(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 119558564 A
(43)申请公布日 2025.03.04

(21)申请号 202411441707.6
(22)申请日 2024.10.16
(71)申请人 东北大学
地址 110819 辽宁省沈阳市和平区文化路三号巷11号
(72)发明人 杜涛 孙竞超 李英楠 那洪明 袁喻兴 张磊 王维辰
(74)专利代理机构 沈阳优普达知识产权代理事务所(特殊普通合伙) 21234
专利代理师 陈曦
(51)Int.Cl.
G06Q 10/0631(2023.01)
G06Q 10/067(2023.01)
G06Q 10/10(2023.01)
G06Q 50/04(2012.01)
G06Q 50/26(2024.01)
G06N 3/126(2023.01)

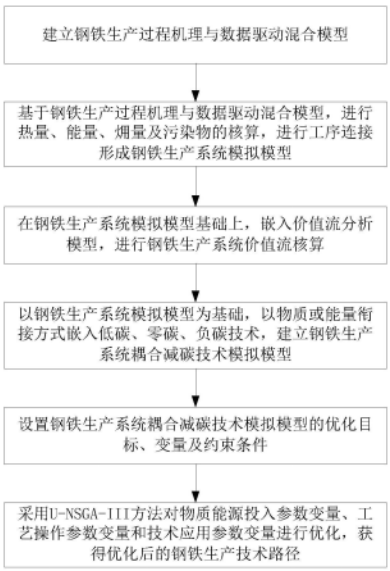
权利要求书6页 说明书9页 附图1页

(54)发明名称

一种钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法

(57)摘要

本发明的提供一种钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法,包括:建立钢铁生产过程机理与数据驱动混合模型;基于钢铁生产过程机理与数据驱动混合模型,进行热量、能量、烟量及污染物的核算,进行工序连接形成钢铁生产系统模拟模型;在钢铁生产系统模拟模型基础上,嵌入价值流分析模型,进行钢铁生产系统价值流核算;以钢铁生产系统模拟模型为基础,以物质或能量衔接方式嵌入低碳、零碳、负碳技术,建立钢铁生产系统耦合减碳技术模拟模型;设置钢铁生产系统耦合减碳技术模拟模型的优化目标;采用U-NSGA-III方法对物质能源投入参数变量、工艺操作参数变量和技术应用参数变量进行优化,获得钢铁生产系统技术优化路径。



CN 119558564 A

1.一种钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法,其特征在于,包括:

步骤1:建立钢铁生产过程机理与数据驱动混合模型;

步骤2:基于钢铁生产过程机理与数据驱动混合模型,进行热量、能量、㶲量及污染物的核算,进行工序连接形成钢铁生产系统模拟模型;

步骤3:在钢铁生产系统模拟模型基础上,嵌入价值流分析模型,进行钢铁生产系统价值流核算;

步骤4:以钢铁生产系统模拟模型为基础,以物质或能量衔接方式嵌入低碳、零碳、负碳技术,建立钢铁生产系统耦合减碳技术模拟模型;

步骤5:设置钢铁生产系统耦合减碳技术模拟模型的优化目标、变量及约束条件;

步骤6:采用U-NSGA-III方法对物质能源投入参数变量、工艺操作参数变量和技术应用参数变量进行优化,获得优化后的钢铁生产技术路径。

2.如权利要求1所述的钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法,其特征在于,所述步骤1具体为:

步骤1.1:基于钢铁生产设备物理化学反应机理、物质平衡原理构建钢铁生产机理模型,计算生产物性参数;

步骤1.2:对历史生产数据进行时间粒度归一化或正则化预处理;历史生产数据包括设备参数、物质能源投入参数、物质能源产出参数、温度参数、工艺操作参数、成分参数和压力参数;

步骤1.3:整合LASSO回归分析方法,对部分预处理后的历史生产数据进行筛选和拟合,进而精准模拟主要生产设备运行过程预测得到生产过程关键参数或产品性能指标,LASSO回归分析公式如下:

$$L_{lasso}=\sum_{a=1}^{r}\left(y_a-\beta_0-\sum_{b=1}^{q}\beta_b x_{ab}\right)^2+\lambda\sum_{b=1}^{q}|\beta_b|$$

式中,L_{lasso}是方误差,y_a是需拟合的第a个生产过程关键参数或产品性能指标,r表示需拟合的生产过程关键参数或产品性能指标的数量,x_{ab}是预处理后的历史生产数据,β_0是常数,β_b是回归系数,λ是权重因子,q表示输入的历史生产数据的数量;

步骤1.4:利用企业的统计期间平均值或经验值来对难以通过机理模型准确计算和回归分析预测的指标或参数进行估算。

3.如权利要求1所述的钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法,其特征在于,所述步骤2具体为:

步骤2.1:基于物理化学反应机理与物质投入产出,计算反应过程能源利用、转换与耗散过程,以热平衡、能量守恒及㶲守恒为基础,在以上钢铁生产过程机理与数据驱动混合模型基础上核算物质产耗及能量耗散;

步骤2.2:根据混合模型和设备热平衡公式核算钢铁生产过程热利用,设备热平衡公式如下:

$$H_{energyin}+H_{material,in}=H_{byprodcutout}+H_{produc,out}+H_{loss}$$

式中,$H_{energy,in}$为生产单位产品的设备热投入量;$H_{material,in}$为生产单位产品的设备物质

显热投入值;$H_{producty,out}$为生产单位产品的设备带走热量;$H_{byprodcut,out}$为生产单位产品的副产品带走热量;H_{loss}为生产单位产品的设备热损失量;

步骤2.3:根据混合模型、设备/工序㶲平衡公式核算㶲转化过程,设备/工序㶲平衡公式如下:

$$Ex_{energy,in}+Ex_{material,in}=Ex_{byproducct,out}+Ex_{product,out}+Ex_{iner,loss}+Ex_{exter,loss}$$

式中,$Ex_{energy,in}$为设备/工序的单位产品能源㶲投入量;$Ex_{material,in}$为设备/工序的单位产品物料㶲投入量;$Ex_{producty,out}$为设备/工序的单位产品㶲产出量;$Ex_{byprodcut,out}$为设备/工序的副产品㶲产出量;$Ex_{iner,loss}$为设备/工序的内部㶲损失量;$Ex_{exter,loss}$为设备/工序的外部㶲损失量;

步骤2.4:对大气污染物和温室气体进行核算;

