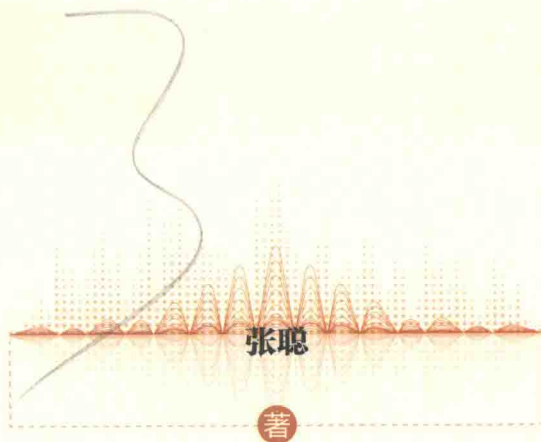




*Research on Application  
of Spatial Cues in 3D Audio*

# 空间线索 在3D音频中的 应用研究



 中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 空间线索在 3D 音频中的应用研究

张聪 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

## 内 容 提 要

本书是面向音频领域研究的专业书籍。通过此书,读者能够掌握空间线索在音频中应用的基础知识,并能了解空间音频技术在3D音频研究的一些前沿内容和实验手段。本书概念讲解清楚、系统性强,是作者多年来从事数字音频编码工作并指导研究生开展研究的经验总结,具有较强的实用性,可供高等院校相关专业的高年级本科生、研究生和工程技术人员阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

空间线索在3D音频中的应用研究 / 张聪著. — 北京:  
中国水利水电出版社, 2019.6  
ISBN 978-7-5170-7714-5

I. ①空… II. ①张… III. ①数字音频技术—研究  
IV. ①TN912.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第099003号

策划编辑: 杜 威 责任编辑: 张玉玲 加工编辑: 赵佳琦 封面设计: 李 佳

书 名	空间线索在3D音频中的应用研究
作 者	KONGJIAN XIANSUO ZAI 3D YINPIN ZHONG DE YINGYONG YANJIU 张聪 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a> E-mail: <a href="mailto:mchannel@263.net">mchannel@263.net</a> (万水) <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a> 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市元兴印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 12.75印张 208千字
版 次	2019年6月第1版 2019年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换  
版权所有·侵权必究

# 前 言

多媒体技术及其应用已经给人类的工作、学习和生活带来了翻天覆地的变化，其中的一种主要媒体形式——音频（包括音乐）是人们生活和心情的调节剂与精神的家园。人民群众对美好生活的向往，永远是技术进步的源泉，利用数字技术研究音频已经成为多媒体技术研究领域继续发展的热点。

随着数字技术的进步，三维视觉特效、逼真的临场感震撼了观众，改变了人们的观影方式，已经能为观众提供较好的临场体验。但是，为了保持与三维视频内容同步的三维声场听觉效果，传统的立体声或环绕声技术已经不能满足需要，开展三维音频相关技术的研究就成为音频领域的重点发展方向。

为了获得更好的三维声效，需要大量增加声道数，而声道数的增加会使得音频的数据量成数倍、甚至是数十倍的增加。媒介存储容量和传输带宽的限制已经影响到了三维声场的重建效果。虽然可以通过技术手段，比如参数化编码方法来降低编码码率，但是参数码率的大幅增加会导致大量的感知冗余产生。如何利用空间参数的感知特性去除参数的主观冗余来降低多声道的参数码率，并通过研究人耳对空间方位的感知特性来指导声道的布置，提高重建声像的听觉体验，就成为本书研究的动力。

全书共四篇，每篇主要通过实验手段来研究和验证空间参数之间的感知特性关系。四篇都是由本书作者和团队成员王恒副教授共同指导研究生完成的。

第一篇主要研究空间线索 ILD（双耳强度差）的感知特性。通过设计自适应测试系统，测量在不同方位下全频率范围内的 ILD 线索的 JND（最小感知差），然后再根据所得的实验数据分析感知特性 JND 与频率的变化关系，并绘制双耳强度差 ILD 线索的 JND 与频率和方位间的三维曲面。本篇实验由研究生李坤完成。

第二篇研究了空间线索 ILD 和 ITD（双耳时间差）之间的关系。先对两个双耳线索的感知特性进行测试，再对测试结果进行分析，从而得到它们同时在声源定位效果上的影响。本篇实验由研究生王思完成。

