

文章编号:1000-582X(2012)08-107-09

带柔性工艺的多品种批量生产投产计划仿真优化

曾 强¹, 沈 玲¹, 杨 育², 孙 健³

(1. 河南理工大学, 河南 焦作 454000; 2. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 3. 重庆红江机械有限责任公司, 重庆 402100)

摘 要:针对带柔性工艺的多品种批量生产系统,提出了一种基于 Witness 仿真的投产计划优化方法。描述了待研究的科学问题。针对带柔性工艺的多品种批量生产特点,设计了仿真逻辑。以 Witness 为仿真平台,构建了多品种批量生产投产计划与调度仿真模型。通过仿真试验验证了所提方法的有效性。

关键词:投产计划;仿真;优化;柔性工艺;多品种批量生产

中图分类号:C93-03; TP391

文献标志码:A

Simulation optimization for input plan of multi-type and batch production with flexible process

ZENG Qiang¹, SHEN Ling¹, YANG Yu², SUN Jian³

(1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 3. Chongqing Hongjiang Machinery Co. Ltd., Chongqing 402100, P. R. China)

Abstract: Aiming at multi-type and batch production system with flexible process, an optimization method for input plan based on Witness simulation is proposed. The scientific problem researched is described. Aiming at the characteristics of multi-type and batch production with flexible process, the simulation logic is designed. Taking Witness as simulation platform, the simulation model combining input plan with scheduling for multi-type and batch production is constructed. The effectiveness of the method is tested by simulation examination.

Key words: input plan; simulation; optimization; flexible process; multi-type and batch production

投产计划的合理性在很大程度上决定着批量生产系统的生产效率。文献[1]指出不同的产品投放策略会对制造系统性能产生不同影响。按并行工程原理,通过批量划分可实现产品各批次并行生产,有利于提高设备利用率、缩短生产周期^[2]。文献[3]研究指出生产批量与生产周期之间存在 U 型关系。

文献[4]指出平准化产品投产计划有利于提高生产效率。文献[5]指出柔性工艺有利于提高生产效率。因此,带柔性工艺的批量生产投产计划优化决策主要包括三方面内容:投产时间、投产批量、工艺路线。带柔性工艺的多品种批量生产系统是一个高度复杂的随机离散事件系统,要实现以上三方面优化决策

收稿日期:2012-02-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71071173);河南理工大学博士基金资助项目(B2011-088);河南理工大学开放实验基金项目(SKJA10060);重庆市重点科技攻关项目(2010GGB108)

作者简介:曾强(1975-),男,河南理工大学副教授,博士,主要从事工业工程、生产管理相关领域的研究,
(E-mail)zengqiang@cqu.edu.cn。

具有较高难度。投产计划的合理性需要通过生产性能指标来衡量,而生产性能指标通常通过四种方法来获得:通过实际生产过程、通过数学计算、通过优化调度算法、通过系统仿真。方法 1 属于事后处理,缺乏时效性和实用价值。方法 2 仅适用于处理确定型且逻辑关系较简单的生产系统。对于方法 3,学术界已有较多的研究,如文献[6][7][8]对批量生产柔性作业车间调度提出了优化算法,但仅适用于工序加工时间为固定值、生产环境稳定的情况;且批量生产中待调度的加工批次随着调度周期增大而大量增加,使调度算法编码过长,计算时间大大增加,因此仅适用于求解短周期调度问题。系统仿真是解决复杂随机事件系统优化的理想手段^[9,10]。该方法通过对生产调度过程进行建模和仿真,获得生产性能指标,通过对生产性能指标加以统计分析,寻找问题并及时解决;不仅适用于长周期调度问题,而且适用于加工时间不固定及生产过程不稳定的调度问题。因规则调度简单、易行^[11],所以在基于仿真的调度中多被采用。虽然文献[12][13]针对不同行业总结了 100 多条调度规则,但文献[5]研究指出对于具有柔性工艺的情况,生产效率对调度规则的敏感度低。调研发现,生产现场大多采用先到先服务和优先级相结合的混合调度规则。

