

论文

基于忆阻的嗅觉感知及跨模态联想电路设计与实现

丁明慧^{1,2,3}, 王小平^{1,2,3*}, 曾志刚^{1,2,3}

1. 华中科技大学人工智能与自动化学院, 武汉 430074
2. 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 武汉 430074
3. 类脑智能系统湖北省重点实验室, 武汉 430074

* 通信作者. E-mail: wangxiaoping@hust.edu.cn

收稿日期: 2023-05-12; 修回日期: 2023-06-21; 接受日期: 2023-07-10; 网络出版日期: 2023-12-11

国家自然科学基金(批准号: 62236005, 61936004, U1913602)资助项目

摘要 嗅觉研究在环境监测、灾害预警等领域的重要性凸显, 联想记忆是生物大脑处理信息的机制, 探索嗅觉感知及其跨模态联想对于扩展类脑感知在机器人技术上的应用和发展十分必要。本文基于忆阻设计了嗅觉感知与跨模态联想电路, 模拟了嗅觉的基本功能及其情感、记忆效应, 主要包括 3 个模块: 气味识别模块以忆阻嗅觉神经元为基础实现对两种气味的识别; 高级感知模块搭建情感产生电路生成嗅觉情感, 并利用忆阻阻值变化实现对其他模态记忆巩固的影响; 延时跨模态联想模块基于忆阻变化规律设计延时电路和联想记忆电路, 以情感为强化物实现了嗅觉与其他模态信息的延时联想。最后设计 4 种情景进行实验, 仿真结果表明该电路可以实现嗅觉的感知功能和与其他模态信息的跨模态联想, 为机器人嗅觉感知提升提供了可能。

关键词 忆阻, 嗅觉感知, 情感, 联想记忆, 跨模态信息关联

1 引言

忆阻是由蔡少棠教授^[1]于 1971 年根据电路完备性理论预言出来的第 4 种基本元件, 弥补当时缺少的将电荷和磁通量关联起来的电路元件, 将其定义为一种表现电荷和磁通量关系的非线性无源两端电器元件。2008 年 HP 实验室制作出第一款忆阻^[2], 其不波动性、非线性、低功耗和良好的可拓展性使得忆阻有可能成为新的计算形式, 越来越多的研究人员将研究方向聚焦这种新型器件, 忆阻在信息存储^[3~5]、逻辑运算^[6,7]、图像处理^[8,9]等领域有巨大的应用潜力。忆阻最独特的优势在于其阻值可变性, 能在高低电阻之间进行切换, 这种特性与生物大脑内神经元和突触的动态结构功能很相似^[10]。此外, 忆阻尺寸在纳米级别, 具有低功耗特点, 在大规模集成和功耗问题具有显著优势。忆阻的以上特点使得忆阻成为类脑仿生电路设计的重要元器件。

引用格式: 丁明慧, 王小平, 曾志刚. 基于忆阻的嗅觉感知及跨模态联想电路设计与实现. 中国科学: 信息科学, 2023, 53: 2561–2576, doi: 10.1360/SSI-2023-0137
Ding M H, Wang X P, Zeng Z G. Memristive circuit design and implementation of olfactory perception and cross-modal association (in Chinese). Sci Sin Inform, 2023, 53: 2561–2576, doi: 10.1360/SSI-2023-0137

随着类脑智能在机器人技术上的发展, 其应用越来越广, 人们对嗅觉感知能力和跨模态联想要求也越来越高。近年来, 嗅觉在环境监测、灾害预警、无人救援等领域的重要性凸显, 嗅觉研究也得到了许多研究学者的关注, 电子鼻是研究的典型成果^[11~14], 可以用来识别气体, 其工作可以简单概括为: 传感器阵列 – 信号预处理 – 神经网络或各种算法 – 计算机识别, 经常需要大量的计算资源。Iwata 等^[15]曾提出可以用忆阻来提取传感器信息。不久, Hirota 等^[16]利用忆阻阻值存储嗅觉特征, 识别两种气味, 实现了嗅觉感知的基本功能。除了气味识别, 也有研究学者注意到嗅觉情感, Dai 等^[17]基于脑电信号数据用聚类分析的方法进行嗅觉情感计算。相比于软件计算存算分离造成的高功耗, 忆阻在嗅觉感知方向具有很大的应用潜力。大多情况下, 嗅觉感知往往同其他模态信息同时出现, 在不同模态具有相同特质时, 就会出现跨模态联想^[18~20], 使得大脑能够快速处理复杂信息。联想记忆的经典案例巴普洛夫 (Pavlov) 的狗就体现了听觉和味觉的跨模态联想, 在 2010 年 Pershin 等^[21]首次利用忆阻作为突触实现了联想记忆功能, 是利用电路再现生物学习记忆行为的重要一步。随后, 基于忆阻的联想记忆仿生电路设计被进一步探索, Ziegler 等^[22]和 Bichler 等^[23]利用忆阻材料搭建简单电路实现联想记忆功能, Liu 等^[24]在上述基础上改进神经元电路, 并加入遗忘行为和 SRDP (spike-rate-dependent plasticity) 机制丰富电路功能, Wang 等^[25]和 Sun 等^[26]继续改进电路, 实现学习率和遗忘率的更改, 使得忆阻联想记忆电路功能更加类脑, 这些研究为多模态联想打下良好的基础。基于上述研究背景, 本文利用忆阻搭建了嗅觉感知功能实现和跨模态联想的类脑电路, 主要贡献如下:

- (1) 根据气味识别的神经机制, 设计以嗅觉神经元为基础的气味识别忆阻电路, 更加符合生物真实特征地实现了嗅觉感知的基础功能;
- (2) 基于气味识别结果, 利用易失性忆阻和非易失性忆阻分别设计电路模拟嗅觉情感生成和嗅觉情感对其他模态信息的记忆转化的影响, 实现嗅觉感知在情感、记忆层面的高级功能;
- (3) 利用忆阻的阻值变化规律设计延时电路和以情感为强化物的联想记忆电路, 实现情感影响下嗅觉与其他模态的延时跨模态关联。

2 嗅觉感知与跨模态联想

嗅觉系统是哺乳动物重要且基本的感觉系统, 解剖学上, 嗅神经的神经纤维除了投射到与嗅觉相关的脑区外, 还大量投射到海马、杏仁核这些与情感、记忆相关的脑区^[27,28]。所以嗅觉系统除了维系正常的嗅觉功能外, 也在情感、记忆过程中发挥着重要的作用, 例如橙子、薄荷、苹果的香味会让人产生愉悦的情感体验, 而丁酸、乙酸的气味会让人感觉到愤怒或厌恶。

情感是大脑处理信息的一种特殊方式, 有学者将情感简单的分为积极和消极两种^[29]。研究表明积极的情感能易化积极信息的加工和回忆, 消极的情感能易化消极信息的加工和回忆^[30]。由于参与嗅觉处理的中心结构主要包括杏仁核、海马体等与情感和记忆相关的神经核团, 嗅觉线索相比于视觉、听觉线索能更有效地诱导记忆存储和检索。在记忆的存储中, 长短时记忆的转化是十分重要的一部分内容, 研究表明情感内容比中性内容更容易记住^[31], 可见情感能在记忆存储中发挥一定的作用。不仅如此, 人类记忆具有情感一致性^[32], 即情感有助于检索相同情感的记忆, 也就是说当人们处于愉悦的状态时, 更容易检索令人开心的记忆, 反之当人们处于伤心的状态时, 更容易想起令人不高兴的事情。而这种记忆检索实际上是涉及到的关联信号在神经细胞中进行整合和存储, 可以认为是一种联想记忆, 是认知信息存储的一种表现形式。当我们闻到香味时, 很容易联想到温暖的阳光、动听的音乐这些带有积极情感色彩的其他模态记忆, 反之, 当闻到臭味时, 阴雨天的景象仿佛能出现在眼前, 即使气味突然消失, 这些联想的记忆也依旧浮现在脑海中, 这说明联想具有延时效应。

