录播技术与应用系统

Recording & Playing Technology and Application Systems

钟晓流 主编

NLIC2970848876

清华大学出版社

录播技术与应用系统

Recording & Playing Technology and Application Systems

钟晓流 主编

薛玉田 张冀中 李海霞 宋述强 董榕 副主编

北京科技大学图书馆馆藏书籍
NLIC
NLIC2970848876

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

随着以多媒体和互联网为代表的信息技术的进步，录播技术也有了长足的发展。本书从音视频、流媒体等录播技术的基础知识入手，系统地介绍了演播室录播系统、虚拟演播室系统、流媒体录播系统和流媒体录播环境的设计与搭建。为了更好地指导流媒体录播系统在教育培训、综合会议、远程医疗、应急指挥等领域的应用，本书特别介绍了不同行业录播系统的建设案例，为录播领域的从业者提供工程设计参考。流媒体录播系统带来的便捷性与实用性已为广大用户所认可。当下，物联网和云计算技术的应用风起云涌，也势必推动录播系统的技术变革，本书在最后对录播系统的技术走向和应用趋势进行了探讨。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。
版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989　13701121933

图书在版编目（CIP）数据

录播技术与应用系统/钟晓流主编. —北京：清华大学出版社，2012.10
ISBN 978-7-302-30123-3

Ⅰ. ①录…　Ⅱ. ①钟…　Ⅲ. ①多媒体技术　Ⅳ. ①TP37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 215700 号

责任编辑：杜　星
封面设计：漫酷文化
责任校对：王荣静
责任印制：王静怡

出版发行：清华大学出版社
网　　址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com
地　　址：北京清华大学学研大厦 A 座　　**邮　　编**：100084
社 总 机：010-62770175　　**邮　　购**：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 装 者：三河市春园印刷有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：170mm×240mm　**印　张**：18.5　**插　页**：1　**字　　数**：350 千字
版　　次：2012 年 10 月第 1 版　　**印　　次**：2012 年 10 月第1 次印刷
印　　数：1～4000
定　　价：39.00 元

产品编号：050349-01

序

2012年春节一个茶话会上，我巧遇“小”老乡、在我母校清华大学工作的钟晓流教授，一阵寒暄之后，我们聊到教育公平的话题，从他的言谈中，我得知应用信息化教育技术在实现教育公平方面大有作为。席间，我告诉小钟：作为国内现代教育技术行业有影响的专家，又在一线工作，你们应该切中国内教育信息化的热点，在应用教育信息化手段为优质教学资源共享方面有所作为。小钟回答我说：为配合教育部有关“视频公开课和精品课程建设”规划的实施，他和他的团队正在编写《录播技术与应用系统》一书，并邀请我作序，我欣然答应。

一、关于我的“小”老乡

关于我和小钟的关系，故事还得从七、八年前讲起。

2005年的一次旅途，我在飞机上偷闲翻阅《力量——2004—2005年100个最值得记忆的事件及其背后的人物》一书，书中第七部分“潜力”一章的“空间影音大师”标题下，钟晓流教授的能力和业绩给我留下了深刻的印象，从文章的内容中我才得知他是我的“小”老乡（因为他年纪和个头都比我小，所以我称他“小”老乡或小钟），也是我的校友。

首次面识这位小老乡是在2006年的一次同乡会上，他的“小草不是无情物，化作春泥护花魂”的诗句，发自肺腑地表达了一个游子对红色故土的深深恋情，再一次让我刮目相看。

我和小钟平时交往不多，一年只有同乡聚会或江西省新建县商会的迎春茶话会等一、二次见面的机会。每次见面，他都仪表得体、彬彬有礼，尊称我为“学长”。虽然善言，但谈吐严谨，废话不多；每次见面，他都来去匆匆，显得特别忙，显得有那么一点清高。但通过母校师友和众多老乡反馈的信息，我发现他确实是忙，他是个工作狂。作为清华大学电教中心主要领导之一，日常行政管理

和教学运行管理工作就不少；同时，作为国内现代教育技术和多媒体视听技术方面的技术带头人之一，他是国家信息化标准委员会教育技术分技术委员会和教育部信息化专业委员会专家，也是全国17个省、市、自治区专家库的成员，每年参与国家和地方一些重大项目的设计、评标、验收工作较为频繁。此外，他还兼任中国教育技术协会理工科院校专业委员会秘书长、中国教育技术协会技术标准专业委员会秘书长等职务……非但如此，而且建树颇丰：

