

谈谈语言机器

张家骏 田时秀

(中国科学院物理研究所)

引言

什么是语言机器呢?语言机器是对语言信号加以分析、合成来达到一定的传递、控制和信息转换等要求的设备。比如,我们使用的电话通讯,总希望它又经济又可靠。这就要压缩语言信号所占用的频带,以便在一条线路上容纳更多的人同时通话。由于阶级斗争的需要,一些电话通讯要采取保密措施。为了满足这些语言传递上的要求,产生了一种语言机器——声码器。这就是把语言变成密码电报发射出去,在接收端把密码电报还原为语言。在我们日常工作和生活中,常常需要把书面材料变成可听的口语。比如,在校对稿件时,如果校对人员只看原稿,而边上有一架机器朗读清样,那将是十分方便的。在使用电子计算机进行工作时,更显得很需要这种输出方式。至于能由机器自动朗读书报,对盲人无疑是莫大的福音。现在还在发展一种把语言信号变成触觉、以帮助聋人听话的设备——触觉声码器。这些都属于信息转换。

在语言机器中,最宏伟的目标就是用语言指挥机器。人类的双手,是劳动的产物,也是劳动的器官。随着社会生产的发展,人们的双手也在更加广阔的领域里,从事愈来愈复杂的动作。人们在忙得不可开交,或者对有些事无能为力时,常说“恨不得能多生出两只手”或“如果会分身法就好了”。在宇宙飞行和高速飞行中,人的双手和双眼都已十分紧张;有些工作环境人是不能直接进入的(虽然有了机械手,但还是要人手操作)。人们即使不是在手忙脚乱时,也会感到动口比动手方便;比如打电话,如果拿起耳机就叫号码,将会比用手拨号方便得多。计算机的程序和数据如果通过口语来输入,计算机的使用就会非常方便和广泛。一个“机器人”如果不具有“听觉”,那将大为逊色。这些便是人类利用语言以达到指挥、控制机器的一些方面。

在久远的古代,人们就幻想着用口语来指挥机器,并把它当作权威的象征。随着生产和科学技术的发展,

特别是电子技术的发展,这种幻想正在逐步变为现实。正如恩格斯所说:“由于手、发音器官和脑髓不仅在每个人身上,而且在社会中共同作用,人才有能力进行愈来愈复杂的活动,提出和达到愈来愈高的目的。劳动本身一代一代地变得更加不同、更加完善和更加多方面。”¹⁾因而,语言机器的研究不但具有广阔的实用价值,而且具有重要的哲学意义。

语音产生的模型

为便于了解语言机器的工作原理,首先对语言信号的产生过程作一简要说明。

人在发音时,首先由肺部呼出空气(在某些非洲语言中有的音是由吸气产生的),经过声门进入声道,而后由嘴以声波的形式辐射出去。声门是由两片声带造成的缝状开口。当发浊音和元音时,声带振动,使气流受到周期性的调制。当发清音时声带不振动,气流在声道中不同部位受到阻塞或摩擦,而形成不同的清辅音。声道是一条由声门到唇部长约17厘米(男人)的管子,当软腭打开时,尚有一长约12厘米、容积约60立方厘米(男人)的鼻腔与之并联。在发音时,口腔的开合,舌位的前后、双唇的圆偏、鼻腔的并联以至肌肉的松紧,对由声门出来的气流加以调制成型。气流走出双唇,便产生了不同的语音,见图1。

从声学的观点看,语音的产生有三种方法。一种是由声带振动而形成的浊辅音和元音。声带长约18毫米,平均声门面积5平方毫米。由声带振动使气流产生准周期的声脉冲(近于三角波),如汉语中的韵母。另一种是擦音。它是由于声道在某些部位收紧,形成狭缝,强迫气流由狭缝快速流过,便在这里产生噪声激励声道,比如汉语中 f、s、h 诸声母便是这样产生的。再一种是塞音。它是由于声道在某些部位阻塞以后突然打开,气流突然冲出,产生一个极短的爆破,使声道受

1) 恩格斯,《自然辩证法》,人民出版社,(1971),156。

到激励。汉语中的 b、d、g 便是。其余的一些音就是这三种方法的搭配组合了。比如塞擦音 z、zh、j，是第二、第三种方法的组合。汉语发音有一个特别的方式，叫送气，如 p、t、k、c、ch、q，它们都是爆破以后气流有一段持续，只是持续时口腔的开度大小不同。因而，有的摩擦较强，有的摩擦较小，但其性质都属于噪声激励。