综上所述,带柔性工艺的批量生产投产计划优化决策具有高度复杂性,研究并提出有效方法辅助其投产计划的科学决策具有重要意义。基于此,受文献[14]的启发,笔者提出一种基于 Witness 的投产计划仿真优化方法。基本思路如下:考虑生产中的随机因素,构建投产计划与调度相结合的综合仿真模型;模型在设定的投产计划下(包括投产时间、投产批量、工艺路线),通过先到先服务与优先级相结合的混合调度规则进行调度获得生产性能指标;决策者依据性能指标对投产计划进行改进。本文首先描述了待研究的科学问题,其次设计了仿真逻辑,再次以 Witness 为仿真平台构建了仿真模型,最后通过仿真试验分析验证了所提方法的有效性。

1 问题描述

多品种批量生产车间需对一定时间 T 内的投产计划进行优化决策。假设:1) 车间共有设备 N 台,分为 L 组,每组设备相同;2) 将 E 种产品分成 F

个加工批次,加工批次的投产时间由决策者在 T 时间段内进行安排;3) 产品具有柔性工艺路线,图 1 所示的产品具有 3 条工艺路线,分别是①-②-③-⑧、①-④-⑧、①-⑤-⑥-⑦-⑧,其中每个工序对应于一个加工设备(组),调度时可根据资源情况为各加工批次选择相同或不同的工艺路线;4) 每种产品在一天最多投入一批;5) 加工批次的调整时间、加工时间不固定,但服从某种随机分布,装卸时间计算在加工时间内;6) 设备不稳定,但其故障时间间隔和故障维修时间服从某种随机分布,设备故障时需要维修工进行维修;7) 加工批次按顺序移动方式移动;8) 车间按工作日历开工,按工种和工作任务多少,不同设备组的日工作时间可不同;9) 车间有维修工 G 人,搬运工及操作工充足;10) 加工是非抢占式的。要求:在以上假设条件下通过仿真对投产计划(包括加工批次的投产时间、投产批量、工艺路线)进行综合优化。

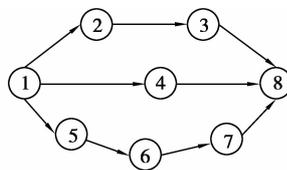


图 1 柔性工艺路线示意图

2 仿真逻辑设计

如图 2,设计的仿真逻辑如下:产品 $M_i, i=1, 2, \dots, E$ 存在柔性工艺,在仿真系统中被映射为零件 $M_{i-r}, r=1, 2, \dots, R_i$,其中 R_i 为产品 M_i 的工艺路线数。 M_i 分别有若干加工批次,若为某加工批次选定的工艺路线为 r ,则使该加工批次在仿真系统中对应于 M_{i-r} 。设备组 $D_k, k=1, 2, \dots, L$ 前各设有虚拟缓存 $B_k, k=1, 2, \dots, L$,用于加工批次在此排队。系统根据加工批次投产时间、投产批量和工艺路线,从原料库(WORLD)中取出 M_{i-r} ,同时 M_{i-r} 被赋予加工批次投产批量属性 Lot_i, M_{i-r} 按照设定的工艺路线在系统中流动。设备组 D_k 中若有设备空闲而其对应缓存 B_k 中有加工批次排队,则该设备从缓存 B_k 中按先到先服务与优先级相结合的混合调度规则取出加工批次加工。各设备按设定的分布形式发生故障并接受维修,维修时需维修工(WXG)。设备加工时会产生一定比例的废品,导致 M_{i-r} 的批量属性

Lot_i 随其流动发生变化,影响 M_{i-r} 在下道工序的加工时间。 M_{i-r} 按其工艺路线流动结束后(M_{i-r} 的最终目的地为 $PCPK_i$),通过一台虚拟分解机将其按最终实际批量 Lot_i 分解成单件产品存放于成品库(CPK_i)。仿真过程中累计各种成本以便对比分析。

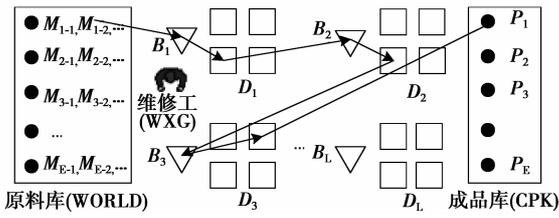


图 2 仿真逻辑

次采用的工艺路线号,若产品 M_i 第 j 天没有投产批量则将 p_{ij} 赋为 0。 o_{ij} 是产品 M_i 第 j 天的投产批次的调度优先级,规定其值越小优先级越高,若产品 M_i 第 j 天没有投产批量则将 o_{ij} 赋为空。

