

◆ 电声技术及其应用丛书 ◆

实用电声 与微型扬声器

叶顺忠 叶希杰 编著 赵振钦 执笔



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电声技术及其应用丛书

实用电声与微型扬声器

叶顺忠 叶希杰 编著
赵振钦 执笔

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

实用电声与微型扬声器/叶顺忠编著. —北京:国防工业出版社, 2006. 1

(电声技术及其应用丛书)

ISBN 7-118-04318-4

I. 实... II. 叶... III. 扬声器—基本知识
IV. TN643

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 003618 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 14 字数 314 千字

2006 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

编者的话

进入信息时代,随着移动通信技术、多媒体技术的迅猛发展以及家庭影院、数字化视听终端的不断完善和出新,电声技术也进入了大发展时期。先进的设计、计算机辅助设计的测量软件和设备的引入,使电声技术领域不论是设计水平还是生产能力都取得了前所未有的发展,传统的设计手段、生产工艺、生产设备以及测试仪器不断得到优化;新型的电声器件如数字式、硅集成等产品层出不穷;高保真化、片式化、微型化、薄型化、低功耗、高功率、多功能、组件化成为电声器件新的发展趋势;同时,产品的安全以及是否环保也成为影响其市场前景的重要因素。

为了追踪电声技术领域的新发展,更为了满足该领域从事音频工程、音响技术、录音技术、软件模拟、声像灯光、舞台音响以及电声器件的设计、生产、安装、调试和操作人员需要,我们组织编写了这套《电声技术及其应用丛书》。

本丛书覆盖面广,图文并茂,资料翔实,将理论阐述和实例分析与操作技巧有机地结合。因此,系统性、实用性和新颖性是本套丛书的突出特点。

在选材上,已收入本套丛书的书目包括:介绍新型电声器件的《电声技术与微型扬声器》;介绍计算机辅助声学设计的《声学设计软件 EASE 及其应用》;介绍数字音频技术及其应用的《数字音频设备与系统工程》;介绍音质设计中的建筑因素及其处理方法的《音质设计与建筑因素》;介绍组合音响中各种设备的原理、调试与维修的《音响设备原理与维修》;介绍多声道录音设备及其操作的《现代录音技术实战》;介绍电声测量知识的《声频测量技术》;介绍音响师必备知识的《音响师声学基础》……

在写法上,本套丛书以实用性、启发性和普及性为出发点,避免艰深的理论探讨和繁复的数学推导;文字叙述通俗易懂,原理阐述深入浅出;借助图和表,使阅读更加轻松、易懂,一目了然。

在写作水平上,本套丛书的作者都是活跃在电声技术领域的教授、专家,科研院所的技术骨干,生产企业的行家里手;既有比较扎实的理论基础,又有丰富的实践经验。所以应该说,本套丛书的每一本都是作者多年教学、科研与实践的概括和总结,希望带给读者的是——一本本集原理介绍、案例分析和操作技巧于一体的、使用上得心应手的工具书。

在后续选材上,由于本套丛书意在做成开放式,便于追踪技术发展和市场需要,不断充实和添加新的书目。目前待加入的书目包括“声像灯光技术”、“音响设备测试”、“专业音响调音技巧”和“音响工程的设计与施工”等,希望有识之士、业内专家、学者加盟我们,以你们的学识和才智,通过编辑和出版社的桥梁,精心打造出受读者欢迎的书籍。

我们衷心希望这套丛书能对从事电声技术的研究、设计、生产、检测的人员和广大的音响爱好者有所帮助,更希望业内专家、学者以及广大的读者朋友对这套丛书提出宝贵意见和建议,让我们做得更好!

