

# 多感知融合的智能手机触觉交互设计研究

张睿<sup>1)</sup> 张姊瑶<sup>1)</sup> 焦阳<sup>1)</sup>\*

<sup>1)</sup>(清华大学未来实验室, 北京100084)

**摘 要** 智能手机中的触觉反馈常与视觉、听觉等通道协同工作, 增强交互的沉浸感与即时性。然而现有设计多以经验调节参数为主, 缺乏系统感知机制, 导致触觉反馈效果尚有较大优化空间。本文提出一套多感知融合的触觉设计框架, 结合用户交互目标、振动特征与感知体验, 构建从任务语义到反馈感知的映射机制, 提升触觉反馈的结构化设计、可迁移性与用户适配性。研究围绕10个典型高频任务, 在三款主流手机上开展跨设备实验, 24名用户参与体验与评价, 共采集348组样本, 涵盖振动参数、满意度评分与主观访谈。结果表明, 该框架可解释67%的用户满意度差异, 振动参数与设备差异是主要影响因素。本研究构建的触觉反馈框架为智能手机等移动终端中的触觉反馈设计提供了理论依据与方法支持。

**关键词** 触觉交互; 多感知融合; 智能手机; 交互设计; 用户体验

中图法分类号 TP DOI号: \*投稿时不提供DOI号

## Multisensory Integrated Haptic Interaction Design for Smartphones

Zhang Rui<sup>1)</sup> Zhang Ziyao<sup>1)</sup> Jiao Yang<sup>1)</sup>\*

<sup>1)</sup> The Future Lab, Tsinghua University, Beijing 100084

**Abstract** Haptic feedback on smartphones often works alongside visual and auditory channels to enhance interaction immediacy and immersion. However, most current designs rely on empirical parameter tuning and lack a structured perceptual framework, leaving room for improvement. This study proposes a multisensory haptic design framework that integrates user interaction goals, vibration features, and perceptual experiences, establishing a clear mapping from task semantics to perceived feedback. Experiments were run on three smartphones as users completed ten frequently occurring tasks. A total of 348 samples were collected from 24 participants, including vibration parameters, satisfaction scores, and qualitative feedback. The results show that the proposed framework explains 67% of the variance in user satisfaction, with vibration features and device differences being the main contributing factors. This work provides a structured approach for haptic feedback design and offers theoretical and methodological support for application in smartphones and other mobile devices.

**Keywords** haptic interaction; multisensory integration; smartphone; interaction design; user experience

收稿日期: - - ; 最终修改稿收到日期: - - . \*投稿时不填写此项\*. 本课题得到... 基金中文完整名称(No.项目号)、... 基金中文完整名称(No.项目号)、... 基金中文完整名称(No.项目号)资助. 作者名1(通信作者), 性别, xxxx年生, 学位(或目前学历), 职称, 是/否计算机学会(CCF)会员 (提供会员号), 主要研究领域为\*\*\*\*、\*\*\*\*. E-mail: \*\*\*\*\*. 作者名2 (通信作者), 性别, xxxx年生, 学位(或目前学历), 职称, 是/否计算机学会(CCF)会员 (提供会员号), 主要研究领域为\*\*\*\*、\*\*\*\*. E-mail: \*\*\*\*\*. 作者名3 (通信作者), 性别, xxxx年生, 学位(或目前学历), 职称, 是/否计算机学会(CCF)会员 (提供会员号), 主要研究领域为\*\*\*\*、\*\*\*\*. E-mail: \*\*\*\*\*. (给出的电子邮件地址应不会因出国、毕业、更换工作单位等原因而变动。请给出所有作者的电子邮件) 第1作者手机号码(投稿时必须提供, 以便紧急联系, 发表时会删除): ... .. E-mail: ... .. \*此部分6号宋体\*

## 1 引言

随着移动设备操作频率和任务复杂度的不断提升,触觉反馈作为增强交互感知与操作效率的重要通道,正被广泛应用于智能手机、可穿戴设备等移动终端设备<sup>[1,2]</sup>。相较于视觉与听觉,触觉具有反馈私密性强、响应即时、不依赖视线的优势,适用于快节奏、多任务的交互情境。然而,当前触觉设计仍高度依赖经验调整和设备预设,缺乏面向用户感知结构的系统建构路径,导致同一操作在不同设备和场景中体验效果差异显著,难以保证设计一致性与可迁移性。

现有研究主要从物理层面探讨振动频率、幅度、持续时长等参数对感知强度的影响,或聚焦于生理机制与心理阈值的基础规律建模<sup>[3]</sup>。但这类研究多在受控条件下展开,难以覆盖真实交互情境中用户行为目标、系统模态协同与设备实现等多维因素。当前仍缺乏能够从操作意图出发,解释跨设备触觉感知差异、支持结构化反馈设计的理论框架。

对此,本文构建了一个面向智能手机的多感知融合触觉反馈设计框架,将用户体验过程划分为交互层、显性认知层与隐性认知层三大模块,分别对应用户操作目标、反馈节奏结构与感知建构机制。该框架旨在建立任务—节奏—感知之间的映射路径,整合用户偏好、系统反馈形态与设备实现逻辑,为触觉反馈提供可解释、可调控、可迁移的结构化支撑。

在此基础上,研究设计了涵盖10个典型交互任务的跨设备用户实验,涉及三款主流智能手机,共计24名用户参与触觉反馈体验、满意度评分与主观访谈。实验同步采集各场景下的振动波形参数,并结合定量建模与定性分析展开验证。结果表明,该框架可解释用户满意度变异的67%,其中物理参数、设备特征与反馈结构均构成显著影响因素。用户普遍偏好短促、清晰、节奏稳定的反馈形式,尤其在操作节律明确的任务中表现出更高满意度。上述发现验证了以用户行为为起点构建多感知反馈结构的可行性,并为节奏化触觉设计在智能终端中的系统化实现提供了理论支撑与实践依据。

