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

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

摘要

本文是"机器感知与认知构建"系列研究的第六篇，旨在系统论述 AI 触觉功能的工程化构建方案。触觉是人类与物理世界进行直接交互的最根本感官通道，在物体识别、环境感知、精细操作与社会交互中发挥着不可替代的作用。与视觉、听觉不同，触觉系统通过分布于皮肤中的四类低阈值机械感受器（慢适应型 SAI 与 SAII、快适应型 FAI 与 FAII），以时空编码方式并行处理压力、振动、拉伸、温度等多维物理信息，经脊髓背柱—内侧丘系通路传递至初级体感皮层与次级体感皮层，最终形成对物体质地、硬度、温度、形状及运动状态的主观感知。触觉的工程复杂性在于其分布式柔性形态：人类皮肤面积约 1.5—2 平方米，机械感受器以百万计，必须在可拉伸曲面上并行处理多模态信号。本文以分布式触觉传感阵列（本文简称"传感器集群"）而非离散测量设备来定位 AI 触觉的感知前端，并提出以柔性表面多点触控阵列作为集群的已有工程雏形。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触觉模态的完整工程技术蓝图。我们系统阐述了触觉感知的生物学基础（从皮肤机械感受器分类与信号传导机制到脊髓—丘脑—皮层的完整投射通路）与心理物理学核心维度（压力检测阈值、两点辨别阈、振动觉阈值、温度觉阈值、质地辨别等），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"绝对触觉者—普通人群—触觉功能障碍者"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 触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、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、可解释且与人类触觉认知对齐的 AI 触觉感知模型奠定了可操作的科学与工程基础。

关键词

机器触觉；三层映射模型；触觉心理物理学；触觉神经编码；低阈值机械感受器；分布式触觉传感阵列；分层基准对照组；单变量纵深实验

1 引言：触觉在机器认知体系中的核心地位

触觉是人类最古老、最直接、与物理世界交互最为紧密的感官通道。与依赖远距离传播的电磁波（视觉）和机械波（听觉）不同，触觉是一种接触性物理感官——只有当物体与皮肤表面发生直接力学接触或热交换时，触觉感知才能启动。这一"零距离交互"的特性，赋予了触觉在物理世界认知中的独特地位：它是验证物体客观存在、评估物质属性、指导精细操作的最后一道感官关口。

从进化的角度看，触觉系统是生物界最早演化出的感官系统之一，其神经回路在脊椎动物中具有高度的进化保守性。从个体发展的角度看，婴幼儿通过触觉建立对物体恒常性、物质属性（软硬、冷暖、光滑粗糙）以及自身身体边界的最初理解。从日常生存的角度看，触觉在物体识别、环境导航、伤害预警、社会交流（如握手、拥抱）以及精细操作（如手术、雕刻、乐器演奏）中发挥着不可替代的作用。

构建 AI 的触觉功能，具有独特的科学价值与技术挑战：

- **多维物理信息的并行编码**：触觉系统处理的不是单一物理量，而是压力、振动、拉伸、温度、剪切力等多维信息的同步输入。皮肤中的四类低阈值机械感受器以不同的适应特性（慢适应/快适应）和感受野大小，对这些物理量进行并行编码。慢适应型 SAI（Merkel 细胞）在持续刺激期间维持连续的电生理信号输出，赋予实时监测静态触觉刺激的能力；快适应型 FAI（Meissner 小体）和 FAII（Pacinian 小体）仅响应刺激起始—结束阶段的动态变化，显著增强对振动、滑移和瞬时机械刺激的敏感性。这种多维、并行的信号架构要求 AI 触觉模型必须具备异构的、多通道的信号处理能力。

- **分布式柔性覆盖的工程难度**：触觉的工程困难不在于信息带宽（视觉的带宽更高），而在于三重约束的叠加——大面积柔性覆盖、多模态共存、感知与动作闭环。人类皮肤面积约 1.5—2 平方米，指尖每平方厘米约 240 个机械感受器单元，全身机械感受器以百万计，且必须分布在可拉伸、可自修复的曲面上。当前工程手段尚不能完整复现这一覆盖规模与多模态集成度。这一约束将在第 3.1 节以分布式触觉传感阵列的工程定位与局部聚焦策略加以处理。

- **时空编码的双重复杂性**：触觉信息的神经编码同时包含空间维度（不同皮肤区域的感受器激活图谱）与时间维度（感受器放电的时序模式）。计算模型如"压力波传播模型"结合皮肤力学与漏积分—放电模型，已能预测手掌区域机械感受器的毫秒级响应。这一时空双重编码特性要求 AI 触觉模型必须同时处理空间分布信息与时间序列信息。

- **触觉与动作的双向交互**：触觉感知并非被动的信号接收，而是与动作紧密耦合的主动探索过程。动作通过三种途径影响触觉感知：下行门控——运动准备期即抑制无关触觉输入，主动运动时电刺激检测阈值可升高 50%；预测性衰减——自触时前馈模型比对预期与实际反馈，使感知强度降低；探索动作增强——特定动作优化特征提取，如横向摩擦检测纹理粗糙度，按压评估柔软度。这一感知与动作的闭环要求 AI 触觉模型不能孤立于运动控制系统而存在。

