AI 味觉功能的可行性构建方法——基于多尺度机器感知与三层映射模型的工程实现路线图

YunFei M. Wang
（王·Micheal·雲飛）
Independent Researcher

摘要

本文是"机器感知与认知构建"系列研究的第五篇，旨在系统论述 AI 味觉功能的工程化构建方案。味觉是生物维持营养平衡与规避有害物质摄入的根本感官通道，在食物选择、能量代谢调控与生存决策中发挥着不可替代的作用。与视觉、听觉和嗅觉相比，味觉的神经编码机制具有独特的分子识别特征：人类味觉系统通过味蕾中四种功能分化的细胞类型，以 G 蛋白偶联受体（甜、鲜、苦）和离子通道（咸、酸）两条并行的信号传导通路，将化学刺激转化为神经电信号，经孤束核、丘脑投射至岛叶初级味觉皮层与眶额叶次级味觉皮层。基于首篇确立的"物理信号—神经编码—主观知觉"三层可计算映射理论框架与"分层基准对照组"实验设计，本文进一步将其实践化为味觉模态的完整工程技术蓝图。我们系统阐述了味觉感知的生物学基础（从味蕾细胞类型与信号传导通路到中枢味觉投射网络）与心理物理学核心维度（检测阈值、识别阈值、强度感知、愉悦度评估等），提出了以"单变量纵深实验"为核心的多层级实验设计方案，并围绕"绝对味觉者—普通人群—味觉功能障碍者"的分层原则设计了全谱系数据采集方案。本文的核心贡献在于：为 AI 味觉功能的实质性研发提供了一份涵盖理论建模、实验室建设（含味觉刺激递送系统、电子舌、高效液相色谱仪、EEG/fMRI 同步记录系统）、设备选型与参数标准、人员配置、实验流程、伦理合规与社会协作的全要素、全链条实施方案，为构建可验证、可解释且与人类味觉认知对齐的 AI 味觉感知模型奠定了可操作的科学与工程基础。

关键词

机器味觉；三层映射模型；味觉心理物理学；味觉神经编码；G 蛋白偶联受体；分层基准对照组；单变量纵深实验

1 引言：味觉在机器认知体系中的核心地位

味觉是生物界最古老的感官之一，在演化史上早于视觉和听觉。味觉系统承担着两项根本性的生存职能：引导摄入营养物质与警示规避有害物质。在人类日常生活中，味觉不仅决定着食物的可接受性与饮食偏好，更深刻影响着营养摄入、代谢调控、消化

生理乃至情绪状态。与依赖远距离感知的视觉和听觉不同，味觉是一种接触性化学感官——只有当物质溶解于唾液并与味蕾直接接触时，味觉感知才能启动。这一"最后一道关口"的感知特性，赋予了味觉在食物选择链中的终极裁决权。

构建 AI 的味觉功能，具有独特的科学价值与技术挑战：

- **双通路信号传导的复杂性**：味觉系统采用了两条本质不同的信号传导通路。G 蛋白偶联受体通路负责甜味（T1R2-T1R3 异源二聚体）、鲜味（T1R1-T1R3 异源二聚体）和苦味（T2R 家族，人类约 25 个成员）的感知；离子通道通路负责咸味（上皮钠通道 ENaC 介导的钠离子内流）和酸味（OTOP1 质子通道及 PKD2L1 相关通路）的感知。这两条通路在细胞类型、信号传导机制、时间动力学上存在本质差异，要求 AI 味觉模型必须具备异构的架构设计。

- **味蕾细胞的功能分化**：每个味蕾由 50—100 个细长细胞组成，分为四种功能类型。Type II 细胞表达 GPCR 类味觉受体（甜、鲜、苦），通过 PLCβ2—IP3—TRPM5—CALHM1 信号级联释放 ATP 作为神经递质；Type III 细胞是唯一与味觉神经纤维形成突触连接的细胞类型，负责酸味感知；Type I 细胞起支持作用；Type IV 细胞为基底祖细胞。这种细胞层面的功能分工为 AI 建模提供了清晰的模块化架构，但也要求模型必须区分不同类型的信号处理逻辑。

- **味觉—嗅觉—触觉的跨模态整合**：食物"风味"并非单纯的味觉体验，而是味觉、嗅觉（通过鼻后通路）、口腔触觉（质地、温度、辛辣感）在三叉神经与中枢层面的动态整合。这意味着味觉 AI 的最终目标不能止于孤立的味觉感知，而必须为后续的跨模态风味建模奠定基础。

- **极端个体差异**：味觉是五感中个体差异最为显著的感官之一。基于对苦味化合物 PROP/PTC 的反应，人群可明确分为超级品尝者、中等品尝者和非品尝者三类。超级品尝者拥有更多的菌状乳头和味蕾，生活在"尤为强烈的味觉世界"中。这种差异主要源于 TAS2R38 苦味受体基因的多态性，同时也受年龄、性别、文化背景等因素调制。这一极端差异要求 AI 味觉模型必须具备比任何其他感官更强的个性化适配能力。

本系列首篇已确立了"机器感知—神经编码—主观知觉"三层映射作为构建任何 AI 感官功能的通用理论框架。第二至四篇分别以视觉、听觉和嗅觉为范例，系统展示了从理论到工程的完整实施方案。本文将此框架扩展至味觉模态，系统解决从物理化学信号到预测的味觉神经编码、再到预测的主观味觉体验的全部关键工程问题。

本章核心论点：构建 AI 味觉功能的本质，是为 AI 建立一套"味质分子的物理化学属性→预测的人类味觉神经时空编码模式→预测的主观味觉体验（品质、强度、愉悦度）"的可计算映射系统。该系统必须以人类味觉感知的全谱系数据为基准，以严谨的单变量纵深实验为方法，以分层招募的受试者群体为数据源，最终输出一个可公开验证、可持续迭代的 AI 味觉感知模型。

