

“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代声学科学与技术丛书

人工听觉——新视野

Auditory Prostheses: New Horizons

曾凡钢

编

〔美〕 Arthur N. Popper Richard R. Fay

平利川 沈 翌 孟庆林 王宁远 王 帅 译

冯海泓 陈友元 校审



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代声学科学与技术丛书

人工听觉——新视野

Auditory Prostheses: New Horizons

曾凡钢

[美] Arthur N. Popper Richard R. Fay 编

平利川 沈 翌 孟庆林 王宁远 王 帅 译

冯海泓 陈友元 校审

科 学 出 版 社

北 京

图字 01-2014-4053 号

内 容 简 介

本书是 2011 年 Springer 出版的“听觉研究手册系列”丛书的一卷 *Auditory Prostheses New Horizons* 的中文版,覆盖了当前人工听觉的最新进展。原书邀请了全世界 30 多位专家,全面总结人工听觉发展的各个方向,介绍最新的研究进展。本书共 15 章,主要内容包括听觉神经假体的发展、双侧人工耳蜗、声听觉与电听觉的结合、适用于传导性和感音神经性听力损伤的植入式听力设备、前庭植入系统、光刺激听神经、贯穿听神经式电极阵列、耳蜗神经核听觉假体、中脑听觉植入系统、CI 植入后中枢听觉系统的发展和适应、CI 植入者的听觉训练、小儿人工耳蜗植入者口头及书面交流的发展、音乐感知、声调语言与人工耳蜗、CI 植入者的多感觉处理等。书末附彩图以便查阅。

本书可供听觉研究方向的科研人员参考使用。

Translation from English language edition:

Auditory Prostheses

by Fan-Gang Zeng, Arthur Popper and Richard R. Fay

Copyright©Springer Science+Business Media, LLC 2011

All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

人工听觉:新视野/曾凡钢等编;平利川等译. —北京:科学出版社, 2015.5
(现代声学科学与技术丛书)

书名原文: *Auditory Prostheses: New Horizons*

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-044263-5

I. ①人… II. ①曾… ②平… III. ①听觉-文集 IV. ①R339.16-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 096474 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:鲁素

责任印制:张倩/封面设计:陈敬

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

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 5 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2015 年 5 月第一次印刷 印张:25

字数:480 000

定价:148.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“现代声学科学与技术丛书”编委会

主 编：田 静

执行主编：程建春

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

陈伟中	邓明晰	侯朝焕	李晓东
林书玉	刘晓峻	马远良	钱梦騄
邱小军	孙 超	王小民	王威琪
谢菠荪	杨德森	杨 军	杨士莪
张海澜	张仁和	张守著	

中文版序言

作为神经电子行业的领跑者，耳蜗植入是一项划时代的高科技产品：20 世纪 50 年代自法国发芽，1984 年在美国正式商业化，已帮助世界各地的三十多万聋人从无声世界走向有声世界，其中近一半的聋儿靠它学会言语，走进主流社会。随着耳蜗植入性价比不断增加，受益的聋人数目预计在十年内将达到一百万之多。如何为这么多用户提供最好的服务和效益，对现在和未来的科研工作者、工程师、医生、听力师、言语病理师、特殊教育老师和其他相关人员来说，这是挑战，也是机会。

《人工听觉》的英文版 2011 年与读者见面。作为主编，我当时意识到人工听觉的三个趋势，希望介绍给读者，提前准备。今天看来，撰写各章的作者不仅是各自研究领域的专家，而且对人工听觉发展非常敏感，有先见之明。首先，耳蜗植入的适应症在不断增多：双耳植入和声电联合刺激的产品已正式上市，而治疗单侧耳聋、眩晕和耳鸣的人体临床试验正在进行。其次，人工听觉的技术在不断翻新：骨传导和中耳植入至少有五个产品上市，儿童脑干植入、穿刺式电极的脑干植入和中脑植入的产品上市也指日可待，而光刺激神经或穿刺式电极刺激听神经的动物试验为下一代人工听觉作技术储备。最后，如何提高人工听觉的效果已经开始从工程技术转向利用和开发大脑的可塑性和潜能：早刺激、多训练和多感官信号处理将会更好地帮助人工听觉用户尤其是儿童用户在日常生活中提高功效，包括音乐欣赏的能力。

