



ENGINEERING IN
VOICE MEDICINE

嗓音医学工程学

万明习 王素品 吴 亮◎著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

嗓音医学工程学

万明习 王素品 吴 亮 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

嗓音医学工程学是在推动嗓音医学发展过程中自身得到发展,多学科交叉特色突出,体系正在逐渐形成,且尚需不断拓展的重要研究领域。本书明确了嗓音医学工程学的概念和内涵,对核心的基础理论、工程技术方法、应用结果与内在机制进行了系统深入的阐述。全书共7章,很好地把握了本领域现状、核心和新方向,其中核心内容包括嗓音产生的物理与调控机制,检测、成像与分析,病理语音重建与增强等方面的理论方法、关键技术和应用成果。

本书适合于生物医学工程、喉科学及嗓音医学、语言声学与通讯、语言学、心理学与神经科学等领域的科研人员、研究生和医生阅读,希望能够为致力于该领域研究的科研人员提供具体的理论方法与关键技术。

图书在版编目(CIP)数据

嗓音医学工程学/万明习,王素品,吴亮著. —北京:科学出版社,2015.2
ISBN 978-7-03-043382-4

I. ①噪… II. ①万… ②王… ③吴… III. ①嗓音医学 IV. ①R767.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 029636 号

责任编辑:罗 静 刘 晶 / 责任校对:郑金红

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:北京铭轩堂广告设计有限公司

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京数图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年2月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年2月第一次印刷 印张:30

字数:711 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

嗓音的产生是语音器官最重要的生理功能和社会功能,是喉科学、艺术嗓音、语言声学 and 语音通讯、语言学、生物医学工程学、心理学与神经科学等学科共同关注的焦点。嗓音医学(voice medicine)是一门研究嗓音产生的基本原理、探讨嗓音与言语障碍的病因、发病机制、诊断、治疗和预防的科学,研究领域涉及嗓音生理、艺术嗓音、嗓音功能评估、嗓音疾病诊断、嗓音外科治疗、无喉言语康复等许多方面。20 世纪,欧洲和美国等相继建立了一批与嗓音医学相关的研究机构、学术组织和基金会,出版了多份专门的学术刊物,嗓音医学及其相关技术研究得到了快速发展。

嗓音医学工程学(engineering in voice medicine)则是在推动嗓音医学发展过程中自身得到发展,学科交叉特色突出,体系逐渐形成,但尚需不断拓展深化的重要研究领域。

除了语言声学和语音通讯领域之外,数理科学与工程技术在嗓音医学的生理基础、功能评估与临床检查、语音重建与替代交流、嗓音与言语障碍等分支领域的研究发展中均发挥了重要作用,并形成了专门的理论方法与技术手段。发音与构语过程涉及来自中枢神经系统命令对呼吸-发声空气动力系统、喉与声门形态及声带振动、上声道构语与共鸣等语音产生过程的复杂与精确控制。因此,发声空气动力学、声带组织力学与振动力学、嗓音和语言声学、喉内外肌肌电与发声神经控制等是嗓音医学及工程领域的基础性核心问题。声带是人体中振动频率最高的微小器官,也是最易损伤的语音器官,它的高速、精微、复杂的三维振动对浊音嗓音源特性起主要决定作用。围绕声带振动与嗓音源特性的研究,产生了专门的基础研究手段和临床检查技术及设备。以自动电子喉为代表的病理语音重建和替代交流技术也在快速发展。语音神经肌肉系统调节运动研究手段和脑功能成像技术正在言语语言病理学分支领域前沿研究发挥作用。由此可见,嗓音医学工程学的研究内容具有特色但又分散,而其内涵正在不断得到充实并形成体系。

目前国际上尚未见到能系统反映嗓音医学工程学主要内容与前沿发展的著作。由 Fant 撰写的 *Acoustic Theory of Speech Production* (1970, 第二版)一书是语言声学和语音通讯领域奠基性经典著作。1981 年由日本学者 Hirano 编写的 *Clinical Examination of Voice* 一书,从满足临床需要角度对嗓音疾病的客观检查与评价方法进行了系统归纳和简要介绍。1995 年,由 Titze 撰写的 *Principles of Voice Production* 一书为不同学科领域的学者从物理学角度了解嗓音的产生、调节与控制等提供了重要帮助。2013 年, Springer 将 Baghai-Ravary 等撰写的 *Automatic Speech Signal Analysis for Clinical Diagnosis and Assessment of Speech Disorders* (共 70 页)作为语音技术丛书出版。

20 世纪 80 年代以前,我国少数知名喉科学和艺术嗓音医学专家就结合临床实践开展了与嗓音有关的研究,出版了《简明声病学》(张迺华,1981)和《歌唱医学基础》(冯葆富,1981)。80 年代初,在我国主要由喉科学和艺术嗓音医学专家开启了嗓音医学这一专门领域,早期也称为嗓音医学与言语医学(phoniatrics and logopedics),少数语言学、语言声