第三篇研究了水平方位上特殊角所对应的空间线索 ILD 和 ITD 的感知特性。首先采用单频正弦纯音，利用人工头设备在消音环境中采集水平方位上 8 个频带的声音数据，建立测试音频样本库；然后设计基于空间心理声学的测听软件，在低频段 8 个频率带上对双耳线索 ILD 和 ITD 分别取不同的值，测试在水平方位上的感知特性，参考 JND 的测试方法，获得双耳线索在水平面上方位角的 JND；最后将所得的数据进行插值和拟合，得到双耳线索与方位角及频率的三维曲面和函

数关系式。本篇实验由研究生彭肖飞完成。

第四篇研究了双耳相关性 (IC) 感知阈值与频率和参数值的关系。首先对 IC 的 JND 进行多参数值和全频带范围的测试, 然后研究双耳相关性感知阈值与频率和参数值之间的关系, 从而为边信息提供更全面、更高效的压缩。本篇实验由研究生朱涵完成。

由于作者和团队能力有限, 疏漏和不妥之处在所难免, 敬请读者批评指正。

张 聪

2019 年 2 月于金银湖畔

# 目 录

前言

## 第一篇 双耳强度差感知特性测量与分析

本篇摘要	1
第1章 绪论	3
1.1 研究背景及意义	3
1.2 国内外研究现状	4
1.3 本篇研究内容	7
1.4 本篇各章节安排	8
第2章 空间心理声学理论基础	9
2.1 引言	9
2.2 传统心理声学	9
2.2.1 听阈和痛阈	10
2.2.2 掩蔽效应	11
2.2.3 临界频带	12
2.3 空间心理声学	14
2.3.1 空间定位	15
2.3.2 双耳线索的感知特性	16
2.4 空间音频编码与双耳线索	17
2.5 总结	20
第3章 双耳强度差临界感知特性测试系统的建立	21
3.1 引言	21
3.2 测试人员的选择	21
3.3 实验设备	22
3.4 双耳强度差 ILD 参考值的选取	24
3.5 测试序列的制作	24
3.6 测试方法	25
3.7 测试系统建立	29
3.8 总结	29
第4章 双耳强度差感知特性实验数据的处理与分析	30
4.1 实验数据	30

4.2 双耳强度差感知特性 JND 曲面拟合	33
4.2.1 插值法的基础知识	34
4.2.2 插值点的选取	34
4.2.3 曲面插值拟合方法	35
4.2.4 曲面拟合的结果分析	39
4.3 双耳强度差感 ILD 的 JND 曲线的函数逼近	40
4.3.1 函数逼近的基础知识	40
4.3.2 JND 函数逼近曲线	42
第 5 章 工作总结	46
参考文献	47

## 第二篇 双耳时间差和强度差在声源定位效果上的感知测试与研究

本篇摘要	50
第 1 章 绪论	52
1.1 研究背景及意义	52
1.2 国内外研究现状	53
1.3 本篇研究内容	56
1.4 本篇各章节安排	57
第 2 章 空间音频编码技术和感知特性	59
2.1 引言	59
2.2 心理声学基础	59
2.2.1 听阈和痛阈	60
2.2.2 声音的掩蔽效应	61
2.2.3 临界频带	63
2.2.4 基于传统心理声学模型的编码	64
2.3 空间心理声学与时空音频编码	65
2.3.1 双耳线索在空间中的定位作用	65
2.3.2 双耳线索的恰可感知差异值	68
2.3.3 空间音频编码	68
2.4 总结	70
第 3 章 双耳强度差和双耳时间差的恰可感知 差异值测试	71
3.1 引言	71
3.2 测试人员的筛选	72
3.3 测试环境	72
3.4 改进的测听系统	73

3.5 测听音频信号	76
3.5.1 测听音频信号的频率选取	76
3.5.2 测听音频信号的方位选取	77
3.5.3 测听音频信号的强度设置	77
3.6 测听音频信号的制作	78
3.7 实验测听方法	80
3.8 实验测试步骤	81
3.9 测听系统的操作步骤	85
3.10 恰可感知差异值的曲线拟合	86
3.10.1 插值法	87
3.10.2 线性插值法	87
3.11 总结	87
<b>第4章 双耳时间差与强度差的感知特性数据处理与研究</b>	<b>89</b>
4.1 原始数据的处理	89
4.2 数据图的分析	90
4.2.1 双耳强度差 ILDs 的阈值分析和对比	90
4.2.2 双耳时间差 ITDs 的阈值分析和对比	92
4.3 曲面拟合及其分析	93
<b>第5章 工作总结</b>	<b>96</b>
<b>参考文献</b>	<b>97</b>

