

音的历程

现代音乐声学导论

An Introduction of Musical Acoustics

韩宝强 著



人民音乐出版社
PEOPLE'S MUSIC PUBLISHING HOUSE

音的历程

现代音乐声学导论

An Introduction of Musical Acoustics

韩宝强 著

YIN DE LICHENG XIANDAI YINYUE SHENGXUE DAOLUN

图书在版编目 (CIP) 数据

音的历程：现代音乐声学导论 / 韩宝强著. — 北京：
人民音乐出版社，2016. 01

ISBN 978-7-103-05100-9

I. ①音… II. ①韩… III. ①音乐声学—研究
IV. ①J611. 1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第273400号

责任编辑：周 洲

责任校对：董辛奕

人民音乐出版社出版发行

(北京市东城区朝阳门内大街甲55号 邮政编码：100010)

Http: // www.rymusic.com.cn

E-mail: rmyy@rymusic.com.cn

人民音乐出版社(上海)有限公司策划

(上海市虹口区广纪路838号C座5楼 邮政编码：200434)

编辑部电话：021-55887227

E-mail: rymusicsh@qq.com

新华书店北京发行所经销

北京金吉士印刷有限责任公司印刷

787×1092 毫米 特16开 16.5印张

2016年1月北京第1版 2016年1月北京第1次印刷

定价：54.00元

版权所有 翻版必究

凡购买本社图书，请与读者服务部联系。电话：(010) 58110591

网上售书电话：(010) 58110654

如有缺页、倒装等质量问题，请与出版部联系调换。电话 (010) 58110533

目 录

序 言	1
章后思考与讨论题	7
第一章 听觉系统	8
第一节 听觉系统的生理构成与功能	8
第二节 骨传导在音乐中的作用	12
第三节 听觉损伤	13
第四节 听力检测	17
第五节 保护你的听觉	19
章后思考与讨论题	21
第二章 听觉系统对音高的识别	22
第一节 音高识别机制的假说	22
第二节 人耳感知音高的范围	25
第三节 主观音高与客观音高之关系	26
第四节 最小音高差的分辨	28
第五节 音乐家的音准感	29
第六节 音准感与律学研究	31
章后思考与讨论题	33
第三章 听觉系统对音强的识别	34
第一节 音强感知机理	34
第二节 外耳道共鸣与等响曲线	36
第三节 音强变化对音高感觉的影响	38
第四节 音乐的声强范围	39
第五节 音乐中的“掩蔽效应”	41
章后思考与讨论题	44
第四章 听觉系统对音色的识别	45
第一节 定义及评价体系	45

第二节 听觉系统对音色的感知机理·····	48
第三节 影响音色感的客观因素·····	51
第四节 影响音色感的主观因素·····	53
第五节 人耳在音色识别上的“特异功能”·····	56
章后思考与讨论题·····	58
 第五章 音长识别、非线性及协和感问题·····	59
第一节 听觉对音长的识别·····	59
第二节 音乐时间的伸缩性·····	61
第三节 音乐听觉中的非线性现象·····	63
第四节 拍 音·····	66
第五节 与协和感有关的理论·····	68
章后思考与讨论题·····	72
 第六章 音乐声的物理基础·····	73
第一节 振 动·····	73
第二节 共 振·····	75
第三节 介 质·····	77
第四节 声波与波长·····	78
第五节 声波传播的基本性质·····	79
第六节 驻波与多普勒效应·····	82
章后思考与讨论题·····	84
 第七章 音乐声的基础知识·····	85
第一节 音乐声的定义·····	85
第二节 纯音与复合音·····	85
第三节 基音与泛音·····	87
第四节 泛音列与频谱·····	88
第五节 乐音与噪音·····	90
章后思考与讨论题·····	95
 第八章 音乐声学测量·····	96
第一节 音乐声学测量的作用·····	96
第二节 音乐声学测量的历史·····	98
第三节 音乐声学测量项目·····	100

