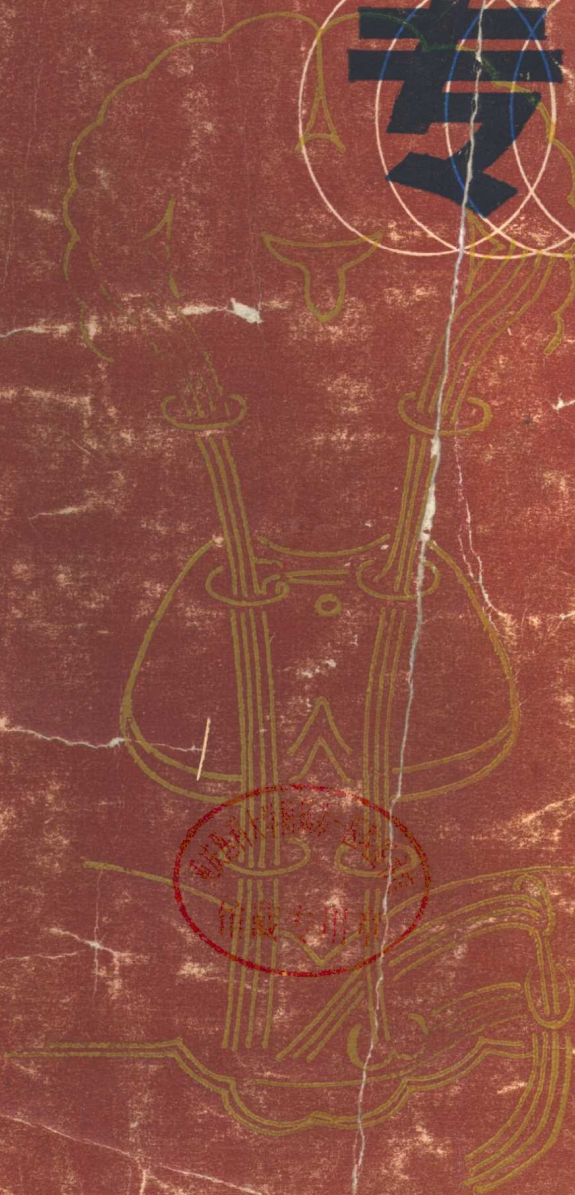


听力字 专辑



1983

鞍钢医学科学情报研究室

1983年5月

目

录

鞍钢医学科学情报研究室

- 1、应用声学……………中国医大物理教研组 徐葆仁…… (1)
- 2、耳蜗的血管和神经……………中国医大听力研究室 张家琨等…… (10)
- 3、应用听觉生理学……………首都医院耳鼻咽喉科 胡 岗…… (16)
- 4、耳蜗电生理的进展……………中国医大听力研究室 魏保龄…… (40)
- 5、听觉外伤耳蜗实验研究 (综述) ……………
……………中国医大听力研究室 张家琨等…… (47)
- 6、听觉脑干电反应 (ABR) 研究的进展……………
……………中国医大听力研究室 魏保龄…… (51)
- 7、电反应测听 (ERA) ……………首都医院耳鼻咽喉科 胡 岗…… (59)
- 8、声阻抗测试的原理及临床应用……………
……………北京中国人民解放军总医院 陈 新…… (93)
- 9、听力计的原理、结构、操作、检定及维修……………
……………陕西千阳宏声器材厂 王龙德…… (120)
- 10、纯音测听……………北京市耳鼻咽喉科研究所 刘 千…… (126)
- 11、自描听力计测听的临床应用……………北京市同仁医院 董玉云…… (137)
- 12、婴幼儿测听……………
……………中国医大附属一院耳鼻咽喉科 金济霖等…… (140)
- 13、助听器及其应用……………天津助听器厂 唐惠德…… (149)
- 14、聋病学概要……………北京市耳鼻咽喉科研究所 刘 千…… (154)
- 15、日本第四届音声外科讨论会侧记……………
……………中国医大附属一院耳鼻咽喉科 金济霖…… (172)
- 16、访日见闻……………中国医大附属一院耳鼻咽喉科 金济霖…… (174)

列 题 目 录

- 1、访日见闻……………北京中国人民解放军总医院 姜泗长
- 2、内耳病理 (幻灯片) ……………北京中国人民解放军总医院 姜泗长
- 3、开创听力学新局面
中国医科大学附属一院耳鼻咽喉科 于靖寰
- 4、鼻出血的急救 (日本电影)
中国医科大学附属一院耳鼻咽喉科 金济霖
- 5、医学科学某些方面进展 中国医科大学听力研究室 魏保龄
- 6、聋哑及其矫治 北京市耳鼻咽喉科研究所 邓元诚

应 用 声 学

中国医科大学物理教研组 徐 葆 仁

一、振动 (Vibration)

振动是自然界很普遍的运动形式。但振动的规律是复杂的，一切声音都是由振动的物体发出来的，为此，我们从最简单的振动讲起。

把一个小球拴在一根细长的线上挂起来，把小球从平衡位置拉开后再放开，小球将左右来回运动。又如图 1，把一个带球的弹簧穿在水平放置的玻璃棒上，弹簧的一端固定，把它从平衡位置 O 拉到 B，然后把手松开，弹簧就发生来回的运动，物体在一定位置附近来回重复的运动称为振动。

我们把拴在一根细线上挂起来的小球称之为单摆，一个带球的弹簧称为弹簧振子。它们在小范围内的振动是一种最简单的振动，下面我们先来研究图 1 中弹簧振子的振动。

小球在位置 O 时，弹簧作用在小球上的力为零，这个位置是小球的平衡位置。

振动物体离开平衡位置的最大距离叫作振幅 (Amplitude)，图中小球的振幅等于 OB 或 OC。

物体完成一次全振动所需要的时间叫作周期 (Period)。图 1 所示的小球由 B 经过 O 到 C，再经位置 O 回到位置 B 的时间就叫它的周期。

单位时间内完成振动的次数叫做频率 (frequency)，频率的单位是赫兹，一秒种内振动一次就叫作 1 赫兹。

频率和周期是互为倒数关系。如果用 T 代表某物体振动的周期，用 f 代表频率，即：

$$f = \frac{1}{T} \text{ 或 } T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

振幅的大小取决于我们最初供给它能量的多少。例如，把小球从平衡位置拉开的远一些，则振幅就大一些，即振幅的大小取决于外界因素。振动的周期（或频率）取决于什么呢？我们通过下述实验可以得出结论。拿一个单摆，令其摆动，测它的周期，然后把摆长减小或增加，再测它的周期。由此可发现，摆长减小，周期减小；摆长增加，周期增加。如果将摆长固定，而振动范围增大一些或减小一些时（在比较小的范围内），其周期不变，这表明单摆的周期由摆长决定，而与振动范围（这个振动范围是由外界条件决定的）无关。对于一定的单摆来讲，其摆长是一定的，因而周期就是一定的。再拿一个弹簧振子来作试验，则可发现其周期决定于弹簧的弹性和小球的质量，也和振动范围无关（在比较小的范围内），对于一定的弹簧和一定的小球来讲，其周期也是一定的。

由此可见，振动的周期（或频率）是由振动系统本身决定的（对于单摆来讲由摆长决定，对于弹簧振子来讲，由弹簧的弹性和小球的质量决定），因此常称这种周期（或频率）为物体的固有周期（或固有频率）。

