

中厚板热轧生产调度优化方法

於春月¹ 王成恩¹ 曲蓉霞¹

摘要 中厚板热轧生产调度, 是一个有优先约束、等待时间和缓冲容量有限的单机调度问题. 用 AON (Activity-on-node) 网络对问题进行描述, 提出并证明了面向单机调度问题的 AON 网络平衡定理, 根据平衡定理, 建立了以轧机利用率最大为优化目标的非线性约束优化数学模型, 并利用优化软件 LINGO 进行求解. 计算实例表明, 所提出的数学优化方法, 与现有的启发式方法相比, 能够获得更好的优化目标, 所得到的生产调度方案, 生产节奏稳定, 更有利于组织生产.

关键词 中厚板热轧, AON (Activity-on-node) 网络, 非线性约束优化, 单机调度

DOI 10.3724/SP.J.1004.2010.00282

Optimization Method for Plate Hot Rolling Production Scheduling

YU Chun-Yue¹ WANG Cheng-En¹ QU Rong-Xia¹

Abstract Scheduling steel plate hot rolling is a typical single-machine scheduling problem subject to multiple constraints including precedence constraints and limited waiting time and finite buffer capacity. To describe the steel plate hot rolling scheduling problem with an AON (Activity-on-node) network, an equilibrium principle is formulated for single-machine scheduling problems on the AON networks. Subsequently, a nonlinear constrained optimization model is built for steel plate hot rolling scheduling problems, which maximizes utilization of the rolling mill and is solved by software LINGO. Numerical computations indicate that the hot rolling scheduling method is more effective than the heuristic methods available in reaching optimal production schedules that may significantly improve production stability and efficiency.

Key words Plate hot rolling, AON (Activity-on-node) network, nonlinear constrained optimization, single-machine scheduling

中厚板生产都广泛采用控制轧制工艺^[1-2], 每块板坯的轧制过程, 包括第一阶段轧制、待温和第二阶段轧制. 中厚板热轧调度问题, 就是根据板坯的轧制时间和待温时间的匹配关系, 以及辊道长度限制, 合理确定板坯的开始轧制时间或间隔时间, 在避免板坯等待时间过长、终轧温度过高(过低)和板坯相碰撞的前提下, 充分利用轧机的空闲时间, 提高轧机利用率, 是全自动轧钢过程控制的重要功能^[3]. 目前, 研究热轧生产计划优化的文献较多^[4-6], 而关于中厚板热轧调度问题的研究很少, Heedman^[7]在镍钒钢轧制工艺设计方面, 提出了缩短轧制时间、提高轧机利用率的方案. 姚小兰^[8]给出了最多 3 块板坯控制轧制的轧机利用率计算公式, 但没有对多板坯 (3 块以上) 热轧调度问题进行深入的研究. 矫志杰等^[9]设计并利用轧机时位图 (Time-location-matrix, T-L-M) 对单规格中厚板热轧调度问题进行了分析, 提出了一种启发式调度方法, 与文献 [8] 一样, 研究的都

是单规格中厚板轧制的特殊情况, 所提出的方法不适用于多规格中厚板轧制的一般情况. 针对钢铁行业中的生产调度问题, 国内外的研究都从不同的角度抽象问题, 用不同的模型和算法进行求解^[10-12], 本文利用 AON 网络进行问题描述, 提出并利用网络平衡定理, 建立了非线性约束优化数学模型, 利用优化软件 LINGO 进行求解, 最后给出了计算实例.

1 问题描述

中厚板热轧线布局如图 1 所示, 板坯在加热炉内加热到一定温度后出炉, 由辊道运输到除鳞机进行除鳞 (去氧化皮), 再运输到四辊单机架可逆轧机进行轧制, 然后以一定的速度通过层流水冷设备进行冷却, 进入精整线. 中厚板轧制与带钢热连轧不同, 需要在四辊单机架可逆轧机上进行多道次 (8~16 道次) 的往复轧制, 这个多道次轧制过程包括前后两个轧制阶段和一个待温阶段, 即: 板坯除鳞后, 先在轧机上反复轧制 4~6 道次 (第一轧制阶段), 达到某一中间尺寸 (中间厚度、宽度), 然后在轧机前或轧机后辊道上进行摆动降温 (待温阶段), 经过一段时间 (待温时间), 温度降到某一温度 (终轧温度) 时, 再轧制其余道次 (第二轧制阶段). 为了提高轧机利用率, 充分利用板坯待温时轧机的空闲时间, 必须进行合理调度, 实现多块板坯同时在线进行轧制.

