



深圳技术大学

SHENZHEN TECHNOLOGY UNIVERSITY

本科毕业论文（设计）

题目：面向数字游民工作生活平衡的
具身交互系统设计

姓 名：吴嘉俊

学 院：未来技术学院

专 业：工业设计

学 号：202200601075

指导教师：王军锋

职 称：副教授

提交日期：2026 年 4 月 28 日

深圳技术大学本科毕业论文（设计）诚信声明

本人郑重声明：所呈交的毕业论文（设计），题目《面向数字游民工作生活平衡的具身交互系统设计》是本人在指导教师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。除此之外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。本人完全意识到本声明的法律结果。

毕业论文（设计）作者签名：

日期：2026年4月28日

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	II
1 绪论	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 数字游民作为问题切片.....	2
1.3 现有工具的局限.....	2
1.4 研究问题与目标.....	4
1.5 研究方法与论文结构.....	4
2 相关工作.....	6
2.1 具身交互与平静技术.....	6
2.2 生理计算与状态感知.....	7
2.3 打断管理、JITAI 与轻量干预.....	8
2.4 环境式反馈、社会可接受性与表达性运动.....	9
2.5 本章小结.....	9
3 设计立场与系统架构	10
3.1 前期探索：从数字公民与手部切入口到腕带感知.....	10
3.2 五条设计立场	12
3.3 三个核心命题	13
3.4 系统架构.....	13
3.4.1 总览.....	14
3.4.2 感知层.....	14

3.4.3	融合与判断层	15
3.4.4	跨端 harness 层.....	15
3.4.5	具身消费者运行时.....	16
3.4.6	关系记忆层.....	17
3.5	本章小结.....	17
4	设计产出、工程实现与具身输出	18
4.1	硬件接入与 EMG 管线	19
4.2	FocuX iOS 应用与产品化.....	20
4.3	focux.me 轻量网站与视觉接入.....	21
4.4	LeLamp runtime 与 harness 协议	22
4.5	数据飞轮与会话复盘	24
4.6	分级干预与具身输出	25
4.6.1	分级干预的内部结构	26
4.6.2	输出通道的差异化使用	26
4.6.3	LeLamp 的两套输出哲学.....	27
4.6.4	从单次提醒到关系连续	28
4.7	本章小结.....	28
5	实验验证与结果分析	29
5.1	评估方法的选择与边界.....	29
5.2	过程效率指标的变化	30
5.3	视觉警觉性与状态轨迹.....	31
5.4	风险结构的迁移.....	32

5.5 设计探针补充材料的角色	33
5.6 当前结论的边界与下一步迭代方向	35
5.7 本章小结.....	35
6 结论与展望	36
6.1 主要贡献与创新点	36
6.2 局限	36
6.3 未来工作.....	37
参考文献	37
致谢.....	41
附录 A 当前原型组成与产出清单	43
附录 B 论文图表清单	44
附录 C2026-04-27 评估补充材料目录	45

面向数字游民工作生活平衡的 具身交互系统设计

【摘要】 数字游民面临三类核心痛点：工作与生活边界模糊、缺乏稳定的外部节律参照、现有工具的提示方式过于生硬。针对这一问题，本文提出并实现了一套面向数字游民工作生活平衡的具身交互系统。系统构建了传感层（腕带 EMG/IMU + 网页摄像头视觉 + 主观标注）、中间处理层（多模态融合与状态帧生成）与执行层（LeLamp 具身输出 + App 反馈）三层架构，通过 harness 协议将状态生产与具身执行解耦，实现了 silent log—light nudge—escalation 三级渐进式干预。原型包括完成 BLE 协议逆向的腕带、FocuX iOS 应用、focux.me 轻量网站及 LeLamp 运行时。在 2026 年 4 月的一次场景化配对实验中，辅助条件较控制条件将总完成时长缩短 17.05%、PERCLOS 均值下降 34.25%，且错误从分散试错收敛至末段单一核验字段，表明系统有助于用户更快进入有效工作路径并降低状态波动。

【关键词】 数字游民；工作生活平衡；具身交互；分级干预；跨端 harness

Embodied Interactive System Design for Work-Life Balance Support Among Digital Nomads

【Abstract】 Digital nomads face three core challenges: blurred work–life boundaries, lack of stable external rhythm cues, and intrusive intervention methods in existing tools. This thesis presents an embodied interactive system for work–life balance support. The system adopts a three-layer architecture—sensing (wristband EMG/IMU + webcam vision + subjective labels), processing (multimodal fusion and state-frame generation), and execution (LeLamp embodied output + App feedback)—with a harness protocol decoupling state production from embodied execution, enabling three-tier progressive intervention: `silent log`, `light nudge`, and `escalation`. The prototype includes a reverse-engineered wristband, the FocuX iOS app, the focux.me lightweight website, and the LeLamp runtime. In a paired situated study (April 2026), the assisted condition reduced total completion time by 17.05%, decreased mean PERCLOS by 34.25%, and compressed errors from diffuse trial-and-error into a single end-stage verification field, indicating that the system helps users enter an effective work path earlier while reducing state fluctuation.

【Key words】 digital nomads; work-life balance; embodied interaction; graded intervention; cross-device harness

1 绪论

1.1 研究背景

数字游民在日常工作中面临三类核心痛点。第一，工作与生活边界模糊：工作空间、生活空间高度重叠，没有通勤、打卡或下班节点作为明确的时间切分，休息需要依靠高度自觉才能发生。第二，缺乏稳定的外部节律参照：没有同事敲门、没有会议结束的群体信号、也没有办公环境中的空间变化提示，状态变化常常在无声中累积。第三，现有工具的提示方式过于生硬：任务管理工具关注计划而后回顾、健康设备聚焦事后统计、弹窗提醒则倾向于在异常出现时立即打断，三类工具均未正面回答“此刻的状态适不适合继续工作”。这三重痛点相互叠加，使得工作生活平衡从时间管理问题变成了一个需要在持续工作过程中实时感知、判断与调节的交互问题。

一台电脑、一副耳机和稳定网络，已经足以把一段完整工作带到咖啡馆、共享办公空间、机场或酒店房间里。知识工作脱离了固定办公室，这件事看起来像是自由度的增加；真正麻烦的部分在后面。原本由通勤、工位、同事和下班铃声共同撑住的边界，开始被压到个人身上。Mazmanian 等人将这种局面概括为“自主悖论”，即技术在赋予知识工作者灵活性的同时，也强化了持续在线与持续响应的压力^[1]。

数字游民把这种矛盾放大了。Hannonen 与 Bozzi 都将数字游民理解为一种同时以流动性、数字连接与自主工作方式为特征的生活实践^[2-3]。在这一情境中，工作空间、生活空间与过渡空间经常重叠，休息不会自然到来，工作也不再被制度化节律清楚切开。Cook 提醒我们，所谓“自由”并不天然意味着轻松，更多时候反而意味着更强的自我管理负担^[4]；Rainoldi 等人指出，数字游民的工作与休闲常常发生在同一空间与同一身体状态里^[5]。所谓“平衡”，在这里不再是把工作时长等分成几块，而是一个不断被现场判断的问题：什么时候继续投入，什么时候被轻轻拉回，什么时候必须明确中断。

图 1-1 回到这篇论文真正面对的工作现场：咖啡馆、共享空间或临时桌面上，电脑、移动设备、环境噪声和个人节律挤在同一段时间里。问题不是“有没有工具可用”，而是工具能否在弱边界、强流动的工作片段里帮助用户看见自身状态，并以足够克制的方式介入。



图 1-1 数字游民在非固定办公空间中的工作状态

1.2 数字游民作为问题切片

数字游民之所以适合作为研究切片，是因为几类移动办公矛盾在他们身上很难被遮住。工作经常发生在公共或半公共空间，屏幕提醒会被旁人看见；状态变差时也未必有外部信号，没有同事敲门、会议结束或下班节点来替用户切分节奏。支持一旦太高调，可能比疲劳本身更早打断工作流。Howe 等人的研究也提示，干预类型与干预时机会影响用户体验与接受度，用户并不希望系统在任何异常出现时都立即高强度介入^[6]。

在这个场景里，系统要面对的问题被压得很具体：能不能在持续工作中看见状态变化；能不能等到合适时刻再反应；反应时能不能不破坏工作的连续性。后文所有设计选择，基本都绕不开这三件事。

1.3 现有工具的局限

围绕知识工作的数字工具并不少，但多数只抓住了问题链条的一段。任务管理与时间规划工具擅长拆目标、排日程、显示完成度，回答的是“今天要做什么”；健康监测与可穿戴设备记录睡眠、心率与活动量，回答的是“昨天身体如何”；提醒式应用或弹窗干预则在固定时段或阈值触发时告诉用户“该停下了”。真正夹在中间的问题反而被留下来了：此刻这个人还适不适合继续工作。

Morshed 等人面向远程信息工作者的被动感知研究，给了本文一个重要提醒：被动数据的价值不在于替代用户，而在于为时机判断和支持方式选择提供证据^[7]。换到设计上，系统至少要同时回答三个问题：看到了什么、何时出手、如何出手。数字游民的难处在于，第三个问题常常牵涉公共可见性。网页或应用当然有用，但屏幕并不总是最礼貌的输出端。

表 1-1 把这种差异放在一起比较。现有工具分别擅长计划、追踪、监测或提醒，问题在于它们通常停在局部环节。本文不打算把这些功能简单叠加，而是把”感知什么、如何判断、怎样输出”放回同一条设计链路里。

表 1-1 现有支持工具与本文系统关注重点的比较

工具类型	主要目标	典型输出方式	主要局限	与本文的关系
任务管理工具	规划任务与追踪完成度	日历、待办、进度条	难以判断用户当下是否适合继续工作	提供任务结构参考，但不是状态支持系统
健康监测设备	记录睡眠、活动与恢复	指标、评分、趋势图	以事后统计为主，缺少过程介入	提供可被借用的状态线索
弹窗式提醒工具	促使用户休息或切换状态	明确通知、弹窗	打断成本高、社交暴露强	提醒了输出问题，但过于单一
本文系统	支持数字游民动态调节工作节律	网页、应用、LeLamp、分级提示	仍处于研究原型阶段	关注输入、处理、输出的整体闭环

图 1-2 把 Apollo Neuro、Muse、Oura Ring、Pavlok 与 FocuX 放在一起，是为了说明现有市场已经分别验证了触觉安抚、专注训练、长期状态追踪和明确行为纠偏这些方向。它们的问题不在于没有价值，而在于很少把持续输入、跨端上下文与环境式输出接成一条完整链路。



图 1-2 现有商业化硬件与 FocuX 的市场参照

1.4 研究问题与目标

这项研究没有把目标停在“提升疲劳检测精度”上。更具体的目标是：为数字游民构建一套低打扰、可持续、且能解释自身判断的具身交互支持系统。围绕这一目标，论文处理四个子问题：

第一，在数字游民这一高自主、弱边界的工作情境中，系统应如何持续感知用户状态，而不过度侵入工作过程？第二，多模态输入信号应如何被组织为可解释的风险证据，使系统能够从“状态变化”推导到“是否值得介入”？第三，当系统决定介入时，应如何在 silent log、light nudge 与 escalation 之间做出分级选择，并把这一选择落到运行时的真实行为？第四，相较于单一屏幕输出，具身输出端如 LeLamp 是否能够提供一种更低打扰、更低暴露、但仍具有表达性的支持方式？

1.5 研究方法与论文结构

研究方法由文献分析、设计立场提炼、原型工程实践与场景化配对实验构成。整个推进过程带有明显的迭代特征，更接近产品在真实问题中不断改版的路径——网页、腕带、iOS 应用、focux.me 网站、FluxChi 后端、harness 协议、LeLamp runtime 与 session recap，是几轮迭代留下的不同答案。如图 1-3 所示，研究路径的起点是工作场景中的边界失稳问题，系统基于这一真实矛盾逐步构建，先做

