

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.12.002

生产单元人机合作策略仿真分析

陈进¹, 张晓冬^{1,2}, 赵东方¹, 郭栓银³

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 北京科技大学东凌经济管理学院, 北京 100083;
3. 中科院苏州生物医学工程技术研究所, 浙江 苏州 215163)

摘要:生产单元不仅要强调先进制造技术, 还要重视高素质员工和灵活的人机合作方式, 才能适应快速变化的制造环境。为动态、定量地研究生产单元的人机合作策略, 结合计算机仿真和 Agent 建模技术, 进行了基于 Agent 的生产单元人机合作策略仿真研究。建立人机合作仿真模型, 提出人机合作仿真的实现方法; 研究生产单元指定合作、部分自主合作和完全自主合作的合作机制; 并以某发动机生产单元为例, 设计了一系列仿真实验, 通过比较任务等待时间、订单准时完成率、机器等待率和操作工利用率 4 个绩效指标, 对该生产单元的各种人机分工模式进行了仿真分析和评价, 从而指导实际生产单元采取更加合理的分工模式。

关键词:智能主体; 生产单元; 人机合作; 仿真

中图分类号: TH18

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)12-009-07

Simulation on human-machine cooperation strategy in production cells

CHEN Jin¹, ZHANG Xiaodong^{1,2}, ZHAO Dongfang¹, GUO Shuanyin³

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Dongling School of Economics and Management,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 10083, China;

3. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Science, Suzhou 215163, China)

Abstract: To adapt to the rapid changes of manufacturing environment, production cell needs to focus on high qualified staff and flexible human-machine cooperation method at the same time, when advanced manufacturing technology (AMT) is emphasized on. In order to study human-machine cooperation strategy dynamically and quantitatively in production cells, a simulation study which combined computer simulation with agent modeling technology is carried out. Firstly, a human-computer cooperation simulation model is established, and its realization method is presented. Secondly, specific cooperation mechanisms of designated production cell cooperation, partly independent cooperation and completely independent cooperation are studied respectively. Finally, an engine production cell is taken as an example, a series of simulation experiments are designed, and four performance indicators of the task waiting time, order on time percentage, waiting rate of machine and operator utilization are established to analyze and evaluate all kinds of man-machine division modes of the production cell to find a more reasonable mode.

Key words: agent; production cell; human-machine cooperation; simulation

收稿日期: 2013-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(70971146); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0608)

作者简介: 陈进(1981-), 男, 重庆大学机械工程学院博士研究生, 主要从事复杂生产系统仿真、网络系统、人因与认知工程研究, (E-mail)glietcj@163.com。

随着制造业的迅速发展,市场环境发生了巨大变化,产品生命周期日趋缩短、客户需求日益多样化,各种先进的生产模式应运而生。生产单元由于具有缩短制造周期、节约生产面积、避免库存积压、提高设备利用率等显著优点,得到了越来越广泛的应用。在技术方面,生产单元强调高设备柔性并按照产品工艺组织生产;在管理方面,生产单元则强调高素质员工和灵活的人机合作方式,从而适应快速变化的制造环境;近年来对生产单元人机关系研究已成为热点问题。Keytack H. 等从人机合作比例和人员忙碌情况直观的评价不同人机配置关系;Schlick S. 等^[1]从工作效率、工作分工等方面对传统柔性制造单元与自治生产单元进行了对比仿真研究;Viviana I. Cesani^[2]提出了人力配置机动性的概念,指出人力资源配置方案的制定,必须综合考虑作业者工作量均衡、作业共享以及运作约束,并要平衡其相对于整体效能的相互关系;杨灿军等^[3]提出了人机合作方式和人主机辅、机主人辅、人机协同 3 个人机合作策略及系统总体结构模型;傅卫平^[4]研究了人机合作的方式方法、人机接口等关键技术,建立了一般的人机合作概念模型;曹乐等^[5]建立了装配线多技能作业人员优化配置模型;陈友玲等^[6]建立了以产能瓶颈站点为调度核心,并向其他次产能瓶颈站点发散的敏捷化生产调度模型以了解企业实时生产调度;方卫宁等^[7]立足于轮班工作模式,阐述轮班制度对工作者负荷的影响;郭伏等^[8]运用工业工程的人机合作工作分析技术,设计了流水线生产

