

动态电子腭位

李英浩

0 引言

动态电子腭位（简称 EPG）能够在连续语流中实时记录舌和硬腭接触过程中舌的空间位置和舌腭接触部位的变化。EPG 主要用于腭裂、耳聋、运动神经障碍等言语疾病的诊治和言语治疗。另外，EPG 也用于言语产生机制的研究。语言中的辅音发音动作的变化比元音的发音动作快的多，使用 EPG 就可以用较高的时间精度和空间精度来记录辅音发音动作的大部分过程，因此是研究舌协同发音（lingual coarticulation）必备的研究手段。

同其他的发音器官追踪仪器一样（如 EMA，X-ray 等），EPG 也有自身的优点和缺陷。EPG 是无侵入的仪器，使用相对简单，时间精度较高。缺陷是假腭只适用于特定的发音人；佩戴假腭后可能会影响发音人的发音质量；假腭向后无法达到软腭，因此无法记录软腭和舌的接触；最后电子假腭只能记录舌和硬腭接触过程的发音动作，而无法记录没有接触时候的动作（Byrd, 1995）。

本文首先介绍 EPG 的发展历史和目前国内外使用的 EPG 的种类和性能，而后介绍假腭的制作过程和电极分布特点以及 WinEPG 的 62 点系统的构成和工作原理。接着介绍 EPG 数据缩减方法；最后简单介绍 62 点 EPG 在言语治疗和语音研究中的一些应用。

1 发展历史和主要类型

EPG 技术产生之前，研究者主要使用静态腭位照相技术（palatography）研究发音的部位。1930 年，德国人希凌（Schilling）提出了用电路进行腭位研究的构想。1964 年，美国华盛顿大学的基德（Kydd）和比尔特（Belt）设计了具有现代意义的电子假腭系统。他们使用直流电路，把银电极放置在被试者假牙托的表面上，这样当舌和硬腭接触的时候，就会产生微弱的电流。然而由于电流十分微弱，同时由于唾液的导电性会产生“假接触”，所以在实际应用中有很大的局限性。

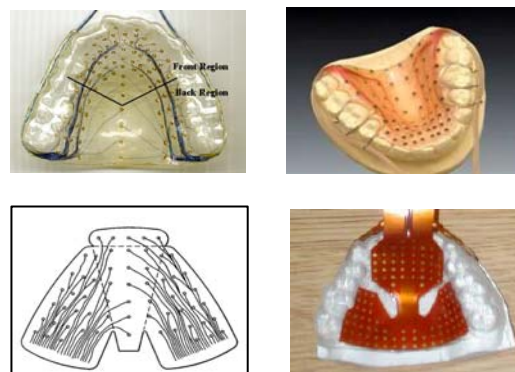


图 1 目前使用的 EPG 的类型（左上为 Kay 的 Palatometer，左下为 Rio 系统，右上 2 为 EPG3 系统，右下为 LogoMetrix 系统）

上世纪 60 年代以后，交流电取代了直流电，柔性电路（flexible circuit）的设计使得使用更多电极来记录舌和硬腭的接触成为可能（Wrench, 2007）。电子腭位的研究和制作技术分别在日本、英国和美国得到发展。1968 年日本东京大学的柴田（Shibata）首先使用交流电路设计制作了电子腭位系统，但是电极数目很少。但到了 1978 年，柴田和他的合作者设计制作了 63 点的便携式电子腭位（Shibata 等，1978）。这就是后来的 Rio 电子腭位系统。也是在上世纪 60 年代，Hardcastle 和 Fletcher 改进了基德和比尔特的电路设计。Fletcher 教授在美国的亚拉巴马大学设计了 96 点假腭的电极排布方案，并委托 Kay 公司生产。这就是后来的 Kay 公司的电子假腭（Palatometer）。1974 年，Wilf Jones 在 Hardcastle 教授的指导下设计了 62 电极的雷丁电子腭位系统（Reading EPG system）。日本东京大学实验室采用了日本理光公司产生的 63 点电子腭位。2000 年，美国 LogoMetrix 公司生产了由 Fletcher 设计的 118 点的电子假腭。目前国外主要研究机构使用的电子腭位有四种，美国 Kay 公司的 Palatometer，英国雷丁大学的 EPG3 系统，日本的 Rio 系统以及美国的 LogoMetrix 系统（图 1）。英国 Articulate Instrument 公司根据 EPG3 系统设计制作了 WinEPG 系统。Kay 公司和日本理光公司已经停止生产电子腭位。

