



清华大学

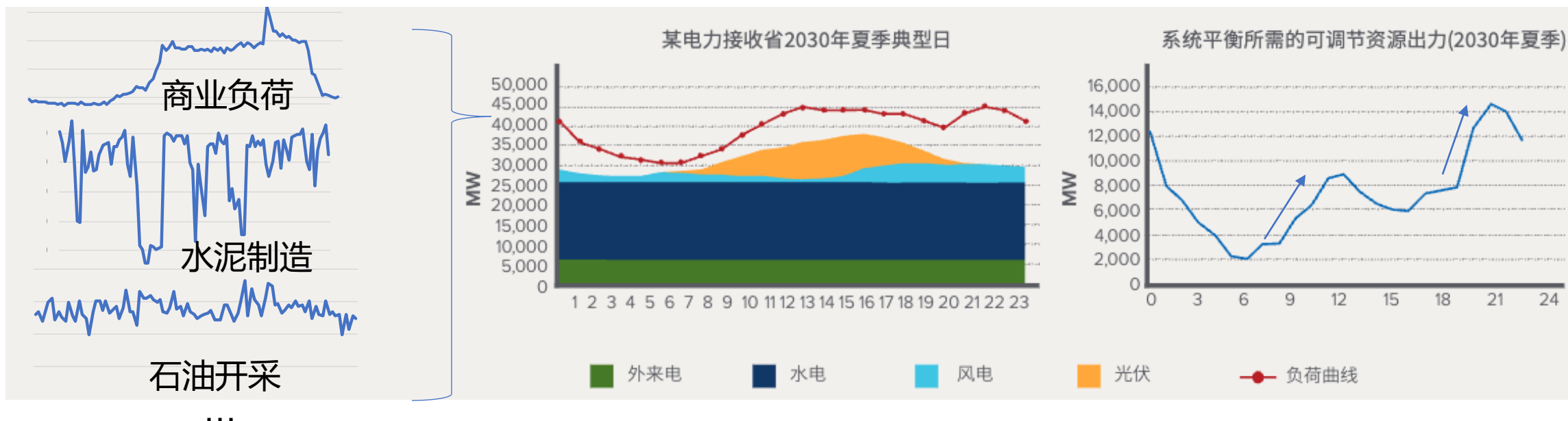
Tsinghua University

面向网荷互动的工业负荷建模



背景：陡峭净负荷曲线不利于电力系统安全经济运行

- 传统电力系统中，电力用户按照各自习惯用电，叠加而成的总负荷曲线峰谷差较大。
- 在未来高比例可再生能源场景下，净负荷曲线更加陡峭，需要大量可调节资源平衡供给，不利于电力系统的安全、经济运行。



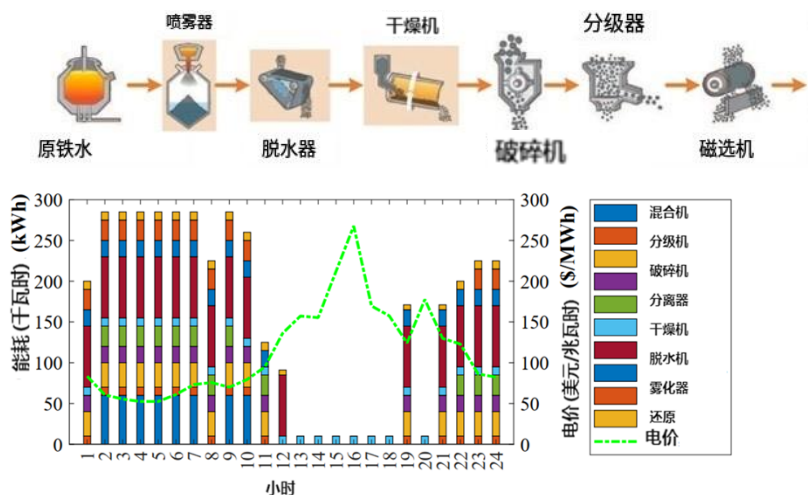
2030年中国中部地区某电力接收省典型日平衡模拟*



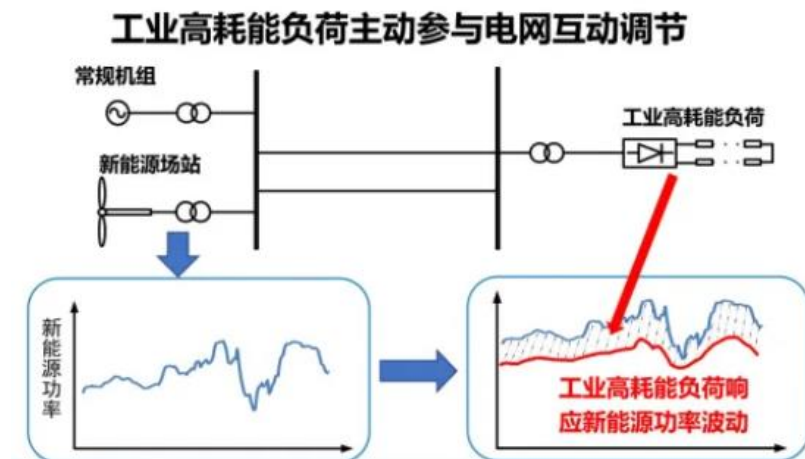
目标：利用工业可调负荷灵活性熨平净负荷曲线

按照调节机理划分，工业可调负荷的灵活性主要两个有来源：

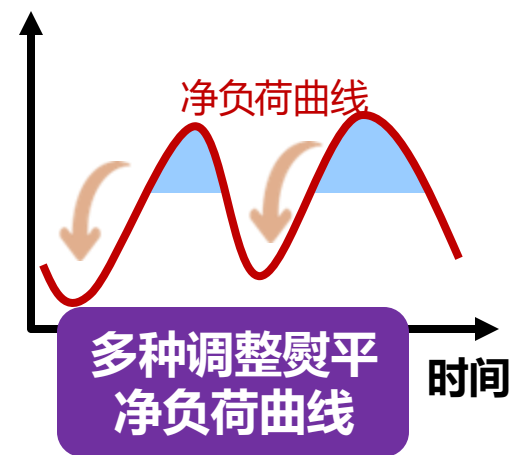
- 负荷平移(小时级): 在能量市场价格激励下，工厂优化生产安排，避开高电价时段，降低用能成本
 - 快速控制(秒-分钟级): 通过电网直控实现可调负荷连续控制，提供调频等辅助服务并通过市场补偿
- 工业用户多种调节方式可共同熨平净负荷曲线，但需要满足用户本身的用能目标和生产约束！



