

医用声学

于黎明 陈洪文/主编

计量测试实用技术



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE



策划编辑：李素琴

责任编辑：钱俊芝

封面设计：刘 刚

ISBN 7-5026-2420-1



9 787502 624200 >

ISBN 7-5026-2420-1/TH • 88

定价：30.00元

医用声学计量测试实用技术

于黎明 陈洪文 主编

中国计量出版社

图书在版编目(CIP)数据

医用声学计量测试实用技术/于黎明,陈洪文主编. —北京:中国计量出版社,2006.6

ISBN 7-5026-2420-1

I. 医… II. ①于… ②陈… III. 医疗器械—声学测试仪器—基本知识 IV. TH785

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 046214 号

内 容 提 要

本书详细阐述了与听力学及声学计量有关的声学基础知识;依据听力计、声导抗仪检定规程,重点介绍了目前临床常见的几种听力计、声导抗仪进入校准状态、调试及数据存储的方法;并对临床中使用比较多的诱发电位仪、耳声发射仪的声学测试方法和声场校准进行了介绍。

本书内容丰富,实用性强,可作为广大医用声学计量工作者的参考用书及培训教材。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

电话(010)64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

廊坊市光达胶印厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm × 960 mm 16 开本 印张 10.25 字数 154 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

*

印数 1—1 000 定价:30.00 元

编 审 人 员 名 单

主 编 于 黎 明 陈 洪 文

编 委 (按姓氏笔画排序)

于 宁 仇 春 燕 孙 志 辉

江 玉 柱 吴 子 怡 张 玉 明

李 毅 周 娜 郭 良

高 慧

主 审 贾 建 革

前 言

医用声学计量主要是与临床有关的听力设备和环境的校准及测试,在声学计量中所占的比例较小,但它是临床听力学诊断、听力伤残评定、助听器验配、听力学科研的基础。随着听力学的发展,听力测试设备的品种和数量日益增多,医院质量管理的要求以及患者知情权的提高,人们对听力设备的计量意识也逐渐增高,许多医疗单位的计量测试由过去的执法要求的被动行为转变为如今的自主行为。

为了适应医用声学计量测试的发展,搞好听力设备的检测工作,不断提高医用声学计量人员的检测水平,根据多年从事听力设备校准/检定及测试的经验,我们编写了这本《医用声学计量测试实用技术》。

本书根据 JJG 388—2001《纯音听力计检定规程》、JJG 991—2004《阻抗听力计检定规程》以及纯音测听方法标准,对纯音听力计、声导抗仪的检定方法进行了阐述,并重点就目前临床中所见的各国不同型号听力计、声导抗仪进入校准的方法以及操作步骤、数据存储等进行了介绍。

本书多承全军医学计量测试研究中心孙志辉主任建议,又蒙中国计量出版社李素琴副编审和钱俊芝编辑的惠教,以及王凌燕女士的文字输入,谨表示感谢。

限于作者水平,书中难免有疏漏错讹,请同行指正。

编者

2006年5月1日

目 录

第一章 声学计量基础知识	(1)
第一节 声波的产生与传播	(1)
第二节 医用声学计量最常见的声学信号	(9)
第三节 声学信号测量与分析	(14)
第四节 声学测量和听力测试仪器设备	(30)
第五节 测听室的隔声与屏蔽	(39)
第六节 与听力学有关的国家标准	(48)
第二章 测听仪器的检定/校准	(53)
第一节 测听仪器的检定规程	(53)
第二节 纯音听力计的检定	(55)
第三节 语言听力计的校准	(69)
第三章 不同型号听力计的检定	(72)
第一节 Madsen 系列听力计	(72)
第二节 Interacoustic 系列听力计	(82)
第三节 GSI 系列听力计	(87)
第四节 瑞典系列听力计	(92)
第五节 德国 MA 系列听力计	(93)
第六节 DANPLEX 听力计	(99)
第七节 STARKEY 听力计	(102)
第八节 天津 FA-18 听力计	(105)
第九节 Oscilla 听力计	(107)
第十节 意大利 AMPLAID 听力计	(108)
第四章 耳声阻抗/导纳测量仪的检定	(110)
第一节 耳声阻抗/导纳测量仪检定装置	(110)
第二节 检定项目和检定方法	(111)

