

一种基于任务优先级的柔性生产线调度方法^{*}

薛晓东, 邹方, 张家谔, 吕瑞强

(中国航空制造技术研究院数字化制造技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 分别以减小生产拖期和提高设备利用率为目标,研究了柔性生产线的调度问题。在满足各种约束条件下,利用调度规则进行任务优先级的计算,确定工序任务的执行顺序。通过遗传规划方法完成调度规则的搜索与优化,在线应用获得的最优调度规则,完成调度方案的求解。通过仿真试验,得到的结果验证了该算法求解生产线调度问题的有效性。

关键词: 柔性生产线; 生产调度; 调度规则; 遗传规划; 任务优先级

Scheduling Algorithm of Flexible Production Line Based on Task Priority

XUE Xiaodong, ZOU Fang, ZHANG Jiae, LÜ Ruiqiang

(Aeronautical Key Laboratory for Digital Manufacturing Technology, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] This paper has studied a kind of flexible production line scheduling problem with the objectives of minimizing the tardiness and increasing the use ratio of devices. The executed sequence of operation tasks was determined by their priority which was computed by dispatching rule with multiple constraints. The dispatching rules were optimized by means of Genetic programming algorithm, then complete the whole scheduling scenario by using the optimal dispatching rule. The result of simulation experiment shows that using GP algorithm to solve the production line scheduling problem is effective.

Keywords: Flexible production line; Production scheduling; Dispatching rule; Genetic programming; Task priority

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.07.095

柔性生产线具有运行灵活、生产高效、设备利用率高等特点,非常适用于航空零件制造业一类典型离散制造行业的生产。近年来,随着国内航空零件制造业的发展,国内相关企业对柔性生产线的的需求逐渐提升,因此,对生产线管理的核心内容——调度问题进行相关的研究十分必要。

柔性生产线调度问题是一种 NP-hard 问题,是最困难的约束组合优化问题之一^[1]。在满足约束条件下对生产资源进行合理安排,获得优化的调度方案是提高资源利用率和生产效率的有效途径。

国外在柔性生产线的应用以及相关调度问题的研究已经取得了一定成果。2010年,瑞典沃尔沃航空公司针对航空发动机部件的自动化生产,建立了一条柔性生产线^[2]。基于该生产线的动态调度问题, Thörnblad 等^[3-4]利用贪婪搜索方法对调度方案进行了优化,将交货时间缩短了 10%~15%; Syberfeldt 等^[5]基于网络的

仿真优化方法,改善了调度方案,将该生产线的生产效率提高了 20% 以上。与此同时,意大利 MCM 公司为 MTU 航空发动机制造公司开发了机匣柔性制造生产线,大大提高了机匣的生产效率。

在实际生产过程中,生产线的生产条件是动态变化的,对算法的实时性要求较高,而上述的贪婪搜索等优化方法耗时较长,无法满足实时性要求。调度规则^[6](Dispatching Rule, DR)是一种应用较广的启发式方法,具有计算复杂度低、实时性较强等特点,便于考虑实际生产过程中的实时约束,适用于解决实际生产中的生产线调度问题。

遗传规划(Genetic Programming, GP)方法是斯坦福大学 Koza^[7]在遗传算法基础上提出的一种有指导的自适应搜索寻优方法,该算法具有搜索速度快、效率高的特点,适于搜索调度问题的 DR。国内外学者在利用 GP 求解 DR 方面已经进行了一定研究,如 Đurasević 等^[8]通过试验证明在平行机调度问题中,使用 GP 所生成的 DR 性能优于已有规则; Branke 等^[9]通过试验证明,

^{*} 基金项目:民用飞机专项科研项目(MJZ-2016-G-59)。

在动态随机 Job Shop 问题中, GP 方法生成的 DR 表现优于神经网络; 范华丽等^[10]通过研究证明了对于动态作业车间调度, 利用 GP 方法生成的 DR 表现优于常用规则。然而, 在研究某航空制造企业的叶片柔性生产线调度问题时, 由于实际生产环境具有多重约束条件, 上述方法并不适用于解决该问题。针对实际的多重约束条件, 本文展开了柔性生产线调度算法的相关研究, 利用 DR 计算任务的优先级, 进而确定任务的先后执行顺序, 通过优化 DR 获得较优的调度方案, 以期提高生产效率, 满足生产线需求。