### 第三篇 双耳线索空间方位感知特性测量与分析

本篇摘要	101
<b>第1章 绪论</b>	<b>103</b>
1.1 研究背景及意义	103
1.2 国内外研究现状	104
1.3 本篇研究内容	107
1.4 本篇各章节安排	108
<b>第2章 空间音频编码技术</b>	<b>110</b>
2.1 引言	110
2.2 传统心理声学基础	110
2.2.1 听阈	110
2.2.2 掩蔽效应	111
2.2.3 临界频带	112
2.3 空间声源定位	114

2.3.1	双耳线索	114
2.3.2	双耳线索的共同作用	115
2.3.3	椎体混淆与耳廓效应	116
2.4	空间音频编码	117
2.5	本章小结	118
<b>第3章</b>	<b>双耳强度差和双耳时间差空间方位感知特性测试</b>	<b>119</b>
3.1	引言	119
3.2	测听人员筛选	120
3.3	参考音选择	121
3.4	测试音数据库建立	121
3.4.1	音频采集装置设计	121
3.4.2	音频采集与预处理	123
3.4.3	测试音选择	124
3.5	音频测试序列的制作	125
3.6	基于MFC对话框的测听系统设计与实现	126
3.6.1	引言	126
3.6.2	系统功能设计	127
3.6.3	系统模块设计	127
3.6.4	系统实现	127
3.7	实验方法及步骤	129
3.7.1	实验方法	129
3.7.2	实验步骤	131
3.8	本章小结	134
<b>第4章</b>	<b>实验结果分析</b>	<b>135</b>
4.1	原始数据预处理	135
4.2	双耳时间差ITD测试数据分析	136
4.2.1	ITD的水平方位角与频率的关系	136
4.2.2	ITD与水平方位角的关系	137
4.2.3	ITD与水平方位角和频率曲面插值	138
4.2.4	ITD与水平方位角和频率曲面拟合	140
4.3	双耳强度差ILD测试数据分析	142
4.3.1	ILD的水平方位角与频率的关系	142
4.3.2	ILD的水平方位角与ILD的关系	143
4.3.3	ILD与水平方位角和频率曲面插值	143
4.3.4	ILD与水平方位角和频率曲面拟合	144

4.4 本章小结·····	146
第5章 工作总结·····	147
参考文献·····	148

## 第四篇 双耳相关性感知阈值与频率和参数值关系的测试与研究

本篇摘要·····	151
第1章 绪论·····	153
1.1 研究背景及意义·····	153
1.2 国内外研究现状·····	154
1.3 本篇研究内容·····	156
1.4 本篇各章节安排·····	157
第2章 空间音频编码技术理论基础·····	158
2.1 引言·····	158
2.2 传统心理声学·····	158
2.2.1 听阈和痛阈·····	159
2.2.2 人耳的掩蔽效应·····	160
2.2.3 临界频带·····	161
2.3 空间心理声学与时空音频编码·····	163
2.3.1 空间信息参数·····	163
2.3.2 空间信息参数的恰可感知差异值·····	166
2.3.3 空间音频编码·····	166
2.4 本章小结·····	167
第3章 双耳相关性的恰可感知差异值测试·····	169
3.1 引言·····	169
3.2 受试者的筛选·····	169
3.3 测试环境与设备·····	170
3.4 测听音频信号·····	170
3.4.1 测听音频信号的频率选取·····	170
3.4.2 测听音频信号的IC参考值选取·····	171
3.5 测试序列的制作·····	172
3.6 测试系统的建立·····	172
3.7 实验方法及过程·····	174
3.8 本章小结·····	178
第4章 双耳相关性的感知特性数据处理与研究·····	179
4.1 测听实验所得数据·····	179

4.2 数据图的分析	179
4.3 双耳相关性 IC 感知特性 JND 曲线的函数逼近	181
4.3.1 函数逼近的基本概念	181
4.3.2 JND 函数逼近曲线	182
4.4 双耳相关性 IC 感知特性 JND 曲面拟合	186
4.4.1 插值法	186
4.4.2 线性插值法	187
4.4.3 插值节点的选取	187
4.4.4 曲面拟合及其分析	188
4.5 本章小结	189
第 5 章 工作总结	190
参考文献	191