每一个物体都有自己的固有周期或固有频率，不同物体的固有周期或固有频率一般是不同的。

振动物体离开平衡位置的距离随时间的变化，通常可用振动曲线表示。设想在上述单摆的摆锤上固定一个细线或马鬃，使之带

上墨水，并使一张白纸在细线下运动，如图2所示。如果白纸用固定的速度沿着和振动平面垂直的方向运动，那么细线便在白纸上画出一条曲线，这个曲线表示了单摆离开平衡位置的距离随时间变化的规律。

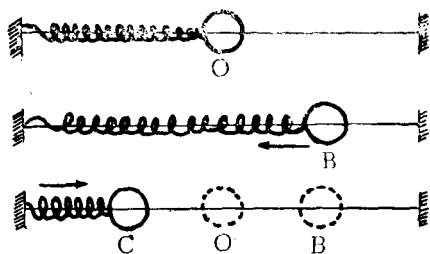


图 1 弹簧振子的振动

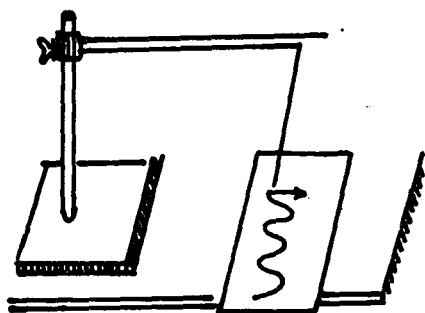


图 2

实验证明，象单摆振动那样的“简单振动”的振动曲线是正弦曲线。如图3所示，图中横坐标 t 表示时间，纵坐标 S 代表振动物体离开平衡位置的距离， A 表示振幅， T 表示振动的周期，用公式表示则为：



图 3

$$\begin{aligned} S &= A \sin \omega t \\ &= A \sin \left(-\frac{2\pi}{T} t \right) \\ &= A \sin (2\pi f t) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 ω 叫圆频率，它与频率的关系是 $\omega = 2\pi f$ 。

图3中所示的振动，其振幅保持恒定，叫做等幅振动。如果振动体与外界有能量交换，比如由于摩擦阻力的存在，将使振动体的能量减少，表现为振幅逐渐减小，这一情况叫做衰减振动（图4）。

在一定的周期性外力作用下，振动体所进行的振动叫做受迫振动，其频率由周期性外力的频率所决定。而自由振动的频率则由振动体本身性质所决定，即决定于固有频率。当周期性外力的频率等于或接近振动体的固有频率时，振动体的振幅达到最大值，这一现象称为共振（resonance）。

图5表示稳定的受迫振动的振幅 A 和外力频率 f 的关系， f_0 代表振动体的固有频率。由图可见，当外力频率 f 和固有频率 f_0 相等时，振幅为一最大值；而外力频率 f 与 f_0 相差甚远时，则振幅就很小，这一关系曲线称为共振曲线。

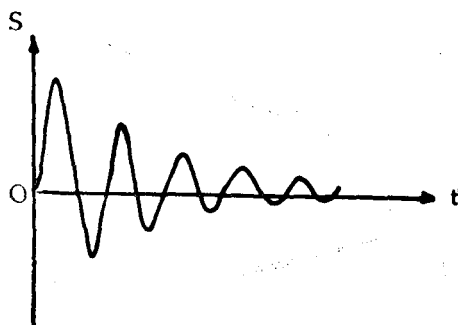


图 4 衰减振动曲线

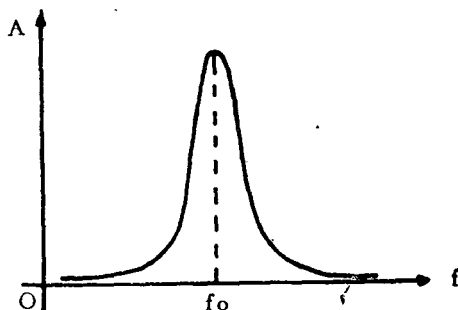


图 5 共振曲线

二、波动 (Wavemotion)

当音叉在振动时, 将引起周围空气的振动, 从而使附近的一层空气发生压缩和稀疏, 由于空气受到压缩和稀疏时有了弹性力发生, 因而又引起邻近部分空气的振动, 这样, 振动从音叉处向各方向传播出去, 这种振动在介质中的传播过程称为波动, 简称为波 (Wave)。

这里传播的只是运动的形式一振动, 而振动物体并未迁移。关于这点我们还可以从水波清楚地观察到。把石块投入水中, 在水中就有以石块投入处为中心的环形波向外传播, 而水的微粒只是上下振动, 而不移向别处去, 可见, 波动是物质运动的一种重要形式, 它是某种振动在物质中的传播过程。

波动可以分为两大类: 一类是由于机械振动在弹性介质里引起的波动过程, 叫做机械波, 例如水波、声波以及在液体、固体内部传播的弹性波等都是机械波。一类是由于电磁振荡所产生的变化电场和变化磁场在空间的传播过程, 叫作电磁波, 例如无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线等都是电磁波。机械波和电磁波在本质上是不同的, 但是它们都具有波动的共同特征。由于振动的传播同时伴随着能量的传播, 因此, 一切波动过程都是能量传播的过程。

波有横波、纵波两种。如果振动方向与传播方向相同, 这种波叫纵波, 在空气或液体中传播的声音或超声就是纵波。如果振动方向与传播方向相垂直, 这种波就叫作横波。用手抖动绳子的一端, 绳子上产生的波就是横波。

对于横波, 显然我们可以用图 6 所示的图线表示, 横座标 x 代表离波源的距离, 纵座标 S 代表同一瞬间距波源不同距离处的位置变化。

凸出的部分叫波峰, 凹下的部分叫波谷, 两个相邻波峰或两个相邻波谷之间的距

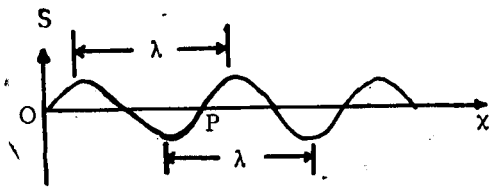


图 6 横波

离叫波长 (Wavelength), 常用 λ 表示。

由图 6 可以看出, 在 O 点的振动传到 P 点时, 所用的时间正好是质点完成一次全振动所用的时间, 即在一个周期内振动在介质内传播的距离, 等于一个波长, 那么振动传播的速度 [即波的速度 (Wavevelocity)] C 应该等于波长 λ 和周期 T 的比, 即,

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad (3)$$

又因为 $f = \frac{1}{T}$, 所以 $C = f\lambda$ (4)

这说明波速等于波长乘以频率, 这个公式是波长、频率、波速的基本关系式。

对于纵波, 比如音叉的振动引起的声波, 我们也用上面分析的图形来表示, 如图 7 所示。在这里, 波峰和密区、波谷和疏区相对应, 两个相邻密区 (或相邻疏区) 间的距离叫作一个波长, 以 λ 表示。音叉每振动一次在空气中能把声振动传播出去一个波长。纵波的波长、频率和波速的关系也是由公式 $C = f\lambda$ 表示。