• **极端个体差异与职业特异性**：触觉敏锐度在人群中的分布极为不均。一方面，盲人因视觉通道关闭后的跨模式重组，其触觉敏锐度通常显著高于视力正常者，这使其成为触觉感知研究的天然"绝对触觉者"群体。另一方面，职业电竞选手、雕塑家、傀儡师、外科医生、推拿按摩师、中医诊疗师、武道家及各运动领域佼佼者等从事细致肢体活动的从业者，经过长期专业训练，其触觉分辨阈限可达普通人的数倍。此外，女性触觉感受性略高于男性，不同身体部位的触觉阈限差异可达两个数量级以上。这一极端差异要求 AI 触觉模型必须具备比任何其他感官更强的个性化适配能力与身体部位特异性建模能力。

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。第二至五篇分别以视觉、听觉、嗅觉和味觉为范例，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触觉模态——五感中与物理世界交互最为直接的感官——系统解决从多维力学/热学信号到预测的触觉神经时空编码、再到预测的主观触觉体验的全部关键工程问题。

本章核心论点：构建 AI 触觉功能的本质，是为 AI 建立一套"多维物理刺激（压力/振动/温度/拉伸）→预测的人类触觉神经时空编码模式→预测的主观触觉体验（质地/硬度/温度/形状/运动）"的可计算映射系统。该系统必须以人类触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 触觉感知模型。

与已有触觉神经编码研究相比，本文的差异化定位在于：已有工作多以单一感受器类型或单一脑区响应的预测为目标，本文要求的是从多维物理刺激到四类感受器并行编码、再到主观知觉报告的完整可计算链路。触觉的独特之处在于，神经编码层必须并行处理 SAI/SAII/FAI/FAII 四类感受器的异构响应，同时区分被动触觉与主动探索两种模式，并将身体部位特异性纳入模型设计——这三个维度使触觉的神经编码建模比视觉、听觉、嗅觉和味觉都更需要多通道并行架构与部位自适应机制。

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。分布式触觉传感阵列是键，被测量的力学/热学现象指向值，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：触觉感知的生物学与心理物理学基础。

- 第 3 章：AI 触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 触觉感知的生物学与心理物理学基础

2.1 人类触觉系统的信息处理层级

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

皮肤与机械感受器层（力学/热信号→神经信号）

皮肤作为触觉感知的起点，包含多层结构（表皮、真皮、皮下组织）。皮肤中的四类低阈值机械感受器根据适应速度与感受野大小可分为以下类型：

感受器类型	形态学对应	适应性	感受野	最佳刺激	主要编码功能
SAI	Merkel 细胞	慢适应	小（5—10 个乳头脊）	静态压力（低频）	静态触觉、形状、纹理粗糙度
SAII	Ruffini 末梢	慢适应	大	皮肤拉伸	皮肤拉伸、手部姿势、物体滑动方向
FAI	Meissner 小体	快适应	小	2—40Hz 振动	低频振动、抓握控制、精细纹理
FAII	Pacinian 小体	快适应	大	20—1000Hz 振动	高频振动、通过工具传递的振动

SAI 和 FAI 受体因小感受野支持高空间分辨率，而 FAII 受体通过大感受野编码高频振动。慢适应机制在持续刺激期间维持连续的电生理信号输出，赋予实时监测和解读静态触觉刺激的能力；快适应机制仅响应刺激起始—结束阶段的动态变化，增强对振动、滑移和流体运动等瞬时机械刺激的敏感性。这些互补的神经反应模式协同作用，共同构成了人类高保真触觉感知的生理基础。

脊髓与脑干层（初级中继与整合）

触觉传入神经（Aβ纤维）将信号经背根神经节传递至脊髓背角，再经背柱—内侧丘系通路上行至脑干。此外，近年研究发现，哺乳动物皮肤中还存在大量低阈值、低传导速度的小直径无髓（C）神经纤维，对轻微的非伤害性皮肤变形反应敏感。这一 C 纤维触觉通路在外部神经科学文献中亦称"second tactile system"（中译"第二触觉系统"；代表性工作见 Olausson 等，2002；Löken 等，2009），编码触觉的情绪成分，提示触觉感知不仅包含辨别性维度，还包含情感性维度。

丘脑与皮层层（知觉生成）

触觉信号经丘脑腹后外侧核中继后，投射至初级体感皮层（S1）。S1 具有精确的躯体拓扑映射（感觉 homunculus），不同身体部位在 S1 中的表征面积与触觉敏锐度正相关。从 S1 出发，信号进一步投射至次级体感皮层（S2）及后顶叶皮层，参与物体形状、质地与空间属性的高级整合。

经验与可塑性层

长期触觉训练（如外科医生、雕塑家、按摩师、盲人）可导致 S1 中对应手指区域的皮层表征扩大，触觉分辨阈限显著降低。触觉感知依赖于触觉受体信号对外界物体的检测、定位与表征，其研究涉及行为科学、神经科学及计算模型。

这一多层级、多通道的加工架构提示我们：AI 触觉模型不能止于"接触信号→触觉标签"的直接映射。我们必须分层建模，从物理力学层逐步逼近知觉层，并分别处理四类机械感受器的并行编码逻辑与主动/被动两种感知模式。

