

# 工艺规划与车间调度集成研究现状及进展

高亮 李新宇

华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室,武汉,430074

**摘要:**首先阐述了传统制造系统存在的问题以及研究工艺规划与车间调度集成的必要性。综述了目前工艺规划与车间调度集成及其扩展问题(集成模型、优化算法)的研究现状。在总结了当前研究工艺规划与车间调度集成问题多种研究方法的基础上,指出了当前工艺规划与车间调度问题研究中存在的问题、可能的解决途径以及发展趋势,并指出了几个有代表性的研究方向。

**关键词:**工艺规划;车间调度;工艺规划与车间调度集成;研究现状

**中图分类号:**TH166      **文章编号:**1004—132X(2011)08—1001—07

## Current Researches on Integrated Process Planning and Scheduling

Gao Liang Li Xinyu

The State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

**Abstract:** Firstly, the necessity of IPPS was analyzed. And then, the current researches about the IPPS were reviewed, including integration models and algorithms which were two aspects of IPPS. Based on the analyses of various research methods about IPPS, some existing issues, possible approaches and development trends of IPPS were pointed out. Finally, some useful research directions were proposed.

**Key words:** process planning; scheduling; integrated process planning and scheduling (IPPS); current research

### 0 引言

工艺规划和车间调度是计算机集成制造系统(CIMS)中两个十分重要的子系统。工艺规划的作用是确定产品加工方法、加工顺序、工艺参数以及产品制造所需的制造资源、制造时间等,是连接产品设计与制造的桥梁;调度的作用是对将要进入或已经进入加工的零件在制造环境的约束下进

行整体优化,是生产准备和具体工艺实施过程的纽带<sup>[1]</sup>。在传统的制造系统中,工艺规划系统和调度系统是两个独立的系统,对二者的集成研究目前还不够深入<sup>[2]</sup>。工艺规划与车间调度集成(integrated process planning and scheduling, IPPS)也是 CIMS 继续向前发展的关键技术之一。

本文总结了已有的研究成果,指出现有研究的不足。在对已有成果进行归纳和分析的基础上,对 IPPS 进行综述,并指出了几个有代表性的

收稿日期:2010—12—24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51005088)

rials Processing Technology, 2007, 194(1/3): 100-109.

[23]

Khettabi R, Songmene V, Masounave J. Effects of Speeds, Materials, and Tool Rake Angles on Metallic Particle Emission during Orthogonal Cutting [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 19(6): 767-775.

[24]

Julio Rivera L, Michalek D J, Sutherland J W. The Origin, Potential Health Effects, and Environmentally Conscious Control of Airborne Particulate in Manufacturing Operations[EB/OL]. [2010-06]. [http://74.125.155.132/scholar?q=cache:7PKhqB0AFgJ:scholar.google.com/+Environmentally+Conscious+Control+of+Airborne+Particulate+in+Manufacturing+Operations&hl=zh-CN&as\\_sdt=2000&as\\_vis=1](http://74.125.155.132/scholar?q=cache:7PKhqB0AFgJ:scholar.google.com/+Environmentally+Conscious+Control+of+Airborne+Particulate+in+Manufacturing+Operations&hl=zh-CN&as_sdt=2000&as_vis=1).

[25]

张忠强. 以车代磨工艺的研究与应用[J]. 漳州师范学院学报(自然科学版), 2009(2): 59-62.

[26]

任凡, 刘飞. 切削过程中悬浮粉尘颗粒的空间分布特性研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(15): 1849-1854.

(编辑 张洋)

作者简介:

任凡,女,1981年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士研究生。主要研究方向为绿色制造、系统工程。发表论文3篇。刘飞,男,1948年生。重庆大学机械传动国家重点实验室教授、博士研究生导师。李聪波,男,1981年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士、讲师。张文元,男,1974年生。中国人民解放军驻重庆气体压缩机厂军代室工程师。

研究方向。

## 1 工艺规划与车间调度集成的必要性

对传统制造系统的研究都是把工艺规划和车间调度作为独立的和具有先后顺序关系的系统来进行研究的,早期并没有对两者进行集成研究,导致传统制造系统存在以下问题<sup>[3]</sup>:

(1)传统工艺规划的局限性问题。传统工艺规划系统的工作模式是静态的,工艺设计人员的决策是在假定车间资源在任何时间都是无限或空闲的情况下作出的<sup>[4]</sup>。因此,工艺设计人员常常会选择最佳的加工设备,而没有考虑到车间的实时资源状况。这就导致:在工艺设计人员眼中“优化”的工艺路线,在车间具体执行时的效果并不理想<sup>[5]</sup>。

(2)工艺规划与实施的时间差问题。工艺路线的制订是在车间生产之前完成的,工艺规划阶段与实施阶段的时间差也可能会影响工艺的可行性。因为计划制订时所考虑的车间资源约束,在这段时间内可能已经发生变化,所以这种约束的动态变化有可能使原先的工艺计划失去“优化”的意义<sup>[6]</sup>。文献[3]指出:为了匹配车间的实时资源,必须对制造之前所制订的车间总负载的 20%~30%进行重新的规划,而且只有很少的一部分调度是完全按照生产工艺计划来的。

(3)传统调度的局限性问题。传统的调度计划往往产生于工艺规划之后,在进行调度的时候就必须考虑到工艺规划所产生的工艺路线,这样调度就不可避免会受到工艺路线的约束,就会影响调度系统的工作效果。同时,工艺路线的局限性也会直接影响调度计划的可行性。车间生产常受制于瓶颈设备故障、工具、材料、人员等不到位、订单取消、交货期改变等干扰因素,由于干扰具有突发和不可预见的特点,这就要求担任生产准备任务的工艺规划和车间调度系统能够快速而高效地对以上事件作出响应,避免造成生产的中断。

由以上问题可以看出,工艺规划与车间调度的集成势在必行。通过工艺规划与车间调度的集成与优化,可以在工艺规划时就考虑到未来加工现场的资源利用状况,这对于消除加工现场资源冲突、提高设备的利用率、缩短产品制造周期、提高产品质量和降低制造成本具有重要意义。

## 2 工艺规划与车间调度集成研究现状

IPPS 的研究始于 20 世纪 80 年代中期<sup>[7-8]</sup>。Chrysosolouris 等<sup>[9-10]</sup>首先提出了 IPPS 的构想。

随后,Beckendorff 等<sup>[11]</sup>使用可选工艺路线来增加系统的柔性。Khoshnevis 等<sup>[12]</sup>将动态反馈的思想引入到 IPPS 之中。Zhang<sup>[13]</sup>和 Larsen<sup>[14]</sup>提出的集成模型在继承可选工艺路线和动态反馈思想的同时,已经在一定程度上体现了分层规划的思想。近年来,针对 IPPS 问题,国内外的学者已经开展了大量的研究,提出了各种集成模型<sup>[7-15]</sup>。

### 2.1 工艺规划与车间调度集成模型的研究概况

目前,针对 IPPS 问题,国内外学者提出了一些集成模型,它们大致可以归纳成以下三类<sup>[4]</sup>:非线性工艺规划、闭环式工艺规划以及分布式工艺规划。它们的共同特点是利用工艺规划和车间调度的交叉,通过对工艺规划系统的某种改良,充分发挥工艺规划系统的柔性,从而提高整个集成系统的柔性<sup>[16]</sup>。

#### 2.1.1 非线性工艺规划

非线性工艺规划(nonlinear process planning, NLPP)模型基于静态的制造环境,在每个零件进入车间之前生成尽可能多的工艺路线,并根据工艺规划的优化目标给每个可选工艺路线赋予一定的优先级,然后进入调度系统,由调度系统根据车间的具体资源状况选择最优的工艺路线。研究 IPPS 的已有文献大部分都采用到了该集成模型的思想。此模型的优点是:生成了尽可能多的工艺路线,从而扩大了车间调度的优化空间,有利于找到最优的工艺路线;其缺点是:由于生成了大量的工艺路线,需要更大的系统存储空间,而且对大量的工艺路线进行优化搜索,也增加了系统优化的计算时间,有可能使系统在有限的时间内无法找到满意解,其基本原理如图 1 所示。