第五章 不同型号声导抗仪的检定	(116)
第一节 Madsen 901 声导抗仪	(116)
第二节 Madsen OTO 100 声导抗仪	(117)
第三节 美国 GSI 声导抗仪	(118)
第四节 丹麦 Interacoustic 声导抗仪	(122)
第六章 听觉诱发电位仪的校准	(124)
第一节 校准短持续声信号用的基准信号	(124)
第二节 短持续信号的校准	(125)
第三节 不同型号诱发电位测试仪的校准方法	(126)
第七章 耳声发射仪的校准	(131)
第一节 耳声发射仪的校准	(131)
第二节 耳声发射仪的校准方法	(131)
第八章 声场校准	(133)
第一节 声场的声学特性	(133)
第二节 扬声器的位置和测试信号的选择	(134)
第三节 测听设备校准	(135)
附录 A 听力计测量不确定度的评定	(139)
附录 B 听力计检定证书格式	(144)
附录 C 听力计检定记录格式	(149)
附录 D 声导抗仪检定证书格式	(152)
参考文献	(155)

第一章

声学计量基础知识

声学是研究声波的产生、传播、接收和效应的科学。它包括电声学、水声学、超声学、生理声学、心理声学、言语声学、音乐声学和建筑声学等许多分支,广泛应用于自然科学和工程技术等领域。

计量是关于测量的科学。声学计量是研究对各种声信号的参数的测量,确保量值准确和统一的科学。其内容包括测量标准、测量单位、测量仪器设备、测量技术方法、对测量数据的分析处理和测量结果的表述等,使其具有统一性、准确性和法制性。

第一节 声波的产生与传播

一、声波的产生

声音是由一定能量作用于物体使之振动所产生并通过媒质传播的波。当物体振动时,就会引起周围的媒质发生压力和质点速度等参量的变化。作为弹性媒质的空气,遇到物体振动时,其毗邻的空气就会出现压缩、膨胀或稠密、稀疏的周期性变化,并由近到远交替地向四周扩散,如图 1-1-1。物体的振动可分为简谐振动、自由振动、阻尼振动和受迫振动等多种形式。简言之,声波是弹性媒质中传播的压力、应力、质点位移、质点速度等的变化或几种变化的综合。从心理声学角度讲,声音是由于物体振动产生的波,通过听觉系统所感受到的印象。

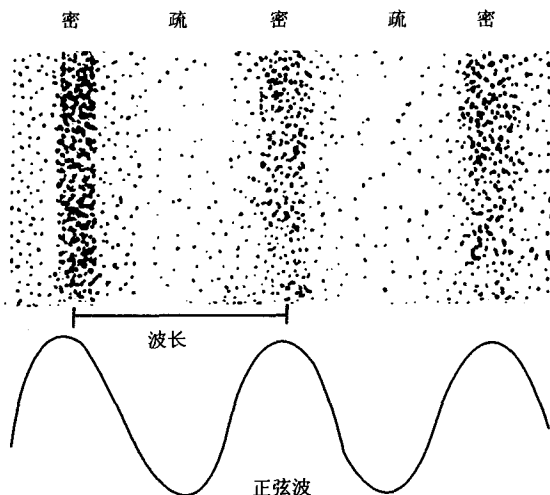


图 1-1-1 声波的产生与传播

二、声波的传播

振动是以波动方式传播,简称为波。波动通常可分为两大类:一类是机械振动在媒质中的传播;另一类是变化的电场和磁场在空间的传播。前者称为机械波,如声波、水波。后者称为电磁波,如光波、电波和射线等。二者虽然在本质上不同,但都具有波动的共同特征。

弹性媒质的存在是声波传播的必要条件。波动只是振动状态的传播,媒质中各质点并不随波前进,只是以交变的速度在各自的平衡位置附近振动。

1. 横波和纵波

质点振动的方向与波动的传播方向并不一定相同。在波动中,质点的振动方向和波的传播方向互相垂直,这种波称为横波。如水波和手拉绳索作上下抖动时,绳索上形成的波,如图 1-1-2。

波动中,质点的振动方向和波动的传播方向互相平行或一致,这种波称为纵波。将一根长的弹簧水平地悬挂着,在其左端沿水平方面拉伸、压缩,使其振动时,就可以看到沿着弹簧各个环节的振动形态,呈现由左向右移动