## 2 相关工作

### 2.1 触觉感知的生理机制与心理物理学基础

触觉作为除视觉、听觉外的重要感知通道,近年来逐步被视为增强智能手机交互体验的第五维度。人机界面中的有效触觉设计,必须同时满足生理可感知性与心理可区分性,也就是振动刺激需要落在皮肤机械感受器的最佳响应区间,并通过参数差异化传递连贯而有意义的反馈。在触觉方向

上,Verrillo 等的经典实验揭示了人类皮肤对振动频率呈带状敏感区的生理特征,其中Pacinian 小体在250-300 Hz 附近的感受阈最低,而Meissner 小体则对10-50 Hz 低频更为敏感<sup>[4]</sup>。Brewster 与Brown 进一步量化了振动频率、幅度和节奏与主观强度之间的函数关系,指出不同参数组合可显著改变用户对同一事件的紧迫性判断<sup>[5]</sup>。Chang 等则将触觉延迟纳入模型,发现大于40 ms 的反馈滞后会显著降低目标定位效率并提升误触率<sup>[6]</sup>。尽管上述工作奠定了振动参数设计的生理与心理物理学基础,但仍存在两方面不足:其一,多数实验在理想实验室条件下进行,缺乏对真实智能手机硬件的适配验证;其二,用户行为意图差异,比如单指敲击与滑动,对阈值感知的调制效应尚未系统量化。基于此,本研究提出一种结合行为语境与生理敏感的框架,并在真实手机交互环境中完成实证评估。

### 2.2 多感知融合的理论基础与设计策略

在多模态交互整合方向上,Wickens 提出的多资源理论表明,不同感官通道可在资源维度上相对独立地并行处理信息,恰当引入触觉能有效分担视觉与听觉负载<sup>[7]</sup>。Oviatt 在模态適切性理论中指出,信息应由对该信息类型最具加工优势的通道承担,因此节奏型提示更宜以触觉或听觉呈现,而空间定位信息则以视觉为佳<sup>[8]</sup>。Spence 与Driver 进一步提出跨感官一致性原则,强调各通道在时序与语义层面的对齐对于降低知觉冲突至关重要<sup>[9]</sup>。这些工作为触觉-视觉-听觉协同奠定了理论框架,但仍有局限:一方面在于现有模型大多以双通道实验验证为主,对三通道协同尤其缺乏基于手机情境的系统考察;另一方面,用户在动态任务切换中的通道权重迁移规律尚未明确。针对此空白,本研究构建了以用户实时任务为核心的多模态感知,提出触觉提示的优先介入条件,并通过多任务手机使用场景实验验证其有效性。

### 2.3 交互框架与触觉符号模型

在触觉符号化与框架构建方向上,Brewster 提出的Tactons 将振动频率、幅度及持续时间编码为离散“触觉图标”,验证了触觉在无视觉场景中的信息区分能力<sup>[5]</sup>。MacLean 与Enriquez 扩展出“多维触觉符号”概念,展示了多参数叠加可承载复合语义、支持层级通知<sup>[10-12]</sup>。面向体验评估,Kim 等提出Haptic Experience Framework,从感官、情境和情感三个层面量化用户体验<sup>[13-18]</sup>。然而,现有研究主要聚焦单一振动事件的编码与主观评价,尚未形成“用户行为→触觉参数→多模态语义→设备物理约束”的纵向因果链;同时,多数评估仍停

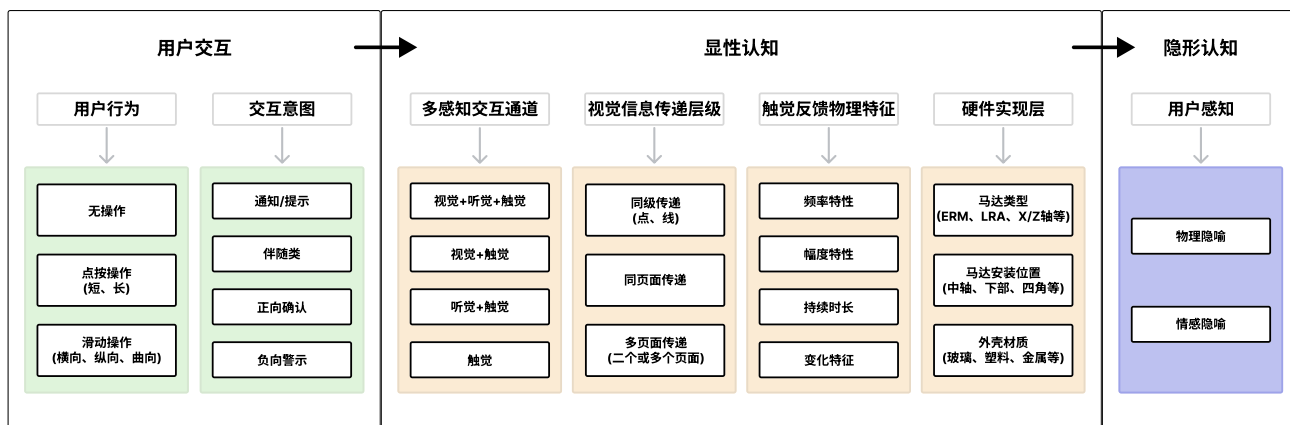


图1 多感知融合的智能手机触觉反馈框架

留在受控环境，对真实手机生态中复杂任务与硬件差异的适应性探讨不足<sup>[19, 20]</sup>。因此，本研究旨在提出一套多层级触觉反馈设计-评估框架，从而弥合参数编码研究与真实使用场景之间的落差，为智能手机触觉交互提供系统化的设计与评估基准。

