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

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

摘要

本文是"机器感知与认知构建"系列研究的第四篇，旨在系统论述 AI 嗅觉功能的工程化构建方案。嗅觉是人类感知世界的重要感官通道，在食物选择、环境安全预警、社会交往与情绪调节中发挥着不可替代的作用。与视觉和听觉相比，嗅觉的神经编码机制具有独特的复杂性：人类约 390 种功能性嗅觉受体通过组合编码模式识别海量气味分子，其编码方式同时包含空间维度（嗅小球激活图谱）与时间维度（神经元放电的时空序列模式）。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嗅觉模态的完整工程技术蓝图。我们系统阐述了嗅觉感知的生物学基础（从嗅上皮嗅觉受体神经元到嗅球、梨状皮层及眶额叶皮层的完整投射通路）与心理物理学核心维度（检测阈值、辨别阈值、气味强度、气味效价等），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"绝对嗅觉者—普通人群—嗅觉功能障碍者"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 嗅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（含气味递送系统、气相色谱—质谱联用仪、嗅觉测量仪、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、可解释且与人类嗅觉认知对齐的 AI 嗅觉感知模型奠定了可操作的科学与工程基础。

关键词

机器嗅觉；三层映射模型；嗅觉心理物理学；嗅觉神经编码；组合编码；分层基准对照组；单变量纵深实验

1 引言：嗅觉在机器认知体系中的核心地位

嗅觉是人类最古老的感官之一，在演化史上早于视觉和听觉。尽管人类常被视为"视觉主导"的物种，嗅觉在食物选择与营养摄入、环境危险识别（如火灾烟气、腐败食物、有毒气体）、社会交往（如通过体味识别亲属与伴侣）以及情绪与记忆调节中发挥着深层而微妙的作用。嗅觉与边缘系统（杏仁核、海马）的直接投射通路，赋予了气味

独特的情绪唤起与记忆触发能力。

构建 AI 的嗅觉功能，具有独特的科学价值与技术挑战：

• **分子识别的化学本质**：嗅觉感知始于气味分子与嗅觉受体的物理化学相互作用。与视觉（电磁波）和听觉（机械波）不同，嗅觉处理的本质是分子识别——AI 嗅觉系统必须具备对复杂化学混合物的高灵敏度、高选择性检测与辨识能力。人类可以分辨近 2000 种嗅味，而自然界中可挥发的有机化合物种类数以万计。

• **组合编码的复杂性**：人类基因组中约含 339 个完整功能的嗅觉受体基因（另含约 297 个假基因），功能性受体蛋白约 390 种。每个嗅觉受体可识别结构相似的多类气味分子，而单个气味分子又可被多个嗅觉受体以不同亲和力识别。气味身份由一组被激活的嗅觉受体的组合模式来定义。这种"多对多"的映射关系使得嗅觉编码具有极高的信息容量，同时也为建模带来了巨大的复杂性。

• **时空双重编码**：嗅球不仅通过空间编码（不同气味激活不同空间分布的嗅小球簇）来表征气味身份，还通过时间编码（神经元放电的时序模式）来携带气味信息。实验揭示不同的气味会产生不同的时空放电序列模式。这意味着 AI 嗅觉模型必须同时处理空间与时间两个维度的神经信息。

• **个体差异的极端显著性**：嗅觉是个体差异最大的感官之一。人类嗅觉受体基因存在大量单核苷酸多态性，导致不同个体对同一气味的感知可能截然不同。例如，雄烯酮的敏感度差异可由 OR7D4 基因的多态性解释 39%，而β-紫罗兰酮敏感度的 96%变异可由 OR5A1 基因的单个单核苷酸多态性解释。此外，约 22%的普通人群存在不同程度的嗅觉功能障碍，超过 50%的 65 岁以上成年人存在嗅觉退化。这一极端差异使得"普通人"概念在嗅觉领域比任何其他感官都更难以定义。

