

CC-DR 和 CC-DHCR 的生产物流模型⁺

李苏剑* 吴清一*

摘要: 运用大系统建模方法, 从连铸-连轧生产物流过程的工艺要求出发, 建立了连铸-轧制、炼钢-连铸和炼钢-连铸-轧制生产物流数学模型, 以此为基础提出了二步制订最佳生产物流计划的方法。

关键词: 连铸, 数学模型 / 连轧, 物流系统, 连铸-连轧

中图分类号: TG 335.13, TF 777.1

On Mathematical Models of Logistics System in CC-DR and CC-DHCR⁺

Li Sujian* Wu Qingyi*

ABSTRACT: Using modelling method of large scale system, and bounding up with the technological requirements in CC-CR, the mathematical models of logistics system in CC-DR and CC-DHCR are built, which include the models in steelmaking-casting, casting-rolling and steelmaking-casting-rolling. Based on them, two-stage optimization method for production plan is discussed.

KEY WORDS: continuous casting, mathematical model / continuous rolling, logistics system, CC-CR

我国钢铁工业工艺技术水平、生产管理水平的不断提高, 使实现高水平的连铸-连轧联接生产方式成为可能。生产物流管理技术作为其主要的技术保证^[1], 已受到高度重视。本文研究了连铸-直接轧制(CC-DR)和连铸-直接装炉轧制(CC-DHCR)生产物流数学模型, 并提出了最佳生产物流计划制订方法。

1 生产物流数学模型的建立

1.1 连铸-轧制数学模型

设有一组用户定货合同, 该组合同中, 包含有 j_0 种不同宽度的轧制产品。

1993-06-12 收稿 第一作者: 男, 34岁, 博士研究生

+ 八五科技攻关项目

* 机械工程系 (Department of Mechanical Engineering)

对于 $j \in \{1, 2, \dots, j_0\}$, 有宽度为 $B(j)$, 重量为 $W_0(j)$ 的产品要进行轧制。为了计算上的方便, 这里不考虑连铸坯到最终轧制产品的成材率, 以及钢水到连铸坯的成坯率, 这两个系数可在下达生产物流计划时进行综合考虑。

由于轧辊的磨损, 在轧制产品长度达到 A_0 后, 要进行换辊, 进入下一个轧制计划单元^[2]。因此对于一组用户合同的轧制计划单元数, 可用下式确定:

$$I_0 = \sum_{j=1}^{j_0} \frac{W_0(j)}{B_0(j) \cdot D_0(j) \cdot G_0 \cdot A_0} \tag{1}$$

式中: I_0 ——轧制计划单元数; $B_0(j)$ ——轧制产品 j 的宽度;
 G_0 ——轧制产品比重; A_0 ——轧制计划单元中的最大计算公里数;
 $D_0(j)$ ——轧制产品 j 的厚度; $W_0(j)$ ——轧制产品 j 的重量。

A_0 是经验系数, 其值与轧辊磨损速率以及所轧产品的钢质、表面质量和轧制计划单元类型有关。为了使轧辊辊型按照预想的要求磨损, 并能够获得轧制产品长度为 A_0 的合格产品, 轧制计划单元必须符合编制规程。图 1 是一个轧制计划单元中的宽度与长度变化示意图。

在图 1 中, B_0 表示一个轧制计划单元中所轧产品的最大宽度 (注意: B_0 不一定等于 $B(j_0)$), B_A 表示该轧制计划单元中开始轧制的产品宽度, 一般取 $B_A = 60\% \sim 80\% B_0$ 。从 B_A 到 B_0 , 产品的宽度不断增加。之后产品的宽度逐渐减小, B_E 表示该计划单元中最终轧制产品的宽度。相邻两种产品宽度变化不得超过 ΔB_{max} , 同一宽度的轧制长度不得超过 ΔA_{max} 。从 B_A 到 B_0 时, 相应轧制产品长度应在 A_1 与 A_2 之间。

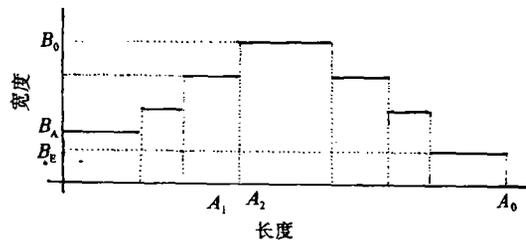


图 1 轧制计划单元中的产品宽度与长度变化示意图
 Fig. 1 Schematic diagram of changing of product width and length in a rolling plan unit