建立 E 台虚拟机 $TLJ_i, i=1,2,\dots,E$,如图 3。 TLJ_i 监控仿真钟,若仿真钟等于第 j 天的第一分钟,且对应的 $h_{ij} > 0$,则从数组 P 中读取对应的工艺路线号 p_{ij} ,从原料库(WORLD)取出 $M_{i-p_{ij}}$,不加工(令其 Cycle time 为 0),直接送入 $M_{i-p_{ij}}$ 的工艺路线(Route)。

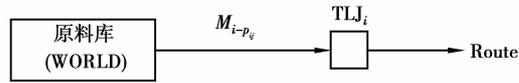


图 3 投产时间、投产批量、工艺路线、调度优先级的控制

3 仿真模型构建

3.1 投产时间、投产批量、工艺路线、调度优先级的控制

按仿真逻辑,仿真前事先指定加工批次的投产时间、投产批量、工艺路线及调度优先级,故需在仿真模型中分别对以上四个方面进行控制。为此,本文提出如下的技术思路。

建立投产批量数组 H 、工艺路线号数组 P 和调度优先级数组 O

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1T} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2T} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{E1} & h_{E2} & \dots & h_{ET} \end{bmatrix},$$

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1T} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2T} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{E1} & p_{E2} & \dots & p_{ET} \end{bmatrix},$$

$$O = \begin{bmatrix} o_{11} & o_{12} & \dots & o_{1T} \\ o_{21} & o_{22} & \dots & o_{2T} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ o_{E1} & o_{E2} & \dots & o_{ET} \end{bmatrix}.$$

其中, $h_{ij} \geq 0, p_{ij} = 0, 1, 2, \dots$ 。

h_{ij} 是产品 M_i 第 j 天的投产批量。若 $h_{ij} > 0$,表示产品 M_i 第 j 天的投产批量为 h_{ij} ;若 $h_{ij} = 0$ 则表示产品 M_i 第 j 天没有投产批量。为便于仿真,规定若 $h_{ij} > 0$,则对应加工批次的投产时间为第 j 天上班时间的第一分钟。 p_{ij} 是产品 M_i 第 j 天的投产批

建立 E 个属性变量 $Lot_i, i=1,2,\dots,E$,用于记录 E 种产品在第 j 天的投产批量,当 TLJ_i 从原料库取出 $M_{i-p_{ij}}$ 时将 h_{ij} 赋给 Lot_i 。

建立属性变量 Pr ,用于记录 $M_{i-p_{ij}}$ 的调度优先级,当 TLJ_i 从原料库取出 $M_{i-p_{ij}}$ 时将 o_{ij} 赋给 Pr , Pr 将在混合调度规则中用到,见 3.2 节。

3.2 混合调度规则的实现

先到先服务与优先级相结合的混合调度规则的含义是,当 B_k 中排队的加工批次数量大于 1 时,设备组 D_k 在加工完当前加工批次后,从 B_k 中按优先级由高到低的顺序取出下一个加工批次,若优先级相同,则按先到先服务的规则取出下一个加工批次。为实现以上混合调度规则,仿真模型中对 B_k 设计如下:

3.3 加工批次的分解

按仿真逻辑,加工批次在流动过程中因受设备加工废品率的影响使其加工批量属性值会发生变化,当加工批次走完最后一道工序时,其加工批量属性值则代表合格成品数量。为了反映出最后成品的数量,需将加工批次分解成单个零件。为实现这一目标,在仿真模型中针对每种产品 M_i 分别建立一台虚拟机 $FJJ_i, i=1,2,\dots,E$,它们监测 $PCPK_i$ 中是否有零件,一旦有零件送入,立即将其取出加以分解。对 FJJ_i 的具体设计如下。

Type: Batch
Batch Min: Batch()+1
Batch Max: Batch Min

```

From: SEQUENCE /Wait PCPKi # (1), Pi out
      of WORLD # (BATCH ())
Cycle Time: 0
To:
  IF TYPE=Pi PUSH to CPKi
  ELSE PUSH to SHIP
ENDIF