2.2 触觉的心理物理学核心维度

心理物理学揭示，人类对触觉刺激的主观感知可分解为若干独立且可量化的维度。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触觉心理物理学标准文献[8]；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

压力检测阈值	垂直力（mN/g）	身体部位差异极大	舌尖约 2g/mm²至足掌后部约 250g/mm²；指尖约 0.5—5mN
两点辨别阈值	两点空间距离（mm）	触觉空间辨别能力的度量；反映感受器密度	指尖 2—5mm；手掌 8—12mm；前臂/背部 30—70mm
振动觉阈值	振动频率（Hz）、振幅（μm）	频率依赖性；FAI 对低频敏感，FAII 对高频敏感	2—400Hz 范围内可定量测量，详见[8]
纹理辨别阈值	表面粗糙度（μm Ra）	双工理论：<0.2mm 依赖 FAI 振动式编码，>0.2mm 依赖 SAI 空间编码	阈值随纹理空间周期与探索速度变化
温度觉阈值	温度（℃）	冷觉与温觉分离；受适应温度与接触面积调制	冷觉阈值约 30°C，温觉阈值约 35°C（中性适应下）

两点辨别阈是对触觉空间辨别能力的度量，身体不同部位的两点阈存在显著差异。触觉感知深度识别阈值的研究已涉及摩擦振动特征和大脑触感激活。这些维度各有其物理控制变量，可单独操作、单独测量，是"单变量纵深实验"的理想条件。

2.3 触觉个体差异的谱系分布

触觉是五感中个体差异最为显著的感官之一，这决定了 AI 触觉模型的分层设计至关重要：

绝对触觉者（L1 基准组）

盲人群体：因视觉通道关闭后的跨模式重组与长期触觉依赖，盲人的触觉敏锐度通常显著高于视力正常者。在德国，已有"医学触觉检查师"这一专门职业，由经过专业培训的盲女担任。盲人按摩师凭借超常触觉进行医疗与保健按摩，全国从业人数达数万人。

职业精细操作者：职业电竞选手、雕塑家、傀儡师、提线人偶艺人、外科医生、推拿按摩师、中医诊疗师、武道家及各运动领域佼佼者（需从无伤病）等从事细致肢体活

动的从业者。经长期专业训练，其触觉分辨阈限可达普通人的数倍。

触觉艺术从业者：陶艺师、微雕艺术家、乐器制作者等依赖手部精细操作与触觉反馈的职业。此类个体提供了触觉感知"最高分辨率"的基准信号，是校准 AI 触觉模型上限的"黄金标准"。

普通触觉者（L2 主体组）

占人群大多数，触觉阈值和分辨力呈正态分布。受年龄（触觉功能随龄衰退）、性别（女性略高于男性）、皮肤状态（水合度与弹性影响触觉敏感度）、职业背景等因素影响。提供触觉感知的"平均模型"与"主流分布"数据。

触觉功能边界者（L3 边界组）

包括外周神经病变患者（如糖尿病性神经病变）、脊髓损伤患者、截肢者（残肢幻肢觉与神经重路由）、皮肤疾病患者（如硬皮病）、老年性触觉衰退者。其数据用于定义感知空间的边界与模型的鲁棒性下限，对开发包容性触觉 AI（如智能假肢、触觉康复设备）至关重要。

2.4 触觉研究实验方法的已有基础

触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
两点辨别测试	同时或先后刺激皮肤两点，判断"一点"或"两点"	触觉空间 acuity 评估	可标准化为 AI 触觉模型的空间分辨率校准协议
振动觉阈值测量	定量振动感觉测试系统（阶梯法+强迫选择法）	振动感知阈值测定	为 FAI/FAII 编码模型提供基准数据
温度觉阈值测量	定量温度觉测试	温度感知评估	为温度觉编码模型提供基准数据
纹理辨别测试	主动触摸+粗糙度评分	纹理感知评估	为质地感知模型提供训练数据
有限元皮肤力学模型	模拟指尖接触时的触觉力学机制	研究可作为物理信号层的仿	为物理信号层提供仿真工具

		真工具	

触觉感知依赖皮肤中机械感受器的信号传导，计算模型如"压力波传播模型"结合皮肤力学与漏积分—放电模型，可预测手掌区域机械感受器的毫秒级响应。有限元分析进一步模拟指尖接触弹性球体时的皮肤形变，揭示被动触觉中软硬度错觉的机制。这些方法均可直接借鉴并整合至我们的三层映射数据采集框架中。

3 AI 触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，并具体化至触觉模态。该框架的哲学论证与一般性方法论见文献[1][2]；本节仅展开触觉模态特有的编码内容。

3.1 物理信号层：分布式触觉传感阵列与多尺度力学/热学数据采集

AI 触觉的物理信号层，在工程形态上不是若干离散测量设备的叠加，而是在柔性基底上大面积部署的分布式触觉传感阵列（本文简称"传感器集群"）。这一区分的意义在于：离散设备只能在受控条件下逐点施加或读取刺激，而 AI 触觉系统需要的是在连续表面上空间同步、时间对齐地采集压力、振动、温度与拉伸的分布式信号。多点触控柔性屏的电容阵列是这一思路的已有工程雏形——它证明了在柔性表面上分布式部署传感单元、由阵列整体而非单点设备输出接触信息是工程可行的。触觉传感器集群与手机柔性屏的区别在于：后者只检测触控位置，前者需并行处理压力分布、振动频谱、温度梯度与皮肤拉伸，且单元密度、多模态共存与耐久性要求更高。

