

多感官协同的冶金安全体感设备交互界面设计

魏源远

中钢武汉安全环保研究院股份有限公司 湖北 武汉 430080

摘要：本文聚焦冶金安全生产中人的行为管控，针对安全技能培训的体感设备交互界面，提出一种基于多感官协同理论的设计范式。该范式融合视觉、听觉、触觉（力反馈/振动）及前庭觉等多通道感知，结合冶金安全规程、操作规范与应急流程，构建高度沉浸、直觉化且低认知负荷的智慧交互系统。通过分析高温熔融金属泄漏、有毒气体扩散、设备异常振动等典型高危场景的信息特征与人员反应，系统阐述了界面设计原则、信息编码策略、交互逻辑及技术实现路径。研究融合人因工程、认知心理学与VR/AR技术，论证该界面在提升态势感知、缩短应急决策时间、降低误操作率和强化肌肉记忆方面的核心价值。文章还展望其与数字孪生、人工智能融合的发展方向，为构建下一代冶金安全生产保障体系提供理论与实践支撑。

关键词：冶金安全；体感设备；多感官协同；交互界面设计；虚拟现实

引言

冶金工业作为国家基础原材料支柱产业，工艺复杂、高危环节多，安全事故仍频发。除设备与管理因素外，人员在复杂情境下的认知局限与行为失误是关键诱因。传统安全培训依赖纸质资料和二维图纸，信息抽象、缺乏真实环境模拟，导致“学用脱节”；日常监控中，视觉信息过载易引发“注意力隧道效应”，忽视关键非视觉预警。体感交互技术为破解上述难题带来新机遇。鉴于人类通过多感官整合形成准确环境认知，本研究提出构建基于多感官协同的体感设备交互界面设计框架，融合视觉、听觉、触觉等通道，契合人因工程原理。该框架不仅提升安全培训沉浸感与实效性，还优化现场人机交互效率，助力降低误操作与事故风险，推动冶金工业向“零事故”智能工厂迈进。

1 理论基础与模型构建

1.1 安全生产管理五要素与人的行为管理

依据我国安全生产管理体系，安全管理的核心可归纳为“人、机、料、法、环”五大要素。其中，“人”作为最活跃、最关键的要素，其行为直接决定了安全绩效。在冶金行业，人的行为管理不仅包括遵章守纪，更深层次地体现在面对突发险情时的应急决策与精准操作能力上。因此，安全技能培训的终极目标，是将标准化的操作规程（SOP）内化为操作员在高压环境下的本能反应。这要求培训工具必须超越简单的知识灌输，走向深度的情境模拟与肌肉记忆塑造。

1.2 多感官协同的人因工程理论模型

基于上述需求，本研究构建了一个“场景-感官-行为”闭环反馈的理论模型（见图1）。该模型的核心在

于：（1）场景驱动：以真实的冶金高危场景（如熔融金属泄漏）为输入源，确保训练内容与生产实际高度统一。（2）多感官映射：将场景中的关键危险信息（如热辐射、刺耳噪音、设备振动）精准映射到视觉、听觉、触觉等最适宜的感官通道上。（3）行为输出与反馈：操作员基于多感官输入做出应急操作（如关闭阀门、启动喷淋），系统通过力反馈等手段即时验证操作的准确性（如扭矩是否足够），并将结果反馈回场景，形成闭环。此模型强调，有效的安全交互界面不仅是信息的展示窗口，更是连接虚拟危险与真实操作行为的桥梁，其设计必须严格遵循冶金行业的工艺安全规范、设备操作手册和应急预案。



2 冶金高危场景的多感官信息特征分析

冶金高危场景具有鲜明且独特的多感官“签名”。高温熔融金属风险表现为刺眼强光、流动形态变化及烟雾颜色浓度等视觉特征；金属液流动声突变、蒸汽爆炸巨响或热应力异响等听觉信号；以及强烈热辐射、地面微震等触觉与热觉反馈，高端系统还可通过气味发生器模拟绝缘材料烧焦味以增强真实感。有毒有害气体泄漏则呈现黄绿色云团扩散、仪表异常跳变等视觉线索，高压泄漏的高频嘶嘶声与报警器音调区分危险等级，同时通过风扇阵列模拟气流方向、可穿戴设备施加胸部压缩感以体感呼吸阻力，甚至利用屏幕晃动或座椅倾斜模拟一氧化碳中毒引发的前庭眩晕^[1]。大型旋转设备故障则体现为异常抖动、冒烟、油溅等视觉现象，不同频率与节奏的噪声（如摩擦啸叫、周期性撞击）精准指示故障类型，并通过力反馈平台或振动马达复现特征振动，操作杆异常阻力或“空行程”则提供关键本体觉反馈。这些多模态信息共同构成每类风险的独特感知标识，为体感交互界面设计提供了精准映射依据。

