

# 钢铁工业智能制造的集成优化

孙彦广

冶金自动化研究设计院, 北京 100071

**摘要** 钢铁工业智能制造的目的,是围绕钢铁流程功能,进行结构优化与程序优化,实现全流程动态有序、协同连续运行和多目标整体优化。介绍了钢厂结构优化和程序优化的主要内容和需要研发的关键技术,包括产品质量闭环管控、一体化计划调度、物质流能量流协同和多工序协调优化。提出了钢铁工业推进智能制造需要突破的一些共性问题 and 实施路径。

**关键词** 智能制造;钢厂集成优化;钢铁工业

## 1 对钢铁工业智能制造的理解

目前,先进制造技术与信息技术深度融合,正推动钢铁工业不断向智能化方向发展,实现钢铁工业由大变强的历史跨越。要实现钢铁工业智能制造,必须深入理解制造流程的本构性特征及其动态运行的物理本质和机理,必须充分理解制造流程动态-有序、协同-连续运行过程的耗散过程和耗散特征,在此基础上,实现基于信息物理系统的集成优化。

根据冶金流程学理论<sup>[1-7]</sup>,钢铁工业制造流程的动态运行过程是耗散结构内的耗散过程,物质流在能量流的驱动和作用下,按照设定的“程序”,沿着特定的“流程网络”作开放性、非平衡运行,随“流”而“动”、随“流”而“变”。流程中各自复制单元通过界面相互关联、非线性耦合,在运行规则约束下联网运行。通过各个自复制单元和它们之间“界面”技术的整体性优化、联网结构优化、动态运行过程优化,实现制造流程功能的多目标优化。制造流程需要外界“他组织力”与流程本身“自组织性”结合,化随机变化为受控有序变化。

钢铁工业智能制造的目的,是围绕钢铁流程“钢铁产品制造、能源高效转换、废弃物消纳处理与再资源化”3个功能,提升“他组织力”,进行结构优化与程序优化,实现全流程动态有序、协同连续运行和多目标整体优化(图1)。

钢铁工业智能制造的主要内容为物质流网络、能量流网络、信息流网络三网优化及协同运行<sup>[1-7]</sup>。

物质流网络优化的方向是动态有序、协同连续,主要包括3个层次:炼铁、炼钢、轧钢等各工序优化;炼铁与炼钢、炼钢与连铸、连铸与轧钢之间界面优化;全流程物流网络优化等。

能量流网络优化的方向是动态平衡、能质匹配,主要包括余热余能高效回收利用、多能源介质之间高效转化、能源管网适当缓冲能力、减少能流网络损耗。

信息网络优化的方向是自感知、自决策、自执行,主要包括在线检测、工业互联、数据集成、数字模型、优化设定和精准控制,实现全流程质量管控、一体化计划调度、物质能量协同优化、多工序优化控制等。

收稿日期:2018-04-12;修回日期:2018-09-15

作者简介:孙彦广,教授级高工,研究方向为钢铁工业智能制造,电子信箱:syanguang@263.net

引用格式:孙彦广. 钢铁工业智能制造的集成优化[J]. 科技导报, 2018, 36(21): 30-37; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.21.003