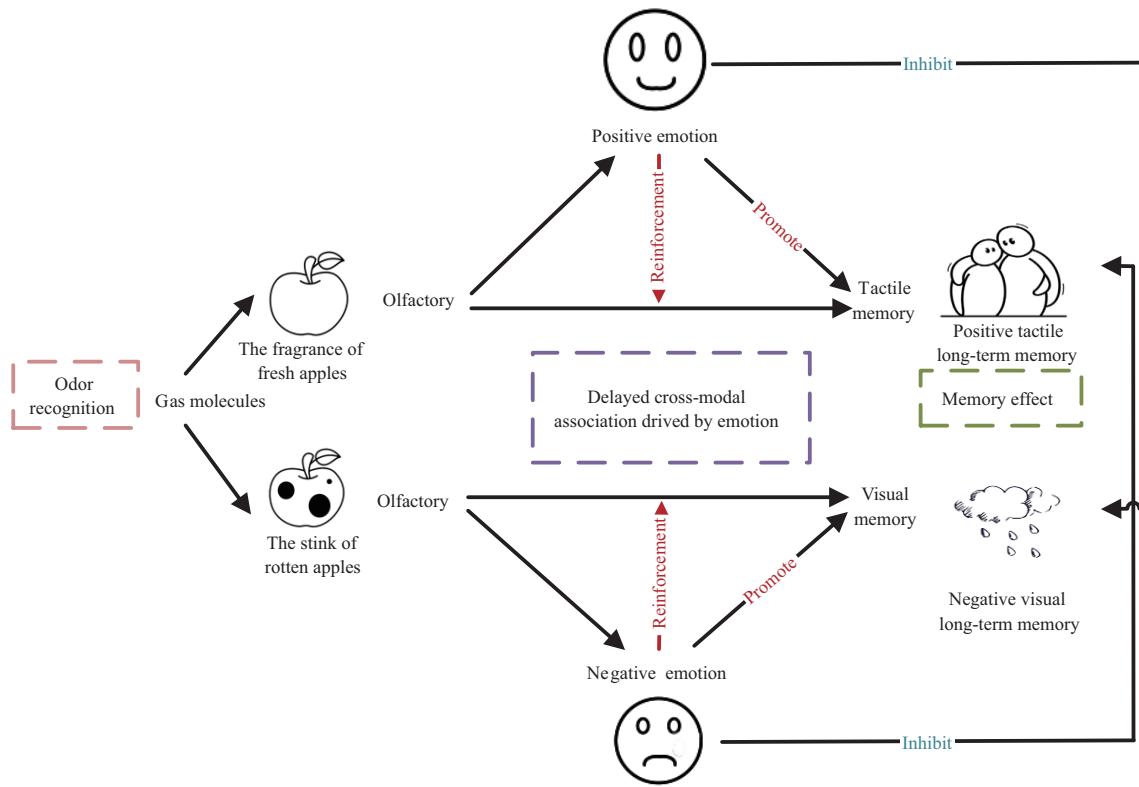


图 1 (网络版彩图) 嗅觉感知与跨模态联想框架
Figure 1 (Color online) Framework for olfactory perception and cross modal association

本文的嗅觉感知与跨模态联想框架如图 1 所示, 新鲜的苹果香味与腐烂苹果气味中具有较为明显差异的是乙烯、乙醇、二氧化碳这 3 种气体的浓度^[33], 生物的嗅觉系统能够通过嗅觉神经元对不同的气体浓度做出不同的响应, 在嗅皮层中实现对两种不同气味的识别, 进而产生不同的情感。本文基于新鲜苹果和腐烂苹果散发的 3 种显著气体浓度信息, 实现对新鲜苹果气味和腐烂苹果气味的识别, 对应地产生积极或者消极的情感。在情感产生的过程中, 也会接收其他模态的信息, 根据情感类型可以对不同情感模态信息的存储进行影响, 相同情感类型的信息能够更快地被处理, 记忆更容易从短时记忆转换为长时记忆。温暖的拥抱是一种可以令人产生积极情感的触觉信息, 当与产生积极情感的气味同时出现时, 情感可以加快对于拥抱记忆的长时记忆转换, 当顺利转换为长时记忆时, 如果气味仍旧存在, 可以在情感的强化作用下建立这种气味与触觉记忆的跨模态联想, 当这种气味再次出现, 可以联想到积极的触觉记忆, 气味消失的短时期内也依旧能够联想, 这种延时联想更符合实际, 并且有效地利用了信息。反之如果气味产生的情感与其他模态的信息产生的情感不同(如新鲜苹果的气味可以产生积极的情感, 但是阴雨天是会产生消极情感的视觉信息), 那么情感将会对其他模态信息的长短时记忆转化起到抑制的作用。

3 忆阻模型

根据忆阻阻值的稳定性, 忆阻可以分为易失性忆阻 (volatile memristor, VM) 和非易失性忆阻 (nonvolatile memristor, NVM)。

表 1 易失性忆阻参数

Table 1 Parameters of volatile memristor

Parameters of VM	α	β	γ	δ	η_1	η_2	λ	σ	θ
Settings	1e-4	0.2	1e-3	1	4	2	0.05	0.0001	0.01

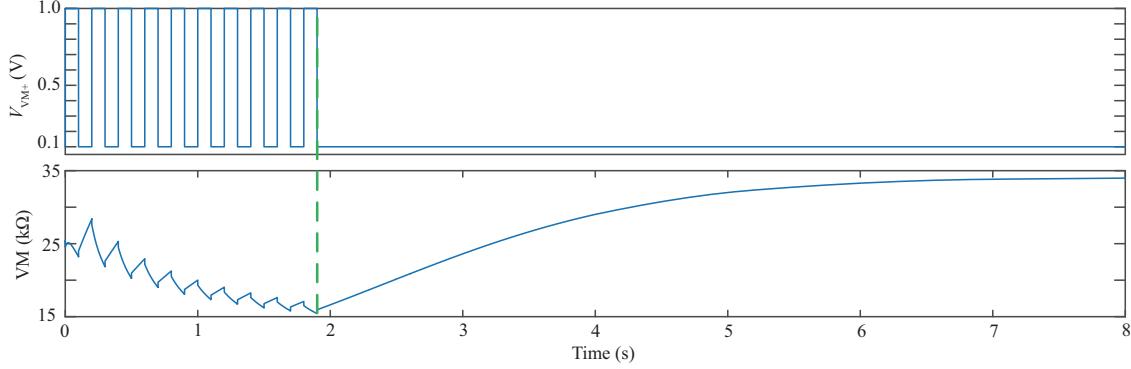


图 2 (网络版彩图) 易失性忆阻阻值变化

Figure 2 (Color online) Memristance change of volatile memristor

3.1 易失性忆阻

易失性忆阻不仅在施加电压时阻值会发生变化, 当外加电压消失时, 忆阻会自发地恢复到初始状态, 这使得易失性忆阻具有遗忘效应。本文使用的易失性忆阻模型为^[34]

$$i = (1 - x) \alpha [1 - e^{-\beta \nu}] + x \gamma \sinh(\delta \nu), \quad (1)$$

$$\dot{x} = \left(\lambda [e^{\eta_1 \nu} - e^{-\eta_2 \nu}] - \frac{x - \varepsilon}{\tau} \right) f(x), \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \sigma [e^{\eta_1 \nu} - e^{-\eta_2 \nu}] f(x), \quad (3)$$

$$\dot{\tau} = \theta [e^{\eta_1 \nu} - e^{-\eta_2 \nu}], \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{(\text{sign}(\nu) + 1)(\text{sign}(1 - x) + 1) + (\text{sign}(-\nu) + 1)(\text{sign}(x) + 1)}{4}, \quad (5)$$

其中 i 是电流, ν 是施加电压。 x 表示被归一化为 $[0, 1]$ 的类欧姆传导沟道, $x = 0$ 表示完全由肖特基 (Schottky) 控制的导通, $x = 1$ 表示完全由隧穿控制的导通。 α 是肖特基势垒区的势垒高度, β 是肖特基势垒区的耗尽宽度, γ 是隧穿的势垒高, δ 是导电区的有效隧穿距离, η_1 和 η_2 是正负电压的界面效应, 它们都是由材料决定, 与 x 有关。 ε 是类欧姆传导通道的保留率, 在 $[0, 1]$ 之间, λ 是控制 x 变化率的正常数, τ 是扩散时间, σ 和 θ 是正常数, 由材料决定, $f(x)$ 是更好地描述忆阻动力学特性的窗函数。

本文使用的易失性忆阻模型参数如表 1 所示, 在该参数下, 模型的阈值略大于 0.1 V, 仿真结果如图 2 所示, 当施加 1 V 脉冲电压, 阻值减小; 当施加电压小于阈值后, 阻值会自动增加, 恢复初始阻值。

3.2 非易失性忆阻

与易失性忆阻不同, 非易失性忆阻在断电之后依旧可以保持断电前的阻值状态, 可用作信息的存

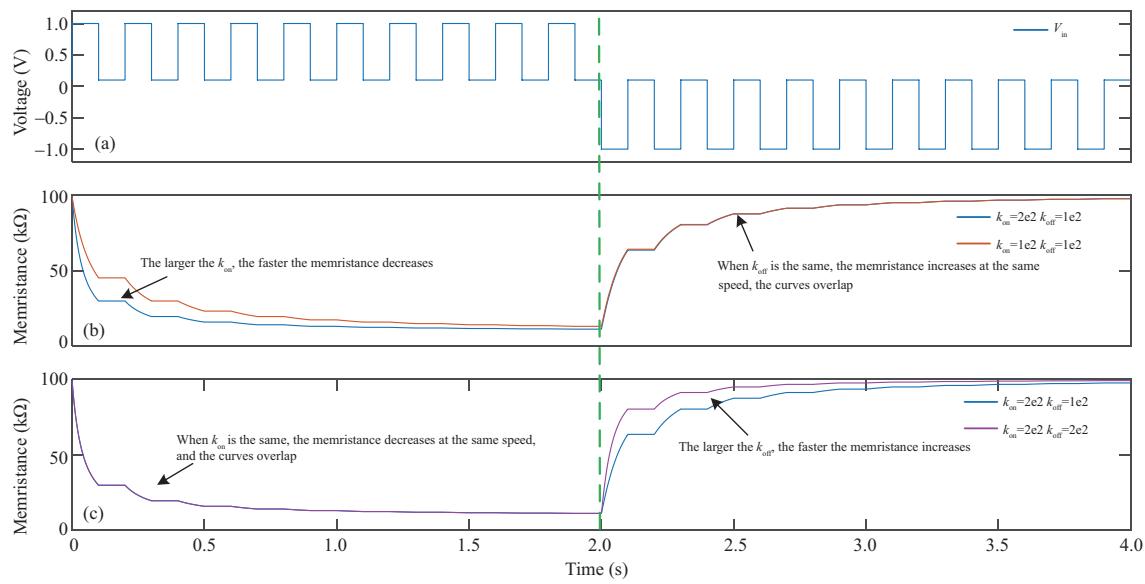


图 3 (网络版彩图) 不同参数设置的非易失性忆阻阻值变化

Figure 3 (Color online) Memristances change of nonvolatile memristors in different settings. (a) Input voltage; (b) memristances change in different k_{on} settings; (c) memristances change in different k_{off} settings

