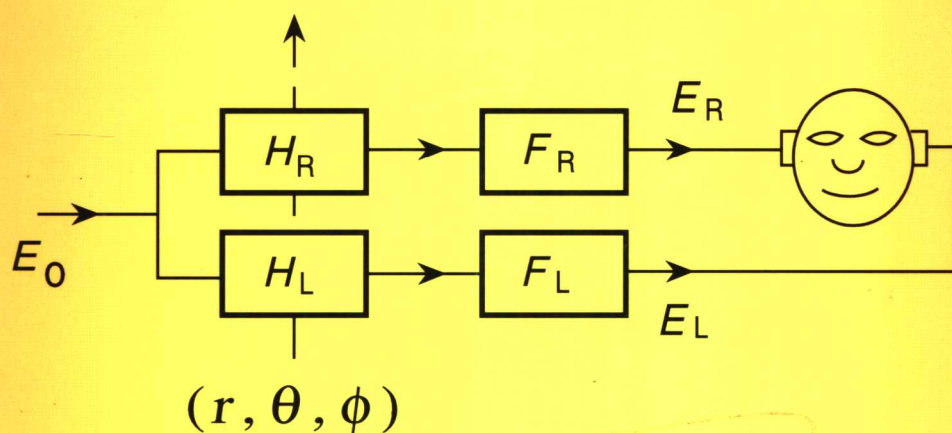


头相关传输函数 与虚拟听觉

Head Related Transfer Function And Virtual Auditory

谢波荪 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

042/2

2008

头相关传输函数与虚拟听觉

Head Related Transfer Function And Virtual Auditory

谢菠荪 著

(国家自然科学基金资助项目, 编号: 10374031)

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

头相关传输函数与虚拟听觉 / 谢波荪著. —北京: 国防
工业出版社, 2008. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 05403 - 3

I. 头... II. 谢... III. ①声学 - 研究②听觉 - 研究
IV. 042 R339. 16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 162253 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 23 1/4 字数 562 千字

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

前 言

除视觉外,听觉是人类感知外界信息的另一重要途径。人类的听觉中,除了对声音的响度、音调和音色等主观属性的感觉外,还包括对声音的空间听觉,也就是对声音空间属性或特性的主观感觉。在一定的条件下,利用声音空间属性,听觉系统可以对声源进行定位,也可以产生对周围声学环境的空间印象。

人类是利用双耳感知声音信息的,双耳的声压信号包含了声音的主要信息。从物理的角度,声源发出的声波经直达和环境反射的途径传输到倾听者,而倾听者的头部、躯干、耳廓等对入射声波散射和反射后传输到双耳,将声源和环境的声学信息转换成双耳声压信号。在自由场(略去环境反射声)的情况下,声源到双耳的传输过程可以用一个物理量——头相关传输函数(Head Related Transfer Function, HRTF)表示, HRTF 包含了有关声源的主要空间信息,因而在双耳空间听觉的研究方面有非常重要的意义。作为 HRTF 的一个重要的应用,虚拟听觉是近 20 年发展起来的新技术,它利用 HRTF 进行信号处理,模拟出声波从声源到双耳的传输,从而在耳机或扬声器重放中虚拟出相应的空间听觉。虚拟听觉技术在有关听觉心理和生理的科学实验、多媒体与虚拟现实、人工智能、通信、室内声学设计、声音节目的制作、家用声重放等科学研究、工程技术、消费电子领域都有重要的应用价值。因而近 10 多年来,国际上有关 HRTF 和虚拟听觉技术的研究发展很快,已成为声学、信号处理、听觉等研究领域的热门与前沿课题,并已在众多的领域得到应用。

早几年,国内从事 HRTF 及虚拟听觉方面研究的课题组很少。而从 20 世纪 90 年代中期开始,作者及其带领的课题组在 HRTF 及其物理特性分析、虚拟听觉信号处理方面已做了大量的理论和应用研究工作,发表相关的研究论文近 50 篇。特别是 2005 年,在国家自然科学基金的资助下,作者及课题组通过实验测量,建立了中国人受试者样本的 HRTF 及生理尺寸参数数据库,是目前国际上少数包括多名真人受试者的高空间分辨率 HRTF 和生理参数的数据库之一,且是唯一的包含等量男女受试者的数据库。课题组的工作为今后进一步的研究提供了重要的基础。