图 1 非线性工艺规划的基本原理图

非线性工艺规划即在制订一个零件的工艺路线时,产生该零件尽可能多的工艺路线,形成可供选择的的多条工艺路线。根据工艺优化准则确定多条工艺路线的优先级并存储在数据库中。具有最高优先级的工艺路线首先被选中,看其是否适合于当前的车间资源状况,如果不合适,则另选具有第二优先级的路线,如此不断重复,直到找到满意的工艺路线为止。文献[17]提出了 FMS 中非线性工艺规划的集成模型。Lee 等<sup>[5]</sup>提出的基于遗传算法的非线性工艺规划模型,可以大大地减少调度时间和产品的延迟。文献[16]在并行工程的

思想下,提出了基于统一资源数据库的面向 FMS 的柔性工艺规划与生产调度的集成方法。

NLPP 是 IPPS 问题最基本的模型。由于此模型的集成思想简单、可操作性强,所以现有对集成模型的研究主要集中在该模型上。

2.1.2 闭环式工艺规划

闭环式工艺规划(closed process planning, CLPP)模型根据调度系统所反馈的车间资源信息来生成工艺路线,因此 CLPP 能够较好地考虑到车间资源的状态,生成的工艺路线相对于当前的生产环境是可行的。实时状态数据是 CLPP 的关键,根据实时的反馈信息进行动态工艺规划,其基本原理如图 2 所示。

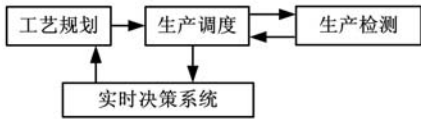


图 2 闭环式工艺规划的基本原理图

闭环式工艺规划是面向车间的动态工艺规划系统<sup>[18]</sup>,它通过车间资源信息的动态反馈来产生实时优化的工艺路线。车间调度系统把当前车间可用设备的资源状况反馈给草拟的工艺路线,使之能及时进行更改与调整,从而提高工艺方案的可行性。工艺设计将作业计划编制、车间调度系统集成在一起,形成工艺路线自动调整的闭环回路。这种动态系统可明显提高工艺规划系统的实时性、指导性与可操作性,同时可以提高工艺路线的利用率。文献[19]提出了一个动态优化机制用于批量制造环境中的 IPPS 系统。

CLPP 利用了集成原理中的反馈机制,能够较好地实现工艺规划与车间调度的集成,但是由于现有的 CLPP 只是提供了信息与功能的接口,而在信息和功能的耦合上考虑的深度不够。如何提高 CLPP 信息和功能的耦合深度,是一个有待解决的问题;而且 CLPP 需要实时地采集车间资源的信息,如何表示、传输和处理车间资源的实时信息,也是一个有待解决的问题。

2.1.3 分布式工艺规划<sup>[20]</sup>

分布式工艺规划(distributed process planning, DPP)也称及时工艺规划(just-in-time process planning, JTPP),其基本原理如图 3 所示。在此模型中,工艺规划和调度计划是同步完成的。它将工艺规划和调度计划分成两个阶段:第一阶段是初步规划阶段,在此阶段中,主要是分析零件特征及特征与特征之间的关系,根据零件的特征信息确定初步的加工方法,同时对加工资源(如原材料、加工设备等进行初步的计算估计;

第二阶段是详细规划阶段,主要工作是把车间加工设备信息和生产任务信息进行匹配,同时生成完整的工艺路线和调度计划。文献[21]提出了分布式工艺规划的方法,并采用多代理系统(MAS)去构建所提出方法的框架。

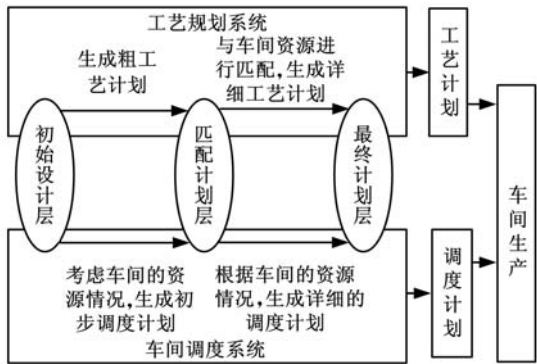


图 3 分层并行规划集成方法的基本原理图

DPP 的基本思想是分层规划。此模型在初期就考虑到了工艺规划系统与车间调度系统的集成问题,并且工艺规划与调度计划始终是并行进行的,两个系统在整个集成决策过程中都体现了交互、协调与合作。但是其在整体上优化工艺路线与调度计划的能力不足,此模型可以通过与其他模型的综合来提高其整体优化的能力。