出最小可运行版本，再在连续的使用矛盾中逐步长出状态感知、证据判断、跨端传递与具身输出。

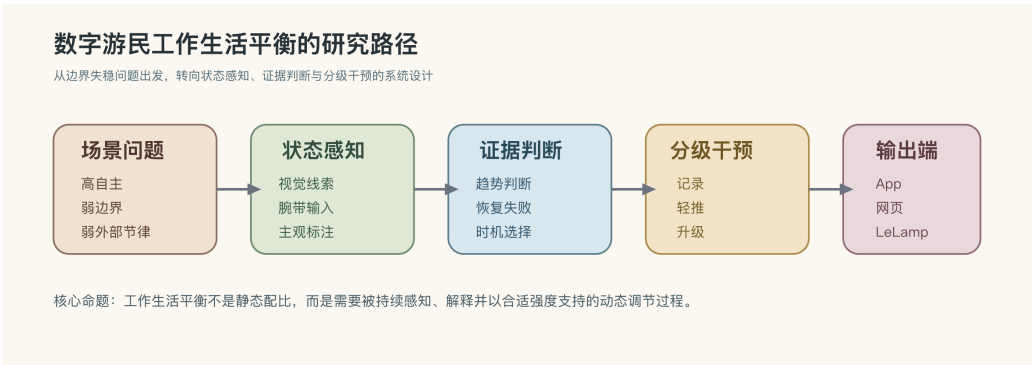


图 1-3 数字游民工作生活平衡的研究路径

全文按六章展开。第一章说明问题来源与研究目标。第二章为相关工作，分析现有工具局限并回顾具身交互、生理计算与打断管理等理论线索。第三章把设计立场、核心命题与五层系统架构放在一起，避免把”为什么这样设计”和”系统如何组织”拆成两段互不相连的叙述。第四章整合设计产出、工程实现与具身输出策略，集中呈现硬件与 EMG 管线、iOS 应用与 App Store 化、focux.me 网站、harness 协议、LeLamp runtime、数据飞轮以及分级干预机制。第五章报告实验验证与结果分析。第六章总结贡献、局限与未来工作。

2 相关工作

第一章说明问题从哪里来。第二章转向设计依据：为什么这套系统不应只做成一个屏幕提醒工具？为回答这个问题，本章选取五条彼此交叉的 HCI 研究线索：具身交互强调身体与情境中的行动，平静技术强调从边缘进入中心的低打扰信息组织，生理计算把身体状态视为交互资源，打断管理处理介入时机与强度，环境式反馈与表达性运动则为 LeLamp 这样的具身输出提供形式上的支持。

图 2-1 将这些理论线索压缩成一张关系图：左侧是理论来源，中间是本文的状态支持链路，右侧是它们在系统中的对应约束。后文的腕带输入、证据判断、分级干预和 LeLamp 输出，都从这几条约束中展开。



图 2-1 理论基础与系统设计约束的关系

2.1 具身交互与平静技术

Dourish 在《Where the Action Is》中指出，交互并不只是发生在抽象的信息界面上，而是始终嵌入身体、空间、社会实践与具体行动之中^[8]。这一观点对本文有两个直接启发：其一，工作生活平衡不是仅靠面板、数字或统计就能解决的问题，它与人的姿态、动作、节律、注意力和环境关系密切相关；其二，如果问题本身发生在身体与情境之中，那么支持它的系统也不应仅停留在屏幕之内，而应进入更贴近身体与空间的交互层。

与具身交互呼应，Weiser 与 Brown 提出的”平静技术”强调，好的技术不应持

续争夺注意力，而应在需要时从边缘进入中心，在不需要时退回背景^[9]。Wisneski 等人关于环境显示的研究提示，空间本身可以成为信息呈现的界面^[10]。对数字游民而言，这一思想尤其重要：他们并不缺少被打断的理由，缺的是一种既不过度暴露、也过度喧哗的支持方式。本文在总体设计上不追求一个更会说话的提醒界面，而是希望构建一个能在身体、空间与界面之间分配信息强度的系统。

图 2-2 展示 LeLamp 官方项目页面，用来交代本文具身输出端的硬件来源。本文后续讨论的 LeLamp 不是重新发明灯体外观，而是把该开源灯体接入 FocuX 的状态判断、分级干预与环境式反馈链路。

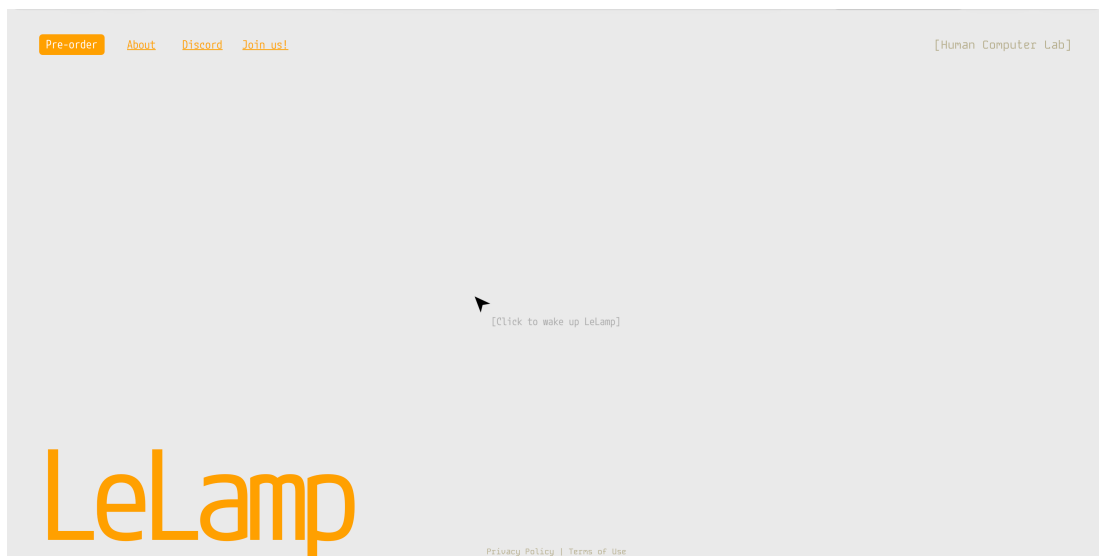


图 2-2 Human Computer Lab 的 LeLamp 官方项目页面

本文使用的灯体形态并不是从零开始设计的外观概念，而是借用了 Human Computer Lab 开源 LeLamp 项目的硬件与运动表达思路。将这一来源明确写出，比把灯写成自己的完整硬件发明更准确：本文真正完成的工作，是把 LeLamp 作为具身输出端接入 FocuX 的状态判断链路，使其从独立的表达性机器人灯转化为可以消费 SubjectStateFrame 的环境式反馈节点。LeLamp 官方网站与开源仓库也说明了该项目的定位，即一个由 Human Computer Lab 推出的、基于 Apple ELEGNT 研究启发的开源机器人灯项目^[11-12]。

2.2 生理计算与状态感知

生理计算研究将人的生理与行为状态纳入交互回路，关注系统如何依据这些状态进行适配。Fairclough 指出，生理信号并不等于心理真相，任何状态推断都

带有概率性与情境性，设计者必须谨慎处理”可测量”与”可解释”之间的差异^[13]。Fairclough 与 Gilleade 提出，真正有意义的生理计算交互不在于读取更多数据，而在于这些数据是否能被组织为对用户有意义的反馈与支持^[14]。在更贴近工作场景的研究中，Morshed 等人针对远程信息工作者的被动感知研究表明，多源行为数据有可能帮助系统理解工作中的压力状态，但用户接受这种支持的前提是系统提供的是有边界、可理解、与工作实践相容的帮助，而非不透明的监控^[7]。Abe 等人对 PERCLOS 在驾驶疲劳监测中的应用研究也提示，视觉警觉性指标在短时窗口内可以构成稳定的状态参考^[15]。

这些研究共同约束了本文的判断逻辑：无论是腕带 EMG 还是摄像头中的眨眼、哈欠和头姿，都不应被写成确定性的诊断结论，而应被视作支持系统做出干预判断的证据。

2.3 打断管理、JITAI 与轻量干预

如果说状态感知回答的是”系统知道了什么”，打断管理研究回答的则是”系统何时、为何应该出手”。Arroyo 与 Selker 指出，任务目标与注意状态会共同影响打断的代价，系统不能只根据事件出现与否决定是否打断^[16-17]。Iqbal 等人在认知任务中验证了打断时机选择对中断恢复成本的影响^[18]。

JITAI 研究为”在合适时刻提供合适支持”提供了更结构化的框架。Nahum-Shani 等人提出，动态支持系统需要同时考虑决策时点、个体化变量、干预选项与时机选择^[19]。Johnson 等人面向日常压力响应的自适应干预研究说明，真正具备干预价值的通常是持续恶化、恢复失败与压力堆积的动态过程，超越了单一的瞬时异常^[20]。Chen 等人在会议情境中比较主动与被动目标反思后发现，较为被动、较少夺取中心注意力的支持方式往往更能保留工作流的连续性^[21]。Tankelevitch 等人通过大规模现场实验发现，轻量反思式提示在不明显破坏当前活动的前提下也可能改变用户行为^[22]。

这些工作共同构成了本文 silent log-light nudge-escalation 三级结构的理论基础。

2.4 环境式反馈、社会可接受性与表达性运动

环境式反馈研究提醒我们,支持系统不一定要通过语言、弹窗或显性数值表达自身判断。Chua 等人关于工作场景环境式生物反馈的研究指出, ambient biofeedback 的价值在于帮助用户更早觉察自身状态变化,以便在状态恶化之前恢复对自身节律的感知^[23]。Costanza 等人的 eye-q 研究展示了细微、私密提示在不强行争夺环境注意力的前提下仍可有效传递信息^[24]; Devendorf 等人则指出,人们对“把技术穿在身上并持续展示出来”具有明显犹豫,在很多情况下显性显示反而可能增加用户的社交压力^[25]; Kelly 等人对可穿戴显示社会可接受性的研究提供了可借鉴的评估维度^[26]。

在这种背景下, LeLamp 作为具身输出端并不是一个装饰性硬件,也不是本文声称原创的灯体形态。Hu 等人在 Apple ELEGNT 项目中的研究提供了一种参考:即便是非拟人的灯具式装置,也能够通过运动表达意图、状态与功能逻辑^[27]; Huang 等人关于 EMOTION 的研究也说明,表达性运动并非只有拟人机器人才能承担,节奏、方向、停顿与幅度都可以成为具有语义潜力的设计材料^[28]。

2.5 本章小结

这一章并不是把几组理论名词并列摆放。它们最后收束到一条设计逻辑上:具身交互与平静技术解释了为什么状态支持不该只发生在屏幕上;生理计算提醒我,状态感知更适合被组织成交互资源,而不是诊断结果;打断管理与 JITAI 帮助我判断系统该在什么时机、用多大强度介入。环境式反馈、社会可接受性与表达性运动把 LeLamp 作为具身输出端的理由补上了。第三章会把这些启发压缩成本文自己的设计立场,并一并说明系统架构。

3 设计立场与系统架构

本章把设计立场、核心命题与系统架构放在一起说明。原因很直接：这套架构不是中性的技术堆叠，而是由”先记录再发声”、”证据先于打断”、”身体优先于屏幕”这些判断一步步推出来的。后面几章里的协议形态、输出策略与实验解释，都要回到这里才能看懂。

3.1 前期探索：从数字公民与手部切入口到腕带感知

项目一开始并没有直接落到”工作生活平衡支持系统”这个命题上。早期更像一组围绕数字公民、数字游民和工作状态展开的开放式探索：我先关心的是疲劳能否被识别，后来才意识到，更值得追问的是怎样选择一个不那么控制人的生理介入口。手和微动作之所以被放到前面，是因为它们离知识工作的真实过程很近。打字、停顿、握持、放松，长时间重复劳动留下的细小张力变化，往往先在手部和前臂附近显形。心率、步数或睡眠时长当然有价值，但它们更偏事后统计；手部线索离当下工作动作更近，也更容易转化为具身交互语言。

如图 3-1 所示，前期概念阶段曾以 FLUX 这一名称展开，将系统理解为一个面向数字游民的 gesture-driven rhythm companion。虽然这一版本在产品命名与表现形式上仍然偏概念化，但它已经提前确定了后来没有被放弃的三条方向：第一，输入端应当是贴身的、可连续佩戴的；第二，系统不只记录显性行为，而要读取 tension、微动作与节律漂移；第三，系统输出旨在以平静方式介入工作节律，而非下达强制指令。

