

内 部
7 8 0 0 7

电子技术会议录

——数字通信终端技术专辑

第四机械工业部第一研究所

一九七八年十一月

数字通信终端技术专辑

(内 部)

一九七八年十一月出版

编辑者：四机部无线通信专业科技情报网

出版者：第四机械工业部第一研究所

发行者：北 750 信箱 21 分箱

前 言

数字通信是我国通信事业中正在蓬勃发展的一种重要通信手段。十几年来，很多单位对数字通信做了大量研制工作，积累了许多经验。目前，数字通信技术的研究和应用范围越来越广泛，在我国通信事业中的重要地位日益显著。为了互通情报、交流经验，四机部无线通信专业科技情报网数字终端专业组于一九七七年一月在武汉召开了“数字通信终端技术交流会”，63个单位参加了会议，共收到技术交流资料92篇，鉴于其中许多资料原单位曾有印刷出版，故仅从所收资料中汇集整理22篇出版一册，望读者对此谅解。

由于我们的水平有限，本会议录中难免出现不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

——编者——

一九七七年十一月二十日

目 录

声带振动分析.....	(1)
汉语普通话辅音声学特性的初步分析.....	(10)
自动识别语音.....	(22)
用对数例频谱 (Cepstrum) 提取汉语的 音 调	(38)
介绍一种信道声码器.....	(50)
9.6千比特半声 码 器.....	(55)
予测编码.....	(59)
脉冲编码调制基群终端机混合式编码器.....	(67)
PCM信道上数据传输的一种编码方法—时标法.....	(78)
多路高速双极性模数转换器.....	(85)
一种 ΔM /PCM码型 转 换 方法.....	(97)
连续语图仪.....	(104)
误码率测量方法.....	(111)
递归式最平幅度特性带通数字滤波器的设计.....	(123)
数字式动态滤波器.....	(142)
动态滤波器原理及其设计考虑.....	(159)
关于几种纠错设备在有线载波信道上的性能比较.....	(176)
四时四频编码分集技术.....	(188)
用自举电沅节省环流放大器的耗散功率.....	(203)
沃尔什函数及其在数字通信中的应用.....	(222)
一种适合通讯工程中使用的快速付利叶变换硬件.....	(246)

声带振动分析

1028 研究所

摘 要

本文基于声带的生理特征,从物理上分析了声带的振动规律。认为声带的振动,主要是游离缘在气流作用下的非线性自动振动。

由理论分析得到声带振动和声门面积变化的解析函数。为了验证理论,作了一个人工喉模型,并作了模拟实验。

文中,对理论分析结果,模拟实验结果和正常人喉的测量结果,三者作了比较,得到了较好的近似性。

一、引 言

在对语言信息处理和语言识别等研究工作中,往往应用到声带音沉的激励函数。另外,在医学和生理学的领域里,也要搞清楚声带的运动规律。因此,很早就有人对声带的运动规律进行了观测^[2, 3, 7]。并提出了各种模型及其相应的理论^[6, 5, 9]。

在实践中,我们发现,以往的一些模型和理论,不论是从生理学上,还是从物理学上,与声带的实际振动规律比较,都还存在一些不能解释的矛盾。本文,是我们对这一课题的初步研究结果。由于我们在生理学和物理学方面的知识都非常浅薄,文中会有缺点和错误,希望读者提出批评指正。

二、声 带

声带起于甲状软骨交角的内侧,止于构状软骨(披裂软骨)声带突^[1]。其剖如图1和图2所示。

声带是由粘膜,声韧带和声带肌等组成^[3]。其横切面呈三角形,上部扁平,游离缘薄而锐。游离缘的组成主要是粘膜。粘膜又可分成上皮和固有层。而固有层又可细分成浅层,中间层和深层,如图3所示。粘膜全体厚度约为1.1mm。

发声时,构肌收缩,两叶声带并拢,其缝隙小于1mm。如图4A所示。

发声时,肺收缩,呼出气流经气管至声门,激励两叶声带,使其振动。其振动部分,主要是向内上方突出的游离缘^[3]。当呼吸,发声及其振动时,游离缘的垂直剖面如图5所示。