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。第二篇以视觉为范例，第三篇以听觉为范例，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嗅觉模态，系统解决从物理化学信号到预测的嗅觉神经编码、再到预测的主观嗅觉体验的全部关键工程问题。

本章核心论点：构建 AI 嗅觉功能的本质，是为 AI 建立一套"气味分子的物理化学属性→预测的人类嗅觉神经时空编码模式→预测的主观嗅觉体验（身份、强度、效价）"的可计算映射系统。该系统必须以人类嗅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 嗅觉感知模型。

与已有嗅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"气味—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。组合编码与时空双重编码使这一链路比

视觉、听觉更为复杂：神经编码层必须同时处理受体组合激活、嗅小球空间图谱与僧帽细胞时间序列三个子维度，而主观知觉层必须处理气味身份、强度、效价与熟悉度等多个并行输出。

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：嗅觉感知的生物学与心理物理学基础。
- 第 3 章：AI 嗅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 嗅觉感知的生物学与心理物理学基础

2.1 人类嗅觉系统的信息处理层级

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

嗅上皮层（化学信号→神经信号）

鼻腔顶部的嗅上皮含有约 600 万至 1000 万个嗅觉感觉神经元（OSNs）。每个 OSN

在其树突末梢表达一种嗅觉受体蛋白。人类约有 390 种功能性嗅觉受体。气味分子与嗅觉受体结合，激活 G 蛋白（Golf），进而激活腺苷酸环化酶产生 cAMP，打开环核苷酸门控离子通道，引起钙离子和钠离子内流，导致神经元去极化并产生动作电位。嗅觉受体属于七次跨膜 G 蛋白偶联受体家族，是哺乳动物中最大的基因家族。

嗅球层（空间编码与初步处理）

表达相同嗅觉受体的 OSNs 将其轴突汇聚投射到嗅球中特定的嗅小球。人类嗅球内约有 2000 个嗅小球。嗅小球将化学编码转化为空间活动地图——不同气味分子激活不同空间分布的嗅小球簇。嗅球通过侧向抑制机制锐化气味表征，增强对比度，将气味信号与背景噪声分离。嗅球僧帽细胞将处理后的信息经嗅束投射至初级嗅皮层。

初级嗅皮层（梨状皮层、杏仁核、内嗅皮层）层（气味身份与效价编码）

梨状皮层神经元主要编码气味的化学身份。约 40%的梨状皮层神经元受气味调制。杏仁核神经元编码气味的主观效价（愉悦/不愉悦）。海马神经元预测气味的行为识别表现。

高级皮层（眶额叶皮层、前额叶皮层）层（认知整合与语义）

眶额叶皮层整合嗅觉、味觉与视觉信息，参与气味愉悦度的精细评估。梨状皮层和杏仁核中的部分神经元还对气味相关的图像和文本产生响应，提示跨模态概念表征的存在。

经验与可塑性层

嗅觉训练可提高敏感度、辨别力、记忆与识别能力。长期嗅觉专业训练（如调香师、品酒师）可导致嗅觉皮层功能重组。

这一多层级加工架构提示我们：AI 嗅觉模型不能止于"分子结构→气味标签"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。

2.2 嗅觉的心理物理学核心维度

心理物理学揭示，人类对气味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嗅觉心理物理学标准文献[5]；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	气味物质浓度（ppm/ppb）	极端个体差异；不同物质阈值相差可达百万倍	乙醚绝对阈限 5.83mg/L 空气; 人造麝香 0.00004mg/L
识别阈值	气味物质浓度	通常比检测阈值高 1—2 个数量级；不同物质差异显著	脂肪醛检测与识别阈值差距至少达 100 倍
辨别阈限	浓度差或分子结构差	韦伯分数约 0.04（浓度辨别）；韦伯系数一般在 1/4 至 1/3 之间	正丁醇浓度变化 7%即可辨别
气味强度	气味物质浓度（对数关系）	幂函数关系（史蒂文斯定律）；受适应与背景调制	强度感知是个体间差异最大的维度之一，详见[5]