收稿日期 2008-10-14 录用日期 2009-05-31
Manuscript received October 14, 2008; accepted May 31, 2009
解放军总装备部武器装备预研重点基金项目 (9140A18010207LN 0101) 资助

Supported by the Ministry of General Equipment of PLA Weapon Equipment Pre-research Foundation (9140A18010207LN 0101)

1. 东北大学流程工业综合自动化教育部重点实验室 沈阳 110004
1. Key Laboratory of Process Industry Automation, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004

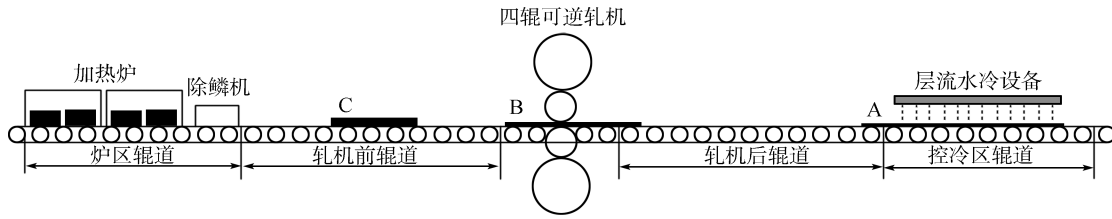


图 1 中厚板热轧线

Fig. 1 Plate hot rolling line

图 1 中,同时在线轧制的共有两块板坯 B 和 C,板坯 C 在轧机前辊道上摆动待温时,板坯 B 正在进行第二阶段轧制.可以同时在线轧制的板坯数量,受到时间与空间(辊道长度)的双重限制,与每块板坯的轧制时间、待温时间、终轧长度(第二阶段轧制之后的钢板长度)和轧机前后辊道长度有关.如果板坯的待温时间较长,轧制时间较短,并且轧机前后辊道长度很长,就可以实现多块板坯同时在线轧制,轧机利用率就可能提高.

假设一个轧制单元计划^[4]内有 n 块板坯,第 i 块板坯的两个轧制阶段分别称为作业 J_{i1} 和 J_{i2} ,所需要的轧制时间分别是 p_{i1} 和 p_{i2} ,待温时间为 w_i ,约束条件有:

- 1) 由轧制单元计划确定的轧制顺序,决定了作业 J_{i1} 是 J_{j1} 的前序作业 ($j = i + 1$);
- 2) 由控制轧制工艺,决定了作业 J_{i1} 是 J_{i2} 的前序作业,而且还要求二者之间有等待时间约束,待温时间为 w_i ;
- 3) 由热轧线布局决定了作业 J_{i2} 是 J_{j2} 的前序作业 ($j = i + 1$);
- 4) 辊道长度有限,同时在线工件(板坯或钢板)的长度之和不能超过可利用待温辊道长度,即缓冲容量有限.

AON 网络是一种非常直观的建模方法,起源于 50 年代末发展起来的网络计划^[13].网络计划借助于网络表示各项活动及所需时间,以及活动之间的相互关系,是生产运作管理中经常采用的建模方法^[14].如果活动对应网络的弧,活动持续时间对应弧的权值,则称为 AOA (Activity-on-arc) 网络;如果活动对应网络的节点,弧的权值表示活动间的时距,则称为 AON (Activity-on-node) 网络. AON 网络构图简单,能直观地反映活动之间的优先关系,比 AOA 网络更适合用于建立上述单机调度的网络模型,如图 2 所示.

图 2 中节点表示轧制作业 ($J_{i1}, J_{i2}, i = 1, \dots, n$),节点旁的数字表示作业加工所需时间 ($p_{i1}, p_{i2} \geq 0$);有向弧表示作业之间的优先约束,箭头作业必须在箭尾作业加工结束后才可以开始;有

向弧上的常量 ($w_i, w_i \geq 0$) 表示箭尾作业必须在箭头作业完工后,等待 w_i 时间后立即开始加工;有向弧上的非负变量 x_{ij} 和 z_{ij} ,说明两个作业之间没有等待时间约束,二者都是生产调度问题的决策变量,表示两个作业的实际间隔时间(本文中所提及的作业间隔时间,均表示箭头作业结束距离箭尾作业开始的间隔时间);任意两个作业 J_{i2} 与 J_{j1} ($i < j, i = 1, \dots, n - 1; j = i + 1, \dots, n$) 之间没有等待时间约束,也没有优先约束,两个作业的间隔时间和加工先后顺序,都是生产调度问题的决策变量.这里用 0/1 变量 a_{ij} 表示二者之间的加工先后顺序,用非负变量 y_{ij} 表示间隔时间.各变量定义如下:

- $a_{ij} = 1$: 安排作业 J_{i2} 在 J_{j1} 之前加工,箭头指向作业 J_{j1} ; $a_{ij} = 0$: 安排作业 J_{i2} 在 J_{j1} 之后加工,箭头指向作业 J_{i2} ;
- x_{ij} : 作业 J_{i1} 和 J_{j1} 的间隔时间, $x_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, n - 1; j = i + 1, \dots, n$;
- y_{ij} : 作业 J_{i2} 与 J_{j1} 的间隔时间, $y_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, n - 1; j = i + 1, \dots, n$;
- z_{ij} : 作业 J_{i2} 和 J_{j2} 的间隔时间, $z_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, n - 1; j = i + 1, \dots, n$.

