

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代声学科学与技术丛书

空间听觉

——人类声定位的心理物理学

Spatial Hearing: The Psychophysics of
Human Sound Localization

〔德〕J. 布劳尔特 著

戴根华 〔美〕项宁 译

李晓东 校



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代声学科学与技术丛书

空 间 听 觉

——人类声定位的心理物理学

Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound
Localization

〔德〕J. 布劳尔特 著
戴根华 〔美〕项宁 译
李晓东 校

中国科学院声学研究所

科 学 出 版 社
北 京

图字: 01-2012-5919

内 容 简 介

本书主要阐述人的听觉的空间感。全书共分5章。第1章扼要介绍空间听觉研究中的心理测试法,提出由该方法导出的实验模型,还简短介绍测试信号、声场和探管传声器。第2章和第3章依次介绍单个声源但位于不同平面时的空间听觉问题和复杂的多声源情况及封闭空间中的空间听觉。第4章介绍作者在1972年至1982年的10年内,在深入的实验研究中获得的重要成果,内容有:外耳物理,单耳和双耳信号的空间听觉属性等。另外,还以足够的篇幅介绍空间听觉在室内声学 and 建筑声学,以及在音响系统中的应用。第5章介绍“听觉虚拟仿真”和重要的、主要建立在空间听觉物理基础上的应用领域;介绍外周听觉系统的信号处理和模拟由双耳倾听(所谓鸡尾酒会效应)得到的语音加强;讨论优先效应的最新研究。

本书讲解透彻,并配以大量的图表。最后还附有十分详细的文献目录,可供从事心理学、生理学、心理物理学、声学和建筑声学、医学、通信工程、广播技术的科技人员、建筑师、音乐界或电影界的录音师以及大专院校师生阅读参考。

德文版原书名:

Raumliches Horen (1974)

Nachschrift. Neue Ergebnisse und Trends seit 1972 (1985)

Nachschrift. Neue Ergebnisse und Trends seit 1982 (1997)

© 1974, 1985, 1997 S. Hirzel & Verlag GmbH&Co. Birkenwaldstrasse 44, 70191

Stuttgart, Germany. All rights reserved

图书在版编目(CIP)数据

空间听觉:人类声定位的心理物理学/(德)J.布劳尔特著;戴根华,(美)项宁译;李晓东校. —北京:科学出版社,2013

(现代声学科学与技术丛书)

书名原文: Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization

ISBN 978-7-03-038096-8

I. ①空… II. ①布… ②戴… III. ①听觉—人体生理学—心理学—研究 IV. ①R339.16

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第146770号

责任编辑:刘凤娟 尹彦芳/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年6月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013年6月第一次印刷 印张: 22

字数: 440 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《现代声学科学与技术丛书》编委会

主 编：田 静

执行主编：程建春

编 委：(按姓氏汉语拼音排序)

陈伟中	陈 宇	邓明晰	侯朝焕
李晓东	林书玉	刘晓峻	吕亚东
马远良	钱梦騄	邱小军	孙 超
王威琪	谢菠荪	杨德森	杨士莪
张海澜	张仁和	张守著	

中文版前言

听觉世界具有三个空间维度，正如视觉世界那样。听觉事件也是“事物”，换言之，它们具有独特的时间、空间基本特征，即存在于特定的时间和特定的空间，具有特定的空间范围和特定的重要属性，比如响度、音调和音色。

然而，在 20 世纪 70 年代初开始撰写本书时，以上这些简单的事实根本不为每个人所理解。人们可以见到这样的描述：“在中平面内没有声定位”，（不是位于某处，某事件如何能够存在？）或者，“声音通常是‘主观性的’，因而与物理世界相比缺乏客观真实性”（如果没有真实性，某事件能够存在吗？）。尽管有关空间听觉的科学研究可以追溯到古希腊时代，近代声学的先驱们（例如，瑞利（Lord Rayleigh）、冯·亥姆霍兹（Hermann von Helmholtz））也曾对此做过广泛深入的探讨，但是那时听觉感知在许多人的心中仍然是个谜。

正是由于这个原因，作者感到有必要撰写一本全新的内容广泛的空间听觉专著，作为教学和科研参考用书。它应汇集当代空间听觉的最新知识。值得欣慰的是，这本书确实得到了广泛的接受，开始时主要在生物学界、心理声学界和耳鼻喉医学界。请注意，印刷第一版的时间，远在学术界和工业界的实验室广泛使用计算机的时代之前。

