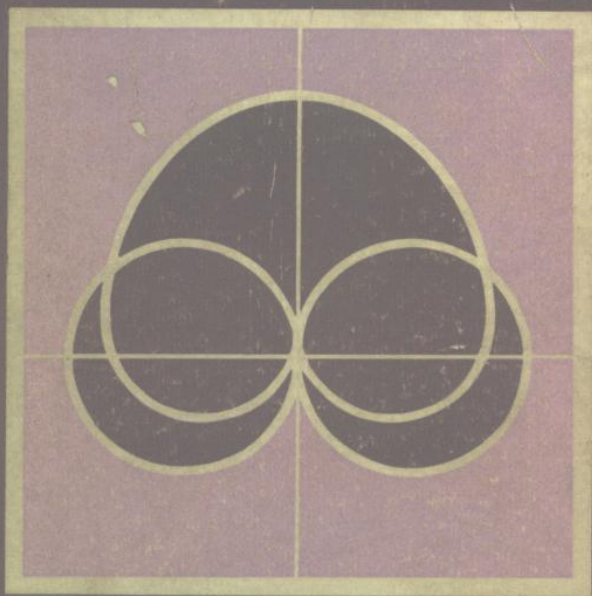


立体声原理

谢兴甫 编著



科学出版社

立 体 声 原 理

谢兴甫 编著

科学出版社
1984年

内 容 简 介

本书比较全面地论述了各种立体声系统的原理、发展状况和最新成就。

全书共十八章，大致分为三部分：第一部分（第一章到第十章）叙述双耳听觉特性，讨论双通路立体声。第二部分（第十一章到第十七章）论述全景声。第三部分（第十八章）讨论声像重发扩展到三维空间中的问题。

本书可供从事立体声研究的科技工作者、广播技术工作者和工程技术人员参考。

立 体 声 原 理

谢兴甫 编著

责任编辑 赵惠芝

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981年9月第一版 开本：787×1092 1/32

1981年9月第一次印刷 印张：13 7/8

印数：精1—4,040 插页：精2
平1—5,300 字数：315,000

统一书号：13031·1640

本社书号：2248·13—3

定价：布背精装 2.65 元
平 装 2.15 元

序 言

有关听觉上的立体感觉,或者所谓“声学透视”问题,早在上一世纪末已有人从事研究。然而其主要发展却是在近四十多年,尤其是在最近二十多年间。

目前立体声的重发不仅限于聆听者前方几十度范围内的声像位置排列,而且已经将这种排列范围无畸变地扩展到聆听者四周甚至包含整个空间,并且在聆听上使人感到一种临场的感觉,从而提高了重发声音的真实性和增强了艺术效果。

此外,也可用立体扩声来改进厅堂的声学性能,使建筑上一些难以解决的声响问题能够应用电声方法妥善解决。在演讲时采用立体扩声还可以提高扩声的清晰度,使听众易于听清。

虽然立体声的发展目前已经取得了不少成就,但是在我国,这门技术仍较落后,有关文献也不齐全。为此,作者不揣浅陋,将国内外有关这方面的发展情况和最近所取得的成就加以总结,编著成此书,希望对从事声学研究工作的同志能有所裨益。

本书共分十八章,大致划分为三部分:第一部分叙述双耳听觉特性后(第一章),进而讨论双通路立体声,其中包括波阵面型、假头型和声级差型三种立体声系统(第二至第四章)以及聆听条件(第五章)和立体声信号的记录、传输方法(第六、七两章);也讨论了“准”和“假”两种立体声系统(第八、九两章);此外还附带叙述了厅堂立体声系统(第十章)。第一部分包括了立体声发展前期的全部内容,对于初学者来说,由此入门就比较容易。

第二部分包括了全景声的全部内容，是将第一部分声像排列在聆听者前方只有几十度的范围扩展至整个水平平面，其中也讨论了各种类型的立体声系统和信号记录、传输方法（第十一章至第十六章）。第十七章结合双通路立体声和全景声两方面而对声场和声像作了定位分析和自然度的讨论，指出了重发声场的品质改进方法。这部分与第一部分包括了目前立体声发展得比较成熟的大部内容。对于已经熟悉双通路立体声的读者，也可以从这一部分看起，而不一定详读第一部分。

第三部分讨论了把声像的重发扩展到三维空间中的问题（第十八章），这是立体声发展的前沿。

本书基本上是按照立体声的发展过程来编排的，也就是依据事物的认识是从低级到高级，从简单到复杂的次序；这样可能使读者比较容易接受。不过，由于作者水平有限，其中必然还有错漏之处，希望广大读者指正。

