

钒钛矿高炉大数据智能系统的构建与实施

胡心光, 张晓冬, 张永升, 李海滨

(承德钒钛新材料有限公司炼铁事业部, 河北承德, 067102)

摘要: 以高炉炼铁工艺机理研究为核心, 综合运用数值仿真、超级计算、人工智能等领域的前沿技术, 以复杂的高炉工艺为对象, 通过搭建大数据云平台, 对承德钒钛高炉长期积累的工艺冶炼过程数据及不同类型设备或数据接口进行高效自动采集、整理和筛选, 形成高炉大数据库并开发云平台交互系统, 同时深入研究大数据深度挖掘算法, 搭建大数据深度学习核心系统, 使高炉生产具备大数据云平台交互、大数据挖掘与预测等功能, 实现了高炉智能化炼铁的目标。

关键词: 大数据; 智能化; 高炉; 数学模型

1 前言

钢铁工业是国民经济的重要基础产业, 要实现可持续协调发展, 必须在信息化和工业化深度融合的基础上, 通过物联网、云计算、移动互联网、大数据等技术的应用, 加快实现自动化、数字化、智能化制造进程, 构建具有高价值、低成本、低资源消耗、低污染的新型生产管理模式, 这是钢铁行业提高自身竞争力的战略选择。同时, 钢铁行业需要通过更科学、更有效的节能新技术武装自己, 以实现高炉深度节能的目标^[1-2]。高炉工艺的“黑箱”操作, 其生产过程是不可预见的, 高炉在长期运行过程中积累了大量冶炼过程数据, 随着大数据技术的不断发展, 高炉炼铁生产中已逐渐呈现出各种数字化和智能化的应用^[3-6]。充分发挥大数据的价值, 并通过人工智能技术深度挖掘大数据中蕴藏的内在规律, 有效预测和指导生产, 最终实现精细化、智能化炼铁, 对于钢铁行业意义重大。本文以复杂的高炉工艺为对象, 围绕高炉大数据应用与智能炼铁, 通过交叉学科前沿技术的集成与实际应用, 实现高炉大数据云平台交互、高炉冶炼过程可视化、大数据挖掘与智能分析等目标, 对于提升高炉炼铁自动化、智能化水平有着巨大的推动作用。

2 大数据云平台系统的构建

承德钒钛高炉炼铁工序采用较完备的工艺技术与装备, 为高炉大数据技术应用和炼铁智能化水平的提升, 提供了良好的研发基础和配套环境。通过物联网搭建前端大数据采集和传输系统以及云平台进行大数据的汇聚, 处理和分析, 有效助力企业生产流程优化。在不影响既有系统和应用架构的前提下, 通过整合现有高炉信息系统, 构建企业内高炉大数据私有化云服务系统。另外, 通过大数据云平台交互功能设计与研发, 实现高炉大数据采集、数据对接、数据处理、数据存储、客户端交互等功能。

2.1 平台技术架构

图 1 为平台技术架构图, 从图 1 可以看出, 数据对接包含实时数据库(wonderware)+铁前项目(oracle)+质量管理(sqlserver), 实时数据库(wonderware)采用(api+jdbc 连接池)方式将数据点数据同步到时序数据库(influxdb), 铁前项目(oracle)、质量管理(sqlserver)采用微服务方式将关系型数据同步到mysql数据库。

2.2 平台应用架构

图 2 为平台应用架构示意图。底层数据源主要包含实时数据库, 铁前数据库, 质量数据库, 均为承德钒钛现有数据库, 平台可实现多系统数据同步及贯穿, 打破数据孤岛, 为应用提供可靠数据支撑。数据层通过数据对接, 数据运算、数据多维度查询、数据可视化实现数据的二次聚合处理, 将源数据转化为更高价值的业务数据。业务应用层围绕底层构建多个上层业务应用, 实现高炉运行状态实时监控及数据追溯。围绕业务应用, 同步搭建移动端, 实现客户端高炉状况实时监控。

