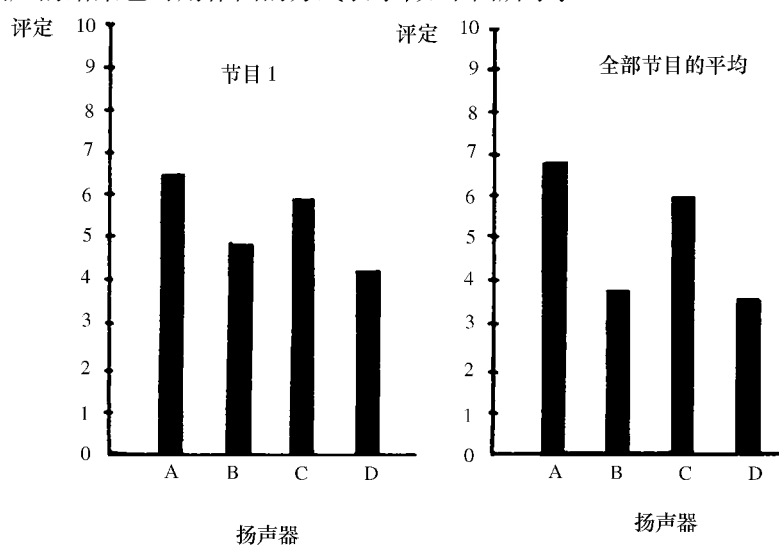


图 C1 扬声器(表 2 数据的)小组平均值的作图表示的例子

若数据处理包括方差分析和有关的统计方法,则表示法还应包括类似于表 C4 的方差分析表。应清楚地说明使用的是固定模型还是混合模型。方差分析和 F 检验的结论应加以说明。对显著的交互作用应加以解释,对具体比较检验的方法和结论应加以描述。

对试验数据的处理做到怎样的程度,显然取决于听音试验的目的。简单地观察数据表,若结果已很明显,已能满足试验目的,则可以不作更进一步的数据处理。但在另一些情况下和为了其他目的,适当的应用方差分析以及有关的统计方法可以说明一些较复杂的情况,并且可以为将来的工作提供重要的信息。有关统计处理在听音试验开始前应事先计划好,因为它影响着试验的实际实现。

表 C5 F 分布的百分位点 $F(df_1, df_2; \alpha)$ 的表 ($\alpha=0.01$)