2 假腭的制作和电极的分布

制作假腭首先要获取发音人硬腭和上齿的模型。按照发音人硬腭的生理模型用丙烯酸基材料制作假腭。在假腭表面安放电极。

电极间距、电极的直径以及电极的材质是设计假腭需要考虑的关键因素。由于唾液具有导电性，电极之间的距离应在一定的范围内。目前一致接受的距离在 1 毫米左右。EPG3 系统和 Palameter 系统电极在假腭上的分布类似，在齿龈区域电极分布比较密集，间距在 3 毫米左右，在龈腭区域电极分布比较稀疏，间距在 3 毫米以上。电极的大小和导电性相关，电极越大，导电性能越好。不同类型 EPG 系统的电极材料不同，Kay 和 Rio 系统用黄金或者白金材料，EPG3 和 LogoMetrix 系统采用银质电极。

导线从口腔引出的方式以及假腭、硬腭固定的方式以及假腭的厚度对语音的产生有较大的影响。EPG3、Palatometer 以及早期的 WinEPG 系统的电极导线都是分为两路，从两侧的白齿由内向外引出，从嘴唇两角伸出口腔。导线的粗细直接影响口腔的完全咬合以及嘴唇的完全关闭。EPG3 和 WinEPG 使用牙箍把假腭固定在上齿上，而 Palatometer 覆盖了前齿和两侧的白齿。这会对齿龈摩擦音和边音的气流产生一定的影响，特别是 Palatometer 系统。假腭的厚度对发音的影响最大，特别是阻塞音。

电极的分布有两种不同的分布理念 (Wrench, 2007)，第一种是电极等距分布，如 Rio 系统和 LogoMetrix 系统。第二种是按照假腭的生理特征摆放电极，如 EPG3 系统和 Palatometer 系统。前者的优点在于能够比较精确地记录舌和硬腭接触的特点，缺点在于不便于人际之间的比较。后者的优点克服可前者的缺点，但是假腭生理特征并不是一致的，因此摆放的时候参考系是不同的。另外一个问题就是假腭电极的第一行和最后一行的位置。一般情况下，假腭只能覆盖硬腭区域，如果再向后延伸并且接触到软腭，则有可能影响正常的发音。这是因为一旦软腭受到刺激，会使人产生呕吐的效果。因而，目前大多数的假腭的最后一行离软腭都有一定的距离。最前面一行的电极摆放在前齿背还是齿龈前，则必须根据不同语言中语音的发音特点。对于英语而言，第一排的电极就必须摆放在前齿背，因为齿间音 (interdental) 在连续语流中往往实现为 [t_ɪ]。汉语普通话中能够接触上齿背的语音只有齿龈音和舌尖前音。这些音是否接触上齿背只具有语音定位的作为，而没有音系学的价

值。EPG3 的第一行电极摆放在前齿后 1 毫米左右的位置，而 Palatometer 的第一行电极放在前齿背。EPG3 的最后一行电极在硬腭和软腭分界线前 1-2 毫米左右 (Hardcastle, 1991)，而 Palatometer 最后一行电极在接近软腭的区域。因此 Palatometer 能够准确地记录齿间摩擦音 /θ/ 和 /ð/ 在语流中的表现，在记录软腭成阻方面也优于 EPG3。

下面主要介绍最新的 WinEPG 电极分布特点 (Wrench, 2007)。WinEPG 使用 62 个电极，电极分布充分考虑了前面两种类型分布方式的特点。四个 (或者三个) 电极一组等距分布在承载电极的细条上。第一行电极比 EPG3 向前推进直到前齿跟附近，第七行电极处于软硬腭交界线。最后一行电极向后 7-12 毫米，与 Palatometer 类似。第四行电极处于齿龈桥附近。前四行电极和后四行电极分别等距排列 (图 2)。