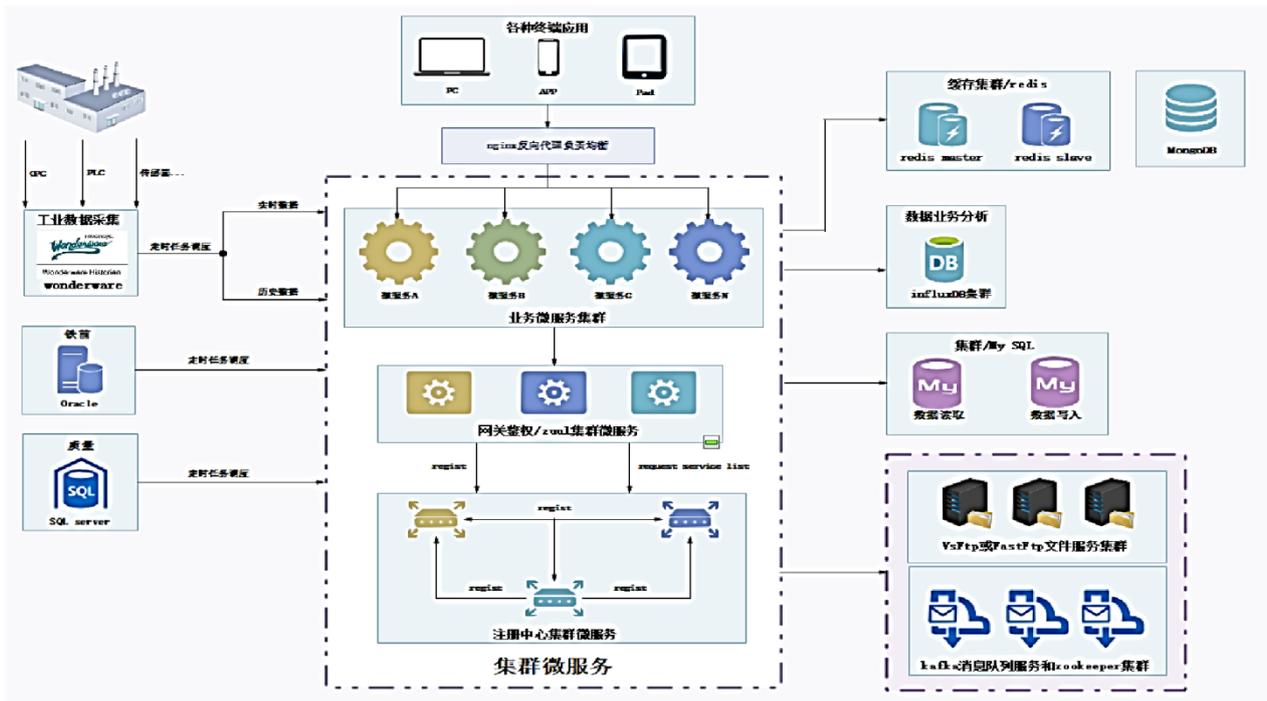


图 1 平台技术架构图

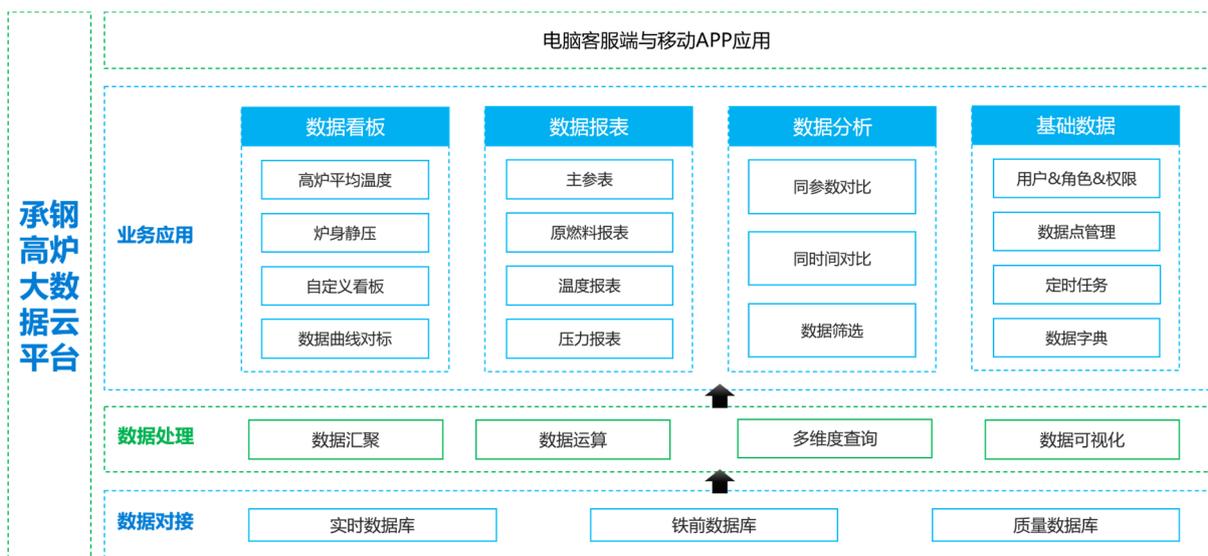


图 2 平台应用架构示意图

3 高炉大数据智能系统简介

3.1 基于连续测温的铁水温度预测系统

高炉铁水温度能够很好的反映高炉能量利用的好坏，其变化的幅度和频率又直接反映了冶炼过程的稳定性。因此在冶炼过程中，如果能及时的掌握铁水温度变化的趋势，并做出较精确的估计，便可及时采取调节措施，对于稳定热制度、减少炉况的波动、降低铁水硅含量以提高生铁质量和降低焦比等都是非常有利的。针对高炉冶炼过程中的海量数据，通过大数据挖掘，并结合实际问题建立预测模块，分析过程参数与铁水质量指标间的相互关系和影响规律，实现对高炉铁水温度变化趋势的准确预测，该系统包括炉料跟踪模型、渣铁平衡模型、炉热指数模型以及铁水温度预测模型。

3.1.1 炉料跟踪模型

