

复材车间智能排产系统研究

张 伟 于成龙

中国航天系统科学与工程研究院 北京 100048

(277531349@qq.com)

摘 要 为解决航天复材车间以经验为主的排产实时性和实用性不够的问题,提出了智能排产系统并讨论了智能排产系统的体系架构和功能组成,研究了基于感知信息的排产计算方法,开发了航天复材车间智能排产原型系统并进行了校验。该系统能够根据生产实时数据和排产知识,自动判断并进行资源优化配置和工序工时计算,并根据生产扰动情况执行重排产及输出排产方案,为企业排产方案的制定提供了依据,并为后续工程化智能排产系统的开发奠定了基础。

关键词: 复材车间;智能;排产系统;工时计算;资源配置

中图法分类号 TH391

Study on Intelligent Scheduling System of Composite Shop

ZHANG Wei and YU Cheng-long

China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China

Abstract To solve the problem of insufficient real-time and practicability of experience-based production scheduling in aerospace composite workshop, an aerospace intelligent scheduling system is proposed, and the architecture and function composition of the system are discussed. Furthermore, the calculating method based on perceptual information is studied, and the prototype system of aerospace composite workshop is developed and verified. According to the production real-time data and the scheduling knowledge, the system can automatically judge and optimize resource allocation, calculate man-hours of each process step, and rearrange and output the scheduling plan according to the production disturbances. It provides a basis for the formulation of the enterprise scheduling program and lays the foundation for the development of the subsequent engineering intelligent scheduling system.

Keywords Composite shop, Intelligent, Scheduling system, Man-hour calculating, Resource allocating

1 引言

以卫星和火箭等为代表的航天产品加工工序长、工艺难度大、专用设备多、手工作业与机械作业并存,并且经常由于生产计划调整、设备故障、物料短缺以及质量问题等扰动事件导致生产计划再排产和生产任务再调整;而目前以经验为主的排产方式由于缺乏生产过程实时数据和工时计算方法的支撑,很难考虑车间实时情况并形成实用性和有效性兼备的排产方案,因此,开展基于实时感知的航天产品智能排产技术研究具有较好的实用价值和创新意义。

关于排产方法及排产系统,国内外学者已经进行了大量的研究。前期关注重点多集中于排产模型优化方法,主要包括运筹学方法^[1-2]、启发式方法^[3-4]、人工智能算法^[5-6],以及改进的GA算法和禁忌搜索算法等分布式算法^[7]等,以上研究在一定范围内解决了很多实际问题,但由于采用的排产模型进行了很多假设,与生产实际情况有一定差异^[8-10]。当前,随着智能制造技术的发展和互联网技术在车间的应用,基于实时感知信息的车间动态排产成为研究的重点和热点;孙棋棋

等基于航空复材车间手工生产、多品种小批量、瓶颈资源显著等特点,研究了基于互联网的排产系统架构,构建了生产各要素互联互通的复材车间智能排产系统^[11];王芊博等基于虚拟制造环境,将排产要素抽象为Agent模型并研究了Agent间的协调机制和排产模型HIS算法,开发了智能排产系统并对算法的有效性进行验证^[12];Mirko等基于物联网环境构建了数据驱动的自适应排产系统框架,提出了一种基于数据仿真驱动的排产算法,构建了自适应动态排产原型系统^[13];BARENJI等设计了基于Multi-agent的系统框架、功能结构和系统运行决策时序图,构建了基于Prometheus求解方法的排产系统,解决了柔性流水线制造系统同步重排产问题^[14];NASIRI等提出了一种基于计算机仿真的多响应调度规则优化方法,通过实验设计、离散事件模拟、多层感知器神经网络、径向基函数和数据包络分析等,优化并形成设备最有效的调度规则,在此基础上开发了基于复合调度规则的实时排产系统,解决了作业过程平均等待时间最小化问题^[15]。以上围绕车间动态排产的研究,在理论及方法层面均取得较大进展,但针对排产计算所需工时的科学计算,以及排产计算过程涉

基金项目:国防基础科研项目(JCKY2016203B083, JCKY2017203B071, JCKY2017203C105)

This work was supported by the Defense Industrial Technology Development Program(JCKY2016203B083, JCKY2017203B071, JCKY2017203C105).