学和生物医学工程学等领域专家也在其中做了重要的研究工作。2000 年以来,《嗓音医学基础与临床》(杨式麟,2001)、《嗓音外科学》(江德胜和余养居,2004)、《嗓音医学》(韩德民,2007)、《嗓音疾病与嗓音外科学》(于萍和王荣光,2009)和《实用临床嗓音医学》(黄永望,2012)等相继出版。这些教科书和著作对嗓音医学领域的人才培养、科学研究和临床实践等发挥了重要作用,本书作者也从中受益匪浅。但到目前为止,国内也没有一部关于嗓音医学工程学方面的著作。

本书作者及其研究小组自 1986 年以来一直从事嗓音医学物理与工程方面的研究工作,在声带多维振动和嗓音源特性测量及高速成像、发声肌肉黏弹性-空气动力学测量与数学物理建模研究、无喉语音重建与替代交流等三大方面发展了具有创新性的基础理论、研究方法和关键技术,逐渐形成了具有特色的嗓音医学工程学研究体系。为了促进学术交流与人才培养,加快我国嗓音医学工程学专门领域的发展,我们于 2012 年启动了《嗓音医学工程学》的撰写工作。此专著的内容主要是本小组近三十年研究成果的归纳和总结,同时涵盖了国际上的最新进展。嗓音医学工程学的理论方法和关键技术与生理病理基础及前沿密切关联,作者在撰写时不仅保证了本书的系统性,还强调了内容的深入性。因此,希望本书能够帮助读者对嗓音医学工程学领域有所了解;也希望对准备进入该领域进行研究的学者起到“抛砖引玉”的作用;更希望为致力于该领域深入研究的科学家和工程开发的技术人员提供具体的理论方法与关键技术。

本书共分为 7 章:第 1 章简单介绍了嗓音医学工程学的发展历程、语音产生的生理基础和物理原理、现有嗓音医学研究与临床应用的检测、成像及分析方法;第 2 章详细介绍了发声空气动力学的物理和数学建模方法,及其在声门腔组织形态变化对发声作用方面的主要研究成果;第 3 章主要讨论了声门图检测电采样场理论、信号起源模型、信号处理与特征参数提取方法及其与声带振动模式的关系,发展了两种新的声门图技术;第 4 章主要介绍了高速成像和高帧率超声成像方法在声带振动特性和组织力学参数反求研究中的理论方法、关键技术和应用结果,对声带的相干光学断层成像也有涉及;第 5 章详细叙述了在自动电子喉语音重建领域关于嗓音源合成与控制的理论方法及关键技术;第 6 章主要介绍了关于电子喉语音增强和病理语音评价等方面的研究成果;第 7 章从脑功能成像角度介绍了关于语音听觉与发声大脑控制机制方面研究的初步方案。

全书撰写过程中,作者参阅了大量国内外本领域和相关领域的教科书、论文等文献,并注意反映我国在嗓音医学及工程领域的工作进展。书中每章参考文献的选择除了满足引文的要求外,还力求涵盖本领域的经典文献和最新文献。由于嗓音医学及工程涉及面广,发展迅速,积累了丰富的文献资料,本书在引文方面可能还有疏漏,敬请谅解。此外,由于作者水平有限,本书在内容选取与写作等方面存在不足和疏漏之处在所难免,恳请读者不吝赐教,予以批评和指正。

作者要特别感谢近 20 年来牛海军、刘汉军、秦绪磊等 13 位博士生和 19 位硕士生的研究工作。感谢张全忠教授和王锦玲教授,缅怀张迺华教授和余桂芬医生,是他们在 20 世纪 80 年代中期同时为作者 1 人——一位生物医学工程专业研究生讲授和主持考试耳鼻咽喉科学课程,并提供动物实验和临床研究的保障。还要感谢北京、天津、上海和南京等地的多位中老年艺术嗓音医学、耳鼻咽喉科学和语言声学专家,当作者 20 世纪 80 年代

中期满怀激情进入这一自己本不熟悉的领域时,他们给予了充分的鼓励。感谢 R. C. Scherer 教授在发声空气动力学研究和人才培养方面提供的富有成效的合作。感谢作者的导师程敬之教授 30 多年来给予的指导和支持。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金面上项目(No. 68871030、No. 69101002、No. 69871023、No. 30070212、No. 30770544、No. 10874137、No. 61271087、No. 11274250)、国家杰出青年科学基金项目(No. 69925101)、原国家教委跨世纪优秀人才计划项目和教育部博士点基金(No. 20100201110049)等的大力支持,也得到了 973 项目课题(No. 2010CB732603)的重要支持。