图 3 为炉料跟踪界面，其中左图为炉料跟踪监控。根据料批位置信息、料层厚度及料批到达风口的时间，模拟炉内的炉料数据建立对应的料批位置信息，为操作者提供核心参数趋势图、料批信息、位置信息。

料批综合信息包括料批号，料批布料开始时间、结束时间、料批体积、焦比、煤比、燃料比等参数，子信息包括理论铁量、矿批重量和焦批重量。当鼠标移动至某批料批时，可调出料批相关联的信息。右图为动态燃料比趋势图，其可显示 24 小时内燃料比趋势、焦比趋势、理论铁量趋势、料速趋势、矿石重量趋势和焦炭重量趋势等相关趋势图。装料数据主要显示入炉料的详细信息。

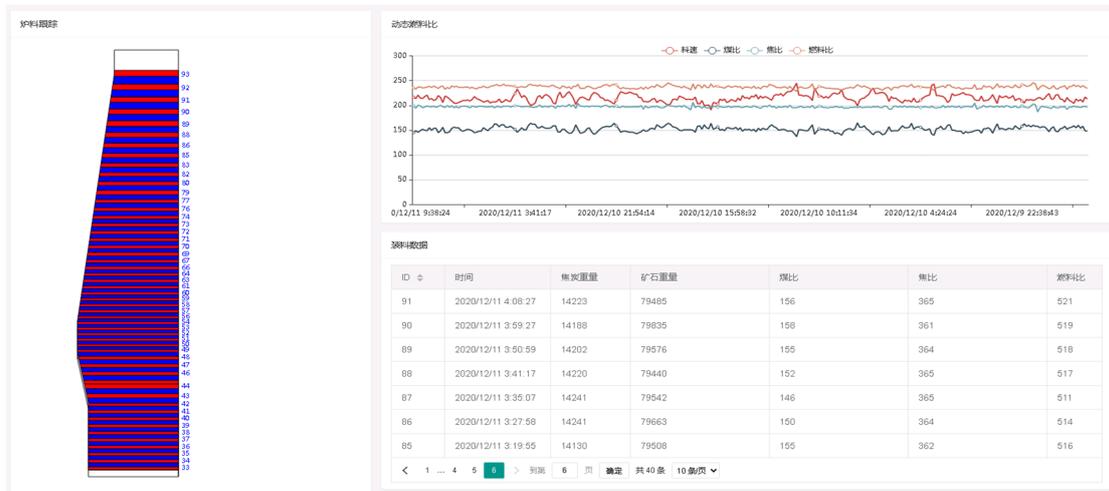


图 3 炉料跟踪界面

3.1.2 渣铁平衡模型

图 4 为出铁相关信息界面，通过建立炉缸出铁平衡模型，采集出铁和出渣数据处理。该模块主要显示出的铁相关信息包括开始出铁时间、出铁结束时间、出铁量、见渣时间、渣量、铁流速率等参数随时间变化的曲线，统计每个班次的理论铁量与实际铁量之差，从而推断炉缸的状态。柱状图显示 24 小时之内每小时理论铁量与实际铁量的铁量累计差。

