

# 基于 GDIA 的钢铁连铸安全生产管控系统信息需求数据模型

张 充<sup>1</sup>, 巴烈电<sup>2</sup>, 张 伟<sup>1</sup>, 赵挺生<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074;  
2. 大冶特殊钢有限公司, 湖北 黄石 435000)

**摘 要:** 应用信息化技术实施安全生产管控是钢铁行业的研究热点, 当前研究侧重以技术为中心提出解决方案, 缺少探讨人和技术元素之间有效交互、协同方式。本文基于 GDIA 识别钢铁连铸安全生产管控的主要目标、达成的 4 个决策点和用于制定决策的 3 个层次信息需求; 构建 UML 用例数据模型和 4 个序列数据模型, 以准确描述在达成 4 个决策点的过程中, 安全生产管控系统应提供的信息和服务、系统内部的工作流程, 以及与安全生产管理人员之间的交互行为逻辑; 最后基于 GDI 结构图和 UML 数据模型开展系统功能设计、实现与验证, 实现基于安全生产人员心智模型的人机高效交互与协同, 提供以技术为基础、以人为中心的信息化、智能化安全生产管控服务, 促进钢铁连铸安全生产管控效能提升。

**关键词:** 钢铁连铸; 安全生产; 管控系统; 信息需求; 数据模型

## 0 引言

钢铁生产的连铸作业是钢厂生产工艺中的重要环节之一, 保障其安全生产对整条钢铁生产链健康稳定地运行具有重大意义<sup>[1]</sup>。随着“工业 4.0”、“中国制造 2025”等概念提出, 国内钢铁行业信息化水平较 10 年前有了质的飞跃, 安全生产面临新形势, 应用信息化技术实施安全生产管控成为钢铁行业的研究热点。

关于钢铁行业信息化、智能化安全生产管控技术研究方面, 芦永明<sup>[2]</sup>和聂鑫<sup>[3]</sup>分别通过安全监测数据分析实现对作业工况和安全风险的识别和评估, 促进了安全管理规范化、标准化和系统化; 这类研究重点在利用安全监测数据实现对安全隐患的动态监测以预防事故发生, 缺乏对安全生产管控服务平台化的探索。陈龄龙<sup>[4]</sup>和黄爽<sup>[5]</sup>搭建安全生产智能监控平台, 实现重点关注领域报警信息的可视化联动, 提高钢铁企业安全监控智能化水平; 张充<sup>[6]</sup>等基于“工业互联网+安全生产”协同融合发展理念提出数字化、智能化的钢铁行业安全生产管控系统架构, 以促进安全管控新型能力的提升; 这类研究为构建钢铁行业安全生产管控系统和平台提出了解决方案。但目前应用信息化、智能化技术于安全生产实践的过程中, 主要是以技术为中心解决问题的导向, 系统和平台与安全生产管理人员的心智模型存在一定差异, 容易出现由于系统终端用户的信息鸿沟而产生决策失误, 造成安全事故<sup>[7]</sup>。如 2023 年 6 月 22 日辽宁营口钢铁厂实时监测炉缸温度失效, 安全管理人员未知炉缸耐火材料厚度, 没有采取及时管控措施, 致使炉缸烧穿, 造成 5 人死亡, 4 人受伤<sup>[8]</sup>。由此可见, 在钢铁生产这种复杂的社会技术系统中, 人和技术元素协同运作, 相互依存, 以实现系统的安全目标极为重要<sup>[9]</sup>。结合安全管理人员心智模型, 在人-机有效交互、协同方式基础上开发安全生产管控系统和平台, 是适用于钢铁生产复杂、高密度作业系统安全管控的有效解决方案。

因此, 针对现有研究侧重以技术为中心解决问题, 缺少人和技术元素有效交互、协同运行的局限, 本文以人机高效协同的技术方案为导向, 探讨安全管理人员与安全生产管控系统的信息交互方式与内容, 并开展钢铁连铸安全生产管控系统功能设计与实现。

## 1 理论基础

### 1.1 GDIA 方法

GDIA (Goal Directed Information Analysis) 是 Raj Prasanna<sup>[10]</sup>于 2009 年提出的一种适用于获取信息管理系统的信息需求的认知性任务分析方法。该方法同时结合 GDTA (Goal Directed Task Analysis) 方法<sup>[11]</sup>在