与已有味觉神经编码研究相比，本文的差异化定位在于：已有工作多以"分子结构—受体激活"或"味质—脑区响应"的单一映射为目标，本文要求的是从物理化学信号到神经编码、再到主观知觉报告的完整可计算链路。味觉的独特之处在于，神经编码层必须分别处理 GPCR 通路（甜/鲜/苦）与离子通道通路（咸/酸）两种本质不同的信号传导逻辑——前者依赖受体—配体结合与下游级联，后者依赖离子通道的直接门控——这一异构性使味觉的神经编码建模比视觉、听觉和嗅觉都更需要模块化的架构设计。

1.1 框架定位

在"键-值-信息-相"框架中，本文的物理信号层对应键操作值获得的原始反馈，神经编码层对应信息整合为相的中介环节，主观知觉层对应相的可报告投影。传感器是键，被测量的化学现象指向值，三层映射的输出是相。本文不展开该框架的哲学论证，详见文献[2]。

1.2 结构安排

本文按以下序列展开：

- 第 2 章：味觉感知的生物学与心理物理学基础。
- 第 3 章：AI 味觉功能构建的理论框架——三层映射模型。
- 第 4 章：实验设计——分层基准与单变量纵深实验。
- 第 5 章：实验室工程设计与建设方案。
- 第 6 章：科研团队配置与技能要求。
- 第 7 章：伦理框架与受试者安全保障。
- 第 8 章：社会协作与资源整合方案。
- 第 9 章：项目阶段规划与目标成果。
- 第 10 章：结论。

2 味觉感知的生物学与心理物理学基础

2.1 人类味觉系统的信息处理层级

理解人类味觉的"信号翻译"过程，是构建 AI 味觉模型的第一性原理前提。人类味觉系统可划分为以下功能层级：

味蕾与外周感受层（化学信号→神经信号）

味觉的感受始于舌上皮的味蕾。每个味蕾由 50—100 个细长细胞组成，从基底膜延伸至舌表面，其顶端微绒毛暴露于口腔中，与溶解的味质分子直接接触。味蕾中的味觉细胞根据形态与功能分为四种类型:

细胞类型	形态特征	功能角色	感知的味觉品质	关键标志物/机制
Type I（暗细胞）	细长、电子密度高	支持细胞；可能参与离子回收	非直接感知	胶质细胞样功能
Type II（亮细胞）	较宽、电子密度低	GPCR 味觉受体细胞	甜、鲜、苦	T1R/T2R→PLCβ2→IP3→Ca^{2+} →TRPM5→ATP 释放
Type III	中等电子密度	唯一与神经纤维形成突触的细胞	酸味	PKD2L1、OTOP1 质子通道
Type IV（基底细胞）	圆形、位于味蕾基部	祖细胞/干细胞	—	分化为其他三种类型

Type II 细胞通过 GPCR 通路感知甜、鲜、苦三种味觉品质。T1R 家族成员通过形成异源二聚体发挥作用：T1R2-T1R3 对甜味刺激有反应，T1R1-T1R3 对鲜味刺激有反应。由于存在多个结合位点，这两个异源二聚体表现出较低的特异性，能够对多种不同的配体做出反应。相比之下，T2R 家族由超过 25 个成员组成，对苦味做出反应。Type III 细胞通过 OTOP1 质子通道和 PKD2L1 相关通路感知酸味。咸味则主要通过上皮钠通道介导的钠离子内流来感知。Type II 细胞激活后，通过 G 蛋白（gustducin）的 Gβγ亚基激活磷脂酶 Cβ2，产生 1,4,5-三磷酸肌醇，IP3 与内质网上的 IP3 受体结合，释放储存的 Ca^{2+} 。胞内 Ca^{2+} 浓度升高激活瞬时受体电位通道 M5，导致细胞膜去极化，最终通过 CALHM1/CALHM3 通道释放 ATP 作为神经递质。TRPM5 对甜、苦、鲜三种味觉的传导都是必需的。

脑干与丘脑层（初级中继与整合）

味觉传入神经（面神经鼓索支、舌咽神经、迷走神经）将信号传递至脑干的孤束核。孤束核对味觉信号进行初步整合后，投射至丘脑腹后内侧核，再进一步投射至大脑皮层。

皮层味觉中枢层（知觉生成）

人类初级味觉皮层位于前岛叶及相邻的额叶盖部。fMRI 研究显示，岛叶双侧区域均参与味觉加工。眶额叶皮层被认为是次级味觉皮层，负责味觉的愉悦度评估与跨模态整合。神经影像学研究表明，味觉刺激可在刺激后 70—80ms 即可激活双侧前岛叶和内侧眶额叶皮层。

经验与可塑性层

长期味觉训练（如专业品酒师、厨师、茶艺师）可显著提高味觉辨别阈值和味觉记忆能力，并可能改变味觉皮层（特别是前岛叶）的响应模式与功能连接。

这一多层级、双通路的加工架构提示我们：AI 味觉模型不能止于"分子结构→味觉标签"的直接映射。我们必须分层建模，从物理化学层逐步逼近知觉层，并分别处理 GPCR 通路（甜、鲜、苦）与离子通道通路（咸、酸）两种本质不同的信号传导逻辑。

2.2 味觉的心理物理学核心维度

心理物理学揭示，人类对味质的主观感知可分解为若干核心维度。这些维度是我们设计"单变量纵深实验"的直接依据。本章心理物理学阈值数据引自味觉心理物理学标准文献[6]；典型值受测量范式、刺激条件与受试者群体影响，工程实施时应以原文条件为准。

