索引：

|  |  |
| --- | --- |
|  | 第时段，，*T*表示周期总数 |
|  | 第种消耗单一煤气工序，，表示单一煤气工序总数 |
|  | 第种消耗混合煤气工序，，表示混合煤气工序总数 |
|  | 第 种煤气 ，表示煤气总数 |
|  | 第 种煤气配比方案 ，表示方案总数 |
|  | 第 个锅炉 ，表示锅炉总数 |

参数：

|  |  |
| --- | --- |
|  | 煤气放散成本 |
|  | 煤气供应不足所需采购电量成本 |
|  | 煤气柜位波动成本 |
|  | 电力外卖收益 |
|  | 锅炉使用煤气成本 |
|  | 外购煤炭费用 |
|  | 时段蒸汽需求量 |
|  | 时段电需求量 |
|  | 时段锅炉的运行负荷 |
|  | 蒸汽的焓值 |
|  | 电能 |
|  | 外购电价格 |
|  | 外卖电价格 |
|  | 煤气 使用费用 |
|  | 外购煤炭费用 |
|  | 锅炉额定效率 |
|  | 煤气 的气柜柜位上限 |
|  | 煤气 的气柜柜位下限 |
|  | 煤气 发生工序在 时段的发生量 |
|  | 煤气 发生工序单位产出系数 |
|  | 煤气 在 时段产品的计划产量 |
|  | 煤气 的单位放散成本 |
|  | 第种煤气的煤气柜波动处罚成本 |
|  | 第种煤气的热值 |
|  | 煤气 在工序按第 种方案投入的混合比例 |
|  | 时段锅炉煤气最小投入量 |
|  | 时段锅炉煤气最大投入量 |
|  | 锅炉蒸汽的最大生成量 |
|  | 锅炉最大产电量 |
|  | 消耗单一煤气工序所需最低热值 |
|  | 消耗单一煤气工序所需最高热值 |
|  | 消耗混合煤气工序所需最低热值 |
|  | 消耗混合煤气工序所需最高热值 |

决策变量：

|  |  |
| --- | --- |
|  | 在 时段工序 煤气 的投入量 |
|  | 在 时段工序第 种煤气配比方案中煤气 的投入量 |
|  | 在 时段工序 采用第 种煤气配比方案，0-1变量 |
|  | 在 时段煤气 的煤气柜位 |
|  | 时段发电厂所耗煤气 煤气量 |
|  | 时段锅炉煤气消耗量 |
|  | 时段自发电量 |
|  | 时段外购电量 |
|  | 时段外卖电量 |
|  | 时段锅炉蒸汽的产生量 |
|  | 煤气 在 时段的放散量 |
|  | 时段外购煤炭量 |
|  | 时段锅炉产生蒸汽用于发电的量 |
|  | 时段锅炉产生蒸汽拿去外供的量 |

# 数学模型

煤气因为供应过剩超出柜位上限会导致过剩煤气直接排放产生排放成本：

煤气供应发电厂不足，所需增加采购电量成本：

煤气柜柜位尽量维持在中间，波动最小，煤气柜波动处罚成本：

电厂发电剩余，电力外卖收益：

锅炉煤气使用费用：

煤气供应热电联产机组不足外购煤炭费用：

目标函数如下：

钢铁生产过程产生的成本为、和，目标函数为生产成本最小化。

煤气系统优化调度模型约束如下：

(1) 煤气平衡约束：该约束指的是在任一时段*t*内，煤气的产生、存储、消耗始终处于平衡状态。

(2)蒸汽保供约束：锅炉产生的蒸汽量要大于蒸汽的需求量(拿去外供的蒸汽量+用来发电的蒸汽量)

(3)电力保供约束：

(4) 锅炉设备约束：

(5) 汽轮机约束：

(6) 锅炉进气能力限制和产能约束：

(7) 发电机组额定产能约束：

(8) 买卖电不能同时操作：

(9) 煤气产出能力约束：

(10) 煤气柜位约束：

(11) 煤气系统各类工序约束方程

1)消耗单一煤气工序：工序需求量相对稳定，约束：

2)消耗混合煤气工序：

(12) 混合比例约束

为了满足每个工序对混合煤气的热值要求，需要对不同煤气混合方案进行选择，保证参与混合的煤气在比例上符合工艺要求。在任一时间内，对任一工序确定选择某一混合方案后实际投入并进行混合的煤气之间的比例关系必须满足：

|  |
| --- |
|  |

(13) 同一时间在同一工序混合方案互斥

|  |
| --- |
|  |
|  |

表1 煤气发生系统产能

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | BFG | COG | LDG  j=3 |
| 焦炉 | j=1 | 0 | 432 | 0 |
| 高炉 | j=2 | 1100 | 0 | 0 |
| 转炉 | j=3 | 0 | 0 | 90 |

表2 煤气放散成本、比热、煤气柜容量

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | BFG  j=1 | COG  j=2 | LDG  j=3 |
|  |  | 0.037 | 0.034 | 0.095 |
|  |  | 3350 | 18820 | 8364 |
|  |  | 140000 | 65000 | 77000 |
|  |  | 240000 | 100000 | 207000 |