第四节 主观评价	101
第五节 常用测量设备	103
第六节 音乐声学测量需要注意的问题	106
章后思考与讨论题	111
第九章 乐器声学构成与乐器改良	112
第一节 乐器的声学构成	112
第二节 乐器的分类	113
第三节 乐器改良规律	117
第四节 我国民族乐器的改良简况	119
第五节 民族乐器改良中存在的问题	122
章后思考与讨论题	125
第十章 管乐器声学特征	126
第一节 管乐器发音原理概述	126
第二节 管口校正	128
第三节 边棱音管乐器	130
第四节 簧管乐器	132
第五节 唇管乐器	135
第六节 几种常见管乐器的频谱特征	139
章后思考与讨论题	143
第十一章 弦乐器声学特征	144
第一节 弦乐器发音原理概述	144
第二节 弦振动的一般特性	145
第三节 擦弦乐器	149
第四节 拨弦乐器	153
第五节 击弦乐器	156
章后思考与讨论题	159
第十二章 打击乐器声学特征	160
第一节 打击乐器发音原理概述	160
第二节 膜体打击乐器	162
第三节 棒体打击乐器	164
第四节 板体打击乐器	167

第五节 类板体打击乐器·····	170
第六节 双音钟音乐性能之检测·····	174
章后思考与讨论题·····	178
第十三章 电乐器声学特征 ·····	179
第一节 电乐器发展概述·····	179
第二节 电乐器发声原理概述·····	182
第三节 MIDI 与 MIDI 乐器·····	185
第四节 MIDI 接口与信息解释·····	193
第五节 家庭 MIDI 音乐制作系统·····	201
章后思考与讨论题·····	204
第十四章 歌唱声学 研究·····	205
第一节 嗓音构造概述·····	205
第二节 歌唱发声特性·····	209
第三节 “歌手共振峰”理论·····	212
第四节 歌唱方法·····	215
第五节 中西唱法的声音特征·····	220
章后思考与讨论题·····	228
第十五章 空间音乐声学 ·····	229
第一节 空间音乐声学研究的问題·····	229
第二节 空间音乐声学的基本概念·····	231
第三节 音乐环境的隔声与隔振·····	234
第四节 音乐与空间环境的匹配·····	237
第五节 小型音乐制作室·····	239
第六节 人工音效与杜比环绕声系统·····	241
章后思考与讨论题·····	246
附 录 ·····	247
常用乐器频率范围一览表·····	247
常用乐器的峰值声压级与动态范围一览表·····	250
噪音的种类·····	253
男中音不同声区正确发声共振峰数据·····	255
参考文献 ·····	256
再版后记 ·····	257

序 言

这是一本探讨音乐的底层——有关“音”的科学的书。

“音”是无形之物,它构成了音乐的主体。那么音从何而来?它具有哪些特性?它依托何种物质而存在?它又如何以“乐”的形式来打动人心?探寻这些问题的答案,即是写作本书的基本动机。

一、回到亥姆霍兹“音的感觉”

用实证手段研究音乐音响问题肇自19世纪的欧洲。在1863年的德国,当时著名的生理学兼物理学家亥姆霍兹(H.von Helmholtz, 1821~1894)出版了一本名为《论音的感觉—音乐心理学基础》的学术专著,从生理解剖和听觉实验角度阐述人耳对乐音的感受。因为这是有史以来第一本从实证科学的角度探讨“音”的发生机理与性质的专著,所以对当时的欧洲音乐理论界,特别是和声学及音乐美学的研究产生了极大影响。

亥姆霍兹的理论是建立在德国物理学家兼哲学家费希纳(G.Fechner, 1801~1887)所奠定的心理物理学^[1]研究方法基础之上的,施通普夫(C.Stumpf, 1848~1936)和里曼(H.Riemann, 1849~1919)是亥氏理论的重要的继承和发展者,但二者后来的发展方向略有差异:前者以实证主义观念全身心地投入到对乐音和音乐感觉的研究之中,按照物理学模式,严格地从计量学角度,研究单个乐音和音程的听觉感受,并将其与其它乐音和音程进行比较。由于施通普夫专注于单个乐音和音程的研究,很少涉及实际音乐作品,仅就这一点来说,他与亥姆霍兹的研究颇为相近。然而这并不意味着施通普夫远离音乐实践,恰恰相反,正是他与霍恩博斯特尔(E.M.Hornbostel, 1877~1935)等人合作建立了著名的柏林音响资料馆,并专注于东南亚、太平洋各国和美洲印第安人音乐研究,因而被公认为民族音乐学的前身——比较音乐学的奠基人之一。