这些维度各有其物理化学基础，可单独操作、单独测量。每一维度的完整研究都将产出该维度的"物理—感知映射曲线"，构成 AI 嗅觉模型的"原子模块"。值得注意的是，嗅觉检测阈值的极端个体差异是建模的重大挑战。同一气味物质，不同个体的检测阈值可能相差数个数量级。这一差异主要源于嗅觉受体基因的遗传变异。

2.3 嗅觉个体差异的谱系分布

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

绝对嗅觉者（L1 基准组）

经长期专业训练的调香师、闻香师、香水调配师、品酒师、茶叶审评师、中药药剂师等。专业训练可提高嗅觉敏感度、辨别力、记忆与识别能力。此类个体提供了嗅觉感知"最高分辨率"的基准信号，是校准 AI 嗅觉模型上限的"黄金标准"。招募来源：国际香料公司、香水学院、葡萄酒与茶叶行业协会、中药研究院所。

普通嗅觉者（L2 主体组）

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

嗅觉功能边界者（L3 边界组）

包括特异性嗅觉缺失者：对特定气味物质不敏感，但其他嗅觉功能正常。例如，对雄烯酮不敏感者约占总人口的相当比例。包括先天性全身性嗅觉缺失者：出生即无嗅觉，约占总人口的 1%—5%。包括嗅觉减退者和嗅觉倒错者：嗅觉功能障碍影响约 22%的普通人群。包括老年性嗅觉衰退者：超过 50%的 65 岁以上成年人存在不同程度的嗅觉功能障碍。其数据用于定义感知空间的边界与模型的鲁棒性下限，对开发包容性嗅觉 AI 至关重要。

2.4 嗅觉研究实验方法的已有基础

嗅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
嗅阈测量	阶梯法、恒定刺激法	检测/识别阈值测定	可标准化为 AI 嗅觉模型的校准协议
气味辨别测试	配对比较、三角测试	评估气味辨别能力	用于受试者分级与模型验证
气味识别测试	标准化嗅棒测试（如 Sniffin' Sticks）	临床嗅觉功能评估	可作为通用评估工具引入实验流程
气味强度/效价评分	视觉模拟量表、Likert 量表	主观感知量化	直接输出为模型训练的回归目标
气相色谱—嗅觉测量法（GC-O）	GC 分离 + 人嗅闻端口	检测复杂混合物中关键气味活性化合物	为 AI 嗅觉模型提供"气味分子—感知"的精细映射数据
动态嗅觉测量法	标准化气味浓度稀释与呈现	气味浓度精确控制	是单变量纵深实验的核心工具

3 AI 嗅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，并具体化至嗅觉模态。该框架的哲学论证与一般性方法论见文献[1][2]；本节仅展开嗅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 嗅觉的物理信号层，目标是建立能够完整描述气味刺激的"化学数字孪生"表征体系。与听觉和视觉不同，嗅觉的"物理层"必须同时包含分子层面的精细化学信息与宏观层面的浓度/混合信息：

分子结构层

气味分子的化学结构式（二维/三维）；
官能团类型与位置（醇、醛、酮、酯、烯等）；
分子量、极性、疏水性（logP）、蒸气压；
分子描述符（如 MORSE 码、分子指纹、药效团特征）；
手性信息（对映异构体可能具有不同气味）。

混合物组成层

挥发性有机化合物（VOC）的完整成分列表；各成分的精确浓度（ppm/ppb 级）；成分间的化学相互作用（如酸碱反应、氢键、迈克尔加成等）；基质效应（如油脂、水分对挥发性物质释放的影响）。

动态释放层

气味分子的时间释放曲线（不同温度、湿度条件下）；气味羽流的空间分布与湍流结构；气味浓度的时间波动（嗅闻采样导致的浓度变化）。

这些数据由高精度分析仪器协同采集：气相色谱—质谱联用仪（GC-MS）用于定性与定量分析挥发性成分；气相色谱—嗅觉测量—质谱联用（GC-O-MS）用于同时获取化学成分信息与人类嗅闻感知响应；电子鼻传感器阵列用于实时、原位的气味模式检测；动态嗅觉测量仪用于精确控制气味刺激的浓度与呈现时序。

