

基于振动-语义特征的智能手机触觉反馈优化设计

张睿¹⁾, 李亦萱^{1,2)}, 焦阳^{1)*}

¹⁾ (清华大学未来实验室 北京 100084)

²⁾ (北京林业大学艺术设计学院 北京 100083)
(jiaoyang7@tsinghua.edu.cn)

摘要: 随着智能手机的广泛应用, 振动反馈已成为提升交互体验的重要方式。然而, 现有的振动设计往往侧重于工程师直接的技术实现, 缺乏基于用户视角对不同场景需求和感知的系统优化, 导致反馈效果在功能性与用户体验之间存在不匹配的问题。本文提出了一种基于振动物理特性和用户感知语义特征的触觉反馈优化算法。首先, 采集智能手机在不同场景下的振动加速度数据, 提取基础频率、振幅和持续时间关键物理参数, 接着构建一组包含 13 对描述智能手机振动感知的语义特征的形容词系统, 并收集用户在不同场景下的形容词的感知值及理想值。最后, 应用优化算法计算得到新的振动波形参数, 以改进原有触觉反馈, 提升用户实际触觉体验。

关键词: 智能手机; 触觉反馈; 振动特征; 语义特征; 优化设计

中图法分类号: TP391 DOI: 10. 3724/SP. J. 1089. 2025. 论文编号

Optimization Design of Smartphone Haptic Feedback Based on Vibration and Semantic Features

Zhang Rui¹⁾, Li Yixuan^{1,2)}, and Jiao Yang^{2)*}

¹⁾ (The Future Lab, Tsinghua University, Beijing 100084)

²⁾ (School of Art and Design, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: With the widespread use of smartphones, vibration feedback has become an important approach to enhance interaction. However, current vibration designs mainly focus on technical implementation by engineers, lacking systematic optimization based on user needs and perceptions in different scenarios. This can lead to a mismatch between functionality and user experience. This study proposes a haptic feedback optimization algorithm based on vibration properties and user-perceived semantic features. First, vibration acceleration data from smartphones in different scenarios are collected, and key physical parameters such as frequency, amplitude, and duration are extracted. Then, a system of 13 adjective pairs is created to describe vibration perception, and user ratings for these adjectives in different scenarios, along with their ideal values, are gathered. Finally, an optimization algorithm is applied to calculate new vibration waveform parameters, improving the original haptic feedback and enhancing the actual user experience.

Key words: Smartphones; Haptic Feedback; Vibration Features; Semantic Features; Optimization Design

智能手机的触觉反馈是提升用户操作体验的重要组成部分^[1], 在输入确认、界面切换、系统提示等交互场景中发挥关键作用^[2-3]。近年来, 仿生振感马达和超宽频线性马达的应用进一步提升了振动反馈的精细度和层次感。但当前振动优化主要依赖工程师的经验调整, 缺乏系统化的用户体验计算方法, 不同场景下的振动效果并未与场景及操作相匹配, 影响整体交互体验。

尽管已有研究从心理物理学角度描述振动感知效果^[4-5], 也有研究探索了物理参数与感知形容词的关系^[6-8], 但他们未真正指导智能手机的日常振动反馈优化参数设计中。在实际使用中, 振动反馈需与用户目的、操作行为和使用状态相匹配, 以确保振动效果既符合用户习惯, 又契合场景特征, 从而提供更舒适自然的振动体验。

本文提出了一种基于振动与语义特征的触觉反馈优化方法, 以量化分析智能手机在不同交互场景下的振动感知, 并计算优化后的物理参数。研究首先采集并提取了不同品牌智能手机在键盘打字、数字键盘拨号、闹钟时钟滚轮等 8 个日常场景中的 3 项关键物理参数。随后, 基于触觉感知研究框架, 选取一组描述振动特征的语义形容词, 并通过 96 人次的用户实验收集各场景的感知评分和理想效果数据。最终, 通过优化计算得到更符合用户预期的振动参数。研究从物理与语义特征构建、数据采集、数据清洗和优化计算四个方面展开, 不仅为智能手机振动反馈优化提供了一种基于用户感知的数据驱动方法, 也为触觉体验一致性设计和个性化交互提供了理论支持。