通信作者:于成龙(yuchengl@163.com)

及的设备故障和插单等扰动事件处理方法等问题涉及较少,在一定程度上影响了排产系统的实用性。

总体来看,前期关于车间排产的研究已经取得很好的成绩,本文从解决车间实际排产问题出发,研究并提出基于实时感知信息的航天复材车间智能排产系统,开发了智能排产原型系统并进行功能校验,可为企业制定排产方案提供依据。

2 排产系统设计

根据某航天企业复材车间的特点,设计了智能排产系统的体系架构,如图1所示,包括数据层、计算层和应用层,其中数据层通过WebService接口与物联感知系统、生产计划管理系统和工艺管理系统等联接,获取零件、生产计划、工艺规程、计划执行和扰动情况等信息,为分析计算提出基础数据。分析计算层包括扰动事件处理、排产参数计算和排产计算;其中排产参数计算基于存储的“排产知识”自动配置资源和计算工时,排产计算基于生产状态、工艺规程、制造资源配置和工序工时构建排产模型并进行计算,生成优化的排产方案。应用层面向排产应用,实现基于扰动事件的重排产。

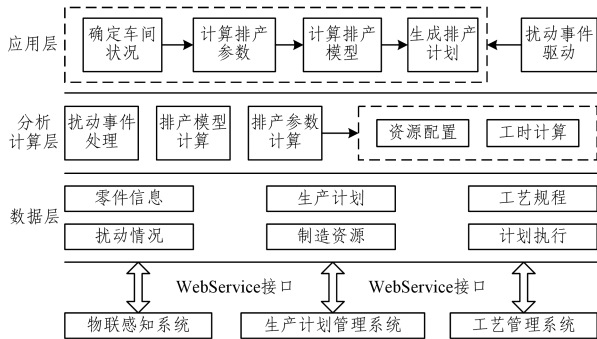


图1 智能排产系统架构

Fig. 1 Intelligent scheduling system architecture

该系统综合考虑车间实际加工过程,基于实时感知信息和排产知识等,形成复材车间智能排产系统,除同类研究普遍具有的集成性和实时性等性能外,还具有一定智能的特点:1)通过车间生产的历史数据进行分析挖掘,获取并存储生产过程的资源配置和工时计算知识;2)基于车间实时生产数据分析及掌握当前的生产进度、资源使用和可能存在的扰动事件等;3)当车间发出排产指令后,系统能够根据车间当前的生产情况,以及零件特点、生产任务、加工工艺等数据自行进行分析和判断,并自动调用知识进行资源配置和工时计算,得到所有工序的加工安排及配套的工时,并进一步自动完成排产计算。

3 排产计算方法

排产计算方法是智能排产系统的关键和核心,图2给出了排产计算的逻辑流程:首先获取车间当前情况:由物联感知、生产计划管理和工艺管理等信息化系统获取零件信息及工艺规程,零件在加工工序及工位、零件待加工工序及工位、制造资源当前使用状态和制造资源未来使用安排,以及可能出现的扰动事件;然后计算排产参数:由车间排产知识库根据零件、工艺规程和加工工位的特点,计算车间所有零件在加工

工序的剩余工时,以及优化待加工工序的资源配置并计算所需的工时,完成排产参数计算;基于上述基础,构建排产计算模型及对应的计算方法,并根据重排产指令计算排产模型得到新的排产计划,以此指导并优化车间生产过程。

