

电 听 觉 问 题

梁 之 安

一 引 言

电刺激是生理学研究中最广泛的一种刺激。动物身体上的许多器官都能被电刺激所兴奋。用电流刺激人的眼、耳、舌、皮肤等感觉器官，可以相应地引起光、声、味、痛等感觉。其中由电刺激听觉器官而产生声音感觉的这一效应叫做电-听效应，或者就叫做电听觉。在给予这样的电刺激时，通常是把一个电极(刺激电极)放在受试者外耳道或内耳(耳蜗)上，另一电极(对照电极)放在身体的其他部位，如腕部皮肤上。

电听觉原是感官生理学中一个较老的问题。早在1800年伏特就在使直流电通过他自己的耳朵时听到了微弱的、类似噪声的声音，从而第一次提出了用电刺激兴奋听觉器官的可能性。其后虽然有人对电听觉问题继续做了一些研究，但由于技术条件等种种限制，在长达一世纪的时间内取得的进展不大。一些作者使用了直流电、感应电及交流电等刺激，所得到的听觉效果都不很好，声音感觉的“音质”很模糊，并且常伴有较强烈的痛觉。至于电听觉产生的机制，更无从分析起，因此研究也就中断。直至本世纪三十年代，苏联奥尔倍利学派的一些生理学家又重新对电

听觉问题进行了较系统的研究。他们观察到，在用声音频率范围内的正弦波电刺激听觉器官时，有些受试者能听到不同的音调，音调的高低和同频率的声音(从耳机或扬声器发出的)相差不多。在一些由于疾病鼓膜已经破损以及动手术摘除了听小骨的患者，电刺激也能有同样的听觉效果。其后的几年内，其他国家的一些研究者也得到了相近的结果。可是他们大都认为电刺激听觉器官之所以能产生声音感觉，主要是因为电流流经人体时，能使某些组织发生机械振动，机械振动再刺激听觉感受器；换句话说，受试者所听到的仍然是由机械振动所产生的声音，而并不存在电刺激直接兴奋听觉感受器的作用。依照他们的这一结论，所谓电听觉的问题便没有什么特别，它只不过是一个一般的听觉问题而已。此外，由于所用的各种电刺激总是伴有明显的痛觉或其他不舒服的副作用，深入的研究确实也很受限制。这样一来，大家对电听觉问题似乎又失掉了兴趣。

在最近几年举行的一些国际性学术会议上，又有人提到了电听觉问题，文献上也再次出现了个别的这方面的研究工作，表明这一老问题又产生了新的吸引力。但是从所报导的情况来看，还很难说电听觉的研究是否

已经取得了新的进展。

电听觉问题之所以能引起人们的注意，主要是在于它可能有实际应用的价值。假如用电刺激的方法能有效地使人听到声音，那么对许多耳聋患者，就可以考虑通过这一途径使他们恢复一些“听力”——不是直接听声音，而是“听”电刺激。特别是对一些因耳朵的声音传导系统发生严重障碍，即使用一般助听器把声音放大许多倍还是听不到，但听神经及内耳的感受装置仍然是良好的患者，这一途径的意义可能就更大。耳聋患者（包括聋哑）不论在国内还是在外国都占人口中相当大的比例。原因当然各有不同，用一种办法也不一定对所有人都有效，但是假如电听觉途径能解决一部分耳聋患者的问题，这还是十分值得我们去努力的。

过去有关电听觉问题的研究已经积累了一些资料，作出了一些结论。但是由于上面谈到的种种限制，我们觉得过去的研究对于电听觉现象本身的了解还是不够详细的，有些结论恐怕也不够全面，都有进一步探讨的必要。要探讨的主要问题归纳起来大致有：（1）是否可能有真正的电听觉，即不是由于机械振动，而是由于电直接刺激听觉感受器或听神经而引起的声音感觉？（2）由电刺激所引起的声音感觉能否正确反映刺激原来的特点？（3）如何使电刺激达到较好的效果，既能使受试者清楚地“听”到声音，又不引起痛或其他不良副作用？（4）电听觉问题应当如何着手研究？这些问题将分别在下面加以讨论。

二 电听觉的作用机制

电刺激听觉器官能引起声音感觉，这已经是十分确定的事实。但电刺激是如何引起

声音感觉的呢？有人曾经认为电刺激引起电极附近肌肉的收缩，人听到的只是肌肉收缩的声音。这一看法很早就被否定了。从理论上来看，电听觉主要有两种可能的作用机制：第一是机械振动机制，就是电流使某些组织发生物理的机械振动，从而产生声音；第二是电兴奋机制，就是电刺激直接兴奋听觉器官（感受细胞或神经末梢），从而产生听觉的效果。按照机械振动机制而产生的听觉不是真正的电听觉，只是“声音听觉”，因为人所听到的仍然是机械振动所产生的声音；假如电听觉的机制只是如此而已，那么它对于不能听到声音的耳聋患者是帮助不大的。只有按照电兴奋机制而产生的听觉才是名符其实的电听觉，这种电听觉途径如果确实存在并且能被利用，那么它对一些耳聋患者是有用处的。因此作用机制到底如何，这是电听觉的核心问题。