```

其中, P_i 代表产品 M_i 的单件成品, 函数 $\text{Batch}()$ 根据零件 $M_{i-p_{ij}}$ 的 TYPE 属性值, 返回对应的加工批量 Lot_i 。

3.4 废品处理

加工批次在设备上的加工时间取决于单件加工时间及加工批次的批量。由于设备在加工过程中会产生一定比例的废品, 导致加工批次在流动过程中批量发生变化, 从而引起加工批次的加工时间变化。为反映加工批量变化, 仿真模型中设计如下: 设 L_k 代表设备组 k 平均废品率, 假定实际废品率是 $[0, 2 \times L_k]$ 的均匀随机实数, 若产品 M_i 的某个加工批次在设备组 k 上加工, 则可通过式(1)更新其加工批量。

$$\text{Lot}_i = \text{Lot}_i - [(\text{Lot}_i \times \text{Uniform}(0, 2 \times L_k, r))] \quad (1)$$

式中, $\text{Uniform}()$ 是产生均匀随机实数的函数, $[]$ 表示取整操作。

3.5 生产成本的统计

决策者为加工批次选择的工艺路线不同, 一方面影响设备均衡率从而表现为生产周期或产量的变化, 另一方面可能造成生产成本的变化。决策者在安排投产计划时除了关注生产周期或产能目标外, 还可能关注生产成本指标。采用如下的方法实现生产成本的统计

1) 建立调整费率向量 \mathbf{S}_{PER} 、加工费率向量 \mathbf{C}_{PER} 和故障维修费率向量 \mathbf{M}_{PER} 。

$$\mathbf{S}_{\text{PER}} = \begin{bmatrix} \text{sper}_1 \\ \text{sper}_2 \\ \vdots \\ \text{sper}_L \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{\text{PER}} = \begin{bmatrix} \text{cper}_1 \\ \text{cper}_2 \\ \vdots \\ \text{cper}_L \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{\text{PER}} = \begin{bmatrix} \text{mper}_1 \\ \text{mper}_2 \\ \vdots \\ \text{mper}_L \end{bmatrix}。$$

2) 建立三个变量 S_{cost} 、 C_{cost} 、 M_{cost} , 用于累计全部设备组的总调整成本、总加工成本和总维修成本。

3) 累计 3 种成本。仿真过程中针对设备的活动分别累计调整成本(s_{cost})、加工成本(c_{cost})和维修成本(m_{cost})到 S_{cost} 、 C_{cost} 、 M_{cost} , 仿真结束时 S_{cost} 、 C_{cost} 、 M_{cost} 的值分别对应总调整成本、总加工成本和总维修成本。

对于 D_k 中某设备, s_{cost} 、 c_{cost} 、 m_{cost} 分别按式(2)~(4)计算。

$$s_{\text{cost}} = s_{\text{time}} \times \text{sper}_k, \quad (2)$$

$$c_{\text{cost}} = c_{\text{time}} \times \text{cper}_k, \quad (3)$$

$$m_{\text{cost}} = m_{\text{time}} \times \text{mper}_k. \quad (4)$$

其中, s_{time} 为调整时间, 按设定的随机分布随机产生; c_{time} 为批加工时间, 等于单件加工时间和加工批量之积, 而单件加工时间按设定的随机分布随机产生, 加工批量为加工批次流经当前设备时剩下的实际批量; m_{time} 是维修时间, 按设定的随机分布随机产生。3 种成本的计算和累计分别在的 D_k 的 Setup 页面中 Actions on start、General 页面中 Actions on input 及 Breakdowns 页面中的 Actions on downbreak 中进行。

3.6 工作班次的设计

按问题描述, 在同一个车间, 各设备组日工作时间可能不同, 故需为不同的设备组设计相应的工作班次。工作班次的设计需考虑法定节假日及工厂自主节假日。工作班次设计完毕后, 需将它们分别赋给相应设备组的 shift 属性。另外, 还需为维修工设置工作班次。因系统中的维修工要负责车间各种设备的维修, 为保证设备故障后能及时得到维修, 维修工的工作班次取各设备组最长的工作时间对应的工作班次。因工作班次考虑了节假日, 而在节假日期间所有设备组均不工作, 因此不允许将加工批次投产时间安排在节假日内, 为此需对产品的投产时间进行控制, 具体控制方法将在 3.8 节提及。