储。本文使用的非易失性忆阻模型是基于 AgInSbTe 忆阻提出, 定义如下^[35]:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \begin{cases} k_{on}\nu(t)f(x), & \nu(t) > V_{on} > 0, \\ 0, & V_{off} \leq \nu(t) \leq V_{on}, \\ k_{off}\nu(t)f(x), & \nu(t) < V_{off} < 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$f(x) = \begin{cases} (a(1-x))^p, & \nu(t) > 0, \\ (ax)^p, & \nu(t) < 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$\nu(t) = [R_{on}x + R_{off}(1-x)]i(t), \quad (8)$$

其中状态变量 x 是导电层的归一化宽度, 其导数与忆阻电流 – 电压数据匹配; $f(x)$ 是速度自适应状态变量函数, V_{on} 和 V_{off} 分别为正阈值电压和负阈值电压, k_{on} , k_{off} , a 和 p 是可以调整以描述不同忆阻器件的拟合参数, R_{on} 和 R_{off} 是忆阻阻值最小值和最大值, 对应状态变量为 $x = 1$ 和 $x = 0$ 时的忆阻状态. 当忆阻电压超过阈值电压时, 状态变量会发生变化, 从而改变忆阻的阻值.

仿真结果如图 3, 图 3(a) 为输入电压, 前 2 s 为正脉冲电压, 2~4 s 为负脉冲电压. 当施加电压为正且超过忆阻正阈值电压, 忆阻的阻值会减小. 如果施加的电压为负且超过负阈值电压, 忆阻的阻值将增加. k_{on} 和 k_{off} 可以用来控制忆阻阻值变化的速度, k_{on} 越大, 阻值减小越快, k_{off} 越大, 阻值增大更快. 图 3(b) 和 (c) 分别表示不同 k_{on} 和不同 k_{off} 时忆阻阻值的变化情况. 图 3(b) 显示了 k_{on} 分别为 $1e2$ 和 $2e2$ 时的阻值变化, 图中橙色曲线 ($k_{on} = 1e2$) 在阻值减小时速度比蓝色曲线 ($k_{on} = 2e2$) 更慢, 由于 k_{off} 相同, 阻值增大时速度相同. 图 3(c) 显示了 k_{off} 分别为 $1e2$ 和 $2e2$ 时的阻值变化, 图中紫色曲线 ($k_{off} = 2e2$) 在阻值增大时速度比蓝色曲线 ($k_{off} = 1e2$) 更快, 由于 k_{on} 相同, 阻值减小时速度相同.

表 2 非易失性忆阻参数
Table 2 Parameters of nonvolatile memristors

Parameters of NVM	M	M_1	M_2	M_3	M_4/M_5	M_6/M_7	M_8/M_9
$R_{on} (k\Omega)$	5	5	5	5	10	10	10
$R_{off} (k\Omega)$	100	100	100	100	100	100	100
$V_{on} (V)$	0.95	1.47	0.55	0.31	0.4	1.2	1
$V_{off} (V)$	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-1
k_{on}	3e3	3e3	3e3	3e3	9e1	2e2	3e3
k_{off}	3e3	3e3	3e3	3e3	3e3	3e3	2e1
a	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
p	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58

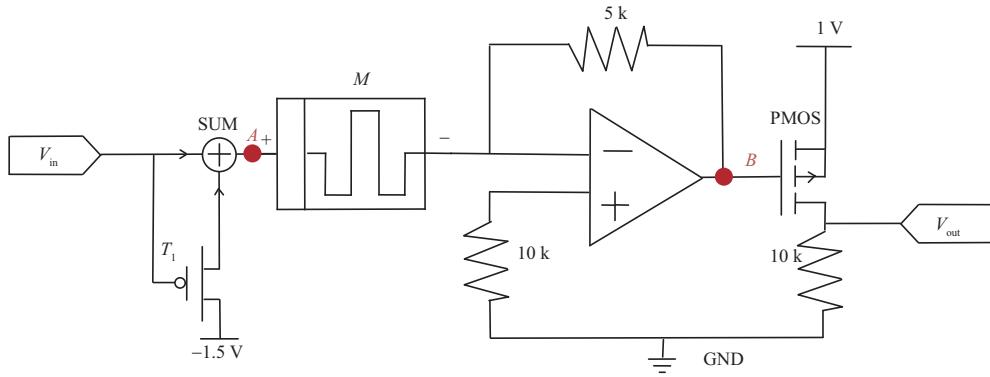


图 4 (网络版彩图) 嗅觉神经元电路设计图
Figure 4 (Color online) Circuit design of olfactory neurons

本文中, 非易失性忆阻的参数设置按照电路设计要求有所不同, 本文使用的非易失性忆阻参数如表 2 所示.

4 电路设计

4.1 嗅觉神经元电路设计

气味识别的神经机制可以描述如下, 嗅感受器细胞感受气体的浓度, 后将信息投射到嗅球层的嗅觉神经元, 由嗅觉神经元对气体信息进行预处理, 随后将信息输出到嗅皮层进行进一步处理, 产生嗅觉 [36]. 本文设计了一个基于忆阻的、阈值可变化的嗅觉神经元, 用于处理气体传感器的输出信号, 在这其中气体传感器相当于生物嗅觉系统中的嗅感受器细胞, 用于采集环境中某种气体的浓度, 随后由嗅觉神经元对浓度信息进行响应. 图 4 展示了嗅觉神经元电路的设计, 嗅觉神经元使用非易失性忆阻, 利用其阈值特性, 当输入信号超过非易失性忆阻 M 的阈值时, M 阻值迅速下降, 图中 B 点电压值将超过由 PMOS 管组成的开关阈值, 阈值约为 -0.1 V, 从而输出 1 V 的电压. 反之, 未超过阈值时, 由于 M 初始阻值远远大于 5 k, B 点电压值无法超过阈值, 神经元不会被激活. 该神经元还考虑了状态恢复, 当外界无输入时, 开关 T_1 将打开, 输出负向电压 -1.5 V, 超过 M 的负向阈值, 可以将忆阻阻值恢复到初始阻值, 神经元恢复到静息态.

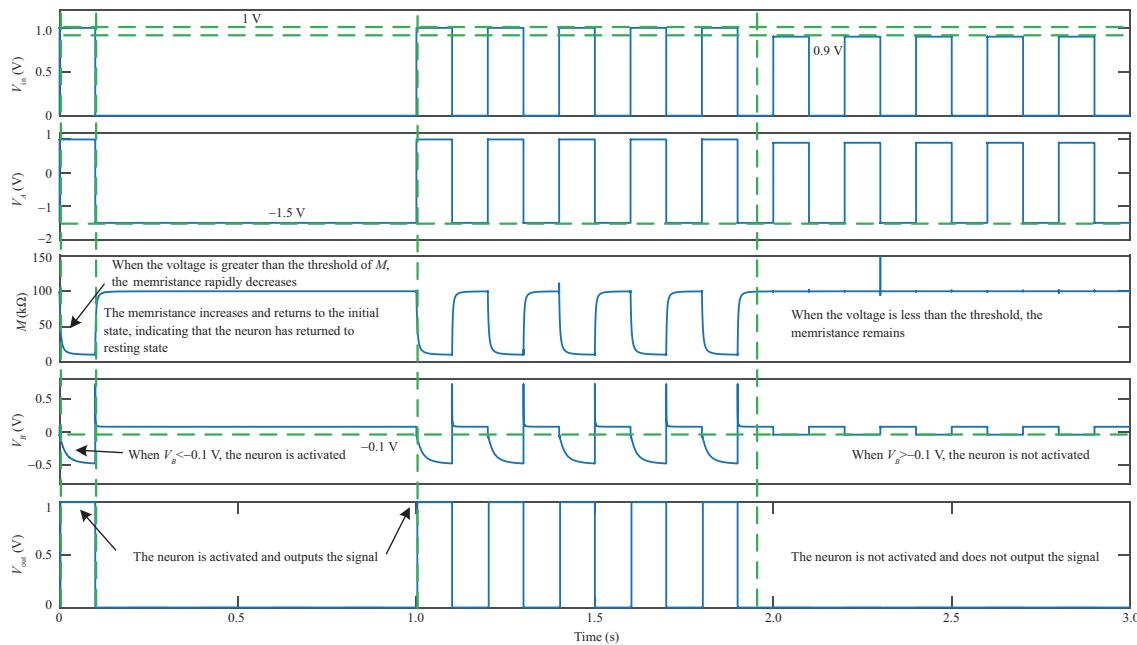


图 5 (网络版彩图) 嗅觉神经元电路仿真结果
Figure 5 (Color online) Simulation results of the olfactory neuron circuit