2008—2012年，先后编著或在国内核心期刊上发表论文十余篇，其中较有影响的有：《e-时代教学环境》、《多媒体视听技术与应用环境》、《低碳时代多媒体教学环境：系统集成与技术趋势》、《e-control技术及其应用》、《多媒体教学环境的设计与评价体系》、《i-时代的智慧型教学环境》等。

2010年5月—2012年8月，他组织并带领全国68所高校和17家龙头企业的专家们完成了教育部《多媒体教学环境工程建设规范》六项标准的研究和制定，并已通过国家信息化标准委员会教育技术分技术委员会和教育部信息化专业委员会专家组的评审，被标准化工作组近百名专家亲切地称为“带头大哥”。

几年的交往中，我发现小钟是一个性情中人，他身上既有一个农民儿子的朴实，也有一个知识分子的睿智，更有一个中国人的责任心和使命感，“上善若水，厚德载物”在他身上留下了深深的印记。这便是我愿意作序的主要缘由。

二、关于《录播技术与应用系统》这本书

20世纪90年代末期开始，随着互联网技术、多媒体技术、智能化技术的飞速发展和深度融合，特别是由于物联网和云计算技术的日益成熟和实际应用，人类社会已由电子化的e-时代进入信息化的i-时代。

在信息社会的今天，以互联网和多媒体为代表的信息技术既带给我们获取资讯上的便利，更带给我们种种视听上的享受。作为信息技术的重要组成部分，录播技术在各行各业中的应用正在蓬勃发展，其实时直播、非实时点播等核心功能被广泛应用于新闻发布、远程教育、远程医疗、司法庭审、网络政务、电子商务、视频会议等方方面面，为人们获取信息和进行各项活动拓展了无限的应用空间。但正是由于流媒体录播系统这种实时性、交互性、多样性的特点和强大功能，决定了它多种的技术交融性：它几乎涉及从音视频技术到多媒体技术、从计算机技术到互联网技术、从智能化控制技术到物联网技术、从现代通信技术到云计算技术等信息化技术的方方面面；也决定了它的系统庞杂性：系统组成包括信号源、信号采集及编码、信号的转发及存储、后台管理、信号的接收显示等多个部分。如果用户想搭建一个流媒体录播系统及环境，对相关的技术或管理人员

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

而言无疑会颇费踌躇。

据我所知，目前业内尚缺乏一本能够从环境构建到架构设计、从设备选型到工作原理、从技术应用到趋势分析等方面进行全面而系统地介绍流媒体录播技术及应用系统著作。《录播技术与应用系统》以专业人士的视野，深入浅出，化繁为简，从录播技术的基本概念和原理入手，结合在实际工程中的应用，重点探讨了流媒体录播系统的功能、架构、原理、设备选型和系统设计等，并提供了各行业的实践案例，为读者和用户在今后的学习和应用过程中提供了很好的参考和借鉴，可谓是解决了业界人士的燃眉之急。通读本书，读者会发现系统化和实用性是其鲜明的特点。对于非专业人士，它是一本科普读物；对于工程技术人员，它是一本工具参考书；对于相关专业的学生，它是一本好教材。

本书的作者除小钟外，其他作者也都是中国传媒大学、北京航空航天大学、浙江大学和清华大学等高校从事教学科研工作的专家或学者，字里行间都透露出科学工作者的那份理性和朴素，如果再版能在图表加工的艺术性方面再费些心力，本书无疑会增色不少。但无论如何，作者能够花时间编写这样一本行业内急需的专业书，与广大读者分享他们对录播技术的认识与经验，令人敬佩。我相信本书会使很多人受益，也祝愿我们的读者能在录播技术的研究和应用中不断有新的心得和共享。

欧阳忠谋

2012 年 9 月

前言

以视音频系统为核心的录播制作技术自20世纪30年代问世以来，促进了新闻、传媒、教育、博览、综艺和会议等行业的重大变革，也极大地丰富了人类获取信息的模式和手段。当今世界，影视传媒成为人们日常生活中不可或缺的物质条件之一，电视成为全球人类沟通信息、交流文化、相互了解的最大和最直接的媒介，电视在全球经济、政治、文化、社会发展中的地位与作用也与日俱增。