负荷平移案例：在PJM日前电价下，某钢粉厂优化其生产计划，避开高电价时段，**用能成本降低13%。**



响应新能源波动案例：通过调节电极极距改变电弧炉等值电阻，可实现其**18%额定容量**范围内的功率连续调节，消纳新能源。



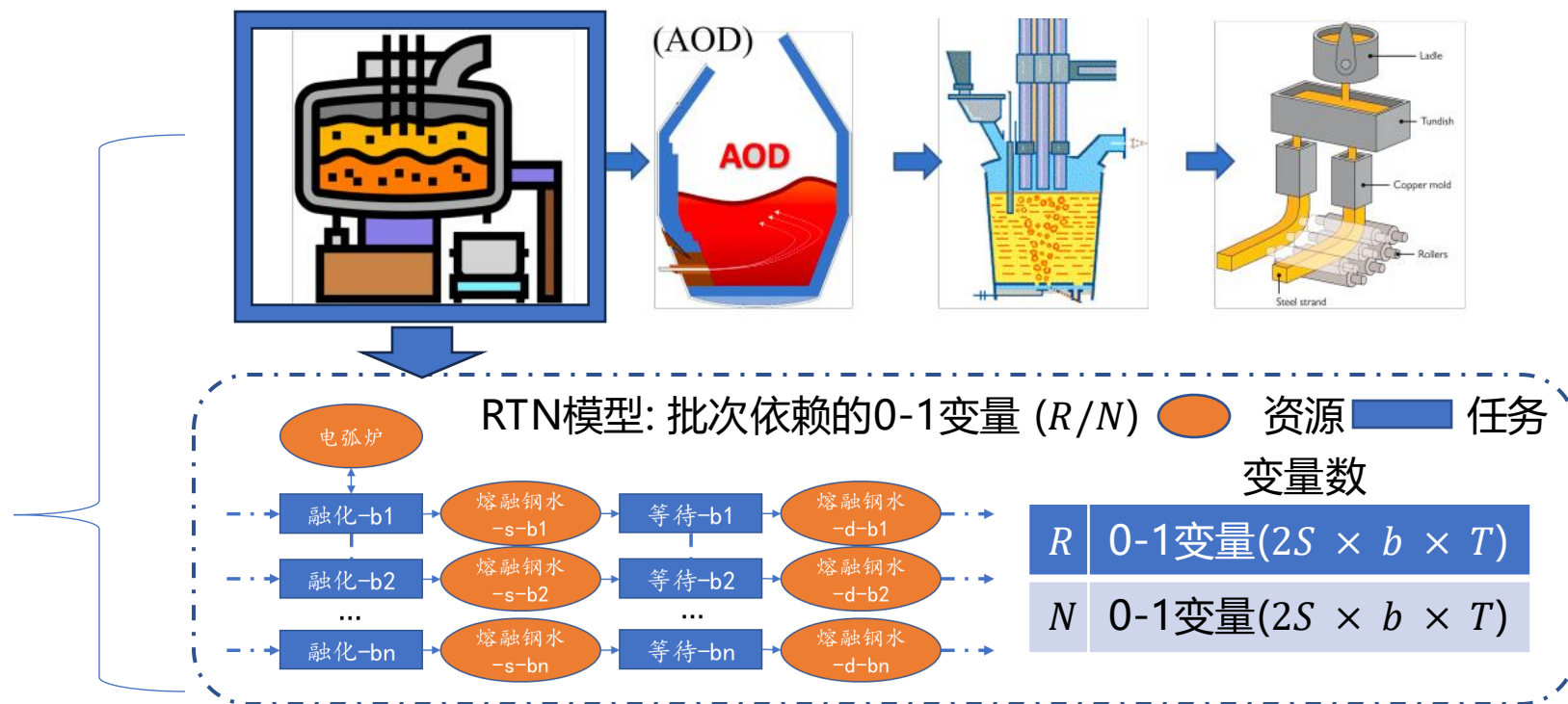


动机：建立可嵌入调度的工业过程灵活性约束

- 传统电力现货市场的运行，本质上需要满足**电网安全约束以及物理运行特性**。
- 引入负荷调度后，还需要满足电力用户用电的**设备技术约束和社会经济特性**。
- 例如，在SCUC环节，需要考虑炼钢电弧炉等启停时间较长设备的用电安排，单个工厂可能引入上千0-1变量。

SCUC约束条件

- 广义机组约束
 - 出力上下限约束
 - 爬坡速率约束
 - 最小连续开停时间约束
 - 最大启停次数约束
 - 用能设备技术约束...
- 系统约束
- 网络约束

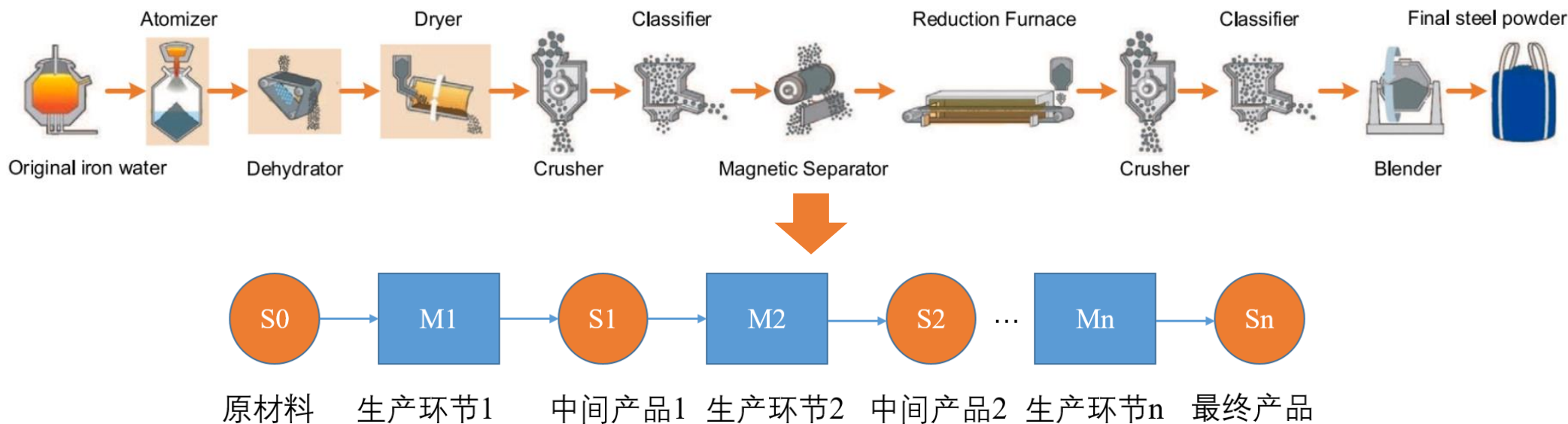


基于“资源-任务网络”的电弧炉建模例子



现有工业过程通用模型：STN模型

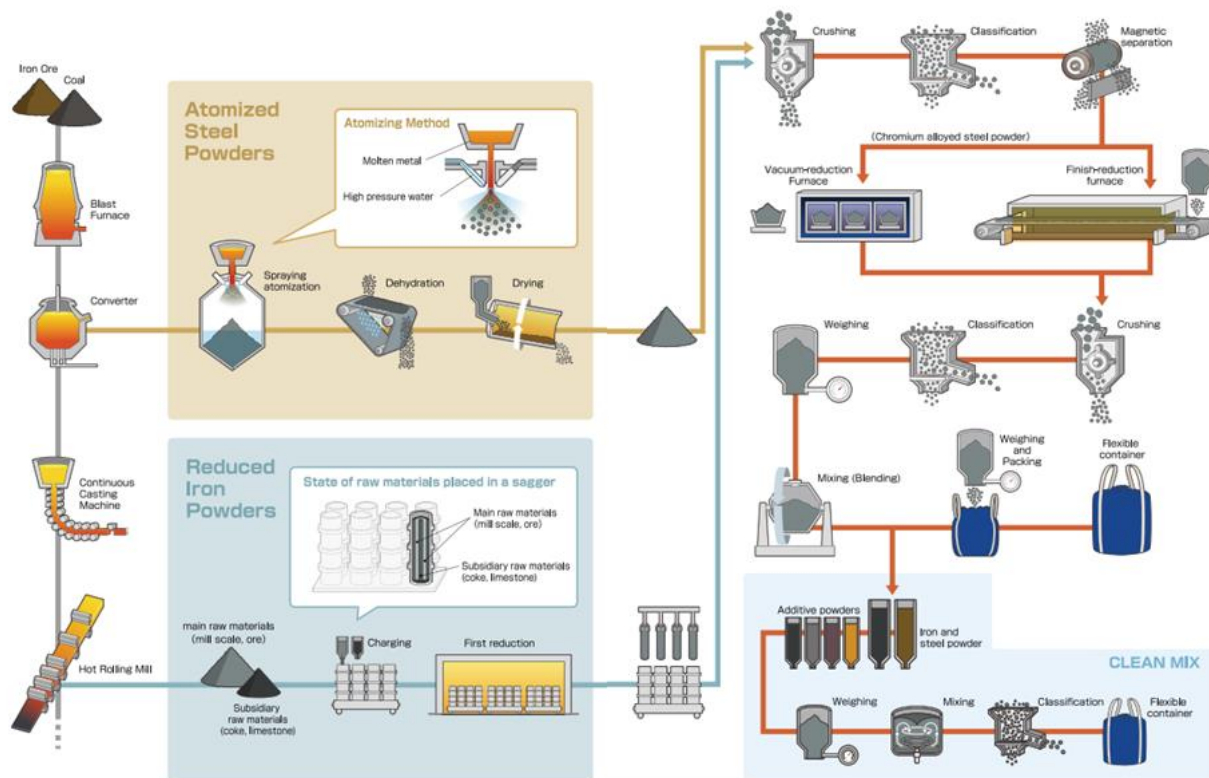
主要思路：**平衡模型精确性和可计算性**，利用通用的工业生产过程模型为各类常见技术约束建立统一的数学形式。例如，状态任务网络(state-task network, STN)用任务(M)描述生产过程，属性包括额定功率、生产速率等；用状态(S)参数描述各产品，属性包括存储约束和生产目标等。常用于水泥、化工等建模。