# 第一篇

## 双耳强度差感知特性测量与分析

### 本篇摘要

随着计算机技术的飞速发展，多媒体技术已被广泛应用于我们的生活中，特别是在数字音频的应用方面。由于人们对音乐品质和效果的需求越来越高，已经无法用传统的单声道音频和立体声音频来实现人们对高品质音乐的迫切需求。目前，多声道音频技术已被广泛应用于移动互联网中。但是在无线通信传输中，由于移动终端的计算能力和宽带资源都有限，数据传输速率受到了极大限制，因此需要以尽可能小的比特数对音频编码，提高多声道音频编码的压缩效率。

空间音频编码技术是在空间听觉理论的基础上对空间声源进行处理得到单声道信号和空间参数，其中单声道信号表示声源信号的基本信息，它是将传统音频编码中的多声道信号通过下混技术合成而得到，同时在多声道信号中提取表示声源信号方位和声像大小的双耳线索，即空间参数，然后再单独编码形成边信息，最后将空间声源信号在解码端进行解码还原成多声道信号。双耳线索是空间音频编码中人耳听觉系统感知声源方向的重要参数，也是空间音频编码的核心，主要由双耳时间差 ITD 线索、双耳强度差 ILD 线索及相关系数 IC 组成。而现有的空间音频编码技术主要是利用双耳线索来确定声源方位。在编码效率上，空间音频编码比传统音频编码技术高很多，可以获得更高的编码压缩比，同时音频的质量也不会下降，而且能大大地减小音频的存储空间和节约传输音频信号的宽带资源。目前，大多数研究者只测量了声源信号处于人头部正前方位的双耳线索，没有进行多方位多频带的全面精细测量，因此可以通过实验获得完整详细 JND 数据，进一步提高空间音频编码的质量。

根据现有的空间音频编码技术,本篇只对双耳线索中的双耳强度差 ILD 线索的感知特性进行研究。通过设计的自适应测试系统测量在不同方位下的全频率范围内的双耳强度差 ILD 线索的 JND,然后再根据所得的实验数据分析感知特性 JND 与频率的变化关系,并绘制了双耳强度差 ILD 线索的 JND 与频率和方位间的三维曲面,为空间音频编码提供理论基础。

**关键词:** 空间音频编码; 双耳线索; 双耳强度差; 恰可感知阈值

# 第 1 章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

3D 影视业的快速发展始于 3D 电影《阿凡达》的上映，其特效的制作技术给广大观众带来了视觉上的震撼效果，使观众能身临其境地感受电影中绚丽多彩的画面，受到了观众的青睐，也使 3D 音频技术成为信息与通信领域的前沿技术和热点研究方向。目前的 3D 视频技术已经能给观众提供视觉上较好的临场感和真实感，而现有的 3D 音频技术仅限于原有的立体声或环绕声技术，相对比较滞后，根本不能满足人们对 3D 音频听觉效果的需求。当今社会，人们的生活水平已经得到了极大的提高，而音乐成为了人们娱乐生活中不可分割的重要组成部分，它能丰富人们的娱乐生活。近几年来由于移动通信技术及互联网的飞速发展，音乐播放已成为各种移动终端设备的必备功能，人们可以随时随地地享受音乐带来的快乐。就目前统计数据可知，无线音乐已为移动多媒体增值业务带来了巨大的收益，成为其支柱业务之一。同时，生活水平的提高使得人们对高品质音频服务的需求日益迫切。单声道音频已无法满足人们对音质的要求，立体声和多声道音频技术成为高品质移动音频增值业务的重要支撑技术之一。但是传统的音频编码技术的编码效率较低，需要更大的存储空间来保存数据，也不利于在有限的带宽资源中传输这种数据量较大音频信号，因此在高音质的前提下，如何对音频信号进行有效的压缩处理是音频技术需解决的关键问题。

空间音频编码是根据空间听觉理论，将空间声源分别用单声道信号和空间参数来表达，其中单声道信号表示了声源信号的基本信息，是将传统音频编码中的多声道信号通过下混技术合成得到的，同时从多声道信号中提取表示声源信号方位和大小的双耳线索，也就是空间参数，然后对这些空间参数单独编码形成边信息，最后在解码端通过单声道信号和边信息还原空间声源。在空间音频编码中，双耳时间差 ITD 线索、双耳强度差 ILD 线索以及相关系数 IC 是人耳听觉系统感