能力的平整方案;Shahram 等^[9]对单元制造系统的设施布局为最小化搬运成本构建了数学模型,并采用改进模拟退火算法进行求解,取得了较好的解决效果。从相关文献可以看出,已有的研究大多仅给出了人机之间的协作、交互和共同决策等的理论框架,在应用上限于人-机个体之间的一对一的合作,侧重于某一组织要素的研究,而且大多数研究模型中的人作为被动的普通资源使用^[10-13]。由于生产单元中人机合作方式、任务流程和生产环境的不确定性和动态性,使针对生产单元的特点的人机合作关系研究还非常有限,尤其是定量和动态的研究结论非常缺乏^[14-21]。因此,针对生产单元中的人机合作问题,考虑到计算机建模与仿真技术支持复杂系统的动态分析的优点,文章将生产单元过程仿真和 Agent 建模技术相结合,建立人机合作的仿真模型,通过仿真研究分析生产单元人机关系对生产单元的影响规律,从而实现了对生产单元的各种人机合作策略的预测、分析和优化,提高生产单元的柔性及其对市场需求的快速反应。

1 生产单元人机合作仿真模型

生产单元作为复杂的制造系统,涉及信息流、物流和设备布局等多方面信息,为实现生产单元人机合作过程描述,文章利用系统建模和智能主体理论,集成生产单元制造过程基础模型和生产者智能主体模型,实现对生产单元制造过程中人机合作的模拟,其模型结构如图 1 所示。