3.7 设备其它参数的设计

除了上面提到的参数, 还要对设备的其它参数进行设计, 如加工时间、调整时间间隔及调整时间、故障时间间隔及维修时间。这些参数需根据统计分析结果, 按其分布形式进行相应设置。

3.8 用户接口设计

为增强仿真模型的使用方便性, 采用 Excel 作为工具设计了用户接口。需通过 Excel 输入仿真系

统的参数有:产品种类数 E 、 D_k 所含设备数量、 D_k 的平均废品率 Lr_k 、 D_k 的加工时间随机数序列号 $PRN1_k$ 、 D_k 的调整时间随机数序列号 $PRN2_k$ 、 D_k 的故障时间间隔随机数序列号 $PRN3_k$ 、 D_k 的故障维修时间随机数序列号 $PRN4_k$ 、投产计划 plan、仿真时间跨度 T 。其中, $PRN1_k$ 、 $PRN2_k$ 、 $PRN3_k$ 、 $PRN4_k$ 通过 EXCEL 的 VBA 代码自动产生,通过改变它们的值可以进行多次不同的仿真以减少随机因素影响。plan 的设置如表 1 所示。其中,第 1 行代表实际日期,第 2 行代表仿真日期(天),第 3 行往下第二列往右的单元格中,第 1 个数字代表加工批次投产批量,第 2 个数字代表为加工批次选择的工艺路线号,第 3 个数字代表调度优先级,中间以“-”分割。同时采用 EXCEL 的 VBA 技术将单元格中的数字分离,得到 3 张新表 H、P、O,分别代表投产批量、工艺路线和优先级。用户改变 Plan 中单元格数值,则 H、P、O 表中数字自动更新。以上参数在 Witness 仿真模型的 Initialize actions 中通过 XLReadArray 函数读入并分别赋给仿真模型中相应参数。另外,为防止将投产时间错误安排在非工作日,在 Plan 表中将非工作日加以特别标示。

4 仿真试验分析

为验证带柔性工艺的多品种批量生产投产计划仿真优化方法的有效性,将该方法在某多品种批量生产车间(X 车间)进行了仿真试验。首先,根据 X 车间现有设施数量及布局状况、生产的产品状况,建

立了如图 4 所示的仿真模型。模型中,设备数 $N=68$,设备组数 $L=21$,维修工数 $G=2$ 。产品种类数 $E=12$,各产品分别设计有 2 条工艺路线(新工艺路线多使用新设备,工艺代号为 1,旧工艺路线多使用旧设备,工艺代号为 2)。工作班次设计了日工作 10 h 和 11 h 两种,周工作时间为 6 天,周日休息,并考虑了法定节假日。仿真时间跨度 T 取 100 d (14 4000 min)。平均废品率 Lr_k 、平均故障时间间隔 ωt_k 、平均故障维修时间 mt_k 、加工费率 $cper_k$ 、调整费率 $sper_k$ 、维修费率 $mper_k$ 、产品的工艺参数略。其次,设计了 7 种投产计划,针对每种投产计划分别独立重复仿真 5 次,将相关仿真统计数据求取平均值,并对五种投产计划仿真结果进行对比,如表 5 所示。7 种投产计划如下:

投产计划 A:不考虑时间上的均衡,均在各周周一投产,选用工艺路线 1,见表 1。投产计划 B:不考虑时间上的均衡,均在各周周一投产,选用工艺路线 2,即将表 1 中的工艺路线号变为 2。投产计划 C:考虑时间上的均衡,选用工艺路线 1,如表 2。投产计划 D:考虑时间上的均衡,选用工艺路线 2,即将表 2 中的工艺路线号变为 2。投产计划 E:考虑批量划分和时间上的均衡,选用工艺路线 1,如表 3。投产计划 F:考虑批量划分和时间上的均衡,选用工艺路线 2,即将表 3 中工艺路线号改为 2。投产计划 G:考虑批量划分、时间上的均衡,为不同批次选用不同工艺路线,如表 4。