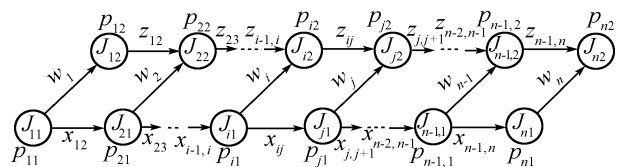


图 2 AON 网络

Fig. 2 AON network

调度问题的优化目标就是可行调度的加工路线最短,即在 AON 图上找到一条连接从作业 J_{11} 到作业 J_{n2} 的最短路.以文献 [9] 中某一具体热轧调度问题 ($n = 6, p_{i1} = 67.3s, p_{i2} = 46.4s, w_i = 112s$) 为例,利用文献 [9] 提出的“一待一轧”启发规则,确定的最短加工路线 ($J_{11}, J_{21}, J_{12}, J_{22}, J_{31}, J_{41}, J_{32}, J_{42}, J_{51}, J_{61}, J_{52}, J_{62}$) 长为 879s, AON 网络图及最短路线表示为图 3.

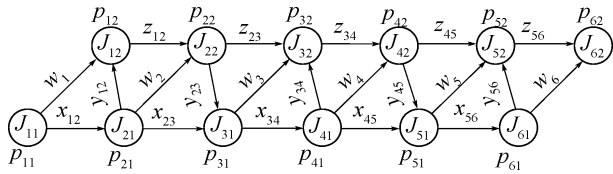


图 3 最短加工路线

Fig. 3 The shortest processing path

本文研究的调度问题中, p_{i1} 、 p_{i2} 、 w_i 是常数, 当确定了变量 x_{ij} 以后, 就可以计算出变量 a_{ij} 、 z_{ij} 和 y_{ij} , 作业加工路线也随之产生. 如果变量 a_{ij} 、 z_{ij} 和 y_{ij} 的值都在定义域内, 则向量 $\mathbf{X} = (x_{12}, x_{23}, \dots, x_{n-1,n})$, 表示了一个可行调度方案, 否则, 调度 \mathbf{X} 不可行.

2 网络的平衡

关于单机调度的 AON 网络, 本文提出了一个调度可行的必要条件, 称之为平衡定理.

2.1 平衡定理

定理 1. 一个单机调度方案可行的必要条件是, 在 AON 网络上, 任意一个子图中, 始节点和终节点相同、但方向不同的两条路的长度相等.

图 4 是一个单层三角形子图 $D(J_{11}, J_{21}, J_{12})$, 有两条路 (J_{11}, J_{12}) 和 (J_{11}, J_{21}, J_{12}) , 平衡关系可表示为: $w_1 = x_{12} + p_{21} + y_{12}$. 图 5 是一个单层四边形子图 $D(J_{11}, J_{21}, J_{22}, J_{12})$, 有两条路 (J_{11}, J_{21}, J_{22}) 和 (J_{11}, J_{12}, J_{22}) , 平衡关系可表示为: $x_{12} + p_{21} + w_2 = w_1 + p_{12} + z_{12}$. 图 6 是一个复合形子图 $D(J_{11}, J_{31}, J_{22}, J_{12})$, 由一个三角形和一个四边形子图组成, 它有两条路 (J_{11}, J_{21}, J_{31}) 和 $(J_{11}, J_{12}, J_{22}, J_{31})$, 平衡关系可表示为: $x_{12} + p_{21} + x_{23} = w_1 + p_{12} + z_{12} + p_{22} + y_{23}$.

所谓平衡定理, 就是约束“一台设备在同一时刻最多只能加工一个作业”映射在 AON 网络上, 所体现的一个等式关系. 对于一个调度, 如果在 AON 网络上, 某一个子图不平衡, 就表示在某一时刻, 两个或多个作业的加工时间出现重叠, 即存在任务冲突现象, 此调度不可行. 满足平衡定理, 是调度方案可行的必要条件.