现有工业过程通用模型：STN模型

状态任务网络(state-task network, STN)的建模，以某钢粉厂为例：



机器/工序	运行状态	生产速率 (Ton/h)	运行功率 (kW)	存储容量 (Ton)
雾化器/1	0	0	0	180
	1	15	60	
脱水器/2	0	0	0	100
	1	15	10	
干燥器/3	0	0	0	150
	1	15	30	
磁分离器 /6	0	0	0	100
	1	15	10	
还原炉/7	0	0	0	100
	1	15	75	
破碎机 /4,8	0	0	0	100
	1	10	15	
	2	15	20	
分级机 /5,9	0	0	0	150
	1	10	15	
	2	20	25	
混合机/10	0	0	0	200
	1	10	6	
	2	15	10	

某钢粉厂生产过程（网状结构）

表1：基于STN的钢粉厂生产过程参数



现有工业过程通用模型：STN模型

STN模型以设备的运行操作为变量，捕捉了物料变化关系（线性关系）、存储限制等技术约束，可以构建外部电价下的最优生产调度问题（通常为MILP形式）。

$$Cost = \sum_{t \in T} Pr_t E_t, \quad (1)$$

$$E_t = \sum_{i \in I^P} \sum_{k \in K_i} P_{ik} \Delta t_{tik}, \quad t \in T, \quad (2)$$

$$\Delta t_{tik} \geq 0, \quad t \in T, i \in I^P, k \in K_i. \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K_i} \Delta t_{tik} = \Delta t, \quad t \in T, i \in I^P. \quad (4)$$

$$S_{ti} \geq S_i^0 + S_i^{\text{tar}}, \quad t = t^{\text{end}}, i \in I^S. \quad (5)$$

$$0 \leq S_{ti} \leq S_i^{\text{max}}, \quad t \in T, i \in I^S. \quad (6)$$

$$S_{ti} = S_i^0, \quad i \in I^S, t = 0 \quad (7)$$

$$S_{ti} = S_{(t-1)i} - \sum_{k \in K_{i+1}} C_{(i+1)k} \Delta t_{t(i+1)k}, \quad t \in T, i = 0. \quad (8)$$

$$S_{ti} = S_{d(t-1)i} + \sum_{k \in K_i} G_{ik} \Delta t_{tik} - \sum_{k \in K_{i+1}} C_{(i+1)k} \Delta t_{t(i+1)k}, \quad t \in T, i \in I^P \setminus \{i^{\text{end}}\}. \quad (9)$$

$$S_{ti} = S_{d(t-1)i} + \sum_{k \in K_i} G_{ik} \Delta t_{tik}, \quad t \in T, i = i^{\text{end}}. \quad (10)$$

用能成本

用能构成

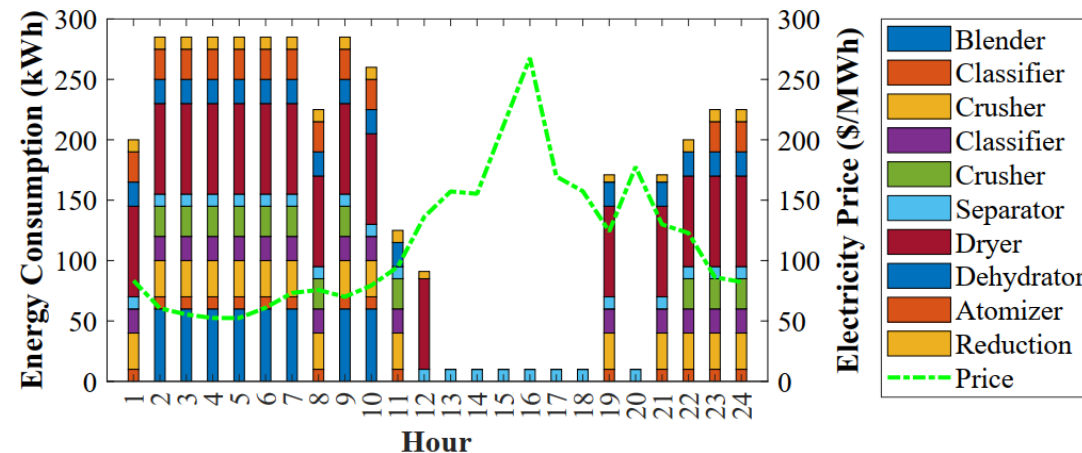
Δt_{tik} 为设备操作变量

生产目标

物料存储限制

物料初值

物料变化关系
(线性关系)



所得模型可以嵌入最优用能模型中，得到不同电价下工厂（钢粉厂）各设备的最优用能结果

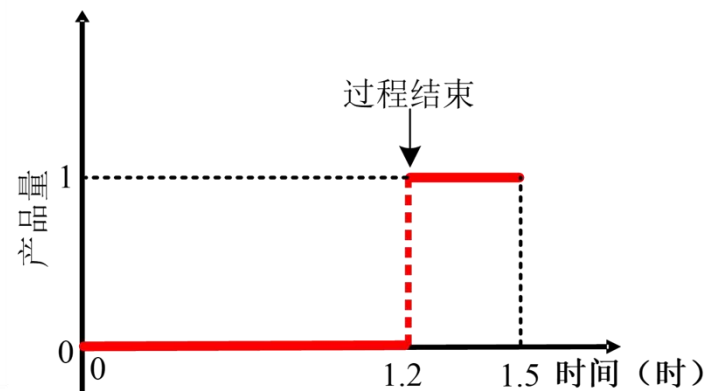
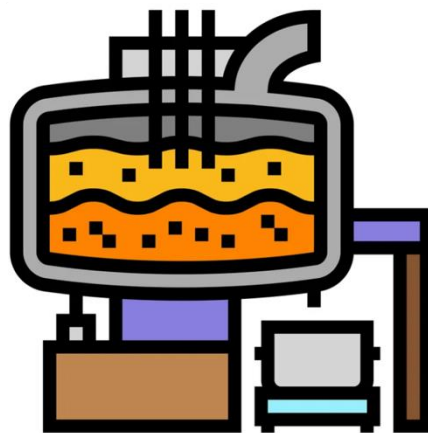
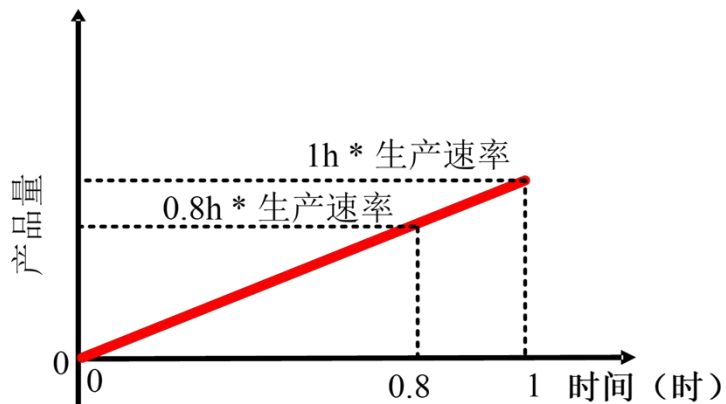


