

三层虚拟 workflows 模型的非线性制造工艺多目标优化算法研究

罗智勇¹ 王静远¹ 谢志强¹ 孙广路¹ 杨旭¹

摘要 时间、生产质量和成本是加工制造中相互制约的重要参数, 平衡此参数使制造工艺最优是一个 NP (Non-deterministic polynomial) 难题, 对此出现了许多优秀的调度方法. 然而这些方法的优化对象均为线性工艺, 对于普遍存在的非线性工艺却无法调度优化. 针对此不足, 本文以非线性工艺为优化对象提出了三层虚拟 workflow 模型 Three-VMG (Three-virtual model graph) 及其优化算法 Three-OVMG (Three-optimal virtual model graph). 该模型和算法首先建立非线性 workflow, 采用虚拟技术寻找虚拟节点进行重构, 将其改造为虚拟线性 workflow; 其次结合工艺特点对模型进行分段, 采用逆向分层串归约来实现段内最优解, 采用累积最优解来衔接各段间的值; 最后根据优化结果自顶向下完成各层资源的优化调度. 实验表明, 该过程较传统时间最小化优化调度算法具有显著的优化效果, 其性能及可操作性也能满足工程要求.

关键词 工作流, 制造工艺, 优化调度, 虚拟技术, 生产质量

引用格式 罗智勇, 王静远, 谢志强, 孙广路, 杨旭. 三层虚拟 workflow 模型的非线性制造工艺多目标优化算法研究. 自动化学报, 2022, 48(3): 896–908

DOI 10.16383/j.aas.c190090

Multi-objective Optimization Algorithm for Non-linear Manufacturing Process Based on Three-tier Virtual Workflow Model

LUO Zhi-Yong¹ WANG Jing-Yuan¹ XIE Zhi-Qiang¹ SUN Guang-Lu¹ YANG Xu¹

Abstract Time, production quality and cost are important parameters of mutual constraints in manufacturing. Balancing these parameters to make the manufacturing process more reasonable is an NP (non-deterministic polynomial) problem, and there are many excellent scheduling methods to solve this problem. However, the optimization objects of these methods are linear processes, so they can not be scheduled and optimized for the prevalent non-linear processes. To overcome the deficiency, a three-tier virtual workflow model, Three-VMG (three-virtual model graph), and its optimization algorithm, Three-OVMG (three-optimal virtual model graph), are proposed to optimize the non-linear processes in this paper. The model and algorithm first establish a non-linear workflow, using virtual technology to find virtual nodes for reconstruction, thus transforming it into virtual linear workflow. Secondly, according to the process characteristics, the model is segmented. Uses serial reduction strategy to calculate reverse hierarchical solution in each segment, and then cumulative values of solutions between segments. Finally, according to the optimization results, the optimal scheduling of resources at each level is top-down accomplished. Experiments show that the process has a significant optimization effect compared with the traditional time minimization optimal scheduling algorithms. In addition, the performance and operability of the algorithm can meet the engineering requirements.

Key words Workflow, manufacturing process, optimize scheduling, virtual technology, production quality

Citation Luo Zhi-Yong, Wang Jing-Yuan, Xie Zhi-Qiang, Sun Guang-Lu, Yang Xu. Multi-objective optimization algorithm for non-linear manufacturing process based on three-tier virtual workflow model. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(3): 896–908

伴随着第四次工业革命的步伐, 中国的制造业

收稿日期 2019-02-27 录用日期 2019-07-10

Manuscript received February 27, 2019; accepted July 10, 2019
国家自然科学基金面上项目 (61772160), 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2021F030) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61772160) and Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (LH2021F030)

本文责任编辑 鲁仁全

Recommended by Associate Editor LU Ren-Quan

1. 哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150080

1. School of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080

已经进入供给侧改革和产业升级的关键时期. 产品的制造由传统的简单线性工艺粗加工逐渐向现代的复杂非线性即反馈工艺细加工转变, 其制造过程更具复杂性、多变性和高效性等特点^[1]. 复杂产品的非线性细加工涉及生产车间、工艺设计及调度等多部门的协同控制, 其过程具有反复性, 必将产生大量的动态信息, 若不能及时优化这些信息势必会降低产品的竞争力. 提高产品的竞争力, 其核心是解决制造工艺的多目标动态优化问题. 生产时间、产品

质量和费用成本是制造工艺的重要参数, 如何动态平衡这些参数使其最优本身就是一个 NP (Non-deterministic polynomial) 难题^[2], 若增加工艺的多次反馈, 即非线性等因素, 则其优化过程将变得更加困难. “中国制造 2025” 和 “新一代人工智能” 为复杂产品非线性工艺多目标优化带来了机遇和指明了方向. 智能制造^[3] 只有在充分融合非线性生产工艺的特点和多目标要求的约束下, 将人工智能、云计算、建模仿真和优化控制等信息处理技术与具体的生产资源相结合, 开发出有效的智能优化调度算法, 才可能使制造业实现跨越式的发展, 满足时代的要求. 科学 workflow 以其具备建模仿真能力强、资源参数量化准确、智能算法及优化调度易开发等特点, 使其在智能制造领域中具有独特的优势. 因此, 研究如何利用科学 workflow 实现非线性制造工艺的多目标优化调度具有非常重要的理论和现实意义.

近些年, 将 workflow 技术应用在线性生产工艺的多目标优化调度, 国内外学者进行了一定的研究. Arabnejad 等^[4] 面向服务计算, 使用服务质量 (Quality of service, QoS) 付费的量化约束, 提出了一种异构预算约束调度算法, 该算法可以保证在用户指定的预算范围内执行成本, 并最大限度地缩短用户应用程序的执行时间, 从而较好地完成了制造工艺异构系统的多目标任务优化调度; Lv 等^[5] 在分析了产品制造工艺流程的制约关系后, 提出了一种 workflow 优化模型, 该模型可进一步缩短制造工期, 使工艺达到最优, 从而提高了产品竞争力; Mollajafari 等^[6] 为解决云制造时间成本最优问题, 利用云计算和遗传算法等技术提出了一种新的基因型到表型映射的 workflow 调度算法, 该算法利用设定的资源调度代价函数有效地解决了限定时间下成本最优的问题, 随后验证了该算法的收敛速度等性能; Koch 等^[7] 为解决医用模型制造工艺中的磨削精度和可靠性等问题, 通过分析铣削的铸造数据集与主参考数据集的映射变化规律, 提出了一种数字 workflow 铣削模型, 统计分析发现该模型可有效地解决医用模型制造的多目标动态调度问题; Kianpisheh 等^[8] 将约束 workflow 与蚁群算法相结合, 通过定义工期和成本因素变量完成了对云制造工艺的优化调度; Chirkin 等^[9] 为解决 workflow 执行时间估计中的常见问题, 提出了一种考虑 workflow 组件及其运行复杂性和随机方面的解决方案, 该方案将制造工艺参数进行双重随机表示, 并使用特性/分布函数简化了 workflow 图, 提高了多目标平衡算法的性能和优化效果; Roberts 等^[10] 为动态平衡危险复合无菌产品的生产时间、员工安全感和工作满意度等参数, 提出一种基于质量约束的辅助 workflow 系统模型, 该模型限定生产质量, 并根据员工匿名的在线调查动态修改模型参数使其达

到最优, 从而有效地解决了生产工艺多目标平衡问题; Lucas 等^[11] 通过工序上下层之间的关系建立了基于事件的工艺 workflow 模型, 通过所提出的相关公式完成了对制造系统的优化调度问题; Stender 等^[12] 为解决不同条件下制造工艺质量提升的问题, 提出了一种有限元分析 workflow 模型, 该模型可完成热条件影响下制造工艺时间质量的优化调度问题; 敬石开等^[13] 为解决云制造工艺多服务平衡可靠性等问题, 提出了一种离散粒子群智能优化 workflow 多目标调度算法, 该算法通过不断优化云制造工艺参数, 并根据智能算法的语义分析实现多服务匹配, 从而确保了云制造多服务选择的可靠性问题; 张玺等^[14] 采用人工智能理论提出了一种模糊 Petri 网 workflow 模型, 对制造车间在不确定环境下的制造工艺进行了资源重调度优化, 实现了时间和成本的动态平衡; 张萌等^[15] 为更好地解决制造工艺服务级别优选难的问题, 提出了基于 workflow 的限定区间多目标优化调度算法, 该算法将制造工艺区分成若干个区间, 根据各区间的特点使用非支配排序改进型遗传算法对其进行局部优化, 通过处处选取局部最优解完成整体优化, 从而实现多目标调度的目的.

上述研究成果对于优化线性生产工艺的多目标动态平衡具有一定的先进性. 然而, 生产工艺错综复杂, 尤其是某些工艺具有非线性特点, 即反馈生产工艺. 对于非线性工艺进行多目标多因素的优化调度, 现有的研究成果无法完成. 另一方面, 非线性制造工艺在生产企业中普遍存在, 企业急需对这类工艺进行优化调度. 本文正是为解决非线性工艺优化调度问题而展开研究的, 并在以往研究^[16-17] 的基础上, 结合非线性制造工艺特点, 考虑制造时间、质量和费用成本这些参数的制约关系, 采用虚拟技术提出一种三层虚拟 workflow 模型 Three-VMG (Three-virtual model graph) 及其优化调度算法 Three-OVMG (Three-optimal virtual model graph). 该模型和算法的主要思想是首先建立非线性生产工艺的抽象结点层、虚拟 workflow 模型层和同构转换层, 其次采用分段优化同构转换层的工艺参数, 并由顶层向底层逐级传递优化解, 最终实现工艺资源的动态平衡, 为制造企业提供科学的决策依据和改进方案. 由于模型采用虚拟技术, 将工艺中的反馈工序结点虚拟为单个结点, 从而将非线性工艺改造为虚拟线性工艺, 实现了其多目标的优化调度. 因此, 该模型可用于解决非线性即反馈制造工艺的多目标优化调度问题. 此外, 该模型的三层结构, 即底层工艺资源抽象层、中层结点工艺偏序层和顶层虚拟组合层, 每层分别代表制造企业的不同关注面, 先由下而上进行抽象优化形成决策, 再由上而下传达决策修改配置参数. 因此, 这种三层模型较其他优化模型更具有

建模清晰、高效快捷和简单明了等优势,值得推广.