图(序)1 著名生理学兼物理学家亥姆霍兹(H.von Helmholtz, 1821~1894)

[1] 心理物理学(psychophysics)是心理学的一个分支,研究对象是人的感觉量与产生感觉的刺激量之间的关系。费希纳为学科奠基人,其所确立的精确的心理实验方法依然为今日实验心理学所采用。

里曼也是以亥姆霍兹的工作模式为其研究的出发点,完成了他的博士论文《论音乐的听赏》^[1]。里曼不满足于对单个乐音和音程的听觉研究,而是将其与音乐实践密切联系在一起。他的颇具影响力的“功能和声体系”,在很大程度上就是基于音响心理学相关法则的基础之上。后人叹服于其理论体系的严密性和实证性,在“功能和声体系”诞生之日起,将其奉为音乐创作和教学的经典理论而广为传播。中国音乐界较为熟悉的功能和声理论著作,如斯波索宾、该丘斯和勋伯格等,基本上也是继承了里曼理论的内核。从这个意义上说,里曼可以算作将亥姆霍兹的理论应用于解释和构建欧洲音乐体系的最伟大的人物之一,同时也是对中国音乐理论界有着间接重要影响的理论家之一。

如果把自亥姆霍兹创立的音响心理学作为解释音乐音响问题的起点,经过施通普夫到了里曼这里,关于音乐音响的研究似乎已经接近终点,因为音乐中的一切音响问题似乎都可以得到科学的解释。随着“民族音乐学”(Ethnomusicology)的兴起以及全球性的对“欧洲音乐文化中心论”的否定,音乐学界开始在考虑一个新的问题:里曼心目中的音乐实践,完全以欧洲古典音乐为中心,在他的音乐逻辑中,主音三和弦是分析一切旋律音程的基础,由此也给他的理论体系带来致命的缺憾:对于欧洲古典音乐以外的音乐体系,如阿拉伯、印度、印度尼西亚爪哇岛等音乐体系,甚至包括欧洲晚期浪漫派的音乐和中国的民间音乐,如果运用里曼的理论体系加以分析,往往不能切中要害,有时甚至根本无用武之地。在这种情况下,人们自然要问:里曼的理论体系对非欧洲古典音乐的分析还有没有指导意义?

我国一些作曲家和研究作曲技术理论的学者很早就从音乐实践角度,或更确切地讲,是从音乐音响的感知角度意识到这一问题的存在,并试图从符合中华民族音乐传统听觉审美的角度解决这一问题,其中所采用的主要技术手段之一,就是引进非三度叠置和声结构的因素,但人们由于信服里曼理论体系的严密性和实证性,虽然对“主音三和弦决定论”有所保留,对“功能和声体系”的合理性却似乎不产生任何怀疑。今天在我国音乐院校的乐理教科书和技术理论教材中所反映出的、浓厚的里曼音乐理论体系色彩,就证实了这一点。

按常理,当人们在行进中感觉应该到达终点,却没有发现终点的任何踪迹的时候,首先考虑的问题就是:方向有没有走错?当我们跟随里曼的思维,沿着欧洲古典音乐之路走进民族音乐学那广袤的原野,突然感到我们平时所熟知的理论体系竟然无法解释欧洲以外的、多姿多彩的民间音乐现象时,头脑里自然也会闪现出这样的疑问:里曼的音乐理论体系,特别是其“功能和声体系”,能够把我们引领到解决民族音乐学技术分析的“终点”吗?如果不能,我们又当做什么选择?