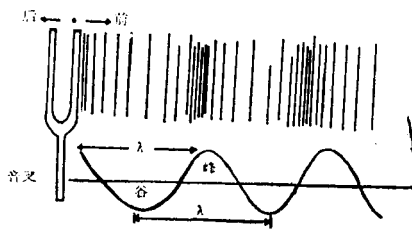


图 7 纵波

必须指出, 频率的大小是由波源 (Wave source) 来决定的, 波的速度是由媒质

(medium) 的性质决定的, (在一定的均匀媒质中, 波速是一定的, 见表1), 而波长决定于波速和波源的频率。根据式(4), 已知其中两个量就可以求第三个量。

三、声波 (声音)

声音 (sound) 是从振动的物体发出来的。用橡皮槌敲音叉, 我们可以听到音叉发出的声音。用手指轻轻接触发声的音叉的叉股, 可以直接感觉到它的振动。如果捏紧音叉的叉股使它的振动停止, 那么随着振动的停止, 我们也就听不到声音了。

正常心音是心脏瓣膜关闭时的振动产生的, 呼吸音是空气通过喉管、气管、小支气管等使之振动而发声, 其他如肠鸣音及叩诊音等都是由不同部位振动发生的, 可见, 一切声音都来源于物体的振动。

物体的振动有快有慢, 因而声波的频率也有高有低。我们的耳朵能够听到声音的范围是从20赫兹到20000赫兹。在自然界也存在着低于20赫兹和高于20000赫兹的振动和波, 但它们不能引起我们的听觉。低于20赫兹的叫低声波, 高于20000赫兹的机械波叫超声波。

物体的振动是怎样传导到入耳中来的? 由于发声物体的振动, 是和它周围的空气 (或其它气体、液体及固体) 相互联系着的, 振动着的发声体使它周围的空气也跟着振动, 在空气中形成了从声源向外传播的声波。当空气里的声波传到耳朵里时, 引起了鼓膜的振动, 刺激了听觉的神经, 因而引起了我们对声音的感觉。不仅空气能够传播声音, 别种气体、固体和液体都能传播声音, 但是声音不能在真空中传播。

在不同的介质中声音传播的速度是不同的 (见表1)。

声波传播的空间叫声场 (Sound field), 描述声场性质的物理量主要有:

(1) 声压 (Sound pressure)

声波在空气中是以纵波形式传播的, 因

表1 几种介质中的声速

物 质	声 速 (米/秒)	物 质	声 速 (米/秒)
空 气	340	脑	1505—1515
水	1450	肾、肝	1553—1559
钢	约5000	肌 肉	1575—1585
松 木	3320	骨	3360—3380

而空气媒质时而密集时而稀疏, 空气媒质各点的压强会发生变化。考虑空气媒质中的一个微小体积元, 当空气密集时受到压缩, 因而压强有所增强; 当空气稀疏时发生膨胀, 所以压强有所减小。由此可知声波在空气中传播时, 各体积元的空气压强发生周期性的变化, 时而增加, 时而减小。气体压强与正常压强的最大差值, 叫做声压振幅, 简称声幅。用 P_m 表示。声幅的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍称为有效声压, 用 P_e 表示, 理论证明, 声幅 P_m 的大小由下式决定

$$P_m = PC\omega A \quad (5)$$

$$\text{故有效声压 } P_e = \frac{1}{\sqrt{2}} PC\omega A \quad (6)$$

式中 P 为媒质密度, C 为声波速度, ω 为角频率, A 是振幅。声压的单位通常用微巴表示, 或用达因/平方厘米 (1微巴 = 1达因/平方厘米)。

(2) 声强 (Sound Intensity)

声波的传播就是振动能量的传播。声强就是指单位时间通过单位面积 (面积与声波前进方向垂直) 所传递的能量。理论证明, 声强 I 可用下式表示

$$I = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 A^2 \quad (7)$$

式(7)表明, 声强 I 与振幅的平方成正比, 与频率的平方成正比。

声强的单位是尔格/厘米²·秒, 实用上, 用瓦/厘米²。一般情况下空气密度 $\rho = 0.0013$ 克/厘米³, $C = 343$ 米/秒, 当频率 f

=1000赫时,引起人耳听觉的最小声强刺激量 I_0 是 10^{-10} 瓦/厘米²。代入式 (7) 可知空气质点的振幅仅为 8×10^{-10} 厘米 (相当于空气分子直径的五十分之一)。与此相应的声压振幅为 2.9×10^{-4} 微巴,可见人耳对压强变化的灵敏程度。此外在同一频率引起人耳痛觉的最小声强刺激量是 10^{-4} 瓦/厘米²,与 I_0 比较两者相差一万亿倍!可见人耳对声强变化的适应范围是很惊人的!

(3) 声阻抗 (Acoustic Impedance)

声阻抗是表征媒质对声波传递性质的物理量,常叫做媒质的声阻抗,简称为声阻,用 Z 表示。其定义是:

$$Z = \frac{P_m}{U_m} \quad (8)$$

式中 P_m 为声压幅值, U_m 为媒质 2 点振动时的速度幅值,其大小 $U_m = \omega A$ 故

$$Z = \frac{P_m}{U_m} = \frac{\rho C \omega A}{\omega A} = \rho C \quad (9)$$

由式 (8) 可见,声阻抗 Z 愈大,意味着在同一声压情况下,媒质 2 点获得的速度幅值就愈小。声阻抗在声学中是一个重要的物理量。其大小决定于媒质的密度 ρ 和声在媒质中传播的速度 C 。

将式 (6) 乘方得

$$P_e^2 = \frac{1}{2} \rho^2 C^2 \omega^2 A^2$$

再与式 (7) 比较,结合式 (9),可得

$$I = P_e^2 / \rho C = P_e^2 / Z = P_m^2 / 2Z \quad (10)$$

式 (10) 给出声强,声压和声阻三者的关系。

四、声波在传播中的特性

1、反射特性 (Reflection Character)

声波在传播过程中,遇到两种媒质的界面时,一部分声波透过界面进入第二媒质,另一部分返回第一媒质。返回第一媒质的声波称为反射波。透入第二媒质的声波,在一般情况下,改变了传播的方向,故而称作折射波。而原来第一媒质中的声波则称为入

射波。由于入射波在媒质界面分为两部分,因而反射和折射波的振幅都比入射波的振幅要小。至于减小到何种程度,则完全依入射角大小及媒质声阻大小而定。对于垂直入射媒界面的声波来讲,反射波振幅 A_r 对入射波振幅 A_i 之比和媒质阻抗之间存在下列关系:

$$R_p = \frac{A_r}{A_i} = \frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \quad (11)$$

式中 ρ 为媒质密度, C 为声波速度, R_p 称作声压反射系数。它反映了反射波声压的大小,可以看出两种媒质声阻抗差值越大,反射波越强。也可用声强反射系数 R_I 表示,其公式为

$$R_I = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{A_r}{A_i} \right)^2 = \left(\frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \right)^2 \quad (12)$$

式中 I_i 为入射波声强, I_r 为反射声强。由式 (7) 可知, I 是和 A^2 成正比,故得上述公式。

声波反射原理是声学诊断的理论基础。由于机体组织、器官的声阻不同,所以反射波的强度不同,从而能够判断各组织、器官的情况。

(2) 衰减与吸收

声波在媒质中传播时,声能将随着距离的增大而逐渐减小。一类是由于声束本身的扩散以及反射、散射等原因,使能量分散,从而降低声能,这种现象叫声能的衰减。另一类是由于媒质的吸收,将声能转换成热能,使声能减少,这叫做声能的吸收。