目标导向方面的优势和 ACTA (Applied Cognitive Task Analysis) 方法<sup>[12]</sup>在需求覆盖方面的优势, 能够实现全面深入、准确有效的信息需求识别, 为以用户为中心的系统设计提供更为有效的支持, 其实施流程如图 1 所示。

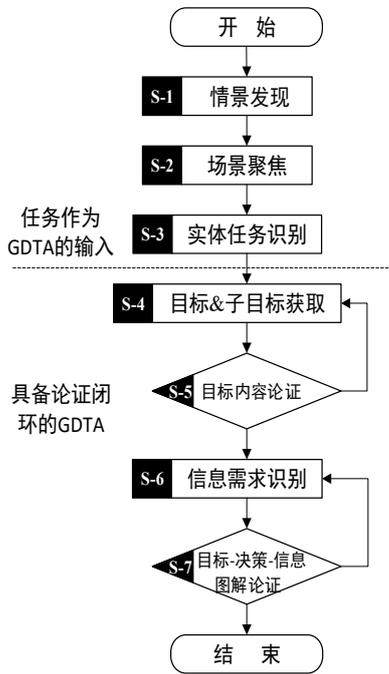


图 1 GDIA 操作流程

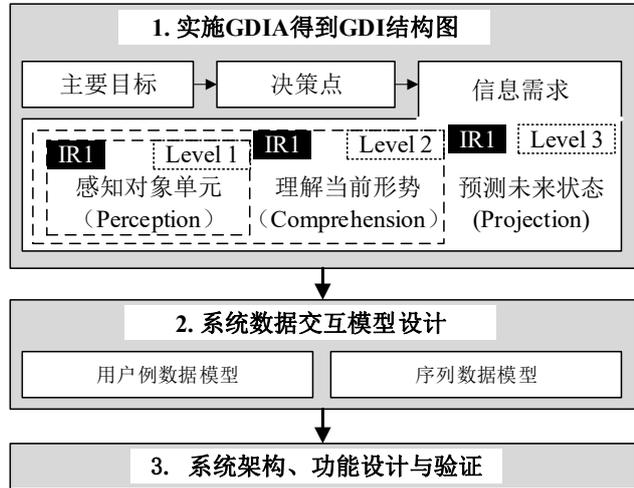


图 2 研究方法框架

## 1.2 SA 信息层次

SA (Situation Awareness) 指在一定的时间和空间范围内对环境因素的感知、对其意义的理解以及对不久的将来的状态的预测<sup>[13]</sup>。用户与系统交互获取信息以实现 SA 的信息需求被划分为 PCP (Perception-Comprehension-Projection) 结构的 3 个层次内容:

感知层信息 (Perception), 指从业者用于感知所处环境中各类元素的信息。对于钢铁连铸安全生产管理人员而言, 只有掌握了作业员工的位置、机械设备的状态、工作环境温度、湿度等基本信息, 才能为了解生产系统的安全状态提供支持。

理解层信息 (Comprehension), 指从业者通过从感知到的信息元素中获取更深的认知来理解当下情况的信息。对于钢铁连铸安全生产管理人员而言, 掌握安全事故发生模式和诱因、生产现场安全形势等信息, 可以促进对当前生产系统安全状态的深刻理解。

预测层信息 (Projection), 指能够为从业者预测对象未来状态提供直接支持的信息。对于钢铁连铸安全生产管理人员而言, 主动风险评估和预测模型、安全监测和预警方法、应急响应准备策略等信息为预测钢铁连铸生产系统未来安全态势提供重要的支撑。

## 1.3 研究方法

本文研究思路如图 2 所示: 首先基于 GDIA 分析钢铁厂安全生产管控信息需求, 制定钢铁连铸安全生产管控的 GDI (Goal-Decision-Information) 结构图; 然后基于 GDI 结构内容, 设计钢铁连铸安全生产管控系统的数据交互模型, 主要包括用户数据例模型和序列数据模型; 最后开展系统功能设计实现与验证。

# 2 钢铁连铸安全生产管控信息需求

## 2.1 GDIA 实施过程

基于 GDIA 的 7 个主要步骤, 逐步完成钢铁连铸安全生产管控目标、决策、信息的识别, 并构建 GDI 结构图进行评测和改进, 各阶段涉及的内容如表 2 所示。

