**北 京 科 技 大 学**

**博士学位研究生**

**选题报告及文献综述**

论文题目：钢铁生产物流与能流耦合调度ERTN模型与方法



指导教师： 吕志民 研究员

单 位： 冶金工程研究院

学 号： B20130521

作 者： 李 婷

专业名称： 机械工程

入学时间： 2013年9月

2016年1月23日

目 录

[目 录 III](#_Toc441254230)

[1 选题背景及研究意义 5](#_Toc441254231)

[1.1 选题背景 5](#_Toc441254232)

[1.2 选题目的及意义 6](#_Toc441254233)

[2 文献综述 8](#_Toc441254234)

[2.1 钢铁企业物流和能流 8](#_Toc441254235)

[2.1.1 钢铁企业生产流程过程及特点 8](#_Toc441254236)

[2.1.2 钢铁企业生产能量流 12](#_Toc441254237)

[2.2 钢铁企业物流与能流研究现状 15](#_Toc441254238)

[2.2.1 生产计划与调度 15](#_Toc441254239)

[2.2.2 能流计划与调度 17](#_Toc441254240)

[2.2.3 能耗指标体系 19](#_Toc441254241)

[2.2.4 能效指标 20](#_Toc441254242)

[2.2.5 物流与能流集成建模研究 21](#_Toc441254243)

[2.3 研究方法 22](#_Toc441254244)

[2.3.1 生产计划与调度研究方法 22](#_Toc441254245)

[2.3.2 STN&RTN在调度问题中的应用 27](#_Toc441254246)

[2.3.3 钢铁生产过程扩展RTN（Extended Resource Task Network） 29](#_Toc441254247)

[2.4 已有研究中存在的不足之处 30](#_Toc441254248)

[3 研究内容及研究计划 32](#_Toc441254249)

[3.1 研究内容 32](#_Toc441254250)

[3.2 实现步骤 33](#_Toc441254251)

[3.3 主要创新点 34](#_Toc441254252)

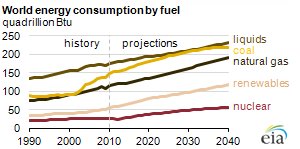
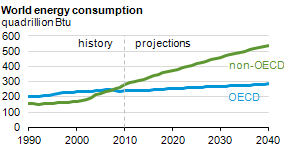
[3.4 技术路线 35](#_Toc441254253)

[3.5 研究计划 35](#_Toc441254254)

[参考文献 36](#_Toc441254255)

1. 选题背景及研究意义
   1. 选题背景

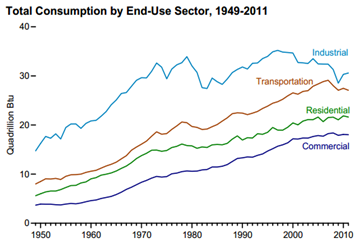
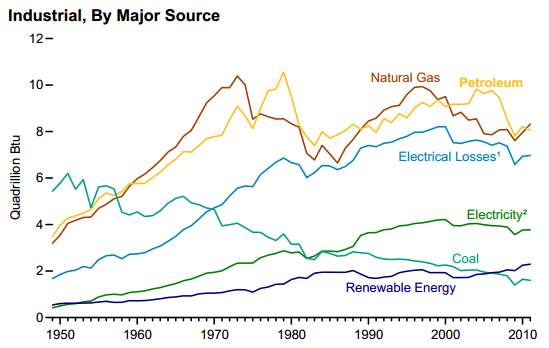
随着全球范围内工业化进程加快和人口快速地增长，世界总能耗在逐年地递增，能耗速度也在不断加快。美国EIA(能源信息管理局)2013年6月发布的International Energy Outlook 2013 (IEO2013)指出从2010年到2040年全球能源消耗总量将增长56%，从524万亿英热增至820万亿英热，见图1-1。



资料来源：U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook 2013。http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=12251

图1-1 1990-2040年世界能耗变化趋势

工业是能源消耗的主要行业，见图1-2，中国工业能耗占总能耗的70%左右[2]。工业消耗的能源以石油，煤，天然气等为主，同时产生大量的废弃物和废气废水，污染环境，因此，“节能与减排”就成为世界范围内各行各业的关注焦点之一。钢铁工业是国民经济的支柱产业，属于流程行业，是典型的联合生产企业，能源耗费总量相当大，是节能减排的重点行业[1]。中国钢铁工业能耗占全国工业总能耗的17%左右[2]，而我国钢铁工业能源消耗以煤炭为主，占能源消耗总量的70%左右，中国钢铁工业排放的CO2约占人类总排放的12%以上[4]，远远高于世界其他国家和地区。因此，钢铁业可持续发展问题越来越受到钢铁业界企业家和技术专家的高度重视[3]。而在钢铁工业中排放的CO2主要通过副产煤气放散产生，所以减少副产煤气放散是钢铁行业节能减排的有效途径之一。



资料来源：U.S. Energy Information Administration, Energy Consumption by Sector。http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/pdf/sec2.pdf

图1-2 1950-2010年世界各行业能耗变化趋势（左）和工业主要能源变化趋势

在钢铁生产过程中，原材料经过焦化，烧结，炼铁，炼钢，连铸，热冷轧到被加工成最终产品，形成物质流。在物流运行过程中伴随着能源流的产生和消耗，能源包括副产煤气，电力，蒸汽，水等。煤气包括高炉煤气，焦炉煤气，转炉煤气，焦炉，高炉和转炉各自产生的煤气相应的煤气管网后供应给钢厂中各煤气消耗单元，剩余的煤气供给CCPP机组发电，发电过程中产生的蒸汽也可以供给各使用单元。因此，副产煤气是钢铁生产过程中产生和消耗的重要二次能源，是钢铁行业节能降耗中重点。另一方面，副产煤气与生产相互影响，副产煤气的发生与消耗受到生产过程中物料的投入产出，工艺制程，炉况的影响。他们之间存在伴生关系。因此，研究钢铁企业生产过程中副产煤气产销和生产之间的耦合伴生关系具有一定的现实意义。

* 1. 选题目的及意义

目前专门针对钢铁制造流程，运行中物流与能流协调运行机制的研究还比较少。物流调度与能流调度相对独立，能流调度属于应急调度，主要依赖于经验进行调度平衡。虽然实现了副产煤气的循环与利用，仍存在吨钢能耗偏高、能级利用不合理、物流与能流运行协调性差等问题。在传统的联合钢铁企业运营管理模式中设置了相对独立的生产管理部门与能源管理部门，各自负责不同的业务。针对钢铁企业的计划与调度理论研究中，生产计划与调度理论重点关注以铁素体为的物流过程，能源计划与调度一般假设已知能源需求前提下，关注于企业内一次能源、二次能源计划平衡与调度。因此，将钢铁企业生产中物流、能流集成建模，具有一定的实际意义。

本文从钢铁企业节能减排的视角，基于现有研究和实际调研，分析影响副产煤气（高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气以及混合煤气）发生和消耗的关键因素，绘制各工序煤气产消动态预测曲线。然后识别钢铁企业物流和能流运行机制，建立基于各个生产阶段的物流和能流耦合调度模型。在此基础上，构建综合考虑物流平衡、能流平衡、能耗水平、CO2 排放等多目标流程集成优化模型，揭示钢铁制造流程中物流与能流协调运行机制及调控策略，形成较为系统的钢铁企业物流与能流集成优化与调度理论、技术，为提高钢铁生产流程物流-能流以及与环境协调运行水平、提高能源合理利用和节能减排水平，以及企业构建新一代生产能源管控中心提供理论基础，具有很强的理论和现实意义。

1. 文献综述
   1. 钢铁企业物流和能流

钢铁生产是一个连续和离散混合的生产过程，伴随着复杂的物料和能源产生和消耗过程，包括许多的物理、化学变化，是一个复杂的铁-煤化工生产系统[6]。铁矿石经过一系列工序发生物理化学反应转化成钢铁成品或废弃品,构成钢铁生产过程，即物流转换过程。同时，煤等含碳原料也经过一系列物理化学加工转化为能源产品或废料、废气，构成能源转换过程。各种物料在各个工序中经过物理化学反应产出钢铁成品，形成物质流，在此过程中，伴随着各种能源的转换、使用及放散，形成能量流。物质流和能量流既独立又相互联系、彼此制约，物质流是钢铁生产的主体，能量流推动物质流的流动和转变[6]。

* + 1. 钢铁企业生产流程过程及特点

钢铁生产工艺流程包括焦化、烧结、炼铁、炼钢、连铸、热轧和冷轧等生产过程，如图2-1所示。生产过程中有多种类型的生产设备，工作方式既有连续的，也有间歇的。整个流程中各工序之间呈非线性关系，相互合作、相互影响、相互促进、相互制约。钢铁产品的总体工艺过程和结构，特点是中间的半成品少而两头的原辅料及成品种类多，特别是成品的品种繁多，生产过程周期长，工序性质差别较大[7]。因此，钢铁生产过程实质上是一个融合时间、空间、温度和能量等为一体的多维物质流管制系统[8]。

根据钢铁生产过程中被加工对象所处的化学性质和物理形态不同，通常将钢铁生产过程划分为炼铁、炼钢、连铸和轧制四大阶段，无论是以铁矿石为原料还是以废钢为原料，炼钢、连铸、热轧三个阶段都是钢铁生产的核心工序，也是钢铁生产管理的重点对象。每个阶段分别具有如下的特征：

(1)炼铁阶段

炼铁阶段是将铁从其自然形态铁矿石等含铁化合物中还原出来的过程，是典型的流程式生产，是目前获得大量生铁的主要手段。其过程主要是将铁矿石、焦炭和石灰石等送入高炉(Blast furnace)进行冶炼，将铁矿石分解熔化形成铁水，作为原料供给炼钢工序。

钢铁企业生产流程过程及特点:



表2-1钢铁企业工艺流程

在高炉炼铁的过程中同时产生大量可燃气体高炉煤气，高炉煤气既可以作为热源供给高炉热风炉和焦炉，也可以存储在煤气柜中或转化为其他能源（如热能，电能等）。焦炭是煤在密闭的焦炉内隔绝空气高温下焦化产生，焦化过程中还产生一定量的焦炉煤气，焦炉煤气供给烧结机，焦炉和高炉作为燃料，也可以存储在煤气柜中或转化为其他能源（如热能，电能等）。此外，高炉煤气和焦炉煤气可以同转炉煤气混合成混合煤气供应给连铸机和热轧工序中的加热炉。

(2)炼钢阶段

炼钢是指将铁水和废钢等原料按照一定比例有顺序地加入转炉中，经过一系列化学反应除去铁水中的C、Si、Mn、P等元素，将铁水分解转化为所需要的钢水，供给连铸、轧钢等工序。整个过程可细分为冶炼 (转炉或电弧炉)和精炼 (精炼炉)两个工序。冶炼工序接受炼铁阶段送来的铁水，合并废钢一起送入转炉(Converter)或电弧炉(Electronic arc furnace)进行冶炼，经吹氧、脱碳去杂质后转变为钢水，同时伴随大量转炉煤气的产生。当钢水的温度和成份达到预定的要求时，进入精炼炉(Refinery furnace)进一步精炼，通过精炼控制钢水的化学成分和温度，为后续连铸工序的浇注过程做准备。炼钢阶段以“炉次”(转炉容量)为单位进行复杂的物理和化学变化过程。

钢水精炼时，可以采用单一的设备或工艺，也可利用多种设备或各种工艺的组合，以宝钢为例，其炼钢工艺流程如图2-2所示。从图中可以看出，炼钢工艺主要体现在钢种流向多，精炼路径多，工序复杂交叉。RH在主要的精炼工艺中的精炼功能和效果最好。RH在脱气( 脱氢) 和脱碳时具有独特优势；而在脱氧、去夹杂和不污染钢水条件下的升温功能上，LF 则占有优势；由于CAS具有成分、温度控制和净化钢水功能，而且精炼周期短，所以，CAS 处理钢种能满足连铸长时间多炉连浇；KIP 的精炼功能则主要体现在脱硫和钙处理。另外，有些精炼设备具有相同的精炼功能，在具体选择这些设备时会有不同的考虑，例如：RH、CAS、LF 都有升温的功能，但RH和CAS采用化学方法升温，LF采用物理方法升温。化学升温的同时使钢水的夹杂物增多，物理升温则不会带来新的夹杂物，因此LF在对合金化后钢水的升温特别是在挽救连铸低温钢水上有优势。钢种精炼工艺的选择需要根据钢种的成分、质量要求和精炼功能的比较来确定。