二零零五年十二月

序

科学技术的发展,信息高速公路的形成,为各种信息的传播提供了快速通道。现在互联网、通信网、有线网上传输的各类资讯,归纳起来,不外乎是图像与声音。重现图像的装置是显示器,而重现声音的装置是各类扬声器。只要人的听觉与视觉功能不改变,作为信息终端的显示器与扬声器便具有不可替代性,必将进一步发展。

1876年3月10日,英国天才物理学家亚历山大·格雷哈姆·贝尔(Alexander Graham Bell)与其搭档沃森(Watson)经过多年的探索,在实验室中首次实现了声音通过电线传播。贝尔这一伟大的发明不仅开创了电话使用的先河,也催生了电声转换的研究,正因为此,后人将声压级的单位称为贝尔(常用的是分贝),以纪念贝尔在电声学上的伟大贡献。

由于众所周知的原因,20世纪80年代以前,中国的电声科学、扬声器技术都发展得不快。十年浩劫,电声研究更处于停滞状态,扬声器技术也是跟在别人后面爬行。改革开放如和煦春风,复苏了电声研究,也加快了扬声器事业的发展。现在形形色色的手机进入寻常百姓家,琳琅满目的移动音响成了男女老少的时尚用品。凡此种种,推动了扬声器领域一个新门类——小型、微型扬声器的发展。据2005年市场调研报告,2005年大陆市场单手机电声转换器件的需求量,就高达数亿只,如今小型、微型扬声器生产厂家如烂漫的山花,开遍了神州大地。

笔者在20世纪80年代在香港创办了香港第一家微型扬声器生产厂,20多年来,其酸甜苦辣无不和微型扬声器联系在一起。如今中国已成为微型扬声器的第一生产大国,但还不是微型扬声器生产的强国。生产优质微型扬声器的许多关键技术、基础材料还掌握在别人手里,如优质聚合物薄膜及其表面处理、性能更好的磁性材料、操作性更优良的胶水、形状不同的超细漆包线加工等。扬声器技术比起电子技术,也许并不特别精深,但要使我国成为一个微型扬声器生产强国,仍需电声学、材料学、软件业等各行业的共同努力才能实现。

笔者尝试以一个电子工程师的角度看电声,着意在声、电、电子日益密切结合的现在,从另一个侧面阐述它们之间的关系,对书架上还缺少微型扬声器书籍的现在,也许能起一个抛砖引玉的作用。

全书文字朴实,无太深的理论探讨及繁复的数学运算,力求使用更多的图表、图片说明问题。它既适合于对音响、电声、微型扬声器感兴趣的管理人员、营销人员阅读,也可作为微型扬声器技术人员及学校师生在生产及教学中的参考书。

本书编写前曾得到了厦门湖里区政协的鼓励,编写开始时,组成了以叶顺忠、叶希杰和赵振钦为主的编写小组,其中资深工程师赵振钦先生做了大量的文字、汇编等工作。

本书在编写过程中,著名电声专家王以真先生、著名电子专家陈祖虞先生、陈燕华工程师等都曾提过宝贵意见,国防工业出版社的刘萍编辑也为本书的出版竭尽全力,书中还引用了部分原材料生产厂家公布的图表、数据,在此谨致谢意。

叶顺忠
2005. 11

内 容 简 介

本书从扬声器的角度看电声,结合音响技术应用介绍扬声器及微型扬声器。

全书分4部分。第一部分3章,从声学及人耳的听觉特性入手,说明要做好扬声器必须使之满足客观条件的要求;第二部分2章,从磁电关系到声电转换,提出扬声器在现代音响中处于一个相对重要但又比较薄弱的地位;第三部分8章,从扬声器及微型扬声器的分类、原理、参数到微型扬声器的结构、工艺,是全书的重点;第四部分2章,简约地介绍了扬声器的测试与主观评价。

本书文字朴实,无繁复的运算,力求用图表、图片说明问题,较适合音响、扬声器行业的从业人员阅读,也可以作为中等学校相关专业师生的参考书。

目 录

第 1 章 声音及其三要素	1
1.1 声音的形成	1
1.2 声音的传播	1
1.3 声能与声压	5
1.4 表征声音特性的物理量	7
1.4.1 响度	7
1.4.2 音调.....	10
1.4.3 音色.....	12
1.5 高、中、低音频段的划分	13
第 2 章 人耳的听觉特性	16
2.1 人耳结构及听觉机理	16
2.2 听觉与频率的关系	18
2.2.1 响度与频率.....	18
2.2.2 频率的心理感受.....	19
2.3 听力与性别、年龄的关系	20
2.4 听觉的相对性及掩蔽效应	21
2.5 声源定位	21
2.5.1 声源定位.....	21
2.5.2 波埃效应.....	22
2.5.3 哈斯效应.....	22
2.5.4 选择效应.....	22
第 3 章 振动与声辐射	24
3.1 机械振动	24
3.1.1 简谐振动.....	24
3.1.2 阻尼振动.....	26
3.1.3 受迫振动.....	28
3.1.4 自持振动.....	29
3.1.5 共振.....	29
3.2 声电类比及声学欧姆定律	31
3.2.1 声电类比.....	31