排产参数计算、扰动事件处理和排产模型构建及计算是排产计算的关键要素。

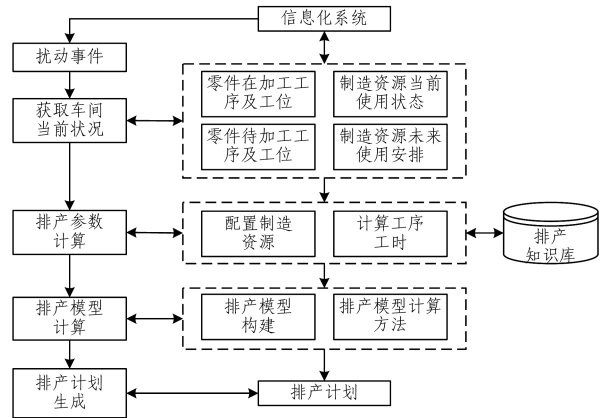


图2 智能排产计算逻辑流程

Fig. 2 Intelligent scheduling method logic flow

3.1 排产参数计算方法

排产参数计算流程如图3所示,包括资源配置和工时计算,具体如下:

零件生产任务到达车间后,首先根据零件加工工艺规程及所含工序,确定工艺路线,根据排产知识库建立工序与工位(可能多个工位)的映射关系,并通过信息化系统获取各工位当前的使用状态,以判断制造资源(设备、人员等)的忙闲状态,并将工作负荷较小的制造资源分配给对应工序,完成工序制造资源的优化配置并输出制造资源配置结果;然后基于已配置的资源,以及加工零件及类型(如材料、埋件及数量、几何属性)、工艺等,自动判断并调用排产知识库中的工时计算公式进行计算,得到零件各工序的工时;同理可得到车间所有零件未加工工序的制造资源配置和工时;由此,可根据生产计划的各工序加工安排,进一步预估所有零件加工时间节点和完工时间,由此完成生产进度预测,为启动重排产计算提供依据。

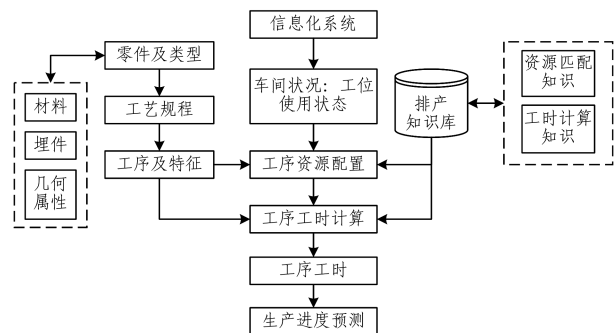


图3 排产参数计算流程

Fig. 3 Scheduling parameters calculating flow

3.2 扰动事件处理方法

扰动事件是进行重排产的驱动要素,基于排产计算需求,将车间扰动事件分为3类,其具体处理方法如下。

第一类:不能按时完成生产任务的扰动事件。定期读取车间当前的加工状态和零件未来的加工安排,由排产参数计算模块对资源配置和加工工时进行计算,并预判车间生产进度和对完工情况进行评估,如果不能按时完工则需要进行重排产,优化资源配置和加工安排,保证按时完成生产任务。

第二类:设备故障、物料/工装齐套性导致停工的扰动事件。当监测到该类扰动事件时,记当前时刻为 T_0 ,读取扰动事件开始时刻 T_s 和预估处理时长 t_d ,并判断扰动事件是否处理完毕。若扰动事件处理完毕,则根据当前车间生产情况、生产计划和待加工工序资源配置及工对生产进度进行预测,针对不能完工情况按第一类扰动事件处理。若扰动事件未处理完成,预计剩余处理等待时长 $t_d' = t_d - (T_0 - T_s)$,如果是设备故障等多工序受影响的扰动事件,则在排产计算过程中,将受影响且第 1 个参与排产的工序工时增加 t_1' 并作为新工时参与排产计算,其他各工序(含受影响的其他工序)的工时不变;如果是物料/工装齐套等单工序受影响的扰动事件,则该工序工时增加 t_1' 作为新工时参与排产计算,其他各工序的工时不变。

