

DOI:10.13196/j.cims.2015.04.013

一类多品种小批量混流制造系统作业 组织模式与工件排序

孔继利^{1,2}, 贾国柱³

(1. 北京邮电大学 经济管理学院, 北京 100876; 2. 北京邮电大学 自动化学院, 北京 100876;
3. 北京航空航天大学 经济管理学院, 北京 100191)

摘要:为解决考虑搬运时间的混流制造系统的资源优化与调度问题,对作业组织模式与工件排序进行了深入研究。建立了以设备停机次数、工件搬运次数、搬运设备数量、搬运次数均衡程度作为第一、第二、第三和第四优化目标,以生产周期作为约束的多目标决策模型,利用该模型选择作业组织模式并确定最优排序方案。分别研究了用于求解该多目标决策模型的分目标和约束:为不同类型批量工件建立加工时间模型;设计开始和结束搬运时间优化模型;给出平行移动模式的设备停机次数算法。开发了考虑搬运时间的混流制造系统软件程序,并设计了所需搬运设备情况的全局优化算法。通过分析和求解企业订单数据验证了所提方法的有效性。

关键词:搬运时间;混流制造;作业组织模式;加工时间模型;多目标决策模型;排序问题

中图分类号:TP301;F273 **文献标识码:**A

Operation organization modes and parts' sequencing for a category of mixed-model manufacturing system of multi-variety and small-batch

KONG Ji-li^{1,2}, JIA Guo-zhu³

(1. School of Economics & Management, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China;
2. School of Automation, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China;
3. School of Economics & Management, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To solve the problem of resource optimization and scheduling for the mixed-model manufacturing system considering handling time, the operation organization modes and parts' sequencing were researched deeply. The equipment shutdown frequency, parts' handling times, handling equipment amount and equilibrium degree of handling times were taken as the first, second, third and fourth optimization objectives and the makespan was taken as the constraint, a multi-objective decision-making model was established to select the appropriate operation organization mode and to determine the optimal scheduling scheme. The different targets and restraint that could be used for solving the model were researched. The processing time models were established and the optimization model of handling time was designed. Meanwhile, a detailed algorithm procedure for the frequency of equipment shutdown was presented. A software system of the mixed-model manufacturing system considering handling time was developed. Besides, a global optimization algorithm for the amount of handling equipment was designed. The effectiveness of the proposed method was validated by the analysis and solution of enterprise order data.

Key words: handling time; mixed-model manufacturing; operation organization mode; processing time model; multi-objective decision-making model; scheduling problem

收稿日期:2014-01-18;修订日期:2014-08-27。Received 18 Jan. 2014; accepted 27 Aug. 2014.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71372007);高等学校博士点基金资助项目(20111102110025)。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 71372007), and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, China(No. 20111102110025).

0 引言

随着市场竞争的日益加剧和客户需求的快速变化,客户在短生产周期、低成本和高个性化方面的要求已经成为制造企业面临的严峻挑战^[1]。混流制造已逐步成为解决此类问题且被许多先进制造企业接受的主要生产方式^[2-3]。从学术研究角度分析,相关研究文献主要体现在车间布局设计^[4-5]、装配线平衡^[6-7]、作业组织模式^[8-9]、批量加工模式^[10-11]、排序算法设计^[12-13]和生产周期研究^[14-15]等方面。其中,生产周期时间构成中大约有 75% 是非生产性时间^[16],如工件在运输工序中的搬运时间等;由于工艺专业化布局的混流制造系统中各工艺工序所在的车间有一定距离,该类制造系统生产周期中需要考虑运输工序的搬运时间。同时,生产周期、工件搬运次数、设备停机次数、搬运设备数量等指标受到作业组织模式和排序方案的影响。

近年来,国内外学者在该研究领域取得了一些研究成果。例如:张毕西等^[11]研究了人工工序作业系统不同作业组织模式的生产周期模型;贾国柱等^[8]对考虑搬运时间的同类型批量工件的生产周期模型进行了构建和证明;孔继利等^[10]构建了考虑学习率和搬运时间的人工工序作业系统不同作业组织模式的生产周期模型。上述考虑作业组织模式的研究成果为不同类型制造系统准确核算生产周期提供了理论依据,但这些研究成果或者未考虑搬运时间对生产周期的影响,或者只研究同类型批量工件的生产周期;Liu 等^[17]构建了分阶段流水车间作业模型,目标是 minimized 生产周期;Allahverdi 等^[18]研究了无等待时间的流水车间作业调度问题,目标是 minimized 存在上下限的总完工时间;Huang 等^[19]研究了流水车间作业调度问题,目标是 minimized 生产周期;Ruiz-Torres 等^[20]考虑机器恶化对并行机影响的调度问题,目标是 minimized 生产周期。上述成果都是以未考虑作业组织模式影响下的生产周期或总完工时间的单一目标为优化准则。Zhu^[21]研究了运输和批量流的两阶段调度问题,目标是 minimized 最大完工时间与加工成本;Moradi 等^[22]研究了多目标混合装配线排序问题;Bautista 等^[23]研究了工作负荷最小化和中断规则的串行装配线排序问题;刘琼等^[24]设计了以最小化工作站的闲置与超载时间和最小化总调整变换时间为优化目标的作业排序问题;刘炜琪等^[25]设计了以最小化超载时间、产品变化率与总切

换时间为优化目标的混流装配线排序问题。上述研究成果都是针对多目标作业排序问题进行的研究,但均未考虑作业组织模式对优化结果的影响。曾强等^[16]提出平顺移动模式的柔性作业车间等量分批多目标调度方法,以完工时间最短和制造成本最低为优化目标,但未考虑其他作业组织模式。综上所述,对带搬运时间的混流制造系统作业组织模式选择与工件排序集成决策问题进行研究,是非常必要且迫切的。

本文同时考虑搬运时间和作业组织模式两个因素,对混流制造系统作业组织模式选择与工件排序集成决策问题展开研究,构建用于选择作业组织模式并确定作业排序方案的基于分层序列法的多目标决策模型。分别研究用于求解该多目标决策模型各分目标和约束条件的相关子问题:在建立加工时间模型的基础上,设计平行移动和平行顺序移动两种模式的开始和结束搬运时间优化模型;设计并开发带搬运时间的混流制造系统批量加工模式系统;设计运输工序进行搬运设备调度的全局优化算法。

1 作业组织模式、假设条件及符号说明

1.1 混流制造系统的作业组织模式

混流制造系统的作业组织模式分为顺序移动、平行移动和平行顺序移动^[8]三类。已有文献仅对单品种批量零件的作业组织模式进行了定义,因此为研究需要,对混流制造系统批量零件的作业组织模式界定如下:

(1) 顺序移动模式 不同类型的批量零件在子批不拆分(即同种类型的子批零件在某道工艺工序顺序加工完之后再加工下一子批零件)的基础上,以事先确定好的加工顺序进行加工,只有该批不同类型的批量零件在上道工艺工序中全部加工完毕后,才利用搬运设备整批地将零件转移到下道工艺工序继续加工。