步骤2.5:根据混合模型和工序能量平衡公式核算能量利用,工序能量平衡公式如下:

$$En_{energy,in}+En_{material,in}=En_{product,out}+En_{byproduct,out}+En_{loss}$$

式中,$En_{energy,in}$为工序的单位产品能量投入量;$En_{material,in}$为工序的单位产品物料中能量投入值;$En_{producty,out}$为工序的单位产品能量产出量;$En_{byprodcut,out}$为工序的副产品能量产出量;En_{loss}为工序的能量损失量;

步骤2.6:钢铁生产全流程模拟以钢比系数进行工序连接,从而形成钢铁生产系统模拟模型。

4.如权利要求1所述的钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法,其特征在于,所述步骤3具体为在钢铁生产系统模拟模型基础上,嵌入价值流分析模型;

(1)系统内部工序价值产出的基本表达式如下:

$$V_{in,out,i}=V_{f,i}^{recycle}+V_{p,i}^{product}+V_{po,i}^{waste}$$

式中,$V_{in,out,i}$为生产系统价值流动第i工序产出的综合价值,它是由第i工序的内部循环㶲价值$V_{f,i}^{recycle}$、第i工序的外部产品价值$V_{p,i}^{product}$和第i工序的废弃物管理价值$V_{po,i}^{waste}$组成;表达式分别如下:

$$V_{f}^{recycle}=V_{eq,en}Ex_{f}^{recycle}$$

$$V_{p}^{product}=V_{eq,en}Ex_{p,ad}^{product}\pm V_{added,p}=V_{market,p}$$

$$V_{po}^{waste}=V_{eq,en}Ex_{po}^{waste}\pm V_{added,po}=V_{manage,po}$$

式中,$V_{eq,en}$为在系统视角下单位㶲所具有价值当量,$Ex_{f}^{recycle}$为在系统内部循环“节点”之间的㶲流f所包含的㶲量;$Ex_{p,ad}^{product}$为生产过程从物料到产品p的㶲值变化量;$V_{added,p}$为因市场或客户需求而产生的产品P的附加价值;$V_{added,po}$为因政策产生的废弃物po的管理或处理成本,$V_{market,p}$为不同时期产品p的市场价值;Ex_{po}^{waste}为废弃物po所含有的㶲值;$V_{manage,po}$为废弃物po管理价值,包括废弃物的处理成本、管理费用、市场资产和资源化效益;系统视角下单位㶲所具有价值当量表达式如下:

$$V_{eq,en}(t)=\frac{V_{sum,en}(t)}{Ex_{sum,en}(t)}$$

式中,$V_{eq,en}(t)$为在周期t内内部循环的价值当量值;$V_{sum,en}(t)$为周期t内边界外投入系统的能源总价值;$Ex_{sum,en}(t)$为周期t内边界外投入系统的能源所含总㶲量;

(2)系统内部工序价值投入的基本表达式如下:

$$V_{i,in}=V_{f,i}^{recycle}+V_{m,i}$$

式中,$V_{i,in}$为生产系统价值流动第i工序投入的综合价值,它是由内部循环㶲价值$V_{f,i}^{recycle}$、外部物料投入价值$V_{m,i}$组成;

$V_{m,i}=V_{m,main,i}+V_{m,sub,i}$

式中,$V_{m,main,i}$表示主要物料价值,$V_{m,sub,i}$表示辅助物料价值;

(3)公辅工序生产单位产品的价值当量$V_{eq,au}(t)$表达式如下:

$$V_{eq,au}(t)=\frac{V_{eq,en}(t)\times Ex_{en,in}}{P_{out,au}}$$

式中,$Ex_{en,in}$表示公辅工序au内部循环能源㶲投入量;$P_{out,au}$表示公辅工序产品au的产出量。

5.如权利要求1所述的钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法,其特征在于,所述步骤4具体为:

步骤4.1:通过改变不同物质能源投入参数从而影响钢铁生产能源消耗与污染物排放量,实现源头结构型减碳技术嵌入;

步骤4.2:通过改变钢铁生产过程中的设备参数、工艺操作参数及成分参数核算其对生产的影响,实现过程节点型减碳技术嵌入;

步骤4.3:通过改变能源消耗、成分参数、污染物排放、能源回收、物质产出参数核算生产的影响,实现末端捕集型减碳技术嵌入;

步骤4.4:基于上述生产过程模拟和技术嵌入,技术改造后会直接影响前后相接工序的物质、能量变化,建立钢铁生产系统耦合减碳技术模拟模型。

6.如权利要求5所述的钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法,其特征在于:

(1)源头结构型减碳技术嵌入系统后的吨钢技术直接碳减排量公式如下:

$$R_{te,CO2}^{S}=\sum_{i}\left[\sum_{te}\left(\sum_{en}M_{i,en,te}\times C_{en}+\sum_{m}M_{i,m,te}\times C_{m}\right)\times p_{i}\right]$$

式中,$R_{te,CO2}^{S}$为吨钢源头结构型减碳技术直接碳减排量;$M_{i,en,te}$为技术应用后工序i的能源或能源介质en的质量变化量,$M_{i,m,te}$为物料m的质量变化量;C_{en}为能源或能源介质en的碳排放系数,C_{m}为物料m的碳排放系数;P_{i}为钢铁生产工序i材比系数;

(2)过程节点型减碳技术嵌入系统后的吨钢技术直接碳减排量公式如下:

$$R_{te,CO2}^{P}=\sum_{i}\left[\sum_{te}\left(\sum_{m}(MC_{i,te,m}-U_{i,te,m})\times C_{m}+\sum_{en}(MC_{i,te,en}-U_{i,te,en})\times C_{en}\right)\times p_{i}\right]$$

式中，$R^{P}_{te,CO2}$为吨钢过程节点型减碳技术的直接碳减排量；$MC_{i,te,m}$为技术应用后工序i物料m的质量变化量，$MC_{i,te,en}$为技术应用后工序i能源或能源介质en的质量变化量；$U_{i,te,m}$为技术应用时导致的物料m的净消耗量，$U_{i,te,en}$为技术应用时导致的能源或能源介质en净消耗量；

(3)末端捕集型减碳技术嵌入系统后的吨钢技术直接碳减排量公式如下：

$$R^{C}_{te,CO2}=\sum_{i}\left[\sum_{te}\left(\sum_{m}(CA_{i,te,m}-U_{i,te,m})\times C_{m}-\sum_{en}U_{i,te,en}\times C_{en}\right)\times p_{i}\right]$$