"类人"原则在此层的适用边界与视觉、听觉篇一致：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嗅觉受体选择性的科学仪器（如 GC-MS 可精确到单分子鉴定），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：从化学到嗅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嗅觉神经群体时空活动模式的计算模型。该层与已有嗅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。嗅觉的独特之处在于，神经编码层必须同时处理三个子维度——受体组合激活、嗅小球空间图谱、僧帽细胞时间序列—

—三者缺一不可。

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（分子结构特征、浓度、混合物组成等）。

• **中间层**：模拟嗅觉通路各关键节点的神经计算。受体激活层：模拟约 390 种嗅觉受体对不同气味分子的组合激活模式。每种受体有其特征性的亲和力谱（对不同气味分子的结合常数）。嗅球空间编码层：模拟表达相同受体的 OSN 轴突汇聚至特定嗅小球的空间激活图谱。嗅球时间编码层：模拟僧帽细胞群体的时空放电序列模式。不同气味产生不同的时空放电模式。梨状皮层编码层：模拟气味化学身份的皮层表征。杏仁核/眶额叶编码层：模拟气味效价与愉悦度的编码。

• **输出层**：预测的各嗅觉脑区神经群体活动模式（嗅小球空间激活图、僧帽细胞放电率与时间序列、梨状皮层/杏仁核/眶额叶的 fMRI BOLD 信号或 EEG 特征）。

模型训练策略

使用同步记录的人类受试者嗅觉神经生理数据（EEG、fMRI、颅内电生理）作为训练目标。采用组合编码建模方法：模型需学习从分子结构到受体激活组合的非线性映射。迁移学习：利用已有的气味分子—受体结合数据库进行预训练。

3.3 主观知觉层：从神经活动到嗅觉体验的预测模型

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嗅觉体验。

本层的必要性来自嗅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气味物质的成分与浓度，但无法回答"这个气味闻起来是什么体验"。气相色谱的峰面积与人类嗅闻感知的强度、愉悦度、熟悉度之间没有稳定的对应关系。本文的主观知觉层为嗅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，而是补充从神经编码到主观报告的映射，使"这个气味闻起来是什么体验"成为可计算、可校验的输出。

输出维度

• **气味检测**：二值判断（是否嗅到气味）

• **气味强度**：连续数值预测（0—10 分标度）

• **气味效价**：愉悦—不愉悦连续评分

• **气味身份**：从预设气味库中匹配或开放描述

- **气味熟悉度**：熟悉—陌生评分
- **气味意象**：与气味相关的视觉/情感联想

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，同时预测多个感知维度。重点设置个体差异适配模块，针对嗅觉极端个体差异特征，基于个体基因型或快速标定测试实现模型个性化校准。

3.4 三层模型整合：AI 嗅觉"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：

气味分子物理化学数据（输入）→【物理信号层】化学描述符标准化（分子结构+浓度+混合物组成）→【神经编码层模型】预测嗅觉神经时空活动模式（受体组合激活+嗅球时空图谱+皮层编码）→【主观知觉层模型】预测主观嗅觉报告（检测/强度/效价/身份/熟悉度）→输出：AI 对"这个气味是什么体验"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嗅觉神经数据进行比对，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，区别在于中间层的嗅觉通路替换，以及神经编码层需同时处理空间与时间两个子维度。

此"感知模拟器"一旦成熟，AI 将能够：理解一种气味对人类意味着什么（愉悦/厌恶/熟悉）；预测一种新合成的香料分子是否适合作为某种香型的前调；为食品饮料企业设计符合目标气味体验的配方；适配特定嗅觉障碍用户的残余嗅觉能力，生成补偿性的气味信号。

