

基于规则学习的炼钢-连铸钢包选配方法

刘 炜, 柴天佑
(东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对炼钢-连铸生产钢包选配时,钢包属性众多,且选配目标相互冲突难以同时满足的现状,通过一阶规则学习确定钢包温度最高、钢包使用次数最多、钢包材质等级最低和钢包下水口数量最小为性能指标,以钢包温度、使用次数、钢包材质、钢包水口使用次数、滑板和框架使用次数为约束,为每个炉次决策钢包,建立钢包选配模型.通过最小一般泛化法给出了钢包选配规则,提出了基于规则优先级的启发式钢包选配方法.实际数据仿真与实际应用结果表明,所提方法减少了在线钢包数量和日钢包维护次数,提升了炉次生产效率.

关 键 词: 炼钢-连铸;钢包选配;一阶规则学习;最小一般泛化;仿真
中图分类号: TP 18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)11-1521-06

Steelmaking Continuous Casting Ladle Matching Method Based on Rule-Learning

LIU Wei, CHAI Tian-you
(State Key Laboratory of Integrated Automation of Process Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Wei, E-mail: liuwei_cn@foxmail.com)

Abstract: In steelmaking-continuous casting ladle matching, the ladle properties are numerous and the targets are difficult to meet at the same time. The performance indicators are established by first-order rule-learning to maximize the ladle temperature and ladle use times, minimize the ladle material grade and nozzle number. The ladle temperature, life, material, nozzle, skateboard and frame use times are constraints. The selection rules of ladle are given by minimal generalization method. The method of heuristic ladle selection based on rule priority is proposed. The actual data simulation and applying results show that the proposed method can improve the production efficiency and the number of online ladle and ladle maintenance per day can be reduced.

Key words: steelmaking-continuous casting; ladle matching; first-order rule-learning; minimal generalization; simulation

现代炼钢厂包括炼钢、精炼、连铸三个生产阶段.钢包是炉次(一台转炉内冶炼的钢水)在炼钢-连铸生产过程中使用的承载容器,炉次选配的钢包影响到钢水成分和加工温度,进而影响到炉次在精炼设备上的加工时间;所以,钢包选配直接影响到最终产品的质量和计划的完成.

文献[1]提出了基于模型特征的三步启发式算法进行钢包调度.文献[2]研究炼钢厂多台连

铸机间钢包产生互用的条件及影响因素.文献[3]介绍了钢铁厂炼钢连铸工艺计算机化调度系统的模型.文献[4]建立了一个包含钢包调度的炼钢综合系统.文献[5]分析了钢包对炼钢调度的影响.这些钢包选配的研究对钢包的属性进行了简化,只能适用于简化的生产模式,没有对钢包选配复杂的属性加以考虑,选配钢包的优化程度不高,因此难以满足炼钢-连铸生产的需要.

文献[6]使用甘特图分析了钢包的周转规则,构建钢包的周转数控制模型.文献[7]研究了静态 BOF 终点控制模型,最大限度地减少炼钢期间钢包炉的使用.文献[8]提出一种基于生产计划和钢包待用时间解析的钢包调度现状评价方法.文献[9]考虑钢包的运行情况,并合理计算钢包数量.文献[10]结合钢水的可控加工时间,提出了一种分散搜索方法.这些研究主要关注钢包管理,重点关注钢包周转.

炼钢-连铸钢包选配是一个多目标冲突问题,现场采用人工方式选配钢包,优化程度不高.本文以上海某大型钢铁企业为背景,对炼钢-连铸钢包选配问题影响因子进行了分析,基于现场钢包选配数据使用一阶规则学习方法提取出优化目标,建立钢包选配模型.并基于规则学习中最小一般泛化方法提炼出钢包选配规则,提出了基于规则优先级的启发式钢包选配方法.

1 钢包选配影响因子分析

钢包保温层材质 M_1 决定钢包单位时间内的温降;钢包使用次数 L 越大,保温层性能下降越多;钢包初始温度 T_1 越高,钢水在连铸机浇注时的温度越高;外界温度 T_2 越高,钢包单位时间内的温降越小;钢包下水口的材质 M_2 导热性和数量 D 在一定程度上影响钢包的散热,进而影响钢水的温降;引流料材质 M_3 和引流剂材质影响钢包浇注的自动开浇率,自动开浇率高,钢水温降小;剩余钢水 R 也会影响到当前炉次的成分.