(2) 平行移动模式 不同类型的批量零件在子批不拆分的基础上,以事先确定好的加工顺序进行加工,在上道工艺工序加工完部分零件后,利用搬运设备将其转移到下道工艺工序继续加工,以恰好使批量零件的生产周期与其在上道工艺工序加工完一个零件就立即转移到下道工艺工序进行加工的生产周期相等。

(3) 平行顺序移动模式 不同类型的批量零件

在子批不拆分的基础上,以事先确定好的加工顺序进行加工,在该批不同类型的批量零件在上一道工序工序尚未全部加工完之前,就利用搬运设备将已加工好的一部分零件转移到下道工序工序继续加工,以恰好能使下道工序工序连续地全部加工完该批不同类型的批量零件为条件的转移方式。

1.2 假设条件

本研究基于如下假设:

- (1) 工件类型总数确定,各类型的工件数量已知。
- (2) 工艺工序总数确定,工件加工顺序和每种类型的工件在各道工序工序中的单件加工时间已知。
- (3) 搬运设备在各工艺工序之间进行转移的时间已知且恒定。
- (4) 每台搬运设备在两个工艺工序之间往返的时间相等。
- (5) 每台搬运设备的搬运能力不受限。
- (6) 搬运设备数量足够。
- (7) 加工制造设备的调整时间为零。
- (8) 工艺工序的加工设备和运输工序的搬运设备在系统运行过程中不发生故障。
- (9) 首道工序工序中首个工件的开始加工时间为零。
- (10) 工件装载到搬运工具上的时间作为搬运时间的组成部分。

1.3 符号说明

m 为工艺工序总数;

g 为工件类型总数, n 为 g 种类型工件的总加工批量, n_j 为第 j 种类型工件的加工批量,

$$n = \sum_{j=1}^g n_j;$$

$t_{i,j}$ 为第 j 种类型的工件在第 i 道工艺工序中的单件加工时间;

$T_{(i-1,i)}$ 为第 $(i-1)$ 道工艺工序与第 i 道工艺工序之间的搬运时间,即搬运设备在第 $(i-1)$ 道运输工序中的搬运时间;

$\Delta t_{(i,i+1)}$ 为平行移动模式第 $(i+1)$ 道工艺工序与第 i 道工艺工序上的最后一个工件结束加工时间的差值;

$T_{(i,j,k)B}^{P}$ 、 $T_{(i,j,k)E}^{P}$ 分别为平行顺序移动模式第 i 道工艺工序中的第 j 种类型第 k 个工件的开始加工时间和结束加工时间;

$T_{(i \rightarrow i+1,j,k)B}^{P}$ 为平行顺序移动模式中的搬运时

间优化前,从第 i 道工艺工序向第 $(i+1)$ 道工艺工序搬运第 j 种类型的第 k 个工件的开始搬运时间;

$T_{(i \rightarrow i+1,j,k)E}^{P}$ 为平行顺序移动模式中的搬运时间优化前,从第 i 道工艺工序向第 $(i+1)$ 道工艺工序搬运第 j 种类型第 k 个工件的结束搬运时间;

$T_{平}$ 为批量工件以平行顺序移动模式完成加工的生产周期;

$sbtj(i)$ 为第 i 道工艺工序中的加工设备停机次数;

$tjcs$ 为平行移动模式中的加工设备停机次数变量;

$bysbsl$ 为 $(m-1)$ 道运输工序所需的搬运设备总数量;

T_{inf} 和 T_{sup} 分别为时间区间的下限和上限;

\overline{HN} 和 HN_{ad} 分别为所有搬运车辆搬运次数的均值、所有搬运设备搬运次数的均衡程度;

$T^P = \{t_{(i,j)}^P | i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,g\}$ 为工艺工序的单件加工时间矩阵;

$N = \{n_j | j=1,2,\dots,g\}$ 为不同类型工件的加工批量集合;

$T^T = \{t_{(i,j)}^T | i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,g\}$ 为搬运设备在各工艺工序之间进行转移的时间矩阵。

2 分层序列多目标决策模型构建

在确定选择哪种作业组织模式的工件排序方案时,可考虑以下几个目标,分别为设备停机次数、工件搬运次数、搬运设备数量、搬运设备搬运次数均衡程度和生产周期。

本研究分别将加工设备的停机次数、工件的搬运次数、所需搬运设备数量、搬运设备搬运次数的均衡程度作为第一~第四优化目标,将一定时间范围内的生产周期作为约束,建立分层序列多目标决策模型。

目标 1:

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^m sbtj(i). \quad (1)$$

目标 1 表示使 m 道工艺工序的加工设备停机次数达到最小。当工件以平行移动模式完成加工时, $f_1 = tjcs$; 当工件以顺序移动模式或平行顺序移动模式完成加工时, $f_1 = 0$ 。

目标 2:

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^{m-1} bn_{(i)}. \quad (2)$$

目标 2 表示使批量工件以某种作业组织模式在 $(m-1)$ 道运输工序中的总搬运次数达到最小。当工件以顺序移动模式完成加工时, $f_2 = m-1$ 。

目标 3:

$$\min f_3 = bybsl. \quad (3)$$

目标 3 表示使 $(m-1)$ 道运输工序所需的搬运设备数量达到最小。当工件以顺序移动模式完成加工时, $f_3 = 1$ 。

目标 4:

$$\min f_4 = HN_{ad}. \quad (4)$$

目标 4 表示使所有搬运设备搬运次数的均衡程度达到最小。其中

$$HN_{ad} = \sqrt{\frac{(HN_1 - \overline{HN})^2 + \dots + (HN_g - \overline{HN})^2}{bybsl}}. \quad (5)$$

s. t. $T_{inf} \leq f_4 = T_{(m,g,n_g)E}^l \leq T_{sup}. \quad (6)$

式(6)表示所选作业组织模式中某种工件排序方案的生产周期要在一定的时间范围内。

3 加工与搬运时间模型的建立

限于篇幅,本文只建立平行顺序移动模式的加工与搬运时间模型。

3.1 平行顺序移动模式的加工与搬运时间模型

(1)开始加工和结束加工的时间模型以及搬运时间优化前的开始搬运和结束搬运时间模型。

此处利用“平行移动模式”中建立的“结束加工的时间模型”中“两个相邻工艺工序上的最后一个工件结束加工时间”的数据,首先建立一个时间差模型,然后建立加工与搬运的时间模型。

1)两个相邻工艺工序中最后一个工件的结束加工时间的的时间差模型为

$$\Delta t_{(i,i+1)} = T_{(i+1,g,n_g)E}^l - T_{(i,g,n_g)E}^l; \quad 1 \leq i \leq m-1. \quad (7)$$

2)第 1 道工艺工序中第 j 种类型的第 k 个工件开始加工和结束加工时间模型为

$$T_{(1,j,k)B}^{lE} = \begin{cases} T_{(1,j,k-1)E}^{lE}, & 1 \leq j \leq g, 2 \leq k \leq n_j; \\ T_{(1,j-1,n_{j-1})E}^{lE}, & 1 \leq j \leq g, k = 1; \end{cases} \quad (8)$$

$$T_{(1,j,k)E}^{lE} = T_{(1,j,k)B}^{lE} + t_{1,j}; \quad 1 \leq j \leq g, 1 \leq k \leq n_j. \quad (9)$$