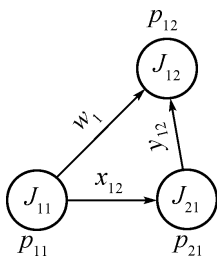


图 4 单层三角形子图

Fig. 4 One-layer triangle subgraph

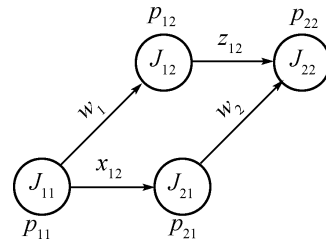


图 5 四边形子图

Fig. 5 Quadrilateral subgraph

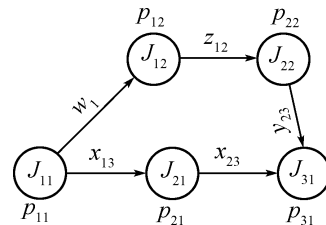


图 6 复合形子图

Fig. 6 Complex-type subgraph

2.2 平衡定理的证明

证明. 首先证明单层三角形子图 (图 4) 的平衡. 图中有两条路, (J_{11}, J_{12}) 和 (J_{11}, J_{21}, J_{12}) , 图 7 反映的是作业 J_{11} 、 J_{12} 、 J_{21} 的加工顺序关系. 可以发现, 如果要想作业 J_{11} 、 J_{21} 、 J_{12} 在同一台设备上依次加工而在时间上不发生冲突, 待温时间 w_1 不能小于 p_{21} , 间隔时间 x_{12} 和 y_{12} , 要保证 J_{12} 及时开工, 即必须有式 (1) 成立:

$$x_{12} + p_{21} + y_{12} = w_1 \tag{1}$$

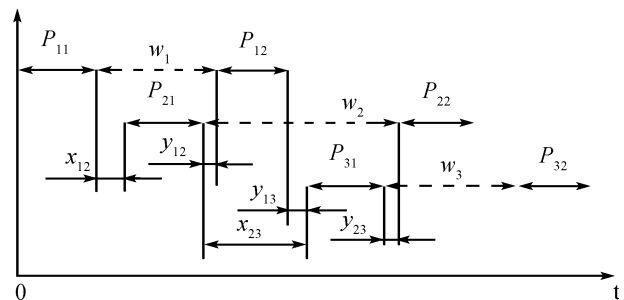


图 7 二层三角形子图的加工顺序

Fig. 7 Processing order in double-layer triangle subgraph

然后, 证明带有四个作业 J_{11} 、 J_{12} 、 J_{21} 、 J_{31} 的二层三角形子图 (图 8) 的平衡. 图中有两个最小的三角形子图: $D(J_{11}, J_{12}, J_{21})$ 和 $D(J_{12}, J_{21}, J_{31})$, 以及由这两个小子图构成的大三角形子图: $D(J_{11}, J_{12}, J_{31})$. 参照前面的分析 (图 7), 在子图 $D(J_{12}, J_{21}, J_{31})$ 中, 作业 J_{12} 、 J_{21} 、 J_{31} 的加工顺序及间隔时间, 只有满足式 (2), 才能保证无任务冲突.

$$y_{12} + p_{12} + y_{13} = x_{23} \tag{2}$$

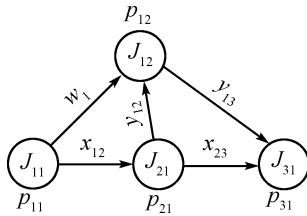


图 8 二层三角形子图

Fig. 8 Double-layer triangle subgraph

由式 (1) 和式 (2) 整理得到式 (3).

$$x_{12} + p_{21} + x_{23} = w_1 + p_{12} + y_{13} \quad (3)$$

等式 (3) 成立, 说明大三角形子图 $D(J_{11}, J_{12}, J_{31})$ 中的两条路: (J_{11}, J_{21}, J_{31}) 和 (J_{11}, J_{12}, J_{31}) 长度相等, 证明了二层三角形子图也满足平衡定理.

下面, 利用数学归纳法证明, 涉及 $i + 1$ 个工件的 i 层三角形子图 (图 9) 的平衡.