人类皮肤的分布式特性为这一阵列设定了参照上限。成人皮肤面积约 1.5—2 平方米，指尖每平方厘米约 240 个机械感受器单元，全身机械感受器以百万计，且必须分布在可拉伸、可自修复的曲面上，同时并行处理压力、振动、拉伸、温度与伤害性信号。当前工程手段尚不能完整复现这一覆盖规模与多模态集成度。本文的实验设计因此聚焦指尖、手掌、前臂等代表性部位，以局部高密度阵列加身体部位特异性参数（感受器密度、皮层表征面积等）来近似，全身分布式覆盖留待柔性电子与多模态集成技术进一步成熟后扩展。这一限定不影响单变量纵深实验的有效性，但意味着模型从局部部位向全身泛化时需逐步标定与扩展，而非一次覆盖。

传感器集群的输出构成力学与热学参数的多尺度表征体系，包含从宏观接触力学到微观表面形貌的多层次信息：

宏观接触力学：法向力（压力）的大小、分布与时间变化率；切向力（剪切力）的大小、方向与摩擦系数；真实接触面积与名义接触面积之比；接触几何中的物体曲率与边缘轮廓。这些量由阵列中的力传感单元分布式输出，而非由单一六轴力传感器逐点

读取。

微观表面形貌：表面粗糙度（Ra、Rz、Rq 等统计参数）；纹理周期的空间频率与方向性；表面各点的局部弹性模量。阵列中的高密度触觉单元在接触面上同步输出力分布图，其空间密度决定了对微观形貌的分辨能力。

动态交互：探索速度与轨迹；接触过程中产生的摩擦振动（频率、振幅、衰减特性）；微滑移的起始、发展、停止时间序列。阵列中的振动传感单元与加速度计以高于人类 FAII 感受器频率上限的采样率记录这些动态信号。

温度：物体表面温度；热导率与热容量决定的热流动态；温度变化率。阵列中的温度传感单元与力传感单元在空间上共位部署，使温度梯度与压力分布可在同一接触事件中对齐。

传感器集群的工程实现涉及柔性基底、多模态单元共位集成、大面积阵列的引线与同步、以及长期使用的耐久性与校准漂移控制。这些是当前触觉工程的前沿问题，本文不展开其材料与工艺细节，但实验设计中的身体部位特异性参数（感受器密度、皮层表征面积）为阵列从局部向更大面积扩展提供了可迁移的校准框架。

"类人"原则在此层的适用边界与视觉、听觉、嗅觉、味觉篇一致：本文的"类人"指神经编码层的可通约性，而非要求前端阵列复制人类皮肤的生理结构。前端允许使用超越人类感受器分布密度的传感单元——部分柔性触觉传感研究已报道实验室水平可达 400 单元/cm²以上，高于人类指尖约 240 单元/cm²的密度——后端通过神经编码映射使阵列输出与人类触觉感知可通约。

3.2 神经编码层：从力学/热学到触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力学/热学描述符映射为预测的人类触觉神经群体时空活动模式的计算模型。该层与已有触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单一感受器类型或单一脑区响应的预测，本文要求的是从多维物理刺激到四类感受器并行编码、再到主观知觉报告的完整链路。触觉的独特之处在于，神经编码层必须并行处理 SAI/SAII/FAI/FAII 四类感受器的异构响应，同时区分被动触觉与主动探索两种模式——前者由外部刺激施加于静止皮肤，后者由主动运动调制感知。

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（法向力、切向力、振动频谱、温度、接触几何等）。

中间层：模拟触觉通路各关键节点的神经计算。本文的概念模型将中间层划分为以下

描述性模块（模块名称是本文的架构划分，非领域既有的标准术语）：皮肤力学模块，以有限元模型模拟皮肤在接触力作用下的形变场；机械感受器激活模块，SAI 模拟 Merkel 细胞对静态压力的持续响应，SAII 模拟 Ruffini 末梢对皮肤拉伸的响应，FAI 模拟 Meissner 小体对低频振动（2—40Hz）的瞬态响应，FAII 模拟 Pacinian 小体对高频振动（20—1000Hz）的瞬态响应，四类感受器的输出在此模块中并行计算，不合并为单一激活值；脊髓与丘脑模块，模拟背柱—内侧丘系通路对信号的整合与中继；体感皮层模块，模拟 S1 的躯体拓扑映射与特征选择性响应，并将身体部位特异性参数（感受器密度、皮层表征面积）纳入模型。