1 生产线运行过程介绍

柔性生产线调度问题, 即通过 K 台设备, 加工 J 个工件, 每个工件任务由多个工序任务组成, 经过运算, 为所有工序任务分配合适的资源, 找到一个满足所有约束条件的最优调度方案来完成计划生产任务^[11]。

图 1 为某叶片柔性生产线组成。该生产线主要由 3 台复合加工中心、2 个装卸站、1 台清洗机、1 台测量机、1 台物流机器人和 2 个货架构成。叶片的加工流程如图 2 所示。

叶片毛坯在装卸站完成装夹后, 由物流机器人将其运输至其他相应设备依次执行加工、清洗、测量任务, 最后将其运回至装卸站进行工装的拆卸, 叶片完成加工, 离开生产线。在执行工序任务时, 若所有可用设备皆处于被占用状态或其他不可执行加工任务状态(如设备故障), 则将该工件运至货架上的缓冲工位等待加工。

生产线管控系统采用自主研发的 MAPCS 系统, 主要以订单的零件编号、生产数量、最早开始生产日期和结束日期作为决定开始生产的依据。生产订单被存入到 MAPCS 的生产订单列表中, 针对每天变化的订单, MAPCS 根据所有接收到的生产订单计算出任务执行的先后顺序, 实现自动排单。生产订单根据工厂的生产日历进行安排, MAPCS 将生产零件的技术数据和生产订单进行绑定, 通过分配的托盘进行每天的生产模拟仿真, 仿真结果可以显示每台设备的任务列表, 作为实际加工的参考依据。

2 调度方法设计

在本文设计的调度算法中, 工序任务优先级通过 GP 算法获得的最优规则进行计算, 通过进一步调度运算, 生成调度方案。

2.1 约束条件

对所有约束条件进行分析是设计生产线调度方法的前提条件, 约束条件越多, 算法复杂度越高。调度过程中需考虑的约束主要分为 3 类, 见表 1。

多重约束如图 3 所示。其中工序任务 A_1 指工件 A 的第 1 道工序任务, 以此类推。生产准备指开始执行任务前, 进行毛坯、刀具、托盘和夹具等相关资源的准备工作。工艺路径约束指工件的工序执行前后顺序约束, A_1 执行完毕, A_2 才可执行。共用设备约束指同一时间内, 设备上只能执行一个加工任务。设备工作日历确定了设备工作时间, 除需要加班执行任务外, 班次外时间设备一般不执行任务。设备在执行任务时发生故障会造成加工任务的中断, 需将该设备离线, 进行人工处理。

在设计调度算法的过程中, 需要对一些约束因素做出理想化假设, 如毛坯、刀具等资源的准备工作需人工完成, 假定人力资源充足; 算法对物流运输时间统一设定。

2.2 调度仿真

在满足各种约束条件下, 基于工序任务的优先级, 对所有的工序任务进行排序, 执行一系列的运算, 求解出设备任务列表、刀具需求清单、工件绑定相应的托盘、任务对设备的选择和预计开始结束时间等信息, 基于任务优先级的调度仿真原理如图 4 所示。

在图 4 中, 所有工序任务集合中, 蓝色虚线表示该工序任务已完成安排。List 表示当前可排序任务集合, 筛选可排序任务的条件为: 该工序任务为所属工件任务的首道工序, 或者其前置工序任务已完成。调度仿真流