由于吸收而产生声强的衰减服从指数规律,如下公式所示:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (13)$$

I 代表在 $X = 0$ 处声强, I_0 是传播到 X 处的声强。 μ 叫做吸收系数,它的大小与媒质的粘滞性,热传导和热幅射有关。此外, μ 还与频率 f^2 成正比,即声波的吸收随声波频率的增加而迅速增大。再有 μ 与波

速 C^3 成反比，这表明各种媒质的吸声能力不同，空气对声波的吸收要比固体和液体大。

(3) 交混回响

如果声音是在室内传播，声音将在墙壁和天花板处发生反射，每一次反射将有一部分声能被吸收，经过多次反射，声音将逐渐减弱而听不见。这种在声源停止作用之后，声音在室内并不立即消失，而延续一个时间的现象称为交混回响。声强减弱为初始强度的百万分之一所经历的时间，称为交混回响时间 t 。

交混回响时间决定于房屋建筑材料和室内装配物的吸音系数。过长的交混回响时间使声音前后重迭，辨别不清。过短的回响时间听起来使人感到声音单调，枯涩。经验指出，最适当的交混回响时间约 $1 \sim 2$ 秒之间。建筑师在计算交混回响时间 t ，常用下列公式：

$$t = 0.163 \frac{V}{\alpha S} \quad (14)$$

式中 t 是交混回响时间，以（秒）为单位， V 是屋子的体积，以（米³）为单位， S 是屋内各反射面的面积，以（米²）为单位。 α 是吸音系数，所谓吸音系数乃是单位面积的吸声材料所吸收的声能与抗射到这面积上的声能的比值。实验指出，坚硬而光滑的物质（例如玻璃）吸音系数小，软而多孔的物质（例如绒毛）吸音系数大。又同一物质的吸音系数和入射声波的频率也有很大的联系。表 2 是几种材料的吸音系数（频率为 512 赫兹时）。

对于需要消灭无噪音的地方，如广播室、电测听室等，则要求交混回响时间 t 愈小愈好，常采用吸音系数大的物质材料作室内墙壁装饰物。

五、声调、响度与音色

一般声源均为一复杂的振动，即组合振动，例如钢琴和黑管这两种乐器的振动曲线，如

表 2 几种材料的吸音系数

材 料	吸音系数	材 料	吸音系数
砖 墙	0.03	纤 维 板	0.35
三 合 土	0.015	地 毯	0.30
灰 墙	0.02	毛 毯	0.50
木 板 墙 (涂石灰)	0.034	绒 幕	0.23
玻 璃	0.02	打 开 的 门 窗	1.00

图 8 所示。



图 8 钢琴与黑管的振动曲线

它们都是周期性的非简谐振动，即是由频率成简单整数比的简谐振动所合成，其中最低频率为基频，高倍频率为泛频。将分振动的振幅，依基频、泛频的顺序画成的图谱，就成为振动频谱图，简称频谱图。

由图 8 的分析可以知道，钢琴与黑管的最低频率（即基频）都是 100 赫兹。黑管是由 10 个纯音（简谐振动）组成；而钢琴却由 16 个纯音组成。它们的频谱图如图 9 所示。

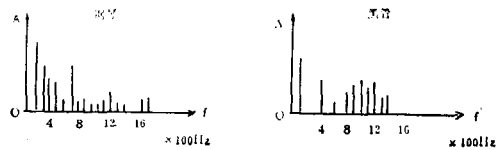


图 9 钢琴与黑管的振动频谱

由以上两个例子可以说明声音有三个基本特征，一是频率，专指基音频率；二是振幅；三是倍频成份。基音频率给人耳的感觉是音调的高低，频率低时音调低，频率高时音调高。振幅的大小给人耳以声音强弱的感觉，振幅大时声音强，振幅小时声音弱。一般把声源发出声音的强弱叫作声强，是描述

声音强弱的客观指标；而把人耳对声音强弱的主观感觉叫作响度，是对声音强弱感觉的主观指标。倍频成份决定着声音的品色，是人耳区别基频相同（音调相同）、振幅相同（声强相同）的两个声音的主观能力；即区别不同倍频成份的主观感觉，通常称之为音色或声质，也可以说是人耳区别声音倍频成份的主观感觉。上述黑管与钢琴的基频和振幅都相同，这时人耳仍能听出何者为钢琴所发之声，而何者又为黑管所发之声，即为音色感觉的不同所造成。

所以基音频率、振幅（或声强）、倍频成份是声音的客观特性。而音调（或声调 Pitch）、响度（Loudness）、音色（Tone Quality）则是听觉的主观特性。也可以说是人耳对声音客观特性的主观感觉或反应。两者是不同的，但又是紧密关联的。

上面所说的钢琴与黑管发出的声音，以及说话、唱歌等等声音，都有着共同的特征，即均为周期性振动。这种周期性振动给人听起来是舒服的感觉，因而叫作乐音。而另一类发声体发出的声音不具周期性的特征，如图（10）所示，给人以不舒服的感觉，通常叫作噪音（Noise）。它是不同频率和强度的声振动毫无规律的组合。



图 10 噪声的波形

六、听觉区域、声强级与响度级

声强是声音的主要客观指标之一。当声波传播到人耳时，便会刺激听觉神经，引起大脑听觉分析器的声音感觉，但并非任何大小的声强都能引起人耳的听觉；必须在声强达到一定量值之后，才能引起人耳的听觉。我们把声波频率范围内（20~20000赫）的最小声强刺激量叫作人耳的听阈（Audible Threshold）。对于不同频率的声波听阈值不同，这说明人耳对不同频率的声波灵敏度

不同。听阈值依频率的关系曲线叫作听阈曲线。声强增大到一定量值，会引起人耳疼痛的感觉，而不再是听觉；这一引起痛觉的最小刺激量，叫作痛阈。对于不同频率的声波痛阈值也不同，痛阈依频率的关系曲线叫作痛阈曲线。由上述人耳的听觉范围是在听阈曲线、痛阈曲线、频率20赫线和20000赫线所包围的区域之间（见图11）。这一区域称作听觉区域。

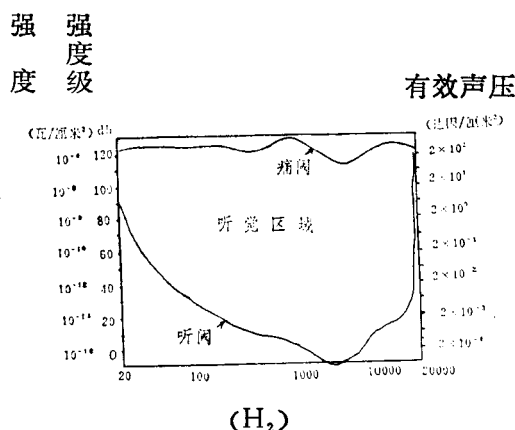


图 11 人耳的听觉区域

图11所采用的坐标制式是半对数坐标，横轴代表频率，纵轴代表声强。纵轴采用分贝（decible）这个单位，记作dB。分贝不是声强的单位，而是声强级的单位。下面对声强级的概念做一叙述。

