

首都师范大学音乐与舞蹈学“新时代”学科建设创新工程

音乐声学导论

Introduction to Musical Acoustics

邓志勇 王岱威◎编著



首都师范大学出版社

CAPITAL NORMAL UNIVERSITY PRESS

首都师范大学音乐与舞蹈学“新时代”学科建设创新工程

音乐声学导论

Introduction to Musical Acoustics

邓志勇 王岱威◎编著



首都师范大学出版社

CAPITAL NORMAL UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

音乐声学导论 / 邓志勇, 王岱威编著. —北京: 首都师范大学出版社, 2019. 2

ISBN 978-7-5656-4909-7

I. ①音… II. ①邓… ②王… III. ①音乐声学 IV. ①J611.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 011441 号

YINYUE SHENGXUE DAOLUN

音乐声学导论

——从实例入门

邓志勇 王岱威 编著

责任编辑 车 慧

首都师范大学出版社出版发行

地 址 北京西三环北路 105 号

邮 编 100048

电 话 68418523(总编室) 68982468(发行部)

网 址 <http://cnupn.cnu.edu.cn>

印 刷 北京虎彩文化传播有限公司

经 销 全国新华书店

版 次 2019 年 2 月第 1 版

印 次 2019 年 2 月第 1 次印刷

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 16

字 数 260 千

定 价 43.50 元

版权所有 违者必究

如有质量问题 请与出版社联系退换

首都师范大学音乐与舞蹈学“新时代”学科建设创新工程委员会

顾问 姚思源 王安国 曹理 杨青

策划 陈玉平 蔡梦 曹薇 李刚

田培培 李晓东

主任 蔡梦

委员 (按姓氏笔画顺序)

丁小琴 王超慧 尹铁良 田培培

刘华 李刚 李晓东 张大龙

陈玉平 郑莉 高平 高梅

曹薇 蔡梦

序

“大学存在的理由，是拥有一批充满想象力地探索知识的学者，使学生在智力发展上受其影响，在成熟的智慧与追求生命的热情之间架起桥梁。”教师队伍建设，是大学学科建设的一项十分重要的任务。

首都师范大学音乐与舞蹈学科从1964年创建，几代人，数十年，筚路蓝缕，殚精竭虑，一路走来，不仅收获了大批颇具影响的教育成果，更涌现出一批能够标志学科发展高度的教育家，他们以高尚的敬业精神和深厚的知识学养，为学科发展和人才培养提供了有力支撑。

今天，我们怀揣“首师大音乐舞蹈人”的共同理想，全力推进“创新工程”，期冀为首都师范大学音乐与舞蹈学一流学科建设添砖加瓦，夯土筑石。秉承这种理念，“创新工程”分设理论研究、教育教学、创作表演、文献资料等不同侧重的系列，通过图书、音像、网络等多种传播方式，为教师专业积淀搭建展示平台。我们力求将学院在职教师已有成果出版，展示不同学科和专业领域所取得的成绩；力求紧密配合学院音乐舞蹈人才培养方案修订，针对能体现不同类型课程在教学理念、目标、内容、方略及评价方式等多层面的改革探索进行教材建设，推出一系列高质量的课程与教材；我们更加希望将“创新工程”建设成为一个面向世界的、开放的、包容的、动态的“音乐与舞蹈学”学科交流、推广平台，为国家的“音乐与舞蹈学”学科建设贡献力量。

“发展是硬道理”这一经典论断，大可经世治国，小可适用于每一生命个体。当我们立足工作岗位，付出智慧和汗水，自然会收获实绩和尊重。首都师范大学音乐与舞蹈学科半个多世纪的建设历程，所取得的成绩，是全体师生共同努力的结果，是社会各界支持、鞭策、帮助的结果。我们要向首都师范大学音乐与舞蹈学科的开创者和老一辈教职员工致以崇高敬意！向为学院学科建设积极助力的社会各界同仁致以最诚挚的谢意！