1 问题描述

1.1 非线性制造工艺优化相关定义

非线性制造工艺虚拟 workflow 技术是根据非线性即反馈制约制造工艺特点将 workflow 与虚拟调度技术相结合为解决非线性制造工艺多目标动态平衡的一种综合优化调度技术. 因此, 其相关定义应体现虚拟、workflow 和非线性制造工艺优化调度等技术的特性.

定义 1. 制造工艺原始 workflow. 该 workflow 可定义为 $M(Pet, H, C, W)$, 式中, M 为 workflow 名称; Pet 为其所继承的原始 Petri 网名称, 可定义为: $Pet(B_0, E_0, P, T, L, Q)$, 式中, B_0 为 Petri 网开始状态结点; E_0 为 Petri 网终止状态结点; P 为工位结点抽象集, 表示为 $P = (p_0, p_1, \dots, p_n)$; T 为迁移结点抽象集, 表示为 $T = (t_0, t_1, \dots, t_m)$; L 为关系有向边抽象集, 表示为 $L = (l_0, l_1, \dots, l_y)$; Q 为 Petri 网中各结点间变换条件的权重值抽象集, 表示为 $Q = (q_0, q_1, \dots, q_z)$; H 为各结点被加工所消耗的时间抽象集, 表示为 $H = (h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_n)$; C 为各结点被加工所需费用的抽象集, 表示为 $C = (c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n)$; W 为各结点所加工产品的质量抽象集, 表示为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_n)$.

定义 2. 虚拟结点 s' . 表示对多个结点进行组合, 进而看作整体, 成为一个虚拟结点, 记为 $s'_{[i-j]}$ 或 $s'_{[i, j]}$, 前者表示结点 s_i 至结点 s_j 之间多结点的组合, 后者表示结点 s_i, s_j 两结点的组合, 由多个虚拟结点 s' 构成的集合称为虚拟结点集合 S' , 其中, 结点 s 可以是工位结点 p 也可以是迁移结点 t , 若结点 $s = p$, 则虚拟结点 s' 记为 p' , 若结点 $s = t$, 则虚拟结点 s' 记为 t' . 采用虚拟结点技术对非线性制造工艺进行处理, 使其变为虚拟线性制造工艺的过程称之为虚拟技术.

定义 3. 制造工艺虚拟 workflow. 该 workflow 可定义为 $VM(M, CP, P', T', Id, Od)$, 式中, VM 为虚拟 workflow 名称; M 为制造工艺虚拟化前的原始 workflow; CP 是非线性制造工艺中所设置质量检测结点抽象集, 表示为 $CP = (cp_1, cp_2, \dots, cp_i, \dots, cp_k)$, k 为检测部门数, cp_i 表示 workflow VM 变换到检测部门 i 时, 该部门对其直接前驱工位结点 p_j 加工产品的累积生产质量 $F_w(p_j, h_j)$ 和累积加工费用 $F_c(p_j, h_j)$ 进行检测, 当满足 $F_w(p_j, h_j) \geq$ 此处要求的质量 δ_{iw} 并且 $F_c(p_j, h_j) \leq$ 此处要求的费用 δ_{ic} 时, workflow VM 继续进行变换, 执行该部门的直接后继工位结点 p_q 继续加工, 否则工位结点 p_j 加工的产品未通过检测, 需反馈至结点 p_j 的某个前驱工位结点 p_{j-x}

处进行精修,直到 workflow VM 重新变换至工位结点 p_j 且满足检测点 cp_i 的检测要求,整个过程的加工时间累积,因此检测点 $cp_i = (\delta_{iw}, \delta_{ic})$, δ_{iw} 和 δ_{ic} 的值由具体加工部门确定; P' 为非线性工艺中进行虚拟重构后工位结点抽象集, 表示为 $P' = (p'_1, p'_2, \dots, p'_i, \dots, p'_n)$; T' 为工艺重构后的虚拟迁移结点抽象集, 表示为 $T' = (t'_1, t'_2, \dots, t'_i, \dots, t'_m)$; Id 为 workflow VM 中各结点入度值的抽象集, 表示为 $Id = (id_1, id_2, \dots, id_i, \dots, id_z)$; Od 为 workflow VM 中各结点出度值的抽象集, 表示为 $Od = (od_1, od_2, \dots, od_i, \dots, od_z)$.

定义 4. 制造工艺虚拟 workflow 图. 该 workflow 图可定义为 $VG(VM, E)$, 式中, VG 为名称; VM 为虚拟 workflow 名称; E 为图中所有有向边的抽象集, 表示为 $E = (e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_n)$, 集合 E 反映 VM 中所有结点的工序.

定义 5. 制造工艺三层虚拟 workflow, 是指由制造资源集合和模型 VM 及虚拟 workflow 图 VG 所构成的决策优化调度过程图, 可定义为 $Three-VMG(Re, Map, VM, VG)$, 式中, $Three-VMG$ 是制造工艺三层虚拟 workflow 名称; Re 是制造资源集合由集合 P 和集合 T 构成; VM 是制造工艺虚拟 workflow 模型; VG 是制造工艺虚拟 workflow 图; Map 是制造资源集合向模型 VM 映射关系的集合, 可表示为 $Map = (map_1, map_2, \dots, map_i, \dots, map_{n+m})$.

定义 6. 合同矢量 V , 是指工艺所交付的产品应满足所签订合同的各项指标, 本文设定为 $V = (v_h, v_c, v_w)$, 式中, v_h 是时间限定, v_c 是费用限定, v_w 是质量限定, 要求交付产品的时间和费用不能超过 v_h 和 v_c , 质量不能低于 v_w .

1.2 非线性制造工艺 Three-VMG 模型优化规则定义

由于三层虚拟 workflow $Three-VMG$ 模型具有一定的反馈制约等特性, 为更好的识别其静态数据关联及生产过程中的动态转换关系, 为此本文设定了一系列 $Three-VMG$ 模型应遵循的优化规则和约束条件, 具体如下:

1) workflow VM 的虚拟工位结点集 P' 识别重构. 在 workflow VM 中, 若多个工位结点构成一个完整的非线性即反馈制约关系, 则这些结点可进行重构, 记为虚拟工位结点 p'_i , 标记为 $p'_i = p_{[i, j]}$ 或 $p'_i = p_{[i-j]}$. $p'_i = p_{[i, j]}$ 表示由相邻的工位结点 p_i 和 p_j 重构后的虚拟工位结点; $p'_i = p_{[i-j]}$ 表示由工位结点 p_i 开始至工位结点 p_j 结束所包含若干工位结点重构后的虚拟工位结点. 由所有重构后的虚拟工位结点 p'_i 所构成的集合, 记为虚拟工位结点集 P' .

2) workflow 图 VG 的工位结点 p_i 的优选域识别.

工位结点优选域是指该结点可选择最优加工过程的时间范围域, 可定义为 $OSD_i[SrT_i, EdT_i]$, 式中, OSD_i 为优选域名称, SrT_i 为工位结点 p_i 可选加工过程的最早开始时间, EdT_i 为工位结点 p_i 可选加工过程的最迟开始时间, 优选域 OSD_i 中的参数可由式 (1) 进行计算:

$$\begin{cases} SrT_{p_i} = \max \{SrT_{p_{i-1}} + \min(h_{ij})\} \\ SrT_{p_1} = 0, \quad SrT_{p_{i-1}} \in \underbrace{\{\dots, SrT_{p_q}, \dots\}}_k \\ EdT_{p_i} = \min \{EdT_{p_{i-1}} - \min(h_{ij})\} \\ EdT_{p_n} = V.v_h, \quad EdT_{p_{i-1}} \in \underbrace{\{\dots, EdT_{p_p}, \dots\}}_l \\ \text{s.t. } k = 1, 2, \dots, id_i; \quad l = 1, 2, \dots, od_i \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中, SrT_{p_q} 和 EdT_{p_p} 为 p_i 的直接前驱和后继工位结点 p_q 的最早和最迟开始时间。

3) 流程图 VG 的加工域识别. 重构后的流程图 VG 中, 令集合 N' 是结点集 N ($N = P \cup P'$) 的子集, 则由集合 N' 中各结点所构成的局部 workflow 所确定的最小和最大合同矢量 $V.v_{h \min}$ 和 $V.v_{h \max}$ 值区间, 识别为该结点集的加工域, 记为 $\tau = [V.v_{h \min}, V.v_{h \max}]$. 集合 N' 加工域 τ 的参数可由式 (2) 进行计算:

$$\begin{cases} V.v_{h \min} = \max \{SrT_{n_j} - SrT_{n_i}\} \\ V.v_{h \max} = \min \{EdT_{n_j} - EdT_{n_i}\} \end{cases} \quad (2)$$

4) 流程图 VG 的虚拟歧途径识别. 虚拟歧途径是指 VG 中, 若存在某结点 n_i 可与结点 n_j 进行重构形成新的虚拟结点, 但结点 n_i 的部分出度边又可与结点 n_k 进行重构形成另外新的虚拟结点, 则由结点 n_i 和 n_k 构成的途径标记为歧途径, 用 VWR_{n_i} 表示, 其中, n_i , n_j 和 n_k 互不相同. 例如: 某虚拟 workflow 图 W , 其结构如图 1 所示. 经分析, 该 workflow 图共有 4 个加工域分别进行标注. 在加工域 1 中, 工位结点 n_{15} 和 n_{16} 可进行重构形成新的虚拟结点. 在加工域 2 中, 工位结点 n_{18} 和 n_{19} 可进行重构形成新的虚拟结点. 由于结点 n_{16} 存在 2 条出度边, 其中

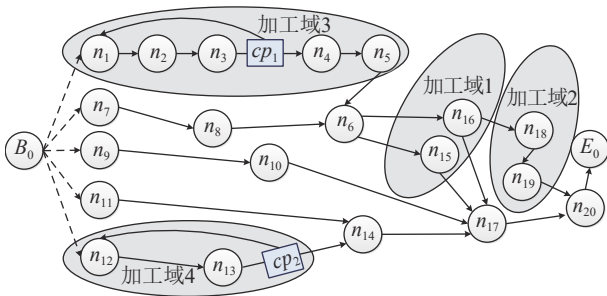


图 1 虚拟歧途径的识别过程

Fig. 1 The process of virtual wrong route recognition

一条可与 n_{18} 进行重构虚拟, 另外一条则不能进行重构虚拟, 因此由结点 n_{16} , n_{18} 和 n_{19} 所组成的途径为虚拟歧途径 $VWR_{n_{16}}$.