[1] 该论文后以《音乐的逻辑——从生理学和心理学的角度论证我们的音体系概论》出版。见贝塞勒:《近代音乐听赏问题》,收于《西方音乐社会学现状》金经言译,人民音乐出版社2002年版,第2页。

记得在大学上和声课的时候,授课老师曾经把里曼的《和声学》比喻为和声理论中的“面包”,意在强调该理论的经典性。对于以西方传统作曲技术理论为专业的人来说,这句话可谓千真万确,但如果走出欧洲古典音乐这个范围,教授的名言显然就带有很强的局限性:虽然还是“面包”,但却是一块仅能解决欧洲古典音乐“饥饿感”的“面包”而已。毋庸置疑,里曼音乐理论体系的局限性并非里曼的错误,更不能因此而抹煞其“功能和声体系”的严密性和实证性。这就好像我们想用望远镜观察火星,却把方向对准了木星,责任当然不在望远镜而在于我们自己。

里曼在亥姆霍兹音响心理学的基础上创建的理论金字塔,保证了欧洲古典音乐分析理论体系历数百年而不衰,这也给后人一个鲜明的启示:我们能否也在现代音响科学理论的基础上去发现适用于解释其它音乐体系的法则呢?答案应当是肯定的,但难度也是巨大的。因为,从亥姆霍兹理论到欧洲古典音乐体系毕竟只是一条不太长的路,而要想对全世界所有音乐体系给予合理的解释,则需要更多的“里曼”做出不懈的探索。这是人类与生俱来的求知欲使然,也是每个音乐学研究者应当承担的责任。

当我们尝试为欧洲以外的音乐构建新的理论解释体系的时候,应当尽可能采纳和包容前人已有的、被证明是科学或合理的研究成果。具体到民族音乐学研究,笔者认为,里曼“音乐的逻辑”虽不能用来解释欧洲以外其他民族的音乐,但其理论体系中体现出来的、重视人的音乐音响感知机理的科学态度,是永远值得提倡和借鉴的。此外,我们还应重视与里曼体系并行发展起来的另一种研究模式,虽然作为一种理论体系,其逻辑架构和表述内容还不够清晰和完整,但对于今天民族音乐学研究却有着奠基性的意义。这就是由施通普夫、霍恩博斯特尔和埃利斯^[1](A.J.Ellis, 1814~1890)等人奠定的、笔者名之为“实证民族音乐学”的研究模式。其主要特征,就是重视利用实验手段,在对各民族的音乐音响进行测量和比较分析的基础上,研究不同音乐体系的形态、规律。这种模式对我国民族音乐学研究也产生了一定影响。

无论是里曼的欧洲古典音乐分析体系还是施通普夫等人的“实证民族音乐学”研究模式,当我们追寻他们的理论根基时,最后都将归结到亥姆霍兹“音的感觉”。这种结果提示我们:世界所有的音乐体系,无论其形态、风格和音响特点有多么大的差异,但有一点是不可逾越的,那就是人耳对音的感觉,这是所有音乐体系的底层基础。

由此便引出了笔者在本节标题中所呈现的命题——理论的回归:从一种较高层面、为我们所熟知的理论体系回归到诞生这种体系的基础层面。此举看似使理论研究更远离音乐,但实际效果却能让我们更深入、更清晰地去认识全世界所有的音乐。

[1] 埃利斯(A.J. Ellis):英国音乐声学专家,音分值的创用者,比较音乐学奠基人之一,曾著有《各民族的音阶》。

二、“音”是什么？

回到亥姆霍兹“音的感觉”，首先碰到的问题是：“音”是什么？翻开国内常见的乐理教科书，一般都将声音定义为“物体振动的结果”。如果追溯其来源，可能皆出自苏联著名音乐教育家斯波索宾的《音乐基本理论》^[1]。表面上看，这个定义准确无误且又很好证实：我们敲一下鼓，用手轻抚鼓面，就可以感觉到鼓面的振动，与此同时我们也听到了鼓声。我们拨一下琴弦，也会有同样的感受。由此，我们很容易认同“音是振动的结果”这一观点。

然而我国古人却把声音与听觉和大脑联系在一起：

凡音之起，由人心生也。人心之动，物使之然也。感于物而动，故形于声；声相应，故生变；变成方，谓之音。^[2]

再看中国最早的文字——甲骨文中的“声”字，其字形像一只耳朵在听编磬的演奏^[3]，见图(序)2。繁体字的“聲”，里面也还保留着一只“耳朵”。甲骨文的“音”的字形像说话的舌头，先作“言”讲，后演化为音^[4]。这说明，在我们先民的概念中，“声”和“音”是与“听觉”和“大脑”（语言是受大脑支配的）联系在一起的。