式中，$R^{C}_{te,CO2}$为吨钢末端捕集型减碳技术的直接碳减排量；$CA_{i,te,m}$为技术的碳捕集量；

(4)节能减碳技术嵌入引起的单位产品技术运行成本CC^{O}_{te}、生命周期单位产品投资成本CC^{F}_{te}与技术吨钢成本效益CB_{te}的公式如下：

$$CC^{O}_{te}=\sum_{i}\left[\sum_{te}\left(\sum_{m}U_{i,te,m}\times V_{eq,m}+\sum_{en}U_{i,te,en}\times V_{eq,en}\right)\times p_{i}\right]$$

$$CC^{F}_{te}=\left[\frac{CC^{fC}_{te}\times\frac{int\times(1+int)^{L_{te}}}{(1+int)^{L_{te}}-1}}{Pr_{TL_{te}}\times TL_{te}}\right]$$

$$CB_{te}=\frac{\sum_{m}M_{m,te}\times V_{eq,m}+Ex_{te,c}\times V_{eq,en}+CO2_{te,R}\times V_{eq,CO2}+PO_{te,R}\times V_{eq,PO}}{CC^{F}_{te}+CC^{O}_{te}}$$

式中，CC^{O}_{te}为单位产品技术运行成本；CC^{F}_{te}为生命周期单位产品投资成本；CC^{fC}_{te}为投资成本；int为周期贴现率；L_{te}为技术运行的时间周期；TL_{te}为技术使用寿命周期时间；Pr_{TLte}为时间周期预计的粗钢生产量；CB_{te}为技术吨钢成本效益；$M_{m,te}$为技术应用后物料m消耗的变化量；$V_{eq,m}$为单位物料的市场价值；$V_{eq,en}$为单位㶲的价值当量；$Ex_{te,c}$为技术应用后吨钢节㶲量；$CO2_{te,R}$为技术应用后吨钢碳减排量；$V_{eq,CO2}$为碳价；$PO2_{te,R}$为其他污染物协同变化量；$V_{eq,PO}$为单位污染物PO排放的处理成本。

7.如权利要求1所述的钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法，其特征在于，所述步骤5具体为：

步骤5.1：在钢铁生产系统耦合减碳技术模拟模型基础上，钢铁生产系统共设置三个优化目标：

目标一：生产单位产品㶲耗作为钢铁生产系统的节能优化目标，简称产品㶲强度，产品㶲强度目标函数$Ex_{intensity}$如下：

$$Ex_{intensity}=\sum_{z}\frac{Ex_{in,z}-Ex^{ef}_{out,z}}{M_{p,z}}\times p_{z}+\sum_{au}\frac{Ex_{in,au}-Ex^{ef}_{out,au}}{M_{p,au}}\times p_{au}$$

式中，P_{z}为主要工序z的钢比或材比系数，即生产一吨粗钢或钢材产品所消耗工序产品的量；$Ex_{in,z}$为主要工序z的投入㶲量；$Ex_{in,au}$为公辅工序au的投入㶲量；$M_{p,z}$为主要工序z中

产品p产出量;$M_{p,au}$为公辅工序au中产品p产出量;$Ex^{ef}_{out,z}$为主要工序z的有效产出㶲量;

$Ex^{ef}_{out,au}$公辅工序au的有效产出㶲量;

目标二:生产单位钢材产品碳排放量设为系统减碳优化的目标,简称碳排放强度,碳排放强度目标函数$CO2_{intensity}$如下:

$$CO2_{intensity}=\sum_{z}\frac{CO2_{D,z}}{M_{p,z}}\times p_z+\sum_{au}\frac{CO2_{D,au}}{M_{p,au}}\times p_{au}+\sum_{pur}\frac{CO2_{I,pur}}{M_{p,pur}}\times p_{pur}$$

式中,$CO2_{D,z}$为企业在主要工序z中的直接碳排放量;$CO2_{D,au}$为企业在公辅工序au中的直接碳排放量;$CO2_{I,pur}$为企业向电网或热网购买动力能源pur造成的间接碳排放量,$M_{p,pur}$为企业向电网或热网购买动力能源pur的量,p_{pur}为单位钢材动力能源pur消耗量;

目标三:生产单位钢材产品的综合成本效益设为经济效益优化的目标,综合成本效益目标函数CB如下:

$$CB=\frac{\sum_p M_{m,p}V_p}{M_{m,in}V_m+M_{en,in}V_{en}+M_{pol,in}V_{pol,ad}+M_{CO2,in}V_{CO2,eq}-M_{bp,out}V_{bp}}\times 100\%$$

其中,分子$M_{m,p}V_p$为产品p的市场经济价值;分母由$M_{m,in}V_m$的原材料成本、$M_{en,in}V_{en}$的能源成本、$M_{pol,in}V_{pol,ad}$的环境成本、$M_{CO2,in}V_{CO2,eq}$的CO_2排放成本以及$M_{bp,out}V_{bp}$的副产品经济价值组成;

步骤5.2:优化模型变量包括:基本生产操作参数、钢铁生产设备参数、工艺参数以及低碳、零碳、负碳技术应用选择优化的布尔变量;

步骤5.3:设备运行参数和污染物排放标准约束条件为:

$x_{j,min}\leqslant x_j\leqslant x_{j,max}$

$0\leqslant P_0\leqslant P_{0,max}$

其中,x_j为第j个设备运行参数,$x_{j,min}$为设备正常运行工况下第j个设备运行参数的历史最低值,$x_{j,max}$为设备正常运行工况下第j个设备运行参数的历史最高值,P_0为污染物排放量,$P_{0,max}$为污染物排放标准的最大值。

8.如权利要求1所述的钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法,其特征在于,所述步骤6具体为:

步骤6.1:将物质能源投入参数变量、工艺操作参数变量和技术应用参数变量组合构成一条染色体,物质能源投入参数变量和工艺操作参数变量采用实数编码方式,技术应用参数变量采用整数编码方式;

步骤6.2:初始化种群,同时设定初始种群数量、初始值、交叉、变异算子、最大迭代步数以及变量上、下边界;

步骤6.3:计算模型优化目标值,并根据优化目标值计算适应度,以作为下一步分层及选择的依据,同时采用违反度来衡量变量对于约束条件的满足情况;

步骤6.4:根据适应度通过非支配排序和锦标赛选择的GA遗传算法对所述初始种群进行交叉与变异遗传处理,生成子代种群;

步骤6.5:将子代种群与父代种群合并后进行精英处理后生成新一代种群;