5) 流程图 VG 的生产参数标识规则. 虚拟 workflow 图 VG 中, 令 A_{Hq} , A_{Cq} 和 A_{Wq} 为 workflow 图进行到结点 n_q 时的累积生产时间、累积生产费用和累积生产质量, A_{Hp} 和 A_{Cp} 为其直接前驱结点 n_p 的累积生产时间和累积生产费用, 则 A_{Hq} , A_{Cq} 和 A_{Wq} 的值可通过式 (3) 进行计算. 若 $n_q = n_{E0}$, 则 A_{HE0} , A_{CE0} 和 A_{WE0} 表示 workflow 图 VG 执行完毕后所达到的最终生产时间、生产费用和生产质量.

$$\begin{cases} A_{Hq} = \max \underbrace{\{\dots, A_{Hp}, \dots\}}_k + l_{qj} h_{qj} \leq V.v_h \\ A_{Cq} = \max \underbrace{\{\dots, A_{Cp}, \dots\}}_k + l_{qj} c_{qj} \leq V.v_c \\ A_{Wq} = \prod_{n_i \in N'} l_{ij} w_{ij} \geq V.v_w \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^k l_{ij} = 1, \quad l_{ij} \in \{0, 1\}, \quad p < q, \quad k = 1, 2, \dots, id_q \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 中, l_{ij} 表示 workflow 图 VG 转换至工位结点 n_i 时, 选用迁移结点 t_j 来进行后续转换, 由于选择具有互斥性, 因此 $l_{ij} = 0$ 或 1 ; N' 表示 workflow VG 换至工位结点 n_q 时, 已经执行完毕的工位结点集.

本文要求所建立的三层虚拟 workflow Three-VMG 模型在满足合同矢量 V 约束的前提下, 利用规则 1) ~ 4) 实现规则 5) 的各项参数最优.

1.3 非线性制造工艺三层虚拟 workflow 调度建模算法 Three-MVMA

汲取部分以往研究成果并遵循第 2.2 节中的相关规则和约束后, 设计非线性制造工艺三层虚拟 workflow 调度建模算法 Three-MVMA 如下:

步骤 1. 分析非线性制造工艺, 统计生产工位形成工位结点集 P , 分析各工位结点的转换状态形成迁移结点集 T , 将工艺中各检测数据汇总形成检测结点集 CP ;

步骤 2. 结合工位结点集 P 和迁移结点集 T 的偏序关系构建原始 workflow 模型 M ;

步骤 3. 根据非线性制造工艺, 按序将 cp_i ($cp_i \in CP$, $i = 1, 2, \dots, k$) 插入到原始 workflow 模型 M 中, 调整有向边集合 L , 形成新的偏序关系;

步骤 4. 输入合同矢量 V , 利用式 (1) 计算模型 M 各工位结点的优选域 OSD ;

步骤 5. 从工位结点 B_0 开始广度优先遍历模型 M 的工位结点集 P , 统计集合 P 中出度 od 和入

度 id 不为 1 的工位结点, 将其插入至队列 $List$ 中, 其中反馈前置结构中各工位结点不入队;

步骤 6. 出队 $List$ 中的队首出度 od 不为 1 的工位结点 p_j , 寻找与其最近的反馈入度工位结点 p_i , 重构结点 p_i 流经结点 p_j 之间的所有工位结点, 将其标注为虚拟工位结点 $p'_i = p_{[i,j]}$ 或 $p'_i = p_{[i-j]}$, 将结点 $p'_i = p_{[i,j]}$ 或 $p'_i = p_{[i-j]}$ 暂时保存至虚拟工位结点集 P' 中, 将此过程中所涉及迁移结点重构为虚拟迁移结点并保存至虚拟迁移结点集 T' 中;

步骤 7. 重复步骤 6 直至队列 $List$ 为空;

步骤 8. 按序移出集合 P' 和 T' 中的虚拟工位结点 p'_i 和虚拟迁移结点 t'_i , 使用规则 4) 进行判断, 检查它们是否构成虚拟歧途径, 若不构成 VWR 则正式进行虚拟重构并修改模型 M 且更新模型 VM , 若构成 VWR 则不能进行重构, 删除该虚拟工位结点 p'_i 和虚拟迁移结点 t'_i 并恢复构成虚拟结点的工位结点和迁移结点;

步骤 9. 若集合 P' 或 T' 不为空, 则循环执行步骤 8, 否则标记模型 VM 并输出;

步骤 10. 利用式 (2) 并遍历虚拟工位结点集 P' , 计算各工位结点的加工域 τ , 将其标注至模型 M 中;

步骤 11. 遍历模型 VM , 统计相邻工位结点 p_i 至 p_j ($p_i \neq p_j$) 的全部途径, 将其建立有向边 e_{jk} , 其中 $k = 1, 2, \dots, id_{pj}$, 计算有向边 e_{jk} 的参数 h_{jk} , c_{jk} 和 w_{jk} , 标记这些参数形成虚拟 workflows 图 VG ;

步骤 12. 重复步骤 11 直至 workflow 趋于稳定, 形成 workflow 图 VG ;

步骤 13. 将制造资源集合 Re 、映射集合 Map 、虚拟 workflow 模型 VM 和虚拟 workflow 图 VG 进行组合, 形成三层虚拟 workflow $Three-VMG$, 将其输出。

根据上述策略, 给出建模算法 Three-MVMA 的伪代码如下:

算法 1. Three-MVMA 算法

输入. 集合 P , 集合 T , 集合 Q , 集合 H , 集合 C , 集合 W , 集合 Id , 集合 Od , 集合 CP , 合同矢量 V ;

输出. 虚拟 workflow 模型 VM , 虚拟 workflow 图 VG , 三层虚拟 workflow $Three-VMG$;

Scan(All) input $P, T, Q, H, C, W, Id, Od, CP$;

Use(P, T, Q, H, C, W, Id, Od) to build M ;

for (int $i = 0$; $i \leq CP.length$; $i++$)

{ Scan(M) do { if $CP.cp[i] \leftrightarrow (P.p[x], \dots, P.p[y])$

then { Insert $CP.cp[i]$ last into $M.P.p[y]$;

Lable $l[y+1] = \text{Line}(CP.cp[i] \rightarrow P.p[x])$ } };

input V ;

for (int $i = P.length$; $i <= 0$; $i--$)

{ $j = i-1$; Scan(M) do {

Formula_1($P.p[j].Fh, P.p[i].Fh, V, OSD.p[i]$)} };

for (int $i = 0$; $i \leq P.length$; $i++$)

{ If ($Id.p[i].id > 1$ || $Od.p[i].od > 1$) then ADD ($List, P.p[i]$)};

While ($List.front == List.rear$) do { $n = List.front$;

$List.front = List.front+1$;

for (int $i = 0$; $i \leq CP.length$; $i++$)

{ Scan(M) do { if ($CP.cp[i] \leftrightarrow (P.p[x], \dots, n)$)

and (Min-distance ($P.p[x], n$))

then { $p' = \text{Planing}(P.p[x], \dots, n)$;

$t' = \text{Planing}(T.p[x], \dots, n)$;

ADD(P', p');

ADD(T', t') } } };

for (int $i = P.length$; $i <= 0$; $i--$)

{ $j = i-1$; Scan(M) do {

Formula_2($OSD.p[i], OSD.p[j], \tau.p[i]$)} };

While ($P' < > \Phi$) or ($T' < > \Phi$) do

{ for (int $i = 0$; $i \leq p'.length$; $i++$)

{ for (int $j = 0$; $j \leq T'.length$; $j++$)

if $VWR(P'.p[i], T'.p[j]) == \text{False}$ then

{ Delete($P'.p[i] \rightarrow (P.p[x], \dots, n)$); Delete($T'.p[j] \rightarrow (T.p[x], \dots, n)$);

Update($P'.p[i], T'.p[j], M$) to VM ;

Delete($P'.p[i]$);

Delete($T'.p[j]$) } else {

Rollback($P'.p[i] \rightarrow (P.p[x] \dots n)$);

Rollback($T'.p[j] \rightarrow (T.p[x] \dots n)$);

Update(Null, Null, M) to VM ;

Delete($P'.n[i]$); Delete($T'.n[j]$) } } };

OutPut VM ;

Scan(VM) input P ;

for (int $i = 0$; $i \leq P.length-1$; $i++$)

for (int $j = i+1$; $j \leq P.length$; $j++$)

{ if ($P.p[j]-P.p[i] == 1$) then

{ for (int $k = 0$; $k \leq Id.p[j].id$; $k++$)

Lable $e[j, k] = \text{Line}(P.p[i] \rightarrow T.t[k] \rightarrow P.p[j])$;

Lable $h[j, k] = \text{Hour}(\Sigma(P.p[i] \rightarrow T.t[k] \rightarrow P.p[j]))$;

Lable $c[j, k] = \text{Cost}(\Sigma(P.p[i] \rightarrow T.t[k] \rightarrow P.p[j]))$;

Lable $w[j, k] = \text{Accuracy}(\Pi(P.p[i] \rightarrow T.t[k] \rightarrow P.p[j]))$;

Add ($e[j, k], h[j, k], c[j, k], w[j, k]$) to VG } };

OutPut VG ;

Add (P, T, Map, VM, VG) to $Three-VMG$;

OutPut $Three-VMG$.