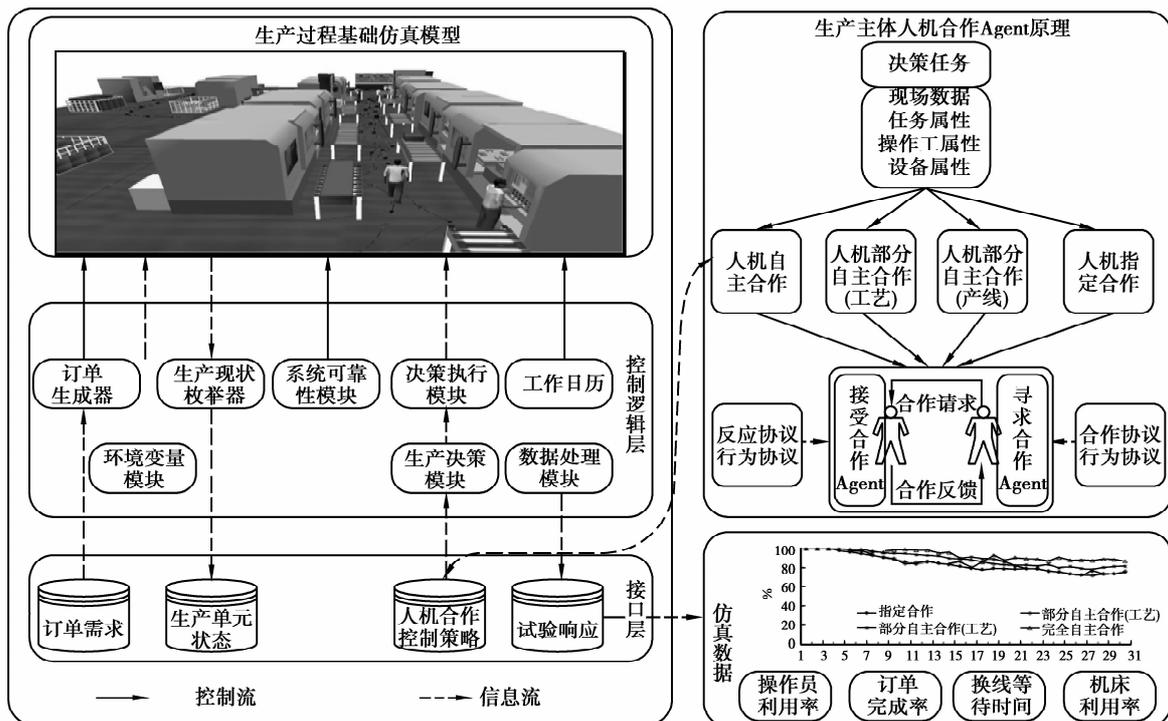


图 1 生产单元人机合作仿真模型结构

图 1 中生产过程基础模型包括设备布局、物流路径、在制品状态、原材料及操作工等生产单元基本信息,用以描述产品在生产系统加工过程和物流路径。在实际生产单元中收集设备、工艺参数、物流路径等生产数据,建立产品对象模型、设备模型、工作者模型和工艺模型,并对模型进行集成,进而从整个生产系统的角度建立生产过程基础仿真模型。

控制逻辑层中订单生成器为仿真的触发点和决策点。订单生成器模块根据订单需求产生订单状态信息,传递给生产系统后,生产系统根据当前系统状态枚举出生产状态数据,采用定量化的数据描述生产现状。决策执行模块根据当前订单属性、系统状态等信息,调用人机合作控制策略。环境变量模块和系统可靠性模块也可以触发决策模块,其中环境变量模块模拟外部实时动态变化的环境,系统可靠性模块模拟生产单元中设备的可靠性;工作日历模块以约束的形式提供给基础仿真模型,当仿真点处于工作日历以外的时间单元时,暂停仿真模型;数据处理模块主要对仿真数据进行相关的处理、加工。

接口层负责处理与外界程序通信事件,提供智能体仿真决策策略,同时将生产状态数据、决策数据传递给仿真模型,并保存生产系统仿真模型输出数据。

接口层中的人机合作控制策略根据当前生产系统的状态、任务属性、设备属性等信息,选择人机合作策略,智能体根据合作协议和行为协议选择最佳合作伙伴。合作协议包含人机自主合作、人机指定合作和人机部分指定合作(按工艺和产线)4 种合作策略中生产者合作对象、合作对象选择机制等信息;行为协议主要包含 4 种合作策略中不同主体针对不同事件的行为规则;反应协议则是指各智能体针对不同合作策略中对合作请求所做出的响应规则。

将上述生产单元人机合作仿真通过离散系统仿真软件 Flexsim 和数据分析软件建模,同时结合智能体理论模拟生产单元中各行为主体,构建生产单元人机合作仿真模型,利用仿真系统的随机性和重现性模拟生产制造过程。

2 生产单元人机合作机制

生产单元人机合作仿真模型中,人机合作定义为在人机合理分工的前提下,对人与机器的运行次序及匹配关系进行全局考虑,以保证生产作业能高效完成。针对生产单元中的人机合作问题,文章提出了人机指定合作、人机部分自主合作(按产线和工艺)和人机完全自主合作的 4 种合作策略。

1) 人机指定合作指在生产单元内指定操作者和

机器之间的合作关系。生产过程中产生任务后,任务主体(人或机器)只能向指定合作主体(机器或人)发出指令或请求,参与合作的人与机器双方在同一时段内,只能具体执行某一个合作任务。如果指定合作主体处于忙碌状态,则需要等待其空闲后才能响应合作,共同执行任务。

2) 人机部分自主合作指在生产单元中,并不完全指定操作者与机器的合作关系。任务主体(人或机器)可以按照一定的规则,向选择范围内的主体(机器或人)发出合作请求,然后根据反馈的状态和信息进行判断,做出合作选择。人机部分自主合作有按生产线和按工艺自主合作 2 种合作策略。

3) 人机完全自主合作指在生产单元中不指定操作者和机器的合作关系。任务主体(人或机器)可以向生产单元内所有主体(机器或人)发送合作请求,根据其状态和技能自主决策,根据合作者完成任务时间最短为原则,选择最佳合作伙伴。

人机合作策略中,其合作机制为任务智能主体根据任务属性及合作策略,向合作主体发出合作请求,合作主体接收到合作请求后,判断合作任务是否和自己匹配,任务匹配后加入其合作任务序列,并判断本主体该操作此任务的技能值和自己的状态,满足合作主体要求后,向对方发出合作确认信息,不满足相关要求后,则拒绝合作主体合作请求,继续自己生产任务,其合作机制如图 2 所示。