“教育者，非为以往，非为现在，而专为将来。”我们珍视前人奠定的基础，我们更应继往开来，秉心前行，为首都师范大学音乐与舞蹈学科建设，为国家音乐舞蹈艺术教育事业，牢记使命，不忘初心，求真务实，砥砺前行！

蔡 梦

首都师范大学音乐学院教授

2018年5月1日

自序

本书最初为邓志勇先生为首都师范大学音乐学院音乐科技系本科生定制的《音乐声学基础》必修课的课程讲义。当我最初以懵懂的本科一年级学生在课堂上遇到邓老师，并拿到这份讲义大纲的时候，并不能想到在接下来的十年中我与音乐声学以及相关专业的联系会变得如此紧密，以至成为我的学习研究方向。后经2012年选入邓老师本科生专业方向，2014年保送成为音乐声学专业研究生，至今毕业工作，以学生、助教、从业者、编者等多个身份，对本书涉及的相关内容进行学习、应用以及思考，也见证本书由最初课程大纲，历经课程教学中的数次调整、扩充、细化，逐步充实、至今成书的过程。将这样一本带有个人对于音乐声学学科思考以及应用实例的个性鲜明的课程讲义集结成册，是邓老师与我多年以来的愿望和约定，而今“首都师范大学音乐舞蹈学科‘新时代’学科建设创新工程”也使得本书的撰写出版成为可能。

本书共7章，分别为基本概念、心理声学、声音信号处理、乐器声学、室内声学、电声学、声景学及其相关思考题、参考乐例与实例。旨在从实例入手，在介绍声学基础知识和理论的同时，沟通声音现象与声学原理，强化理论与实践间的联系，促进交叉学科的共同发展，并在音乐声学的范畴下首次系统地阐述声景学与声景音乐的研究内容，扩展了学科视野。其中，邓志勇主要负责第1章基本概念，第2章心理声学，第3章声音信号处理及第5章室内声学的编写与统稿工作；王岱威主要负责第4章乐器声学，第6章电声学及第7章声景学的编写与校对工作。

本书的初衷是作为音乐学院音乐声学及相关课程的教材，除此之外，我们更希望见到的是，它可以成为音乐、音频工程从业者和研究者、声音艺术家、演奏家、音乐学人、作曲家和音乐制作爱好者，甚至音乐爱好者的读物。读者若能从字里行间有所收获、有所思考，即便开怀一笑，亦是编者的乐事。若能更进一步，为研究者打开思路，为创作者激发灵感，为学子创造兴趣，便配得上“导论”二字，更是本书及编者的荣幸。虽才疏学浅，但能抛砖引玉，

为音乐声学领域贡献自己的点滴智慧和汗水，亦不负我辈学子之心、学者之志。

最后，诚挚地感谢首都师范大学出版社与首都师范大学音乐学院为本书出版提供支持，首都师范大学音乐学院蔡梦教授为《首都师范大学音乐舞蹈学科“新时代”学科建设创新工程》丛书作序，并为本书的统稿提供诸多支持和帮助。感谢首都师范大学教务处、广西艺术学院音乐学院、中国传媒大学传播声学研究所、美国杜兰大学音乐系、英国谢菲尔德大学建筑学院及音乐系。感谢吴硕贤、赵越喆、谢菠荪、朴泰弘、李永荣、尹铁良、刘奕、邱菲、韩宝强、吴粤北、孟子厚、谢凌云、王鑫、刘爱利、张健、华伟、潘林紫、张梓倩、马昕、李永刚、周长海、王辛刚、白喜元、邓小华、刘玉英和苏纪方老师对本教材的支持与帮助。感谢参与本教材相关研究工作的李昕欣、陈昊骥、王芸、栾奕、杨倩、张云翰、刘天奕、袁亦佳、曲一峰、李梦煜、佟鑫、张子良、白丹枫、郑晓宁、吴雯、何穆和史东宁同学的辛勤工作。感谢涉及所有研究样本的音乐家、艺术家、居民和游客，感谢所有参加主观评价实验的被试者和欣然接受问卷调查的受访者，以及母校首都师范大学音乐学院音乐科技系多年的培养。感谢父母及家人给予我的理解、支持与关爱。