算法 Three-MVMA 时间复杂度可达到 $O(n^m)$.

1.4 非线性制造工艺三层虚拟 workflow 决策模型实例验证

某公司汽车制造冲压工艺质量控制流程如图 2 所示, 经分析该工艺流程呈现非线性的特点, 可用三层虚拟 workflow 决策模型对其完工时间、生产质量和费用等参数进行多目标优化调度.

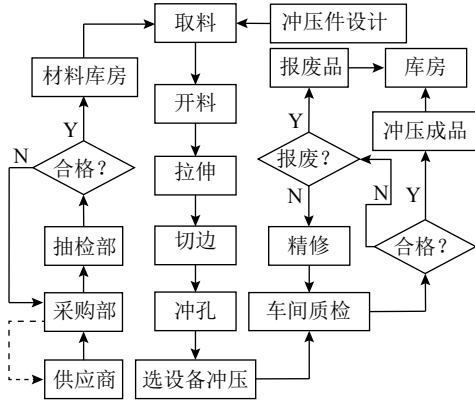


图 2 汽车制造冲压加工工艺

Fig.2 Stamping process of automobile manufacturing

根据一般统计发现, 该公司进行冲压加工所需原材料常用供应商共计 3 个, 其供应号设定为: B_1, B_2 和 B_3 ; 采购部门共计设立 2 个质检组, 其编号设定为: C_1 和 C_2 ; 冲压工艺形成的中间件进行质量抽查组共计有 2 个, 其编号设定为: S_1 和 S_2 ; 冲压件在进入库存前的质量检测组共计有 3 个, 其编号设定为: D_1, D_2 和 D_3 . 为便于研究, 忽略该工艺流程的某些次要矛盾, 将其主要矛盾进行非线性 workflow 分解, 得出相应的结点记为: 工位结点集合 P 和迁移结点集合 T , 各集合的情况如表 1 所示.

将集合 P 和集合 T 的各元素输入至 Three-MVMG 算法后, 形成非线性冲压工艺质量检测的三层虚拟 workflow 如图 3 所示.

2 非线性制造工艺三层虚拟 workflow 调度模型优化算法 Three-OVMG

定义 7. 三层虚拟 workflow 调度输出途径 $VRoute$. 该途径是指非线性制造工艺经优化调度算法处理后给出的最佳调度途径, 由相关虚拟结点、有向边和生产参数组成, 可定义为 $VRoute(P', E, A)$, 式中, $VRoute$ 是最优输出途径名; P' 是组成该途径的虚拟工位结点集; E 是偏序有向边集合; A 是该途径各虚拟工位结点的累积参数集, 表示为 $A = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_m)$, 式中, a_i 为结点 p_i ($p_i \in P'$) 的累积参数, 表示为 $a_i = (a_{iH}, a_{iC}, a_{iW})$, m 为集合 P' 的结点数.

表 1 冲压工艺质量检测结点集合 P 和 T
Table 1 Node set P and T of stamping process quality inspection

结点	含义
p_1	供应商
p_2	采购部
p_3	采购部质检
p_4	冲压加工
p_5	零件抽检部
p_6	精修部
p_7	质检部
p_E	仓库
t_1	备料
t_2	采购就绪
t_3	采购部质检就绪
t_4	待冲压
t_5	抽检质量就绪
t_6	精修就绪
t_7	质检就绪
t_E	待入库

假设函数 $f_w(p_i, h_{p_i})$ 和 $f_c(p_i, h_{p_i})$ 表示虚拟 workflow $Three-VMG$ 在时刻 h_{p_i} 处, 工位结点 p_i 在其优选域 $OSD_{p_i}[SrT_{p_i}, EdT_{p_i}]$ 内所选中的最高生产质量和最低费用, 则该时刻下可使用式 (4) 计算工位结点 p_i 的 $f_w(p_i, h_{p_i})$ 和 $f_c(p_i, h_{p_i})$:

$$\begin{cases} f_w(p_i, h_{p_i}) = \max\{w_{pik}\} \\ f_c(p_i, h_{p_i}) = \min\{c_{pik}\} \\ h_{p_i} \in OSD_{p_i}[SrT_{p_i}, EdT_{p_i}], \quad 0 < k \leq id_{p_i} \\ \text{s.t. } h_{p_i} + h_{pik} \leq V.v_h, \quad c_{p_i} + c_{pik} \leq V.v_c, \\ w_{p_i} \times w_{pik} \geq V.v_w \end{cases} \quad (4)$$

虚拟 workflow $Three-VMG$ 中, 任意两工位结点 p_{i-1} 和 p_i ($p_{i-1} \in P', p_i \in P'$), 若 p_{i-1} 是 p_i 的前驱结点, 则可使用式 (5) 来计算结点 p_{i-1} 的累积生产质量和费用:

$$\begin{cases} f_w(p_{i-1}, h_{p_{i-1}}) = \max\{f_w(p_i, h_p + h_{p_{i-1}}) \times w_{p_{i-1}k}\} \\ f_c(p_{i-1}, h_{p_{i-1}}) = \min\{f_c(p_i, h_p + h_{p_{i-1}}) + c_{p_{i-1}k}\} \\ h_{p_{i-1}} \in OSD_{p_{i-1}}[BEH_{p_{i-1}}, ENH_{p_{i-1}}], \\ \quad 0 < k \leq id_{p_{i-1}} \\ \text{s.t. } h_{p_{i-1}} + h_{p_{i-1}k} \leq V.v_h, \quad c_{p_{i-1}} + c_{p_{i-1}k} \leq V.v_c, \\ w_{p_{i-1}} \times w_{p_{i-1}k} \geq V.v_w \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) 可由后向前完成对 workflow $Three-VMG$ 的优化求解, 然后通过这些解完成非线性制造工艺资源正向调度. 由此, 可设计三层虚拟 workflow 优

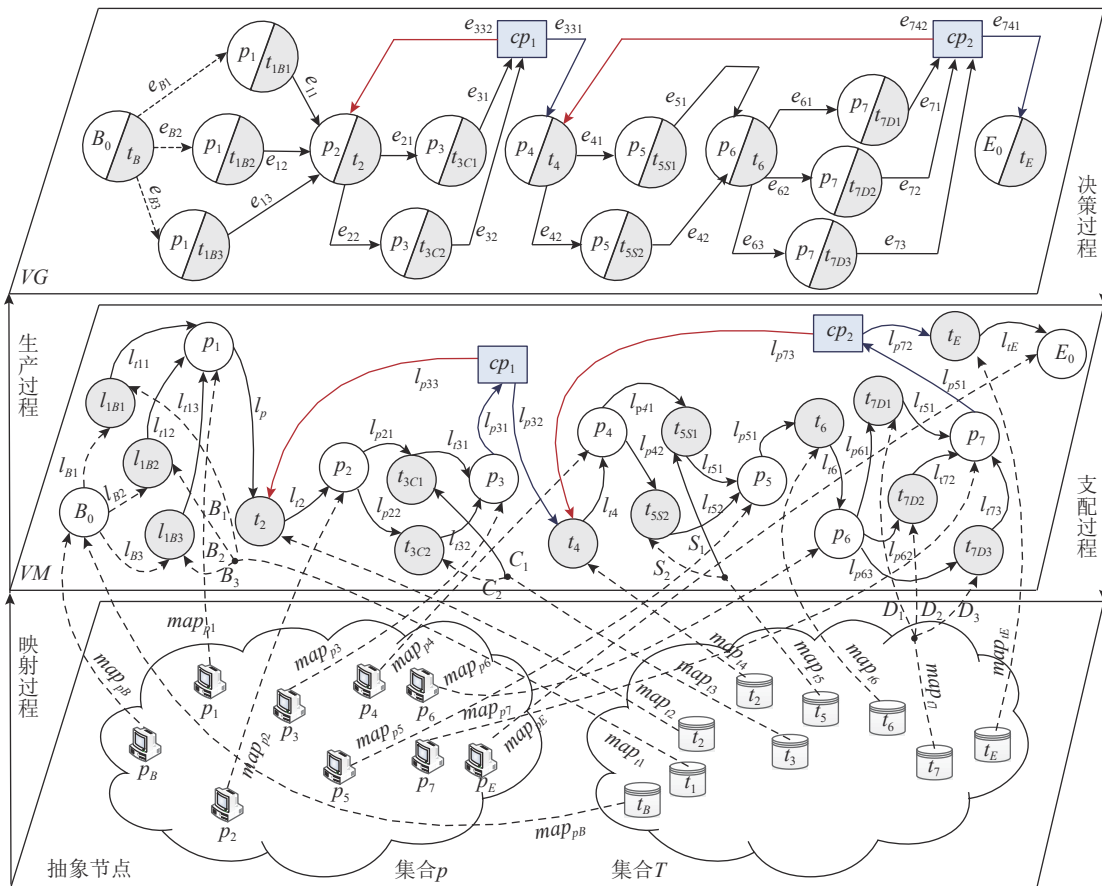


图 3 冲压工艺质量检测三层虚拟 workflow

Fig.3 Three-tier virtual workflow for stamping process quality inspection

化算法 Three-OVMG.