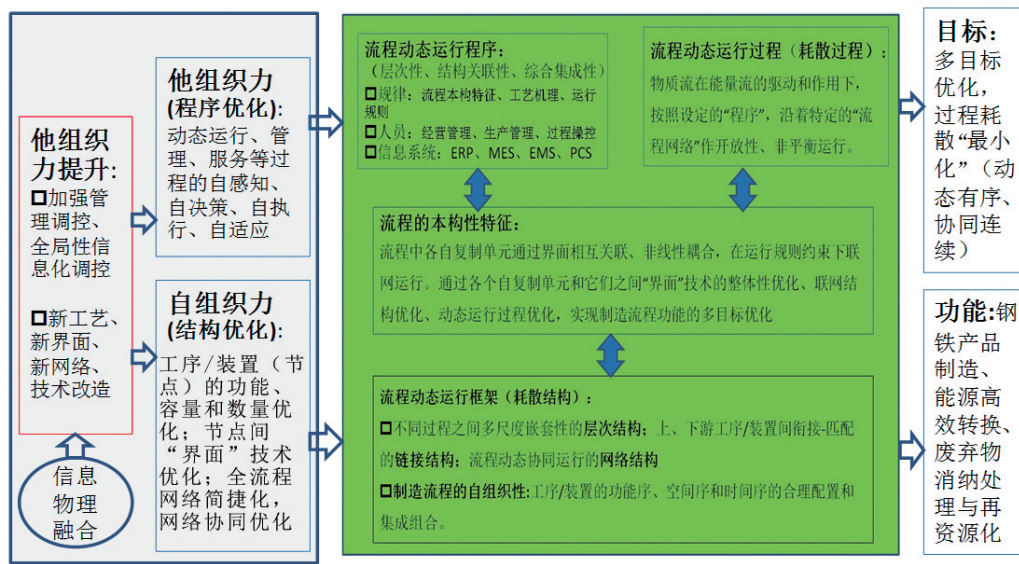


图1 钢铁工业智能化的结构优化和程序优化

Fig.1 Structure optimization and program optimization of steel industry

## 2 智能化钢厂“结构”优化

流程结构是指工序功能集合、工序关系集合的适应(协调)性,系统运行的动态可调性,结构优化包括流程工序功能集解析-优化、工序关系集协调-优化、流程系统工序集重构-优化多个层次<sup>[1]</sup>。

流程模型化是流程优化的前提。首先基于流程机理建立物理系统模型,对流程进行结构化(形成合理的流程网络)、概念化(对多因子物质流运行性质的描述)理解基础上,进行的整体物理描述(包括“程序”描述)。进而,基于物理模型建立数字化模型,包括工序

数学模型、平面布置图 GIS(地理信息系统)、工序关联语义网络和运行“程序”数字化<sup>[1]</sup>。

信息是动态调控流程中各个功能因素的纽带,是制造流程集成优化的重要基础之一。流程中各个工序的输入集(I),在经过流程中各个工序(X)作用后形成相应的输出集(O),从输入集到输出集的转变受工序功能集(F)和工序关系集(R)控制的,并经过控制策略集(C)的调控,在这个过程的各个层面形成对应的信息子系统,进而集成到决策中心并形成制造流程信息系统<sup>[1]</sup>。

融入信息流的流程结构优化过程如图2所示。

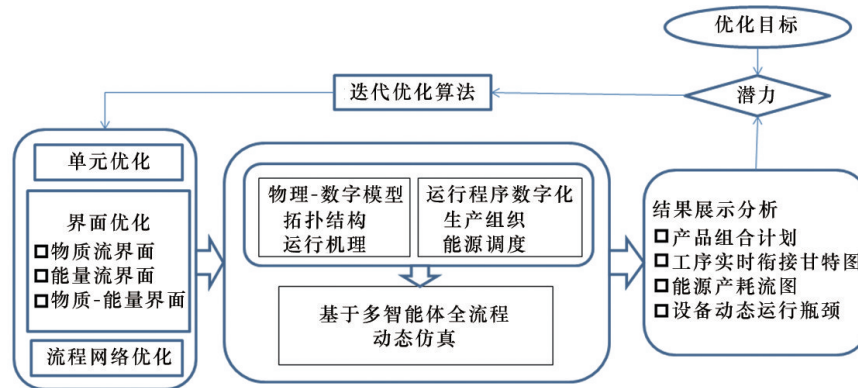


图2 融入信息流的流程结构优化过程

Fig. 2 Process structure optimization diagram with information flow

### 3 智能化钢厂“程序”优化

智能化钢厂“结构”优化为智能钢厂“程序”优化奠定了基础,是智能化的必要条件,智能化钢厂“程序”优化是智能化的充分条件,两者有机结合,相互促进。智能化钢厂“程序”优化侧重全局性集成优化,通过物质流、能量流、信息流“三网”协同运行,实现多目标优化,使得过程耗散“最小化”<sup>[1-7]</sup>。主要优化内容包括全流程产品质量管控、一体化计划调度、物质能量协同、多工

序协调优化等。

#### 3.1 全流程产品质量管控

全流程产品质量管控的目的是联通产品开发、工艺设计、生产制造、用户使用多个环节,打破信息孤岛,形成图3所示产品质量管控的多回路PDCA闭环。

以扁平材为例,其全流程生产制造环节需研究开发的主要技术内容包括:全制造周期集成质量信息平台、全流程产品质量在线监控、质量在线综合评判诊断、全流程产品质量的溯源分析和质量优化(图4)。