其仿真结果如图 5 所示, 此时忆阻 M 阈值设置为 0.95 V , 当输入 1 V 的电压时, 忆阻阻值迅速减小到 $5\text{ k}\Omega$, 使得放大器输出 -1 V 的电压, PMOS 管将输出 1 V 的信号, 表示神经元放电。当输入信号消失, 忆阻两端被施加 -1.5 V 的电压, 使得阻值迅速回到 $100\text{ k}\Omega$, 放大器输出电压过小, PMOS 输出 0 V , 此时神经元恢复静息态。多次实验后, 神经元放电仍正常。当输入 0.9 V 的电压时, 由于未超过忆阻阈值, 忆阻阻值不发生改变, PMOS 也无输出, 表示神经元未被激活。

4.2 嗅觉高级感知电路设计

嗅觉系统除了维系正常的嗅觉功能外, 也在情感、记忆过程中发挥着重要的作用。不同气味能产生不同的情感, 例如新鲜苹果的香味能让人产生愉悦的情感, 根据情感一致性原理, 大脑会更加关注积极的事物, 可以加快对积极记忆的长短时记忆转化处理, 反之腐烂的苹果气味使人感到消极, 加快对消极记忆的处理, 这种情感主导的选择性记忆巩固就是嗅觉的高级感知效应。

本文基于以上原理设计了基于忆阻的嗅觉高级感知电路(图 6)。高级感知电路的输入信号是嗅觉系统基本功能气味识别的输出, 左侧虚线框内为嗅觉情感产生电路, 基于气味识别的输出, 可以生成消极或积极的情感, 主要由易失性忆阻 VM_1 , VM_2 和电阻构成的分压电路和由 MOS 管组成的比较器构成, 当气体为香味时(输入信号为正电压), VM_2 阻值将迅速减小。后面连接的 N_2 管和 P_5 管构成比较器 2, 阈值约为 0.2 V 。随着 VM_2 阻值的减小, 当 VM_2 负极电压超过 0.2 V 时, 比较器将输出一个 0.5 V 的电压, 表明输入的气体可以产生积极的情感。当气体为腐烂臭味时(输入信号为负电压), VM_1 阻值将减小。 P_4 和 N_1 组成比较器 1, 阈值约为 -0.2 V , 当 VM_1 负极电压减小到 -0.2 V 时, 比较器将输出一个 -0.5 V 的电压, 表明腐烂臭味产生消极的情感。情感的产生将会影响大脑记忆转化, 对同种情感的短期记忆转化起到促进作用, 对不同情感的短期记忆转化起到抑制作用。右侧虚线框为嗅觉情感刺激下的长短时记忆转化电路, 长短时记忆转换期间, 受到 3 种信号的影响, 一个是重复次数信号 V_{re} ,

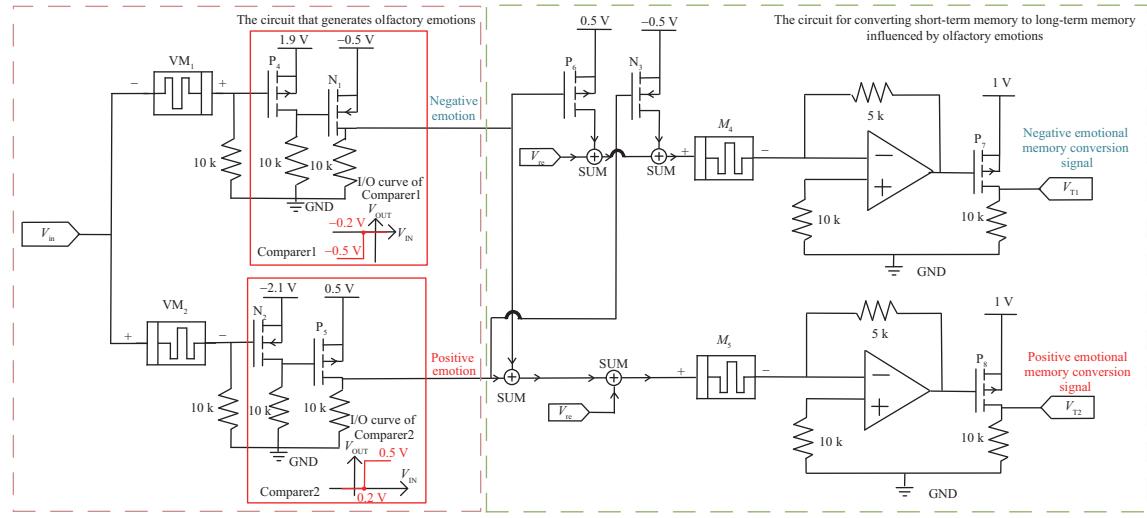


图 6 (网络版彩图) 嗅觉高级感知电路设计图

Figure 6 (Color online) Circuit design of olfactory advanced perception

这里简单设置为高电平 1 V、低电平为 0 的脉冲电压, 该电压超过了非易失性忆阻 M_4/M_5 的阈值, 表示重复信号可以促使短时记忆转换为长时记忆, 另外两个信号为同种情感的促进信号为 0.5 V 和不同情感的抑制信号 -0.5 V, 消极情感对于消极的视觉记忆能够起到促进作用, 此时 M_4 电压为 1.5 V, 使得该忆阻阻值变化加快, 表示消极视觉记忆转换为长时记忆的速度加快。随着忆阻阻值的减小, P_7 管栅极的电压不断减小, 超过阈值时输出 1 V 的电压, 表示长时记忆转换完成。反之对于积极的触觉记忆会使得 M_5 电压减小为 0.5 V, 阻值变化变慢, 表示积极触觉记忆转换为长时记忆的速度减慢。

4.3 延时效应电路设计

延迟效应主要体现在当人们闻到某种气味从而联想到其他事物时, 即使气味慢慢消失, 但是联想并不会随着气味的消失而消失, 而是会再持续一段时间。图 7 展示了延迟效应电路的设计, 延迟效应电路可由两个模块构成, 第 1 个电压控制模块用来控制非易失性忆阻 M_8 两端电压, 先由一个 N_4 和一个 P_{11} 对信号进行取反, 当输入信号超过 N_4 组成的开关阈值时, 会输出 -1.5 V 的信号, 否则输出 2 V 的信号, 由此实现对输入信号波形的取反。随后再经过压控开关 T_2 对信号进行编码, 编码电压 V_{en} 高电压为 0 V, 低电平为 -1.5 V。当输入信号结束时, 控制模块仍然会输出负向的脉冲信号将忆阻阻值进行复位。第 2 个时间控制模块是实现延时的关键, 由于 M_8 阻值的恢复需要一定的时间, 在这段时间内仍有较强的信号, 经过延迟效应电路可以延长输入信号时长, 从而延长联想效应。延长的时间可以通过调节 M_8 的参数来实现。

其仿真结果如图 8 所示, 输入信号经过 MOS 管, M_8 电压超过忆阻正阈值电压, 忆阻阻值会先减小, 在输入信号消失后, M_8 电压超过忆阻负阈值电压, M_8 阻值将逐渐恢复, 输出端仍然有信号, 直到忆阻负极电压大于 -0.2 V, 输出信号为 0, 在这段时间内借助 M_8 阻值的恢复时间实现了输入信号的延时。

4.4 整体电路设计

本文全电路设计如图 9。整体电路包括了 3 个功能模块, 其中粉色部分是以嗅觉神经元为基础的气味识别模块、绿色部分为嗅觉高级感知模块、蓝色部分为延时跨模态联想模块。其中长时记忆和短

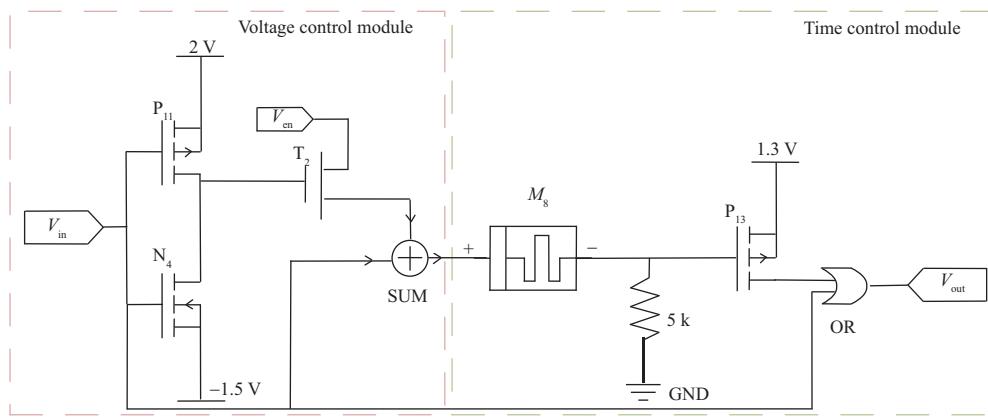


图 7 (网络版彩图) 延时效应模块电路设计图
Figure 7 (Color online) Circuit diagram of the delay effect module