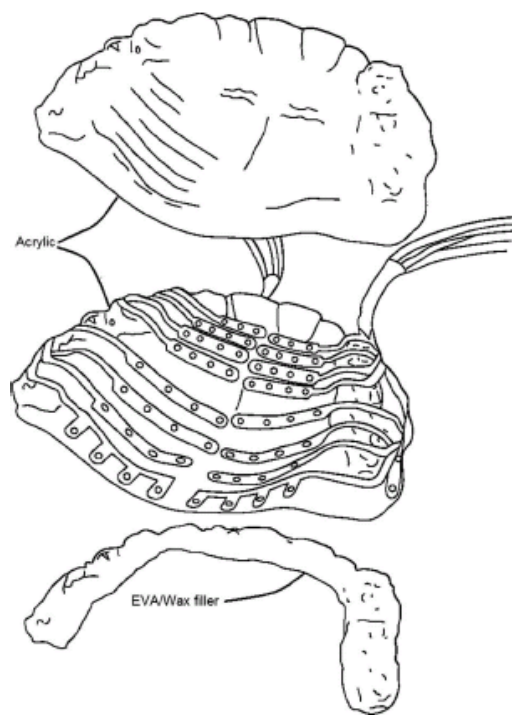


图 2 WinEPG 电极分布 (引自 Wrench, 2007)

3 WinEPG 系统的构成和工作原理

WinEPG 硬件有串行通讯接口 (Serial Port Interface)，腭位扫描仪 (EPG3 scanner)，多路复用器 (Multiplexer)，电极手柄 (Chrome Handgrip) 和假腭 (EPG palate)。

多路复用器连接三个部分，电极手柄，腭位扫描仪和假腭。电极手柄实际上就是一个电极，上面加有一定的电压，一旦假腭的某个电极产生接触，电流形成回路，信号就传送到多路复用器，再由后者对信号缓存放大后发送到腭位扫描仪进

行处理。多路复用器对电极扫描的时候，一次扫描 4 个电极，以此提高扫描速度。扫描 62 个电极需要 3.2 毫秒，所以 WinEPG 的理论采样频率可以达到 300Hz，然后一般采用 100Hz 或者 200Hz，因为这个采样频率足以记录舌腭接触的动态过程 (Hardcastle, 1991)。

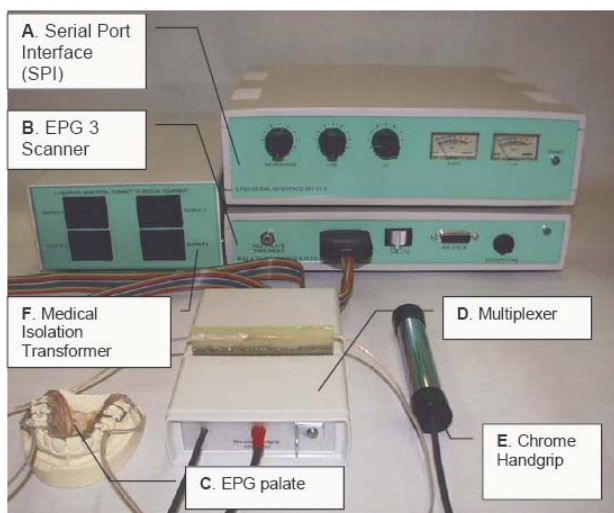


图 3 WinEPG 硬件 (图片引自 Articulate Assistant User Guide)

腭位扫描仪有时电路 (timing circuit) 和信号探测电路 (signal detection circuit)。计时电路用来控制多路复用器对假腭电极进行扫描的时间，信号探测电路用于接触电极信号的获得、分析和传输。信号经过多路复用器放大后传送到腭位扫描仪，探测电路首先获得某时刻信号的峰值，然后与预先设定的阈值进行对比，而后把有效的信号进行数字编码传输到串行通讯接口。

串行通讯接口为腭位扫描仪提供电源并且根据电脑的指令控制腭位扫描仪的运行。此外，串行通讯接口还有两个输入口，分别是喉头仪信号输入口和一个线路电平 (line-level) 信号输入口，后者一般为语音信号。换句话说，WinEPG 可以同时采集三个信号，EPG 信号，语音信号和喉头仪信号。设备连接方法见图 4。最新型号的 WinEPG 还配备了 EMA 接口和超声波图像的接口，功能变得更加强大。