图 2-1 宝钢——炼钢精炼工艺

(3)连铸阶段

连铸阶段是将钢包中的高温钢水不断倒入中间包内，经由中间包流入下面的结晶器中，钢水沿结晶器周边冷凝结壳(即坯壳)，当坯壳有一定的厚度时，开动拉锭装置，使铸坯随引锭下降，与此同时，铸坯被二次冷却装置进一步冷却凝固，然后按计划要求被切割成一定规格尺寸的板坯，作为轧制阶段的原材料。

在一定周期内，钢水在一台连铸机上的浇注过程需要连续进行，不能断流，如果断流将需要更换中间包和结晶器。对连铸机来说，更换中间包和结晶器要增加设备成本费用和调整时间。因此，为降低成本提高生产效率，在中间包的寿命周期内，要尽可能地实现多炉连浇。连铸阶段基本的加工单位是“浇次”。一个“浇次”是指在同一台连铸机上，使用同一个中间包和结晶器连续浇注的炉次集合。

(4)轧制阶段

从连铸机拉出的板坯，经不同的输送路线送往热轧机组(Hot Mill)，由轧机按订单要求轧制成各种规格的钢卷或其他轧材，直接供应市场或供给冷轧工序进一步深加工。在热轧阶段，由于高温、高速轧制，轧机的工作辊磨损很大，需要不定期更换。为减少轧制过程中对轧辊的磨损，降低生产成本和保证产品的表面质量，调度人员必须按照一定工艺规程安排板坯通过轧辊的轧制顺序。通常，将更换轧机两个工作辊之间所轧制的一个完整的板坯序列称作一个“轧制计划”或一个“轧次”。轧制阶段以“轧次”为基本的加工单位，一个“轧次”内板坯的轧制顺序受板坯宽度、厚度、硬度等工艺参数的限制。

冷轧是指金属在再结晶温度以下进行轧制变形的工艺操作，通常是在室温下进行轧制，以提供高精度和性能优良的钢板和带材为目的。其生产加工工艺包括：结构变化过程、表面处理过程和精整过程。结构变化过程有冷轧、退火等，表面处理过程有镀锡、镀锌、彩色涂层等，精整过程是进行形状尺寸和外观处理的过程。

在钢铁企业的生产过程中，冶炼阶段主要以化学反应为主，后续阶段以物理变化为主。整个生产过程具有复杂、突变和不确定等特性。钢铁生产过程的前几道工序包括焦化、烧结、炼铁、炼钢一旦开始，中间不能间断，持续进行直至结束。生产过程比较连续，工艺流程也基本保持不变，产品比较稳定，具有连续型生产流程特征。而后几道工序生产过程分离，工艺流程根据产品不同而改变，产品随加工需求而变化，具有离散型生产流程特征。

根据钢铁生产工艺过程可以看出，不同于机械行业的离散式生产，也不同于石油、化工等行业的纯流程式生产，钢铁产品生产是一个半连续半离散的生产过程。其生产流程具有以下特点[9]：

(1)产品种类多样化。①钢铁企业生产出的产品都是由天然铁矿石和煤等原材料生产而来，可供机械行业或其它行业再加工使用，因此也叫“一次产品”。②根据形状来划分，钢铁成品可分为管、板、型、卷、线等5大类，产品的形状不同，其对应的生产计划的制定方法不同。③由于钢铁企业的生产特点，在生产成品的同时也可能产生大量半成品以及附属产品。

(2)连续性与离散性生产并存。钢铁生产过程分段连续，炼铁和炼钢阶段为连续生产，而连铸和轧制阶段为离散生产，因此整个生产过程既有连续性又存在离散性。炼铁和炼钢阶段的产品为液态形式，整个生产过程具有连续性，不能间断。而连铸阶段的产品既可以作为轧制阶段的原料，又可以作为单独的成品进行市场交易，因此与轧制阶段又存在间隔性。

(3)物流过程复杂。①产品的生产批量大，并有大量不同种类的原料和半成品同时进入生产过程，从有限的原材料投入到多种产品种类的产出，生产物流图呈树状。②从原材料到最终钢铁产品的整个生产过程中，原材料的化学特性、物理特性和机械特性都在不断变化。③在物流转换过程中不但有热金属的产生，还伴有能量和水的大量消耗。④物流、能流、信息流需要进行综合管理，并且要求同步管理。

(4)生产工艺制约性强。①生产过程是多阶段的。②对于一种产品来说，其工艺路线基本是单一固定的。③前后工序间存在相互制约和相互联系的关系，因此，工序间节奏要匹配。

(5)设备构成复杂且集中。①生产主要集中在几个关键工序(或流水线上)，如炼钢、连铸、热轧等，设备的布置几乎固定不变。②单机设备大、功率大。③设备操作与维护需要集体人工负责。④设备布置有串、并、混联三种方式，构成了连续的生产布置。

* + 1. 钢铁企业生产能量流

能量流，即碳素流，是以煤的形式(洗精煤或燃料煤)开始。洗精煤以适当配比进入焦炉，经过一系列化学反应转化成焦炭、焦炉煤气和焦油，在此过程，碳素流转化为固态焦炭和气态碳一氢化合物、液态碳一氢化合物。另一类煤以煤粉形式与铁矿粉等混合，经烧结机转化为一定还原程度的烧结矿并排放出CO2、CO等气体[5]。炼铁阶段，铁矿、烧结矿等含铁料与焦炭等进入高炉，经鼓风燃烧并发生升温和还原反应，形成液态含碳生铁并排出含有CO2、CO等高炉煤气。此高炉煤气既含热能、化学能，还有动能，可供加热和发电。过还原的高温含碳铁液，经吹氧转化为液态钢并排出蕴含CO2、CO的转炉煤气，此煤气既有热能(>1600℃)，又有化学能(CO)，可回收蒸汽和热值1800kcal/m3以上的煤气。钢液经脱氧、合金化、净化后经连铸机转变成高温铸坯，铸坯经不同类型的煤气适度加(均)热后，经高温压力加工转变成一定组织形态的钢材[7]。以上就是钢铁生产流程中能流的转化过程及其对物流运行、转化的作用过程。

在生产过程中，能量流既追求提高能源转换效率，又重视及时充分地回收加工过程中排放的热量和能量(碳素流的转化体)及集成回收各工艺环节排出热量和能量，尽可能地实现钢厂内部不同形式的碳素流循环[10-11]。钢铁企业生产过程中涉及的与碳素流相关的能源主要有电力，煤气，蒸汽等。钢铁生产过程中所产生的二次能源副产煤气，既可以作为生产工序所需的燃料和能源，也可以经过再加工转化为蒸汽和电力，富余的煤气将作为废气被放散到大气中。合理有效地利用副产煤气一方面能够减少外购能源，节约能源成本，提高企业的经济效益；另一方面，能够减少废气的排放，降低环境污染，具有很好的环境效益。

1)钢铁企业生产过程中副产煤气网络

在钢铁生产过程中，排放的CO2主要通过副产煤气放散产生，减少副产煤气放散是减低CO2排放量的有效途径之一。副产煤气包括高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气以及混合煤气，是钢铁生产过程中副产的优质气体燃料，约占钢铁企业能源总收入的30~40%，是可循环利用的能源资源。与钢铁企业消耗的其他能源不同，副产煤气是在钢铁生产中产生的二次能源，不需要任何附加费用，但很难做到大量且长时间保存。实际生产过程中，副产煤气的产消量受到多种因素的影响，例如生产工序，设备检测，检修计划，生产计划和状态，生产制度等都能够引起煤气发生量和消耗量的波动。而且由于煤气系统有众多的产消环节，不同的消耗用户对煤气的要求也不同，所以短时间内可能出现煤气的不平衡状态，此时企业需要外购能源或者放散过剩煤气以达到煤气系统的整体平衡，从而导致高耗能和资源浪费。表1-2中，2013年重点钢铁企业焦炉煤气放散率为1.25%，高炉煤气放散率为3.46%，转炉煤气回收量为101立方米/吨。考虑到我国钢产量较高，因此煤气放散总量所折算的能源量损失是巨大的。据统计，2014年6月，重点钢铁企业共生产粗钢6862.8万吨、生铁5981.4万吨、钢材8982万吨、焦炭3877.2万吨。转炉煤气回收量达到100立方米/吨，相当于可多回收200万吨以上标煤。

表1-2重点钢铁企业副产煤气的利用情况

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 高炉煤气放散率% | 焦炉煤气放散率 | 转炉煤气回收量 |
| 2013 | 3.46% | 1.25% | 101 m3/t |
| 2014 | 2.42% | 0.61% | 106 m3/t |
| 增减 | -1.04% | -0.64% | 5.02 m3/t |

如图2-3所示，高炉煤气为炼铁过程中高炉产生的副产气体，主要成分包含CO, CO2, N2、H2、CH4等。高炉煤气成分和热值与高炉所用的燃料、所炼生铁品种及冶炼工艺有关，经过加压站PS（Pressure Station）可以用于焦炉，高炉，热风炉，热轧，冷轧和发电等。焦炉煤气是焦化过程中焦炉产生的气体，主要成分包含氢气和甲烷，另外还含有少量的一氧化碳、二氧化碳、氧气、氮气等。其产率和组成因炼焦煤质和和焦化过程条件不同而有所差别。焦炉煤气经过压力站PS后可用于高炉、焦化厂、热冷轧厂、发电等。转炉煤气是炼钢过程中转炉产生的副产品，主要成分为一氧化碳60～80%，二氧化碳15～20%，以及氮、氢和微量氧，经过加压站PS后可以用于高炉，锅炉，钢厂和发电等。焦炉煤气和高炉煤气经过混合加压站MGS（Mix Gas Station）可转化成转炉煤气，此外，焦炉煤气、高炉煤气和转炉煤气通过煤气混合站MGS混合成混合煤气，该煤气既可作为燃料用于板/管/线材厂，也可以用于烧结厂，石灰窑，内部用户等。



图2-3钢铁企业副产煤气产消网络图

2)钢铁企业生产过程中的能源网络

在钢铁生产过程中，除了副产煤气，能源主要还有电力，蒸汽等，图2-4描述某钢铁企业能流特点。电力包含外购电和自备电厂发电，其中，自备电厂能源来源于副产煤气，TRT压力，及烧结余热。自备电厂发电产生的蒸汽可用于各使用单元。副产煤气主要包含焦炉产生焦炉煤气（COG），高炉产生高炉煤气（BFG），转炉产生转炉煤气(LDG)及前三种煤气按一定比例在混合煤气加压站里加工而成的混合煤气。焦炉煤气通过管网进入焦炉煤气柜存储，可用于热风炉，自备电厂发电，及各使用单元。同时，也可以进入混合煤气加压站转化成混合煤气用于加热炉。富余的焦炉煤气也可以通过放散塔放散。高炉煤气通过管网进入高炉煤气柜存储，可用于热风炉，各使用单元，及TRT或者自备电厂发电等。富余的高炉煤气也可以通过放散塔放散。转炉煤气通过管网进入转炉煤气柜存储，可用于转炉，热风炉，各使用单元，及自备电厂发电等。富余的转炉煤气也可以通过放散塔放散。