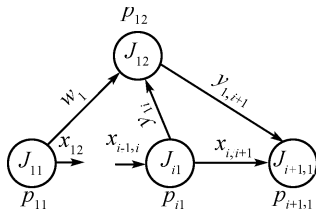


图 9 i 层三角形子图

Fig. 9 i -layer triangle subgraph

假设 $i - 1$ 层子图 $D(J_{11}, J_{12}, J_{i1})$ 已满足平衡关系, 即式 (4) 成立.

$$x_{12} + p_{21} + \dots + x_{i-1,i} + p_{i1} + y_{1i} = w_1 \quad (4)$$

子图 $D(J_{11}, J_{12}, J_{i+1,1})$ 与子图 $D(J_{11}, J_{12}, J_{i1})$ 相比, 多一个单层三角形子图 $D(J_{12}, J_{i1}, J_{i+1,1})$, 由于子图 $D(J_{12}, J_{i1}, J_{i+1,1})$ 满足平衡关系, 即有:

$$y_{1i} + p_{12} + y_{1,i+1} = x_{i,i+1} \quad (5)$$

由式 (4) 和式 (5) 整理得到式 (6), 即证明了 i 层三角形子图 $D(J_{11}, J_{12}, J_{i+1,1})$ 的平衡.

$$x_{12} + p_{21} + \dots + x_{i-1,i} + p_{i1} + x_{i,i+1} = w_1 + p_{12} + y_{1,i+1} \quad (6)$$

以此类推, 可以证明, 如果一个 n 块坯控制轧制方案可行, 它的 $n - 1$ 层三角形子图 $D(J_{11}, J_{12}, J_{n1})$ 应满足平衡定理. 采用同样的方法, 也可证明四边形子图的平衡. 由于复合形子图是由三角形子图和四边形子图组成的, 所以可以证明复合形子图的平衡, 进而平衡定理得证. \square

2.3 平衡关系表达式

通过对 AON 网络平衡定理的证明, 可以总结出以下平衡关系表达式. 在 AON 网络上, 对于任意

两个工件 i 和 $j (i < j)$ 的三角形子图, 如果 J_{i2} 在 J_{j1} 之前加工 ($a_{ij} = 1$), 则式 (7) 成立.

$$y_{ij} = \sum_{k=i}^{j-1} x_{k,k+1} + \sum_{k=i+1}^{j-1} p_{k1} - p_{i2} - w_i \quad (7)$$

如果 J_{i2} 在 J_{j1} 之后加工 ($a_{ij} = 0$), 则式 (8) 成立.

$$y_{ij} = w_i - \sum_{k=i}^{j-1} x_{k,k+1} - \sum_{k=i+1}^j p_{k1} \quad (8)$$

对式 (7) 和式 (8) 整理得式 (9):

$$\sum_{k=i}^{j-1} x_{kk+1} + \sum_{k=i+1}^{j-1} p_{k1} + (1 - a_{ij})(p_{j1} + y_{ij}) - a_{ij}(p_{i2} + y_{ij}) = w_i \quad (9)$$

在 AON 网络上, 两个工件 i 和 $j (i < j)$ 的四边形子图平衡关系表示为式 (10).

$$\sum_{k=i}^{j-1} x_{k,k+1} + \sum_{k=i+1}^j p_{k1} + w_j = w_i + \sum_{k=i+1}^j p_{k2} + \sum_{k=i}^{j-1} z_{k,k+1} \quad (10)$$

特殊地, 相邻两个工件 i 和 $i + 1$ 的四边形子图, 平衡定理表示为式 (11).

$$x_{i,i+1} + p_{i+1,1} + w_{i+1} = w_i + p_{i2} + z_{i,i+1} \quad (11)$$

3 数学模型

根据以上分析, 建立以下中厚板热轧生产调度优化数学模型.

$$\max \frac{\sum_{i=1}^n (p_{i1} + p_{i2})}{p_{11} + \sum_{i=1}^{n-1} x_{i,i+1} + p_{n1} + w_n + p_{n2}} \quad (12)$$

s.t.

$$\sum_{k=i}^{j-1} x_{k,k+1} + \sum_{k=i+1}^{j-1} p_{k1} + (1 - a_{ij})(p_{j1} + y_{ij}) - a_{ij}(p_{i2} + y_{ij}) = w_i \quad (13)$$