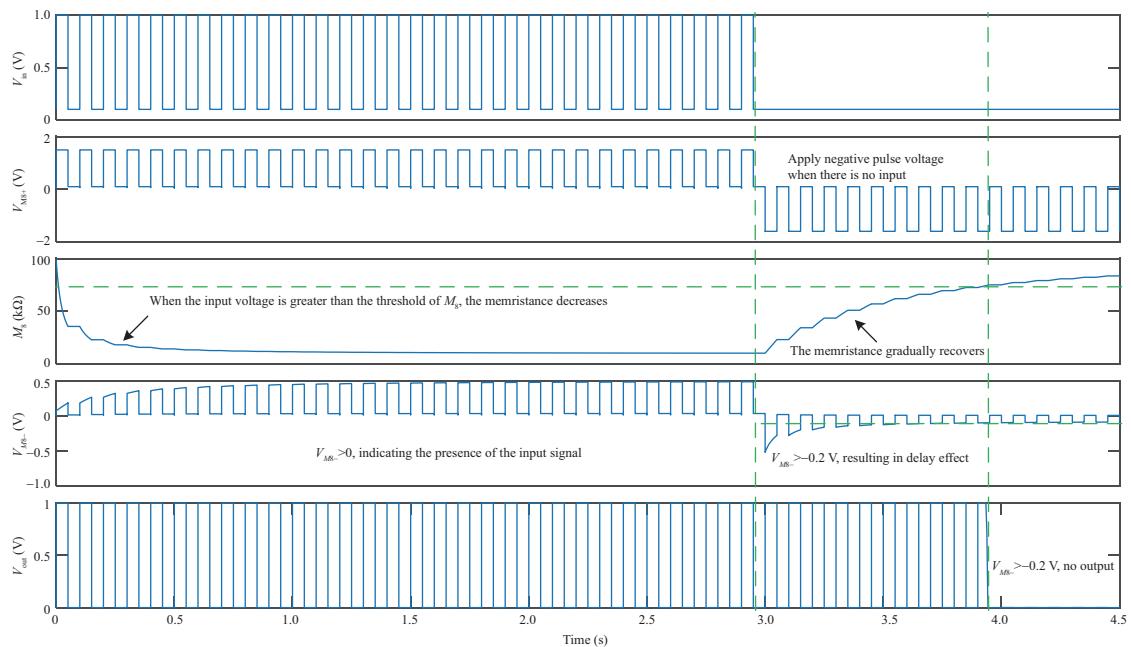


图 8 (网络版彩图) 延时效应模块电路仿真结果
Figure 8 (Color online) Simulation results of the delay effect module

时记忆的存储记忆可由忆阻阵列的读写来实现记忆的复现和存储。气味识别模块是基于 3 种气体信号的输入, 利用 3 个神经元的激活特性, 经过逻辑门模拟嗅皮层的信号处理实现两种气味的识别。绿色部分为高级感知模块, 基于气味识别模块的识别结果, 产生对应的情感并对消极视觉记忆和积极触觉记忆的长短时转化进度产生影响。蓝色部分的延时跨模态联想模块由延时功能和情感主导的联想功能构成, 前两个模块的输出结果作为联想实现的条件, 如果长时记忆形成后气味仍未消失, 在情感的主导下, 将建立起气味和长时记忆的联系, 此时非易失性忆阻 M_6/M_7 两端电压将超过其阈值, 使得忆阻阻值迅速增大, 表示联想建立进度。当 V_{D2}/V_{D1} 电压超过 P_9/P_{10} 管组成的开关阈值, 输出信号 V_{F2}/V_{F1} , 再经过延时模块输出信号 V_{a2}/V_{a1} , 表示实现气味到其他模态记忆的延时跨模态联想。