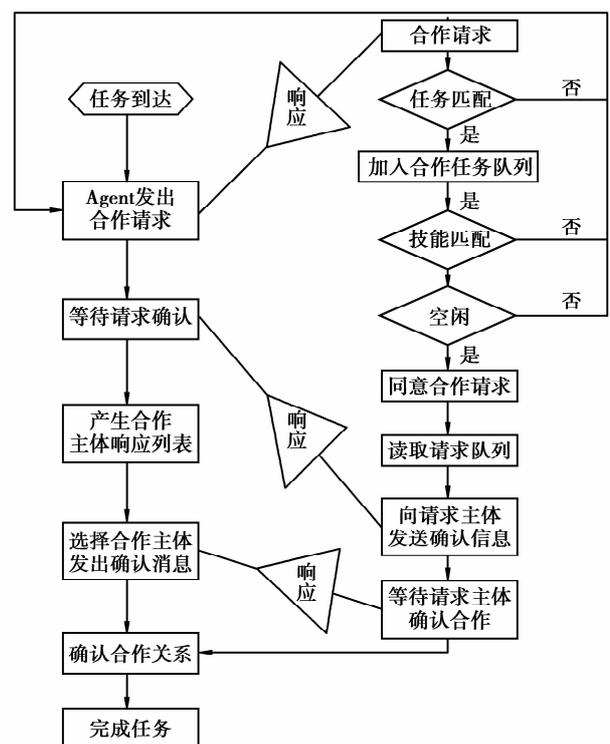


图 2 人机合作机制

3 仿真实验

某集团摩托车发动机生产单元属于典型的多品种小批量生产模式,由于订单更换频繁,人机交互量大,生产单元的人机分工和协作一直是生产管理所面临的关键问题。为此,采用文章提出的方法,对该生产单元的各种人机分工模式进行了仿真分析和评价,从而优化其人机合作策略,指导生产单元采取更加合理的分工模式。

3.1 实验方案设计

在试验中,首先考虑操作者的技能值是否达到机床要求技能值。要求操作者的技能值不低于机床要求技能值才能操作机床。在仿真模型参数设置中,规定操作者的技能值不低于 7 才能够操作机床。操作者技能值如表 1 所示。一般情况下,系统会默认技能值越高的操作者优先匹配操作机床,同时会综合考虑操作成本和机床分配的协调。

表 1 操作者对应机床的操作技能值

操作者	机床								
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉
L ₁	9.5	7.3	8.2	8.5	8.2	8.4	8.0	6.2	9.0
L ₂	8.0	8.2	7.2	9.7	9.0	6.0	6.3	8.0	8.3
L ₃	8.0	8.1	9.0	9.1	7.2	6.5	6.0	8.2	8.0
L ₄	8.0	8.2	6.2	6.7	6.0	7.5	8.5	8.0	8.1
L ₅	6.2	6.7	8.0	8.5	8.0	8.1	8.2	7.7	6.8
L ₆	6.1	8.3	8.2	8.1	7.8	7.9	8.2	6.5	9.6

利用人机合作模型进行仿真实验,比较不同合作方式对操作者、机器设备以及生产单元系统的影响。具体有以下 4 个实验方案。

方案 1:人机指定合作。在生产和换线过程中,采用指定操作员和机器操作的关系模式。操作者 L₆ 与机器 M₉ 合作;操作者 L₁ 与机器 M₁ 和 M₂ 合作;操作者 L₂ 与机器 M₃ 和 M₄ 合作;操作者 L₃ 与机器 M₅ 合作;操作者 L₄ 与机器 M₆ 和 M₇ 合作;操作者 L₅ 与机器 M₈ 合作。

方案 2:按照生产线人机部分自主合作。按照箱体生产线和缸体生产线将人与机器认为 2 组;操作者 L₆、L₁、L₂、L₃ 与机器 M₉、M₁、M₂、M₃、M₄、M₅ 合作;操作者 L₄、L₅ 与机器 M₆、M₇、M₈ 进行合作。当任务到达后,在组内寻求合作,如果所请求的合作对象目前处于忙碌状态,则不能接受合作请求,需要另选合作者或等待其空闲。