### 3 多感知融合的智能手机触觉反馈框架

研究从用户体验出发，基于对多种触觉场景的观察、归纳与分析，构建了一个如图1所示的多感知融合的智能手机触觉反馈框架。该框架基于多场景归纳和用户感知分析，围绕用户交互、显性认知以及隐形认知三个层次展开，构建了从具体操作到感知结果的因果链条。

#### 3.1 用户交互层

智能手机的振动设计往往源于用户的交互行为及其触觉反馈的功能意图。其中用户行为可分为被动接收与主动操作两类，前者则如来电、系统通知等无需用户直接操作的被动情境，后者如点按、长按、滑动等交互操作。

结合功能性目标与使用情境，触觉反馈可进一步划分为四类。提示类反馈出现在用户未主动操作时，如应用通知、提醒消息，通过振动增强事件的可感知性。伴随类反馈通常融合于操作过程中，如滑动切换等，虽无直接信息传达功能，但通过轻微振动提升操作流畅感与参与感。正向反馈类用于确认操作被成功执行，如密码输入完成或指纹解锁成功，有助于建立明确的交互闭环。而负向反馈类则通过更显著的振动提示失败、错误或风险情境，例如认证失败或权限受限，提升用户的感知敏感性。

#### 3.2 显性认知层

显性认知层由多个关键维度构成，主要描述系

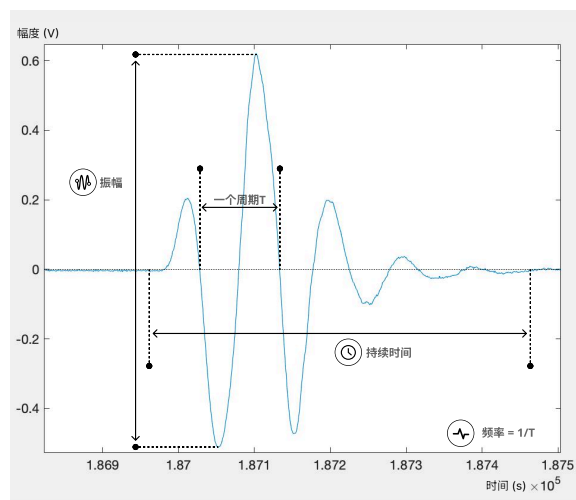


图2 振动参数示意图

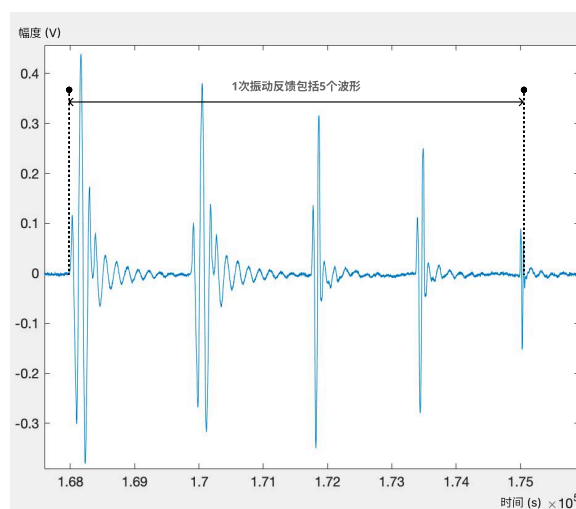


图3 变化性示意图

统反馈在可感知层面对用户产生的直接影响。首先是模态组合方式，不同感官通道的协同具有互补性与增强性。例如，视觉结合触觉可提升操作确认感，触觉结合听觉则更适用于状态提醒与警示，三模态组合在高强度干扰或复杂任务中表现更为稳定。合理选择模态组合形式有助于提升反馈信息的可识别性和优先级调控能力。

其次，视觉信息在界面中的呈现层级决定了反馈信息所处的注意引导层面。反馈可位于当前操作界面，也可跨页面或嵌套于多级结构中，不同层级暗示了系统对用户注意力的调度策略。例如，跨层级的界面切换更易与显著的触觉或多模态反馈配合，强化系统状态变更的感知。

智能手机的振动反馈由图2和3的四个物理参数构成，包括频率、幅度、持续时间与变化性，用于刻画反馈在强度、密度与节奏结构上的差异。合理配置这些参数，有助于增强系统信息传递的清晰性与区分度，并为后续的节奏建模与机制分析提供结构基础。

硬件实现层的差异也会显著影响显性反馈的感知表现。即使在输出相同波形参数的条件下，不同设备因马达类型（如X轴或Z轴线性谐振马达、Taptic Engine等）、马达安装位置及机身材质等差异，会导致触感的实际表现不同。例如，金属机身中的振动通常更为清脆紧凑，而玻璃材质则带来更柔和的反馈质感。这些差异可能影响用户对节奏清晰度或反馈意图的判断，因此在跨设备触觉设计中需考虑感知一致性的策略适配。

### 3.3 隐性认知层

在用户完整体验多模态触觉反馈后，往往会在意识层面之外生成对系统状态的理解与情绪反应。隐形认知层关注的正是这种基于感知经验的深层联想机制，用户通过节奏、强度与模态协同等线索，自主建构对系统行为的判断与情感态度。这类认知不仅影响操作意图的识别，也在很大程度上决定了触觉反馈所传递的主观质感与交互调性。

这类联想通常以隐喻的形式呈现，本文将其实划分为物理隐喻与情感隐喻两种类型。物理隐喻指用户将触觉特征映射至熟悉的物理经验，例如调节闹钟滚轮时的咔哒感令人联想到机械齿轮的旋转，滑动页面边缘的颗粒感唤起对阻尼结构的联想。此类反馈增强了系统行为的拟物性，使用户更容易接受其“自然性”。

情感隐喻则体现为用户对反馈节奏与力度的情绪化解读。节奏平稳、强度柔和的反馈往往被感知为温和友好，适合伴随类或正向确认场景；而短促强烈的反馈则更易传递紧张与警示之意。这种综合