后来，人们很快就发现，空间听觉的基础知识在许多技术领域中具有极高的应用价值。首先，在高保真音响技术，随后在模拟头立体声爱好者中和相关工业中，本书为之掀起了一波又一波引人瞩目的研发高潮。随着微电子和数字信息处理技术的发展，由本书引出的许多应用理念都得到了实现，例如，防串声双耳声重放系统，双耳听闻室内声学模拟和去混响技术，智能拾声技术和基于鸡尾酒会效应的处理技术。

随后，本书又在双耳助听技术领域，在虚拟仿真，进而在感知编码压缩等领域中，获得了众多读者们和开发工程师们的青睐。最近的迹象表明，人工耳蜗植入、电脑游戏技术是需要坚实的空间听觉基础知识的新课题。因而，作为一本关于人类声定位的心理物理学基本原理的参考书和教科书，本书持续地赢得了国际声誉，继德文原著之后，其英文、俄文和日文版相继出版。

作者欣喜地看到本书的中文版也已面世，对译者们的努力深表感谢，并期望这方面有新的合作者。鉴于微电子和音响技术工业在中国的重要性，作者深信，本书定会满足广大读者的各种需求。

J. 布劳尔特(Jens Blauert)

德国波鸿

2012 年 8 月

修订版前言

本书的德文版于 1974 年出版。那时，工业界和大学实验室中的数字信号处理几乎各自在计算机主机上进行。为做简单的快速傅里叶变换，研究人员可能必须耐心地等上几天：打一堆卡片，将它们送到计算机中心，等待输出——结果也许仅仅是发现错打了一些孔，而不得不全部重新来过。然而，那时人们早已熟知许多空间听觉的基本概念，并且一些关键应用已是可能的，主要采用机械的（声的）硬件和模拟电子线路。

大约 10 年以后，微机得以进入实验室。现在研究人员和开发工程师能够当场做数字信号处理。结果，老的空间听觉概念得以向前发展，并采用计算机模拟对其进行严格的试验——尽管还不是实时进行。微机作为实验室的工具，使空间听觉成为了很吸引人的研究领域，该领域内的出版物数量显著增加。在感到必须对本书 1983 年美国版进行修订时，我不得不放弃了完全覆盖该领域的想法——这是我在原版中企图做的，而赞同将关注点放在详细阐述综合性的进展和主要趋势上。然而，我预感到信号处理的进展——特别是计算机小型化和计算速度加快——世界很快为空间听觉原理在科学和工业中的各种最新应用铺平道路。

另一个 10 年后的今天，这个看法成真了，新的工业在“双耳技术”的综合标题下取得进展。双耳技术作为诸如信息和通信系统、测量技术、助听、语音技术、多媒体系统和虚拟仿真等领域的使能技术已确立自己的地位。最近 10 年间，空间听觉领域事实上继续快速扩张，因而要在一本书中涵盖它的全部内容的努力将是徒劳的。

不过，利用为修订版做准备的机会，对空间听觉领域最新的巨大发展做点评述，似乎是合宜的。为此，增加了新的第 5 章。在引论之后（见 5.1 节），5.2 节介绍“听觉虚拟仿真”，一个重要的、主要建立在空间听觉物理基础上的应用领域。5.3 节研究外周听觉系统的信号处理，和模拟由双耳倾听（所谓鸡尾酒会效应）得到语音加强。这个话题也引起人们巨大的研究兴趣。最后，5.4 节讨论优先效应的最新研究，优先效应以前称第一波阵面定律（见 3.1 节）。优先效应的最新研究，为认知在空间听觉中起重要作用这方面，提供了清晰的实验证据。

我尤其感谢我过去几年的博士学生，特别是 M. Bodden 博士，J.-P. Col 博士，H. Els 博士，W. Gaik 博士，H. Lehnert 博士，U. Letens 博士，W. Lindemann 博士，Ch.