正是所有这些因素支持我们在本领域长期从事研究和人才培养工作,并使本书得以完成,在此一并表示感谢。

著 者

于西安交通大学

2014 年 2 月

目 录

前言

第 1 章 嗓音医学工程学基础	1
1.1 嗓音医学工程学简介	1
1.1.1 嗓音言语医学	1
1.1.2 嗓音医学工程学	2
1.2 发声系统	3
1.2.1 喉下腔	3
1.2.2 喉腔	4
1.2.3 喉上腔	5
1.2.4 喉软骨	5
1.2.5 喉肌	7
1.3 嗓音产生的基本原理	9
1.3.1 声带振动机理	9
1.3.2 喉发声调节机制	10
1.3.3 声学基础	13
1.4 语音产生的神经控制	14
1.4.1 喉神经	15
1.4.2 语音产生的大脑控制	15
1.5 现有嗓音学研究方法	16
1.5.1 语音声学参数检测	16
1.5.2 发声空气动力学测量	19
1.5.3 喉动态镜和喉高速摄影	22
1.5.4 声带振动的声门图	23
1.5.5 声带振动组织力学	26
1.5.6 喉肌电图	28
1.6 本章小结	29
参考文献	29
第 2 章 发声空气动力学物理与数学建模	35
2.1 发声空气动力学建模的理论基础	35
2.1.1 语音激励模型	35
2.1.2 生物物理因素	36
2.1.3 准稳态假设理论	36
2.2 喉物理模型	37

2.2.1	喉物理模型建立的意义	37
2.2.2	喉物理模型的发展	38
2.2.3	离体喉模型	39
2.2.4	活体喉模型	40
2.3	声门几何参量的发声空气动力学数学及物理建模	41
2.3.1	数学建模方法	41
2.3.2	声门倾角对喉物理模型内压力速度场分布及发声的影响	42
2.3.3	声门上下表面角对声门腔内压力场及发声的影响	50
2.3.4	声门入口半径对声门内压力场及发声的影响	56
2.4	喉腔内表面参量及不同发声条件的空气动力学建模	62
2.4.1	不同假声带及喉室形状对声门腔内准稳态流场及发声的影响	62
2.4.2	正常语音发声周期内及不同直径下声门腔内流场变化及其与发声参量的关系	72
2.4.3	全喉与半喉模型声门区准稳态流场分布	78
2.5	本章小结	85
	参考文献	85
第3章	声门图与声带振动模式	91
3.1	光声门图信号起源	91
3.1.1	光声门图信号模型	91
3.1.2	光声门图模型讨论	93
3.2	电声门图采样场理论	94
3.2.1	电声门图场扰动理论	95
3.2.2	电声门图信号模型	98
3.2.3	电声门图灵敏度空间分布	103
3.2.4	电声门图调制度公式	109
3.2.5	横向电声门图与声带振动的关系	109
3.2.6	电声门图微音器效应	111
3.3	电声门图信号特征	114
3.4	电声门图信号处理与参数提取	116
3.4.1	电声门图信号预处理	116
3.4.2	电声门图的参数提取	122
3.5	斜置电声门图	125
3.5.1	发声的多信号同步采集系统与方法	126
3.5.2	斜置电声门图设计与参数提取	128
3.5.3	SEGG 信号与声带振动相位间关系的验证	129
3.5.4	SEGG 的信号幅度	130
3.5.5	SEGG 提取的速度和速度比	132
3.5.6	SEGG 提取的平均声门闭合商	133

3.6 超声声门图	135
3.6.1 基于超高速平面波和 SEGG 的成像和记录系统	136
3.6.2 从平面波超声图像中提取超声声门图曲线	137
3.6.3 超声声门图曲线的特征点	139
3.6.4 超声声门图曲线的特征参数	143
3.6.5 超声声门图和电声门图的优点	143
3.7 线性预测反滤波声门图	144
3.7.1 语音单通道线性预测反滤波声门图	145
3.7.2 语音-电声门图双通道线性预测反滤波声门图	146
3.7.3 气流-电声门图双通道线性预测反滤波声门图	147
3.7.4 语音-气流混合式线性预测反滤波声门图	148
3.7.5 反滤波声门图再处理	149
3.7.6 反滤波声门图实验结果分析	149
3.8 声门图声带质量运动学建模仿真	152
3.8.1 声带振动运动学模型与位移函数	152
3.8.2 声门图波形数学模型	154
3.8.3 声门图波形仿真计算	158
3.9 声门图特征参数与声带振动模式	165
3.9.1 正常男女性不同发声方式及其特征参数	165
3.9.2 喉病声带振动方法及其特征参数	167
3.9.3 声带扰动参数的分布	175
3.10 本章小结	175
参考文献	176
第4章 声带组织力学及其振动高速成像	180
4.1 声带的组织力学特性及其模型	180
4.1.1 声带振动的组织力学特性	180
4.1.2 声带被覆层振动模型	184
4.1.3 声带体层-被覆层分层模型	187
4.1.4 咽食管模型	189
4.1.5 声带振动组织力学特性的实验测量方法	191
4.2 电声门图同步的高速摄影成像	193
4.2.1 影响声带组织力学参数提取精度的因素	193
4.2.2 高速摄影喉镜和电声门图同步成像检测系统	194
4.2.3 亚像素级声门边缘检测和直接参数提取	198
4.2.4 双质量块模型参数优化	202
4.2.5 组织力学参数反求与分析	205
4.3 声带振动的超声成像	211
4.3.1 喉的常规超声成像	211