王岱威代笔

2018年4月24日

目 录

第 1 章 基本概念	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 基本概念	(3)
1.2.1 正弦波和纯音	(3)
1.2.2 声音四要素	(6)
1.2.3 其他概念	(7)
1.3 分贝	(8)
1.4 声级	(9)
1.4.1 声压级	(10)
1.4.2 声功率级	(13)
1.4.3 声强级	(13)
1.5 思考题	(13)
 第 2 章 心理声学	(14)
2.1 听觉与人耳结构	(14)
2.2 声音四要素的感知	(17)
2.2.1 音量的感知	(17)
2.2.2 音高的感知	(21)
2.2.3 音长的感知	(23)
2.2.4 音色的感知	(24)
2.3 声像的感知	(25)
2.4 噪声的感知	(28)
2.4.1 什么是噪声?	(28)

2.4.2	信噪比	(29)
2.4.3	噪度	(29)
2.5	掩蔽效应	(30)
2.6	失真的感知	(33)
2.7	音质的感知	(33)
2.8	思考题	(37)

第3章 声音信号处理

3.1	模拟信号的数字化艺术	(38)
3.1.1	信息论思想简述	(38)
3.1.2	信号及其分类	(39)
3.1.3	AD 转换	(41)
3.1.4	常用数字音频编解码标准	(44)
3.2	信号的时域分析	(45)
3.2.1	时窗	(45)
3.2.2	信号的瞬态特征与 ADSR 包络	(46)
3.2.3	压缩器与扩展器	(49)
3.2.4	噪音门	(52)
3.2.5	延迟器	(53)
3.3	信号的频域分析	(54)
3.3.1	傅立叶变换与信号的频谱	(54)
3.3.2	滤波器与均衡器	(57)
3.3.3	脉冲响应、卷积与混响器	(62)
3.4	音乐信号分析	(65)
3.4.1	音乐的声谱图	(65)
3.4.2	音与音列的分析	(67)
3.4.3	旋律与曲式的分析	(71)
3.4.4	音长与节奏的分析	(72)
3.4.5	和声与协和性分析	(73)

3.5 思考题	(76)
---------------	------

第4章 乐器声学

(77)

4.1 乐器概述	(77)
4.1.1 乐器的构造	(78)
4.1.2 乐器的分类	(79)
4.2 乐器的声学属性	(80)
4.2.1 乐器的音高与音域	(80)
4.2.2 乐器的瞬态特性	(82)
4.2.3 乐器的频域特性	(82)
4.3 钢琴的声学原理	(85)
4.3.1 钢琴的构造	(86)
4.3.2 钢琴的音域与振动频率	(87)
4.3.3 钢琴的波形与瞬态特性	(88)
4.3.4 钢琴的指向性	(88)
4.3.5 钢琴的频谱	(89)
4.4 弦乐器的基本声学原理	(90)
4.4.1 弦乐器的构造	(91)
4.4.2 弦乐器的音域与弦的振动频率	(92)
4.4.3 弦乐器的指向性	(93)
4.4.4 弦乐器的瞬态特性与平均频率响应	(93)
4.5 管乐器的基本声学原理	(96)
4.5.1 管乐器的一般构造	(96)
4.5.2 管乐器的音域与空气柱的振动方式	(97)
4.5.3 管乐器的指向性	(97)
4.5.4 管乐器乐音的瞬态特性与频谱	(99)
4.6 人声乐器	(102)
4.6.1 人声乐器的发声机制	(102)
4.6.2 人声的指向性	(105)