表 2 GDIA 实施过程

阶段	开展方式	内容
S-1	正式/非正式文件研习	大冶特殊钢有限公司转炉厂钢铁连铸机技术操作规程 安全生产管理技术体系 安全生产目标、安全生产组织结构和职责、安全管理制度等
	S-2 问卷调查、半结构化面谈	大冶特殊钢有限公司 安全生产管理队伍 钢铁连铸生产工艺流程、主要安全隐患源、关键控制情景、安全管理工作内容、现有安全监管系统业务、安全管理工作优化需求等
S-3	结构化面谈	宝武钢铁集团有限公司 安全生产管理队伍
S-4	面谈	宝武钢铁集团有限公司 安全生产管理队伍
S-5	实景观察	大冶特殊钢有限公司转炉厂钢铁连铸生产作业场景
S-6	半结构化面谈	大冶特殊钢有限公司 安全生产管理队伍 开展安全管理工作的思维模式 中钢集团武汉安全环保研究院安全事业部 安全检查报告、安全咨询服务细节等
	专家评测	行业专家队伍评测GDI结构
S-7	用户评测	大冶特殊钢有限公司 安全生产管理队伍 GDI结构内容、钢铁连铸安全管控系统功能与界面设计

## 2.2 GDIA 实施结果

### 2.2.1 目标和决策识别

梳理钢铁连铸安全生产管控的目标与决策点，经论证后，结果如图 3 所示。

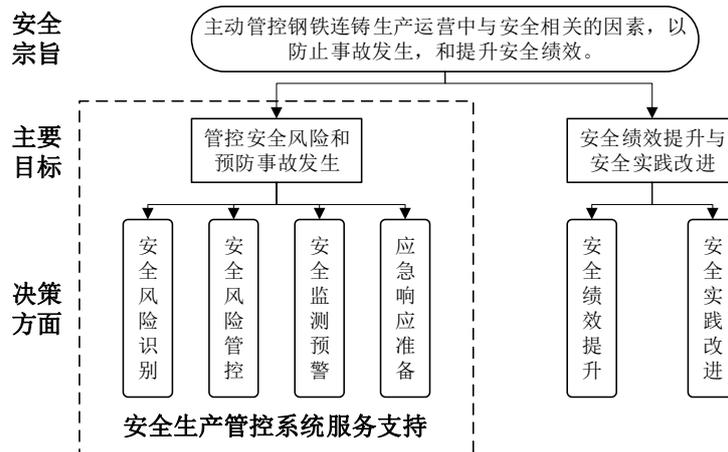


图 3 钢铁连铸安全生产管控目标与决策点

### 2.2.2 信息需求识别

#### (1) 感知层信息需求

各类静态、动态的感知层信息可以全面客观地描述钢铁连铸生产系统的结构组成、运行原理以及当前安全管理工作内容，为安全生产管理人员提供深入了解生产系统特点、当前安全形势提供底层信息来源，如表 3 所示。

表 3 感知层信息需求

静态信息		动态信息		
历史事故数据	生产工艺流程	人员状态	设备状态	工艺过程参数
历史险情数据	○生产原料	○作业行为	○应力	○钢包回转
历史检查数据	○生产设备	○劳保物品	○位移	○中间包浇注
安全行为观察数据	○工艺步骤	○实时位置	○倾斜度	○结晶器振荡
安全认知调查数据	操作工安全素质	○生理状态	○腐蚀	○二次冷却
安全生产组织结构	○技术资质	环境因素	○裂缝	○拉坯矫直
安全生产管理制度	○健康状况	○温度	物料状态	○钢坯切割
安全生产管理技术	○安全培训	○湿度	○体积	
安全角色与责任	设备使用性能	○风速	○质量	
安全应急资源	生产环境条件	○气压	○温度	
安全应急方针	生产物料信息	○有害气体	○形态	

## (2) 理解层信息需求

通过获取理解层面的信息，钢铁连铸安全管理人员可以更深刻地认识影响当前钢铁连铸生产系统的安全风险总体情况、安全风险管控需求、安全监控预警要点和安全应急响应准备情况，为预测生产系统未来一定时间内的安全态势提供认知基础，如表 4 所示。

表 4 理解层和预测层信息需求

理解层信息需求			
安全风险总体情况	安全风险管控需求	安全监控预警方法	安全应急响应准备
○事故发生模式	○生产现场安全风险	○关键情景控制指标	○应急响应协作计划
○事故发生致因	○现有安全管理方法	○安全监测预警体系	○应急资源部署方案
○生产安全形势	○安全管理优化方向	○安全监测布局	○安全应急响应预案
预测层信息需求			
安全风险评估预测模型	安全风险管控技术体系	安全状态评估和预警方法	应急响应策略和优化思路

