

立体声应用技术

李宝善 编著

上海科学技术文献出版社

前 言

立体声技术对丰富人们的文化生活，进一步满足人们对音乐的欣赏起着愈来愈重要的作用。当今的高保真录声和放声领域，已几乎被立体声设备所占领。立体声已不再是一个陌生的技术术语，它已愈来愈为人们所熟悉了。

五十年代，电子技术的飞跃进步促进了声频学、电声学的迅猛发展，立体声技术的研究也被普遍重视起来。六十年代是不少国家普及立体声的年代，唱片和磁带录声立体声化了，立体声调频广播得到了很大的发展，双声道立体声技术已趋成熟阶段。一个意外的情况是，四声道立体声在七十年代的崛起並迅速衰落，但双声道组合型重放设备却得到很大的发展，包括将盒式录声机、电唱盘、立体声接收调谐器、声频放大器和音箱组合在一起的家庭音乐中心。

本书着重介绍立体声技术在广播、磁带录放声、唱片录放声以及家庭重放系统等方面的应用，並力求在物理概念方面给读者一个正确、清楚的认识，为此，在本书前几章对立体声的原理和基本概念作了较详细的叙述。本书还用了较少的篇幅对四声道立体声系统和假立体声系统作了介绍，使读者对立体声的应用有一全面的了解。

本书对八十年代立体声技术的发展作了简单展望。显然，现今流行的双声道立体声系统，尚不能完全满足听音的需要，由于它仍然缺乏在音乐厅里听音的那种包围感，身临其境的感受仍然受到限制。人们正在寻找新的环绕声系统，这将是第二代的、更加完美的立体声。至于这种新的立体声系统具有多少通道，现在还很难估计。但有一点是可以肯定的，新的立体声制式必然进一步运用心理声学的研究成果，进一步探索人们听音的生理机理。随着数字技术在声频领域的应用，人们对激光检拾数字声频立体声唱片的发展给予了关注，也许，在八十年代末能够普及。随着大屏幕投影电视的应用，立体声伴音有了可能和需要，电视伴音也许会立体声化。

本书可供研究所、大专院校、工厂、电台等部门从事广播、录声、唱机和唱片生产、收录设备制造的专业技术人员参考，也可供广大无线电、电声爱好者阅读。希望广大读者对本书的不足之处给予指正。

作者 李宝善
1981年4月

目 录

第一章 立体声技术概念	1
1.1 什么是立体声?	1
1.2 音乐厅的现场感——立体声节目的技术组成	1
1.3 单声道与双声道立体声比较—钥匙孔效应	3
1.4 立体声技术发展简史	4
1.5 八十年代初立体声技术发展概况	6
1.6 高保真度与立体声技术的关系	7
第二章 立体声原理概述	8
2.1 声音定位机理	8
2.2 双耳效应、绕射效应与遮蔽效应, 声级差、音色差与时间差、相位差	8
2.3 哈斯效应、德·波埃效应与李开试验	11
2.4 耳壳效应	14
第三章 立体声录声及拾音制式	16
3.1 近代传声器概述	16
3.1.1 电动式传声器	19
3.1.2 电容式传声器	21
3.2 立体声传声器特点	25
3.3 8种主要立体声拾音制式	26
3.3.1 A/B制式	26
3.3.2 X/Y制式	29
3.3.3 M/S制式	31
3.3.4 声象移动(电位)器(Pan pot)制式	33
3.3.5 仿真头(人工头)制式	34
3.3.6 真人头制式	35
3.3.7 ORTF制式	36
3.3.8 声场制式	37
第四章 立体声录声室技术	38
4.1 立体声录声室和控制室的声学要求	38
4.2 立体声录声系统的技术设备	43

4.3 立体声人工混响器	44
4.3.1 立体声钢板混响器	44
4.3.2 立体声箔式混响器	45
4.3.3 立体声扭力传输线	46
4.3.4 人工混响的加入	47
第五章 立体声磁带录声机和磁带	49
5.1 立体声开盘式录声机	51
5.2 立体声盒式录声机	52
5.3 立体声卡式录声机	55
5.4 五种主要类型磁带及其特点	60
5.5 立体声盒式节目磁带的高速复制	62
5.6 杜比系统	64
第六章 立体声唱片和唱机	67
6.1 概述	67
6.2 唱片立体声化的技术途径	68
6.3 立体声唱片录、放声频率预均衡和去均衡	71
6.4 立体声唱片的机械录声	74
6.5 立体声唱片的制版与压片	78
6.6 立体声电唱盘	81
6.6.1 立体声唱头	82
6.6.2 立体声唱针	85
6.6.3 立体声拾声臂	87
6.6.4 立体声电唱盘	89
第七章 立体声广播的发送与接收	91
7.1 早期的试验	91
7.2 调频-调幅 (GE-Zenith) 制式	94
7.3 MPX 指示及立体声/单声道自动切换	96
7.4 立体声调谐器实例	100
7.5 立体声广播网	101
7.6 四声道立体声广播	102
第八章 立体声重放系统	105
8.1 高保真度立体声重放系统	105
8.2 立体声重放系统的主要调节装置	107
8.3 立体声前置放大器	109
8.4 立体声功率放大器	112

8.5 立体声放声音箱·····	114
第九章 立体声耳机和重放 ·····	125
9.1 耳机立体声重放的特点·····	125
9.2 立体声耳机的种类·····	126
9.3 新型半开式耳机剖析·····	127
第十章 四声道立体声系统 ·····	132
10.1 概述·····	132
10.2 分离式四声道立体声系统(CD-4型,4-4-4立体声系统)·····	132
10.3 矩阵式四声道立体声系统(以SQ型为例,4-2-4立体声系统)·····	135
10.4 矩阵式四声道立体声系统(4-3-4立体声系统)·····	137
10.5 三维立体声·····	137
第十一章 模拟立体声系统 ·····	139
11.1 什么叫模拟立体声?·····	139
11.2 频率分割法·····	140
11.3 延时法·····	142
11.4 相移法·····	143
11.5 声象移动器方法·····	144
11.6 2-2-4型模拟立体声·····	145
第十二章 立体声系统的听音 ·····	146
12.1 家庭立体声系统的布局·····	146
12.2 左、右声道平衡的调整·····	149
12.3 左、右声道相位的检验·····	150
12.4 厅堂的立体声系统·····	151
12.5 立体混响(安贝风)·····	153
12.6 汽车立体声听音的发展·····	155
12.7 怎样评价立体声节目?·····	156

第一章 立体声技术概念

立体声技术的发展,已经有二十多年的历史了,如果把早期的方案设想和试验计算在内,那就要追溯到三十年代。

今天,立体声技术已经得到非常普及的应用,它给人们带来高保真度的艺术享受,它在人民文化生活领域内,占有十分重要的地位。

什么是立体声?为什么要发展立体声技术?即使很多人都见到过立体声录声和放声设备,很多人都聆听过立体声音乐,可是要回答上述问题,却也感到并不那么容易。

1.1 什么是立体声?

