

Research on the Function Mapping Method of Main Control Room Human-Machine Interface Based on Task Analysis

Jiang Wu

China General Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

The design of the human-machine interface (HMI) in nuclear power plant control rooms directly affects operator efficiency and nuclear safety. To address current issues such as insufficient task matching and poor dynamic adaptability of interfaces, this study proposes a control room HMI function mapping method based on task analysis. By introducing Hierarchical Task Analysis (HTA) and Functional Abstraction Hierarchy (FAH) theories, the system analyzes operator cognitive behavior and task flow, constructing a collaborative framework for task decomposition and cognitive modeling. On this basis, an interface mapping strategy is designed with semantic continuity and multimodal feedback, and it is validated in typical scenarios such as accident handling, routine inspections, and alarm processing. Results show that this method can effectively enhance interface logical consistency and interaction efficiency, significantly reduce operator cognitive load, and improve operation accuracy and response speed, providing both theoretical and practical pathways for control room interface optimization.

Keywords

task analysis; human-machine interface; function mapping; cognitive modeling; nuclear power plant main control room

基于任务分析的主控室人机界面功能映射方法研究

武江

中广核研究院有限公司, 中国 · 广东 深圳 518000

摘要

核电厂主控室人机界面设计直接影响操纵员的操作效率与核电安全。针对当前界面任务匹配度不足、动态适应性差等问题, 本研究提出一种基于任务分析的主控室人机界面功能映射方法。通过引入层次任务分析 (HTA) 与功能抽象层级 (FAH) 理论, 系统解析操纵员认知行为与任务流, 构建任务分解与认知建模的协同框架。在此基础上, 设计语义连续性与多模态反馈的界面映射策略, 并在事故处理、日常巡盘与报警处理等典型场景中验证。结果表明, 该方法能有效提升界面逻辑一致性与交互效能, 显著降低操纵员认知负荷, 提高操作准确率与响应速度, 为主控室界面优化提供了理论与实践路径。

关键词

任务分析; 人机界面; 功能映射; 认知建模; 核电厂主控室

1 研究背景与意义

核电厂主控室作为核电站运行的核心, 其人机界面设计直接影响操纵员的操作效率与决策准确性, 进而关系到整个电站的安全与可靠。在现代数字化主控室系统中, 基于任务分析的界面功能映射成为连接用户认知模型与系统功能架构的核心方法论, 通过解析操纵员在特定工况下的任务流与信息需求, 构建符合人因工程原则的交互架构, 优化界面布局与导航路径, 实现界面元素与操作任务间的精准时空对应。尽管已有研究在任务分析与界面设计领域取得一定成果, 但仍面临复杂任务分解与动态映射、多任务并行及突

发事件处理等挑战。因此, 本研究旨在提出一种系统化、可操作的界面功能映射方法, 解决当前设计中的关键问题, 为提升主控室人机交互效能、保障核安全提供理论支持与实践指导。

2 行业研究现状

当前基于任务分析的主控室人机界面功能映射研究已取得了一定成果, 尤其是在任务分解与认知建模方面积累了丰富经验。然而, 现有研究仍存在诸多不足。首先, 多数研究侧重于静态任务场景的功能映射, 而对动态任务场景的适应性设计关注较少, 难以满足实际运行中多样化的交互需求。其次, 现有方法在多模态信息整合与时空协调机制方面的探索较为有限, 导致界面在复杂工况下的表现欠佳。此外, 针对报警处理、事故响应等关键任务的功能映射研究仍显不

【作者简介】武江 (1992-), 男, 中国广东深圳人, 本科, 工程师, 从事反应堆控制室及人因工程设计研究。

足,亟需开发更为系统化的设计方法。本文正是基于上述研究缺口,提出一种综合性的功能映射方法,旨在提升核电站主控室人机界面的整体性能与用户体验。

3 基于任务分析的主控室人机界面功能映射方法

3.1 任务分解方法

3.1.1 层次任务分析 (HTA)

层次任务分析 (Hierarchical Task Analysis, HTA) 作为一种系统化的方法,在构建原子化操作单元中发挥了重要作用。HTA 通过将复杂的核电运行任务分解为多个可执行的子任务序列,从而实现任务结构的清晰描述。根据 ISO 11064 标准,核电任务通常被划分为监控、诊断、控制与验证四个功能域,每个功能域进一步细化为具体的操作步骤。例如,在丧失给水事件的复训中,反应堆操纵员 (RO) 和汽轮机操纵员 (TO) 的任务序列被详细记录并分类,以揭示其软操作特征。研究表明,TO 的软操作次数显著高于 RO,且界面管理任务占据了主要部分,这为后续的功能映射提供了重要依据^[1]。此外,HTA 还能够识别任务中的潜在认知冲突,例如当操作序列熵值超过阈值时,系统需自动触发折叠式信息架构,以减少操纵员的认知负荷。