1 相关工作

1.1 智能手机的振动波形

触觉技术已经被广泛应用于虚拟游戏、移动端交互、机器人等诸多领域。其中, 手机振动触觉感受基于主观感知能力可以传输信息, 优化人机体验^[9]。手机振动设计主要涉及振动强度、频率、脉冲波、节奏, 以及这些参数的组合应用^[10]。通过调

整各个参数数值, 可以表达不同的触觉样式, 使用户能够感知和识别不同的振动反馈。随着手机振动物理参数的改变, 例如频率变化、持续时间、接触力^[11], 以及感觉运动预测、视觉对象信息和先前经验^[12]的影响, 用户的感知与主观评价也会随之改变^[7]。过往研究表明, 不同的手机振动物理量设计会影响用户的感知与评价。例如, 在手机所处的移动环境中, 振动触觉感知的最佳振动频率为 180Hz^[13]。随着频率加权振动加速度值的增加, 舒适度也相应增加。

振动反馈的软硬件技术虽然已在智能通讯设备领域得到了广泛应用, 但手机振动的振感语义特征和评价指标维度, 以及从用户角度量化、评估当前振感方案在各重点场景下的体验水平, 仍需进一步研究与探索, 有必要为各个场景建立通用的主观感知评估标注和度量指标以评估物理振动输出^[14]。本研究致力于对比目前手机行业各厂商手机的振动体验, 明确当前振感方案的振动语言是否与用户感官体验保持一致, 为后续振感方案的迭代优化提供方向。

1.2 触觉反馈语义特征

触觉感受和心理物理学息息相关^[15], 人的主观感知成为设计人机触觉反馈中的重要内容。振动作为一种媒介, 可以传递个体的主观感知^[8]。由于手机不同场景的设计不同, 人们会受到不同的主观感知刺激。例如, 消息提示、拖拽按钮等场景会对用户感知产生不同的振动触觉体验影响^[16]。但由于触觉形容词形容词数量多, 使用范围广, 类别丰富, 并且具有模糊性、抽象性等特点, 感觉性状特征明显^[17], 包括通感形容词, 隐喻、转喻^[17], 情感形容词^[18-19]等类别, 因此有必要对用户的设计期望进行提取, 以将不同用户间对于触觉进行描述规范化, 反映主观和意识体验^[8]。近年来有很多相关工作, 如邵知宇通过客观力触觉刺激输入, 与主观感知评价结果输出之间的感知模型, 代替人对再现效果进行量化描述^[14], 刘宁通过构建触觉信息的信号特征集及触觉反馈拟真度主观评价数据集, 为客观评测方法的研究提供数据支持^[20]。

聂新苗将手机场景下的振动体验分为三个层级: 物理参数(频率、振幅、持续时长), 感知维度(快慢、钝、尖)和情感语义维度(不安、活泼、愉悦)^[16], 可以将物理参数映射至易于理解的形容词以设计振动效果.

综上所述, 本文基于用户体验的描述性指标, 优化智能手机的振动参数, 以提升触觉反馈的匹配度和体验质量. 在扩展振动感知的语义词汇库

的同时, 推动触觉交互设计的完善.

研究围绕智能手机的日常振动反馈场景展开, 综合振动波形测量、参数解析、语义特征识别、用户感知实验和数据优化计算等环节, 形成完整的优化策略. 具体流程如图 1 所示, 通过量化分析和数据驱动的方法, 计算出更符合用户感知的振动参数, 为智能手机的触觉设计提供支持.



图 1 本文研究策略

2 数据采集

2.1 采集设备与场景

通过调研智能手机品牌的市占率和触觉反馈技术应用情况, 并结合品牌热度及触觉反馈好评率, 选取了实验前发布的四款最新机型. 所选机型及其振动马达分别为 iPhone 14 Pro Max (Apple Taptic Engine)、三星 Galaxy S23 Ultra (AAC Technologies SLA 0620)、OnePlus 11 (AAC Technologies CSA 0916) 和小米 13 Pro (AAC Technologies ESA 1016).