近两三年, HRTF 及虚拟听觉已引起了国内研究人员的兴趣,已有一些研究单位开始或计划开展这方面的工作。但目前国内还没有对 HRTF 和虚拟听觉进行详细论述的著作,国际上也仅在 1994 年出版过一本相关的著作(Begault D R 1994a)。

本书系统地论述了 HRTF 和虚拟听觉的基本原理与应用,总结了国际上在该领域的研究成果和最新进展,特别是总结了本课题组在该领域的研究成果。全书分为 14 章,基本上概括了目前该领域的主要研究内容。其中第 1 章至第 7 章主要论述双耳听觉与 HRTF 的基本原理、实验测量、物理特性分析、理论计算、滤波器模拟、HRTF 的空间插值和分解个性化 HRTF 近似等。第 8 章至第 14 章论述虚拟听觉的基本原理和应用,包括采用耳机和扬声器的虚拟听觉重放、立体声和多通路环绕声的虚拟重放、环境反射声的虚拟、虚拟听觉环境实时绘制、虚拟听觉重放

的心理声学评价与验证、虚拟听觉的各种应用等。书最后列出 500 多篇参考文献,包括了该领域的主要基础论文。

本书的读者对象为从事 HRTF 和虚拟听觉领域研究工作的科技工作者、研究生和工程师。本书能帮助他们掌握该领域的前沿技术,开展相应的研究或技术开发工作。由于该领域具有跨学科的性质,因而阅读本书需要有一定的声学和信号处理方面的基础知识,在参考文献部分也列出了相关的参考书籍。

本书的出版得到国家自然科学基金(编号:10374031)的资助。而作者及课题组有关的研究工作得到了国家自然科学基金、教育部优秀青年教师资助计划、广州市科技计划项目(编号 2005Z3 - D0071)的资助,作者所在单位华南理工大学给予了大力的支持。

作者在 10 多年的研究工作中,有幸得到北京邮电大学管善群教授的指导。在本书的计划和写作过程中,管善群教授提出了许多建设性的意见和建议。而作者在 20 世纪 90 年代中期攻读博士学位期间,得到了同济大学王佐民研究员的指导,毕业后一直得到老师的支持、鼓励和帮助。

作者的研究工作还得到课题组的饶丹、钟小丽、谢志文、梁志强等同事以及本人指导的历届研究生的支持。本书初稿完成后,饶丹、钟小丽两位同事协助对稿件进行了校对,并提出了修改建议。余光正博士协助绘制了本书部分插图。美国 Rensselaer Polytechnic Institute 的 Ning Xiang 教授提供了一些相关的文献资料。

作者在多年的研究工作中,得到了多位国内同行专家不同形式的支持、鼓励和帮助,包括华南理工大学建筑学院吴硕贤院士、赵越喆博士,南京大学徐柏龄、沈勇教授,中国科学院声学研究所李晓东、程明昆、沈壕研究员,同济大学毛东兴教授、俞悟周博士,华中科技大学龙长才教授,中国传媒大学孟子厚教授,电视电声研究所范宝元、杨锦刚教授,吴金才、钟厚琼高工,国光电器股份有限公司俞锦元高工等。

国防工业出版社的编辑刘萍、贾艳以及参加审读的老师们为本书的出版做了大量的工作。

在此,作者向上述单位和个人表示衷心的感谢。

作者的父亲谢兴甫教授也是一位声学工作者。20 多年前,正是在他的引导下,作者选择了声学作为研究领域。不幸他已去世多年,在此仅以本书作为纪念。

谢菠荪

(华南理工大学 物理科学与技术学院 声学研究所)