步骤 1. 调用建模算法 Three-MVMG 处理非线性制造工艺各参数, 形成三层虚拟 workflow Three-VMG 模型;

步骤 2. 结合合同矢量 V 由后向前将模型 Three-VMG 分层, 利用式 (1) 分析并计算每层形成各工位结点 p_i 的优选域 $OSD_{p_i}[SrT_{p_i}, EdT_{p_i}]$;

步骤 3. 利用式 (4) 计算并标记结束层的工位结点 E_0 在其优选域 OSD_{E_0} 内, 各时刻的 $f_w(E_0, h_{E_0})$ 和 $f_c(E_0, h_{E_0})$;

步骤 4. 全面处理模型 Three-VMG, 若工位结点不存在虚拟歧途径 VWR, 则使用逆向串规约且利用式 (4) 计算并标记各工位结点 p_i 在其优选域 OSD_{p_i} 内, 每个时刻的 $f_w(p_i, h_{p_i})$ 和 $f_c(p_i, h_{p_i})$;

步骤 5. 若工位结点在虚拟歧途径 VWR 中, 则首先利用式 (2) 计算 VWR 的加工域 τ , 然后利用式 (4) 串行计算并标记该域 τ 下的各工位结点 p_i 不同时刻的 $f_w(p_i, h_{p_i})$ 和 $f_c(p_i, h_{p_i})$;

步骤 6. 利用式 (3) 并遵循合同矢量 V 的约束, 全面处理标记后的模型 Three-VMG 的工位结点 P

集合, 确定并输出最优调度途径 $VRoute$.

算法 Three-OVMG 其所对应的伪代码如下:

算法 2. Three -OVMG 算法

输入. 工作流 $Three-VMG$, 合同矢量 V ;

输出. 虚拟优化调度途径 $VRoute$;

Call Three-MVMG to Create $Three-VMG$;

BackScan($Three-VMG$) output P, H, C, W ;

Input(V);

for (int $i = P.length$; $i \leq 0$; $i--$)

{ $j = i-1$; Scan ($Three-VMG$) do{

Formula_1($P.p[j].Fh, P.p[i].Fh, V, OSD.p[i]$)}};

Formula_4($E_0.fc, P.E_0, C.E_0, H.E_0, OSD[P.E_0]$);

Formula_4($E_0.fw, P.E_0, W.E_0, H.E_0, OSD[P.E_0]$);

Scan($Three-VMG$) to Lable(VWR);

for (int $i = P.length$; $i \geq 1$; $i--$){ $j = i-1$;

if ($P.n[i]$ not in VWR) then {

Formula_5($P.p[j].fc, P.p[i].fc, P.p[j], C.p[j]$,

```

H.p[j], OSD[P.p[j]]);
Formula_5(P.p[j].fw, P.p[i].fw, P.p[j],
W.p[j], H.p[j], OSD[P.p[j]]);
Formula_2(OSD.p[i], OSD.p[j],  $\tau.p[i]$ )
Else{ under  $\tau.p[i]$  do{
P.p[i].fh = Hour( $\Sigma(P.p[i] \rightarrow P.p[j])$ );
P.p[i].fc = Cost( $\Sigma(P.p[i] \rightarrow P.p[j])$ );
P.p[i].fw = Accuracy( $\Pi(P.p[i] \rightarrow P.p[j])$ )};
Scan(VRoute, Three-VMG, Formula_3, V);
OutPut VRoute.

```

算法 Three-OVMG 时间复杂度可达到 $O(n^m)$.

3 非线性制造工艺 Three-VMG 模型优化案例分析

为验证上述建模及优化调度算法, 这里仍选用某公司汽车制造冲压工艺质量控制流程进行分析. 实验所用服务器操作系统为 Windows Server2016, 内存配置至少 8 GB, 采用 Java 语言开发建模算法 Three-MVMG 和优化调度算法 Three-OVMG 的代码, 设定合同矢量 V 为: $V.h = 111$ 天, $V.w = 0.98 \times 100\%$, $V.c = 20$ 万元.

3.1 非线性冲压工艺 Three-VMG 模型优化过程

为验证模型 Three-VMG 的优化调度过程, 这里仍选用第 2.4 节所述工艺, 该工艺在忽略突发事件及其他附情况的前提下, 加工某批工件的质量控制数据如表 2 所示.

将图 3 所示的该工艺模型输入算法 Three-OVMG 后, 代入表 2 中的数据并遵循合同矢量 V 的约束, 形成最优的虚拟调度途径 $VRoute$, 其过程如图 4 所示.

根据该工艺特点将图 4 的调度过程分为两个优化段. 由于合同矢量 $V.h = 111$ 天, 因此将第 1 个优化段的原材料采购质量控制非线性工艺的合同约束时间定为 $V.h_1 = 60$ 天, 将第 2 个优化段的冲压质量控制非线性工艺的合同约束时间定为 $V.h_2 = 51$ 天. 根据工艺要求, 在第 1 个段中, 采购部质检抽查组设置的检测点 $cp_1 = 0.950$, 无费用约束, 当工作流转换到该检测点时, 若此时的 $f_w(p_i, h_{pi}) < 0.950$ 时, 则需要反馈至前向工位结点进行质量缺陷修改, 生产时间延误 5 天, 费用增加 5 万; 在第 2 个段中, 车间质检抽查组设置的检测点 $cp_2 = 0.975$, 无费用约束, 当工作流转换到该检测点时, 若此时的 $f_w(p_i, h_{pi}) < 0.975$ 时, 则需要反馈至前向工位结点进行质量缺陷修改, 生产时间延误 3 天, 费用增加 1 万. 两个段之间采用累积传递的策略进行衔接, 利

表 2 各部门服务的时间、质量和费用

Table 2 Time, quality and cost of departmental services

编号	时间 (天)	质量 (%)	费用 (万元)
B ₁	30	95.1	10.5
B ₂	25	95.6	11.0
B ₃	20	94.2	10.2
C ₁	20	95.6	0.5
C ₂	18	97.0	0.6
S ₁	21	97.6	0.65
S ₂	20	96.8	0.63
D ₁	20	96.9	0.67
D ₂	19	96.7	0.65
D ₃	18	96.0	0.66
t ₂	15	99.8	0.45
t ₄	1	98.8	0.05
t ₆	7	99.9	0.2
t _E	1	99.9	0.04
cp ₁	—	95.0	—
cp ₂	—	97.5	—

用式 (1) ~ (5) 及表 2 中的数据, 可完成对图 4 工艺各工位结点 $f_w(p_i, h_{pi})$ 和 $f_c(p_i, h_{pi})$ 的计算, 过程如下:

1) 经计算, 工位结点 p_1, p_2 和 p_3 的优选域分别为: $OSD_1 = [0, 7]$, $OSD_2 = [20, 27]$ 和 $OSD_3 = [35, 42]$. 它们符合虚拟重构要求且不存在 VWR , 故将其重构为虚拟工位结点 $p'_{[1-3]}$, $p'_{[1-3]}$ 的加工域: $\tau_1 = [35, 35]$.

2) 根据 τ_1 和 OSD_1, OSD_2, OSD_3 的值, 计算第一阶段各工位结点 p_i 的 f_w 及 f_c 如下:

工位结点 p_3 的计算过程为:

$$f_w(p_3, 42) = \max\{0.97\} = 0.97; f_c(p_3, 42) = 0.6;$$

$$f_w(p_3, 41) = \max\{0.97\} = 0.97; f_c(p_3, 41) = 0.6;$$

$$f_w(p_3, 40) = \max\{0.97, 0.956\} = 0.97; f_c(p_3, 40) = 0.6;$$

$$f_w(p_3, 39) = \max\{0.97, 0.956\} = 0.97; f_c(p_3, 39) = 0.6;$$

$$f_w(p_3, 38) = \max\{0.97, 0.956\} = 0.97; f_c(p_3, 38) = 0.6;$$

$$f_w(p_3, 37) = \max\{0.97, 0.956\} = 0.97; f_c(p_3, 37) = 0.6;$$

$$f_w(p_3, 36) = \max\{0.97, 0.956\} = 0.97; f_c(p_3, 36) = 0.6;$$

$$f_w(p_3, 35) = \max\{0.97, 0.956\} = 0.97; f_c(p_3, 35) = 0.6.$$

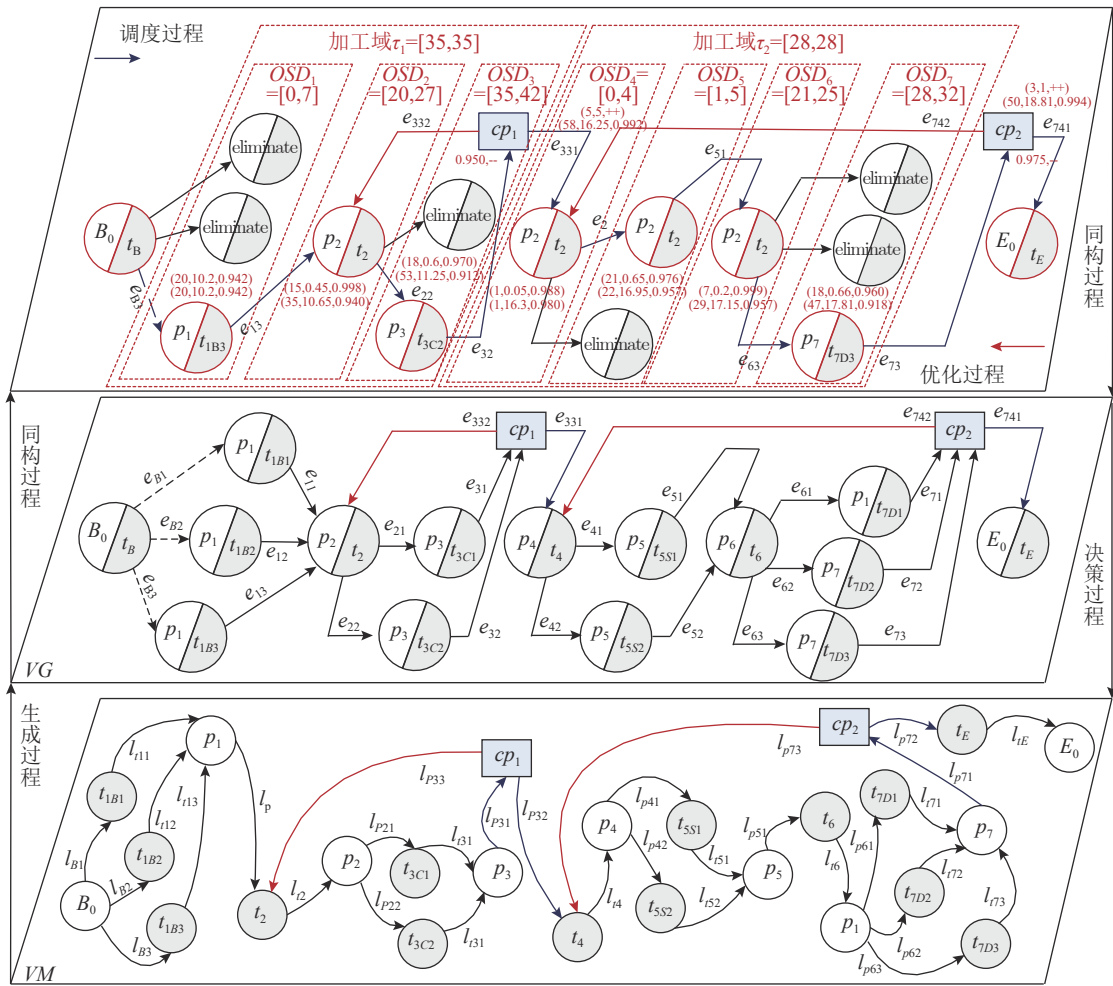


图 4 workflow Three-VMG 的调度过程
Fig. 4 Process of workflow Three-VMG

工位结点 p_2 的计算过程:

$$\begin{aligned}
 f_w(p_2, 27) &= \max\{0.998 \times f_w(p_3, 42)\} = 0.968; \\
 f_c(p_2, 27) &= 1.05; \\
 f_w(p_2, 26) &= \max\{0.998 \times f_w(p_3, 41)\} = 0.968; \\
 f_c(p_2, 26) &= 1.05; \\
 f_w(p_2, 25) &= \max\{0.998 \times f_w(p_3, 40)\} = 0.968; \\
 f_c(p_2, 25) &= 1.05; \\
 f_w(p_2, 24) &= \max\{0.998 \times f_w(p_3, 39)\} = 0.968; \\
 f_c(p_2, 24) &= 1.05; \\
 f_w(p_2, 23) &= \max\{0.998 \times f_w(p_3, 38)\} = 0.968; \\
 f_c(p_2, 23) &= 1.05; \\
 f_w(p_2, 22) &= \max\{0.998 \times f_w(p_3, 37)\} = 0.968; \\
 f_c(p_2, 22) &= 1.05; \\
 f_w(p_2, 21) &= \max\{0.998 \times f_w(p_3, 36)\} = 0.968; \\
 f_c(p_2, 21) &= 1.05; \\
 f_w(p_2, 20) &= \max\{0.998 \times f_w(p_3, 35)\} = 0.968. \\
 f_c(p_2, 20) &= 1.05.
 \end{aligned}$$

工位结点 p_1 的计算过程:

$$\begin{aligned}
 f_w(p_1, 7) &= \max\{0.942 \times f_w(p_2, 27)\} = 0.912; \\
 f_c(p_2, 7) &= 11.25; \\
 f_w(p_1, 6) &= \max\{0.942 \times f_w(p_2, 26)\} = 0.912; \\
 f_c(p_2, 6) &= 11.25; \\
 f_w(p_1, 5) &= \max\{0.942 \times f_w(p_2, 25)\} = 0.912; \\
 f_c(p_2, 5) &= 11.25; \\
 f_w(p_1, 4) &= \max\{0.942 \times f_w(p_2, 24)\} = 0.912; \\
 f_c(p_2, 4) &= 11.25; \\
 f_w(p_1, 3) &= \max\{0.942 \times f_w(p_2, 23)\} = 0.912; \\
 f_c(p_2, 3) &= 11.25; \\
 f_w(p_1, 2) &= \max\{0.956 \times f_w(p_2, 27), 0.942 \times \\
 f_w(p_2, 22)\} &= 0.925; \\
 f_c(p_2, 2) &= 12.05; \\
 f_w(p_1, 1) &= \max\{0.956 \times f_w(p_2, 26), 0.942 \times \\
 f_w(p_2, 21)\} &= 0.925; \\
 f_c(p_2, 1) &= 12.05;
 \end{aligned}$$

$$f_w(p_1, 0) = \max\{0.956 \times f_w(p_2, 25), 0.942 \times f_w(p_2, 20)\} = 0.925;$$

$$f_c(p_1, 0) = 12.05.$$

由上述过程可知, 第 1 阶段由后至前累积到 p_1 的 $f_w(p_1, 0)$, $f_w(p_1, 1)$, $f_w(p_1, 2)$, $f_w(p_1, 3)$ 和 $f_w(p_1, 4)$ 值所用生产时间分别为: 60 天、59 天、58 天、57 天和 56 天, 但这些路径的累积生产质量 $f_w < 0.950$, 不满足检测点 cp_1 要求需返回前至修改. 它们修改一次后的累积生产时间变为: 65 天、64 天、63 天、62 天和 61 天, 这些生产时间不满足合同矢量 V . $h_1 = 60$ 天的要求, 因此不能沿用这些路径进行工艺的优化调度, 及时淘汰.

由累积到 p_1 的 $f_w(p_1, 5)$, $f_w(p_1, 6)$ 和 $f_w(p_1, 7)$ 值所用生产时间分别为: 55 天、54 天和 53 天, 同样这些路径的累积生产质量 $f_w < 0.950$, 不满足检测点 cp_1 要求需返回前至修改. 它们修改一次后的累积生产时间变为: 60 天、59 天和 58 天, 这些生产时间小于合同矢量 V . $h_1 = 60$ 天, 满足时间约束要求. 因此, 工艺修改后它们的累积 f_w 分别为: $f'_w(p_1, 5) = 0.912 + (1 - 0.912) \times 0.912 = 0.992$, $f'_w(p_1, 6) = 0.912 + (1 - 0.912) \times 0.912 = 0.992$, $f'_w(p_1, 7) = 0.912 + (1 - 0.912) \times 0.912 = 0.992$; 修改后的累积 f_c 分别为: $f'_c(p_1, 5) = 5 + 11.25 = 16.25$ 万元, $f'_c(p_1, 6) = 5 + 11.25 = 16.25$ 万元, $f'_c(p_1, 7) = 5 + 11.25 = 16.25$ 万元. 优选生产时间最短且累积 f_w 最高者, 即 $f'_w(p_1, 7) = 0.992$. 此段工艺将沿此途径进行资源优化, 即: $VRoute_1 = B_0 \rightarrow p_1/t_{1B3} \rightarrow p_2/t_2 \rightarrow p_3/t_{3C2}$.

3) 由于第 2 阶段为第 1 阶段的后续工艺且合同矢量 V . $h_2 = 51$ 天, 因此此阶段的初始生产质量 $f_w = 0.992$. 经计算, 工位结点 p_4 、 p_5 、 p_6 和 p_7 的优选域分别为: $OSD_4 = [0, 4]$, $OSD_5 = [1, 5]$, $OSD_6 = [21, 25]$ 和 $OSD_7 = [28, 32]$. 它们符合虚拟重构要求且不存在 VWR , 故将其重构为虚拟工位结点 $p'_{[4-7]}$, $p'_{[4-7]}$ 的加工域: $\tau_2 = [28, 28]$.

4) 根据 τ_2 和 OSD_4 、 OSD_5 、 OSD_6 、 OSD_7 的值, 计算第 2 阶段各工位结点 p_i 的 f_w 及 f_c 如下:

a) 工位结点 p_7 的计算过程为

$$f_w(p_7, 32) = \max\{0.96\} = 0.96; f_c(p_7, 32) = 0.66;$$

$$f_w(p_7, 31) = \max\{0.96, 0.967\} = 0.967;$$

$$f_c(p_7, 31) = 0.65;$$

$$f_w(p_7, 30) = \max\{0.96, 0.967, 0.969\} = 0.969;$$

$$f_c(p_7, 30) = 0.67;$$

$$f_w(p_7, 29) = \max\{0.96, 0.967, 0.969\} = 0.969;$$

$$f_c(p_7, 29) = 0.67;$$

$$f_w(p_7, 28) = \max\{0.96, 0.967, 0.969\} = 0.969;$$

$$f_c(p_7, 28) = 0.67.$$

b) 工位结点 p_6 的计算过程为

$$f_w(p_6, 25) = \max\{0.999 \times f_w(p_7, 32)\} = 0.959;$$

$$f_c(p_6, 25) = 0.86;$$

$$f_w(p_6, 24) = \max\{0.999 \times f_w(p_7, 31)\} = 0.966;$$

$$f_c(p_6, 24) = 0.85;$$

$$f_w(p_6, 23) = \max\{0.999 \times f_w(p_7, 30)\} = 0.968;$$

$$f_c(p_6, 23) = 0.87;$$

$$f_w(p_6, 22) = \max\{0.999 \times f_w(p_7, 29)\} = 0.968;$$

$$f_c(p_6, 22) = 0.87;$$

$$f_w(p_6, 21) = \max\{0.999 \times f_w(p_7, 28)\} = 0.968;$$

$$f_c(p_6, 21) = 0.87.$$

c) 工位结点 p_5 的计算过程为

$$f_w(p_5, 5) = \max\{0.968 \times f_w(p_6, 25)\} = 0.928;$$

$$f_c(p_5, 5) = 1.49;$$

$$f_w(p_5, 4) = \max\{0.976 \times f_w(p_6, 25), 0.968 \times f_w(p_6, 24)\} = 0.936;$$

$$f_c(p_5, 4) = 1.51;$$

$$f_w(p_5, 3) = \max\{0.976 \times f_w(p_6, 24), 0.968 \times f_w(p_6, 23)\} = 0.943;$$

$$f_c(p_5, 3) = 1.50;$$

$$f_w(p_5, 2) = \max\{0.976 \times f_w(p_6, 23), 0.968 \times f_w(p_6, 22)\} = 0.945;$$