式中规定 $T_{(1,1,1)B}^{lE} = 0$ 。

3)第 $(i+1)$ 道工艺工序中第 j 种类型的第 k 个工件开始加工和结束加工时间模型为

$$T_{(i+1,g,n_g)E}^{lE} = T_{(i,g,n_g)E}^{lE} + \Delta t_{(i,i+1)}; \quad (10)$$

$$T_{(i+1,j,k)B}^{lE} = T_{(i+1,j,k)E}^{lE} - t_{i+1,j}, \quad 1 \leq i \leq m-1, 1 \leq j \leq g, 1 \leq k \leq n_j; \quad (11)$$

$$T_{(i+1,j,k)E}^{lE} = T_{(i+1,j,k+1)E}^{lE} - t_{i+1,j}, \quad 1 \leq i \leq m-1, 1 \leq j \leq g, 1 \leq k \leq n_j - 1; \quad (12)$$

$$T_{(i+1,j-1,n_j)E}^{lE} = T_{(i+1,j,1)B}^{lE}, \quad 1 \leq i \leq m-1, 2 \leq j \leq g. \quad (13)$$

4)搬运时间优化前,第 $(i-1 \rightarrow i, 2 \leq i \leq m)$ 道工艺工序之间的搬运工序的开始搬运和结束搬运时间模型为

$$T_{(i-1 \rightarrow i,j,k)B}^{lE} = T_{(i-1,j,k)E}^{lE} \\ T_{(i-1 \rightarrow i,j,k)E}^{lE} = T_{(i-1 \rightarrow i,j,k)B}^{lE} + T_{(i-1,i)}, \quad 2 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq g, 1 \leq k \leq n_j. \quad (14)$$

(2)平行顺序移动模式的生产周期。

$$T_{\text{平顺}} = T_{(m,g,n_g)E}^{lE}. \quad (15)$$

3.2 开始与结束搬运时间优化模型

经分析可知:平行移动模式和并行顺序移动模式的开始搬运与结束搬运时间优化模型的算法流程相同,只需调整两种不同移动模式的开始加工时间和优化前的结束搬运时间数据即可。平行移动模式和并行顺序移动模式的开始搬运与结束搬运时间优化模型的求解流程如图 1 所示。

其中: i 为工艺工序或运输工序的序号, j 为不同类型批量工件在某道工艺工序中的第 j 次加工或在某道运输工序中的第 j 次搬运, $T_{(i,j)EB}^T, T_{(i,j)EE}^T, T_{(i,j)LB}^T$ 和 $T_{(i,j)LE}^T$ 分别为优化后的第 i 道运输工序中第 j 次搬运的最早开始搬运时间、最早结束搬运时间、最晚开始搬运时间和最晚结束搬运时间, $T_{(i+1,j)B}^T$ 为不同类型批量工件在第 $(i+1)$ 道工艺工序中的第 j 次开始加工时间, $T_{(i,k)E}^T$ 为优化前第 i 道运输工序中的第 k 次结束搬运时间, $T_{\text{slack}(i,j)}$ 为优化后第 i 道运输工序中第 j 次搬运的松弛时间, $tt(i)$ 为第 i 道运输工序的搬运时间, $PerN_{(i,j)}$ 为第 i 道运输工序中第 j 次搬运的工件个数, N_p 为某次搬运的工件个数, $SumN$ 为某运输工序已经完成搬运的工件个数, $bn_{(i)}$ 为第 i 道运输工序中工件的搬运次数, $Perbn$ 为某道运输工序中工件的搬运次数。