根据上面的讨论, 可得约束模型如下:

$$\sum_{n=1}^{n_0} \sum_{i=1}^{I_0} \sum_{k=1}^2 W_{ijk}^{(n)} = W_0(j) \tag{2}$$

$$j \in \{1, 2, \dots, j_0\}$$

式中: $W_{ijk}^{(n)}$ ——为第 i 个轧制计划单元的第 k 部分、轧制产品的宽度为 $B(j)$ 、连铸坯由第 n 台连铸机提供的连铸坯质量;

$k=1$ 一个轧制计划单元中 B_A 到 B_0 部分;

$k=2$ 一个轧制计划单元中 B_0 到 B_E 部分;

n_0 ——一个轧制计划单元中, 并列工作的连铸机数。

$$\sum_{n=1}^{n_0} \sum_{j=1}^{j_0} \sum_{k=1}^2 W_{ijk}^{(n)} / (B_{ijk}^{(n)} \cdot D_{ijk}^{(n)} \cdot G_0) \leq A_0 \tag{3}$$

$$i \in \{1, 2, \dots, I_0\}$$

式中: $B_{ijk}^{(n)}$ —— 对应于 $W_{ijk}^{(n)}$ 的轧制产品宽度;

$D_{ijk}^{(n)}$ —— 对应于 $W_{ijk}^{(n)}$ 的轧制产品厚度。

$$A_1 \leq \sum_{n=1}^{n_0} \sum_{j=1}^{j_0} W_{ijl}^{(n)} / (B_{ijl}^{(n)} \cdot D_{ijl}^{(n)} \cdot G_0) \leq A_2 \tag{4}$$

$$i \in \{1, 2, \dots, I_0\}$$

对于一个轧制计划单元, 不一定包含全部轧制产品, 用以下两式表示这种情况:

$$m_i = \min \{ P / W_{ip1}^{(n)} > 0 \} \tag{5}$$

$$M_i = \max \{ P / W_{ip2}^{(n)} > 0 \} \tag{6}$$

$$i \in \{1, 2, \dots, I_0\}; \quad n \in \{1, 2, \dots, n_0\}$$

式中: m_i —— 对应于第 i 个轧制计划单元 $k=1$ 部分的最小宽度数;

M_i —— 对应于第 i 个轧制计划单元 $k=2$ 部分的最大宽度数;

因此, 对于一个轧制计划单元, 由定义可知: $m_i < M_i$, m_i 和 M_i 决定了 B_A 与 B_0 , 所以有下面各式:

$$0.6 \max(B_{M_i}) \leq \min(B_{m_i}) \leq 0.8 \max(B_{M_i}) \tag{7}$$

$$i \in \{1, 2, \dots, I_0\}$$

$$W_{ij1}^{(n)} = 0 \quad j \in \{1, 2, \dots, m_i - 1\} \tag{8}$$

$$W_{ij1}^{(n)} = 0 \quad j \in \{M_i, \dots, j_0\} \tag{9}$$

$$W_{ij2}^{(n)} = 0 \quad j \in \{M_i + 1, \dots, j_0\} \tag{10}$$

$$n \in \{1, 2, \dots, n_0\}$$

仅从一个个独立的轧制计划单元看, 开始轧制产品宽度与最终轧制产品宽度似乎没有什么关系, 但从动态角度看, 一个轧制计划单元接着一个轧制计划单元连续进行 (由于换辊时间很短, 这里忽略不计)。连铸机在线调宽速率一般都很小, 如果前一个轧制单元的最后连铸坯宽度与后一个轧制计划单元的开始连铸坯宽度不同, 连铸机很难适应这种变化。因此, 设前一个轧制计划单元的最后连铸坯宽度等于下一个轧制计划单元的开始连铸坯宽度。所以有:

$$W_{ij2}^{(n)} = 0 \quad j \in \{1, 2, \dots, m_i^{(n)} - 1\} \tag{11}$$

基于同样的道理, 对于 $W_{ijk}^{(n)} > 0$, 必有:

$$\frac{W_{ijk}^{(n)}}{B_{ijk}^{(n)} \cdot CD \cdot G_{0i}} \geq \begin{cases} \frac{\Delta B_{\max}}{\alpha} \cdot V_j & \text{单流浇注} \\ \frac{\Delta B_{\max}}{\alpha} \cdot V_j \cdot m & \text{多流浇注} \end{cases} \tag{12}$$

式中: CD —— 连铸坯的厚度;

G_{0i} —— 连铸坯的比重;