$df_2 \backslash df_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
1	405.0	500.0	540.0	562.0	576.0	586.0	593.0	598.0	602.0	606.0	611.0	614.0	617.0	619.0	621.0
2	98.5	99.0	99.2	99.2	99.3	99.3	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.9	99.4	99.4	99.4
3	34.1	30.8	29.5	28.7	28.2	27.9	27.7	27.5	27.3	27.2	27.1	26.9	26.8	26.8	26.7
4	21.2	18.0	16.7	16.0	15.5	15.2	15.0	14.8	14.7	14.5	14.4	14.2	14.2	14.1	14.0
5	16.3	13.3	12.1	11.4	11.0	10.7	10.5	10.3	10.2	10.1	9.89	9.77	9.68	9.61	9.55
6	13.7	10.9	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.72	7.60	7.52	7.54	7.40
7	12.2	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.47	6.36	6.27	6.21	6.16
8	11.3	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.67	5.56	5.48	5.41	5.36
9	10.6	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	5.11	5.00	4.92	4.86	4.81
10	10.0	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.71	4.60	4.52	4.46	4.41
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.40	4.29	4.21	4.15	4.10
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.16	4.05	3.97	3.91	3.86
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	3.96	3.86	3.78	3.71	3.66
14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.70	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.80	3.70	3.62	3.56	3.51
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.67	3.56	3.49	3.42	3.37
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.55	3.45	3.37	3.31	3.26
17	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.46	3.35	3.27	3.21	3.16
18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51	3.37	3.27	3.19	3.13	3.08
19	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.30	3.19	3.12	3.05	3.00
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.23	3.13	3.05	2.99	2.94
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31	3.17	3.07	2.99	2.93	2.88
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.12	3.02	2.94	2.88	2.83
23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3.21	3.07	2.97	2.89	2.83	2.78
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17	3.03	2.93	2.85	2.79	2.74
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.86	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.99	2.89	2.81	2.75	2.70
26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09	2.96	2.86	2.78	2.72	2.66
27	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.93	2.82	2.75	2.68	2.63
28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03	2.90	2.79	2.72	2.65	2.60
29	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09	3.00	2.87	2.77	2.69	2.62	2.57
30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07	2.98	2.84	2.74	2.66	2.60	2.55
32	7.50	5.34	4.46	3.97	3.65	3.43	3.26	3.13	3.02	2.93	2.80	2.70	2.62	2.55	2.50
34	7.44	5.29	4.42	3.93	3.61	3.39	3.22	3.09	2.98	2.89	2.76	2.66	2.58	2.51	2.46
36	7.40	5.25	4.38	3.89	3.57	3.35	3.18	3.05	2.95	2.86	2.72	2.62	2.54	2.48	2.43
38	7.35	5.21	4.34	3.86	3.54	3.32	3.15	3.02	2.92	2.83	2.69	2.59	2.51	2.45	2.40
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.80	2.66	2.56	2.48	2.42	2.37
42	7.28	5.15	4.29	3.80	3.49	3.27	3.10	2.97	2.86	2.78	2.64	2.54	2.46	2.40	2.34
44	7.25	5.12	4.26	3.78	3.47	3.24	3.08	2.95	2.84	2.75	2.62	2.52	2.44	2.37	2.32
46	7.22	5.10	4.24	3.76	3.44	3.22	3.06	2.93	2.82	2.73	2.60	2.50	2.42	2.35	2.30
48	7.20	5.08	4.22	3.74	3.43	3.20	3.04	2.91	2.80	2.72	2.58	2.48	2.40	2.33	2.28
50	7.17	5.06	4.20	3.72	3.41	3.19	3.02	2.89	2.79	2.70	2.56	2.46	2.38	2.32	2.27
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.50	2.39	2.31	2.25	2.20
80	6.96	4.88	4.04	3.56	3.26	3.04	2.87	2.74	2.64	2.55	2.42	2.31	2.23	2.17	2.12
100	6.90	4.82	3.98	3.51	3.21	2.99	2.82	2.69	2.59	2.50	2.37	2.26	2.19	2.12	2.07
125	6.84	4.78	3.94	3.47	3.17	2.95	2.79	2.66	2.55	2.47	2.33	2.23	2.15	2.08	2.03
150	6.81	4.75	3.92	3.45	3.14	2.92	2.76	2.63	2.53	2.44	2.31	2.20	2.12	2.06	2.00
200	6.67	4.71	3.88	3.41	3.11	2.89	2.73	2.60	2.50	2.41	2.27	2.17	2.09	2.02	1.97
300	6.72	4.68	3.85	3.38	3.08	2.86	2.70	2.57	2.47	2.38	2.24	2.14	2.06	1.99	1.94
500	6.69	4.65	3.82	3.36	3.05	2.84	2.68	2.55	2.44	2.36	2.22	2.12	2.04	1.97	1.92
1000	6.66	4.63	3.80	3.34	3.04	2.82	2.66	2.53	2.43	2.34	2.20	2.10	2.02	1.95	1.90
∞	6.63	4.61	3.78	3.32	3.02	2.80	2.64	2.51	2.41	2.32	2.18	2.08	2.00	1.93	1.88