现有工业过程通用模型：RTN模型

STN模型不足：线性化的物料转化关系无法描述很多实际“离散型过程”。

- 连续型过程：产出量是生产时间的连续函数；例如钢粉生产中的压碎过程。
- 离散型过程：产出量是生产时间的离散函数；例如二次炼钢中的电弧炉融化过程。

为此，学者提出了RTN模型，可以描述炼钢等离散型过程的技术约束。



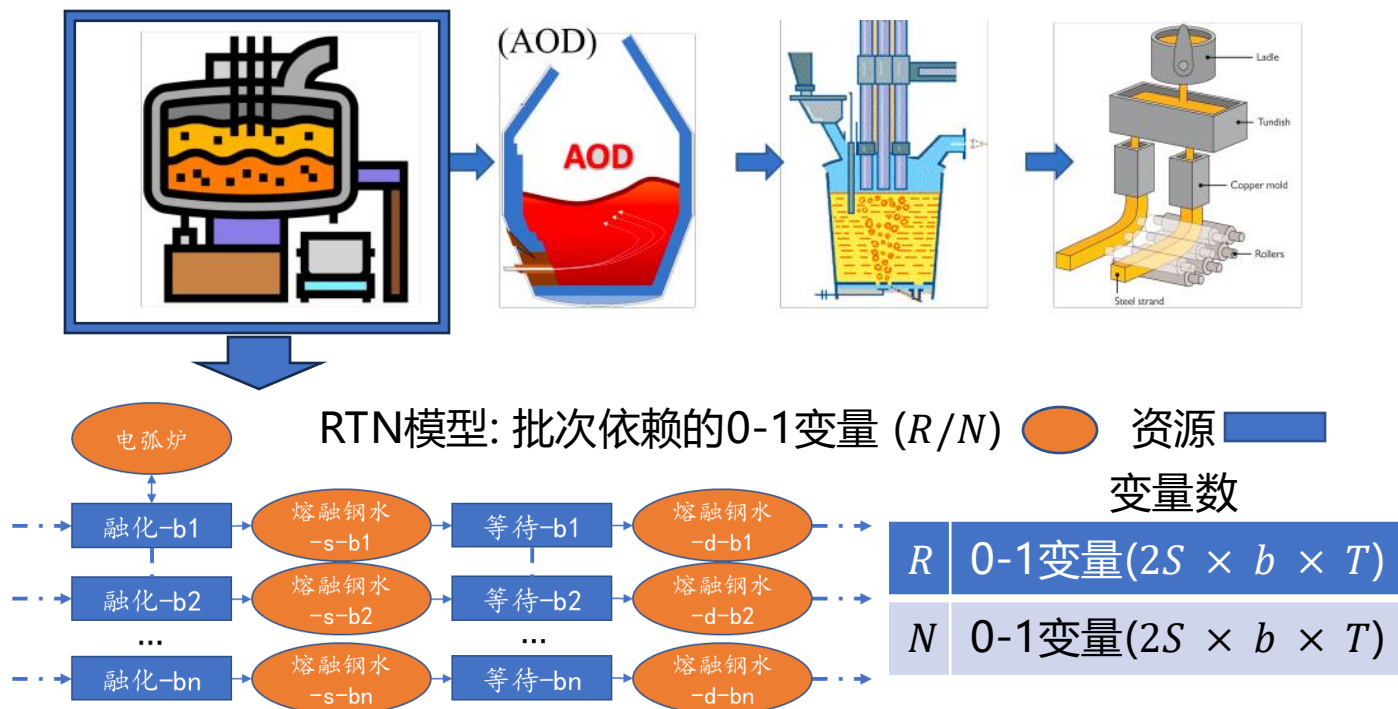
压碎过程：产品量、用电量与运行时间成正比

融化过程：完全融化才有能传递到下一环节的“产品”



现有工业过程通用模型：RTN模型

资源-任务网络 (resource task network) 基于批次刻画启停约束、等待时间约束等离散型工业过程技术约束，提高了工业过程灵活性的建模精度。然而，RTN模型建模单个工业过程就需要上千0-1变量，应用到大规模网荷互动中必然导致“维数爆炸”。



RTN中物料转化关系 (与STN完全不同):

$$R_{r,t} = R_{r,t-1} + \sum_i \sum_{\theta=0}^{\tau_i} \mu_{r,i,\theta} N_{i,t-\theta} \quad \forall r, t$$

0-1变量 N 用于建模任务的开始时间, $N_{i,t} = 1$ 表示任务 i 在时间槽 t 开始。 μ 表示任务 i 在开始后的第 θ 个时间槽消耗或产生的资源 r 的数量。例如, 熔炼(任务 i) 在开始后 80 分钟产生钢水 (资源 r), 则 $\mu_{r,1,80}$ 的值为 1。

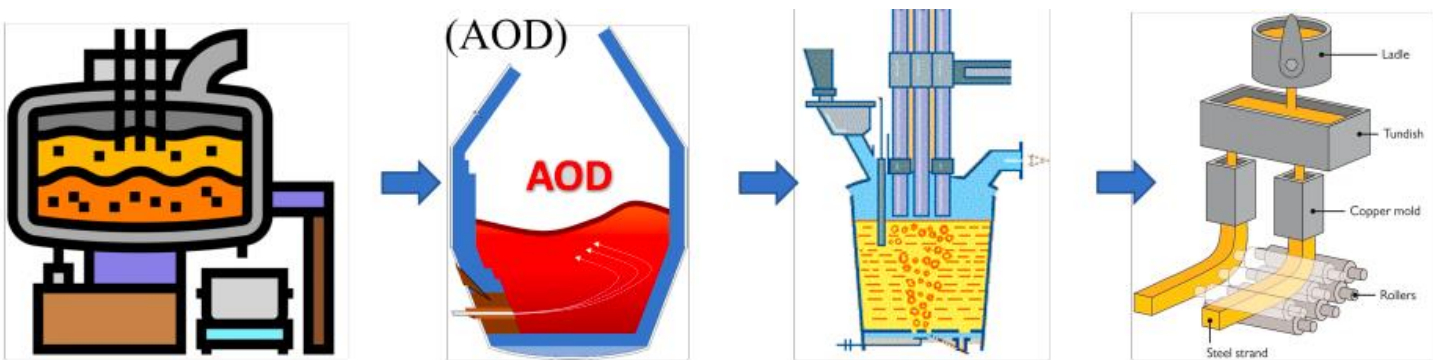


目标：计算高效的工业过程通用模型

主线任务： 建立计算高效的通用数学模型，准确描述大多数工业过程通用的技术约束，包括操作单元之间的依赖关系以及能源和资源的动态流动等。

支线任务： 能否统一STN模型和RTN模型的形式，建立真正的通用模型？

复杂性来源	生产过程	设备运行状态	前后阶段耦合
机理源头	<ul style="list-style-type: none">• 基于批处理• 最小单元要求• 01变量描述	<ul style="list-style-type: none">• 具有严格切换条件• 切换与生产进度关联• 状态切换与批次耦合	<ul style="list-style-type: none">• 顺序处理限制• 批次完成约束• 时间敏感约束
处理方法	约束重构	变量重构	约束重构