性的情感感知，既提升了触觉反馈的信息效率，也优化了用户的情绪体验。

## 4 方法

### 4.1 设备与场景选取

本研究在设备选取方面，考虑了品牌影响力、用户基数和触觉马达类型的覆盖广度。最终选用的三款智能手机及马达型号分别为iPhone 14 Pro Max（Apple Taptic Engine）、OnePlus 11（AAC Technologies CSA0916）与Xiaomi 13 Pro（AAC Technologies ESA1016），它们表现出在结构设计、驱动方式和材料适配等方面的差异。

实验场景方面，研究聚焦于智能手机日常使用中高频且交互性强的典型操作，共选取了表1所示的10个任务场景，涵盖输入、滑动、编辑、拍摄与状态反馈等多种功能。这些任务均基于用户主动操作进行触发，避免了系统通知类被动事件，同时在交互行为、模态结构与语义意图上具备良好的区分度。

表1 智能手机触觉反馈场景

场景	行为	交互意图
1. 键盘打字	点按	正向确认
2. 闹钟滚轮滑动	滑动	伴随
3. 联系人字母索引	滑动	伴随
4. 相机变焦刻度调节	滑动	伴随
5. 相机拍照	点按	正向确认
6. 相册长按编辑	点按	正向确认
7. 桌面App长按编辑	点按	正向确认
8. 设置横向开关	滑动	正向确认
9. 底部上滑进入最近任务	滑动	伴随
10. 指纹解锁失败	点按	负向警示

### 4.2 场景特征识别

在明确任务与设备后，研究进一步从感知设计框架出发，对10个交互场景的核心特征分别进行识别与分类。这一过程旨在提炼影响用户体验的关键变量，构建参数编码与建模分析的理论基础。

行为形式上，10个任务既包含点按类的短时确认操作，也有滑动类的持续导航任务，体现了交互节奏与反馈需求的差异性。意图属性方面，部分任务用于传达操作完成的结果，如拍照或开关切换，另一些则强调操作过程中的伴随，例如滚动、缩放等场景，解锁失败场景则表达警告与失败。

感知模态层面，所有任务均结合视觉与触觉反馈，其中部分场景进一步叠加听觉通道，构成多通

道感知协同。视觉反馈的呈现位置也因任务而异，既有在同一页面即时响应的，也有涉及界面跳转的系统级操作，反映出系统对反馈显著性与注意力调度的不同要求。

### 4.3 物理数据采集与参数提取

#### 4.3.1 数据采集系统

研究搭建了一套基于加速度测量的硬件系统，如图4所示，用于采集三款智能手机在典型交互场景中的振动反馈数据。系统采用ADXL354BZ 三轴加速度传感器，采样方向集中于X 轴，以匹配三款设备所使用的X 轴线性马达的振动方向。Teensy 4.1 作为控制核心驱动传感器并负责数据传输，振动信号经由Pico 5444D MSO 示波器采样，采样率设定为24 kS/s，最终通过串口传输至ThinkPad工作站用于存储与分析处理。

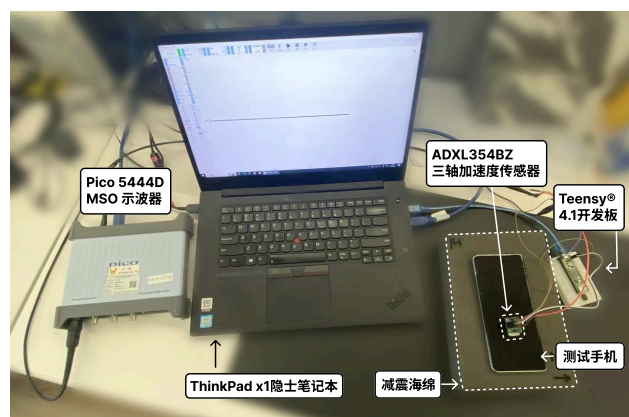


图4 振动波形的数据采集系统

#### 4.3.2 振动参数采集

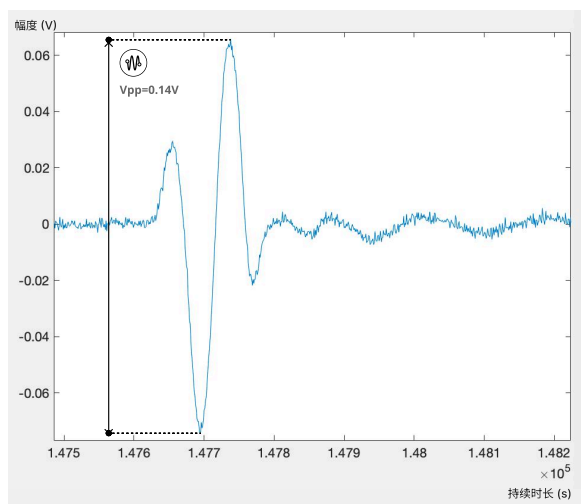


图5 Xiaomi 13 Pro “相机拍照”场景的时域图

借助该振动数据采集系统，研究对典型场景

中的振动反馈进行了定量记录，提取了波形的关键物理特征，包括峰值幅度、持续时间、频率和变化性。以Xiaomi 13 pro的“相机拍照”场景为例，图5的时域图显示该场景的电压峰峰值为0.14V，振动时长约为0.0083s；图6为经过傅里叶变换后得到的频域图，其基频为270Hz。由于该反馈波形仅包含一次完整的振动周期，其变化性为1。