方案 3:按照加工工艺人机部分自主合作。按照 2 条生产线中的加工工艺相似性,将生产单元中人与机器划为 2 组;操作者 L₆、L₁、L₄ 与机器 M₉、M₁、M₂、M₆、M₇ 进行合作;操作者 L₂、L₃、L₅ 与机器

M₃、M₄、M₅、M₈ 进行合作。

方案 4:人机完全自主合作。整个生产单元内部所有操作者和机床均可进行合作。

3.2 仿真结果分析

运行仿真模型,收集 30 个订单完工之后 4 种合作方式下实时数据,包含加工时间、换线时刻、等待时间、换线时间、加工中心属性、操作主体属性和合作对象属性等。30 个订单加工完毕为一个仿真周期。30 个订单加工过程中,实际换线 16 次。运行 10 个仿真周期,统计仿真结果。

生产单元人机合作的仿真评价采用 4 个目标矢量,分别为任务等待时间、订单准时完成率、机器等待加工率和操作工利用率。在一轮仿真试验中,随着系统的进行,每调用一次目标矢量计算器,将重新计算相应矢量值。下面分别比较目标矢量的仿真结果。

1)任务等待时间:指任务产生到开始解决所需要的时间。4 种不同人机合作策略下换线任务的等待时间如表 1 所示,等待时间比较如图 3 所示。

表 2 4 种合作方式下换线等待时间均值 T/min

换线序列号	指定合作	部分自主合作(按生产线)	部分自主合作(按工艺)	完全自主合作
1	3.1	2.3	1.7	2.5
2	5.8	3.1	2.1	1.1
3	5.3	1.9	1.8	0.3
4	1.5	2.8	0.7	3.2
5	3.9	3.5	2.3	2.7
6	7.7	3.6	1.8	0.1
7	6.8	2.6	2.1	0.0
8	8.7	3.4	4.3	1.3
9	8.3	0.6	2.4	3.1
10	9.7	2.8	2.9	1.2
11	10.9	3.5	2.0	0.6
12	1.7	1.9	3.4	1.5
13	3.6	3.1	1.4	2.2
14	5.3	2.7	0.1	1.5
15	8.3	7.1	0.8	0.8
16	4.6	3.2	3.5	1.6
平均值	5.95	3.0	2.08	1.48

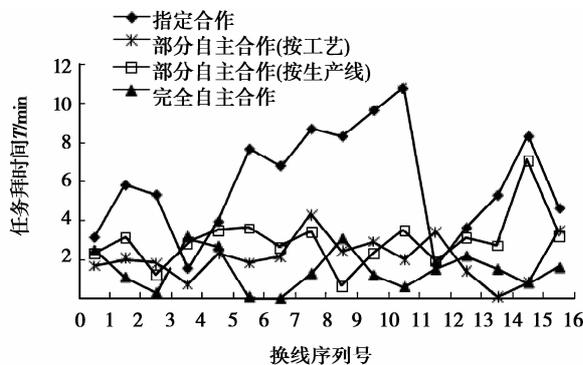


图 3 4 种合作方式下换线等待时间比较

由表 1、表 2 和图 3 可知,在 16 次换线序列中,人机指定合作时,操作者 L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_5 对应机床 M_2 、 M_3 、 M_5 和 M_8 的操作技能值都较低,导致平均换线等待时间最长为 5.95 min,部分自主合作策略下平均换线等待时间居中,而完全自主合作方案下系统会综合考虑操作成本和机床分配的协调,一般情况下会选择操作技能值越高的操作者优先匹配操作机床,这时平均换线等待时间最短为 1.48 min,完全自主合作方案比指定合作方案节省时间 4.47 min。由于在按照生产线划分的合作策略下,操作者的移动范围要大于按工艺划分移动的范围,因此其换线等待时间也略长。