立体声音乐是一种能够保持原有音乐厅演奏时乐队展开感、宽度感、听音的空间感和一定程度乐音(主要是混响声和反射声)包围感的重放音乐。

换句话说,立体声音乐比普通单声道音乐可以更好地保持音乐厅听音的临场感、现场感和自然感,因而十分优美动听。国外有人把它称作身历声,即可以得到在音乐厅身历其境进行听音的那种艺术享受。

优质的立体声系统重放音乐时,可以准确地分别听出每件乐器声象的准确位置,因而它的重放效果是在听众面前展现整个声音舞台。虽然重放系统只有一对音箱,一左一右地放置在听众面前,但是你决不会感到声音只来自两只音箱。优质的立体声重放,甚至使听众感觉不到两只音箱的存在,而只感觉到展现在你面前的整个乐队的声象群。

在立体声聆听中有一个术语,叫做乒乓效应。顾名思义,乒乓效应就是描述对打乒乓球声音效果的录声。打乒乓球现场的声音是球与桌面和拍子接触的声音,因而,此种声音要么出现在左边,要么出现在右边,是左右分明的,中间部分(球桌中部和球网附近)很大一部分范围是没有声音的。同时,好象中间隔了一堵墙,左边的声音在右边扬声器一点也不会发出,反之亦然。

当然,如果对打乒乓球现场进行立体声录声,录得的效果确实如此。

可是,对音乐,对一个乐队的录声,能够这样去理解吗?当然不是。为了把立体声的技术概念解释得更深更透,为了更好地回答“为什么要发展立体声”这个问题,首先需要对音乐厅中音乐节目的技术组成作一些了解。因为立体声系统的作用就是要在听众面前更好地、更完美的再现在音乐厅里聆听音乐的真实感受,在前面我们称它为音乐厅的现场感和临场感。

1.2 音乐厅的现场感——立体声节目的技术组成

在音乐厅里,当乐队在舞台上演奏,到达听众席音乐信号的组成是十分复杂的,所有这些组成部分,代表着音乐厅的现场感或临场感,如图 1.1 所示。它们包括以下几种信息:

1. 直达声

指乐队演奏直达听众席座位的声音, 它比舞台上乐队演奏发出的声音要滞后一小段时间, 也即声波由舞台到座位的传输时间, 这个延时平均在 50 ms 左右, 它是最主要的声音信息。

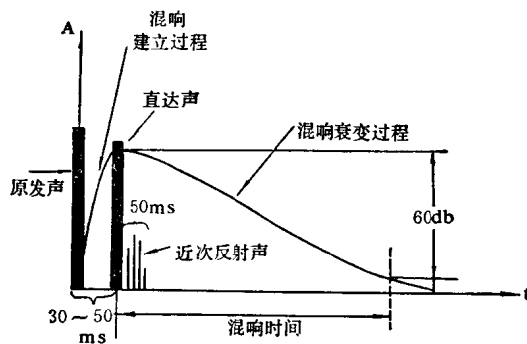


图 1.1 音乐厅里音乐信息的技术组成

长, 声音“发混”, 音乐的层次及清晰度受到破坏。因而, 对于特定的音乐节目, 混响时间有一个最佳值。从大多数优质音乐厅看来, 此值在 1.8~2.2s 之间, 低频段可略长一些。混响时间适当时, 音乐被评为“有水份”, 声音圆润丰满, 感染力强。这也是我国古人夸张地描述听音, 所谓“余音绕梁, 三日不绝”的意境了。

混响时间的计算由著名的赛宾-艾润公式得出:

$$\text{混响时间 } T(s) = \frac{0.164 V}{\sum S [-2.3 \lg(1-\bar{\alpha}) + 4mV]}$$

式中 V ——音乐厅容积(m^3);

$\bar{\alpha}$ ——厅内周墙平均吸声系数;

$\sum S$ ——厅内总表面积(m^2);

m ——空气吸声系数(由声学手册查出)。

混响声还有一个建立过程, 即由乐器发出声音, 至此声音引起的混响到达最大值, 需要一小段时间。混响声的建立时间与厅堂体积关系不大, 大约在 20~50 ms 之间, 低频长一些, 高频短一些。混响时间的建立过程, 对听音的真实感也起一定的作用。顺便说一下, 近代许多人为产生混响声的人工混响器, 已可对混响衰变过程作真实模拟, 但有些混响器产生的混响信息缺乏建立过程, 因而真实感受到损害。

混响声强度在音乐厅内各点大体上是相等的。另外, 它是一种全向性信息, 即在厅内任何一点, 从各个方向来的混响声, 强度基本上相当。

3. 近次反射声

近次反射声又称为有用反射声。它们是由舞台前斜顶、舞台两侧墙面反射到听众厅的声音。由于这种反射途径比直达途径距离长不了多少, 因而只比直达声延时 20~50 ms。

由后面 2.3 节所述的哈斯效应可知, 存在这样的延时声时, 声音的来向仍由先导声信号, 也就是直达声来确定。对超过 30 ms 的近次反射声, 则已经可以感知它们的来向。对于 50 ms 以内的延时声, 它们对原有声音起加重、加厚的作用, 所以称为有用反射声。