步骤6.6:重复步骤6.3-步骤6.5对新一代种群进行非支配排序和遗传处理,直到达到

最大迭代次数,获得最优种群。

一种钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法

技术领域

[0001] 本发明属于钢铁生产技术领域,涉及一种钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法。

背景技术

[0002] 我国是世界上最大的钢铁生产国,其粗钢产量占世界的53.9%,而且钢铁行业是典型的资源和能源密集型产业,其能耗约占全国能源总能耗的13.6%,其碳排放量约占全国碳排放为15%,具有产量大、消耗多和排放高等特点。钢铁行业亟需进行低碳转型。因此,如何有效推动钢铁企业的节能-减碳-增效协同发展,是产业转型升级、实现绿色高质量发展的内在要求。

[0003] 传统的钢铁生产长流程企业是多设备、多层级、多技术集成的结构紧凑且耦合物质流、能量流、价值流等多流交互的复杂庞大生产系统,其中涉及物质的转化、能源的转换与利用协同碳排放与价值变化。其依托于底层的各种设备的物理化学变化的能源利用与物质转化过程、而不同设备、技术与工序的连结整合共同构成了钢铁生产系统,而能源结构零碳转型、能效提升助力减碳、碳捕集与利用能直接或间接减少企业的能源消耗与碳排放,或增加企业资金收益或碳资产。因此,需要开发一种科学、有效、全方位、系统的钢铁生产系统低碳转型决策优化与分析方法。以此摸清钢铁生产系统物质-能源-碳排-价值之间的耦合关系,实现从粗钢到不同钢铁产品的生产过程的模拟分析,同时对设备、工序、流程及企业的能源(㶲)利用指标、碳排放指标及成本效益等指标进行计算、评价、优化与分析。在系统视角下,某个因素变化会导致生产系统多方位的变化,钢铁生产系统与低碳-零碳-负碳等多种减碳技术的耦合关系需被揭露,从而探索随着市场与政策变化或趋势的钢铁企业节能减碳协同增效的发展路径,为企业提供科学有序的低碳转型决策,响应国家经济发展要求,促进钢铁工业节能低碳与经济全面发展。

[0004] 当前钢铁企业节能减碳改造决策管理与低碳发展路径的制定更多的是以“头痛医头,脚痛医脚”的方式,针对生产系统局部进行节能减碳技术改造,且节能减碳技改选择更多依赖技术经验,存在主观性强且存在经验水平不一的问题,缺乏源头-过程-末端全面系统优化管理问题。于此同时,系统视角下钢铁企业的不同节能减碳技术的匹配关系及协同机制不清晰,不利于将减碳、零碳、负碳多技术进行组合应用及推广,难以为企业提供整合生产运行状况的科学有效改造方案以及环境-经济效益最大化的发展路径。

发明内容

[0005] 为解决上述技术问题,本发明的目的是提供一种钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法。

[0006] 本发明提供一种钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法,包括:

[0007] 步骤1:建立钢铁生产过程机理与数据驱动混合模型;

[0008] 步骤2:基于钢铁生产过程机理与数据驱动混合模型,进行热量、能量、㶲量及污染

物的核算,进行工序连接形成钢铁生产系统模拟模型;

[0009] 步骤3:在钢铁生产系统模拟模型基础上,嵌入价值流分析模型,进行钢铁生产系统价值流核算;

[0010] 步骤4:以钢铁生产系统模拟模型为基础,以物质或能量衔接方式嵌入低碳、零碳、负碳技术,建立钢铁生产系统耦合减碳技术模拟模型;

[0011] 步骤5:设置钢铁生产系统耦合减碳技术模拟模型的优化目标、变量及约束条件;

[0012] 步骤6:采用U-NSGA-III方法对物质能源投入参数变量、工艺操作参数变量和技术应用参数变量进行优化,获得优化后的钢铁生产技术路径。

[0013] 本发明的一种钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法,具有以下有益效果:

[0014] (1)提升能源使用效率:通过灵活调整生产流程以适应市场变动,此方法能减少能源浪费,促进能源的高效转换与利用;

[0015] (2)降低碳排放水平:该方法着重于集成应用低碳技术或措施,旨在大幅度减少钢铁生产过程中二氧化碳及其他温室气体的排放量;

[0016] (3)实现多重技术协同效应的量化评估:通过精确量化不同技术组合的应用效果,为制定科学合理的节能减碳路径提供有力支撑。

[0017] (4)促进节能减碳与经济可持续发展的双赢:在推动企业节能减排的同时,确保经济效益的持续增长,有效避免节能减碳与经济效益提升之间的矛盾。

附图说明

[0018] 图1是本发明的一种钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法的流程图。

具体实施方式

[0019] 如图1所示,本发明的一种钢铁生产系统节能减碳增效协同的技术路径优化方法,包括:

[0020] 步骤1:建立钢铁生产过程机理与数据驱动混合模型,具体为:

[0021] 步骤1.1:基于钢铁生产设备物理化学反应机理、物质平衡原理构建钢铁生产机理模型,计算生产物性参数。

[0022] 具体实施时,基于钢铁冶炼物理化学过程原理和物质和能量守恒定律,可以得出部分拥有完整数据的生产物性参数或指标。通过数学机理模型较为准确计算出生产物性参数,如:理论风量、蒸汽产生量、需氧量、理论燃烧温度、发电量、炉渣碱度、炉膛温度等。

[0023] 步骤1.2:对历史生产数据进行时间粒度归一化或正则化预处理;历史生产数据包括设备参数、物质能源投入参数、物质能源产出参数、温度参数、工艺操作参数、成分参数和压力参数。

[0024] 步骤1.3:整合LASSO回归分析方法,对部分预处理后的历史生产数据进行筛选和拟合,进而精准模拟主要生产设备运行过程预测得到生产过程关键参数或产品性能指标,以焦化工序为例,如焦炉的总焦炭产率、焦油、粗苯和氨的产量、COG生成、蒸汽需求量以及焦炭的M10、M40、CSR和CRI的产品性能指标。

[0025] LASSO回归分析公式如下：

[0026] $$L_{lasso}=\sum_{a=1}^{r}\left(y_a-\beta_0-\sum_{b=1}^{q}\beta_b x_{ab}\right)^2+\lambda\sum_{b=1}^{q}|\beta_b|$$