知声源方向的重要参数，是空间音频编码中的核心。目前，空间音频编码技术主要也是利用双耳线索来确定声源的方位。利用空间音频编码技术对声音信号进行编码能够获取更高的编码压缩比，减小了存储空间，同时提高了音频信号在有限宽带资源中的传输速率。然而，大多数研究者只对声源信号处于人头部正前方的双耳线索进行了测量，没有进行多方位多频带的精细测量，因此还可以进一步提高空间音频编码质量。

根据现有的空间音频编码理论，本篇只对空间音频编码中的双耳强度差 ILD 的感知特性进行研究。通过设计的自适应测试系统测量在不同方位、不同频率下双耳强度差 ILD 的 JND 值，得到更加详细的感知特性 JND 的数据，然后再根据所得的实验数据分析感知特性 JND 与频率的变化关系，并绘制了双耳强度差 ILD 的 JND 值与频率、方位间的三维曲面，对空间音频编码的深入研究作理论支持。

## 1.2 国内外研究现状

在水平面上，双耳时间差（Interaural Time Different, ITD）线索和双耳强度差（Interaural Level Different, ILD）线索是人耳听觉系统对空间声源进行准确定位的非常重要的两个线索。所谓双耳线索是指对于同一声源信号发出的声音在到达人的双耳时会产生微小的时间差或强度差，而人耳可以通过这个微小的差值来判断声源的方位。最早开始对双耳时间差 ITD 线索和双耳强度差 ILD 线索的产生机理及其定位作用进行详细阐述的是经典的双工理论（duplex theory）<sup>[1]</sup>，该理论是由 Strutt 在 1877 年提出的。根据该双工理论可知，双耳时间差 ITD 线索是由于声音到达左右耳所经历的距离不同而造成的，而双耳强度差 ILD 则是由于人头部对音频信号的遮蔽作用导致的；双耳强度差 ILD 线索是人耳判断 1500Hz 以上声源方位的主要依据，而 1500Hz 以下声源方位主要由双耳时间差 ITD 来决定。因此人耳可以感知双耳强度差 ILD 线索和双耳时间差 ITD 线索的变化来准确定位声源方位。尽管人类听觉系统能够根据双耳线索准确地判断声源的方位，但是其感知灵敏度仍然具有一定的局限性。在双耳线索值发生变化时，只有当其变化量达到或超过最小域值 JND 时，人耳才能察觉到这种变化。所以当 JND 值越小，则表明人耳的敏感度越强，对声源的定位越准确。学者们为了研究人耳听觉系统对声源定位的这种敏感度，即人耳对双耳线索的分辨率，对双耳线索的感知特性进

行了大量的实验测量和分析。双耳线索感知特性 JND 的影响因素有很多,比如声源频率、声源类型和声源方位等。为了分析声源方位对双耳线索 JND 的影响,学者们一般是将某种固定频率的声源放置在不同方位进行测听,在各个方位上获取和分析人耳听觉系统对双耳线索的感知阈值 JND。由于双耳时间差和双耳强度差本身就是声源方位的参数化表达,所以实验中一般都是通过改变声源信号的双耳线索值来获得不同方位的测听声音信号。

1960年, Mills 使用恒定激励的方式,在 250~10000Hz 范围内分别测量了 5 名测试者对 8 种不同频率的纯音信号的双耳强度差 ILD 的感知特性 JND 值<sup>[2]</sup>。该实验的结果表明,当声源信号的频率为 1000Hz 时,人耳对 ILD 的 JND 值大约在 1dB;当声源信号的频率小于 1000Hz 时, JND 值要稍微低一些;当声源信号的频率大于 1000Hz 时, JND 值为 0.5dB 左右。

1969年, Hershkowitz 等人单独选取频率为 500Hz 的纯音信号来测量和分析了双耳强度差 ILD 和双耳时间差 ITD 的感知特性 JND 受声源方位变化的影响<sup>[3]</sup>。实验结果表明,人耳的听觉系统对声道间的强度差或时间差的值越大的声源信号的感知阈值 JND 越大,这说明声源在逐渐靠近左右两侧时,人耳对声源方位的变化的敏感度越低,也就是判断声源方位的能力较差。