作为世界上人口最多、经济实力第二的国家，我国无论是耳蜗植入数量还是人工听觉研究水平，都离国际标准有一定的距离。感谢平利川、沈翌、孟庆林、王宁远、王帅的辛勤努力，以及冯海泓和科学出版社的支持，让众多的中文读者有机会近距离地感受人工听觉的脉动，领会技术精髓，帮助我国加快人工听觉的进程，赶上甚至领先国际水平。

我希望有一天我们有实力一起用中文写一本中文版的《人工听觉》，再译成英文，介绍给国际读者。

曾凡钢

2014 年 12 月

译者序

我在 2006 年进入中国科学院声学研究所仿生耳与声音技术实验室时,第一次听说“人工耳蜗”,一个可以让聋人恢复听觉的、不可思议的发明。当时国内在这方面的研究很少,且人工耳蜗还不算普及。开始探路这方面研究的时候,我的导师冯海泓教授每周总问我同样的问题,“发现什么新东西了吗?给我讲一讲。”而我面对浩如烟海的英文文献,真不知如何入手,也不知道该找谁讨论。而科研或任何事情成功的关键可能也就在于要知道如何入手,要知道找谁讨论。

一晃 8 年过去了,人工耳蜗在国内越发普及。国产人工耳蜗也已经累积了超过 2000 例使用者。但我国听觉的研究,尤其是人工听觉的研究仍然相对薄弱。而世界范围内,人工听觉的发展已经远远超出了人工耳蜗的范畴。人工中耳、耳蜗核刺激器、听觉脑干刺激器、前庭刺激器在人工耳蜗技术的基础上,都取得了一定的进展。另一方面,和人工耳蜗相关的感知研究已经深入到了大脑皮层。人工听觉新技术和研究领域已经从耳蜗,扩展到了整个听觉通路。鉴于此,我们有一种使命感,希望快速而科学地组织开展相关的基础研究,希望激发更多的年轻人投身于人工听觉领域。

我们翻译这本书的目的也就在于为在人工听觉研究道路踌躇的同仁提供一个“入手点”。本书是对人工听觉 14 个新领域的概述,系统地回答在每个领域,历史是什么样?现在的研究重点在哪里?未来的方向是什么?读者在阅读了相关章节后,能够迅速地获得该领域的全貌。每章后的参考文献,为读者进一步深入研究提供准确的指导方向。

同时,我们也提供了一个交流讨论的平台。本书的译者之一孟庆林在 2013 年建立了一个名为“心理声学”的 QQ 群。这个群集合了国内外听觉领域的学人。我也是在这个群里找到了合作翻译的 4 位伙伴。我们花了半年时间,分文未取,完成了全书的翻译。

全书共 15 章。第 1 章,曾凡钢概述人工听觉技术的历史、现状和未来发展方向;第 2 章, van Hoesel 系统地综述双侧植入人工耳蜗的原理、进展和现存问题;第 3 章, Turner 和 Gantz 介绍声-电联合刺激(EAS)的发展;第 4 章, Snik 综述填补了助听器和人工耳蜗之间的技术空白的人工中耳技术;第 5 章, Golub, Phillips 和 Rubinstein 详述前庭植入刺激器的工程学和动物实验进展;第 6 章, Richter 和 Matic 探讨光刺激听神经的机制并报告了初步的动物实验数据;第 7 章, Middlebrooks