经过仔细的听音试验, 发现这种近次反射声的适当排列, 给人们以音乐厅是由墙壁、顶棚框起来的感觉。当改变它们的延时间距时, 人们将感到音乐厅的容积在改变。

2. 混响声

混响声由音乐厅内墙壁、顶棚等对声音信号的无规多次反射所形成, 由于每入射、反射一次, 墙面就吸收掉一部分声功率, 因而混响声强度在一段时间内是逐渐衰减的。混响声由最大值衰减到比它低 60db 所需的时间, 称作混响时间。各个频段的混响时间是音乐厅最重要的声学属性。混响时间过短, 音乐评价起来“发干”, 不动听; 混响时间过长,

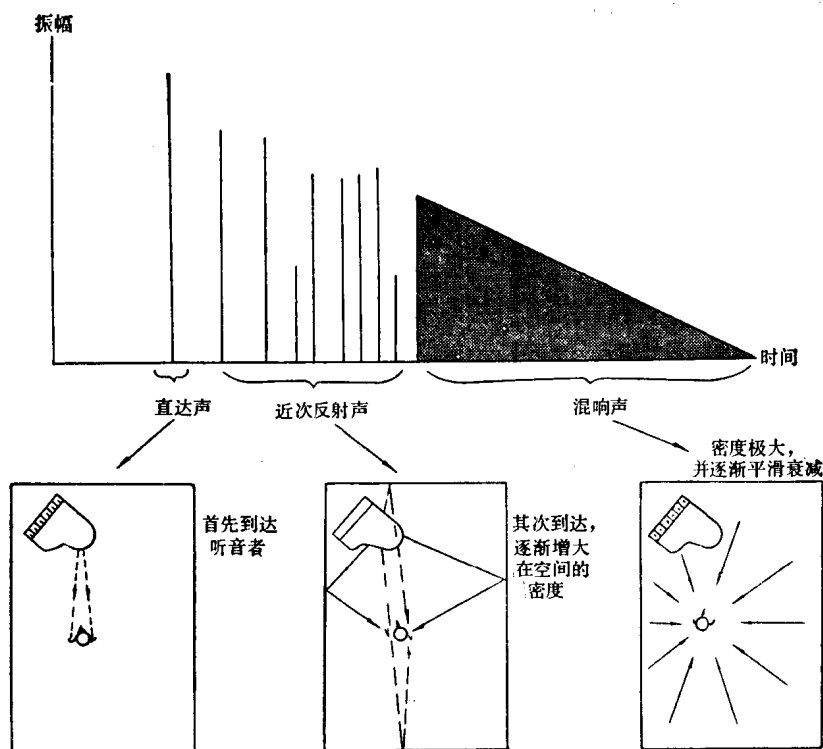


图 1.2 直达声、近次反射声与混响声的形成

还有, 近次反射声的强度, 取决于舞台前斜顶及前侧墙的吸声系数。所以, 这些强度信息给听音者带来厅内墙面装修情况的信息, 例如可以告诉听音者是硬墙还是软质厚幕帷。

图 1.2 进一步给出了以上三种声音信息的形成过程。

4. 乐队的宽度感、展开感、分布感以及深度感

听众在座位上可以明显地感觉到乐队在舞台上占据一定的几何宽度, 各件乐器或合唱的各个声部在舞台上各点的展开, 听众也可以准确地判断各件乐器声音的准确方位, 以及它们的前后(深度感)关系。

因而, 乐队在舞台上是一个复杂的阵声源, 而不是一个简单的点声源。

对乐器深度感的感受, 主要由这件乐器声音到达的迟早所决定。很明显, 后排乐器的声音, 到达听众略有一点延时。

音乐厅的现场感是以上一些复杂信息的综合作用, 它们是作为一个整体呈现出来的, 不能把这些信息过份分隔地看待。

为了要使听音者在家里就能够得到音乐厅里的艺术享受, 就要完美地再现这些信息。下面我们将会知道, 常规的单声道录、放声系统将使这些信息受到很大的损失, 而双声道立体声系统, 则可以在这方面得到许多改进。

1.3 单声道与双声道立体声比较——钥匙孔效应

众所周知, 常规的单声道放声系统只使用一只或一组(指高、低音分频的)扬声器, 因而

只能看作是一个点声源。所以,对单声道放声系统说来,即使录声时采用了多只传声器,放声时听众将仍感到所有声音是来自一个点,即扬声器所在的位置上。因而,十分明显,对1.2节所述直达声、混响声、近次反射声等,听音者只能感到它们来自一个方向,乐队所有各件乐器的声音也都集中在这个点上,因此就根本谈不上展开感、分布感和宽度感了。所以重放音乐的真实感受到很大破坏。

单声道系统唯一能够保留的是各件乐器的深度感,因为各件乐器的相互延时量,单声道系统仍能重放出来。

因此,打一个譬喻,单声道系统重放的效果,好像听音者不是坐在音乐厅听众席上听音乐,而是在音乐厅外的休息厅,通过门上的钥匙孔来听厅内乐队的演奏,因为这时厅内的各种声音信息,包括直达声、混响声、近次反射声等都来自一个方向,都发自同一个点声源——钥匙孔。因此,可以想象,单声道系统对音乐厅现场感的损害是多么严重!

那么,双声道立体声系统的重放能力又如何呢?

可以肯定,双声道立体声系统可以重放出比单声道系统丰富得多的声音信息。首先,由于2.3节所述哈斯效应、德·波埃效应和李开试验的结果,双声道立体声重放系统可以重放出整个乐队的宽度感和展开感,而且对各件乐器的声象都可以使它们准确地分布到原来的位置上去,因而在两组放声扬声器之间,复现出整个乐队完整的声象群。所以,立体声系统重放出来的声音,决不是像1.1节所述乒乓效应那样,从左边扬声器放出一部分乐器的声音,而从右边的扬声器放出另一部分乐器的声音。

对于每个近次反射声,立体声系统也可以在一定程度上重现它们的原来方向。另外,立体声系统要比单声道系统重放出丰富得多的混响信息,此时,混响声的方向无规程度要高得多,对听众形成一定的包围感觉。