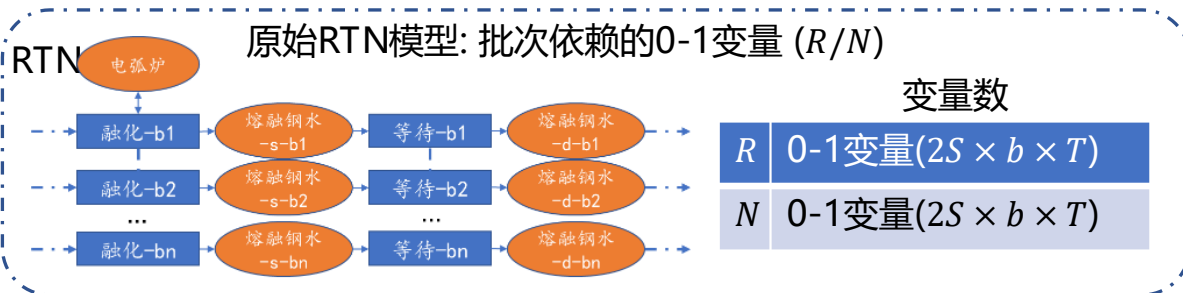




方法框架

电弧炉建模例子

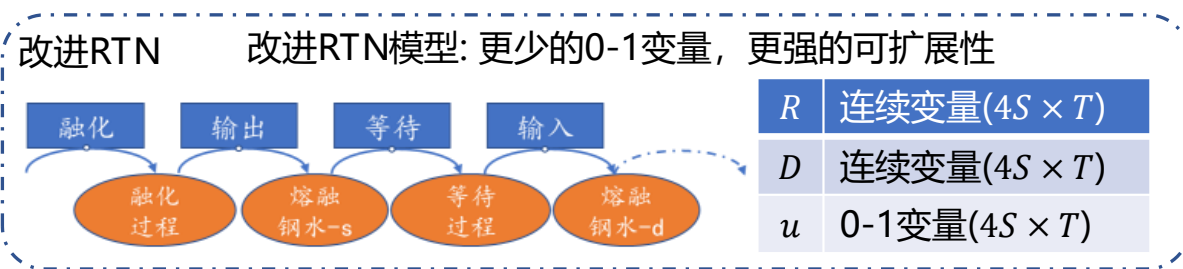
资源 任务



① 将原始的资源/任务对应的0-1变量替换成连续变量



② 引入状态变量 u 以建模不可中断过程的运行状态



R : 资源量; N : 任务启动时间; D : 任务运行时间; u : 任务运行状态
 S : 生产环节数; b : 批次数; T : 调度时段数

在保留图论建模理念（即任务作为边、资源作为节点，描述资源转化过程）的基础上：

(1) **变量重构**：使用与批次无关的连续变量来建模资源和任务操作，替代传统工业过程模型中的离散变量；

(2) **约束重构**：引入状态变量以建模不可中断过程状态，在严格满足离散工业过程技术要求的同时，提高计算效率。



步骤1：变量重构-问题

由于工业生产设备的运行状态通常是离散的（仅能开/关或者在有限个状态间切换），因此需要引入大量01变量描述其运行。类似发电侧的机组组合问题，但每台“机组”（工厂）所需变量更多，难以大规模协同优化。

工序	运行状态	生产速率 (Ton/h)	额定功率 (kW)	存储容量 (Ton)
破碎机/1	0	0	0	200
	1	10	60	
	2	15	100	

表1：钢粉厂生产过程参数

以钢粉生产过程为例，若每个设备可能的运行状态为2个，描述10台设备在全天96时段的运行需要 $2 \times 10 \times 96 = 1920$ 个

随着工厂数量的增加，建模其运行的01变量数量将线性增加，求解复杂度将呈指数增加！



步骤1：变量重构-思想

针对工业生产流水线建模中存在启停(01)变量、导致计算复杂度较大的问题，提出线性化的工业生产过程模型，将混合整数规划近似为线性规划。

0-1变量建模

hour	1	2	3	...
设备1运行状态	on	on	off	...

连续变量建模

hour	1	2	3	...
设备1开启时间	1h	0.8h	0h	...
设备1关闭时间	0h	0.2h	1h	

思想1：利用最优化知识：优化问题的最优解往往在边界处取到；即使把01变量松弛，得到线性规划最优解也基本是0/1，误差不大。

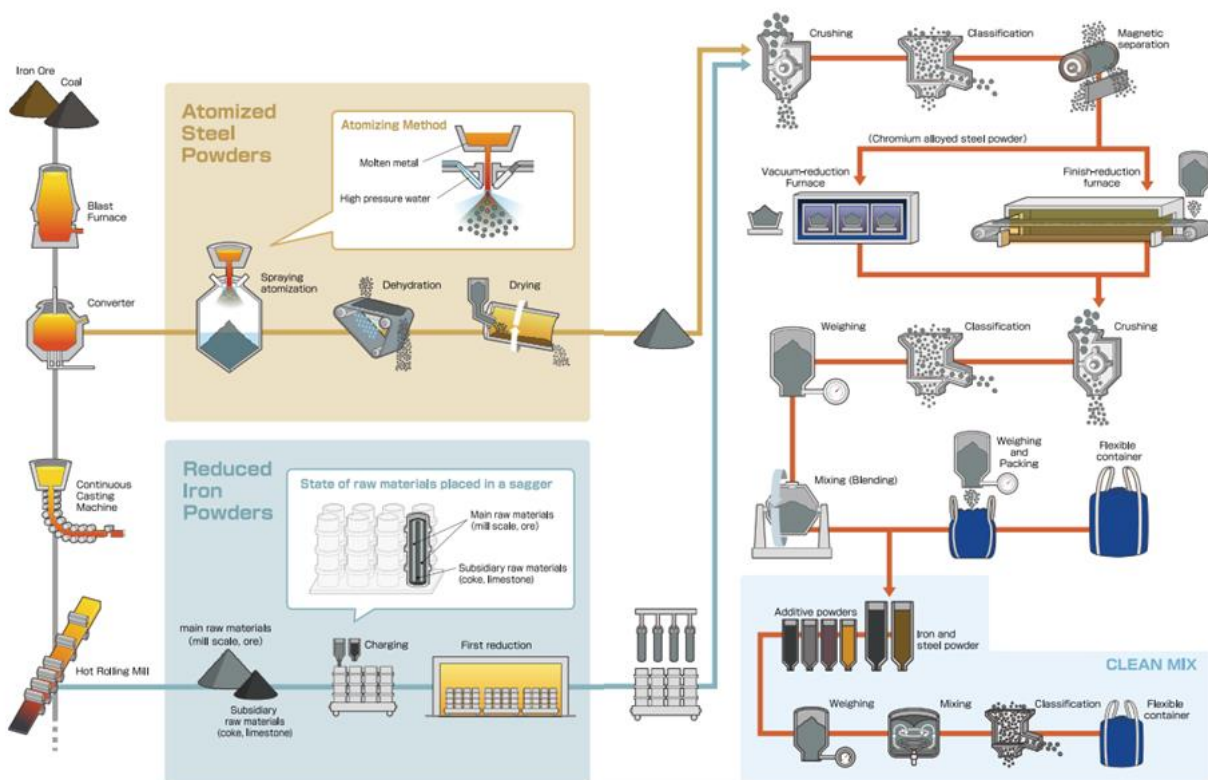
思想2：利用时间尺度：实际操作中，由于用能设备的开启时间很短，因此在电网调度小时级别的时间尺度中，设备在一个时间区间中的运行时间是接近连续的。