表3 工序生产产量及单位热耗

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 工序 | 单位热耗 | 热耗单位 | 产量/h | （hv\_min）热值下限/KJ | （hv\_max）热值上限/KJ |
| 烧结 | 56514 |  | 1500-3000 | 84771000 | 169542000 |
| 焦炉 | 3673130 |  | 400t-800t | 1469252000 | 2938504000 |
| 石灰 | 56480 |  | 150t-200t | 8472000 | 11296000 |
| 高炉 | 1992120 |  | 1500t-1700t | 2988180000 | 3386604000 |
| 转炉 | 62968 |  | 1400t-1600t | 88155200 | 100748800 |
| 连铸 | 368 |  | 840t-960t | 309120 | 353280 |
| 初轧 | 10840 |  | 462t-528t | 5008080 | 5723520 |
| 钢管 | 35740 |  | 98t-112t | 3502520 | 4002880 |
| 管坯连铸 | 1620 |  | 135t左右 | 210600 | 226800 |
| 热轧1 | 13400 |  | 转炉89% | 16696400 | 19081600 |
| 热轧2 | 15390 |  | 转炉89% | 19175940 | 21915360 |
| 热轧3 | 15390 |  | 转炉89% | 19175940 | 21915360 |
| 冷轧 | 12560 |  | 热轧32% | 5007923.2 | 5723340.8 |
| Ccpp | 8243 |  | 145kkW | 1154020000 | 1236450000 |
| 低压锅炉 | 2199350 |  | 415t | 879740000 | 945720500 |
| Ldg合成 | 8360 |  | 110 | 836000000 | 1003200000 |
| 城市煤气 | 18820 |  | 4 | 65870000 | 84690000 |
| 其他 | 3350 |  | 3 | 10050000 | 10050000 |
| 电厂 | 8243 |  | 50kkW | 412150000 | 412150000 |

表4 配比方案

|  |  |
| --- | --- |
| 工序 | 煤气 |
| 烧结 | COG |
| 转炉 | COG |
| 连铸 | COG |
| 管坯连铸 | COG |
| 冷轧 | BFG |
| 城市煤气 | COG |
| 其他 | BFG |
| 电厂 | 90%BFG+10%COG |
| 焦炉 | BFG  COG  95%BFG+5%COG |
| 石灰 | 18%BFG+82%COG |
| 高炉 | BFG  95%BFG+5%COG  83%BFG+17%LDG |
| 初轧 | 62%BFG+38%COG |
| 钢管 | 62%BFG+38%COG |
| 热轧1 | 45%BFG+35%COG+20%LDG  60%BFG+40%COG |
| 热轧2 | 54%BFG+26%COG+20%LDG  66%BFG+34%COG |
| 热轧3 | 45%BFG+38%COG+17%LDG  56%BFG+44%COG |
| 冷轧 | 95%BFG+5%COG |
| 低压锅炉 | COG  10%COG+90%LDG  65%BFG+10%COG+25%LDG  65%BFG+35%COG |
| LDG合成 | 68%BFG+32%COG |

注：其中烧结、转炉、连铸、管坯连铸、冷轧、城市煤气、其他工序为单一消耗煤气用户，用表示，焦炉、石灰、高炉、初轧、钢管、热轧1、热轧2、热轧3、冷轧、低压锅炉、LDG合成工序为混合煤气用户，用表示。

表5 三种煤气单位时间内产量范围

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 焦炉 | 400-800 |
| 高炉 | 1500-1700 |
| 转炉 | 1400-1600 |

备注：煤气产量为随机数生成

表6 使用Gurobi求解不同规模

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 周期T | 求解结果(元) | 时间s |
| 6 | 90011 | 1 |
| 12 | 244031 | 18 |
| 18 | 384280 | 13 |
| 24 | 487140 | 411 |
| 30 | - | 3600 |

图示

描述已自动生成

钢铁企业煤气系统示意图

图示

中度可信度描述已自动生成

钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换系统示意图

|  |  |
| --- | --- |
| 费用项 | 值 |
| COG使用(元/) | 0.35 |
| BFG使用(元/) | 0.04 |
| 外购煤炭(元/) | 0.6 |
| 外售电(元/) | 0.5 |

模型成本相关参数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 峰价 | 谷价 | 平价 |
| 区间 | 08:00-12:00 | 23:00-24:00 | 12:00-19:00 |
| 19:00-23:00 | 00:00-08:00 |
| 价格(元/) | 0.72 | 0.28 | 0.49 |

峰谷电价情况

蒸汽相关参数：(蒸汽焓值)：3000

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 锅炉 |  |  | 产汽范围  () | 消耗BFG范围() | 消耗COG范围() | 锅炉额定功率 |
| 1 | 0.41 | -12.39 | 0-35 | 0-60k | 0-10k | 0.95 |
| 2 | 0.43 | -15.52 | 0-35 | 0-60k | 0-10k | 0.95 |
| 3 | 0.44 | -58.78 | 60-130 | 0-290k | 0-20k | 0.91 |
| 4 | 0.47 | -67.44 | 60-130 | 0-290k | 0-20k | 0.91 |
| 5 | 0.58 | -845.75 | 700-1025 | 0-400k | 0-60k | 0.94 |
| 6 | 0.56 | -794.63 | 700-1025 | 0-400k | 0-60k | 0.94 |

锅炉相关参数