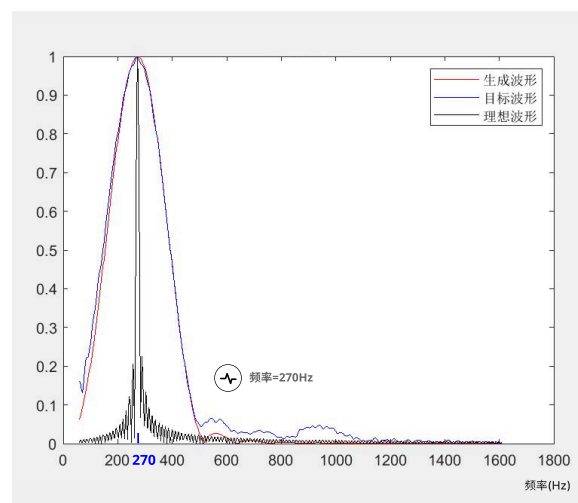


图6 Xiaomi 13 Pro “相机拍照”场景的频域图

为进一步量化感知幅度，我们采用感知强度换算公式对电压幅度进行标准化。根据韦伯-费希纳定律<sup>[21]</sup>，引入常数项与底数10得到如下公式：

$$S = 10 \times \log_{10} \left( \frac{U}{U_{\text{阈值}}} \right)$$

其中， $S$ 表示感知强度（单位为dB SL）， $U$ 为测得的电压幅度， $U_{\text{阈值}}$ 为人手可感知的电压最低阈值（本研究中测得为0.001V）。根据计算小米在该场景下的感知幅度为21.46dB SL。最终得到相机拍照的三款智能手机的四项振动参数如表2所示。

表2 相机拍照场景下三个手机的振动参数

	频率(Hz)	幅度(dB SL)	时长(s)	变化性
1	295	19.78	0.0136	2
2	250	21.82	0.0080	2
3	270	21.46	0.0083	1

### 4.4 用户实验设计与数据收集

#### 4.4.1 参与者

实验包括10个典型交互场景，为确保每个场景均获得12人次的主观评分数据，需采集120人次的实验样本。由于每位被试平均完成5个不同场景的打分任务，因此共招募24名被试参与本实验。被试





图7 用户实验流程、设备与场景

表3 场景1“键盘打字”及场景10“指纹解锁失败”编码

	Freq (Hz)	Amp (dB SL)	Dur (s)	Vari- ation	Mod _AVT	UI _Cross	Dev _ONE	Dev _MI	Act _Cross	Int _Comp	Int _Alert	Satis- faction
1	270	23.80	0.0104	1	1	0	0	0	0	0	0	5.42
1	292	28.81	0.0068	1	1	0	1	0	0	0	0	4.61
1	160	28.57	0.0125	1	1	0	0	1	0	0	0	4.33
10	255	28.51	0.0450	3	1	1	1	0	0	0	1	4.50
10	531	29.08	0.0700	5	0	0	0	1	0	0	1	3.75

中男性10人、女性14人，年龄分布在20至55岁之间（ $M = 28.17$ ， $SD = 8.28$ ）。所有参与者均为右利手，身心健康，无触觉感知障碍，自愿签署知情同意书并在实验结束后获得相应时长的金钱补偿。

4.4.2 实验流程

为确保被试在实验过程中的持续专注与感知敏锐度，实验要求每人体验5个场景，每个场景对应2至3款智能手机，单人测试时长控制在60至85分钟之间。实验详情如图7所示，流程包括以下四个阶段：

- (1) 填写问卷：被试首先完成基础信息登记，包括性别、年龄等人口统计学变量；
- (2) 实验说明：主试对整体流程、任务目标和评分机制进行简要讲解，确保被试充分理解后进入横向体验环节；
- (3) 触觉体验：被试依次感受每个场景下来自不同品牌手机的振动反馈效果。为增强感知对比性，体验顺序随机打乱，测试中鼓励参与者反复体验以加强记忆；
- (4) 打分与解释：用户在每次体验后立即为该场景下的不同设备打出1-7分的满意度分值，并简要说明评分原因，用以补充理解其感知偏好。

4.5 数据预处理与编码

研究基于所构建的感知设计框架，对实验采集的数据进行了标准化处理与统一编码。变量包括两类：第一类为连续型变量，用于描述触觉反馈的物理属性，第二类为分类虚拟变量，用于刻画交互行为结构与设备实现方式。

其中频率、幅度、持续时长和节奏变化性作为连续变量，分别衡量振动的密度、强度、时间长度和结构复杂程度，原始测量值直接用于建模分析。用户主观评分采用7级李克特量表，用作回归模型的因变量。其余用于表示场景的模态特征、界面结构、行为类型、交互意图以及设备类型等关键感知因素采用哑变量形式编码。如多模态通道中，若反馈中包含听觉信息，则编码为1，否则为0；视觉层级中，跨页面跳转场景赋值为1，单页面内传递则为0。用户行为以点按为参考组，滑动类任务赋值为1；交互意图中，正向确认为基础组，伴随类和警示类任务分别编码为1。设备层面中，苹果设备作为参考组，一加与小米分别对应Dev.ONE 与Dev.MI 两个变量。表3所示为场景1“键盘打字”与场景10“指纹解锁失败”的变量编码，其中iPhone设备因系统设计不包含场景10操

作，未参与该场景的数据采集。

## 5 结果与发现

### 5.1 描述性统计分析

#### 5.1.1 满意度对比

研究对用户主观评分数据进行了描述性统计分析，图8展示了三款设备在10个典型交互场景中的平均满意度分布。总体来看，iPhone 14 Pro Max在所有场景中评分均处于相对领先水平，均值集中于5.0以上，OnePlus 11与Xiaomi 13 Pro评分相对较低，部分场景低于4.0，反映出设备间存在较为显著的满意度差异。此外，不同场景的评分差异亦较明显，场景2“闹钟滚轮滑动”获得较高评价，而场景9“上滑进入最近任务”与场景10“指纹解锁失败”得分普遍偏低。