Pössel 博士, W. Pompetzki 博士, D. Schlichthärle 博士, J. Schroeter 博士, H. Slatky 博士, S. Wolf 博士, 和 N. Xiang 博士, 他们的工作为新增加的那章建立了主要基础。R. Leopold 夫人准备了大部分新的图。

新增加的那章提供了空间听觉三个基本方面, 即物理的、心理物理的和心理的进展的例子。希望本书能以新的面貌摆上每个人的书桌, 以迷人的空间听觉领域的成就使你喜欢。

J. 布劳尔特(Jens Blauert)

德国波鸿

1995 年 11 月

前 言

无线通信工程的任务是获取和处理信息，并通过空间和时间将其传递。一个典型例子是使某人听到源自另一地点和时间的声音，其情景宛如他人就在附近。在无线通信链的终端，必须让人们听到预期的声信号。

要想给位于传输起点的听众创造一种身临其境的听觉幻境和直接感受原始听觉事件，听众听到的声音的方向和距离，就必须尽可能地与在起点的感觉相当。这就要求增加从事通信事业的工程师，同时使他们对听觉感知的空间属性和对伴随这些属性的信号发生兴趣。这里我们称空间属性和伴随的信号为“空间听觉”。

空间听觉涉及多个学科。对这课题的研究的重要贡献，来自各个不同的学科，一方面如心理学、心理物理学、生理学和医学，另一方面如工程、物理和音乐分析。

第一类学科一开始就把人作为有主动感觉者。毕竟心理学、心理物理学和生理学之间的区别仅仅在于方法不同。心理学和心理物理学试图根据人的外部表现，来推断他在感觉声音之前、之中和之后的内心活动；而生理学在研究人的内心活动时，着重于直接观察。医学则同时采用以上两种方法，但特别重视人的反常表现，以及从正常人中把他们区别开来。耳科学和听力学对空间听觉尤其感兴趣。

第二类学科则把感受听觉事件的人，作为信息传递链的终端，即作为“信宿”。在各工程学科的分支中，无线通信技术最注意空间听觉现象，使用空间听觉技术也最广。空间听觉现象在噪声测量和噪声控制等工程技术中也有应用。物理学在涉及建筑声学的设计而应用空间听觉时遇到的问题是，房间的“音质”最终要根据人的主观感觉来评价。最后，音乐分析感兴趣的则是在演奏一个作品时的空间氛围，与以后重放音乐时获得的艺术印象之间的关系。显然，为使听众更好地收听音乐，当代作曲家——流行音乐以及“严肃”音乐——都愈益把空间效果作为一种艺术手法加以应用。

由于兴趣来源的多样性，所以有关“空间听觉”的知识面很广，连某一特殊领域的专家都不容易了解它的全貌。而少量有较为详尽摘要的相关文章（参考文献中用*标示）的研究范围很窄，而且其观点局限于某一领域。

本书试图汇集现有的有关空间听觉的基础知识，并对其加以清楚的阐述，使读者对它的全貌至少有一个概括的了解。书中所列的大量引源注释和参考文献，使读者能容易地找到有关专门问题的详细文章。然而，鉴于文献数量巨大，有关文章很难查询，因此列出一个完整的文献目录是不可能的。

我的这本专著主要以心理学、心理物理学、耳科学、听力学、无线通信技术和物理学等方面的文献为基础。尽管没有解释生理学方面的细节，但这里提供的材料会让生理学家们感觉兴趣，因为他们面对着特别艰巨的任务，就是设法把从试听者的行为研究中得到的结果，与他们自己关于生理过程的知识协调一致起来。另外，电声传输系统的细节未加讨论，因为对此已有足够的文献，将在书中适当之处给以提示。

空间听觉的研究大多数以试听者的听觉实验为基础。至少对于工程师和物理学家们来讲，困难之处在于，可资用的数据仅是根据试听者们的表述得到的。而同一测试条件下几个试听者的表述，常常有明显的矛盾。为了不计这些问题而获得定量结果，心理学家和生理物理学家们发展了特别的“心理学的”测量法。这些技术的简要说明和其依据的模型，将在第 1 章中给出。

第 1 章还包括对测试信号和声场的一些评论。物理学家和工程师对此非常熟悉，但是评论将使其他读者理解空间听觉的物理的和声学的内涵容易些。

人有两只耳朵。发送到两耳的声信号是到目前为止空间听觉最重要的物理参数。显然，只采用这些信号讨论空间听觉是合宜的，这使根据信号理论分类来组织论著成为可能。可是，现在只有特定种类的耳朵输入信号的实验结果，其中多数是以自由声场中和封闭空间内的信号构成的。有鉴于此，本书的章节按声源个数划分，这种选择遵从了普通惯例。