4.3.2	高帧率超声与高速摄影同步成像	213
4.3.3	电声门图同步的高帧率超声成像	223
4.4	电声门图同步的超声喉动态镜	238
4.4.1	电声门图同步的超声喉动态镜原理	238
4.4.2	电声门图同步的超声喉动态镜系统	240
4.4.3	超声喉动态镜系统测试	245
4.5	声带的光学相干断层成像	248
4.6	本章小结	252
	参考文献	252
第5章	病理语音重建	258
5.1	病理语音重建方法	258
5.1.1	食管语音	259
5.1.2	气管食管语音	259
5.1.3	电子喉语音	260
5.2	电子喉元音重建	262
5.2.1	电子喉噪音源与重建元音	263
5.2.2	具有声道特征补偿的电子喉声门上元音噪音源	265
5.2.3	不同元音噪音源及其重建元音的声学特征	273
5.3	电子喉辅音重建	297
5.3.1	基于辅-元结构音节的重建方法	298
5.3.2	噪音源参数设置	299
5.3.3	重建辅音的感知听觉评价	303
5.4	电子喉自动控制	307
5.4.1	电子喉自动控制缺失	307
5.4.2	基于颈部肌电信号的电子喉自动控制	308
5.4.3	基于视觉语音特征的电子喉自动控制	313
5.4.4	基于视觉语音特征的电子喉发声起止控制性能	317
5.4.5	基于视觉语音特征的电子喉噪音源控制性能	333
5.4.6	基于轨迹球运动的汉语声调控制	348
5.5	本章小结	360
	参考文献	360
第6章	电子喉语音增强与评价	365
6.1	电子喉语音的噪声	365
6.2	电子喉语音的谱减增强方法	366
6.2.1	经典谱减法	366
6.2.2	电子喉语音的噪声估计	368
6.2.3	基于感知加权滤波器的电子喉语音增强	370
6.2.4	基于人耳听觉掩蔽模型的电子喉语音增强	382

6.3 电子喉语音的自适应增强方法	392
6.3.1 基于自适应滤波的电子喉语音增强	392
6.3.2 基于 ANC-ICA 的电子喉语音增强	393
6.3.3 语音增强效果	395
6.4 电子喉语音的小波包增强方法	398
6.4.1 小波变换与小波包	398
6.4.2 基于自适应小波包变换的电子喉语音增强	401
6.4.3 语音增强效果	404
6.5 电子喉语音增强系统	407
6.5.1 系统设计	407
6.5.2 系统实现	408
6.5.3 系统性能	412
6.6 电子喉语音评价	414
6.6.1 电子喉语音的空气动力学分析	414
6.6.2 电子喉语音的心理声学评价	423
6.6.3 电子喉语音和食管语音的声调特性	430
6.7 本章小结	444
参考文献	445
第7章 大脑语音加工机制	450
7.1 语音加工脑功能研究方法	450
7.1.1 语音加工脑功能模型	450
7.1.2 实验设计	453
7.1.3 数据的采集与分析	454
7.2 语音听觉	459
7.2.1 声音感知	459
7.2.2 语音处理	461
7.2.3 语音理解	461
7.3 语音表达	462
7.3.1 构音器官的运动皮层功能定位	462
7.3.2 语音表达的大脑控制	462
7.3.3 基频微扰响应特性	463
7.3.4 多语种语音表达	464
7.4 语言功能障碍	464
7.4.1 失语症	465
7.4.2 听觉异常	465
7.4.3 构音障碍	465
7.4.4 喉癌	466
7.5 本章小结	466
参考文献	467

第 1 章 嗓音医学工程学基础

1.1 嗓音医学工程学简介

1.1.1 嗓音言语医学

嗓音(voice)是在高级中枢神经的控制下,声门下气流挤压声带使其振动产生基音,并经咽腔、口腔和鼻腔调节而发出的具有一定音调、强度和音色的声音。嗓音的产生是语音器官最重要的生理功能和社会功能,是喉科学、艺术嗓音、语言声学 and 语音通讯、语言学、生物医学工程学、心理学与神经科学等学科共同关注的焦点。嗓音医学(voice medicine)是一门研究嗓音产生的基本原理,探讨嗓音与言语障碍的病因、发病机制、诊断、治疗和预防的科学,研究领域涉及嗓音生理、艺术嗓音、嗓音功能评估、嗓音疾病诊断、嗓音外科治疗、无喉言语康复等许多方面。20 世纪以来,随着全球信息化进程的推进,人类语言交流的广度及深度不断增加,对言语语言的要求已经不再停留于基本的交流功能上,而是上升到情感交流的高度,上升到“美声健声”的高度,因此对嗓音保健及嗓音康复质量的要求正在不断提高。所以,对嗓音医学领域的持续深入研究,对于人类发声机制的阐明,以及嗓音疾病的诊断、治疗、康复和保健都具有极其重要意义。