ΔB_{\max} —— 连铸坯宽度变化最大值;

α —— 连铸机在线调宽速率;

m —— 浇注 $W_{ijk}^{(n)}$ 的连铸机流数;

V_j ——连铸机铸坯速率。

$$B_{ij+1,1} - B_{ij,1} \leq \Delta B_{\max} \quad j \in \{1, 2, \dots, m_i^{(n)} - 1\} \quad (13)$$

$$B_{ij,2} - B_{i,j-1,2} \leq \Delta B_{\max} \quad j \in \{m_i^{(n)}, \dots, M_i^{(n)}\} \quad (14)$$

$$\frac{W_{ijk}^{(n)}}{B_{ij,1}^{(n)} \cdot D_{ij,1}^{(n)} \cdot G_{01}} \leq \Delta A_{1\max} \quad j \in \{1, 2, \dots, m_i^{(n)} - 1\} \quad (15)$$

$$\frac{W_{ij,2}^{(n)}}{B_{ij,2}^{(n)} \cdot D_{ij,2}^{(n)} \cdot G_{01}} \leq \Delta A_{2\max} \quad j \in \{m_i^{(n)}, \dots, M_i^{(n)}\} \quad (16)$$

式中: $\Delta A_{1\max}$ —— $k=1$ 时, 同一宽度的轧制产品的最大长度值;

$\Delta A_{2\max}$ —— $k=2$ 时, 同一宽度的轧制产品的最大长度值;

$\Delta B_{1\max}$ —— $k=1$ 时, 相邻两种轧制产品宽度差的最大值;

$\Delta B_{2\max}$ —— $k=2$ 时, 相邻两种轧制产品宽度差的最大值。

1.2 炼钢-连铸数学模型

设: (1) 从炼钢厂来的钢水包以固定的时间间隔到达;

(2) 一个钢水包的钢水全部倒入一台连铸机的中间包, 即一包钢水只能用来供应一台连铸机。

基于上面 2 条假设, 根据物流量相等原则, 可以得到:

$$\sum_{n=1}^{n_0} \sum_{i=1}^{I_0} \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{j_0} W_{ijk}^{(n)} = G \cdot H \quad (17)$$

式中: H ——对应一组轧制计划单元的钢水包数量;

G ——每个钢水包的钢水重量。

一般 $H_n = \frac{H}{n_0}$, 即 $\sum_{n=1}^{n_0} H_n = H$, 因此有:

$$\sum_{i=1}^{I_0} \sum_{j=1}^{j_0} \sum_{k=1}^2 W_{ijk}^{(n)} = G H_n \quad n \in \{1, 2, \dots, n_0\} \quad (18)$$

上两式是否成立, 应在下达一组轧制计划单元时给予保证。

由前两式可知, 对于每组轧制计划单元, 将分配给每台连铸机一定数量的钢水包数, 以维持连铸机的正常工作条件, 形成连续的连铸坯流。但每个钢水包到达对应的连铸机工作地点后, 其等待倒入连铸机中间包的最长时间将有一定的限制, 否则因温度降低过多, 造成连铸坯质量不合格或其他事故。因此有:

$$t_h^{(n)} \leq t_{\max} \quad n \in \{1, 2, \dots, n_0\}, \quad h \in \{1, 2, \dots, H_n\} \quad (19)$$

式中: $t_h^{(n)}$ ——第 n 台连铸机第 h 个钢水包的等待时间;

t_{\max} ——钢水包最长等待时间。

如果把一组轧制计划单元开始时的状态取为零, 则有:

$$t_b^{(n)} = \max((n-1)T_j, T_b^{(n)}) \quad n \in \{1, 2, \dots, n_n\} \quad (20)$$

式中: $t_b^{(n)}$ —— 第 n 台连铸机开始工作时刻。

T_f —— 钢水包到达时间间隔;

$T_b^{(n)}$ —— 第 n 台连铸机可以开始工作时刻。

从此式可得到每台连铸机的工作开始时刻:

$$t_b^n \geq (n-1) T_f \quad n \in \{1, 2, \dots, n_0\} \quad (21)$$

$$\tau_{ijk}^{(n)} = \tau_{ijk}^{(n)} (W_{ijk}^{(n)}, B(j), CD, V_j) \quad (22)$$

式中: $\tau_{ijk}^{(n)}$ —— 第 n 台连铸机完成 $W_{ijk}^{(n)}$ 重量的连铸坯时间;