$$f_c(p_5, 2) = 1.52;$$

$$f_w(p_5, 1) = \max\{0.976 \times f_w(p_6, 22), 0.968 \times f_w(p_6, 21)\} = 0.945;$$

$$f_c(p_5, 1) = 1.52.$$

d) 工位结点 p_4 的计算过程为

$$f_w(p_4, 4) = \max\{0.988 \times f_w(p_5, 5)\} = 0.917;$$

$$f_c(p_4, 4) = 1.54;$$

$$f_w(p_4, 3) = \max\{0.988 \times f_w(p_5, 4)\} = 0.925;$$

$$f_c(p_4, 3) = 1.56;$$

$$f_w(p_4, 2) = \max\{0.988 \times f_w(p_5, 3)\} = 0.932;$$

$$f_c(p_4, 2) = 1.55;$$

$$f_w(p_4, 1) = \max\{0.988 \times f_w(p_5, 2)\} = 0.934;$$

$$f_c(p_4, 1) = 1.57;$$

$$f_w(p_4, 0) = \max\{0.988 \times f_w(p_5, 1)\} = 0.934;$$

$$f_c(p_4, 0) = 1.57;$$

e) 此段工艺被加工一次后工位结点 p_4 的 $f_w(p_4, h_{0-4})$ 和 $f_c(p_4, h_{0-4})$ 为

$$f_w(p_4, 0) = 0.992 \times \max\{0.988 \times f_w(p_5, 1)\} = 0.927;$$

$$f_c(p_4, 0) = 17.82;$$

$$f_w(p_4, 1) = 0.992 \times \max\{0.988 \times f_w(p_5, 2)\} = 0.927;$$

$$f_c(p_4, 1) = 17.82;$$

$$f_w(p_4, 2) = 0.992 \times \max\{0.988 \times f_w(p_5, 3)\} = 0.925;$$

$$f_c(p_4, 2) = 17.80;$$

$$f_w(p_4, 3) = 0.992 \times \max\{0.988 \times f_w(p_5, 4)\} = 0.918;$$

$$f_c(p_4, 3) = 17.81;$$

$$f_w(p_4, 4) = 0.992 \times \max\{0.988 \times f_w(p_5, 5)\} = 0.910;$$

$$f_c(p_4, 4) = 17.79.$$

由上述过程可知, 第 2 阶段由后至前累积到 p_4 的 $f_w(p_4, 0)$, $f_w(p_4, 1)$ 和 $f_w(p_4, 2)$ 值所用生产时间分别为: 50 天、49 天和 48 天, 但这些路径的累积生产质量 $f_w < 0.975$, 不满足检测点 cp_2 要求需返回前至修改. 它们修改一次后的累积生产时间变为: 53 天、52 天和 51 天. 若沿此途径继续转换至工位结点 E_0 , 则累积生产时间变为: 54 天、53 天和 52 天, 均大于合同矢量 V . $h_2 = 51$ 天, 不满足时间要求. 因此, 不能沿用这些路径进行工艺的优化调度, 及时淘汰.

由累积到 p_4 的 $f_w(p_4, 3)$ 和 $f_w(p_4, 4)$ 值所用生产时间分别为: 47 天和 46 天, 同样这些路径的累积生产质量 $f_w < 0.975$, 不满足检测点 cp_2 要求需返回前至修改. 它们修改一次后的累积生产时间变为: 50 天和 49 天. 若沿此途径继续转换至工位结点 E_0 , 则累积生产时间分别为: 51 天和 50 天, 均小于合同矢量 V . $h_2 = 51$ 天, 满足时间要求. 因此, 工艺修改正后它们的累积 f_w 分别为: $f'_w(p_4, 3) = 0.918 + (1 - 0.918) \times 0.925 = 0.994$ 和 $f'_w(p_4, 4) = 0.910 + (1 - 0.910) \times 0.917 = 0.993$; 修改后的累积 f_c 分别为: $f'_c(p_4, 3) = 1 + 17.81 = 18.81$ 万元和 $f'_c(p_4, 4) = 1 + 17.79 = 18.79$ 万元. 优选累积 f_w 最高者, 即 $f'_w(p_4, 3) = 0.994$. 此段工艺将沿此途径进行资源优化, 即: $VRoute_2 = p_4/t_4 \rightarrow p_5/t_{5S1} \rightarrow p_6/t_6 \rightarrow p_7/t_{7D3}$.

5) 将第 1 阶段和第 2 阶段工艺采用段间累积的方法进行整合, 整合后此工艺的最终累积 $f_w = 0.999 \times 0.994 = 0.993$, 累积 $f_c = 0.04 + 18.81 = 18.85$ 万元, 累积 $f_h = 1 + 50 + 58 = 109$ 天. 由于最终累积 $f_h < \text{合同矢量 } V$, 满足要求, 因此最终输出的优化调度虚拟途径 $VRoute = VRoute_1 + VRoute_2 = B_0 \rightarrow p_1/t_{1B3} \rightarrow p_2/t_2 \rightarrow p_3/t_{3C2} \rightarrow p_4/t_4 \rightarrow p_5/t_{5S1} \rightarrow p_6/t_6 \rightarrow p_7/t_{7D3} \rightarrow E_0$.

3.2 Three-VMG 模型虚拟重构及算法比较

图 5 给出了模型 Three-VMG 被算法 Three-OVMG 处理后, 各工位结点的虚拟重构归约优化过程.

算法 Three-OVMG 扫描模型 Three-VMG 的工位结点集 P , 按规则将工位结点 p_1 、 p_2 、 p_3 进行重构形成虚拟工位结点 $p'_{[1-3]}$, 将工位结点 p_4 、 p_5 、 p_6 、

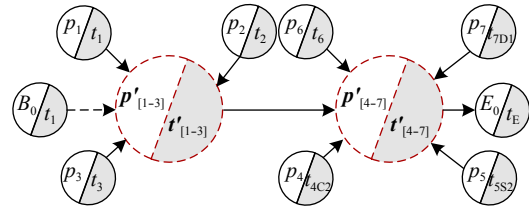


图 5 虚拟结点重构过程

Fig.5 Virtual node reconfiguration process

p_7 进行重构形成虚拟工位结点 $p'_{[4-7]}$. 虚拟工位结点 $p'_{[1-3]}$ 和 $p'_{[4-7]}$ 均不存在虚拟歧途径 VWR , 因此整个工艺优化后的最终 f_{h2} 、 f_{w2} 和 f_{c2} 分别为: 109 天、0.993 和 18.85 万元.

将该工艺和表 1、表 2 的数据分别输入时间最小化优化调度算法^[18] 和算法 Three-OVMG 中, 设定合同矢量 V . $h = 111$ 天, 得出两条资源调度途径 $VRoute$, 如图 6 所示.

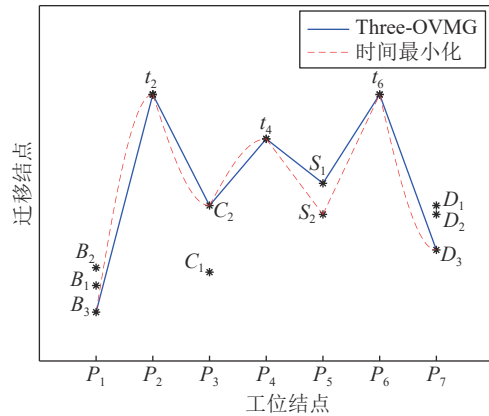


图 6 调度途径 VRoute 输出对比

Fig.6 Comparison of scheduling routes VRoute output

图 6 所示工艺经时间最小化优化调度算法处理后被分为两个优化阶段, 第一段被优化后的累积 f_{h1} , f_{w1} 和 f_{c1} 分别为: 58 天、0.990 和 16.25 万元; 第二段被优化后的累积 f_{h2} , f_{w2} 和 f_{c2} 分别为: 47 天、0.992 和 2.04 万元. 因此, 整个工艺被优化后最终的 f_{h1} , f_{w1} 和 f_{c1} 分别为: 106 天、0.991 和 18.33 万元.

比对最终的累积 f_w 值发现: 相对于时间最小化优化调度算法, 算法 Three-OVMG 最终优化的生产质量提升 0.202%, 即: $\Delta = (f_{w2} - f_{w1}) / f_{w1} \times 100\%$. 该结果表明: 在有限范围内相同合同矢量 V 约束下, 算法 Three-OVMG 的优化效果要好于时间最小化优化调度算法.