3.1.2 任务层级建模

任务层级建模是将复杂任务分解为多级结构的重要方法,其目标在于明确各级任务的内容与关系,从而为界面设计提供清晰的逻辑框架。以安注工况处理为例,任务层级可以建模为三级结构:全局层、系统层和设备层。在全局层,任务主要关注冷却剂注入需求的判断;在系统层,任务涉及硼浓度调节与泵组启停等具体操作;在设备层,则聚焦于阀门开度调整与压力监测等细节操作。功能抽象层级 (Functional Abstraction Hierarchy, FAH) 理论进一步要求将物理参数映射为功能意图,例如通过动态色带与水位梯度图符联合呈现稳压器液位,使操纵员无需数值解析即可感知系统偏离阈值程度^[2]。这种层级建模方法不仅有助于任务分解,还为界面功能映射奠定了坚实的基础。

3.2 认知建模与功能抽象

3.2.1 认知行为特征分析与建模

在特定工况下,操纵员的认知行为特征对界面功能映射具有重要影响。研究表明,操纵员在事故处理过程中需要快速处理大量信息,这对信息处理需求和注意力分配提出了较高要求。例如,在蒸汽发生器传热管破裂 (SGTR) 事故处理中,操纵员需同时关注多个系统的参数变化,并迅速做出决策。基于 Rasmussen 决策阶梯模型的作用原理,操纵员的认知行为可分为技能型、规则型和知识型三种模式,每种模式对信息显示的需求不同。因此,界面设计需充分考虑这些认知特征,通过对典型任务下操纵员的脑力负荷及行为认知过程进行建模,辅助分析以减少操纵员的认知负荷并提高

操作效率。

3.2.2 功能抽象层级 (FAH) 理论应用

功能抽象层级 (FAH) 理论通过将物理参数映射为功能意图的视觉符号,使操纵员能够更直观地感知系统状态。例如,在数字化主控室系统中,稳压器液位通过动态色带与水位梯度图符联合呈现,使操纵员无需依赖精确数值即可判断系统是否偏离阈值。此外,FAH 理论还强调将关联控制系统集中布局在视线焦点区,通过色彩编码 (如红色闪烁表示异常参数) 和空间拓扑设计,引导操纵员的注意力资源流向关键决策节点。这种方法不仅提高了界面的信息传达效率,还显著降低了操纵员的认知负荷,为复杂工况下的操作提供了有力支持。

3.3 人机界面功能映射策略

3.3.1 语义连续性设计

语义连续性设计通过实现任务流与界面组件的动态绑定,确保任务逻辑与界面视觉锚点保持同构性。基于生态界面设计 (Ecological Interface Design, EID) 原理,操作流程图的视觉锚点需与任务逻辑紧密关联。例如,在全局态势图中,关键系统 (如反应堆冷却剂系统、余热排出系统) 采用环状拓扑串联,次级参数通过热区交互按需展开,从而实现任务流与界面元素的无缝衔接。在数字化规程执行中,界面需构建“任务步骤-参数阈值-操作反馈”的闭环链路,例如在执行停堆指令时,界面同步显示中子通量下降曲线、控制棒插入状态及安全壳压力变化,以增强操作确认的可信度。

3.3.2 多模态反馈设计

多模态反馈设计通过整合视觉、听觉和触觉等多种感官通道,强化操作确认与信息传达的效果。研究表明,在数字化控制室中,单一模态的信息反馈难以满足复杂工况下的操作需求。例如,在处理复合报警时,操纵员容易因优先级误判或关联报警遗漏而导致操作失误。为此,界面设计需采用多模态反馈机制,例如通过 105dB 脉冲蜂鸣+1.2g 振动的方式强化操作确认,同时结合动态报警关联图谱技术,自动生成以故障源为中心的辐射状拓扑图,通过节点大小、连线粗细和色温渐变等方式直观展示报警信息的时间演进与系统关联度^[3]。这种设计不仅提高了信息传达的效率,还显著增强了操纵员的情境意识与操作信心。

4 不同任务场景下的功能映射应用

4.1 日常巡盘任务

针对日常巡盘任务中参数繁杂导致的认知负荷问题,基于任务分析的功能映射方法提出了分层递进设计策略。顶层通过自定义仪表矩阵与色阶编码展示全局态势,中层利用跨屏联动面板支持多维参数对比,底层开发异常追溯引擎关联历史数据与三维模型。结合参数监视的“三阶段认知特征”,界面引入动态切换机制,在初始、中期与终期阶段分

别优先呈现热力图、趋势图与细节数据。实验证实，该架构显著缩短了巡盘时间，降低了误检率，并提升了操纵员满意度。

4.2 事故处理任务

在核电厂主控室中，事故处理任务对界面功能映射要求极高。以 SGTR 事故为例，该方法通过解析破管定位、安注启动等子任务的交互需求，利用压力梯度曲线、放射性热力图及参数动态关联等设计，精准支持操纵员决策。针对全厂断电等复杂工况，采用分屏协同架构结合眼动追踪技术，有效缓解认知负荷。研究表明，该任务驱动的功能映射方法能显著提升事故处理效率，降低人因失误率，保障核安全。