## (3) 预测层信息需求

通过获取这些预测级信息，安全管理人员可以对钢铁连铸生产系统未来安全态势展开科学合理的预测，积极主动地规划和实施安全行为活动，以管控安全风险、预防安全事故和提高安全绩效，并推动钢铁连铸安全生产管控技术体系的持续改进，如表 4 所示。

按照 GDI 层次由顶层向下依次梳理主要目标、包含的决策点、达成决策点所需的信息内容，其中信息内容依据 SA 信息需求层次分为感知层信息（L3）、理解层信息（L2）、预测层信息（L1）。经 GDIA 分析和行业专家及安全生产管理队伍的评测后，所确定的 GDI 结构图清晰地展示实现主要目标，需要达成的 4 个决策点及其所需的 PCP 层次信息需求，为钢铁连铸安全生产管控系统的数据模型设计提供了数据交互的内容基础。



图 4 钢铁连铸安全生产管控的 GDI 结构

## 3 钢铁连铸安全生产管控系统数据交互模型

基于 GDIA 分析的信息需求内容设计安全管控系统的数据交互模型，包括用户数据模型和 4 个用例的数据序列模型，能够准确地描述用户与系统之间的数据交互方式，为系统开发提供支持。

### 3.1 用例数据模型

用例数据模型描述系统边界中的功能要求和交互作用，界定了该系统所提供的服务内容以及用户应用这些服务的方式，安全风险识别、安全风险管控、安全监测预警和安全应急响应准备的 4 个用例如图 5 所示。



图6 钢铁连铸安全生产管控系统 UML 用例数据模型

### 3.2 序列数据模型

序列数据模型可以准确地描述系统内部的工作流程和与安全生产管理人员直接的交互行为逻辑，保证钢铁连铸安全生产管控系统能在恰当的时机为安全生产人员输出相关信息、辅助达成安全决策和提供实施安全行为活动的参考。序列数据模型中包含了安全生产管控系统、数据库系统和物联网监测系统 3 条生命线，工作流程和信息交互主要分为以下几个环节：

- 1) 安全生产管理人员向钢铁连铸安全生产管控系统发起请求，要求系统提供所需的预测层/理解层信息。
- 2) 系统向相关生命线（如数据库系统或物联网监测系统）发起相关感知层信息内容的请求，并获取返回信息。
- 3) 安全生产管控系统整合相关的感知层信息，形成理解层信息，并将其以统计图表、综合报告等形式输出，为安全生产管理人员建立理解当前情况的心智模型。
- 4) 安全生产管理人员基于所建立的心智模型向系统发生安全决策制定支持的请求。
- 5) 系统通过人工智能等手段生成主动性决策制定的预测层信息并返回安全生产管理人员，提供安全决策制定的参考信息。