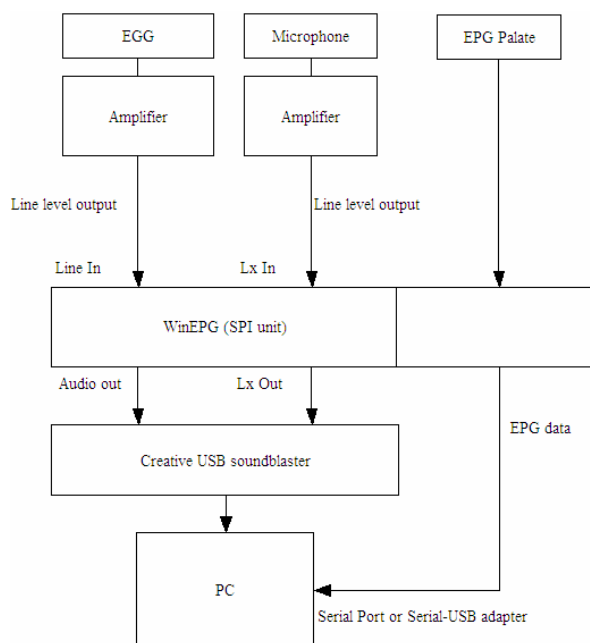


图 4 多通道信号采集连线图

4 EPG 数据缩减方法

EPG 数据缩减方法根据不同的研究目的而不同。下面主要介绍 62 点 (EPG3 或者 WinEPG) 的电子腭位的数据缩减方法。

由于不同发音人的发音习惯和策略不同，进行数据分析之前最好分析不同发音人的发音区域 (Byrd,1995)。EPG3 或者 WinEPG 系统在设计的时候就考虑了不同发音人的硬腭生理特征，因此在许多研究针对不同的发音人采用相同的发音区域进行分析。而发音区域的划分却因不同的研究者以及研究目的而不同 (图 5)。我们看到有的研究把假腭分为两个语音区域，有的把假腭细分为 5 个区域。实际上，对假腭的语音分区不仅与发音人硬腭的生理结构有关系，而且和特定语言语音的发音部位密切相关。进一步说，如果一种语言里面的辅音的部位比较多 (发音部位是对立的)，那么我们就可以把语音区域划分地细致一些。但是如果一种语言辅音发音较少，就可以划分地粗糙一些。然而对于言语工程的问题，我们就要对假腭的区域进行细致划分。这个时候，其工程意义大于其语言学意义。

Hardcastle 等 (1991, 1999) 把数据缩减技术分为三类：发音部位指数 (Place of articulation measures)，动态变化指数 (Contact Profile Display) 和接触指数 (Contact indices)。第一类指数主要用于描写不同音类的舌腭接触区域并进行区域划分，与传统的语音学描写对应。一般采

用的方法如下¹：

- 选取相同语音样本舌腭接触面积最大帧，而后进行叠加，计算每个电极的接触频率，最后按照研究的目的确定发音区域 (Farnetani, 1989)；
- 对于特定音类，如阻塞音 (sibilant)，可以采用槽宽，槽长以及阻塞的位置和 dimension；
- 选取关键帧界定语音样本的不同阶段。如对塞音而言，可以用第一个和最后一个完全阻塞帧 (对 62 点假腭而言就是指任何一行全部接触) 来界定塞音的持阻开始和结束；