为尽可能涵盖常见的触发方式, 并确保振动反馈为单一波形, 选取了表 1 中的 8 种场景.

表 1 本文交互场景选择与行为分析

交互场景	操作行为与特点
键盘打字	短按, 多次
侧滑返回上一级	左右滑动, 单次
闹钟时钟滚轮	上下滑动, 多次
联系人字母索引	上下滑动, 多次
拨号盘数字按键	短按, 多次
相册长按编辑	长按, 单次
桌面 App 长按编辑	长按, 单次
底部上滑进入最近任务	上下滑动, 单次

2.2 物理参数采集

本研究对 4 款设备在 8 个振动反馈场景下的 3 项关键物理参数进行数据采集, 包括峰峰值幅度、频率和持续时间, 以表征当前振动效果, 并为后续波形优化提供基础数据.

2.2.1 物理参数识别

为准确分析振动反馈效果并指导振动设计, 本文提取了三个关键物理参数, 如图 2 所示:

- (1) 振幅: 指电压的峰峰值, 为振动波形的最大正振幅与最大负振幅之差.
- (2) 频率: 表示单位时间内的振荡次数, 通常以赫兹(Hz)为单位.
- (3) 持续时间: 指振动从开始到基本停止的时间跨度, 以秒(s)为单位.

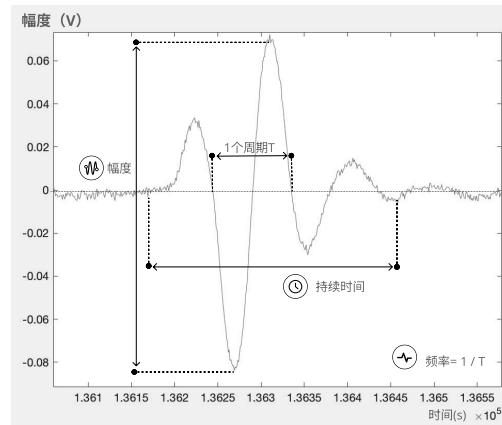


图 2 振动波形物理参数

2.2.2 采集设备与环境

振动加速度采集系统如图 3 所示,所有设备均已连接电源,该系统主要由四个部分组成:

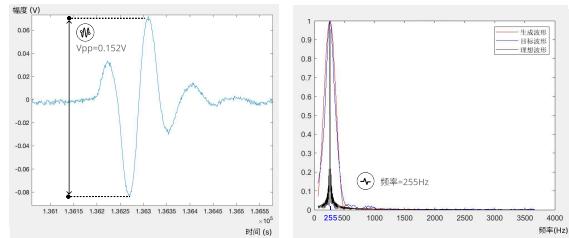
- (1) 三轴加速度计模块 ADXL354BZ: 用于测量智能手机的振动加速度,重点分析 X 轴方向的振动分量.
- (2) Teensy 4.1 开发板: 为 ADXL354BZ 提供 3.3V 供电,并负责数据采集、预处理和传输.
- (3) 示波器 Pico 5444D MSO: 以 24 kS/s 采样率进行信号采集.
- (4) ThinkPad X1 隐士工作站笔记本: 通过串口传输、存储与分析数据.



图 3 振动加速度采集系统

2.2.3 数据集报告

通过读取示波器采集到的时域图,我们得到了振动波形的幅度.随后,再通过傅里叶变换^[21]得到其频域图,以确定其振动频率和持续时间.以 iPhone 14Pro Max 的“闹钟时钟滚轮”场景为例,图 4a 为其时域图,可得振动波形幅度为 0.152V. 通过傅里叶变换得到频域图 4b, 基频为 255Hz, 周期数 T 为 2.25.