步骤1：变量重构-LSTN实例

线性化STN(LSTN)建模某钢粉厂生产：决策变量为 Δt_{tik} ：设备i在时段t、状态k上停留的时间长度，基于线性状态任务网络的优化问题变为线性规划。

t: 时段编号; i: 工序编号



某钢粉厂生产过程

$$Cost = \sum_{t \in T} Pr_t E_t, \quad (1)$$

$$E_t = \sum_{i \in I^P} \sum_{k \in K_i} P_{ik} \Delta t_{tik}, \quad t \in T, \quad (2)$$

$$\Delta t_{tik} \geq 0, \quad t \in T, i \in I^P, k \in K_i. \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K_i} \Delta t_{tik} = \Delta t_i, \quad t \in T, i \in I^P. \quad (4)$$

$$S_{ti} \geq S_i^0 + S_i^{\text{tar}}, \quad t = t^{\text{end}}, i \in I^S. \quad (5)$$

$$0 \leq S_{ti} \leq S_i^{\text{max}}, \quad t \in T, i \in I^S. \quad (6)$$

$$S_{ti} = S_i^0, \quad i \in I^S, t = 0 \quad (7)$$

$$S_{ti} = S_{(t-1)i} - \sum_{k \in K_{i+1}} C_{(i+1)k} \Delta t_{t(i+1)k}, \quad t \in T, i = 0. \quad (8)$$

$$S_{ti} = S_{(t-1)i} + \sum_{k \in K_i} G_{ik} \Delta t_{tik} - \sum_{k \in K_{i+1}} C_{(i+1)k} \Delta t_{t(i+1)k}, \quad t \in T, i \in I^P \setminus \{i^{\text{end}}\}. \quad (9)$$

$$S_{ti} = S_{(t-1)i} + \sum_{k \in K_i} G_{ik} \Delta t_{tik}, \quad t \in T, i = i^{\text{end}}. \quad (10)$$

用能成本

用能构成

Δt_{tik} 约束

生产目标

物料存储限制

物料初值

物料变化关系

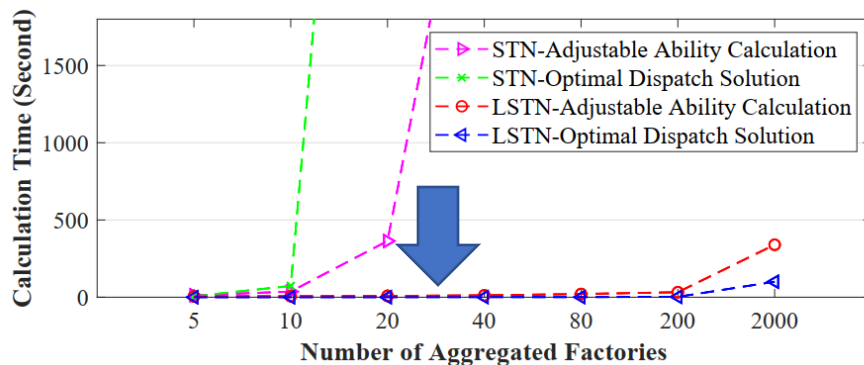
基于线性状态任务网络的钢粉厂生产过程模型



步骤1：变量重构-数值测试(钢粉厂自调度)

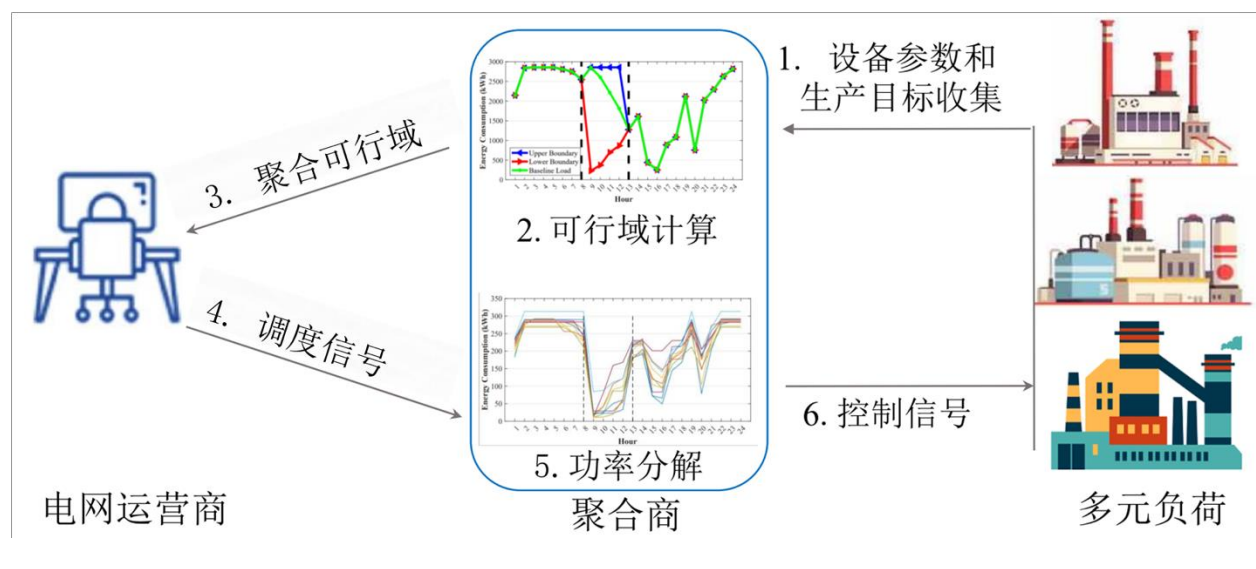
效果：与传统STN相比，LSTN以不超过0.2%的误差大大提升模型可扩展性，可支撑超过2000个多元用户用能的协调优化。

计算时间大幅降低



工业过程模型嵌入最优用能问题的计算复杂度降为多项式复杂度

基于LSTN的工业负荷参与电网互动框架

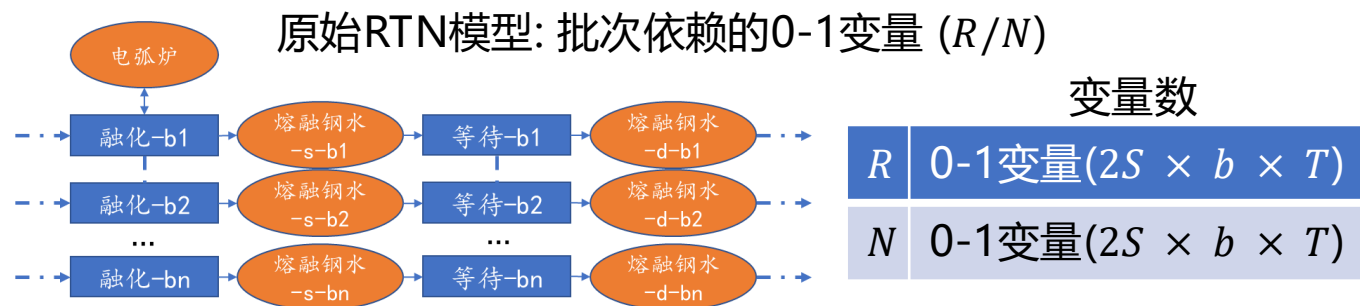


- R. Lyu, H. Guo, Y. Zheng, Y. Bai, and Q. Chen. "LSTN: a linear model of industrial production process for demand response." 2023 IEEE PES ISGT Europe.