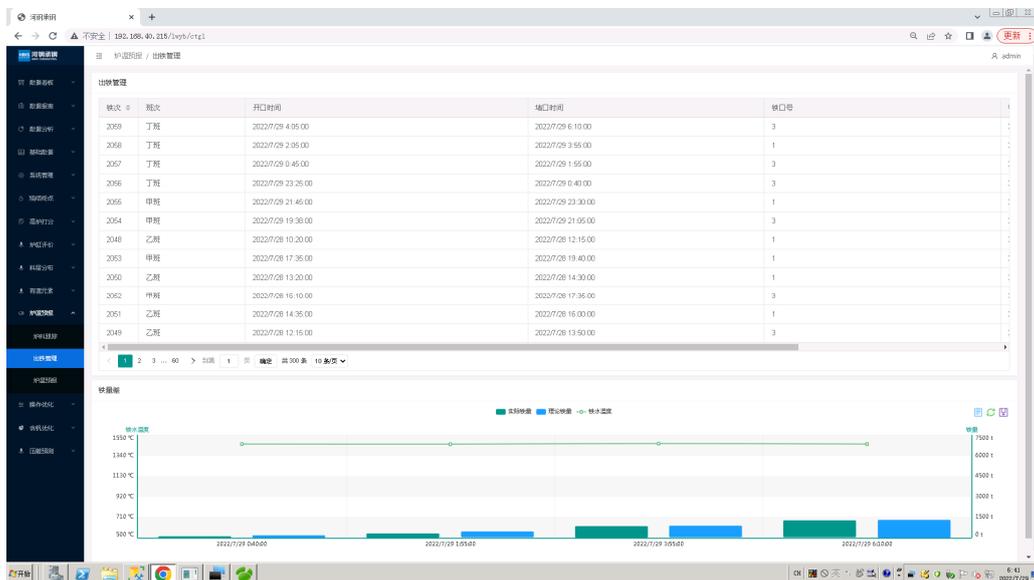


图 4 出铁相关信息界面

3.1.3 炉热指数模型

图 5 为炉热指数显示界面，根据冶金工艺，建立基于物料平衡和热平衡的炉热指数模型。炉温趋势主要显示高炉热量平衡各项之间与炉温的趋势，包括煤粉燃烧热量、焦炭燃烧热量、热风带入热量、鼓风湿度分解热、煤气带走热量、煤粉分解耗热、冷却水带走热量、炉渣带走热量、铁水带走热量、直接还原耗热、鼓风水分分解耗热、炉热指数等相关参数的趋势。

3.1.4 炉温连续预测模型

由于高炉是一个动态连续的生产过程，高炉的反应过程是渐变的，当前的炉况与历史炉况相关联，所

以本模型使用基于 Lstm 算法的循环神经网络预测更加合适。引入 LSTM 神经网络结构进行预测，解决了普通递归神经网络模型梯度弥散的问题，Lstm 具有时间循环结构，可以很好地刻画具有时空关联的序列数据，学习长期规律。不仅能够学习新的数据信息，而且能够动态记住历史信息。图 6 为铁水温度预测界面，通过模型的计算分析，可以预测 7 个小时以后的铁水温度情况。