3.2.2 声学欧姆定律.....	34
3.3 辐射阻抗与辐射功率	35
3.3.1 辐射阻抗.....	35
3.3.2 辐射功率.....	35
3.4 声辐射	37
3.4.1 点声源的声辐射.....	37
3.4.2 喇叭.....	38
3.4.3 声能在管中的传播.....	39
3.4.4 毛细管及其吸声.....	39
3.4.5 喇叭声辐射的指向性.....	40
第4章 磁场、磁路与磁性材料.....	42
4.1 磁场及相关物理量	42
4.1.1 磁场.....	42
4.1.2 磁力线.....	42
4.1.3 磁感应强度 B 、磁通量 Φ	43
4.1.4 磁场对载流导体的作用	44
4.1.5 磁介质与磁导率.....	45
4.1.6 磁场强度 H 及其与磁感应强度 B 的区别	47
4.2 磁路	48
4.2.1 磁回路.....	48
4.2.2 磁阻.....	49
4.2.3 磁路欧姆定律.....	50
4.3 磁性材料	51
4.3.1 磁性材料的参数.....	51
4.3.2 磁化.....	52
4.3.3 人造磁体.....	53
第5章 声电转换与声场处理	59
5.1 声电转换.....	59
5.1.1 电磁式.....	59
5.1.2 炭精式.....	60
5.1.3 电动式.....	61
5.1.4 电容式.....	62
5.2 声音存储.....	63
5.2.1 唱片.....	63
5.2.2 磁带.....	65
5.2.3 CD(Compact Disc)	66
5.2.4 闪存(Flash Memory)	68

5.2.5 硬盘(Hard Disc)	68
5.3 声场处理	69
5.3.1 立体声(Stereo)	69
5.3.2 DSP(Digital Sound Process)	69
5.3.3 杜比环绕声(Dolby Surround)	69
5.3.4 杜比数字声(Dolby Digital)	70
5.3.5 DTS(Digital Theater System)	70
第6章 扬声器分类及性能	72
6.1 按外形尺寸分类	72
6.2 按原理分类	72
6.2.1 电磁式	72
6.2.2 电动式	74
6.2.3 压电式	74
6.3 按磁回路分类	76
6.3.1 励磁式	76
6.3.2 恒磁式	76
6.4 按振动板材料分类	78
6.4.1 纸盆	78
6.4.2 金属盆	78
6.4.3 聚合物盆	79
6.4.4 复合盆	79
6.5 按扬声器的外形分类	80
6.5.1 号筒式扬声器	80
6.5.2 锥形扬声器	81
6.5.3 球顶形扬声器	83
6.5.4 平板扬声器	85
6.5.5 带式扬声器	86
6.6 按工作频率分类	87
6.6.1 低音扬声器	87
6.6.2 中音扬声器	88
6.6.3 高音扬声器	89
第7章 扬声器主要参数	91
7.1 扬声器的外形尺寸	91
7.2 扬声器的阻抗	91
7.2.1 阻抗的定义	91
7.2.2 阻抗特性曲线及额定阻抗	92
7.3 扬声器的谐振频率	93