第三类:插单、重新下单等导致排产对象改变的扰动事件。当监测到该类扰动事件时,读取插单或重新下单等扰动事件信息,并将重排产对象进行梳理,并加入插单/重新下单零件,然后调整排产对象的加工优先级,零件 i 加工优先级系数 τ_i 计算方法为:

$$\tau_i = D_i - [T_{i0} + (t_{i1} - (T_{i0} - T_{i1})) + \sum_{j=2}^p t_{ij}] \quad (1)$$

其中,零件 i 设置的变量为: D_i 为交货期, t_{i1} 为当前在加工的工序工时, t_{ij} 为以当前加工工序为起始工序(第 1 个工序)顺延的第 j 个工序工时(假设 p 为工序总数), T_{i0} 和 T_{i1} 分别为当前时刻和当前工序的开始时刻, $t_{i1} - (T_{i0} - T_{i1})$ 为当前工序的剩余加工时长, $\sum_{j=2}^p t_{ij}$ 为全部待加工工序的工时总和;计算全部排产对象的加工优先级系数,并对其升序排列,即为车间零件加工优先级顺序。

3.3 排产模型构建及计算方法

排产计划评价指标主要考虑排产零件最大完工时间、车间设备总负荷和交货期总延期 3 个方面。其中,零件最大完工时间反映了排产方案的执行效率,是指同时加工多个零件,最后一道工序的完工时间;车间设备总负荷反映了车间资源的利用情况,是指设备在当前排产计划下生产产品的最大能力;交货期总延期反映了车间及时交付能力,是指车间所有零件的完工时间与交货期的时间差。本文针对上述三个指标建立多目标优排产计算模型,目标函数为:

$$f = a_1 f_1 + a_2 f_2 + a_3 f_3 \quad (2)$$

f_1 为最大完工时间最小函数, f_2 为总延期最小函数, f_3 为设备总负荷最小函数, a_1 、 a_2 和 a_3 分别为 f_1 、 f_2 和 f_3 的权重系数且为非负数, $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ 。

f_1 的计算过程为:

首先,计算车间全部零件第 k 个排产方案中每个工序的完工时间矩阵 T_k :

$$T_k = \begin{bmatrix} t_{k11} & \cdots & t_{k1p} \\ \vdots & & \vdots \\ t_{kn1} & \cdots & t_{knp} \end{bmatrix} = \begin{cases} T_s + T_p + T_m + T_d, & j=1 \\ \max(T_{p-j}, T_{pa-j}) + T_p + T_m + T_d, & j>1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, t_{k11} 为第 1 个零件第 k 个排产方案中第 1 个工序的完工时间, t_{knp} 为第 n 个零件第 k 个排产方案中第 p 个工序的完工时间, T_s 为 $n \times p$ 阶当前时刻矩阵,矩阵中元素为当前时刻 t , n 为排产对象的零件数量, p 为排产对象的工序数量, T_p 为 $n \times p$ 阶准备工时矩阵, T_m 为 $n \times p$ 阶工序加工工时矩阵, T_d 为 $n \times p$ 阶扰动事件消耗工时矩阵, j 为工序顺序, T_{p-j} 为零件完成前道工序时间, T_{pa-j} 为本工序完成当前零件的时间。

其次,计算车间全部零件第 k 个排产方案最大完工时间 ET_k ,即 T_k 最后一列 $T_{k-l}(t_{k1p}, \dots, t_{knp})'$ 向量的最大值:

$$ET_k = \max(T_{k-l}) = \max(t_{k1p}, \dots, t_{knp}) \quad (4)$$

最后,计算车间全部零件所有排产方案最大完工时间最小函数 $f_1: f_1 = \min(ET_1, \dots, ET_k, \dots)$ 。

f_2 的计算过程为:

首先,计算 T_{k-l} 向量与交货期向量 DT 的差值 ED_k :

$$ED_k = T_{k-l} - DT = (t_{k1p}, \dots, t_{knp})' - (D_1, \dots, D_l, \dots, D_n)' = (ed_1, \dots, ed_l, \dots, ed_n)' \quad (5)$$