4.7	打击乐器的声学原理	(106)
4.7.1	鼓的瞬态特性与频谱	(106)
4.7.2	鼓的指向性	(108)
4.8	思考题	(109)
第5章	室内声学	(110)
5.1	建筑基础知识	(110)
5.1.1	建筑空间的基本类型	(113)
5.1.2	室内空间的基本构造与图面表达	(113)
5.1.3	室内空间的体型与功能	(118)
5.2	声音在室内空间的传播规律	(120)
5.2.1	混响过程与脉冲响应	(120)
5.2.2	室内声音传播的几何声学	(125)
5.2.3	室内声能传播的波动声学观点	(127)
5.3	吸声与隔声	(130)
5.4	典型室内空间的声学特点与声学设计流程	(132)
5.5	思考题	(137)
第6章	电声学	(138)
6.1	电声换能器	(138)
6.1.1	电声换能器的工作原理与类型	(138)
6.1.2	传声器	(139)
6.1.3	扬声器	(141)
6.1.4	传声器与扬声器的主要技术指标和性能	(145)
6.2	电声系统	(152)
6.2.1	声音链与声系统	(152)
6.2.2	信号流程图、设备清单、系统配置图与音响脚本 ...	(153)
6.2.3	线路与电声系统中的电平	(161)
6.2.4	音频接口	(161)

6.2.5	电声系统的调试与校准	(164)
6.3	常见问题	(165)
6.3.1	频率响应	(165)
6.3.2	阻抗匹配	(166)
6.3.3	接地	(167)
6.3.4	声系统的降噪与其他基本原则	(168)
6.4	思考题	(169)
第7章	声景学	(170)
7.1	声景学概述	(170)
7.2	声景音乐	(175)
7.2.1	声景音乐的概念	(175)
7.2.2	声景音乐的研究内容与研究框架	(180)
7.3	声景与声景音乐的属性	(185)
7.3.1	物理与声学属性	(185)
7.3.2	时空二维属性	(186)
7.3.3	原生性	(186)
7.3.4	符号学意义与声景音乐的类型	(187)
7.3.5	声景音乐的特征量及其音乐功能	(190)
7.4	声景音乐的表达与分析	(194)
7.4.1	谱面表达	(194)
7.4.2	曲式分析	(196)
7.4.3	综合分析	(200)
7.5	声景素材的采集	(202)
7.5.1	采集策划	(202)
7.5.2	采集技术与实施	(204)
7.5.3	采集后样本的整理与分析	(205)
7.6	声景素材的应用	(208)
7.7	思考题	(211)

参考文献 (212)

实例索引 (225)

图表索引 (228)

术语表 (232)

跋 (241)

第1章 基本概念

1.1 概述

音乐声学是一门古老而年轻的学科,本书讨论的音乐声学(Musical/Music Acoustics),从音乐学的范畴看,一个可能但略微狭义的定义是:从声学的角度研究音乐音响现象^①。在中国,于1986—1987年间在河南舞阳县贾湖新石器时代遗址出土的数十只贾湖骨笛,为古代音乐声学的研究提供了极有价值的实物^②。在西方,古希腊哲学家毕达哥拉斯(Pythagoras,前570—495)较早计算出了等程律(Pythagorean Tuning)^③,并传说其本人还根据这一理论进行作曲,但目前尚未发现有流传后世的文献记载。而古罗马哲学家圣奥古斯丁(Saint Augustine of Hippo, 354—430)的早期论著《论音乐》就指出“音乐是经完美调制的科学(Musica est Scientia, bene modulandi)”^④。之后,东西方众多科学家与艺术家们,从计算出十二平均律的朱载堉(1536—1611)^⑤、佛兰德人(现今荷兰境内)斯特芬(Simon Stevin, 1548—1620)^⑥和法国数学家及哲学家默森(Marin Mersenne, 1588—1648)^⑦到平均律音乐创作的先驱巴赫(Johann Sebastian Bach, 1685—1750)^⑧;从声学理论的早期构建者奇洛德尼

① 杨燕迪. 音乐学新论——音乐学的学科领域与研究规范[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.