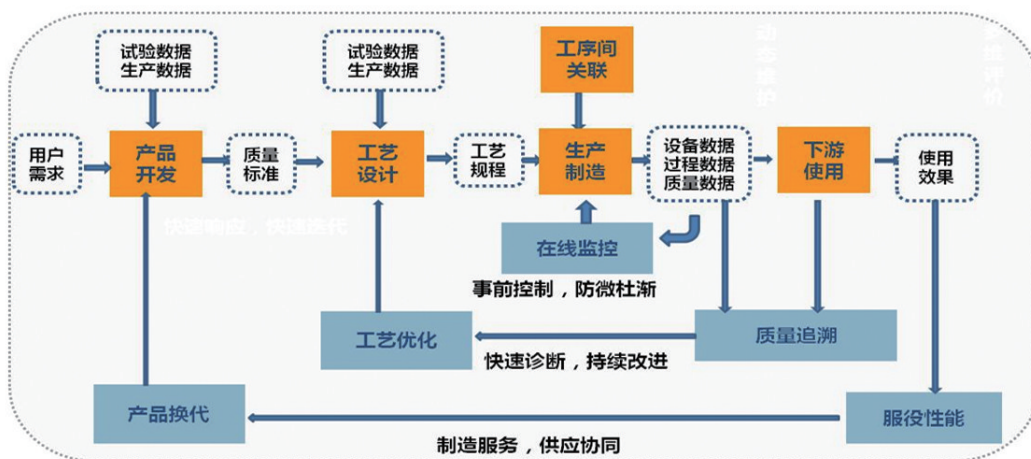


图3 产品质量管控的多回路PDCA闭环

Fig. 3 The multi-PDCA closed loop for product quality management and control

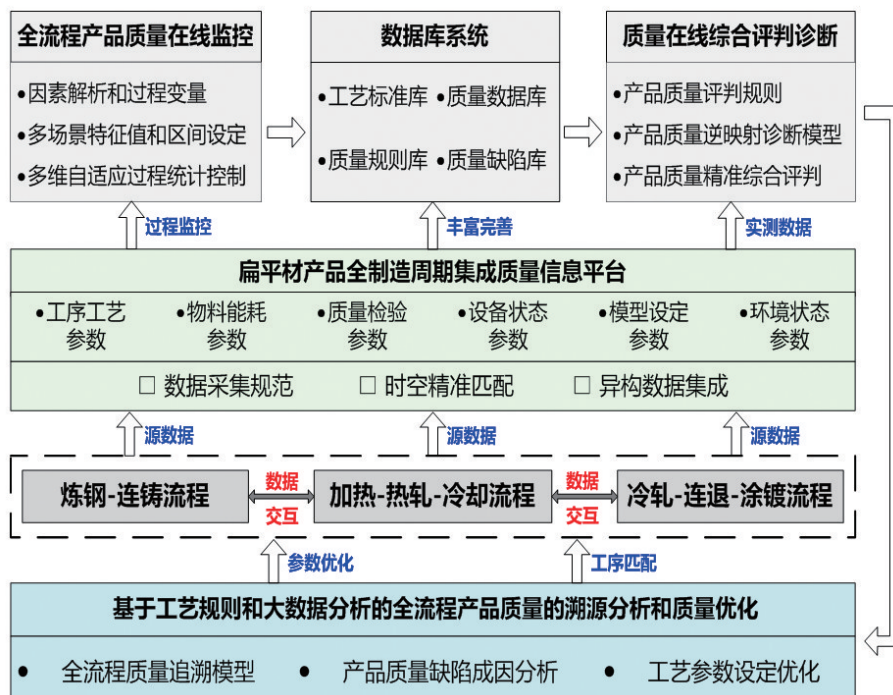


图4 扁平材全流程产品质量管控技术

Fig. 4 The full process flat product quality management and control technologies

### 3.2 一体化计划调度

一体化计划调度从内容上包括从销售订单、资源计划、生产计划、作业计划到过程控制的纵向集成,从原料、炼铁、炼钢、轧钢到产品的横向集成,其目标是实现准时交货、在制品减少、工序均衡、运行效率、能源优化等指标的多目标优化(图5)。将以前分别部署在企业ERP、各分厂MES、各工序PCS的计划-执行-控制系统进行有机协同、动态管控。

要实现一体化计划调度,需要研究开发以下关键共性技术:

- 1) 生产路径与规程语义网络表达。
- 2) 基于多智能体(Agents)流程仿真。
- 3) 多层次迭代启发式计划优化。
- 4) 不确定因素(设备故障、质量下降)影响的预测。
- 5) 不确定因素的启发式调度策略(图6)。