音调变化,是由声带振动频率决定的。而声带振动频率,又由声带的长短,厚薄和张力大小所决定。声带短、薄、张力大时,则振动频率高;反之,则振动频率低。声带的长度,

一般是，儿童6~8mm，成年女子15~20mm，男子20~25mm。

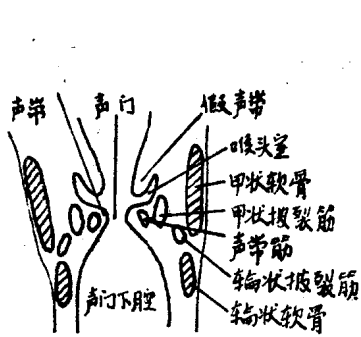


图 1 喉的垂直剖面图

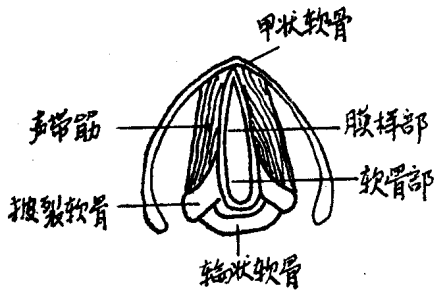


图 2 喉的水平剖面图

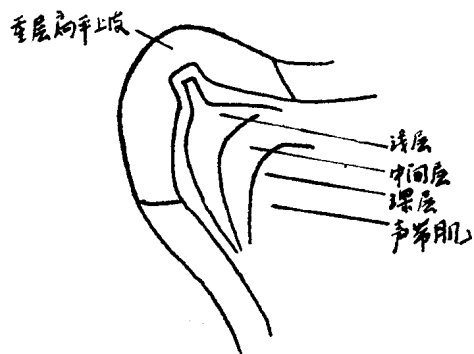


图 3 声带的层构造模型图

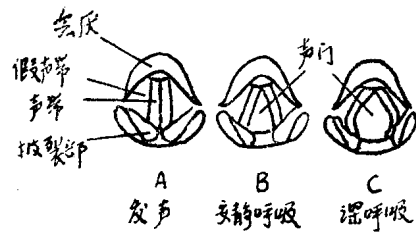


图 4 喉头镜像

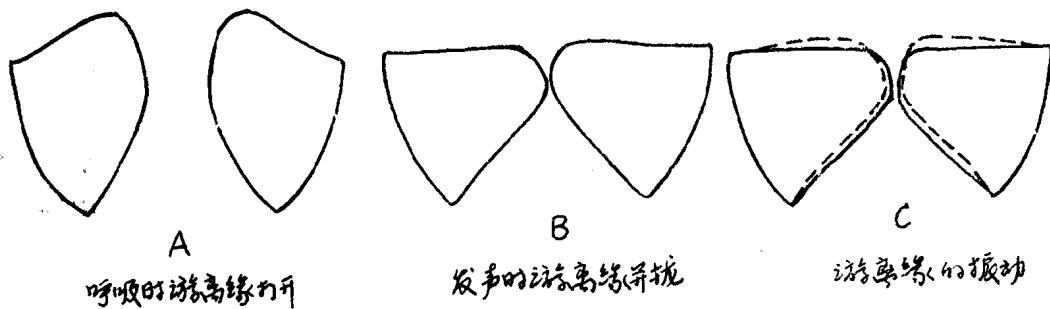


图 5 游离缘的各种状态(垂直剖面图)

三、声带振动模型

由于,即使正常人发声时,声带运动也相当复杂。因此,本文在描述声带运动规律时,注意抓住主要矛盾,观察主流和分析共性。而略去对发声而言的次要运动,以及那些因人而异的个性。

生理观测表明,声带的振动部分,主要是游离缘。而游离缘的振动又属于多自由度的非线性振动系统。

下面,分析游离缘上一点A的运动轨迹。设在A点附近,切取一小段游离缘,宽度为 ds ,如图6左所示。断面 $a b c d$ 是游离缘向声带肌过渡,由振动部分过渡到不动部分的交界面。这时,我们把 ds 两侧组织对 ds 的作用力,化到 ds 的弹性力中。由于,只研究A点的运动轨迹,还可以将不规则形状 ds 小段,模型化为一端固定的簧片。同样,将 ds 所具有的弹性力,化到簧片的弹性力中,如图6右所示。

后面将看到,A点运动规律和整个声带的运动规律是相似的。因此,声带的振动规律,可以通过对簧片端点在气流作用下,所发生的振动规律来描述。

但是,应当指出,将游离缘上一点A模型化为一个簧片,这只是作为一种分析方法。事实上,由于声带具有自己特有的生理和物理条件,使其振动方式与簧片的自由振动并不相同。



图 6 一小段游离缘 ds 及其模型

四、声带振动分析

下面对声带振动,作近似地分析。

声带受力如下:

(1) 作用在游离缘上的气流阻力,也叫做动压力。根据流体力学理论^[4],动压力可以写为下式:

$$F_1 = \frac{f a \rho}{2} u^2$$

其中, $u = v \pm \Delta v$,为游离缘相对气流的速度。“+”号表示游离缘运动与气流方向相反;

“-”号表示游离缘运动与气流方向相同。 v 为气管里的气流流速。 $\Delta v = \frac{dx}{dt}$ 为游离缘运动

速度。 f 为阻力系数。 a 为游离缘的有效面积。 ρ 为气流密度。

图7为当 $\frac{f a \rho}{2} = 1$ 时,动压力 F 随速度 U 变化的曲线。

) 2) 介质阻力 F_2 , 方向与游离缘的速度方向相反, 大小与速度的一次方成正比, 设比例系数为 μ ,

$$F_2 = -\mu \frac{dx}{dt}$$

(3) 游离缘的恢复力 F_3 , 方向与游离缘的位移相反, 大小与游离缘的位移成正比,

$$F_3 = -CX.$$

其中, C 为恢复系数。

设游离缘模型化后质量为 m 。根据牛顿第二定律, 游离缘上A点的运动方程为:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \mu \frac{dx}{dt} + Cx = F(u). \quad (1)$$

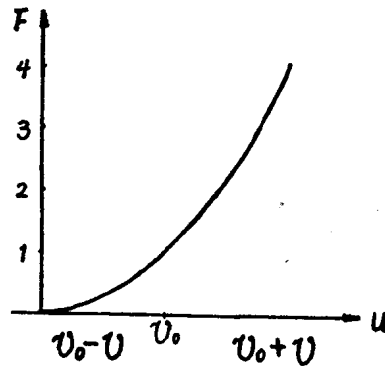


图7 当 $\frac{fap}{2} = 1$ 时动压力曲线

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \mu \frac{dx}{dt} + cx = F(v_0 \pm \Delta V) \quad (2)$$

将动压力 $F(u)$ 在 V_0 处展成台劳级数,

$$F(u) = F(v_0 \pm \Delta V) = F(v_0) \pm R \Delta V. \quad (3)$$

其中系数

$$R = \left(\frac{\partial F}{\partial U} \right)_{v_0}. \quad (4)$$

表示动压力在 V_0 处的斜率。

引进新坐标系,

$$Z = x - \frac{F(v_0)}{C}. \quad (5)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dx}{dt} = \Delta V \quad (6)$$

将(3), (4), (5), (6)代入(2), 则运动方程变为,

$$m \frac{d^2z}{dt^2} + (\mu \pm R) \frac{dz}{dt} + cz = 0 \quad (7)$$

微分方程的解为,

$$Z = Ae^{-Ht} \sin(wt + \varphi), \quad (8)$$

$$H = \mu \pm R, \quad (9)$$

$$W_1 = \left[\left(\frac{c}{m} \right)^2 - \left(\frac{\mu + R}{m} \right)^2 \right]^{1/2}, \text{ 当 } \Delta V \text{ 与 } v_0 \text{ 同向} \quad (10)$$

$$W_2 = \left[\left(\frac{c}{m} \right)^2 - \left(\frac{\mu - R}{m} \right)^2 \right]^{1/2}. \text{ 当 } \Delta V \text{ 与 } v_0 \text{ 反向} \quad (11)$$

现在, 分析游离缘上, 受到气流动压力所作的功。当游离缘向上运动时, 游离缘对气流相对速度 u 向下, 故游离缘所受的动压力向上, 即与运动方向相同。此时动压力作正功。

当游离缘向下运动时, 动压力与游离缘的运动方向相反, 此时动压力作负功。

可见, 声带往返振动过程中, 阻尼是改变的, 即阻尼是非线性的。所以, 本文称声带振动是非线性自动振动系统^[8]。

由(5)式, 游离缘运动轨迹 X 对 Z 坐标系而言, 仅差一常数。所以, 下面分析声门面积变化时, 变量 Z 与 X 是等同的。

五、声门闭锁期

在二中讲过, 发声时两叶声带并拢或者有小于1mm的缝隙。这时, 声门间隙最小。由于, 从肺呼出的气流通过这个间隙, 当两叶声带由上侧向平衡位置运动时, 缝隙越来越小。根据Bernoulli定理, 缝隙气流流速升高, 其间隙的压力下降, 具有使两侧游离缘闭合, 从而使游离缘停止振动的倾向。此后, 声门下压上升, 达一定数值后, 又使两叶声带向上侧运动。因此, 两叶声带, 只是在平衡位置和向上侧的空间里往复振动。在达到平衡位置时, 间隙最小, 甚至完全闭合。所以, 游离缘在水平方向上, 也有一些微小的往复振动。但是, 一般声带并不存在由平衡位置到向下空间的振动。