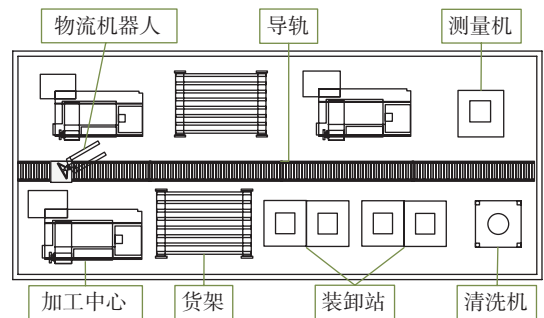


图1 柔性生产线组成

Fig.1 Form of flexible production line

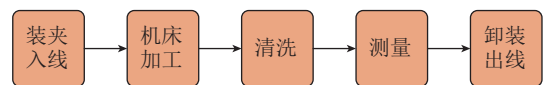


图2 叶片加工流程

Fig.2 Flow path of blade processing

表1 约束类型

Table 1 Constraint type

约束类型	具体内容
资源类	设备、刀具、夹具和毛坯等
工艺类	工艺路径等
时间类	设备日历、加工时间等

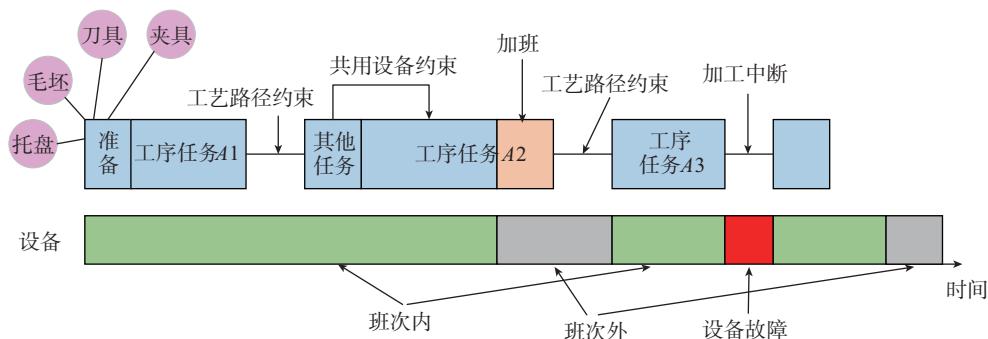


图3 生产线多重约束

Fig.3 Multiple constraints of production line

程分为以下几个步骤：

(1)初始化过程。

首先初始化设备的相关信息,包括设备可用时间的计算、清空设备任务队列、更新可用时间等;其次,从所下发订单中筛选符合开始执行条件的工序任务,将其加入可排序任务队列 List 中。

(2)计算任务优先级。

工序优先级是影响调度效果的决定性因素之一,通过 GP 算法优化获得的调度规则计算工序任务优先级,具体计算过程为:将调度规则进行解析,获得相应的数学表达式,依据该表达式计算任务的优先级。

(3)模拟排序过程。

从设定时间开始,以分钟为单位模拟时间推进。在每 1min 内,遍历 List 中的工序任务。如图 5 所示,选择优先级最高的任务,根据其所处的状态进行相应的处理:若其状态为执行中,将该任务剩余加工时间减 1;若工序任务执行完毕,则将其从 List 中移出;若该工序任务尚未开始执行,则依照一定的判断机制,从 n 台可执行该工序任务的设备中,选择最合适的设备来执行该任务,且将任务的状态置为执行中,初始化其剩余加工时间。随着调度过程的进行, List 不断有新任务加入,已完成任务移出,循环直至所有工序任务排序完毕。

(4)设备选择。

为工序任务选择合适的设备执行,需考虑的主要约束如下:一是设备状态,设备当前需处于空闲状态;二是时间约束,设备运行时间约束(设备日历)、工序任务开始执行时间不早于设备允许开始加工的最早时间等等。若有多台设备同时满足所有约束条件,则选择可最早开始执行任务的设备。

选定设备后,将该工序任务添加到设备任务列表中,更新工序任务的状态和设备的占用状态等数据,便于下一步计算。循环直至所有工序任务完成排序。图 6 是调度结果的甘特图实例,纵轴表示设备,横轴表示

时间,矩形模块表示工序任务, A、B、C 等字母表示工件,字母下方数字表示工序号。

2.3 基于GP的调度规则优化

遗传规划算法流程如图 7 所示。

种群中的个体指调度规则,用于计算任务优先级,初始种群中个体通过生长法^[10]生成。遗传规划算法采用二叉树表示个体,树节点包括终止节点和函数节点,终止节点表示待操作的参数,函数节点表示处理参数所使用的数学运算符。