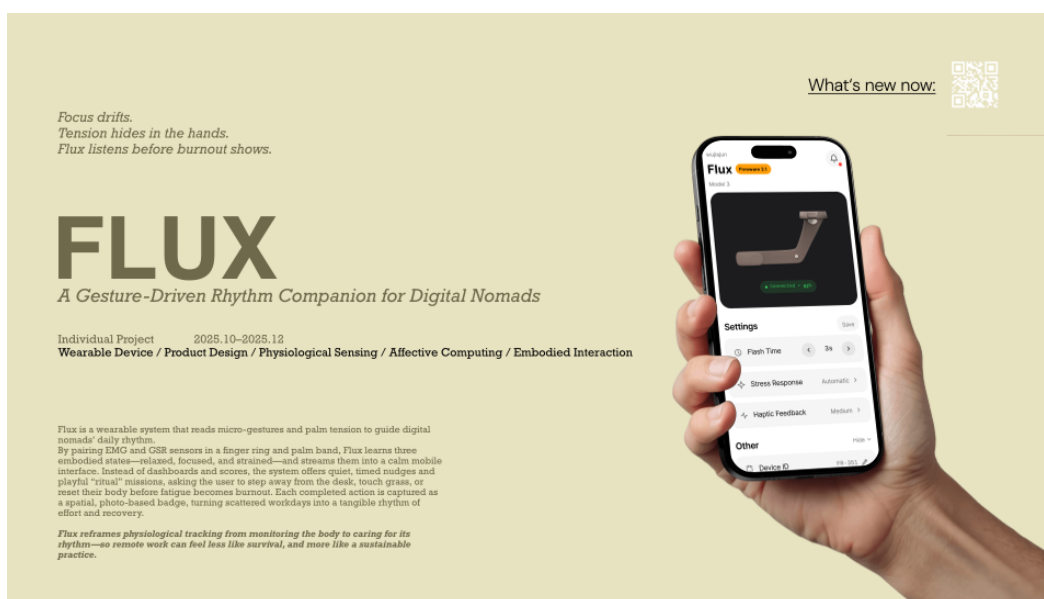


图 3-1 前期概念阶段的 FLUX 方案板，体现了“手部 tension + 可穿戴节律陪伴”的初始设想

原型推进后，一个问题很快暴露出来：如果只把”手势”当作可识别命令，这套系统会变得太像一次性交互。显式手势适合触发某个动作，却不适合长时间、低打扰地感知工作状态。真正值得被捕捉的，往往不是用户有没有做出一个清晰手势，而是手部和前臂在连续工作中的残余张力、动作模式稳定性，以及逐渐显现的疲劳漂移。几轮自制原型和贴身测试之后，项目的关注点从”手势识别”转向了”基于手部/前臂信号的连续状态感知”。

如图 3-2 所示，这个收敛过程是可以直接看到的：从布线外露、结构粗糙的初代感知原型，到上臂电极贴附测试，再到后续定型为更稳定、可日常佩戴的唯理手环，输入端慢慢从开放式身体探索收到了一个更适合长期运行的腕带形态。腕带最终确立为主输入节点，主要得益于其在真实场景中的适用性与长期佩戴的自然感：长期佩戴更自然，位置上也更靠近前臂肌群，能够较稳定地读取与持续工作相关的 tension 和模式变化；同时，它也能顺着 BLE、iOS 应用和跨端 harness 链路继续往下接。第四章中的腕带工程实现，正是基于前期试错逐步推演出的理性选择。

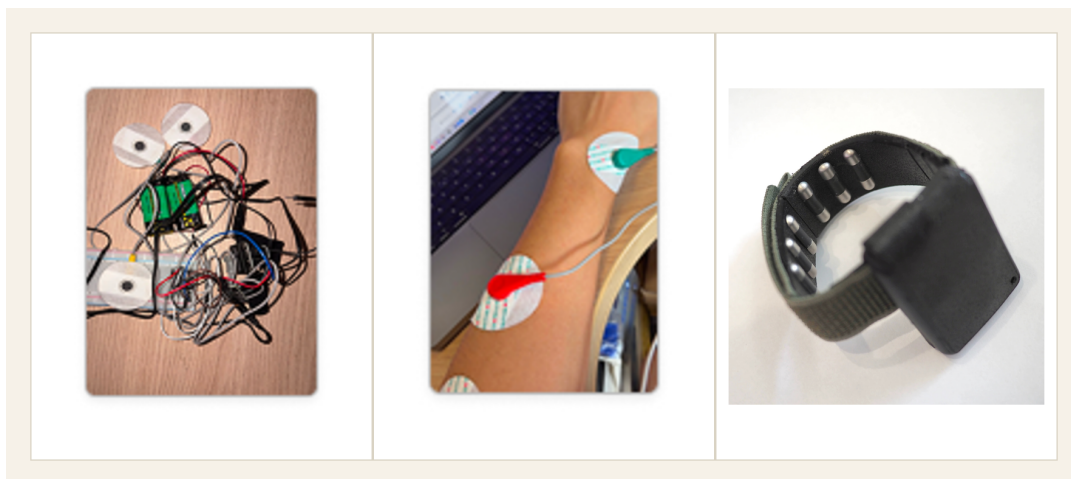


图 3-2 从初代感知原型、贴身电极测试到唯理手环，输入形态逐步从开放探索收敛为稳定腕带

3.2 五条设计立场

立场一：先记录，再发声。系统看到的第一个异常默认进入 `silent log`，不直接改变可见输出。知识工作里的状态波动本来就是常态，过早发声只会让用户更快学会忽略系统。第一时间要做的，不是“喊一声”，而是先把证据留下来。

立场二：证据先于打断。任何可见的系统输出均需依赖连续的跨模态证据链支撑。单点视觉异常、单条 EMG 突变都不足以触发提醒。这条立场让系统的可解释性不只是事后写文档，而是落在实时判断上。

立场三：分级出现。干预机制被设计为“沉默/轻推/升级”三档。强度选择本身就是设计内容，不该默认全开或默认全关。三档之间还需要有可观察的转换条件——持续时长、累计证据数、全局介入预算余量、`recovered` 闭环——而非依赖缺乏严谨证据支撑的模糊触发机制。

立场四：身体优先于屏幕。在数字游民常出现的公共或半公共场景中，屏幕弹窗既容易打断工作，也容易让旁人看见用户被系统“管”了。本文倾向于把可被身体直接感知、却不公开传达内容的通道（光、姿态、节律、呼吸）作为优先输出形态，把屏幕保留为高置信、高代价时刻的最后通道。

立场五：关系胜过单次提醒。系统的价值并不取决于某次提醒“对不对”，而取决于多次提醒之后，用户和系统之间的关系是不是更可用。顺着这个立场，系统就必须有能力把一次会话里的状态、判断、提示和反馈结构化留下来，再用语言或视

觉的形式让用户事后看懂“为什么是那一刻、为什么是那一档”。session summary 与 companion recap 共同构成了完整的关系交互闭环。

3.3 三个核心命题

命题一：工作生活平衡是过程问题，不是分配问题。困难不在于一天工作多少小时，而在于一段连续工作过程中能不能被恰到好处地拉一拉。只在事后做评分的系统，很难进入这个问题的现场。

命题二：介入应当被视为复合设计决策，超越单一阈值触发。“什么时候发声、用什么通道、用多大强度”全都是设计选择，不应被简化为某一条阈值是否被穿过。这决定了第四章后半部分的 light nudge 与 escalation 遵循两套本质不同的输出哲学，独立于同一动作的单纯量级变化。

命题三：跨端 harness 是这套系统能成立的前提。状态判断如果停留在生产它的那台设备里，腕带、网页、应用、灯就会各说各话，“具身输出”也无从谈起。harness 把状态生产与具身执行解耦，让 LeLamp 从“被远程触发的外设”变成“持续消费状态帧的运行时”。该架构判断在系统第三轮迭代中即被确立为核心推进前提。

3.4 系统架构

本章给出当前系统的总体架构。与第三章的设计立场相对应，架构层级被组织成五层：感知层、融合与判断层、跨端 harness 层、具身消费者运行时层与关系记忆层。各层均确立了清晰的输入输出契约。如图 4-1 所示，这五层在当前原型中已经全部落地，并通过 harness 协议串成一条贯通的链路。

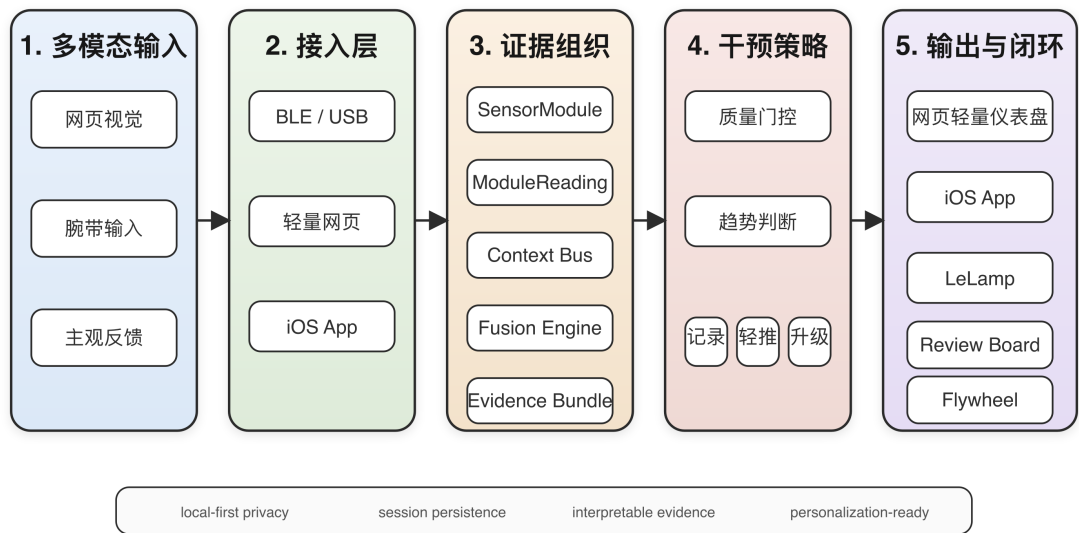


图 3-3 五层系统架构与跨端协同示意

3.4.1 总览

系统的输入端包括腕带硬件、移动应用与轻量化网页摄像头三类来源。输入数据进入感知层后，经由统一接口 `SensorModule` 被封装成带时间戳、模态标签与质量度量的 `ModuleReading`。融合与判断层订阅 `Context Bus` 上的读数流，由 `Fusion Engine` 把多模态证据组织为 `EvidenceBundle`，再压缩成表征“是否值得介入”的状态结论。`harness` 层把这一结论以 `SubjectStateFrame` 的形式持续广播。`LeLamp runtime` 作为具身消费者订阅该广播，再结合本地语音门控、过期帧丢弃、节流去抖与全局介入预算，决定是否输出以及采用何种输出方式。所有过程数据由记忆层周期性快照，并与主观标签一起汇总成 `session summary` 和 `companion recap`。

3.4.2 感知层

感知层的设计目标是让多模态信号在尽量低耦合的前提下进入系统。本文为此抽象了 `SensorModule` 接口：每一个模态实现自己的连接、采样、质量评估与异常恢复逻辑，但对外只暴露 `ModuleReading{timestamp, modality, quality, payload, source_id}` 这样一个统一对象。这一设计的直接好处是，腕带可以从 USB 切换到 BLE 而不影响下游处理，网页摄像头可以从笔记本切换到外接 USB 摄像头而不影响 `Fusion Engine`，未来加入 PPG、皮电或环境麦克风也只需要新增一个 `SensorModule`，不需要修改判断逻辑。

在当前原型中，已经接入的模态包括：腕带的 8 通道 EMG（连续采样，由前

端时间窗滑动派生 84 维特征)、IMU 加速度、网页摄像头的视觉指标 (眨眼、哈欠、头姿、PERCLOS、alertness level)、应用内主观标注 (“我很累/我很清醒” 等显式按钮事件)、以及任务时间结构 (连续工作窗口、最近一次休息距今时长)。这些模态的可信度并不一致, 但都通过 `quality` 字段把不确定性显式向后传递, 而不是默认所有信号同等可信。