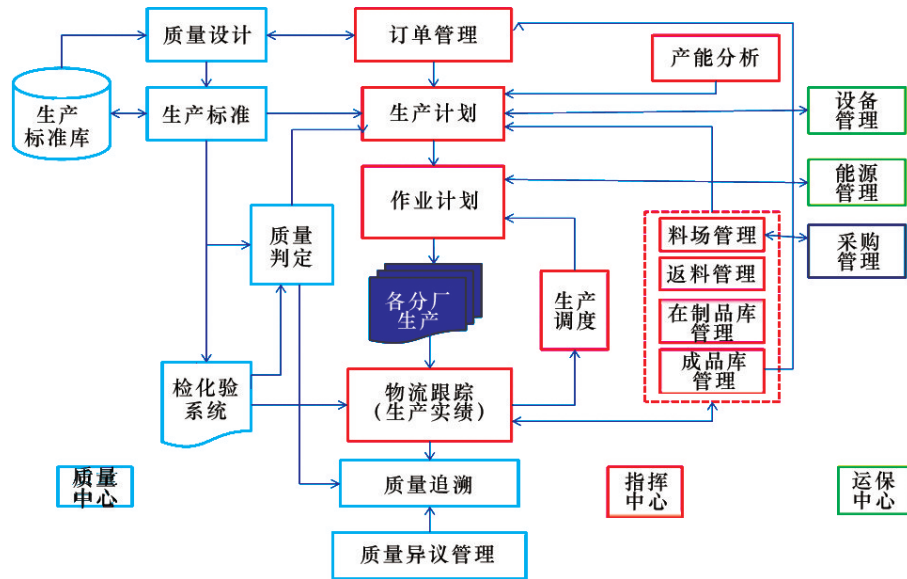


图5 一体化计划调度

Fig. 5 Integrated planning and scheduling

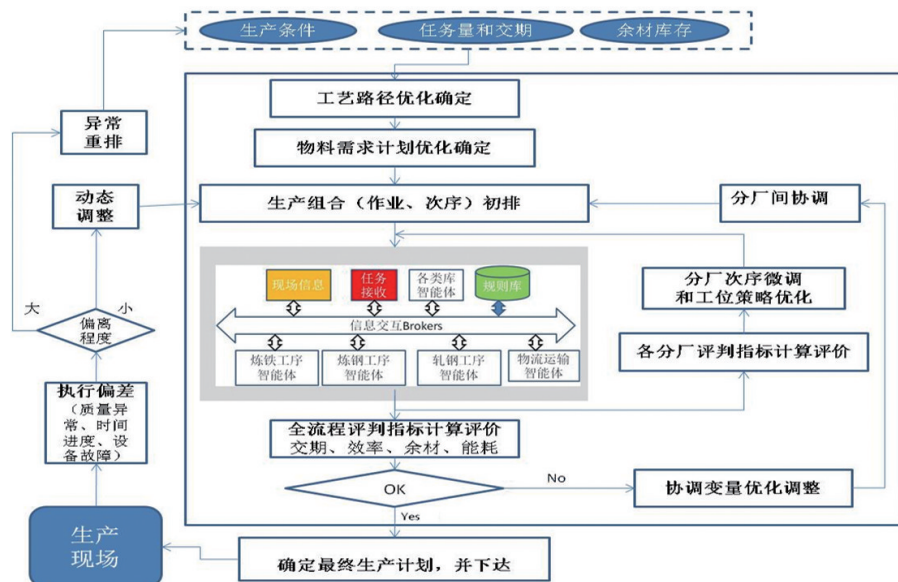


图6 实现一体化计划调度的关键技术

Fig. 6 The key technologies for integrated planning and scheduling

### 3.3 物质流能量流协同

物质流能量流协同是将钢铁企业生产优化的制造执行系统MES和能源优化的能源管理系统EMS进行协同,实现能源的综合智能调控(图7)。物质流能量流协同关注与物质流耦合紧密的能源流的产生-转换-缓冲-使用-回收等能量流网络各个环节,通过能源高效转化、适当缓冲能力、减少能流网络损耗等途径,实现能量流网络动态平衡、能质匹配。

要实现物质流能量流协同,需要研究开发以下关键共性技术:

- 1) 全流程物质流-能量流耦合的能量流网络模型;
- 2) 基于能量流网络模型的动态仿真;
- 3) 多尺度多视角能效评估;
- 4) 多场景能源计划和多介质能源优化;
- 5) 生产预测与能源反馈结合的能源动态闭环控制

(图8)。

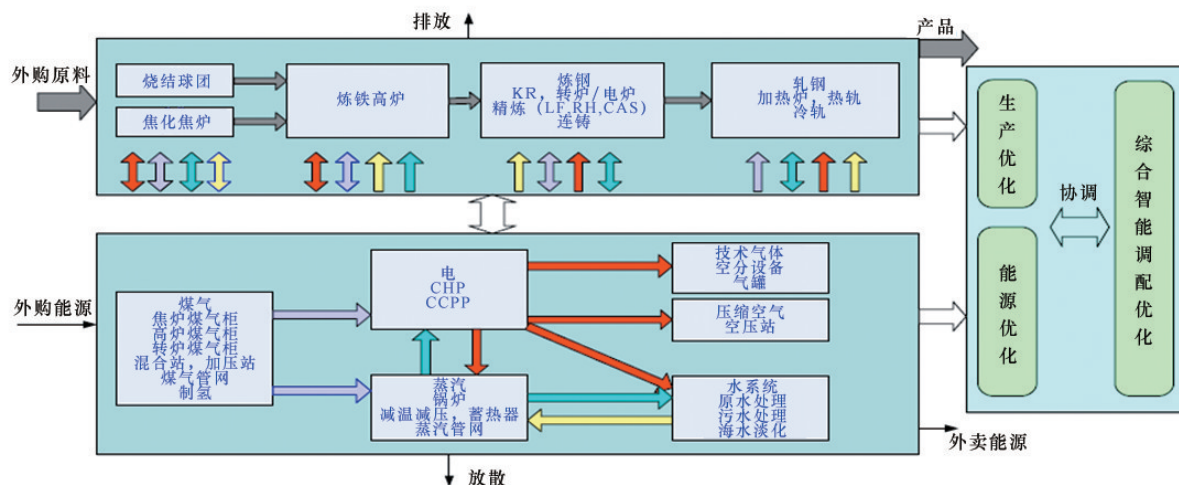


图7 物质流能量流协同

Fig. 7 Coordination between material flow and energy flow

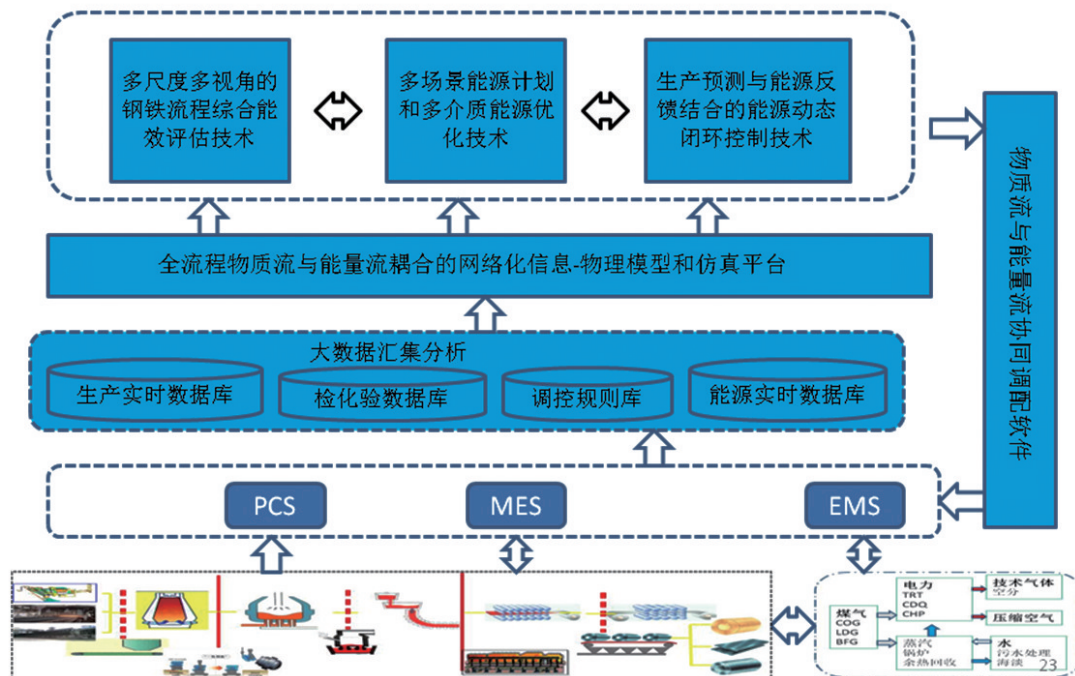


图8 实现物质流能量流协同的关键技术

Fig. 8 Key technologies for the coordination between material flow and energy flow