我们了解了语音产生的过程及其声学性质以后，便可以从通讯工程的观点，来考察如何利用语音特性，来进行工程技术的处理了。根据上述情况，我们看到，激励声道而产生的可听声的声源主要有两种：准周期的脉冲和噪声。这些声源的频谱很宽，有些个别情况甚至可超出 100—10000 赫的范围。可是，我们平常听到的语音，绝不是单纯的脉冲和噪声。其所以成为语音，乃是声道的丰富多采的变化对激励声源进行调制的结果。这种调制就是发音器官的运动所造成的。这

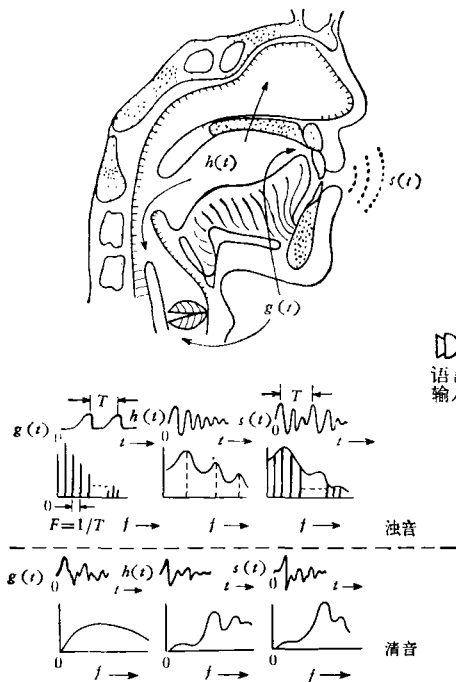


图1 语音产生的模型： $g(t)$ ——激励源； $h(t)$ ——调制过程； $s(t)$ ——声音辐射

种运动的速度不超过10赫。它是我们人耳直接听不到的。我们可以把语音的产生过程类比成音响电报。激励声源可以看成是声频的载波，而发音器官的调制则好像是手指按键发出的电码。真正传递信息的是电码，可是为了能听到又必须有载波。当然，作为语音的载波——激励声源，也不是完全不传递信息的。它还可以在语词的意义之外，附加上个人特征和情感色彩。汉语的声调就是声带基频的变化。

声码器——压缩频带和保密通讯的有力工具

根据上述认识，把语言信号当作一个载波调制过程，在三十年代末期，有人研制了一种将语言信号解体，把载波和调制波分别传送，以达到压缩通讯频带目的的装置。这种装置称为声码器。它的工作原理见图2。

语言信号输入以后，分作两路。上边一路是鉴别清音还是浊音。如果是浊音就测量出它的基频是多少。这样，这一路的主要作用就是得到语言信号中载波的特性。它在清音时不输出信号，浊音时给出基频的大小，送往接收端。下边一路是对语言信号进行频谱分析。为了便于分析，首先将语言信号中较弱的高频成分加以提升。以后送入一组带通滤波器（本例为10个）。滤波器带宽和中心频率的分布可有不同选择。实验表明，按等清晰度分配通过频带可得到最好的效果。本例是最早的声码器，为300赫等带宽，每个带通滤波器的输出，经过检波和一个25赫的低通滤波，得到

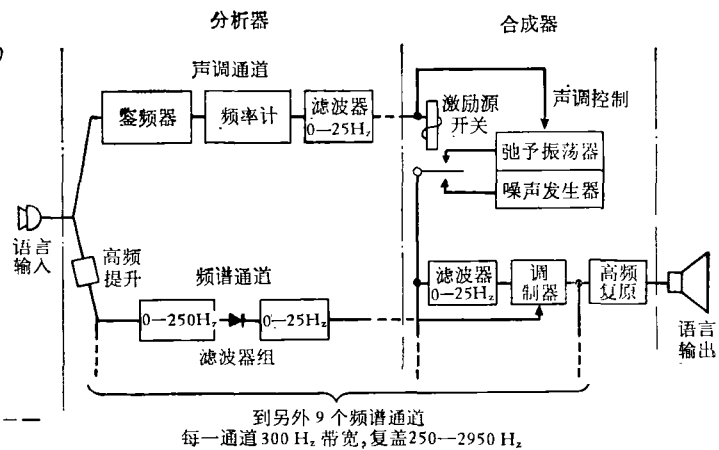


图2 声码器电路简图

在该通带内频谱包络的缓慢变化。这十个通带（近年来的声码器可有12—16个通带）总的输出，便代表了它所覆盖的频段（一般为300—3400赫）上频谱包络的变化。这一变化可以体现出声道的调制特性。将这一输出以编码的方式送到接收端。