3.4.3 融合与判断层

融合层的核心是 `Fusion Engine`。它不直接给出 “累/不累” 的二值结论, 而是先在 `Context Bus` 上聚合最近一段时间窗内的 `ModuleReading`, 再分别交给三类策略: 第一类是阈值规则 (如 PERCLOS 持续超过某线、连续工作时长超过某线); 第二类是 `StaminaEngine` 的三维状态模型, 将 EMG 流压缩成 `Pattern Consistency` (动作模式稳定性)、`Baseline Tension` (残余肌张力) 与 `Sustained Capacity` (基于 MDF 频域漂移的持续输出能力), 再合成为 0–100 的 `stamina` 值; 第三类是 ONNX 推理链路, 为后续替换为学习型分类或回归模型预留路径。三类策略的输出共同进入 `EvidenceBundle`, 再由调度策略决定是否进一步生成 `SubjectStateFrame`。

判断层在设计上始终遵守第三章 “证据先于打断” 的立场, 引入了两道防御机制。第一道是质量门控: 当任意模态的 `quality` 低于阈值时, 例如视觉信号出现 `face-not-found`, 或者 EMG 断流, 该失效模态在当前周期即被合理排除。第二道是模态降级: 当主模态不可用时, 系统会切到 `vision-only` 或 `wristband-only` 模式, 并在 `SubjectStateFrame` 里明确标出当前是一帧降级帧。这样的判断逻辑追求的并不是理想数据条件下的最优值, 而是让系统在真实、跨设备、又不太稳定的环境里尽量保持克制。

3.4.4 跨端 harness 层

跨端 `harness` 是当前系统里最关键、也最容易被误解的一层。如果没有它, 整个系统就会退回成一种很常见但也很脆弱的做法: 某个设备检测到一点异常, 再临时写一条脚本去驱动另一个设备动一下。这样的串接可以完成 demo, 却很难支撑一个真正面向长期使用的 AI Native 硬件。因为对 `LeLamp` 这类具身输出端来说, 具身消费者需要获取包含状态成因、干预约束以及历史记录的系统上下文信息, 不再只是接受简单命令的被动角色。`harness` 就是为这件事存在的。

从系统角色定义而言, harness 本质上是一个跨端上下文层。它把内部融合得到的 EvidenceBundle 翻译成一个更稳定、可共享的 SubjectStateFrame, 再通过 WebSocket 持续广播给外部具身消费者。这样一来, 腕带、网页、App 和 LeLamp 不再是彼此孤立的设备, 而是围绕同一份上下文协同工作。

从信息内容看, SubjectStateFrame 所传递的内容包含了三类具备上下文感知能力的运行时信息: 第一类是当前状态, 例如 stamina、risk_level 和各维度摘要; 第二类是状态为什么会这样, 例如 reason_codes 与模态质量摘要; 第三类是边界条件, 例如 debounce_hint、budget_remaining 与 session_id。这些字段的价值不在于技术名词本身, 而在于它让 LeLamp 可以基于上下文做本地判断, 由此摆脱单纯执行固定脚本的从属地位。

落到工程上, harness 的意义可以说得更直白一些。它先把“状态生产”和“具身执行”拆开, 让前端、后端和灯各自可以继续迭代; 再把“为什么现在要出现”公开出来, 让输出端有能力自己处理边界情况; 也给后续更多具身消费者留下统一接入口, 使系统未来能够从一盏灯扩展到更多环境化物件, 而不必重写整条链路。第四章会继续解释它在当前原型里的具体实现方式。

3.4.5 具身消费者运行时

LeLamp 在本文中不被理解为“接受命令并播放动画”的外设, 而是一个长期运行的具身消费者运行时。它会订阅 SubjectStateFrame、维护本地状态, 并与语音、运动和灯光通道协商使用权, 最后再在 motor-bus 上发出仲裁后的动作。

运行时主要由四组规则共同约束。第一是 stale frame drop——任何超过指定窗口（如 5 秒）的状态帧都被视为过期, 直接丢弃, 避免网络抖动后一连串补偿性动作。第二是 voice gate——当本地语音通道（包括语音回应或主动播报）正在发生时, 运动通道整体被门控, 避免“灯一边说一边动”的混乱。第三是 per-level debounce——light_nudge 与 escalation 各有自己的最短复发间隔, 避免同一档反复触发。第四是 global intervention budget——一个会话内可发出的可见介入次数有上限, 预算耗尽时即使收到 escalation 级状态帧, 也只产生 silent log 行为; 预算在 recovered 闭环（连续若干帧 risk 降回 silent）后才会被部分回填。motor-bus 仲裁机制保证同一时刻只有一组动作真正发生, 其它意图被排队或丢弃, 避免运动通道和呼吸通道同时争夺执行资格。

这一运行时的存在，是本章命题三所说”harness 让 LeLamp 从被动外设变成持续消费者”在工程上的具体落地。

3.4.6 关系记忆层

关系记忆层的设计目标，是把”实时介入”和”长期理解”接成同一条链路。当前实现包括三件事。第一，会话级周期性快照：每隔固定窗口，将各 SensorModule 的 ModuleReading、融合结果、告警与主观标签写入 session 记录。第二，session summary：会话结束时对当次过程做一次结构化总结，包括 stamina 曲线、关键告警事件、主观标签的对齐情况，以及提醒触发与 budget 使用情况。第三，companion recap：把多个 session summary 在更长时间尺度上拼接起来，形成一种以语言描述为主、可被下次 LeLamp 输出策略读取的”伴随式叙述”。flywheel 层只保留用于训练与解释的数值维度、质量值和标签，不默认保存原始视频或原始 EMG 波形，以同时满足训练可用与隐私克制两个目标。

3.5 本章小结

本章把早期概念探索、五条设计立场、三个核心命题与五层系统架构连在一起，说明 FocuX 不是单一提醒工具，而是一套围绕状态感知、证据判断、跨端传递和具身输出展开的支持系统。通过这一章，后续工程实现有了明确的设计边界：系统需要持续感知，但不能把用户推向持续被监控；系统可以介入，但必须把介入时机、强度和恢复成本同时纳入判断。

4 设计产出、工程实现与具身输出

本章是本文工作量最集中的一章。第三章已经给出系统架构，本章则把每一层背后已经完成的真实产出逐一落到硬件、应用、网站、跨端运行时、数据闭环和具身输出策略上。

如表 4-1 所示，当前已经完成的工程实现可以从五个维度展开。

表 4-1 当前系统已完成的关键工程实现一览

层级	已完成实现	对研究原型的意义
输入端	腕带 BLE 协议逆向； USB/BLE 双入口； EMG/IMU 连续采集； focux.me 网站摄像头视觉通道	建立真实、连续、可切换的数据来源
状态建模	8 通道 EMG 派生 84 维特征；StaminaEngine 三维状态模型；ONNX 推理链路	把原始信号转化为统一的 stamina 与状态维度
跨端协议	SensorModule / ModuleReading 标准接口； Context Bus；Fusion Engine；质量门控；模态降级；SubjectStateFrame 协议；WS 广播链路	状态生产与具身执行解耦，可跨端消费
具身运行时	LeLamp listener； stale-frame drop；voice gate；per-level debounce； global budget；motor-bus 仲裁；recovered 闭环	让具身输出具备本地决策与边界控制

层级	已完成实现	对研究原型的意义
产品化	iOS 原生 SwiftUI 应用； CoreBluetooth； SwiftData；Live Activity； 桌面组件；focux.me 网 站；session summary； companion recap；App Store 分发就绪	推到真实可用的多端产品 组合

4.1 硬件接入与 EMG 管线

腕带这一侧，是整个项目最早开始积累、也在最终结果呈现时往往易被简化的部分。其选型经历了完整的实证推演过程。如 §3.1 所示，我先做的是手势与微动作层面的探索，后来才逐步把前臂腕带收敛成主输入方案。真正把这件事做实，先卡在接入层。原始硬件没有面向第三方的 SDK，我只能从 BLE 通信抓包入手，对照固件返回包一点点归纳服务/特征 UUID 和帧格式，最后在不依赖原厂软件的前提下打通了 USB 直连与 BLE 无线两条入口。两套入口在上层共用同一个 SensorModule，下层再根据连接方式切换物理通道，这样实验室桌面场景和移动办公场景之间就不需要换一套逻辑。

这一工程路线与第一章的市场参照相接：现有产品已经分别证明了可穿戴状态支持、低打扰触觉反馈与明确行为纠偏的可用性；本文在硬件接入上的工作，是把前臂肌电持续输入、跨端 harness 和环境式输出接到同一条运行链路里。腕带对我重要，不只是因为它能采到信号，更因为它可以长期贴身佩戴，能在真实工作片段里稳定在线，让系统第一次拥有一个不只属于实验室的输入端。

接入打通之后，问题才转到信号本身。8 通道原始采样进入系统后会先做去噪与滑窗，再从三个角度提取特征：一类描述肌肉活跃强度，如 RMS 与波形长度；一类描述疲劳相关的频谱漂移，如 MNF 与 MDF；另一类描述多通道之间的协同性。最后形成的 84 维特征向量，既是 StaminaEngine 三维状态模型的输入，也是 ONNX 推理链路的输入。

再往下一层，我没有急着把 EMG 压成一个简单的“累/不累”标签，而是把

状态拆成三个相对独立的维度：Pattern Consistency 用来描述动作模式是否稳定，Baseline Tension 对应持续残余张力，Sustained Capacity 则借助 MDF 的频域漂移衡量持续输出能力。三维各自归一化后再合成为 0–100 的 stamina 值。此种多维拆解使得指标表征更加贴近真实的疲劳发生机制：同样是 stamina 60，可能来自模式不稳，也可能来自张力堆积，下游策略就可以给出不同响应。

4.2 FocuX iOS 应用与产品化

如果说网页是这套系统的最低门槛入口，FocuX iOS 应用就是它能成为”日常用得起来的产品”的关键载体。FocuX 是用 SwiftUI + CoreBluetooth + SwiftData 原生开发的 iOS 应用，承担了从腕带连接、状态查看、专注会话、历史复盘到反馈记录的完整流程。

FocuX 的产品形态由四张关键页面组成。如图 4-1 所示，从左到右依次为首页、专注页、历史页与反馈页：首页把续航值、三维指标和下一步动作压缩为一个统一入口；专注页用沉浸式单视图承接实时会话过程；历史页把 stamina 曲线、三维诊断与时间结构组织成复盘材料；反馈页把系统判断、统计摘要与主观感受重新接回同一条闭环。

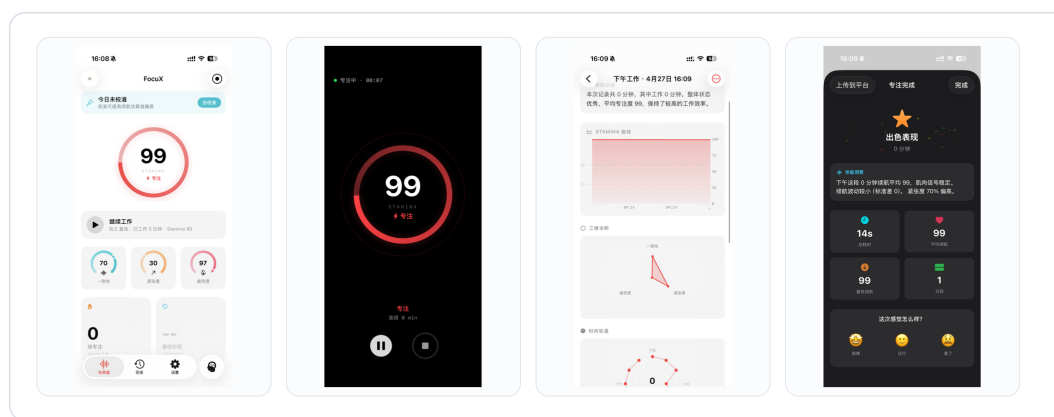


图 4-1 FocuX iOS 应用的四张关键页面

产品化也没有停留在 App 内部。FocuX 已经接入 Live Activity 与桌面组件（图 4-2），让状态从“必须打开 App 才能看到”变成“在锁屏与主屏幕的边缘随时被轻量唤起”。这一步表面上像 UI 扩展，实际改变的是产品边界：状态开始跨越单次会话，在更低打开成本的位置持续存在。