2) 订单准时完成率:30 个订单全部完成后,统计整个生产过程中,所有订单序列的完成情况,根据

仿真结果计算出订单准时完成率。4 种人机合作策略下订单完成情况如图 4 所示。

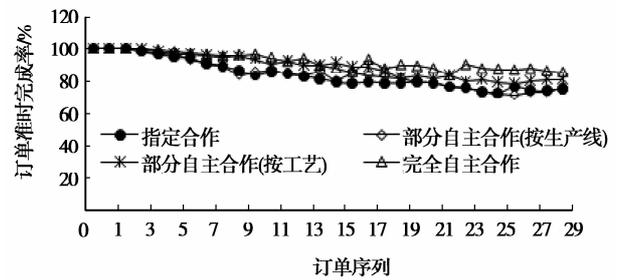


图 4 4 种合作方式下订单准时完成率比较

在图 4 中,由于人机部分自主和完全自主合作策略会优先匹配操作技能值高的操作者和机床,这样换线等待时间自然比指定合作短,因此相应的人机合作策略下订单准时完成率也要高一些。人机指定合作中 30 个订单的准时完成率均值约为 83.74%,按生产线部分自主合作下订单准时完成率约为 84.72%,按工艺自主合作下订单准时完成率为 89.23%,完全自主合作下订单准时完成率约为 92.16%。完全自主合作中订单准时完成率比指定合作中高出 8.42%。由图 4 可知,部分自主合作和完全自主合作策略下订单准时完成率波动变化更为平稳,说明自主合作方式下生产单元应对订单变化的能力比较强,生产系统的柔性较高。这种结果和换线等待时间保持一致,也可判定模型的有效性。

3) 机器等待率:某些任务到达,机器需要等待操作者的合作才能成任务,机器等待率就是等待时间占总工作时间的比率。该人机合作模型中的等待时间有 3 部分:等待装载时间、等待卸载时间和等待换线时间。4 种合作方式下,各机器的等待率比较如图 5 所示。

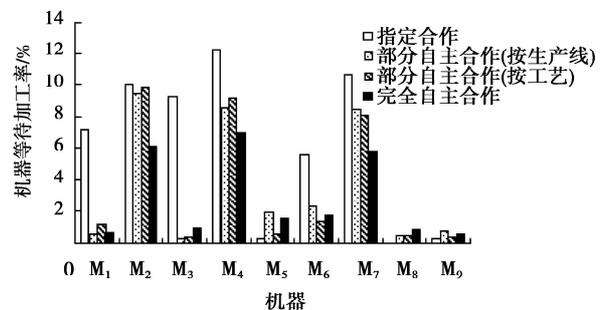


图 5 4 种合作方式机器等待加工率比较

从图 5 中可以看出:1) 在人机指定合作的情况下,尽管操作者 L_3 和 L_5 对应机器 M_5 和 M_8 的操作技能值均偏低,分别为 7.2 和 7.7,但由于机器 M_5 、 M_8 和 M_9 均是单人负责操作,而且无需进行换线,

因此其等待率很低,而其他机器均是 2 台共享 1 个操作者,因此等待率要高;2)按生产线人机部分自主合作的情况下,操作者 L_4 对应机器 M_4 的操作技能值为 6.7 小于 7,因此操作者 L_4 不能操作机器 M_4 。由于装卸时间相对加工时间较长,以及人员分配的不均衡,机器 M_2 、 M_4 、 M_7 是由于要进行换线,换线等待时间较长,所以总的等待率也最高;3)在加工工艺人机部分自主合作的情况下,由于机器 M_1 、 M_3 和 M_6 受到机器 M_2 、 M_4 、 M_7 换线的影响,操作者的互换,机器等待时间有一定的缩短,其等待率也有不同程度的降低,所以等待率也处于相对较高的水平;4)在人机完全自主合作的情况下,除机器 M_2 、 M_4 、 M_7 要受到换线的影响等待率略高一些以外,由于整个生产单元内部所有操作者和机床均可进行合作,因此相比较其他 3 种方式而言机器等待率更低。结合这 4 种方式可以看出:操作者技能对缩短机器等待时间不是最有效的影响因素,用多人多机的自主合作策略,可以有效缩短机器等待时间,平衡机器的使用效率。对于机器等待,最高的 M_2 、 M_4 和 M_7 ,完全自主合作策略下,等待时间的缩短最为明显,但是由于涉及换线任务等待,所以这 3 台机器的等待率仍然最高。