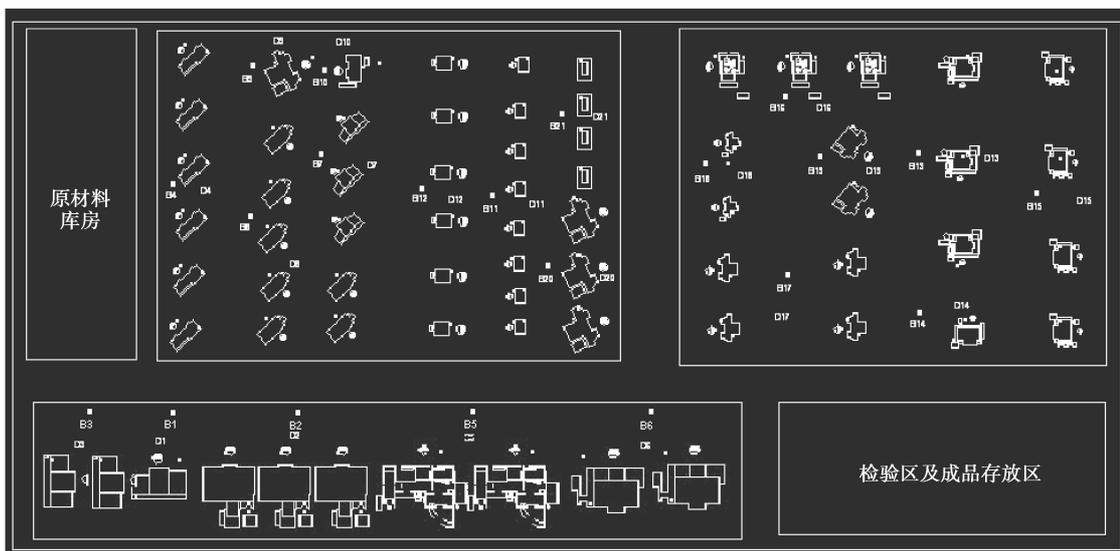


图 4 X 车间仿真模型

表 1 投产计划 A

时间 产品号	2010-1-4 1	2010-1-5 2	2010-1-6 3	2010-1-7 4	2010-1-8 5	2010-1-9 6	2010-1-10 7	...	2010-4-13 100
M ₁	200-1-1							...	
M ₂	200-1-1							...	
M ₃	300-1-1							...	
M ₄	300-1-1							...	
M ₅	300-1-1							...	
M ₆	200-1-1						周日休息	...	
M ₇	200-1-1							...	
M ₈	200-1-1							...	
M ₉	300-1-1							...	
M ₁₀	200-1-1							...	
M ₁₁	200-1-1							...	
M ₁₂	200-1-1							...	

表 2 投产计划 C

时间 产品号	2010-1-4 1	2010-1-5 2	2010-1-6 3	2010-1-7 4	2010-1-8 5	2010-1-9 6	2010-1-10 7	...	2010-4-13 100
M ₁	200-1-1							...	
M ₂		200-1-2						...	
M ₃			300-1-3					...	
M ₄				300-1-4				...	
M ₅					300-1-5			...	
M ₆	200-1-1						周日休息	...	
M ₇		200-1-2						...	
M ₈			200-1-3					...	
M ₉				300-1-4				...	
M ₁₀					200-1-5		
M ₁₁	200-1-1							...	
M ₁₂			200-1-3					...	

表 3 投产计划 E

时间 \ 产品号	2010-1-4	2010-1-5	2010-1-6	2010-1-7	2010-1-8	2010-1-9	2010-1-10	...	2010-4-13
	1	2	3	4	5	6	7	...	100
M ₁	100-1-1	100-1-1						...	
M ₂		100-1-2	100-1-2					...	
M ₃			150-1-3	150-1-3				...	
M ₄				150-1-4	150-1-4			...	
M ₅					150-1-5	150-1-5		...	
M ₆	100-1-1	100-1-1					周日休息	...	
M ₇		100-1-2	100-1-2					...	
M ₈			100-1-3	100-1-3				...	
M ₉				150-1-4	150-1-4			...	
M ₁₀					100-1-5	100-1-5	
M ₁₁	100-1-1	100-1-1						...	
M ₁₂			100-1-3	100-1-3				...	