图(序)2

在英文音乐词典中，与“声”和“音”相对的单词是“Sound”和“Tone”，仔细研究其释意，可以说与我国儒家理论大致相当^[5]。查阅其它音乐声学文献，内容也基本相似。如著名音乐声学专家罗兴^[6] (Thomas D. Rossing) 在其《声音科学》(The Science of Sound)一书的序言中，开宗明义把声音归结为两方面因素使然：一是人耳的听觉感知，二是对听感产生作用的、存在于某种媒介中的扰动，二者缺一不可。他还用一个古老的欧洲哲学谜语来说明其观点：“森林里倒了一棵大树，却没有人听见，这算不算有声音？”^[7]

现在让我们对声音现象的发生作一个简要描述。

就一般情况而言，声音源于物体的振动，又称振源。譬如，弦是弦乐器的振源，空气柱是

[1] 斯波索宾：《音乐基本乐理》，汪启璋译，人民音乐出版社1982年版，第1页。

[2] 《史记乐书第二》，中华书局1999年版，第1039页。

[3] 《甲骨文字典》，四川辞书出版社1989年版，第1289页。

[4] 徐中舒：《怎样考释古文字》，载《出土文献研究》，文物出版社1985年版，第215页。

[5] 有关“Sound”和“Tone”的释义可参见(1) S. Sadie 主编《新格罗夫音乐与音乐家词典》(New Grove Dictionary of Music and Musicians, 伦敦麦克米兰出版社, 1980) 相关词条: Acoustics (Vol.1 p.43), Sound (Vol.17 p.545), Tone (Vol.19 p.59)。(2) W. Apel 主编《哈佛音乐词典》(Harvard Dictionary of Music 增补版, 美国哈佛大学出版社, 1979) 相关词条: Acoustics (p.8), Tone (p.856)。

[6] 罗兴：曾任美国北伊利诺伊州立大学物理系教授，美国音乐声学学会会长。

[7] Thomas D. Rossing. The Science of Sound America. Addison-Wesley, 1982:3.

管乐器的振源,电子振荡器是电子乐器的振源等。振动需要通过一定的介质才能传播,振动在介质中的存在称为“波”(Wave)。就音乐而言,空气是最常用的介质。然而有了振源和波并不等于就会有声音。譬如,我们的周围存在着大量传输各种信息的电磁波(包括光波),但由于振动形式和振动频率已超出我们听觉的感知范围,因此我们虽身陷“波海”却依然能安然入睡。

综上所述可以说明,只有当某一类声波被听觉系统接收和分析后,转换为生物电信号并刺激大脑中控制声音的相应部分,人们才会有“声音”的感觉。由此,我们现在对“声音”重新做一个比较完整的诠释:

声音是人类听觉系统对一定频率范围内振波的感受。

在这个定义中,听觉感受是声音存在的主体,振波是声音存在的客观条件,二者缺一不可都不能产生“声音”。

这一过程可用图(序)3来表示:



图(序)3

上图中,如果把“鼓”(振源)视为“音”的起点,把大脑的听觉中枢视为“音”的终点,那么从振源经介质到大脑就构成了一条“音链”,所有声音信息,包括音乐都是经由这一通道传到我们的心灵。

本书冠以“音的历程”,即指“音”从通道的此端至彼端、从客观到主观的过程。在这个过程中,包含着振源、介质和听觉系统三个方面的因素,其中任何一个因素发生变化,都会对“音”的感觉产生直接影响。

三个因素中如果缺少了一个因素,那情况又会怎样呢?