### 3.4 多工序协调优化

多工序协调优化是从全流程角度,基于界面技术,将各工序生产管理和过程控制系统进行协同起来进行系统优化,实现全流程连续紧凑、动态有序生产。多工序协调优化与一体化计划调度都强调全流程横向集成,只不过前者更关注生产流程“耗散”,后者更关注订单的完成。

要实现多工序协调优化,需要研究开发以下关键

共性技术:

- 1) 全流程物质流网络模型。
- 2) 基于物质流网络模型的动态仿真。
- 3) 工艺路径规程优化。
- 4) 界面协同优化。
- 5) 工艺模型与设定值优化。
- 6) 过程预测控制模型。
- 7) 工艺变量在线连续检测(图9)。

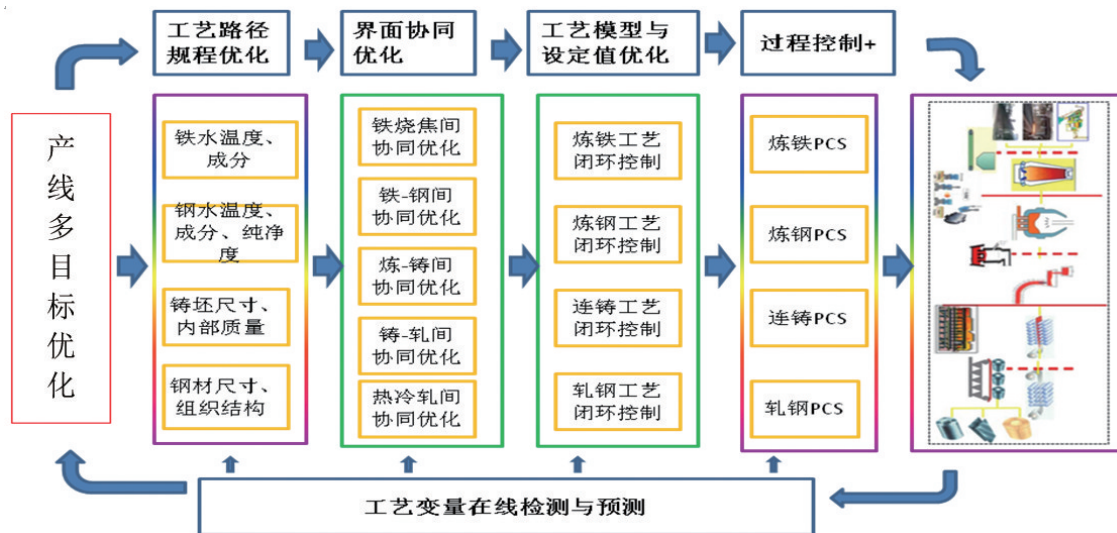


图9 多工序协调优化及关键技术

Fig. 9 Key technologies for multi-unit coordination optimization

## 4 钢铁工业智能制造需要突破的一些共性问题

钢铁制造流程具有强耦合性、不确定性、多约束性、多目标性等特征:

1) 强耦合性。钢铁流程是一个多工序组成复杂的高温物理化学过程。铁水、钢水、钢坯等在制品的温度调控是产品质量的保障,也是高效生产的前提,要求全流程各工序紧密衔接,连续紧凑。此外,各工序产品质量的遗传性,铁钢、炼铸、铸轧之间工艺界面优化进一步提高了工序间的耦合关联度。

2) 不确定性。在实际生产中存在很多随机的和不确定的因素,如外部订单的增减、交货期的改变、环保要求的产量限制,内部各工序加工时间的波动、设备状态的变化、质量偏差、物流瓶颈等,都会干扰全流程各工序顺行,需要动态调整。

3) 多约束性。流程生产需要满足交货日期、产品质量、物流能流平衡、工艺路径选择、工序设备产能和

作业时间、连铸连浇规程、工装设备周期、物流缓冲容量、节能减排等多方面约束限制条件。

4) 多目标性。流程生产目标包括客户交货期、产品质量要求、支持多品种小批量订单生产、设备利用率最优、作业时间最短、生产成本最低、能效高排放达标等,并且这些目标间可能发生冲突。