图 4-2 FocuX 桌面组件与 Live Activity 入口

应用之外，还有一块很花时间、但很容易被忽略的工作，是按 App Store Connect 的规范把产品化前置流程补齐：应用元数据、隐私清单、权限说明、支持页与隐私政策，以及 TestFlight 分发链路。将产品化合规流程纳入研究视野，是因为该过程迫使系统必须在工程层面重新审视数据权限与隐私边界：哪些数据可以离开本机，哪些必须留在本地，哪些权限真有必要，哪些已经接近过度收集。App Store 化在这里更像一次工程层面的体检，它把第三章提出的“先记录再发声”重新落到了产品边界上。截至目前，FocuX 已具备分发就绪状态，并以 focux.me 作为外部品牌入口与营销、解释层。

4.3 focux.me 轻量网站与视觉接入

focux.me 网站承担两重角色。其一，作为产品对外发布入口，承载项目介绍、TestFlight 申请引导、隐私政策与支持说明，是 App Store 之外面向公众的官方解释面。其二，作为系统的最低门槛输入端：网站本身集成了基于浏览器摄像头的视觉模块，访问者可以在不安装应用、不连接腕带的情况下立即看到一次最简版的状态 snapshot，包括眨眼频率、PERCLOS、头姿与 alertness level。

这一双重定位的意义在于，网站既是品牌资产，也是研究原型的一部分。它让”想了解这个项目”的人可以从”读一段说明”自然过渡到”自己跑一次”，而不必经过繁琐的安装步骤。同时，网站端与 App 端共用同一套 SensorModule 抽象

(视觉模块在前端用 TensorFlow.js / MediaPipe 实现), 保证了两端在进入 Context Bus 之后的处理路径一致。

如图 4-3 所示, 当前 focux.me 首页已经把产品介绍、核心能力说明和直接进入视觉体验的入口组织在同一个页面中。这种“解释层 + 入口层”合并的做法, 使网站不只是一个静态落地页, 而是把公开展示、品牌承接与最低门槛试用连接成同一条转化路径。

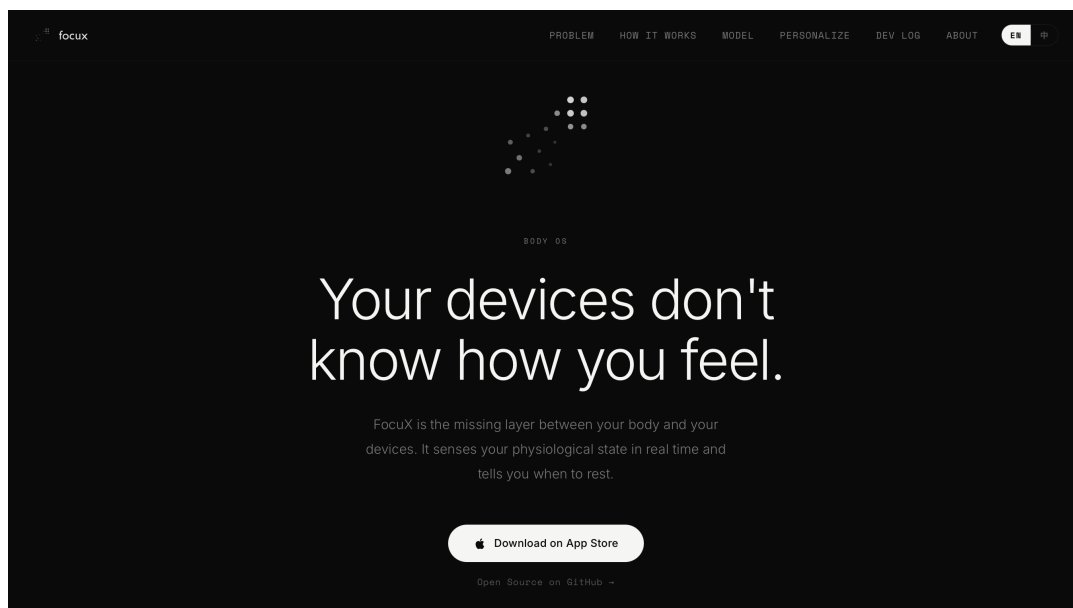


图 4-3 focux.me 网站作为公开入口与视觉体验入口的页面形态

4.4 LeLamp runtime 与 harness 协议

这一节是本文工程贡献里最需要被单独说明的部分。harness 协议负责把状态讲清楚, LeLamp runtime 负责决定硬件何时出现、以什么方式出现; 两者一起, 构成了这套系统真正跨端工作的中枢。

harness 是在开发后期变得越来越必要的。只要没有这层, LeLamp 就始终只是一个被动外设: 后端一发现风险, 就把某个动作脚本推过去执行。它当然能动, 但并不知道自己为什么动, 也无法判断此刻是不是该克制。对我来说, 这还不算 AI Native 的硬件。它至少要共享同一份上下文, 知道自己是在回应什么。

harness 的核心作用在于构建一条跨端可共享的状态总线。FluxChi 后端在 Fusion Engine 完成判断后, 会把证据写成 SubjectStateFrame, 再按固定节拍向外广播。对 LeLamp 来说, 其目的在于使终端能够持续获取三类上下文信

息：现在是什么状态，系统为什么这样判断，这次介入又受哪些边界条件约束。

落到当前原型里，这层带来的变化很直接。LeLamp 不再只接收“执行动作”这种单点命令；同一会话里的状态、原因和预算会被连续送到灯端，恢复状态也被纳入同一条事件流，后续如果再加入新的具身输出端，也可以沿用这套接口。当前 harness 通过 WebSocket 长连接广播三类事件：state_frame 用于常规状态更新，intervention_intent 表示此刻值得考虑某一档介入，recovery_frame 表示状态已回落、可以逐步退回背景。三类事件共享 session_id，这样 LeLamp 看到的是一整段工作过程，而不是一堆互不相连的瞬时命令。

LeLamp runtime 层。Listener 进程以长期驻留的方式订阅 harness。收到 state_frame 后，runtime 不会立刻执行，而是先过四道本地判断：过期帧会被丢弃，本地语音通道占用时运动通道暂时关闭，同档介入要满足最短复发间隔，会话预算也要先通过检查。只有这些条件都过了，具身输出才真正开始。

执行决策由场景策略负责。本文实现了两套互补的策略：Scene A 走 motion path，把 light_nudge 翻译为 shy / tilt / soft headshake，把 escalation 翻译为 sustained nod / firm headshake / focused gaze 等更明确的动作；Scene B 走 breath path，把同档强度翻译为 60–90 秒的共振呼吸节律，由色温与亮度的缓慢起伏完成“不出声的拉一拉”。两套策略下游共用同一组 motor-bus 仲裁机制：所有候选动作进入仲裁队列，按优先级与互斥关系决定唯一执行对象，避免“灯既要点头又要呼吸”的语义冲突。

recovered 闭环。当 runtime 收到 recovery_frame 时，会触发两件事：第一是逐步释放被使用的 budget（避免一次性回填导致下一轮立即过激）；第二是把 motor-bus 的“高优先级保留”释放回低优先级状态，让灯重新回到背景陪伴姿态。这一闭环让系统具备“出现—退场”的完整礼貌曲线，而不仅是“出现”。

在真实桌面部署中，FocuX、腕带与 LeLamp 围绕同一段工作过程协同工作。图 4-4 说明三类设备在桌面环境中的相对位置和协同关系；图 4-5 补充呈现灯体原型与真实测试时的桌面状态。LeLamp 在系统中的存在价值，在于承接屏幕设备无法胜任的环境式、低侵入支持功能。



图 4-4 FocuX、腕带与 LeLamp 在真实桌面环境中的部署关系

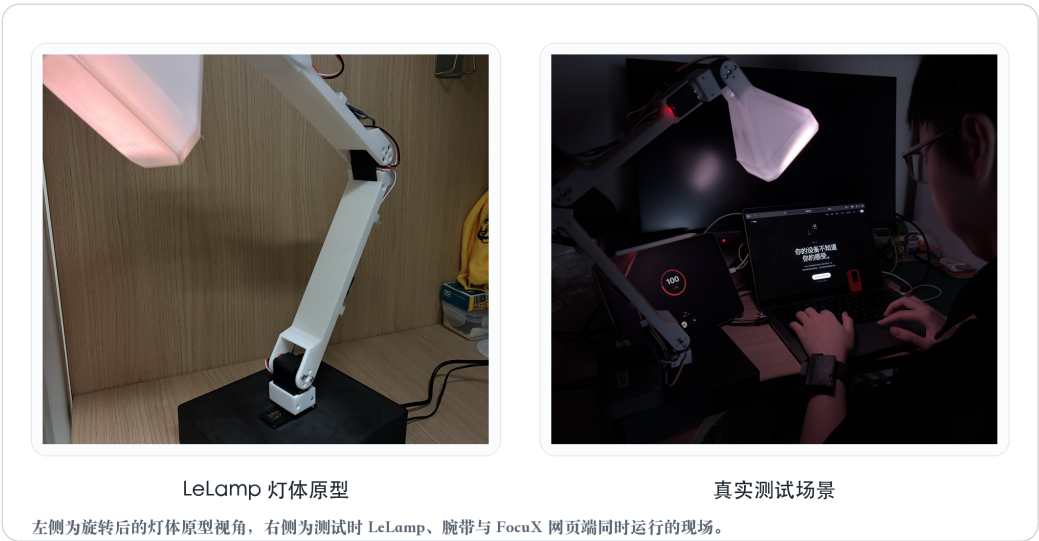


图 4-5 LeLamp 原型与 FocuX 桌面运行场景

4.5 数据飞轮与会话复盘

数据飞轮与会话复盘，是本文为系统留出的”长期化通道”。它解决一个具体问题：今天的提醒是否能让明天的判断更准。

数据飞轮的关键在于结构化保存而不是原始留存。具体做法包括：周期性把

ModuleReading 与融合结果做快照写入本地数据库（SwiftData on iOS）；用户在应用或网站上的主观标签作为标签事件写入；会话结束时由 review board 模块将事件流压缩为 session summary；多个 summary 在更长时间窗口上由 companion recap 拼接出”伴随式叙述”。整个飞轮中，原始视频帧与原始 EMG 波形默认不被保存，只保留可被复用与审计的数值维度、质量值和标签。这一约束既是隐私立场，也是工程务实选择——原始数据成本高、收益边际递减，而结构化标签直接接 ONNX 链路，反而更容易把闭环跑起来。

如表 4-2 所示，数据飞轮在系统中的位置，更像是把“实时判断—会话复盘—长期记忆”三段接到了一起。

表 4-2 数据飞轮在当前系统中的闭环位置

阶段	当前实现	作用
实时采集	周期性保存多模块 ModuleReading 快照	保留状态轨迹而非只保留 最终结论
主观反馈	“我很累 / 我很清醒”等显 式标签事件	为系统判断提供补证与反 证
会话复盘	review board、session 详 情、异常片段汇总	将即时提示转化为可理解 证据
训练导出	将快照与标签对齐为训练 样本	为个体化模型与后续研究 提供基础
隐私约束	默认保存数值维度与标 签，不保留原始视频/波 形	在闭环学习与隐私之间保 持平衡

4.6 分级干预与具身输出

前几节把”做了什么”盘清楚了；本节继续回答”为什么这些产出之间能成为一套有立场的设计”。这里把分级干预的内部逻辑、输出通道的选择规则与 LeLamp 的两套输出哲学串起来，作为对第三章”立场—命题”在执行层的补充论证。

4.6.1 分级干预的内部结构

如图 4-6 所示，本文采用 silent log-light nudge-escalation 的三级结构。其核心机制在于约束系统的非必要触发，实现克制化介入。