Email: phbsxie@scut.edu.cn

目 录

第1章 空间听觉及虚拟听觉	1
1.1 空间坐标系统	1
1.2 听觉系统与听觉滤波器	3
1.2.1 听觉系统与功能	3
1.2.2 临界频带与听觉滤波器	5
1.3 空间听觉	6
1.4 单声源定位因素	7
1.4.1 双耳时间差	7
1.4.2 双耳声级差	9
1.4.3 混乱锥和头部转动	10
1.4.4 谱因素	12
1.4.5 方向定位因素的讨论	13
1.4.6 距离定位因素	15
1.5 头相关传输函数	16
1.6 多声源的合成定位与空间听觉	18
1.6.1 双扬声器实验与立体声正弦定理	19
1.6.2 多声源合成声像定位的普遍情况	21
1.6.3 声源信号的时间差与优先效应	22
1.6.4 鸡尾酒会效应	23
1.7 室内声学与空间听觉	23
1.7.1 室内声场	23
1.7.2 室内空间听觉	25
1.8 双耳声信号拾拾与虚拟听觉	26
1.8.1 人工头听觉仿真模型	26
1.8.2 双耳拾拾和重放系统	28
1.8.3 虚拟听觉重放系统	29
1.8.4 与多通路(环绕)声系统比较	31
1.9 本章小结	33
第2章 HRTF 的测量	35
2.1 线性时不变系统传输函数及其测量原理	35

2.1.1	连续时间线性时不变系统	35
2.1.2	离散时间线性时不变系统	37
2.1.3	常用测量信号	40
2.2	HRTF 测量的原理与设计	43
2.2.1	测量原理概述	43
2.2.2	HRTF 的测量对象	44
2.2.3	双耳声压的测量位置与传声器	44
2.2.4	测量环境与机械装置	45
2.2.5	扬声器与放大器	46
2.2.6	信号的产生与处理	47
2.2.7	HRTF 的均衡处理	48
2.2.8	HRTF 测量设计示例	49
2.2.9	HRTF 测量的质量与误差分析	50
2.3	HRTF 数据库	51
2.4	一些特殊的 HRTF 测量方法	54
2.5	本章小结	55
第 3 章	HRTF 的基本特性分析	57
3.1	HRTF 的时域和频域特性	57
3.1.1	HRTF 的时域基本特性	57
3.1.2	HRTF 的频域基本特性	59
3.1.3	HRTF 的最小相位特性	61
3.2	双耳时间差的分析	63
3.2.1	双耳时间差的计算方法	63
3.2.2	双耳时间差的计算结果	67
3.3	双耳声级差的分析	71
3.4	HRTF 谱特征的分析	73
3.4.1	耳廓谷的分析	73
3.4.2	躯干反射引起的谱因素分析	75
3.5	HRTF 的对称性分析	76
3.5.1	HRTF 的前后对称性	77
3.5.2	HRTF 的左右对称性	78
3.5.3	双耳时间差的对称性	80
3.6	近场 HRTF 与距离定位因素	81
3.7	HRTF 与其他双耳听觉问题	83
3.8	本章小结	84
第 4 章	HRTF 的理论计算	86
4.1	HRTF 计算的刚球模型	86

4.1.1	远场 HRTF 的刚球模型及其基本特性	86
4.1.2	声源定位因素分析	88
4.1.3	双耳位置的影响	89
4.1.4	声源距离的影响	90
4.1.5	刚球模型的适用范围	92
4.2	HRTF 计算的雪人模型	93
4.2.1	雪人模型的基本概念	93
4.2.2	雪人模型的计算结果	94
4.3	HRTF 的数值近似计算方法	95
4.3.1	边界元法求解波动方程的基本原理	95
4.3.2	边界元计算 HRTF 的基本方法	97
4.3.3	边界元计算 HRTF 的一些结果	100
4.3.4	头部形状的简化	101
4.3.5	HRTF 的其他数值近似计算方法	104
4.4	本章小结	104
第 5 章	HRTF 的滤波器系统模型及其实现方法	105
5.1	HRTF 近似的误差分析	105
5.2	HRTF 的滤波器模型及设计考虑	108
5.2.1	离散时间线性时不变系统的滤波器模型	108
5.2.2	HRTF 滤波器设计的基本思路和模型选择	109
5.2.3	HRIR 脉冲响应的长度及其简化	110
5.2.4	HRTF 滤波器设计中听觉因素的考虑	111
5.3	HRTF 滤波器的设计方法	113
5.3.1	HRTF 的 FIR 滤波器设计方法	113
5.3.2	HRTF 的 IIR 滤波器简单设计方法	114
5.3.3	HRTF 的 IIR 滤波器设计的 BMT 法	117
5.3.4	采用对数误差的 HRTF 滤波器设计	119
5.3.5	HRTF 的 CAPZ 模型	120
5.3.6	HRTF 滤波器设计的结果比较	123
5.4	HRTF 滤波器的结构与实施	125
5.5	HRTF 的频率规整滤波器	127
5.5.1	频率规整变换	127
5.5.2	频率规整的 HRTF 滤波器	128
5.6	本章小结	130
第 6 章	HRTF 的空间插值和分解	132
6.1	HRTF 的空间插值	132