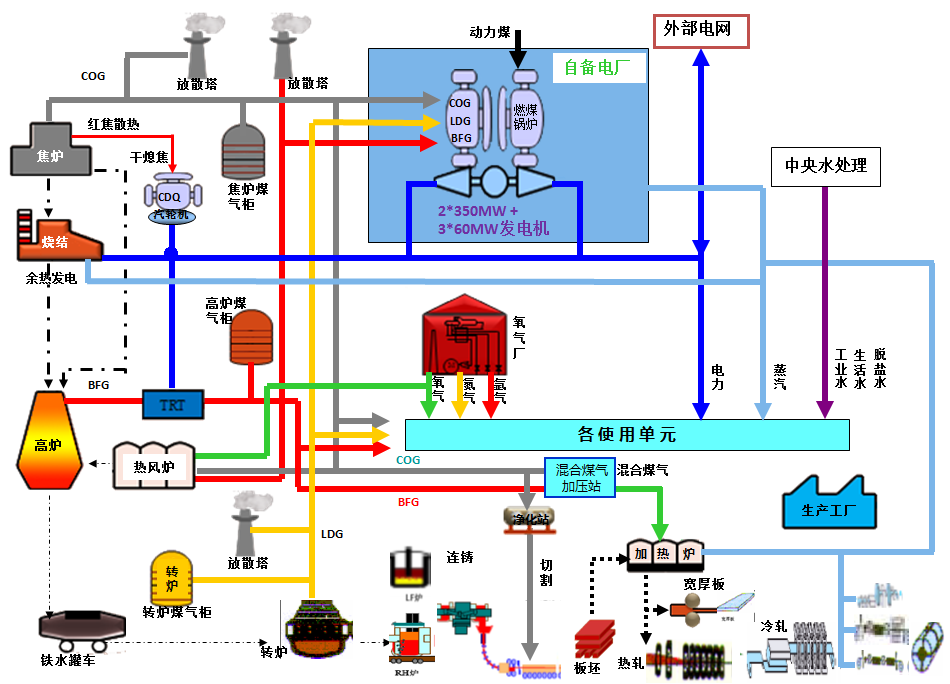


图2-4钢铁企业能源特点

* 1. 钢铁企业物流与能流研究现状

在钢铁企业的生产计划与调度中，相关研究主要聚焦于单纯以铁素体为的物流过程或者以碳素体为主的能流过程的研究。

* + 1. 生产计划与调度

物流调度主要关注于工序作业调度和企业级的生产计划平衡与优化，唐立新[12]等在钢铁企业(integrated steel production)集成生产与调度方法研究综述中指出，传统的钢铁企业计划与调度理论研究一般以工序的生产调度优化为核心，重点研究在满足主要生产约束和交货期条件下，生产计划或调度优化。俞胜平等[13]针对炼钢连铸生产过程中微调度问题, 在分析各种调整方式基础上，考虑生产工艺约束和产能约束，建立了基于变约束的炼钢连铸动态调度数学模型。随后，针对多阶段、多设备以及精炼工序重数不同的炼钢连铸生产调度问题，俞胜平等建立了的非线性规划模型，综合考虑工序设备指派和作业时间安排，提出了三阶段炼钢连铸混合智能优化调度方法[14]。该调度方法应用于中国某大型钢厂的生产调度，在减少钢水冗余等待时间、提高设备负荷率方面获得显著成效。许剑等[15]综合考虑了直接热装(Direct hot charging rolling)和直轧工艺(Direct rolling)的特点, 提出在冶铸轧一体化组批时用组合批代替传统的连铸作业计划和热轧作业计划，并建立了时序条件多收益旅行商MPCT SP-TC 模型。最后，根据模型的特点，提出了分组协同蚁群算法求解该模型。唐立新等[16]针对上海宝钢生产过程中的生产订单调度问题，为了一些关键和瓶颈工序上的生产订单调度问题，考虑实际工艺技术和产能约束，建立了混合整数规划模型(MIP)。此外，基于协同组合的拉格朗日松弛，线性规划和启发式方法，提出一种分层求解方法。Bellabdaoui 和Teghem[17]，针对钢铁生产中的瓶颈问题，考虑工艺约束和交货期，建立了混合整数规划问题求解炼钢连铸调度问题（steelmaking-continuous casting）。Sung 和 Maravelias[18] 建立了一种新的混合整数规划用于解决单个工序单元的多产品约束批量计划问题。Mattik[19]等为了解决钢铁企业热轧和连铸联合调度问题，针对单个工序，考虑不同钢种的工艺顺序和轧制工艺，提出基于地块规划原则(block planning principle)的混合整数规划模型。通过实验证明了该种方法在实际钢厂中的实用性。

随着市场竞争的加剧，目前许多学者借助于高级计划与调度理论，采用合同计划方法以制造过程有限能力为约束，满足订单交货期为目标进行整体生产计划优化[20]，取得较好的效果。吕志民等[21][22]以客户需求满足度、企业效益等为目标，考虑了有限生产能力、库存和工艺约束，构建了基于网络流的钢铁中企业长期生产计划优化模型和短期计划优化模型，提高了资源的利用水平。Tang等[23]为了解决CIMS环境下炼钢连铸SCC生产调度问题，考虑了实际生产中按时交货和生产操作连续性，建立了基于JIT的非线性数学模型。Hvolby 和Steger-Jensen[24]指出ERP 和APS很大的提高了物料和能力计划的集成。APS使用有限的物料和工厂资源能力来安排生产以满足客户需求。以上研究多聚焦于在满足订单交货期、生产工艺或合同计划等约束下，实现单个或多个工序的物流计划或调度，但是由于生产计划与调度方案的制定分属于不同的决策层，所以根据生产计划制定的调度子方案有可能不可行。此外，不能确保计划方案的最优性，因为计划问题可能不能提供生产成本的精确估计，而在调度问题中通过具体的任务计划计算出生产成本，若计划问题和调度问题得出的生产成本不一致，使得生产计划和调度方案不匹配，造成最优的计划方案被误判成不可行解[27]。所以一些研究致力于研究钢铁生产计划与调度集成优化方案，以确保由生产计划得到的调度方案可行或最优。

安玉伟等[25]建立了离散双层规划模型来解决一类两阶段生产系统的生产计划与调度集成优化问题，并提出一种基于混合优化方法的分支定界解法以及有效缩减搜索空间的方法，并构造了有效下界。Wu 和Ierapetritou [26]通过一个层次架构解决生产和调度协同优化。该层次架构包含一个计划模型和一个调度模型，计划模型主要考虑物料平衡和时间约束，而调度模型是连续的，根据滚动时域策略可以得到当前阶段的生产量。然后，一个迭代架构被用于收敛计划和调度结果。Li 和Ierapetritou [27]把计划和调度集成问题看作两阶段的优化问题，包含一个上层的单个计划问题和下层的多个调度问题。由于集成约束和大规模的特点，文中提出了一种基于求解算法的分解方法，把生产可行性约束看作是调度子问题的目标函数中的一个惩罚因子，这个因子与不能实现的生产目标数量成正比。Yue 和You [28]把实时库存控制决策嵌入到生产计划与调度中，建立的MINLP模型考虑过程网络中的多种因素之间的权衡，以决定生产计划，原材料购买量，最终产品销售，工序生产水平，详细的灵活的工序的周期性生产计划，库存控制和安全库存水平的最优方案。根据非凸的MINLP模型的特性，提出了一种基于连续分段线性逼近方法的剪裁分枝细化修剪方法。然而，这些文献多研究物流的生产计划与调度集成优化方案，关于生产过程中的能源考虑较少，即钢铁企业计划与调度理论研究中将能源耦合到生产调度物流模型中进行集成优化研究还比较少，也即关于钢铁企业的生产调度很少有文献关注能源平衡，优化与调度。

* + 1. 能源计划与调度

能源计划与调度一般假设已知能源需求前提下，关注于企业内一次能源、二次能源计划平衡与调度。国内外关于副产煤气的研究大部分以基于数据建模的单一工序预测为主，主要涉及高炉煤气，焦炉煤气和转炉煤气产生和发生量的预测。Yan等[29]对煤气管网动态建模和线性模型预测控制进行研究时，构建了使用时间尺度分解参数的降阶模型来描述闭环仿真工厂，随着维数的减少，得到对应的线性模型，用于线性模型预测控制（LMPC）设计。Fukuda等[30]提出了能源分配控制优化方法，即通过预测来优化能源需求，主要采用ARMAX方法对三种副产煤气的产生量进行预测。张琦[31]等采用灰色关联度分析了高炉煤气产生量、消耗量的影响因素与煤气量的关系。基于人工神经网络预测方法，建立了高炉煤气BP神经网络预测模型，对钢铁企业各生产工序中高炉煤气的产生和消耗量进行预测。盛春阳等[32]对基于数据的高炉煤气进行模糊建模，建立T-S模糊模型的高炉煤气系统辨识模型，考虑了系统中煤气调节用户的人为干扰特性，采用条件模糊聚类方法对输入输出空间划分，利用贝叶斯线性回归方法求解模型的后件参数，通过实际数据验证了模型的有效性。时飞飞[33]针对高炉煤气系统的预测问题，将系统中的产消用户分为非调节用户和调节用户。对于非调节用户，提出一种带参数的改进回声状态网络（ESN）时间序列方法进行预测。对于调节类用户则采用了平均值法进行预测。Zhao 等[34]提出一个基于改性的 ESN网络的两阶段网上预测模型来实现高炉煤气系统的预测。邱东等[35]针对高炉煤气的生产工艺，建立了基于BP神经网络的高炉煤气消耗预测模型，并进行了Matlab仿真，提出了高炉煤气的综合优化方法。周强[36]运用灰色马尔可夫预测模型对我国各年的能源需求进行了预测。该模型综合了灰色系统和马尔可夫链的特点，能充分利用原始时间序列提供的信息，具有较高的预测精度。Kim 等[37]针对副产煤气优化分配问题，提出了多阶段优化方法以阻止煤气排放和设备陷阱，及最大化提高能源使用效率。该方法权衡多个目标，柜位水平控制，最小化油耗，电力产生成本，最小化锅炉点火器转换成本。汤振兴[38]将焦炉煤气产消量预测归为一类基于时间序列的预测问题，将煤气柜的柜位预测归结为回归预测问题。建立了相应的基于最小二乘支持向量机的产消预测模型和柜位预测模型，加快了建模时间，同时提高了预测精度。姜曙光[39]建立了基于多元线性回归分析法的预测模型，并得出转炉煤气回收量的统计公式，由于转炉煤气生产过程复杂，回收时间不确定，煤气用户产消波动大，且我国各钢厂生产计划多以日或周为单位，无法获得短时段内产品产量等相关参数，很难建立短时段机理预测模型。田向伟等对于转炉产生量进行了拟合，求得平均钟罩，采用基于信号触发的拟合法进行预测，只是针对历史数据进行了相应预测[40]。

煤气平衡与调度优化将直接影响到企业的物流平衡、蒸汽循环、电力供应、水循环等系统能否经济、平稳运行，因此综合有效利用这些能源是实现节能降耗的关键所在。基于副产煤气产销量预测结果，一些国内外学者对煤气平衡与优化调度进行了深入探讨。目前针对钢铁企业能源调度研究多以副产煤气调度为核心进行能源平衡与调度优化[41 - 42]，主要聚焦于基于柜位预测的煤气平衡优化方法。Haining Kong[42]提出动态多周期MILP模型用于副产煤气优化，但研究中假设生产过程中副产煤气消耗量是提前知道的，忽略了制造过程物流对副产煤气供需的影响，仅优化副产煤气剩余量。有的研究中假设煤气产生和需求满足某种分布规律，然后进行优化[43]。这类计划与调度方法实际上仍然是一种序列化优化方法，即假设煤气的供应与生产的需求，然后通过调度能源系统设备使用，以降低煤气的放散，提高能源利用率。张晓平等[44]通过分析焦炉煤气的产消及柜位变化特点，建立了基于最小支持向量机的柜位预测模型。构造梯度网络搜索算法来优化模型参数和大样本筛选方法选取训练样本，从而提高预测精度。最后，上海宝钢实际数据被用于仿真实验来验证模型及其选择参数的有效性，结果表明预测结果良好，可为煤气的平衡调度提供科学指导。济钢采用回归模型预测煤气系统未来一段时间的发展趋势，并在此基础上动态给出各调整用户使用煤气量或混合站调整热值的操作建议，达到快速平衡煤气用量，减少煤气的放散，提出高效利用煤气的一种基于柜位预测的钢铁企业煤气动态平衡实时控制方法[45]。Akimoto等[46]提出了用MILP方法对煤气柜位的水平进行控制来优化分配副产煤气，并在优化模型中增加适当的处罚费用。Sinha等[47]考虑多周期之间的锅炉开关费用来解决多周期优化问题，用MILP来优化资源配置以达到利润最大化。齐二白等[48]综合考虑了钢铁企业整体能源系统，用改进的MILP方法对全厂煤气进行多周期动态优化，同时兼顾了煤气柜的波动和副产煤气的分配优化。Zhao[49]等针对钢铁企业煤气调度中的实时预测柜位水平问题，基于简化梯度法把最小二乘支持向量回归(LSSVR)扩展到多核学习方法(MKL)中。基于LSSVR的MKL方法采用核函数的最佳线性组合来提高模型的泛化和减少训练时间。采用经典废平坦函数和实际问题的实验表明提出的方法能够达到很高的计算效率和很好的效果。Zhang[50]等提出一种预测和调整煤气柜位预测的优化方法。为了考虑不同操作方式的煤气柜，基于机器学习方法提出单个或多个煤气柜位水平预测模型。并提出了混合参数优化算法来优化模型预测精度。此外，基于预测的柜位水平，通过一种新的推理方法计算优化调整量来是柜位保持安全水平。通过应用提出的方法于宝钢能源中心，证明该方法能够精确的预测和调整柜位，指导副产煤气合理调度。