20世纪90年代之前，影视演播制作技术使用的都是模拟信号，即直接模拟所记录对象的声音和图像，通过声电、光电转换，变成连续的电波信号进行传输后再还原为声音和图像。90年代中期开始，随着传统音视频技术与数字化信息技术的融合，数字化音视频技术将所有图像和声音都转换为由0和1组成的二进制数字信息来进行记录和处理，给视听技术及相关行业迎来了一场革命性的变化，影视传媒行业的新设备、新系统、新方法、新模式、新观念等层出不穷。

随着计算机应用技术和互联网技术的发展，数字音视频文件得以在网络上流式传输，专用服务器把已做好的音视频节目当成数据包发出，传送到网络上，用户通过解压缩设备对这些数据进行解压后，节目就会像发送前那样显示出来。这就是当今流行的流媒体技术。流媒体录播系统是演播制作技术与信息化教学、培训、会议、医疗、庭审等活动相结合的必然产物，具有广泛的应用前景和强大的生命力。

当前，针对不同行业、不同环境、不同目的应用的录播系统类型繁多，形式各异，但它们的基本原理相近，只是实现手段不同而已。我们认为，建立一套先进而完备的实用录播系统，应给用户或服务对象一个完整的解决方案。任何类型或形式的录播系统的扩建和设计，必须本着先进实用性、稳定可靠性、完备拓展性和标准

化之目的，达到再现现场和动感视听的目标。

本书正是本着上述目的，使读者和用户了解实用录播系统的基本概念、基本结构、基本原理和应用背景，并结合在实际工程中的应用，为读者和用户在今后的学习和应用过程中提供参考和借鉴。

本书第一章、第二章由宋述强和宗佳执笔或起草，第三章由薛玉田执笔或起草，第四章由董榕执笔或起草，第五章由张冀中执笔或起草，第六、七、八章由李海霞和逯金重执笔或起草。全书由钟晓流担任主编并负责技术指导，尤其是对第三章至第八章做了大量的补充、完善、勘误和技术细节的厘定，并最终定稿。

在本书编写过程中，我们得到了来自多方面的帮助和支持。在此，对清华大学吴庚生教授和李学农教授、浙江大学张剑平教授、华南理工大学郑道林教授、北京大学张亦工副教授、上海交通大学沈宏兴副教授、北京外国语大学王峻京副教授、北京理工大学左渠副教授等表示谢意，他们为本书的出版提出了许多宝贵的意见和建议。

由于信息技术的发展日新月异，加上作者水平的局限，书中存在不全面、不完善甚至值得商榷的问题在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编　者

2012 年 9 月

目录

第一章　录播系统的技术基础 …… 1

第一节　音频与音频系统 …… 1

一、声学常识 …… 1

二、音频录放技术 …… 9

三、数字音频的编码 …… 14

四、音频系统的构建 …… 22

第二节　视频与视频系统 …… 26

一、视觉常识 …… 26

二、视频录播技术 …… 30

三、数字视频的编码 …… 48

四、视频系统的构建 …… 51

第二章　流媒体的原理、应用与发展 …… 76

第一节　流媒体技术及原理 …… 76

一、流媒体及技术简介 …… 76

二、流媒体系统的组成 …… 77

三、流媒体的关键技术 …… 79

四、流媒体的常见格式 …… 90

第二节　流媒体的应用领域 …… 92

一、网络电视 …… 92

二、视频会议 …… 93

三、网络直播 …… 93

四、教育培训 …… 94

五、视频监控 …… 94

第三节　流媒体的发展趋势 …… 94

一、视听效果 …… 94

二、编码技术 …… 95

三、传输技术 …… 96
四、网络环境 …… 97

第三章 演播室录播系统 …… 98

第一节 数字电视节目制作系统 …… 98
一、前期采集 …… 98
二、后期编辑 …… 101
第二节 演播制作系统构成及技术要求 …… 104
一、演播室系统分类 …… 104
二、演播室系统组成及其信号格式和接口标准 …… 105
三、高清演播室主要视频设备选型技术规格参数 …… 121
四、数字演播室建设主要参考标准 …… 127