表 4 投产计划 G

时间 \ 产品号	2010-1-4	2010-1-5	2010-1-6	2010-1-7	2010-1-8	2010-1-9	2010-1-10	...	2010-4-13
	1	2	3	4	5	6	7	...	100
M ₁	100-1-1	100-2-1						...	
M ₂		100-1-2	100-2-2					...	
M ₃			150-1-3	150-2-3				...	
M ₄				150-1-4	150-2-4			...	
M ₅					150-1-5	150-2-5		...	
M ₆	100-1-1	100-2-1					周日休息	...	
M ₇		100-1-2	100-2-2					...	
M ₈			100-1-3	100-2-3				...	
M ₉				150-1-4	150-2-4			...	
M ₁₀					100-1-5	100-2-5	
M ₁₁	100-1-1	100-1-1						...	
M ₁₂			100-2-3	100-1-3				...	

表 5 仿真结果对比

项目 方案	设备忙率 Busy/%							Avg Size/min					Avg Time/ min	总成本/ 元	产量/ 件
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₁₇	D ₁₈	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₁₇	B ₁₈			
A	87.3	85.5	40.3	40.0	78.6	19.6	7.1	2.28	0.06	0.05	2.87	0.01	37 175.9	1 007 422	22 680
B	0	71.9	85.4	51.8	40.0	84.5	0	1.04	2.36	0.11	0.04	13.13	41 425.1	971 207.6	20 453
C	86.1	83.0	43.4	36.6	77.4	20.7	7.1	1.25	0.1	0.06	2.2	0.01	35 360.9	1 010 897	23 055
D	0	68.3	84.5	50.9	39.9	82.2	0	0.05	2.49	0.28	0.03	12.0	39 465.7	963 461	20 339
E	78.8	76.8	43.3	40.0	75.8	19.9	17.4	5.19	0.17	0.12	10.07	0.04	29 625.8	1 035 770	23 348
F	0	67.5	79.0	50.9	41.3	83.5	0	0.53	9.02	0.28	0.2	24.4	31 995.9	1 016 700	22 144
G	61.2	71.1	70.1	43.1	72.9	71.3	0.12	0.62	0.95	0.13	1.7	0.94	20 895.8	1 170 866	28 324

从表 5 可见

1) C 计划与 A 计划相比,虽然二者产量基本相等,但 C 计划采用了投产时间上的均衡化,使加工批次的平均系统逗留时间(Avg Time)减少了 1 815 min (37 175.9—35 360.9)。同样, D 计划与 B 计划相比,加工批次 Avg Time 减少了 1 959.4 min (41 425.1—39 465.7)。表明投产时间均衡化可减少因设备资源冲突而使物料等待时间过长现象,有利于加速物流、减少流动资金占用量。其次, A 计划 Avg Time 小于 B 计划的 Avg Time; C 计划的 Avg Time 也小于 D 计划的 Avg Time。这是因为 A、C 计划采用的是新工艺路线,其中多使用先进设备加工,加工效率高,物料流动速度快。

2) E 计划与 C 计划相比,虽然成本上升了 24 873 元(1 035 770—1 010 897),但加工批次的 Avg Time 减少了 5 735.1 min (35 360.9—29 625.8),产量增加了 293 件(23 348—23 055); 同样, F 计划与 D 计划相比,成本上升了 53 239 元(1 016 700—963 461),加工批次的 Avg Time 减少了 7 469.8 min(39 465.7—31 995.9),产量增加了 1 805 件(22 144—20 339)。成本上升的主要原因是由于批量划分增加了调整次数和相应的调整成本;但批量划分减少了单个加工批次的加工时间,从而在一定程度上减少了其它加工批次的待机(等待此机)时间和下道工序对应设备的待料(等待此料)时间,有利于加速物流、提高设备利用率、增加产量。

3) G 计划与 E 计划、F 计划相比,成本分别上升了 135 096 元(1 170 866—1 035 770)和 154 166 元(1 170 866—1 016 700),加工批次的 Avg Time 分别减少了 8 730 min (29 625.8—20 895.8)和