Hardcastle 等 (1993) 在研究 /k/ 和 /l/ 在不同元音环境中的发音部位的时候，修改了上述公式。首先，把和 /l/ 和 /k/ 的发音动作相关的区域分别确定在前四行和后四行中间四列。计算公式 (2) 与 (1) 类似。指数越高，表明发音部位受临近语音影响越大，位置越靠前。

$$\text{后部 CoG} = (R_8 \times 0.5 + R_7 \times 1.5 + R_6 \times 2.5 + R_5 \times 3.5) /$$

$$\sum_{i=5}^8 Ri \quad (2)$$

$R_i, i=1,2,3...8$ — 每行接触电极的数目；

Fontdevila 等 (1994) 认为 CoG 指数只能粗略地估计电极接触的分布。他提出使用接触超前指数 (CA)，接触趋后指数 (CP) 和接触居中指数 (CC) 能够更加精确地表示接触的分布。其基本思想是前行 (以 CA 为例) 归一化后的接触点数的权重大于后面行所有可能接触点权重的总和。这些指数的优点是能够通过指数就能判断 (以 CA 为例) 接触电极能够达到的行数，在该行接触的点数以及其后面行接触的情况。比起 CoG, CA/CP/CC 更能够说明接触的方向性。下面给出 CA 和 CC 的公式, CP 的公式与 CA 类似。

$$CA = \log(\sum_{i=1}^8 a_i \times R'_{9-i} + 1) / \log(\sum_{i=1}^8 a_i + 1) \quad (3)$$

$$- a_i \text{ 为系数, } a_1 = 1, a_i = R_i \sum_{j=1}^{i-1} a_j + 1 \quad (i > 1)$$

— R_i 为 i 行电极数目, R'_i 为 i 行接触电极比率；

$$CC = \log(\sum_{i=1}^4 a_i \times C'_{5-i} + 1) / \log(\sum_{i=1}^4 a_i + 1) \quad (4)$$

$$- a_i \text{ 为系数, } a_1 = 1, a_i = 2C_i \sum_{j=1}^{i-1} a_j + 1 \quad (i > 1)$$

CA, CP 和 CC 还可以应用在不同的发音区域里面。如 Fontdevila 把 62 点分为齿龈区和硬腭区，对硬腭区采用式 (3) 和 (4) 的指数，形成新的指数 CA_p, CP_p 和 CC_p。采用后面的指数就能够很好地描写元音对前面辅音发音动作的影响。国内的学者如李俭等 (2004)，平悦铃 (2005) 就把 Fontdevila 的三个参数改造到 Kay96 点的电子腭位系统上。

动态变化指数就是计算假腭特定发音区域

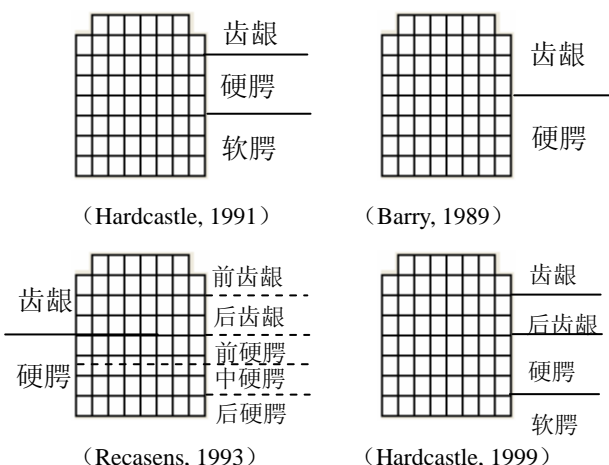


图 5 电子腭位电极和发音区域对应

第三类指数主要思路就是把一帧 62 点数据缩减成为一个数据。定义这类数据依赖于对腭位电极的分区。不同的研究目的就有不同的电极分区，因此此类指数为数众多。下面只介绍几个常用的指数。

最常用的指数包括面积重心指数 (Center of Gravity, 或者简称 CoG)，趋前性，趋后性以及居中指数。

面积重心指数 (式 (1), Hardcastle, 1991) 用来衡量接触电极在假腭前后维度上集中的程度。实际上，面积中心指数就是计算加权的平均数，电极的排数越靠前，权重就越大。

$$\text{CoG} = (R_8 \times 0.5 + R_7 \times 1.5 + R_6 \times 2.5 + R_5 \times 3.5 + R_4 \times 4.5 + R_3 \times 5.5 + R_2 \times 6.5 + R_1 \times 7.5) / \sum_{i=1}^8 Ri \quad (1)$$