a. 时域图
b. 频域图

图 4 iPhone 14Pro Max “闹钟时钟滚轮”振动波形

因为振动波形的周期是频率的倒数,故得到振动持续时间为 0.0088s. 对于峰峰值幅度,我们根据韦伯定律^[22]进行了调整. 在本研究中,引入底数为 10 和比例常数 10 后,得到方程:

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

其中 S 是人类的感觉强度. U 是电压刺激强度, $U_{\text{阈值}}$ 是电压的绝对阈值,代表人手感知的触觉振动幅度的绝对阈值(本研究测得为 0.001 V). 因此 iPhone 14 Pro Max 闹钟时钟滚轮这个场景感知幅度为 21.82 dB SL. 以键盘打字场景为例,表 2 展示了 4 部智能手机测得的 3 个振动参数.

表 2 键盘打字场景 4 部智能手机实际物理参数

手机	频率(Hz)	幅度(dB SL)	持续时间(s)
1	215	26.02	0.0140
2	270	23.80	0.0104
3	292	28.81	0.0068
4	160	28.67	0.0125

本阶段共收集 90 组数据,计算方式为:(6 个场景 × 4 部智能手机 + 2 个场景 × 3 部智能手机) × 3 个物理参数(幅度、频率、持续时间).

2.2 感知数据采集

2.3.1 形容词选择与配对

为了找到可以描述智能手机中触觉反馈和用户感知的相关形容词,我们进行了大量的相关论文研究与用户调研,同时考虑到智能手机中使用的刚性材料的特性和日常振动反馈,我们排除了与柔韧材料明显相关的术语,例如胶状的、肉质的^[23]. 我们选择了松弛的、舒缓的、紧张的、强烈的^[23]、弹性的^[23-24]、密集的^[7,23-24]、稀疏的^[7]、稳定的^[25]、温和的^[7,19,23], 平滑的^[7,16,19,23,25], 此外,引入了与移动设备触觉反馈相关的隐喻术语,例如点状

的和面状的。为了更好的用户理解和更正确的均衡, 我们还选择了反义词进行配对^[25], 最终选择了与单波形振动相关的 13 对描述性形容词, 包括“温和的-剧烈的”, “稳定的-弹性的”等词, 如图 5 左上图所示。

2.3.2 实验

被试. 为确保 8 个场景均有 12 名被试, 共计 96 人次实验, 本研究最终招募 29 名被试(16 名女性, 13 名男性), 年龄从 19 至 41 岁($M = 25.79$, $SD = 5.58$)。所有被试均为右利手, 身心健康, 触觉感知正常, 并自愿参与测试, 签署知情同意书。实验结束后, 所有参与者根据测试时长获得相应金钱补偿。

流程. 实验开始前, 参与者填写人口统计信息, 并听取实验介绍。为确保被试保持专注并维持触觉敏感性, 每人测试时长上限为 1.5 小时。由于个体体验时间不同, 每名被试完成 2 至 4 个测试场景, 最终用户平均完成 3.31 个($SD = 0.81$), 总测试时长约 2160 分钟, 共计 36 小时。

每名用户的正式实验包括以下过程:

- (1) **实验介绍(约 10 分钟):** 主试讲解实验背景、流程及需体验的场景, 并确保被试理解任务要求。
- (2) **振动体验与打分(约 80 分钟):** 用户先整体感受四部智能手机在该场景下的振动反馈, 形成初步印象。接着逐一体验每部手机的振动效果, 并对“温和的-剧烈的”“离散的-集中的”“稳定的-弹性的”等 13 组形容词与整体感知幅度进行 1-7 级李克特量表打分, 直至完成该场景所有形容词的评分。最后针对该场景, 给出 13 组形容词及整体感知幅度的理想效果打分。

由远及近的	↔	由近及远的
渐弱的	↔	渐强的
温和的	↔	剧烈的
离散的	↔	集中的
轻缓的	↔	急促的
和缓的	↔	强劲的
舒缓的	↔	紧张的
面状的	↔	点状的
稳定的	↔	弹性的
稀疏的	↔	密集的
松弛的	↔	紧实的
圆润的	↔	锋利的
平滑的	↔	纹理的