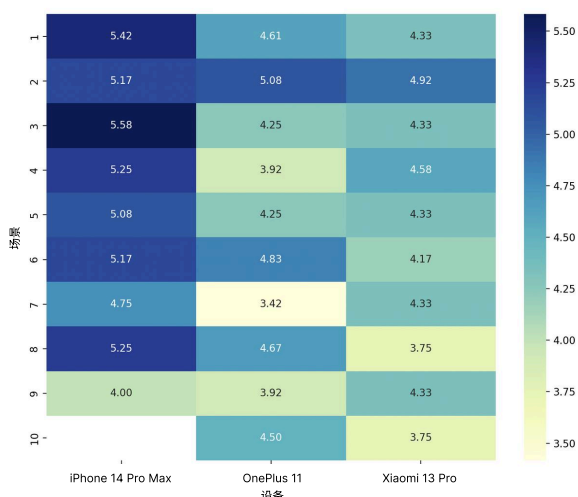


图8 三款设备在十个交互场景中的满意度分布

#### 5.1.2 参数相关性

为初步探查物理参数对用户满意度的影响，研究计算了如图9所示的四项振动参数与满意度评分之间的皮尔逊相关系数。结果显示，除频率外，幅度、持续时长与变化性均表现出负相关趋势，其中持续时长 ( $r = -0.32$ ) 和变化性 ( $r = -0.23$ ) 关联方向一致，反映出用户可能更倾向于节奏简洁、反馈清晰的振动模式。这一趋势与“显性认知层”所强调的反馈时间结构对感知辨识度的影响保持一致，提示反馈节奏在优化用户体验中的潜在价值。

## 5.2 多层回归分析

### 5.2.1 分层逻辑

为探究不同维度因素对用户触觉满意度的影响，本研究基于所提出的理论框架，构建了四层回归模型，模型设计遵循用户感知路径的层级逻辑。

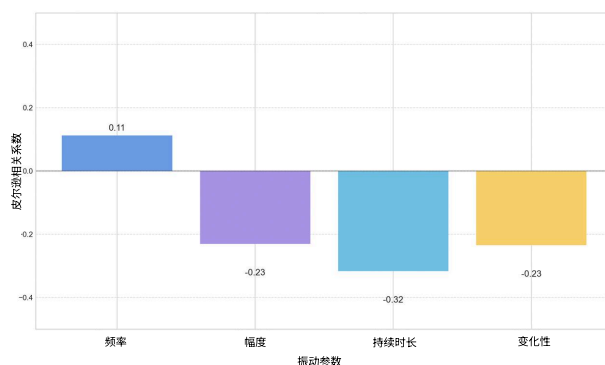


图9 振动参数与满意度之间的皮尔逊相关系数

其中第一层为触觉反馈的物理参数，包括频率、幅度、持续时长与变化性，作为最底层的感知输入。第二层纳入显性感知设计要素，包括模式组合和UI层级变化，反映界面呈现的知觉策略。第三层引入设备差异，体现不同厂商在马达实现和系统调优上的策略影响。第四层则考虑用户交互层面的行为与意图变量，以捕捉用户主动行为对感知结果的调节作用。我们采用逐步回归的方式依次引入变量，并通过 $\Delta R^2$ 与 $F$ 检验评估各层级的模型贡献。

### 5.2.2 建模结果

表4的多层回归建模的结果表明，频率、幅度、时长、变化性这些基础的振动参数可解释约25%的用户满意度差异 ( $\Delta R^2 = 0.251$ )。在引入感知设计相关的多模态组合与界面层级后，模型解释力提升至40% ( $\Delta R^2 = 0.15$ ,  $p = 0.090$ )，显示出设计层变量对用户主观感知的潜在调节作用。进一步纳入设备类型作为硬件实现层，模型拟合度显著跃升至62% ( $\Delta R^2 = 0.22$ ,  $p = 0.006$ )，其中OnePlus 11与Xiaomi 13 Pro相较iPhone 14 Pro Max的满意度显著偏低 ( $\beta = -0.57/-0.62$ ,  $p < 0.01$ )，表明硬件实现对最终体验的关键影响。

尽管行为类型与交互意图的引入未显著提升模型拟合 ( $\Delta R^2 = 0.05$ ,  $p = 0.480$ )，但其结构稳定性为解释多场景触觉反馈中的语境差异提供了补充维度。最终四层回归模型达到 $R^2 = 0.666$ ，说明研究提出的分层感知设计框架可解释近三分之二的满意度变异，验证了其合理性与应用价值，为未来智能终端的触觉设计提供了理论支持与参数参考。

## 5.3 定性数据分析

研究结合开放编码与主题归纳方法分析用户在典型交互任务中的触觉感知，对24位用户在10个代表性场景中的访谈数据进行了逐条整理。最终依据操作目标将任务划分为三类：精细调节、快速点击

表4 多层回归模型结果

预测变量	模型1		模型2		模型3		模型4	
	$\beta$	$t$	$\beta$	$t$	$\beta$	$t$	$\beta$	$t$
Frequency	0.604	1.868	0.487	1.588	0.289	1.078	0.165	0.531
Amplitude	-0.281	-1.527	-0.3	-1.683	-0.008	-0.046	0.095	0.441
Duration	0.192	0.412	0.437	0.937	-0.069	-0.158	-0.697	-1.171
Variation	-0.765	-1.3	-0.931	-1.641	-0.306	-0.581	-0.102	-0.16
Mod_AVT			0.295	1.698	0.148	0.961	0.067	0.382
UI_Cross			-0.253	-1.247	-0.171	-0.991	-0.098	-0.459
Dev_ONE					-0.569	-2.730**	-0.765	-3.120**
Dev_MI					-0.624	-3.270*	-0.734	-3.562**
Act_Slide							0.281	0.899
Int_Comp							-0.108	-0.349
Int_Alert							0.553	1.179
$R^2$	0.251		0.398		0.615		0.666	
$\Delta R^2$	0.251		0.148		0.217		0.051	
$F$	2.008		2.427		3.993**		3.078*	