感知维度	对应物理参数	心理物理学特性	关键阈值/参考值
检测阈值	味质浓度（mol/L）	不同味质阈值差异可达数个数量级；受温度与机体状态调制	蔗糖约 0.01mol/L；食盐约 0.01mol/L；盐酸约 0.0007mol/L
识别阈值	味质浓度	通常高于检测阈值；受认知与文化因素影响	随味质种类与个体经验变化
辨别阈限	浓度差或分子结构差	韦伯分数因味质而异；受适应与背景调制	因味质而异，详见[6]
味觉强度	味质浓度（幂	幂函数关系（史蒂文斯定律）；受温度与基质效应	感知强度随浓度增加而

	函数）	影响	增加，但边际递减
味觉愉悦度	非单一物理参数	愉悦/不愉悦感知；受内稳态状态与眶额叶皮层活动调制	个体差异大，需个性化标定

值得注意的是，味觉的检测阈值并不能预测阈上感知函数——一个人可能在很低浓度就能检测到某种味质，但在高浓度时对该味质的强度感知却可能弱于另一个人。这一"阈值—强度分离"现象对 AI 味觉模型的设计提出了重要警示：模型不能仅以阈值为基准进行校准，必须同时覆盖从阈值到超阈值的完整感知区间。

2.3 味觉个体差异的谱系分布

味觉是五感中个体差异最为显著的感官之一，这决定了 AI 味觉模型的分层设计比任何其他感官都更为关键：

绝对味觉者（L1 基准组）

经长期专业训练的美食评论家、星级厨师、面点师、品酒师、茶艺师、调味品研发专家等与食品烹饪和品鉴高度相关的从业者。部分个体属于遗传定义的超级品尝者——对 PROP/PTC 等苦味化合物具有超常敏感度，拥有更多的菌状乳头和味蕾。超级品尝者生活在"尤为强烈的味觉世界"中。此类个体提供了味觉感知"最高分辨率"的基准信号，是校准 AI 味觉模型上限的"黄金标准"。

普通味觉者（L2 主体组）

占人群大多数，味觉阈值和分辨力呈正态分布。受年龄（味觉功能随龄衰退）、性别、文化背景、饮食习惯等因素影响。提供味觉感知的"平均模型"与"主流分布"数据。

味觉功能边界者（L3 边界组）

包括味觉缺失/减退者（如因疾病、药物、老龄化导致的味觉功能障碍）、特定味质不敏感者（如对 PROP/PTC 无感的非品尝者，在人群中占有相当比例）、味觉倒错者（味觉感知扭曲）。其数据用于定义感知空间的边界与模型的鲁棒性下限，对开发包容性味觉 AI（如为味觉障碍人群设计辅助饮食方案）至关重要。

2.4 味觉研究实验方法的已有基础

味觉科学已有丰富的实验方法学积累，为我们的工作提供了可直接借鉴的工具：

经典方法	操作方式	应用场景	借鉴价值
味阈测量	阶梯法、恒定刺激法、强迫选择追踪程序	检测/识别阈值测定	可标准化为 AI 味觉模型的校准协议
味觉强度评分	标签量值量表、视觉模拟量表	阈上味觉强度感知量化	直接输出为模型训练的回归目标
味觉愉悦度评分	9 点享乐标度、面部表情分析	主观偏好评估	为"愉悦度预测"模块提供训练数据
配对比较/三角测试	同时或先后呈现两个样品，要求判断相同/不同	味觉辨别能力评估	用于受试者分级与模型验证
味觉诱发电位	舌面电刺激+EEG 记录	味觉皮层响应客观测量	为神经编码层提供客观生理指标
电子舌技术	传感器阵列+模式识别算法	味质快速检测与分类	可作为 AI 味觉物理信号层的辅助工具

3 AI 味觉功能构建的理论框架：三层映射模型

本文沿用首篇确立的三层映射理论框架，并具体化至味觉模态。该框架的哲学论证与一般性方法论见文献[1][2]；本节仅展开味觉模态特有的编码内容。

3.1 物理信号层：多尺度化学数据的系统采集

AI 味觉的物理信号层，目标是建立能够完整描述味质刺激的"化学数字孪生"表征体系。味觉的"物理层"必须包含从分子到宏观的多层次信息：

分子结构层

味质分子的化学结构式（二维/三维）；官能团类型与位置（羟基、羰基、羧基、氨基等）；分子量、极性、溶解度（logP）、解离常数（pKa）；离子种类与价态（对咸味和酸味尤为重要）；分子描述符（如分子指纹、拓扑指数、量化参数）。

溶液特性层

味质浓度（mol/L、%w/v）；溶液 pH 值、离子强度、渗透压；温度（影响味觉感知强度的关键因素）；黏度与表面张力（影响味质在舌面的扩散与接触）。

口腔环境层

唾液成分与流速（影响味质的溶解与缓冲）；口腔温度与湿度；食物基质效应（脂肪、蛋白质、多糖对味质释放的调制）。

这些数据由高精度分析仪器协同采集：高效液相色谱与质谱联用用于味质成分的定性与定量分析；电子舌传感器阵列用于味质的快速模式识别与分类；离子色谱用于咸味相关离子的精确测量；pH 计与电导率仪用于溶液基本理化参数的实时监测。

"类人"原则在此层的适用边界与视觉、听觉、嗅觉篇一致：本文的"类人"指神经编码层的可通约性，而非对前端传感器的仿生约束。前端允许使用超越人类味蕾选择性的科学仪器（如 HPLC 可精确到纳摩尔级定量），后端通过神经编码映射使感知输出与人类可通约。

3.2 神经编码层：从化学到味觉神经活动的预测模型

神经编码层的目标，是构建一个能够将物理化学描述符映射为预测的人类味觉神经群体活动模式的计算模型。该层与已有味觉神经编码研究的方法同构，但目标不同：已有工作通常止于对特定受体或特定脑区响应的预测，本文要求的是从物理化学信号到神经编码、再到主观知觉报告的完整链路。味觉的独特之处在于，神经编码层必须分别处理 GPCR 通路与离子通道通路两种本质不同的信号传导逻辑，二者在细胞类型、信号级联与时间动力学上均不可通约。