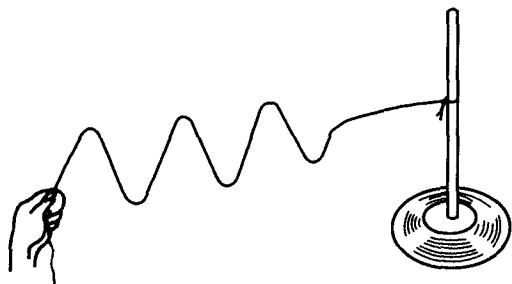


图 1-1-2 绳索抖动时产生的横波

的疏密相间的纵波波形,如图 1-1-3。声波在空气中传播的表现形式是纵波。

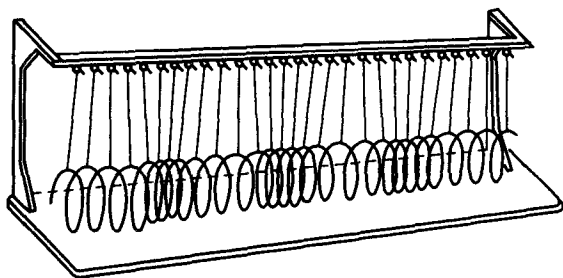


图 1-1-3 长弹簧上产生的纵波

2. 声速(c) sound velocity

声波在媒质中传播的速度叫做声速,单位为 m/s 。声波可在气体、液体和固体中传播,其传播速度取决于媒质的特性,与媒质的分子结构和分子的活跃程度有关。媒质分子密度越高,内耗特性越小,声速就越快;分子密度越低,速度越慢(表 1-1-1)。声波在空气、水和钢铁中的传播速度比值约为 1:4:15。

表 1-1-1 几种媒质中的声速(0℃)

物质	声速/(m/s)
空气	331
水	1 402
橡胶	1 800
混凝土	3 100
松木	3 320
砖	3 700
钢	5 000
玻璃	6 000
脑	1 510
肝、肾	1 556
肌肉	1 580
骨骼	3 370

媒质分子运动的活跃程度与温度有关。当媒质温度升高时,声速增加,温度降低时,声速减小。以空气为例,声速 c 与温度 t 的关系可表示为:

$$c = c_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad (1.1.1)$$

式中: c_0 ——0℃时空气的声速,331m/s;

t ——空气的温度。

当 t 比 273 小得多时,上式可近似简化为:

$$c = c_0 + 0.6t \quad (1.1.2)$$

由式(1.1.2)可知,大气温度每变化 10℃,声速大约变化 6 m/s。气温为 20℃时,空气中的声速为 343 m/s,人外耳道气柱中声速大致如此。

3. 声波的频率、周期、波长和相位

(1) 声波的频率(f) frequency

频率是单位时间内,传播声波的媒质质点振动的次数,单位为赫兹(Hz)。频率是声波的重要属性之一。系统的结构、尺寸和材料以及激励该系统的方式,决定了该系统的振动频率。简谐振动的频率取决于系统的质

量和劲度。由系统本身的质量和劲度所决定的振动频率称为该系统的固有频率。固有频率与系统质量的平方根成反比,质量越大,固有频率越低;与系统劲度的平方根成正比,劲度越大,固有频率越高。人的鼓膜振动的频率与张力成正比,与半径、厚度和密度成反比。

物体在周期性外力作用下产生的振动称为受迫振动。当外力的频率和系统本身的固有频率相同或很接近时,系统受迫振动的振幅趋于最大值,这种现象叫共振。发声器件的频率如果与外来声音的频率相同时,则它将由于共振的作用而发声,这种声学中的共振现象称为共鸣。

声波的频率范围很宽,从 10^{-4} Hz $\sim 10^{14}$ Hz,按频段可分成以下几类,如表 1-1-2 所示。

表 1-1-2 声波的频率范围

频率范围/Hz	频段名称
$10^{-4} \sim 20$	次声
$20 \sim 2 \times 10^4$	可听声
$2 \times 10^4 \sim 5 \times 10^8$	超声
$5 \times 10^8 \sim 10^{12}$	特超声
$10^{12} \sim 10^{14}$	热振动

人的听觉系统可接收的频率范围是从 20Hz $\sim$ 20 000Hz,人耳最灵敏频率在 1 000Hz $\sim$ 4 000Hz。

(2) 声波的周期(T) Period

振动的物体在往复循环的过程中重复一次所用的时间叫周期,单位为秒(s)。周期和频率互为倒数关系,即 $T = 1/f(\text{s})$,或 $f = 1/T(\text{Hz})$ 。振动频率越高,周期越短;周期越长,频率越低。例如,频率(f)为 1 000Hz,周期(T)为 $1/1\,000\text{s}$,即 1ms;周期为 1s,频率为 1Hz,依此类推。