2.2 扩展型工艺规划与车间调度集成的研究概况

2.2.1 多目标 IPPS 的研究概况

在企业的实际生产过程中,一般不会单纯地只考虑一个目标,往往同时需要考虑多个目标,比如,企业为了追求利益的最大化,一般需要在满足顾客需求的前提下,追求成本的最小化,这时,就需要同时考虑多个目标。多目标优化中,最优解的定义发生了变化,不能简单地定义多目标优化问题的最优解。因为多目标优化的结果并不是单个解,而是一组均衡解,即所谓的 Pareto 最优解。多目标 IPPS 的研究文献不多。文献[22]采用基于遗传算法(GA)的多目标权重的方法对多目标 IPPS 问题进行求解,并将该方法与传统的求解方法进行比较。文献[23]采用基于模拟退火的线性加权的方法求解多目标 IPPS 问题。

2.2.2 动态 IPPS 的研究概况

在实际中,生产系统不会一成不变,而存在大量的随机干扰事件。突发事件发生后,预先的调度方案可能无法继续进行,必须进行重新调度,所以需要动态调度进行研究。

动态调度问题的研究始于 20 世纪 50 年代, Jackson<sup>[24]</sup>在 1957 年便对静态调度和动态调度的概念作了区分。在不同文献中,动态调度也被



称为反应调度、自适应调度<sup>[25]</sup>等。Ramash<sup>[26]</sup>对动态调度仿真研究方法进行了综述,Szelde 等<sup>[27]</sup>对基于知识的反应调度方法进行了综述。Suresh 等<sup>[28]</sup>将动态调度事件分成了四类:与工件相关的事件、与机器相关的事件、与工序相关的事件和其他事件。从车间动态调度问题描述的角度,可以将动态调度问题分成三类:具有鲁棒性的调度<sup>[29]</sup>、完全反应调度和预一反应调度<sup>[30]</sup>。

虽然对车间动态调度问题的研究已经取得了较多的成果,但是对动态 IPPS 问题的研究还处于起步阶段,对该问题研究的文献较少。文献<sup>[31]</sup>提出了一个调度算法来对具有非线性工艺的任务进行调度。它包括交货期算法和遗传算法,交货期算法根据主生产计划把产品计划分解为零件计划,然后利用遗传算法实现具有非线性工艺的多个零件的动态调度。

### 3 工艺规划与车间调度集成的研究方法

基于优化算法的 IPPS 问题求解方法的核心思想是基于 NLPP 模型,对所有零件的工艺路线组合进行优化仿真调度,在为每个工件确定最优工艺路线的同时确定最优的车间调度方案。由于考虑到了多条工艺路线,所以 IPPS 问题比车间调度问题更加复杂,解空间更大,也是极困难的 NP 组合优化问题。针对该问题的主要研究方法包括人工智能方法、局部搜索方法等。

#### 3.1 人工智能方法

在人工智能方法中,用于求解 IPPS 的主要方法包括进化算法、基于多代理系统(MAS)的方法、粒子群算法、蚁群算法、免疫算法等。

进化算法<sup>[32]</sup>中,主要用于求解 IPPS 问题的是 GA。Morad 等<sup>[33]</sup>在 1999 年采用基于 GA 的多目标权重的方法对多目标 IPPS 问题进行求解。此后,一些 GA 应用于 IPPS 的研究成果相继出现<sup>[5,34-35]</sup>。Jia 等<sup>[36]</sup>采用 GA 和甘特图相结合的方法求解分布式制造系统中的 IPPS 问题。Chan 等<sup>[37]</sup>提出一种基于主导基因(dominated genes)的 GA 来求解 IPPS 问题。Shao 等<sup>[38]</sup>采用改进的 GA 求解 IPPS 问题。田颖等<sup>[39]</sup>在构建了 IPPS 模型的基础上采用 GA 对该模型进行求解。

MAS 方法是研究分布式智能制造系统(distributed intelligent manufacturing systems, DIMS)的一种重要方法。工艺规划和车间调度是 DIMS 的重要组成部分,所以很多学者使用 MAS 方法来研究 IPPS 问题。Chan 等<sup>[40]</sup>提出了分布式的工艺规划系统,并采用 MAS 方法求解。Lim