首先可以肯定,如果失去“听觉系统”这个因素,“音”则不复存在。注意,这里说的是“音”,不是声波。正常人与失聪者最大区别就在于,后者失去了健全的听觉系统,因此尽管周围遍布声波,但他们却“充耳不闻”。

如果失去振源和介质这两个因素,从物理学和生理学的角度来说,人们也无法感知“音”的存在,因为没有声波或其它波(固体波或液体波)的刺激,听觉系统就不会产生“音的感觉”,但是从心理学角度讲,对具有较高音乐修养的人来说,在没有振源和介质这两个因素的条件

下,依然可以有声音的感觉,这就是我们常说的“内心听觉”。这种能力往往是一些专业音乐工作者的基本功,例如作曲家在进行交响乐创作时,作品的音响其实已经在其脑海中跌宕起伏;指挥家在指挥一个新作品时,要凭借内心听觉事先把握住作品的总体音响效果,才能保证在乐队面前指挥若定。一流的演奏家也常利用内心听觉来提高演奏水平,完善演出效果。有些人甚至可以在周围寂静无声的时候利用自己的内心听觉来欣赏音乐作品^[1]。

内心音乐听觉属于一种特殊的听觉记忆,普通人难于拥有,但它可以说明一个问题,即大脑听觉神经对声音的存在是具有决定性意义的。任何弦管鸣奏只有进入了听觉,被我们的大脑所感受和识别,才变为有意义的音乐之声。

正因为听觉系统在“音的历程”中占有如此重要的地位,所以本书把音乐听觉问题放在全书之首,这或许是与其它音乐声学著作最大的不同之处。

三、阅读本书的方法

全书在总体内容上分为三大部分,依次为:**音的感觉**(第一至第五章),主要介绍有关乐音感知方面的问题;**音的传播**(第六至第八章),主要介绍有关音的物理问题;**音的色彩**(第九至第十五章),主要介绍乐器声学和空间音乐声学方面的问题。每个部分的知识相对独立,读者可以根据自己的需要,直接浏览相关章节的内容而不必从头开始阅读。

本书在写作时考虑的读者定位主要包括:专业音乐工作者、音乐院校的师生、乐器制造者、音乐声学工作者、音响工程师、录音师和音乐爱好者。囿于笔者走过的专业道路(少年学习小提琴,大学本科学习作曲、研究生转民族音乐学、律学,后一直从事有关音乐形态学、音乐声学和计算机辅助音乐学研究),本书在材料来源、知识结构、内容深度、实例引用和语言表述的习惯上难免带有自己专业的“烙印”。譬如,本书对有关物理声学基础的内容讲得不很详细,并非这方面知识不重要,而是出于两方面考虑:一是本人非物理声学专业出身,不敢也不愿全部照抄他人的理论;二是考虑到大部分读者的知识背景,对模拟复杂声场环境和振动模式的数学方程式在理解上可能有一定困难。如果读者需要这方面知识,可以根据本书提供的参考文献去查寻更权威、更详尽的解释。

[1] 缪天瑞:《音乐内心听觉在创作和演奏中的作用及训练问题》,《交响》,2000年第2期。

章后思考与讨论题

1. 在对“音”的认识上,中西方之间有何异同?
2. 音乐声学 research 需要听觉的参与吗?
3. 亥姆霍兹在音乐声学方面的研究成果对后世音乐理论和实践产生了哪些直接和间接的影响?
4. 音乐声学与音乐学和作曲技术理论之间有何联系?
5. 音乐声学与基本乐理有何关联?

第一章 听觉系统

第一节 听觉系统的生理构成与功能

人类的听觉系统是我们得以接收外界声音的重要器官。概括讲,听觉系统是由外耳、中耳、内耳和脑听觉神经组织构成(见图1-1)。

一、外耳

外耳包括我们肉眼可见到的耳廓和外耳道。耳廓表面凹凸不平,耳垂为脂肪所构成,其余由弹性软骨组成。外耳道是稍弯曲的管道,起自外耳,止于鼓膜,全长约24毫米。外1/3为软骨部,内2/3为骨部。外耳道覆以皮肤,内有毛囊和耵聍腺。

外耳在听音过程中主要起到三种作用:一是耳廓可以将声场中的声波进行聚焦并传导至中耳。二是利用耳廓对声源进行定位。三是利用耳道对声波信号进行共鸣放大。

耳廓的聚焦作用是众所周知的,当我们听远处的声音时,常常把手放在耳后,这样做就起到了增加聚焦面积的作用,由此可以拾取到更多的声波信号,使声音听起来更清楚。从这个意义上讲,人的耳廓越大越有利于声波信号的拾取。一些动物,如兔子、狗、驴的耳廓相对于它们的身体来说都比较大,所以它们的听觉比人类要灵敏。