$$x_{i,i+1} \geq w_i + p_{i2} - p_{i+1,1} - w_{i+1} \quad (14)$$

$$x_{i+1,i} \leq w_i + p_{i2} \quad (15)$$

$$\sum_{k=i}^{no_i} l_k \leq L_r \quad (16)$$

$$a_{ij} = 0, 1 \quad (17)$$

$$x_{ij}, y_{ij} \geq 0 \quad (18)$$

其中, $i = 1, \dots, n-1$; $j = i+1, \dots, n$; L_r 表示可利用待温辊道总长度; l_k 表示板坯 k 的终轧长度; no_i 表示在板坯 i 的待温时间内, 最大的同时在线轧制板坯序号, $no_i = \max\{i | J_{i1} \in \overline{P_{i2}}\}$; $\overline{P_{i2}} = \{J_{i2} | ST_{i2} \geq FT_{i1}\}$ 表示在作业 J_{i2} 开轧之前, 已经完工的前序作业子集; ST 表示轧制开始时间, FT 表示轧制结束时间; 目标函数 (12) 表示轧机利用率最大; 约束式 (13) 即式 (9), 表示要满足等待时间约束; 约束式 (14) 是由式 (11) 推导出来的, 表示要求间隔时间 $z_{i,i+1}$ 非负; 约束式 (15) 表示每块板坯第一阶段轧制最晚开始时间, 是其紧前板坯第二阶段轧制结束时间; 约束式 (16) 表示同时在线轧制的工件长度之和不能超过辊道长度; 约束式 (17) 表示 a_{ij} 为 0、1 变量; 约束式 (18) 表示间隔时间 x_{ij} 与 y_{ij} 非负.

由于约束条件式 (13) 是一个多元二次等式约束, 所以优化问题式 (12)~(18), 属于非线性约束优化问题. 非线性约束优化问题在经济、化学工程和技术科学等领域中有许多实际应用价值, 但其求解难度很大, 算法设计复杂, 往往需要借助优秀的优化软件进行建模与求解. LINDO 和 LINGO 是美国 LINDO 系统公司开发的一套专门用于求解最优化问题的软件包, 在教学、科研和工业、商业、服务等领域得到了广泛应用. 本文就是利用 LINGO 软件包, 对优化问题式 (12)~(18) 进行求解.

4 算例

表 1 给出了 9 个不同规模的中厚板热轧调度问题, 分别包括多种不同规格的板坯若干块, 已知所有

板坯的净轧制时间 (不计待温时间), 按轧制单元计划^[4] 事先确定好的顺序出炉. 首先按文献 [9] 提出的启发式规则, 先依次确定每一种规格的最优轧制模式, 然后累计得到总完工时间, 称为方案 1; 采用本文方法进行求解, 称为方案 2. 对比结果说明, 方案 2 的轧机利用率都有所提高, 这是因为本文提出的优化方法是精确的数学方法, 能找到最优解, 而启发式规则主要是用来解决同规格中厚板的热轧调度问题, 难以胜任复杂的多规格中厚板热轧调度问题. 从求解效率上看, 本文方法的求解效率相对较低, 这是因为求解时需要进行优化计算, 但在实际应用中, 运算所耗时间还是可以接受的: 如果在生产之前进行静态调度, 对于一个规模为 100~150 块板坯的班次 (8 小时) 生产计划, 本文方法所需运算时间不足 3 分钟; 如果在生产过程中, 对轧线上板坯及加热炉内即将出炉板坯 (最多不超过 10 块), 进行实时生产调度, 本文的方法所需运算时间最多在 2 秒左右, 实际应用比较有效.

实例 1 中有 6 种不同轧制规格的板坯 22 块, 按成品厚度递增的顺序轧制, 具体生产数据见表 2, 两种方法的详细调度结果见表 3, 二者的甘特图对比见图 10. 从表 3 和图 10 中可以看出, 方案 1 中, 开轧间隔时间为 0 的板坯较多, 看似缩短了大量的轧机空闲时间, 但没有实现目标最优, 而且间隔时间分布不均匀, 有时两块板坯的开轧间隔时间很大, 生产节奏时紧时松, 不利于进行组织生产. 方案 2 中, 相邻板坯的开轧间隔时间波动不大, 分布比较均匀, 之所以能实现总完工时间最小化, 原因是安排适当的间隔时间, 增加了充分利用板坯待温时轧机空闲时间的机会, 缩短了总完工时间, 由此带来的另一个效果, 就是生产节奏得到均匀化, 利于组织生产, 同时设备的生产负荷平衡, 也有利于延长设备使用寿命.

表 1 两种方法对比

Table 1 Comparison of the two methods

实例	规格数	总块数	净轧 时间 (s)	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	利用率 提高 (%)	方案 1	方案 2
				完工时间 (s)	完工时间 (s)	利用率 (%)	利用率 (%)		耗时 (s)	耗时 (s)
1	6	22	2 730	3 514	3 206	77.69	85.15	7.46	0.4	0.6
2	9	30	2 402	3 149	3 107	76.27	77.31	1.04	0.6	1.3
3	13	48	3 391	4 483	4 091	74.84	82.01	7.17	1.2	2.6
4	17	51	4 189	6 018	5 644	69.61	74.22	4.61	2.2	7.1
5	20	67	5 383	8 258	7 526	65.18	71.53	6.35	5.3	20.9
6	22	81	8 471	12 678	11 487	66.82	73.74	6.92	8.1	41.4
7	24	105	10 045	15 222	13 681	65.99	73.42	7.43	12.3	63.6
8	27	129	14 654	20 828	18 475	70.35	79.32	8.97	18.4	102.1
9	32	150	16 708	23 101	20 193	72.32	82.74	10.42	28.3	143.2