1) 钢水温降会影响到最终钢水的品质,则有

$$T_0 = F(M_1, L, T_1, T_2, M_2, M_3, d) . \quad (1)$$

其中: $F(\cdot)$ 为描述钢水温度 T_0 与其影响因素之间关系的未知非线性关系; d 为未知影响因素.

2) 钢包属性对钢水成分的影响见式(2):

$$C = F(M_1, L, T_1, R, D, M_2, M_3, d) . \quad (2)$$

其中, $F(\cdot)$ 为描述钢水成分 C 与其影响因素之间关系的未知非线性关系.

2 钢包选配模型

2.1 符号和参数定义

- k : 钢包序号;
- i : 浇次序号;
- j : 炉次序号;
- L_{ij} : 第 i 个浇次的第 j 个炉次;

- $T(k)$: 浇次 i 第 j 个炉次选配钢包 k 温度;
- L_{\min} : 选配钢包最低使用次数要求;
- L_{\max} : 选配钢包最高使用次数要求;
- M_{\min} : 炉次选配钢包的最低材质要求;
- M_{\max} : 次选配钢包的最高材质要求;
- $D(k)$: 钢包 k 的下水口数量;
- D_{\min} : 炉次选配钢包的最低下水口数量要求;
- D_{\max} : 炉次选配钢包的最高下水口数量要求;
- $U(k)$: 钢包 k 的钢包上使用次数;
- U_{\min} : 炉次对钢包最低上水口使用次数要求;
- U_{\max} : 炉次对钢包最高上水口使用次数要求;
- SK_{ab} : 钢种第 a 位到第 b 位的值;
- Ω : 可用钢包集合.

2.2 钢包选配决策变量

钢包选配需要在满足炉次工艺要求的基础上,尽可能地选配属性更优的钢包.即

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{如果炉次 } L_{ij} \text{ 选择了钢包 } k; \\ 0, & \text{如果炉次 } L_{ij} \text{ 未选择钢包 } k. \end{cases} \quad (3)$$

2.3 钢包选配优化目标的选取

使用一阶规则学习对训练集进行学习,钢包选配的属性集 $A = \{a_1, a_2, \cdots, a_{28}\}$,如表 1 所示.

表 1 钢包选配属性定义表 Table 1 Definition of ladle matching properties		
属性	符号	变量说明
钢种	SK	炉次的工艺编号
钢包大包规制	R_m	钢包大包规制第 m 位;
钢包状态	S_m^k	钢包 k 状态第 m 位;
包底冷钢量	$R(k)$	钢包 k 剩余的钢水量
钢包材质	$M(k)$	钢包 k 的材质
使用次数	$L(k)$	钢包 k 的使用次数
上水口使用次数(东)	U_e^k	钢包 k 东上水口使用次数
上水口使用次数(西)	U_w^k	钢包 k 西上水口使用次数
滑板使用次数(东)	S_e^k	钢包 k 东滑板使用次数
滑板使用次数(西)	S_w^k	钢包 k 西滑板使用次数
引流料(东)	M_e^k	钢包 k 引流料(东)的材质
引流料(西)	M_w^k	钢包 k 引流料(西)的材质
框架使用次数(东)	F_e^k	钢包 k 框架(东)使用次数
框架使用次数(西)	F_w^k	钢包 k 框架(西)使用次数
空包重	$m_E(k)$	钢包 k 空包的质量

选取典型数据和随机数据建立钢包选配的训练集 B ,其中典型数据和随机数据比例为 1:3,如表 2 所示,并对数据进行转换,建立关系数据表,如表 3 所示.

表 2 钢包选配数据集
Table 2 Data set of ladle matching

编号	钢种	精炼路径	$\frac{\text{温度}}{\text{K}}$	使用次数	下水口数	$\frac{\text{冷钢量}}{\text{t}}$...	引流料材质 (西)	$\frac{\text{空包重}}{\text{t}}$	可用
1	AK202204	R	>1 341	>10	2	0.5	...	镁橄榄石	136	是
2	AP1055E5	R	>1 457	>149	1	1.0	...	锆	145	否

3 钢包选配关系数据表
Table 3 Data relationship of ladle matching

背景知识	钢包温度更高(1,2)	钢包材质更高(1,2)	...
	钢包温度更高(2,1)	钢包材质更高(1,2)	...

样例	更好(1,2)	更好(1,3)	...
	¬ 更好(2,1)	¬ 更好(3,1)	...