在接收端，由上一路发来的信号控制一个开关。当清音时，没有信号，接通一个噪声发生器。当浊音时，有信号开关启动，接通一个弛豫振荡器（或一三角波发生器）。与此同时，根据测量得到的基频数值，调整振荡频率使其给出与基频相同的频率。这两种发生器作为接收端合成语言的激励源，送入与发送端相同的一组带通滤波器。滤波器输出接有调制器，使激励源的

频谱分量受发送端对应的通带送来的频谱包络信号所调制。所有通带相加以后,经过一个与发送端带通滤波器组前端所加的高频提升装置的作用相反的一个高频降低的装置,最后送入受话器,便得到了原来发送的语言信号的合成语言,这种合成语言完全可以听懂。现在,做得好的声码器,可以达到与打普通电话没什么差别的质量水平。

按照图2的办法做成的声码器,占用频带约300赫,比原来压缩了10倍。当前实际应用的声码器有2400比特/秒的,它比脉码调制(PCM)通信(50000比特/秒)压缩20多倍。由于准确地区分清浊音,并提取出浊音的基频,以及激励源的相位关系是比较复杂的,可是,这一部分对音质的影响又较大,所以,除了采用比较复杂的技术手段的方法外,有的将包含基频的低频段,直接送往接收端作为激励信号,这样降低了压缩比,但改善了音质,简化了设备,这种型式的装置称为半声码器。

对语言信号还可以采取其它的分析方法。总不外是,在频率维和时间维上,提取一些特征参量来传递,在接收端再去合成。诸如:相关声码器、图案声码器、线性预测声码器、共振峰声码器等多种。

由于声码器是将语言信号解体以后,以电码的形式传递一些特征参量,便于采取措施,达到保密通讯的目的。所以,在军用通讯和专用通讯上首先得到了应用。目前还没有普遍应用于民用通讯,可是,由于这种分析-合成传递语言信息方法所具有的优越性,已使它显示出了广阔的前途。比如,在潜水员通讯中,由于潜水员呼吸的是氢-氧混合气体,这种气体的声学特性与空气不同(主要是声的传播速度不同),因而说话就听不清楚(相当于声道尺寸改变了)。为解决这一问题,可以利用声码器方法,对潜水员说的话进行处理,使接收端合成正常的语言。再如,在合成语言时,输出的不是一个语言信号,而是几个振动信号。将这种振动送到聋人的手指,经过训练也可以理解。

语言自动识别——让机器听懂人的话

口语的机器识别,是仿生学的一个重要分支,也是近年来发展较迅速的学科之一。在国外,有的将语言识别和文字识别,图象识别、物体识别放在一起,看作是“图案信息处理系统”,并当成国家的大型科研项目之一。

长期以来,人们非常向往一种会听话的能帮人做事的机器,曾经流传着各种动人的神话。随着科学技术的发展,这种机器不仅成为必要,而且有实现的可能。语言打字机的实现,就可能将人手解放出来,通过大脑的思考,口语的表达,直接变成书写符号,这是

文化史上的重大改革。用语言控制机器,可以扩大自动控制的范围,不受固定位置的局限,且高于手(或脚)的运动速度。在通讯上,将语言变成符号(例如音素符号),对于汉语普通话来说可将语音信息从50000—100000比特/秒,压缩到5个比特/秒左右!此外,语言识别的成功,就可能进一步实现不同语言的自动翻译,加速信息的交流。

从本质上说,语言的机器识别,是在语言的分析基础上,包括语音物理特性,特别是发声机构的分析,和语言结构本身的分析。研究和模拟听觉的物理和生理过程,以及人脑对语言信息处理,加工的能力。

人们识别语音,不光是分析语音的物理特性,还要了解语言本身的结构。例如对于方言,它和普通话之间在语音上有很大的差别,人们所以听得懂,除开对该方言有一点点熟悉之外,在很多方面是了解谈话人所谈的内容,即语意。再如我们听一句话,往往听不完全,也能够正确理解,原因是我们已掌握一般说话的语法知识和听懂词的上下文之间的联系以及对语意的了解。