[0027] 式中，L_{lasso}是方误差，y_a是需拟合的第a个生产过程关键参数或产品性能指标，r表示需拟合的生产过程关键参数或产品性能指标的数量，x_{ab}是预处理后的历史生产数据，β_0是常数，β_b是回归系数，λ是权重因子，q表示输入的历史生产数据的数量。

[0028] 步骤1.4：利用企业的统计期间平均值或经验值来对难以通过机理模型准确计算和回归分析预测的指标或参数进行估算。例如，过量空气系数、压缩空气消耗量、氮消耗量以及少数温度参数。这些参数或指标通常波动较小，该平均值或经验值有效反映了生产系统在正常工况下的平均水平或典型状态。

[0029] 具体实施时，在建立混合模型前，还需根据研究对象和需求设立研究边界，边界内皆是与钢铁生产相关的设备、工序或系统，对企业原数据进行预处理，包括异常值检测与处理，处理缺失值。

[0030] 步骤2：基于钢铁生产过程机理与数据驱动混合模型，进行热量、能量、㶲量及污染物的核算，进行工序连接形成钢铁生产系统模拟模型，具体为：

[0031] 步骤2.1：基于物理化学反应机理与物质投入产出，计算反应过程能源利用、转换与耗散过程，以热平衡、能量守恒及㶲守恒为基础，在以上钢铁生产过程机理与数据驱动混合模型基础上核算物质产耗及能量耗散。

[0032] 步骤2.2：根据混合模型和设备热平衡公式核算钢铁生产过程热利用，设备热平衡公式如下：

[0033] $H_{energy,in}+H_{material,in}=H_{byprodcut,out}+H_{product,out}+H_{loss}$

[0034] 式中，$H_{energy,in}$为生产单位产品的设备热投入量；$H_{material,in}$为生产单位产品的设备物质显热投入值；$H_{producty,out}$为生产单位产品的设备带走热量；$H_{byprodcut,out}$为生产单位产品的副产品带走热量；H_{loss}为生产单位产品的设备热损失量。

[0035] 步骤2.3：根据混合模型、设备/工序㶲平衡公式核算㶲转化过程，设备/工序㶲平衡公式如下：

[0036] $Ex_{energy,in}+Ex_{material,in}=Ex_{byproduct,out}+Ex_{product,out}+Ex_{iner,loss}+Ex_{exter,loss}$

[0037] 式中，$Ex_{energy,in}$为设备/工序的单位产品能源㶲投入量；$Ex_{material,in}$为设备/工序的单位产品物料㶲投入量；$Ex_{producty,out}$为设备/工序的单位产品㶲产出量；$Ex_{byprodcut,out}$为设备/工序的副产品㶲产出量；$Ex_{iner,loss}$为设备/工序的内部㶲损失量；$Ex_{exter,loss}$为设备/工序的外部㶲损失量。

[0038] 步骤2.4：对大气污染物和温室气体进行核算。

[0039] 具体实施时，设备CO2排放核算公式如下：

[0040] $$CO2_D=\sum_r\left([\boldsymbol{M}_{r,in}][\boldsymbol{C}_{r,in}]^T-[\boldsymbol{M}_{r,out}][\boldsymbol{C}_{r,out}]^T\right)\times\frac{44}{12}+[\boldsymbol{M}_{GHG}][\boldsymbol{GWP}_{GHG}]^T$$

$$C_{em}=\frac{CO2_{em}^D}{M_{em,out}}$$

[0041] $CO2_I=[M_{em,in}][C_{em}]^T$

[0042] 式中,$M_{r,in}$为物质投入量矩阵,$C_{r,in}$为C元素含量矩阵,$M_{r,out}$为物质产出量矩阵,$C_{r,out}$为C元素的质量比矩阵;M_{GHG}为其他温室气体GHG排放量;GWP_{GHG}为是其他温室气体GHG的全球温升潜势。

[0043] 步骤2.5:根据混合模型和工序能量平衡公式核算能量利用,工序能量平衡公式如下:

[0044] $En_{energy,in}+En_{material,in}=En_{prodct,out}+En_{byproduct,out}+En_{loss}$

[0045] 式中,$En_{energy,in}$为工序的单位产品能量投入量;$En_{material,in}$为工序的单位产品物料中能量投入值;$En_{producty,out}$为工序的单位产品能量产出量;$En_{byprodcut,out}$为工序的副产品能量产出量;En_{loss}为工序的能量损失量。

[0046] 步骤2.6:钢铁生产全流程模拟以钢比系数进行工序连接,从而形成钢铁生产系统模拟模型。

[0047] 步骤3:在钢铁生产系统模拟模型基础上,嵌入价值流分析模型,进行钢铁生产系统价值流核算,具体为:

[0048] (1)系统内部工序价值产出的基本表达式如下:

[0049] $$V_{in,out,i}=V_{f,i}^{recycle}+V_{p,i}^{product}+V_{po,i}^{waste}$$

[0050] 式中,$Vi_{n,out,i}$为生产系统价值流动第i工序产出的综合价值,它是由第i工序的内部循环㶲价值$V_{f,i}^{recycle}$、第i工序的外部产品价值$V_{p,i}^{product}$和第i工序的废弃物管理价值$V_{po,i}^{waste}$组成;表达式分别如下:

[0051] $$V_f^{recycle}=V_{eq,en}Ex_f^{recycle}$$

$$V_p^{product}=V_{eq,en}Ex_{p,ad}^{product}\pm V_{added,p}=V_{market,p}$$

$$V_{po}^{waste}=V_{eq,en}Ex_{po}^{waste}\pm V_{added,po}=V_{manage,po}$$

[0052] 式中,$V_{eq,en}$为在系统视角下单位㶲所具有价值当量,$Ex_f^{recycle}$为在系统内部循环“节点”之间的㶲流f所包含的㶲量;$Ex_{p,ad}^{product}$为生产过程从物料到产品p的㶲值变化量;$V_{added,p}$为因市场或客户需求而产生的产品P的附加价值;$V_{added,po}$为因政策产生的废弃物po的管理或处理成本,$V_{market,p}$为不同时期产品p的市场价值;Ex_{po}^{waste}为废弃物po所含有的㶲值;$V_{manage,po}$为废弃物po管理价值,包括废弃物的处理成本、管理费用、市场资产和资源化效益;系统视角下单位㶲所具有价值当量表达式如下:

[0053] $$V_{eq,en}(t)=\frac{V_{sum,en}(t)}{Ex_{sum,en}(t)}$$

[0054] 式中,$V_{eq,en}(t)$为在周期t内内部循环的价值当量值;$V_{sum,en}(t)$为周期t内边界外投入系统的能源总价值;$Ex_{sum,en}(t)$为周期t内边界外投入系统的能源所含总㶲量;