我很幸运有机会在亚琛高等技术大学无线电子通信工程学院，多年从事空间听觉领域的理论和实验研究。对我尊敬的导师、当了多年研究所所长的教授 V. Ashcroft 工程学博士表示真诚的感谢，他对我的工作给予了大力支持，并鼓励我编写本书。我也要感谢柏林工程大学的教授 L. Creamer 工程学博士，他阅读了原稿初版，并指出许多重要的改正建议。我还要感谢两位同事，P. Laws 工程学博士和 R. Harming 双学位工程学博士，感谢他们二位对我的鼓励和对本书的批评。H.-J. Plate 双学位工程学博士评估了大量实验结果，我向他表示敬意。

J. 布劳尔特(Jens Blauert)

德国亚琛

1972 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 听觉事件和听觉空间	1
1.2 听觉实验的系统分析	3
1.3 试验方法评述	8
1.3.1 心理测量学方法	9
1.3.2 信号与声场	14
1.3.3 探管传声器	20
第 2 章 单声源的空间听觉	24
2.1 定位与定位模糊	24
2.2 两耳上的声场	33
2.2.1 耳道内的声传播	36
2.2.2 耳廓和头的影响	42
2.2.3 外耳的传递函数	51
2.3 等同耳输入信号的分析 and 评价	60
2.3.1 中平面内的方向听觉	63
2.3.2 距离听觉与头内的定位问题	75
2.4 非等同耳输入信号的分析 and 评价	89
2.4.1 耳间时间差	91
2.4.2 耳间声级差	101
2.4.3 耳间时间差和声级差的相互作用	107
2.5 其他一些参数	115
2.5.1 运动理论	116
2.5.2 骨导理论, 视觉理论, 前庭理论及触觉理论	124
第 3 章 多声源和封闭空间中的空间听觉	131
3.1 两个辐射相干信号的声源	132
3.1.1 合成定位	133
3.1.2 第一波阵面定律	145
3.1.3 初级声的抑制	154
3.2 部分相干或者不相干的两个声源	155
3.2.1 相干系数的影响	158

3.2.2 双耳信号检测	169
3.3 两个以上的声源和扩散声场	178
第4章 1972年以来的进展和趋势	188
4.1 初步评论	188
4.2 外耳物理学	188
4.2.1 外耳传递函数的测量和解释	189
4.2.2 耳道的面积函数和终端	193
4.2.3 外耳传递特性的分析	196
4.3 耳输入信号单耳属性的分析与评价	198
4.4 耳输入信号耳间属性的分析与评价	203
4.4.1 横偏和多重听觉事件	204
4.4.2 合成定位与第一波阵面定律	212
4.4.3 存在干扰噪声时的双耳定位, 信号检测和语音识别	216
4.4.4 双耳信号处理模型	220
4.5 应用实例	226
4.5.1 听觉的空间印象感	227
4.5.2 模拟头立体声	233
第5章 1982年以来的进展和趋势	240
5.1 初步评论	240
5.2 房间双耳听觉模拟和听觉虚拟仿真	242
5.3 双耳信号处理和语音加强	255
5.4 优先效应: 认知实例	267
参考文献	276
主词中英文对照	328
译后记	335

第 1 章 绪 论

本书主要研究听觉实验的结果：在规定的条件下研究听觉感知。从这里起至本书最后，我们将讨论限定在有意识的感知。

不同的学科分支从不同的观点研究感知现象，它们之间基本的差别在于：

(1) 根据认知理论的观点和方法：“什么是感知？”

(2) 根据自然科学和技术科学的观点和方法：“(特殊的)感知是怎么产生？”

第一个问题与感知的实质有关。对它的回答指出，在感知的瞬间，被感知者和感知者彼此之间的关系是，感知者有意识地去感觉被感知者。如以一般术语“试听者”和“目标”替代“感知者”和“被感知者”，就可说，感知是试听者和目标的主从合取，直白地说，叫“试听者-目标关系”(Lungwort, 1923, 1933a; Bence, 1961)。没有试听者和目标二者就没有感知可言。