(3) 波长(λ) wave length

在传播声波的媒质中,质点振动一个周期所传播的距离,或者说,在波形上相位相同的相邻两点间的距离叫波长。单位为米(m)。

根据频率和波长的定义,声速可以理解为在单位时间内,媒质中传播 f

个波长为 λ 的声波的距离。即声速(c)为频率(f)和波长(λ)的乘积, $c = f \lambda$ (m/s)。气温为 20°C 时,空气中的声速为 343m/s 。当声波的频率为 $1\,000\text{Hz}$ 时,其波长 $\lambda = 343(\text{m/s})/1\,000\text{Hz}$,约为 0.34m 或 34cm 。频率为 100Hz ,波长约为 3.4m ,频率越高波长越短,频率越低波长越长。图1-1-4是空气中波长与频率关系的示意图。

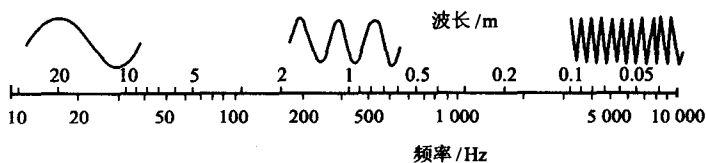


图1-1-4 正常条件下空气中声波波长与频率的关系

(4) 相位 phase

在振动或波动时,质点在一个周期之内每一瞬间的振动状态(位移和速度)是不相同的。用来描述质点在某一时刻(t)运动状态的物理量叫相位(或叫位相,周相),它充分反映了振动的周期性特征。对简谐振动, $X = A\cos(\omega t + \varphi)$, $(\omega t + \varphi)$ 叫振动的相,常数 φ 叫振动的初相,即 $t = 0$ 时的相,如图1-1-5所示。两个相位相差 π 的偶数倍,叫作同相位;相差 π 的奇数倍,叫作反相位。

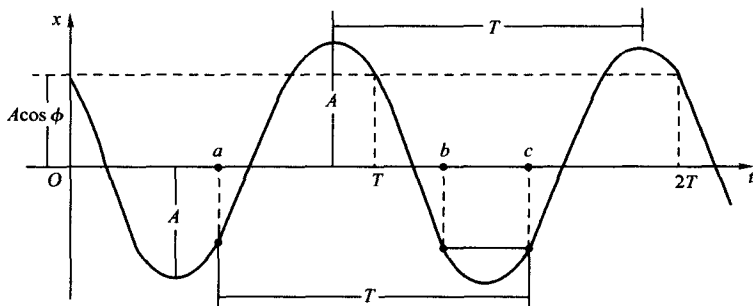


图1-1-5 简谐振动的位移时间曲线

测听用的纯音为一正弦波,每个周期的相位变化是 $0 \sim 360^{\circ}$ 。前 180° 由于空气分子受到挤压,使密度增加,形成声波的密相(condensation);后

180°分子向四周扩散,密度变稀疏,形成声波的疏相(rarefaction)。用耳机给声,膜片向外运动为密相,膜片向内运动为疏相。声波为疏相时,鼓膜与镫骨底板均向外运动,使基底膜上移向蜗管方向,此时毛细胞与听神经纤维受到刺激而兴奋。

两个频率相同的纯音,到达同一界面的相位差不为0°或360°时,就意味着二者的相位不同。人耳位于头的左右两侧,从某一侧声源发出的声音到达两耳的时间、强度和相位都会有差别,这对于双耳听觉及声源定位有重要意义。两个纯音作用于同一耳时,若相位相同,则互相增强,使响度加大;若相位相反,则相互削弱,使响度减小;若二者有相位差,则可产生相互干扰。

4. 声波的叠加、干涉、反射、折射和辐射

(1) 声波的叠加原理

分析声波传播时可以运用叠加原理,叠加原理也叫独立作用原理。这是一个适用范围十分广泛的物理规律。它指出:许多独立的物理量作用于一个系统时,其作用的合效果等于各物理量单独作用结果的总和,它们的分解或合成都遵循矢量运算的法则。

由几个声源产生的波,在同一媒质中传播,如果这几个波在空间某点处相遇,该处质点的振动将是各个波所引起的振动的合成。也就是说,相遇后的各波都会对该点作出贡献,但仍独立保持自己原有的特性(频率、波长、相位和振动方向等),犹如在各自的传播中没有遇到其他波一样。这种波动传播的独立性,就是声波的叠加原理。在管弦乐队合奏或几个人同时讲话时,我们能够分辨出各种乐器或每个讲话人的声音,就是声波叠加原理的具体实例。