② 夏季. 中国原始音乐声学成就数理分析——贾湖骨笛研究[D]. 北京: 中国科技大学, 2003.

③ Ferguson, Kitty. The Music of Pythagoras: How an Ancient Brotherhood Cracked the Code of the Universe and Lit the Path from Antiquity to Outer Space[M]. New York: Walker & Company, 2008.

④ Croix, Richard R. La (Editor). Augustine on Music[M]. The Edwin Mellen Press, 1988.

⑤ 朱载堉, 冯文慈. 律吕精义[M]. 北京: 人民音乐出版社, 1998.

⑥ Mersenne, Marin. Harmonie universelle, Contenant la théorie et la pratique de la musique (1636). Centre national de la recherche scientifique, 1965.

⑦ Stevin, Simon. Van De Spiegheling Der Singconst. The Diapason Press, Tuning and Temperament Library, 1605.

⑧ [德]巴赫. 巴赫: 平均钢琴曲集(一)、(二)[M]. 北京: 人民音乐出版社, 2009.

(Ernst Chladni 1756—1827)^①、丁铎尔(John Tyndall, 1820—1893)^②、赫尔姆霍茨(Hermann von Helmholtz, 1821—1894)^③与瑞利勋爵(John William Strutt, 1842—1919)^④直至发明家爱迪生(Thomas Edison, 1847—1931)^⑤与工程师赛宾(Wallace Clement Sabine, 1868—1919)^⑥;再从中国历代的修律与礼乐历史到嵇康(224—263)^⑦与阮籍(210—263)^⑧、祖孝孙(六世纪下半叶至七世纪)^⑨、沈括(1031—1095)^⑩、宋应星(1587—1666)^⑪、徐寿(1818—1884)^{⑫⑬}至缪天瑞(1908—2009)^⑭等人,相继推动了音乐声学,特别是基于平均律(西方)与东方音乐体系(中国)的理论研究、实践与艺术创作。关于音乐声学的历史已有学者进行过深入而有趣的阐述^{⑮⑯},此处不再一一赘述。

音乐声学发展至今已成为与众多学科形成关联的交叉学科,基于龚镇雄先生的研究,本书对声学在整个学科体系中的地位及其与相关学科的关系所构成的研究框架整理如图 1.1(a),音乐声学与其相关学科所构成的研究内容整理如图 1.1(b)所示。而音乐声学研究的基本方法又涉及数学、声学、信息科学、生态学、音乐学、人类学、社会学与史学等多个领域,本书将在相应

① Chladni, Ernst. Entdeckungen über die Theorie des Klanges (Discoveries in the Theory of Sound, 1787). Literary Licensing, LLC, 2014.

② Tyndall, John. Sound, 1875.

③ Helmholtz, Hermann von. On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music. Longmans, Green, 1912.

④ 杨庆余,周荣生.瑞利勋爵对现代声学基础理论的开创性贡献[J].徐州师范大学学报(自然科学版),2001(3):36—39.

⑤ Baldwin, Neil. Edison: Inventing the Century[M]. Chicago: University of Chicago Press, 2001.

⑥ Sabine, Wallace Clement. Collected Papers on Acoustics[M]. New York: Dover Publications, 1964.

⑦ 嵇康,吉联抗.声无哀乐论[M].北京:人民音乐出版社,1964.

⑧ 徐公持.阮籍与嵇康[M].上海:上海古籍出版社,1986.

⑨ 戴念祖.中国物理学史大系:声学史[M].长沙:湖南教育出版社,2001:14、248—253.

⑩ 沈括,诸雨辰.梦溪笔谈[M].北京:中华书局,2016.

⑪ 宋应星,邹其昌.天工开物[M].北京:人民出版社,2015.