综上所述,双声道立体声系统消除了放声的钥匙孔效应,重放的音乐具有气势大,宏伟动听,感染力强等特点,能够较理想地再现音乐厅的临场感和现场感。所以,立体声系统深受广大音乐爱好者的欢迎,并得到了迅猛的普及。不少音乐爱好者都有这样的感受:在听过较高质量的立体声系统以后,就不想再听单声道放声了,此时,就会觉得单声道声音贫乏无味、单薄肤浅了。

今天,在唱片放声、磁带放声、无线电广播等方面都已普及了立体声技术,爱好音乐的人们已经离不开立体声,它在人民文化生活中所占的位置已经愈来愈重要了。

1.4 立体声技术发展简史

立体声技术的发展主要在最近二十年间,这些年随着电子技术、高保真录放声技术的飞速发展,立体声得到了迅速普及。但对于立体声的理论研究,以及提高音乐聆听现场感和临场感的试验,则可以追溯到十九世纪末。

1881年,在巴黎就曾试用两对普通电话线,从歌剧院传送双声道节目到一些用户,用两通道耳机聆听。这是对双耳效应的最早一次试验。很明显,那时候还没有电子技术,没有放大器,拾音的传声器只是电话炭精传声器,因而音质的低劣是可想而知的。

1892年,美国贝尔电话试验室试验双耳电话,据用户反映声音强度高,声音比普通电话

甜蜜、饱满。

1896 年著名物理学家、现代声学理论奠基人之一——瑞利发表了“声学理论”一书，对人们听闻的双耳效应作了较完整的叙述。他提出：人头的遮蔽效应（详见 2.2 节）主要发生在 700~1000 Hz 以上，在 1 kHz 左右，人头直径 b 近似等于声波波长。低频段，判断声音方位主要靠信号到达两耳间的时间差 Δt 。另外，瑞利还指出，遮蔽效应的另一种形式是信号到达两耳间的音色差，对音色差的判断也牵涉到人们过去听闻经验在大脑中的存储，以及随时取出这些信息记忆与当时的听闻进行比较。

对于怎样才能充分地传输音乐厅舞台上乐队演出的现场感，人们很早就有使用多只传声器及多只扬声器分离式系统的设想，见图 1.3。很明显，这种系统在理论上是可行的，在实际上是行不通的。但这种设想却推动了早期立体声技术的发展。例如，有的试验，采用了三个分离的通路。

后来的理论研究和试验工作说明：实际上不必采用那么多通道。经过合理设计的双通道，在一定程度上已经可以较好地传输或记录立体声信息。

立体声技术的发展史简述如下。

1920 年英国哥伦比亚唱片公司制出可录制立体声信息的三通道唱片，三通道为左、中、右，三个声槽相邻排列。

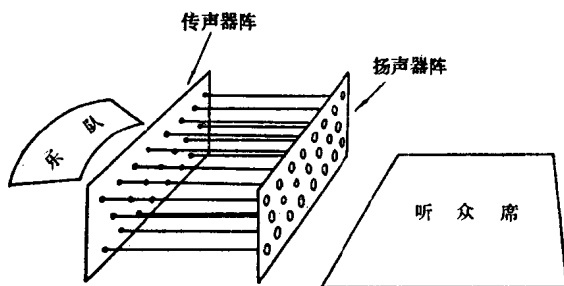


图 1.3 设想中的分离式立体声系统

在二十年代后半期，已经开始进行立体声试验性广播。1925 年柏林电台用两个中波台试播立体声左、右通道信号。同年，美 WPAJ 电台用两个长波台播一套立体声节目，用耳机聆听效果甚好，公认为很成功。当时，两只拾音传声器相距 17.5 cm，由于它们相距很近，当任意收听两个长波台中的一个时，效果也很好，因此单声道接收兼容性较好。1926 年，英国广播公司 BBC 也开始用两个中波台试播立体声节目。

1932 年，贝尔电话试验室研究出仿真头拾音制式。

1933 年 4 月 27 日在美国进行一次非常成功的立体声传送试验。由费城把交响乐演奏用三对电话线传送到华盛顿进行重放，这次试验，在音乐重放的现场感方面评价很高。

1936 年，贝尔电话试验室研究出立体声唱片，当时左、右声道一个采用纵向（垂直）刻纹，另一个采用横向（水平）刻纹。同年，美、英两国都提出了 45°/45° 制式，从而奠定了现代立体声唱片的基础。

1937 年，在电影电视工程学会的年会上放映了立体声电影的样片。

立体声技术在二次世界大战期间几乎完全停止发展。可以记载的是 1944 年在柏林第一次用磁带录声机进行立体声录声，录声的团体是柏林交响乐团。

第二次世界大战以后，立体声技术发展很快，45°/45° 立体声唱片迅速普及。1955 年左右，大量立体声节目磁带开始出售。

1961 年美国联邦通讯委员会 (FCC) 选定了调频-调幅导频制式（即 GE-Zenith 制式）作为立体声广播的标准，那时，仅美国已有 300 个采用此种制式的广播电台了。

1.5 八十年代初立体声技术发展概况

双声道立体声技术早已进入成熟阶段,欧美、日本等声频技术水平较高的国家不但唱片、磁带录声已经立体声化,广播也已经立体声化。

以 $45^\circ/45^\circ$ 作为刻纹制式的立体声唱片,目前多采取大型 ($\phi 250$ 及 $\phi 300$ mm) 轻型密纹形式。加上近年采用数字磁带录声,或不经磁带录声环节直接刻纹,唱片制版采用喷银及高速镀镍工艺,唱片的电声质量已经超过磁带录声方式,因而往往把它当作高保真度的母声源来使用。例如,一般可先把唱片的音乐翻录在盒式磁带上,平时只重放盒式磁带,而将唱片妥善保存,以减少放唱次数,减少磨损。

开盘式立体声磁带录声多用于专业录声、广播系统中,而立体声盒式磁带录声方式则已迅速普及到每家每户。值得特别提出的是立体声盒式录声机在汽车中的普及。由于汽车数量日益增大,人们在汽车里消磨的时间也日益增多,愈来愈多的汽车里装上了盒式录声机。一对立体声扬声器有些装在汽车后窗的两内侧,有些装在两扇前车门的两内侧。