模型架构设计（概念）

• **输入层**：上述物理信号层的全部标准化描述符（分子结构、浓度、pH、温度、离子强度等）。

• **中间层**：模拟味觉通路各关键节点的神经计算。Type II 细胞 GPCR 通路模块：T1R2-T1R3 甜味受体激活预测（基于分子对接与 QSAR 模型）；T1R1-T1R3 鲜味受体激活预测；T2R 家族（25 个成员）苦味受体组合激活模式预测；下游信号级联：G 蛋白→PLCβ2→IP3→Ca^{2+} →TRPM5→去极化→ATP 释放的动力学模拟。Type III 细胞离子通道通路模块：ENaC 介导的钠离子内流与咸味信号模拟；OTOP1/PKD2L1 介导的质子内流与酸味信号模拟。两条通路的输出在此模块中并行计算，不合并为单一激活值——这是味觉区别于其他感官的关键架构特征。孤束核整合模块：模拟不同味觉品质信号在脑干的初步整合与空间编码。丘脑与皮层模块：模拟味觉信号经丘脑腹后内侧核至前岛叶/额叶盖部（初级味觉皮层）的投射，以及至眶额叶皮层（次级味觉皮层）的愉悦度编码。

• **输出层**：预测的各味觉脑区神经群体活动模式（前岛叶/额叶盖部的 EEG 特征或 fMRI BOLD 信号、眶额叶皮层的愉悦度相关活动模式等）。

模型训练策略

使用同步记录的人类受试者味觉神经生理数据（EEG、fMRI、味觉诱发电位）作为训练目标。对于 GPCR 通路（甜、鲜、苦），可采用基于分子结构的预测模型预训练，再以人类感知数据进行微调。对于离子通道通路（咸、酸），可基于电生理数据进行物理建模。两条通路的训练数据分别采集、分别校准，最后在孤束核整合模块中对接。

3.3 主观知觉层：从神经活动到味觉体验的预测模型

主观知觉层模型的目标，是将神经编码层输出的活动模式"翻译"为人类可报告的主观味觉体验。

本层的必要性来自味觉工程中一个长期存在的缺口：化学分析仪器可以精确测定味质的成分与浓度，电子舌可以区分不同味质模式，但二者都无法回答"这个味道尝起来是什么体验"。高效液相色谱的峰面积与人类品尝的强度、愉悦度、品质判断之间没有稳定的对应关系。本文的主观知觉层为味觉感知对齐提供一个显式的预测层：其功能不是取代化学分析或电子舌，而是补充从神经编码到主观报告的映射，使"这个味道尝起来是什么体验"成为可计算、可校验的输出。

输出维度

- **味觉检测**：二值判断（是否尝到味道）
- **味觉品质**：五种基本味觉的分类概率（甜/酸/咸/苦/鲜）
- **味觉强度**：连续数值预测（如标签量值量表 0—100 分标度）
- **味觉愉悦度**：连续评分（如-50 至+50）
- **味觉描述**：开放式的味觉特征描述（如"像焦糖"、"金属味"）
- **熟悉度/偏好**：对特定味质的熟悉程度与偏好判断

模型训练策略

以受试者主观报告作为训练目标。采用多任务学习框架，同时预测品质、强度、愉悦度等多个维度。重点：个体差异适配模块——由于味觉个体差异极端显著（超级品尝者 vs 非品尝者），模型必须具备基于个体基因型（如 TASR38 多态性）或快速标定测试进行个性化校准的能力。

3.4 三层模型整合：AI 味觉"感知模拟器"的完整运行逻辑

三层模型形成数据—模型—验证的闭环：

味质物理化学数据（输入）→【物理信号层】化学描述符标准化（分子结构+浓度+pH+温度+基质效应）→【神经编码层模型】预测味觉神经活动模式（Type II GPCR通路+Type III 离子通道通路+中枢整合）→【主观知觉层模型】预测主观味觉报告（品质/强度/愉悦度/描述/熟悉度）→输出：AI 对"这个味质是什么体验"的完整预测。

验证闭环：将模型预测的神经活动模式与实际同步采集的人类味觉神经数据进行比较，将模型预测的主观报告与实际主观报告比对，误差返回优化各层模型参数。流程结构与视觉篇 3.4 节一致，区别在于中间层的味觉通路替换，以及神经编码层需并行处理 GPCR 与离子通道两条异构通路。

此"感知模拟器"一旦成熟，AI 将能够：理解一种味质对人类意味着什么（甜度、苦感、鲜味强度）；预测一种新开发的代糖是否能在保持甜味的同时避免苦味后调；为食品企业设计符合目标味觉体验的配方；适配特定味觉障碍用户的残余味觉能力，生成补偿性的味觉信号。

本模态的感知数据接入长程智能体状态管理与分层生成架构的协作机制，已在文献[2]中系统阐述。

4 实验设计：分层基准与单变量纵深实验

4.1 核心实验原则

三条实验原则的完整方法论依据见总纲第 4 章，此处仅列味觉模态的适用要点：

- **原则一：单变量纵深实验优先于多变量黑箱采集。**味觉实验从单一纯味质出发，每次仅改变一个物理化学维度（如浓度），系统性地探索该维度从阈值以下到阈上至感知极限的完整区间。对于甜味，可从蔗糖水溶液开始；对于咸味，可从氯化钠水溶液开始；对于酸味，可从柠檬酸开始；对于苦味，可从咖啡因或奎宁开始；对于鲜味，可从谷氨酸钠开始。