一般来说, $\tau_{ijk}^{(n)}$ 是 $W_{ijk}^{(n)}, B(j), CD, V_j$ 的函数。

$$T_{(h)}^{(n)} = T_{(h)}^{(n)} (W_{ijk}^{(n)}, t_b^{(n)}, \bar{V}_j) \quad h \in \{1, 2, \dots, H_{n_0}\} \quad (23)$$

式中: $T_{(h)}^{(n)}$ —— 第 h 个钢水包开始连铸时刻;

\bar{V}_j —— 平均连铸速率。

一般来说, $T_{(h)}^{(n)}$ 是 $W_{ijk}^{(n)}, t_b^{(n)}, \bar{V}_j$ 的函数

对于一组轧制计划单元, 下标 (i, j, k) 将按下列顺序变化:

$(i, j, k) = (1, 1, 1), (1, 2, 1), \dots, (1, j_0 - 1, 1), (1, j_0, 2), (1, j_0 - 1, 2), \dots, (1, 1, 2), (2, 1, 1), \dots, (I_0, 1, 2)$, 共有 $I_0 (2j_0 - 1)$ 次变化。

为了使下式易于表达, 采用一个下标 v 代替 (i, j, k) , 因此有:

$$t_v^{(n)} = t_{v-1}^{(n)} + \tau_{v-1}^{(n)}$$

$$v \in \{1, 2, \dots, I_0 (2j_0 - 1)\}; \quad n \in \{1, 2, \dots, n_0\} \quad (24)$$

式中: $t_v^{(n)}$ —— 第 v 组重量的板坯开始连铸时刻;

$t_{v-1}^{(n)}$ —— 第 $v-1$ 组重量的板坯开始连铸时刻;

$\tau_{v-1}^{(n)}$ —— 第 $v-1$ 组重量的板坯连铸用时间。

从 v 的定义可以看出, 它遍及整个 $j \in \{1, 2, \dots, j_0\}$ 取值情况, 而对于某个轧制计划单元, 有可能 $W_{ijk}^{(n)} = 0$, 这时 $\tau_v = 0$, 因此, $t_v^{(n)} = t_{v-1}^{(n)}$ 。

对于多流连铸, 必须满足下列条件, 否则会发生流之间的相互干涉。

$$Dt_v^{(n)} = \min (t_{v1}^{(n)}, t_{v2}^{(n)}, \dots, t_{v_{mo}}^{(n)}) \quad (25)$$

式中: $t_{v1}^{(n)}, t_{v2}^{(n)}, \dots, t_{v_{mo}}^{(n)}$ —— 第 v 组重量的连铸坯在各流的开始连铸时刻;

$Dt_v^{(n)}$ —— 第 v 组重量的连铸坯的计算开始连铸时刻。

$$D\tau_v^{(n)} = \max (\tau_{v1}^{(n)}, \tau_{v2}^{(n)}, \dots, \tau_{v_{mo}}^{(n)}) \quad (26)$$

式中: $\tau_{v1}^{(n)}, \tau_{v2}^{(n)}, \dots, \tau_{v_{mo}}^{(n)}$ —— 第 v 组重量的连铸坯在各流的连铸用的时间;

$D\tau_v^{(n)}$ —— 第 v 组重量的连铸坯的计算连铸用时间。

$$Dt_v^{(n)} = Dt_{v-1}^{(n)} + D\tau_{v-1}^{(n)} \quad (27)$$

$$Dt_{vz}^{(n)} \geq Dt_{v-1,z}^{(n)} \quad (28)$$

$$z \in \{1, 2, \dots, m_0\}; \quad n \in \{1, 2, \dots, n_0\}$$

1.3 炼钢-连铸-轧制数学模型

就炼钢-连铸-轧制生产设备配置而言,一般只设有一套热连轧机组,因此进入热连轧机组的连铸坯必须符合轧制计划单元的编制规程要求,即顺序连铸出不同宽度的连铸坯。当然在实际生产中,可以依靠生产线中的某个环节进行缓冲,解决连铸坯的规格差异问题,但这种缓冲不可能持续较长的时间。因此,在下列模型中,不考虑铸坯规格的缓冲问题。有:

$$t_r^{(n)} + \tau_v^{(n)} \leq \min \{ f_p(t_{vc}^{(p)}) + T_s, f_p(t_{vc}^{(p)}) + f_p(\tau_{vc}^{(p)}) \} \quad (29)$$

$$t_{vc}^{(p)} = \min \{ t_{v1}^{(p)}, t_{v2}^{(p)}, \dots, t_{v,zv}^{(p)} \} \quad (30)$$

$$\tau_{vc}^{(p)} = \sum_{i=1}^{zv} \tau_{vi}^{(p)} \quad (31)$$

式中: $t_{vc}^{(p)}$ ——热轧机组开始轧制第 v 组板坯时刻;