应当指出, 即使在正常发声情况下, 声门也并不一定闭锁。当发高音时, 声门也可以不闭锁^[7]。声门闭锁期, 发生在平衡位置, 此时

$$X=0 \quad (14)$$

$$Z = -\frac{F(v_0)}{C} = Z_0 \quad (15)$$

声带虽然属于多自由度的振动系统, 但对游离缘上其它点进行分析, 也将得到如上所述的相似结果。只是游离缘上各点几何位置不同, 所以, 各点的振动幅度也不一样。膜样部中央振幅最大, 向两端逐渐减少。但是, 理想的游离缘, 其上各点的振动频率和相位变化是一样的。所以, 各点合成后的激励空气波的音源波形, 在形式上, 与单个点的振动规律相似。

六、声带振动描述

在四中, 我们已经得到声带位移函数为,

$$Z = Ae^{-Ht} \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

其中 e^{-Ht} 为指数衰减因子。在一个周期内, t 值很小。例如, 当基音为100赫时, 对应 $t=0.01$ 秒。所以可以近似认为 $e^{-Ht} \approx 1$ 。这样, 声带位移函数近似为,

$$Z = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (16)$$

由于, 游离缘振动的非线性特点, 据(10), (11), (15)式, 在一个周期内, 声带位移函数, 应当分为三段来描述:

$$Z = \begin{cases} A \sin(\omega_1 t + \varphi_1), & (T_1, \text{声门向着打开}) \\ A \cos(\omega_2 t + \varphi_2), & (T_2, \text{声门向着关闭}) \\ Z_0, & (T_3, \text{声门闭锁}) \end{cases} \quad (17)$$

其中前两部分, 描述声门开放期的运动规律。 T_1 为向着打开。 T_2 为向着关闭。 $Z=Z_0$, 即 T_3

为声门闭锁期。

综上所述，我们可以描绘声带位移函数的波形图。其示意图如图8所示。它与小野利用数字滤波器方法，对人进行实际测试得到的声带波形非常相似^[7]。

现在，可以对声带振动的一个周期作如下描述了：发声时，游离缘并拢，在气流作用下，声门向着打开运动。此时气流产生的动压力对游离缘作正功。从而使游离缘具有弹性位能。声门这一向着打开的运动期间记为 T_1 。当游离缘的弹性位能增长到一定数值，使游离缘改变运动方向，转而克服动压力，向着平衡位置运动。此时动压力对游离缘作负功。游离缘的弹性位能逐渐减小。此处与常见的簧片自由振动不一样，即弹性位能并不转化为动能。声门这一向着关闭的运动期间记为 T_2 。当游离缘回到平衡位置时，位能和动能都为零。有时，游离缘还出现闭锁，这一期间记为 T_3 ，当游离缘回到平衡位置时，其动能和位能都为零，就这点看，游离缘似乎无法再振动下去了。然而，只要有气流呼出，游离缘在气流作用下，将继续重复如上所述的运动过程。

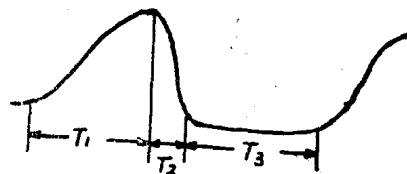


图8 声带位移函数示意图

七、声门面积变化

当游离缘振动时，声门间隙也在作周期性变化。如图9所示，声门间隙为，

$$r = 2l(1 - \cos \omega t) \quad (18)$$

声门面积为，

$$Q = 2lL(1 - \cos \omega t) \quad (19)$$

其中， L 为游离缘长度。声门面积变化为，

$$\frac{dQ}{dt} = 2lL\omega \sin \omega t \quad (20)$$

同样，由于游离缘振动的非线性特点，上式应当分为三段来描述：

$$\frac{dQ}{dt} = \begin{cases} 2lL\omega_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) & (T_1, \text{声门向着打开}) \\ 2lL\omega_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) & (T_2, \text{声门向着关闭}) \\ 0 & (T_3, \text{声门闭锁}) \end{cases} \quad (21)$$