和 Snyder 介绍电极直接接触神经组织的电刺激听神经方式；第 8 章，McCreery 和 Otto 回顾耳蜗神经核听觉假体或称为听觉脑干植入（ABI）的研发；第 9 章，Lim, Lenarz 和 Lenarz 探讨听觉中脑植入系统（AMI）的科学原理、工程设计及初步的临床实验结果；第 10 章，Sharma 和 Dorman 综述大脑皮层可塑性方面的内容，并介绍植入人工耳蜗后的大脑皮层可塑性；第 11 章，傅前杰和 Galvin 论证听觉训练对于人工耳蜗植入者的重要性和有效性；第 12 章，Ambrose, Hammes-Ganguly 和 Eisenberg 回顾正常儿童、听障儿童和植入人工耳蜗儿童的语言发展过程；第 13 章，McDermott 对人工耳蜗音乐感知方面的研究和最新进展进行综述；第 14 章，徐立和周宁介绍人工耳蜗植入者声调语言的感知研究；第 15 章，Barone 和 Deguine 综述人工耳蜗植入者多感官处理的初步研究。

本书第 5, 7, 9 章由沈翌翻译；第 2, 4, 6 章由孟庆林翻译；第 3, 13, 14 章由王宁远翻译；第 10 和 15 章由王帅翻译；剩余部分由平利川翻译。全书由平利川统稿，冯海泓审校。在此感谢各位的无私奉献！感谢《声学学报》籍顺心主编为本书联系了科学出版社，感谢中国科学院声学研究所仿生耳与声音技术实验室提供了出版经费，让本书的出版成为可能，感谢曾凡钢教授为本书作序，感谢科学出版社的青睐。

译者水平有限，难免疏漏。希望本书能抛砖引玉，让读者和译者一起讨论，一起进步；更希望读者在讨论中获得科研的灵感，产生合作的机会。

希望我国的人工听觉研究能迎头赶上。

平利川

2014 年 12 月

前 言

自本系列第一本人工耳蜗专著,《人工耳蜗:听觉假体和电听觉》(SHAR, Zeng, Popper and Fay, 2004)问世以来,人工听觉的研发和应用已经取得了显著的进展。这些进展不仅包括人工耳蜗的新成就,也来自听觉通路其他部位的刺激假体,涵盖了中耳和中枢神经系统的植入式刺激系统。本卷为读者总结了人工听觉过去7年(2004~2010)的进展,同时也包括了人工耳蜗植入者对声音处理的复杂机制的研究。

第1章,曾凡钢概述本卷的内容:回顾人工听觉的历史,现状和未来发展方向;第2章, van Hoesel 介绍双侧人工耳蜗;第3章, Turner 和 Gantz 关注于“声-电”联合刺激;近期,人工中耳技术圆满地填补了助听器和人工耳蜗之间的技术空白。Snik 在第4章描述这项复杂的技术,并给出了其医学的适应症范围。眩晕与平衡失调症是与耳科相关的主要疾病,这类症状可通过电刺激治疗,但直至最近,这方面的研究才开展起来。Golub, Phillips 和 Rubinstein 在第5章对前庭系统的病理学和功能紊乱机制进行全面的综述。同时,也详述了近期前庭植入刺激器的工程学和动物实验进展。新技术也试图解决当前的人工耳蜗将电极插入鼓阶导致的种种问题。Richter 和 Maric 在第6章探讨光刺激的机制并展示了光刺激听神经可以显著提高刺激的空间选择性。Middlebrooks 和 Snyder 从传统的电刺激着手,但通过使电极直接接触神经组织,以获得较好的选择性。对那些缺失耳蜗功能或听神经的患者,只能通过刺激听觉通路的更高层来恢复听觉。在第8章, McCreery 和 Otto 回顾耳蜗神经核听觉假体或称为听觉脑干植入(ABI)的研发。在第9章, Lim, M. Lenarz 和 T. Lenarz 探讨听觉中脑植入系统(AMI)的科学原理、工程设计及初步的临床实验结果,并对结果进行了深入的分析。第10章, Sharma 和 Dorman 综述两种大脑皮层的可塑性,一种是由耳聋导致的听觉剥夺引起的皮层的可塑性,另一种是由人工耳蜗恢复听觉后,经验依赖的皮层可塑性。第11章, Fu 和 Galvin 论证听觉训练对于人工耳蜗植入者的重要性和有效性。第12章, Ambrose, Hammes-Ganguly 和 Eisenberg 综述儿童人工耳蜗植入者的语言发展过程。音乐感知依然是人工耳蜗的挑战,第13章, McDermott 对该领域的研究和最新进展进行综述,并从人工耳蜗设计和植入者在心理物理缺陷两个角度分析音乐效果差的原因。第14章,徐立和周宁对声调语言处理的声学因素进行总结,同时也从设计和感知的角度探讨了人工耳蜗植入者对声调语言的处理。第15章,