在本书写作过程中和我近二十多年来在这方面的 工作中，我的老师冯秉铨教授曾不断地予以鼓励、支持、指导和帮助，并且审阅了全稿。不幸他已逝世，未能看到此书的出版，实为憾事，谨以此书表示纪念之意。此外，梁淑娟同志曾协助整理原稿；上海中国唱片厂李宝善同志也曾详细看过全稿，并且提出了宝贵的意见，在此一并对他们表示谢意。

谢兴甫

一九七八年春于华南工学院

目 录

引言	1
第一章 双耳听觉特性	5
§ 1.1 时间差与相位差	5
§ 1.2 声级差与音色差	9
§ 1.3 双耳定位机理	12
§ 1.4 双扬声器实验	16
§ 1.5 优先效应	19
第二章 波阵面型立体声系统	24
§ 2.1 三通路波阵面型立体声	24
§ 2.2 双通路 AB 型立体声	29
§ 2.3 声像的位置畸变	32
§ 2.4 减低声像位置畸变的一些方法	37
第三章 假头型立体声系统	44
§ 3.1 假头型双耳听觉传输	44
§ 3.2 假头型立体声	45
§ 3.3 立体声的矩阵表示	48
§ 3.4 立体声的矩阵分析	50
§ 3.5 立体声重发中声像位置畸变的矫正	54
第四章 声级差型立体声系统	60
§ 4.1 声像位置与声级差的基本关系	60
§ 4.2 XY 型立体声	67
§ 4.3 MS 型立体声	72
§ 4.4 立体声的和差变换	77

§ 4.5	立体声的检拾和指示	80
§ 4.6	界外立体声重发	87
第五章	立体声的聆听	94
§ 5.1	立体声系统的比较和选择	94
§ 5.2	扬声系统的布置	98
§ 5.3	电声质量	104
§ 5.4	立体声的聆听设备	110
第六章	立体声的记录	116
§ 6.1	概说	116
§ 6.2	45/45 盘式立体声录音	117
§ 6.3	磁性立体声录音	124
§ 6.4	正交声迹与偏角声迹磁性立体声录音	129
§ 6.5	调制式立体声录音	134
第七章	立体声广播	140
§ 7.1	概说	140
§ 7.2	调幅波立体声广播	143
§ 7.3	GE-Zenith 立体声广播系统	147
§ 7.4	立体声检波	151
§ 7.5	其他副载波调制的调频立体声广播系统	156
§ 7.6	电视立体声广播	162
第八章	准立体声和仿真立体声	169
§ 8.1	概说	169
§ 8.2	准立体声系统	170
§ 8.3	立体声的模拟	175
§ 8.4	移相声级差型仿真立体声系统	178
§ 8.5	三输出通路仿真立体声系统	184
第九章	混响信息的传输和模拟	188
§ 9.1	概说	188
§ 9.2	混响信息的传输	189
§ 9.3	混响信息的模拟(合成混响)	192

§ 9.4	声音的空间印象感觉模拟	198
§ 9.5	人工混响的缺点及其改进	204
第十章	厅堂立体声	210
§ 10.1	概说	210
§ 10.2	电影立体声	211
§ 10.3	立体声扩声	214
§ 10.4	舞台上移动声源的模拟	218
§ 10.5	立体混响	221
§ 10.6	厅堂声学特性的电声控制	225
第十一章	波阵面型平面环绕声系统	230
§ 11.1	概说	230
§ 11.2	波阵面型平面环绕声	234
§ 11.3	波阵面型四通路立体声	237
§ 11.4	ART 系统	241
第十二章	声级差型平面环绕声系统	246
§ 12.1	多通路声级差型平面环绕声	246
§ 12.2	方形排列四通路立体声	252
§ 12.3	四通路立体声信号的检拾	256
§ 12.4	全景分压器的运用和录声指示	260
§ 12.5	运动声源的模拟	265
§ 12.6	四通路扬声器的布置	271
第十三章	平面环绕声的信号变换	275
§ 13.1	菱形排列四通路立体声	275
§ 13.2	三角排列平面环绕声	279
§ 13.3	全景声的信号简化	284
§ 13.4	四通路立体声的 4-3-4 变换	287
§ 13.5	平面环绕声的六输出通路系统	292
§ 13.6	平面环绕声的 4-3- N 重发系统	295
§ 13.7	UMX 方位编码系统	304
§ 13.8	方形排列 UMX 方位编码系统	310