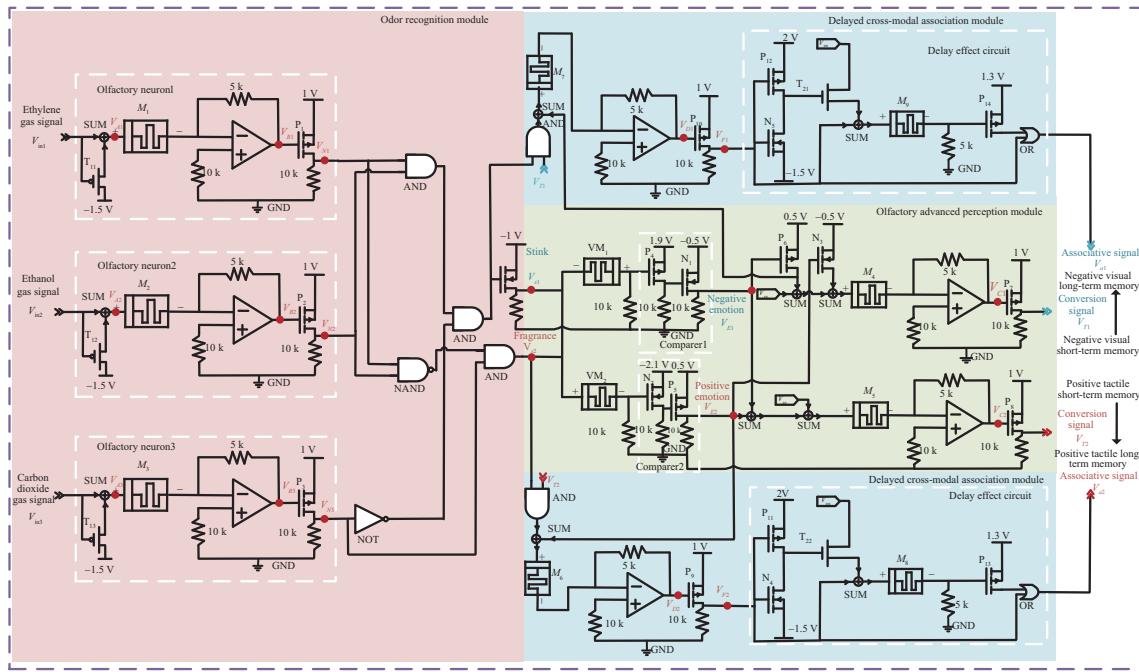


图 9 (网络版彩图) 整体电路设计图
Figure 9 (Color online) The complete circuit diagram

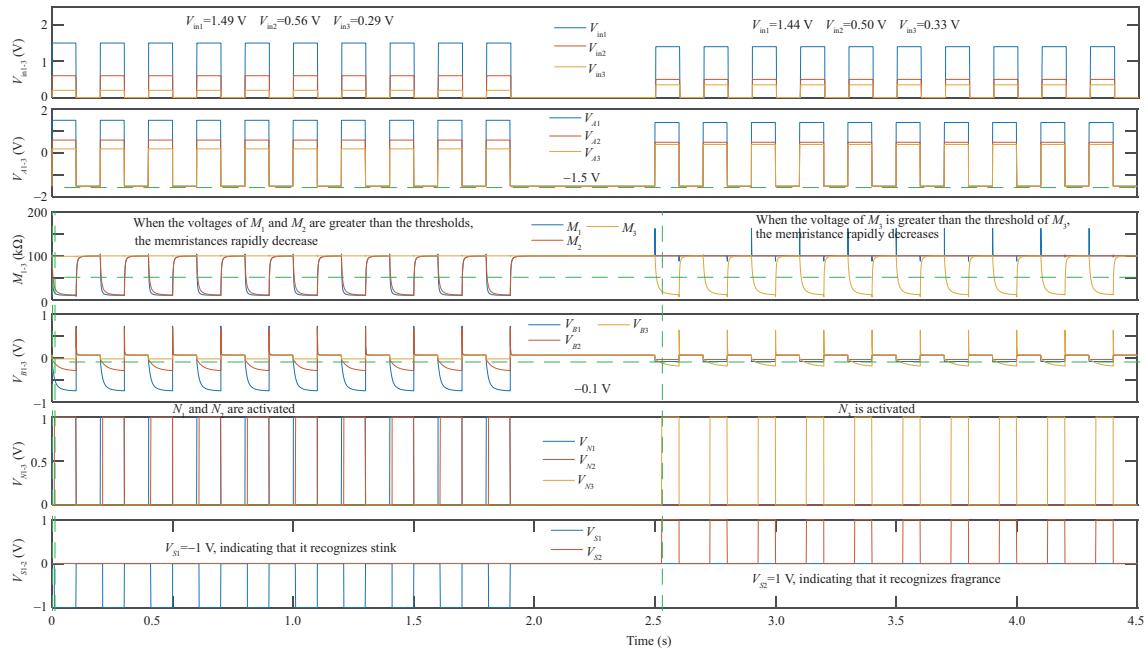


图 10 (网络版彩图) 情景一仿真结果图
Figure 10 (Color online) Simulation results of case 1

5 实验仿真结果和分析

本文设计了 4 种情景模拟, 对其仿真结果进行了分析。其中 V_{in1-3} 分别表示乙烯、乙醇和二氧化

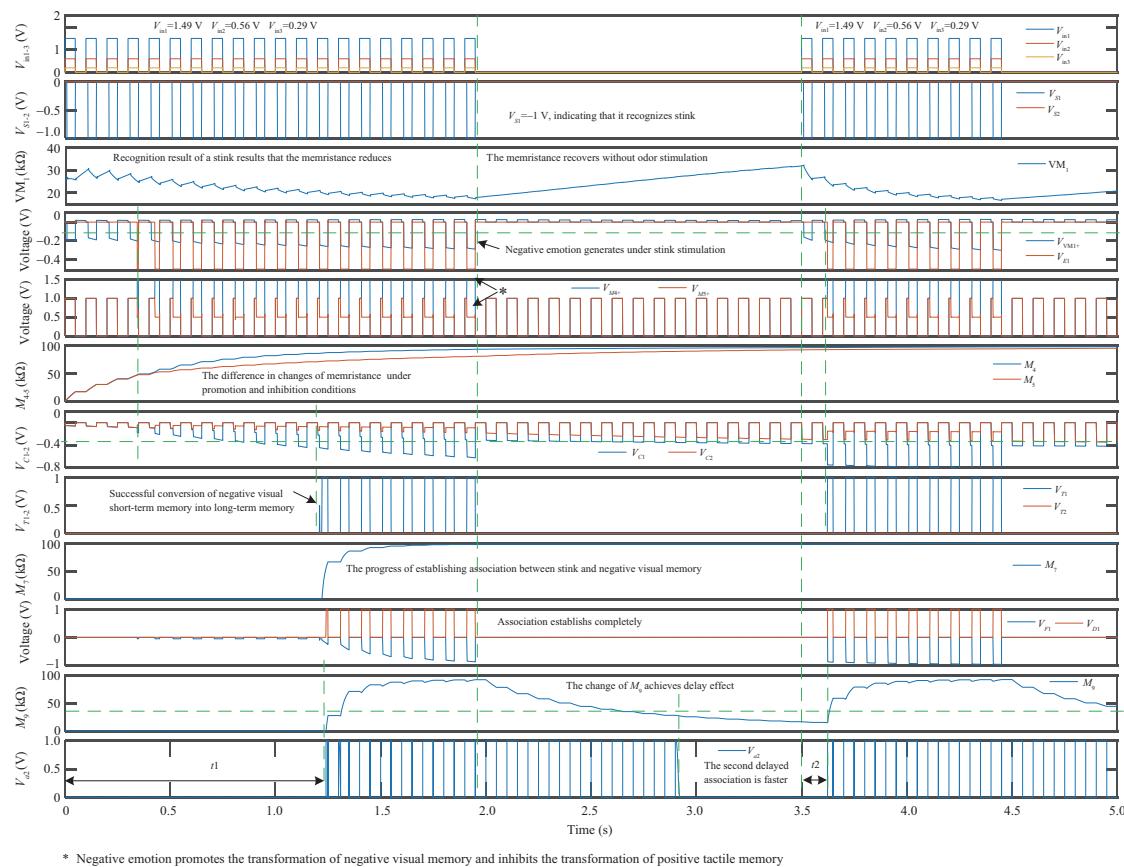


图 11 (网络版彩图) 情景二仿真结果图
Figure 11 (Color online) Simulation results of case 2

碳的浓度信号, V_{N1-3} 对应表示 3 个嗅觉神经元的输出信号, 输出 1 V 表示该神经元被激活, V_{S1} 和 V_{S2} 是气味识别的结果, V_{S1} 输出 -1 V, 表示识别出腐烂苹果气味, V_{S2} 输出 1 V 则表示识别出新鲜苹果香味, VM_1 和 VM_2 分别用于产生消极和积极的情感, 在气味识别结果信号作用下, 阻值将减小, V_{E1} 和 V_{E2} 会输出消极或积极情感信号, 通过影响 M_4 和 M_5 的阻值来影响消极视觉记忆和积极触觉记忆的长短时记忆转换, V_{T1} 和 V_{T2} 分别代表消极视觉记忆和积极触觉记忆是否转换的信号, M_6 的阻值变化表示新鲜苹果香味和积极触觉记忆建立联想的进展, M_7 的阻值变化表示腐烂臭味和消极视觉记忆建立联想的进展, V_{a1} 为腐烂臭味联想消极视觉记忆的信号, V_{a2} 为香味联想积极触觉记忆的信号。

情景一为气味识别实验, 用以识别新鲜苹果和腐烂苹果的气味, 可以根据比较乙烯、乙醇、二氧化碳的浓度来区分, 当乙烯传感器输出大于 1.47 V, 乙醇传感器输出大于 0.55 V, 二氧化碳传感器输出小于 0.31 V 时可以判断出苹果已腐烂, 反之表示依旧为新鲜苹果的气味。本文设置两组气体输入信号, 乙烯、乙醇、二氧化碳传感器输出分别为: $1.49, 0.56, 0.29$ 和 $1.44, 0.5, 0.33$, 分别代表腐烂苹果气味和新鲜苹果气味。仿真结果如图 10 所示。前 2 s 为第 1 组输入信号, 此时由于神经元 1 和神经元 2 的输入信号大于 M_1 和 M_2 的阈值, 使得这两个忆阻的阻值随着输入信号的变化而变化, B_1 和 B_2 点输出的负电压大于由 PMOS 管组成的开关阈值 -0.1 V, 输出 1 V, 表示神经元 1 和神经元 2 被激活, 而神经元 3 的输入太小无法引起 M_3 的阻值变化, 神经元 3 未被激活, 经过逻辑门, V_{S1} 输出 -1 V 的

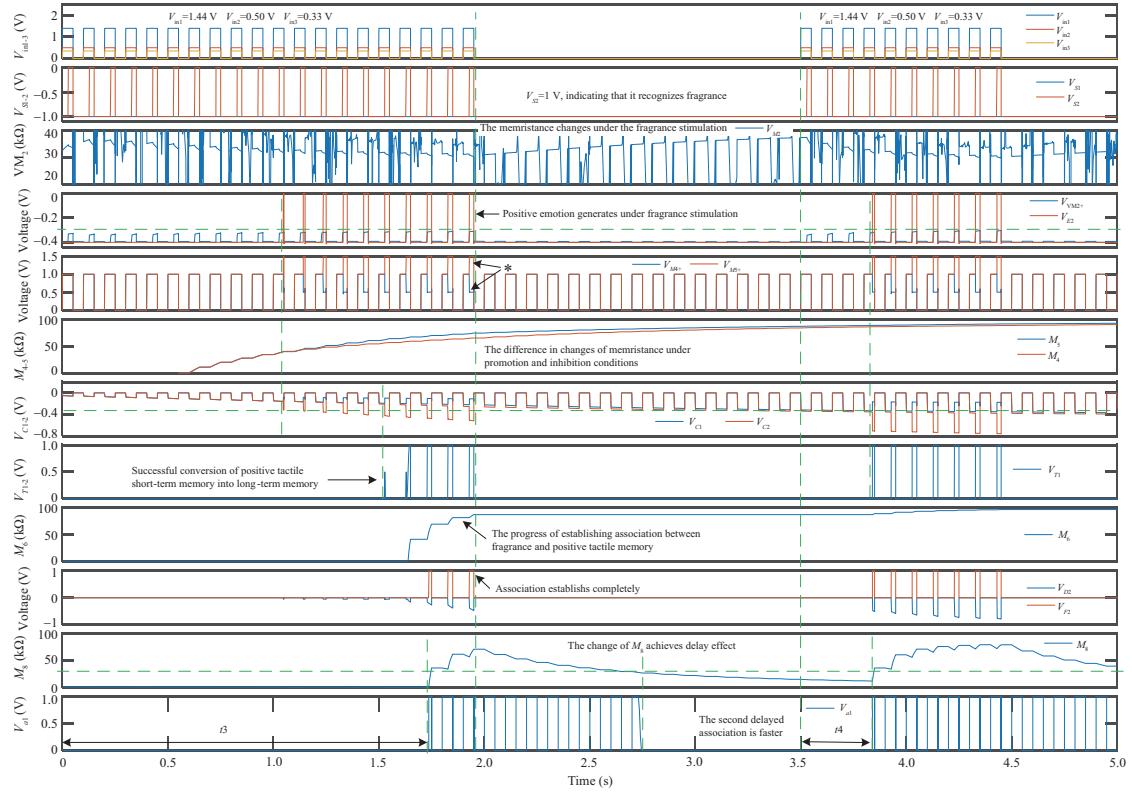


图 12 (网络版彩图) 情景三仿真结果图
Figure 12 (Color online) Simulation results of case 3

电压, V_{S2} 无输出, 表示识别出为腐烂苹果的气味; 2.5~4.5 s 输入第 2 组信号, 此时只有神经元 3 输入电压大于 M_3 的阈值, 引起 M_3 的阻值变化, 神经元 3 被激活, 经过逻辑门后 V_{S2} 输出 1V 的电压, V_{S1} 无输出, 表示识别出为新鲜苹果的气味。