4 加工设备停机次数分析

在顺序移动模式和并行顺序移动模式中,工件在制造过程中加工设备无停机。在平行移动模式

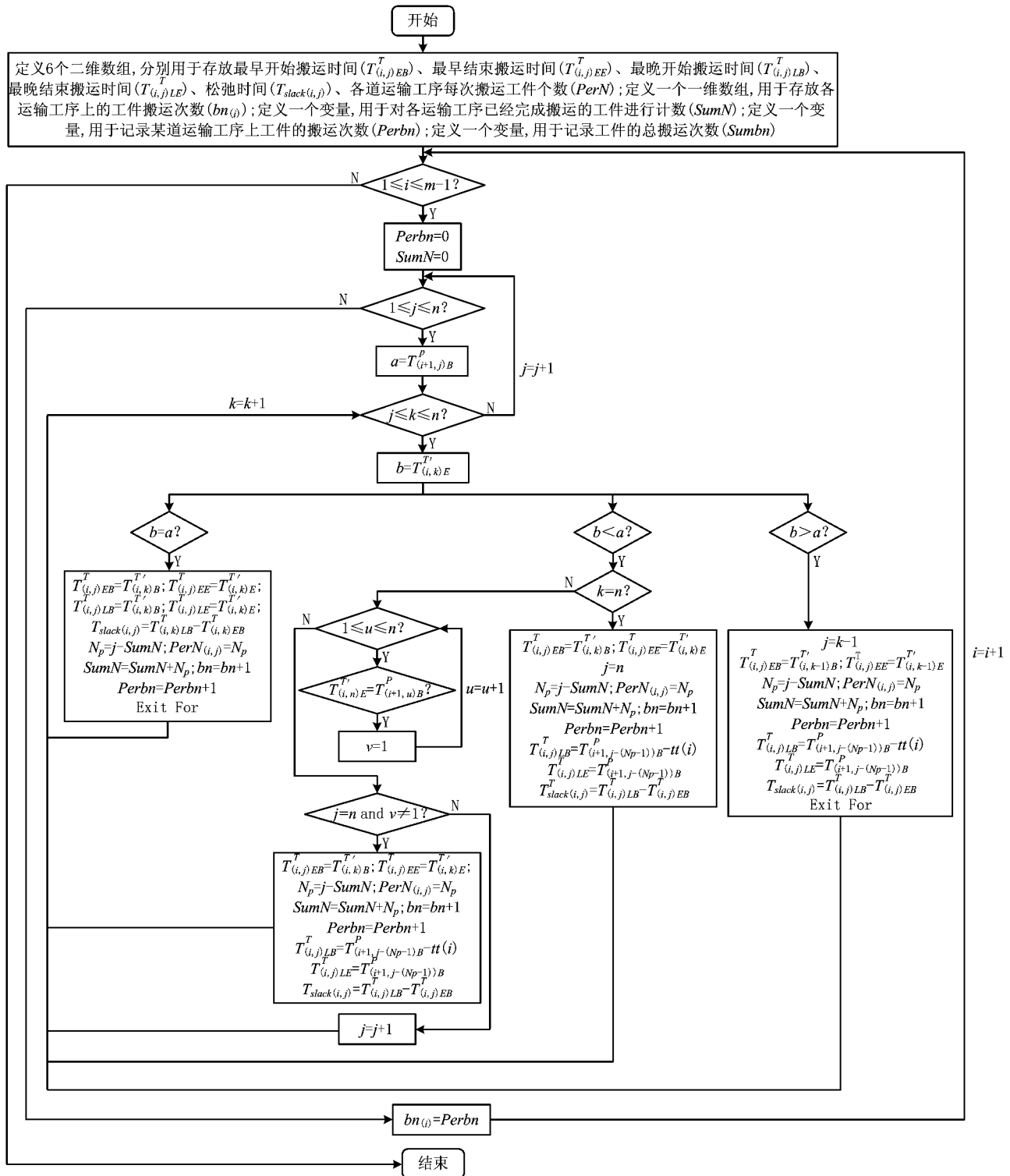


图1 开始与结束搬运时间优化模型的求解流程

中,当第 i 道工艺工序中第 $j+1(1 \leq j \leq n-1)$ 个工件的开加工时间不等于第 j 个工件的结束加工时间,即 $TPB(i, j+1) \neq TPE(i, j)$ 时,第 i 道工艺工序中的加工设备停机一次。平行移动模式中的加工设备停机次数算法流程如图 2 所示。

5 系统设计目标和处理流程分析

5.1 系统设计目标

设计该系统的目标主要包括:①计算不同类型批量工件的生产周期;②计算工件在 $(m-1)$ 道运输

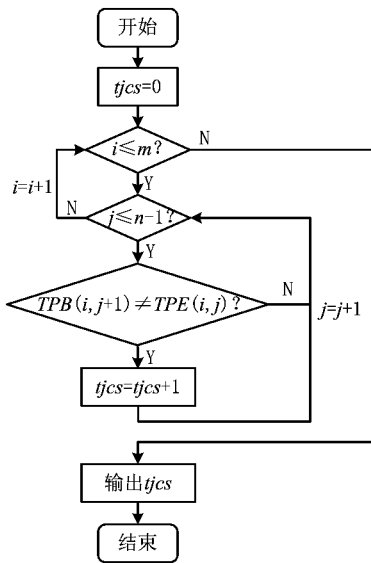


图2 平行移动模式中的加工设备停机次数算法

工序中的总搬运次数和任意运输工序中的搬运次数；③计算平行移动模式中加工设备的停机次数；④计算各道工艺工序中各个工件的开始加工时间和结束加工时间；⑤计算运输工序中每次搬运的工件个数；⑥计算每个运输工序中各次搬运的时间；⑦自动生成不同作业组织模式的不同类型批量工件的加工

和搬运甘特图。

5.2 系统处理流程

按照系统设计的目标,结合程序求解特性设计该系统的处理流程,如图 3 所示。

6 全局优化算法分析与设计

由于顺序移动模式中不同类型批量工件在第 $(m-1)$ 道运输工序中共需顺序搬运 $(m-1)$ 次,只要投入 1 台搬运设备即可,对顺序移动模式所需搬运设备情况无法再进行优化。因此,只需设计平行移动和平行顺序移动两种模式的运输工序所需搬运设备情况的全局优化算法。全局优化算法的求解目标是希望所有运输工序所需搬运设备的投入数量能够达到最小。经分析可知:平行移动模式和平行顺序移动模式的运输工序所需搬运设备情况的全局优化算法的处理步骤相同,只需调整两种不同作业组织模式的某次搬运的开始时间数据即可。因此,以两种不同作业组织模式各自运输工序的搬运时间模型计算出的某次搬运的开始时间、运输工序的搬运时间等为已知数据,可建立平行移动和平行顺序移动模式运输工序所需搬运设备情况的全局优化算法,具体求解步骤如下:

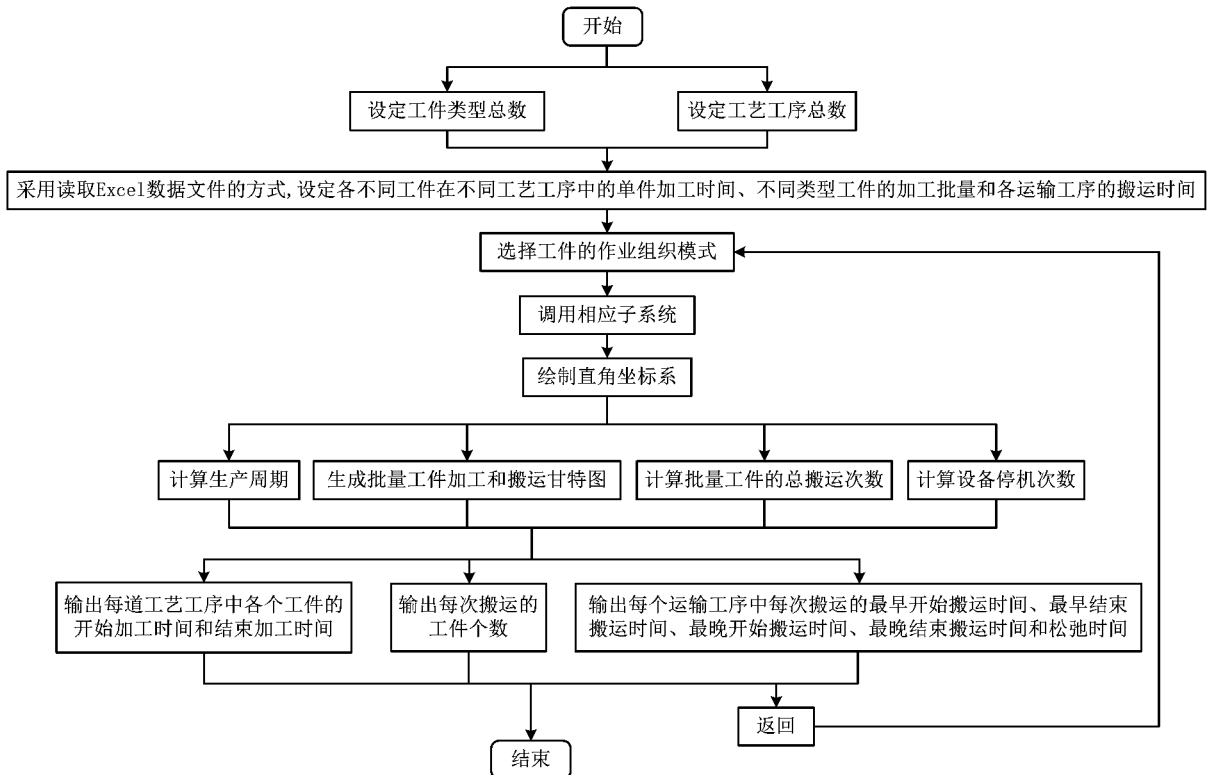


图3 带搬运时间的混流制造系统批量加工模式系统处理流程

步骤 1 从未开始进行搬运的运输工序中找出最小的最早开始搬运时间,并记录相应的运输工序编号,将其赋值给变量 k_{\min} ,同时记录 $t_{k_{\min}}^{\text{最早开始搬运时间}}$ 和 $t_{k_{\min}}^{\text{最晚开始搬运时间}}$;若未开始进行搬运的运输工序中的最早开始搬运时间相等,则找出最小的最晚开始搬运时间,并记录相应的运输工序编号,将其赋值给变量 k_{\min} ,同时记录 $t_{k_{\min}}^{\text{最早开始搬运时间}}$ 和 $t_{k_{\min}}^{\text{最晚开始搬运时间}}$;若未开始进行搬运的运输工序中的最早开始搬运时间相等且最晚开始搬运时间也相等,则找出较小的运输工序编号,将其赋值给变量 k_{\min} ,同时记录 $t_{k_{\min}}^{\text{最早开始搬运时间}}$ 和 $t_{k_{\min}}^{\text{最晚开始搬运时间}}$ 。