Barone 和 Deguine 综述人工耳蜗植入者多感官处理的最新进展, 并指出未来的研究方向。

本卷的内容与 SHAR 之前各卷的内容有大量的关联, 尤其是之前提及的, 本系列第 20 卷(《人工耳蜗: 听觉假体和电听觉》)的内容可以作为本卷的补充。此外, 人工耳蜗植入者音乐感知的内容在本系列第 26 卷, 《音乐感知》(Jones, Fay and Popper, 2010)中也被大量提及; 与计算模型相关的内容在本系列第 35 卷, 《听觉系统的计算模型》(Meddis, Lopez-Poveda, Popper Fay, 2010)里也有涉及。最后, 年老性听觉损失和介入治疗方面的内容被单独整理为本系列第 34 卷, 《老年听觉系统》(Gordon-Salant, Frisina, Popper, Fay, 2010)。

Fan-Gang Zeng, Irvine, CA

Arthur N. Popper, College Park, MD

Richard R. Fay, Falmouth, MA

曾凡钢, 尔湾, 加利福尼亚州

Arthur N. Popper, 学院市, 马里兰州

Richard R. Fay, 法尔茅斯, 马萨诸塞州

SHAR: Springer Handbook of Auditory Research/Springer 听觉研究手册

目 录

第 1 章 听觉神经假体的发展	1
1 引言	1
2 技术的发展	3
3 功能康复与评估的发展	6
4 总结	9
参考文献	10
第 2 章 双侧人工耳蜗	12
1 引言	12
2 正常听力者的两耳聆听	12
3 双侧 CI 的声音编码	15
4 双侧 CI 使用者的情况	17
5 成人 BiCI 使用者的心理物理研究	32
6 生理学研究	36
7 一侧人工耳蜗和对侧助听器的联合使用	38
8 总结	45
参考文献	46
第 3 章 声听觉与电听觉的结合	58
1 引言	58
2 残余声听觉与电听觉相比的局限与优势	58
3 植入后的听觉保留	62
4 人工耳蜗植入中听觉保留的候选人	63
5 保留残余听力的手术策略	65
6 电听觉与声听觉的生理交互作用	65
7 行为学测量的交互作用	67
8 残余声听觉优势的机制	72
9 人工耳蜗中音频定位映射	74
10 总结	76
参考文献	76

第4章 适用于传导性和感音神经性听力损伤的植入式听力设备	82
1 概述	82
2 适用于感音神经性听力损失的植入式听力设备	83
3 适用于传导性和混合型听力损失的植入式骨导设备	92
4 适用于传导性和混合型听力损失的主动中耳植入	95
5 总结	99
参考文献	99
第5章 前庭植入系统	106
1 引言	106
2 前庭植入设备的设计和性能	113
3 前庭植入研究方向	120
4 临床实验	124
5 未来展望	125
参考文献	126
第6章 光刺激听神经	132
1 引言	132
2 对神经组织进行红外激光脉冲刺激	133
3 光刺激机理	139
4 神经刺激的选择性	140
5 光刺激的时域性质	143
6 慢性实验	146
7 总结	146
参考文献	147
第7章 贯穿听神经式电极阵列	153
1 引言	153
2 下丘中心核的分频刺激	154
3 神经内电极阵列和鼓阶植入人工耳蜗的比较	158
4 临床应用的前景	164
5 总结	168
参考文献	169
第8章 耳蜗神经核听觉假体	173
1 耳蜗神经核听性脑干植入是治疗严重听觉损失的一种手段	173
2 电刺激耳蜗核和相关的安全性问题	183