注: \*\*\* $p < 0.001$ , \*\* $p < 0.01$ , \* $p < 0.05$

与功能切换，并逐类梳理用户反馈语言中的感知关键词与体验偏好。

在精细调节类任务中，如闹钟滚轮、联系人索引和相机变焦刻度调节，用户非常关注颗粒感的清晰度与节奏的稳定性。P10表示，闹钟滚轮的反馈“像一片大水滴，衔接紧密”，有助于准确定位刻度位置；相机变焦刻度调节中，P19提到“随倍数增加振动慢慢加强”，能带来“自然且可感知的变化过程”。但也有用户指出，颗粒感“过重”“偏涩”时会影响操作节奏，特别是在快速滑动中易感到卡顿。

快速点击类任务如键盘打字与桌面App长按编辑，用户反复强调触觉反馈的干脆、及时和稳定。针对键盘打字场景，P5提到：“打字时只要有一点延迟，整个人的节奏就乱了。”用户反复提及“拖泥带水”“间隔感强”（P2, P8, P11）等负面评价，说明反馈若不能紧跟输入节奏，会直接影响操作流畅度。而在App长按中，P2形容好的触觉反馈“像打勾一样”，清晰有力，带来明确的操作完成感。

功能切换类任务中，包括设置开关、拍照与指纹解锁失败，用户关注反馈是否与视觉动作保持同步。设置开关常被描述为“像拉链”，P19进一步指出“有仪式感，让人感觉切换是完整的”，表现出节奏与界面逻辑匹配的重要性。拍照任务中，P11形容其为“像传真喇一下”，是一种即时确认的信号。而在指纹解锁失败场景中，不少用户指出“节奏不

清”“多段突兀”会让人难以判断系统反馈的意图。

6 讨论

6.1 参数设计与硬件差异的协同效应

多层回归显示，振动参数先解释了25.1%的满意度方差，确认频率、幅度、时长与节奏构成触觉体验的物理基础；将设备变量纳入后， $R^2$ 额外提升21.7%，意味着同一组参数在不同手机上仍会呈现截然不同的体感效果。根源并非单一马达优劣，而是硬件与系统协同：马达规格、安装位置、机身材质共同决定震动能量的传导与衰减，而驱动层的节奏整形与延迟抑制进一步放大差异。

本研究所测试的三部设备中，iPhone 14 Pro Max的表现最佳，它使用Apple Taptic Engine、刚性中框与玻璃背板，振动反馈短促、清晰且一致。若马达距握持区较远、机壳吸振，或软件触发存在滞后，即便幅度相似，用户也会感到“发闷”或“尾巴长”。由此可见，高质量触觉体验必须同时做好参数精调与实现优化；在跨设备迁移或多终端设计时，也应同步校准硬件能力与系统调度，才能保证节奏一致与触感可识别性。

6.2 节奏与意图的匹配机制

实验结果显示，满意度较高的场景往往具备节奏简洁、与操作节律高度同步的振动结构；而满意



度较低的警示类反馈则存在振动时长偏长、节奏断裂等问题。这一趋势与持续时长和变化性参数的负向相关相符，表明用户对反馈时序结构的敏感度高于对强度或频率等单一物理特征的感知。

进一步分析发现，不同交互意图对应着显著不同的节奏结构偏好：短促的单次振动适用于确认与完成类操作，等间隔的弱振适合伴随类持续操作，而密集且对比强烈的节奏更适用于传达警示或错误信号。这些节奏样式构成了“节奏—意图”的基本映射关系。触觉设计中应从交互语义出发，明确目标操作的时间特征，再反向推导振动段数与间隔结构，在保证节律协调的同时平衡辨识度与舒适性。

### 6.3 用户感知体验的分层特征

访谈结果显示，用户满意度主要受三项因素共同驱动。首先是时效与节奏一致性。当振动与操作同步、节拍稳定，用户描述为“及时”“连贯”；一旦延迟超出感知阈或节奏断裂，便被认为“拖泥带水”，操作与反馈脱节。其次是空间聚焦与结构简洁。反馈集中于触点、振动段清晰时，被评价为“干脆利落”；若反馈扩散至整机或呈现多段堆叠，则被指“突兀”“割裂”，说明空间冗余会加重感知负担。第三是力度与颗粒的适度平衡。中等强度、颗粒分明的反馈被形容为“像脉搏跳动”，能增强确认感；过强引发生理不适，过弱或颗粒模糊则削弱信息辨识。

从机制上看，时效一致性对应显性认知层的节律同步需求，空间聚焦降低了注意分配负荷，力度颗粒则关乎隐性层的舒适阈与情感质感。触觉反馈设计应先保证触发延迟与节奏精度，再控制传播范围与波形简洁度，最后在强度与颗粒上做微调，以在多场景和多设备间同时满足可识别性与愉悦度。

### 6.4 设计应用与跨设备拓展前景

研究提出的“用户交互—显性认知—隐形认知”多层结构，为触觉反馈设计提供了系统化思路。在应用层，设计者可从用户行为与交互意图出发，定位反馈的目标语义，再映射至显性认知层的感知结构，明确所需通道组合、视觉传达层级及参数边界。而硬件能力作为实现基础，为物理参数调配设定可行区间，而最终的感知效果仍受隐形层中物理与情感隐喻的调节。该框架支持从行为起点到感知终点的“因果式设计”，适用于多种日常场景中触觉策略的快速归类与生成。

在多设备环境中，该框架具备良好的可拓展性。通过优化马达类型、材质等硬件，可在不改变交互逻辑的前提下迁移至平板、可穿戴或VR终端设备；同时，该模型也为多模态设计中的通道协同、反馈优先级设定与用户感知一致性提供了统一