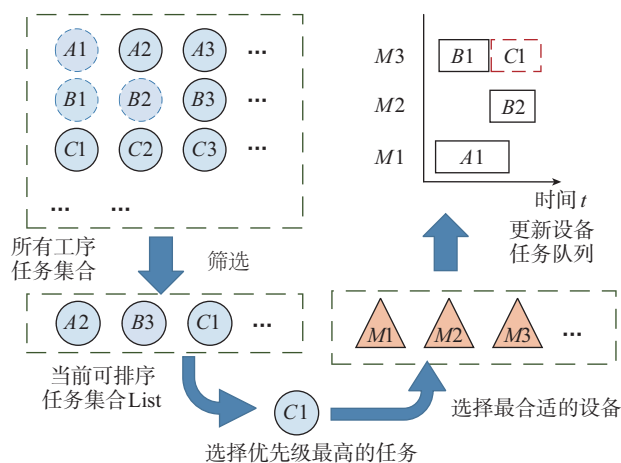


图4 调度仿真流程

Fig.4 Flow chart of scheduling simulation

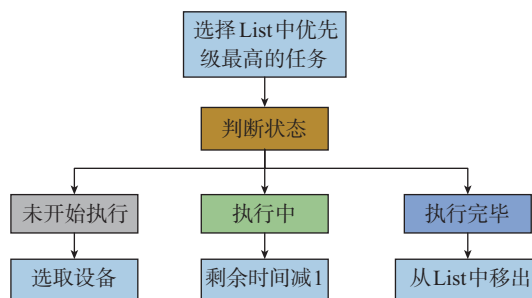


图5 任务处理流程

Fig.5 Process flow of operation tasks

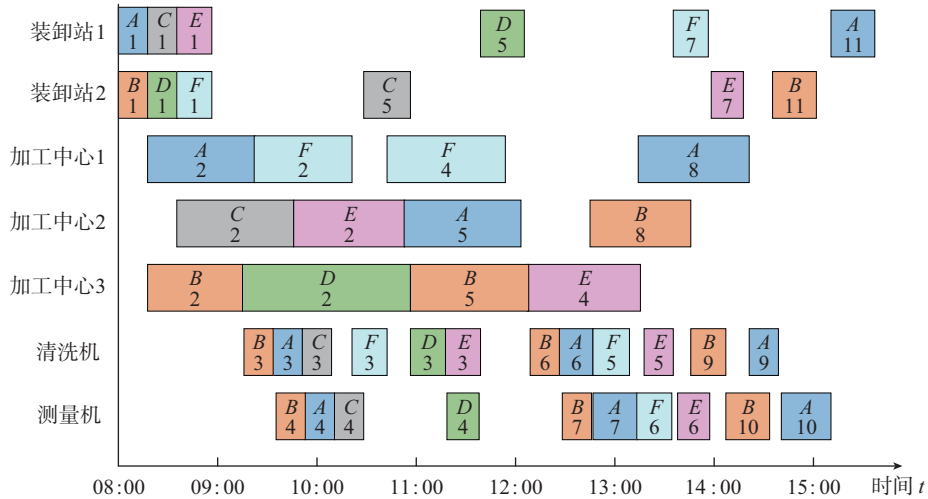


图6 生产排程甘特图

Fig.6 Gantt chart of production scheduling

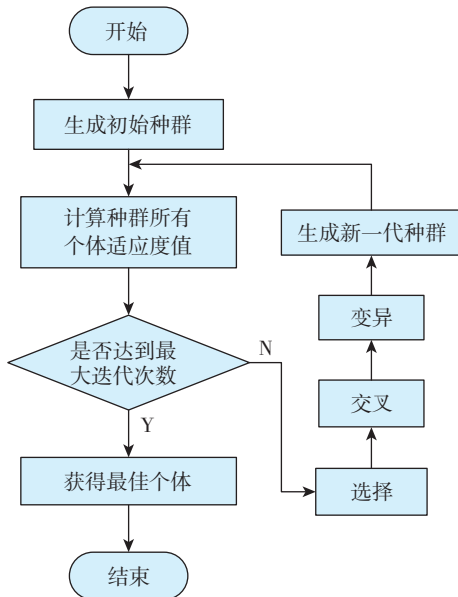


图7 遗传规划算法流程

Fig.7 Flow chart of GP algorithm

遗传规划算法的算子与传统遗传算法相同,主要有选择、交叉和变异,用于完成种群的进化。个体适应度是影响遗传算子的主要参数,其值的大小是评价个体表现好坏的标准。本文中调度算法的目标是最小化工件平均拖期/最大化设备利用率,也是计算个体适应度值的方法,具体计算过程为:将GP个体进行解码得到相应的计算表达式,通过该表达式计算工序任务的优先级,进而完成调度运算,通过适应度函数对调度结果进行进一步计算,获得该个体的适应度值。