输出层：预测的各触觉脑区神经群体活动模式（S1 各躯体分区的局部场电位、EEG 特征、fMRI BOLD 信号等）。

模型训练策略

使用同步记录的人类受试者触觉神经生理数据（EEG、fMRI、体感诱发电位）作为训练目标。采用物理仿真与数据驱动混合方法：先用有限元皮肤力学模型预训练物理至感受器的映射，再以人类感知数据进行微调。主动触觉与被动触觉的训练数据分别采集、分别建模，最后在体感皮层模块中对接。

3.3 主观知觉层：从神经活动到触觉体验的预测模型

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触觉体验。

本层的必要性来自触觉工程中一个长期存在的缺口：力学传感器可以精确测定接触力、振动频谱与温度，但无法回答"这个触感摸起来是什么体验"。力传感器的读数与人类触摸的质地、硬度、舒适度判断之间没有稳定的对应关系。本文的主观知觉层为触觉感知对齐提供一个显式的预测层：其功能不是取代力学测量，而是补充从神经编码到主观报告的映射，使"这个触感摸起来是什么体验"成为可计算、可校验的输出。

输出维度

- **触觉检测**：二值判断（是否感受到接触）
- **压力/强度**：0—10 分连续数值预测
- **质地**："光滑—粗糙""柔软—坚硬""温暖—凉爽"多维语义描述
- **形状/曲率**：平坦、凸起、尖锐等几何描述
- **温度**：冷暖判断与强度评分

- **振动**：频率与振幅主观感知
- **愉悦度**：触觉体验愉悦—不愉悦评分
- **物体识别**：从预设物体库匹配相似物体

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，同步预测多个感知维度。重点设置个体差异适配模块，针对触觉显著的人群、身体部位、职业差异，基于个体快速标定参数完成模型个性化校准。

3.4 三层模型整合：AI 触觉"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：

传感器集群输出的多维物理刺激数据（输入）→【物理信号层】力学/热学描述符标准化（法向力+切向力+振动频谱+温度+接触几何）→【神经编码层模型】预测触觉神经时空活动模式（SAI/II+FAI/II 四类感受器激活+皮层编码）→【主观知觉层模型】预测主观触觉报告（质地/硬度/温度/形状/振动/愉悦度）→输出：AI 对"这个触觉刺激是什么体验"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触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，区别在于中间层的触觉通路替换，以及神经编码层需并行处理四类感受器的异构响应与主动/被动两种模式。

此"感知模拟器"一旦成熟，AI 将能够：理解一种材质对人类意味着什么（粗糙/光滑/温暖）；预测一种新设计的表面处理是否适合作为消费电子产品的触感；为机器人设计符合目标触觉体验的抓取策略；适配特定触觉障碍用户的残余触觉能力，生成补偿性的触觉反馈信号。

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，此处仅列触觉模态的适用要点：

- **原则一：单变量纵深实验优先于多变量黑箱采集。**触觉实验从单一物理维度出发，每

次仅改变一个物理量，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。对于压力感知，可从不同幅度的垂直压痕刺激开始；对于振动感知，可从不同频率的正弦振动开始；对于温度感知，可从不同温度的接触刺激开始。

- **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 绝对触觉者（盲人群体与职业精细操作者）、L2 普通触觉者、L3 触觉功能边界者。缺少任何一层，模型都将存在系统性偏差。

- **原则三：区分被动触觉与主动触觉，并系统覆盖代表性身体部位。**被动（外部刺激施加于静止皮肤）与主动（主动探索物体）两种模式需分别采集数据，以建模动作对感知的调制效应。不同身体部位的触觉敏锐度差异巨大（指尖两点阈 2—5mm vs 背部 30—70mm），实验需至少覆盖指尖、手掌、前臂、唇部等代表性部位。

4.2 受试者招募与分组方案

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

L1 基准组（绝对触觉者，每组 5—10 人）

来源：盲人群体（尤其是从事按摩、调音等职业者）；职业电竞选手、雕塑家、傀儡师、提线人偶艺人、外科医生、推拿按摩师、中医诊疗师、武道家及各运动领域者（需从无伤病）等从事细致肢体活动的从业者。招募方式：通过中国盲人协会、残疾人联合会定向邀请；通过电竞俱乐部、艺术院校、医疗机构、体育训练中心推荐。入选标准：通过标准化触觉测试（两点辨别阈、振动阈、温度阈均在相应群体正常值上限以上）；L1 盲人组需经眼科确认；L1 职业组需经所在行业确认专业训练年限≥5 年。报酬标准：专家级咨询费，建议 1000—2000 元/小时。

L2 主体组（普通触觉者，每组 100—300 人）

来源：社会公开招募，涵盖不同年龄（18—70 岁）、性别、职业、身体部位。入选标准：通过基础触觉筛查；无已知神经系统疾病；无严重皮肤疾病。报酬标准：100—200 元/小时。

L3 边界组（触觉功能边界者，每组 20—50 人）

分类子组：1）外周神经病变患者（如糖尿病性神经病变）；2）脊髓损伤患者；3）截肢者（幻肢觉研究）；4）老年性触觉衰退者（≥65 岁）；5）皮肤疾病患者（如硬皮病）。来源：与三甲医院神经内科、康复科、皮肤科、骨科合作，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"压力感知"为例