语言的机器识别,从五十年代初以来,已有大量的研究报导^[1]。在早期的工作中,比较典型的是德赖富斯(Dreyfus)的工作^[2]。1952年,戴维斯(Davis)等^[3]用共振峰转移的规律,做出了英语口语数字识别机,单呼(间歇时间要求大于100毫秒)识别率,对一个特定的人可达97—99%,换人时下降到50—60%。他的识别单元是整个词。以后又进行了一些改进,来适应不同的发音人,但是所能识别的单词不易增加,发音人又要练习一个相当的时间。这种装置如图3所示。

语言输入通过一组带通滤波器,进行频谱分析,将分析结果存入一由电位器组成的频谱图案存储装置。另一已存储的单词的频谱图案,连续地与分析得到的频谱图案作互相关。根据得到最大互相关作为选定识别词的标准。其办法是,当输入的语言频谱与存储的单词匹配时,即得到最大互相关,那么便在相应通路的电容器上得到最大电压。根据电容器上的最大电压出现的位置,选定单词输出。当时,所用的滤波器为10个,每个带宽300赫。存储的单词为10个口语数字,对单个人有较好的效果,对不同的人要改变单词存储以取得最佳效果。1956年,奥尔森(Olson)^[4]用音节作识别单元,以短时平均谱作识别特征,可识别10个英语单音音节,单人的识别率可达98%。1959年,登斯(Dence)^[5]用音素的两个共振峰(或极大值)振幅的乘积作特征,能识别4个元音和9个辅音,单人的识别率分别是78%和68%;此外他第一次使用了语言出现概率的信息。同年,福杰(Forgie)等^[6]用共振峰与反共振峰的比值作参量,能识别10个英语元音,21人的平均识别率达93%。在日本,1964年中田和男^[7]等采用与共振峰位置有关的8个特征,可识别日语10个数字。20个男声的平均识

别率高达97.9%。在西德,1965年库什(Kusch)等^[13]仅用一对高低通滤波器的输出电压值的顺序排列作参量,对于德语10个数字,72人的平均识别率能达92.7%。

在我国,六十年代初,用共振峰的有关特征,可识别汉语普通话的6个元音^[9],单人的识别率接近100%。

口语的机器识别远不是想象中那样简单。同样一个音,不仅因人而异,而且也随个人不同的发音时间而

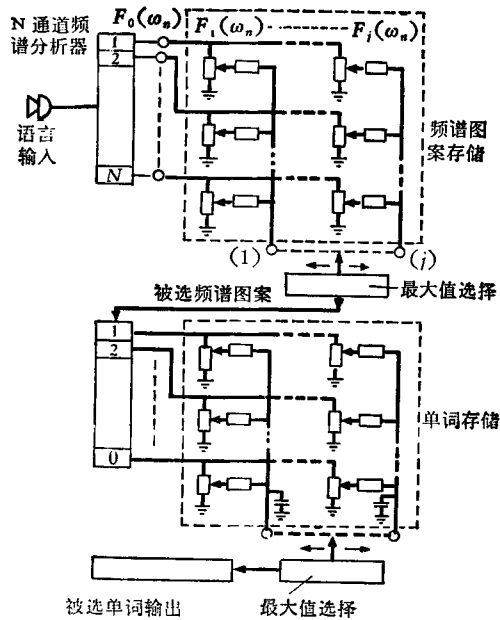


图3 口呼数字自动识别装置简图

有所不同,这不仅是由于人们的声道长度(小孩的平均长度为14厘米,成年男人为17厘米,成年女人为14厘米)不同所形成的语音频谱的千差万别,而且声道的截面积和声带的基频和波形以及发音的持续时间都在变化,因此寻找有效的识别特征(所谓的“不变量”),是语音识别中的重大课题。在连呼语言中,不仅音素之间相互影响,而且词和词之间、相应的声调之间都相互影响,使得单呼和连呼之间有很大的差别。在听觉机制不甚了然的情况下,人们单就对语言中复杂信息的利用,诸如音素,音节,词的上下文的出现概率,韵律(包括声调和声强级)、语音规则、语法、语义等信息的综合使用,已远远超出了简单识别机的能力。即使在有限词汇,单人、单呼的情况下,回答什么是合理的识别单位和识别特征,解决识别单元和人数之间、识别率和成本之间的矛盾等问题,都很尖锐的提了出来。