* + 1. 能耗指标体系

为了进一步提高钢铁生产中的能源效率，一些研究中引入能耗指标体系用以关注物流、能流的耦合作用，但主要是关注物流能流之间转换，在调度层面缺乏可操作性。殷瑞钰院士针对钢铁企业能量问题发表了一系列的重要文章。他曾经提出钢铁企业的三个主要功能是“钢铁产品制造，能源转换和废弃物消纳、处理、再资源化”[51]。这在钢铁冶金研究领域是非常重要的理论基础和研究出发点。文中阐述了钢铁制造流程中铁素物质流和能量流的行为规律，提出了应注重与铁素物质流相关的能量流的输入/输出特点和能量流网络构建以及相应的信息化集成调控的观点，剖析了钢铁工业节能减排的潜力，探讨了相关理论的建立、技术开发和工程化实施的策略等[52]。同年他还提出，在钢厂制造流程中，铁素物质流与碳素能量流的关系是相伴而行的，而碳素能量流与铁素物质流的关系则是时合时分的。从铁素物质流系统和碳素能量流系统提出了一系列钢厂节能减排的着手环节。特别对钢厂"只买煤、不买电、不用燃料油"的内涵与煤气等含能介质"近零"排放作了解释。提出中国钢厂的节能减排应该进入以建立能量流网络——能源管控中心为主要标志的新阶段[53]。

来自东北大学东北大学国家环境保护生态工业重点实验室的蔡九菊教授和他的团队则从生产实际出发，更细致的分析了钢铁企业能量流。蔡九菊等[54]把钢铁企业生产系统分解为相互关联的物质流动和能量流动，并针对物质流动和能量流动过程，分别制定物流图和铁流模型，以及能量流图和能量流模型。基于这两种模型，建立了物流和能量耦合模型，分析了物流和能流变化，以及其相互作用对钢铁企业能耗，资源和能源效率等的影响。此外，针对考虑钢铁生产过程中资源消耗、产品生产和污染物排放等问题，蔡九菊等[ ]构造了一张能源-环境负荷投入产出表，并应用物质平衡理论，建立了钢铁企业产品生产过程和能量转换过程数学模型。模型中给出了工序能耗、产品能值和吨钢能耗表达式，以及工序、产品和吨钢环境负荷计算公式。最后，分析了影响上述指标的各种因素，以及能流、物流和污染物流三者间的相互关系。于庆波等[55]提出“基准物流图”的概念以分析含铁物料在实际生产流程中各工序的流动情况，并针对偏离“基准物流图”的各股物流，建立其对能耗影响的计算公式及计算步骤。陆仲武等[56]剖析了我国钢铁企业吨钢综合能耗指标，提出了多个静态指标，例如，吨钢综合能耗，工序能耗，工序铁比系数和钢比系数来评价钢铁企业的吨钢能耗，指导钢铁工业的节能降耗。这些文献中主要采用静态研究方法，关注物流、能流的耦合作用，聚焦于静态指标⎯吨钢能耗，虽然成果在工程集成设计取得成功应用，但由于研究中没有引入时间变化，在计划与调度层面缺乏可操作性[57]。张小雷等[41]通过分析钢铁企业煤气、蒸汽、氧气和电力子系统能源介质间投入产出关系，建立基于时间变量的线性规划模型，完整地解释了能源间的相互制约与平衡关系，并结合某大型钢铁企业生产企业实际生产数据进行试验，实现了能源成本最小化。

* + 1. 能效指标

钢铁企业制造过程本质是以铁素体为主的物流在能流驱动下的有序运行过程，各主要环节运行过程中物流与能流是耦合、伴生关系。但目前研究中对物流与能流时空转换特性的同时性考虑不够，针对钢铁企业能源计划与调度理论研究中，一般将采用序列化方法进行调度优化，该方法不能保证物流与能流运行过程时空转换特性，以及反映两者之间耦合与伴生关系，增加了企业运行成本和能耗水平。部分学者将能效指标约束引入到生产计划与调度中，取得很好的节能降耗效果或者降低用电成本。近年来，国外部分学者针对钢铁行业典型工序生产计划与调度研究时，将能源约束增加到生产计划与调度模型中也取得了很好的效果[58-59]。Artigues等[60]从实际工业问题中抽象出一个通用的问题，能源调度问题（EnSP）即生产调度问题中考虑能源约束，能源主要考虑电力。文中提出一种扩展的特定资源约束传播技术来有效地修剪EnSP问题的解的空间，并提出一种基于树检索分枝方法来求解问题。针对短流程钢铁企业中冶炼工序，Ashok提出一个考虑电力负荷及价格成本的生产调度模型并进行优化，显著降低了电费成本[61]。Nolde [62]提出一种跟踪钢铁企业电力负荷的调度解决方案，可按预先定义的电力供应及成本曲线调度生产任务，以降低电费成本。SSAB钢铁公司研发了用于联合钢铁企业的过程集成的数学模型[63]，该模型可从经济性、能源消耗和环境等方面对流程进行评价。

Tang等[64]解决的钢铁生产调度问题中考虑可变电力价格，并提出了一种分解方法求解问题。在第一阶段，不考虑可变的电力价格，采用数学规划方法减少每个轧制的最大完成时间。在第二阶段，基于已得到的所有轧次调度方案，提出以最小化能源成本为目标的数学模型求解所有轧次调度问题。最后，为了验证提出方法的可行性和有效性，两阶段模型应用于国内一家钢厂的实际生产过程，取得了很好的效果。Castro[65]等研究了钢铁企业计划与调度问题中波动电力价格对生产调度的影响，探讨了三种不同的基于RTN的离散数学模型。但是以上能源调度问题文献中的能源主要聚焦于电力，而钢铁企业生产中涉及的其他能源（煤气，蒸汽等）考虑较少。

* + 1. 物流与能流集成建模研究

在欧盟研究计划中目前重点支持工业企业将能源有效性指标与生产管理中的需求。在相关流程行业（如石化、氢气供应、纸浆生产等）研究中将物流、能流集成建模，可显著降低能耗成本[57][66 -70 ]，提高运行经济性，取得很好的节能效果。SAAB构建过程集成模型进行综合评价，指导流程优化，取得不错效果。J.D Zhang将燃气系统调度与生产需求集成建模为多周期MILP模型，取得较好的优化效果[43]。B.J. Zhang将一个工厂范围的蒸汽、燃油和燃气集成建模为多周期计划模型，并改进了单元能耗模型，实现了整体平衡优化 [71] 。Mujtaba H. Agha 提出一个离散时间MILP集成调度模型，优化结果显示集成方法可显著降低能源成本，同时可降低有害气体的排放 [72] 。Susara A. Van den针对氢气供应网络进行优化调度，将生产计划与过程反应集成调度，取得了较好的应用效果 [73] 。Pedro M. Castro 研究了具有并行单元与共享存贮罐工艺过程的多产品生产调度问题 [74] ，模型同时考虑时变的电力价格与可获得性，以及多中间品的交货期，取得了更好的优化效果。

目前中国钢铁工业产能过剩严重，企业的设备产能只能发挥 70-80%左右。按照流程工程集成理论设计的钢铁流程，在产能不足时设备处于非设计状态运行，偏离了其经济运行区，直接增加了产品能耗成本和运行成本，生产运行过程物流与能流协调运行机制的理论研究滞后于工程实践。为提高钢铁企业运行过程能源使用有效性及运行经济性，达到更好的节能减排目标，必须遵循其流程生产运行的客观规律，紧密围绕生产过程中的物质流、能量流和时间流的运行转换机制，进行系统优化和科学管理。本文提出的钢铁制造流程物流与能流协调调度研究，以过程集成优化理论与方法对钢铁企业生产过程物质流和能量流进行深层次的研究，以期形成完整的理论体系指导企业生产运行，提高物流与能流运行的协调性，实现最佳的节能降耗，促进钢铁行节能减排和提高运行经济性。因此，将钢铁企业生产中物流、能流集成建模，具有一定的实际意义。

* 1. 研究方法
     1. 生产计划与调度研究方法

钢铁生产是一个多阶段、离散和连续加工方式并存的复杂过程，其生产计划的制定问题涉及很多的约束，大部分都是NP难问题。对于NP难问题，其求解所消耗的时间随着问题规模增大呈指数增长。这种问题描述起来容易，求解却非常困难。这种特点在许多工程应用问题中都有存在，并且吸引着众多的科学研究者对其进行研究。过去四十多年，生产计划及调度问题不断地应用许多新兴的科学技术，使得其研究工作得到也不断地充实和发展[75] 。

1)数学规划方法

数学规划是应用数学中的一个重要分支，发展比较成熟，应用也比较广泛[76] 。数学规划问题是指：在等式或不等式约束条件下求一元或多元函数的极值问题。常见的数学规划有线性规划、整数规划以及动态规划等。在一般的情况下，可能还需要解决多个目标的平衡和协调，这就是多目标下的规划问题。目前解决生产计划问题的几种常用运筹学算法有：

（1）线性规划

在数学规划中，目标函数和约束条件的函数式都是线性的，就称其为线性规划问题，一般是在满足一组线性约束条件下，求出多变量线性函数的最优值。线性规划问题常用的解法是单纯形算法以及在单纯性算法基础上改进的算法，包括修正单纯形法、原始-对偶算法、Dantzig-Wolfe算法等等，通过将生产问题的目标函数与约束条件用线性规划方程表示出来，再利用线性规划方法对问题进行求解，得到问题的最优解。

（2）目标规划

目标规划是一种针对线性规划的局限性而研究出来的数学规划方法，以便能更好地适应决策者解决某些显示问题的需要[77]，是一种多目标规划技术，其基本思想源于Simon的目标满意概念[78]。其特点是：第一，在每个约束条件中引入正、负偏差变量，使硬性约束变成软约束；第二，将距各个目标值得偏差综合最小作为目标函数，从而便于处理多目标问题；第三，用划分优先级的方法来处理多个目标的相对重要性，能更好地适应决策者的判断；第四，通过变量定界的方法来解决多解问题。

（3）整数规划

在等式（或不等式）的线性约束下，极大化（或极小化）某个线性函数，其中要求某些变量必须取整数，此类问题通常称为线性（混合）整数规划问题。此外，如果某些约束函数或者目标函数式非线性的，则成为非线性（混合）整数规划问题；如果所有自变量都限制为整数则称为线性整数规划。对整数规划问题比较实用的解法主要有：适用于线性整数规划问题的割平面法、适用于0-1 整数规划问题的隐枚举法以及任意整数规划问题的分枝定界法等。大多数生产调度问题都可以表达为整数规划或混合整数规划的形式，但其有效解用的是组合规划，等效于分枝定界法与动态规划法的求解[79]。

（4）动态规划

动态规划法是解决多阶段决策过程最优化的一种数学方法，主要用于以时间或地域划分阶段的动态过程的最优化[80]。最早由Bellman[81]于1957年提出，并在许多优化领域得到了应用。至今，动态规划已成功地用于解决生产计划、资源分配等问题。

数学规划方法作为一种辅助决策的定量分析方法虽然从理论上能求得属于精确解析的最优解，但其模型抽取困难、运算量大、算法难以实现。由于大多数生产计划、调度及相关问题为NP 难题，随着问题规模的增大，求解难度将呈指数规律递增，因此对于大规模生产计划与调度问题而言不一定具有实际可行性，而大多数组合问题只能通过启发式 (Heuristics) 算法或智能算法来计算近似最优解(局部最优)。

2)启发式方法

(1)基于规则的启发式算法

基于规则的启发式方法在生产计划和调度问题在研究中运用的比较广泛。它针对问题的NP特性，在计算时间和求解效果之间进行折中，以较小的计算量来得到近优解或满意解，有助于实时生产和调度。目前APS中应用最多的有两种基本选择规则：算法任务顺序计划选择规则和基于模拟的顺序计划选择规则[82]，主要包括：先到先服务规则FCFS，选择最先到达的工件进行加工；工序选择规则；资源选择规则等，针对基于规则的启发式方法一直是研究的热点之一。1954年，Johnson提出的基于两台机床上Flow-Shop排序问题的最优算法开始了对排序选择理论的研究。而关于启发式规则比较经典的文献为1982 年Blackstone等的一篇综述[83]。启发式规则简单易行，但难以得到全局优化的结果，并且对问题的性质与应用场合的依赖性较强。