3 提高 ABI 效果的挑战	184
4 总结	191
参考文献	192
第 9 章 中脑听觉植入系统	198
1 引言	198
2 听觉中脑植入系统的基本原理	199
3 表面刺激	203
4 刺入式电刺激	205
5 未来的发展方向	213
参考文献	218
第 10 章 CI 植入后中枢听觉系统的发展和适应	225
1 引言	225
2 先天性失聪人群(皮层)的发育及可塑性	225
3 成人 CI 植入者的可塑性	236
4 总结	238
参考文献	238
第 11 章 CI 植入者的听觉训练	245
1 引言	245
2 CI 植入者的被动学习	250
3 CI 植入者的主动学习	251
4 设计 CI 使用者训练计划的注意事项	255
5 总结	260
参考文献	261
第 12 章 小儿人工耳蜗植入者口头及书面交流的发展	267
1 引言	267
2 听力正常儿童的语音、语言和读写技能的发展	267
3 听力损失对语音产生、语言和读写能力发展的影响	269
4 人工耳蜗对语音、语言和读写的作用	272
5 影响口语和读写能力的因素	276
6 总结	281
参考文献	281
第 13 章 音乐感知	288
1 引言	288

2 音乐的声学元素	288
3 CI 系统的声音处理	289
4 CI 植入者的音乐感知	293
5 提升音乐感知	303
6 总结	312
参考文献	313
第 14 章 声调语言与人工耳蜗	320
1 引言	320
2 声调识别的声音线索	320
3 声调识别	325
4 声调发声	332
5 CI 植入者的歌唱水平	335
6 总结	336
参考文献	336
第 15 章 CI 植入者的多感觉处理	343
1 引言	343
2 多感觉感知和交叉知觉模式补偿	343
3 语言是一种多感官学习	344
4 人工耳蜗植入者的多感官处理	345
5 人工耳蜗植入者的功能性跨感觉识别	349
6 结论	351
参考文献	351
索引	360
《现代声学科学与技术丛书》已出版书目	377
彩图	

第 1 章 听觉神经假体的发展

曾凡钢

1 引 言

20 世纪六七十年代是人工听觉假体发展的黄金时代。在那令人振奋的 20 年间，各种竞争的想法和创新的实验推动人工听觉取得了巨大的进展。这 20 年（1960~1979 年），总让作者联想到中国的战国时代（Zeng et al., 2008）。此间，House（1974）推出的单通道人工耳蜗和 Clark 等（1977）推出的多通道人工耳蜗之间的竞争被推到了风口浪尖：前者在 1984 年成为最早的商用人工耳蜗产品；而后者却成为最成功的神经假体。多通道人工耳蜗已经帮助全世界超过 20 万聋人在一定程度上重建了听觉功能。我们评价人工耳蜗所取得的成就之非凡，一方面，作为产品，它需要和传统助听器及触觉助听器等同类产品展开竞争；另一方面，作为新事物，它需要打破传统主流思想和聋人群体的疑问（Levitt, 2008）。20 世纪八九十年代，一系列人工耳蜗的技术进步，尤其是信号处理策略的突破，大大提高了人工耳蜗植入者的听声效果（Loizou, 2006; Wilson and Dorman, 2007）。