分级干预状态机与升级条件

系统先记录，再轻推，最后才升级；恢复、预算和公共可见性共同约束下一步动作。

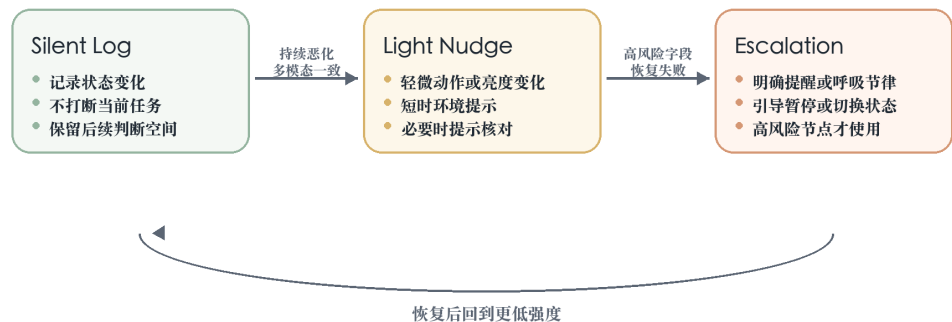


图 4-6 分级干预结构

silent log 用于第一次轻微恶化时的无打断记录，看似”不做任何事”，实际上完成了两项关键工作：一是为后续判断提供时间上的连续证据，二是避免系统在证据不足时过早破坏用户状态。light nudge 是系统从背景进入前景的第一步，但这种进入仍保持克制，可表现为网页上的柔和提示、App 中的轻触发、LeLamp 的轻微动作或呼吸调制。escalation 才意味着系统已经积累了足够多的理由，认为”继续沉默”的代价开始高于”明确提醒”的代价。这一结构在 runtime 层的具体形态已经在系统架构与工程实现部分描述：首次恶化默认进入 silent log，持续恶化才进入 light nudge，严重证据如高 PERCLOS、微睡眠或持续点头才会直接触发 escalation。

4.6.2 输出通道的差异化使用

通道选择是介入设计的另一半。如表 4-3 所示，网页与 App 适合承载信息量更高的反馈，弹窗适合高置信时刻的明确提醒，而 LeLamp 更适合承担中低强度、持续性的状态表达。

表 4-3 干预通道的比较

通道	信息密度	打扰强度	社会可见性	适合层级
网页 (focux.me)	高	中	高	silent log / light nudge
移动应用 (FocuX)	高	中	中	silent log / light nudge / 复盘
弹窗 / 系统通知	中	高	中	escalation
LeLamp (motion path)	低到中	低到中	低	light nudge / 渐进式 escalation
LeLamp (breath path)	低	低	低	light nudge / 节律托举

值得强调的是，多通道并不意味着每次都同时输出。系统应尽可能只选择一种最合适的方式出现：在公共空间中，LeLamp 通常优于网页显性提示；在用户即将结束会话时，App 中的 review board 比即时提醒更有意义；在风险已经很高的时刻，弹窗或明确提示才有必要进入前台。“先选通道、再决定强度”是本文对于预设计方法的一个具体化。

4.6.3 LeLamp 的两套输出哲学

LeLamp runtime 不只承载一种输出语言。它在同一档强度下，至少存在两条互不相同的表达路径。

Motion path (Scene A) 强调可见、可被记忆的具身动作。light_nudge 时执行轻摇头、低头犹豫或回避式后撤；escalation 时执行明确点头、聚焦凝视或伸长抬头。这一路径的优势是”语义明确”，缺点是”在意识层面更打扰”——它很像一个有意为之的提醒。

Breath path (Scene B) 强调更低冲击、更接近节律协同的环境式支持。处于 light_nudge 时, 系统进入 60 秒共振呼吸节律, 以“4 秒吸气、6 秒呼气”为基线, 通过亮度与色温的缓慢起伏把用户轻轻拉回节奏。处于 escalation 时, 系统把节律延长到 90 秒, 并在结尾补一个轻微姿态切换, 暗示“建议起身”。这一路径的优势是“在意识层面几乎不打扰”, 但需要更长时间窗才生效。

两套路径共享同一组 SubjectStateFrame 输入, 在 motor-bus 上互斥执行。具体走哪条由场景策略决定——例如咖啡馆等公共场景默认偏向 breath path, 独立工作场景在已有持续 escalation 历史时偏向 motion path。两套哲学的存在不是为了让 LeLamp 看起来更复杂, 而是为了让“具身输出”不被简化为“动作越多越好”。这也回应了第二章中 ELEGANT 与 EMOTION 关于表达性运动的设计观察^[27-28]。

4.6.4 从单次提醒到关系连续

分级干预并不在某次提示出现的那一刻结束。如本章数据飞轮部分所述, 系统中的 session summary 与 companion recap 会把“提示之后如何被理解”组织进同一条数据飞轮。即时介入帮助用户在当下做出调整, 会话复盘则让用户在事后理解系统为什么在某个时刻出现、这些提示是否合理、自己的工作状态是如何变化的。这针对数字游民群体具有同等重要性: 工作生活平衡无法依赖单次提醒达成, 必须在多次会话反馈中逐步构建清晰的自我节律感。

这与第三章立场五“关系胜过单次提醒”互为支撑: 让系统具备“被回看”的能力, 是它从工具走向伴随物的关键一步。

4.7 本章小结

本章集中呈现当前原型已经落地的工程与产品形态, 包括腕带接入、EMG 管线、iOS 应用、focux.me 网站、LeLamp runtime、数据飞轮和分级干预机制。各部分共同证明, 本文的设计产出已经从概念图推进到可运行、可部署、可复盘的跨端系统, 也为第五章的场景化评估提供了真实运行基础。

5 实验验证与结果分析

本章分析 2026 年 4 月 27 日完成的一次场景化配对实验。边界先说清楚：这不是大样本有效性验证，也不试图把一次短时实验写成普遍结论。它更像一次形成性检查，用来回答系统在真实任务片段中是否已经出现可观察的过程变化。为避免把不同层面的材料混在一起，本章把过程指标、状态轨迹和风险结构分开写；合成设计探针只作为下一轮访谈和迭代的辅助材料，不参与实证结论。

5.1 评估方法的选择与边界

研究原型很容易过早走向大样本对照。问题在于，当系统本身的完成度、稳定性和表达方式仍在变化时，形式上更完整的对照研究未必能更接近核心问题。本文先采用一种较克制的形成性评估方式：同一参与者、同一类任务、两轮相近任务链的配对实验。

具体来说，任务为中文规则核算录入，参与者需要按规则核对数字、抄录金额、回答验证字段，最终通过即可视为完成。控制条件下，仅保留任务网站与基础日志记录；辅助条件下，相同任务接入 FluxChi 的状态链路，并让 LeLamp 作为环境式输出端参与节奏提示与高风险节点辅助。两轮任务时长都控制在 13–16 分钟之内，本次评估更像一次“真实工作片段”的前后对照，而不是追求统计显著性的正式大样本研究。



图 5-1 配对实验任务网页界面

这种设计的边界很清楚：它能回答”过程发生了什么变化”，回答不了”在更大群体中是否同样有效”。后文所有判断都只在这一边界内成立。对现阶段的 FocuX 来说，先确认系统框架是否跑得通，比过早追求统计显著性更重要。

5.2 过程效率指标的变化

最直接的变化发生在”任务进入和过程摩擦”上。如图 5-2 所示，辅助条件下总完成时长由 936.19 秒降至 776.59 秒，缩短 17.05%；字段输入次数由 60 次降至 37 次，下降 38.33%；平均首次输入延迟由 84.61 秒降至 57.94 秒，下降 31.52%；平均首次正确提交延迟由 233.47 秒降至 193.63 秒，下降 17.06%；修正次数由 3 次降至 2 次。错误提交次数仅从 14 次降到 13 次。

一次配对实验的总体过程指标对比

同一参与者、两轮中文核算录入任务；数值越低代表过程摩擦越少。



图 5-2 一次配对实验的总体过程指标对比

错误总数并没有明显变化。这一点反而有用：系统没有替用户给出正确答案，也没有直接改变最终判断。更值得看的，是“首次输入更快”和“字段输入次数更少”这两项过程指标。它们说明参与者更早进入了可推进的解题路径，沿途无效试填也少了一些。换句话说，系统的作用更像是托住过程，而不是接管任务。这个结果与第三章的判断相符：平衡首先是过程问题，不是事后评分问题。

5.3 视觉警觉性与状态轨迹

行为层面之外，多模态状态记录给出了相对一致的方向。如图 5-3 所示，辅助条件下 PERCLOS 均值由 0.362 降至 0.238，下降 34.25%；视觉 fatigue 指数均值由 0.313 降至 0.220，下降 29.71%；alert 状态占比由 21.95% 提升到 55.33%；中重度疲劳片段占比由 11.18% 降至 7.61%，下降 31.93%。

多模态状态轨迹与警觉性对比

保留原始观察指标，不在图中写结论；解释放在正文段落中完成。



图 5-3 多模态状态轨迹与警觉性对比

这组数据回答了一个比效率指标更靠里的问题：辅助条件下，用户的状态轨迹是否更稳定？就当前这一次实验而言，答案倾向于肯定。这里仍需谨慎，“更稳定”不是一个独立结论，它和前面的过程指标变化方向一致，也和 §5.4 里风险结构的变化方向一致。三组证据朝同一方向收拢后，本文可以提出一个相对稳妥的判断：系统并没有把用户变成另一个人，但它可能帮助用户在同一段任务里维持了更长时间的有效注意力。这是当前阶段最站得住的一条实证解释。

5.4 风险结构的迁移

只看“错误总数差不多没变”，容易误判系统在错误维度上没有贡献。把错误位置拆开看，情况会更复杂一些。

控制条件中的错误分散在多道题与多个字段上，其中 A-102 占全部错误事件的 42.86%；辅助条件中的错误则明显集中到最后一题，B-204 单题占全部错误事件的 76.92%，而且主要落在“商家到账（元）”这一最终核验字段上。如图 5-4 所示，这种变化更像一次“风险收敛”：原本弥散在前中段的试错，被慢慢压到了末段少数真正值得谨慎处理的节点上。

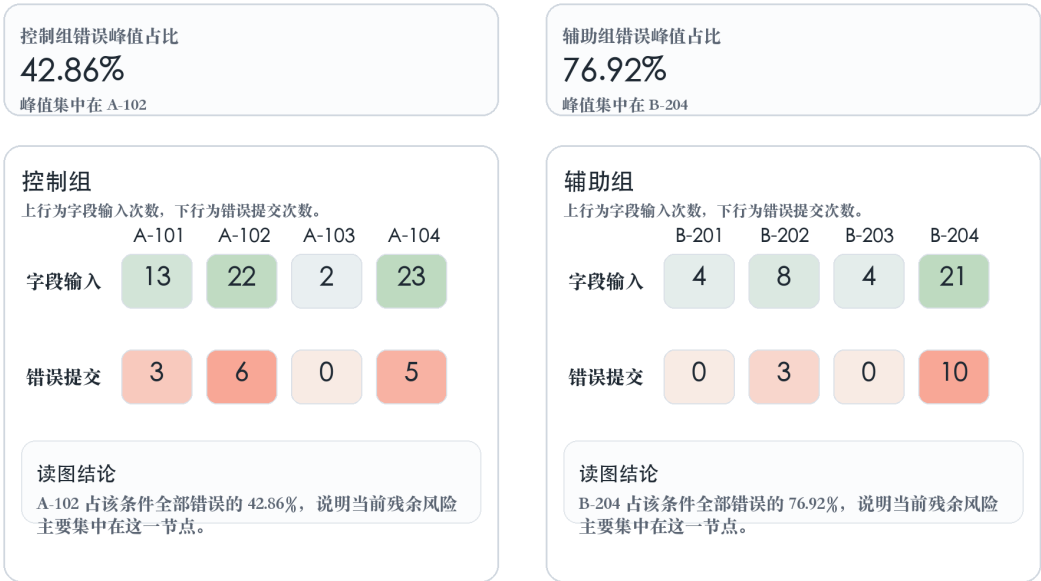


图 5-4 错误模式与残余风险分布

对本文而言，这是这次实验里最值得保留的一类发现。它并不能说明系统已经“减少错误”，但说明残余风险的位置变得更集中、更容易被下一轮设计处理。这正好对应前文“先选通道、再决定强度”的设计方法——既然末段单一字段才是真正高代价的位置，那么下一轮 LeLamp 就不该在整个会话里平均发力，而应把 motion path 的明确动作或 breath path 的节律收紧留给那一刻。这也意味着系统进入了一种“自己告诉自己下一步该改哪里”的迭代节奏。