安全风险识别、安全风险管控、安全监测预警和安全应急响应准备 4 个用例序列数据模型如图 7-图 10 所示。

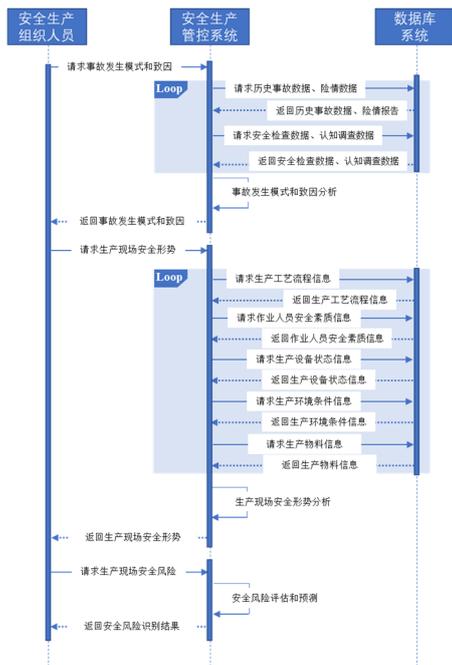


图7 安全风险识别的 UML 序列图

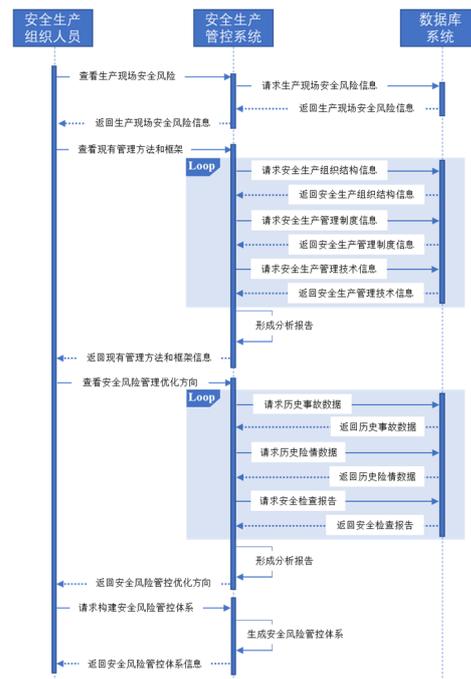


图8 安全风险管控的 UML 序列图

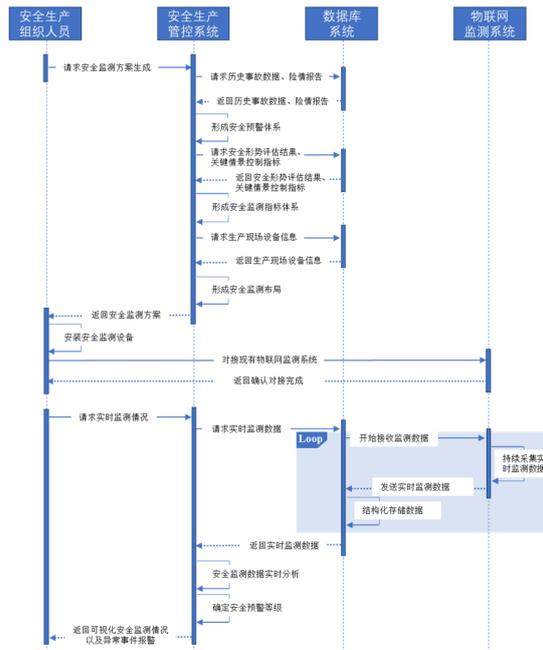


图9 安全监测预警的UML序列图

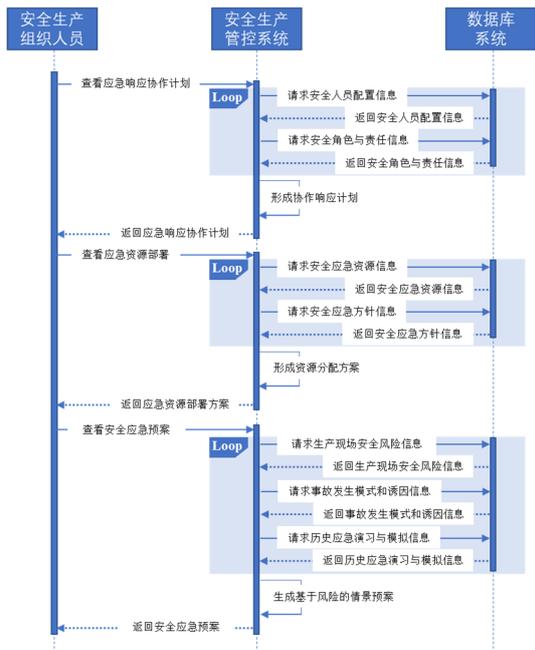


图10 安全应急响应准备的UML序列图

### 4 系统设计与验证

在基于GDIA对钢铁连铸安全生产管控信息需求分析结果和钢铁连铸安全生产管控系统数据交互模型的基础上，设计实现系统功能，分别如图10-14所示。

编码	风险状态	事故类型	当前管控手段	表征参数	监测物理量	传感器类型	监测点位	操作
01-01-01	1. 站属机之间距离低于安全距离(防碰撞)	钢包碰撞、钢液飞溅	人工操作控制	站属机间距	相对位移	位移传感器	站属机清枪	查看 编辑 删除
01-01-02	2. 钢包内钢液安全高度不足	钢液飞溅/凝固	基本在操作工作区已实现预警；异常点为天车对位时引起的碰撞	液面高度	钢包重量	重量感应系统	钢包内侧	查看 编辑 删除
01-01-03	3. 钢液温度异常过高或过低	溢流/凝固	通过人工测温或自动连续测温进行监控	钢液温度	下水口钢液温度	温度传感器	钢包下水口	查看 编辑 删除
01-01-04	4. 钢包回转台转速过快	钢液飞溅/凝固	马达控制转速，通过从检测到异常时限制转速，到零限位自停	回转台转速	回转台相对位移	位移传感器	回转台轴承	查看 编辑 删除
01-01-05	5. 支打杆翻升异常(溢流、溢枪等异常)	钢液飞溅/包体倾覆	异常点为起吊卡滞、无人翻钢	支打杆升降速度	升降位移	位移传感器	升降臂	查看 编辑 删除
01-02-01	6. 中包与铁罐对中定位偏差过大	开浇失败	人工操作控制	定位距离	中包车水平位移	位移传感器/开关传感器	中包车外侧	查看 编辑 删除