⑫ 戴念祖.中国物理学史大系:声学史[M].长沙:湖南教育出版社,2001:17、32、364—370、440、445.

⑬ Stone, W. H. Acoustics in China[J]. Nature, 1881(3):448—449.

⑭ 缪天瑞.律学[M].北京:人民音乐出版社,1983.

⑮ 龚镇雄.音乐声学——音响、乐器、计算机音乐、MIDI、音乐厅声学原理及应用[M].北京:电子工业出版社,1995.

⑯ 韩宝强.音的历程——现代音乐声学导论[M].北京:中国文联出版社,2003.

的章节进行讨论。同时，读者还可参考其他声学或音乐声学著作^{①②③④⑤}的有关章节，结合本书使用。

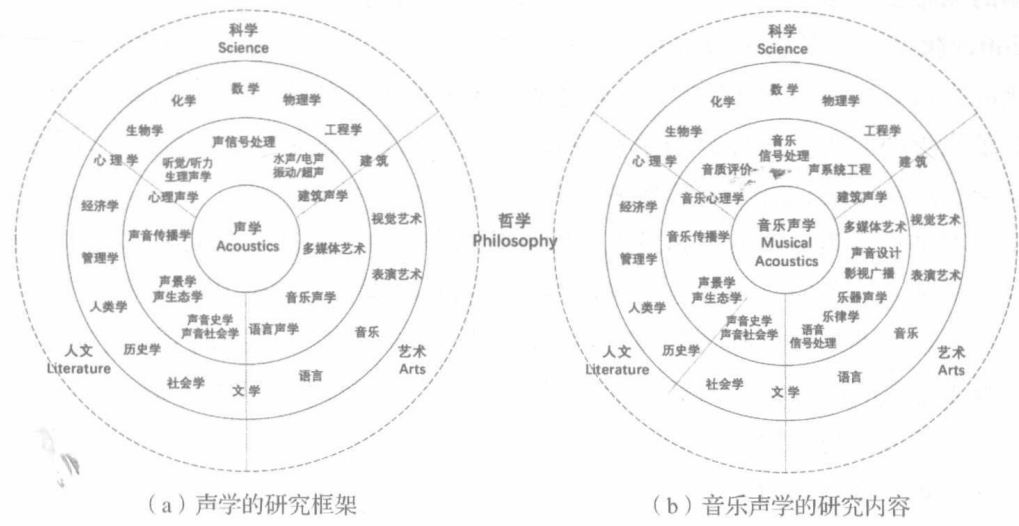


图 1.1 声学的研究框架与音乐声学的研究内容

1.2 基本概念

1.2.1 正弦波和纯音

正弦波(Sine Wave)虽然只是包含单个频率的纯音(Pure Tone/Single Tone/Monotone)，却包括了振幅(Amplitude)、频率(Frequency)和相位(Phase)等声音的基本特征。纯音也许是世界上最为简单也是人们最为熟悉的声音。然而遗憾的是，在现实世界中几乎不可能听到纯音，而是可以分解成多个正弦波的、包含多个频率的复合音(Complex Tone)，如钢琴等常见乐器的乐音都是复合音。纯音似乎只是在 20 世纪初，电子音乐(Electronicacoustic

① 齐娜，孟子厚. 音响师声学基础[M]. 北京：国防工业出版社，2006.

② 马大猷，沈峰. 声学手册[M]. 北京：科学出版社，2004.

③ [英]David M. Howard, Jamie Angus. 陈小平译. 音乐声学 with 心理声学[M]. 北京：人民邮电出版社，2010.

④ 杜功焕，朱哲民，龚秀芬. 声学基础[M]. 南京：南京大学出版社，2001.

⑤ [美] Everest, F. Alton, Ken C. Pohlmann, 声学手册——声学设计与建筑声学实用指南，关于录音棚、控制室、家庭听音室等声学环境构建的科学与实践指导书[M]. 郑晓宁译. 北京：人民邮电出版社，2016.