在国际上,嗓音医学(phoniatrics)和言语医学(logopedics)是一对相伴相生的概念,最初由奥地利医生 Hago Stern 于 1919 年提出。嗓音医学是研究嗓音器官,包括呼吸器、发声器和共鸣腔在内的解剖、生理、病理及有关临床疾病诊治问题的学科;言语医学是研究人们有关语言功能和言语病理的学科。而嗓音言语医学(logopedics and phoniatrics, L. P.)就是研究包括嗓音医学和言语医学两个方面在内的一门科学。随着社会需求的增长和研究技术的发展,首先在西方世界出现了与嗓音言语医学相关的研究机构、学术组织、政府机构及基金会等。在欧洲,国际嗓音医学和言语医学联合会(International Association of Logopedics and Phoniatrics, IALP)于 1924 年成立于奥地利的维也纳,是当时嗓音医学领域中最早的具有全球影响力的国际组织,出版了期刊 *Folia Phoniatrica et Logopaedica*。现在全球 31 个国家的 44 个协会参加了该联合会。美国的 ASHA(American Speech-Language-Hearing Association)成立于 1925 年,目前是美国临床言语语言病理学(speech-language pathology)从业资格标准的制定机构和专门的认证机构。美国的 Voice Foundation 也是非常具有国际影响力的、致力于嗓音医学和嗓音科学研究及教育的组织。在亚洲,日本音声言语医学会在语音、语言、听觉功能紊乱,以及脑对发声的中枢调控等方面具有深厚的研究背景,出版了《言语医学》一书,并提出了嗓音质量的主观评价标准。这些机构和组织一般由临床喉科医生、语音声学家、物理学家、生理学和生物学家、工程技术专家等多行业、多领域研究人员组成。他们大量的研究成果都发表在该领域具有国际影响力和国际知名的科技期刊中,如 *IEEE Transactions on Biomedical Engi-*

neering, *The Journal of the Acoustical Society of America*, *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, *Journal of Voice*, *Folia Phoniatica et Logopaedica*, 等等。

20 世纪 80 年代以前,我国少数知名喉科学和艺术嗓音医学专家就结合临床实践开展了与嗓音有关的研究。80 年代初,由喉科学和艺术嗓音医学专家开启了嗓音医学这一专门领域,早期也称为嗓音医学与言语医学。少数语言学、语言声学 and 生物医学工程学等领域专家也在其中做了重要的研究工作。经过三十余年的发展,我国的嗓音言语医学在研究领域、诊疗范围、从业人员数量、学术交流及相关研究成果的刊出等方面都具有一定水准,在嗓音生理、嗓音评估、语言治疗、艺术嗓音、嗓音外科、喉康复治疗、发音再造、吞咽障碍等方面都取得了一定的研究进展。2009 年,中华医学会耳鼻咽喉头颈外科分会成立了专门的嗓音学组,领导出版了《听力学及言语疾病杂志》期刊。此外,在北京和重庆等地也有一些地区性的嗓音研究协会。虽然与发达国家的研究单位相比还存在一些差距,但目前国内的一些三级甲等医院已经能够独立开展临床嗓音功能的评估和治疗。然而,国内对嗓音言语医学开展研究的研究者绝大多数为临床喉科医生,研究重点和大部分的研究成果都集中在嗓音医学领域,言语医学的发展非常滞后且目前仍处于被嗓音医学“代管”的状态,远非临床医师所能独立涉足。因此在国内,嗓音医学实际上包含了嗓音医学和言语医学这两个方面的研究内容。

1.1.2 嗓音医学工程学

随着科学技术的进步,喉科的检查方法和研究手段都有了很快的发展。其中一些是专门针对喉科检查和喉病康复而设计发展的,如非侵入且操作简便的电声门图、能够对声带高速振动进行“慢像”观察的频闪喉镜、无需手术且易于掌握的人工电子喉等;此外还有一些技术手段是借用其他临床或科研领域的技术方法,如超声、CT、高速摄影、肌电图、非线性动力学分析、声学分析和评价,等等。这些技术手段相互配合、相互补充,为研究者提供同一研究对象的不同角度的多维信息,为全面深入地进行研究奠定了基础。