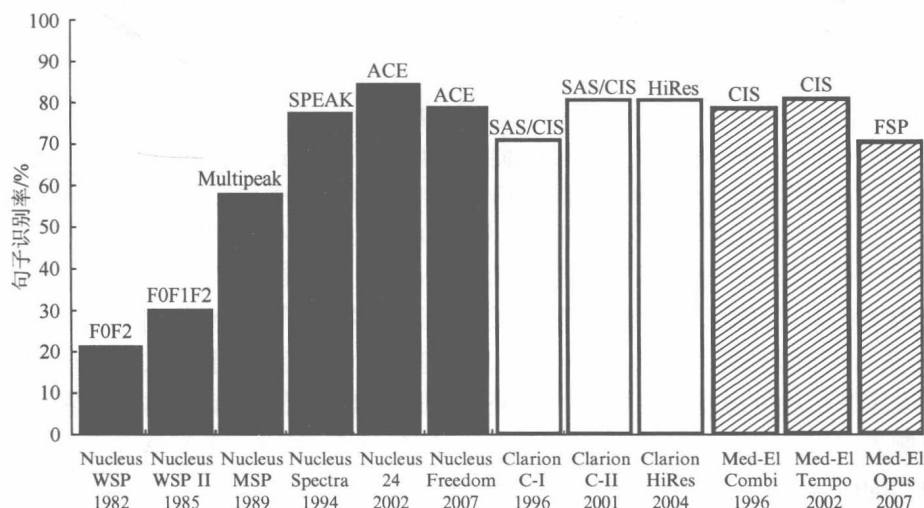


图 1.1 3 家人工耳蜗制造商，不同年代系列产品在句子识别得分。包括 Cochlear 公司的 Nucleus 系列，AB 公司的 Clarion 系列，以及 Med-El 公司产品（改编自（Zeng et al., 2008），图 3）

图 1.1 中显示了 3 家主要人工耳蜗厂商不同时代产品的语句识别得分。所有厂家的当代人工耳蜗产品均采用类似的信号处理策略——在有限数量的频段内提取时域包络信息,并通过植入耳蜗内的 12~22 个电极的非同时刺激来表达这些信息。人工耳蜗植入者普遍表现出较好的言语识别效果(安静环境下的言语识别率可达到 70%~80%),半数的植入者都可以进行电话交流。

尽管在安静环境下的言语识别效果良好,人工耳蜗植入者和正常听力者的听觉能力之间依然存在鸿沟。举例来说,植入者在噪声环境下的听声效果很糟糕,稳态噪声背景下,有接近 15dB 的损失;竞争语音环境中,有近 30dB 的听力损失(Zeng et al., 2005)。植入者对音乐的感知也同样有限:如果说对节奏的识别还差强人意,那么对旋律和音色的感知只能说微乎其微(McDermott, 2004)。最后,对于使用声调语言(汉语普通话、泰语、越南语)的植入者(Peng et al., 2008),声调的感知和发声的能力与正常听力者相去甚远(图 1.2)。

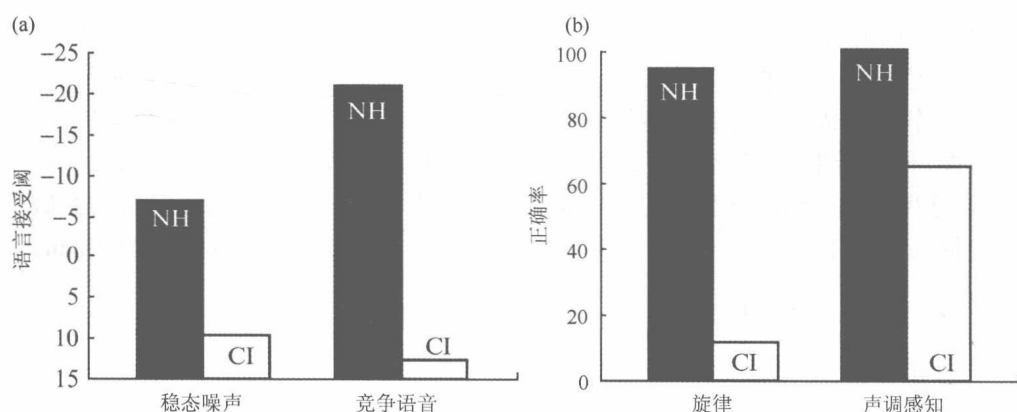


图 1.2 正常听力(NH)人群和人工耳蜗(CI)植入者在噪声下言语识别能力(a)、音乐和声调识别能力(b)的比较。噪声下言语识别能力,通过刚好能达到 50%言语识别率时的信噪比来体现,音乐识别能力通过旋律识别的正确率来体现,声调识别率通过汉语普通话声调识别的正确率来体现(改编自(Zeng et al., 2008),图 21)