$\tau_{vc}^{(p)}$ ——热轧机组轧制第 v 组板坯时间;

zv ——第 v 组板坯的板坯块数;

$t_{v1}^{(p)}, t_{v2}^{(p)}, \dots, t_{v,zv}^{(p)}$ ——第 v 组板坯各板坯块的开始轧制时刻;

$t_{v1}^{(p)}, \tau_{v2}^{(p)}, \dots, \tau_{v,zv}^{(p)}$ ——第 v 组板坯各板坯块的轧制时间;

T_s ——轧制计划中最重板坯组连铸时间

$$T_f(h-1) \leq T(h) \leq T_f(h-1) + t_{\max} \quad h \in \{1, 2, \dots, H\} \quad (32)$$

$$T(h) = T(h) (T_{(h)}^{(1)}, T_{(h)}^{(2)}, \dots, T_{(h)}^{(n_0)}) \quad (33)$$

式中: $T(h)$ ——第 h 个钢水包的连铸时刻。

2 应用举例

以上述模型为基础,可分 2 步制订生产物流计划。首先求出满足轧制计划单元编制规程要求的可行解;再应用复合型离散变量优化方法^[3]和分解优化设计原理进行连铸机的最优流设计。表 1 为一组要制订生产物流计划的用户合同品种及数量,CC-DR 或 CC-DHCR 生产线中配有 2 台双流连铸机,钢水包以 30 min 间隔到达。表 2 是这组用户合同的流设计结果,其中 Y_0 是第一步计算的符合轧制计划单元编制规程要求的可行解。

3 结论

本文研究了 CC-DR 和 CC-DHCR 生产物流数学模型,给出了应用实例。以这些模型为基础,也可进行其它方面的物流管理与控制问题研究。

表 1 用户合同品种及数量

Table 1 Product kinds and weights in customer's contracts

宽度值	产品宽度 m	产品厚度 mm	产品重量 t	连铸坯宽度 m
I	1.1	2.5	900	1.1
II	1.2	2.5	900	1.2
III	1.3	2.5	600	1.3
IV	1.4	2.5	600	1.4

表 2 连铸机各流连铸量及连铸量累加

Table 2 Strand casting weight and accumulated weight of caster

I_0	$X_1 - X_1$	$X_2 - X_2$	$X_3 - X_3$	$X_4 - X_4$	$Y_0 - Y_0$	$A - X_1$	$A - X_2$	$A - X_3$	$A - X_4$
	50.0	50.0	0.0	0.0	100.0	50.0	50.0	0.0	0.0
	51.0	49.0	0.0	0.0	100.0	101.0	99.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	101.0	99.0	0.0	0.0
1	81.0	79.0	90.0	90.0	340.0	182.0	178.0	90.0	90.0
	77.0	78.0	77.0	78.0	310.0	259.0	256.0	167.0	168.0
	67.0	69.0	67.0	67.0	270.0	326.0	325.0	234.0	235.0
	94.0	95.0	95.0	96.0	380.0	420.0	420.0	329.0	331.0
	25.0	25.0	25.0	25.0	100.0	445.0	445.0	354.0	356.0
	26.0	26.0	30.0	28.0	110.0	471.0	471.0	384.0	384.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	471.0	471.0	384.0	384.0
2	66.0	64.0	67.0	63.0	260.0	537.0	535.0	451.0	447.0
	73.0	71.0	73.0	73.0	290.0	610.0	606.0	524.0	520.0
	106.0	106.0	102.0	106.0	420.0	716.0	712.0	626.0	626.0
	35.0	37.0	124.0	124.0	320.0	751.0	749.0	750.0	750.0
	CW11 = 751.00		CW12 = 749.00		ACW1 = 1500.00				
	CW21 = 750.00		CW22 = 750.00		ACW2 = 1500.00				
	T01 = 0;		T02 = 30;		CW1 = 1500;		CW2 = 1500		

参 考 文 献

- 1 吉村等. 新日铁大分厂连铸-连轧直接连接工序的生产管理系统, 铁与钢, 1988, 74 (7): 1323
- 2 冯光纯等. 板带钢生产工艺学. 四川: 重庆大学出版社, 1990. 4
- 3 陈立周等. 约束非线性离散变量规划的最优性问题, 北京钢铁学院学报, 1978, 9 (4): 73