6.1.1	HRTF 空间插值的基本概念	132
6.1.2	几种常用的 HRTF 空间插值方法	133
6.1.3	HRTF 空间插值效果的分析	135
6.1.4	HRTF 空间插值的一些问题与改进	136
6.2	HRTF 的空间基函数线性分解与空间采样定理	138
6.2.1	HRTF 线性分解的基本概念	138
6.2.2	HRTF 的空间傅里叶分析与空间采样定理	139
6.2.3	HRTF 测量的空间分辨率分析	141
6.2.4	HRTF 的球谐函数分解	145
6.3	HRTF 谱形状基函数线性分解与主成分分析	149
6.3.1	谱形状基函数分解的基本概念	149
6.3.2	HRTF 主成分分析的基本方法	151
6.3.3	HRTF 主成分分析的一些结果	154
6.3.4	谱形状基函数线性分解下的空间插值	156
6.4	HRTF 的空间子集分解	156
6.5	HRTF 空间插值与多通路环绕声信号馈给	159
6.5.1	多通路环绕声的信号馈给	159
6.5.2	分立一对信号馈给	159
6.5.3	声场信号馈给	161
6.5.4	多通路环绕声信号馈给的进一步讨论	162
6.6	虚拟声像信号处理的简化	162
6.6.1	虚拟扬声器方法	163
6.6.2	基函数线性分解方法	165
6.7	本章小结	167
第 7 章	个性化 HRTF 的近似	169
7.1	生理参数的测量及与定位因素的相关性	169
7.1.1	受试者生理参数的测量及其结果	169
7.1.2	生理参数之间及其与定位因素的相关性	175
7.2	个性化双耳时间差模型	177
7.2.1	ITD 的球形头部模型的推广	177
7.2.2	基于空间傅里叶分析的 ITD 模型	178
7.3	个性化 HRTF 近似的生理参数匹配法	181
7.4	个性化 HRTF 近似的频率标度变换法	182
7.5	个性化 HRTF 的生理参数线性回归近似	186
7.6	HRTF 的结构模型	187
7.6.1	HRTF 结构模型的基本思路与组成	187
7.6.2	HRTF 结构模型的讨论与改进	190

7.7	个性化 HRTF 近似的其他方法	191
7.8	本章小结	192
第 8 章	双耳声信号的耳机重放	194
8.1	耳机—外耳传输特性均衡	194
8.1.1	耳机—外耳传输特性均衡的基本原理	194
8.1.2	自由场均衡与扩散场均衡	197
8.2	耳机到耳道传输特性的测量重复性与个性化问题	199
8.2.1	耳机到耳道传输特性的测量及重复性	199
8.2.2	个性化耳机到耳道传输函数问题	202
8.3	耳机重放双耳声信号的声像方向畸变	203
8.4	耳机重放头外声像与距离控制	206
8.4.1	耳机重放的头中定位与头外声像	206
8.4.2	耳机重放声像距离的控制	207
8.5	本章小结	208
第 9 章	双耳声信号的扬声器重放	210
9.1	扬声器重放双耳声信号的基本原理	210
9.1.1	双耳声信号的两扬声器重放	210
9.1.2	双耳声信号扬声器重放的普遍理论	213
9.2	头部转动与扬声器重放	216
9.2.1	两扬声器重放的声像范围	216
9.2.2	虚拟声像信号的四扬声器重放	216
9.2.3	头部转动和扬声器重放的动态定位因素分析	218
9.2.4	头部转动与重放声像的稳定性	220
9.3	头部移动与扬声器重放声像的稳定性	222
9.3.1	头部移动与声像稳定性的初步分析	222
9.3.2	立体声偶极	223
9.3.3	头部移动与声像稳定性进一步分析	224
9.3.4	串声消除稳定性分析的一般理论	226
9.4	不匹配的 HRTF 对扬声器重放声像的影响	228
9.5	扬声器重放的音色改变与均衡处理	229
9.5.1	音色改变与均衡处理方法	229
9.5.2	音色均衡信号处理的分析	230
9.6	扬声器重放的信号处理设计	233
9.6.1	信号处理的因果性与稳定性	234
9.6.2	扬声器重放信号处理的滤波器直接实现	235
9.6.3	扬声器重放信号处理的结构分解实现	236