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，此处仅列嗅觉模态的适用要点：

- **原则一：单变量纵深实验优先于多变量黑箱采集。**嗅觉实验从单一纯气味物质出发，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。

• **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 绝对嗅觉者、L2 普通嗅觉者、L3 嗅觉功能边界者。在嗅觉领域，L3 组的特异性嗅觉缺失者尤为重要——他们对特定气味物质的"盲区"为理解受体—气味映射提供了天然实验。

• **原则三：严格的气味刺激控制。**气味刺激的浓度、纯度、呈现时序、温湿度必须精确控制。使用动态嗅觉测量仪实现气味浓度的精确稀释与快速切换。所有气味刺激需经 GC-MS 验证纯度与浓度。

4.2 受试者招募与分组方案

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

L1 基准组（绝对嗅觉者，每组 5—10 人）

来源：调香师、香水调配师、品酒师、茶叶审评师、中药药剂师、闻香师等。招募方式：通过国际香料公司、香水学院、葡萄酒与茶叶行业协会、中药研究院所定向邀请。入选标准：通过标准化嗅觉测试（如 Sniffin' Sticks 测试，得分在相应年龄组正常值上限以上）；经专业训练年限≥5 年；无已知嗅觉疾病。报酬标准：专家级咨询费，建议 1000—2000 元/小时。

L2 主体组（普通嗅觉者，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。入选标准：通过基础嗅觉筛查（Sniffin' Sticks 12 项识别测试，得分在正常范围内）；无已知嗅觉疾病；无急性呼吸道感染。报酬标准：100—200 元/小时。

L3 边界组（嗅觉功能边界者，每组 20—50 人）

分类子组：1）特异性嗅觉缺失者（经标准化测试确认对特定气味不敏感）；2）先天性全身性嗅觉缺失者（经临床诊断确认）；3）嗅觉减退/嗅觉倒错者（经临床诊断）；4）老年性嗅觉衰退者（≥65 岁）。来源：与三甲医院耳鼻喉科合作，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"气味浓度—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，填写嗅觉史问卷。进行基础嗅觉筛查（Sniffin' Sticks 测试），确认分组归属。受试者进入气味实验室，适应环境 10 分钟。佩戴高密度 EEG 电极帽（64—128 导）；准备 fMRI 扫描（如需）。嗅觉测量仪预热与校准。

实验正式阶段（约 60—90 分钟）

选择一种标准气味物质（如正丁醇，因其气味特征明确、阈值已知）。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）。每个试次：通过嗅觉测量仪向受试者呈现 2—3 秒气味刺激（通过特制鼻插管或嗅闻面罩），刺激间隔至少 30 秒（避免适应）。

每次刺激后，受试者需完成：a）二选一判断："是否嗅到了气味？"（测量检测阈值）；b）连续滑动条评分："请评价此气味的强度"（0—10 分）；c）7 级评分："请评价此气味的愉悦度"（-3 至+3）；d）开放回答："请描述此气味的特征"。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，同步记录血氧水平依赖信号。

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

在完成单一物质的全浓度曲线后，逐步引入：不同分子结构（同系列化合物，如不同碳链长度的醛类），研究结构—感知关系；二元混合物（两种气味物质按不同比例混合），研究混合感知与成分交互；鼻内定位（单侧鼻腔刺激），研究空间编码。

4.4 数据同步采集与质量保障

• **气味刺激控制**：嗅觉测量仪需能实现气味浓度的精确稀释（精度±5%）、快速切换（上升时间<100ms）、温湿度控制（37°C，80%相对湿度，匹配鼻腔生理条件）。所有气味刺激需经 GC-MS 验证纯度与浓度。

• **同步精度**：嗅觉测量仪触发信号、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**：气味实验室需配备独立的通风与活性炭过滤系统，确保每次试次间背景气味清零。室内温度恒定（22±1°C），湿度恒定（50±5%）。

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，以下仅列嗅觉模态特有的分区、设备与化学安全要求。

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、污水处理厂）；需有独立的通风系统，避免气味交叉污染；需考虑未来扩展性。