$R_i, i=1,2,3...8$ — 每行接触电极的数目；

¹ 下面的分类和描写引自 Hardcastle 等 (1999), 236-242 页。

接触电极的比率随时间的变化过程。指数的计算必须建立在假腭语音分区的基础上。动态变化指数能够展现假腭不同区域的电极的接触变化以及时间关系。图 6 汉语普通话“匣”和“渣”的齿龈、硬腭和软腭区域电极接触比率的动态变化指数。第三类指数随时间变化所形成的指数也可以是动态变化指数。

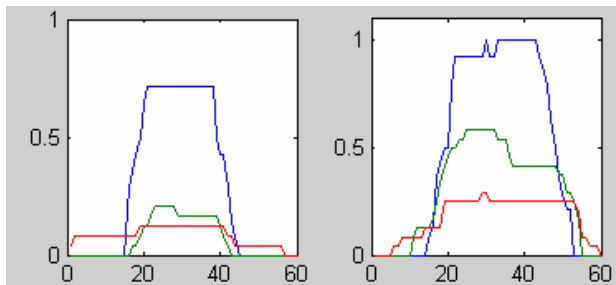


图 6 汉语普通话“匣”和“渣”齿龈、硬腭和软腭区域电极接触比率动态变化。蓝线为齿龈区域，绿线为硬腭区域，红线为软腭区域。

5 EPG 的应用

由于电子腭位能够反应舌和硬腭接触的过程，所以在言语疾病诊断和治疗中有很多用处。在言语疾病诊断中，医生往往需要判断病人的病症是语音知识层面的问题还是语音实现层面上的问题。如果是语音知识层面的问题，则说明病人无法正确感知自己母语的不同音位的区别。如果是语音实现层面上的问题，则说明病人能够区分不同音位的差别，但是控制发音器官的神经或者肌肉发生了病变。言语治疗方面，EPG 能够通过各种视觉的手段对病人进行发音能力的恢复。

电子腭位在语言研究和言语工程也有重要的贡献。到目前位为止，EPG 是唯一能够以较高时间精度来对舌的运动方式进行记录的仪器，因而广泛用于研辅音的成音过程以及连续语流中舌头的运动的研究。最后，EPG 和 MRI 以及 X 光数据可以用于构建舌运动的三维模型，因而可以解释许多言语产生过程中的语音现象。

在中国，使用电子腭位对汉语进行研究以及开展言语疾病的诊断和治疗刚刚起步。中国社会科学院民族学和人类学研究所已经建立了一个汉语普通话的电子腭位数据库。北京大学也正在着手建立更加全面的汉语普通话的电子腭位数据库。

参考文献

- [1] Byrd, D. et al. 1995. Using regions and indices in EPG data reduction. *Journal of Speech and Hearing Research* 38: 821-827
- [2] Wrench. A. 2007. Advances in EPG palate design. *Advances in Speech-Language Pathology*. 9(1):3-12
- [3] Shibata, et al.. 1978. A new portable type unit for electropalatography. *Ann Bull RILP*. 12: 5-10
- [4] Hardcastle, W.J. et al. 1991. Visual display of tongue-palate contact: electropalatography in the assessment and remediation of speech disorders. *International Journal of Language& Communication Disorders*. 26: 41-74
- [5] WinEPG Users Manual (Revision 1.9)
- [6] Hardcastle, W.J. et al. 1999. Coarticulation: Theory, Data and Techniques. CUP.
- [7] Farnetani, E. 1989. an aritulatory study of voicing in Italian by means of dynamic palatography. *Speech Research* 89, *Budapest*: 395-398
- [8] Barry, A. 1989. Measuring coarticulation and variability in tongue contact patterns. *Clinical Linguistics & Phonetics*. 3(1):39-47
- [9] Recasens, D. et al. 1993. An electropalatographic study of alveolar and palatal consonants in Catalan and Italian. *Language and Speech*. 36(2/3): 213-234
- [10] Fontdevila, J. et al. 1994. The contact index method of electropalatographic data reduction. *Journal of Phonetics* 22: 141-154.
- [11] 李俭等. 2004. 汉语普通话动态腭位的数据缩减方法. *现代语言学与语音学研究*, 天津社会科学出版社, 主编: 路继伦, 王嘉龄, 26—31
- [12] 平悦玲. 2005. 上海方言语音动态腭位研究. 香港. 香港文汇出版社