步骤 2 若最小的最早开始搬运时间 $t_{k_{\min}}^{\text{最早开始搬运时间}}$ 是第 1 道运输工序的第 1 次搬运,则投入一台新搬运设备,令 $i=1, j_i=1$,该台搬运设备投入并开始搬运的时间为 $t_{(i,j_i)}^{\text{开始搬运}} = T_{(1,1)EB}^T$,该台设备结束本次搬运的时间为 $t_{(i,j_i)}^{\text{结束搬运}} = t_{(i,j_i)}^{\text{开始搬运}} + t_{k_{\min}}^{\text{运输工序}}$,令 $j_i = j_i + 1$;否则,判断已有的哪台搬运设备可用于本次搬运,若无设备可用则新投入一台搬运设备,若有搬运设备可用则选择 $t_{(i,j_i)}^{\text{可用}}$ 最小的搬运设备完成本次搬运。其中: $t_{(i,j_i)}^{\text{开始搬运}}$ 和 $t_{(i,j_i)}^{\text{结束搬运}}$ 分别表示第 i 台搬运设备的第 j 次开始搬运时间和结束搬运时间; $T_{(1,1)EB}^T$ 为第 1 个运输工序第 1 次搬运的最早开始搬运时间; $t_{k_{\min}}^{\text{运输工序}}$ 为第 k_{\min} 道运输工序的搬运时间; j_i 为第 i 台搬运设备的第 j 次搬运; $t_{(i,j_i)}^{\text{可用}}$ 为第 i 台搬运设备在第 j 次搬运中的最早可用搬运时间; $t_{(p,p')}^{\text{转移时间}}$ 为搬运设备从第 p 道工艺工序向第 p' 道工艺工序的转移时间。

步骤 3 重复步骤 1 和 2,直到运输工序中的所有搬运都结束,此时输出变量 i ,即为全局优化算法计算出的运输工序所需搬运设备的总数量。

其中,判断已有搬运设备是否可用于某次搬运的规则如下:

- (1) 判断已有第 i' ($1 \leq i' \leq i$) 台搬运设备所处的工艺工序位置,将位置信息赋值给变量 p_i 。
- (2) 判断某次搬运任务所处的工艺工序位置,将位置信息赋值给变量 p' 。
- (3) 计算已有搬运设备可用于某次搬运任务的投入并开始搬运的时间, $t_{(i',j_i')}^{\text{可用}} = t_{(i',j_i'-1)}^{\text{结束搬运}} + t_{(p_i,p')}^{\text{转移时间}}$ 。
- (4) 若 $t_{(i',j_i')}^{\text{可用}} > t_{k_{\min}}^{\text{最晚开始搬运时间}}$ 时无设备可用,则需要投入一台新搬运设备,令 $i = i + 1, j_i = 1, t_{(i,j_i)}^{\text{开始搬运}} = t_{k_{\min}}^{\text{最早开始搬运时间}}, t_{(i,j_i)}^{\text{结束搬运}} = t_{(i,j_i)}^{\text{开始搬运}} + t_{k_{\min}}^{\text{运输工序}}$,令 $j_i = j_i + 1$; 否则,选择 $t_{(i',j_i')}^{\text{可用}}$ 最小的设备完成本次搬运,若 $t_{(i',j_i')}^{\text{可用}}$ 相等,则选择 i' 小的搬运设备完成本次搬运。

用已有的第 i' 台搬运设备完成第 j_i 次搬运任务的规则如下:

- (1) 当 $t_{(i',j_i')}^{\text{可用}} \leq t_{k_{\min}}^{\text{最早开始搬运时间}}$ 时, $t_{(i',j_i')}^{\text{开始搬运}} = t_{k_{\min}}^{\text{最早开始搬运时间}}, t_{(i',j_i')}^{\text{结束搬运}} = t_{(i',j_i')}^{\text{开始搬运}} + t_{k_{\min}}^{\text{运输工序}}$,令 $j_i' = j_i' + 1$ 。
- (2) 当 $t_{k_{\min}}^{\text{最早开始搬运时间}} < t_{(i',j_i')}^{\text{可用}} \leq t_{k_{\min}}^{\text{最晚开始搬运时间}}$ 时, $t_{(i',j_i')}^{\text{开始搬运}} = t_{(i',j_i')}^{\text{可用}}, t_{(i',j_i')}^{\text{结束搬运}} = t_{(i',j_i')}^{\text{开始搬运}} + t_{k_{\min}}^{\text{运输工序}}$,令 $j_i' = j_i' + 1$ 。

7 数值实例与结果分析

7.1 数值实例

某混流制造企业接到一份订单,要求该企业生产 4 种不同类型的工件,其加工批量集合 $N = \{4, 5, 3, 2\}$,且需要在 $[170 \text{ min}, 260 \text{ min}]$ 时间范围内完成制造。该批零件在各工艺工序中的单件加工时间矩阵 T^P 和搬运设备在各工艺工序之间进行转移的时间矩阵 T^T 如下(时间单位: min):

$$T^P = \begin{bmatrix} 4 & 7 & 6 & 3 \\ 5 & 13 & 10 & 8 \\ 9 & 7 & 12 & 6 \\ 3 & 2 & 7 & 4 \\ 10 & 12 & 6 & 9 \end{bmatrix};$$

$$T^T = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 3 & 4 & 2 \\ 2 & 0 & 3 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 0 & 2 & 3 \\ 4 & 2 & 2 & 0 & 1 \\ 2 & 2 & 3 & 1 & 0 \end{bmatrix}。$$

下面对该订单的作业组织模式选择与工件排序方案的确定、工件最优排序方案的相关信息进行分析。

7.2 各作业组织模式的有效解分析

利用本文设计的“带搬运时间的混流制造系统批量加工模式系统”,可求解该订单加工任务不同作业组织模式中所有工件排序方案所对应的生产周期、工件搬运次数和加工设备停机次数的信息。将三种作业组织模式的不同工件排序方案对应的信息绘制成三维颈状图,如图 4 所示。