图 5 炉热指数显示界面



图 6 铁水温度预测界面

3.2 高炉压差预测系统

高炉压差是高炉透气性的主要指标，也是提高高炉焦炭负荷的主要限制因素，同时对于高炉的稳定运行、提高煤比都是非常有利的。压差预测模型能够根据当前高炉状态，利用 DNN 深度神经网络预测 4 小时之后的压差变化，工长可以根据压差变化提前采取调剂措施，为高炉获得较为宽松的冶炼环境。高炉压差预测系统主要由以下几部分组成：图 7 为压差参数变化趋势图，通过图 7 可以监控与压差相关变量的趋势变化，通过趋势对比分析压差变化的原因以及现象。图 8 为压差趋势预测界面，根据图 8 中压差的走势，从压差预测趋势中可以查看实际压差与预测压差的变化趋势是否一致。通过预测压差趋势方便工长判断压差的走向，提前采取调节措施。图 9 为送风调整建议界面，其可根据高炉压差各个部位所占的比例判断各个位置的压差是否合理，当压差发生变化时寻找压差变化的原因，并根据压差变化的原因提示给操作者压差控制的合理建议。



图 7 压差参数变化趋势

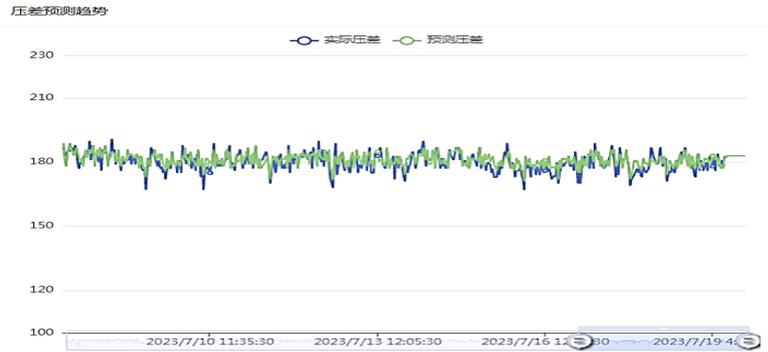


图 8 压差趋势预测界面

送风调整建议

推理时间	推理内容
2023/7/19 6:13:06	下部压差上升,料速稍快,炉热指数高,调节措施:风压调整-3KPa
2023/7/18 17:55:03	CO/CO2正在快速上升,顶温较高,有可能发生管道,建议措施:风压调整-5KPa,
2023/7/18 17:43:09	下部压差上升,料速稍快,炉热指数高,调节措施:风压调整-3KPa
2023/7/18 16:23:08	下部压差上升,料速稍快,炉热指数高,调节措施:风压调整-3KPa
2023/7/18 16:04:03	CO/CO2正在快速上升,顶温较高,有可能发生管道,建议措施:风压调整-5KPa,
2023/7/18 15:53:07	压差正常,炉温正常,出铁正常,料速正常,可以加风,建议措施:风压调整+3KPa
2023/7/18 15:43:08	下部压差上升,炉热指数高,调节措施:风压调整-3KPa
2023/7/18 15:13:07	压差正常,炉温正常,出铁正常,料速正常,可以加风,建议措施:风压调整+3KPa
2023/7/18 14:03:09	压差正常,炉温正常,出铁正常,料速正常,可以加风,建议措施:风压调整+3KPa
2023/7/18 13:33:08	压差正常,炉温正常,出铁正常,料速正常,可以加风,建议措施:风压调整+3KPa

图 9 送风调整建议界面

3.3 全炉料层分布智能监测系统

全炉料层分布智能监测系统通过大数据平台所采集的实时布料和生产数据,采用高炉布料数学模型和仿真模拟的研究方法,实现 2500m³ 高炉布料落点轨迹计算、料面分布模拟计算、径向矿焦比计算以及基于智能算法的料层分布数值模拟及连续复杂布料过程的各料层分布数值模拟,实现上部布料过程的在线跟踪模拟,形成可视化画面,帮助高炉操作者了解炉料分布状况,进而为人工调整装料制度提供参考依据,实现规则均匀布料。

3.3.1 料层分布监测页面

该页面展示料层分布图形、料层数据、料制参数、矿焦层厚度比、沿径向矿焦比、布料矩阵柱状图,如图 10~图 11 所示。通过设置查询时间,可以获取该时段的料制参数,然后点击料制参数记录,可获得取完该批料时的料层分布图形和数据以及矿焦层厚度比、沿径向矿焦比、布料矩阵柱状图,通过在料层分布图形上移动鼠标可获取径向和深度方向的坐标。