[0055] (2)系统内部工序价值投入的基本表达式如下:

[0056] $$V_{i,in}=V_{f,i}^{recycle}+V_{m,i}$$

[0057] 式中,$V_{i,in}$为生产系统价值流动第i工序投入的综合价值,它是由内部循环㶲价值$V_{f,i}^{recycle}$、外部物料投入价值$V_{m,i}$组成;

[0058] $V_{m,i}=V_{m,main,i}+V_{m,sub,i}$

[0059] 式中,$V_{m,main,i}$表示主要物料价值,$V_{m,sub,i}$表示辅助物料价值;

[0060] (3)公辅工序生产单位产品的价值当量$V_{eq,au}(t)$表达式如下:

[0061] $$V_{eq,au}(t)=\frac{V_{eq,en}(t)\times Ex_{en,in}}{P_{out,au}}$$

[0062] 式中,$Ex_{en,in}$表示公辅工序au内部循环能源㶲投入量;$P_{out,au}$表示公辅工序产品au的产出量。

[0063] 步骤4:以钢铁生产系统模拟模型为基础,以物质或能量衔接方式嵌入低碳、零碳、负碳技术,建立钢铁生产系统耦合减碳技术模拟模型,具体为:

[0064] 步骤4.1:通过改变不同物质能源投入参数从而影响钢铁生产能源消耗与污染物排放量,实现源头结构型减碳技术嵌入。

[0065] (1)源头结构型减碳技术嵌入系统后的吨钢技术直接碳减排量公式如下:

[0066] $$R_{te,CO2}^{S}=\sum_{i}\left[\sum_{te}\left(\sum_{en}M_{i,en,te}\times C_{en}+\sum_{m}M_{i,m,te}\times C_{m}\right)\times p_{i}\right]$$

[0067] 式中,$R_{te,CO2}^{S}$为吨钢源头结构型减碳技术直接碳减排量;$M_{i,en,te}$为技术应用后工序i的能源或能源介质en的质量变化量,$M_{i,m,te}$为物料m的质量变化量;C_{en}为能源或能源介质en的碳排放系数,C_{m}为物料m的碳排放系数;P_{i}为钢铁生产工序i材比系数。

[0068] 步骤4.2:通过改变钢铁生产过程中的设备参数、工艺操作参数及成分参数核算其对生产的影响,实现过程节点型减碳技术嵌入。

[0069] (2)过程节点型减碳技术嵌入系统后的吨钢技术直接碳减排量公式如下:

[0070] $$R_{te,CO2}^{P}=\sum_{i}\left[\sum_{te}\left(\sum_{m}(MC_{i,te,m}-U_{i,te,m})\times C_{m}+\sum_{en}(MC_{i,te,en}-U_{i,te,en})\times C_{en}\right)\times p_{i}\right]$$

[0071] 式中,$R_{te,CO2}^{P}$为吨钢过程节点型减碳技术的直接碳减排量;$MC_{i,te,m}$为技术应用后工序i物料m的质量变化量,$MC_{i,te,en}$为技术应用后工序i能源或能源介质en的质量变化量;$U_{i,te,m}$为技术应用时导致的物料m的净消耗量,$U_{i,te,en}$为技术应用时导致的能源或能源介质en净消耗量。

[0072] 步骤4.3:通过改变能源消耗、成分参数、污染物排放、能源回收、物质产出参数核

算生产的影响,实现末端捕集型减碳技术嵌入。

[0073] (3)末端捕集型减碳技术嵌入系统后的吨钢技术直接碳减排量公式如下:

[0074] $$R_{te,CO2}^{C}=\sum_{i}[\sum_{te}(\sum_{m}(CA_{i,te,m}-U_{i,te,m})\times C_{m}-\sum_{en}U_{i,te,en}\times C_{en})\times p_{i}]$$

[0075] 式中,$R_{te,CO2}^{C}$为吨钢末端捕集型减碳技术的直接碳减排量;$CA_{i,te,m}$为技术的碳捕集量。

[0076] 步骤4.4:基于上述生产过程模拟和技术嵌入,技术改造后会直接影响前后相接工序的物质、能量变化,建立钢铁生产系统耦合减碳技术模拟模型。

[0077] 节能减碳技术嵌入引起的单位产品技术运行成本CC_{te}^{O}、生命周期单位产品投资成本CC_{te}^{F}与技术吨钢成本效益CB_{te}的公式如下:

$$CC_{te}^{O}=\sum_{i}[\sum_{te}(\sum_{m}U_{i,te,m}\times V_{eq,m}+\sum_{en}U_{i,te,en}\times V_{eq,en})\times p_{i}]$$

[0078] $$CC_{te}^{F}=[\frac{CC_{te}^{fC}\times\frac{int\times(1+int)^{L_{te}}}{(1+int)^{L_{te}}-1}}{Pr_{TL_{te}}\times TL_{te}}]$$

$$CB_{te}=\frac{\sum_{m}M_{m,te}\times V_{eq,m}+Ex_{te,c}\times V_{eq,en}+CO2_{te,R}\times V_{eq,CO2}+PO_{te,R}\times V_{eq,PO}}{CC_{te}^{F}+CC_{te}^{O}}$$

[0079] 式中,CC_{te}^{O}为单位产品技术运行成本;CC_{te}^{F}为生命周期单位产品投资成本;CC_{te}^{fC}为投资成本;int为周期贴现率;L_{te}为技术运行的时间周期;TL_{te}为技术使用寿命周期时间;Pr_{TLte}为时间周期预计的粗钢生产量;CB_{te}为技术吨钢成本效益;$M_{m,te}$为技术应用后物料m消耗的变化量;$V_{eq,m}$为单位物料的市场价值;$V_{eq,en}$为单位烟的价值当量;$Ex_{te,c}$为技术应用后吨钢节烟量;$CO2_{te,R}$为技术应用后吨钢碳减排量;$V_{eq,CO2}$为碳价;$PO2_{te,R}$为其他污染物协同变化量;$V_{eq,PO}$为单位污染物PO排放的处理成本。

[0080] 其中从系统角度来看,技术边际减碳成本效益是随着源头-末端的生产状况,减排技术以及经济市场的变化而变化,减碳技术边际减碳成本效益公式如下:

[0081] $$MCB(t)=\frac{CR_{CO2}(t)\times V_{CO2,eq}(t)}{CVP_{after}(t)-CVP_{base}(t)}$$