自 1986 年以来,本书作者及其研究小组从生物物理和工程应用的角度出发,对嗓音医学领域中亟待解决的问题和难点不断提出创新的研究思路和实施方法,逐步发展并形成了十分具有特色的嗓音医学工程研究体系。我们将流体动力学和组织力学等自然科学方法与检测和成像技术、信号处理技术和康复工程等工程技术方法相结合,应用于声带多维振动和嗓音源特性测量及高速成像、发声肌肉黏弹性-空气动力学测量与数学物理建模研究、无喉语音重建与替代交流等方面的研究中来,将嗓音言语医学与物理学和工程学融合形成一个整体,首次提出了嗓音医学工程学这一概念:嗓音医学工程学(engineering in voice medicine)是在嗓音医学发展过程中逐渐形成的与工程学结合的交叉产物,是一门运用现代工程技术的原理和方法在多层次上研究嗓音医学的综合性、高技术的科学。在嗓音医学工程研究中,物理学和工程学扮演着十分重要的角色,它们是构成嗓音医学工程学这座大厦的基石。但遗憾的是,到目前为止我国的嗓音医学工程学仍未形成一个专门的人才培养学科。

经过近三十年的研究积累,我们利用物理学和工程学方法对发声生理与生物物理机制、嗓音学检测及信号处理方法、发声空气动力学特征、声带振动及组织力学特性、嗓音康

复重建技术等方面进行了多年系统深入的研究,形成了特有的嗓音医学工程基础理论、研究方法和关键技术,同时也构成了本学术专著的主要成果。本书在概括性地介绍了嗓音产生的生理解剖结构、物理原理及现有的嗓音学检测和研究手段基础上,主要内容可分为三大部分:发声空气动力学的物理与数学建模方法、声带振动的组织力学测量与成像、无喉语音康复技术。此外,考虑到言语医学在我国的研究基础相对薄弱,本书中还介绍了本研究小组对大脑的语音加工机制的初步研究方案和成果。希望本书能够帮助读者对嗓音医学工程学领域有所了解,也希望为准备进入该领域进行研究的学者起到抛砖引玉的作用,更希望为致力于该领域深入研究的科学家和工程开发的技术人员提供具体的理论方法与关键技术,使得嗓音医学工程学的研究内容不断拓宽、研究方法不断创新、研究成果不断丰富,从而促进嗓音医学工程学在我国的蓬勃快速发展。

1.2 发声系统

发声器官是人类歌唱和言语等发声过程的生理基础,而发声器官的解剖学是本书后续内容的重要基础。本节在编写过程中主要参考了国内耳鼻喉科学的权威教材和著作,包括汪吉宝和黄选兆等编写的《实用耳鼻咽喉科学》、吴学愚等编写的《喉科学》、江德胜和余养居等编写的《嗓音外科学》。

人类发声系统主要包含三个组成部分:振动部分——声带;动力部分——肺;传播和共鸣部分——胸腔、咽喉腔、喉腔、口鼻腔和头颅。对于人类语言功能而言,还需要有神经系统和咬字吐字器官(唇、舌、牙、腭等)的配合。

根据发声系统各部分的解剖结构和功能,通常将发声系统分为三个子腔,分别是喉下腔、喉腔和喉上腔。

1.2.1 喉下腔

喉下腔主要包括肺、气管和支气管,除了作为呼吸系统的一部分之外,也是整个发声系统的能量来源。

气管(trachea)是由弹性透明软骨、平滑肌、黏膜和结缔组织构成的腔管,共计有16~20个气管环,分叉为左、右主支气管。气管环之间有结缔组织连接。成人气管长度为10~12cm,横截面积 2.5cm^2 ,左右径2~2.5cm,前后径1~2cm。

支气管的结构与气管相似,由软骨、黏膜、平滑肌及结缔组织组成。从气管杈开始分为左、右主支气管,进入肺门。右侧主支气管粗短,长约2.5cm,与气管纵轴约成 25° 角,左侧主支气管细而长,长约5cm,与气管纵轴约成 45° 角,左右主支气管交角平均 $63^\circ\sim 79^\circ$ 。

肺是进行气体交换的器官,位于胸腔内纵隔的两侧,左右各一。肺上端钝圆处称为肺尖,向上经胸廓上口突入颈根部,底位于膈上面,左肺由斜裂分为上、下两个肺叶,右肺除斜裂外,还有一水平裂将其分为上、中、下三个肺叶。肺以支气管反复分支形成的支气管树为基础构成。支气管各级分支之间及肺泡之间都由结缔组织性的间质所填充,血管、淋巴管、神经等随支气管的分支分布在结缔组织内。成人肺容积为 $3000\sim 5000\text{cm}^3$,在正常呼吸时,肺内的气体交换量一般不大于 1000cm^3 。

1.2.2 喉腔

喉腔既是发声器官,又是呼吸道的门户,居于前正中,舌骨之下,是由喉支架围成的管状空腔,上通咽喉,下接气管。通常以声带为界,将喉腔分为声门上区(supraglottal portion)、声门区(glottal portion)和声门下区(subglottal portion)三部分。