经过对不同作业组织模式中所有工件排序方案的相关信息进行分析可知,该订单加工任务不同作业组织模式的有效解为 7 个,具体信息如表 1 所示。

7.3 作业组织模式和工件排序方案决策分析

结合表 1 信息可知,使目标 1(式(1))达到最小且满足约束 1(式(6))的作业组织模式是平行顺序移

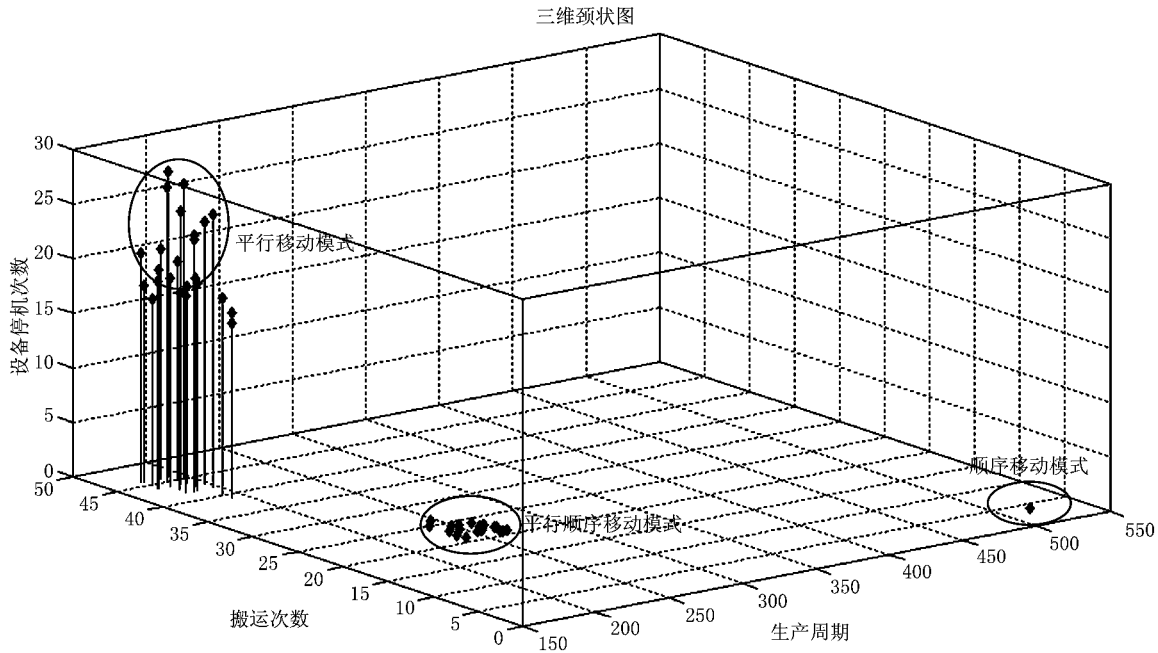


图4 不同作业组织模式中所有工件排序方案的三维颈状图

表 1 各作业组织模式的有效解信息

加工设备 停机次数	搬运 次数	生产周期 /min	工件排序 方案	作业组织模式
17	45	174	{1,4,3,2}	平行移动模式
16	39	191	{3,4,1,2}	
19	44	171	{4,1,2,3}	
18	42	178	{4,1,3,2}	
0	21	240	{1,4,3,2}	平行顺序移动模式
0	21	240	{4,1,3,2}	
0	4	520	任意排序方案	顺序移动模式

动模式,此时的工件排序方案有{1,4,3,2}和{4,1,3,2}两种。

使目标 2(式(2))达到最小且满足约束 1(式(6))的工件排序方案有{1,4,3,2}和{4,1,3,2}两种。

为了进一步确定到底采用平行顺序移动模式中的哪种工件排序方案,还需要进一步分析这两种工件排序方案的搬运设备投入情况,选择搬运设备投入情况较优的工件排序方案作为最优工件排序方案。工件排序方案{1,4,3,2}和{4,1,3,2}对应的搬运设备投入情况和各台搬运设备的搬运次数信息分别如表 2 和表 3 所示。

由表 2 和表 3 可知:平行顺序移动模式中的两种工件排序方案{1,4,3,2}和{4,1,3,2}都能满足目标 3(式(3)),即两种工件排序方案都能使所需搬运设备数量达到最小的两台。

使目标 4(式(4))达到最小的工件排序方案只有一个,即{4,1,3,2}。因此,在满足两台搬运设备所承担的工作负荷尽量均衡的前提下,选择工件排序方案{4,1,3,2}为最优方案。

表 2 两种工件排序方案的搬运设备投入情况

项目	工件排序方案 {1,4,3,2}	工件排序方案 {4,1,3,2}
投入搬运设备总数量/台	2	2
投入第 1 台设备的时间/min	4	3
投入第 2 台设备的时间/min	112	22
投入第 1 台设备的工艺工序	工艺工序 1	工艺工序 1
投入第 2 台设备的工艺工序	工艺工序 4	工艺工序 1

表 3 两种工件排序方案各台搬运设备的搬运次数信息

搬运设备 编号	运输工序 编号	工件排序方案的搬运次数	
		{1,4,3,2}	{4,1,3,2}
第 1 台 搬运 设备	1	7	2
	2	5	6
	3	2	2
	4	3	2
合计		17	12
第 2 台 搬运 设备	1	0	4
	2	1	1
	3	2	2
	4	1	2
合计		4	9

7.4 工件最优排序方案的其他详细信息分析

工件最优排序方案 {4, 1, 3, 2} 的加工与搬运甘特图如图 5 所示。其中黑色边框的空矩形长度代表工艺工序的加工时间, 浅灰色和深灰色实矩形长度分别表示最早和最晚搬运的起止时间。

由带搬运时间的混流制造系统批量加工模式系统计算出来的工件最优排序方案各道工艺工序中各个工件的开始加工时间矩阵为 T_B^P 、结束加工时间矩阵为 T_E^P 、各个运输工序每次搬运工件个数矩阵为 N 、搬运次数列向量为 BN 、各个运输工序各次搬运时间矩阵为 $HPT_1 \sim HPT_4$ (其中, 第 1 行表示各次的最早开始搬运时间, 第 2 行表示各次的最早结束搬运时间、第 3 行表示各次的最晚开始搬运时间、第 4 行表示各次的最晚结束搬运时间、第 5 行表示松弛时间)。