情景二为第 1 组气体输入信号, 仿真结果可见图 11。此时 0~2 s 和 3.5~4.5 s 的输入为第 1 组输入信号, V_{S1} 输出 -1 V 的信号表示识别出腐烂苹果气味, 该信号随后到嗅觉情感产生模块经过 VM_1 , 超过该忆阻的阈值, 使得 VM_1 的阻值减小, 当 VM_1 正极电压小于比较器 1 的阈值, 比较器将输出 -0.5 V 的电压, 表示在腐烂苹果气味刺激下产生了消极情感, 与此同时, M_5 和 M_4 分别表示同时发生的积极触觉记忆和消极视觉记忆长短时转化进度, 当未受到情感影响时, 在重复信号 V_{re} 下进行转化, 当产生了消极情感后, 会对 M_4 再施加 0.5 V 正电压, 对 M_5 施加 -0.5 V 负电压, 忆阻两端的电压不同将会影响忆阻阻值的变化快慢, M_4 阻值增加更快, 使得 V_{C1} 更快达到 P_7 组成的开关阈值产生 1 V 的 V_{T1} 电压, 表明消极视觉的长短时记忆转化完成, 当该信号与 V_{S1} , V_{E1} 同时发生时, M_7 电压超过其阈值, 使得 M_7 的阻值增大, 表示腐烂气味与消极视觉记忆的联想逐渐建立, V_{D1} 超过 P_{10} 组成的开关阈值, 输出腐烂苹果气味与消极视觉长时记忆的联想信号 V_{F1} , 经过延时模块, 实现延时跨模态联想, 输入信号在 2 s 结束, 但是联想输出信号 V_{a1} 能持续到 2.8 s 左右。第 1 次建立联想的时间为 t_1 , 3.5 s 时再次输入第 1 组信号, 此时耗时 t_2 产生了联想输出信号, 由于之前已经完成了消极视觉记忆的长短时转化和联想建立, 第 2 次联想时间 t_2 比第 1 次 t_1 更快。

情景三为第 2 组气体输入信号, 仿真结果可见图 12。此时 0~2 s 和 3.5~4.5 s 的输入为第 2 组输

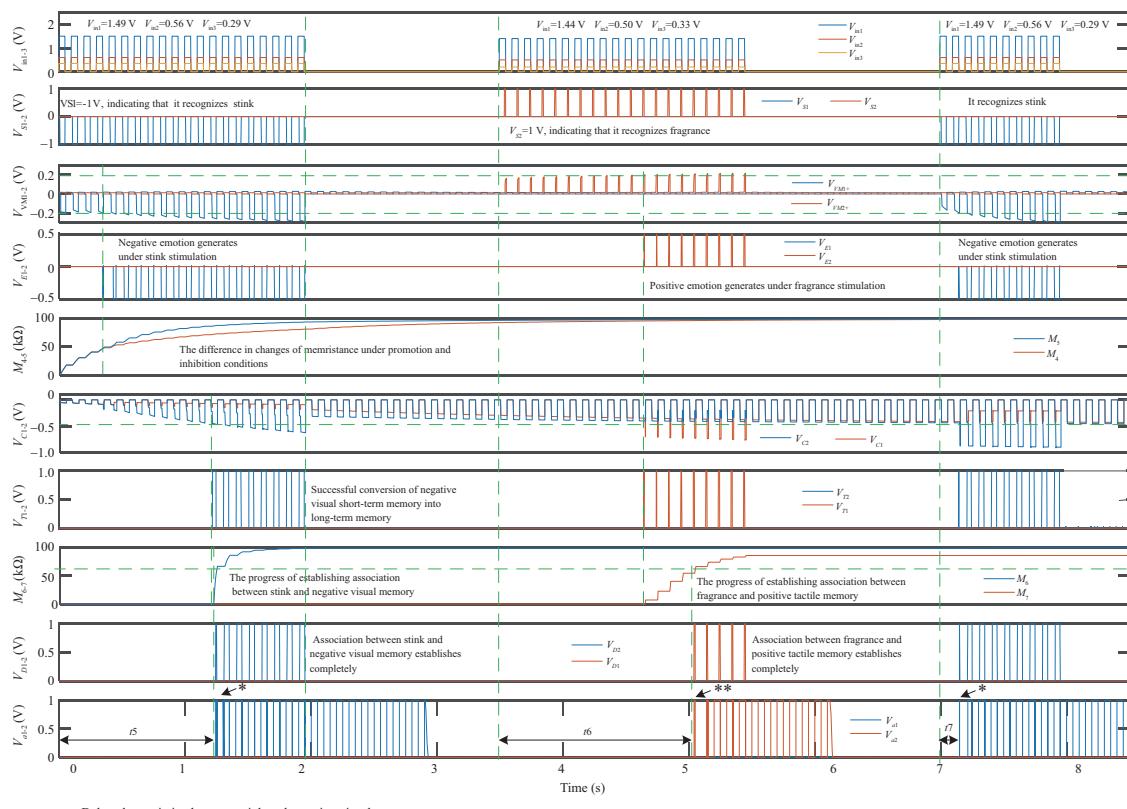


图 13 (网络版彩图) 情景四仿真结果图
Figure 13 (Color online) Simulation results of case 4

入信号, V_{S2} 输出 1 V 的信号表示识别出新鲜苹果香味, 该信号随后到情感模块经过 VM_2 , 超过该忆阻的阈值, 当 VM_2 负极电压小于比较器 2 的阈值, 比较器将输出 0.5 V 的 V_{E2} 电压产生积极情感, 随后会对 M_5 施加 0.5 V 正电压, 对 M_4 施加 -0.5 V 负电压, 忆阻电压不同将会影响忆阻阻值的变化快慢, M_5 阻值增加更快, 使得 V_{C2} 更快达到 P_8 组成的开关阈值产生 1 V 的 V_{T2} 电压, 表明积极触觉的长短时记忆转化完成, 当该信号与 V_{S2} , V_{E2} 同时发生时, M_6 电压超过其阈值, 使得 M_6 的阻值增大, 表示新鲜苹果香味与积极触觉记忆的联想逐渐建立, V_{D2} 超过 P_9 组成的开关阈值, 输出新鲜苹果香味与积极触觉长时记忆的联想信号 V_{F2} , 经由延时模块, 实现延时跨模态联想, 输入信号在 2 s 结束, 但是联想输出信号 V_{a2} 能持续到 2.8 s 左右. 第 1 次建立联想的时间为 t_3 , 3.5 s 时再次输入第 1 组信号, 此时耗时 t_4 产生了联想输出信号, 第 2 次联想时间 t_4 比第 1 次 t_3 更快.

情景四为两种输入信号交替出现, 仿真结果可见图 13. 前 2 s 为第 1 组输入信号, V_{S1} 输出 -1 V 的信号, 表示识别出腐烂苹果气味, 信号进入情感模块时, 随着 VM_1 阻值的减小, V_{VM1+} 电压变大使得 V_{E1} 输出 -0.5 V 的消极情感电压, 该电压对于消极视觉记忆的长短时转换进行了促进, 并对积极触觉记忆长短时转换进行了抑制, 当 V_{S1} , V_{E1} , V_{T1} 同时出现, M_7 电压超过阈值, 阻值增大, 直到 V_{F1} 输出联想信号, 经由延时模块输出从腐烂气味到消极视觉记忆的延时联想, 耗时 t_5 , 随后 3.5 s 开始输入第 2 组输入信号, V_{S2} 输出 1 V 信号表示识别为新鲜苹果的香味, 并产生积极情感, 加快积极触觉记忆的长短时转换, 在该信号的作用下, M_6 电压超过阈值, 阻值增大表示新鲜苹果香味与积极触觉记

忆建立联想, 经过延时模块得到信号 V_{a2} 耗时 t_6 , 第 7 s 再次输入第 1 组信号, 腐烂气味与消极视觉记忆的联想信号建立时间为 t_7 , 远小于 t_5 , 即使中间输入的是其他气味的信号, 仍然不影响原先建立的联想.

6 结论

本文基于忆阻设计嗅觉感知和跨模态联想电路, 通过 4 种情景的实验证明了电路的正确性, 并对实验结果进行了分析. 该电路分为 3 个模块, 对应实现了 3 个功能. 气味识别模块以设计的基于忆阻的嗅觉神经元为基础实现了两种气味的识别, 是嗅觉的基本感知功能. 嗅觉高级感知是指嗅觉有关情感、记忆的效应, 首先是对于气味识别结果能够产生相应的情感, 本文选取的两种气味分别对应了积极和消极两种情感, 通过嗅觉情感效应电路能够实现情感的产生, 再基于忆阻在不同电压下阻值变化的规律设计了情感对其他模态信息长短时转化速度的影响电路. 延时跨模态联想电路用忆阻搭建延时电路和以情感为强化物的联想记忆电路实现了由气味联想到其他模态的信息. 最后设计 4 种情景对电路进行了验证. 本文在忆阻电路上探索了生物嗅觉的感知效应和跨模态联想, 涉及感觉、情感、记忆三大块重要内容, 可用于机器人仿生嗅觉部分的设计, 在情感和记忆的效用也可以扩展到其他模态上, 使得机器人能拥有更完善的类脑感知功能, 有望构建更强大的类人设备.