7.4 扬声器的灵敏度.....	93
7.4.1 扬声器关于灵敏度的定义.....	94
7.4.2 灵敏度与功率放大器的关系.....	94
7.5 扬声器的频率特性.....	95
7.5.1 频率特性.....	95
7.5.2 频率特性曲线.....	96
7.5.3 频率响应曲线提供的信息.....	96
7.5.4 几种频率响应曲线.....	98
7.6 扬声器的功率.....	99
7.6.1 白噪声与粉红噪声.....	99
7.6.2 扬声器最大噪声功率	100
7.6.3 扬声器的最大正弦波功率(RMS)	100
7.6.4 音乐功率	100
7.6.5 商业功率	100
7.7 扬声器的失真	100
7.7.1 频率失真	100
7.7.2 总谐波失真	101
7.7.3 互调失真	104
7.7.4 瞬态失真	105
第8章 锥形电动式扬声器.....	106
8.1 锥形电动式扬声器结构	106
8.2 磁系统	106
8.2.1 磁系统的组成	106
8.2.2 磁系统对扬声器性能的影响	108
8.3 振动系统	109
8.3.1 音圈	109
8.3.2 定心支片	111
8.3.3 振动板	113
8.3.4 防尘帽	114
8.4 附属部分	115
8.4.1 盆架	115
8.4.2 胶水	115
8.4.3 磁液	115
第9章 扬声器的微型化与新要求.....	117
9.1 扬声器的小型化、微型化进程	117
9.2 电子技术发展对扬声器的新要求	117
9.2.1 微型化	117

9.2.2 高灵敏度	118
9.2.3 宽频带	118
9.2.4 高阻抗	119
第10章 唛呐小型、微型扬声器	120
10.1 唛呐扬声器的磁回路	120
10.1.1 磁回路结构的改变	120
10.1.2 使用新磁性材料	121
10.2 唛呐扬声器的振动系统	122
10.2.1 唛呐	122
10.2.2 唛呐振动片的结构及其对性能的影响	123
10.2.3 脱胎音圈	125
10.3 支架与调音布	127
10.3.1 支架	127
10.3.2 调音布	129
10.4 壳体与助声	131
10.4.1 声短路与音箱	131
10.4.2 微型扬声器的外壳	133
10.5 唛呐小型、微型扬声器的工艺	140
10.5.1 唛呐小型、微型扬声器的工艺特点	140
10.5.2 唛呐小型、微型扬声器关键工序的工艺要点	140
10.5.3 常用胶水	143
10.6 唛呐小型、微型扬声器的效率	144
第11章 唛呐扬声器的应用	146
11.1 小喇叭	146
11.2 受话器	148
11.2.1 座机受话器	148
11.2.2 手机受话器	150
11.2.3 和弦喇叭	151
11.3 唛呐耳机	155
11.3.1 耳塞	156
11.3.2 耳机	157
第12章 微型电磁式扬声器	165
12.1 电磁式耳机的发声原理	165
12.2 高灵敏度电磁式助听器耳塞	167
12.2.1 耳塞的结构	168
12.2.2 磁系统	168
12.2.3 振动系统	171

12.2.4	磁隙对耳塞性能的影响	172
12.2.5	磁工作点的选择	173
12.2.6	前后助声室对频率响应的影响	174
12.2.7	工艺要点	175
12.2.8	电磁耳塞的指标	177
12.3	微型舌簧扬声器	179
12.3.1	微型舌簧扬声器的工作原理	179
12.3.2	磁工作点及与电路的连接	179
12.3.3	微型舌簧扬声器的结构	179
第13章	骨导传声	182
13.1	骨导	182
13.2	电磁式骨导	182
13.2.1	电磁式骨导的结构与性能	182
13.2.2	电磁式骨导的工艺要点	184
13.3	电动式骨导	185
13.4	未来的骨导	186
第14章	扬声器的测试	187
14.1	测试条件	187
14.1.1	不同的测试系统	187
14.1.2	隔音与大气条件	187
14.2	50mm 以上电动式扬声器及其系统的测试	188
14.2.1	自由场与消声室	188
14.2.2	前障板	188
14.2.3	DAAS 系统	189
14.3	50mm 以下电动式扬声器的测试	191
14.3.1	人工耳	191
14.3.2	阳光测试系统	192
14.4	电磁式耳塞与骨导的测试	195
14.4.1	电磁式耳塞测试	195
14.4.2	电磁式骨导测试	196
第15章	听音	197
15.1	听音环境	197
15.2	听音器材	199
15.2.1	信号播放机	199
15.2.2	功率放大器	199
15.2.3	信号碟片	199
15.2.4	My disc(我的碟)	201