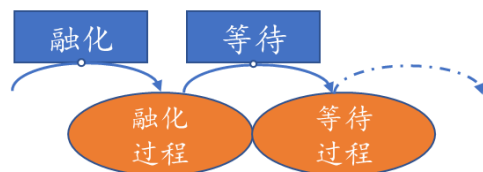


步骤2：约束重构-问题

要将连续变量建模方法推广到更复杂的RTN，或者说要基于连续变量建模启停约束、等待时间约束等离散型技术约束，还需要相应设计数学形式描述离散型技术约束。



将原始的资源/任务对应的0-1变量替换成连续变量



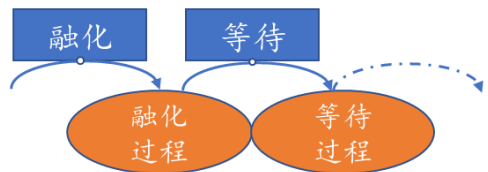
R	连续变量($4S \times T$)
D	连续变量($4S \times T$)

R : 资源量; N : 任务启动时间; D : 任务运行时间; u : 任务运行状态
 S : 生产环节数; b : 批次数; T : 调度时段数



步骤2: 约束重构-方法

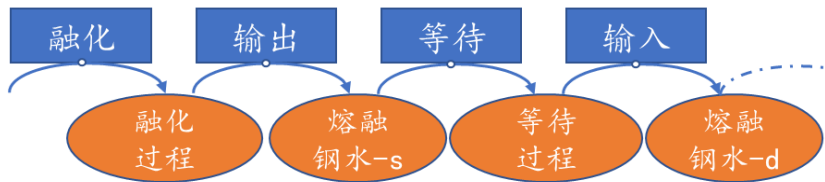
(1)引入状态变量 u 以建模不可中断过程的运行状态



R	连续变量($4S \times T$)
D	连续变量($4S \times T$)



引入状态变量 u 以建模不可中断过程的运行状态



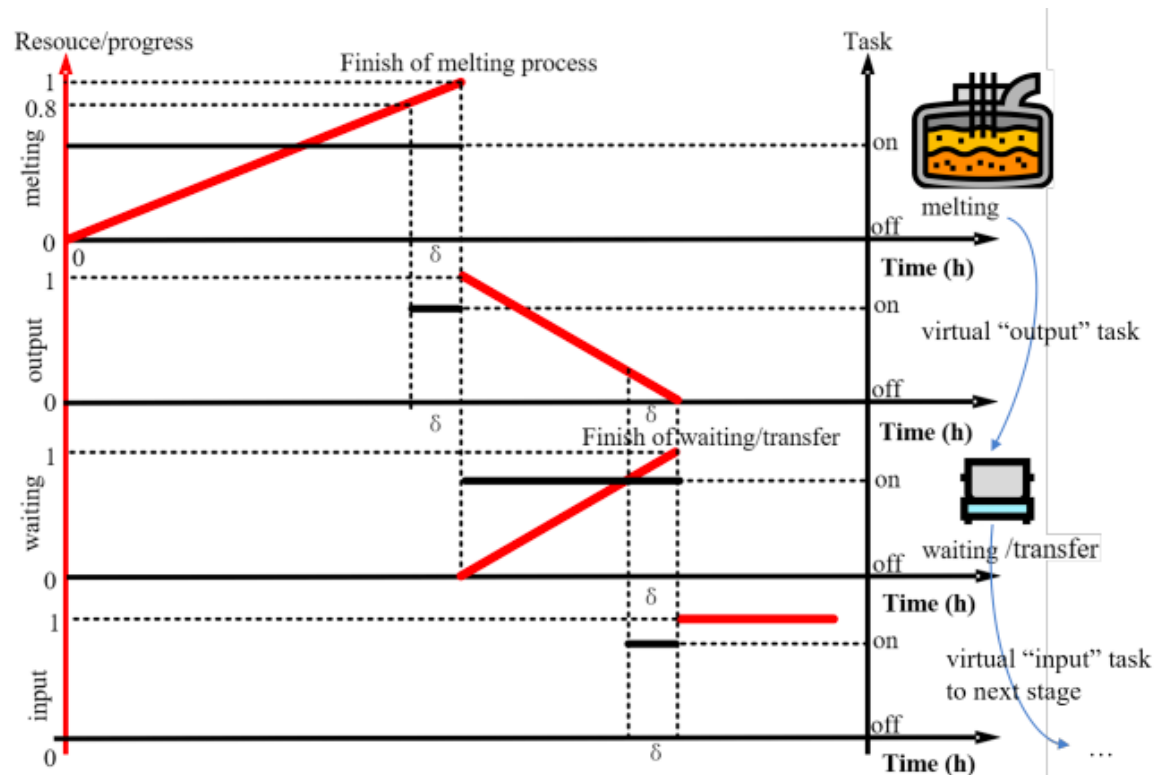
R	连续变量($4S \times T$)
D	连续变量($4S \times T$)
u	0-1变量($4S \times T$)

R : 资源量; N : 任务启动时间; D : 任务运行时间; u : 任务运行状态
 S : 生产环节数; b : 批次数; T : 调度时段数



步骤2: 约束重构-方法

(2)在加工任务与等待/传输任务之间添加虚拟的输出和输入任务。在前序任务完成的时段内，虚拟任务将其自身的资源设为0，并将后续任务的资源设为 1。



基于“虚拟任务”机制，重新设计技术约束(略)

物料转化
(与LSTN一致)

$$R_{r,t} \leq R_{r,t-1} + \sum_i \sum_k g_{r,i,k} D_{i,k,t} \quad \forall r, t.$$

不可中断

$$D_{i,0,t} \leq 1 - u_{i,t} \quad \forall t$$

$$R_{r^{i+},t} \leq u_{i,t} \quad \forall t$$

批次处理

$$D_{i,1,t} = u_{i,t} \delta \quad \forall t$$

等待时间限制

$$R_{r^{i-},t} \leq u_{i,t} \quad \forall t$$

由于可表达性与传统RTN一致，称所提模型为连续RTN (cRTN)。



步骤2：约束重构-对比

经过形式变换，可以发现此前所提LSTN模型的核心约束（物料转化）的数学形式与cRTN一致，因此cRTN可以视为是在LSTN的基础上添加了部分状态变量并增加技术约束的复杂版本。或者说，LSTN模型是cRTN模型的退化，cRTN是更为通用的模型。

LSTN核心约束：物料转化

$$S_{ti} = S_{(t-1)i} - \sum_{k \in K_{i+1}} C_{(i+1)k} \Delta t_{t(i+1)k}, \quad t \in T, i = 0. \quad (8)$$

原料
中间产品

$$S_{ti} = S_{(t-1)i} + \sum_{k \in K_i} G_{ik} \Delta t_{tik} - \sum_{k \in K_{i+1}} C_{(i+1)k} \Delta t_{t(i+1)k}, \\ t \in T, i \in I^P \setminus \{i^{\text{end}}\}. \quad (9)$$

最终产品

$$S_{ti} = S_{(t-1)i} + \sum_{k \in K_i} G_{ik} \Delta t_{tik}, \quad t \in T, i = i^{\text{end}}. \quad (10)$$



更紧凑的符号表示

$$R_{r,t} = R_{r,t-1} + \sum_i \sum_k g_{r,i,k} \Delta t_{tik} \quad \forall r, t$$

引入 $g_{r,i,k}$ 来表示任务*i*在工况点 *k* 上对资源 *r* 的消耗/产出速率（其中 >0 表示产出， <0 表示消耗）

cRTN核心技术约束

物料转化
(与LSTN一致)

$$R_{r,t} \leq R_{r,t-1} + \sum_i \sum_k g_{r,i,k} D_{i,k,t} \quad \forall r, t.$$