由样本类比转化而来关于“更好”“¬ 更好”的原子公式称为关系数据样例. 采用 FOIL (first – order inductive learner) 进行规则学习, 最初的空规则为

$$\text{更好}(X,Y) \leftarrow$$

使用“FOIL 增益”选择文字:

$$F_Gain = \hat{m}_+ \times \left(\text{lb} \frac{\hat{m}_+}{\hat{m}_+ + \hat{m}_-} - \text{lb} \frac{m_+}{m_+ + m_-} \right).$$

(5)

其中: \hat{m}_+ 和 \hat{m}_- 为增加候选文字后新规则所覆盖的正、反例数; m_+ 和 m_- 为原规则所覆盖的正、反例数. 得到钢包优化目标: 尽可能选配温度高的钢包, 尽可能选择使用次数高的钢包, 优先选择低材质的钢包, 优先选择单下水口的钢包, 即

$$\max \{ T(k), L(k) \}, \min \{ M(k), D(k) \} .$$

(6)

2.4 钢包选配约束条件

钢包温度要在工艺要求的温度范围之内, 钢包使用次数要在工艺要求的范围之内, 钢包材质要满足炉次工艺要求, 满足炉次工艺对钢包下水口数量的要求, 保证上水口在炉次工艺规定的范围之内, 钢包滑板使用次数要在规定的范围之内, 钢包引流料的材质要满足工艺规定, 钢包框架使用次数满足工艺要求:

$$\left. \begin{aligned} T_{\min} &\leq T(k) \leq T_{\max}, L_{\min} \leq L(k) \leq L_{\max}, \\ M_{\min} &\leq M(k) \leq M_{\max}, D_{\min} \leq D(k) \leq D_{\max}, \\ U_{\min}^{ij} &\leq U(k) \leq U_{\max}^{ij}, S_e^k \leq S_{\max}, S_w^k \leq S_{\max}, \\ M_e^k &= M_{ij}^k, M_w^k = M_{ij}^k, F_e^k \leq F_{\max}, F_w^k \leq F_{\max}. \end{aligned} \right\}$$

(7)

2.5 钢包选配模型建立

根据上述分析, 建立钢包选配模型(DM):
Object: 式(6) , (8)
s. t. 式(7) . (9)

决策变量为 x_{ij}^k .

3 基于规则学习的钢包选配方法

本文采用最小一般泛化方法从训练数据中学习出一组能用于对未见示例进行判别的规则.

3.1 钢包选配顺序

- 1) 按照转炉完工时间从早到晚进行选配 (Seq1),
- 2) 按照转炉完工时间从晚到早进行选配 (Seq2).

3.2 钢包选配规则提取

本文采用 RLGG (relative least general generalization)^[11] 选择方法从训练数据中学习规则. 得到的规则如下.

规则 1 钢种是钢帘线(钢以 KK 或 XK 开头), 选择包龄小于 50, 上水口使用次数大于等于 2 且小于 10 的钢包.

$$\text{IF } SK_{1,2} = KK \text{ or } SK_{1,2} = XK,$$

$$\text{THEN } L(k) < 50 \text{ and } 2 \leq U_e^k / U_w^k < 10 .$$

(10)

规则 2 炉次含有 LF 精炼.

$$\text{IF } j \text{ in LF THEN,}$$

$$U_e^k \leq 15 \text{ and } U_w^k \leq 15 \text{ and } L(k) < 100 .$$

(11)

规则 3 连铸第一炉不能使用新包.

$$\text{IF } j = 1 \text{ THEN } L_{i1}(k) \neq 0 .$$

(12)

规则 4 钢包材质规定.

$$\text{IF } R_3 \neq 0 \text{ THEN } R_3 = S_3^k. \tag{16}$$

$$M(k) \geq R_1. \tag{13}$$

规则 5 钢种对新包或冷包的限制.

$$\text{IF } R_2 = 1 \text{ THEN } L(k) \neq 0. \tag{14}$$

$R_2 \geq 2$ 禁用新包和冷包,选取钢包状态与大包规制编码第二位相同的钢包.

$$\text{IF } R_2 \geq 2 \text{ THEN } L(k) \neq 0 \text{ and } R_2 = S_2^k. \tag{15}$$

规则 6 钢包上一炉的限制.