过去从事电听觉研究的作者大都只承认机械振动机制，否定了电兴奋机制。他们承认机械振动机制是有一定的理由和依据的。电流在通过电极及人体组织时能引起机械振动，从而产生声音，这在物理学上是能成立的，因为许多物质结构都有把电能转换成机械运动的特性。我们的实验表明：当用面积较大的薄银片作电极使较强的电流通过人体时，在电极与皮肤接触处确实能发出声音，声音虽然较轻，但与电极毫无接触的另一人用耳朵靠近时可以清楚地听到。如何会产生声音这一问题颇为复杂，我们不预备在这里讨论。但从这一事实来看，电听觉中存在着机械振动机制，似乎已经没有什么疑问。问题是除了机械振动机制外，电兴奋机制是否可以同时起作用？机械振动机制与电兴奋机制是否可以不互相排除，而互相补充？

电兴奋性是机体内许多器官的共同特性，而对听觉器官说来，兴奋与电变化过程的关系更是十分密切。耳蜗（听觉器官的主要感受装置）的一个很重要的特性，是它具有能把声波引起的机械振动转换成电的所谓微音器效应：耳蜗象一个微音器（话筒）一样，在受声音振动时产生微音器电位。而按照大多数人的意见，微音器电位则是兴奋神经末梢的刺激动因。因此在自然条件下，听觉系统从接受声音至引起听觉的过程，本来就包括电转换的环节，声音得先转换成电，然后才能兴奋神经系统。这一过程可以简单地表示为：

声→电→神经冲动→听觉

根据这一过程，在给予电刺激的情况下，电刺激直接兴奋感受细胞或神经末梢，从而引起听觉，应该是完全可能的。这时的过程：

电→神经冲动→听觉

只是比由声音引起听觉时省去了声音转换成电的一个环节而已。因此从理论上来看，电听觉的电兴奋机制是能够成立的。

为了探讨在电听觉中电兴奋机制是否确实能起作用，实验设计可以从下面两点出发：第一，假如电听效应的机制是因为电极与组织通路中产生声音，那么电听觉有一些特性必然和一般声音引起的听觉一致；第二，假如是按照电兴奋的机制，那么电听觉有一些特性应当也会和其他器官电兴奋的特性相近。让我们在这里举个例子简单地说明一下：人和动物对声音强度的变化是不很敏感的，当声音强度变化10—20%左右时，一般都不易听得出来。但是我们的实验表明，在电听觉的情况下，电刺激强度这样幅度的变化，却能很明显地被感觉出来。电刺激强度增加1倍对于人的听觉效果，大约相当于声

音强度增加7—8倍。可见在电听觉中反应与刺激强度的依赖关系，与声音听觉是不一致的，但却比较符合电兴奋性的特点。在豚鼠以大脑皮层听区诱发电位为指标，所得到的刺激强度与反应大小的关系也是符合电兴奋性的规律，而和声音听觉的特性有明显差异的。这些实验结果倾向于说明，在电听觉中电兴奋机制是存在的。有人报导用电直接刺激听神经，能使人听到声音，这也符合存在电兴奋机制的提法。

总的看来，电兴奋机制与机械振动机制不是互相排除而是互相补充的，可能在一些条件下机械振动机制的作用比较显著，而在另一些条件下电兴奋机制的作用比较显著。如何创造最好的条件，使电兴奋机制最为有效，这有待于进一步的研究。

三 感觉与刺激特性的关系

电听觉是否有实际应用价值，除了电刺激要确实能引起声音感觉之外，还要看它引起的感觉能否反映刺激的各种特点。按照有些作者的报导，电刺激只引起噪声或马达声的感觉。假如是这样，那么电听觉还是没有实际用处的，因为耳聋患者不是一般地只希望能听到声音就够了，而是希望听到并且能辨别日常生活中各种不同的声音，起码能识别不同的语言声音，听懂讲话。

由于在耳蜗声音振动是首先转换成微音器电位，微音器电位才进一步兴奋听觉感受装置的，因此所产生听觉的特性和微音器电位特性的关系最为密切，微音器电位的各种特性，一般都能在听觉中反映出来。从这一关系上看，在直接用电刺激来兴奋听觉感受装置时，电刺激的各种特性理论上也应该能反映到听觉上来。听觉系统电-兴奋转换的