六十年代中期以来,口语的机器识别,朝着两个方面发展:一个方面是联系实际应用,研究限定词汇(在特定场合使用的)、单呼的识别系统,这种系统容许换人(要接受操作前的短期适应性训练);另一个方面是研究连呼的、不限词汇的并且使用语言信息的所谓语言的“理解系统”。在研究方法上,则从硬件的装备

转向软件的摹拟实验。用电子计算机实行对口语的快速分析和设计方案的验证,已为世界各国所广泛采用。在分析、实验的方法上已取得了积极的进展。七十年代以来,板仓文忠^[10]用所谓线性预测误差作参量的摹拟实验,可识别200个日本地名。单人单呼的识别率高达98.95%(22倍实时时间)。马丁(Martine)^[11]采用语音短时谱及其包络的变化作特征,能识别英语的10个数字,10人的平均识别率达99.79%(实时识别);对34个数字(从1到34)的识别,12人的平均识别率达98.5%(实时识别)。在我国,近年来在以共振峰转移为特征和以特定时刻的频谱为特征^[12]的汉语数字识别的基础上,又采用以过渡区短时谱为主的特征,并采取随机匹配预存图案的办法所进行的计算机摹拟,对100组汉语成语(四字为一组)实验,单人的识别率达99.3%。

如果说,单呼的口语识别,在限定的场合已接近成熟的话,那末对连呼口语的识别还处于初级阶段。连呼的第一个问题是分段。分段后的识别类似单呼语音的识别。对于连呼的3位数的分段,分段后的识别,拉比纳(Rabiner)^[13]等得到10人的平均识别率仅为91%。

使用语法、语义,上下文的出现概率及其他信息来改善语音识别,贝克(Baker)采用最新的办法^[14],可以大大提高识别率。在《听讲-I》(HearSay-I)^[15]系统中,144次发音(包含676个词),使用28—76个单词,5个人的词的识别率使用语义和语法知识达93%;不用语义知识,识别率下降到70%;语义、语法都不用时,则下降到39%。

在实用情况下,必须解决噪声的干扰,因为一些辅音本身就是气流噪声。对于环境噪声(譬如打字机声、谈话声、风扇噪声、开门关门等噪声,声级一般在60—90分贝之间)的降低,通常采用封闭式发话系统(即将人的头部与传声器置于闭合腔内)。这不仅有效地屏蔽噪声的干扰,而且相应地提高声级(可达90—100分贝之间)。但这种装置带来的新问题是呼吸噪声的干扰。分析了呼吸噪声的频谱,马丁^[16]采用图样匹配法较好地解决了这个问题;其它在信号处理技术上,使用频谱计数和反滤波方法都能提高信噪比。

当前,单呼口语的机器识别已从实验室阶段走上或者正在走上实用阶段^[16]。在实用中不要求机器具有完全无误的识别率,但要求在使用前经受短期训练来适应机器。实验指出,经过训练后的口呼误差与按键的误差相当。在使用中,为了保证每个口令的正确识别,往往采用显示设备来校正使用者的发音。如果发音错误,可以重呼直到呼对为止。例如对产品质量的鉴定,显示装置不仅用来校正发音,还显示要鉴定的项目和一些尺寸的公差。当测量和发音都无误时便送入计算机打印。其它象机器故障的检查、邮件的分类

过程,与上述情况雷同。在一些数控机器中,用口呼的程序输入,大大提高了输入速度。在军事应用上,例如人和计算机的配合、现场数据输入、飞机座舱模拟器的控制、空中交通控制等等,都在不同程度上开始实行。口语的机器识别,还逐渐用于“应答系统”(机器不仅能听懂口语而且能够答话),这就有利于某种业务的自动查询工作。所有以上应用的共同特点,都是词汇量少,扩大词汇往往用组合的数字代替。

对于汉语普通话来说,根据我们工作的情况,即使用存储容量不大的计算机,对于一定数量的单呼指令,可以做到不限人(换人时可临时存入本人的信息)的识别,完全无误的识别,但要有校正装置。对于少量的单呼指令,做出硬件也是有可能的。在连呼方面,只要适当地解决分段问题,限定词汇的识别也是可能的。

语言识别存在的问题是,对语声的动态分析特别是听觉机制的探索还很不够。同样一个词,不同人发音的差别那么大,为什么人听起来是一个词?它们的“不变量”究竟是什么?这需要物理学工作者、生理和心理学工作者、语言学工作者、计算机和电子线路工作者等的共同努力,才能取得更大的进展。