- **原则二：分层基准对照组保障模型的全谱系覆盖。**数据采集同时包含 L1 绝对味觉者、L2 普通味觉者、L3 味觉功能边界者。在味觉领域，L1 组中的超级品尝者尤为重要——他们对苦味化合物 PROP/PTC 的超常敏感度为理解味觉敏感度的上限提供了天然实验窗口。

- **原则三：严格的味觉刺激控制与模态隔离。**味觉刺激的浓度、温度、pH 值、呈现方式（滤纸盘法、滴注法、含漱吐出法）必须精确控制。所有味质溶液需经 HPLC 验证浓度与纯度。刺激呈现需考虑口腔内的味觉适应与交叉适应效应。在味觉单模态实验中，必须严格控制嗅觉与触觉的干扰——使用鼻夹阻断鼻后嗅觉通路，使用标准化溶

液载体最小化质地差异。

4.2 受试者招募与分组方案

分层原则与总纲 4.1 节一致。以下仅列味觉模态的具体来源、入选标准与报酬标准。

L1 基准组（绝对味觉者，每组 5—10 人）

来源：美食评论家、星级厨师、面点师、品酒师、茶艺师、调味品研发专家等。招募方式：通过美食与烹饪行业协会、品酒师协会、茶艺师协会定向邀请；通过米其林餐厅、知名酒店后厨推荐。入选标准：通过标准化味觉测试（如味觉条纹测试或 PROP 苦味敏感度测试）；专业训练年限≥5 年；无已知味觉疾病；非吸烟者。报酬标准：专家级咨询费，建议 1000—2000 元/小时。

L2 主体组（普通味觉者，每组 100—300 人）

来源：社会公开招募，涵盖不同年龄（18—70 岁）、性别、地域、文化背景、饮食习惯。入选标准：通过基础味觉筛查；无已知味觉疾病；无急性口腔感染。报酬标准：100—200 元/小时。

L3 边界组（味觉功能边界者，每组 20—50 人）

分类子组：1）对 PROP/PTC 无感的非品尝者；2）味觉减退者（因疾病、药物、老龄化导致）；3）味觉缺失者（如头颈癌放疗后患者）；4）味觉倒错者。来源：与三甲医院口腔科、耳鼻喉科、肿瘤科合作，由科室医师推荐（匿名化脱敏后接入实验）。报酬标准：考虑医疗陪同与交通，建议 200—300 元/小时。

4.3 单变量纵深实验流程标准化——以"甜味浓度—强度感知"为例

实验前准备（约 20 分钟）

受试者签署知情同意书，填写味觉史与饮食问卷。进行基础味觉筛查（味觉条纹测试或 PROP 测试），确认分组归属。受试者进入味觉实验室，适应环境 5 分钟（期间仅饮用纯水）。佩戴高密度 EEG 电极帽（64—128 导）；准备 fMRI 扫描（如需）。使用鼻夹阻断鼻后嗅觉通路（隔离嗅觉对味觉的干扰）。

实验正式阶段（约 60—90 分钟）

选择标准甜味物质（蔗糖，因其味觉特征明确、阈值已知、安全性高）。预设一系列浓度梯度（从亚阈值到超阈值，覆盖至少 4 个数量级，如 0.001mol/L 至 1.0mol/L）。每个试次：向受试者口腔递送 5—10mL 味觉溶液（通过移液器或自动味觉递送系

统），要求受试者含漱 5 秒后吐出（含漱吐出法），刺激间隔至少 45 秒（避免味觉适应），期间用纯水漱口。

每次刺激后，受试者需完成：a）二选一判断："是否尝到了味道？"（测量检测阈值）；b）从预设味质列表中选择："这是什么味道？"（测量识别阈值与品质判断）；c）连续滑动条评分："请评价此味道的强度"（标签量值量表 0—100 分）；d）连续滑动条评分："请评价此味道的愉悦度"（-50 至+50）；e）开放回答："请描述此味道的特征"。同时，EEG 连续记录（采样率≥1000Hz），标记每个刺激起始点与受试者响应的精确时间戳。若使用 fMRI，同步记录 BOLD 信号。

实验后处理（约 10 分钟）

受试者完成主观疲劳问卷。数据备份与离线质检。

扩展实验

在完成蔗糖的全浓度曲线后，逐步引入：不同甜味物质（果糖、葡萄糖、糖精、三氯蔗糖、阿斯巴甜等），研究分子结构—甜味感知关系；不同温度（在 4°C、22°C、37°C 下重复实验），研究温度对味觉感知的调制；混合味质（蔗糖+柠檬酸、蔗糖+氯化钠等二元混合物），研究味觉交互作用。

4.4 数据同步采集与质量保障

• **味觉刺激控制**：所有味质溶液需经 HPLC 验证浓度与纯度（精度±2%）；溶液温度需精确控制（±0.5°C）；递送方式需标准化（体积、流速、舌面落点位置）。

• **同步精度**：味觉递送系统触发信号、EEG/fMRI 采集、行为响应盒，必须由同一主时钟源同步。时间戳偏差需<1ms。

• **环境控制**：味觉实验室需保持恒温（22±1°C）、恒湿（50±5%），避免环境气味干扰。

5 实验室工程设计与建设方案

本章组织框架与视觉篇对应章节一致，以下仅列味觉模态特有的分区、设备与口腔安全要求。

5.1 实验室选址与环境要求

选址原则

优先选址于大学或科研院所园区内，便于跨学科合作与受试者招募。需远离强气味源

（如食堂、化工厂），避免气味干扰。需配备独立的供水与排水系统（用于味觉溶液配制与清洗）。需考虑未来扩展性。

环境影响评估

周边环境气味监测（确认基线无干扰性气味）；供水水质检测（需符合实验用水标准，如超纯水）。

5.2 实验室核心区域功能划分

主味觉实验舱（20—30m²）

配备受试者座椅（可调节高度、带扶手）、下颌托/头托（用于头部固定）。配备味觉溶液递送系统（移液器/自动递送装置）、纯水漱口供应系统、废液回收系统。墙面与设备采用易清洁、不吸附气味的材料（不锈钢、食品级塑料）。配备鼻夹（阻断鼻后嗅觉通路）。