表 2 实例 1 的生产数据
Table 2 Production data of the first example

规格	终轧厚度 (mm)	终轧长度 (mm)	块数	p_{i1} (s)	w_i (s)	p_{i2} (s)	单坯加工周期 (s)
I	12	14 500	2	98	168	70	336
II	16	16 500	4	56	266	70	392
III	20	12 500	4	56	154	84	294
IV	22	12 500	3	70	182	56	308
V	24	10 500	5	70	196	42	308
VI	30	9 500	4	42	182	56	280

表 3 实例 1 的调度结果
Table 3 Schedule for the first example

板坯号 i	方案 1					方案 2				
	ST_{i1}	FT_{i1}	ST_{i2}	FT_{i2}	$x_{i,i+1}$	ST_{i1}	FT_{i1}	ST_{i2}	FT_{i2}	$x_{i,i+1}$
1	0	98	266	336	0	0	98	266	336	0
2	98	196	364	434	238	98	196	364	434	0
3	434	490	756	826	14	196	252	518	588	182
4	504	560	826	896	14	434	490	756	826	98
5	574	630	896	966	14	588	644	910	980	14
6	644	700	966	1036	336	658	714	980	1050	126
7	1036	1092	1246	1330	28	840	896	1050	1134	238
8	1120	1176	1330	1414	238	1134	1190	1344	1428	28
9	1414	1470	1624	1708	28	1218	1274	1428	1512	238
10	1498	1554	1708	1792	238	1512	1568	1722	1806	0
11	1792	1862	2044	2100	0	1568	1638	1820	1876	0
12	1862	1932	2114	2170	0	1638	1708	1890	1946	238
13	1932	2002	2184	2240	238	1946	2016	2198	2254	0
14	2240	2310	2506	2548	0	2016	2086	2282	2324	42
15	2310	2380	2576	2618	0	2128	2198	2394	2436	126
16	2380	2450	2646	2688	238	2324	2394	2590	2632	42
17	2688	2758	2954	2996	0	2436	2506	2702	2744	14
18	2758	2828	3024	3066	238	2520	2590	2786	2828	56
19	3066	3108	3290	3346	14	2646	2688	2870	2926	56
20	3122	3164	3346	3402	14	2744	2786	2968	3024	42
21	3178	3220	3402	3458	14	2828	2870	3052	3108	56
22	3234	3276	3458	3514	/	2926	2968	3150	3206	/

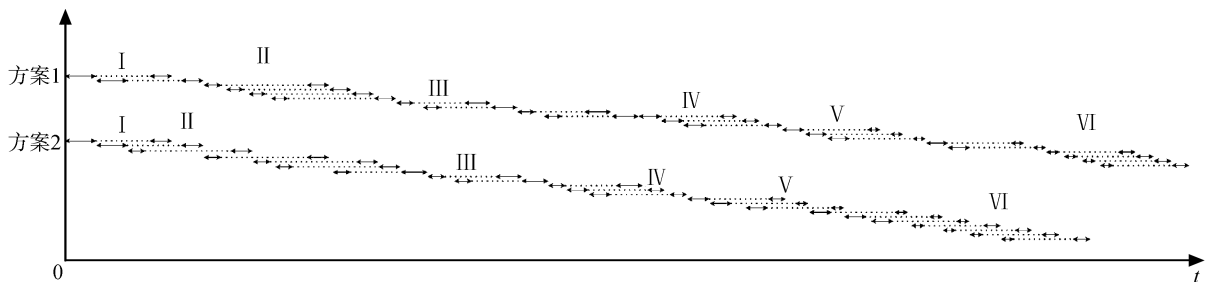


图 10 实例 1 的调度甘特图
Fig. 10 Scheduling Gantt chart of the first example

5 结论

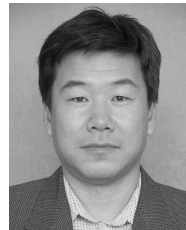
现有的中厚板热轧生产调度启发式规则, 简单实用, 适合解决单一规格中厚板热轧生产调度问题, 但灵活性差, 难以实现多规格中厚板热轧生产调度最优化. 本文用 AON 网络对问题进行描述, 提出并利用 AON 网络的平衡定理, 建立了生产调度优化的数学模型, 并利用优化软件 LINGO 进行求解. 计算结果表明本文提出的优化方法, 与现有的启发式规则相比, 可以实现多规格中厚板热轧生产调度优化, 获得更高的轧机利用率, 所得到的生产调度方案, 生产节奏稳定, 更有利于组织生产和延长设备使用寿命. 本文提出的 AON 网络平衡定理, 对从事网络计划优化、项目管理、单机排序等问题的研究, 也有一定的借鉴作用.