第二个问题与感知的物理学、生理学和心理学特性有关。由于感知与生物机体的生理过程相联系，所以可用更详细的方式提问：“对于特定的目标，为在生物机体的感觉世界中产生出感知，机体内外必须满足什么条件？”这是通常会提出的问题，也是正在研究的基本问题。这里被研究的机体是人，是听觉实验的试听者；外部条件是给予试听者的刺激（大部分是声信号）；使人感兴趣的是试听者听到了什么。

1.1 听觉事件和听觉空间

人类主要根据视觉确定方向。与人类的视觉世界相比，其他感觉（如听觉和触觉等）世界远不及视觉世界发达，因此一些概念和表述的基础基本全是可视物体（Becker, 1971）。比如，我们说“钟响了”而不说“声音敲响了钟”。科学技术上的表述与此相似。

德国标准 DIN 1320 (1959)按照上述观点，把“声音”定义为“人类听觉频率范围（16Hz~20kHz）内弹性媒质的机械振动和其中的波”。这是物理上主要是视觉感知到的可测量的位置改变的表述法。人们所听到的，所感觉到的，只不过隐含在关键性的“特别在人类听觉频率范围内”的短句中。

为了满意地表述听觉实验，要求更彻底地分析作为这个定义的基础的事件的状

态。潜意识的假设是,当媒质中出现频率在 16 Hz~20 kHz 的振动或波时,正常人通常就会听到些什么。然而,这并非表示,媒质的振动和其中的波就是所听到的全部。例如,若实验试听者的两耳暂时被堵塞或有听力损失,那他就什么也听不到,但媒质的振动和其中的波仍然可察觉到(例如,采用物理测量仪器)。

为了使术语的意义清楚,也由于先前 Blauert 于 1966 年的提议,本书采用在 DIN 标准中定义的“声音”这个词,来表述听觉现象的物理方面,特别是用来构成复合词“声事件”。例如,术语“声源”“声信号”“声波”总是被用来描述表征声事件特性的物理名词。而声学上“感觉到的”将冠以前缀“听觉的”,如“听觉目标”,或更适宜地叫“听觉事件”^①。

人们一般相信,听觉事件是声事件诱发、确定和引起的事件。然而,听觉事件也可能没有相应的机械振动或波就可发生,如一定病理条件下耳中出现的鸣响(耳鸣)和人工刺激听神经时感觉到的听觉事件。更一般的事实是,声事件不一定产生听觉事件,同时不是每一个听觉事件都与声事件有关。必须排除因果意义上一个引起另一个的潜规则。人的视觉系统与听觉系统有很大差别,所以视觉世界与听觉世界也有很大差别。因此,相信声事件一定引起听觉事件的普通想法虽然不是不可理喻的,但是是不正确的。

仔细推敲过的表述只是说明,在一些特别精确地定义的条件下,特别精确地定义的声事件和特别精确地定义的听觉事件彼此相伴,或相继发生(Blauert, 1969a,b)。也可以说,声事件和听觉事件相互联系,相互依存,或比照另一方面而分类。

声事件和听觉事件在时间、空间和其他属性方面都是确定性的(Lungwort, 1933b),也就是,它们只在特定的时间和特定的地点发生,并且具有特定的属性。“空间听觉”这个概念正是建立在这个意义上的,因为它暗示听觉事件固有的空间确定性。事实上,这个概念语意上重复,因为没有“非空间听觉”一说。更严密地说,空间听觉概念包含听觉事件的位置与其他参数尤其声事件之间的关系,但是也包括其他,如与大脑生理学有关的参数。

听觉事件的定位性^②多少不太精确。例如,一个在混响室中被称为“持续音”的听觉事件的位置和空间范围,不管采用什么样的精度,都没法加以确定。音的定位性比较扩散。另一方面,消声室中的喀哒声能被精确地定位,位置范围非常限定。听觉事件的定位性,由它的位置及其范围决定,如同评价其他的感知目标的位置及其范围一样。其他的感知目标也许是别的听觉事件,也许是另一类感觉目标——特

① 本书中用“事件”来表述听觉过程的两大要素:声音现象和听觉现象。“听觉事件”这个定义是本书作者首先提出的,而其他文献中常被称为“声像”。“事件”这个词含义更广,读者将在后面看到,“声事件”和“听觉事件”将通过若干特征量加以限定和表述。——译者注