由图11可知，人耳能感觉的声强范围是非常宽广的，前面已提到1000赫兹的声音的听阈和痛阈的声强之间的差约为 10^{12} 倍。事实上，人耳是不能把这样大的一个范围内的声音由弱到强分辨出 10^{12} 个等级来。生理学的研究结果指出，人耳对两个不同声强的声音的感觉近似地与两个声强比的对数成正比。因此采用对数坐标来表示声音强度的等级，这种等级就叫作声强级（Sound Intensity Level）。通常规定，以最低可闻声强 $I_0 = 10^{-16}$ 瓦/厘米² 作为基准来量度任一声强 I ，取常用对数，则得声强级 L 为：

$$L = 20 \lg \frac{I}{I_0} \quad (\text{贝耳}) \quad (15)$$

式中 L 就是声强为 I 这个声音的声强级，它的单位叫作贝耳 (Bel)，贝耳这个单位过大，所以通常用十分之一贝耳作声强级的单位，叫作分贝耳 (dB)。于是公式 (10) 可写成

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (\text{分贝耳}) \quad (16)$$

例如当 $I = 100 I_0$ 时，其声强级为 20 分贝耳，而声强为 10^{-4} 瓦/厘米² 的声音，其声强级为 120 分贝耳，（即频率为 1000 赫兹时，痛阈的声强级）。声强差大于 1 分贝耳时，人耳才能感觉到两个声音的强度不同，即一个声音的声强要比另一个声音的声强大一倍多。还必须指出，分贝不能用代数加减，例如一台机器所产生的噪声为 50 分贝，若再增加一台同样的机器，声强级不是 100 分贝，而只是增加了 3 分贝，即 53 分贝。常见声源的声强级如表 3 所示。

表 3 常见声源的声强级

声源	声强级 (dB)	响度	声源	声强级 (dB)	响度
雷、炮	120	震耳	办公室 (中)	60	正常
铆钉锤	110		交谈 (中)	50	
闹市	100	极响	住宅 (静)	30	轻
警笛	90		树叶微动	20	
无线电 (中)	70	响	细语	10	极轻

如用声压来计算强度级，按式 (16) 和式 (10)

$$\begin{aligned} \text{则} \quad L &= 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \frac{P^2}{P_0^2} \\ &= 20 \lg \frac{P}{P_0} \end{aligned} \quad (17)$$

式 (17) 中， P 为某一声音的声压 (微巴)， P_0 为听阈的声压 (0.0002 微巴)。

例如正常的语言声压为 0.2 微巴，则其强度级为：

$$\begin{aligned} L &= 20 \lg \frac{0.2}{0.0002} = 20 \lg 1000 \\ &= 20 \times 3 = 60 \text{ 分贝 (dB)} \end{aligned}$$

用声压计算的强度级常叫声压级，单位也是分贝。

与声强对响度的关系一样，我们用响度级代表声强级的主观感觉。声强级与频率无关。但响度级与频率有关。这就是说对应于不同声波频率的声强级相同时，并不意味着主观感觉相同，即响度级也相等。举例来说，对应 1000 赫兹的声强级为零分贝，其响度级是零昉 (昉，Phon 是响度级的单位)；当然这是必然的，因为这是规定的参考标准。可是对应于 100 赫兹的响度级来说，仍然是零昉，可是声强级却是 37 dB。这说明响度级和频率有关。响度级依频率变化而相同的各点连线，构成等响曲线 (见图 12)。其中听阈曲线 (零昉) 和痛阈曲线 (120 昉) 都是等响曲线。

比如声强级为 78 分贝，频率为 50 赫兹的声音和 78 分贝，1000 赫兹的声音并不是等响的，而是和 1000 赫兹，60 分贝声音等响，那么这时的响度级则为 60 昉。

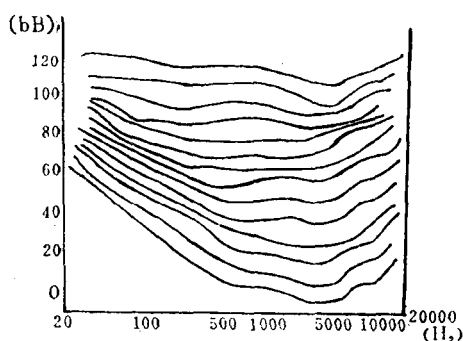


图 12 等响曲线

图 12 中的各条曲线是通过实际观察画出来的等响曲线。另外，从图 12 可见，当声强级超过 80 分贝时，等响曲线几乎是直线，说

明它与频率大小无关，因此大于80分贝的噪音，其危害性与频率的变动没太大关系。

七、声强级的计算

在工厂车间里，如果同时有 N 个强度和频率均不同的噪音源存在，它们的总噪音强度为：

$$I_{\text{总}} = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_N \quad (18)$$

如果换算成强度级，应是：

$$\begin{aligned} L_{\text{总}} &= 10 \lg \left(\frac{I_{\text{总}}}{I_0} \right) \\ &= 10 \lg \left(\frac{I_1 + I_2 + \cdots + I_N}{I_0} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

假定各个声源的强度相等，即 $I_1 + I_2$

$$+ I_3 + \cdots + I_N = NI_1$$

则式 (19) 变为：

$$\begin{aligned} L_{\text{总}} &= 10 \lg \left(\frac{NI_1}{I_0} \right) \\ &= 10 \lg \frac{I_1}{I_0} + 10 \lg N \end{aligned} \quad (20)$$

由式 (20) 可知，两个相同噪音强度的机器，同时产生的噪音声强级，比单独一台机器所产生的声强级只大 3 个分贝（因 $N=2$ ， $10 \lg N = 10 \lg 2 = 3$ ）；如果有 10 台相同噪音的机器，只能增加 10 个分贝（ $10 \lg 10 = 10$ ），而 100 台机器只能增加 20 分贝（ $10 \lg 100 = 10 \times 2 = 20$ ），等等，

对于两个不同强度不同频率的声源同时产生的噪音，总声强级可用下式计算：

$$L_{\text{总}} = L_1 + \Delta L \quad (\text{分贝}) \quad (21)$$

式 (21) 中， L_1 是两个声强级中较大的一个； ΔL 是附加的声强级，它可由图 13 的曲线中确定。

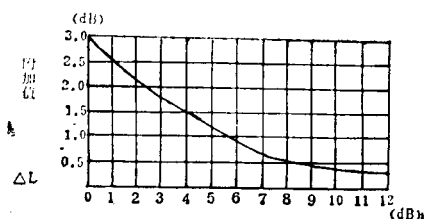


图 13

二个噪音的声强级之差 $L_2 - L_1$

例如， $L_1 = 90$ 分贝，而 $L_2 = 85$ 分贝， $L_1 - L_2 = 5$ 分贝，在图 13 的 ΔL 附加值曲线中，找到 $\Delta L = 1.2$ 分贝，所以两个噪音源的总声强级等于：

$$L_{\text{总}} = L_1 + \Delta L = 90 + 1.2 = 91.2 \text{ 分贝}$$

有多个不同强度，不同频率的噪音源时，可用此法顺序相加，但必须先从小声强级最大的声源开始。例如，车间内有三个不同强度，不同频率的噪音源，其声强级分别为 $L_1 = 85$ 分贝， $L_2 = 90$ 分贝， $L_3 = 88$ 分贝。首先应求 $L_2 - L_3$ 的附加值，即 $90 - 88 = 2$ 分贝的附加值，查图 13 曲线得 $\Delta L = 2.2$ 分贝，因此 L_2 和 L_3 的总声强级 L_{23} 为 92.2 分贝。然后再从 $L_2 - L_1 = 92.2 - 85 = 7.2$ 分贝。查得 ΔL 的附加值为 0.7 分贝。所以三个不同噪音源的总声强级 $L_{\text{总}} = 92.2 + 0.7 = 93$ 分贝。