此外,语言识别的另一重要内容,不是识别发音人的“共性”,而是象识别指纹那样来识别发音人的“个性”,通过发音来识别人,这就是所谓的“声纹”工作,它具有重大的现实意义。

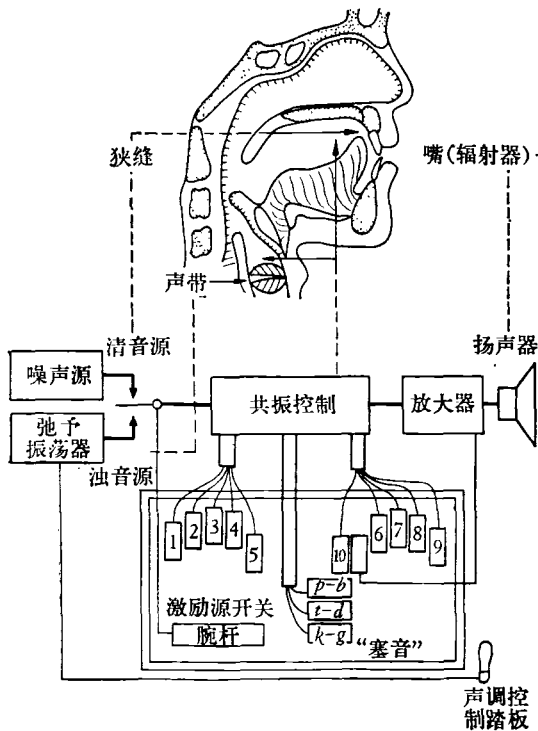


图4 语言合成器简图

语言合成器——说话的机器

用机器模仿人讲话,人们很早就开始研究。最初是用一些共振器,形状、体积各不相同,气流通过一个簧片来激励共振器,从而发出不同的元音来。以后,又发展成由一风箱供气,吹动簧片,激励一个用手控制的皮革共振器,以产生浊音。另一只手控制几个通路,来模拟鼻音和辅音。当然,这种方式所能模拟的语音,不但数量有限,而且音质很差。到了三十年代末,便有人利用电子技术来进行语言合成,其工作示意如图4。

这一装置好像一架电子钢琴。它以一个噪声发生器和一个弛豫振荡器作为激励源,由一腕杆加以控制。当产生浊音时,再由一脚踏板控制声调。激励源输出进入共振控制系统。它是由十个带通滤波器并联组成。这些滤波器覆盖了语言频率范围。有十个手指按键操纵电位器,以使激励源受到调制形成不同的语音。另有三个按键产生瞬态激励,以模拟塞辅音。不过演奏这样一台语言合成器的人,要受较长时间的训练,大约一年左右,才可以发出易懂的语言。

由于采样理论、数字电子计算机和集成电路的发展,现在完成语言合成就比较方便了。采样理论告诉我们如何用一些离散的数字来表示一个连续的语言信号。电子计算机又可以利用一定的算法来迅速而精确地进行运算。而大规模集成电路又提供了计算机小型化的可能。用数字电路来合成语言的方法示意如图5。

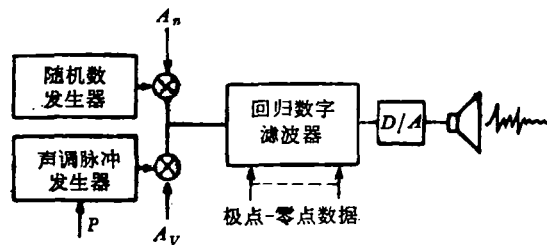


图5 数字语言合成器简图

用比较方便的方法和设备来合成语言,可以给人们带来许多新的应用。

结 语

语言机器是在阶级斗争、生产斗争和科学实验三大革命运动中诞生和发展的;语言机器的发展和应用又为三大革命运动提供了更好的服务。在毛主席的革命路线指引下,在党中央的关怀下,我国有不少单位,在声码器和语言自动识别方面,进行了许多研究工作并取得了可喜的成果。对汉语的基本物理特性和统计特性,也进行了研究并取得了相当的数据。可以相信,随着我国社会主义革命和社会主义建设的发展,随着