1. 声门上区

声门上区位于声带上缘以上,其前襞为会厌软骨,二侧襞为杓会厌襞,后襞为杓状软骨。介于喉入口与室带之间的部分,称为喉前庭(laryngeal vestibule),上宽下窄,前壁比后壁长。其下又有室带与喉室两部分结构。

1) 室带

室带(ventricular fold)也称假声带(false vocal fold),左右各一,位于声带上方,与声带平行,由黏膜、室韧带及少量肌纤维组成,外观呈淡红色。发声时边缘呈凸面向上的弧形,呼吸时边缘展直,喉室入口呈窄隙状。

2) 喉室

喉室(laryngeal ventricle)位于声带和室带之间,开口呈椭圆形的腔隙,前端向上向外延展成一小憩室,称为喉室小囊(sacculus of larynx)或喉室附部。

2. 声门区

声门区位于声带之间,包括两侧声带、前联合和后联合。其中,声带是发声系统中最重要的器官。

声带(vocal fold)位于室带下方,左右各一,由声韧带、声带肌、黏膜组成。前端位于甲状软骨板交角的内面,两侧声带在此融合成声带腱,称前联合(anterior commissure)。声带后端附着于杓状软骨的声带突。声带张开时,出现一个等腰三角形的裂隙,称为声门裂,简称声门,这是喉最狭窄处。声门的后1/3界于两侧杓状软骨声带突之间者称为软骨间部,即为后联合(posterior commissure)。成年男性声带全长17~21mm,女性为11~15mm。

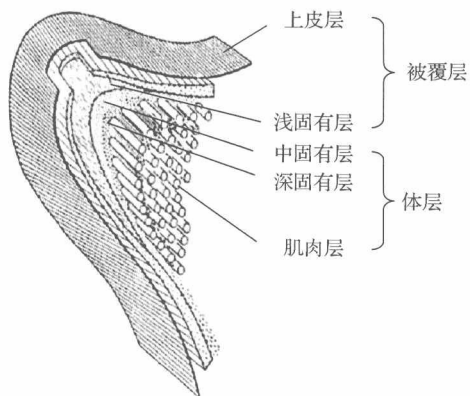


图 1.1 声带的层状结构(Hirano, 1974)

声带的多层结构如图 1.1 所示。声带是由黏膜、声韧带和声带肌组成的层状结构,其显微结构由浅入深分为三层。①上皮层,为覆层鳞状上皮,该层非常薄且细胞排列不紧密,但韧性好,伸屈性强。②固有层,可进而分为:浅固有层,为疏松结缔组织,弹性纤维极少,无胶原纤维,又称为 Reinke 间隙;中固有层,以弹性纤维为主,胶原纤维不丰富,较紧密;深固有层,主要为胶原纤维,与肌纤维结合紧密。③肌肉层,为甲杓内肌(即声带肌)。其中,上皮层和浅固有层组成声带黏膜,其下的中固有

层和深固有层构成声韧带(弹性圆锥),声韧带与声带肌紧密连接在一起。Hirano 根据声带分层特性,提出了一种声带结构模型(Hirano, 1974)。该模型由三部分构成,分别是被覆层、过渡层和体层。其中,被覆层包括了上皮层和浅固有层;过渡层包括了中固有层和深固有层;体层包括了声带肌。进一步简化该模型,可将过渡层划归到体层中,这样声带的简化结构模型由被覆层和体层两部分构成。

声带振动过程是一个空气动力学和声带组织本身弹性力学共同作用的生物物理学过程,为了能够对声带振动的力学特性进行定量分析,建立了很多相应的声带振动流体力学模型和组织力学模型。建立声带振动的模型,需要能够反映声带振动的某些特性,而一个适应于生理或者病理的声带振动的组织力学模型,必须能够通过调节它的参量来模拟喉内肌调节或者病理引起的不同条件下的发声。有关声带振动的模型有很多,包括了针对声带被覆层振动的单质量块和多质量块模型,也有针对声带被覆层和体层的三质量块模型(Story and Titze, 1995)、自激振动模型(Titze and Story, 2002),还有考虑声带几何形状的体层-被覆层双层连续模型(Zhang, 2009)、简化水波模型(Tsai et al., 2006)。随着数值计算和计算机技术的发展,后来又出现了利用有限元方法建立的多种有限元模型。

3. 声门下区

声门下区指的是声带下缘以下至环状软骨下缘以上的喉腔,该腔上小下大。气流经过这里,压力增加,最终冲开声门,使声带振动。

1.2.3 喉上腔

喉上腔起始于声门上区上端,终止于嘴唇,包含咽腔、鼻腔和口腔三个空气腔。

咽腔为一漏斗形肌性管道,前后扁平,为呼吸道与消化道的共同通道。成人长 11~12cm,上起颅底,向下于环状软骨下缘与食管口连接。咽的后壁及侧壁完整,前壁与鼻腔、口腔和喉腔相通。咽具有防御保护、吞咽、呼吸及言语形成等功能,并与保持正常听力有关。