耳廓的定位功能是近年来人们关注的一个研究课题。按传统的理论,只有两个耳朵同时接收声波信号,人们才能对声源进行定位。但新的研究表明,即使一只耳朵,人类也可以利用耳廓、身体其它部位(如脑袋和肩部)和环境物的反射作用,对声源进行定位。当然,单耳定位终究不如双耳定位来得精确。

从声学角度讲,外耳道可视为一个共鸣管,将外来的声波加以共鸣、放大。但由于每人的

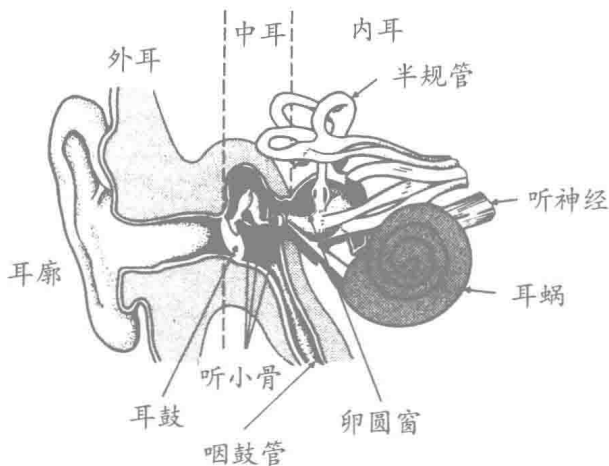


图1-1 耳朵构造示意图
中耳和内耳已作局部放大

耳道都有各自的生理特征,形状和大小各不相同,因此理论上讲,每个人耳道的共鸣放大作用也不相同。有关耳道的放大功能将在第三章继续讨论。

二、中耳

中耳包括鼓膜、鼓室及听小骨、咽鼓管等。鼓膜位于外耳道底部,呈扁锥形,尖朝内,灰白色,有光泽,直径约为9毫米。分为三层:内层为中耳粘膜层;外层为复层鳞状上皮,与外耳道皮肤相延续;中层为放射状和环状纤维组织。鼓膜的血管及神经丰富,痛觉灵敏。

鼓室位于鼓膜与内耳外壁之间,是一个含气的空腔,内有听小骨。鼓室可分为鼓室本部及鼓室上隐窝两部分。鼓室的外壁大部分是鼓膜,内壁为内耳迷路的外侧面,上壁、下壁均借一薄骨板分别与颅中窝及颈静脉球分隔。

听小骨包括锤骨、砧骨和镫骨(参见图1-2a),三者相连成听骨链。锤骨柄紧接鼓膜紧张部上缘,砧骨居中,有关节与砧骨和镫骨相连,镫骨底板与内耳卵圆窗相接。

咽鼓管从鼓室前壁向前、内、下方通向鼻咽侧壁。咽鼓管的咽口一般呈闭合状态,吞咽时管口顿开,使空气进入鼓室以保持鼓膜内外气压平衡。

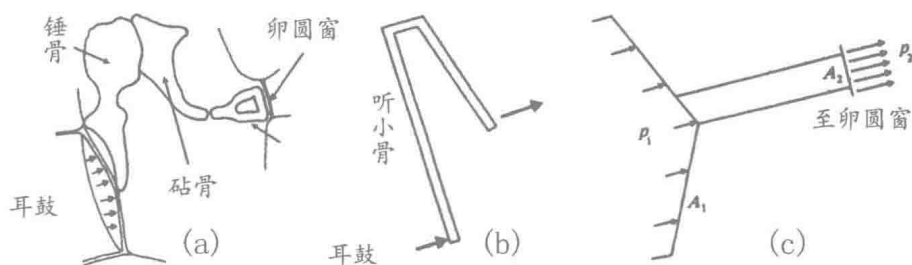


图 1-2 听小骨将声波放大示意图

说明: (a) 声波通过耳鼓经听小骨传递到卵圆窗

(b) 听小骨杠杆工作原理示意图

(c) 耳鼓与卵圆窗之间压强变化示意图

中耳在听音过程中所起到的作用,是将声波放大并传导至内耳。放大声波的工作主要由听小骨来完成。其放大原理如图1-2所示:由于听小骨中锤骨的长度长于镫骨,当锤骨受到鼓膜的推力时,根据杠杆工作原理,在镫骨上产生的力必然大于锤骨所受到的力;根据压强变化原理,在强度不变的情况下,受压面积越小,其所受到的压强就越大。由于耳鼓膜的面积大于卵圆窗的面积,根据上述原理,卵圆窗所受到的压强自然比耳鼓膜处更大。