环境影响评估

开展周边空气质量监测（挥发性有机物浓度基线）；完成通风系统设计评估，保障气味实验室维持合理微正压或微负压环境，杜绝外界气味干扰与内部气味外泄。

5.2 实验室核心区域功能划分

主气味实验舱（30—50m²）

配备独立的通风与活性炭过滤系统，换气次数≥12 次/小时；墙面与设备采用易清洁、不吸附气味的材料（不锈钢、玻璃）；配备嗅觉测量仪、气味递送管路系统、受试者座椅与头部固定装置；支持 EEG/fMRI 同步记录（如需适配 MRI，全部采用非铁磁性材料）。

化学分析室（20—30m²）

配备 GC-MS、GC-O-MS 等化学分析仪器；配备标准通风橱、低温避光试剂存放柜；用于气味刺激的配制、纯度验证与浓度标定。

嗅觉神经记录与控制室（15—30m²）

紧邻主实验舱，由观察窗连通；布置 EEG/fMRI 数据采集主机、受试者监控系统、嗅觉测量仪控制电脑、数据服务器，实现实验全程可视化管控与数据同步采集。

气味存储与配制室（10—20m²）

低温、避光、防挥发存放气味标准品；配备精密天平、移液器、顶空瓶等配制工具；配置独立通风与恒温恒湿系统，保障气味试剂存储安全、配比精准。

受试者接待与筛查室（10—15m²）

用于受试者登记、问卷填写、知情同意签署、基础嗅觉功能筛查，隔离实验区域，避免外界干扰。

数据处理与计算中心（15—30m²）

部署多 GPU 高性能计算服务器、PB 级大容量存储阵列；配置 UPS 不间断电源与恒温

空调系统，保障数据处理、模型训练与数据存储稳定安全。

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）
气味分析	气相色谱—质谱联用仪（GC-MS）	质量范围 1—1000Da，分辨率≥2000，灵敏度≤1pg（OFN）	80—150
气味分析	气相色谱—嗅觉测量—质谱联用（GC-O-MS）	GC-MS+嗅闻端口，同步记录色谱保留时间与嗅闻响应	100—180
气味呈现	动态嗅觉测量仪	浓度稀释范围 1:10 至 1:10^6，上升时间<100ms，4—8 通道独立控制	60—120
气味呈现	气味标准品库	≥200 种标准气味物质（涵盖各类官能团），纯度≥98%	10—30（逐年）
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
环境控制	活性炭过滤通风系统	换气次数≥12 次/小时，活性炭更换周期≤3 个月	20—50
环境控制	温湿度控制系统	温度 22±1℃，湿度 50±5%	5—15
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，一键停止气味输出，快速终止实验刺激。

- **气味安全管控**：所有气味刺激浓度严格控制在 NIOSH/ACGIH 职业暴露限值以下；对致敏、刺激性气味单独标注、限量使用，全程监控。

- **应急保障**：现场配置急救药箱、洗眼器等基础应急设备；与周边三甲医院建立绿色就医通道，应对突发不适情况。

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，以下仅列嗅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	整体方案设计、项目统筹与技术总把控	嗅觉神经科学、心理物理学或化学感官领域教授/研究员，具备跨学科项目统筹经验
嗅觉心理物理学方向 PI	1	实验方案设计、心理物理学数据采集与分析、受试者实验管控	博士学位，5 年以上嗅觉实验研究经验，熟练掌握嗅阈测量、主观感知量化方法
计算神经科学方向 PI	1	嗅觉神经编码模型构建与迭代优化	博士学位，熟练掌握 EEG/fMRI 神经数据处理与建模方法
分析化学/香料化学方向 PI	1	气味物质分析、刺激配制与标定、GC-MS/GC-O-MS 操作	博士学位或同等工程经验，熟悉挥发性有机物分析与香料化学
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 操作与嗅觉测量仪使用
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：聘请嗅觉神经生理学顾问、耳鼻喉科医学顾问、香料化学工业顾问（国际香料企业）、数据安全与伦理法律顾问，为项目全程提供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，以下仅列嗅觉模态特有的伦理关切。