(2)专家系统方法

专家系统在生产调度研究中占有重要地位。目前己经有一些较成熟的调度专家系统，例如Fox和Smith等人研发的ISIS[84]，以及ColIinot等[85]的SONIA等。调度专家系统通常将领域知识和现场的各种约束表示成知识库，然后根据现场情况从知识库中产生调度方案对意外情况采取相应的对策。使用专家系统的时所得的结果会受到问题规模变化的影响，即使变化很小，也会与最初的解有很大的不同，并且难以评估所得到的解的性能好坏。Fox[86]将应用专家系统的失败归咎于应用者对人工智能技术本身的误解和(或)获取、发展以及应用这些技术时缺乏有效的管理手段。

(3)拉格朗日松弛法

当NP难组合优化问题在原有的约束条件下很难求得最优解时，拉格朗日松弛法(LR-Lagrangian Relaxation)通过将造成问题难的约束条件吸收到目标函数中来降低问题的求解难度，以达到在多项式时间内求得减少了约束的问题最优解。LR得到的解不一定是原问题可行解，但是与原问题的可行解特别相近，由此使原问题变得可行。Hoitomt和Luh[87]研究了LR在作业车间调度中的应用，通过采用Lagrangian乘子与惩罚系数将约束条件松弛从而分解调度问题为多个工序级的子问题，然后选择工序的开始时间及所需机器类型，在LR目标函数中加入惩罚项以加快算法的收敛。另外，LR在柔性制造系统机器装载[88]和生产计划[89]等领域都有较好的应用。

3)智能优化算法

智能优化算法的思想是：基于直观或经验构造的算法，在可接受的计算费用内去寻找最好的解，但不一定能保证所得解的最优性。常用的智能优化算法主要有：禁忌搜索(Tabu Search，TS) 、模拟退火(SimulatedAnnealing，SA)、遗传算法(Genetic Algorithms，GA) 、神经网络(Neural Networks ，NN)和粒子群算法(Particle Swarm Optimization，PSO)等，其中TS、GA和SA是一类不同于NN工作机理的非确定性迭代算法。Sait和Youssef[90] 在其论著中，系统介绍了SA、GA和TS算法。具体介绍如下：

（1）遗传算法

GA是通过在算法上仿效生物遗传与进化理论搜索适应于给定环境(问题领域)的最优个体(问题的解) 的一类随机优化算法。20世纪60年代到70年代初，美国密歇根大学的John H.Holland和他的学生提出了遗传算法，并于1975年系统地阐述了遗传算法的基本理论和方法[91] 。Goldberg 等人[92]做了大量的工作，使遗传算法更加完善。Cheng等综述了这方面的具体研究应用情况[93]，包括如何进行编码、设计交叉变异算子、改进算法性能等。除了机器调度，GA也被广泛应用于其他生产领域，如批量计划[94]、工件分批[95]等。

（2）禁忌搜索

禁忌搜索是局部邻域搜索算法的推广，由Glover[96] [97]于1977年提出，该算法首先按照某种方式产生一初始可行解，然后搜索邻域中所有的可行解，然后取其最优解作为新的当前解。在搜索过程中为避免重复搜索，它采用禁忌表记录下搜索过的历史路径到达过的局部最优点或达到局部最优的一些过程，并在下一次搜索中利用禁忌表中的信息不再或有选择地搜索这些点或过程，每搜索一次就更新一次列表，允许一定程度地接受较差解，从而避免陷入局部最优解。选取的禁忌长度不能太大，但是禁忌长度短也会造成循环，也就是说可能在一个局部最优解附近循环。TS在其他方面的应用主要包括Job-Shop的调度问题、柔性制造系统的机器装载问题以及生产批量计划问题等[98]。

（3）模拟退火算法

1983年，Kirkpatrick提出了模拟退火算法[99]，该算法是一种启发式的随机寻优算法，其模拟了物理退火过程。求解时由一个给定的初始高温开始，利用具有概率突跳特性的Metropolis抽样策略在解空间中随机进行搜索，伴随着温度的不断下降重复该过程，最终得到问题的全局最优解[100]。Li和Wang[101]用SA进行了生产计划编制，Mitenthal[102]用SA实现了单台机器N个工件的调度问题等。

（4）粒子群算法

粒子群优化算法(PSO)是由Kennedy和Eberhart提出的一种并行随机搜索算法[103]。通过随机产生目标函数的解得到一个初始化的种群，种群中的个体被称为粒子。每一个粒子搜索最优位置的过程类似于飞鸟觅食的行为，跟随当前的最优粒子“飞过”问题的解空间。每个粒子的移动是通过速度的修正和位置的调整来实现，速度的变化以该粒子以前的速度、当时该粒子达到的最优位置(pbest or pb ) 以及整个种群当时达到的最优位置(gbest or gb)来计算。粒子群算法最早被应用于非线性连续函数的优化和神经元网络的训练，后来也被用于解决约束优化问、多目标优化问题、动态优化问题等。

（5）混合算法

混合方法通常集中了几种算法的优点，比单一算法具有更强的搜索性能，还可以处理计算复杂性更大的问题。常见的有拉格朗日松弛法与神经网络、遗传算法与模拟退火、遗传算法与禁忌搜索等组成的混合算法。

采用智能优化算法的共同特点为：1）搜索比较盲目，搜索时算法自身不知道何时结束；2）方法近似，不能保证找到最优解；3）具有“爬山”特性，即偶尔允许接收较差的解；4）算法比较容易实现；5）算法具有通用性，适于求解任意类型的组合优化问题；（6）算法探测到的子空间的质量很大程度上依赖于所使用的启发式知识；7）算法的收敛速度对所选择的参数有较大的依赖性。

（5）混合算法

混合方法通常集中了几种算法的优点，比单一算法具有更强的搜索性能，还可以处理计算复杂性更大的问题。常见的有拉格朗日松弛法与神经网络、遗传算法与模拟退火、遗传算法与禁忌搜索等组成的混合算法。

采用智能优化算法的共同特点为：1）搜索比较盲目，搜索时算法自身不知道何时结束；2）方法近似，不能保证找到最优解；3）具有“爬山”特性，即偶尔允许接收较差的解；4）算法比较容易实现；5）算法具有通用性，适于求解任意类型的组合优化问题；（6）算法探测到的子空间的质量很大程度上依赖于所使用的启发式知识；7）算法的收敛速度对所选择的参数有较大的依赖性。

4)约束规划

约束规划（Constraint Programming，CP）是上个世纪80年代中期从人工智能领域发展起来的一种计算科学技术，直到最近才被意识到是一种强有力求解优化问题的工具，尤其是在计划与调度领域，可以用来弥补传统的数学规划技术的不足，吸引了运筹学领域的特别关注[104]。约束规划通过建立约束满足问题（Constraint Satisfaction Problem，CSP）的模型来求解所描述的问题。约束满足问题的构成包括一个变量集、变量的值域和限制变量取值的约束集[105] [106]。约束规划提供更灵活的建立数学模型框架的方法，建立的模型能够有效地接近问题的原型，模型中的表达式表示比较直观，更容易让人理解，可以包括非线性和非连续函数。约束规划利用变量之间的约束关系从变量的值域中预先或动态地消除非法解、修剪搜索空间、减少组合爆炸、降低计算复杂性，从而减少求解组合优化问题的计算量。

约束满足问题本质上是组合优化问题，由于许多CSP问题都是NP难问题，不存在有效的解法。利用约束规划方法求解约束满足问题的主要求解方法是回溯[107] [108]、一致性算法[109] [110] [111]、约束传播[112] [113]、树搜索算法和启发式修复算法。一致性算法判断变量之间的约束是否有解，约束传播通过不断增加新的约束过滤和收缩变量的值域，树搜索可以找到问题的所有解，启发式修复通过冲突导向，可以在搜索空间中随机跳跃，快速搜索问题的解[114]。

* + 1. STN&RTN在调度问题中的应用

1988年，Kondili等[115]提出用一种新的通用图形化表达方式——状态任务网STN(State Task Network)来描述批处理过程，并在其基础上提出了基于离散时间描述的混合整数线性规划(MILP Mixed Integer Linear Programming)模型解决批处理生产过程调度问题。STN是一种包含两种节点和一种连接弧的双支图。在STN中，状态(State)节点表示各种物料资源，包含进料、中间产品和最终产品，任务(Task)节点表示处理步骤或加工过程[116]。这种方法通过状态节点存储的资源和中间产品来确定是否可以进行下一步操作，以避免复杂的操作顺序的描述，而且允许批次的合并与分离。随后，部分学者相继采用STN 解决批处理生产调度问题并进行了改进创新。Lee[117-119]等提出了基于STN的MILP求解批处理生产计划与调度问题。Maravelias 和Grossmann[120]针对多产出批量生产短期调度问题，提出一种新的连续时间状态任务网来描述问题。并考虑不同的存储策略，批量可变，及顺序相关建立时间等情况，建立更为通用的MILP，采用任务解藕的技术减少二进制变量个数，消去任务的开始时间以减少大M约束的个数，从而减小模型规模，使计算更为有效。Shah等[121]改进了文献[62]提出的模型，减小了模型规模，并加快了求解速度。但Pantelides[122]指出，STN存在一些缺陷：比如任务只包含处理任务，其他如存储、清洗等行为只能当作特殊任务来处理，不同的资源处理的方法不同等等。因此，Crooks[123]在STN的基础上进行推广，考虑过程管线的连接，提出了最大化状态任务网mSTN(maximum State Task Network)，弥补了STN和RTN的上述前两个缺陷。mSTN可以给出过程的详尽描述，可以充分利用的过程设备的存储能力，还能检查多余任务分配和存储任务分配。然而这种描述方法更加复杂。此外，2002年，Majozi等[124]提出的状态顺序网SSN (State Sequence Network)，以及1996年Voudouris 和 Grossmannr[125]提出的用箭头和方框表示批处理过程的表示方法。

在1994年Pantelides[126]建立了基于STN的一种更通用和更有效的表示方法资源任务网RTN(Resource Task Network)。RTN中将设备、存储、物料传输及公共设施按统一的方式处理，并建立了MILP模型求解批处理生产调度问题。其他学者也采用这种方法做了相关的研究工作[126-130]。Schilling等[130]建立了基于RTN的连续时间MILP调度模型，并提出了一种新的分支定界算法，对连续和离散变量都进行分支。Kyriakidis[131]等针对确定性单模资源约束的调度问题(RCPSP)提出一种新的基于连续时间模型的混合整数规划模型(MILP)。文中采用RTN描述调度问题及建模。Wassick和Ferrio[132]针对调度优化中的离散RTN模型，提出了一些已应用于the Dow化工厂的RTN扩展以满足工厂实际需求。 Chen 和Chang[133]集成任务调度和热回收问题于一个统一的多目标批量工序框架，建立了基于连续RTN的批量调度模型，同时针对批量工序的热集成阶段性调度问题，建立MILP模型，采用文献中两个算例验证了算法的有效性和适用性。Durand[134]等提出一系列整数修剪方法来提高STN/RTN建模的短期调度问题的计算性能。RTN的特点是所有的生产资源具有统一的描述和特征，而且都允许被生产和消耗。RTN的优点主要在于对所有操作采用统一的时间刻度，使得模型的表达更为直接，容易被人接受。但由于时间概念本身的连续性，及操作时间的可变，使得这种模型只能近似地描述生产过程，难以找到最优解。

由于，STN和RTN可以描述绝大部分批处理过程，因此它们在批处理过程调度中的应用最为广泛。Castro等[135]针对工业批量生产中提取的最佳周期表调度问题，建立了基于RTN的离散时间和连续时间公式表达。针对多目标的批量或连续工厂调度问题，提出一种新的基于RTN表达的简单通用数学公式[136]。Chen [137]等聚焦于把多目标批量工序中的任务调度和热回收问题集成为一个统一的框架，建立基于RTN的批量调度公式。You和Castro[138]针对反应分离网络和考虑副产品循环的造纸产中的工业循环调度问题，建立基于连续时间RTN的混合整数线性分式规划模型。从RTN相关文献我们可知，RTN架构在处理批量调度问题中有优势，但是RTN主要关注物料调度问题，没有考虑生产过程中公用能源的产生与消耗，且不允许同步处理能源的产生和消耗任务。结合钢铁企业生产特点，构建ERTN网络能够更有效、更统一地图形化表示钢铁企业生产过程中的物流和能流耦合过程。因此，在本文采用ERTN来描述和建模钢铁生产过程中物流和能流。