4)操作员利用率:操作员在生产单元中主要负责的任务有装夹、卸载、搬运、质检和换线等。在经过 30 个生产订单的加工任务与 16 个换线任务的仿真运行后,各个操作员利用率比较情况如图 6 所示。

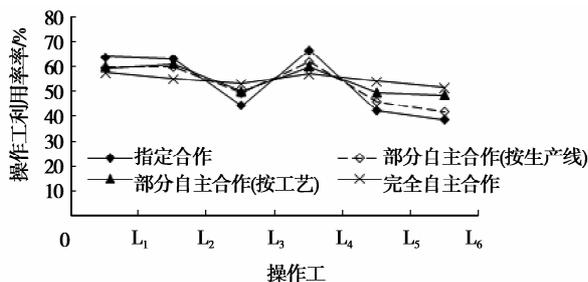


图 6 4 种工作方式下操作工利用率比较

由于 M_2 、 M_4 、 M_7 这 3 台机器要执行换线任务,所以对应的操作工的工作时间也比较长。在人机指定合作的情况下, L_1 操作机器 M_1 和 M_2 , L_2 操作机器 M_3 、 M_4 以及 L_4 操作机器 M_6 、 M_7 ,均是 1 个操作者负责 2 台机器, L_3 、 L_5 和 L_6 是 1 个操作者负责 1 台机器,所以 L_1 、 L_2 和 L_4 比 L_3 、 L_5 和 L_6 的平均利用率高出 22.81%,其中以操作工 L_4 对应机器 M_6 、 M_7 的操作技能值分别为 7.5、8.5,技能不太高,操作者一直处于加工状态,这样其利用率偏高,而 L_6

对机器 M_9 的操作技能值为 9.6,加工完毕后处于等待加工状态,利用率偏高,所以 L_4 和 L_6 的利用率差值最大,达到了 27.95%。在部分自主合作策略下,按照加工工艺自主合作与按照生产线自主合作方式下的最大差值分别为 12.54% 和 20.36%。随着作业共享程度的不断提高,操作工与机器的合作更加灵活和自如,部分自主合作情况下其利用率有一定的改善,在完全自主合作时,达到最均衡。在完全自主合作的策略下,所有操作员的利用率最为平衡,最高者(L_1)与最低者(L_6)的差值约为 6.41%。

通过上述 4 个目标矢量的分析比较可以得出如下结论:1)在该生产单元中,由于订单更换频繁,人机交互量大,人机合作分工模式对生产单元的 4 个重要性能均具有显著影响;2)按照工艺的部分自主合作策略比按照生产线的部分自主合作策略具有更好的绩效;3)人机完全自主合作模式的 4 个性能指标均为最好,但该分工模式需要所有生产人员具有所有设备和换线的操作技能,对人力资源的要求最高,人力成本也会相应提高,在实际运作过程中需要平衡绩效与成本因素。若成本高于绩效利润,则可折衷采用部分自主合作的人机分工策略。

4 结 论

笔者首先介绍了生产单元中基于智能主体的人机合作主要内涵,包括当前人机合作的研究局限,人机合作的特点以及人机工作分配,分析了人机合作的主要思想,在此基础上构建了生产单元人机合作仿真模型,提出了人机合作的基本策略。根据智能主体仿真模型,以仿真软件和人机合作模型为基础,提出了人机合作仿真模型的实现方法。最后,以某发动机生产单元为例进行分析,通过比较任务等待时间、订单准时完成率、机器等待率和操作工利用率 4 个指标,充分验证了所提出模型的实用价值。

参考文献:

- [1] Schlick S, Reuth R, Luczak H. Comparative simulation study of work processes in autonomous production cells [J]. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 2002, 12(1): 31-54.
- [2] Cesani V I, Steudel H J. A study of labor assignment flexibility in cellular manufacturing systems [J]. Computers & Industrial Engineering, 2005, 48 (3): 571-591.
- [3] 杨灿军,陈鹰,路雨祥. 人机一体化智能系统理论及应用研究探索[J]. 机械工程学报, 2000, 36(6): 42-47.
YANG Canjun, CHEN Ying, LU Yongxiang. Study on