② 为表示感觉的空间确定性,特引入新的术语“定位性”,以免在出现空间某点的“定位”时可能引起的某些混淆(Blauert, 1969a)。而“定位”将在 2.1 节中给出新的定义。

别是视觉目标。

听觉事件可能出现在没有什么东西可看得见的地方：自己身体内；或其他不可透视的物体如墙后、地平线以下、黑暗中，等等。听觉事件与视觉感知相反，不仅出现在观察者前方，而且出现在感知它们的人的四面八方。与别的种类的感觉如触觉、嗅觉和味觉，也可做类似的比较。听觉事件的全部可能位置构成听觉空间。表述中所采用的“空间”这词，必须在数学的层面来理解，理解为它们之间的距离能确定的点的集合。

尤其在早期文献中，这种观点常常被表述为，定位性不是听觉事件的固有特性，而只是在生物演变过程中发展而来的，它特别与人类根据经验，学习把“正确”位置赋予听觉事件的程度有关。“正确”位置被认为是声源位置。这种处理方法意味着存在听觉事件，而听觉事件，可以那么说，于“非空间（nonspace）”中等待着被赋予空间属性，而且只有有经验者才能确定其精确位置。这种观点的错误很长时间内是有案可查的（Hornstone, 1926）。实际情况如下：在个体的发育期，听觉世界本身在演变。听觉事件的定位性开始时比较模糊，后来空间上变得比较明确，与视觉世界和别的感觉世界相似，逐渐成为更加精确。

听觉事件的位置和辐射声波的振动体（声源）的位置经常在同一点，这是确实情况。虽然如此，但声源位置一定也是听觉事件的固有正确位置的结论是有问题的，无论如何要打个问号，毕竟声源和听觉事件二者都是感觉目标。如它们的位置不同，那么，问哪个不对毫无价值。

无线通信工程师对声源位置和听觉事件位置不同的情况特别有兴趣，是十分自然的。无线通信工程师在寻求，采用数量尽可能最少的声源（例如，扬声器），在记录或传输的起始点复制听觉事件。必须以这样的方式在无线电声通信链的接收端产生声事件，使出现与起始点那样的同样方向同样距离的听觉事件。因此，必须在扬声器以外的其他位置也产生听觉事件。

1.2 听觉实验的系统分析

通常在听觉实验中，要以明确规定的方法，向实验试听者发送时间和空间结构已知的声事件。然后试听者就关心的各特别属性，描述在这些条件下出现的听觉事件。描述可以用口头表示方式，也可以用动作表示，如做手势、操作电子接触开关或作记录。然而重要的一点是，在描述的同时，要对所关心的听觉属性做定量评分。

有两种根本不同的听觉实验：一种是实验员也是试听者，另一种有一个或几个人作为试听者。自助实验仅对初步研究有用。但在另外的人作为试听者的实验中，试听者感知到的听觉事件有他自己的表述方法，对于实验员而言，这只是间接体验。

从试听者的表述中，可以得出结论（以实验员自己的经验做类推），试听者以多大的概率感知到了给定的听觉事件。实验员决不能直接感知试听者听到的听觉事件！

常规上，对于实验目的而言，除了做生理学和医学检查外，试听者生理学上的经历还是无法获知。然而，实验安排可采用系统理论中的“黑箱”象征性地表示（图 1.1），这在正讨论的最简单的情况下有三个接口：一个输入接口和两个输出接口（图 1.1）。可是注意，这里黑箱仅表述功能关系，而非作为试听者的生理学模型。