利用GP算法对调度规则进行搜索和优化是一种学习过程,目的是找到表现最佳/近似最佳的调度规则,在实际生产之前完成。在实际生产中,将获得的规则用

表2 GP参数设置

Table 2 GP parameter settings

参数名称	取值
种群规模	500
遗传代数	50
复制率	0.3
交叉率	0.7
变异率	0.1
锦标赛规模	3
初始个体最大深度	5
交叉后个体最大深度	7
精英个数	50
函数集	+, -, *, /, max, min

于具体调度运算,即在线应用。

3 试验结果与讨论

针对某叶片生产线的调度环境,为了得到合适的DR,首先用符合实际生产需求的实例对生成的规则进行优化。针对不同的目标,分别选取5个表现最好的规则与其他常用参考规则进行测试和比较,验证GP算法的优越性。用于优化和测试案例的生成方法如下:依据生产线实际生产环境,订单包含3种类型的工件,每种工件数量在20~40之间随机取值,工装数量在10~20之间随机取值;每道工序的加工时间服从正态分布,平均值为预计加工时间;订单交付期与工件数量相关。工件数量越大,交货期宽裕度越大。

本文中算法和仿真试验通过Java语言在MyEclipse平台下实现的。其中GP算法的基本参数设置见表2,选用的工序任务参数集合见表3。因EDD(Earliest Due

date)、FIFO(First in First out) 和 SPT (Shortest Processing Time)3 种启发式规则在实际调度应用中表现优于其他常用规则,因此选择这 3 种规则作为参考规则^[12]。分别以工件最小平均拖期和最大设备利用率为目标,利用随机生成的测试案例分别对参考规则和 GP 算法获得的 5 个规则进行测试。测试过程中,除了任务的优先级计算方法,其他条件完全相同。

表 4 中是 EDD、SPT 和 FIFO 3 个常用参考规则的表现数据,其中: 工件平均拖期 = 总拖期时间 / 工件数量,设备利用率 = 设备占用时间 / 设备运行总时间。

表 5 和 6 分别是目标为工件最小平均拖期和最大设备利用率时 GP 算法的测试数据。图 8 给出了目标为工件最小平均拖期下不同规则的表现情况,横轴表示不同的规则,纵轴表示工件平均拖期值。可以看出,由 GP 算法进化得到的规则,整体表现远优于参考规则,其中表现最好的 Rule3 与表现最好的参考规则 EDD 相比,拖期时间减少了 22% 左右,优化效果明显。

图 9 给出了目标为最大设备利用率下不同规则的表现情况,横轴表示不同的规则,纵轴表示设备利用率。

表3 应用终止符集

Table 3 Application termination character set

参数	含义
PT	工序加工时间
NPT	下一工序加工时间
RPT	工序剩余加工时间
ROp	工件剩余工序数量
DN	工序任务可用设备数量
DTW	工件交付期权值
CT	当前时间

表4 参考规则计算结果

Table 4 Compute result of reference rules

规则名称	工件平均拖期 / min	设备利用率 / %
EDD	450.6	82.93
SPT	599.4	81.45
FIFO	514.3	81.21

表5 GP算法计算数据1

Table 5 GP algorithm calculation data 1

获得的规则	表达式
Rule1	$DTW * NPT$
Rule2	$NPT * DTW ^ 2$
Rule3	$DTW * ROP / NPT + \min\{DTW, PT\}$
Rule4	$\max\{PT, DTW\} * (DN * NPT / \max\{DN, NPT\})$
Rule5	$2NPT * \max\{DTW, DN + NPT\}$