7.1 伦理审查与合规框架

本项目所有实验方案、受试者招募流程、数据采集与存储规范，需在实验启动前提交机构伦理委员会（IRB）审核，取得正式批准文件后方可实施。全程严格遵循《中华人民共和国个人信息保护法》《涉及人的生物医学研究伦理审查办法》相关规定，契合 GDPR 通用数据保护准则。

7.2 受试者知情同意与权益保护

标准化知情同意书需完整载明研究目的、实验流程、气味刺激类型与浓度范围、潜在不适感受、受试者权利（随时无条件退出、数据隐私保密）、报酬标准、数据使用范围等核心内容，确保受试者完全知情、自愿参与。针对嗅觉功能障碍等特殊受试者群体，采用通俗化语言解读条款，保障特殊群体知情权与合法权益。

7.3 实验过程的安全监控

建立全程安全监控机制，所有气味刺激严格限定在安全阈值内，杜绝致敏、有毒超标刺激。实验操作员全程可视化监控受试者状态，实时问询身体感受。设定明确实验中止条件，受试者出现头痛、恶心、眩晕、鼻腔不适等异常症状时，立即终止实验、撤离刺激源并做好应急处置。

7.4 数据隐私与匿名化处理

所有原始实验数据、受试者个人信息实行分离存储、匿名化编码管理，去除可识别个人身份的敏感信息。数据集公开、论文发表前需再次提交伦理委员会审核，确保数据合规可用，杜绝隐私泄露风险。

7.5 安全阈值外推与被动校准（交叉引用）

嗅觉实验涉及刺激性、致敏性气味，极端厌恶刺激与化学灼伤属于超阈值区域。本模态适用文献[1]第 4.3 节“外推优先、被动校准”原则：安全阈值内的气味浓度严格按 NIOSH/ACGIH 职业暴露限值控制（见 5.4 节）；超阈值嗅觉厌恶或损伤数据只能通过安全区间外推或真实事件（如职业性化学暴露事故、嗅觉倒错临床记录）被动接入。架构层面，致敏与刺激性气味的使用上限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，以下仅列嗅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	化学系、心理学院、生命科学学院	L1/L2 受试者招募、基础理论支撑、学术联合攻关
医疗机构	三甲医院耳鼻喉科	L3 障碍组受试者引荐、临床嗅觉学技术指导、实验安全医学支撑
行业协会与企业	国际香料公司、香水学院、葡萄酒/茶叶行业协会	L1 专业嗅觉人才招募、标准气味品供应、工业场景技术落地指导
政府与社会组织	残联、科技主管部门	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**：大规模受试者招募与实验运维需求，可为专业技术人才、普通社会人员、特殊群体提供临时就业与劳务收入渠道，盘活社会人力资源。

- **推动包容性技术发展**：针对嗅觉功能障碍人群的系统性研究，可直接赋能电子鼻、智

能气味预警、嗅觉康复设备的研发迭代，填补无障碍智能感知技术空白。

• **培育交叉学科人才**：搭建嗅觉科学、人工智能、分析化学、神经科学交叉研究平台，培养复合型高端科研人才，助力智能感知领域学科建设与人才储备。

8.3 项目经济价值

• **产业直接转化**：AI 嗅觉感知模型可广泛应用于食品饮料风味研发与品质检测、环境 VOCs 监测、公共安全危险气体/爆炸物识别、医疗呼气疾病诊断、美妆香料配方优化等多个产业场景，具备极高产业化落地价值。

• **知识产权与标准构建**：项目产出的三层映射模型架构、标准化实验范式、全谱系嗅觉感知数据集可形成核心专利、软件著作权，可牵头制定嗅觉 AI 行业技术规范与数据标准，抢占行业技术话语权。