11 100.1 min(31 995.9—20 895.8),产量分别增加了 4 796 件(28 324—23 348)和 6 180 件(28 324—22 144)。成本上升的主要原因是在相同的时间 T 内 G 计划完成的加工批次多于 C 计划和 D 计划,故发生的调整和加工成本相对多,因此比较总成本意义不大,但 G、E、F 的单位产品平均成本分别是 41.3 元(1 170 866/28 324)、45.9 元(1 035 770/23 348)和 44.4 元(1 016 700/22 144),其中 G 计划单位产品平均成本最低。Avg Time 减少的主要原因是同一产品的不同加工批次采用不同的工艺路线,有效避免了设备瓶颈,均衡了设备负荷,加速了物流,增加了产量。

5 结 论

投产计划的优劣在很大程度上决定了多品种批量生产系统的生产效果。带柔性工艺的多品种批量生产系统是一个高度复杂的随机离散事件系统,系统仿真是解决这类系统的理想手段。通过系统仿真能尽可能逼近生产实际,得到的生产性能指标更具有决策指导性。提出了一种带柔性工艺的多品种批量生产投产计划仿真优化方法。文中描述了待研究的科学问题,设计了仿真逻辑,构建了仿真模型,并对 X 车间进行了仿真试验。仿真试验表明,该方法可辅助决策者针对投产计划从投产时间、投产批量、工艺路线 3 个方面进行综合优化,以均衡设备负荷、解决设备瓶颈、加速物流,最终达到增加产量的目的。

参考文献:

[1] 阎艳,王国新,胡立臣,等. 制造执行中订单投放顺序

- 与工件加工批量集成决策[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(9): 773-777.
- YAN Yan, WANG Guoxin, HU Lichen, et al. Integrated decision-making of order release sequence and lot sizing for manufacturing process execution[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(9): 773-777.
- [2] 冯根尧, 颜蕾. 生产与运作管理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002.
- [3] Karmarkar U S, Kekre S, Kekre S. Lotsizing in multi-item multi-machine job shops [J]. IIE Transactions Institute of Industrial Engineers, 1985, 17 (3): 290-297.
- [4] 徐贤浩, 马士华. MC 模式下的计划平准化模型的最优算法[J]. 华中理工大学学报: 自然科学版, 2000, 28 (11): 73-77.
- XU Xianhao, MA Shihua. The optimal algorithm of the model of production smoothness based on Mass Customization[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2000, 28(11): 73-77.
- [5] 李言, 李淑娟, 郑建明, 等. 工艺设计对生产调度结果的影响[J]. 中国机械工程, 2000, 11(4): 402-405.
- LI Yan, LI Shujuan, ZHENG Jianming, et al. Influences of process planning on scheduling results [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(4): 402-405.
- [6] 鞠全勇, 朱剑英. 多目标批量生产柔性作业车间优化调度[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 148-154.
- JU Quanyong, ZHU Jianying. Multi-objective flexible job shop scheduling of batch production[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43 (8): 148-154.
- [7] 潘全科, 朱剑英. 多工艺路线的批量生产调度优化[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 36-39.
- PAN Quanke, ZHU Jianying. Optimization method for a job-shop scheduling problem with alternative machines in the batch process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(4): 36-39.
- [8] 周亚勤, 李蓓智, 杨建国. 考虑批量和辅助时间等生产工况的智能调度方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(1): 52-56.
- ZHOU Yaqin, LI Beizhi, YANG Jianguo. Intelligent scheduling algorithm for problems with batch and non cutting time [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(1): 52-56.
- [9] 顾启泰. 离散事件系统建模与仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [10] 王亚超, 马汉武. 生产物流系统建模与仿真: Witness 系统及应用[M]. 第1版. 北京: 科学出版社, 2011.
- [11] 王国新, 宁汝新, 王爱民, 等. 基于仿真的调度规则组合决策研究[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(7): 598-602.
- WANG Guoxin, NING Ruxin, WANG Aimin, et al. Combination decision problem of scheduling rules based on simulation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(7): 598-602.
- [12] Montazeri M, Van wassenhove L N. Analysis of scheduling rules for a FMS[J]. International Journal of Production Research, 1990, 28(4): 785-802.
- [13] Jayamohan M S, Rajendran C. New dispatching rules for shop scheduling: a step forward[J]. International Journal of Production Research, 2000, 38 (3): 563-586.
- [14] 杨建军, 寇益. 在线仿真系统在生产计划与调度中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(2): 215-218.
- YANG Jianjun, KOU Yi. Application of online simulation in production planning and scheduling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(2): 215-218.

(编辑 张小强)