等<sup>[41]</sup>提出了求解 IPPS 的 MAS 框架。Wong 等<sup>[42]</sup>提出了一种基于在线混合 Agent 的 MAS 方法来求解 IPPS 问题,取得了较好的效果。还有一些文献也用到了 MAS 方法<sup>[43-44]</sup>。以上的几种方法是采用 MAS 求解 IPPS 的主要方法。Shen 等<sup>[45]</sup>对基于 MAS 的 IPPS 进行了综述。Zhang 等<sup>[46]</sup>对 MAS 求解协同工艺规划问题进行了综述。

除了上述的方法,还有一些人工智能方法可以用来求解 IPPS 问题,如粒子群优化算法<sup>[47]</sup>、蚁群优化算法<sup>[48]</sup>和免疫算法<sup>[49]</sup>等。如何发挥这些算法的优势,是今后一个重要的研究热点。

#### 3.2 局部搜索算法

局部搜索算法是求解车间调度问题的重要方法,也有部分研究人员将其用来求解 IPPS 问题。Palmer<sup>[50]</sup>采用基于模拟退火的算法求解 IPPS 问题。Li 等<sup>[23]</sup>采用基于模拟退火的算法求解 IPPS 问题。Chan 等<sup>[51]</sup>提出一种改进的模拟退火算法来研究 IPPS 问题。Chen<sup>[52]</sup>采用模拟退火(simulated annealing, SA)算法求解基于大规模客户的 IPPS 问题。Weintraub 等<sup>[53]</sup>和 Kis<sup>[54]</sup>提出了基于柔性工艺的车间调度系统,然后采用 TS 算法进行求解。Mishra 等<sup>[55]</sup>提出了一种基于 Chaos 的 TS 与 SA 混合算法来求解带外包业务的 IPPS 问题。

除了上述的主要研究方法外,还有其他一些方法被用来求解 IPPS 问题,如数学规划方法<sup>[56]</sup>、基于启发式规则的方法<sup>[57]</sup>、约束满足方法<sup>[58]</sup>、神经网络方法<sup>[59]</sup>、协同进化算法<sup>[60]</sup>、基于 Web 的方法<sup>[61]</sup>和面向对象的集成方法<sup>[62]</sup>等。每种算法都有其自身的优点和缺点。如何取长补短,让它们能更好地求解 IPPS 问题是未来的研究热点之一。

### 4 研究展望

虽然国内外的研究人员提出了多种集成模型和研究方法,但是还有很多问题有待解决。例如:如何克服各个模型所存在的缺点。同时,现在所使用的优化算法还主要是一些比较传统的算法,所以有没有更好、更新的算法也是一个问题。目前的研究主要还停留在理论阶段,需要进一步深入,同时研究成果的实用化等问题也需要解决。结合已有的研究成果,未来的研究可以从以下几方面展开。

(1)对 IPPS 问题的本质进行研究。一般的优化方法能用来求解很多种问题,这些问题有的

具有类似的模型,有的问题的模型与其他问题的模型完全不同。所以,算法效果的好坏与算法能否很好地反映问题的本质是十分相关的。所以,需要对 IPPS 问题本质进行研究,这些研究包括:对该问题的解空间进行研究,探索该问题解空间的适应度地形等,这些对设计性能优秀的求解算法十分重要。

(2)传统上,对 IPPS 问题的研究大部分会将最大完工时间作为优化目标。该目标的重要性不言而喻,但是结合生产实际,同样存在着一些其他十分重要的优化目标,比如产品交货期、库存、生产成本、提前/拖后等,这些目标更加贴近企业的生产实际,在一些情况下,这些目标可能比最大完工时间更加重要。对这些目标的研究,对 IPPS 的实用化十分重要。同时,对多目标 IPPS 问题进行研究也是十分重要的。下一步的工作可以从以下两个方面入手:一是对更多的目标进行研究;二是研究更加有效的多目标求解算法。