续表 C5

df ₂ \ df ₁	22	24	26	28	30	35	40	45	50	60	80	100	200	500	∞
1	622.0	623.0	624.0	625.0	626.0	628.0	629.0	630.0	630.0	631.0	633.0	633.0	635.0	636.0	637.0
2	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5
3	26.6	26.6	26.6	26.5	26.5	26.5	26.4	26.4	26.4	26.3	26.3	26.2	26.2	26.1	26.1
4	14.0	13.9	13.9	13.9	13.8	13.8	13.7	13.7	13.7	13.7	13.6	13.6	13.5	13.5	13.5
5	9.51	9.47	9.43	9.40	9.38	9.33	9.29	9.26	9.24	9.20	9.16	9.13	9.08	9.04	9.02
6	7.35	7.31	7.28	7.25	7.23	7.18	7.14	7.11	7.09	7.06	7.01	6.99	6.93	6.90	6.88
7	6.11	6.07	6.04	6.02	5.99	5.94	5.91	5.88	5.86	5.82	5.78	5.75	5.70	5.67	5.65
8	5.32	5.28	5.25	5.22	5.20	5.15	5.12	5.00	5.07	5.03	4.99	4.96	4.91	4.88	4.86
9	4.77	4.73	4.70	4.67	4.65	4.60	4.57	4.54	4.52	4.48	4.44	4.42	4.36	4.33	4.31
10	4.36	4.33	4.30	4.27	4.25	4.20	4.17	4.14	4.12	4.08	4.04	4.01	3.96	3.93	3.91
11	4.06	4.02	3.99	3.96	3.94	3.89	3.86	3.83	3.81	3.78	3.73	3.71	3.66	3.62	3.60
12	3.82	3.78	3.75	3.72	3.70	3.65	3.62	3.59	3.57	3.54	3.49	3.47	3.41	3.38	3.36
13	3.62	3.59	3.56	3.53	3.51	3.46	3.43	3.40	3.38	3.34	3.30	3.27	3.22	3.19	3.17
14	3.46	3.43	3.40	3.37	3.35	3.30	3.27	3.24	3.22	3.18	3.14	3.11	3.06	3.03	3.00
15	3.33	3.29	3.26	3.24	3.21	3.17	3.13	3.10	3.08	3.05	3.00	2.98	2.92	2.89	2.87
16	3.22	3.18	3.15	3.12	3.10	3.05	3.02	2.99	2.97	2.93	2.89	2.86	2.81	2.78	2.75
17	3.12	3.08	3.05	3.03	3.00	2.96	2.92	2.89	2.87	2.83	2.79	2.76	2.71	2.68	2.65
18	3.03	3.00	2.97	2.94	2.92	2.87	2.84	2.81	2.78	2.75	2.70	2.68	2.62	2.59	2.57
19	2.96	2.92	2.89	2.87	2.84	2.80	2.76	2.73	2.71	2.67	2.63	2.60	2.55	2.51	2.49
20	2.90	2.88	2.83	2.80	2.78	2.73	2.69	2.67	2.64	2.61	2.56	2.54	2.48	2.44	2.42
21	2.84	2.80	2.77	2.74	2.72	2.67	2.64	2.61	2.58	2.55	2.50	2.48	2.42	2.38	2.36
22	2.78	2.75	2.72	2.69	2.67	2.62	2.58	2.55	2.53	2.50	2.45	2.42	2.36	2.33	2.31
23	2.74	2.70	2.67	2.64	2.62	2.57	2.54	2.51	2.48	2.45	2.40	2.37	2.32	2.28	2.26
24	2.70	2.66	2.63	2.60	2.58	2.53	2.49	2.46	2.45	2.40	2.36	2.33	2.27	2.24	2.21
25	2.66	2.62	2.59	2.56	2.54	2.49	2.45	2.42	2.40	2.36	2.32	2.29	2.23	2.19	2.17