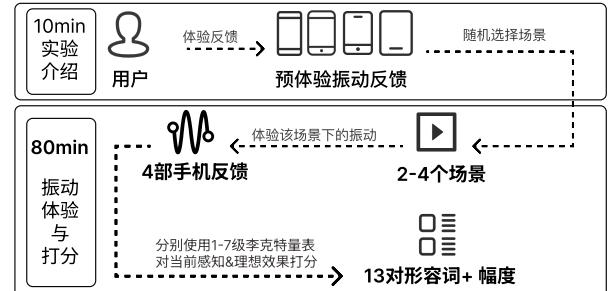


图 5 实验流程与细节

2.3.3 感知数据结果

本研究共选取 8 个测试场景, 其中 6 个场景在 4 部智能手机上均提供触觉反馈, 另有 2 个场景(拨号盘数字按键和侧滑返回上一级)仅在除 iPhone 14 Pro Max 之外的 3 部设备上具备振动反馈。每个场景由 12 名参与者完成测试, 最终数据集由 360 条数据组成, 计算方式为(6 个场景 \times 4 部手机 + 2 个场景 \times 3 部手机) \times 12 名参与者。如表 3 所示, 展示了一位用户在键盘打字场景中的全部评分。

表 3 键盘打字场景用户 X 的感知打分与理想值

手机	13 组形容词	感知幅度
1	5 3 2 4 3 3 4 4 5 4 3 3 3	4
2	3 3 2 6 5 4 3 6 6 4 3 4 4	3
3	2 5 3 5 5 4 3 5 5 3 2 3 3	3
4	3 5 4 4 5 5 5 3 5 5 5 3 5	5
理想值	4 3 3 5 3 3 3 4 4 4 3 3	3

注: 13 组形容词顺序如图 5 左上信息所示。

3 数据计算与振动优化

3.1 数据清洗

为减少用户打分的极端值影响, 本文采用 Z-score 方法^[26]进行异常值剔除。具体操作为计算每

组形容词评分的 Z-score，并删除绝对值大于 2 的数据点，即满足 $Z - score > 2$ 或 $Z - score < -2$ 的分数。

$$Z = \frac{(X - \mu)}{\sigma}$$

其中 X 是单个数据点的值， μ 是该数据集的均值， σ 是该数据集的标准差。

3.2 理想振动波形参数计算

现以键盘打字场景为例，详细阐述物理参数计算过程。

(1) 计算理想振动反馈对应的振幅

首先基于 4 部设备的物理幅度和用户评分，构建幅度相关的线性拟合模型。如图 6 所示，4 部设备的感知打分为纵轴 n ，实际感知幅度作为横轴 m ，拟合得到幅度的主客观的回归直线。随后，根据用户的理想幅度打分 3.00，带入得到对应的物理感知幅度为 24.54 dB SL，进一步转换成可观测的电压峰峰值为 0.2841 V。

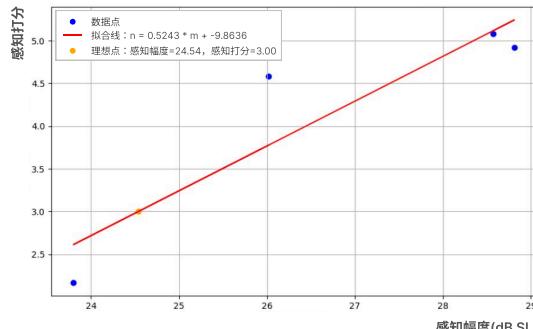


图 6 键盘打字场景感知打分与幅度的拟合直线

(2) 数据处理与均值计算

在数据清洗后，计算 13 组形容词对的平均打分。数据来自 4 部手机在该场景下的振动反馈，每组评分基于 12 名被试的主观评价，以确保结果的稳定性和代表性。

(3) 多元线性拟合

基于用户评分数据，建立振动物理参数与主观感知之间的映射关系。以 4 部设备的客观频率和振幅作为自变量，用户评分均值作为因变量，进行多元线性回归分析，拟合得到 13 组形容词对对应的振动特性模型。拟合结果以平面形式呈现，如图 7 所示，每个平面代表一组形容词对在频率与振幅维度上的分布趋势。