(3)在现阶段的研究中,对 IPPS 的问题模型都进行了相应的抽象与假设,没有考虑机器的准备时间和工件传输时间,这不符合现代的市场环境。现代的市场要求企业能针对客户的需求作出快速的反应,这就要求企业的生产模式是“多品种、小批量”的,在这种生产模式下,准备时间和工件传输时间是不能被忽略的。因此,对考虑准备时间和工件传输时间的 IPPS 进行研究是十分重要的。

(4)现有研究中,一般假设 IPPS 问题的各个参数是确定的,但是在实际的生产中,有很多参数是不可能完全确定的,比如机器对某个工序的加工时间是变化的,因为其跟机器的性能和原材料的材质等是有直接关系的。所以,为了让 IPPS 问题能更好地指导车间生产,对不确定环境下 IPPS 问题的研究也是十分重要的。

总之,对工艺规划与车间调度集成的研究,必然向着多目标化、动态化、优化等方向发展。

# 参考文献:

- [1] Sugimura N, Hino R, Moriwaki T. Integrated Process Planning and Scheduling in Holonic Manufacturing Systems[C]//IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning Soft Research, Fukuoka, Japan, 2001:36-41.
- [2] 吴德中,严隽琪,王丽亚. CAPP 与 PPC 的并行分布式集成研究[J]. 上海交通大学学报, 1996, 30 (12): 1-6.
- [3] Kumar M, Rajotia S. Integration of Scheduling with

- Computer Aided Process Planning[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 138 (1/3): 297-300.
- [4] Usher J M, Fernandes K J. Dynamic Process Planning—the Static Phase[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 61 (1/2): 53-58.
- [5] Lee H, Kim S. Integration of Process Planning and Scheduling Using Simulation Based Genetic Algorithms[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18 (8): 586-590.
- [6] Kuhnle H, Braun H J, Buhning J. Integration of CAPP and PPC-interfusion Manufacturing Management[J]. Integrated Manufacturing Systems, 1994, 5 (2): 21-27.
- [7] Tan W, Khoshnevis B. Integration of Process Planning and Scheduling—a Review[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2000, 11: 51-63.
- [8] Kumar M, Rajotia S. Integration of Process Planning and Scheduling in a Job Shop Environment[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 28 (1/2): 109-116.
- [9] Chryssolouris G, Chan S, Cobb W. Decision Making on the Factory Floor: an Integrated Approach to Process Planning and Scheduling[J]. Robotics & Computer—integrated Manufacturing, 1984, 1 (3/4): 315-319.
- [10] Chryssolouris G, Chan S. An Integrated Approach to Process Planning and Scheduling[J]. Annals of the CIRP, 1985, 34 (1): 413-417.
- [11] Beckendorff U, Kreutzfeldt J, Ullmann W. Reactive Workshop Scheduling Based on Alternative Routings[C]//Proceedings of a Conference on Factory Automation and Information Management, Boca Raton, Florida: CRC Press Inc., 1991: 875-885.
- [12] Khoshnevis B, Chen Q M. Integration of Process Planning and Scheduling Function[C]//IIE Integrated Systems Conference & Society for Integrated Manufacturing Conference Proceedings, Atlanta: Industrial Engineering & Management Press, 1989: 415-420.
- [13] Zhang H C. IPPM—a Prototype to Integrated Process Planning and Job Shop Scheduling Functions[J]. Annals of the CIRP, 1993, 42 (1): 513-517.
- [14] Larsen N E. Methods for Integration of Process Planning and Production Planning[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1993, 6 (1/2): 152-162.
- [15] Wang L, Shen W, Hao Q. An Overview of Distributed Process Planning and Its Integration with Scheduling[J]. International Journal of Computer