第十四章	四通路立体声信号的记录和广播	315
§ 14.1	四通路信号的磁性录声	315
§ 14.2	四通路立体声信号的编码录声	318
§ 14.3	四通路信号的盘式录声	322
§ 14.4	四通路立体声广播	327
§ 14.5	副载波正交调制四通路立体声广播	331
§ 14.6	副载波正交调制四通路立体声广播系统中的第四通路处理	335
§ 14.7	MXV 型四通路立体声广播	338
第十五章	准四通路立体声系统	345
§ 15.1	概说	345
§ 15.2	菱形排列准四通路立体声	347
§ 15.3	方形排列准四通路立体声	350
§ 15.4	四通路立体声的矩阵变换	357
§ 15.5	SQ 变换	362
第十六章	仿真四通路立体声系统	370
§ 16.1	四通路立体声的模拟	370
§ 16.2	后方混响信号的模拟	374
§ 16.3	2-2-4 型仿真立体声	377
§ 16.4	1-1-4 型仿真立体声	384
第十七章	立体声场的分析和重发声的自然度	387
§ 17.1	立体声场的分析	387
§ 17.2	方向听觉的能量理论	393
§ 17.3	ΔP - $\Delta\varphi$ 平面	398
§ 17.4	重发声的自然度	403
§ 17.5	四通路立体声系统的改进	407
第十八章	三维空间环绕声系统	410
§ 18.1	概说	410
§ 18.2	三维空间环绕声的检拾和重发	411
§ 18.3	三维空间环绕声的 4-4-8 重发	417

§ 18.4	三维空间环绕声的棱锥形重发和菱体形重发·····	419
§ 18.5	半三维空间环绕声·····	423
§ 18.6	半三维空间环绕声信号的四通路重发和无线电广播 ·····	431

引 言

在人们的听觉中，除了对声音的强度、音调和音色的感觉外，还有一种空间印象的感觉。因此，除了视觉，我们还可以用双耳的听觉特性对声源的方向和距离作出判断。譬如在音乐演奏会中，聆听者不但可以从音色中区别各种乐器的类别，而且应用双耳听觉特性，还可以判别各种乐器的位置。又如对于来自自己背后的事物或者现象，我们常常只凭听觉上所具有的这种定位能力来判断这些事物或者现象的存在，并且估计其方向和任何瞬刻对自己的接近程度。此外，在漆黑的夜间或者在大雾迷漫的白昼，我们也常常凭借双耳的定位能力去探索自己周围可能发生的危险事件，从而及时地采取适当措施。

不仅如此，我们还能够把听觉集中于某一个方向的声源，将来自其他各个方向的声音归于自己的感觉背景之中。由于听觉具有这种能力，我们才可以在几个人之间，甚至在嘈杂环境或者在混响较大的房间里进行交谈。

听觉上的这种定位现象，十九世纪末叶以来^[1]虽经许多学者研究，但是，直到现在还没有一个圆满的理论系统。不过可以肯定，产生双耳效应的原因是由于聆听者自己的头部对入射声波所引起的衍射作用，以致声音到达两耳之时形成了声级差和时间差（或者音色差和相位差）。因此，当声音到达两耳时，我们可以将其和过去的经验比较，从而确定声源的方向。至于深度方面的定位问题，则与聆听者所听到的直接声和混响声的强度比有关^[2]，但并非唯一的关系。

在听觉方面,我们既然具有这种空间印象的感觉,或者说具有“声学透视”的特性,因此,在声音的记录、传输或者重发时,如欲保持其高度的真实性,一般单通路的电声系统是不能满足这种要求的。虽然在普通的单路声重发中,在一定程度上也可以使聆听者感到深度效应,但却没有方向的感觉,所以始终不能与原声场中聆听的情况相比拟。

为了解决声音重发上的这类问题,早在 1881 年的巴黎电气展览会上,曾有人以两个碳粒传声器连接几对耳机,作了双通路的立体声传递表演^[3],并且取得了一定的成绩。1933 年,在美国的费城和华盛顿之间作了一次波阵面式的三通路立体声传递试验^{[4]-[5]},其效果一般认为相当成功。此后遂将其应用到电影中,并且发展成为今日众所熟知的宽银幕电影中的三通路立体声系统和特宽银幕电影中的五通路立体声系统。