5.5 设计探针补充材料的角色

为了避免迭代方向完全来自我个人解释，本文补充了三组合成设计探针。这里的 synthetic interviews 只用于把不同类型潜在使用者对系统的关注点整理成可视化材料。必须明确，这些材料不是人类受试结果，不参与实证结论，仅用于帮助下一轮真人访谈与产品迭代锁定优先级。

如图 5-5 所示，合成画像在六个维度上的评分均值显示，“工作负担改善”、“时机匹配”和“再次使用意愿”都达到 4.0，而“打扰可接受度”、“社会可接受性”和“解释透明度”只有 2.67。图 5-6 把主题频次拉平后可以看到，出现频率最高的关注主题是“过程节奏托举”和“解释透明度”，其次是“高风险节点对齐”、“公共可见性压力”与“打扰阈值”。这两份合成材料和真实实验之间存在一个可用的对应关

系：实验提示系统可能已经托住了过程，并把风险压到末段；探针则提醒下一轮不要简单增加提醒次数，而应让提醒更准确地对准高风险节点，并让用户知道为什么此刻出现、为什么它值得被听见。

合成设计探针的六维评分

3 组合成画像，1 到 5 分，越高代表评价更正向；仅作设计探针，不计入人类受试结果。

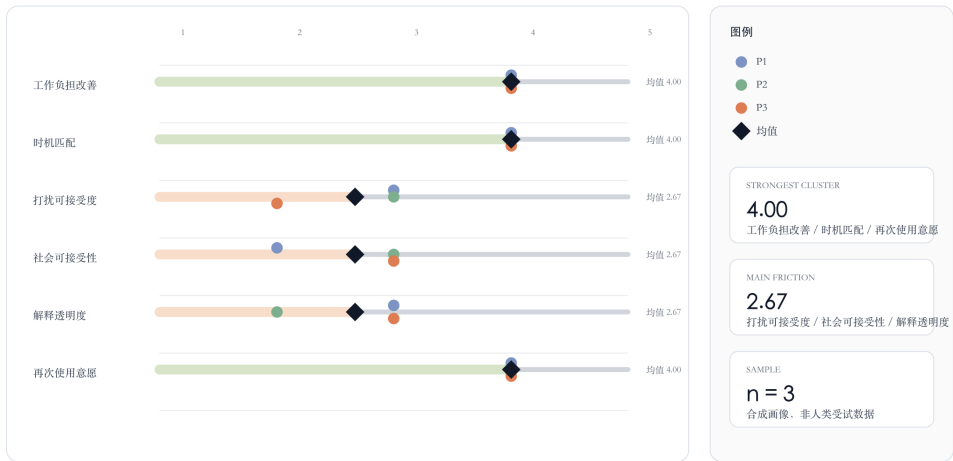


图 5-5 合成设计探针的六维评分

合成设计探针的关注主题

频次表示某主题在 3 组合成画像中被提及的次数；该图用于决定下一轮产品迭代优先级。

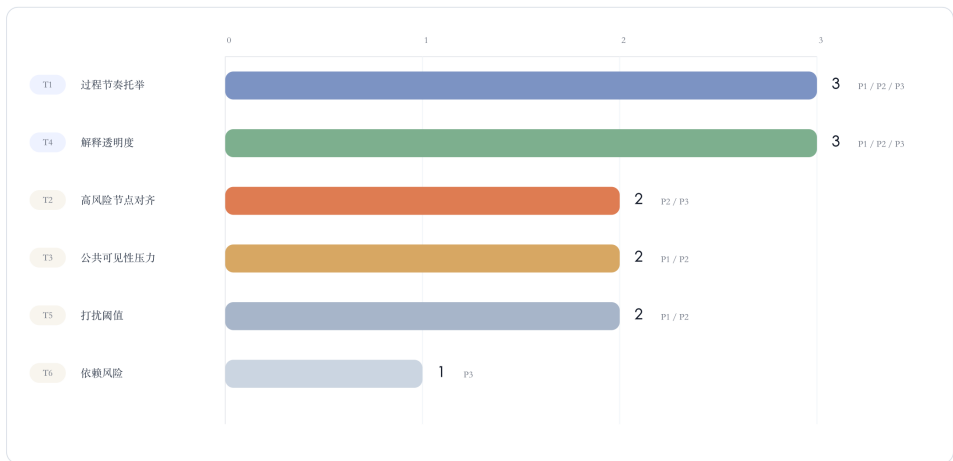


图 5-6 合成设计探针的关注主题

5.6 当前结论的边界与下一步迭代方向

把上面四节合在一起，当前最稳妥的实证解释是：在这段数字游民式的真实工作片段里，系统在过程效率、视觉警觉性和风险结构三个方向上出现了同向变化。不过，这些变化仍然建立在 $N=1$ 的形成性配对之上，只在十几分钟的短时窗口里成立。它能不能推广到更多用户、更长时间和更多任务类型，还需要下一轮工作继续验证。

顺着真实实验与合成探针给出的线索，下一轮迭代的优先级也比较明朗。最先要补的是末段高风险核验处的定点干预，让 motion 和 breath 两条路径分别试开；紧接着是把解释透明度补起来，让 LeLamp 不只是“出现”，还要让用户理解“为什么是现在、为什么是这个字段、下一步该怎么做”；再往后，仍然要继续压低公共可见性和打扰感，让它更像一个环境协商者，而不是一个外显提醒器；最后，还需要把依赖风险一并纳入设计，确保系统是在帮助用户进入核对模式，而不是替用户承担最后判断。

如果下一轮要把实验做得更规范，可以在保留当前自动化日志的基础上引入一组更标准的人机交互量表：工作负担用 NASA-TLX 衡量^[29]；整体可用性补 SUS，并按 Bangor 等的阈值解释^[30-31]；体验质量补 UEQ-S，看系统是否不仅高效、而且足够清晰、顺滑、愿意长期使用^[32]。对于干预本身，还可以加入时机适配与中断恢复成本相关的题项，用来判断系统是否在该出现的时候出现^[18,6]；如要讨论公共场景接受度，则可以引入可穿戴外显技术的社会可接受性条目^[26]。引入量表不是为了把论文写得更像标准实验，而是为了更清楚地回答四个产品级问题：是否省力，是否好用，是否舒服，是否适合真实环境。

5.7 本章小结

本章基于一次形成性配对实验和补充设计探针，讨论系统在过程效率、视觉警觉性和风险结构上的变化。结果不能被解释为大样本统计结论，但已经显示出一个稳定方向：FocuX 更适合被理解为帮助用户更早进入有效路径、把残余风险集中到关键节点上的状态支持系统，而不是替代用户判断的自动化工具。

6 结论与展望

6.1 主要贡献与创新点

把全文六章放在一起看，这篇论文实际完成的是几件可以分开说清楚的工作。第一步，是把“工作生活平衡”从时间分配或事后统计里拿出来，放回连续工作过程中的交互判断。这个重心一旦转过来，后面的很多选择才变得顺：为什么要持续感知，为什么不能一看到异常就提醒，为什么输出层最好不要总停留在屏幕里。

顺着这个判断，本文提出了 silent log、light nudge 到 escalation 的三级递进框架。它关心的不只是“提醒触发..，而是介入判断、介入时机与介入方式如何共同成立。stale-frame drop、voice gate、per-level debounce、global budget 与 recovered 闭环，为分级干预机制在真实环境中的运行提供了必要约束。

再往下，harness 与具身消费者运行时构成了本文最想讲清楚的一层架构。它不是简单增加一个通信协议，而是让 LeLamp 不再只是“收到命令就执行”的被动外设，而是围绕同一份上下文持续判断自己是否该出现、如何出现、何时退回背景的具身消费者。对本文来说，这正是 AI Native 硬件和脚本驱动硬件之间最值得被区分开的地方。

这些判断没有停在概念层。研究原型已经被工程化为可以真实运行的多端产品组合，完整链路覆盖腕带、iOS 原生应用 FocuX、focux.me 公开网站、FluxChi 后端与 harness、LeLamp runtime 和关系记忆层。它们既是论文里的设计产出，也是后续实验、继续迭代和外部接入的现实基线。

6.2 局限

本文仍有几处明显限制。当前实证结论只来自一次 N=1 的形成性配对实验，时间窗口也只有 13–16 分钟，所以这些数据更适合被看成方向性证据，而不是统计性证据。关系记忆层还处在早期阶段，session summary 与 companion recap 的实际效果也还没有被独立评估。LeLamp 的 motion path 与 breath path 在真实公共空间中的社会可接受性，目前主要依赖合成探针给出的方向提示，缺少现场观察。整套系统在长期使用下的隐私观感与依赖感问题，也还停留在设计立场层面，暂时没有形成足够扎实的量化结论。

6.3 未来工作

后续工作会沿着三条线继续推进。第一条线，是把评估扩到更多用户、更多任务类型和更长时间窗口，并接入 §5.6 提到的那组标准量表。第二条线，是把 harness 协议继续收成一个可被外部接入的开放契约，使第三方具身消费者，例如新的硬件原型、桌面物件或空间装置，也能在不改 FluxChi 内部实现的前提下接入这套状态广播。第三条线，则是把关系记忆层真正做厚：session summary 与 companion recap 不仅限于“单向生成”，更需具备“反向读取”的闭环能力，让下一次 LeLamp 出现的时机、强度和表达方式，真的会受到前几次关系上下文的影响。

回到最初的问题，这篇论文没有把数字游民的工作生活平衡一次性解决。它完成的，是把这个抽象概念推进成一个可运行、可测试、也还能继续优化的系统原型。这个结果有限，但它是可以继续往下做的。

参考文献

- [1] MAZMANIAN M, ORLIKOWSKI W J, YATES J. The autonomy paradox: The implications of mobile email devices for knowledge professionals[J/OL]. *Organization Science*, 2013, 24(5): 1337-1357. DOI: 10.1287/orsc.1120.0806.
- [2] HANNONEN O. In search of a digital nomad: Defining the phenomenon[J/OL]. *Information Technology & Tourism*, 2020, 22: 335-353. DOI: 10.1007/s40558-020-00177-z.
- [3] BOZZI A. Digital nomadism from the perspective of places and mobilities: A literature review[J/OL]. *European Transport Research Review*, 2024, 16(50). DOI: 10.1186/s12544-024-00663-z.
- [4] COOK D. The freedom trap: Digital nomads and the use of disciplining practices to manage work/leisure boundaries[J/OL]. *Information Technology & Tourism*, 2020, 22: 355-390. DOI: 10.1007/s40558-020-00172-4.
- [5] RAINOLDI M, LADKIN A, BUHALIS D. Digital nomads' work-leisure management practices[J/OL]. *Annals of Tourism Research*, 2025, 111: 103904. DOI: 10.1016/j.annals.2025.103904.
- [6] HOWE E, SUH J, MORSHED M B, et al. Design of digital workplace stress-reduction intervention systems: Effects of intervention type and timing[C/OL]//CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '22). 2022. DOI: 10.1145/3491102.3502027.
- [7] MORSHED M B, HERNANDEZ J, MCDUFF D, et al. Advancing the understanding and measurement of workplace stress in remote information workers from passive sensors and behavioral data[C/OL]//International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII 2022). 2022: 1-8. DOI: 10.1109/ACII55700.2022.9953824.
- [8] DOURISH P. Where the action is: The foundations of embodied interaction[M/OL]. MIT Press, 2001. DOI: 10.7551/mitpress/7221.001.0001.
- [9] WEISER M, BROWN J S. Designing calm technology[Z]. 1995.
- [10] WISNESKI C, ISHII H, DAHLEY A, et al. Ambient displays: Turning architectural space into an interface between people and digital information[C/OL]//CoBuild '98. 1998. DOI: 10.1007/3-540-69706-3_4.
- [11] Human Computer Lab. Lelamp[EB/OL]. 2026. <https://www.lelamp.com/>.