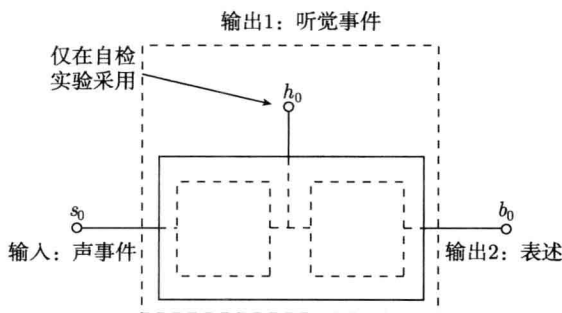


图 1.1 听觉实验中试听者的简单图示

现在我们假设，输入接口上接入一个有某种所关心的属性的声事件 s_0 。输出接口上出现一个（空间）属性为 h_0 的听觉事件。这个听觉事件出现在听觉空间中它所在的位置，只有在某些异常情况下才出现在试听者体内（见 2.3.2 节）。只有实验员自己也是试听者时，听觉事件才直接被感知。在这里的讨论阶段，虚线围成的黑箱中的两个系统单元和它们的连接，只是为了表示输出 h_0 和 b_0 不同。如果有几个听觉实验要考虑，那么，无论一个或是几个试听者，以下的输入和输出也许要区分：

- （1）声事件 S_0 的各个属性，单元数为 s_0 ；
- （2）听觉事件 H_0 的各个属性，单元数为 h_0 ；
- （3）听觉事件 B_0 的诸属性的各种表述，单元数为 b_0 。

这些“基本”参数组是相互有关的：数组 H_0 和数组 B_0 是数组 S_0 的函数。听觉实验的目的是达到这些数组的或它们的子数组定量表示。在此之前，需要一定的中间步骤。

显然，如果一定要定量表示，那么，测量就是必须的。

根据一般定义，测量是按照相容规则将数值赋予目标（Campbell, 1938; Stevens, 1951）。本书中“相容规则”的意思是，赋值方法必须使正在考虑的、形成基本的参数组的属性之间，和数字之间存在同构关系。在每一种特定情况下，先选择一组数字，它与基本参数组或其子数组的各个单元存在关联，这样，所考虑的每个单元被

赋予了一个数。这个数组叫“标度”。标度的单元用来定量地表述基本参数组的各个单元。

在测量理论中,要对复杂程度不同的标度,即标称的、序数的、间距的和比例的(nominal, ordinal, interval, and ratio scales)标度做出区别。这些标度彼此之间按照采用数字的哪个特性而有分别:等同(每个数只同自己恒等)、排列次序(数按规定的序列排队)和可加性(规定加法规则)。

标称标度的唯一根据是等同特性。一个数只作为基本参数组的一个单元或一组单元的标签,而它们与所考虑的属性具有等同性,数没有别的含义。例如,按照声事件是脉冲性的还是时不变的,听觉事件可排成标为1和2的组。

序数标度采用等同性或排列次序。例如, n 个听觉事件组,可按照到实验试听者的距离的增加而采用1到 n 的数表示。大数相当于距离长,但各听觉事件之间的距离之差不必相等,就是说,标度分档不必等距离。

间距标度利用恒等、排列次序和间距可加性的特点。不要求与数0对应的特定单元的属性一定等于0,就是不要求“绝对”0标度。广为熟知的例子是摄氏温标。

最后,在比例标度中,以上列出的数的所有三个特征,对于基本参数组的各单元均具有,均以标度中的数予以赋值。例如,两个听觉事件与另一个的距离为0,就表示后者消失;以2表示的距离是1表示的2倍,如此等等。大多数物理测量都根据比例标度。

测量过程中所采用的标度类别,决定了在解释测量结果时采取哪种数学运算。除其他研究者外, Guildford (1954)、Spiegel (1956)和 Sixth (1967)对这个课题进行了更加详细的考察。

联系到图1.1中实验试听者的图示,可建立3种标度,来测量3个基本数组:

- (1) 声事件标度 S , 单元数 s ;
- (2) 听觉事件标度 H , 单元数 h ;
- (3) 表述标度 B , 单元数 b 。

图1.2中,以闭曲面表示3个基本数组和附属于它们的标度。同时也示出了不同数组的单元之间的关系:

(1) 标度功能——实质是测量规则,指明怎么样给基本数组用数字赋值,以形成被执行的标度;

(2) 心理物理功能——图中竖向联系,这些指明基本数组各单元之间的关系,狭义上说,是标度之间的相应关系。

实际上,每次测量精度都有限;按照测量规则,对应于基本数组单元的数也只能在一定的界限内确定。当重复测量时,清楚地发现再现性也有限;重复测量的结果彼此多少有些差别。测量精度和再现性的问题,在几种听觉实验中都发生过。图1.3指出问题出现的位置。让我们举个例子,图中心理物理功能 $h = f(s)$, 表示声事