- Applications in Technology, 2006, 26(1/2): 3-14.
- [16] 张志英, 唐承统, 张建民. 遗传算法在柔性 CAPP 与生产调度集成中的应用[J]. 计算机集成制造系统—CIMS, 2002, 8(8): 621-624.
- [17] Saygin C, Kilic S E. Integrating Flexible Process Plans with Scheduling in Flexible Manufacturing Systems [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999, 15(4): 268-280.
- [18] Wang Z B, Chen Y L, Wang N S. Research on Dynamic Process Planning System Considering Decision about Machines [C]//Proceeding of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou, IEEE, 2004: 2758-2762.
- [19] Zhang Y, Saravanan A, Fuh J. Integration of Process Planning and Scheduling by Exploring the Flexibility of Process Planning [J]. International Journal of Production Research, 2003, 41(3): 611-628.
- [20] Wang L H, Shen W M. Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing [M]. Berlin, Springer—Verlag, 2007.
- [21] Wang L, Shen W. DPP: an agent Based Approach for Distributed Process Planning [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2003, 14(5): 429-439.
- [22] Morad N, Zalzal A M S. Genetic Algorithms in Integrated Process Planning and Scheduling [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1999, 10(2): 169-179.
- [23] Li W D, McMahon C. A Simulated Annealing-based Optimization Approach for Integrated Process Planning and Scheduling [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2007, 20(1): 80-95.
- [24] Jackson J R. Simulation Research on Job Shop Production [J]. Naval Res Log Quart, 1957, 4(3): 287-295.
- [25] Nof S Y, Grant F H. Adaptive Predictive Scheduling Review and a General Framework [J]. Production Plan & Control, 1991, 2(4): 298-312.
- [26] Ramash R. Dynamic Job Shop Scheduling—a Review of Simulation Research [J]. OMEGA International Journal of Manage Science, 1990, 18(1): 43-57.
- [27] Szelde E K, Roger M. Knowledge-based Reactive Scheduling [J]. Production Plan & Control, 1994, 5(5): 124-145.
- [28] Suresh V, Chandhuri D. Dynamic Scheduling—a Survey of Research [J]. International Journal of Production Economics, 1993, 32(1): 53-63.
- [29] Donovan O R, Uzsoy R. Predictable Scheduling of a Single Machine with Breakdowns and Sensitive Jobs [J]. International Journal of Production Research, 1999, 37(18): 4217-4233.
- [30] George C, Velusamy S. Dynamic Scheduling of Manufacturing Job Shops Using Genetic Algorithms [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2001, 12(3): 281-293.
- [31] 杨洪柏, 彭召旺, 钟廷修, 等. 面向非线性工艺计划的动态多任务调度 [J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(3): 400-403.
- [32] Moon C, Seo Y. Evolutionary Algorithm for Advanced Process Planning and Scheduling in a Multi-plant [J]. Computers & Industrial Engineering, 2005, 48(2): 311-325.
- [33] Morad N, Zalzal A M S. Genetic Algorithms in Integrated Process Planning and Scheduling [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1999, 10(2): 169-179.
- [34] Moon I, Lee S, Bae H. Genetic Algorithms for Job Shop Scheduling Problems with Alternative Routings [J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(10): 2695-2705.
- [35] Moon C, Kim J, Hur S. Integrated Process Planning and Scheduling with Minimizing Total Tardiness in Multi-plants Supply Chain [J]. Computers & Industrial Engineering, 2002, 43(1/2): 331-349.
- [36] Jia H Z, Fuh J Y H, Nee A Y C, et al. Integration of Genetic Algorithm and Gantt Chart for Job Shop Scheduling in Distributed Manufacturing Systems [J]. Computers & Industrial Engineering, 2007, 53(2): 313-320.
- [37] Chan F T S, Chung S H, Chan L Y. An Adaptive Genetic Algorithm with Dominated Genes for Distributed Scheduling Problems [J]. Expert Systems with Application, 2005, 29(2): 364-371.
- [38] Shao X Y, Li X Y, Gao L, et al. Integration of Process Planning and Scheduling—a Modified Genetic Algorithm-based Approach [J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(6): 2082-2096.
- [39] 田颖, 江平宇, 周光辉, 等. 基于遗传算法的工艺规划与调度集成方法 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(9): 1041-1044.
- [40] Chan F, Zhang J, Li P. Modeling of Integrated, Distributed and Cooperative Process Planning System Using an Agent-based Approach [J]. Proceeding Institution Mechanical Engineering, Part B: Journal of Engineering Manufacturing, 2001, 215(10): 1437-1451.
- [41] Lim M, Zhang D. A Multi-agent Based Manufacturing Control Strategy for Responsive Manufacturing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139(1/3): 379-384.