第四章 虚拟演播室系统 …… 129

第一节 虚拟演播室的由来与发展 …… 129
一、虚拟现实技术的引进 …… 129
二、传统演播室现存问题 …… 130
三、虚拟演播室系统的发展 …… 131
第二节 虚拟演播室系统的构建 …… 133
一、基本内涵 …… 133
二、系统架构 …… 133
三、工作原理 …… 135
四、主要特点 …… 136
第三节 虚拟演播室系统的关键技术 …… 137
一、摄像机跟踪技术 …… 137
二、计算机虚拟场景生成 …… 140
三、色键技术 …… 142
四、蓝背景技术 …… 143
五、灯光布光技术 …… 143
六、延时技术 …… 144
第四节 虚拟演播室系统搭建 …… 145
一、制作虚拟场景前的准备工作 …… 145
二、场景建模 …… 145
三、布置场景灯光 …… 148

四、场景渲染 …… 149
第五节 虚拟演播室系统的发展趋势 …… 149
一、关键技术的发展 …… 150
二、系统类型的完善 …… 150
三、应用范围的扩展 …… 151
第六节 超高清晰度显示系统 …… 153
一、常规超高清晰度显示技术应用 …… 153
二、集群推送的超高清晰度显示技术应用 …… 154

第五章 流媒体录播系统 …… 156

第一节 基本术语与缩略语 …… 156
一、基本术语 …… 156
二、缩略语 …… 159
第二节 流媒体录播系统的历史沿革 …… 161
一、传统教学录播系统面临的问题 …… 161
二、流媒体录播系统的雏形 …… 161
三、流媒体录播系统的发展历程 …… 163
第三节 系统组成与工作原理 …… 165
一、总体架构 …… 165
二、系统组成 …… 166
三、工作原理 …… 182
第四节 流媒体录播系统的功能特点与应用 …… 183
一、流媒体录播系统的功能 …… 183
二、流媒体录播系统的特点 …… 185
三、流媒体录播系统的分类 …… 186
四、流媒体录播系统的应用 …… 192

第六章 流媒体录播的环境设计与搭建 …… 195

第一节 概述 …… 195
一、系统设计 …… 195
二、系统集成 …… 196
第二节 音频效果设计 …… 198
一、体型设计 …… 198
二、音质设计 …… 198

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

三、扩声系统设计 …… 201
第三节　视觉效果设计 …… 211
一、照明设计 …… 211
二、视觉设计 …… 214
三、视频系统设计 …… 219
第四节　智能化控制设计 …… 224
一、智能化中央控制系统的定义 …… 224
二、e-control 技术与智能化控制系统的特点及应用 …… 225
三、智能化控制系统的设计 …… 227
第五节　流媒体录播环境的搭建 …… 232
一、项目背景 …… 232
二、设计方案简述 …… 232

第七章　流媒体录播系统应用案例 …… 239

第一节　教学录播系统应用案例 …… 239
一、概述 …… 240
二、项目背景 …… 240
三、设计方案 …… 240
四、实际应用 …… 249
第二节　会议录播系统应用案例 …… 250
一、概述 …… 250
二、设计方案 …… 252
三、实际应用情况 …… 263
第三节　医疗录播系统应用案例 …… 263
一、项目背景 …… 263
二、技术方案 …… 264
三、结构原理 …… 265
四、实际应用 …… 266

第八章　流媒体录播技术发展趋势 …… 268

第一节　录播技术的发展方向 …… 268
一、录播系统性能提升的趋势 …… 268
二、与其他系统融合 …… 271
第二节　录播技术未来发展趋势 …… 274

一、移动技术在实用录播系统中的应用 …… 274
二、3D 技术在录播系统的应用 …… 275
三、学习分析技术促进录播系统在理念上的更新 …… 277
四、构建录播系统 CDN …… 277

参考文献 …… 281

第一章 录播系统的技术基础

人们通过视觉、听觉、嗅觉、触觉、味觉5种基本的感觉通道来感知外部世界，获取各种信息。心理学家特瑞克勒(D. G. Treichler)曾指出在人类获取信息的来源中视觉占83%，听觉占11%，嗅觉占3.5%，触觉占1.5%，味觉占1%。可见5种感觉通道接收信息的能力是不同的，其中视听之和所占比例达到90%以上。