由图 13 可见，若 $L_1 - L_2$ 的差大于 6 分贝以上时，附加值小于 1 分贝。因此如有两个噪音源，其中一个的声强级超出另一个达 6 分贝以上时，则较小的声强级在计算总声强级时，可略而不计。

八、电子听力计

由于工业噪声或某些疾病均能导致听力损失，所谓听力损失就是患者听阈值与正常听阈值之差。确定听力损失的测试叫听力测试。目前，听力测试已多使用电子听力计。

电子听力计是一种精密的电子设备，它主要用来测验人耳对不同频率音响的听阈值，并将这些阈值连成折线以与正常听力参考线进行比较，从而判定听力损失的情况。

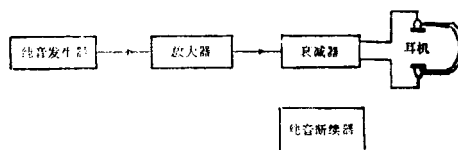


图 14 电子听力计方框图

况。

一般电子听力计都包含有以下几个主要部分,即纯音发生器,放大器,衰减器,纯音断续器以及耳机,其方框图如图14所示。

纯音发生器就是一个正弦波振荡器,一般发声范围在125~8000赫兹,以每一倍频程为其间隔,如125, 250, 500, 1000, ... 8000。振荡器的频率可以调节。

放大器和衰减器组成一个可调节的音频输出电压,其电压范围在不同频率时,能在

耳机中产生 -10分贝至 +100分贝的声强级信号。其大小可由衰减器调节旋钮进行控制。

纯音断续器是为避免被测试者听声的持续时间太久而产生听觉疲劳。在操作时,要求能随意地产生或中断纯音,而不产生附带的声音。

耳机是听力计中较易损坏的部件,通常它是与听力计输出端匹配好的,因而不能随意调换。

耳 蜗 的 血 管 和 神 经

中国医科大学听力研究室 张家琨 许荣伟

一、耳蜗的血管

迷路分骨性迷路与膜性迷路。骨迷路的血液由椎动脉及颈动脉的小枝即下鼓室动脉、硬脑膜后动脉、茎乳孔动脉、弓形下窝动脉供给。

骨迷路的血管与膜迷路血管无吻合,故当膜迷路发生动脉梗塞时不能代偿。

本文主要介绍膜迷路的血管。膜迷路的动脉大部分来自小脑前下动脉,也可发自小脑后下动脉,这些动脉是基底动脉的分枝,它前面有大脑动脉环 (Willis Circulus arteriosus cerebri), 与颈动脉相连,后与椎动脉相连,向膜迷路去的血管,主要处在椎动脉的影响之下。

基底动脉的大小、走行、分枝等是人体动脉中变异最大的血管。从胎生学来看,人胎儿7~10mm时,小脑上动脉已具有明确的形态,而小脑前下动脉、小脑后下动脉只有到40mm时才勉强从营养耳迷路骨胞及脑髓之动脉丛中稍微变粗涌现出来,故它极不稳定。

据龟山氏165耳统计,26%缺少小脑后

下动脉,12.7%缺少小脑前下动脉。

膜迷路动脉,据石井氏统计40耳中,来自:

小脑前下动脉者34耳(85%)

小脑后下动脉者2耳(5%)

小脑动脉重复枝者4耳(10%)。

因为迷路动脉的来源常有变异,故一般教科书的记载常常互相不一致。

其次应当注意者是有67%的小脑前下动脉在越过内耳道口时被吸入内耳道,形成绊(loop formation),而迷路动脉常从绊的顶点发出,也有不从绊处发出迷路动脉者。

据Mazzoni氏(1969),100人中,小脑前下动脉的主干或分枝形成绊者占80%,

小脑副动脉形成绊者占17%,

小脑后下动脉形成绊者占3%。

绊在内耳道内者占40%,

绊在内耳道入口处者27%,

绊在内耳道小脑桥脑角者占33%。

在内耳道内作听神经瘤显微手术时宜注

意，因小脑前下动脉营养桥脑及一部分小脑，故伤了它有致命危险。

1、迷路动脉 (A. labyrinthi) 过去叫内听道动脉 (internal auditory artery)

—前庭前动脉……供应椭圆囊，(A. vestibuli anterior) 上，水平半规管。

横棱 (Crista transversa)

—耳蜗固有动脉 (A. cochleae propria) 也叫螺旋蜗轴动脉 (spiral modiolar artery)……供应耳蜗上、中周，基底周之 $\frac{2}{3}$ 。

—前庭耳蜗动脉 (A. vestibuli cochlearis) 也叫前庭后动脉 (A. vestibuli posterior)……供应基底周之 $\frac{1}{3}$ ，球囊及后半规管。