(21)式，与泽岛用光电方法^[2]，实际测量得到的声门面积变化波形非常相似。图10是泽岛测到的声门面积波形。

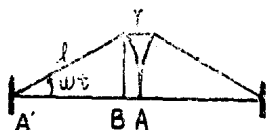
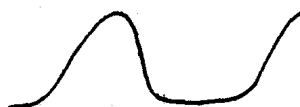


图9 声门间隙示意图



八、模拟实验

根据喉发声的生理特征和物理分析，我们作了一个人工喉模型。制作方法如图11所示。

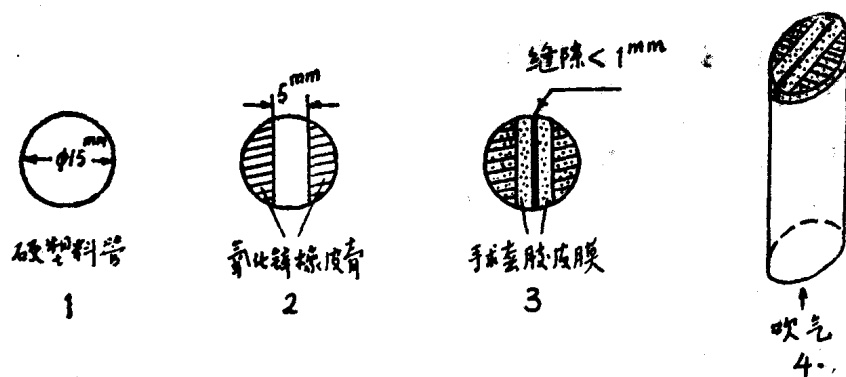


图 11 按模型原理编制的人工喉

不难看出，硬塑料管相当于气管。橡皮膏相当于声带肌（不振动部分）。手术套胶皮膜相当于游离缘。

由于条件限制，我们没有对人工喉的“声带”振动作直接测量。而是间接地测量了由它激励而产生的空气波。



图 12 人工喉激励的空气波形

图12是人工喉激励的空气波波形之一。实验中，用一个硬纸筒模拟声道。发现，当模拟声道的形状改变时，空气波波形也随着变化。但是，尽管气波波形变化多端，然而，总可以观察到，其波形在一个基音周期内，具有衰减特征和对零轴不对称特征。还可以粗略看到“声门”打开和关闭的时刻。上述特征，恰是正常人喉所具有的特征。

为了比较，图13画出一例男声 | a | 的部分是空气波波形。

此外，用人耳鉴听人工喉的音质，也象是人的声音。当人工喉发音时，目视人工喉的“声带”，也是在平衡位置及其向外的空间范围内振动。

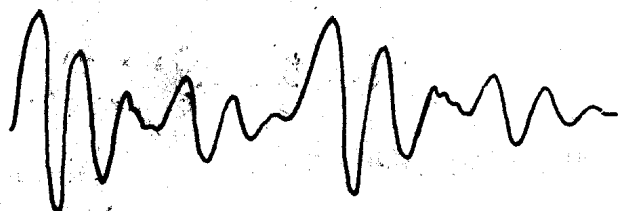


图 13 正常人喉激励的空气波形 (男: /a/)

九、結 語

本文从声带的生理特征出发, 特别对游离缘的运动规律, 从物理学角度, 作了理论分析。得到了声带振动和声门面积变化的解析函数。这一理论结果与正常人喉的实际测量结果相当近似。

又从声带的生理特征出发, 参考理论分析结果, 制作了一个喉的模型。并作了模拟实验。实验结果表明, 模型喉的性能与正常人喉的性能也相当近似。

我们认为: 声带的振动, 主要是游离缘在气流作用下而产生的非线性自动振动。因此, 将声带振动, 仅仅归结为水平方向一开一闭的振动是不全面的。这种观点与声带的实际运动情况也不完全符合。

本文所描述的声带振动, 同时包含有水平和垂直两个方向的振动。因此, 除了声门开闭刻, 气流压力变化激励口腔空气外, 游离缘垂直方向的振动, 也是激励口腔空气的因素之一。还认为游离缘的直接激励和声门开闭的压缩气流激励, 二者对口腔空气的激励作用是一致的。

我们认为: 喉的发声机理, 同时与生理和物理两种因素有关。只讲其中一种因素, 而排斥另一因素的观点, 都是片面的。

本文分析声带振动, 借助于数学以近似的表现物理现象为目的, 又为该问题不过于复杂化, 所以宁可避免并不十分必要的精确表示。因此, 其理论分析结果, 只能看作是声带振动的一般的和近似的描述。文中的模拟实验, 也显得简单和粗糙。总之, 我们认为关于声带振动这一课题, 无论是理论上, 还是实验上, 都还存在许多问题, 需要进一步地探索。