另一方面,在 1931 年出现了声级差型的双通路立体声系统^[6]。也有人研究了假头型的双通路立体声系统^[7]。不过在家庭应用方面则直到唱片的 $45^\circ/45^\circ$ 刻录方法出现^[8],并且商品化之后才得到普遍推广。

1925 年间,有一些作者^[9]提出把立体声广播应用于家庭。不过由于在发信和接收中都须应用两套相同的设备,故不论在经济方面或者其他方面(如频谱宽度问题,兼容问题等)都有较大的缺点,因而使其难于付诸实用。其后,为了解决这些问题,先后提出了二十多种不同的立体声广播方式^{[10]-[11]}。经过反复考核,1961 年^[12]各国先后规定采用副载波调幅的调频广播系统,亦即所谓 GE-Zenith 系统,逐渐发展成为今日通行的立体声广播体系。这种系统能够很好地解决上述各个缺点,并可以接收普通调频广播。

更加完备的立体声系统包括整个水平平面定位的全景声系统和三维空间环绕声系统^{[13]-[15]}。前者由于在重发中一般

都采用四个输出通路，所以通常也都将它称为四通路立体声系统。这种系统在70年代初期就有许多作者开始研究，至今已经取得不少成果，并且在家庭中也已逐渐推广使用。至于三维空间环绕声系统的研究，目前还处于开始阶段。

在我国，立体声的研究始于五十年代后期。由于受到林彪、“四人帮”的干扰，我国新建起来的这门学科遭到了严重破坏和摧残。粉碎了“四人帮”后，在党的领导下，我国的电声学工作者才又将它重新建立起来。

参 考 文 献

- [1] Lord Rayleigh, *The Theory of Sound*, vol. 2, p. 440 (MacMillan, 1896).
- [2] J. C. Steinberg and W. B. Snow, Auditory Perspective-Physical Factors, *Electrical Eng.*, **53**(1934), pp. 12—17.
- [3] C. Ader, Les Auditions Téléphoniques Théâtrales, *L'Électricien* **I**(1881), p. 572.
- [4] Transmit Auditory Perspective in Music, *Electronics*, **6**(1933), May, pp. 118—120.
- [5] H. Fletcher, A Symposium on Wire Transmission of Symphonic Music and Its Reproduction in Auditory Perspective: Basic Requirement's, *Bell System Technical Jour.*, **13**(1934), p. 239. *Electrical Eng.*, **53**(1934), No. 1, pp. 9—11.
- [6] A. D. Blulein, British Patent, No. 394325, 1931.
- [7] K. de Boer, The Formation of Stereophonic Images, *Philips Tech. Rev.*, **8**(1946), p. 51.
- [8] C. C. Davis, J. G. Frayne, The Westrex Disc System, *Proc. IRE.*, **46**(1958), No. 10, pp. 1686—1693.
- [9] F. M. Doolittle, Binaural Broadcasting, *Electr. World*, **25**(1925), p. 867.
- [10] C. J. Hirsch, Progress Report of Panel 1 of the National Stereophonic Radio Committee, *J. A. E. S.*, **8**(1960), pp. 2—6.
- [11] K. Wilhelm, Übersicht über Wichtigsten Vorschläge, Stereophonie über Rundfunk zu Übertragen, *NTZ*, **14**(1961), Heft 3, 129—141.
- [12] FCC Docket No. 13506, 61—524, 3143.
- [13] 太田一穂, 4チャネルステレオの歴史と現況, 電波科学(日本), 通巻463

号(1972), No. 1, pp. 17—23.

- [14] H. E. Maynard, Experiments with 4-channel Stereo, *Radio-Elect.*, **42**(1971), No. 3, pp. 33—37.
- [15] M. J. Carey and J. C. Sager. Quadraphonic Broadcasting-current Proposals and the Way Ahead, *Wireless World*, **80**(1974), No. 1467, pp. 422—425.

第一章 双耳听觉特性

§ 1.1 时间差与相位差

一般地说, 由于从声源分别传达到聆听者两耳之间的距离并不相等和聆听者自己头部的掩蔽作用, 声音到达两耳之时并不完全相同, 而具有一定的时间差和声级差。

计算从一个声源发出的声波传达到聆听者两耳后所产生的时间差时, 可以近似地把人头当作一个球体处理。当声波

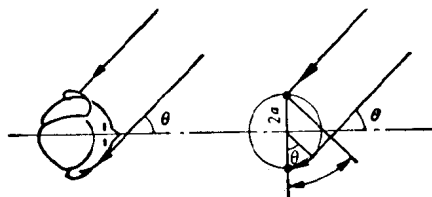


图 1.1

沿聆听者的竖直对称平面偏离角 θ 的方向而传达到其两耳时所产生的时间差可以从图 1.1 得到¹⁾:

1) 实际上, 公式

$$\Delta t \approx \frac{a}{c} (\theta + \sin\theta)$$

只适用于计算 $0 \leq \theta \leq \pi/2$ 的时间差, 对于 $\pi/2 < \theta \leq \pi$ 并不适用, 应改为

$$\Delta t = \frac{a}{c} (\theta' + \sin\theta')$$

$$= \frac{a}{c} [(\pi - \theta) + \sin(\pi - \theta)],$$

其中 $\theta' + \theta = \pi$.

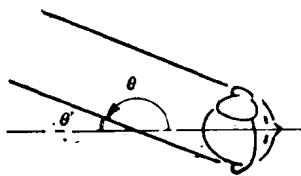


图 1.1 (a)

$$\Delta t = \frac{a}{c} (\theta + \sin \theta), \quad (1.1)$$

式中 c 为声音传播的速度；当空气的温度为 15°C 时，声速等于 3.4×10^4 厘米/秒。 a 为球体的半径，其数值常因人而异，对于一般正常的头颅，如果取 $2a = 17$ 厘米，则其在运算中所得的结果与采用一个形状做得很好的假头，在实验中测量所得的结果非常符合（参看图 3.5）。因此如果将这个数值代入式 (1.1)，并采用毫秒为时间的计算单位，则式 (1.1) 可以简化为

$$\Delta t = 0.25(\theta + \sin \theta) \text{ 毫秒}. \quad (1.2)$$

图 1.2 的曲线(实线)表示 Δt 依 θ 变化的关系，其最大值(相

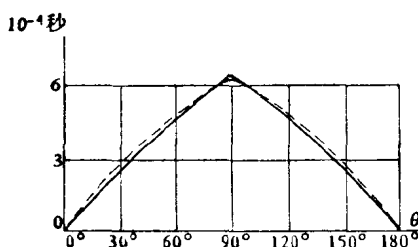


图 1.2

当于 $\theta = 90^{\circ}$ 时) 等于 6.4×10^{-4} 秒。对于 a 值不同的球体(相当于不同大小的头颅)，曲线的纵坐标可以按比例增加或者减小。

此外，从实验上发现，聆听者可以鉴别的最小偏角，大概等于 3° 左右，这约相当于 $\Delta t = 3 \times 10^{-5}$ 秒的时差。实际上这种能够鉴别的最小偏角往往因人而异，一个在这方面素有训练的人(如乐队的指挥)，其鉴别能力常超过常人。

声音传达到两耳之后所产生的时差也可以用另一种更为简单的方法作近似计算，如图 1.3 所示。如果将两耳当作相

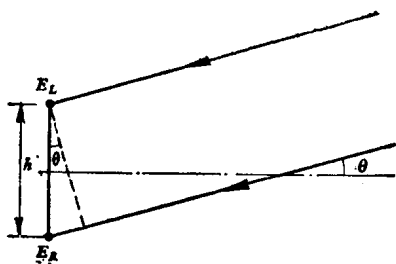


图 1.3

距 h 的两点 E_L 和 E_R 处理时, 则从偏离其正前方 θ 角方向上传来的声音到达两耳之后所产生的时差为

$$\Delta t = \frac{h}{c} \sin \theta, \quad (1.3)$$

h 称为两耳间的等效长度, 其数值也因人而异, 并且不一定等于前述球体模型的直径. 若将计算结果与球体模型的结果作比较, 可以得知, h 值必须大于 $2a$ 值. 如果令 $h = 21$ 厘米, 则式 (1.3) 也可以简化为

$$\Delta t = 0.62 \sin \theta \text{ 毫秒}, \quad (1.4)$$

其相应的曲线如图 1.2 中虚线所示, 最大值等于 6.2×10^{-4} 秒. 这些结果与前面所得的结果非常接近.

声音传达到两耳, 一般都具有时间差, 因此相应地也都产生相位差. 对于纯音(正弦波)来说, 一定的时间差产生一定的相位差:

$$\Delta \phi = \omega \Delta t, \quad (1.5)$$

式中 ω 为声波的角频率. 将式 (1.1) 或者式 (1.3) 代入上式可以得到沿不同方向入射的声波在两耳间所产生的相差关系:

$$\Delta \phi = \frac{\omega a}{c} (\theta + \sin \theta), \quad (1.6)$$

或者