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，以下仅列嗅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	实验室装修建设、核心设备采购安装调试、伦理审批、L1 专家库搭建、实验 SOP 制定	实验室验收达标，设备正常运行，完成首批预实验数据采集
第二阶段：单维纵深实验期（核心攻坚）	12—48 个月	完成单一气味物质全维度单变量实验，采集三组受试者全谱系数据，搭建神经编码层基础模型	建成完整分层对照数据集，第一版 AI 嗅觉神经编码模型上线
第三阶段：多维交互实验期	48—72 个月	开展气味混合物、空间定位、跨模态联动等复杂实验，完善多维度感知映射模型	完成全场景嗅觉感知模型优化，实现多变量气味感知精准预测
第四阶段：整合与验证期	72—84 个月	整合全部实验数据，完成模型闭环验证，撰写系列论文，开源核心模型	发布 AI 嗅觉感知模拟器 1.0，系列学术论文定稿投稿，核心技术开源共享

9.2 最终目标成果

理论成果

构建覆盖 L1/L2/L3 全人群谱系的人类嗅觉"物理—神经—知觉"三维映射数据库，完善 AI 嗅觉组合编码、时空编码核心理论体系。

模型成果

研发开源可迭代的 AI 嗅觉感知模拟器，包含完整推理代码、预训练模型参数与标准化调用接口。

标准成果

制定嗅觉 AI 实验设计、数据采集、模型评估的行业标准草案，形成全套标准化操作 SOP 文档。

应用成果

建成国际领先的机器嗅觉研究平台，形成可落地的产业转化技术，赋能食品、环保、安防、医疗等领域智能化升级。

10 结论

本文系统论述了 AI 嗅觉功能构建的完整工程实施方案，从理论基础、三层映射模型、分层受试者设计、单变量纵深实验标准化、实验室建设方案、设备参数选型、团队配置、伦理规范、社会协作到阶段规划，形成了全链条、可落地的实施方案。

嗅觉感知的独特性——组合编码、时空双重编码、极端个体差异——使其成为 AI 感官功能构建中最具挑战性也最具科学价值的模态之一。人类约 390 种功能性嗅觉受体通过组合模式编码海量气味分子，嗅球将化学编码转化为空间活动地图并辅以时间编码，而个体间因嗅觉受体基因的遗传变异导致感知差异可达数个数量级——这些特征要求 AI 嗅觉模型必须具备比视觉和听觉模型更高的复杂度与灵活性。

我们强调的核心实验原则——以绝对嗅觉者为基准锚定高精度感知上限、以普通人群构建主流统计模型、以嗅觉功能障碍者（尤其是特异性嗅觉缺失者）定义模型鲁棒性边界——确保了最终产出的 AI 嗅觉模型能够覆盖人类嗅觉认知的完整谱系。

嗅觉功能的构建不仅依赖于算法与数据的突破，更依赖于精密化学分析仪器、严谨心理物理学实验设计、跨学科团队协作、周密伦理保障与社会资源整合的系统工程能力。本方案为这一跨越基础科学与工程实践的重大挑战，提供了完整的操作蓝图。

嗅觉作为连接化学世界与主观体验的关键桥梁，其 AI 化的成功构建将为后续味觉、触

觉等感官功能的建模提供可复制的工程范式，尤其为味觉—嗅觉交互（风味感知）的研究奠定基础，最终促成完整的、可验证的、与人类认知对齐的 AI 感知世界模型的诞生。

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] Doty R L. Handbook of Olfaction and Gustation[M]. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2015.

[6] YunFei M. Wang 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[PP/OL]. AiraXiv, 2026. eprint: 2611.0013

[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

本文作者提出了论文的核心观点、理论框架、方案设计思路、全部实验与工程逻辑。在文本撰写过程中，作者使用了 DeepSeek AI 模型辅助进行文本结构的组织、部分章节的起草与修辞润色。作者对 AI 生成的所有内容进行了全面的审阅、批判性修改与最终定稿，并对论文的全部学术内容、观点、数据引用及结论负最终责任。