表 4 钢包选配规则优先级

Table 4 Decoupling of the decarbonization ladle

序号	优先级 1	优先级 2	优先级 3	优先级 4	优先级 5	选配优先级
1	材质最低	水口最少	温度最高	使用次数最多	随机选择	A_{g1}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
24	使用次数最多	温度最高	水口最少	材质最低	随机选择	A_{g24}

炉次选配钢包算法描述如下:

步骤 1 建立所有钢包组成的钢包集合 Ω , 初始化钢包状态 S (表 1 所示的钢包参数), 建立需要匹配钢包的炉次集合 Φ . 通过主设备生产调度计划获取所有需要选配钢包的炉次按照转炉完工时间排序, 得炉次集合 $\Phi = \{L_1, L_2, \cdots, L_N\}$, 初始 $n = 1$;

步骤 2 更新所有钢包状态 S ;

步骤 3 对炉次 $L_n (n = 1, 2, \cdots, N)$, 根据式 (7), 从所有钢包中剔除不符合要求的钢包, 更新可用钢包集合 Ω ;

步骤 4 根据式 (10) ~ 式 (16), 在 Ω 中剔除不符合要求的钢包;

步骤 5 如果 $|\Omega| > 1$, 基于规则优先级方法 RP 选配最合适的钢包, 即确定 x_{ij}^k ; 如果 $n = N$ 转步骤 6, 否则, $n = n + 1$, 转步骤 2;

步骤 6 结束.

4 仿真实验

4.1 仿真实验设计

根据钢包选配排序和选配优先级进行组合, 得到多种启发式钢包选配方法, 如表 5 所示. 本文评价方案采用模糊综合评价 - 加权平均复合模型的方案^[12]. 确定评价因素集, 如图 2 所示.

仿真参数描述如下:

1) 炉次数规模 C_1 : 表示需要选配钢包的炉次数量. $C_1 = 1$ 表示小规模炉次; $C_1 = 2$ 表示中等规模炉次; $C_1 = 3$ 表示大规模炉次.

2) 钢包初始参数 C_2 : 初始参数生成方式. $C_2 = 1$ 表示如表 1 所示每一个钢包属性, 随机选

3.3 钢包选配启发式算法

根据规则 1 ~ 6, 在可用钢包集合 Ω 中去除不符合的钢包, 最终钢包数可能不唯一, 使用基于规则优先级的钢包选配规则(RP)选配钢包. 建立的基于规则优先级的钢包选配方法, 优先级组合如表 4 所示.

择工艺允许的上限值或下限值; $C_2 = 2$ 表示在工艺允许的上限值或下限值 $\pm 10\%$ 范围内随机取值; $C_2 = 3$ 表示在工艺允许的上限值或下限值 $\pm 10\%$ 范围内服从正态分布.

表 5 钢包选配规则优先级

Table 5 Decoupling of the decarbonization ladle

序号	排序	优先级	选配方法
1	Seq1	A_{g1}	H_1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
24	Seq1	A_{g24}	H_{24}
25	Seq2	A_{g1}	H_{25}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
48	Seq2	A_{g24}	H_{48}

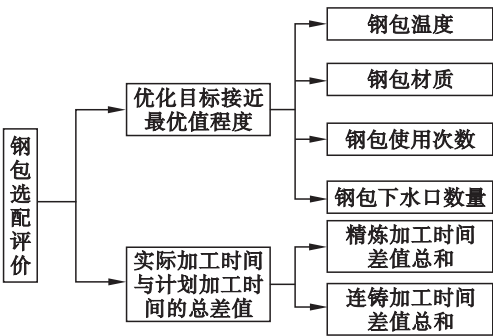


图 2 综合评价体系

Fig. 2 Comprehensive evaluation system

3) 钢包周转规模 C_3 : 表示现场周转的钢包数量. $C_3 = 1$ 表示小规模; $C_3 = 2$ 表示中等规模; $C_3 = 3$ 表示大规模.

4.2 仿真实验结果

每类问题选取 3 组数据进行测试, 评价结果取平均值后如表 6 所示.