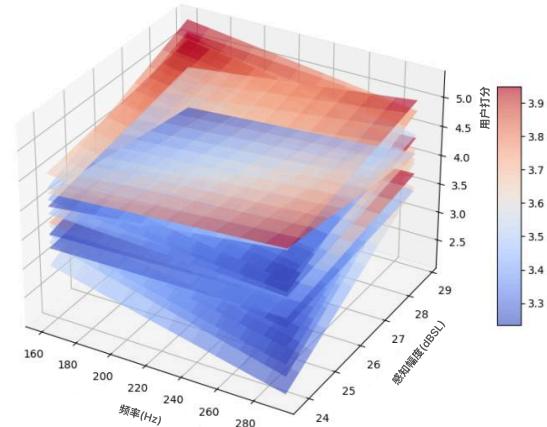


图 7 键盘打字场景 13 组形容词拟合平面

(4) 理想频率计算

首先，根据用户对 13 组形容词的理想评分构建目标平面，并与 13 个拟合平面相交，得到 13 条频率与幅度的交线。交线上的点代表满足理想效果的振动参数。随后，通过数据分析筛选出与该场景相关性较高的词语，最终保留图 8 中 9 条交线。

接着，将步骤 (1) 中计算得到的物理感知幅度 24.53 dB SL 设为 $y = 24.53$ 这条直线，在频率范围内寻找其在所有保留交线上欧式距离之和最小的点。最终计算得出最优解 $x = 255.3515\text{Hz}$ ，对应的红色圆点如图 8 所示，该横坐标即为理想振动效果的频率参数。

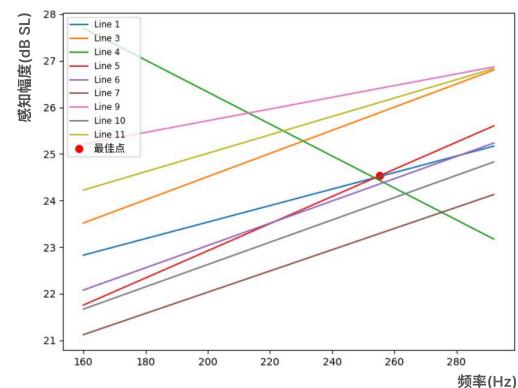


图 8 键盘打字场景频率最佳点

(5) 理想持续时间计算

计算过程与步骤 (2)、(3)、(4) 相同，仅需将频率相关数值替换为持续时间的对应值。最终计算得到理想持续时间为 0.0113s，所有保留直线与最佳点如图 9 所示。根据公式 周期 $T = \text{频率} \times$

持续时间, 计算得出理想振动周期为 2.885.

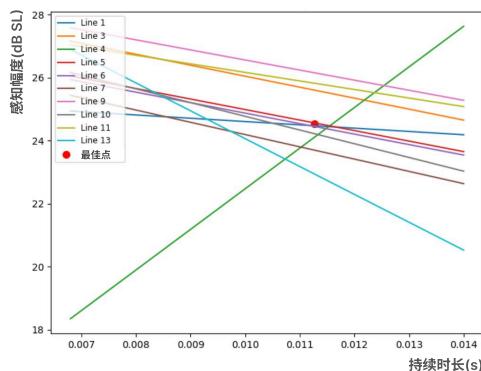


图 9 键盘打字场景持续时间最佳点

采用该方法, 最终计算得到 8 个场景的振动频率、幅度和持续时间 3 个物理参数的优化数值.

4 结果与讨论

优化后的振动物理参数在数值调整上表现出合理性, 并在整体趋势上与不同交互场景的需求及用户预期相契合. 针对连续点按、滑动、多点振动、长按等不同类型的交互方式, 振动的频率、振幅和持续时间均经过针对性的优化, 以在触感清晰度、操作流畅性和反馈一致性之间取得平衡.