“四个现代化”的实现,在语言机器这一新兴领域中,我们也一定能够赶上和超过世界先进水平。

参 考 文 献

- [1] 田时秀,《语言的机器识别》,《电子计算机参考资料》, -11 (总 89) (1976), 19—27.
- [2] Dreyfus-Graf, J., *Sonograph and Sound Machine, JASA*, Nov. (1950), 731.
- [3] Davis, K. H. Biddulph, R. and Balashek, S., *Automatic Recognition of Spoken Digits, JASA*, 24 (1952), 637.
- [4] Olson, H. F., *Phonetic Typewriter, JASA*, 28—Nov. (1956).
- [5] Danes, P., *The Design and Operation of the Mechanical Speech Recognizer at University College London, JBIRRE*, 19—Apr. (1956).
- [6] Forgie J. W. and Forgie, C. D., *Results Obtained from a Vowel Recognition Computer Program, JASA*, 31—Nov. (1959).
- [7] Nakata, N., *Spoken Digit Recognizer for The Japanese Language, JAES*, Oct. (1964).
- [8] Kusch, H., *Automatic Recognition of Spoken Numbers, NTZ-Communications J.*, 4—5 (1965).
- [9] 田时秀,《元音识别的初步结果》,《第一届全国声学会议论文摘要》, (1964), 165.
- [10] Itakura, F., *Minimum Prediction Residual Principle Applied to Speech Recognition, IEEE Trans.*, ASSP-23 (1975).
- [11] Reddy, D. R., *Speech Recognition by Machine, A Review, PIEEE*, 64—4 (1976).
- [12] 中国科学院物理研究所语音识别组,《采用相关矩阵识别口呼数字的实验》,《物理学报》, 25 -4 (1976), 352—354.
- [13] Rabiner, L. R. and Sambur, R., *Some Preliminary Experiments in the Recognition of Connected Digits, IEEE Trans.*, ASSP-24—Apr. (1976).
- [14] Baker, J. K., *The ORAGON System—An Overview, IEEE Trans*, ASSP-24—Apr. (1976).
- [15] Reddy, D. R. Erman, L. D. and Neely, R. B., *A Model and a system for Machine Recognition of speech, IEEE Trans*, AU-21—June (1973).
- [16] Martine, T. B., *Practical Applications of voice Input to Machine, PIEEE*, 64—4—April (1976), 487—501.

驻极体及其应用

闻建勋

(中国科学院上海有机化学研究所)

一、前 言

驻极体 (electret) 是一种永久极化的电介质。长期以来,它一直是一种科学上的珍奇。只是在近三十年间才有了应用方面的研究。最近十多年工业上的研究和应用有了迅速发展。例如,在电声学方面,驻极体麦克风及其它换能器已有商品出售。驻极体在人们面前展现了更多应用的可能性,其前景是鼓舞人的。开展驻极体研究并开拓其应用,对我国社会主义事业是很有意义的。

首先推测驻极体存在的是英国物理学家赫维赛德 (O. Heaviside)^[1]。1890 年他在一篇文章中首先使用了驻极体这个术语,认为它可以作为磁体的静电类似物而存在。30 年后,日本物理学家江口元太郎^[2]在研究油类和蜡类电传导性时,首次成功制得驻极体。他原先并不了解赫维赛德的工作,重新发明了驻极体这个术语,但他的工作当时并未受到应有的重视。

1935 年,格曼特 (A. Gemant)^[3]重复并发展了江口的工作,但他却认为,从理论上看来驻极体不会存

在。这种观点和早期实验所揭示出的一些稀奇性能使驻极体神秘化了。然而,大量事实证明,驻极体效应远非反常现象,而是固体电介质的一种普遍现象,只不过是程度上而非本质上的不同而已。驻极体不同于铁电物质,它的电极化状态不受外电场影响,除非后者足够强,将驻极体破坏。

驻极体有许多种,依不同制备方法,可分为以下几类:热驻极体^[2,3];光驻极体^[4];热光驻极体^[5,6];电驻极体^[7];辐射驻极体^[8];磁驻极体^[9];机械驻极体^[10]。

本文不讨论无机的驻极体,只讨论合成的有机高分子材料。后者具有良好的加工性能以及由它制成的驻极体的稳定性,因而在应用上是有前途的。文中所涉及的仅是它们的静电效应。

二、驻极体生成机理探讨

用驻极体制作的换能器等器件,使用过程中,十分关注的是表面电荷及其稳定性。因而,要求了解驻极体生成和衰减机理。

早期的研究者^[11—13]对驻极体效应提出过许多解