这一精确性,是其它感觉系统所不及的;别的感觉器官在接受电刺激时只能产生笼统的感觉,例如用各种频率及波形的电刺激视觉器官都只能笼统地产生闪光感觉。

声音最主要的特性是音调的高低。耳蜗辨别音调主要依靠部位机制及冲动频率机制。所谓部位机制就是不同频率的声音刺激耳蜗基底膜的不同部位,被兴奋部位不同,就决定了音调的高低。一般在用电刺激兴奋听觉器官时,电流流经整个耳蜗,不论刺激的频率是多少,基底膜所有的部位都被兴奋。因此从部位机制的角度来看,电刺激所引起的声音感觉将是很难反映声音的音调特性的。但按照冲动频率机制,不同频率的声音或电刺激使听觉感受装置发放不同频率的神经冲动排放,因此音调的高低不必依靠刺激部位的不同,而可以由排放的频率反映出来。

已有一些作者报导过,在给予不同频率的正弦波电刺激时,受试者能听到不同的音调,而且在给予语言声音转换成的电刺激时(从录音机不经扬声器直接输出),受试者可以听到语音。可是用正弦波或语音电刺激时都很容易引起痛觉,而所听到的“声音”很微弱,达不到清晰的起码程度。为了获得较好的电-听效果,我们试用了重复窄方波电刺激。当方波重复频率在125—10,000次/秒的范围内变化时,受试者能听到与重复频率相应的各种音调。当方波很窄(20微秒)时,有可能在不引起痛觉的情况下达到较大的响度,音调特性非常清楚。这样就比较确实地说明了在用电刺激时,声音的音调特性是可以较准确地被感受的。在以豚鼠大脑皮层听区诱发电位为指标的实验中证明:若用正弦波电刺激豚鼠耳蜗,则当刺激频率变化时,所引

起的反应也相应地发生变化,表明豚鼠的听觉系统是能够区分电刺激的频率特性的。

除了频率之外,声音的另一重要特性是强度。如前面已提到的,听觉器官对电刺激强度的变化比对声音强度的变化要敏感得多,因此在电听觉中刺激的强度特性显然是能很好地被区分的。但从另一方面来看,声音中各成分原来的强度比例在转换成电刺激再引起听觉后可能有一些失真,这是一个缺陷。可是就对语音的识别来说,强度关系这一因素并不象频率关系那么重要,强度比例的失真对语音可懂度的影响一般是不会很大的。至于声音的时间特性,如长短、间距、调频或调幅变化速度等,在电听觉中是能被感受的。

综上所述,初步可以认为,电刺激的一些基本特性在电听觉中是能反映出来的。但在用复杂的刺激(例如语音)时,情况是否也一样,还必须通过新的实验来分析。

四 电刺激的效率

电刺激引起的声音感觉必须达到足够的响度,又不伴有其他不良的副作用,它才有可能被实际应用。在过去不同作者使用的各种刺激方法中,最大的缺点就是电刺激的听阈与痛阈相差很小,刚能听到声音就会引起痛觉,想把刺激加强一点使听到的声音响一些,就会痛得比较厉害。过强的刺激甚至还会引起晕眩、头痛、面部肌肉痉挛等副作用。这就给电听觉的研究带来了很大的困难。如何提高电刺激的效率,使既能听清楚,又没有不舒服的副作用,这是一个关键性的技术问题。

提高电听觉的刺激效率可以从不同的方面来考虑,如刺激电极放置的位置、电极的

特性、刺激的选择等。从原则上来看,刺激电极愈靠近耳蜗效率应该愈好。但要把电极放在耳蜗上或耳蜗附近,必须进行一定的手术,研究的可能性就受到了相当的限制。在正常人进行研究时,刺激电极放在外耳道较为方便,这样的外耳道电极用什么形状和质地的最好,已有人作过一些比较。按照我们的经验,电极与外耳道的皮肤接触面稍大一些较好。最好把锡纸包在耳塞或软橡皮管上作成电极,用时把它塞进外耳道内,易放置,好固定,接触面大,效果也不错。提高刺激效率比较根本的办法是根据不同感觉器官有不同的适宜刺激的原理来选择电刺激,使它对听觉器官作用明显,而对痛觉感受器则作用轻。用重复方波刺激时(电极在外耳道),若每一个方波的刺激时间很短,只有20微秒,则受试者可以听到较响的声音而无痛或其他不舒服的感觉。所听到的音调随方波的重复频率而变,十分清楚,响度级一般可达阈上30分贝以上。我们相信在再作一些改进后响度还有可能提高。即使就只能有阈上30分贝那么响,语言声音已经可以被识别了。