针对钢铁制造流程的强耦合性、不确定性、多约束性、多目标性等特征,要实现上述智能化钢厂“结构”优化和“程序”优化,需要在建模方法、优化机制、调控策略方面进行探索研究,取得一些突破<sup>[8-9]</sup>。

### 4.1 钢铁制造流程网络化建模方法

现有钢铁制造流程建模方法大多基于还原论方法,将流程系统分解为独立的各个子系统,然后以各个子系统运行特性简单叠加代替了流程对象整体的描述和分析,由于流程的非线性耦合性特征,难以描述流程复杂的动态行为。

因此需要探讨一些新的建模方法,如采取简单一致、单体准确、网络耦合、行为涌现的整体论建模方

法<sup>[8]</sup>。简单一致是指对简单事物往往会有一致的看法, 尽管人们容易对复杂系统(全流程)的整体行为的认识产生分歧, 但对相对简单的单体对象的局部行为和模型的认识往往能够取得一致, 从而对基于这些认识较为一致的局部行为所产生出的复杂整体行为也能够理解和接受。为此针对各单体(生产工序、运输设备等)利用以前过程控制研究结果建立满足计划调度要求的相对准确的数学模型。将上述单体模型按照流程的设备配置、工艺路径、连接方式、启停条件进行网络化建模, 以反映其相互关联耦合关系。通过输入生产任务、工况条件, 在仿真环境下, 产生复杂的互动方式和相关行为, 利用涌现方法进行观测总结, 了解、分析和理解流程复杂系统的行为及其各种影响因素(图10)。

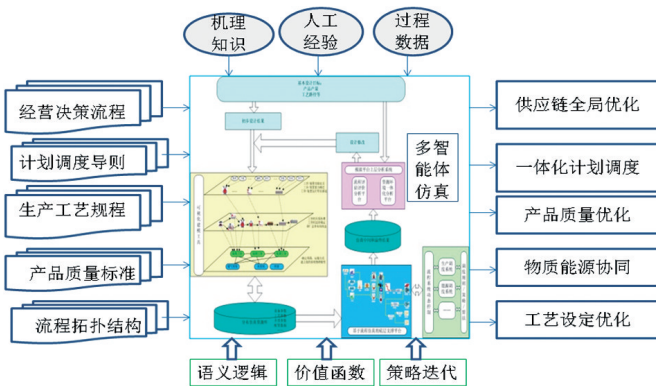


图10 流程网络化建模方法和多目标启发式优化机制  
Fig. 10 Process network modeling and multi-object heuristic optimization

#### 4.2 基于交互仿真的启发式优化机制

需要突破的问题有:

- 1) 相互冲突、量纲不一的多目标归一化。
- 2) 具有非线性耦合、动态变化特征的约束条件数字化模型。
- 3) 常规运筹学方法难以应用的整体优化求解。

现有优化机制是首先确定目标函数和约束条件, 然后通过问题求解(逆向求解)获得最优解。其局限性在于: (1)以各个子系统约束条件代替了流程对象整体的描述和分析, 由于流程的非线性耦合性特征, 难以通过各个子系统的约束条件描述流程复杂的动

态行为; (2)受限于问题求解算法对约束条件进行了简化处理; (3)目标函数和约束条件的参数取统计平均值, 难以反映不同品种、不同生产工况、不同设备状态等不确定因素的变化以及相互耦合的影响, 难以实现动态调整和协同优化。

因此, 需要探讨一些新的优化机制。例如, 首先建立对象(生产流程)详尽的网络化描述模型, 然后通过简单规则产生优化初始方案, 代入生产流程网络化描述模型动态仿真生产过程计算初始方案的结果(正向求解), 将结果与多目标进行对比, 确定下一步优化改进方向, 通过迭代优化给出多个满意解, 最终确定优化方案。

#### 4.3 反馈预测结合调控策略

需要突破以下问题, 形成反馈预测结合的调控策略:

- 1) 难检测工艺变量的软测量。
- 2) 机理、经验、数据相融合的对象模型。
- 3) 基于经验的异常因素前馈控制。
- 4) 具有对象模型的预测控制(图11)。

### 5 钢铁工业智能制造的推进路径

针对钢铁工业这种典型的流程制造业所具有的连续化、工艺体系复杂、生产过程不确定因素多、制造过程中间产品形态、性质及最终产品多样化的产业技术特点, 需要在明确智能制造发展需求的基础上, 循序渐进发展。