表现情况,横轴表示不同的规则,纵轴表示设备利用率。可以看出,与参考规则相比,由 GP 算法进化得到的规则将设备利用率平均提高了 7% 左右。

试验结果说明,遗传规划算法获得的优化规则应用于生产线的调度求解过程后,与常用的参考规则相比,有效降低了工件平均拖期和提升了设备的利用率,显著

表6 GP算法计算数据2

Table 6 GP algorithm calculation data 2

获得的规则	表达式
Rule6	$\min\{NPT, (PT + DN) * (PT / DTW)\}$
Rule7	$DTW - NPT$
Rule8	$\min\{PT, DN\} * (ROP - PT)$
Rule9	$PT * (\max\{DN, \min\{DN, NPT\}\})$
Rule10	$\min\{PT, NPT\}$

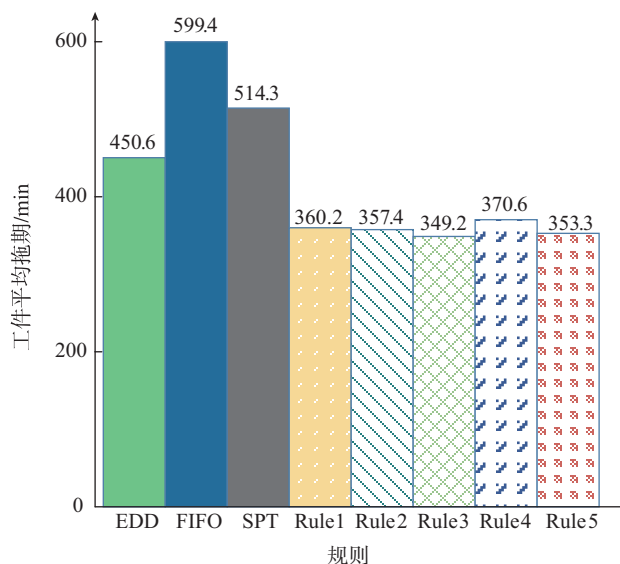


图8 工件平均拖期

Fig.8 Average of tardiness

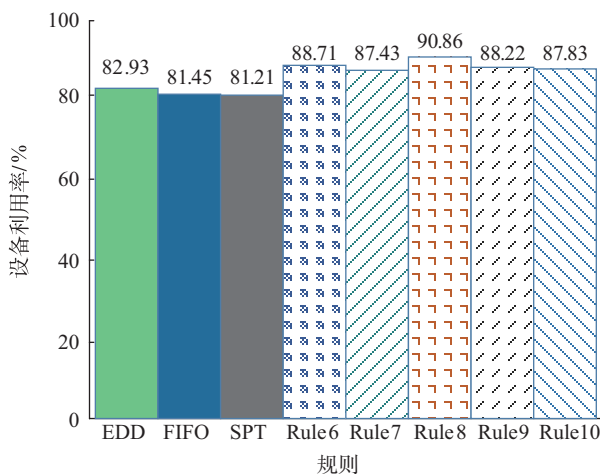


图9 设备利用率

Fig.9 Use ratio of device

提高了柔性生产线的性能,验证了遗传规划算法搜索和优化调度规则的有效性和可行性。

遗传规划算法可对调度规则完成有效搜索和优化的原因在于:通过遗传算子,种群不断进化,最终获得较优规则;使用二叉树表示调度规则个体,其结构可变,利于遗传算子的执行和群体的进化;算法中充分考虑了可能影响任务优先级的因素,利于找到较优规则。

在试验过程中,当生产规模较小时,GP算法运行耗时约130000ms,该过程在生产线实际运行前完成,将其获得的优化规则直接应用于调度算法中;基于任务优先级的调度算法运行一次耗时30~150ms,满足实际生产中小批量规模下生产调度的实时性要求。当生产规模较大时,GP算法效率降低,还需对算法做出进一步的改进。

4 结论

本文针对柔性生产线的调度问题,分析了调度过程中需考虑的各种约束条件,在满足所有约束条件下,基于工序任务的优先级属性设计了相应的算法。通过优化工序任务优先级的计算方法——调度规则来完成调度方案的优化。利用遗传规划方法进行调度规则的搜索与优化,获得的优化规则进行在线应用,完成工序优先级的计算和生产线调度方案的快速求解,以满足实际生产要求。利用实例进行了试验,结果表明,与EDD等常用规则相比,由遗传规划算法得到的调度规则有效提高了设备利用率和减小了拖期时间,证明遗传规划算法可以用于解决生产线调度问题。本文设计的调度方法已经应用到了实际的生产线管控系统中。整个调度方案和优化过程还需要进一步改进,以提高解的质量。