9.6.4 串声消除信号处理的带限实施	238
9.7 求解串声消除矩阵的一些近似方法	240
9.7.1 求解串声消除矩阵的代价函数方法	240
9.7.2 求解串声消除矩阵的自适应滤波方法	241
9.8 本章小结	243
第10章 立体声和多通路环绕声的虚拟重放	244
10.1 立体声和多通路环绕声的耳机虚拟重放	244
10.1.1 双通路立体声信号的耳机虚拟重放	244
10.1.2 5.1 通路环绕声的耳机虚拟重放原理	246
10.1.3 5.1 通路环绕声耳机虚拟重放的改进	249
10.1.4 有关耳机虚拟重放的讨论	251
10.2 非标准立体声扬声器布置的虚拟校正	252
10.3 立体声效果增强系统	254
10.4 5.1 通路环绕声的扬声器虚拟重放	255
10.4.1 5.1 通路环绕声两扬声器虚拟重放的原理	255
10.4.2 5.1 通路环绕声两扬声器虚拟重放的改进	256
10.4.3 5.1 通路环绕声的多扬声器虚拟重放	259
10.4.4 有关“虚拟环绕声”的讨论与误区	260
10.5 本章小结	261
第11章 室内反射声的虚拟	263
11.1 室内声场和双耳房间脉冲响应的物理模拟	263
11.1.1 双耳房间脉冲响应的物理模拟	263
11.1.2 室内声场模拟的虚声源法	264
11.1.3 室内声场模拟的声线跟踪法	266
11.1.4 其他的室内声场模拟方法	267
11.1.5 声源指向性和空气吸收的影响	268
11.1.6 双耳房间脉冲响应的计算	269
11.2 人工延时和混响算法	270
11.2.1 延时算法结构和分立反射声的模拟	270
11.2.2 混响声的模拟与简单混响算法结构	272
11.2.3 混响算法结构的改进	273
11.2.4 延时和混响算法在虚拟听觉中的应用	275
11.3 本章小结	277
第12章 虚拟听觉环境实时绘制	278
12.1 虚拟听觉环境实时绘制系统的基本结构	278

12.2	动态听觉环境信息的虚拟	279
12.2.1	头踪迹跟踪和动态听觉信息的虚拟	279
12.2.2	自由场声源与动态听觉信息	281
12.2.3	环境反射声与动态听觉信息	282
12.2.4	实时绘制系统的动态特性	285
12.2.5	扬声器重放的动态串声消除	287
12.3	运动声源的虚拟	288
12.4	虚拟听觉环境实时绘制系统的例子	290
12.5	本章小结	291
第 13 章	虚拟听觉重放的心理声学评价与验证	292
13.1	评价虚拟听觉重放的心理声学实验条件	292
13.2	主观对比与选择实验评价	294
13.2.1	主观对比与选择实验及其分析方法	294
13.2.2	主观对比与选择实验的一些结果	296
13.3	声像定位实验评价	297
13.3.1	声像定位实验的基本方法	297
13.3.2	声像定位实验结果的初步分析	298
13.3.3	声像定位实验的一些结果	300
13.4	主观感知属性的定量评价实验方法	304
13.5	心理声学实验数据的进一步数理统计分析	306
13.5.1	进一步数理统计分析的方法	306
13.5.2	采用进一步数理统计分析的一些结果	307
13.6	双耳听觉模型与虚拟听觉重放的客观分析	308
13.7	本章小结	312
第 14 章	虚拟听觉的应用	313
14.1	双耳听觉科学实验的应用	313
14.2	双耳可听化的应用	314
14.2.1	双耳可听化在室内声学的应用	314
14.2.2	室内声学双耳可听化存在的问题	317
14.2.3	双耳可听化的其他应用	318
14.3	声重放和声音节目制作的应用	318
14.4	虚拟现实、通信和多媒体的应用	320
14.4.1	虚拟现实的应用	320
14.4.2	通信与信息系统的應用	320
14.4.3	多媒体与移动产品的应用	322
14.5	听觉的医学诊断应用	324