图 10 料层分布、料层数据和料制参数

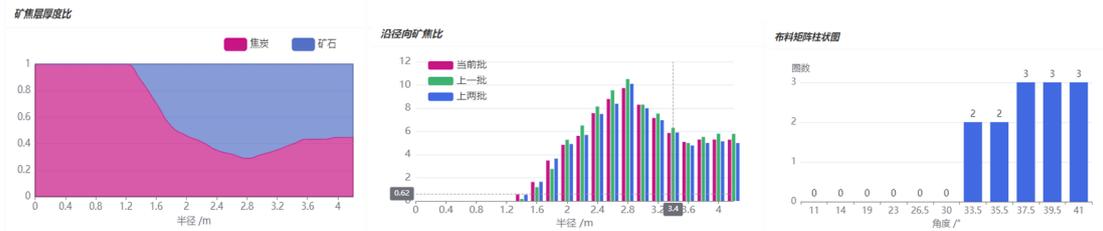


图 11 矿焦层厚度比、径向矿焦比、布料矩阵柱状图

3.3.2 装料制度分析页面

该页面主要展示与料层分布有关的操作指标监测、指标报警边界值设定以及报警信息和相应料制参数显示。与料层分布有关的实时监测操作参数有：热负荷、下部压差占比、煤气利用率、顶温、阀座温度与顶温的比值等，其边界条件初始定为：当热负荷升高 3000 或下部压差占比下降 2%或阀座/顶温 <0.5 或顶温 $>200^{\circ}\text{C}$ 或煤气利用下降 0.5%时，需要调整料制抑制边缘，疏导中心；当热负荷降低 3000 或下部压差占比升高 2%或阀座/顶温 >0.7 或顶温 $<120^{\circ}\text{C}$ 时，需要调整料制疏松边缘。可在页面中修改设置边界条件，并将设置报警边界值存入 mysql 数据库中。通过设置查询时间，可获取该时段的监测历史，如图 12 所示。

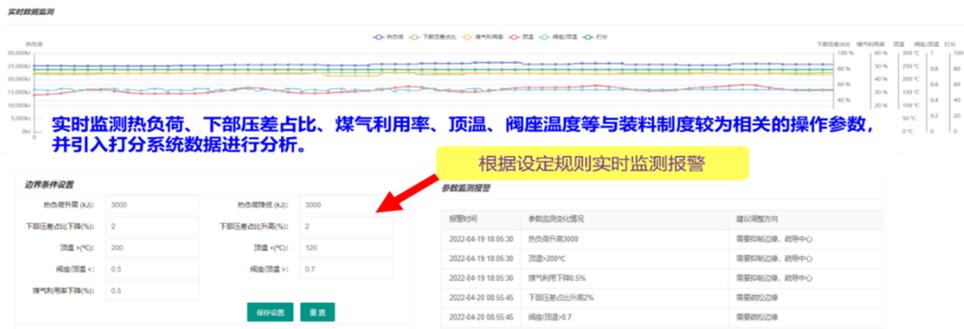


图 12 实时监测数据、边界条件设置和报警

料制调整离线模拟分析及结果显示主要包括焦炭布料矩阵和矿石布料矩阵修改，如图 13 所示，当修改完料制参数后，提交料层分布计算，将修改数据存入 mysql 数据库中，同时后端离线分析仿真模型监测到修改值后启动离线模拟分析，然后将结果返回至前端页面显示，该模拟过程大概需 20~30S 左右。通过多次料制参数调整和离线模拟计算后，将料层分布计算结果在表格和图形中显示，如图 14 所示。



图 13 焦炭、矿石料制参数修改和提交料层分布计算



图 14 料层分布计算结果比较

3.4 铁水含钒量预测与决策系统

针对承德钒钛高炉钒钛矿冶炼的生产特性，应用数据挖掘技术配以工艺经验，找出烧结生产技术指标、高炉生产技术指标与铁水钒含量的相关性，建立有利于高炉钒还原的铁水最佳含钒量预报模型。同时，建立基于铁水最佳含钒量模型的决策系统，当原料条件、高炉运行情况发生变化时，为现场人员提供不同条件下的操作建议。图 15 为含高炉铁水含钒预测界面，通过该界面可显示铁水含钒量当前值和预测值。同时，基于最佳含钒量模型还可显示铁水含钒量最佳值和对应铁水钒收得率。另外，在“操作范围”区域内，可对关键参数进行判别，显示是否在最佳指标范围和该关键操作参数在历史数据中统计占比情况，以及在“操作调整”区域内对核心可控参数给出具体操作指导建议，高炉操作者根据参数指导建议调控铁水含钒量至最佳水平。图 16 为高炉炉渣预测界面，通过该界面可显示炉渣成分碱度 R_2 、 MgO/Al_2O_3 、 TiO_2 的当前值和预测值，时间频次为小时，每小时终了后自动更新该小时数据。另外，操作调整模块可根据炉渣成分最佳范围结合现场规则实现炉渣成分调整。