References

- Porter D. Thermomechanical processing on hot strip and plate mills. *Ironmaking and Steelmaking*, 2001, **28**(2): 164–169
- Hu Xian-Lei, Zhao Zhong, Wang Jun, Wang Zhao-Dong, Liu Xiang-Hua, Wang Guo-Dong. Optimization of holding temperature and holding thickness for controlled rolling on plate mill. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2006, **13**(3): 21–25
- Jiao Zhi-Jie, He Chun-Yu, Chen Bo, Wang Guo-Dong. Process control system for plate mill in Shougang. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2004, **25**(5): 412–415
(矫志杰, 何纯玉, 陈波, 王国栋. 首钢中厚板轧机过程控制系统. 东北大学学报(自然科学版), 2004, **25**(5): 412–415)
- Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, Yang Z H. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron and Steel Complex. *European Journal of Operational Research*, 2000, **124**(2): 267–282
- Cowing P. A flexible decision support system for steel hot rolling mill scheduling. *Computers and Industrial Engineering*, 2003, **45**(2): 307–321
- Stauffer L, Liebling T M. Rolling horizon scheduling in a rolling-mill. *Annals of Operations Research*, 1997, **69**(1): 323–349
- Heedman P J. Shorter process times in the controlled rolling of plate. *Journal of Mechanical Working Technology*, 1978, **2**(2): 117–128
- Yao Xiao-Lan, Liang Qi-Hong, Zhang Di-Sheng. Optimization of rhythms in controlled rolling. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2004, **24**(4): 327–330
(姚小兰, 梁启宏, 张迪生. 控制轧制节奏的优化. 北京理工大学学报, 2004, **24**(4): 327–330)
- Jiao Zhi-Jie, Hu Xian-Lei, Zhao Zhong, Qiu Hong-Lei, Liu Xiang-Hua, Wang Guo-Dong. Mill pacing control on plate mill at Shougang. *Journal of Iron and Steel Research*, 2005, **17**(1): 72–76
(矫志杰, 胡贤磊, 赵忠, 邱红雷, 刘相华, 王国栋. 首钢中厚板轧机轧制节奏的控制. 钢铁研究学报, 2005, **17**(1): 72–76)
- Liu Quan-Li, Wang Wei, Zhu Rui-Jun, Li Ning, Jin Ji-Ling. Optimal scheduling method and its application for a bell-type batch annealing. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(6): 974–980
(刘全利, 王伟, 朱瑞军, 李宁, 金吉凌. 罩式退火炉生产优化调度方法及其应用. 自动化学报, 2004, **30**(6): 974–980)
- Zhao Yu-Fang, Tang Li-Xin. Scheduling with agreeable release times and due dates on a single continuous batch processing machine. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(8): 957–963
(赵玉芳, 唐立新. 释放时间和工期同序的单机连续型批调度问题. 自动化学报, 2008, **34**(8): 957–963)
- Kumar A S S, Tiwari M K. Modeling the slab stack shuffling problem in developing steel rolling schedules and its solution using improved, parallel genetic algorithms. *International Journal of Production Economics*, 2004, **91**(2): 135–147
- Dawson C W, Dawson R L. Generalised activity-on-the-node networks for managing uncertainty in projects. *International Journal of Project Management*, 1995, **13**(6): 353–362
- Marek M, Grzegorz W, Jan W. Simulated annealing and tabu search for multi-mode resource-constrained project scheduling with positive discounted cash flows and different payment models. *European Journal of Operational Research*, 2005, **164**(3): 639–668



於春月 东北大学流程工业综合自动化教育部重点实验室博士研究生. 主要研究方向为生产调度与组合优化. 本文通信作者. E-mail: ycy_neu@163.com
(YU Chun-Yue Ph.D. candidate at Northeastern University. Her research interest covers production scheduling and combinational optimization. Corresponding author of this paper.)



王成恩 东北大学教授. 主要研究方向为计算机集成制造系统、多学科设计优化系统集成技术.

E-mail: wangc@ise.neu.edu.cn

(WANG Cheng-En Professor at Northeastern University. His research interest covers computer integrated making system (CIMS), multi-disciplinary design optimization system integrated technology.)



曲蓉霞 东北大学副教授. 主要研究方向为制造执行系统.

E-mail: qurongxia@ise.neu.edu.cn

(QU Rong-Xia Associate professor at Northeastern University. Her main research interest is manufacturing executive system.)