不可中断

$$D_{i,0,t} \leq 1 - u_{i,t} \quad \forall t$$

$$R_{r^{i+},t} \leq u_{i,t} \quad \forall t$$

批次处理

$$D_{i,1,t} = u_{i,t} \delta \quad \forall t$$

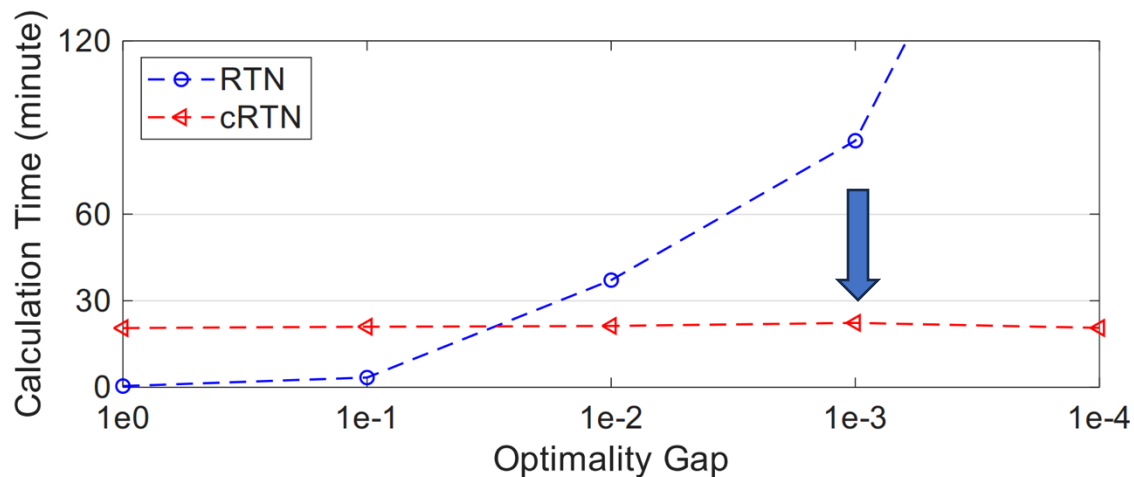
等待时间限制

$$R_{r^{i-},t} \leq u_{i,t} \quad \forall t$$

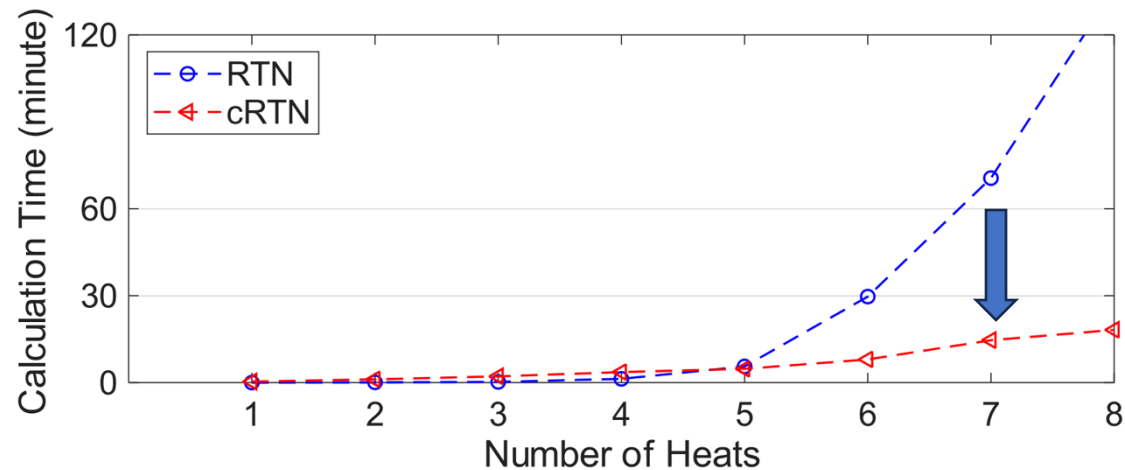


步骤2：约束重构-数值测试(二次炼钢自调度)

(1) 计算效率：相比RTN模型，基准设置下cRTN模型求解时间减少89%（从156.7分钟降至17.1分钟），且生产批次越多效果越明显。



生产调度求解时间随优化求解的Optimality Gap变化



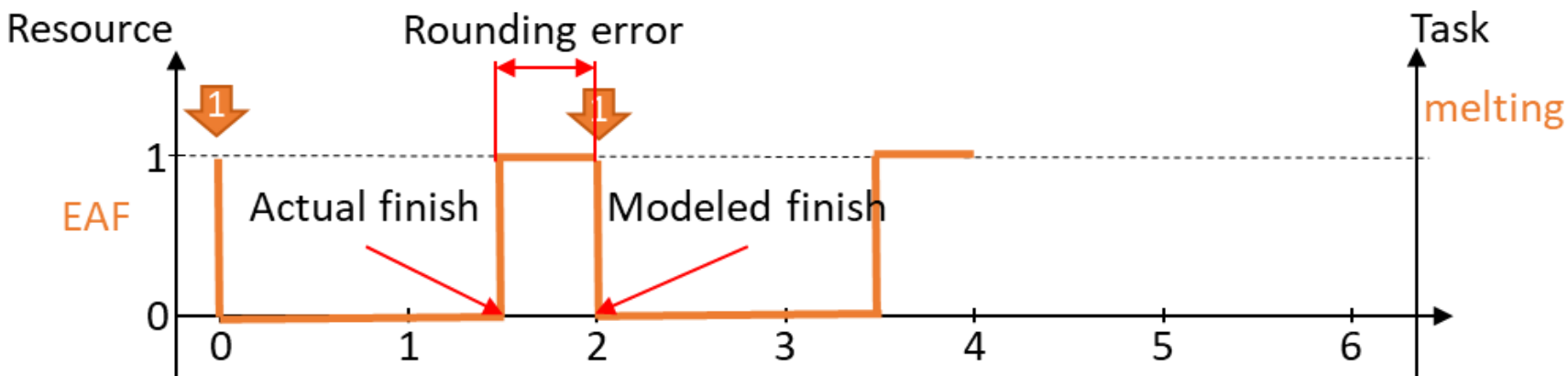
生产调度求解时间随生产目标（批次数）变化

- R. Lyu, X. Su, E. Du, H. Guo, Q. Chen and C. Kang. "Efficient Scheduling of Discrete Industrial Processes through Continuous Modeling", IEEE Transactions on Smart Grid, in press.



步骤2：约束重构-数值测试(二次炼钢自调度)

(2) 经济效益：连续变量的建模方式天然可以消除舍入误差*，cRTN将平均能耗成本降低7.4%，特定场景最大降幅达25%



*舍入误差(rounding error)示意。传统RTN 模型中，由于采用离散变量建模设备运行，一个资源（如电弧炉）在一个时间槽内只能被一个任务占用。因此，在时段 2 中，尽管第一批的生产可以在时段中点完成，但第二批的生产只能在下一个时段开始。



步骤2：约束重构-数值测试(二次炼钢自调度)

(3) 可扩展性：cRTN模型变量数稳定在4k个，而传统RTN模型变量数随生产批次增至20k个以上，导致求解复杂度指数增长

Model	Binary variables	Continuous variables
cRTN	4197	8233
RTN-5heats	11513	1262
RTN-6heats	13690	1516
RTN-7heats	15870	1772
RTN-8heats	18046	2025
RTN-9heats	20225	2280

基于传统RTN模型和cRTN模型的生产调度优化问题变量数量对比



结论

1、改进1993年提出的连续工业过程的模型任务状态网络(STN), 提出线性任务状态网络 (LSTN) 模型, 以不超过0.2%的误差完全消除0-1变量;

- R. Lyu, H. Guo, Y. Zheng, Y. Bai, and Q. Chen. "LSTN: a linear model of industrial production process for demand response." 2023 IEEE PES ISGT Europe.

2、系统性重构1994年提出的离散工业生产过程的模型资源任务网络(RTN), 提出连续RTN模型, 保持精度的同时大幅减少0-1变量, 基准求解时间-90%;

- R. Lyu, X. Su, E. Du, H. Guo, Q. Chen and C. Kang. "Efficient Scheduling of Discrete Industrial Processes through Continuous Modeling", IEEE Transactions on Smart Grid, in press.

3、首次实现了学界主流的两种工业过程模型——STN模型和RTN模型——的统一, 说明前者是后者的退化, 这种视角具有一定的理论价值。



清华大学
Tsinghua University

谢谢！

请批评指正！