含钒预测			
预测值	0.199	当前值	0.206
最佳值	0.198	收得率	83.92
操作范围	上部压差占比	高	[11.91,13.76]
	富氧流量	高	[7406.62,10001.44]
	煤气在线分析	正常	[23.0,24.95]
	shaojiekzB	高	[66.94,68.49]
	LDYL	高	[241.39,244.03]
	FZWD	高	[83.12,101.14]
	TiO2	高	[5.74,6.8]
操作调整	CG_LT_GL_GL04_Ftswd	低	铁水温度偏低,建议将铁水温度提高15.0
	CG_LT_GL_GL04_FCoalRate	低	煤比偏低,建议将煤比提高33.0
	CG LT GL GL04 Zha Mg Al	低	焦炭40mm粒度偏低,建议

[显示详情](#)

图 15 高炉铁水含钒预测界面

炉渣预测					
碱度R2[当前]	1.1	Mg/Al[当前]	0.85	TiO2[当前]	6.86
碱度R2[预测]	1.1	Mg/Al[预测]	0.85	TiO2[预测]	6.86
操作调整	CG_LT_GL_GL04_Zha_TiO2	高	CG_LT_GL_GL04_Zha_TiO2偏高,建议降低球团占比,降低0.06		
	CG_LT_GL_GL04_Zha_R	高	CG_LT_GL_GL04_Zha_R偏高,建议降低机烧占比,降低-0.06		
	CG_LT_GL_GL04_Zha_Mg_Al	高	CG_LT_GL_GL04_Zha_Mg_Al偏高,建议降低烧结矿占比,降低0.12		

图 16 高炉炉渣预测界面图

3.5 合理高炉操作参数匹配智能分析与优化系统

操作参数优化系统是一种智能化的计算机系统，它能够模拟人类专家对复杂的过程进行跟踪、控制和管理。通过设计研发合理高炉操作参数匹配智能分析优化系统，有效融合大数据及人工智能技术，实现在当前冶炼条件下，评估当前工长操作水平，智能优化各项操作参数的合理匹配关系，展示当前冶炼操作水平评估结果，并为下一步高炉操作提供各项操作参数合理建议值，帮助高炉操作者充分挖掘高炉冶炼潜力。图 17 为炉型监控系统界面，该界面可实时监控炉型变化，并通过各种分析计算和模型研究炉内发生的各种现象，并根据相应结果得出结论。虽然模型不能对外部因素造成的变化进行干预，但是能够对于外部变