- the humachine intelligent system and its application [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(6):42-47.
- [4] 傅卫平,王雯,吕军玲. 生产物流系统人机合作模型及其关键技术[J]. 工业工程, 2009, 12(2):72-77.
FU Weiping, WANG Wen, Lü Junling. The man-machine cooperation model and key technology in production logistic system[J]. Industrial Engineering Journal, 2009, 12(2):72-77.
- [5] 曹乐,王彪,刘飞,等. 装配线多技能作业人员优化配置模型[J]. 重庆大学学报, 2010, 12(12):21-26.
CAO Le, WANG Biao, LIU Fei, et al. Mixed-skill worker assignment optimization model for assembly line[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 12(12):21-26.
- [6] 陈友玲,张永阳,孙亚南,等. 基于 Petri 网的敏捷化生产调度建模方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(3):598-602.
CHEN Youling, ZHANG Yongyang, SUN Yanan, et al. Factory agile production scheduling modeling based on Petri net [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(3):598-602.
- [7] 方卫宁,张燕,鄂明成,等. 轮班制度对于地铁司机疲劳的影响[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(2):17-23.
FANG Weining, ZHANG Yan, E Mingcheng, et al. Influence of shift system on subway drivers' fatigue [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(2):17-23.
- [8] 郭伏,张国民,温婕. 工作研究在轿车装配流水线能力平整中的应用[J]. 工业工程与管理, 2006, 11(2):119-126.
GUO Fu, ZHANG Guomin, WEN Jie. Application of work study to the throughput balance of car assembly aine[J]. Industrial Engineering and Management, 2006, 11(2):119-126.
- [9] Ariaifar S, Ismail N. An improved algorithm for layout design in cellular manufacturing systems [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2009, 28(4):132-139.
- [10] 杨玮,邱小红,傅卫平,等. 物资储配系统人机合作模型及关键技术研究[J]. 机械设计与制造, 2011, 10:233-235.
YANG Wei, QIU Xiaohong, FU Weiping, et al. The research of man-machine cooperation model and key technology in warehousing system [J]. Machinery Design & Manufacture, 2011, 10:233-235.
- [11] Zhang X, Schmidt L, Schlick C M, et al. A human task-oriented simulation study in autonomous production cells[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(18):1-29.
- [12] Zuelch G. Modeling and simulation of human decision-making in manufacturing systems[C]. Monterey, CA: Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, 2006:947-953.
- [13] 郭宁,金天国,刘文剑. 基于虚拟制造单元的制造资源组织模型[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(8):1649-1656.
GUO Ning, JIN Tianguo, LIU Wenjian. Manufacturing resources organization model based on virtual manufacturing cell [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(8):1649-1656.
- [14] 张晓冬,杨育,易树平,等. 制造系统人因仿真参考模型及若干关键技术研究[J]. 机械工程学报, 2006, 42(3):56-64.
ZHANG Xiaodong, YANG Yu, YI Shuping, et al. Reference model and key technology for human factors simulation in manufacturing systems [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3):56-64.
- [15] 张晓冬,罗乐,缪春. 基于设计者智能主体模型的产品开发过程仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(12):2654-2660.
ZHANG Xiaodong, LUO Le, MIAO Chun, et al. Product development process simulation based on intelligent agent model of designer [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(12):2654-2660.
- [16] Mahdavi I, Shirazi B, Solimanpur M, et al. Development of a simulation-based decision support system for controlling stochastic flexible job shop manufacturing systems [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18(6):768-786.
- [17] Papakostas N, Efthymiou K, Mourtzis D, et al. Modelling the complexity of manufacturing systems using nonlinear dynamics approaches [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(1):437-440.
- [18] Krüger J, K Lien T, Verl A. Cooperation of human and machines in assembly lines [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(2):628-646.
- [19] Barbati M, Bruno G, Genovese A. Applications of agent-based models for optimization problems: A literature review [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(5):6020-6028.
- [20] Tamani K, Boukezzoula R, HABCHE G. Application of a continuous supervisory fuzzy control on a discrete scheduling of manufacturing systems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2011, 24(7):1162-1173.
- [21] Zhang X D, Zhqng Z Q, Luo L, et al. Organization evaluation of product development process using agent based simulation [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008, 5236 :282-293.