味觉化学分析室（20—30m²）

配备 HPLC、离子色谱、pH 计、电导率仪、电子舌等分析仪器。配备标准通风橱、试剂存放柜（低温、避光）。用于味质溶液的配制、纯度验证、浓度标定与理化参数测量。

味觉神经记录与控制室（15—30m²）

紧邻主实验舱，由观察窗连接。布置 EEG/fMRI 数据采集主机、受试者监控系统、味觉递送系统控制电脑、数据服务器。

味质存储与配制室（10—20m²）

存放味质标准品（需低温、避光、防潮）。配备精密天平（0.1mg 精度）、移液器、容量瓶、超纯水系统。需有独立温湿度控制。

受试者接待与筛查室（10—15m²）

受试者到达后在此填写问卷、签署知情同意书、进行基础味觉筛查。

数据处理与计算中心（15—30m²）

高性能计算服务器（多 GPU 并行）。大容量存储阵列（PB 级）。UPS 与空调恒温系统。

5.3 核心设备清单与关键技术参数

设备类别	设备名称	关键技术参数要求	预算估算（万元）
味觉化学分析	高效液相色谱	紫外/二极管阵列检测器，精度±1%，检出限≤0.1μg/mL	40—80
味觉化学分析	离子色谱仪	电导检测器，检出限≤0.01μg/mL	30—60
味觉化学分析	电子舌系统	多通道传感器阵列（≥7 个交叉敏感性传感器），模式识别软件	50—100
味觉化学分析	pH 计/电导率仪	精度±0.01pH，±1%	1—3
味觉刺激呈现	自动味觉递送系统	多通道（≥6 通道），精确控温（±0.5℃），程控递送（精度±0.1mL）	20—50
神经生理	高密度脑电图系统	≥128 导，DC 耦合，采样率≥16kHz，共模抑制比≥120dB	80—200
神经生理	功能性磁共振成像（共享/合作使用）	3T 及以上，EPI 序列，TR≤2s	共享使用
数据同步	主时钟与同步发生器	多路 TTL 输出，精度≤10μs	2—5
数据处理	高性能计算服务器	多 GPU（≥4×A100/H100），内存≥512GB	60—150
数据处理	海量存储阵列	容量≥500TB，读写带宽≥5GB/s	15—40
总预算估测	约 350—900 万元		

5.4 安全与应急设施

- **紧急停止按钮**：实验舱与控制室各安装 2 处，一键停止味觉递送。
- **味觉安全**：所有味质浓度需确保在安全食用范围内；对已知过敏原需特别标注；备有抗过敏药物与急救设备。
- **口腔卫生**：每位受试者使用一次性口腔器具；实验前后提供漱口与口腔清洁。
- **急救设施**：现场配置急救药箱、洗眼器；与附近医院建立绿色通道。

6 科研团队配置与技能要求

本章组织框架与视觉篇对应章节一致，以下仅列味觉模态特有的岗位技能要求。

6.1 核心研究人员

岗位	人数	核心职责	关键技能与资质要求
项目首席科学家	1	统筹项目整体规划、整体方案设计、科研团队领导与课题进度把控	深耕味觉神经科学、心理物理学、食品科学相关领域，具备教授或研究员职称，拥有跨学科重大项目牵头经验
味觉心理物理学方向 PI	1	负责味觉心理物理学实验整体设计、实验流程把控、实验数据统计与专项分析	博士学位，具备 5 年及以上味觉专项实验设计与落地经验，熟练掌握心理物理学数据分析方法
计算神经科学方向 PI	1	负责味觉神经编码机制研究、神经编码模型搭建与迭代优化	博士学位，熟练掌握 EEG、fMRI 数据处理与计算神经建模技术
食品科学/风味化学方向 PI	1	味质分析、溶液配制与标定、HPLC/离子色谱操作	博士学位或同等工程经验，熟悉味质化学与食品基质效应
数据科学家/机器学习专家	2—3	三层映射模型实现与训练	博士学位，具备机器学习/神经网络经验，熟悉 PyTorch/TensorFlow

实验技术员/EEG 技术员	2—4	日常实验执行、设备维护、数据采集	本科及以上，经过专业培训，熟悉 EEG 操作与味觉递送系统使用
科研助理/行政协调	1—2	受试者招募管理、伦理对接、后勤协调	本科及以上，具有项目管理经验或心理学背景

6.2 跨学科顾问与合作专家

跨学科顾问团队：味觉神经生理学顾问、口腔医学顾问、食品科学/风味化学顾问、数据安全与伦理法律顾问，为项目提供多维度专业技术与合规指导。

7 伦理框架与受试者安全保障

本章组织框架与视觉篇对应章节一致，以下仅列味觉模态特有的伦理关切。

7.1 伦理审查与合规框架

本项目所有实验操作严格遵循科研伦理规范，实验方案正式执行前，必须取得所属机构 IRB 或独立伦理委员会的书面正式批准。全程严格遵守《中华人民共和国个人信息保护法》及 GDPR 通用数据保护条例相关要求，保障实验合规性、数据合法性与受试者权益。

7.2 受试者知情同意与权益保护

统一制定标准化知情同意书，内容完整覆盖研究核心信息与受试者权益，具体包含：研究核心目的、完整实验流程（含味质类型、浓度梯度、口腔接触方式）、实验可能产生的轻微不适感（味觉疲劳、轻微口腔刺激等）、受试者随时无条件退出实验的权利、实验数据使用范围与存储方式、受试者补偿标准与支付方式等。