* + 1. 钢铁生产过程扩展RTN（Extended Resource Task Network）

Pantelides[122]于1994年提出了RTN将设备、存储、物料传输及公共设施按统一的方式处理，并建立了MILP模型求解批处理生产调度问题。资源任务网 (RTN)本质上是一个由两种节点，资源节点和任务节点构成的双向图表。RTN架构的主要突出特点是把所有资源用统一的方式处理。

图2-5 资源任务网络架构的元素

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| NAME | SYMBOL | VARIABLES | REPRESENTS |
| 任务节点 | Task K  (, ) | :最大批量  :最小批量  :处理时间 | 表示产生或消耗特定资源集合的处理操作 |
| 资源节点 | Resource  Name  Resource  Name  **(, )** | :资源r的初始量  ：资源r的最大存储能力。 | 资源是一个完全通用的概念，包含生产工序中的所有实体，例如物料（原材料，中间产品和最终产品），处理设备（油箱，反应器等），公共设施（水，蒸汽等）和人力。  原始架构采用圆圈来表示所有类型的资源。后来，椭圆形节点被引入来代表加工设备和人力，而圆形节点用于表示物料和公用资源 |
| 连接弧 | x% | x：当与相邻连接弧的所占比例不是同时的批量比例 | 原始架构采用固定的连接弧表示所有种类资源输入和输出任务节点。现在，固定弧仅用于表示公用或物料资源与任务节点连接。为了简化图形表达，添加不存在的虚线用于表示任务节点和资源节点（加工设备，公用资源和人力）相连。 |

从RTN相关文献[119-139]我们可知，RTN架构在处理批量调度问题中有优势，但是RTN主要关注物料调度问题，能源涉及较少。在钢铁企业生产过程既是离散的又是连续的，在生产钢铁成品和半成品的同时，伴随着多种能源（副产煤气，蒸汽，电力等）的产生与消耗。所以，结合钢铁企业生产特点，拟构建扩展RTN(ERTN)把钢铁生产过程中物流和能流调度问题统一到一个通用的统一的架构中具有一定理论意义，不仅能够采用统一的图形化方法描述钢铁企业生产过程中的物流和能流运行过程，而且能够构建通用的、有效地钢铁企业全流程物流和能流耦合调度问题的建模和求解方法。

* 1. 已有研究中存在的不足之处

总体看来，国内外学者对钢铁生产计划和调度优化方面的研究已做了大量工作，取得了很多有价值的成果，这些成果为本研究提供了理论支撑，但同时也存在一些不足之处，主要表现在：

(1) 针对物流或能流的计划与调度很多，但是物流和能流协同调度的很少。物流调度主要关注于工序作业调度和企业级的生产计划平衡与优化，采用合同计划方法以制造过程有限能力为约束，满足订单交货期为目标进行整体生产计划优化。但在钢铁企业计划与调度理论研究中将能源约束集成到生产调度模型中进行集成优化研究还比较少。能源计划与调度一般假设已知能源需求前提下，关注于企业内一次能源、二次能源计划平衡与调度，往往以基于数据建模的单一工序预测为主。关于副产煤气的研究主要聚焦于副产煤气的预测，平衡与优化。虽然一些研究中引入能耗指标体系用以关注物流、能流的耦合作用，但主要是关注物流能流之间转换，在调度层面缺乏可操作性。

(2) 考虑能耗指标的生产调度中，电力成本涉及较多，副产煤气调度较少。部分学者将能效指标约束引入到生产计划与调度中，取得很好的节能降耗效果或者降低用电成本。但能源调度中的能源主要聚焦于电力，而钢铁企业生产中涉及的其他能源，例如，煤气，蒸汽等考虑较少。

(3)单个和多个工序物流或能流调度问题研究较多，全流程物流和能流调度研究较少，统一的描述物流和能流运行的方法研究较少。能流计划调度主要集中于单种或多种煤气的预测和调度。关于整个钢铁生产过程中的物流与能流协同调度涉及较少。此外，不同的研究采用不同建模和抽象方法，采用统一的表征物流和能流运行机制工具的研究较少。

(4)求解方法具有多样性，缺乏有效地统一的通用的表征的求解方法。无论是针对物流或能流调度，求解方法集中于非线性规划，智能算法，约束规划等，虽然，这些方法在解决研究提出的问题具有一定的优越性，但关于这些方法是否适用于整个钢铁生产调度流程的讨论较少，更别说探讨具有普适性的全流程钢铁生产物流与能流调度优化方法。

(5)调度与优化方法涉及较多，钢铁物流与能流协调运行机制及策略涉及较少。目前，关于钢铁生产调度的研究主要聚焦于单个或多工序计划与调度的方法，以达到在满足交货期和工艺约束下实现利润最大化或成本最小，而研究工艺条件及工况对物流与能流耦合关系的影响机制，建立运行机制及协调策略的研究设及较少。

1. 研究内容及研究计划
   1. 研究内容

本课题以新一代可循环钢铁流程为背景进行理论建模、抽象，以及实证研究，重点研究物流与能流协调运行机制。利用具体钢厂中生产管理系统与能源管理系统取得物流及能流数据，针对物流与能流协调运行方面存在的问题，从实际运行数据进行分析、建模、抽象，开展相关研究，形成共性的理论和技术。研究中从以下几方面开展工作：

（1）借助于目前企业制造执行系统（MES）与能源管理系统（EMS）运行后产生数据，探讨工艺条件及工况对物流与能流耦合关系影响机制，分析钢铁企业物流和能流特点，提出钢铁生产过程描述和建模的ERTN方法（定义元素，建模规则及描述方法），建立每个工序的物流和能流ERTN描述及模型，然后，把各单元模型集成为钢铁企业物流和能流全流程ERTN模型，提出基于全流程物流和能流的ERTN描述及建模方法。

（2）基于ERTN表达及建模方法，根据铁前系统中物流和能流的特点，建立铁前物流和能流调度问题的ERTN表达及模型来描述。初步估计要求解的模型属于多约束多目标问题,拟在GAMS中采用MDT多参数分解技术，CP+数学规划或CP+智能算法求解模型。根据钢后系统特点，建立物流和能流耦合ERTN模型，拟采用铁前问题提出的研究方法求解模型。

（3）描述物流与能流协调运行规律的集成优化调度模型是多目标复杂约束的非线性优化模型。重点研究复杂的多约束多目标问题优化方法，尤其是非线性优化模型线性化求解方法。针对数学模型的特征，研究高效的约束优化与智能优化、数学规划相结合的优化算法，即CP+数学规划或CP+智能算法，CP用于分解约束，把模型分解成多个子模型，然后采用数学规划或智能算法求解子模型的可行解或最优解。最后，若所得解是最优解则直接返回结果，若不是，则通过协调策略不断迭代以得到整体模型的最优解，如图3-1所示。

（4）利用构建的流程模型及优化算法，提出不同约束与工况条件下优化的运行与调度模式，研究分析新一代可循环钢铁流程运行过程物流-能流的协调运行模式与动态调控策略。

* 1. 实现步骤

对于以上四部分，拟采用以下四步进行解决：

**Step1：**分析钢铁企业物流和能流特点，提出钢铁生产过程描述和建模的ERTN方法包括定义元素，规则及描述方法等。针对钢铁制造流程的特点， ERTN描述和建模钢铁生产和副产煤气的耦合，在ERTN中，资源节点包括原料，设备，中间产品等，任务节点表示各个工序及其物流和能流输入输出关系，有向连接弧表示物质流和各种煤气COG,BFG及LDG。 然后，基于数据关系和ERTN方法，建立每个工序的物流和能流ERTN描述及单元模型，现阶段已建立多种不同的单元模型，未来需要根据优化结果进行实际验证。最后，把各单元模型集成为钢铁企业物流和能流ERTN全流程模型，并提出基于全流程物流和能流的ERTN描述及建模方法，具体如图3-2所示。



图3-2 钢铁企业生产物流和能流方法实现步骤

在这个过程中，拟出现创新点1：钢铁生产物流和能流耦合ERTN表达及建模。

Step2：基于提出的ERTN方法，根据铁前系统中物流和能流的特点，基于数据构建物流和煤气发生之间的关系，建立铁前物流和能流调度问题的ERTN模型。初步估计要求解的模型属于多约束多目标问题, 拟在GAMS平台上采用MDT多参数分解技术，CP+数学规划或CP+智能算法求解模型。流程问题包括石油精练问题，钢铁生产问题，水网络问题，纸浆生产等，是一类NP难问题，通常建立的模型属于非线性规划NLP或MINLP，由于非凸的双线性变量的存在，这些NLP或MILP模型很难用传统的基于梯度搜索的算法求得最优解。Castro and Teles[ ]采用MDT方法求解水使用网络优化问题中的双线性变量（两个连续变量的乘积），得出基于MDT的MILP方法优于传统的商业求解器PCM, BARON 和GloMIQO。因此，针对提出的ERTN模型中可能存在的双线性变量拟采用MDT方法进行求解。

Step3: 基于提出的ERTN方法，根据钢后系统中物流和能流的特点，基于数据构建物流和煤气发生之间的关系，建立钢后物流和能流调度问题的ERTN模型。初步估计要求解的模型属于多约束多目标问题, 拟在GAMS平台上采用MDT多参数分解技术，CP+数学规划或CP+智能算法求解模型。

这两步的创新之处在于，1)典型工序（铁前和钢后）的物流和能流集成调度模型及方法；2)探讨高效的统一的优化方法。

Step4：把典型工艺的ERTN模型抽象到钢铁企业全流程，验证前面提出的方法的可行性，从而，提出统一 的、通用的全流程模型；针对Step2和3中的求解方法，提出具有通用性的表征优化算法；最后，分析不同工况下的钢铁企业物流和能流协调运行策略。