实验前准备（约 20 分钟）

受试者签署知情同意书，填写触觉史问卷；进行基础触觉筛查（两点辨别阈快速测试），确认分组归属；受试者进入触觉实验室，适应环境 10 分钟（温度 22±1°C，湿度 50±5%）；佩戴高密度 EEG 电极帽（64—128 导，覆盖 S1 区域）；准备 fMRI 扫描（如需）；将受试者手指/手掌固定在触觉刺激呈现装置上。

实验正式阶段（约 60—90 分钟）

选择标准触觉刺激模式：垂直压痕（通过线性致动器或压电驱动器施加精确控制的法向力）；预设一系列力幅值梯度（从亚阈值到明显可感，覆盖至少 3 个数量级，如 0.5mN 至 5N）；每个试次向受试者指腹施加持续 500ms 的垂直压痕刺激，刺激间隔至少 3 秒（避免触觉适应）。每次刺激后，受试者完成四项测评：二选一判断"是否感受到压力"、0—100 分压力强度评分、-50 至+50 愉悦度评分、刺激位置定位判断。实验室全程以≥1000Hz 采样率连续记录 EEG 数据，标记刺激起始与响应时间戳。

实验后处理（约 10 分钟）

受试者完成主观疲劳问卷；完成数据备份与离线质检。

扩展实验

完成垂直压力全幅值曲线实验后，依次开展不同频率振动刺激、不同温度接触刺激、主动触摸探索、多身体部位对照等拓展实验。

4.4 数据同步采集与质量保障

- **触觉刺激控制**：线性致动器/压电驱动器力精度±1mN、位移精度±1μm、上升时间<10ms；温度刺激装置控温精度±0.1°C、升温时间≤100ms；所有刺激参数由传感器实时校准。

- **同步精度**：刺激装置、EEG/fMRI 采集、行为响应盒共用同一主时钟源，时间戳偏差<1ms。

- **环境控制**：实验室恒温 22±1°C、恒湿 50±5%，规避环境因素对触觉感知的干扰。

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，以下仅列触觉模态特有的分区、设备与力学安全要求。

5.1 实验室选址与环境要求

选址原则

优先选址于高校或科研院所园区，便于跨学科合作与各类受试者招募；远离地铁、大型设备等强振动源，保障力学实验精度；配备稳定温湿度控制系统，预留多工位拓展空间。

环境影响评估

完成环境振动基线监测、温湿度基线监测，满足精密触觉实验标准。

5.2 实验室核心区域功能划分

主触觉实验舱（30—50m²）

配备隔振精密力学实验台、多类型触觉刺激呈现系统、多维力与触觉传感器阵列，墙面及设备采用低反光、低噪声材质，保障实验环境稳定。

触觉神经记录与控制室（15—30m²）

紧邻实验舱、设观察窗，布置 EEG/fMRI 采集主机、受试者监控系统、设备控制终端与数据服务器。

设备校准与维护室（10—20m²）

存放传感器、致动器、电极等配件，配备标准砝码、力标准机等校准设备，用于设备定期标定与维护。

受试者接待与筛查室（10—15m²）

用于受试者签到、问卷填写、知情同意签署、基础触觉能力筛查。

数据处理与计算中心（15—30m²）

配置多 GPU 高性能计算服务器、PB 级大容量存储阵列、UPS 稳压系统与恒温空调，支撑力学仿真、模型训练与数据归档。

5.3 实验刺激设备与感知前端的区分

本章所列设备是受试者实验中的刺激呈现与神经测量设备，用于在受控条件下施加单变量触觉刺激并同步记录神经响应。它们不是 AI 触觉系统的感知前端。AI 系统的感知前端是第 3.1 节所述的分布式触觉传感阵列——其形态是在柔性基底上大面积部署的多模态传感单元，与实验室中用于施加受控压痕、振动或温度阶跃的离散刺激设备属于不同工程类别。实验室刺激设备追求的是单变量精确可控与可重复，感知阵列追求

的是大面积覆盖、多模态共位与长期稳定；前者服务于人类触觉建模的数据采集，后者服务于 AI 系统在真实环境中的感知输入。两者在工程落地阶段需分别设计，不可相互替代。

核心设备清单如下:

设备类别	设备名称	关键技术参数要求	预算估算（万元）
触觉刺激呈现	线性致动器/压电驱动器	力范围 0—50N，精度 ±1mN，位移精度±1μm，上升时间<10ms	20—50
触觉刺激呈现	振动刺激器	频率范围 2—1000Hz，振幅精度±0.1μm	10—30
触觉刺激呈现	温度刺激装置	温度范围 10—50°C，精度 ±0.1°C，上升时间<100ms	15—35
触觉测量	多维力传感器（六轴）	力范围 0—50N，精度 ±0.5%FS，采样率≥10kHz	10—25（每个）
触觉测量	高密度触觉传感器阵列（实验用）	空间密度≥100 传感单元/cm²，力分辨率≤0.1N，采样率≥1kHz	30—80
触觉测量	加速度计/振动传感器	频率范围 0—10kHz，灵敏度 ≥100mV/g	2—5
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
环境控制	隔振平台	固有频率≤5Hz，隔振效率 ≥90%@10Hz	10—30
环境控制	温湿度控制系统	温度 22±1°C，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