近年来卡式 (Cartridge) 录声机也得到了一定的发展,由于它很适用于自动化系统中,以及它的电声技术指标很高,因而在广播电台自动化系统中,起着很重要的作用。卡式录声机使用宽 6.25 mm 的磁带,是一个无头磁带环,装在特殊的塑料盒子内,一般,磁带上上面有 8 个磁迹,可录四组双声道立体声信号。

欧美及日本等国均采用调频-调幅导频制式作立体声广播,我国也已确定选用此种制式。瑞典曾花了不少力量研究调频-调频制式,其特点是两声道间串音指标高,而且便于作双节目广播使用,但与调频-调幅导频制式不能兼容。另外,日本等国已有少量四声道立体声调频广播电台,四个信号编码以后,信号总频带宽度延伸到 97 kHz,再将此信号对超高频载波进行调频,这种制式称为哈士德 (Halsted) 制式。

立体声技术也可以应用在扩声系统中,我国北京人民大会堂,即采用了立体声扩声系统作音乐扩声。

七十年代初期,日本首先发展了四声道立体声技术(详见第十章),四声道立体声是一种环绕声系统。在开始的 1~2 年曾颇为轰动,但很快就冷落下来。目前,世界各国大多数声频专家,都认为目前的四声道立体声技术,不论是分离式的或矩阵式的,都不很成功。他们主要根据以下四点理由:

1. 四声道立体声不论是菱形排列(重放扬声器在前、后、左、右四个位置),或是方形排列(重放扬声器在左前、右前、左后、右后四个位置),听音效果较好的区域,只有室中央一小块地方。而且对听音室的要求非常临界,室内最好少放东西,混响时间要短,这些条件在日常家庭生活中是较难得到满足的。

2. 这种系统造价昂贵。

3. 容易产生声象飘移现象。这对分离式四声道系统还好些,对矩阵式四声道系统则尤为严重。这个缺陷是一个“致命伤”,因为立体声系统的重要属性,就是应该保持稳定的重放声象。

4. 用双声道立体声信号可以加工成模拟四声道立体声信号,具有一定的电声质量,而且造价要便宜得多。通常的做法是从左、右声道中分别进行取样,加入一些人工混响及延

时,放大后从左后、右后扬声器中放出,所以这种模拟四声道立体声称作2-2-4系统。即录音和记录是两声道,重放是四声道。

所以,从七十年代后期开始,不少国家都在探讨新的环绕声系统,这种新的系统究竟采用多少个通道,目前还很难估计。不过,有一点是肯定的,就是它必须克服目前四声道立体声的一些缺点,而且还必须考虑可以作双声道立体声甚至单声道系统兼容重放。

新的立体声电视也在加紧研究中,它必须克服声象位置与图象位置不相吻合的问题。另外,立体声技术在宽银幕电影中应用的问题,也在重新研究的过程中。

1.6 高保真度与立体声技术的关系

很长一段时间以来,高保真度与立体声技术的关系往往有些混淆。当然,两者是两个完全不同的技术概念。它们的关系概括起来说应该是这样的:高保真度的概念包含了立体声这个技术范畴在内,但高保真度又是立体声系统得以充分发挥其优越性的前提。另外,并不只是立体声系统才有高保真度的要求,单声道系统同样是这样要求的。

下面再就两者的关系稍作讨论。

什么是声频、电声系统的高保真度呢?高保真度的英语原词是 High-Fidelity,简称 Hi-Fi,但也有人称为高传真度。但从它也描述各种录声设备的质量这一角度说来,“传”字似乎不能包含录声的概念在内,因而以用前者为妥。

高保真度指声频、电声系统和设备,如实反映声音信号的音色、音高、音强和方向感等音质状况原来面貌的能力。换句话说,就是衡量这个系统能不能把音乐厅的演奏现场,在听音者的家里再现出来,能不能保持音乐厅聆听音乐的现场感和临场感。因此,评价一个电声系统是否达到高保真度,最好的办法是拿重放出来的声音去和演奏现场的音乐进行比较。

再有,引伸来说,近代高保真度技术实际上还把对声音信号进行必要的修饰、加工能力包括在内了,也就是说,使声音逼真并美化。有时电声系统重放出来的音质,甚至可以比音乐厅现场听音更上一层楼。

要想达到声频、电声系统的高保真度,就必须对它的一些技术指标进行严格控制。过去传统的三大指标是:频率特性(频率响应)、谐波畸变和信号噪声比,以后又提出了互调畸变和相位畸变指标。近年,人们又特别关注声频系统和设备对突发声信号的跟随能力,因为所有的音乐、语言信号都是脉冲形式的、突发形式的,而不是稳态信号,所以又提出来需要控制瞬态响应和瞬态互调畸变指标。对于功率放大器,人们还很重视它的阻尼系数指标。对扬声器、传声器、耳机等电声器件,除上述各项指标以外,还需控制指向性、灵敏度、效率等。

如果声频、电声系统(包括拾音、录音、放声系统)的上述一些技术指标都很高,那么,应该可以给出很好的音质。但对真正的高保真度系统,仅仅达到这些是不够的,还要进一步给出1.2节所述复杂的音乐厅的现场信息,包括乐队的宽度感、展开感,乐器的方位,丰富的、具有方向信息的混响声和近次反射声等等,这就要借助立体声技术的发展了。

由此,可以清楚地看出,高保真度包含了立体声的含义在内。可是对于一个立体声系统,前述一些控制指标应该达到一定的水平,否则也就谈不上重放出好的立体声效果来。不能设想,一个谐波畸变很大的或频带狭窄的立体声系统,能够重放出具有良好音乐厅现场感的声音来,那时,即使系统是立体声的,也发挥不出它应有的作用来。

第二章 立体声原理概述

研究立体声原理,不仅要牵涉到声频学和电声学方面的问题,还要牵涉到心理声学 and 生理声学方面的许多问题。应该说,至今对立体声的理论,还只弄清了一些基本机理,对许多细节,尚待进一步的研究。例如,只是在五年以前,人们才开始注意到人的耳壳对声音定位起着很大的作用。因而,人们靠单耳也有相当强的定位作用。在这以前,人们只知道双耳效应——靠双耳的共同功能对声音进行定位。可以肯定,随着心理声学这门新的边缘科学的继续开拓,对声音方位、来向的感觉机理,一定会提到新的认识高度上。