3.3 算法 Three-OVMG 的性能分析

影响算法 Three-OVMG 执行性能的因素众多, 本文只研究了算法在有限范围内不同合同矢量 V .

h 和不同工位结点集合 P 因素下执行性能的影响情况。

1) 有限范围内不同合同矢量 $V \cdot h$ 对算法的影响

限定工位结点集 P 中数目为 10 和 15 个, 各工位结点 p_i 的迁移结点集 T 中数目为集合 $\{2, 3, 4, 5\}$ 的随机数, 按 5%、10%、15%、20%、25% 的比例增加合同矢量 $V \cdot h$, 调用算法 Three-OVMG 执行, 得出有限范围内不同合同矢量 $V \cdot h$ 对算法的影响, 如图 7 所示。

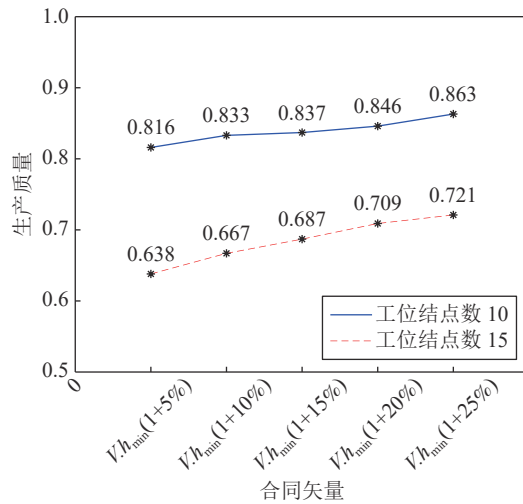


图 7 合同矢量 V 对性能的影响

Fig. 7 Effect of contract vector V on Performance

图 7 指出, 在有限范围内合同矢量 $V \cdot h$ 的值跟算法 Three-OVMG 优化调度后工艺最终的 f_w 值成正比关系。

2) 有限范围内不同工位结点数 P 集合对算法的影响

限定增加 20% 的合同矢量 $V \cdot h$ 后, 将工艺的工位结点集 P 中数目分别设定为 5、10、15 和 20 后, 各工位结点 p_i 的迁移结点集 T 中数目为集合 $\{2, 3, 4, 5\}$ 的随机数, 调用算法 Three-OVMG 执行, 得出有限范围内不同工位结点数 P 集合对算法的影响, 如图 8 所示。

图 8 指出, 在有限范围内工位结点集 P 中数目跟算法 Three-OVMG 优化调度后工艺最终的 f_w 值成反比关系。然而, 同时间最小化调度算法相比, 算法 Three-OVMG 优化调度后工艺最终的 f_w 值有所增加, 其增加比为: 1.58%、3.68%、11.13%、15.45%。

4 结束语

制造工艺的多目标优化调度具有一定的难度, 尤其是当工艺呈现出非线性即反馈制约时, 现有的研究成果无法实现优化调度, 本文针对这一不足提

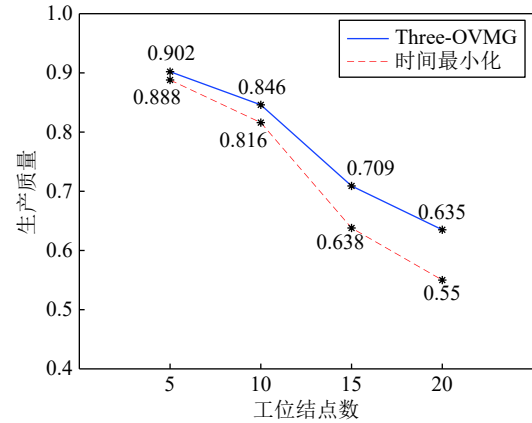


图 8 工位结点数对性能的影响

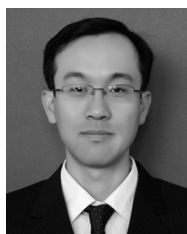
Fig. 8 Effect of workplace node numbers on performance

出了三层虚拟 workflow 决策模型及其优化调度算法。该模型汲取了虚拟技术的部分思想, 并根据反馈制约工艺建立反馈 workflow。随后, 结合所提出的虚拟 workflow 调度模型识别规则对其扫描, 重构工艺的虚拟结点, 构建三层虚拟 workflow 模型。通过对模型进行逐级分段, 段内采用虚拟串归约技术进行多目标动态优化, 段间采用多目标优化结果累积传递和虚拟正向调度策略从而实现了对整个模型的优化调度。经验证, 这种三层虚拟 workflow 优化调度方法具备虚拟特点, 简化了非线性制造工艺, 增强了对这些反馈制约工艺的描述, 有效地完成了多目标优化调度。此外, 该模型调度方法具备一定的启发性, 值得进一步研究。

References

- Xie Zhi-Qiang, Zhang Xiao-Huan, Xin Yu, Yang Jing. Time-selective integrated scheduling algorithm considering posterior processes. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(2): 344-362 (谢志强, 张晓欢, 辛宇, 杨静. 考虑后续工序的择时综合调度算法. *自动化学报*, 2018, **44**(2): 344-362)
- Duro R J, Mogas S L, Oxman N. Flow-based fabrication: An integrated computational workflow for design and digital additive manufacturing of multifunctional heterogeneously structured objects. *CAD Computer Aided Design*, 2015, **69**(12): 143-145
- Ding Jin-Liang, Yang Cui-E, Chen Yuan-Dong, Chai Tian-You. Research progress and prospects of intelligent optimization decision making in complex industrial process. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(11): 1931-1943 (丁进良, 杨翠娥, 陈远东, 柴天佑. 复杂工业过程智能优化决策系统的现状与展望. *自动化学报*, 2018, **44**(11): 1931-1943)
- Arabnejad H, Barbosa J G. A budget constrained scheduling algorithm for workflow applications. *Journal of Grid Computing*, 2014, **12**(4): 665-679
- Lv M, Wang G. Research on workflow-based modeling method of product manufacturing process. *International Journal of Smart Home*, 2014, **8**(3): 97-106
- Mollajafari M, Shahhoseini H S. A cost-optimized GA-based heuristic for scheduling time-constrained workflow applications in infrastructure clouds using an innovative feasibility-assured decoding mechanism. *Journal of Information Science and Engineering*, 2016, **32**(6): 1541-1560

- 7 Koch G K, Gallucci G O, Lee S J. Accuracy in the digital workflow: from data acquisition to the digitally milled cast. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 2016, **115**(6): 749–754
- 8 Kianpisheh S, Charkari N M, Kargahi M. Reliability-driven scheduling of time/cost-constrained grid workflows. *Future Generation Computer Systems*, 2016, **55**: 1–16
- 9 Chirkin A M, Belloum A S Z, Kovalchuk S V, Makkes M X, Melnik M A, Visheratin A A, et al. Execution time estimation for workflow scheduling. *Future Generation Computer Systems-The International Journal of Esience*, 2017, **75**(11): 376–387
- 10 Roberts P A, Willoughby I R, Barnes N. Evaluation of a gravimetric-based technology-assisted workflow system on hazardous sterile product preparation. *American Journal of Health-System Pharmacy: AJHP: Official Journal of the American Society of Health-System Pharmacists*, 2018, **75**(17): 1286–1292
- 11 Lucas S A, Ribeiro R, Teixeira M. Modeling and control of flexible context-dependent manufacturing systems. *Information Sciences*, 2017, **421**(12): 1–14
- 12 Stender M E, Beghini L L, Sugar J D, Veilleux M G, Subia S R, Smith T R, et al. A thermal-mechanical finite element workflow for directed energy deposition additive manufacturing process modeling. *Additive Manufacturing*, 2018, **21**(5): 556–566
- 13 Jing Shi-Kai, Jiang Hao, Xu Wen-Ting, Zhou Jing-Tao. Cloud manufacturing service composition considering execution reliability. *Jornal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2014, **26**(3): 392–400
(敬石开, 姜浩, 许文婷, 周竞涛. 考虑执行可靠性的云制造服务组合算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, **26**(3): 392–400)
- 14 Zhang Xi, Liu Ming-Zhou, Zhang Ming-Xin, Ge Mao-Gen. Research on rescheduling strategy optimization in manufacturing shop based on improved fuzzy Petri net. *Journal of Industrial Engineering/Engineering Management*, 2017, **31**(2): 216–221
(张玺, 刘明周, 张铭鑫, 葛茂根. 基于改进模糊 Petri 网的制造车间重调度策略优化研究. 管理工程学报, 2017, **31**(2): 216–221)
- 15 Zhang Meng, Li Guo-Xi. Multi-objective optimization of manufacturing service composition with interval numbers. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, **23**(8): 1787–1796
(张萌, 李国喜. 基于区间的制造服务组合多目标优化方法. 计算机集成制造系统, 2017, **23**(8): 1787–1796)
- 16 Luo Z Y, Wang P, You B, Zhu S X. Serial reduction optimization research of complex product workflow's accuracy under the time constraint. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, **8**(10): 1–9
- 17 Luo Zhi-Yong, Zhu Zi-Hao, You Bo, Liu Jia-Hui. Virtual iterative reduction optimization algorithm of workflow's time-accuracy. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2018, **40**(8): 2013–2019
(罗智勇, 朱梓豪, 尤波, 刘嘉辉. 虚拟工作流约束的时间—精确率迭代归约优化算法. 电子与信息学报, 2018, **40**(8): 2013–2019)
- 18 Woo J K, Dong K K, Seong H K. Cost adaptive VM management for scientific work-flow application in mobile cloud. *Mobile Networks and Application*, 2015, **20**(3): 328–336



罗智勇 哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院教授。主要研究方向为企业智能计算与调度系统, 数据处理, 网络优化。本文通信作者。

E-mail: luozhiyongemail@sina.com
(**LUO Zhi-Yong** Professor at the School of Computer Science and

Technology, Harbin University of Science and Technology. His research interest covers intelligent computing and scheduling system, data processing and network optimization. Corresponding author of this paper.)



王静远 哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院硕士研究生。主要研究方向为企业智能计算与调度系统。

E-mail: wangjingyuan_hust@163.com

(**WANG Jing-Yuan** Master student at the School of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology. His research interest covers intelligent computing and scheduling system.)



谢志强 哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院教授。主要研究方向为企业智能计算与调度系统, 数据处理, 网络优化。

E-mail: xiezhiqiang@hrbust.edu.cn

(**XIE Zhi-Qiang** Professor at the School of Computer Science and

Technology, Harbin University of Science and Technology. His research interest covers intelligent computing and scheduling system, data processing, and network optimization.)

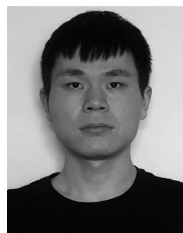


孙广路 哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院教授。主要研究方向为计算机网络与信息安全, 机器学习与智能信息处理。

E-mail: guanglu_sun@163.com

(**SUN Guang-Lu** Professor at the School of Computer Science and

Technology, Harbin University of Science and Technology. His research interest covers computer network and information security, machine learning, and intelligent information processing.)



杨旭 哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院硕士研究生。主要研究方向为企业智能计算与调度系统。

E-mail: yangxu_hust@sina.com

(**YANG Xu** Master student at the School of Computer Science and Technology, Harbin University of

Science and Technology. His research interest covers intelligent computing and scheduling system.)