这部分的创新点在于: 研究不同约束与工况条件下物流-能流的协调运行模式。

* 1. 主要创新点

因此，拟解决问题和方法的创新点如图3-2所示，主要包括：

（1）构建普适性的钢铁企业全流程ERTN的描述及建模方法；

（2）建立钢铁企业典型工序的物流和能流集成调度模型及方法；

（3）探讨高效的约束优化与智能优化、数学规划相结合的优化算法，用于求解提出的物流和能流集成调度模型即多目标多约束的非线性模型；

（4）研究分析新一代可循环钢铁流程运行过程物流-能流的协调运行模式与动态调控策略；提出不同约束与工况条件下优化的运行与调度模式。

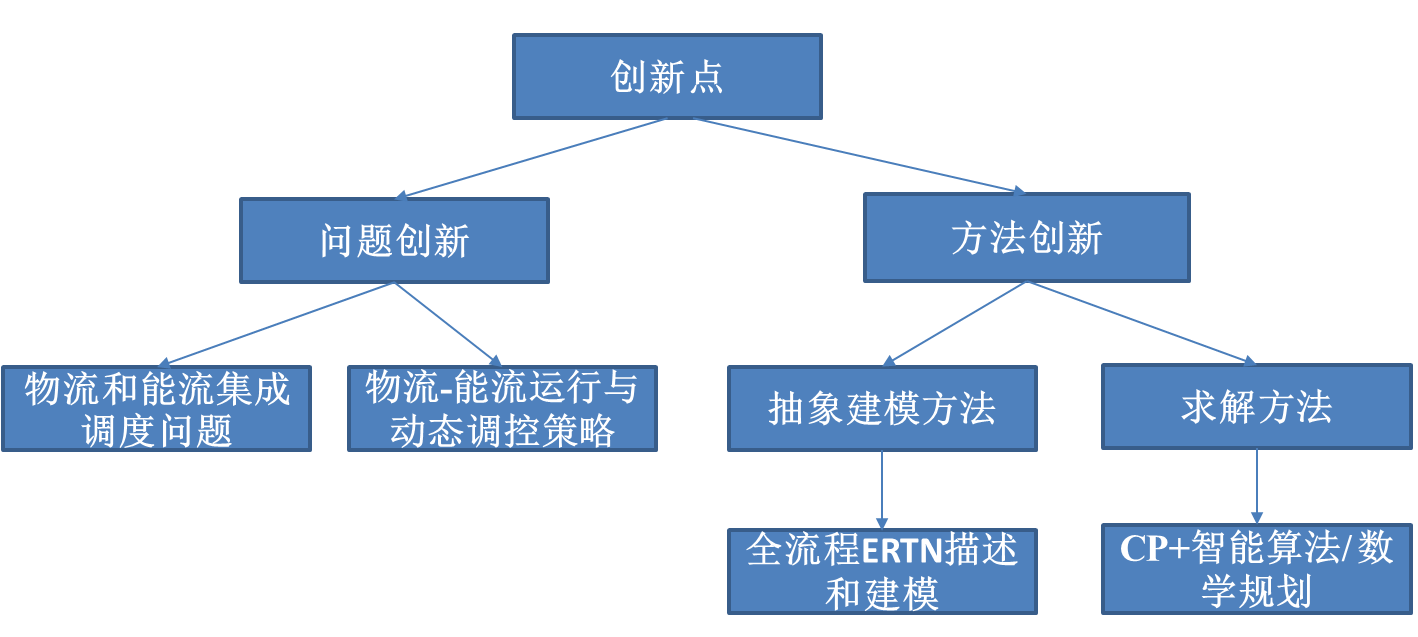


图3-2 创新点图示

* 1. 技术路线

（1）文献研究，理论综述：调研钢铁企业物流与能流调度的文献成果和研究现状，充分总结、分析已有研究成果。

（2）实地调研，发现问题：深入钢厂调研钢铁生产中的物流与能流运行机制，获得实际生产中的物流和能流数据，发现待解决的实际问题。

（3）描述问题，建立模型：从实际出发，在充分描述问题的基础上建立基于ERTN的典型工序的单体模型和全流程整体模型，提出表征全流程物流与能流网络及建模方法。

（4）设计算法，求解模型：根据模型特点设计相应算法，以实现模型的求解。

（5）数值试验，检验算法：根据从钢厂获得的物流和能流数据进行数值试验，验证模型及算法性能和效率。

（6）仿真测试，检验模型：根据钢厂实际问题给出仿真测试算例，检验模型及算法的可靠性。

* 1. 研究计划

|  |  |
| --- | --- |
| 2013年9月－2016年1月 | 调研并查阅文献对实际问题进行分析、总结，提炼其中的科学问题，并对目前该类问题的研究现状进行总结；进行钢铁企业调研，深入钢厂调研钢铁生产中的物流与能流运行机制，获得实际生产中的物流和能流数据。在充分描述问题的基础上建立基于ERTN的典型工序的单体模型和全流程整体模型，提出表征全流程物流与能流网络及建模方法。准备开题。 |
| 2016年1~9月 | 建立铁前系统ERTN描述和模型，设计相应算法求解模型。根据从钢厂获得的物流和能流数据进行数值试验，完成1篇论文编写。建立钢后系统ERTN描述和模型。撰写中期论文，准备答辩。 |
| 2016年10月~2016年12月 | 根据钢后模型的特点设计相应算法求解模型。进行数值实验，整理现有成果，完成1篇论文编写。 |
| 2017年1月~2017年5月 | 构建表征钢铁企业全流程ERTN建模及方法；提出不同约束与工况条件下协调运行与调度模式，完成1篇论文编写。撰写大论文，申报毕业。 |
| 2017年4-5月 | 完成论文，送外审，准备答辩。 |