2.1 声音定位机理

对某一个声音信号的方位、来向,和对集群声音信号(如合唱团、乐队)的展开感、宽度感的感覺能力,是人们听觉系统天然具备的能力。正如人的眼睛对所观察的景物有透视感、深度感一样。因而立体声和立体象是人们本来应该感受到的和具备感受能力的东西。古典声学告诉我们,人对声音立体感的感受能力主要依靠双耳,所以称为双耳效应。但近年来,双耳效应的理论受到强烈的挑战,这就是本章后面要讨论到的耳壳效应,它对立体声的听闻也有很大的影响。

双耳听闻立体声的机理是十分复杂的。概括地说:由于人们双耳的位置是在头部的两侧,假如声源不在听音人的正前方,而是偏向一边,即偏离听音人正前方的中轴线,则声源到达两耳的距离不等,声音到达两耳的时间与相位有差异。同时,人头对侧向入射的声波,对其中一只耳朵有遮蔽效应,因而到达两耳的声级也有差异。

人的大脑有如一架复杂的计算机,可以把听觉器官感受到的这些相当微细的差别加以综合分析,并与原来就存储在大脑里的听觉经验(对声音方位、来向感知的经验)进行比较,在极短的时间内作出反应,辨出声音的方位来。事实说明,这种辨别能力决不是只对单一声音信号,而是对复杂的集群声音信号的各个细节,人们都具强有力的感知能力。

2.2 双耳效应、绕射效应与遮蔽效应, 声级差、音色差与时间差、相位差

对到达两耳的声音的声级差(或称强度差),主要是指较高频率的声音,而不是低频。声学常识告诉我们,前进中的声波如果遇到几何尺寸等于或大于声波波长的障碍物,会对声波起遮蔽作用,在障碍物后面形成声阴影区;但对几何尺寸小于声波波长的障碍物,声波可以绕射过去,称为绕射效应。

所以,由于绕射效应,低频声可以绕过人的头部而到达被遮蔽的那只耳朵,由于头部直径不过 20 cm 左右,它所多走的路程很有限,绕射的损失很小,因而偏离中轴线的低频声源,到达两耳的声级差几乎为零,特别当声源离听音人稍远一些时更是如此。

可是,对频率较高的声波,则不能绕过头部,所以到达被遮蔽的那只耳朵的声级,将因存在声阴影区而低得多。频率愈高,声源偏离中轴线愈多,声级就低得愈多。这种现象称为遮蔽效应。上述两种效应示于图 2.1 中。

应该说明的是:声级差还包含了音色差的概念在内。根据对遮蔽效应和绕射效应的分析,对于一个复杂波,也即包含着高次泛音的声音(事实上几乎所有自然界的声源,包括乐音,都是复杂波),它的基音和低次泛音很可能产生绕射效应,而高次泛音则被头部遮蔽。因而,到达一只耳朵的声音,是原来的音色,到达另一只耳朵却由于高次泛音声级的明显降低,而使音色发生变化。所以,音色差是不同频率信号声级差的另一种反映,两者的起因是相同的。

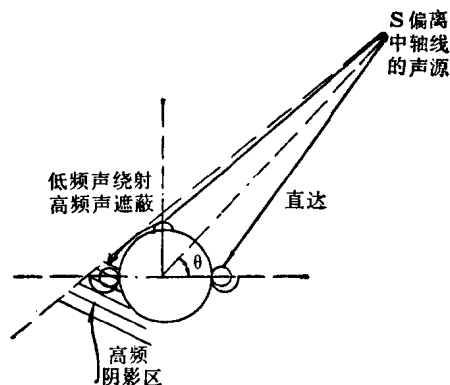


图 2.1 绕射效应和遮蔽效应

实验证明,在一般的听音距离,尽管声源位置在变化,声源对听音人的入射角度在变化,对于频率低于 $300 \sim 400 \text{ Hz}$ 的声音,声级差 $\Delta p \approx 0$ 。但如果声源在极近距离,声波入射角 $\theta = \pm 90^\circ$,也即声源入射方向正好从侧面对准左耳或右耳,此时,当 $f = 300 \text{ Hz}$, Δp 最大可接近 10 db 。所以,对十分靠近听音人的声源,方位又十分偏离中轴线,即使声音频率较低, Δp 对声音判断也有一定作用。

在 300 Hz 以上,在听音者正前方区域, Δp 随 θ 角改变有明显变化,也即: $\frac{\Delta p}{\Delta \theta}$ 值较大。在高频段, Δp 值可增大到 20 db 。所以,很明显,高频声定向主要靠 Δp 。

对时间差 Δt 来说,本来与频率无关,它只反映声音到达两耳有先后所造成的相对时间差异。但是, Δt 和相位差 $\Delta \phi$ 是密切相关的。低频声的波长很长,例如在常温空气中 20 Hz 声波的波长是 17 m , 200 Hz 是 1.7 m ,因而时间差产生的相位差,在一定数量级内,可以作为确定声音方位的一种信息。而高频声波长短,例如 10 kHz 是 3.4 cm , 20 kHz 是 1.7 cm ,

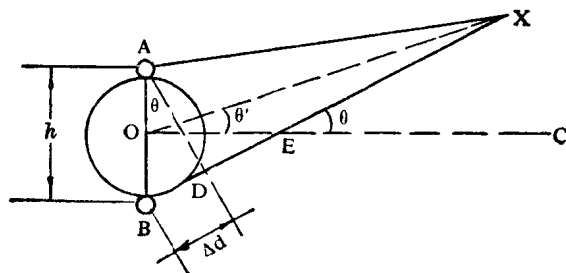


图 2.2 时间差 Δt 的计算

时间差会形成很大的相位差,甚至超过 360° ,亦即开始另一个波长。所以相位差作为表达声音方位的信息已无任何价值,因为已无法分辨相位是超前还是滞后,因而被称为“混乱的相位差”信息。所以,时间差对各个频率的声音确定方位都有用,而相位差只对低频声有用。