迷路动脉的变异情况，35耳中 (Hinojosa)：

前庭前动脉 } 三者都具备者占23耳
耳蜗固有动脉 } (66%)
前庭耳蜗动脉 }

缺耳蜗固有动脉者 6 耳 (17%)，

缺前庭耳蜗动脉者 5 耳 (14%)，

缺前庭前动脉者 1 耳 (3%)。

我们都知道，脾、肾都为终动脉 (end-artery)。迷路动脉为终动脉，但前庭耳蜗动脉与耳蜗固有动脉有吻合，不是终动

脉。

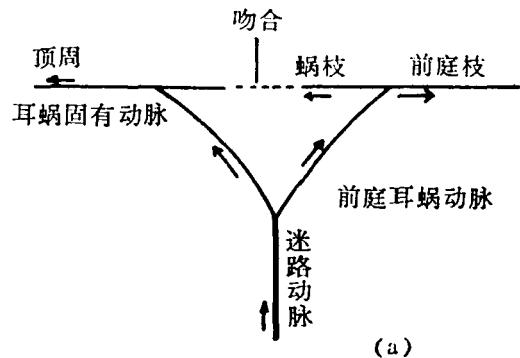


图 15

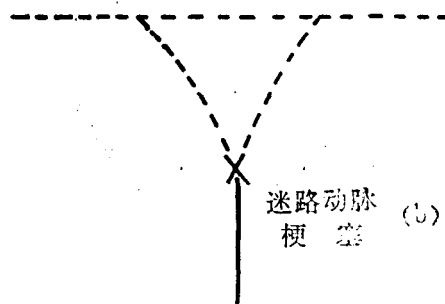


图 16

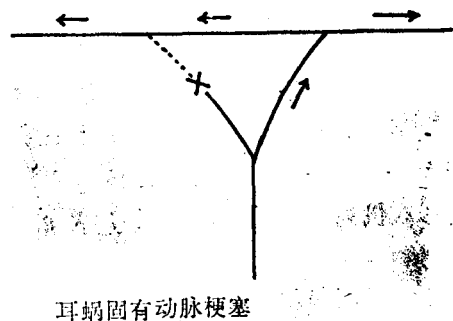


图 17

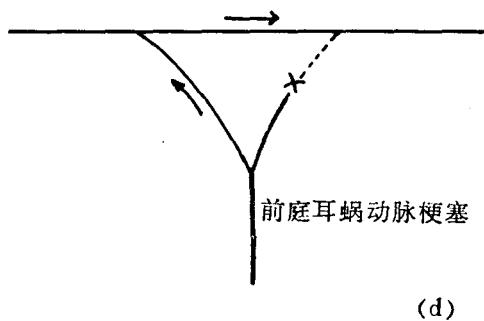


图 18

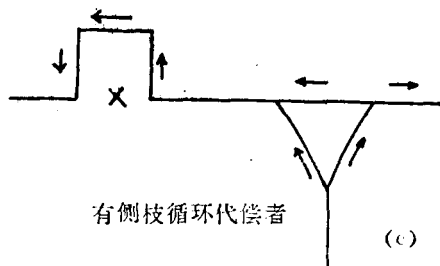


图 19

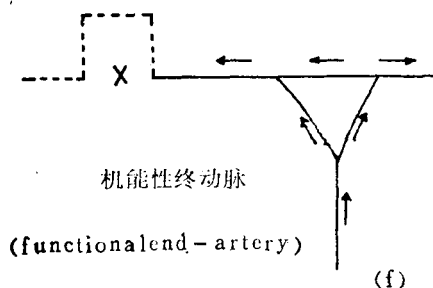


图 20

耳蜗部分有侧枝循环，故堵塞病灶不大则可以代偿，在堵塞下区不形成变性、坏死，例如有的糖尿病病人生前听力正常，死后发现耳蜗有许多小病灶而被周围之侧枝循环所代偿，未发生柯替氏器变性。如病灶过大则形成机能性终动脉，引起动脉下端变性。

2、迷路静脉

螺旋后静脉(Posterior spiral vein)，也叫鼓阶静脉(vein of the scala tympani)排螺旋神经节、中阶(scala media)

的外壁的毛细血管和鼓阶静脉血。

螺旋前静脉(anterior spiral vein)也叫前庭阶静脉(vein of scala vestibuli)，排螺旋板(spiral lamina)及前庭阶的静脉血。

在基底周附近，螺旋前、后静脉汇合形成蜗轴总静脉(Common modiolar vein)，再汇合前庭耳蜗静脉(vestibulo-cochlear vein)进入Cotugno氏管(Canal of Cotugno)，形成耳蜗小管静脉(Cochlear aqueduct vein)，进入岩下窦。

椭圆囊和上、外半规管壶腹之静脉血由前庭前静脉(anterior vestibular vein)排除。

球囊，后半规管壶腹以及耳蜗基底周的静脉血由前庭后静脉排除。

前庭前静脉与前庭后静脉汇合后又汇合园窗静脉(vein of round window)成为前庭耳蜗静脉。

半规管之静脉血由前庭小管静脉排血，位置接近内囊，最后进入乙状窦。

Bast 及 Anson (1949) 所称之为内听静脉，排耳蜗顶周及中周之血，经内耳道进入岩下窦者不常见。

3、螺旋韧带及螺旋板的血管

耳蜗固有动脉，围绕耳蜗神经螺旋上升，发出第1枝，放射状细动脉(radiating arterioles)是从第2枝直角地分出，形成上、下线圈状细动脉(upper coiled arterioles, lower coiled arterioles)，其间有交通枝。线圈状细动脉在豚鼠、鼠、猪、牛、猫、狗都非常明显，上线圈状细动脉比下线圈状细动脉大且圈数多，基底周的线圈状细动脉比上、中周多，人类则不明显，形成弧状。

过去一度认为它可与肾小球相比，实际肾小球1个平均含50个绊(loop)，全长25mm，居于一个腔内，而线圈状细动脉1个平均有5个loop，全长只1mm，而且

居于骨管中,故无似肾小管之作用,可能有调节血流的功能。

上线圈状细动脉形成放射状细动脉,沿前庭阶骨壁进入螺旋韧带上的4个毛细血管网,经集合静脉回血到蜗轴。

下线圈状细动脉向螺旋板供给血,形成螺旋板血管。

A、螺旋韧带血管

1) 前庭膜上血管网 (the capillary network above the vestibular membrane)。

螺旋韧带比中阶上下都略宽一些,前庭膜上血管网位于螺旋韧带内面,面向前庭阶的部分。

放射状细动脉到此形成一个呈螺旋状走行(与放射状细动脉成直角)的血管网,恰在前庭膜附着部之上,其静脉血一部分向下进入集合静脉(Collecting venule),一部分向上进入前庭阶之静脉。

2) 血管纹 (Stria vascularis)。

它上、下界限清楚且平行,乃较厚之血管网,从横断面看呈蜂窝状,无神经纤维,血流速度慢 $100\mu/\text{sec}$,从放射状细动脉受血,向集合静脉排血。

3) 螺旋凸血管 (vessel of the spiral prominence)。

在螺旋凸内有1条或2条螺旋走行的血管,从放射状细动脉受血,极少从前庭膜上血管网来动脉枝,绝不与血管纹吻合,回血静脉数比进血的动脉多4~5倍,最后排入集合静脉。

4) 基底膜细静脉 (Venule at the basilar membrane),在螺旋韧带内面,基底膜附着线下,面向鼓阶处,是一种形态上属于毛细血管的静脉。

目前认为血管纹,螺旋凸血管以及后述之螺旋血管及鼓室唇螺旋血管与内淋巴之生成、吸收有关,可能有营养柯替氏器的作用。

在上述四种毛细血管的深部,还有细动静脉吻合 (Arterio—Venous anastomosis),是放射状细动脉直接与集合静脉吻合,在基底周的放射状细动脉到血管纹与螺旋凸去的分枝不如形成细动静脉吻合者多,故有调节血流之作用,其血流速度为 $250\mu/\text{sec}$ 。

B、螺旋板血管。

由下线圈状细动脉发出的细动脉,在螺旋板中从蜗轴向外走,形成丛,变为细静脉,回到耳蜗轴。

1) 螺旋血管 (Spiral vessel)。

在隧道下方、基板上,普通有一根螺旋走行的血管,细动脉和细静脉交替地与螺旋血管形成T形吻合,所以可以看作是血管丛的融合,从一个细动脉到1个细静脉称谓1个分节,因而血流向顶周及向基底周交替地流动。

2) 鼓室唇螺旋血管 (Vessel of the tympanic lip),存在于螺旋板的鼓室唇的下方。

以上两者有时合称为边缘血管 (marginal vessels),与柯替氏器的营养有关。

3) 螺旋板缘血管 (Vessel of the limbus),

恰在骨螺旋板缘处,血管较多,其机能尚待研究。

临床上解释感音性聋高频易下降之理由有三:

1) 基底周司高频而其螺旋血管的分节长,最长者可达3.4mm,顶周及中周最长者只1mm,故易发生营养障碍。1mm的循环障碍可引起100个内毛细胞及340个外毛细胞的变性。