26	2.62	2.58	2.55	2.53	2.50	2.45	2.42	2.39	2.36	2.33	2.28	2.25	2.19	2.16	2.13
27	2.59	2.55	2.52	2.49	2.47	2.42	2.38	2.35	2.33	2.29	2.25	2.22	2.16	2.12	2.10
28	2.56	2.52	2.49	2.46	2.44	2.39	2.35	2.32	2.30	2.26	2.22	2.19	2.13	2.09	2.06
29	2.53	2.46	2.46	2.44	2.41	2.36	2.33	2.30	2.27	2.23	2.19	2.16	2.10	2.06	2.03
30	2.51	2.47	2.44	2.41	2.39	2.34	2.30	2.27	2.25	2.21	2.16	2.13	2.07	2.03	2.01
32	2.46	2.42	2.39	2.36	2.34	2.29	2.25	2.22	2.20	2.16	2.11	2.08	2.02	1.98	1.96
34	2.42	2.38	2.35	2.32	2.30	2.25	2.21	2.18	2.16	2.12	2.07	2.04	1.98	1.94	1.91
36	2.38	2.35	2.32	2.29	2.26	2.21	2.17	2.14	2.12	2.08	2.03	2.00	1.94	1.90	1.87
38	2.35	2.32	2.28	2.26	2.23	2.18	2.14	2.11	2.09	2.05	2.00	1.97	1.90	1.86	1.84
40	2.33	2.29	2.26	2.23	2.20	2.15	2.11	2.08	2.06	2.02	1.97	1.94	1.87	1.83	1.80
42	2.30	2.26	2.23	2.20	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03	1.99	1.94	1.91	1.85	1.80	1.78
44	2.28	2.24	2.21	2.18	2.15	2.10	2.06	2.03	2.01	1.97	1.92	1.89	1.82	1.78	1.75
46	2.26	2.22	2.19	2.16	2.13	2.08	2.04	2.01	1.99	1.95	1.90	1.86	1.80	1.75	1.73
48	2.24	2.20	2.17	2.14	2.12	2.06	2.02	1.99	1.97	1.93	1.88	1.84	1.78	1.73	1.70
50	2.22	2.18	2.15	2.12	2.10	2.05	2.01	1.97	1.95	1.91	1.86	1.82	1.76	1.71	1.68
60	2.15	2.12	2.08	2.05	2.03	1.98	1.94	1.90	1.88	1.84	1.78	1.75	1.68	1.63	1.60
80	2.07	2.03	2.00	1.97	1.94	1.89	1.85	1.81	1.79	1.75	1.69	1.66	1.58	1.53	1.49
100	2.02	1.98	1.94	1.92	1.89	1.84	1.80	1.76	1.73	1.69	1.63	1.60	1.52	1.47	1.43
125	1.98	1.94	1.91	1.88	1.85	1.80	1.76	1.72	1.69	1.65	1.59	1.55	1.47	1.41	1.37
150	1.96	1.92	1.88	1.85	1.83	1.77	1.73	1.69	1.66	1.62	1.56	1.52	1.43	1.38	1.33
200	1.93	1.89	1.85	1.82	1.79	1.74	1.69	1.66	1.63	1.58	1.52	1.48	1.39	1.33	1.28
300	1.89	1.85	1.82	1.79	1.76	1.71	1.66	1.62	1.59	1.55	1.48	1.44	1.35	1.28	1.22
500	1.87	1.83	1.79	1.76	1.74	1.68	1.63	1.60	1.56	1.52	1.45	1.41	1.31	1.23	1.16
1000	1.85	1.81	1.77	1.74	1.72	1.66	1.61	1.57	1.54	1.50	1.43	1.38	1.28	1.19	1.11
∞	1.83	1.79	1.76	1.72	1.70	1.64	1.59	1.55	1.52	1.47	1.40	1.36	1.25	1.15	1.00