如图 2.2,时间差的计算大致如下:

从点声源 X 至人头中心连线为 XO , XO 与人头中轴线 OC 的夹角为 θ' , θ' 即代表声源方向的角度。再设 X 点离听音者足够远(实践证明, 1 m 远已可满足远距离条件),则 X 和人右耳联线 XB 与直线 OC 的夹角 $\theta \approx \theta'$ 。

由于

$$AB \perp OC, AD \perp BX,$$

所以,

$$\angle BAD = \angle XEC = \theta。$$

在三角形 ABD 中,

$$\sin \theta = \frac{\Delta d}{h}$$

$$\Delta d = h \sin \theta$$

人头直径

$$h \approx 21 \text{ cm},$$

所以

$$\Delta d = 21 \sin \theta$$

时间差

$$\Delta t = \frac{21 \sin \theta}{C}$$

$$C = 344 \text{ cm/s (声速)}$$

所以

$$\Delta t (\text{ms}) = 0.62 \sin \theta$$

当 $\theta = 90^\circ$, 也即声源来向与两耳连线重合时, $\Delta t = \Delta t_{\max} = 0.62 \text{ ms}$ 。

人耳对偏离 3° 的方向可以进行分辨, 也即 $\Delta t \approx 3 \times 10^{-5} \text{ s}$ 。

相位差 $\Delta \phi$ 可由 Δt 计算:

$$\Delta \phi = 2\pi f \cdot \Delta t$$

式中 f ——频率(Hz)

综上所述, 进一步阐明了:

$\Delta \phi$ 是低频声定向的主要依据,

Δp 是高频声定向的主要依据,

Δt 对判断瞬态声的方向贡献较大。

以上均指听音者离声源较远的情况。前面已经涉及, 如果在很近距离, 即使是低频声,

Δp 也很明显, 因而也提供方向信息。相反, 在很近距离的某些区域, 即使是低频声, $\Delta \phi$ 或 Δt 均不能用来解释定向作用, 这种现象称为双曲线效应, 如图 2.3 所示。

如果以两耳位置 A 、 B 为焦点, 绘出一组双曲线, 则在双曲线上任何一点 X , 必然满足以下条件:

$$BX - AX = \text{常数 } C (\text{双曲线定义})$$

换句话说, 在双曲线上任意一点, Δt 或 $\Delta \phi$ 为恒定值。也就是说, 即使 X 点位置在变换, XO 线与中轴线夹角 θ 在变化, 只要 X 点还在双曲线上, Δt 或 $\Delta \phi$ 便不会变, 那又怎能用 Δt 与 $\Delta \phi$ 来说明声源方向 θ 呢?

所以, 按上述分析, 在很近的距离, 定位机理和远距离不

一样, 低频声、高频声都主要依靠 Δp 来定位。

再深入探讨一下声音定位问题, 还有以下一些有趣的现象:

1. 在中频区(如 $2 \sim 4 \text{ kHz}$ 附近), 频率不高不低, 相位差已接近进入“混乱的相位差”范围, 而头部的遮蔽效应却刚刚开始发生, 因而相位差、声级差都不能提供十分充分的方向信息。所以, 人耳对中频 3 kHz 左右声音的定位作用较差, 这是理论分析的结果, 基本上符合听音试验的结果。

2. 时间差主要是指声音刚到入耳瞬间先后的时间差别。因而突发声、瞬态声可以更好地利用时间差来作定位信息。这时, 定位作用取决于声音传来的最初瞬间。

连续的声音虽然到达双耳也存在时间差, 可是, 同时到达某一只耳朵的后面的声音掩蔽

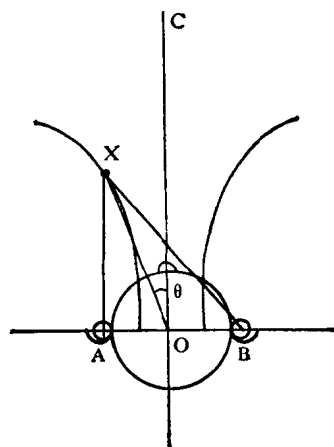


图 2.3 双曲线效应示意图

着前面的声音,以致使时间差定位效应不明显。实践证明,人耳对枪声、打击乐器等瞬态声有更强的定向能力。

3. 人们对复合声方向的辨别力高于对纯音方向的辨别力,这是因为前述音色差帮助了复合声,提供了更多的方向信息。

对从听音者背后来的声音,也是容易辨认的。这是因为人的耳壳朝向前方,对背后来的声音有明显的遮蔽效应,特别对高频声更是如此。所以,可借助耳壳附加的 $4p$ 、 $4t$ 和 4ϕ , 以及音色差等方向信息,来辨明声音是前方来的还是后方来的。

以上所述都是指人们借助双耳效应对一个点声源进行辨别的情况。

在双声道立体声重放系统中,为了获得声象定位及宽度感效果,必须同时使用两组扬声器系统,而每组扬声器系统的声音都会到达人的左、右耳,人们的主观感觉是两耳接收两个声源迭加后的综合结果。总的说来,两个声源都能到达听音者双耳这种状态,冲淡了各种定位因素的作用,因而情况要比前面的分析复杂得多。

这种双声道立体声的定位机理,除了前述一些定位因素继续有效以外,还有赖于描述双声源特征的哈斯效应、德·波埃效应与李开试验。

2.3 哈斯效应、德·波埃效应与李开试验

哈斯效应描述两个声源,其中一个延时 $4t$ 为 $5\sim 35\text{ ms}$ 以内时,两个声源合并成一个,听音者只能感到前导的声源,好象声音完全由那里来,对滞后声源感到好象并不存在似的。但是如果:

$$4t = 30 \sim 50\text{ ms}$$

则开始感到滞后声源的存在,但声音来向仍由前导声源确定。当 $4t > 50\text{ ms}$ 时,滞后声源将成为清晰的回声,两者的方向分别由它们自己来确定。

德·波埃效应指出:当与听音者中轴线左右对称的两个声音的 $4p$ 与 $4t$ 均为零时,则感到声源来自中轴线方向。如果 $4p$ 加大,则声象向着声音响的声源方向移动。若 $4p \geq 15\text{ db}$, 则会感到声音完全来自较响的声源。