其中, D_i 为第 i 个零件的交货期。然后,对向量 ED_k 所有元素求和,记为 $M_k, M_k = \sum_{i=1}^n ed_i$ 。

最后,计算车间排产对象所有排产方案总延期最小函数 f_2 :

$$f_2 = \min(M_1, \dots, M_k, \dots, M_n) \quad (6)$$

f_3 的计算过程为:

首先,计算第 k 个排产方案中设备加工工序工时矩阵 T_{m-e} 与设备调整工时矩阵 T_{m-a} 的差值 T_{ea-k} ,其中,若 T_{m-e} 和 T_{m-a} 中各元素所对应的工序为手工作业工序时,元素值取 0。

$$T_{ea-k} = T_{m-e} - T_{m-a} = \begin{bmatrix} te_{11} & \cdots & te_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ te_{n1} & \cdots & te_{np} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} ta_{11} & \cdots & ta_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ ta_{n1} & \cdots & ta_{np} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} tea_{11} & \cdots & tea_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ tea_{n1} & \cdots & tea_{np} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其次,计算设备运行效率矩阵 Q_{s-k} ,其中, q_s 为设备故障率矩阵,若 q_s 中元素所对应的工序为手工作业工序时,元素值取 1,若为设备加工工序时,元素值取设备故障率。

$$Q_{s-k} = 1 - q_s = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} q_{11} & \cdots & q_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ q_{n1} & \cdots & q_{np} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - q_{11} & \cdots & 1 - q_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ 1 - q_{n1} & \cdots & 1 - q_{np} \end{bmatrix} \quad (8)$$

然后,计算 $T_{ea-k} \cdot Q_{s-k}$,记结果为 TQ_k ,对 TQ_k 所有元素取和,记为 Q_k :

$$TQ_k = T_{a-k} \cdot Q_k = \begin{bmatrix} tq_{k11} & \dots & tq_{k1p} \\ \vdots & & \vdots \\ tq_{kn1} & \dots & tq_{knp} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Q_k = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^n tq_{kij} \quad (10)$$

最后,计算车间全部零件所有排产方案设备总负荷最小函数 f_3 :

$$f_3 = \min(Q_1, \dots, Q_k, \dots) \quad (11)$$

该计算模型受零件工艺流程约束,即 $t_{s-p_i} < t_{s-p_{i+1}}$,其中, t_{s-p_i} 为零件第 i 道工序的开始时间, $t_{s-p_{i+1}}$ 为零件第 $i+1$ 道工序的开始时间。

4 系统开发及校验

基于前述研究开发了车间智能排产系统,界面如图 4 所示;并基于某航天企业复材车间进行校验,知识库如图 5 所示,结果如图 6 所示。

(1)排产知识库构建:根据历史数据分析挖掘及凝练排产知识,构建工序与工位(可能多个工位)的映射关系,包括加工工序所需的设备和人员,以及工序工时的计算方法。

(2)制造资源配置校验:选择零件 101P01,计算该零件的制造资源配置,输出结果如图 6(a)所示,其中,W008 和 W010 为该零件加工工序 A1 随炉试件制备的制造资源。

(3)工时计算校验:选择零件 101P02 并计算其工序工时,输出结果如图 6(b)所示,其中,该零件加工工序为 A1,使用编号为 18 的设备时,工序工时为 76 min;使用编号为 20 的设备时,工序工时为 61 min。

(4)扰动事件驱动排产计划调整校验:以零件 101V01, 130822E4 和 140620E5 为排产对象,经排产计算,得到调整前的排产计划,当有扰动事件发生时,以插单为例,界面如图 6(c)所示,新增 101V02 零件,得到调整后的排产计划,调整前和调整后的排产计划部分截图如图 6(d)所示。