4.3 报警处理任务

报警处理是核电厂主控室操纵员在异常工况下的核心任务，其执行效率依赖于多模态信息的时空协调。依据 IEC 60964:2009 标准，报警界面需实现“视觉-听觉-操作”的三维耦合以确保及时响应，但操纵员在处理复合报警时常出现优先级误判、关联报警遗漏等问题。为解决这些难题，基于任务分析的功能映射方法引入了动态报警关联图谱与声场定位算法：图谱以辐射状拓扑展示报警严重程度与系统关联度（节点大小表征等级、连线粗细反映关联、色温渐变指示时间趋势），而声场定位则赋予报警声源空间方向感，辅助快速定位。

5 方法验证与评估

5.1 验证方案设计

为验证所提出的基于任务分析的主控室人机界面功能映射方法的有效性，设计了涵盖场景、人员与任务的实验方案。实验场景选取了某第三代数字化核电厂主控室环境，并模拟了包括正常运行工况、事故处理工况以及报警响应工况在内的多种典型操作场景；参与人员由 12 名资深操纵员组成；实验任务则分为三大类，包括日常巡盘任务、事故处理任务和火警响应任务，主要测试操纵员在面对复杂工况时的信息处理能力与决策准确性。通过上述实验设计，能够有效验证所提功能映射方法在不同任务场景下的适用性与优越性。

5.2 评估指标确定

为全面评估界面功能及操纵员表现，本研究选取了多项客观与主观指标进行综合度量。首先，任务完成时间被定义为从接收到任务指令至完成所有操作所需的总时长，这一指标直接反映了界面功能映射对操作效率的影响。其次，错误率用于衡量操纵员在执行任务过程中出现的操作失误频率，包括参数误读、控制动作偏差等，其计算方式为总错误次数与总操作步数的比值。此外，主观满意度通过问卷调查的形式获取，问卷内容涵盖了界面易用性、信息呈现清晰度以及多模态反馈的有效性等多个维度，采用 Likert 五级量表进行评分。为进一步量化认知负荷，引入了 NASA-TLX

(National Aeronautics and Space Administration Task Load Index) 量表，该量表从脑力需求、体力需求、时间需求、努力程度、绩效水平和挫折感六个方面对操纵员的主观感受进行评估。上述指标的综合运用，不仅可以从定量角度分析功能映射方法的性能，还能从定性角度揭示其对操纵员工作体验的改善效果。

5.3 实验结果分析

实验共收集了 12 名操纵员在三种任务场景下的表现数据，统计分析结果表明，所提出的功能映射方法在多个维度上均展现出显著优势。在日常巡盘任务中，采用分层递进式界面架构后，操纵员平均巡盘时间缩短了约 23%，误检率降低了 15%，这表明功能映射有效缓解了多子系统参数监控带来的认知负荷。在事故处理任务中，以 SGTR 事故为例，操纵员在关键子任务（如破管定位与安全注入系统启动）中的操作准确率提升了 18%，且任务完成时间减少了 12%。这得益于界面功能映射对事故规程执行逻辑的严格遵循，以及通过色彩编码与空间拓扑设计对注意力资源的有效引导。在报警处理任务中，动态报警关联图谱的应用显著提高了操纵员对复合报警的处理效率，优先级误判率降低了 21%，关联报警遗漏率减少了 17%。此外，主观满意度调查结果显示，超过 85% 的操纵员对界面的易用性与信息呈现方式表示满意，认为多模态反馈机制在强化操作确认方面发挥了重要作用。综合来看，实验数据充分证明了所提功能映射方法在提升核电厂主控室人机交互效率与安全性方面的有效性。

6 结论与展望

本研究基于任务分析的方法，提出了一种系统化的人机界面功能映射框架，旨在提升核电厂主控室操作的效率与安全性。通过层次任务分析 (HTA) 和认知建模技术，将复杂的核电运行任务分解为可管理的原子化操作单元，并结合功能抽象层级 (FAH) 理论，实现了物理参数到功能意图的视觉符号映射。这一方法不仅显著降低了操纵员的信息处理负担，还通过语义连续性设计与多模态反馈机制，增强了界面与任务流之间的动态适配性。实验结果表明，所提方法在事故处理、日常巡盘及报警处理等多种任务场景中均表现出色，能够有效减少操作失误率并提高任务完成效率。此外，该方法还为第四代智能化主控室系统的界面设计提供了理论支持与实践指导，推动了人因工程学和人工智能技术在核电厂人机交互领域的深入应用。

参考文献

- [1] 梁涛. 核电厂数字化事故规程的研究与实践[J]. 电子技术应用, 2023, 49(S01): 200-203.
- [2] 刘松林; 李菁. 核电厂数字化报警系统设计及优化[J]. 中国信息界, 2024, (4): 74-76.
- [3] 王志敏行; 邓士光; 徐云龙; 段鹏飞; 李婉婷. 语音识别在核电厂控制室中的应用研究[J]. 自动化仪表, 2023, 44(S01): 259-262.