键盘打字作为用户日常使用中最为高频的振动交互场景, 其振动反馈需要兼顾操作流畅性与反馈可感知性, 在确保输入的精准性同时也要减少频繁操作带来的疲劳感. 横向实验中, 用户满意度最高的设备为 iPhone 14 Pro Max, 多数被试者认为其振动反馈“轻盈、灵动, 触感温和舒适”(P8, P11, P21). 优化后的振动反馈的参数相对 iPhone 14 Pro Max, 频率适度降低, 增强了振动的清脆感, 有效减少了长时间输入时的手部疲劳; 振幅有所提升, 解决了部分用户(P2, P13) 反馈的“振动太弱, 反馈不够明显”的问题, 同时避免了过强振动干扰输入节奏, 提升了操作的流畅性与舒适度; 持续时间基本保持稳定(仅增加 0.0009s), 确保了频繁快速点按操作与振动反馈的一致性. 优化后的振动参数更契合用户在连续点按场景下的实际需求, 使得反馈既清晰可感, 又不影响长时间操作的体验.

底部上滑进入最近任务是另一类对触觉反馈

匹配性要求较高的场景, 由手指的滑动操作完成, 用户手指与屏幕的接触时间较长, 因此振动反馈不仅要在时间上同步, 还需在触感上增强匹配度. 横向实验中, 用户普遍认为三星 Galaxy S23 Ultra 的振动反馈最佳, 描述其“振感不错, 滑动即时, 很有弹性, 且与手势匹配良好”(P1, P7, P13, P25). 优化后的参数中, 频率从 185Hz 降低至 84Hz, 增强了振动的弹性与厚重感, 使其更加契合滑动手势的物理触感; 振幅适度降低, 避免过强振动影响滑动的顺滑体验; 持续时间增加了 0.0086s, 确保振动覆盖整个滑动操作过程, 从而增强反馈的匹配感与一致性.

对于其他场景, 优化策略同样体现出对用户需求的针对性调整. 在闹钟时钟滚轮、联系人字母索引等涉及多点振动的滑动交互中, 优化后的振动参数强化了拟物感, 确保在不同刻度点位提供清晰的确认感, 同时保持原有的短促轻快感, 避免拖滞感影响操作流畅度. 在相册长按编辑、桌面 App 长按编辑等长时间点按触发的交互中, 优化后的振动反馈通过适度提升频率和振幅, 增强了操作的提示感, 同时确保触觉反馈稳定, 不影响用户操作节奏.

由于实验时间和成本的限制, 本研究仅选取四款智能手机进行测试, 可能无法覆盖更广泛的设备特性. 此外, 测试场景仅涉及八种常见交互方式, 未涵盖多波形或更复杂的应用场景. 未来研究可进一步扩展测试设备和交互场景范围, 并结合大规模用户实验, 优化个性化触觉反馈设计, 以提升方案的适用性和普遍性.

5 结语

本研究针对智能手机触觉反馈日常场景, 提出了一种基于振动-语义特征的振动波形设计优化方法. 通过采集振动数据, 提取频率、振幅和持续时间等物理参数, 并结合用户感知实验, 计算得到新的振动参数. 优化方案在多个交互场景中提升了振动反馈的舒适性和一致性, 使触觉反馈更符

合用户预期，同时也增强了操作的清晰度和匹配度。

参考文献(References):