图 4 系统界面

Fig. 4 Scheduling system interface

工序编号	工序名称	工序类型	工位名称	机器
1	M6	固化	机加工序	M01
2	A1.1-3	埋件表面磷酸	机加工序	其他车间
3	M6	固化	机加工序	M02
4	A1.1-3	埋件表面磷酸	机加工序	其他车间
5	A1.2-1	铝面板机加	机加工序	M03
6	A1.2-1	铝面板机加	机加工序	其他车间

工时计算知识
该道工序的工时计算公式如下,式中,x为物料数量,y为物料种类:
(1) $xy \leq 30, T=30 \cdot (xy+15)$
(2) $30 < xy \leq 150, T=15 \cdot (xy-30) / 100+5$
(3) $150 < xy \leq 300, T=20 \cdot (xy-150) / 150+15$
(4) $300 < xy \leq 600, T=35 \cdot (xy-300) / 300+15$
(5) $600 < xy \leq 1500, T=45 \cdot (xy-600) / 900+15$
(6) $1500 < xy, T=60 \cdot (xy-1500) / 1500+30$

图 5 排产知识库界面

Fig. 5 Scheduling knowledge interface

生产计划号	工序编号	工序名称	加工设备/人员编号
101P01	A1	随炉试件制备	W008, W010
101P01	A1.1-1	领取金属预埋件	W001, W002
101P01	A1.1-3	埋件表面磷酸	M01, M02
101P01	A1.1-4	埋件安装丝套	W001, W002
101P01	A1.1-5	称重、刷底胶、发泡胶	W001, W002
101P01	A1.2-1	碳面板铺层、固化	M03, M04

(a)制造资源配置

生产计划号	工序编号	工序名称	加工设备/人员编号	工序工时 (min)
101P02	A1	随炉试件制备	M018, M020	76, 61
101P02	A1.1-1	领取金属预埋件	W002, W001	5.3, 4.2
101P02	A1.1-2	埋件高度测量	W002, W001	0, 0
101P02	A1.1-3	埋件表面磷酸	M02, M03	3.1, 4.2
101P02	A1.1-4	埋件安装丝套	W002, W004	25.4, 23.6
101P02	A1.1-5	称重、刷底胶、发泡胶	W002, W003	450.8, 590.7
101P02	A1.2-1	碳面板铺层、固化	M01, M02	25.7, 3.1

(b)工时计算



(c)“插单”扰动事件驱动界面

调整前排产计划

生产计划号	工序编号	加工设备/人员编号	工序开始时间	工序结束时间
101V01	A1.1-1	W001	15:29:56	15:31:55
101V01	A1.1-3	M03	15:31:55	15:36:07
101V01	A1.1-4	W004	15:36:07	15:45:37
130822E4	A1.1-1	W001	15:27:09	15:29:56
130822E4	A1.1-3	M02	15:29:56	15:33:01
130822E4	A1.1-4	W004	20:34:09	15:34:52
140620E5	A1.1-1	W002	15:29:56	15:33:00
140620E5	A1.1-3	M02	15:48:28	15:51:33
140620E5	A1.1-4	W004	15:51:33	16:03:56

调整后排产计划

生产计划号	工序编号	加工设备/人员编号	工序开始时间	工序结束时间
101V01	A1.1-1	W001	15:39:16	15:41:15
101V01	A1.1-3	M02	15:44:02	15:47:07
101V01	A1.1-4	W004	16:10:00	16:19:30
101V02	A1.1-5	W001	16:10:00	22:56:10
101V02	A1.2-1	M02	23:44:38	23:47:43
101V02	A1.2-3	M03	23:48:50	23:53:02
130822E4	A1.1-1	M03	15:44:02	15:48:14
130822E4	A1.1-3	W004	16:19:30	16:37:39
130822E4	A1.1-4	W003	23:54:56	23:55:56
140620E5	A1.1-1	W001	15:36:14	15:38:40
140620E5	A1.1-3	M02	15:39:16	15:42:21
140620E5	A1.1-4	W004	15:42:21	15:54:44