[0082] 式中,MCB(t)为在时间周期t内的减碳成本效益,若等于1则为边际成本效益,若大于1则说明减碳协同效益,反之亦然;CR_{CO2}为碳减排量;$V_{CO2,ep}$为碳排放价值;CVP_{after}为预设多种减排技术后生产系统的成本;CVP_{base}为改造前生产过程的成本。

[0083] 步骤5:设置钢铁生产系统耦合减碳技术模拟模型的优化目标、变量及约束条件,具体为:

[0084] 步骤5.1:在钢铁生产系统耦合减碳技术模拟模型基础上,钢铁生产系统共设置三个优化目标:

[0085] 目标一:生产单位产品㶲耗作为钢铁生产系统的节能优化目标,简称产品㶲强度,产品㶲强度目标函数$Ex_{intensity}$如下:

[0086] $$Ex_{intensity}=\sum_{z}\frac{Ex_{in,z}-Ex^{ef}_{out,z}}{M_{p,z}}\times p_z+\sum_{au}\frac{Ex_{in,au}-Ex^{ef}_{out,au}}{M_{p,au}}\times p_{au}$$

[0087] 式中,P_z为主要工序z的钢比或材比系数,即生产一吨粗钢或钢材产品所消耗工序产品的量;$Ex_{in,z}$为主要工序z的投入㶲量;$Ex_{in,au}$为公辅工序au的投入㶲量;$M_{p,z}$为主要工序z中产品p产出量;$M_{p,au}$为公辅工序au中产品p产出量;$Ex^{ef}_{out,z}$为主要工序z的有效产出㶲量;$Ex^{ef}_{out,au}$公辅工序au的有效产出㶲量;

[0088] 目标二:生产单位钢材产品碳排放量设为系统减碳优化的目标,简称碳排放强度,碳排放强度目标函数$CO2_{intensity}$如下:

[0089] $$CO2_{intensity}=\sum_{z}\frac{CO2_{D,z}}{M_{p,z}}\times p_z+\sum_{au}\frac{CO2_{D,au}}{M_{p,au}}\times p_{au}+\sum_{pur}\frac{CO2_{I,pur}}{M_{p,pur}}\times p_{pur}$$

[0090] 式中,$CO2_{D,z}$为企业在主要工序z中的直接碳排放量;$CO2_{D,au}$为企业在公辅工序au中的直接碳排放量;$CO2_{I,pur}$为企业向电网或热网购买动力能源pur造成的间接碳排放量,$M_{p,pur}$为企业向电网或热网购买动力能源pur的量,p_{pur}为单位钢材动力能源pur消耗量;

[0091] 目标三:生产单位钢材产品的综合成本效益设为经济效益优化的目标,综合成本效益目标函数CB如下:

[0092] $$CB=\frac{\sum_p M_{m,p}V_p}{M_{m,in}V_m+M_{en,in}V_{en}+M_{pol,in}V_{pol,ad}+M_{CO2,in}V_{CO2,eq}-M_{bp,out}V_{bp}}\times 100\%$$

[0093] 其中,分子$M_{m,p}V_p$为产品p的市场经济价值;分母由$M_{m,in}V_m$的原材料成本、$M_{en,in}V_{en}$的能源成本、$M_{pol,in}V_{pol,ad}$的环境成本、$M_{CO2,in}V_{CO2,eq}$的CO_2排放成本以及$M_{bp,out}V_{bp}$的副产品经济价值组成;

[0094] 步骤5.2:优化模型变量包括:投入的物料成分与结构、能源成分与结构等基本生产操作参数,钢铁生产设备参数如温度、压力、元素收得率等,产品结构、富氧率、材比系数等工艺参数以及低碳、零碳、负碳技术应用选择优化的布尔变量。

[0095] 步骤5.3:变量的边界设置符合正常工况下运行的实际要求。其他约束条件的设置包括产品质量约束,过程参数约束,物质及能量守恒约束等。

[0096] 设备运行参数和污染物排放标准约束条件为:

[0097] $x_{j,min}\leqslant x_j\leqslant x_{j,max}$

[0098] $0\leqslant P_0\leqslant P_{0,max}$

[0099] 其中,x_j为第j个设备运行参数,$x_{j,min}$为设备正常运行工况下第j个设备运行参数的历史最低值,$x_{j,max}$为设备正常运行工况下第j个设备运行参数的历史最高值,P_0为污染物排放量,$P_{0,max}$为污染物排放标准的最大值。

[0100] 物料、热量、能量和㶲平衡约束:基于热力学定律和质量守恒理论建立投入-产出

的物料、热量、能量和㶲平衡约束。但是,在模拟过程中如炉体散热等热量无法被准确计算,故一系列不可计算的能量将受到实际生产状况经验值的约束,以使得模型与实际生产更加吻合。

[0101] $$\begin{cases} \dfrac{E_{others}}{E_{in,sum}} \geq \sigma_{Q,av} \\ E_{in,sum}-E_{out,sum} \geq 0 \end{cases}$$

[0102] 式中,E_{other}为不可计算的能量损失;$E_{in,sum}$和$E_{out,sum}$分别为投入与产出能量;$\sigma_{Q,av}$为不可计算损失与总能量之比,其以实际生产经验值作为约束条件。

[0103] 稳定生产条件约束:为了满足钢铁稳定生产条件,部分关键的生产过程参数将受到限制,如矿渣的碱度、熔炉燃烧温度、含水量、烟气氧含量等。此外,考虑到实际工况配矿精细化难度的挑战,在配煤或配矿时将单一类型煤炭或矿石比例的最低阈值保持在3%以上。以炉渣碱度约束为例,如下所示:

[0104] $R_{r,min} \leqslant R_r \leqslant R_{r,max}$

[0105] 式中,R_r表示矿渣的碱度,并明确约束其上下限。

[0106] 产品质量指标约束:保证生产产品质量是实现企业效益的重要前提条件,故不同钢材产品的微量元素组成约束是必要的。在冶炼过程中,对所有过程产品和最终产品实施了元素组成和质量指标约束。

[0107] 设备功率约束:在本研究中,针对公辅设备设备功率的上限和下限约束在设计和正常工况范围内,包括锅炉、电厂、制氧、石灰窑等设备。

[0108] $$\frac{GC_{min,e,tm}}{M_{cs.tm}} \leq GA_{e,cs} \leq \frac{GC_{max,e,tm}}{M_{cs.tm}}$$