针对 L3 味觉障碍受试人群，采用通俗简洁的语言讲解实验内容与流程，避免专业晦涩表述，同时根据受试者实际情况提供对应的辅助支持，保障受试者充分知情、自愿参与。

7.3 实验过程的安全监控

味觉安全监控：所有实验所用味质浓度严格低于国际及国内公认的安全食用标准，无毒性、无刺激性风险；对实验涉及的各类已知过敏原进行单独标注、重点管控，杜绝过敏风险。

实时状态监控：实验全程安排专职操作员通过监控设备实时观察受试者身心状态，全

程跟进实验过程，及时捕捉异常信号。

实验中止条件：实验过程中，若受试者主动反馈口腔不适、皮肤及呼吸道过敏反应、恶心、头晕等任何异常生理感受，或操作员观察到受试者状态异常，将立即终止实验，保障受试者人身安全。

7.4 数据隐私与匿名化处理

项目采集的所有受试者原始实验数据，均采用统一编码方式完成匿名化处理，去除所有个人可识别信息，加密存储、分级管理。所有拟公开发布的实验数据集、研究数据，均需再次提交伦理委员会审核通过后方可公开，从源头规避数据隐私风险。

7.5 安全阈值外推与被动校准（交叉引用）

味觉实验涉及味质浓度与口腔接触，极端苦味、灼烧感与过敏反应属于超阈值区域。本模态适用文献[1]第 4.3 节“外推优先、被动校准”原则：安全阈值内的味质浓度严格按安全食用标准控制（见 7.3 节）；超阈值味觉厌恶或损伤数据只能通过安全区间外推或真实临床事件（如味觉倒错、放化疗后味觉损伤）被动接入。架构层面，味质浓度上限与过敏原清单作为硬约束固化于实验控制系统，操作员无权解除；制度层面，被动临床数据接入须经第三方伦理监督。触觉模态的完整表述详见文献[7]第 7.5 节。

8 社会协作与资源整合方案

本章组织框架与视觉篇对应章节一致，以下仅列味觉模态特有的协作机构与价值点。

8.1 核心协作机构

合作方类型	具体机构示例	合作内容
高等院校	食品科学学院、心理学院、生命科学学院	L1/L2 受试者招募、基础理论支撑、学术联合研究
医疗机构	三甲医院口腔科、耳鼻喉科、肿瘤科	L3 障碍组受试者引荐、临床味觉学指导、实验安全医疗支撑
行业协会与企业	餐饮行业协会、品酒师协会、食品调味品企业	L1 专业味觉人才招募、标准味质品供应、工业场景技术落地指导
政府与社会组织	科技主管部门、食品营养学会	政策扶持、经费申报、特殊群体资源对接、项目成果推广

8.2 项目社会价值

• **激活社会人力资源**：本项目存在大规模、持续性的数据采集与实验辅助需求，可为餐饮、食品等行业人员提供临时性就业岗位与稳定收入来源，盘活社会闲散人力资源，助力灵活就业。

• **推动包容性技术发展**：针对味觉功能障碍人群的系统性研究，能够为下一代个性化营养配餐方案、味觉康复训练设备研发、老年适老化餐饮设计提供核心科学依据，助力特殊群体生活品质提升。

• **促进跨学科人才成长**：项目依托多领域交叉研究模式，可培育一批深耕味觉科学、人工智能、分析化学、心理物理学的复合型科研人才，补齐交叉学科人才短板。

8.3 项目经济价值

• **直接产业转化价值**：本项目构建的味觉感知模型可广泛赋能食品饮料行业，应用于风味智能设计、产品品质精准控制、配方优化等场景；同时可落地于个性化营养定制、医疗膳食配比、智能烹饪设备研发等多个赛道，产业化应用场景广阔。

• **专利与标准价值**：项目研发的三层映射模型架构、标准化实验范式、高精度味觉感知数据集均可形成核心自主知识产权，可申报发明专利、软件著作权，同时可推动味觉 AI 实验、数据标注领域行业标准制定，构建行业技术壁垒。

9 项目阶段规划与目标成果

本章组织框架与视觉篇对应章节一致，以下仅列味觉模态特有的里程碑内容。

9.1 阶段划分与里程碑

阶段	周期	核心任务	里程碑目标
第一阶段：基建与筹备期	0—12 个月	完成专项实验室整体建设、功能分区布置；完成 HPLC、离子色谱、电子舌等核心设备采购、安装与调试；完成味觉递送系统校准与优化；推进伦理申报与审批；搭建 L1 味觉专家资源库	实验室顺利通过专项验收；伦理审批手续齐全合规；建成完善的 L1 专家资源库；成功采集首批味觉测试数据，验证实验体系可行性

第二阶段：单维纵深实验期（核心攻坚）	12—48 个月	聚焦甜、咸、酸、苦、鲜五种基本味质，逐一开展全浓度梯度单维度纵深实验，完成多批次受试者数据采集、筛选与标注；推进神经编码模型训练、迭代与优化	建成覆盖五种基本味质、全浓度梯度的标准化单维味觉数据集；完成第一版味觉神经编码层模型开发与上线，模型基础性能达标
第三阶段：多维交互实验期	48—72 个月	开展二元混合味质交互实验、温度调制味觉实验、味觉+嗅觉跨模态耦合实验，探索多维度味觉感知规律；完善模型多场景适配能力	完成全部多维交互实验数据采集与分析，构建多模态味觉感知数据库；完整 AI 味觉感知模型通过多场景有效性验证
第四阶段：整合与验证期	72—84 个月	整合全周期单维、多维实验数据，完成数据集标准化梳理与归档；迭代优化核心模型；完成系列学术论文撰写、投稿；发布 AI 味觉感知模拟器	正式发布 AI 味觉感知模拟器 1.0 版本并完成核心模型开源；完成系列高水平学术论文投稿；形成完整的实验标准与操作规范体系