表 6 启发式方法评价
Table 6 Evaluation values of heuristic method

序号	C_1	C_2	C_3	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8	...	H_{15}	H_{16}	H_{17}	H_{18}	H_{19}	H_{20}	H_{21}	H_{22}	H_{23}	H_{24}
1	1	1	1	0.66	0.55	0.59	0.58	0.54	0.60	0.62	0.61	...	0.53	0.56	0.63	0.55	0.53	0.53	0.55	0.56	0.62	0.60
2	1	1	2	0.82	0.77	0.70	0.73	0.69	0.80	0.79	0.78	...	0.74	0.72	0.73	0.70	0.70	0.69	0.72	0.73	0.76	0.72
3	1	1	3	0.84	0.73	0.77	0.81	0.74	0.72	0.78	0.74	...	0.79	0.75	0.82	0.74	0.76	0.80	0.76	0.82	0.76	0.82
4	1	2	1	0.68	0.63	0.61	0.54	0.55	0.63	0.57	0.55	...	0.59	0.55	0.56	0.61	0.61	0.64	0.53	0.53	0.61	0.63
5	1	2	2	0.81	0.79	0.70	0.81	0.81	0.80	0.80	0.77	...	0.71	0.77	0.76	0.78	0.74	0.80	0.79	0.80	0.81	0.80
6	1	2	3	0.87	0.75	0.77	0.80	0.75	0.78	0.82	0.81	...	0.75	0.74	0.82	0.73	0.73	0.81	0.72	0.72	0.81	0.81
7	1	3	1	0.72	0.59	0.63	0.62	0.66	0.69	0.60	0.66	...	0.63	0.61	0.67	0.61	0.63	0.66	0.69	0.66	0.68	0.61
8	1	3	2	0.87	0.78	0.87	0.83	0.84	0.78	0.86	0.84	...	0.77	0.78	0.84	0.76	0.83	0.84	0.78	0.83	0.85	0.84
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27	3	3	3	0.77	0.69	0.74	0.72	0.67	0.74	0.65	0.66	...	0.71	0.72	0.76	0.72	0.73	0.67	0.68	0.76	0.73	0.71

可知方法 H_1 性能更好,在大多数情况下比其他方法优越.随着炉次规模 C_1 的增大,各种启发式方法的性能逐渐下降,这是因为随着炉次规模的增加,钢包性能不断下降,符合炉次要求的钢包数量也在减少.钢包初始参数 $C_2=3$ 时,启发式方法的性能要稍好一些,这是因为存在更多性能较好的钢包.随着现场钢包周转数量的增大,启发式方法的性能逐渐提高,这是因为炉次有更多的钢包可以选择,但是 $C_3=2$ 与 $C_3=3$ 差别不大,因为钢包的制造和运行维护成本非常高,更少的钢包周转数量可以节省更多的成本,建议使用中等规模的周转钢包数量.

5 工业应用

将研制的炼钢－连铸钢包选配方法应用于某大型钢铁企业,与人工钢包调度相比,炼钢－连铸钢包调度软件采用本文所提算法编制钢包调度计划平均时间为 3.4 s,远小于人工的平均编制时间 30 s,在线钢包数量由 23 个减少为 19 个,日钢包维护次数由 17 次减少为 12 次.与采用人工编制相比,炉次的时间命中率(炉次严格按照计划时间点开始加工的比例)由 61% 提升到 65%.能够使钢包周转更加流畅,提高了企业的经济效益.

6 结 语

本文基于规则优先级启发式的钢包选配方法满足工艺对钢包的要求,减少空包烘烤时间.以上海某炼钢厂为背景,对炼钢－连铸生产的钢包调度方法进行了深入研究,给出了一种钢包选配方

法,并将该方法应用到炼钢厂的生产调度中,工业实验测试结果显示收到了良好的效果,对计划人员编制与调整计划具有很好的指导价值,能够使管理人员和工作人员及时了解生产的执行情况.相对以前现场调度人员的人工编制,可以大大提高工作效率.

参考文献:

[1] Wei Z,Zhu T,He T,et al. A fast heuristic algorithm for ladle scheduling based on vehicle routing problem with time windows model [J]. *ISIJ International*, 2014, 54 (11) : 2588 – 2597.

[2] 黄帮福,田乃媛,施哲,等. 钢包互用条件及影响因素[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2017,40(2) :52 – 59.
(Huang Bang-fu, Tian Nai-yuan, Shi Zhe, et al. Ladle interaction conditions and influencing factors[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science)*, 2017, 40 (2) : 52 – 59.)

[3] Sun L,Wang X. Application of mix optimization scheduling approach for steelmaking-continuous casting process based on actual steelmaking industry [J]. *Journal of Iron and Steel Research,International*,2013,20(10) :1 – 9.

[4] Fanti M P,Rotunno G,Stecco G,et al. An integrated system for production scheduling in steelmaking and casting plants [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*,2016,13(2) :1112 – 1128.

[5] Zhang T,Rose O. Scheduling in a flexible job shop with continuous operations at the last stage [J]. *Journal of Simulation*, 2016,10(2) :80 – 88.

[6] Huang B F, Shi Z, Zhang G F, et al. Saving ladle control model of steel ladle in steelworks[J]. *Advanced Materials Research*,2014(1015) :700 – 707.

[7] Shukla I,Rajesh G,Agarwal P,et al. Lean operations strategy to combat uncertainties in temperature at BOF end point, tapping, deoxidation, alloy addition and thermal history[M]. Belin:Springer International Publishing, 2014 :333 – 339.