(2) 声波的干涉和衍射

频率相同或相近的声波相加时所得到的现象叫干涉。其特点是某种特性的幅值与原有声波相比较,具有不同的空间和时间分布。声波产生干涉的一个重要条件,就是几个声波在空间相遇时,其振幅有稳定的加强和减弱,就是声波的干涉现象。

由于干涉现象,声场中可产生驻波或叫定波。频率相同的同类自由行波相互干涉而形成的空间分布图的周期波叫驻波。其特点是具有固定于空间的波节(或次节)和波腹,波腹处幅值最大,波节处幅值为零。

衍射(也叫绕射)是媒质中有障碍物或其他不连续性(如小孔洞)而引起

的波阵面畸变。声波在传播过程中,遇到障碍物或小孔洞时,当波长远大于障碍物或孔洞的尺寸时,就会发生声波的衍射。波长与障碍物尺寸的比值越大,衍射也越大。对于 100Hz 以下的低频声,波长可达几米至十几米,很容易绕过障碍物,如果墙上有孔洞,就会产生低频泄漏。如果障碍物的尺寸远大于波长,虽然还有衍射,但在障碍物的边缘附近将形成一个没有声音的区域,叫声影区。

任何物体的存在都会使声场发生畸变。人的耳廓、头颅和躯干都可能成为声波的衍射体。

(3) 声波的反射和折射

当声波从一种媒质入射到另一种媒质时,若它们的特性阻抗不同,就会产生反射和折射。

波阵面由两种媒质之间的表面返回的过程叫反射。根据反射定律,向表面的入射角等于反射角。两种媒质的声阻抗相差越大,反射越强。声波完全传不到第二种媒质,而由分界处全部反射的现象叫全反射。当平面波通过空气和水的边界时,声波不论从哪个方面入射,都几乎是完全反射。

大小和时差都大到足以能够和直达声区别开的反射声,或由其他原因返回的声叫回声,有时泛指反射声。

当声波从一种媒质进入另一种媒质时,由于媒质中声速的空间变化而引起的声传播方向改变的过程叫折射。在两种媒质中的声速之比称为折射率。

如果同一种媒质存在温度差,其声阻抗会发生变化,声波就会产生折射现象。例如,白天由于阳光照射使地面附近的空气温度比上层的空气温度高,则地面附近空气中的声速比上层空气中的声速快,于是声音就向上折射;而夜晚,靠近地面的空气温度比上层空气温度下降的快,上层空气温度高于地面附近空气温度,于是声音就向地面折射。因此,在夜晚人们可以清晰地听到很远的声音。有时风也会使声波产生折射现象,顺风讲话比逆风讲话传得远,就与声波的折射有关。

(4) 声波的散射

当声波在均匀媒质中传播时,它的行进方向不会改变。但是,在声波的进行中遇到小的障碍物,或者媒质中有不均匀结构时,就会有一部分声波偏离原来的方向。声波朝许多方向的不规则反射、折射或衍射的现象叫声波

的散射。

(5) 声波的辐射与衰减

声辐射是以波的形式进行能量传递的物理过程。声波从声源向四周辐射,波振面随着传播距离的增加而不断扩大,能量也被分散,使通过单位面积的声能相应减少。声源在单位时间内发射出的能量一定时,声音的强度随着距离的增加而衰减。当声波以球面波传播时,声强与距离平方成反比。

声波在大气中传播时,除了球面波发散引起的声衰减以及由于声波的反射、衍射和散射引起的损失外,还有由于气候和自然环境等条件引起的声衰减。

第二节 医用声学计量最常见的声学信号

临床听力诊断和实验研究常用的声学信号主要有以下几种:纯音、短持续信号(短声、短纯音)、调制声(调频声、调幅声)、言语信号和噪声信号等,由于它们的声学特性不同,各自的用途也不相同。

一、纯音

纯音(pure tone)又叫单音,从主观感觉判断是单一音调的声觉。从物理意义上讲,纯音是指瞬时值为一简单正弦式时间函数的声波。持续不变的纯音的频谱为一根垂线。临床用作气导和骨导听阈测试的声信号是各种频率的纯音。

二、短持续听觉测试信号

时程小于 200ms 的声信号称为短持续信号(short-duration signal)。记录听觉诱发电位、诱发性耳声发射和神经耳科检查所用的短纯音和短声等都是短持续信号。

1. 短纯音 brief tone

短纯音也称为猝发音(tone burst),为持续时间少于 200ms 的正弦信号。短纯音的持续时间是指其包络上升与下降到最大振幅中点之间的时间间隔;短纯音的上升时间是指从其包络振幅的 10% 上升到包络振幅的 90% 的