参考文献

1. 柴天佑，生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战，自动化学报，2009,6(35),641-649
2. 王维兴. 钢铁工业能耗现状和节能潜力分析[J]. 中国钢铁业, 2011 (4): 19-22.
3. 谢企华，钢铁企业实现可持续发展的途径，中国工程科学，2005(5):9-15.
4. 国家“十一五”科技支撑计划项目“新一代可循环钢铁流程工艺技术”可行性研究报告，2006-07-10. 2015-06-23.
5. 殷瑞钰，关于钢铁制造流程优化与产品优化问题的讨论，钢铁，2004，8(39)，9-16
6. 蔡九菊, 王建军, 陆钟武, 等. 钢铁企业物质流与能量流及其相互关系[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2006, 27(9): 979-982.
7. 殷瑞钰．冶金流程工程学[M]．北京：冶金工业出版社，2004，125-133．
8. 郭冬芬．基于约束满足的钢铁生产计划与调度方法研究.北京:北京科技大学博士论文,2007,3.
9. 唐立新，王梦光，徐建有．钢铁企业CIMS体系结构的研究[J]．东北大学学报，1995，16(6)：628-632．
10. Korhonen J, Savolainen I. Cleaner energy production in industrial recycling networks [J]. Eco‐Management and Auditing, 2001, 8(3): 144-153.
11. Marukawa K, Edwards K L. Development of iron and steel into eco-material [J]. Materials & Design, 2001, 22(2): 133-136.
12. Tang L, Liu J, Rong A, et al. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 133(1): 1-20.
13. 俞胜平, 王秀英, 郑秉霖, 等．基于变约束规划模型的炼钢连铸动态调度[J]. 控制理论与应用, 2009 (7): 771-776.
14. 俞胜平, 柴天佑, 郑秉霖. 炼钢连铸混合智能优化调度方法及应用[J]. 系统工程学报, 2010 (3).
15. 许剑, 吕志民, 徐金梧. 基于并行策略的冶铸轧一体化组批模型及算法[J]. 控制与决策, 2006, 21(9): 979-983.
16. Tang L, Liu G. A mathematical programming model and solution for scheduling production orders in Shanghai Baoshan Iron and Steel Complex [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 182(3): 1453-1468.
17. Bellabdaoui A, Teghem J. A mixed-integer linear programming model for the continuous casting planning[J]. International Journal of Production Economics, 2006, 104(2): 260-270.
18. Sung C, Maravelias C T. A mixed-integer programming formulation for the general capacitated lot-sizing problem [J]. Computers & Chemical Engineering, 2008, 32(1): 244-259.
19. Mattik I, Amorim P, Günther H O. Hierarchical scheduling of continuous casters and hot strip mills in the steel industry: a block planning application [J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(9): 2576-2591.
20. Liu S, Tang J, Song J. Order-planning model and algorithm for manufacturing steel sheets [J]. International Journal of Production Economics, 2006, 100(1): 30-43.
21. 吕志民, 宋肖青, 董绍华. 钢铁联合企业中期生产计划建模及算法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(1): 89- 94.
22. 宋肖青, 吕志民, 董绍华. 基于网络能力的钢铁企业短期生产能力计划模型求解算法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(8): 1839- 1844.
23. Tang L, Liu J, Rong A, et al. A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 120(2): 423-435.
24. Hvolby H H, Steger-Jensen K. Technical and industrial issues of Advanced Planning and Scheduling (APS) systems [J]. Computers in Industry, 2010, 61(9): 845-851.
25. 安玉伟, 严洪森. 一类两阶段生产系统生产计划与调度的集成优化[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(4): 796-806.
26. Wu D, Ierapetritou M. Hierarchical approach for production planning and scheduling under uncertainty[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2007, 46(11): 1129-1140.
27. Li Z, Ierapetritou M G. Integrated production planning and scheduling using a decomposition framework [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(16): 3585-3597.
28. Yue D, You F. Planning and scheduling of flexible process networks under uncertainty with stochastic inventory: MINLP models and algorithm [J]. AIChE Journal, 2013, 59(5): 1511-1532.
29. Zhu G Y, Henson M A, Megan L. Dynamic modeling and linear model predictive control of gas pipeline networks [J]. Journal of Process Control, 2001, 11(2): 129-148.
30. Fukuda K, Makino H, Suzuki Y, et al. Optimal energy distribution control at the steel works[C]//Simulation of Control Systems: Selected Papers from the IFAC Symposium, Vienna, Austria, 22-26 September, 1986. Elsevier, 2014: 337.
31. 张琦，蔡九菊，王建军等．钢铁厂煤气资源的回收与利用[J]．钢铁，2009(12)：95-99．
32. 盛春阳，赵珺，王伟，刘颖.基于T-S模型的高炉煤气系统模糊建模.上海交通大学学报。2012,46（12）.1907-1912.
33. 时飞飞．基于改进ESN的高炉煤气系统预测方法的研究[D]．大连理工大学，2009．
34. Zhao J, Wang W, Liu Y, et al. A two-stage online prediction method for a blast furnace gas system and its application[J]. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 2011, 19(3): 507-520.
35. 邱东，陈爽，仝彩霞等．钢铁企业高炉煤气平衡与综合优化[J]．计算机技术与发展，2009(3)：196-199．
36. 周强. 灰色马尔可夫链预测模型对我国能源需求量的预测[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2009, 11(3): 179-182.
37. Kim J H, Yi H S, Han C. Optimal byproduct gas distribution in the iron and steel making process using mixed integer linear programming[C]//International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes. 2002: 581-586.
38. 汤振兴．钢铁焦炉煤气产消及柜位预测方法与应用[D]．大连理工大学，2009．
39. 姜曙光. 济钢能源中心煤气平衡预测模型研究 [D]. 济南: 山东大学, 2009.
40. 田向伟. 基于参数优化 LSSVM 在转炉煤气系统预测中的应用[D]. 大连理工大学, 2010.
41. 张小雷, 张颜颜, 马庆涛, 等. 钢铁企业能源介质平衡分配与优化调度[J]. 冶金自动化, 2009 (1) :802-806.
42. Kong H, Qi E, Li H, et al. An MILP model for optimization of byproduct gases in the integrated iron and steel plant [J]. Applied Energy, 2010, 87(7): 2156-2163.
43. Zhang J D, Rong G. An MILP model for multi-period optimization of fuel gas system scheduling in refinery and its marginal value analysis [J]. Chemical engineering research and design, 2008, 86(2): 141-151.
44. 张晓平, 赵珺, 王伟, 等. 基于最小二乘支持向量机的焦炉煤气柜位预测模型及应用[J]. 控制与决策, 2010, 25(8): 1178-1183.
45. 温燕明. 济南钢铁集团总公司, 基于柜位预测的钢铁企业煤气动态平衡实时控制方法[P],中国专利，申请号：200710016562，2008-01-23.
46. Akimoto K, Sannomiya N, Nishikawa Y, et al. An optimal gas supply for a power plant using a mixed integer programming model[J]. Automatica, 1991, 27(3): 513-518.
47. Sinha G P, Chandrasekaran B S, Mitter N, et al. Strategic and operational management with optimization at Tata Steel[J]. Interfaces, 1995, 25(1): 6-19.
48. 齐二石, 孔海宁, 何曙光. 钢铁企业副产煤气多周期动态优化调度[J]. 系统工程理论与实践, 2010 (11): 2071-2079.
49. Zhao J, Liu Y, Zhang X, et al. A MKL based on-line prediction for gasholder level in steel industry [J]. Control Engineering Practice, 2012, 20(6): 629-641.
50. Zhang X, Zhao J, Wang W, et al. An optimal method for prediction and adjustment on byproduct gas holder in steel industry [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(4): 4588-4599.
51. 殷瑞钰．钢铁制造流程的本质、功能与钢厂未来发展模式[J]．中国科学，2008，38(9): 1365-1377．
52. 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): 1-14．
53. 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．
54. 蔡九菊，王建军，陆钟武，殷瑞钰，钢铁企业物质流与能量流及其相互关系，东北大学学报（自然科学版），2006，9（27）979-982
55. 蔡九菊, 杜涛. 钢铁企业投入产出模型及吨钢能耗和环境负荷分析[J]. 黄金学报, 2001, 3(4): 306-312.
56. 于庆波, 陆钟武, 蔡九菊. 钢铁生产流程中物流对能耗影响的计算方法[J]. 金属学报, 2000, 36(4): 379-382.
57. 陆钟武，蔡九菊，于庆波等，钢铁生产流程的物流对能耗的影响，金属学报，2000，4（36）370-378
58. Andersen J P, Hyman B. Energy and material flow models for the US steel industry [J]. Energy, 2001, 26(2): 137-159.
59. Pan C, Yang G K. A method of solving a large-scale rolling batch scheduling problem in steel production using a variant of column generation [J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(1): 165-178.
60. Artigues C, Lopez P, Haït A. The energy scheduling problem: Industrial case-study and constraint propagation techniques [J]. International Journal of Production Economics, 2013, 143(1): 13-23.
61. Ashok S. Peak-load management in steel plants [J]. Applied energy, 2006, 83(5): 413-424.
62. Nolde K, Morari M. Electrical load tracking scheduling of a steel plant[J]. Computers & Chemical Engineering, 2010, 34(11): 1899-1903.
63. Bunse K, Vodicka M, Schönsleben P, et al. Integrating energy efficiency performance in production management–gap analysis between industrial needs and scientific literature[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(6): 667-679.
64. TAN Y, HUANG Y, LIU S. Two-Stage Mathematical Programming Approach for Steelmaking Process Scheduling Under Variable Electricity Price[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2013, 20(7): 1-8.
65. Castro P M, Sun L, Harjunkoski I. Resource–Task Network Formulations for Industrial Demand Side Management of a Steel Plant[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(36): 13046-13058.
66. Oldenburg N, Gruhn G, Stoldt J. Capacity analysis of multi-product plants integrating energy consumption[J]. Applied thermal engineering, 2001, 21(13): 1283-1298.
67. Tari M H, Söderström M. Optimization modeling of industrial energy systems using MIND introducing the effect of material storage [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 142(2): 419-433.
68. Andreassi L, Ciminelli M V, Feola M, et al. Innovative method for energy management: Modeling and optimal operation of energy systems[J]. Energy and buildings, 2009, 41(4): 436-444.
69. Larsson M, Wang C, Dahl J. Development of a method for analyzing energy, environmental and economic efficiency for an integrated steel plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(13): 1353-1361.
70. Korhonen J. A material and energy flow model for co-production of heat and power [J]. Journal of Cleaner Production, 2002, 10(6): 537-544.
71. Zhang B J, Hua B. Effective MILP model for oil refinery-wide production planning and better energy utilization [J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(5): 439-448.
72. Agha M H, Thery R, Hetreux G, et al. Integrated production and utility system approach for optimizing industrial unit operations [J]. Energy, 2010, 35(2): 611-627.
73. Van den Heever S A, Grossmann I E. A strategy for the integration of production planning and reactive scheduling in the optimization of a hydrogen supply network [J]. Computers & chemical engineering, 2003, 27(12): 1813-1839.
74. Castro P M, Harjunkoski I, Grossmann I E. Optimal scheduling of continuous plants with energy constraints [J]. Computers & chemical engineering, 2011, 35(2): 372-387.
75. 陈荣秋．排序的理论与方法[M]．武汉：华中理工大学出版社，1987：1-18．
76. 黄红选，韩继业．数学规划[M]．北京：清华大学出版社，2006．
77. 成思危,胡清雅,刘敏．大型线性目标规划及其应用[M]．郑州：河南科学技术出版社，2000．
78. Simon H A. Models of man; social and rational [J]. 1957.
79. Bellman R E, Esogbue A O, Nabeshima I. Mathematical aspects of scheduling and applications[M]. Oxford: Pergamon Press, 1982.
80. 陈宝林．最优化理论与算法[M]．北京：清华大学出版社，2005：452-466．
81. Bellman，R．．Dynamic programming[M]．USA：Princeton University Press，1957．
82. 蔡颖．APS供应链优化引擎[M]．广东：广东经济出版社，2004．
83. Blackstone，J．H．，Phillips，D．T．，Hogg，G．L．．A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operation[J]．International Journal of Production Research，1982，20(1)：27-46．
84. Fox，M．S．，Smith，S．F．．ISIS-a knowledge-based system for factory scheduling[J]．Expert Systems，1984，1(1)：25-49．
85. Collinot，A．，Le Pape，C．，Pinoteau，G．．SONIA：a knowledge-based scheduling system[J]．International Journal for Artificial Intelligence in Engineering，1988，3(2)：86-94．
86. Fox，M．S．．AI and expert system myths，legends and facts[J]．IEEE Expert，1990，5(1)：8-20．
87. Hoitomt，D．J．，Luh，P．B．，Pattipati，K．R．．A practical approach to job-shop scheduling problems[J]．IEEE Transactions on Robotics and Automation，1993，9(1)：1-13．
88. Srivastava，B．，Wun-Hwa Chen．Heuristic solutions for loading in flexible manufacturing systems[J]．IEEE Transactions on Robotics and Automation，1996，12(6)：858-868．
89. Millar，H．H．，Minzhu Yang．Lagrangian heuristics for the capacitated multi-item lot-sizing problem with backordering[J]．International Journal of Production Economics，1994，34(1)：1-15．
90. Sait，S．M．，Youssef，H．．Iterative computer algorithms with applications in engineering[M]．Los Alamitos，Calif：IEEE Computer Society，1999．
91. Holland，J．H．．Adapation in natural and artificial systems[M]．Ann Arbor：University of Michigan press，1975．
92. Goldberg，D．．Genetic algorithms in search，optimization and machine Learning[M]．Massachusetts：Addison Wesley，1989．
93. Runwei Cheng，Gen，M．，Tsujimura，Y．．Tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithms-I．Representtio- n[J]．Computers & Industrial Engineering，1996，3(4)：983-997．
94. Jinxing，Xie．Application of genetic algorithms for general dynamic lotsizing problems[C]．IEEE Conference Publication，1995．
95. Dellaert，N．， Jeunet，J．， Jonard，N．．Genetic algorithm to solve the general multi-level lot-sizing problem with time-varying costs[J]．International Journal of Production Economics，2000，68(3)：241-257．
96. Glover，F．．Tuba search：PartⅠ[J]．ORSA Journal on Computing，1989，1(3)：190-206．
97. Glover，F．．Tuba search：PartⅡ[J]．ORSA Journal on Computing，1990，2(1)：4-32．
98. Hindi，K．S．．Solving the CLSP by a tabu search heuristic[J]．Journal of the Operational Research Society，1996，47：151-161．
99. Kirkpatrick，S．，Gelatt，C．，Vecchi，P．．Optimization by simulated annealing[J]．Science，1983，220：671-679．
100. 汪定伟，王俊伟，王洪峰．智能优化方法[M]．北京：高等教育出版社，2007：142-143．
101. Li，Y．，Wang，D．．A semi-infinite programming model for earliness/tardiness production planning with simulated annealing[J]．Mathematical and computer modeling，1997，26(7)：35-42．
102. Mitetenthal， J．， Raghavachari，M．，Rana，A．I．．Hybrid simulated annealing approach for single machine scheduling problems with non-regular penalty functions[J]．Computers& Operations Research，1993，20(2)：103-111．
103. Kennedy J. Particle swarm optimization[M]//Encyclopedia of Machine Learning. Springer US, 2010: 760-766.
104. Sangh yun Kim．Adaptations of constraint programming to aircraft scheduling problems [D]．Washington：Washington University，2001．
105. Nuijten，W．， Aarts，E．． A computational study of constraint satisfaction for multiple capacitated job shop scheduling [J]．European Journal of Operational Research，1996，90(2)：269-284．
106. Cheng，C．，Smith，S．F．．Applying constraint satisfaction techniques to job- shop scheduling [J]．Annals of Operations Research，1997，70：327-357．
107. Wersing， H．，Ritter， H．，Backtracking algorithms for constraint satisfaction problem[C]．Proceedings of 9th International Conference on Artificial Neural Networks：ICANN’99，Edinburgh，UK：IEE，1999，2 ：868-873
108. Dechter，R．，Frost，D．．Backjump-based backtracking for constraint satisfaction problems[J]．Artificial Intelligence，2002，136：147-188
109. Van Hentenryck，P．， Deville，Y．，Teng，C．M．．A generic arc-consistency algorithm and its specializations [J]．Artificial Intelligence，1992，57：291- 321．
110. Perlin，M．．Arc consistency for factorable relations [J]．Artificial Intelligence，1992，53：329-342．
111. Bessiere，C．．Arc-consistency and arc-consistency again [J]．Artificial Intelligence．1994，65 ：179-190．
112. Pape，C．L．，Baptiste，P．．Constraint propagation techniques for disjunctive scheduling：The preemptive Case[C]．Proceedings of 12th European Conference on Artificial Intelligence．ECAI’96，1996，4：619-623．
113. Baptiste，P．．Constraint propagation and decomposition techniques for highly disjunctive and highly cumulative project scheduling problems[J]．Constraints，2000，5：119-139．
114. Peter Brucker．Scheduling and constraint propagation[J]．Discrete Applied Mathematics，2002，123：227-256．
115. Kondili E, Pantelides C C, Sargent R W H. A general algorithm for scheduling batch operations[J]. 1988.
116. E Kondili, C G Pantelidcs, R W H Sargent. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations. I. MILP formulation[J]. Computers and Chemical Engineering, 1993, 17(2), 211-227.
117. K Lee, H I Park, I Lee. A novel non-uniform discrete time formulation for short-term scheduling of batch and continuous processes [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2001, 40(22): 4902-4911.
118. Floudas C A, Lin X. Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review[J]. Computers & Chemical Engineering, 2004, 28(11): 2109-2129.
119. R E Burkard, T Fortuna, C A J Hurkens. Makespan minimization for chemical batch processes using non-uniform time grids [J]. Computers and Chemical Engineering, 2002, 26(9): 1321-1332.
120. Wang S, Guignard M. Redefining event variables for efficient modeling of continuous-time batch processing [J]. Annals of Operations Research, 2002, 116(1-4): 113-126.
121. C T Maravelias, I E Grossrnann. New general continuous-time state task network formulation for short term scheduling of multipurpose batch plants [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2003, 42{13}:3056-3074.
122. N E Shah, C C Pantelides, R Sargent. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations II: Computational issues [J]. Computers and Chemical Engineering. 1993, 17(2): 229-244.
123. C C Pantelides. Unified Frameworks for the Optimal Process Planning and Scheduling[C]. Proceedings on the Second Conference on Foundations of Computer Aided Operations, 1994: 253-274.
124. C Crooks. Synthesis of operating procedures for chemical plants [D]. University of London. P1. D Dissertation, 1992.
125. Majozi T, Zhu X X. A novel continuous-time MILP formulation for multipurpose batch plants. 1. Short-term scheduling[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2001, 40(25): 5935-5949.
126. Voudouris V T, Grossmann I E. MILP model for scheduling and design of a special class of multipurpose batch plants [J]. Computers & Chemical Engineering, 1996, 20(11): 1335-1360.
127. I T Dedopoulos, N Shah. Optimal short-term scheduling of maintenance and production for multipurpose plants [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1995,34(1): 192-201.
128. 王朝晖，陈浩勋，胡保生.用Lagrang ian松弛法解化工批处理调度问题[J].自动化学报，1998, 124{11): 1-8.
129. M T M Rodrigues, L G Latre, L C A Rodrigues. Production planning using time windows for short-term multipurpose batch plants scheduling problems [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2000, 39(10):3823-3834.
130. M T M Rodrigues, L G Latre, L C A Rodrigues. Short-term planning and scheduling in multipurpose batch chemical plants: a multi-level approach [J]. Computers and Chemical Engineering, 2000, 24(10):2247-2258.
131. Schilling G, Pantelides C C. A simple continuous-time process scheduling formulation and a novel solution algorithm[J]. Computers & Chemical Engineering, 1996, 20: S1221-S1226.
132. Chu Y, Wassick J M, You F. Real-time scheduling of batch processes via agent-based modeling[C]//Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on. IEEE, 2012: 6370-6375.
133. Wassick J M, Ferrio J. Extending the resource task network for industrial applications[J]. Computers & chemical engineering, 2011, 35(10): 2124-2140.
134. Chen C L, Chang C Y. A resource-task network approach for optimal short-term/periodic scheduling and heat integration in multipurpose batch plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(5): 1195-1208.
135. Durand G A, Bandoni J A. Improving the computational performance of STN/RTN formulations for short-term scheduling[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49(24): 12477-12495.
136. Castro P M, Barbosa-Póvoa A P, Matos H A. Optimal periodic scheduling of batch plants using RTN-based discrete and continuous-time formulations: a case study approach [J]. Industrial & engineering chemistry research, 2003, 42(14): 3346-3360.
137. Castro P M, Barbosa-Póvoa A P, Matos H A, et al. Simple continuous-time formulation for short-term scheduling of batch and continuous processes[J]. Industrial & engineering chemistry research, 2004, 43(1): 105-118.
138. Chen C L, Chang C Y. A resource-task network approach for optimal short-term/periodic scheduling and heat integration in multipurpose batch plants [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(5): 1195-1208.
139. You F, Castro P M, Grossmann I E. Dinkelbach's algorithm as an efficient method to solve a class of MINLP models for large-scale cyclic scheduling problems [J]. Computers & Chemical Engineering, 2009, 33(11): 1879-1889.
140. Castro, P.M., Teles, J.P., 2013. Comparison of global optimization algorithms for the design of water-using networks. Computers & Chemical Engineering 52, 249-261.