謝 辞

为了学习喉的生理知识, 唐山煤矿医学院, 北京耳鼻喉研究所, 山东医学院中国人工喉科学实验小组曾给予热情帮助。西北电讯工程学院施仁杰老师和屈家淦老师, 曾来函进行有益的讨论。语言所吴宗济先生和周殿福先生, 非常及时地审查了修改稿, 并提出了宝贵的修改意见。在此, 一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1) 肖轼之：“耳鼻咽喉科学”，人民卫生出版社，1965年，北京。
- 2) 泽岛政行：“音声生成の过程”，电子通信学会杂，11/68。
- 3) 平野实：“音声外科の形态学的基础”，日本音响学会志，31卷11号，1975年11月。
- 4) L. Prandtl：“流体力学概论”，郭永怀等译，科学出版社，1966，P.188。
- 5) J. Flanagan, et al: “Self-oscillating source for vocal-tract Synthesizers”，IEEE Trans, Au-16, 1, P.57, 1968年。
- 6) 石坂谦三松平正寿：“Analysis of the Vibration of the Vocal Cords”，日本音响学会志，24卷5号，1968年。
- 7) 小野博 齐藤成司：“オンライン処理による声帯音波形の抽出とその臨床的应用”，日本音响学会志，31卷3号，1975年3月。
- 8) 哈尔滨工业大学：“理论力学讲义”，下册，P.219，1960年。
- 9) 藤崎博也：“第8回国际音声科学会议”，日本音响学会志，32卷1号，1976年1月。

汉语普通话辅音声学特性的初步分析

哲学社会科学部语言研究所 吴宗济

内 容 提 要

本文对辅音中的纯辅音段和过渡音段声学特性及其分析方法，作了简明的叙述；列出汉语普通话辅音在不同元音环境中的声学特性数据表，分别加以说明。最后，并对近来各有关方面在语音处理工作中，所关心到的有关辅音处理的一些问题，提出看法，以供讨论。

一、引 言

在语音分析中，辅音分析常被认为比元音分析复杂些。辅音与元音的区别在于，元音是声带声沉通过声腔共鸣作用而成的，具有准周期性频率的音。辅音分清、浊两类，清辅音是自声门发出的噪声沉通过声腔内某些阻碍而成的擦音或破裂音。浊辅音是类似元音性质的声带音。

传统语音学对辅音的分类以发音部位为主，这样便于生理分析和模仿。声学分析则主要是观察发音的流程，并转换为电能来记录和分析，这样就按发音方法来分类比较方便。一切辅音的发音过程都可按其发音长短来归为暂音和久音两大类。一切塞音属于暂音，其余的都属于久音。

传统语音学把辅音的发音过程分为成阻—持阻—除阻三个阶段，持阻和除阻是辅音的发声阶段。近代实验语音学已证明，一个助音的被听辨，不但这三段过程起作用，事实上，还有除阻后接上元音的一段过程（称为过渡音）对听辨也起着重要作用。现在我们把前者称为“纯辅音段”，把后者称为“过渡音段”。

纯辅音段按其声沉的不同分为清浊两类（即声带不颤动音和带颤动的音，亦即语言处理中所谓的噪音和蜂音）。在频谱上，这两类音有显著区别，清辅音是噪音性质，因其腔中阻碍部位不同，共鸣作用不同，而在频率轴上显出不同的强频集中区的谱型。浊辅音是乐音性质，具有同元音相似的振峰谱型。有些浊辅音是浊音与清音结合的，如浊塞、浊擦等，这样就先后或同时具有两种谱型^[1]。（图1）

过渡音段具有和元音相似的谱型，事实上，在一个辅元结合的音节中，它是主要的元音的前奏。由于开始时能量较弱，它有时还和纯辅音段的尾部重叠出现，故其共振峰的结构是先简单而后渐趋完备的。过渡音段反映了发音器官（主要是舌部）从辅音部位转移到元音部位的运动过程，这是规律可寻的。这一段的变化揭示了辅音的特征，称为“音征”（cue），音征一般以同元音的 F_2 和 F_3 相接的两个共振峰的延伸为主要信息，称为 T_2 、 T_3 （尤以 T_2 为重要）。辅音自除阻时到过渡音前沿常常不是紧接的，而有一小时段距离，在塞音中，当破裂后、过渡音前有一段无声段，称为“间隙”（gap）。在擦音中，这一段就为噪音谱型所填充了。因此