15.2.5 音量对听音的影响.....	201
15.3 听音者的修养	202
15.3.1 听得到.....	202
15.3.2 懂得听.....	202
15.3.3 听得懂、说得出	203
15.4 扬声器的老化	203
15.5 听音术语小释	204
附录	206
附录1 十进制倍、分词冠及关系表	206
附录2 3种声压参考级的关系	206
附录3 3种声压单位换算表	207
附录4 声学中表示电压的V、dBV、mV、dBmV之间的换算表	207
附录5 主要声学量的级和基准量	207
附录6 磁参数厘米·克·秒制与国际单位制间的换算表	208
附录7 钕钴的产品特性	208
附录8 若干物理量厘米·克·秒制与英制、国际单位制换算表	208
附录9 声学单位表示法	209
参考文献	210
跋	211

第 1 章 声音及其三要素

1.1 声音的形成

物体围绕着平衡位置做来回往复的运动叫做振动。振动物体将它的振动传给周围的弹性物质,弹性物质又将振动传到人的耳朵,听觉系统感受到振动,并对其中的 $20\text{Hz}\sim 20000\text{Hz}$ 的频率成分做出反应,就形成了声音。

首先发出振动的物体叫做振源,继而传播振动的物质叫做媒介。形成声音客观上要具备两个要素:振源与传播媒介。有人认为,研究声音还应引入第三要素,即人的听觉系统。他们认为,这并不是要否定声音的客观性,而在于强调声音具有很强的生理特征与心理特征。举例来说,现在很多文章认为,世界上本没有色彩,色彩只是人的视觉对物体反射的各种频率的光线做出的不同反应,这是色彩的生理特性。声音同样是自然现象与人的生理特性及心理感受相结合的产物,所以振源、媒介、人的听觉系统就是声学研究的 3 个重要对象。

声源并不局限于固体,大火燃烧时,熊熊火焰会发出“扑、扑”的声音,这是气体发声;海浪翻滚时,会发出“哗、哗”的声响,这是液体在发声。世界上有形形色色的声源,发出千差万别的声音,才构成了这热热闹闹的世界。扬声器乃至微型扬声器,要用它来重现自然界和人类社会千奇百怪的声音,不仅神奇,也十分不易。

1.2 声音的传播

以前有人做过实验,将“嘀嗒”作响的时钟悬放在玻璃罩内,抽去了空气,人就听不到时钟的声音。当再把空气输入罩内时,声音又出来了。可见声音与电磁波不同,在真空中是不能传播的,它必须经过一定的载体(如空气)才能传送,于是人们将诸如空气这样的载体称作媒介,又叫做介质或媒体。

能传播声音的媒介并不仅仅是空气,人将耳朵贴在钢轨上,可以听到数千米外火车飞驰的声音,这是声音通过固体传播;深海水中的潜艇通过声呐,可以发现水里、水面的船舰,这是声音通过水而传播,可见气体、液体与固体都是传播声音的媒介。

研究发现,人的骨头乃至皮肤也是媒介。国内包括香港许多公司生产的骨导,就是利用骨头传声的。日本最近推出的手表手机,没有受话器,来电后只要将拇指按住振动体,将食指伸进耳朵就可收听,其利用的原理,也是骨导传声。声学所研究的主要是声音在气体与液体中的传播。

声音在各种媒体中传播的速度是不一样的,它与媒体弹性的平方根成正比,与密度成反比,即

$$C \propto \frac{\sqrt{E}}{\rho} \quad (1.1)$$

式中 C ——声音在媒体中的传播速度；

E ——媒体的弹性系数；

ρ ——媒体的密度。

表 1.1 为声音在若干媒体中的传播速度表。

表 1.1 若干媒体中声音的传播速度

传播媒体	传播速度/(m/s)	传播媒体	传播速度/(m/s)
空气(0℃)	331.5	软木	500
空气(20℃)	344	松木	3320
氢气(0℃)	1270	其他木材	3300~4700
氧气(0℃)	317	纸	1400~2000
水蒸气(100℃)	405	大理石	3810
水(17℃)	1430	铝	5250
海水	1540	铁	3850
酒精	1241	钢材	4990