14.6 本章小结	324
附录 A 球谐函数	325
附录 B 雪人模型 HRTF 的球谐函数多极展开求解	327
参考文献	330

Contents

Chapter 1	Spatial hearing and virtual auditory	1
1.1	Spatial coordinates	1
1.2	Auditory system and auditory filter	3
1.2.1	Auditory system and its functions	3
1.2.2	The critical band and auditory filter	5
1.3	Spatial hearing	6
1.4	Localization cues for one sound source	7
1.4.1	Interaural time difference	7
1.4.2	Interaural level difference	9
1.4.3	Cone of confusion and head rotation	10
1.4.4	Spectral cue	12
1.4.5	Discussion on directional localization cues	13
1.4.6	Localization cues for distance	15
1.5	Headrelated transfer function	16
1.6	Summing localization and spatial hearing with multiple sound sources	18
1.6.1	Localization experiment with two loudspeakers and the law of sine	19
1.6.2	General situation for summing localization with multiple sound sources	21
1.6.3	Time difference between sound sources and the precedence effect	22
1.6.4	The cocktail party effect	23
1.7	Room acoustics and spatial hearing	23
1.7.1	Sound field inside the room	23
1.7.2	Spatial hearing inside the room	25
1.8	Binaural recording and virtual auditory	26
1.8.1	Artificial head models	26
1.8.2	Binaural recording and playback system	28
1.8.3	Virtual auditory display	29
1.8.4	Comparison with multichannel (surround) sound	31
1.9	Summary of Chapter 1	33
Chapter 2	Measurement of HRTF	35
2.1	Transfer function of linear time-invariant system and its measurement	35

2.1.1	Linear time-invariant system of continuous time	35
2.1.2	Linear time-invariant system of discrete time	37
2.1.3	Usual excitation signals for HRTF measurement	40
2.2	Principle and design of HRTF measurement	43
2.2.1	Outline of HRTF measurement	43
2.2.2	Object of HRTF measurement	44
2.2.3	Microphone and its position in binaural pressure measurement	44
2.2.4	Environment and mechanical constructions for measurement	45
2.2.5	Loudspeaker and amplifier	46
2.2.6	Generating and processing of signals	47
2.2.7	HRTF equalization	48
2.2.8	An example of HRTF measurement	49
2.2.9	Quality and error analysis of HRTF measurement	50
2.3	HRTF database	51
2.4	Special methods for HRTF measurement	54
2.5	Summary of Chapter 2	55
Chapter 3	Analysis on the general characters of HRTFs	57
3.1	Characters of HRTFs in time and frequency domain	57
3.1.1	General characters in time domain	57
3.1.2	General characters in frequency domain	59
3.1.3	Minimum-phase character	61
3.2	Analysis on interaural time difference	63
3.2.1	Methods for calculating ITD	63
3.2.2	Some results of ITD	67
3.3	Analysis on interaural level difference	71
3.4	Analysis on the spectral characters of HRTFs	73
3.4.1	Analysis on pinna notch	73
3.4.2	Analysis on the spectral cue caused by torso reflections	75
3.5	Analysis on the symmetry of HRTFs	76
3.5.1	Front-back symmetry	77
3.5.2	Left-right symmetry	78
3.5.3	Symmetry of ITD	80
3.6	Near field HRTF and distance localization	81
3.7	HRTFs and other issues dealing with binaural hearing	83
3.8	Summary of Chapter 3	84
Chapter 4	Theoretical Calculation of HRTF	86
4.1	Rigid sphere model for calculating HRTF	86