如果 $4p = 0$, 改变 $4t$, 则感到声象向先导的声源移动。当 $4t \geq 3\text{ ms}$, 声象就好象完全来自先导的声源。

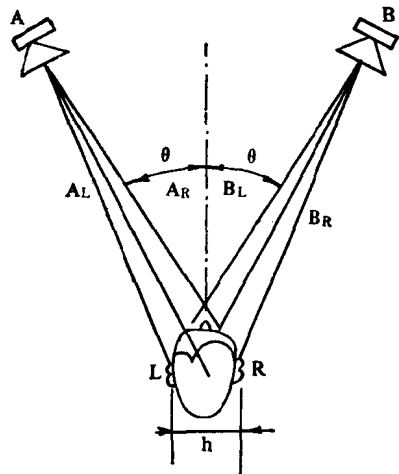
由德·波埃效应可见, $4p$ 与 $4t$ 可起同样的作用,其换算关系是:

5db 的 $4p$ 相当于 1ms 的 $4t$ 。

在哈斯和德·波埃之后,李开又对双声道立体声重放系统的功能,进行了深入的试验工作。在哈斯效应和德·波埃效应中,对于左、右扬声器的声音,都能到达听音者左、右两耳这个复杂现象叙述得不够详细,李开试验则着重地说明了这方面的原理。

李开引用了通道间的 $4p$ 和 $4t$ 来描述两组扬声器系统的放声,引用了听觉间的 $4p$ 和 $4t$ 来描述听音者两耳的听音。很显然,通道间和听觉间完全是两个不同的范畴,不能混为一谈。李开指出,只有用立体声耳机进行重放,通道间的 $4p$ 才能等于听觉间的 $4p$, 通道间的 $4t$ 才能等于听觉间的 $4t$ 。从这方面也可以看出,用立体声耳机聆听立体声节目的优越性了,它消除了两声源到两耳间的交叉信号,从而保存了节目中各种立体声信息的原来面貌。有关这一点,在 3.3.5 节人工头拾音制式一节中,还要进行详细讨论。

左扬声器到达右耳的声音信号和右扬声器到达左耳的声音信号, 被称为通道间与听觉间的交叉信号。如图 2.4 所示, A_R 、 B_L 是交叉信号, A_L 、 B_R 是主导信号。显然, A_R 与 A_L 间的 Δt 等于 B_L 与 B_R 间的 Δt , Δt 值的计算方法同 2.2 节中图 2.2 节所示。当然, 这里的分析都是假定听音者在两只扬声器中点正前方, 而且左、右声道信号 A 、 B 间的 $\Delta p=0$, $\Delta t=0$ 。



现假设 A 、 B 间出现 Δp , 则此通道间 Δp 会造成听觉间的 Δp , 但由于有交叉信号 A_R 、 B_L 的存在, 在低频段还会产生一个新的时间差 Δt_1 , 这个 Δt_1 的计算推导较为复杂, 因此直到 1957 年才发表。由于在低频段, Δt 与 $\Delta \phi$ 是同样有效的, 所以对 Δt_1 的推导结果, 用 $\Delta \phi_1$ 来表示如下:

$$\Delta \phi_1 = \frac{A-B}{A+B} \frac{\omega h \sin \theta}{v}$$

式中 $\omega=2\pi f$, f 为声波频率;

v ——声速, 34400 cm/s;

h ——头部直径, 可取 20 cm;

图 2.4 通道间与听觉间交叉信号的影响 θ 角如图 2.4, A 、 B 分别为左、右声道的声压。

所以, 由于交叉信号的存在, 通道间声级差不但产生听觉间声级差, 而且还附加产生了一个听觉间相位差 $\Delta \phi_1$ 。

另一方面, 如果左、右扬声器保持声级相同, 即通道间声级差为零, 而引入一个通道间时间差, 这个通道间时间差同样不只是引起听觉间时间差, 这也是由于交叉信号存在的缘故。

李开对双声道扬声器重放系统通道间的 Δp 与 Δt 作了充分的研究。他的大量试验证明: Δp 与 Δt 引起人们听觉上的反应与试听声音素材无关, 与使用的声压级绝对值无关, 而且对所有的听音者试验结果的一致性甚好。

对只存在 Δp 的双声道扬声器重放系统, 李开导出了声象方位的计算公式, 这个公式是经过简化了的, 但与试验结果十分吻合。声象方位以 α 角示出, 见图 2.5。 α 角与 θ 角的关系为:

$$\sin \alpha \approx \frac{A-B}{A+B} \sin \theta$$

应该说明, 上述公式主要在低频段有效。这是因为一旦进入高频段, 由于交叉信号引起的 Δt 与 $\Delta \phi$ 的关系要复杂得多。经过进一步的研究, 发展了高频方面的理论, 指出了如下事实: 当两声道同相时, 只能在低频段对声象位置正确再现。当 θ 角较大时, 即使一个通道完全反相, 对高频定位也只有很小影响。如前所述, 这是因为在高频区已进入了“混乱的相位”状态, 定位主要依靠声级差 Δp 。

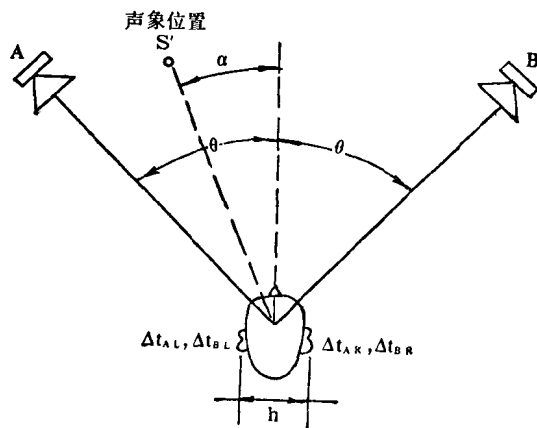


图 2.5 对只存在 Δp 的双声源所产生的声象方位

上面我们只讨论了听音者位于两只扬声器中点的正前方情况。如果听音者偏离此中轴