为了让人工耳蜗植入者的康复效果更接近正常听力者,亟待引入新的概念和手段。人工耳蜗也的确在不断创新,与 21 世纪的前 5 年相比,近 5 年(2006~2010),关于人工耳蜗的文献已经从 1196 篇增长到 1792 篇(图 1.3)。这些增长主要来源于双侧人工耳蜗,相关主题的文献几乎增长了一倍;另外,助听器与人工耳蜗联合使用的研究文献增长了 4 倍之多。而中脑刺激及光学人工耳蜗这些新的手段也开始涌现。

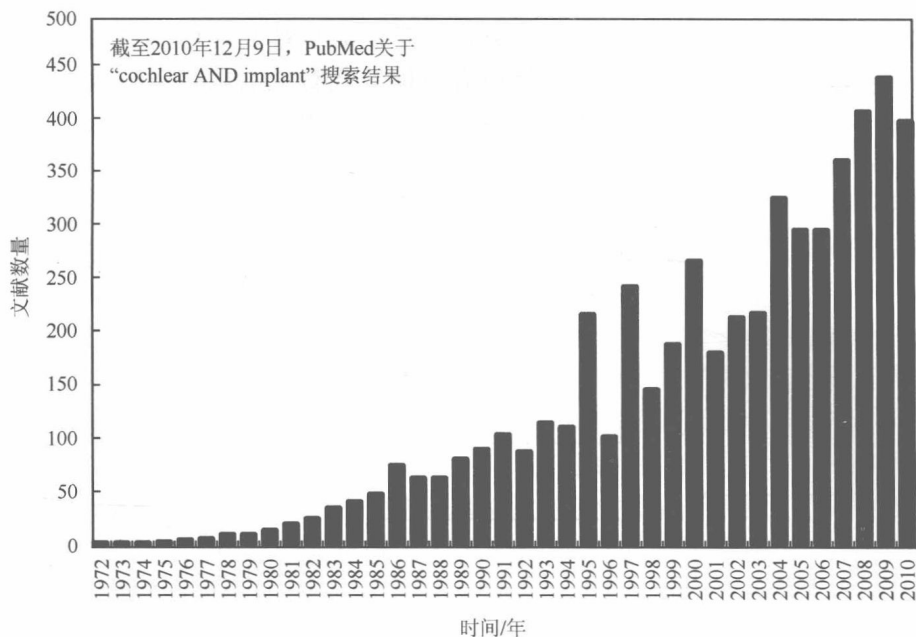


图 1.3 自 1972 年到 2010 年 12 月, 每年从 PubMed 检索的关于人工耳蜗的文献数量
(<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>)

在 2004 年, Springer 出版的“听觉研究手册”里包含了人工耳蜗一卷, 着重介绍电刺激听觉的基础科学与技术。而本卷将超越传统人工耳蜗的内容, 关注最新的技术进展, 内容包括从双侧植入到中脑刺激器; 同时也介绍新的评估手段, 内容包括从听觉训练到跨模态处理。

2 技术的发展

随着技术的进步, 人工耳蜗的功效已经被极大地提升, 被应用于更广泛的听觉相关疾病的治疗。下面将从两个角度介绍这些技术: 一方面, 听觉感知可由多种形式的能量诱发(图 1.4)。正常的听觉通路中, 声波能量被转换为机械振动, 并进一步转换为电势能。在有缺损的听觉通路中, 根据听觉损失的种类和程度, 可分为不同的治疗方法。大多数耳蜗受损的患者, 症结在于听觉通路中机械放大功能受损。助听器可以对声信号进行放大, 通过佩戴助听器可以在一定程度上弥补声音传导中的损失(图 1.4 的第一条通路)。为了增大放大倍数和减少不良声学反馈, 声音可以直接被转换成机械振动来刺激中耳(图 1.4 的第二条通路)。但对于重度耳聋患者, 传统的人工耳蜗跳过了听觉通路的前端部分, 将声信号转换为电脉冲, 来直接刺激耳蜗内残存的