参考文献

- 1 Chua L O. Memristor-the missing circuit element. *IEEE Trans Circ Theor*, 1971, 18: 507–519
- 2 Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, et al. The missing memristor found. *Nature*, 2008, 453: 80–83
- 3 Emara A, Ghoneima M, El-Dessouky M. Differential 1T2M memristor memory cell for single/multi-bit RRAM modules. In: Proceedings of the 6th Computer Science and Electronic Engineering Conference (CEEC), Colchester, 2014. 69–72
- 4 Shaarawy N, Ghoneima M, Radwan A G. 2T2M memristor-based memory cell for higher stability RRAM modules. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Lisbon, 2015. 1418–1421
- 5 Duan S K, Hu X F, Wang L D, et al. Memristor-based RRAM with applications. *Sci Sin Inform*, 2012, 42: 754–769 [段书凯, 胡小方, 王丽丹, 等. 忆阻器阻变随机存取存储器及其在信息存储中的应用. 中国科学: 信息科学, 2012, 42: 754–769]
- 6 Yang H, Duan S K, Dong Z K, et al. A memristor-CMOS-based general-logic circuit and its applications. *Sci Sin Inform*, 2020, 50: 289–302 [杨辉, 段书凯, 董哲康, 等. 基于忆阻器-CMOS 的通用逻辑电路及其应用. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 289–302]
- 7 Dai G Z, Zhao Z Y, Song X W, et al. Design and application of memristor hybrid logic circuit. *Sci Sin Inform*, 2023, 53: 178–190 [代广珍, 赵振宇, 宋兴文, 等. 忆阻器混合逻辑电路设计及其应用. 中国科学: 信息科学, 2023, 53: 178–190]
- 8 Zheng Y W, Hu X F, Zhou Y, et al. Biomimetic adaptive memristive cellular neural network for image enhancement. *Sci Sin Inform*, 2020, 50: 1850–1866 [郑雅文, 胡小方, 周跃, 等. 用于图像增强的仿生自适应忆阻细胞神经网络. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 1850–1866]
- 9 Xu C, Wang C H, Sun J R. A memristor-based RBM circuit implementation and application in license plate image processing. *Sci Sin Inform*, 2023, 53: 164–177 [徐聪, 王春华, 孙晶茹. 基于忆阻器的 RBM 及其在车牌图像处理中的应用. 中国科学: 信息科学, 2023, 53: 164–177]
- 10 Zhang Y, Zhang X L, Yu J B, et al. Approximated spice model for memristor. In: Proceedings of the International Conference on Communications, Milpitas, 2009. 928–931
- 11 Fang C, Li H Y, Li L, et al. Smart electronic nose enabled by an all-feature olfactory algorithm. *Adv Intell Syst*, 2022, 4: 1–15
- 12 Macasaet D, Bandala A, Illahi A A, et al. Development of an electronic nose for smell categorization using artificial neural network. *J Adv Inf Technol*, 2021, 12: 36–44

- 13 Ye Z, Liu Y, Li Q. Recent progress in smart electronic nose technologies enabled with machine learning methods. *Sensors*, 2021, 21: 7620
- 14 Zhang J Y, Xue Y Y, Sun Q Y, et al. A miniaturized electronic nose with artificial neural network for anti-interference detection of mixed indoor hazardous gases. *Sens Actuat B-Chem*, 2020, 326: 128822
- 15 Iwata T, Ono K, Yoshikawa T, et al. Gas discrimination based on single-device extraction of transient sensor response by a metal-oxide toward olfactory sensor array. In: Proceedings of the IEEE Sensors, Montreal, 2019. 1–4
- 16 Hirota T, Yoshikawa T, Iwata T. Gas discrimination based on feature patterns of sensor transient extracted by memristor with resistance-voltage converter. In: Proceedings of the IEEE Sensors, Australia, 2021. 1–4
- 17 Dai W H, Li X Y, Xia Z Q, et al. Olfactory affective computation based on EEG signal data. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC), Shanghai, 2021. 432–436
- 18 Goubet N, Durand K, Schaal B, et al. Seeing odors in color: cross-modal associations in children and adults from two cultural environments. *J Exp Child Psychol*, 2018, 166: 380–399
- 19 Lwin M O, Morrin M, Chong C S T, et al. Odor semantics and visual cues: what we smell impacts where we look, what we remember, and what we want to buy. *Behaval Decision Making*, 2016, 29: 336–350
- 20 Stevenson R J, Rich A, Russell A. The nature and origin of cross-modal associations to odours. *Perception*, 2012, 41: 606–619
- 21 Pershin Y V, Di Ventra M. Experimental demonstration of associative memory with memristive neural networks. *Neural Netw*, 2010, 23: 881–886
- 22 Ziegler M, Soni R, Patelczyk T, et al. An electronic version of Pavlov's dog. *Adv Funct Mater*, 2012, 22: 2744–2749
- 23 Bichler O, Zhao W, Alibart F, et al. Pavlov's dog associative learning demonstrated on synaptic-like organic transistors. *Neural Comput*, 2013, 25: 549–566
- 24 Liu X Y, Zeng Z G, Wen S P. Implementation of memristive neural network with full-function pavlov associative memory. *IEEE Trans Circ Syst I*, 2016, 63: 1454–1463
- 25 Wang Z L, Wang X P. A novel memristor-based circuit implementation of full-function pavlov associative memory accorded with biological feature. *IEEE Trans Circ Syst I*, 2018, 65: 2210–2220
- 26 Sun J W, Han G Y, Zeng Z G, et al. Memristor-based neural network circuit of full-function pavlov associative memory with time delay and variable learning rate. *IEEE Trans Cybern*, 2019, 50: 2935–2945
- 27 Firestein S. How the olfactory system makes sense of scents. *Nature*, 2001, 413: 211–218
- 28 Lledo P M, Gheusi G, Vincent J D. Information processing in the mammalian olfactory system. *Physiol Rev*, 2005, 85: 281–317
- 29 Kim S H, Hamann S. Neural correlates of positive and negative emotion regulation. *J Cogn Neurosci*, 2007, 19: 776–798
- 30 Fiedler K, Nickel S, Muehlriedel T, et al. Is mood congruency an effect of genuine memory or response bias? *J Exp Soc Psychol*, 2001, 37: 201–214
- 31 Rimmele U, Davachi L, Petrov R, et al. Emotion enhances the subjective feeling of remembering, despite lower accuracy for contextual details. *Emotion*, 2011, 11: 553–562
- 32 Itoh K, Miwa H, Zecca M, et al. New memory model for humanoid robots-introduction of co-associative memory using mutually coupled chaotic neural networks. In: Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks, Montreal, 2005. 2790–2795
- 33 Liu Y G, Wang W. Apple fresh odor recognition system based on SFLA optimized BP neural network. *Transducer Microsyst Technol*, 2020, 39: 96–99 [刘云刚, 王伟. 基于 SFLA 优化的 BP 神经网络苹果鲜度气味识别系统. 传感器与微系统, 2020, 39: 96–99]
- 34 Chen L, Li C D, Huang T W, et al. The bipolar and unipolar reversible behavior on the forgetting memristor model. *Neurocomputing*, 2016, 171: 1637–1643
- 35 Yan R N, Hong Q H, Wang C H, et al. Multilayer memristive neural network circuit based on online learning for license plate detection. *IEEE Trans Comput-Aided Des Integr Circ Syst*, 2022, 41: 3000–3011
- 36 Tian T T. Research on models of key parts of olfactory neural pathway. Dissertation for Master's Degree. Changsha: Hunan Normal University, 2020 [田恬恬. 嗅觉神经通路关键部分模型研究. 硕士学位论文. 长沙: 湖南师范大学, 2020]

Memristive circuit design and implementation of olfactory perception and cross-modal association

Minghui DING^{1,2,3}, Xiaoping WANG^{1,2,3*} & Zhigang ZENG^{1,2,3}

1. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Key Laboratory of Image Processing and Intelligent Control of Education Ministry of China, Wuhan 430074, China;

3. Hubei Key Laboratory of Brain-inspired Intelligent Systems, Wuhan 430074, China

* Corresponding author. E-mail: wangxiaoping@hust.edu.cn

Abstract The importance of olfactory research in environmental monitoring, disaster warning, and other fields is highlighted. Associative memory is the mechanism by which biological brains process information. Exploring olfactory perception and its cross-modal association is necessary to expand the application and development of brain-like perception in robotics technology. This paper designs olfactory perception and cross-modal association circuits based on memristor, simulating the basic function of olfaction and its emotion and memory effects, which mainly includes three modules: an odor recognition module realizes recognizing two types of odors based on memristor olfactory neurons; an advanced perception module builds an emotion generation circuit to generate olfactory emotions, and uses changes in memristance to impact the consolidation progress of other modal memories; and the delayed cross-modal association module designs a delay circuit and an associative memory circuit based on the variation law of memristance and implements delayed association among olfactory information and other modal information using emotions as reinforcement. Finally, four cases are designed for experiments, and the simulation results show that the circuit can achieve olfactory perception function and cross-modal association with other modal information, allowing for improving a robot's olfactory perception.

Keywords memristor, olfactory perception, emotion, associative memory, different modal information correlations