9.2 最终目标成果

理论成果

构建完整的人类味觉感知"物理—神经—知觉"三层映射数据库，实现 L1（味觉专家）、L2（普通人群）、L3（味觉障碍人群）三层数据对照，全面覆盖甜、咸、酸、苦、鲜五种基本味质，填补 AI 味觉领域系统性数据空白。

模型成果

研发开源可用的 AI 味觉感知模拟器，配套完整推理代码与预训练模型参数，支持基于个体基因型、快速标定测试的个性化感知适配，可精准模拟不同人群的人类味觉认知规律。

标准与规范成果

制定味觉 AI 实验设计与效果评估标准草案，形成一套标准化、可复用的味觉感知数据

采集、筛选、标注全流程 SOP 文档，为行业相关研究提供统一规范。

社会影响力成果

搭建国际化味觉 AI 研究合作节点，推动跨区域、跨领域学术交流；形成可直接落地于食品风味设计、个性化营养定制、医疗膳食研发领域的产业化成果，赋能相关行业升级。

10 结论

本文系统梳理并完整论述了 AI 味觉功能构建的全链条工程实施方案，涵盖理论基础体系、"物理—神经—知觉"三层映射核心模型、分层受试者实验设计、单变量纵深实验标准化体系、实验室建设方案、核心设备参数选型、跨学科团队配置、科研伦理规范、社会资源协同机制、全周期阶段规划等核心内容，形成了一套体系完整、逻辑严谨、可落地、可执行的 AI 味觉构建实施方案。

人类味觉感知具备独特的生理与认知特性，是 AI 感官功能构建中极具科研价值与技术挑战的研究模态。其核心特性体现为 GPCR 通路与离子通道通路的双轨信号传导机制、味蕾四类细胞的精准功能分化、味觉阈值与感知强度的分离特征，同时存在超级品尝者与非品尝者的极端个体感知差异。从分子机制来看，人类依托约 25 种苦味受体的组合编码模式实现苦味感知，通过 T1R 家族异源二聚体完成甜味、鲜味的分子识别，借助离子通道实现咸味、酸味的快速信号传导。多样化、差异化的味觉感知生理机制，决定了 AI 味觉模型需要具备远超视觉、听觉 AI 模型的架构异构性与自适应灵活性。

本研究确立了核心实验原则：以绝对味觉者为精度基准，锚定 AI 味觉感知高精度上限；以普通人群数据为核心基础，构建通用主流味觉统计模型；以味觉功能障碍人群（重点为非品尝者）为边界参照，定义模型鲁棒性与适配边界。该方法有效保障了自研 AI 味觉模型可全面覆盖人类味觉认知完整谱系，兼顾通用性、精准性与稳定性。

AI 味觉功能的成功构建，并非单一算法或数据层面的突破，而是依托精密化学分析设备、标准化心理物理学实验、跨学科协同研发、全流程伦理保障、多维度社会资源整合的系统性工程。本方案为 AI 味觉构建这一跨越基础科学与工程实践的重大课题，提供了完整、系统、可落地的实操蓝图。

味觉作为连接化学物质世界与人类主观感知体验的核心桥梁，其 AI 化落地将与成熟的 AI 视觉、听觉、嗅觉感知体系共同构成完整的 AI 四感感知基础，为后续 AI 触觉建模、五感融合"通感"认知理论构建筑牢实验与工程根基，最终推动与人类认知对齐、可验证、可落地的完整 AI 感知世界模型的形成。

参考文献

[1] YunFei M. Wang 论经典 AI 训练方式认知局限的产生原因与破局思路——迈向基于多尺度机器感知与认知对象数据库的下一代人工智能[PP/OL]. AiraXiv, 2026. eprint: 2611.0009
[2] YunFei M. Wang 数学有效性的哲学解释：基于计算模拟视角的"键-值-信息-相"四层认知模式[预印本]. PhilPapers, 2026. 链接: https://philpapers.org/rec/WANPOT-8
[3] YunFei M. Wang AI 视觉功能的可行性构建方法——基于多尺度机器感知与三层映射模型的工程实现路线图[PP/OL]. AiraXiv, 2026. eprint: 2611.0010
[4] YunFei M. Wang AI 听觉功能的可行性构建方法——基于多尺度机器感知与三层映射模型的工程实现路线图[PP/OL]. AiraXiv, 2026. eprint: 2611.0011
[5] YunFei M. Wang AI 嗅觉功能的可行性构建方法——基于多尺度机器感知与三层映射模型的工程实现路线图[PP/OL]. AiraXiv, 2026. eprint: 2611.0012
[6] Lawless H T, Heymann H. Sensory Evaluation of Food: Principles and Practices [M]. 2nd ed. New York: Springer, 2010.
[7] YunFei M. Wang AI 触觉功能的可行性构建方法——基于多尺度机器感知与三层映射模型的工程实现路线图[PP/OL]. AiraXiv, 2026. eprint: 2611.0014
[8] YunFei M. Wang 论 AI 通感（机器联觉）功能的可行性构建方法——基于五感感知体系与认知对象数据库的跨模态联想与验证机制[PP/OL]. AiraXiv, 2026. eprint: 2611.0015
[9] YunFei M. Wang 论 AI 认知对象数据库的设计与构建——基于五感感知映射的多模态认知对象数据体系与基础设施[PP/OL]. AiraXiv, 2026. eprint: 2611.0016

AIGC 使用声明

本文作者独立提出论文核心观点、完整理论框架、项目方案设计思路及全部实验与工程逻辑。文本撰写过程中，作者使用 DeepSeek AI 模型辅助完成文本结构梳理、部分章节初稿起草与语言修辞润色。作者对 AI 辅助生成的全部内容进行了全方位审阅、批判性修改、优化打磨与最终定稿，对本文所有学术观点、研究方案、数据引用、结论成果承担全部最终学术责任。