过渡音并不总是紧接着纯辅音破裂段的。不同元音的 F_2 有其特定频率，而辅音又有其特定的发音部位（在谱上显示出一个或一个以上的强频集中区），因此一段过渡音征的频率，前后并不总是平稳的。从过渡音征走向纯辅音段的频率变动趋势，频率逐渐升高的称为升渡

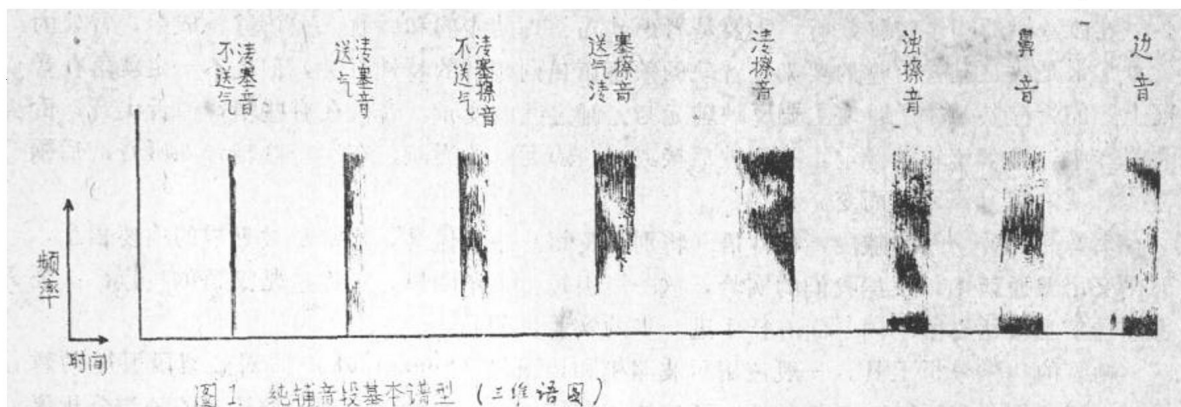


图1. 纯辅音段基本谱型（三维谱图）

或正渡（+），逐渐降低的称为降渡或负渡（-），频率稳定的称为平渡或零渡（0）。同一个辅音，由于所接元音不同而使过渡音征的正负不同，但其从元音到辅音的音征走向如在语图上加以延长，它总是循着一定的轨迹而会合到一个虚点上的。这个虚会合点落在辅音的破裂段或摩擦段的某个频率位置，代表了该辅音受环境影响的特性。此点称为“音轨”（locus）。〔2〕（图2）

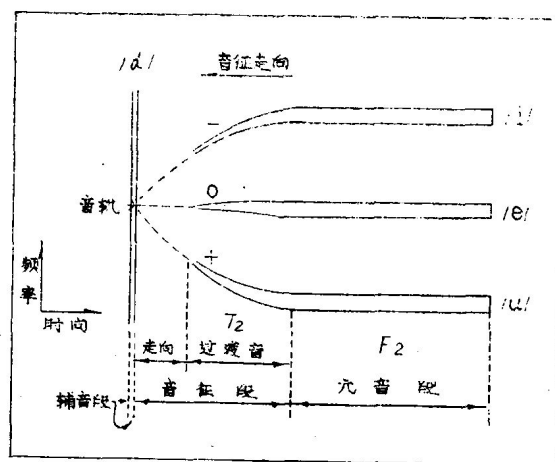


图2. 普通话“低”、“德”、“都”的过渡音示意图

一个辅音的听辨，在久音中，因时间较长，含有足够的信息量，清晰度较高。在暂音中，因纯辅音破裂段很短（一般不超过10毫秒），不容易听清楚，就有赖于其所接的过渡音征来提供信息。因此，过渡音征的作用在暂音中比在久音中更为重要，过去对这方面的研究成果也比较多些。

分析辅音的声学特征，对纯辅音段也不外乎分析的要素：音长、音强、音色、音高。音长的作用在辅音中比在元音中重要，纯辅音段的长度计算根据，在清辅音是从破裂或摩擦音的开始到过渡音前沿的一段，在浊辅音是从声带音的开始到过渡音前沿的一段。音强的分析，对清辅音是观测其强频集中区的幅值，对浊辅音是观测其共振峰幅值（有时也有必要计算两者的功率值）。音色的观测，在清辅音中是根据其噪音频谱，主要分析其强频集中区（或