01-02-02	7. 中包浸入式水口带入杂质量设定位置(距离偏差)	开浇失败	人工操作控制	定位距离	中包车垂直位移	位移传感器/开关传感器	中包车外侧	查看 编辑 删除
01-02-03	8. 连铸管铸机铸机位置偏差过大(距离偏差) 禁下门的1600mm, 上门的500mm处)	溢流/凝固	人工操作控制	定位距离	铸机臂长度与引锭杆长度	位移传感器	引锭杆头部	查看 编辑 删除
01-02-04	9. 渣口溢流过大, 超过20mm	钢液飞溅/爆炸	人工观察	溢流长度	渣口溢流长度	视频监控	引锭杆头部	查看 编辑 删除
01-02-05	10. 上下滑板与水口接触时间过大	灼伤	通过限位装置进行人工控制	溢流长度	滑板与水口接触时间长度	开关传感器	滑板与水口连接处	查看 编辑 删除
01-03-01	11. 保护漏钢报警不及时(上对位大板下水口, 下对中包中包区)	开浇失败	人工操作控制	对中距离	漏钢口上下对中距离	开关传感器	大板下水口中包冲击区	查看 编辑 删除

图11 安全风险识别结果

图11展示了系统识别当前钢铁连铸生产现场存在的安全风险，并将各风险与可能导致的事故类型、当前采用的安全管控手段、表征参数等信息关联起来，为安全生产人员提供直观的安全风险识别结果参考。

图12展示了系统制定的安全风险管控方案内容，将安全风险与所需管控的工序参数、可监测的物理量、可采用的安全监控手段等信息关联起来，为安全生产人员提供了科学有效的安全风险管控方法参考。

图13展示了系统接收和实时分析来自物联网监测系统所采集的安全监测指标数据，并根据已构建的安全预警体系确定该监测指标的安全状态等级，最终通过关联数据实况曲线、指标安全状态实时趋势图和安全预警等级彩色标识来为安全生产管理人员提供直观、动态、可视化的安全监测实况和安全预警展示。



图 12 安全风险管理方案

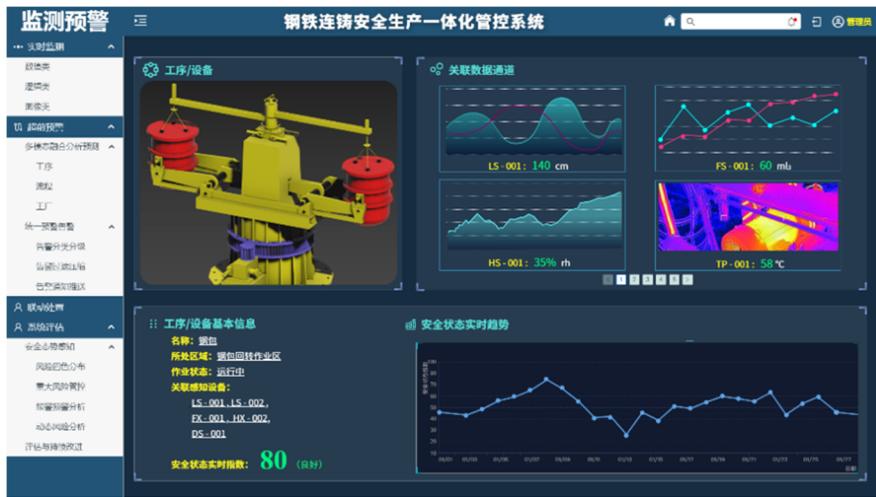


图 13 实时监测预警展示



图 14 应急响应处置展示

图 14 展示了系统在形成协作响应计划、应急资源部署信息和安全应急预案后，当发生安全事件时，为安全生产管理人员提供的信息支撑，辅助完成快速的应急响应处置和安全事件归档。