3 多感官协同交互界面设计原则与参数优化

3.1 核心设计原则

（1）信息-通道匹配原则：根据信息的固有属性和通道的生理特性进行最优匹配。空间定位信息优先使用听觉和视觉；紧急告警与方向指引优先使用触觉和听觉；状态与数值信息优先使用视觉；强度、纹理与力反馈用专属触觉/力觉通道。（2）协同一致性原则：当同一信息通过多个通道呈现时，必须保证其在语义、时空上的一致性。例如，模拟一个从左侧袭来的热浪，视觉、听觉、触觉的反馈必须同步且方位一致。（3）感官负载平衡原则：系统应动态感知主操作通道（通常是视觉）的负载，当其过载时，自动将次级信息切换到其他通道。（4）最小必要干预原则：反馈的强度、频率和持续时间应恰到好处，足以引起注意并传达信息，但又不至于造成惊吓或干扰主要任务。

3.2 关键参数优化设计

为确保设计原则的有效落地，本研究对核心感官通道的关键参数进行了优化设计，具体参数见表1。

表1 多感官协同交互界面关键参数优化表

感官通道	应用场景	关键参数	优化值/范围	设计依据
视觉	高温熔融金属泄漏	光源亮度	800-1200cd/m ²	模拟真实熔融金属强光，避免过曝导致细节丢失
	有毒气体泄漏	气体粒子扩散速度	0.5-2.0m/s	匹配真实气体在车间内的扩散速率，用于判断风向

续表：

感官通道	应用场景	关键参数	优化值/范围	设计依据
听觉	高压气体泄漏	报警音调频率	2000-4000Hz	人耳对此频段最敏感，穿透性强，不易被环境噪音掩盖
	设备异常振动	故障特征频率	根据设备型号预设(e.g.,50Hz, 120Hz)	精准复现不同故障（如轴承损坏、齿轮断齿）的独特声纹
触觉(振动)	方向指引/警报	振动频率	150-250Hz	该频段振动易于被皮肤感知，且能精确定位到身体部位
	模拟设备振动	振动强度(RMS加速度)	0.5-2.0m/s ²	覆盖从轻微异常到严重故障的振动强度范围
触觉(力反馈)	阀门开关操作	扭矩阈值	2.0-5.0N·m	匹配真实工业阀门的操作手感，确保“关紧”的肌肉记忆
	紧急制动杆拉动	阻力曲线	非线性递增(初始轻，末端重)	模拟真实机械装置的沉重感和到位感

4 系统架构与关键技术实现

4.1 硬件平台

在视觉层面，需要采用高分辨率、低延迟、宽视场角的VR/AR头显，以提供沉浸式的视觉体验和精确的空间叠加信息。听觉层面，则依赖于支持HRTF（头部相关传递函数）算法的高保真空间音频耳机，能够精准还原声音的三维方位和距离感。触觉反馈是本系统的核心特色，需部署多层次的硬件：全身层面，采用集成数十个独立可控振动马达的触觉背心或套装，可编程生成复杂的空间振动模式；手部层面，配备高精度的力反馈手套，能够模拟抓握、按压、碰撞等多种力感；对于需要模拟大型设备低频振动的场景，则需引入专业的运动平台或震动地板^[2]。此外，为追求更高阶的沉浸感，系统还可选配温控模块（用于模拟冷热感）和风效模块（用于模拟气流方向与速度），从而构建一个全方位的多感官输出矩阵。

4.2 软件与交互逻辑

整个系统以Unity或Unreal Engine等成熟的商业游戏引擎作为底层场景构建平台，利用其强大的物理仿真能力，精确模拟冶金环境中的流体动力学、热传导、刚体碰撞等复杂物理现象。在此之上，核心是多感官信息编码器，它充当了虚拟世界事件与物理世界反馈之间的翻译官。当场景引擎中触发一个特定事件（如“高炉西侧管道破裂”）时，编码器会立即将其解析为一组跨通道

的、结构化的指令集。它会指示视觉子系统在AR视野中标注破裂点，叠加红色警示框和动态的气体扩散粒子效果；同时命令听觉子系统播放一段经过HRTF处理的、源自西侧的高压气体泄漏声；并驱动触觉子系统，触发背心左侧区域的高频、短促振动序列以模拟气体冲击感，同时通过力反馈手套向用户双手施加一个与关闭虚拟阀门所需扭矩相匹配的阻力^[3]。为了使系统更具智能性，还需引入自适应调度器。该模块能够通过头显内置的眼动仪、心率传感器等设备，实时采集用户的生理数据，评估其当前的认知负荷与情绪状态。若检测到用户视觉注意力分散或心率异常升高，调度器便会动态调整策略，例如暂时抑制非关键的视觉通知，转而通过更温和的触觉提示来传递次要信息，从而实现真正的人本化交互。