- [42] Wong T, Leung C, Mak K, et al. Dynamic Shop-floor Scheduling in Multi-agent Manufacturing System[J]. Expert Systems with Applications, 2006, 31(3): 486-494.
- [43] Sormaz D N, Arumugam J, Rajaraman S. Integrative Process Plan Model and Representation for Intelligent Distributed Manufacturing Planning[J]. International Journal of Production Research, 2004, 42(17): 3397-3417.
- [44] Shukla S, Tiwari M, Son Y. Bidding-based Multi-agent System for Integrated Process Planning and Scheduling: a Data-mining and Hybrid Tabu-SA Algorithm-oriented Approach[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 38(1/2): 163-175.
- [45] Shen W, Wang L, Hao Q. Agent-based Distributed Manufacturing Process Planning and Scheduling: a State-of-the-art Survey[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews, 2006, 36(4): 563-577.
- [46] Zhang W, Xie S. Agent Technology for Collaborative Process Planning: a Review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(3/4): 315-325.
- [47] Guo Y W, Li W D, Mileham A R, et al. Applications of Particle Swarm Optimization in Integrated Process Planning and Scheduling[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2009, 25(2): 280-288.
- [48] Kumar R, Tiwari M K, Shankar R. Scheduling of Flexible Manufacturing Systems: an Ant Colony Optimization Approach[J]. IMechE Part B: Engineering Manufacture, 2003, 217(10): 1443-1453.
- [49] Chan F T S, Kumar V, Tiwari M K. Optimizing the Performance of an Integrated Process Planning and Scheduling Problem: an AIS-FLC Based Approach[C]//Proceedings of CIS, Bangkok, Thailand, IEEE, 2006: 1-8.
- [50] Palmer G J. A Simulated Annealing Approach to Integrated Production Scheduling[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1996, 7(3): 163-176.
- [51] Chan F T S, Kumar V, Tiwari M K. The Relevance of Outsourcing and Leagile Strategies in Performance Optimization of an Integrated Process Planning and Scheduling Model[J]. International Journal of Production Research, 2009, 47(1): 119-142.
- [52] Chen Y J. An Integrated Process Planning and Production Scheduling Framework for Mass Customization[D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science & Technology, 2003.
- [53] Weintraub A, Cormier D, Hodgson T, et al. Scheduling with Alternatives: a Link between Process Planning and Scheduling[J]. IIE Transactions, 1999, 31(11): 1093-1102.
- [54] Kis T. Job Shop Scheduling with Processing Alternatives[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 151(2): 307-332.
- [55] Mishra N, Choudhary A K, Tiwari M K. Modeling the Planning and Scheduling Across the Outsourcing Supply Chain: a Chaos-based Fast Tabu-SA Approach[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(13): 3683-3715.
- [56] Tan W, Khoshnevis B. A Linearized Polynomial Mixed Integer Programming Model for the Integration of Process Planning and Scheduling[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2004, 15(5): 593-605.
- [57] Gindy N N, Saad S M, Yue Y. Manufacturing Responsiveness through Integrated Process Planning and Scheduling[J]. International Journal of Production Research, 1999, 37(11): 2399-2418.
- [58] Moreno M D R, Oddi A, Borrajo D, et al. IPSS: a Hybrid Approach to Planning and Scheduling Integration[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2006, 18(12): 1681-1695.
- [59] Ueda K, Fuji N, Inoue R. An Emergent Synthesis Approach to Simultaneous Process Planning and Scheduling[J]. Annals of the CIRP, 2007, 56(1): 463-466.
- [60] Kim Y, Park K, Ko J. A Symbiotic Evolutionary Algorithm for the Integration of Process Planning and Job Shop Scheduling[J]. Computers & Operations Research, 2003, 30(8): 1151-1171.
- [61] Wang Y F, Zhang Y F, Fuh J Y H, et al. A Web-based Integrated Process Planning and Scheduling System[C]//Proceedings of 4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering. Arlington, VA, IEEE, 2008: 662-667.
- [62] Bang C W. Hybrid Integration Approach for Process Planning and Shop Floor Scheduling in Agile Manufacturing[D]. Buffalo: State University of New York at Buffalo, 2002.

(编辑 张 洋)

作者简介:高亮,男,1974年生。华中科技大学机械科学与工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为现代优化方法及其在设计、制造与管理中的应用。曾获教育部科技进步一等奖1项。发表论文100余篇。李新宇,男,1985年生。华中科技大学机械科学与工程学院讲师。