- [12] Human Computer Lab. Lelamp: Open-source robot lamp based on apple's elegant paper [EB/OL]. 2025. <https://github.com/humancomputerlab/LeLamp>.
- [13] FAIRCLOUGH S H. Fundamentals of physiological computing[J/OL]. Interacting with Computers, 2009, 21(1-2): 133-145. DOI: 10.1016/j.intcom.2008.10.011.
- [14] FAIRCLOUGH S H, GILLEADE K. Meaningful interaction with physiological computing [M/OL]//Advances in Physiological Computing. Springer, 2014: 1-16. DOI: 10.1007/978-1-4471-6392-3_1.
- [15] ABE T, MOLLICONE D, DINGES D F. PERCLOS in drowsiness monitoring: A systematic review and future directions[J/OL]. Sleep Advances, 2023, 4(1): zpad006. DOI: 10.1093/sleepadvances/zpad006.
- [16] ARROYO E, SELKER T. Attention and intention goals can mediate disruption in human-computer interaction[C/OL]//Interact 2011. 2011: 454-470. DOI: 10.1007/978-3-642-23771-3_34.
- [17] ARROYO E, SELKER T. Self-adaptive multimodal-interruption interfaces[C]//International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI 2003). 2003: 6-11.
- [18] IQBAL S T, BAILEY B P. Leveraging characteristics of task structure to predict the cost of interruption[C/OL]//CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '06). 2006: 741-750. DOI: 10.1145/1124772.1124882.
- [19] Nahum-Shani I, SMITH S N, SPRING B J, et al. Just-in-time adaptive interventions (jitais) in mobile health: Key components and design principles for ongoing health behavior support [J/OL]. Annals of Behavioral Medicine, 2018, 52(6): 446-462. DOI: 10.1007/s12160-016-9830-8.
- [20] JOHNSON J A, ZAWADZKI M J, SLIWINSKI M J, et al. Adaptive just-in-time intervention to reduce everyday stress responses: Protocol for a randomized controlled trial[J/OL]. JMIR Research Protocols, 2025, 14: e58985. DOI: 10.2196/58985.
- [21] CHEN X, TANKELEVITCH L, VANUKURU R, et al. Are we on track? AI-assisted active and passive goal reflection during meetings[C/OL]//CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '25). 2025: 22. DOI: 10.1145/3706598.3714052.
- [22] TANKELEVITCH L, SCOTT A E, CHALLAKERE N, et al. Nudging attention to workplace meeting goals: A large-scale, preregistered field experiment[C/OL]//CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '26). 2026: 27. DOI: 10.1145/3772318.3791199.

- [23] CHUA P, AGRES K, NANAYAKKARA S. Know thyself: Improving interoceptive ability through ambient biofeedback in the workplace[C]//SIGHCI 2023 Proceedings. 2024.
- [24] COSTANZA E, INVERSO S A, PAVLOV E, et al. Eye-q: Eyeglass peripheral display for subtle intimate notifications[C]//MobileHCI '06. 2006: 211-218.
- [25] DEVENDORF L, LO J, HOWELL N, et al. “I don’t want to wear a screen”: Probing perceptions of and possibilities for dynamic displays on clothing[C/OL]//Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2016. DOI: 10.1145/2858036.2858192.
- [26] KELLY R, GOOCH D, WATTS L, et al. The WEAR scale: Developing a measure of the social acceptability of a wearable device[C/OL]//Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. 2016: 2864-2871. DOI: 10.1145/2851581.2892331.
- [27] HU Y, HUANG P, SIVAPURAPU M, et al. ELEGNT: Expressive and functional movement design for non-anthropomorphic robot[EB/OL]. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2501.12493.
- [28] HUANG P, HU Y, NECHYPORENKO N, et al. EMOTION: Expressive motion sequence generation for humanoid robots with in-context learning[EB/OL]. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2410.23234.
- [29] HART S G, STAVELAND L E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research[M/OL]//HANCOCK P A, MESHKATI N. Human Mental Workload. North-Holland, 1988: 139-183. DOI: 10.1016/S0166-4115(08)62386-9.
- [30] BROOKE J. SUS: A “quick and dirty” usability scale[M]//JORDAN P W, THOMAS B, WEERDMEESTER B A, et al. Usability Evaluation in Industry. Taylor & Francis, 1996: 189-194.
- [31] BANGOR A, KORTUM P T, MILLER J T. An empirical evaluation of the system usability scale [J/OL]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2008, 24(6): 574-594. DOI: 10.1080/10447310802205776.
- [32] SCHREPP M, HINDERKS A, THOMASCHEWSKI J. Design and evaluation of a short version of the user experience questionnaire (UEQ-S)[J/OL]. International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence, 2017, 4(6): 103-108. DOI: 10.9781/ijimai.2017.09.001.

致谢

致谢写到这里，我的本科阶段也快要结束了。很难说这篇论文是一个完美的终点，它更像是四年里许多偏航、试错、推翻和重新开始之后，暂时被固定下来的一张截面。

我并不是一开始就知道自己要做什么的人。刚进入大学时，我对工业设计的理解还停留在比较表面的地方：产品、造型、效果图、作品集、一个看起来完整的方案。后来才慢慢发现，真正让我兴奋的并不只是一个物件被设计成什么样，而是一个问题如何被打开，一个系统如何被搭起来，一个想法如何从纸面走到真实设备、真实界面和真实使用情境里。

这篇论文里的项目，就是在这种反复中长出来的。它不是某个学期突然出现的毕业设计，而是由许多看似分散的尝试慢慢拼起来的结果：从对数字游民和工作状态的兴趣，到手部感知、腕带接入、EMG/IMU 采集，再到 FocuX iOS 应用、focux.me 网站、harness 协议和 LeLamp 运行时。论文里它被整理成了一套系统，但在真正发生的时候，它更多是一连串不确定的夜晚、卡住的代码、失效的原型、被推翻的想法，以及一次次“那就再试一下”。

本科四年里，我最重要的进步，也许不是学会了某一个具体技能，而是慢慢接受了自己不是沿着标准路径成长的人。我尝试过传统工业设计，也接触过科研；做过硬件，也写过软件；关心过作品集，也关心过产品能不能真的跑起来。很多东西一开始看起来并不统一，甚至有点杂乱，但后来我才意识到，这些不稳定的尝试并不是浪费，它们构成了我真正的方向。我也逐渐明白，所谓成长并不总是变得更确定。很多时候，成长反而是更诚实地承认自己不适合什么，更勇敢地离开某些看起来正确的道路，然后把时间投入到那些真正让自己想继续追问的问题里。对我来说，从工业设计走向交互设计、产品系统和人机交互，并不是一次突然的转向，而是很多次小的选择叠加之后形成的结果。

感谢我的指导教师王军锋老师在毕业设计和论文写作过程中给予我的指导。老师的建议让我不断重新看待这个项目：它不应该只是一个“我做了很多东西”的展示，也不应该只是技术模块的堆叠，而应该讲清楚问题从哪里来、系统为什么这样组织、它在真实情境里到底试图回应什么。这个过程让我第一次更认真地理解，论文不是把工作量写满，而是把自己的判断写清楚。

感谢未来技术学院和各位老师在本科阶段给予我的自由、信任和支持。作为第一届设计专业的学生，我很幸运没有被过早地固定在某一种单一答案里。学院给了我很多可以试错的空间，也让我有机会接触不同方向、不同资源和不同类型的项目。很多看起来“不太像标准设计学生该做的事”，最后反而成为了我最重要的积累。

感谢这几年里和我一起讨论、合作、熬夜、改方案、推翻方案的人。很多重要的变化并不发生在正式场合，而是发生在一次很随意的聊天、一次临时的反馈、一次一起卡住又一起解决问题的过程中。那些具体的人和具体的瞬间，很难全部写进论文，但它们确实构成了这篇论文背后的另一部分工作。

感谢我的家人一直以来的支持与包容。本科阶段有很多选择并不容易解释，也不是每一次努力都马上能看见结果。感谢你们愿意相信我，让我可以把时间花在那些当时看起来不够稳定、但对我来说非常重要的事情上。

最后，也感谢这四年里那个一直不太安分的自己。很多时候，我并没有选择最稳妥、最省力、最容易被理解的路。也正因为如此，我才有机会在一次次不确定中慢慢知道自己想成为什么样的人。

这篇论文不是对本科阶段的总结陈词，而更像是一个证明：那些绕路、试错、怀疑和重来，并没有把我带偏，它们恰恰把我带到了这里。

附录 A 当前原型组成与产出清单

1. 腕带硬件接入：BLE 协议逆向、USB/BLE 双入口、8 通道 EMG + IMU 连续采集、84 维特征派生。
2. iOS 原生应用 FocuX：SwiftUI + CoreBluetooth + SwiftData，承载首页、专注页、历史页、反馈页、Live Activity、桌面组件、App Store 分发就绪元数据。
3. focux.me 网站：作为公开发布入口与最低门槛视觉接入端，集成浏览器侧视觉模块。
4. FluxChi 后端：SensorModule / ModuleReading / Context Bus / Fusion Engine 模块化处理链路，质量门控与模态降级机制。
5. harness 协议：SubjectStateFrame 状态帧、WebSocket 长连接广播，以及状态更新、介入意图、恢复信号三类事件。
6. LeLamp runtime:listener 进程、stale-frame drop、voice gate、per-level debounce、global budget、motor-bus 仲裁、recovered 闭环、Scene A motion path 与 Scene B breath path。
7. 数据飞轮：周期性快照、主观标签事件、session summary、companion recap、隐私约束（仅保存数值维度与标签）。

附录 B 论文图表清单

1. 图 1-1 数字游民在非固定办公空间中的工作状态
2. 图 1-2 现有商业化硬件与 FocuX 的市场参照
3. 图 1-3 数字游民工作生活平衡的研究路径
4. 图 2-1 理论基础与系统设计约束的关系
5. 图 2-2 Human Computer Lab 的 LeLamp 官方项目页面
6. 图 3-1 前期概念阶段的 FLUX 方案板，体现了“手部 tension + 可穿戴节律陪伴”的初始设想
7. 图 3-2 从初代感知原型、贴身电极测试到唯理手环，输入形态逐步从开放探索收敛为稳定腕带
8. 图 3-3 五层系统架构与跨端协同示意
9. 图 4-1 FocuX iOS 应用的四张关键页面
10. 图 4-2 FocuX 桌面组件与 Live Activity 入口
11. 图 4-3 focux.me 网站作为公开入口与视觉体验入口的页面形态
12. 图 4-4 FocuX、腕带与 LeLamp 在真实桌面环境中的部署关系
13. 图 4-5 LeLamp 原型与 FocuX 桌面运行场景
14. 图 4-6 分级干预结构
15. 图 5-1 配对实验任务网页界面
16. 图 5-2 一次配对实验的总体过程指标对比
17. 图 5-3 多模态状态轨迹与警觉性对比
18. 图 5-4 错误模式与残余风险分布
19. 图 5-5 合成设计探针的六维评分
20. 图 5-6 合成设计探针的关注主题
21. 表 1-1 现有支持工具与本文系统关注重点的比较
22. 表 4-1 当前系统已完成的关键工程实现一览
23. 表 4-2 数据飞轮在当前系统中的闭环位置
24. 表 4-3 干预通道的比较

附录 C2026-04-27 评估补充材料目录

为保证正文中的过程证据、补充分析与研究材料之间关系清晰，本文将本轮配对实验的补充材料整理为一个独立目录 `supplementary/evaluation-2026-04-27`。其中内容分为两类：

1. 真实实验摘要材料：包括关键定量指标汇总、证据矩阵、原始来源文件索引，以及与正文图表对应的派生指标文件。
2. 合成设计探针材料：包括半结构化访谈提纲、三组 agent-based synthetic interview transcripts、主题编码表，以及支撑 §5.5 评分与主题频次的原始数据。

第二类材料必须被视为”设计性补充材料”，而不是人类受试数据。它们的用途是帮助下一轮真人访谈更聚焦地询问时机适配、打扰负担、社会可接受性、解释透明度与依赖风险，而不是用来替代真实访谈结论。