实验舱与控制室多处设置紧急停止按钮，可一键切断所有触觉刺激输出；所有力学、温度刺激参数严格控制在人体安全阈值内，杜绝皮肤损伤、烫伤、冻伤风险；L3 特殊受试群体实验全程由医护人员陪同；现场配置标准急救药箱，与周边医院建立应急绿色通道，全方位保障受试者安全。

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，以下仅列触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	统筹项目整体方案设计、科研规划与团队管理，把控核心研究方向与重大技术难题	触觉神经科学、心理物理学、生物力学相关领域，教授或研究员职称，具备重大跨学科项目牵头经验
触觉心理物理学方向 PI	1	负责触觉实验整体设计、范式优化、行为数据统计与心理物理学分析	博士学位，5 年及以上触觉专项实验设计与数据分析经验，精通心理物理学实验范式
计算神经科学方向 PI	1	触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

生物力学/精密仪器方向PI	1	力学校准、触觉刺激装置开发与维护、有限元建模	博士学位或同等工程经验，熟悉精密力学测量与皮肤力学仿真
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 操作与触觉刺激系统使用
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：触觉神经生理学顾问、康复医学顾问（假肢与神经康复方向）、盲人教育/就业顾问、数据安全与伦理法律顾问、机器人学顾问。

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，以下仅列触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正式实施前，必须通过机构 IRB 或独立伦理委员会正式审批。针对 L1 盲人群体、L3 神经病变与截肢患者等弱势群体，制定专项伦理保护方案，配备专属辅助保障机制。全程严格遵循《中华人民共和国个人信息保护法》及 GDPR 通用数据保护条例，保障实验合规性、数据安全性与受试者合法权益。

7.2 受试者知情同意与权益保护

标准化知情同意书完整载明研究目的、实验流程、触觉刺激类型与强度、潜在轻微不适（固定姿势疲劳、触觉疲劳等）、受试者无条件随时退出权利、数据存储与使用范围、实验补偿标准等核心内容。为盲人受试者提供盲文版知情同意书或录音口述讲解服务，为触觉障碍患者采用通俗化语言解读实验内容，保障所有受试者充分知情、自愿参与。

7.3 实验过程的安全监控

所有触觉力学、温度刺激参数严格低于人体安全阈值，规避损伤风险；实验全程操作员实时监控受试者身心状态，一旦受试者反馈疼痛、麻木、眩晕等异常，或观测到状态异常，立即终止实验，启动应急保障。

7.4 数据隐私与匿名化处理

所有原始实验数据全部进行匿名化编码处理，去除个人可识别信息，加密分级存储。所有拟公开发布的数据集、研究数据，均需再次经伦理委员会审核通过后方可公开，严防隐私泄露。

7.5 安全阈值外推与被动校准原则

7.3 节确立了实验过程中的安全阈值管控；本节进一步确立超阈值区域的数据获取边界——哪些数据不能通过主动实验获取，只能外推或被动校准。

触觉实验直接涉及压力、振动、温度等力学/热学刺激，痛觉是触觉通道中最需要严格管控的超阈值体验。本实验方案确立“外推优先、被动校准”原则：安全阈值范围内的触觉刺激必须进行严格校准（压力精度±1mN、温度精度±0.1°C，见 4.4 节）；超出安全阈值的痛觉、组织损伤性刺激，绝不能通过主动诱发实验获取数据。超阈值痛觉数据只能通过安全区间的函数外推获得（如痛觉的非线性响应模型），或在真实临床事件（如糖尿病性神经病变痛觉异常、截肢后幻肢痛、烧伤康复）发生后，通过合规渠道被动接入数据进行修正性校准。

在架构层面，安全阈值作为硬约束固化于实验控制系统，严禁任何主动刺激装置请求超出阈值的参数（压力≤人体安全阈值、温度≤50°C），该上限由独立的安全系统控制，实验操作员无权解除。在制度层面，被动临床数据的接入须经第三方伦理监督，并与三甲医院神经内科、康复科、烧伤科签署合规数据使用协议，科研人员只能作为观察者被动接收。故意诱发或制造极端痛觉事件以获取数据的行为，不仅违反学术伦理，更触犯法律，应通过职业禁入与司法衔接形成实质性震慑。这一原则与文献[1]第 4.3 节一致，L3 边界组（外周神经病变、脊髓损伤、截肢者）的痛觉异常数据尤其适用。

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，以下仅列触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	心理学院、生物医学工程学院、机械工程学院	L1/L2 普通受试者招募；提供触觉基础理论支撑；联合开展生物力学建模与触觉传感器研发
医疗机构	三甲医院神经内科、康复科、骨科、皮肤科	L3 障碍组受试者引荐（匿名化）；临床触觉评估指导；实验安全医疗支撑
行业协会与公益组织	中国盲人协会、残疾人联合会、康复辅具协会	L1 盲人专家组招募；康复辅具行业场景对接；无障碍技术推广
企业合作	触觉传感器厂商、智能假肢企业、机器人公司	精密触觉设备定制；灵巧操作与假肢触觉反馈技术联合验证
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**：大量数据采集需求为盲人群体、各行业人员提供临时性工作与收入来源。