强频峰)的频率和幅值。有人称此值为“音枢”(hab)。在浊辅音中分析共振峰频率值(有时也分析共幅值和带宽)。音高数据在辅音中不占重要地位,在清辅音固然没有基频可测量,即使在浊辅音中,虽具有基频,也常常不予考虑。

过渡音段的声学特征分析,主要是考虑其 T_1 、 T_2 的走向和音轨。在语言合成中,音轨的数据常常是决定辅音听辨的要素。音轨的频率值虽同辅音的特性有关,但也不一定就落在音枢上,而自存其规律。音轨主要反映辅元与元辅之间的变量。音轨在有些辅音如舌尖音、舌面前音中,频率值较为稳定,不易被后接或(前接)元音所影响;在另一些辅音如唇音、后腭音中,就常随元音环境而变。〔3〕

塞音和元音之间的隙段,在外语(特别是英语)中很显著,常常是被听辨的主要信息,但在汉语普通话中,根据我们的实验,这一段很短、或不明显,也许这是汉语的特点。(是否塞音信息被比有所不同,尚有待于进一步的实验证明)。

辅音的声学分析工具,一般该用示波照相和语图仪(Sonagraph)。对破裂段很短的暂音,上述仪器难以反映出详细特性,还应该用能快速作出二维断面谱的较精密的频谱分析仪来分析〔4〕。我们用经过切音的辅音元通过固定滤波频谱仪来作扫描分析,也可得到满意结果。〔5〕〔6〕(图3)从示波照相的波形来研究辅音,对于清辅音噪音段的长度,以及浊辅音的周期波型与元音波型的差异,都显示得比较清楚,可以和语图仪的结果比较参证,有它一定的用途。

语图的纯辅音段谱型较短,特别是在不送气塞音中,显示的信息量较少。补救办法,可以改用转鼓直径较大的语图仪,或把磁带用快录慢放方法转入语图仪,都可以把语图展长而得到足够的信息量,便于观测。

二、普通话辅音的声学分析

本文所列普通话辅音声学分析数据,是根据两个发音人(A、B)的单字材料,而以另外几个发音人的材料作补充比较的。这些材料是从每个辅音配上几个不同舌位的元音构成的音节中测得的。元音的舌位一般都包括前、央、后三个位置,这样可以观察元音的舌位置变动对其所接辅音的影响。发音人A的辅音音长(包括纯辅音段和过渡音段)是从示波照相上量得的。强度是用声级记录仪测定的。浊辅音的共振峰频率值和清辅音的强频集中区,是分别用渐变滤波频谱仪和固定滤波频谱仪作出断面谱来量得的,其材料是经切音听选出的辅音最理想的一小段。发音人B的辅音音长和过渡音征等数据都是从语图上量得的。

现在把汉语普通话的声学分析数据分到五表如下:

表1

汉语普通话辅音声学数据表

发音方法	辅音	例字	纯辅音段			过渡音段			
			长度 (毫秒)		强度 (分贝)	强频区 (赫)	音征长度 (毫秒)		音征走向 B T ₂ T ₃
			A	B			A	B	
不送气清塞音	b	巴 ba	6	6	2	200—1600 △250	16	72	- -
		不 bu	10	5	7	150—3200	20	37	+ -
		通 bi	6	5	5	200—800, 1600—3000 △400, 2000	22	37	- -
	d	搭 da	5	5	2	300—6000	13	37	+ +
		都 du	6	5	10	100—500, 1000—5000 △1500	36	30	+ -
		低 di	14	8	5	1600—4000 △2000	22	21	- -
	g	沓 ga	12	15	20	250—6300	20	10	+ -
		姑 gu	22	23	7	160—1200, 3000—10000	20	30	+ -
		哥 ge	—	20	—	200—6300	—	50	+ -
送气清塞音	p	趴 pa	62	52	22	150—8000 △1250, 2500	16	22	- -
		铺 pu	64	65	2	800—6300 △1600	32	35	+ -
		批 pi	86	52	14	150—600, 1500—6000 △2500, 5000	18	23	- -
	t	他 ta	62	45	17	150—8000 △200	24	52	+ +
		秃 tu	44	45	11	150—10000 △160, 400, 4500	74	45	+ -
		梯 ti	50	45	8	200—11000 △2500, 5000	34	52	- -
	k	咖 ka	102	45	15	120—6000 △2000	22	60	+ -
		枯 ku	70	45	10	120—10000 △800	52	60	+ +
		科 ke	—	52	—	250—7000 △1600	—	75	+ -