1977年, Domnitz 也在实验中得到了与 Hershkowitz 相同规律的实验结论<sup>[4]</sup>。

1984年, D.Wesley 根据 Mills 的实验结论,在 500~4000Hz 的频率范围内分别测量 4 名受试者对 8 种频率纯音信号双耳强度差 ILD 的感知特性 JND 值<sup>[5]</sup>。该实验结果表明,人耳听觉系统对频率为 1000Hz 的声音信号的双耳强度差 ILD 线索的变化最不敏感,而对其他各频率的声音信号的双耳强度差 ILD 的变化敏感度很接近,没有太大变化。

1988年, William 采用纯音信号进行实验,并且将声音信号的双耳时间差 ITD 设置为 0,然后通过改变声源信号的双耳强度差的值来测试声源方位改变对双耳强度差 ILD 线索的感知特性 JND 的影响<sup>[6]</sup>,分别测量了人耳对声源信号的 ILD 为 0、5、10 和 15dB 时的双耳强度差 ILD 的感知特性 JND 值。该实验结果表明,声源的方位值 ILD 从 0dB (表示声源位于正中方向) 逐渐变化到 15dB (接近左耳方向) 过程中,双耳强度差 ILD 线索的感知特性 JND 将会增大 5 倍以上。说明处在人头部正前方的声源信号向人耳的左右两侧移动时,人耳感知声源信号方位的变化会变得越来越差,也就是说 JND 值将会逐渐增加。

1992 年, Kaigham 利用频率处在 250~4000Hz 范围内的窄带噪声信号来测试双耳强度差 ILD 的感知特性 JND 值, 实验发现当信号频率不断变大时, 人耳的感知特性 JND 值没有明显的变化<sup>[7]</sup>。

2007 年, Francart 通过对窄带噪声信号进行频移处理的方式来测量人耳听觉系统的 JND 值<sup>[8]</sup>。测试实验采用的窄带噪声信号的带宽为 1/3 倍频程, 该声音信号输入左耳时的中心频率分别为 250、500、1000 和 4000Hz, 与左耳相对应的右耳输入信号是将左耳信号的中心频率都分别移动 0、1/6、1/3 或者 1 倍频程之后的声音信号。这个实验结果说明, 对于每一个频移之后的声音信号, 双耳强度差 ILD 的感知 JND 值会随着信号频率的变大而明显减小, 而随着频移距离的增加, JND 值有明显的变大。

2011 年, 根据之前学者们研究双耳线索感知阈值与声音信号频率之间关系所取得的成果, Leslie 等人对双耳强度差 ILD 线索感知阈值与信号频率进行了测试与分析<sup>[9]</sup>。他们在实验中发现了一个非常重要的结果: 人耳对处于 500Hz 的低频信号的双耳强度差 ILD 线索的定位感知的偏侧范围要明显小于处在 4000Hz 的高频信号。该实验结果表明人耳感知较高频率的声源的双耳强度差 ILD 线索的分辨率要比较低频率的声源明显低一些, 并且该实验结果与以往研究者得出的结论相比, 存在很大的差异。因此, 作者分析、推测颅内声像的总体偏移量和偏移量潜在的变化幅度也是影响 ILD 线索感知阈值的因素。

人类听觉系统感知敏感特性的研究在国内很早就已经开始了。20 世纪 60 年代, 中科院生理研究所的梁之安教授就对声源定位与声源位置辨别之间的关系进行了研究<sup>[10]</sup>, 分别对 43 名具有正常听力的测试者的声源定位偏差和 60 名正常听力的测试者的声源位置辨别阈进行了测试。该实验结果发现: 定位声源的平均水平偏差为 3.1°, 垂直平均偏差为 4.7°, 总的平均偏差为 5.7°。当声源信号处在人头部正前方的水平位置且与测试者之间的距离为 1.15 米时, 人耳对声源位置辨别阈的平均值为 3.5°。梁教授测量了处于人头部正前方声源的 JND 值, 得到 ILD 线索的感知阈值 JND 的平均值为 0.70dB。1997 年, 梁教授又利用一种新型调频调幅调相声刺激器, 操作简单方便, 分别对人和豚鼠通过心理物理方法和电生理方法来测量其强度感知阈值和相位感知阈值<sup>[11]</sup>。

2008 年, 陈水仙等人在 20~15500Hz 的频率范围内对正弦纯音信号的频率与双耳线索的感知阈值 JND 的关系进行了分析<sup>[12]</sup>。该实验中, 根据临界频带划分