语音和方波是有很大的不同的,用语音电流直接刺激听觉器官很容易产生痛觉。要达到够响而不痛,是否也可以考虑把语音变成方波呢?根据截幅语仍然可被听懂的原理,我们觉得若是用语音的频率去调制窄方波的重复频率,再用这样的重复方波去刺激听觉器官,是有可能听到较响的语音而不产生痛觉的。

五 研究途径

电听觉本来应该是一个经验性的问题:给耳聋患者电刺激,看他听得见还是听不见,似乎便可以马上作出结论。但实际上问题并

不那么简单,研究了一百多年还没弄清楚,就表明电听觉问题具有相当的复杂性。因此,要很好地解决它,便不能不从分析理论上的可能性,改进具体实验技术等方面先进行一些探索。这样一来,电听觉便不简单地只是一个经验性的问题,而必须从多方面着手,通过多种途径来求得解决。

电听觉的效果如何,最终当然是要由耳聋患者来判定的。临床耳科可以利用治疗、手术等方便的机会,在耳聋患者进行一些测试。这是研究电听觉的一条最直接的途径。但它是受到一定条件的限制的,特别是在方法还不成熟之前,不大可能作很多探索。在探索性的阶段,较大量的实验在正常人进行是较为适宜的。关于听觉的各种特性已有很多现成的测试方法,在正常受试者可以很方便地利用这些方法对电听觉的各种特性进行较详细的研究。但在正常人进行测试也有它的缺点,就是电极一般只能放在外耳道或其他离耳蜗较远的地方。为了弥补这一缺点,可以考虑在动物进行一些实验。在动物可以随意作各种各样的手术,给予各种各样的刺激(甚至有不良副作用的),进行各种各样的试探。但是用动物来研究感觉问题是有困难的,它不能象人那样说出自己的感觉,它是否能听见和辨别不同的声音,我们只能根据一些较一般化的指标去进行推测。不过把动物试验作为电听觉研究的辅助途径还是可以的。动物的生物电反应是可以利用来作为研究指标的,这方面的一些研究结果在上面已经提到了。我们也可以考虑用狗作一些实验,看能否用电刺激听觉器官的方法去训练它对语言(电)刺激的一些行为反应,如呼名反应,听到某一指令时某一动作等。狗是听不懂人的语言的,但能建立对特定语音的行

为反应表明它的听觉系统具有区分不同语音的能力。此外,也可以利用一些如鹦鹉等会“说话”的鸟类,看能否用电刺激方法训练它说话。当然,动物和人的听觉系统差别较大,因此动物试验的途径只能是次要的、辅助性的。

与电听觉有关的许多技术性问题,也都需要分别从不同的途径来着手解决。

六 结 语

从目前存在的资料来看,电听觉问题是有希望得到较好的解决的。假如能最后证明,电刺激确实可以直接有效地兴奋听觉器官(不必先经过转换为声音的步骤),而所产生的声音感觉又基本上能反映电刺激的各种特点,以及能找到效率较好而又方便的电刺激方法,这从实际应用的意义上说,当然是最理想的结果。那时传导性的,甚至一部分周边感受性的耳聋患者,都有可能利用电刺激的途径来感受声音。目前这虽然还仅仅是希望,但通过实验获得的初步结果,似乎对上述几个基本问题的解决已多少提供了一些依据。

当然,最终的结果也可能并不那么理想。但只要问题的一些方面能得到较好的解决,实际上有一些可以利用的可能性,我们都可

以考虑充分利用它。例如若最终结果表明了电刺激是不能直接有效地兴奋听觉器官使产生声音感觉的,所谓电听觉只是机械振动产生了声音的结果,那么可以考虑把电极安装在耳蜗上,使机械振动产生在耳蜗,而不在鼓膜或鼓膜以外。这样,对于声音传导路径受障碍的耳聋患者还是能有些帮助的(一般传导性耳聋患者,若声音传导障碍不严重,借助于普通助听器把声音放大后就能听见,用不着考虑电听觉的途径,我们这里指的是传导障碍比较严重,即使用助听器还是听不见的患者)。

除了实际应用的价值外,电听觉作为一种方法,对于听觉基础理论的研究也是很有用处的。用声音刺激时有一些不易控制的条件,在用电刺激时都可以比较容易控制,有些实验用声音刺激不大好做的,都可以考虑用电刺激的方法来做。听觉系统对电刺激的反应有较精细的定性定量关系,这是比其他感觉系统有利的。因此电听觉的工作,在总的中枢神经生理机制的研究中可能起一些独特的作用。

总之,不论从实际价值或理论意义上说,电听觉问题都是值得研究的。我们把这个问题的提出来,希望和对它感兴趣的工作者们,共同努力来攻克它。