4.1.1	Far field HRTF from rigid sphere model and their characters	86
4.1.2	Analysis on localization cues	88
4.1.3	Effects of ears positions	89
4.1.4	Effects of sound source distance	90
4.1.5	Limitation of rigid sphere model	92
4.2	The snowman model for calculating HRTF	93
4.2.1	Basic concepts of the snowman model	93
4.2.2	Some results from the snowman model	94
4.3	Numerical methods for calculating HRTF	95
4.3.1	Boundary element methods for wave equation	95
4.3.2	Basic boundary element methods	97
4.3.3	Some results from the boundary element methods	100
4.3.4	Head-shape simplification	101
4.3.5	Other numerical methods for calculating HRTF	104
4.4	Summary of Chapter 4	104
Chapter 5	Models and implementation of HRTF filter	105
5.1	Analysis on the error of HRTF approximation	105
5.2	Models and considerations of HRTF filter	108
5.2.1	Filter models for linear time-invariant systems of discrete-time	108
5.2.2	General consideration and selection of HRTF filter	109
5.2.3	Length of HRIR and its simplification	110
5.2.4	Auditory criterion in HRTF filter design	111
5.3	Methods for designing HRTF filter	113
5.3.1	Methods for designing FIR filter	113
5.3.2	Simple methods for designing IIR filter	114
5.3.3	The BMT method for designing HRTF filter	117
5.3.4	Logarithmic error criterion	119
5.3.5	CAPZ filter model of HRTF	120
5.3.6	Comparison of the results from different HRTF filter designs	123
5.4	Structure and implementation	125
5.5	Frequency warped method	127
5.5.1	Frequency warping	127
5.5.2	Frequency warped HRTF filter	128
5.6	Summary of Chapter 5	130
Chapter 6	Spatial interpolation and decomposition of HRTF	132
6.1	Spatial interpolation of HRTF	132

6.1.1	Basic concepts	132
6.1.2	Common methods	133
6.1.3	Analysis on the effect of spatial interpolation of HRTF	135
6.1.4	Problems and improvement on spatial interpolation of HRTF	136
6.2	Basis functions linear decomposition and spatial sampling law of HRTF	138
6.2.1	Basic concepts of linear decomposition of HRTF	138
6.2.2	Spatial Fourier analysis and sampling law of HRTF	139
6.2.3	Analysis on spatial resolution needed for HRTF measurement	141
6.2.4	Spherical harmonics functions decomposition of HRTF	145
6.3	Spectral shape basis functions decomposition and principal components analysis on HRTF	149
6.3.1	Basic concepts of spectral shape basis functions decomposition	149
6.3.2	Basic method for principal components analysis on HRTF	151
6.3.3	Results of principal components analysis	154
6.3.4	Spatial interpolation of HRTF under spectral shape decomposition	156
6.4	Subset decomposition of HRTF	156
6.5	Spatial interpolation of HRTF and signal mixing for multichannel surround sound	159
6.5.1	Signal mixing for multichannel surround sound	159
6.5.2	Pair-wise signal mixing	159
6.5.3	Sound field signal mixing	161
6.5.4	Further discussion on signal mixing for multichannel surround sound	162
6.6	Simplification on signal processing for virtual sound image	162
6.6.1	Method of virtual loudspeakers	163
6.6.2	Method of basis functions linear decomposition	165
6.7	Summary of Chapter 6	167
Chapter 7	Approximation of Individualized HRTF	169
7.1	Measurement of anthropometric parameters and relation with localization cues	169
7.1.1	Measurement and results of anthropometric parameters	169
7.1.2	Correlation among anthropometric parameters and localization cues	175
7.2	Models of individualized ITD	177
7.2.1	Extension of spherical head model of ITD	177
7.2.2	ITD model based on spatial Fourier analysis	178
7.3	Individualized HRTFs by anthropometric parameters match	181
7.4	Individualized HRTFs by scaling in frequency	182
7.5	Individualized HRTFs by linear multiple regression approximation	186
7.6	Structural model of HRTFs	187