行表示各次的最晚结束搬运时间、第 5 行表示松弛时间)。

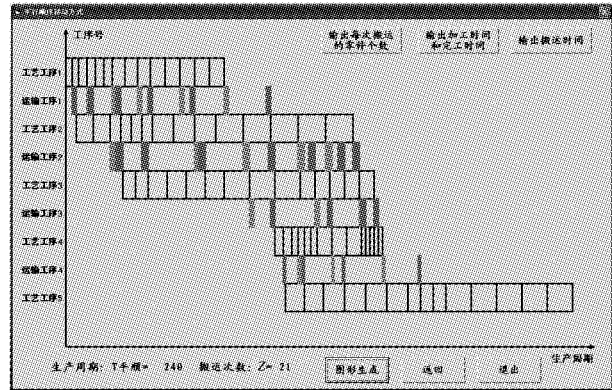


图5 工件最优排序方案 {4, 1, 3, 2} 的加工与搬运甘特图

$$T_B^P = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 6 & 10 & 14 & 18 & 22 & 28 & 34 & 40 & 47 & 54 & 61 & 68 \\ 5 & 13 & 21 & 26 & 31 & 36 & 41 & 51 & 61 & 71 & 84 & 97 & 110 & 123 \\ 27 & 33 & 39 & 48 & 57 & 66 & 75 & 87 & 99 & 111 & 118 & 125 & 132 & 139 \\ 99 & 103 & 107 & 110 & 113 & 116 & 119 & 126 & 133 & 140 & 142 & 144 & 146 & 148 \\ 104 & 113 & 122 & 132 & 142 & 152 & 162 & 168 & 174 & 180 & 192 & 204 & 216 & 228 \end{bmatrix};$$

$$T_E^P = \begin{bmatrix} 3 & 6 & 10 & 14 & 18 & 22 & 28 & 34 & 40 & 47 & 54 & 61 & 68 & 75 \\ 13 & 21 & 26 & 31 & 36 & 41 & 51 & 61 & 71 & 84 & 97 & 110 & 123 & 136 \\ 33 & 39 & 48 & 57 & 66 & 75 & 87 & 99 & 111 & 118 & 125 & 132 & 139 & 146 \\ 103 & 107 & 110 & 113 & 116 & 119 & 126 & 133 & 140 & 142 & 144 & 146 & 148 & 150 \\ 113 & 122 & 132 & 142 & 152 & 162 & 168 & 174 & 180 & 192 & 204 & 216 & 228 & 240 \end{bmatrix};$$

$$N = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 3 & 0 & 2 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 3 & 0 & 2 & 0 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 3 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 \end{bmatrix}; BN = \begin{bmatrix} 6 \\ 7 \\ 4 \\ 4 \end{bmatrix};$$

$$HPT_1 = \begin{bmatrix} 3 & 10 & 22 & 34 & 54 & 75 \\ 5 & 12 & 24 & 36 & 56 & 77 \\ 3 & 11 & 24 & 39 & 59 & 95 \\ 5 & 13 & 26 & 41 & 61 & 97 \\ 0 & 1 & 2 & 5 & 5 & 20 \end{bmatrix}; HPT_2 = \begin{bmatrix} 21 & 36 & 61 & 84 & 110 & 123 & 136 \\ 24 & 39 & 64 & 87 & 113 & 126 & 139 \\ 24 & 36 & 63 & 96 & 115 & 129 & 136 \\ 27 & 39 & 66 & 99 & 118 & 132 & 139 \\ 3 & 0 & 2 & 12 & 5 & 6 & 0 \end{bmatrix};$$

$$HPT_3 = \begin{bmatrix} 87 & 118 & 139 & 146 \\ 89 & 120 & 141 & 148 \\ 97 & 124 & 140 & 146 \\ 99 & 126 & 142 & 148 \\ 10 & 6 & 1 & 0 \end{bmatrix}; HPT_4 = \begin{bmatrix} 103 & 110 & 126 & 150 \\ 104 & 111 & 127 & 151 \\ 103 & 112 & 131 & 167 \\ 104 & 113 & 132 & 168 \\ 0 & 2 & 5 & 17 \end{bmatrix}.$$

7.5 两类优化结果的分析与比较

以运输工序的最早或最晚开始搬运时间和运输工序的搬运时间等数据为基础, 采用笔者在《考虑搬运时间的多品种、小批量混流制造系统批量加工模式的优化与资源调度》中的设计互助组优化算法计

算各互助组所需搬运设备的数量, 使用本文设计的全局优化算法计算运输工序所需搬运设备的总数量。在该订单加工任务的平行移动模式中, 运输工序所需搬运设备情况的全局优化结果与互助组优化结果比较的详细信息如表 4 所示。

表 4 运输工序所需搬运设备情况全局优化结果与互助组优化结果比较

运输工序	所需搬运设备数量 (全局优化)/台	互助组	所需搬运设备情况 (互助组优化)/台
1	2	1	搬运设备 1 和 2
2			
3		2	搬运设备 1
4			
合计	2	合计	2

(1) 运输工序所需搬运设备情况的全局优化结果分析

1) 第 3 min 和 22 min 时, 需要在第 1 道工艺工序上各投入 1 台搬运设备。

2) 第 1 台搬运设备共搬运 12 次, 其中在第 1~4 道运输工序中分别搬运 2, 6, 2 和 2 次; 第 2 台搬运设备共搬运 9 次, 其中在第 1~4 道运输工序中分别搬运 4, 1, 2 和 2 次。

(2) 运输工序所需搬运设备情况的互助组优化结果分析

在第 1 道运输工序和第 2 道运输工序组成的第 1 个互助组中, 需要分别在第 1 道工艺工序的第 3 min 时和第 22 min 时投入搬运设备 1 和搬运设备 2。其中, 搬运设备 1 在第 1 个互助组中共搬运 6 次, 之后转入由第 3 道运输工序和第 4 道运输工序所组成的第 2 个互助组中完成相应的搬运任务, 在第 2 个互助组中共搬运 8 次, 共计搬运 14 次; 搬运设备 2 在第 1 个互助组中共搬运 7 次。

(3) 互助组优化结果与全局优化结果比较

与互助组优化算法计算出的 2 台搬运设备相比, 利用全局优化算法计算出的所需搬运设备数量也为 2 台; 但全局优化算法计算出的搬运设备搬运次数均衡程度为 1.5, 比互助组优化算法计算出的搬运设备搬运次数均衡程度好(互助组优化算法为 3.5)。

8 结束语

本文对考虑搬运时间的多品种小批量混流制造系统作业组织模式选择和工件排序集成决策问题进行了深入研究, 取得如下研究成果:

(1) 为考虑搬运时间的混流制造系统中的批量零件以平行顺序移动模式完成制造建立了加工时间模型, 并设计开始与结束搬运时间优化模型的求解流程。

(2) 设计了运输工序所需搬运设备情况的全局优化算法。该算法是在已经优化各道运输工序的搬运时间和搬运次数的基础上, 进一步优化某种工件排序方案所需要的搬运设备数量, 并对搬运设备进行有效调度。

(3) 设计了平行移动模式的加工设备停机次数算法。该算法可计算某种工件排序方案在平行移动模式中所有工艺工序上的加工设备的总停机次数。

(4) 设计了带搬运时间的混流制造系统批量加工模式系统。该系统可以自动生成不同作业组织模式中某种工件排序方案的加工和搬运甘特图, 并能有效地计算用于指导生产的各类信息。

(5) 建立了基于分层序列法的多目标决策模型。利用该多目标决策模型可以选择作业组织模式, 并确定工件的最优排序方案。

作为本文的后续工作, 需要进一步研究的问题有: 考虑设备调整时间的多品种、小批量混流制造系统, 建立该类型制造系统的加工与搬运时间模型; 以及工件装载到搬运工具上的时间与搬运时间分离的情况。

参考文献:

- [1] CHEN Yanhui, ZHOU Dejian, YUAN Haiying, et al. Min-max partition modularity method of complex product [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(1): 9-14(in Chinese). [湛炎辉, 周德俭, 袁海英, 等. 复杂产品的最小最大划分模块化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(1): 9-14.]
- [2] ZHENG Yongqian, WANG Yongsheng. An immunity particle swarm sequencing algorithm for mixed-model assembly lines [J]. Industrial Engineering and Management, 2011, 16(4): 16-20(in Chinese). [郑永前, 王永生. 免疫粒子群算法在混流装配线排序中的应用[J]. 工业工程与管理, 2011, 16(4): 16-20.]
- [3] ZHAO Xiaosong, WU Xia, HE Zhen. Complexity optimization of mixed-model assembly systems based on human factors [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(6): 1256-1262(in Chinese). [赵小松, 吴 瑕, 何 桢. 基于人因的混流装配系统复杂性优化[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(6): 1256-1262.]
- [4] XIA Chunyan, FAN Shuhai, WANG Yuqian. Reserch on re-layout of mixed pduction workshop [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(6): 263-265(in Chinese). [夏春燕, 樊树海, 王宇乾. 混流生产车间布局重构设计研究[J]. 机械设计与制造, 2012(6): 263-265.]
- [5] WANG Jin, FAN Shuhai, CHEN Jinlong. A sequential matrix method for mixed production shop layout [J]. Industrial Engineering Journal, 2010, 13(3): 71-74(in Chinese). [王 进, 樊树海, 陈金龙. 混流生产线车间布置的顺序矩阵方法[J]. 工业工程, 2010, 13(3): 71-74.]

- [6] YANG Caijun, GAO Jie, SUN Linyan. Multi-objective mixed-model assembly line rebalancing: Model and algorithm[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2013, 33(8): 1956-1964(in Chinese). [杨才君, 高杰, 孙林岩. 多目标混流装配线再平衡模型与算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(8): 1956-1964.]
- [7] GAMBERINI R, GEBENNINI E, GRASSI A, et al. A multiple single-pass heuristic algorithm solving the stochastic assembly line rebalancing problem[J]. *International Journal of Production Research*, 2009, 47(8): 2141-2164.
- [8] JIA Guozhu, KONG Jili. System design of batch processing modes in processing-assembly enterprise with transit time considered[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2013, 16(2): 104-111(in Chinese). [贾国柱, 孔继利. 考虑运输时间的加工装配型企业批量加工模式系统设计[J]. *工业工程*, 2013, 16(2): 104-111.]
- [9] YE T F. Analysis on multi-stage lot streaming; the effect of transfer[J]. *Computer & Industrial Engineering*, 2012, 62(4): 1046-1054.
- [10] KONG Jili, JIA Guozhu, LUAN Shichao, et al. Batches processing modes for manual operating system considering learning rate and handling time[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2013, 33(8): 1965-1974(in Chinese). [孔继利, 贾国柱, 栾世超, 等. 考虑学习率和搬运时间的人工作业系统批量加工模式研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(8): 1965-1974.]
- [11] ZHANG Bixi, GUAN Yingying, SONG Jing. Optimization of batches processing system considering modes for manual operating learning rate[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2010, 30(4): 622-627(in Chinese). [张毕西, 关迎莹, 宋静. 考虑学习率的人工作业系统批量加工模式优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(4): 622-627.]
- [12] LI J, PAN Q, XIE S, et al. A hybrid artificial bee colony algorithm for flexible job shop scheduling problems[J]. *International Journal of Computers Communications & Control*, 2011, 6(2): 286-296.
- [13] LI Xiulin, LU Jiansha, CHAI Guozhong, et al. Modified artificial bee colony optimization for mixed assembly line sequencing problem[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(12): 2599-2609(in Chinese). [李修琳, 鲁建厦, 柴国钟, 等. 混流装配排序问题的改进人工蜂群优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(12): 2599-2609.]
- [14] JOHNSON D J. A framework for reducing manufacturing throughput time[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2003, 22(4): 283-298.
- [15] TU Yuanzhi, SUN Shudong, LI Qinghe, et al. Cycle time analysis for air plane part production based on rough clustering[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2012, 15(4): 119-123(in Chinese). [涂袁志, 孙树栋, 李庆贺, 等. 基于粗糙聚类的航空制造企业零件生产周期分析[J]. *工业工程*, 2012, 15(4): 119-123.]
- [16] ZENG Qiang, YANG Yu, CHENG Bo, et al. Research on multi-objective optimization for equal batch splitting FJSP under parallel and sequence shift mode[J]. *Journal of System Simulation*, 2012, 24(5): 1046-1052(in Chinese). [曾强, 杨育, 程博, 等. 平顺移动下等量分批 FJSP 多目标优化研究[J]. *系统仿真学报*, 2012, 24(5): 1046-1052.]
- [17] LIU Y C, FANG K T, LIN B M T. A branch-and-bound algorithm for makespan minimization in differentiation flow shops[J]. *Engineering Optimization*, 2013, 45(12): 1397-1408.
- [18] ALLAHVERDI A, AYDILEK H. Algorithms for no-wait flowshops with total completion time subject to makespan[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(9-12): 2237-2251.
- [19] HUANG T C, LIN B M T. Batch scheduling in differentiation flow shops for makespan minimisation[J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(17): 5073-5082.
- [20] RUIZ-TORRES A J, PALETTA G, PÉREZ E. Parallel machine scheduling to minimize the makespan with sequence dependent deteriorating effects[J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(8): 2051-2061.
- [21] ZHU H L. A two stage scheduling with transportation and batching[J]. *Information Processing Letters*, 2012, 112(19): 728-731.
- [22] MORADI H, ZANDIEH M, MAHDAVI I. Non-dominated ranked genetic algorithm for a multi-objective mixed-model assembly line sequencing problem[J]. *International Journal of Production Research*, 2011, 49(12): 3479-3499.
- [23] BAUTISTA J, CANO A. Solving mixed model sequencing problem in assembly lines with serial workstations with work overload minimisation and interruption rules[J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 210(3): 495-513.
- [24] LIU Qiong, WANG Wenxi, ZHANG Chaoyong, et al. Advanced scatter search approach for sequencing problems in mixed model assembly lines[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(4): 776-782(in Chinese). [刘琼, 王文玺, 张超勇, 等. 基于改进分散搜索的混流装配线排序问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(4): 776-782.]
- [25] LIU Weiqi, LIU Qiong, ZHANG Chaoyong, et al. Hybrid particle swarm optimization for multi-objective sequencing problem in mixed model assembly lines[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(12): 2590-2598(in Chinese). [刘伟琪, 刘琼, 张超勇, 等. 基于混合粒子群算法求解多目标混流装配线排序[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(12): 2590-2598.]

作者简介:

孔继利(1982—),男,天津蓟县人,北京邮电大学经济管理学院博士后,北京邮电大学自动化学院讲师,研究方向:生产与运作管理、物流工程等, E-mail: kongjili026@163.com;

贾国柱(1962—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,研究方向:生产与运作管理、流程管理。