

一种数字助听器的自适应验配方法，其特征包括以下步骤：

1.语音信号的采集及验配模型的建立

(1-1) 语音信号的采集

本发明将每帧语音信号划分为 11 个频段，各频段节点频率分别为 125, 250, 500, 750, 1k, 1.5k, 2k, 3k, 4k, 6k, 8k (Hz)。数字助听器由麦克风采集一帧输入语音信号 $x(n)$ ， n 表示离散时间点，将 $x(n)$ 通过分析滤波器组 $H_1(z), H_2(z), \dots, H_{11}(z)$ 分解为 11 个子带信号，各滤波器均为 6 阶的 IIR 滤波器，滤波频段如前所述，滤波器输出子带信号为：

$$y_k(n) = x(n) * h_k(n) \quad (\text{式 1})$$

上式中， k 表示子带号， $k = 1, 2, \dots, 11$ ， $y_k(n)$ 表示子带 k 的输出， $h_k(n)$ 表示第 k 个滤波器单位脉冲响应。

(1-2) 计算各子带声压级

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{n=1}^N p^2 \Delta t} = \sqrt{\frac{1}{N \Delta t} \sum_{n=1}^N p^2 \Delta t} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p^2} \quad (\text{式 2})$$

其中， p 为瞬时声压，即语音信号在某一时刻的采样值。 N 为一帧语音信号的采样点数。将上式取 10 为底，再乘以 20，则可得到声压级的计算公式：

$$L_p = 20 \lg \frac{p_e}{p_{ref}} (dB SPL) \quad (\text{式 3})$$

式 (3) 中 p_{ref} 为基准声压，在空气中基准声压一般取 $2 \times 10^{-5} Pa$ 。

(1-3) 验配模型的建立

本发明采用响度曲面法作为听力补偿的方法，在该三维模型中， x 轴为语音信号的频率 (Hz)， y 轴为语音信号的声压级 (dB SPL)， z 轴为听力补偿 (dB SPL)。对于某一帧语音信号的特定频段子带信号，计算其声压级 L_p 后，通过响度曲面三维模型即可确定所需补偿的声压级。响度曲面采用二维高斯模型，其公式如下：

$$AL(f, L_p) = \sum_{i=1}^5 Gauss_k(\mu_{k1}, \sigma_{k1}, \mu_{k2}, \sigma_{k2}, \rho_k, h_k, \pm) \quad (\text{式 4})$$

其中， f 为子带语音信号的中心频率 (Hz)， L_p 为该子带语音信号的声压级 (dB SPL)，

$AL(x, y)$ 为该子带语音信号的听力补偿 (dB SPL)。 $\mu_{k1}, \mu_{k2}, \sigma_{k1}, \sigma_{k2}$ 分别为第 k 个高斯过程的两个均值和方差， ρ_k 为相关系数， h_k 为峰值， \pm 表示高斯过程的值可取正或负。

2.种群初始化

批注 [MA1]: 最好给出 Gauss() 的具体形式

(2-1) 参数选择

待优化参数为式 (4) 所确立模型中 35 个参数, 即 $\mu_{xi}, \sigma_{xi}, \mu_{yi}, \sigma_{yi}, \rho_i, h_i, \pm$, 其中, $i = 1, 2, \dots, 5$ 。一旦这 35 个参数确定, 则验配完成, 对于任意时刻的语音信号, 均可通过式 (4) 计算得到所需增益值。

(2-2) 参数编码

μ_{xi} , 取值 0~90, 步长 2.81, 5 比特编码; σ_{xi} , 取值 1~90, 步长 2.81, 5 比特编码; μ_{yi} , 取值 0~3.9, 步长 0.12, 5 比特编码 (以 10 为底); σ_{yi} , 取值 0~3.9, 步长 0.12, 5 比特编码 (以 10 为底); ρ_i 取值 0~1, 步长 0.125, 3 比特编码; h_i 取值 0~30, 步长 1.88, 4 比特编码; \pm 取值 1 或 -1, 1 比特编码。

3. 参数优化

采用交互式遗传算法作为参数优化方法, 其步骤如下:

(3-1) 染色体选择

考虑到人对语音的分辨能力以及患者的评价疲劳度, 将适应度分为 5 个等级, 分别对应 5 个不同的具体数值, 如 1, 4, 9, 16, 25。这五个等级分别对应 5 个不同的评价等级, 即“劣”, “差”, “中”, “良”, “优”。对于每组特定参数形成的语音, 患者听取该段语音后, 根据自己的主观感受进行 5 个等级的评价, 若患者做出的评价为“良”, 则改该组语音信号所对应的适应度值即为“良”所对应的数值, 该数值将作为改组参数遗传到下一代的概率依据。

此外, 按照超几何算子的方法选取适应度值, 即对于评价等级 N (本发明选择为 5), 第 n 个等级对应的遗传概率为:

$$P_n = \frac{1}{\gamma * n^q} \quad (\text{式 } 5)$$

其中, γ 的计算方式如公式 (6):

$$\gamma = \sum_{k=1}^N \frac{1}{k^q} \quad (\text{式 } 6)$$

q 为常数, 取值 0.5。

(3-2) 交叉操作

首先进行染色体的配对, 对于染色体 $a_i = \{g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{iN}\}$ 以及染色体 $b_j = \{g_{j1}, g_{j2}, \dots, g_{jN}\}$, 定义 a_i 和 b_j 的不相关指数为:

$$r(a_i, b_j) = \sum_{k=1}^N g_{ik} \oplus g_{jk} \quad (\text{式 } 7)$$

批注 [MA2]: 中间那个运算符号的含义, 要交代一下

采取非等概率配对策略, 给配对池中不相关指数较大的个体赋予较大的被选概率, 配对染色体的选定过程如下: 首先随机选定一个染色体 x , 染色体的配对池为 $\{y_1, y_2 \dots y_L\}$, 要在配对池中选定其中一个染色体和染色体 x 进行交叉操作。配对池中个体 y_i 被选择与个体 x 进行配对交叉的概率定义如下:

$$P(y_i/x) = \frac{1}{L} \left(1 + \lambda \frac{r(x, y_i) - r_{avg}}{r_{max} - r_{min}} \right), i = 1, 2, \dots, L \quad (\text{式 } 8)$$

式中, λ 为常数, $0 \leq \lambda \leq 1$, $r_{avg} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L r(x, y_i)$, $r_{max} = \max\{r(x, y_i), i = 1, 2, \dots, L\}$, $r_{min} = \min\{r(x, y_i), i = 1, 2, \dots, L\}$ 。

交叉点的选取方法为: 首先确定有效交叉点区域, 然后在有效交叉区域中随机选择一个位置作为交叉点, 交叉区域为 (n_{min}, n_{max}) , n_{min} 以及 n_{max} 由式 (9) 确定:

$$\begin{cases} n_{min} = \min\{k/g_{ik} \neq g_{jk}, k = 1, 2, \dots, N\} \\ n_{max} = \min\{k/g_{ik} \neq g_{jk}, k = 1, 2, \dots, N\} \end{cases} \quad (\text{式 } 9)$$

(3-3) 变异操作

首先通过轮盘赌方法判断某个染色体是否要变异, 变异概率 P_m 的大小由式 (10) 确定:

$$P_m = \begin{cases} P_{max} \left\{ \exp \left(-\frac{f_{max} - f_{avg}}{f_{max} - f_{avg}} \right) \right\} \\ P_{max} f_{avg} \end{cases} \quad (\text{式 } 10)$$

其中, P_{max} 取值 0.2, f_{max} 选取式 (5) 中的最大值, f_{avg} 为式 (5) 中所有值的平均。

若某个染色体通过上述方法确定为待变异染色体后, 在该染色体中随机选取一个位置作为变异点, 在变异点 (包括该点) 后所有编码 0,1 互换, 形成新的染色体并加入到新的种群中。

4. 用户反馈

对应于 8 个染色体, 会形成 8 个输出信号, 用户逐一听取每个染色体对应形成的语音信号, 主观判断该语音信号的好坏, 并根据判断结果进行 5 级评价 (评价等级如式 5), 该评价将作为下一代进化的选择操作的依据。重复步骤 3 中 (3-1)、(3-2)、(3-3) 以及步骤 4, 直到用户觉得当前语音信号已经满意, 或者进化代数达到上限 (30)。

批注 [MA3]: 何种条件下用户满意? 需要用一个变量或公式具体量化一下