## 5 结论

1) 实施 GDIA 分析识别了钢铁连铸安全生产管控的目标、需达成的决策点和制定决策的信息需求。同时，这些得到行业专家和安全生产管理人员验证的 GDI 结构具体内容，可为一般性的钢铁连铸安全生产管

理工作提供理论支持。

2) 基于 GDI 结构内容构建了钢铁连铸安全生产管控系统的数据交互模型, 包括安全风险识别、安全风险管控、安全监测预警和应急响应准备 4 个用例的用例数据模型和序列数据模型。这些数据模型准确地描述安全生产管理人员在达成 4 个决策点的过程中, 安全生产管控系统应提供的服务和执行的系列动作, 及系统内部的工作流程和与安全生产管理人员直接的交互行为逻辑。同时, 这些数据交互模型也反映了安全生产管理人员在实施安全行为活动时, 构建科学的认知性心智模型的过程和需求, 可为安全教育与培训工作提供理论指导。

3) 根据构建的用例数据模型和序列数据模型, 开展系统功能设计与实现, 能够为安全生产人员提供直观的安全风险识别结果参考、科学有效的安全风险管控手段参考、直观动态可视化的安全监测实况、安全预警展示和辅助完成快速的应急响应处置、安全事件归档等主要功能, 实现信息化、智能化的安全生产管控服务, 提升钢铁连铸安全生产管控效能, 保证生产现场安全状态水平。

### 参考文献:

- [1] 杨利彬. “十三五”中国炼钢关键技术进步及思考[J]. 钢铁, 2022, 57(8): 1-10.
- [2] 芦永明, 钱王平, 邓多洪, 等. 利用物联网技术实现钢铁企业智能化生产管理[J]. 中国冶金, 2014, 24(09): 1-5.
- [3] 聂鑫, 宋辉. 安全隐患大数据分析系统在钢铁企业安全管理中的应用与实践[J]. 工业安全与环保, 2022, 48(6): 60-62, 94.
- [4] 陈龄龙, 管强, 余凯. 基于工业互联网的钢铁企业安全生产监管平台设计与实践[J]. 冶金自动化, 2022, 46(S1): 275-278.
- [5] 黄爽, 臧中海, 袁怀月, 等. 钢铁企业安全生产智能监控平台[C]//中国金属学会. 第十三届中国钢铁年会论文集——11. 冶金自动化与智能化. 冶金工业出版社 (Metallurgical Industry Press), 2022:134-140. DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.017429.
- [6] 张充, 张伟, 张建荣等. “工业互联网+钢铁厂安全生产”管控系统架构研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(04): 5-13.
- [7] Endsley, M. R. Taxonomy of Situation Awareness Errors, In R. Fuller, N. Johnston & N. McDonald (Eds.), *HFAs in Aviation Operations*, Aldershot, England: Avebury Aviation, Ashgate Publishing Ltd, 1995, 287-292.
- [8] 应急管理部. 国务院安委会办公室关于辽宁营口钢铁有限公司“6·22”较大灼烫事故情况的通报 [EB/OL]. (2023-07-07)[2023-07-29].
- [9] Walker, G.H., Stanton, N.A., Salmon, P.M., Jenkins, D.P., 2008. A review of sociotechnical systems theory: a classic concept for new command and control paradigms. *Theoret. Issues Ergon. Sci.* 9, 479-499.
- [10] Amit Sharma, Nazir Salman, Ernstsen Jorgen. Situation awareness information requirements for maritime navigation: A goal directed task analysis[J]. *Safety Science*, 2019, 120745-752.
- [11] Mica-R Endsley. A Survey of Situation Awareness Requirements in Air-to-Air Combat Fighters[J]. *The International journal of aviation psychology*, 1993, 3(2): 157-168.
- [12] Militello, L.G. and Hutton, R.J.B. (1998). *Applied Cognitive Task Analysis: a Practitioner's Toolkit for Understanding Cognitive Task Demands*, *Ergonomics*, 41, 11, 1618-1641.
- [13] Endsley, M.R., 1988. Situation awareness global assessment technique (SAGAT). In: *Proceedings of the IEEE 1988 National Aerospace and Electronics Conference*, 1988. NAECON 1988. IEEE, pp. 789-795.