鼻腔(nasal cavity)由鼻中隔分为左右各一,每侧鼻腔为一前后开放的狭长腔隙,顶部较窄,底部较宽,前起于前鼻孔,后止于后鼻孔。鼻腔的顶部与底部大致平行。鼻腔前后径上部约为 35mm,下部为 75mm,顶部内径均值为 3.5~5mm,底部为 12~23mm。鼻腔通道的整个长度约为 11cm,整个鼻腔体积约为 25cm³。

口腔是发声系统的终端。前壁以口唇为界,两侧被双颊包围,上界的前期 2/3 为硬腭,后 1/3 为软腭,下界由口腔底部的肌肉组成,后界借咽峡与咽相通。在闭口时,口腔可分为前庭和固有口腔两个部分,口腔对发声具有重要作用,其中唇、齿、舌是最重要的构音器官。口腔长度男女性不一,其中成年男性约 8.1cm,女性约 7.8cm。

当牙齿合拢时,喉上腔内的体积大约是女性 130cm³、男性 170cm³,在人正常说话过程中嘴张得最大时,对应体积变为 150cm³和 190cm³。

1.2.4 喉软骨

喉的整体形态依赖于由韧带、肌肉相互连接的软骨,喉部软骨共 11 块,包括甲状软

骨、环状软骨、会厌软骨、杓状软骨、小角软骨、楔状软骨和麦粒软骨,前三者为单一软骨且较大,后四者成对且较小。本节主要参考嗓音医学专著(吴学愚,2000;江德胜和余养居,2004)对喉软骨进行简单介绍(图1.2)。

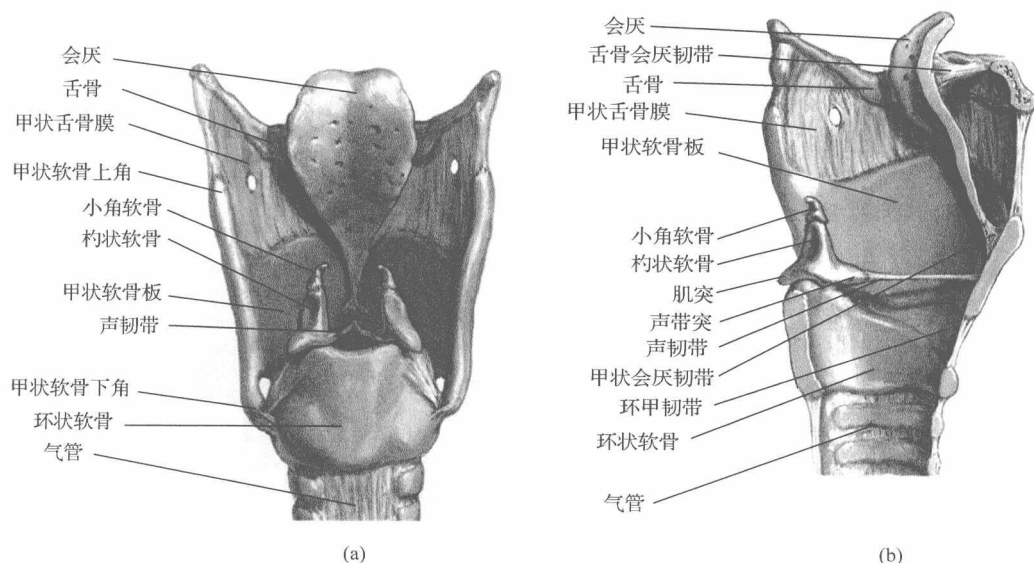


图 1.2 喉软骨(Netter et al., 2005)

(a) 后面观; (b) 内侧面观,正中矢状切面

1. 甲状软骨

甲状软骨为喉软骨中最大的一块,两侧软骨片呈四边形,称为甲状软骨板,两板前缘在颈前正中线汇合,相交处稍向后下方倾斜,其上方凹陷呈“V”形,称为甲状软骨切迹。相交角度存在性别差异:男性呈直角或锐角,向颈前中央突出,上端最突出处称为喉结;女性两板交角较大,约 120° ,呈弓形,外突不明显。

2. 环状软骨

环状软骨是呼吸道唯一的完整环形软骨。环状软骨较甲状软骨小,但较厚而坚硬,构成喉腔下部的前壁、侧壁,特别是后壁的支架。

3. 会厌

会厌为薄片状软骨,位于喉入口处的前方,舌与舌骨之后,表面有血管和神经穿行的小孔。其下部呈细柄状,称为会厌软骨茎,其上部逐渐变宽,向上后方延展,上缘游离。儿童的会厌软骨两侧缘向内卷曲,呈“Ω”形,较软;成人多呈圆弧形,平展、较硬,少数成人也呈卷曲状。

4. 杓状软骨

杓状软骨又称为“披裂软骨”,呈不规则锥体,左右各一,各跨于环状软骨板上缘的外侧。