声音在空气中的传播速度还和大气的条件有关,例如,当空气中的温度、湿度发生变化时,都能对声音的传播速度产生影响。

声音传播速度随绝对温度的升高而加快。0℃时,声音在空气中的传播速度为 331m/s;当环境温度升高 1℃时,其速度大约可增加 0.61m/s;15℃时为 340m/s;38℃时为 354m/s。这是由于温度低时空气的密度大,温度高时,密度小,声音在空气中传播的速度随密度的减小而增大。同理,空气在高山上传播的速度就要高于地面。以此类推,声音在钢铁中的传播速度可能要因为它的密度比空气大而变小,但式(1.1)揭示,声速不仅与介质的密度有关,而且与介质的弹性系数有关,由于钢铁的弹性系数要比空气大得多,所以声音在钢铁中的传播速度还是要比空气中大。

与空气中声速随密度的增大而减小相反,当空气中的湿度增大时,声音的传播速度不是减小,而是增大。这是因为空气中水蒸气会影响空气的密度。由于水蒸气的密度只有干燥空气密度的 62%,所以湿空气的密度要比干燥空气小,因此空气的湿度增加后,声速加快了。

空气中声速与温度之间的关系可用下式表示,说明空气中声速随温度升高而加大。

$$C_1 = C_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad (1.2)$$

式中 C_1 ——实际声速(m/s);

C_0 ——零摄氏度时空气的速度(m/s);

t ——温度(℃)。

声音在空气中传播的距离则与自身的频率及外部条件有关。

近听雷声,轰鸣中饱含撕裂刺耳的高音,远听雷声,只能听到沉闷的隆隆声,可见低音传得远,高音在空气中衰减得快。

研究发现,声波在介质中的传播,除了在传播方向上,单位面积通过的声能与距离的平方成反比外(即反平方定律),声能还会发生其他衰减。这是因为空气在波动中,质点相互之间存在作用力,即有黏滞性,而且相互之间还有摩擦力,有部分能量变成热能而损耗掉,即介质吸收了声能。

如果将声在空气的吸收系数设为 δ ,经典理论证明:

$$\delta = \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu}{C_0^2 \rho_0} \times \omega^2 \left(1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{x}{\mu} \cdot \frac{\Psi - 1}{\Psi} \right) \quad (1.3)$$

式中 μ ——媒体的粘滞系数;

x ——媒体的导热性;

C_0 ——空气的声速;

ρ_0 ——空气的密度;

ω ——声波振动的角速度;

Ψ ——定压比热和定容比热之比(对空气而言, $\Psi=1.4$)。

从式(1.3)中可以看出,声吸收系数与音频角频率 ω 的平方成正比。

声能的损耗随频率的升高而大增,从式(1.3)中看出,当空气中声波的频率从100Hz上升到1000Hz时,频率上升了10倍,但媒体吸收造成的声能损失则上升到100倍,所以在传播中,高频的损耗要比低频大得多。有人换个角度计算过,在离开声源一定的距离(如100m),要保持相同的声压(如0dB),则9000Hz频率发出的声功率,需要比400Hz频率发出的功率大7倍。

图1.1所示为一张相对湿度为60%时的声吸收的经验曲线图,可以看出,声音的吸收与频率成正比。

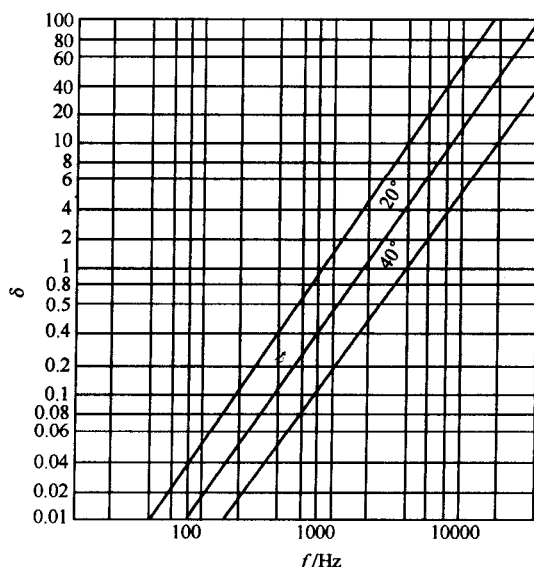


图 1.1 声吸收的经验曲线图(相对湿度 60%)

空气的湿度对声音的传播距离也有影响。与空气的湿度增加并不减小声速而是增加声速一样,湿度的增加也不减小声音传播距离,而是增大了传播距离。换句话说,干燥的