参考文献

- [1] 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.
- [2] THÖRNBLAD K. On the optimization of schedules of a multitask production cell[D]. Trollhättan: Chalmers University of Technology, 2011.
- [3] THÖRNBLAD K. Mathematical optimization in flexible job shop scheduling modelling, analysis, and case studies[D]. Sweden: University of Gothenburg Göteborg, 2013.
- [4] THÖRNBLAD K, STRÖMBERG A B, ALMGREN T, et al. Optimization of schedules for a multitask production cell[J]. Surgical Infections, 2010, 16(6): 821-824.
- [5] SYBERFELDT A, KARLSSON I, NG A. An industrial case study of web-based simulation-optimization[C]//Industrial Simulation Conference. Skövde, 2011.
- [6] BLACKSTONE J H, PHILLIPS D T, HOGG G L. A state-of-

the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations [J]. International Journal of Production Research, 1982, 20(1): 27-45.

[7] KOZA J R. Genetic programming: on the programming of computers by natural selection[M]. Cambridge: MIT Press, 1992.

[8] ĐURASEVIĆ M, JAKOBOVIĆ D, KNEŽEVIĆ K. Adaptive scheduling on unrelated machines with genetic programming[J]. Applied Soft Computing, 2016, 48: 419-430.

[9] BRANKE J, HILDEBRANDT T, SCHOLZREITER B. Hyper-heuristic evolution of dispatching rules: a comparison of rule representations [J]. Evolutionary Computation, 2014, 23(2): 249-277.

[10] 范华丽,熊禾根,蒋国璋,等.基于遗传规划的动态作业车间调度规则生成研究[J/OL].计算机集成制造系统,(2016-12-16) [2017-08-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20170818.1120.006.html>.

FAN Huali, XIONG Hegen, JIANG Guozhang, et al. Research on the generation of dispatching rules for dynamic Job-shop scheduling problem based on genetic programming algorithm[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems, (2016-12-16) [2017-08-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20170818.1120.006.html>.

[11] 刘晓冰,焦璇,宁涛,等.基于双链量子遗传算法的柔性作业车间调度[J].计算机集成制造系统,2015,21(2): 495-502.

LIU Xiaobing, JIAO Xuan, NING Tao, et al. Flexible job shop scheduling based on double chains quantum genetic algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2015, 21(2): 495-502.

[12] RAJENDRAN C, HOLTHAUS O. A comparative study of dispatching rules in dynamic flow shops and job shops[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 116(1): 156-170.

通讯作者:邹方,研究员,研究方向为数字化与柔性装配、智能控制, E-mail: yzoufang@sina.com。

(责编 大漠)

(上接第94页)

[4] 任宁,刘敬民.美国机载激光武器发展浅析[J].红外与激光工程,2008(37): 379-382.

REN Ning, LIU Jingmin. Analysis for american air-borne laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008(37): 379-382.

[5] BARTON D K. Report of the APS study group on boost-phase intercept systems for national missile defense[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2004.

[6] TIRPAK J A. Setting a course for the airborne laser[J]. Air Force, 2003, 86(9): 46-50.

[7] BUTLER A. Ray of Light[N]. Aviation Week & Space Technology, 2010-94-28.

[8] FEIN G. Textron picked for high energy laser program phase III [J]. Defense Daily, 2006, 229(6): 1-2.

[9] 陈黎.美国的ELLA“大型飞机电激光器”项目-未来的“激光轰炸机”[J].国防科技工业,2013(3): 66-67.

CHEN Li. ELLA of the US—Laser bomber in the future[J]. Defence Science & Technology Industry, 2013(3): 66-67.

通讯作者:张亦卓,博士、高级工程师,研究方向为固体激光及激光加工技术, E-mail: yizhuolaser@foxmail.com。

(责编 大漠)