(d)插单扰动事件发生前后的排产计划

图 6 系统校验结果

Fig. 6 System verification results

结束语 本文围绕航天复材车间智能排产问题,研究并提出了智能排产系统的体系架构和功能组成,讨论了排产计算方法及所包括的排产参数计算、扰动事件处理和排产模型构建及计算等关键内容,在此基础上开发了航天复材车间智能排产原型系统并进行了功能校验。该系统能够基于零件特征和生产过程实时感知数据,自动判断并进行资源优化配置和计算零件各工序的工时,并且根据生产扰动情况进行重排产并输出排产方案,该研究为合理制定排产方案提供了工具和保障;后续将基于现有研究基础,研究及开发更为先进的计算模型和计算方法,提升计算效率,保证系统的先进性,为开发先进的实用化智能排产系统提供研究基础和技术保障。

参 考 文 献

- [1] LIU Y H, MA J, MOU J H, et al. Dynamic sequencing of mix-model assembly line oriented to rush orders[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2017, 23(12): 2647-2656.
- [2] KU W Y, BECK J C. Mixed integer programming models for job shop scheduling: A computational analysis[J]. *Computers & Operations Research*, 2016(73): 165-173.
- [3] ZHANG Y F, YANG T, WANG J Q, et al. Intelligent navigation of assembly activities based on real-time manufacturing information[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2014, 20(1): 28-36.
- [4] FAN H L, XIONG H G, JIANG G Z, et al. Survey of dispatching rules for dynamic Job-Shop scheduling problem[J]. *Journal of Computer Applications*, 2016, 33(3): 648-653.
- [5] FRAMINA J M, PEREZ-GONZALEZ P. New approximate algorithms for the customer order scheduling problem with total completion time objective [J]. *Computers & Operations Research*, 2017(78): 181-192.
- [6] AHMADI E, ZANDIEH M, FARROKH M, et al. A multi objective optimization approach for flexible job shop scheduling problem under random machine breakdown by evolutionary algorithms[J]. *Computers & Operations Research*, 2016(73): 56-66.
- [7] WANG L, DENG J, WANG S Y. Survey on optimization algorithms for distributed shop scheduling[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(1): 1-11.
- [8] ZAHMANI M, ATMANI B. A data mining based dispatching rules selection system for the job shop scheduling problem[J].

Journal of Advanced Manufacturing Systems, 2019, 18(1): 35-56.

- [9] SHOKOUHI E. Integrated multi-objective process planning and flexible job shop scheduling considering precedence constraints [J]. *Journal Production & Manufacturing Research*, 2018, 69(1): 61-89.
- [10] BÜRG Y, REINHAR D. A neighborhood for complex job shop scheduling problems with regular objectives [J]. *Journal of Scheduling*, 2017, 20(4): 391-422.
- [11] SUN Q Q, DING M. Research on intelligent service scheduling scheduling in aviation compound production workshop[J]. *Intelligent Manufacturing*, 2017(12): 39-43.
- [12] WANG Q B, ZHANG W X, WANG B L, et al. Research on Agent-based Hybrid Flow Shop Dynamic Scheduling Problem[J]. *Journal of Computer Applications*, 2017, 37(10): 2991-2998.
- [13] MIRKO K, JENS E, MICHAEL F, et al. A data-driven simulation-based optimisation approach for adaptive scheduling and control of dynamic manufacturing systems[J]. *Advanced Materials Research*, 2016(1140): 449-456.
- [14] BARENJI A V, BARENJI R V, ROUDI D, et al. A dynamic multi-agent-based scheduling approach for SMEs[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017 (89): 3123-3137.
- [15] NASIRI M M, YAZDANPARAST R, JOLAI F. A simulation optimisation approach for real-time scheduling in an open shop environment using a composite dispatching rule[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2017, 30(12): 1239-1252.



ZHANG Wei, born in 1983, master, engineer. His main research interests include production process control technology.



YU Cheng-long, born in 1979, Ph.D, senior engineer. His main research interests include intelligent manufacturing research, planning and application.