- **推动包容性技术发展**：对触觉功能障碍人群的研究将直接为下一代智能假肢、触觉康复设备、无障碍交互界面提供科学基础。

- **促进跨学科人才成长**：培养一批同时具备触觉科学、人工智能、生物力学交叉背景的复合型人才。

8.3 项目经济价值

- **直接产业转化**：触觉感知模型可广泛应用于机器人灵巧操作（抓取与操控）、虚拟现实/增强现实（触觉反馈）、智能假肢（触觉神经接口）、医疗触诊（远程医疗触觉传输）、智能制造（质量检测触觉反馈）等。

- **专利与标准制定**：三层映射模型架构、实验范式标准、触觉感知数据集均可形成核心知识产权。

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，以下仅列触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	实验室建设；触觉刺激设备采购安装；力学校准系统调试；伦理审批（含弱势群体专项方案）；L1 盲人组与职业组联络网络建立	实验室通过验收；首批测试数据采集成功
第二阶段：单维纵深实验期（核心攻坚）	12—48 个月	依次完成压力感知、振动感知、温度感知、纹理辨别等单变量纵深实验	三组全覆盖数据集；第一版神经编码层模型上线
第三阶段：主动触觉与多维交互实验期	48—72 个月	主动探索实验、多模态触觉实验（压力+温度+振动）、不同身体部位对比实验	完整触觉感知模型（含主动/被动双模式）验证通过
第四阶段：整合与验证期	72—84 个月	整合全部数据，发布"AI 触觉感知模拟器"1.0 版；发表系列论文	核心模型开源；系列论文投稿完成

9.2 最终目标成果

理论成果

完整的人类触觉感知"物理—神经—知觉"映射数据库（L1/L2/L3 三层对照，覆盖被动与主动两种模式、多个身体部位）。

模型成果

开源可用的 AI 触觉感知模拟器（含推理代码与预训练模型参数），具备个性化适配能力（基于个体触觉敏锐度快速标定）。

标准与规范

触觉 AI 实验设计与评估的标准草案；触觉感知数据采集与标注的 SOP 文档。

社会影响力

建立与盲人群体、康复医疗机构的长期合作网络；产生可用于智能假肢、机器人灵巧

操作、虚拟现实触觉反馈行业的直接转化成果。

10 结论

本文系统论述了 AI 触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。

触觉感知的独特性——四类机械感受器的功能分化与并行编码、被动与主动双模式感知、时空双重编码的复杂性、感知与动作的深度耦合、极端个体差异——使其成为 AI 感官功能构建中兼具最高挑战性与最广阔应用前景的模态之一。本文进一步指出，触觉的工程复杂性不仅在于神经编码的多通道并行，更在于其感知前端的分布式柔性形态：人类皮肤面积约 1.5—2 平方米，感受器以百万计，当前工程手段尚不能完整复现。本文以分布式触觉传感阵列而非离散测量设备来定位 AI 触觉的感知前端，以柔性表面多点触控阵列作为阵列的已有工程雏形，并通过聚焦指尖、手掌、前臂等代表性部位加身体部位特异性参数（感受器密度、皮层表征面积）的策略，在工程可行性与方法学有效性之间取得平衡。这一限定不影响单变量纵深实验的有效性，但意味着模型从局部向全身泛化时需逐步标定与扩展。

我们强调的核心实验原则——以盲人群体与职业精细操作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、以触觉功能障碍者定义模型鲁棒性边界——确保了最终产出的 AI 触觉模型能够覆盖人类触觉认知的完整谱系。

触觉功能的构建不仅依赖于算法与数据的突破，更依赖于精密力学仪器、严谨心理物理学实验设计、跨学科团队协作、周密伦理保障（特别是对盲人等弱势群体的保护）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。

触觉作为五感中与物理世界交互最为直接的感官，其 AI 化的成功构建将与前述视觉、听觉、嗅觉、味觉共同构成完整的 AI 五感感知基础。五篇感官专论所建立的"三层映射模型"与"分层基准对照组"实验范式，为最终五感整合（通感/直觉）的理论构建——即如何将五感信息与信息实践验证经验结合，诞生跨模态的整合性认知能力——奠定了坚实的实验、数据与工程基础。关于认知对象数据库的设计与构建[9]，以自然界事物或虚构概念为锚点，赋予其对应的五感数据，建立一套用 AI 五感信息剖析万事万物并建立对应关系的完整方法论（工程范式），使对事物认知和认知结果调用分别处理，最终促成完整的、可验证、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] 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] 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 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
[8] Lederman S J, Klatzky R L. Haptic perception: A tutorial[J]. Attention, Perception, & Psychophysics, 2009, 71(7): 1439—1459.
[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
[10] Olausson H, Lamarre Y, Backlund H, et al. Unmyelinated tactile afferents signal touch and project to insular cortex[J]. Nature Neuroscience, 2002, 5(9): 900—904.
[11] Löken L S, Wessberg J, Morrison I, et al. Coding of pleasant touch by unmyelinated afferents in humans[J]. Nature Neuroscience, 2009, 12(5): 547—548.

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。