[0109] 式中,$GA_{e,cs}$是指生产一吨粗钢时设备e的产品产量。$GC_{min,e,tm}$表示为设备e在tm期间最小产品产量;$M_{cs,tm}$为tm期间的粗钢产量。同理,max表示最大。

[0110] 可靠性约束:钢铁生产交互网络涉及多种能源和物料的生产和交叉利用,以满足钢铁生产对于多种物料和能源介质的需求。因此,这些物料和能源的投入和产出需满足可靠性条件约束,即公辅工序产品产出量大于系统利用量,包括电力、蒸汽、鼓风、压缩空气、氧气、氢气等能源介质以及辅料、熔剂。而根据压力和温度不同将蒸汽分为三种类型皆需满足可靠性约束条件,分别是S1蒸汽(2.5~3.0MPa,250~300℃)、S2蒸汽(0.7~1.0MPa,170~300℃)和S3蒸汽(0.3~0.5MPa,200~250℃)。约束表达式如下:

[0111] $$\sum_{l,g} M^{g}_{gen,l} + \sum_{g} M^{g}_{pur} \geq \sum_{l,g} M^{g}_{use,l} + M^{g}_{loss,l}$$

[0112] 式中,$M^{g}_{gen,l}$表示为在工序l中的的产生量;M^{g}_{pur}为辅料或能源介质g外购量;$M^{g}_{use,l}$为钢铁生产系统的辅料或能源介质g利用量,$M^{g}_{loss,l}$为钢铁生产系统的辅料或能源介质g损失量。

[0113] 步骤6:采用U-NSGA-III方法对物质能源投入参数变量、工艺操作参数变量和技术应用参数变量进行优化,获得优化后的钢铁生产技术路径,具体为:

[0114] 步骤6.1:将物质能源投入参数变量、工艺操作参数变量和技术应用参数变量组合

构成一条染色体,物质能源投入参数变量和工艺操作参数变量采用实数编码方式,技术应用参数变量采用整数编码方式。

[0115] 步骤6.2:初始化种群,同时设定初始种群数量、初始值、交叉、变异算子、最大迭代步数以及变量上、下边界。

[0116] 步骤6.3:计算模型优化目标值,并根据优化目标值计算适应度,以作为下一步分层及选择的依据,同时采用违反度来衡量变量对于约束条件的满足情况。

[0117] 步骤6.4:根据适应度通过非支配排序和锦标赛选择的GA遗传算法对所述初始种群进行交叉与变异遗传处理,生成子代种群。

[0118] 步骤6.5:将子代种群与父代种群合并后进行精英处理后生成新一代种群。

[0119] 步骤6.6:重复步骤6.3-步骤6.5对新一代种群进行非支配排序和遗传处理,直到达到最大迭代次数,获得最优种群。

[0120] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,并不用以限制本发明的思想,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

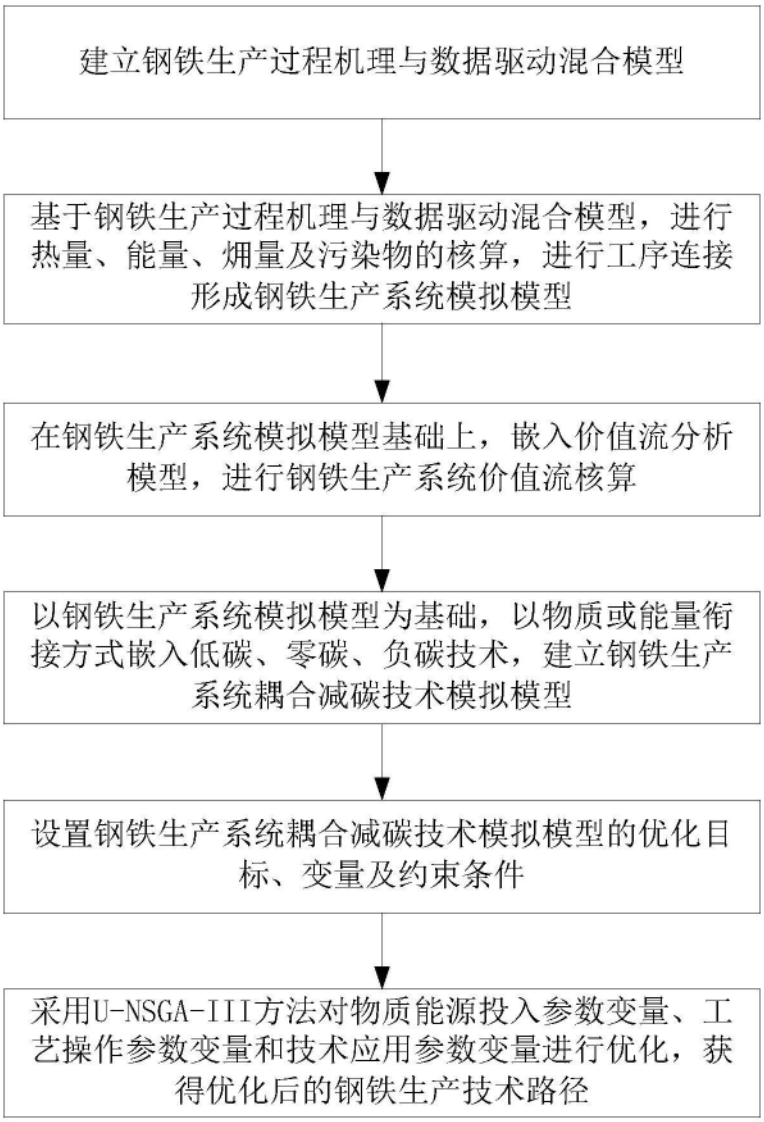

建立钢铁生产过程机理与数据驱动混合模型
基于钢铁生产过程机理与数据驱动混合模型，进行热量、能量、烟量及污染物的核算，进行工序连接形成钢铁生产系统模拟模型
在钢铁生产系统模拟模型基础上，嵌入价值流分析模型，进行钢铁生产系统价值流核算
以钢铁生产系统模拟模型为基础，以物质或能量衔接方式嵌入低碳、零碳、负碳技术，建立钢铁生产系统耦合减碳技术模拟模型
设置钢铁生产系统耦合减碳技术模拟模型的优化目标、变量及约束条件
采用U-NSGA-III方法对物质能源投入参数变量、工艺操作参数变量和技术应用参数变量进行优化，获得优化后的钢铁生产技术路径

图1