2) 基底周的鼓室唇血管与螺旋血管的距离比其他周要远,如螺旋血管发生血流停止时鼓室唇螺旋血管难以代偿。

3) 螺旋血管外侧再没有血管,但也有时与螺旋韧带吻合,这种吻合多发生于顶

周。

另外解释感音性聋 4000Hz 常下降之理由也有人归因于前庭耳蜗动脉与耳蜗固有动脉之吻合, 认为吻合处血流不充分。

螺旋韧带上 4 个毛细血管网都没有神经纤维, 只有耳蜗轴的血管包括线圈状细动脉壁有肾上腺能神经纤维, 据说边缘血管也有神经纤维, 故注射肾上腺素或作颈上神经节切断, 只能作用到这些血管。

二、耳蜗的神经

在 Lorente de No, 1937年, Rasmussen, 1940年等人用光学显微镜的研究的基础上, 加上近30年来的 Spoendlin 1956年, Engström 1958年的电子显微镜研究, 以及 1959年 Schuknecht 用胆硷脂酶 (Cholin esterase) 的组织化学方法, 能看到远心性神经纤维之后, 现在已将柯替氏器的神经供给相当精确地阐明了。

柯替氏器由双极神经细胞的树突 (dendrites) 支配, 细胞体在螺旋神经节中。而螺旋神经节居于 Rosenthal 氏管中。Rosenthal 氏管乃蜗轴四周一螺旋形骨管。轴索 (axon) 是耳蜗神经, 一直走到耳蜗核。

Rasmussen (1940) 查人的耳蜗神经有髓神经纤维为 22,800~40,000, 平均为 31,400根。

A、求心性神经 (afferent auditory pathways)。

求心性神经纤维从螺旋神经节出来, 在骨螺旋板中手掌状走向骨螺旋板边缘的神衄孔 (foramina nervosa 或 habenula perforate)。(与此相对照的是远心性神经纤维, 它呈螺旋状走行, 后述)。

Spoendlin (1971) 记述了两型耳蜗求心性神经元。

I 型……占总数95%, 细胞体大, 有髓鞘, 只与内毛细胞结合。

II 型……占总数5%, 细胞体小, 无

髓鞘, 大部分与外毛细胞结合, 只 0.5%终止于内毛细胞。

每个内毛细胞约由20个 I 型神经元支配, 每个 II 型神经元可与10个外毛细胞结合。

从以上神经分布来看, 内毛细胞适于音频的分析, 外毛细胞适于低强度音的感受。也有人以此解释重振现象, 内毛细胞接受较高强度的音刺激, 一旦兴奋之后, 因为内毛细胞的神经纤维多, 就比外毛细胞觉得响即响度 (loudness) 大。

从神经孔到柯替氏器的神经走行比较复杂, 因此分为放射束, 螺旋束以及中间束, 基底束。这些只是以神经走行的分类, 不拘于是求心性或远心性神经纤维, 只要它呈放射状走行即谓放射束, 也可能一根纤维呈放射状走行之后又采取螺旋状走行。

1) 内放射束 (internal radial bundle) ……呈放射状走行, 到达内毛细胞的神经纤维, 可为求心性 & 远心性神经纤维。

外放射束 (external radial bundle) ……呈放射状走行到达外毛细胞的神经纤维, 可为求心性 & 远心性神经纤维。

中间束 (medial fascicles) 及基底束 (basilar fascicles)。

……到外毛细胞去的神经纤维, 在通过隧道时都呈放射状, 走上方者谓中间束, 多为远心性神经纤维, 通过基底膜者谓基底束, 为求心性神经纤维。

在人类中间束略偏斜向顶侧 (apex), 基底束略偏斜向基底侧 (basal)。

2) 螺旋神经束

i) 内螺旋束 (internal spiral bundle)。

在内毛细胞下走, 终止于内毛细胞, 顶周及基底周的神经纤维密度无大差异, 为远心性神经纤维。

ii) 隧道螺旋神经束 (tunnel spiral

bundle)。

紧贴内柱细胞走,终止尚不清楚,顶周密度比基底周小,基底周可达200根,与内螺旋束联系多,为远心性神经纤维。

iii) 外螺旋神经束 (external spiral bundle)。

分三排,在三排的外毛细胞下走,可从这一排移到另一排,由求心性和远心性神经纤维构成。

B、远心性神经 (efferent auditory pathways)。

最近由 Rasmussen 氏的研究揭示,有相当数量的远心性神经元与求心性神经纤维并行,其听皮层以及下位听觉核与求心性神经是一致的而有一个系统终止于耳蜗腹侧核,另一个系统作为橄榄—耳蜗束 (Olivocochlear bundle),终止于柯替氏器。

橄榄耳蜗束是从上橄榄核起始与前庭神经一起,离开脑干,在内耳道内与耳蜗神经吻合,也叫作 Oort's vestibulo—cochlear anastomosis 或 Rasmussen's bundle。

一侧耳的远心性神经纤维,其 $\frac{3}{4}$ (80%) 来自对侧橄榄核,其 $\frac{1}{4}$ 来自同侧橄榄核。从进化史方面看,自鸟类、爬虫类直到猴、人类都有橄榄—耳蜗束。

这个神经束进入耳蜗轴,穿过 Rosen—thal 氏管中的螺旋神经节,成为神经节内螺旋神经束 (intraganglionic spiral bundles), 但与螺旋神经节并无联系。

进入骨性螺旋板之后,它的走行有以下三个特征:

- i) 向顶侧呈螺旋状走行。
- ii) 各螺旋神经束之间有联系。
- iii) 分枝很多,猫的远心性神经在内耳道为500根,到神经孔为3,000根,增加5倍。

由以上情况可以看出一根远心性神经纤维,不只作用于一个毛细胞或与一根求心性

神经结合,而是作用于广泛的毛细胞,并对听觉起一定抑制作用。有人用有害音强噪声,间歇地暴露给豚鼠,使其毛细胞发生损害。但有一组,在每给噪声之前给光,当动物造成条件反射后,开始实验,结果这一组毛细胞损伤不如不给光者重,证明远心性神经纤维起了抑制作用,为了消除镫骨肌收缩的保获作用,将动物在实验前予以切断。

远心性神经纤维到外毛细胞去的密度1排>2排>3排,基底周密度>顶周之密度。

基底周外毛细胞底部的远心性求心性神经终末的电子显微镜所见:

远心性神经终末常在毛细胞底部的外侧,形状较大,含有许多小胞,有突触下池 (Subsynaptic cisterna)。

求心性神经终末,常在毛细胞底部的内侧,形状较小,几乎不含小胞,有突触小棒 (Synaptic bar)。

C、从耳蜗神经到听中枢

在耳蜗中基底周司高频,顶周司低频而在耳蜗神经 (听神经) 干中也有类似的规则的排列 (Orderly spatial arrangement)。

底周的神经纤维在神经干的周边部及下部。顶周的神经纤维在神经干的中央部。进入脑干后分为前后两枝:前枝短,分布于耳蜗腹侧核的前部;后枝长,再分为两两枝,1枝分布于耳蜗腹侧核的后部,1枝分于耳蜗背侧核。

耳蜗腹侧核上部分布来自顶周之纤维,耳蜗腹侧核的中下部分布来自中周及基底周的纤维。

以后进入斜方体,进入对侧或同侧橄榄核及外侧丘系、下丘,到内侧膝状体,最后到达原始听觉中枢 (Primary auditory center), 这些神经核都有同样如耳蜗核的规则排列,如:

内侧膝状体的下叶前部发出的神经纤维到听皮层的尾部,司高频。