- 1) 企业发展智能制造应该与企业本身的战略定

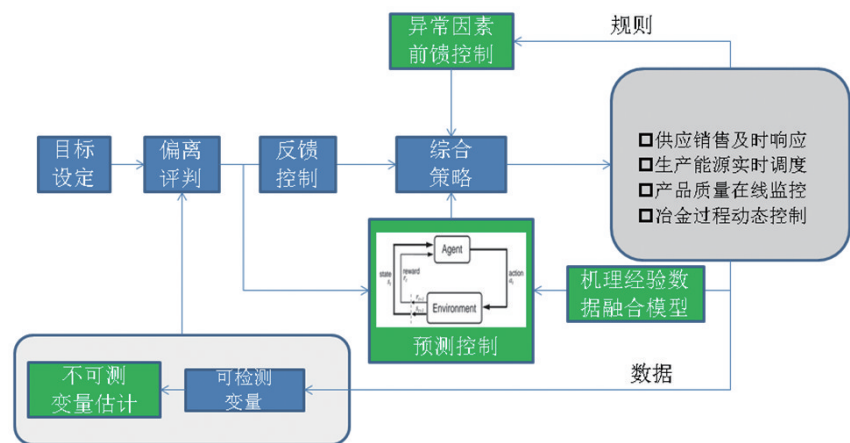


图11 反馈预测结合调控策略

Fig. 11 Control strategy with both feedback and prediction

位、商业模式一致。

各钢铁企业战略定位、商业模式不同,通过两化深度融合和智能制造提升企业实现发展战略所需的各项能力也不同。企业需要因企施策,根据自身的业务发展现状、市场定位、客户需求和资金投入等因素,选择合适的目标,确定智能制造的发展方向和实施路径。

2) 企业在实施智能制造时,宜采取逐级递进的技术路径。

智能制造是从低级向高级循序演进的过程。目前,中国钢铁企业间智能制造能力成熟度差异较大,因此,基础弱的企业需要在规范级、集成级层面下工夫,夯实基础,如产品质量和工艺规程数字化、标准化,各工序过程控制系统和工艺过程模型完善和提升,冶金流程物质流、能量流网络的改造和优化等。基础好的企业应向优化级、引领级提升,力争取得突破。

## 参考文献 (References)

- [1] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2009.
- [2] 殷瑞钰. 冶金流程集成理论与方法[M]. 北京:冶金工业出版社, 2013.
- [3] 殷瑞钰. 过程工程与制造流程[J]. 钢铁, 2014, 49(7): 15-22.
- [4] 殷瑞钰. 论钢厂制造过程中能量流行为和能量流网络的构建[J]. 钢铁, 2010, 45(4): 1-9.
- [5] 殷瑞钰. 从开放系统、耗散结构到钢厂的能量流网络化集成[J]. 中国冶金, 2010, 20(8): 2-14.
- [6] 殷瑞钰. 关于智能化钢厂的讨论——从物理一侧出发讨论钢厂智能化[J]. 钢铁, 2017, 52(6): 1-12.
- [7] 殷瑞钰. “流”、流程网络与耗散结构——关于流程制造型制造流程物理系统的认识[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(2): 136-142.
- [8] 王飞跃. 平行控制:数据驱动的计算控制方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(4): 293-302.
- [9] 商秀芹, 王飞跃, 孙彦广, 等. 平行钢铁: 从钢铁制造信息化到智能化体系研究[C]//第九届全国平行管理会议. 大连, 2018.

## On integrated optimization for steel intelligent manufacturing

SUN Yanguang

Automation Research Institute of Metallurgical Industry, Beijing 100071, China

**Abstract** The purpose of intelligent manufacturing in iron and steel industry is to optimize the structure and process of iron and steel process so as to realize dynamic, orderly, coordinated and continuous operation and multi-objective optimization in a whole. In this paper, the main contents and key technologies of structural optimization and program optimization in steelworks are introduced, including multi-PDCA closed loop for quality management and control, integrated planning and scheduling, coordination between material flow and energy flow, and multi-unit coordination optimization. Some common problems are analyzed, which the steel industry needs to overcome to make breakthrough in promoting intelligent manufacturing and some promising implementation paths are proposed.

**Keywords** intelligent manufacturing; steelworks integrated optimization; steel manufacture ●



(责任编辑 祝叶华)