表 C6 t 化极差分布的百分位点 $q(k, df; \alpha)$ 表 ($\alpha=0.01$)

$k \backslash df$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	$k \backslash df$
1	90.03	135.0	164.3	185.6	202.2	215.3	227.2	237.0	245.6	253.2	260.0	266.2	271.8	277.0	281.8	286.3	290.4	294.3	298.0	1
2	14.04	19.02	22.29	24.72	26.63	28.20	29.53	30.68	31.69	32.59	33.40	34.13	34.81	35.43	36.00	36.53	37.03	37.50	37.95	2
3	8.26	10.62	12.17	13.33	14.24	15.00	15.64	16.20	16.69	17.13	17.53	17.89	18.22	18.52	18.81	19.07	19.32	19.55	19.77	3
4	6.51	8.12	9.17	9.96	10.58	11.10	11.55	11.93	12.27	12.57	12.84	13.09	13.32	13.53	13.73	13.91	14.08	14.24	14.40	4
5	5.70	6.98	7.80	8.42	8.91	9.32	9.67	9.97	10.24	10.48	10.70	10.89	11.08	11.24	11.40	11.55	11.68	11.81	11.93	5
6	5.24	6.33	7.03	7.56	7.97	8.32	8.61	8.87	9.10	9.30	9.48	9.65	9.81	9.95	10.08	10.21	10.32	10.43	10.54	6
7	4.95	5.92	6.54	7.01	7.37	7.68	7.94	8.17	8.37	8.55	8.71	8.86	9.00	9.12	9.24	9.35	9.46	9.55	9.65	7
8	4.75	5.64	6.20	6.62	6.96	7.24	7.47	7.68	7.86	8.03	8.18	8.31	8.44	8.55	8.66	8.76	8.85	8.94	9.03	8
9	4.60	5.43	5.96	6.35	6.66	6.91	7.13	7.33	7.49	7.65	7.78	7.91	8.03	8.13	8.23	8.33	8.41	8.49	8.57	9
10	4.48	5.27	5.77	6.14	6.43	6.67	6.87	7.05	7.21	7.36	7.49	7.60	7.71	7.81	7.91	7.99	8.08	8.15	8.23	10
11	4.39	5.15	5.62	5.97	6.25	6.48	6.67	6.84	6.99	7.13	7.25	7.36	7.46	7.56	7.65	7.73	7.81	7.88	7.95	11
12	4.32	5.05	5.50	5.84	6.10	6.32	6.51	6.67	6.81	6.94	7.06	7.17	7.26	7.36	7.44	7.52	7.59	7.66	7.73	12
13	4.26	4.96	5.40	5.73	5.98	6.19	6.37	6.53	6.67	6.79	6.90	7.01	7.10	7.19	7.27	7.35	7.42	7.48	7.55	13
14	4.21	4.89	5.32	5.63	5.88	6.08	6.26	6.41	6.54	6.66	6.77	6.87	6.96	7.05	7.13	7.20	7.27	7.33	7.39	14
15	4.17	4.84	5.25	5.56	5.80	5.99	6.16	6.31	6.44	6.55	6.66	6.76	6.84	6.93	7.00	7.07	7.14	7.20	7.26	15
16	4.13	4.79	5.19	5.49	5.72	5.92	6.08	6.22	6.35	6.46	6.56	6.66	6.74	6.82	6.90	6.97	7.03	7.09	7.15	16
17	4.10	4.74	5.14	5.43	5.66	5.85	6.01	6.15	6.27	6.38	6.48	6.57	6.66	6.73	6.81	6.87	6.94	7.00	7.05	17
18	4.07	4.70	5.09	5.38	5.60	5.79	5.94	6.08	6.20	6.31	6.41	6.50	6.58	6.65	6.73	6.79	6.85	6.91	6.97	18
19	4.05	4.67	5.05	5.33	5.55	5.73	5.89	6.02	6.14	6.25	6.34	6.43	6.51	6.58	6.65	6.72	6.78	6.84	6.89	19
20	4.02	4.64	5.02	5.29	5.51	5.69	5.84	5.97	6.09	6.19	6.28	6.37	6.45	6.52	6.59	6.65	6.71	6.77	6.82	20
24	3.96	4.55	4.91	5.17	5.37	5.54	5.69	5.81	5.92	6.02	6.11	6.19	6.26	6.33	6.39	6.45	6.51	6.56	6.61	24
30	3.89	4.45	4.80	5.05	5.24	5.40	5.54	5.65	5.76	5.85	5.93	6.01	6.08	6.14	6.20	6.26	6.31	6.36	6.41	30
40	3.82	4.37	4.70	4.93	5.11	5.26	5.39	5.50	5.60	5.69	5.76	5.83	5.90	5.96	6.02	6.07	6.12	6.16	6.21	40
60	3.76	4.28	4.59	4.82	4.99	5.13	5.25	5.36	5.45	5.53	5.60	5.67	5.73	5.78	5.84	5.89	5.93	5.97	6.01	60
120	3.70	4.20	4.50	4.71	4.87	5.01	5.12	5.21	5.30	5.37	5.44	5.50	5.53	5.61	5.66	5.71	5.75	5.79	5.83	120
∞	3.64	4.12	4.40	4.60	4.76	4.88	4.99	5.08	5.16	5.23	5.29	5.35	5.40	5.45	5.49	5.54	5.57	5.61	5.65	∞

附加说明：

本标准由中华人民共和国机械电子工业部提出。

本标准主要起草单位机械电子工业部三所、南京大学声学所。

本标准主要起草人张桂昌、刘璋温、李敏、蔡振江、包紫薇等。