4.3 应用场景示例：熔融铁水包倾翻应急演练

为了直观展示系统的运作流程，以“熔融铁水包倾翻”这一典型高危场景的应急演练为例。演练开始时，操作人员佩戴全套体感设备，在高保真的VR车间中进行常规巡视。系统突然模拟吊运铁水包的钢缆因疲劳断裂。事件触发的瞬间，多感官协同响应机制全面启动：视觉上，刺眼的橙红色光芒瞬间照亮整个虚拟场景，炽热的铁水呈抛物线状泼洒而出，撞击地面后激起浓密的黑烟和火花；听觉上，先是尖锐的金属撕裂声，紧接着是震耳欲聋的铁水撞击地面的轰鸣声，以及此起彼伏、不同音调的火灾与疏散警报声交织在一起；触觉上，操作员的全身首先感受到一股由远及近的、强烈的热浪冲击（由背心加热元件和风扇协同模拟），脚下站立的平台随之发生剧烈震动，同时双手需要用力拉动眼前的虚拟紧急制动杆，而力反馈手套则提供了强大且真实的阻力，模拟了机械装置的沉重感。在此高度紧张的氛围中，系统并未放弃对操作员的引导。触觉背心在背部中央位置开始给出温和、持续、有节奏的脉冲振动，无声地但坚定地指示着预设的安全逃生通道方向。与此同时，AR界面在用户视野的边缘区域，以高对比度、简洁的图标清晰地标出了最近的消防沙箱和紧急淋浴装置的位置。整个过程将危险感知、应急操作与逃生引导无缝融合在一个多感官协同的交互闭环中，为操作员提供了一次身临其境、刻骨铭心的安全训练。

5 设计优势与效益分析

5.1 极大提升态势感知

通过全方位模拟真实世界的感官输入，操作人员能建立起对危险环境更完整、更直观的心理模型。他们不仅能“看到”危险，更能“听到”、“感觉到”甚至“闻到”危险，从而对威胁的性质、规模、方位和紧迫

性做出更精准的判断。

5.2 显著缩短应急决策与反应时间

触觉和听觉通道具有极低的感知阈值和极快的神经传导速度。一个精准的触觉提示（如手腕振动指示逃生方向）比在屏幕上寻找一个闪烁的箭头要快得多。这种“直觉化”的交互方式能帮助操作员在生死攸关的几秒钟内做出正确反应^[4]。

5.3 有效降低认知负荷与误操作率

通过将不同类型的信息分流到最适合的感官通道，避免了单一视觉通道的拥堵。操作员可以更从容地处理复杂任务，减少因信息过载而导致的遗漏或误判。力反馈的引入更能确保关键操作（如阀门开关）的准确性，防止“点错”或“力度不足”。

5.4 强化肌肉记忆与程序性知识

在多感官环境中反复演练标准操作程序（SOP），尤其是涉及肢体动作的部分，能将知识从陈述性记忆（知道是什么）转化为程序性记忆（知道怎么做）。这种“身体学会”的技能在真实高压环境下更具鲁棒性，不易遗忘。

6 结语

本文提出的多感官协同体感设备交互界面设计，是对传统安全人机交互模式的一次深刻革新。它不再将人视为一个被动的信息处理器，而是将其视为一个拥有丰富感知能力的主动参与者。通过科学地协同视觉、听觉、触觉等多通道，我们能够构建出一个更符合人类认知天性的交互环境，从而在根本上提升操作员在高危冶金环境中的感知、决策与行动能力。这不仅是技术的胜利，更是人因理念的回归。未来的智能冶金工厂，必然是一个技术与人性高度融合的场所。多感官协同交互界面，正是连接冰冷的钢铁洪流与温暖的人类智慧之间的一座关键桥梁。随着相关技术的不断成熟与成本的下降，这一设计理念必将从实验室走向广阔的冶金生产一线，为守护每一位冶金工人的生命安全贡献不可估量的价值。

参考文献

- [1]张文显.冶金企业安全管理模式创新策略[J].金属制品,2025,51(05):63-66.
- [2]范京津.可穿戴设备中的运动传感器技术发展历程研究（1980-2023）[D].南京信息工程大学,2025.DOI:10.27248/d.cnki.gnjqc.2025.000003.
- [3]邓卫斌,刘勇,李淑慧.基于模块化的组合式体感设备设计[J].设计,2022,35(03):109-111.
- [4]李志强,王海燕.基于VR的冶金企业安全培训系统人机交互设计研究[J].冶金安全与环保,2025,52(04):45-49.