- [1] 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. Springer International Publishing, 2019: 397-406
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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. Springer Singapore, 2018: 350-359
- [5] Yoshida K T, Kiernan J X, Adenekan R A G, et al. Cognitive and physical activities impair perception of smartphone vibrations[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2023, 16(4): 672-679
- [6] 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
- [7] Hwang I, Choi S. Perceptual space and adjective rating of sinusoidal vibrations perceived via mobile device[C]//2010 IEEE Haptics Symposium. IEEE, 2010: 1-8
- [8] Ju Y, Zheng D, Hynds 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
- [9] YIN Xinyu, SU Yuning, SUN Xiaoying. Encoding and Characterizing Method of Vibrotactile Signal for Information of Mobile Terminals[J]. Journal of Jilin University Science Edition, 2022, 60(3): 705-712(in Chinese)
(尹馨予, 苏宇宁, 孙晓颖. 移动终端信息的振动式触觉信号编码表征方法[J]. 吉林大学学报 (理学版), 2022, 60(3): 705-712)
- [10] Chu Shaowei. Understanding the Perception of Vibrations and Designing Tactile Reading on Smartphones[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(6): 1046-1052(in Chinese)
(褚少微. 振动触觉的量化感知与触觉文字编码设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(6): 1046-1052)
- [11] Vicentini M, Botturi D. Perceptual issues improve haptic systems performance[J]. Advances in haptics, 2010: 415-438
- [12] Kording K P, Ku S, Wolpert D M. Bayesian integration in force estimation[J]. Journal of neurophysiology, 2004, 92(5): 3161-3165
- [13] Hwang I, Seo J, Kim M, et al. Vibrotactile perceived intensity for mobile devices as a function of direction, amplitude, and frequency[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2013, 6(3): 352-362
- [14] Shao Zhiyu. Research on Objective Evaluation Methods for Realistic Force-Haptic Rendering Based on Perception Mechanism [D]. Southeast University, 2021(in Chinese)
(邵知宇. 基于感知机制的力触觉再现真实感客观评估方法研究[D]. 东南大学, 2021)
- [15] Jones L A, Tan H Z. Application of psychophysical techniques to haptic research[J]. IEEE transactions on haptics, 2012, 6(3): 268-284
- [16] Nie Xinmiao. Research and Practice of Vibration Design Tools for Mobile Interaction Scenarios [D]. Hunan University, 2023(in Chinese)
(聂新苗. 面向手机交互场景的振动设计工具研究与实践[D]. 湖南大学, 2023)
- [17] Meng Qianyu. Study on Tactile Perception Adjectives in Modern Chinese [D]. Northeast Normal University, 2023(in Chinese)
(孟倩羽. 现代汉语触觉感知形容词研究[D]. 东北师范大学, 2023)
- [18] Hwang J, Hwang W. Vibration perception and excitatory direction for haptic devices[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011, 22: 17-27
- [19] 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
- [20] Liu Ning. Research on Evaluation Methods for the Realism of Haptic Feedback in Electronic Pen Writing [D]. Jilin University, 2024(in Chinese)
(刘宁. 电子笔书写的触觉反馈拟真度评测方法研究[D]. 吉林大学, 2024)
- [21] Brigham E O. The fast Fourier transform and its applications[M]. Prentice-Hall, Inc., 1988
- [22] Ekman G Ö S. Weber's law and related functions[J]. The Journal of Psychology, 1959, 47(2): 343-352
- [23] Guest S, Dessirier J M, Mehrabyan A, et al. The development and validation of sensory and emotional scales of touch perception[J]. Attention, Perception, & Psychophysics, 2011, 73: 531-550
- [24] Nalini Bhushan, A Ravishankar Rao, and Gerald L Lohse. 1997. The texture lexicon: Understanding the categorization of visual texture terms and their relationship to texture images. Cognitive science 21, 2 (1997), 219–246
- [25] Shiraga S, Kinoshita Y, Go K. Designing smartphone feedback based on vibration impression[C]//Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. 2016: 3190-3196
- [26] Altman E I, Iwanicz-Drozdowska M, Laitinen E K, et al. Financial distress prediction in an international context: A review and empirical analysis of Altman's Z-score model[J]. Journal of international financial management & accounting, 2017, 28(2): 131-171

作者姓名	邮箱	联系方式	备注
张睿	ruihang@tsinghua.edu.cn gloriezhang777@gmail.com	17610275197	论文修改者 QQ: 1085322586
李亦萱	liyixuan2021@bjfu.edu.cn	17825470707	
焦阳	jiaoyang7@tsinghua.edu.cn	18001261425	论文通信作者