视听效果最直接的评价标准就是声音和图像的品质。音质悦耳、视觉逼真、视听同步是视听技术和录播系统要解决的主要命题。决定音质效果的音频系统和决定视觉效果的视频系统是录播系统同等重要的两个方面。因此，在了解录播系统之前学习音频和视频的基本知识十分必要。

第一节 音频与音频系统

音频指人所能感知到的声音，包括噪声。根据记录和处理技术的不同，音频又分为模拟音频与数字音频。模拟音频把机械振动转换成电信号，以电信号(电压、电流)来模仿声音物理量的变化。为了便于在计算机中存储和编辑，模拟音频通常要转换为数字音频。数字音频是指用一连串二进制数据来保存声音信号。这种声音信号在存储和电路传输及处理过程中，不再是连续的信号，而是离散的信号。

一、声学常识

1. 声音的传播

声音由物体(声源)的振动产生，它有两层含义：在物理学上是指声波，即由物体振动所产生并在介质中传播的一种机械波；在生理学和心理学上则是指声波作用于听觉器官所引起的主观感觉，即听觉。

声音以声波的形式通过空气、水、木头、金属等弹性介质进行传播。在真空状态中，因为没有任何弹性介质，所以声波就不能传播了。声波在穿过不同的介质时，会发生反射、折射、衍射、散射、扩散、吸收等现象。在同一介质中传播时，

只要媒质存在某种不均匀性(密度、温度、水深等),也会发生这些现象。

1) 声波的参数

(1) 周期

周期是指声源完成一次振动所需要的时间。记作 T,计量单位为秒(s)。

(2) 频率

频率是指声源在一秒钟内振动的次数。记作 f,计量单位为赫兹(Hz)。频率是周期的倒数,即:$f=1/T$。

人耳所能感觉到的声波的频率范围是 20～20 000Hz,被称为可闻声。如果物体振动频率低于 20Hz 或高于 20 000Hz,人耳就听不到了。高于 20 000Hz 的频率叫做超声波(如 B 超),而低于 20Hz 的频率叫做次声波(如地震波)。通常把 125～250Hz 以下的频率称为低频,500～1 000Hz 的频率称为中频,2 000～4 000Hz以上的频率称为高频。

(3) 波长

波长是指沿声波传播方向,振动一个周期所传播的距离,或在波形上相位相同的相邻两点间的距离。记作 λ,单位为米(m)。

(4) 振幅

振幅是指声波在波动过程中距离平衡位置的最大位移。记作 A,单位为米(m)。

振幅是声波能量的体现,振幅越大,能量越大。小的振幅表明声音很弱或声波传播的距离很近,大的振幅表明声音很强或声波传播的距离很远。距离声源越远,听到的声音越小,是因为在声波的传播过程中,介质会吸收声波能量,振幅逐渐减小。

(5) 声速

声速是指声波每秒在介质中传播的距离。记作 c,单位为 m/s。声速与传播声音的介质和温度有关。声波在不同的介质中其传播速度是不一样的,在空气中,声速(c)和温度(θ)关系可表示为:$c=331.4(1+\theta/273)^{1/2}$。在常温(15～25℃)下,声速约为 340m/s。

频率 f、波长 λ 和声速 c 三者之间的关系是:$c=\lambda f$。

声速不是声源的振动速度,而是振动状态的传播速度,其大小与振动特性无关,而与介质的弹性、密度及温度有关。因此,声波在恒定的介质中其传播速度是不变的。

2) 声波的传播

(1) 透射

透射是指声源发出的声波透过介质传播到受声点的现象。声波入射到介质

时，声能的一部分被反射，一部分被吸收而损耗掉，还有一部分会透过介质在另一侧继续进行传播。

如果把单位时间内入射声能记为 E_0，介质反射声能记为 E_r，介质透射声能记为 E_τ，介质吸收声能记为 E_a，根据能量守恒律，则有：$E_0=E_r+E_a+E_\tau$。

介质透射声能与入射声能之比称为“透射系数”，记作 τ，即：$\tau=E_\tau/E_0$。

（2）反射

声波在同一介质中按一定方向传播，而在传播过程中遇到比波长大得多的障碍物时就会反射，从而产生虚声源，即声像。

反射声能与入射声能之比称为“反射系数”，记作 r，即：$r=E_r/E_0$。

（3）散射

如果障碍物表面的起伏程度与波长相当，或者障碍物的大小与波长差不多，入射声波就会向各个方向散射。散射可以理解为没有规律的反射。

（4）折射

声波在传播的过程中，遇到不同介质的分界口时，除了反射外，还会发生折射，从而改变声波的传播方向。

（5）衍射

声波在传播过程中遇到障碍物或孔洞时，如果障碍物或孔洞的大小比声波波长小得多，声波不是沿直线传播，而是改变前进的方向绕过障碍物或孔洞，到达按直线传播时不能到达的地方，这种现象称为衍射（或绕射）。