听神经（图 1.4 的第三条通路）。最近，光学刺激也被发现可以直接激活神经组织（图 1.4 的第四条通路）。这将很有可能取代传统的电刺激，成为一种新的刺激手段，用于神经刺激器。

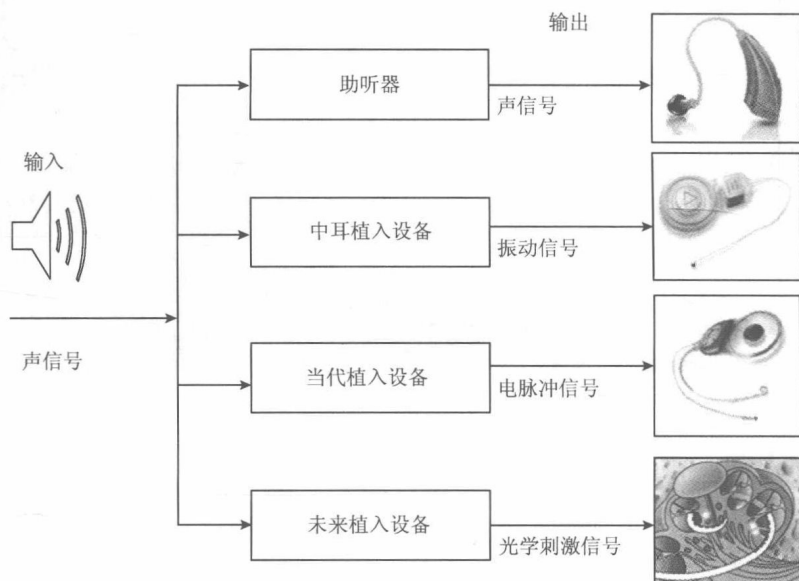


图 1.4 对听觉系统听力重建的不同刺激方法。助听器图片摘自 www.starkey.com，中耳植入系统图片摘自 www.medel.com，人工耳蜗图片来自 www.cochlear.com，以及光学刺激图片来自 www.optoiq.com（后附彩图）

另一方面，刺激听觉系统的不同部位，可以用来治疗不同类型的听觉受损疾病。助听器可以将声音放大来治疗耳蜗损伤。对佩戴助听器的人来说，放大的声刺激通过耳道传至鼓膜（听力正常者的鼓膜接收的声刺激直接来源于外耳道，没有经过人为放大）。整个中耳听骨链中从砧骨到蹬骨都可以进行机械式刺激，提供更大的放大倍数，用于治疗与外耳道塌陷或慢性耳科疾病相关的传导性听力损失。用电脉冲或激光直接刺激听神经，可以让人产生听觉感知。这种方法主要用于内毛细胞缺失的患者。通过刺激从耳蜗核到皮层的整个听觉中枢系统，可以治疗听神经瘤及其他神经疾病。另外，电刺激已经被应用于治疗听神经病、耳鸣和多种其他疾病（Trimble et al., 2008; van de Heyning et al., 2008; Teagle et al., 2010），但这些方面的内容本书没有涉及。

单侧人工耳蜗技术成熟后，很自然地扩展到双耳植入。在过去十年（2000~2010 年）里，双侧植入的数量剧增，相关的科学理解也逐渐成熟。早在 1993 年，van Hoesel 就开展了第一例双侧人工耳蜗研究（van Hoesel et al., 1993）。在第 2 章，他将系统地综述双侧植入的原理、进展和现存问题。与单侧植入相比，双侧