正是上述两种结构力的作用,使鼓膜接收到的声波压力在听小骨传导的过程中得到放大。

三、内耳

内耳由前庭、半规管、耳蜗和连接耳蜗与大脑的神经束四部分组成。

前庭位于内耳中部,呈椭圆形,前为耳蜗,后接半规管。前庭外侧壁是鼓室内侧壁的一部分,有卵圆窗及圆窗。卵圆窗是与听小骨衔接的地方,由于内、外淋巴在压力变化时体积不变,圆窗在这里便起重要的缓冲作用:当镫骨及卵圆窗膜向内推时,它向外鼓出;当镫骨及卵圆窗膜向外拉时,它向内收。

半规管有三个互成直角的骨管,根据其所在位置分为上、后、外半规管。

耳蜗因形似蜗牛壳而得名,为旋转两圈半的螺旋状骨管。耳蜗中央有疏松骨质的蜗轴,有薄骨片由蜗轴伸入螺旋管内腔,由耳蜗底部盘旋上升,直达蜗顶,称骨螺旋板。从骨螺旋板外缘到耳蜗外壁有基底膜连结,于基底膜上方骨螺旋板外缘又斜伸出一薄膜,称前庭膜。这样,耳蜗便被基底膜和前庭膜分隔成前庭阶、鼓阶和蜗管(参见图1-3)。

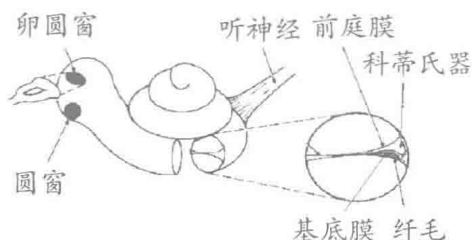


图1-3 耳蜗横剖面示意图

蜗管内储内淋巴液,为一封闭的盲管。前庭阶和鼓阶都含外淋巴液,并在蜗顶借蜗孔相通。内耳中各种神经末梢感受器的形式不同,而组织结构却相仿,皆由一种支持细胞和神经上皮的毛细胞组成。耳蜗神经的末梢感受器称为“螺旋器”,又称“科蒂氏器”(Corti's organ),位于蜗管基底膜上。

在电子显微镜检查中发现,基底膜上每一毛细胞下面有两种神经末梢。分别与两种神经束衔接,一种称“传入神经束”,即把耳蜗中产生的声音信号传入脑干耳蜗核。另一种称“传出神经束”,同毛细胞和传入神经束末梢略有接触,这一神经束来自脑干的拉斯默森(Rasmussen)氏橄榄形耳蜗束。传出神经束的主要作用是对耳蜗功能起抑制性影响。

内耳在听音过程中所起的作用,主要有两点:一是对声波信号进行初级分析;二是将声波信号转换成生物电信号,传导至大脑。

内耳对声波的分析主要在耳蜗中完成。由于耳蜗的构造十分精密狭小,故对于耳蜗分析功能的研究工作直到19世纪才开始展开。最早的研究是探讨耳蜗对音高的识别,主持此项研究工作的是德国生理学家兼物理学家亥姆霍兹。他根据死亡者耳部解剖的结果,认为耳蜗中的基底膜相当于一个音高分析器,通过基底膜上大量长短不一的纤毛与相应的振动频率产生共振来分析音高。其中,短的纤毛与高频产生共振,长的纤毛与低频产生共振。这种假说被后人称为“竖琴说”(The Harp Theory)^[1]。后人通过更为精细的研究,发现人类耳蜗内的纤毛

[1] H.von Helmholtz. *On the Sensation of tone, As a Physiological Basis for the Theory of Music*, 4th ed. Edited by A. J. Ellis. New York: Dover, 1954.