2. 声音的计量

1）*声功率*

声功率指单位时间内，声波通过垂直于传播方向某指定面积的声能量。记作 W，单位为瓦（W）或微瓦（μW）。$1\text{W}=10^6\mu\text{W}$。

声功率表示声源发声能力的大小。

2）*声强*

声强指在垂直于声波传播方向上，单位时间内通过单位面积的平均声能。记作 I，单位为 W/m^2。人耳可以感受的声强变化范围为 $10^{-12}\sim10^2\text{W/m}^2$。

3）*声压*

当空气中有声波传播时，该点的压强与没有声波到达时的压强之差叫做该点的声压。声压通常用 P 来表示，单位是帕斯卡，简称帕（Pa）或牛顿/平方米（N/m^2）。声压是衡量声音大小的尺度。声音越强，声压就越大；反之，声压就越小。树叶被微风吹动发出响声的声压约为 0.01 帕；在房中大声说话的声压约为 0.1帕。

4）级与分贝

人耳听阈(人耳刚刚能感受的声音)的频率 $f=20\text{Hz}$，声压 $P=2\times10^{-5}\text{Pa}$，声强 $I=1\times10^{-12}\text{W/m}^2$。人耳痛阈(闻之则痛的声音)的频率 $f=20\,000\text{Hz}$，声压 $P=20\text{Pa}$，声强 $I=10\text{W/m}^2$。可见人们日常生活中听到的声音变化范围非常大，若以声压值表示，可以达 6 个数量级以上，若以声强值表示，则可以达 12 个数量级以上。实验证明，人的听觉对声音信号强弱的刺激反应不是线性的，而是成对数比例关系。

由于以上原因，实际应用中，表示声音强弱的单位并不采用声功率或声压的绝对值，而采用相对单位“级”，并以“分贝”作为级的单位，记作 dB。分贝是以美国发明家亚历山大·格雷厄姆·贝尔(Alexander Graham Bell)命名的，他因发明电话而闻名于世。

所谓分贝是指两个相同的物理量(例如 A 和 A_0)之比取常用对数并乘以 10(或 20)，即

$$N=10\lg(A/A_0) \quad \text{或} \quad N=20\lg(A/A_0)$$

上式中 A 为被量度量，A_0 为基准量(或参考量)。被量度量和基准量之比取常用对数，该对数值称为被量度量的“级”，它代表被量度量比基准量高出多少“级”。

分贝是物理学中常用的对数单位，例如风级、地震级等。在声学中有声功率级、声强级、声压级等，分别是将声功率、声强、声压与各自的参考值相比后再取对数。

5）声功率级

声功率级(L_W)是用声功率(W)和基准功率(W_0)之比的常用对数来表示，单位为分贝。其定义为：$L_W=10\lg(W/W_0)$，通常采用 $W_0=10^{-12}\text{W}=1\text{pW}$。

6）声强级

声强级(L_I)是用声音强度(I)和基准声强(I_0)之比的常用对数来表示，单位为分贝。其定义为：$L_I=10\lg(I/I_0)$，通常采用 $I_0=10^{-12}\text{W/m}^2$，即人耳对频率为 1 000Hz 的声音的可听下限。

7）声压级

声压级是声压与基准声压的相对量度，单位为分贝。其定义为：$L_p=10\lg(P^2/P_0^2)=20\lg(P/P_0)$，通常采用 $P_0=2\times10^{-5}\text{Pa}$。

$2\times10^{-5}\text{Pa}$ 是正常人耳对频率为 1 000Hz 的声音刚刚能感觉其存在的声压值，也就是 1 000Hz 声音的可听阈声压。一般来讲，低于这一声压值，人耳就不能觉察出这个声音的存在了。显然该可听阈声压的声压级即为零分贝。人耳听阈和痛阈通常用声压级表示：

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com