化引起的早期影响及时做出反应，工长可以根据模型提出的建议进行修正，避免造成引起炉况的波动。

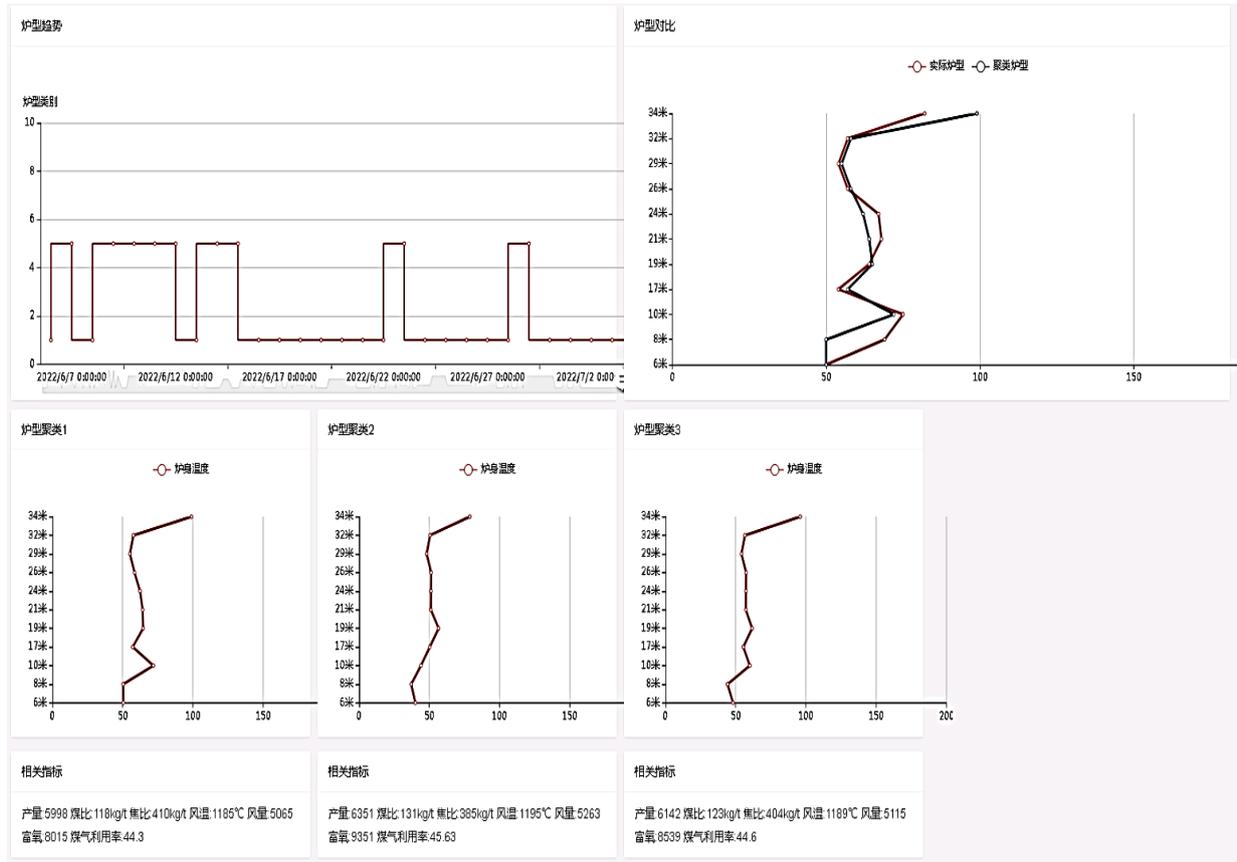


图 17 炉型监控系统

4 结语

钒钛矿高炉大数据云平台智能炼铁系统的成功构建，实现了承德钒钛高炉从传统型生产模式向数字化、信息化、智能化模式的跨越。系统正式上线后，高炉风量稳定率在 95%以上，利用系数提高 14%，焦比降低 14kg/t，[Si+Ti]合格率超过 95%，经济效益显著。同时，通过搭建大数据云平台以及大数据智能炼铁系统的开发，实现高炉生产作业的业务数据化，通过数据分析和报表统计的业务透视，促进了工艺执行的逐步稳定和不断优化空间的不断挖掘，为产品质量稳定性和生产力提升创造了良好的条件。

参考文献:

- [1] 肖鹏. 高炉炼铁技术创新实践及未来展望[J]. 钢铁, 2021, 56(6): 10-14,34.
- [2] 田毅, 王刚, 苏家庆, 等. 基于大数据挖掘的高炉参数优化调控模型研究[J]. 冶金自动化, 2022, 46(5): 65-75.
- [3] 张伟阳, 郝良元, 钟文达, 等. 基于大数据技术的炉缸侵蚀模型[J]. 钢铁, 2020, 55(8): 160-168.
- [4] 唐文文, 李欣, 刘小杰, 等. 大数据赋能高炉炼铁智能应用[J]. 冶金自动化, 2022, 46(4): 11-22,29.
- [5] 刘小杰, 李欣, 刘二浩, 等. 高炉炼铁生产中的大数据技术研究现状与展望[J]. 矿产综合利用, 2021, 4: 91-96.
- [6] 刘小萍, 熊昆鹏, 葛小亮. 兴澄炼铁大数据智能互联平台建设及应用[J]. 冶金自动化, 2021, 45(3): 34-41.