的结构支撑，为跨平台触觉设计奠定理论基础。

### 6.5 局限与未来研究方向

本研究存在一定范围与方法上的局限。首先，在场景与设备覆盖上，尽管已选取具代表性的10个使用场景与3款主流设备进行横向对比，但在更广泛的系统设置、马达种类与交互任务下仍需进一步验证，以提升框架适用的广度与稳健性。其次，在变量拆解上，当前对触觉反馈的建模主要集中于频率、幅度、时长与变化性等核心物理特征，未来可进一步引入起止缓冲、方向性与传播路径等更细致的维度，以更准确映射用户多层感知。

此外，定性数据尚以主题归纳为主，尚未系统建模用户语言与感知之间的映射关系。后续研究可结合自然语言处理方法对主观描述进行结构建模，或与生理指标联动，建立更全面的多模态感知评估机制。总体而言，研究已初步验证多感知融合触觉设计框架的可行性，未来将在设备多样性与变量精度两个方向上持续探索。

## 7 结语

本文围绕触觉反馈在智能手机中的结构化设计问题，提出并验证了一套多感知融合的触觉反馈设计框架。该框架整合用户操作意图、节奏结构与感知特征，构建任务—节奏—感知的映射路径，为提升反馈的适配性与表达精度提供系统化支持。通过对10个典型任务场景与三款主流设备的跨平台实验，结合振动参数测量、满意度评分与主观访谈数据，研究验证了该框架对用户体验差异的较高解释力。相较于传统依赖经验或聚焦触觉参数本身的设计方式，本研究强调从任务场景、功能目标与多感官融合层面出发，建立反馈设计的感知结构逻辑。未来可进一步拓展用户感知维度与设备适配策略，强化触觉设计在多模态、多终端中的体验与价值。

**致谢** 感谢所有参与本研究的研究成员、实验参与者及匿名审稿人对本工作的支持与贡献。本研究得到教育部人文社科基金（23YJCZH092）和中残联辅助器具专项课题（2024CDPFAT-04）支持。

### 参考文献

- [1] SAKET B, PRASOJO C, HUANG Y, et al. Designing an effective vibration-based notification interface for mobile phones[C]//Proceedings of the 2013 conference on Computer supported cooperative work. 2013: 149-1504.
- [2] YAO H Y, GRANT D, CRUZ M. Perceived vibration strength in mobile devices: The effect of

- weight and frequency[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2009, 3(1): 56-62.
- [3] ZHANG R, LI Y, WU Z, et al. SemanticTap: A Haptic Toolkit for Vibration Semantic Design of Smartphone[C]//Proceedings of the 26th International Conference on Multimodal Interaction. 2024: 264-273.
- [4] VERRILLO R T, FRAIOLI A J, SMITH R L. Sensation magnitude of vibrotactile stimuli[J]. Perception & Psychophysics, 1969, 6(6): 366-372.
- [5] BREWSTER S A, BROWN L M. Tactons: structured tactile messages for non-visual information display[J]. 2004.
- [6] CHANG A, O'MODHRAIN S, JACOB R, et al. ComTouch: design of a vibrotactile communication device[C]//Proceedings of the 4th conference on Designing interactive systems: processes, practices, methods, and techniques. 2002: 312-320.
- [7] WICKENS C D. Multiple resources and performance prediction[J]. Theoretical issues in ergonomics science, 2002, 3(2): 159-177.
- [8] OVIATT S. Ten myths of multimodal interaction [J]. Communications of the ACM, 1999, 42(11): 74-81.
- [9] SPENCE C, DRIVER J. Crossmodal space and crossmodal attention[M]. Oxford University Press, 2004.
- [10] MACLEAN K, ENRIQUEZ M. Perceptual design of haptic icons[C]//Proc. of EuroHaptics. 2003: 351-363.
- [11] TERNES D, MACLEAN K E. Designing large sets of haptic icons with rhythm[C]//Haptics: Perception, Devices and Scenarios: 6th International Conference, EuroHaptics 2008 Madrid, Spain, June 10-13, 2008 Proceedings 6. 2008: 199-208.
- [12] HOGGAN E, BREWSTER S A, JOHNSTON J. Investigating the effectiveness of tactile feedback for mobile touchscreens[C]//Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems. 2008: 1573-1582.
- [13] OBRIST M, SEAH S A, SUBRAMANIAN S. Talking about tactile experiences[C]//Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems. 2013: 1659-1668.
- [14] SEIFI H, MACLEAN K E. A first look at individuals' affective ratings of vibrations[C]//2013 World Haptics Conference (WHC). 2013: 605-610.
- [15] TAN J, GE Y, SUN X, et al. User experience of tactile feedback on a smartphone: Effects of vibration intensity, times and interval[C]//Cross-Cultural Design. Methods, Tools and User Experience: 11th International Conference, CCD 2019, Held as Part of the 21st HCI International Conference, HCII 2019, Orlando, FL, USA, July 26-31, 2019, Proceedings, Part I 21. 2019: 397-406.
- [16] JU Y, ZHENG D, HYND S D, et al. Haptic empathy: Conveying emotional meaning through vibrotactile feedback[C]//Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2021: 1-7.
- [17] ANWAR A, SHI T, SCHNEIDER O. Factors of haptic experience across multiple haptic modalities[C]//Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2023: 1-12.
- [18] KIM E, SCHNEIDER O. Defining haptic experience: foundations for understanding, communicating, and evaluating HX[C]//Proceedings of the 2020 CHI conference on human factors in computing systems. 2020: 1-13.
- [19] SHIRAGA S, KINOSHITA Y, TOTSUKA T, et al. Construction of impression estimation models for the design of smartphone vibration feedback [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Kansei Engineering and Emotion Research 2018: KEER 2018, 19-22 March 2018, Kuching, Sarawak, Malaysia. 2018: 350-359.
- [20] HWANG J, HWANG W. Vibration perception and excitatory direction for haptic devices[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011, 22: 17-27.
- [21] EKMANN G. Weber's law and related functions [J]. The Journal of Psychology, 1959, 47(2): 343-352.