

引文格式:唐红涛,洪润尔,张伟,等.大型航空模锻液压缸的生产调度系统与应用[J].航空制造技术,2024,67(19):14-24.

TANG Hongtao, HONG Runer, ZHANG Wei, et al. Production scheduling system and application of large aviation die forging hydraulic cylinder[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(19): 14-24.

大型航空模锻液压缸的生产调度系统与应用*

唐红涛¹,洪润尔¹,张 伟^{1,2},张雁翔²,张小勇²,刘 焘²

(1. 武汉理工大学,武汉 430079;

2. 韶关液压件厂有限公司,韶关 512029)

[摘要] 大型航空模锻液压缸是航空模锻液压机的核心部件,在生产飞机、航空发动机上的重要模锻零部件时提供动力来源。根据此类液压缸高质量生产过程中质检对加工的约束及两种工序的耦合关系,提出了一种考虑质量检验的大型航空模锻液压缸生产调度模型,从而同时对加工和质检两种工序进行调度优化;设计了一种双工序混合型的双层编码方式及基于总工序号奇偶性判定工序类型的解码方法,在结合非支配排序遗传算法和多目标模拟退火算法的理论上开发了一套具有参数调节、任务推送、进度监控、数据反馈等功能的调度系统,并通过实例验证了模型和算法的有效性。最后,将该调度系统运用于某液压生产企业,保证了大型航空模锻液压缸产品质量优良的同时较大程度地提高了生产效率。

关键词:航空模锻液压缸;非支配排序遗传算法 II (NSGA-II);多目标模拟退火算法(MOSA);质量控制;调度系统

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.19.014



唐红涛

教授,博士生导师,研究方向为智能优化算法和调度。

航空模锻件具有优良的机械性能和表面质量,广泛应用于飞机机身或机翼等关键部位及涡轮发动机等重

* 基金项目:国家自然科学基金(51705384, 52075401)。

要设备上^[1]。该类工件的成形方式主要是通过航空模锻压机进行锻造加工,而航空模锻液压缸作为航空模锻液压机的核心部件,在航空模锻件的生产中有着举足轻重的地位,其产生压力的大小更是能直接影响航空模锻件质量的优劣^[2]。迄今为止,我国的高吨位模锻液压缸在压力方面已经有了较大突破,而在生产方面,对产品的高效率和高质量等要求愈发严苛,因此如何在复杂的生产环境下保证液压缸产品性能良好的同时又能兼顾效率、负载、成本等加工因素逐渐成为一项需要攻克的难题,在此背景下,产品制造智能化和数字化成为航空工业的一大发展趋势^[3]。

在航空工业领域的生产调度方面,许多学者针对算法理论或应用平台做出了相关研究。王玉芳等^[4]在航空结构件的批量调度问题上建立了一种双资源约束的柔性作业车间调度

模型,用混合灰狼算法实现了对最大加工时间和瓶颈机器负载的优化。杨博见^[5]针对航空结构件研究了基于多 Agent 系统的柔性制造动态调度系统,并设计了相应的动态调度策略,最后通过仿真验证了其可行性。刘环宇^[6]提出了基于仿真模型和智能搜索算法交互的车间排产方法,以及基于启发式规则的刀具夹具管理方法。此类研究大多围绕加工效率和机台负载方面进行优化,在产品质量方面的优化却很少涉及。而航空模锻液压缸零部件的制造工艺大部分是加工工序和质检工序相互连接耦合而成,因此各质检人员的分工和质检顺序会直接影响加工工序流转,对调度过程产生不可忽略的影响,因此对考虑质检的柔性作业车间调度问题的研究具有现实意义。

本文构建了一种对加工和质检工序同时进行优化的调度系统,旨

在尽可能减少最大加工完成时间的同时提高质检员和各加工机台工时分配均匀度,从而在保证加工和质检效率的同时也能减少部分人员因任务过多而造成产品质量不良的情况。该平台使用改进的非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)生成调度方案,在算法求解框架中利用多目标模拟退火算法(Multi-objective simulated annealing, MOSA)按改进的Metropolis准则接受新解以跳出局部最优解^[7-10],同时提供了方案的推送和收集执行结果的功能,并对使用数据进行处理和展示,以提高操作工人的执行力及后续调度方案的准确度。

1 大型航空模锻液压缸及其制造现状

液压缸通常有单作用缸和双作用缸两种结构类型,双作用缸通常用于双向运动且需要较大动力的场合,单作用缸则为单方向提供动力,在返回行程时则需借用外力,但是相比双作用缸成本更低^[11],具体需要根据应用场景来选择液压缸的类型。液压缸的密封件保证活塞在运动过程中不会漏油,同时也能起到减少摩擦的作用^[12],良好的密封件对整个液压系统的正常运行起着至关重要的作用。

大型航空模锻压机是锻造航空模锻件的关键设备,其液压缸分为主缸和回程缸两部分,两种缸都是单作用缸,其实物、结构和应用如图1所示。活塞正向运动时由主缸提供动力,返回则借用两个回程缸产生的压力来实现,两种缸相互配合,使运动更加平稳,同时可以减少流体能量浪费,从而提高工作效率。其主缸和回程缸均由近20个非标准零件和近20个标准零件组成,车间自行生产的产品基本属于非标准零件部分,一些螺钉螺母和密封件则多为标准件。以主缸为例,它主要由球面垫、连杆、柱塞、缸体、导向套、各种密封件、各

种螺钉及螺母等部件构成,其BOM(Bill of materials)结构如图2所示。在加工工艺卡片上,除了特殊的内部缺陷质检工序会被写入外,通常只会写加工工序,本文以连杆、柱塞、缸体的加工工序为例,若不考虑质检的工序,则其加工工艺卡简表如表1所示。

由于应用场景的特殊性,大型航空模锻液压缸的质量要求严格。在实际生产过程中,每道加工工序后都会有一道质检工序,因此工艺流程基本为“加工-质检……加工-质检”的形式,即加工工序和质检工序耦合交

替进行。质检工序一般分为几何形状检验、物理性能检验和内部缺陷检验,几何形状和物理性能检验需要根据图纸具体的工艺要求,选取对应类型和量程、精度等级的量具完成,有的特殊零件还需要进行三坐标检测,常用量具包括环塞规、压力表、千分尺、粗糙度轮廓扫描仪、涂镀层测厚仪及里氏硬度计等;内部缺陷检验常采用超声波探伤、磁粉探伤等方式。

通常在加工零件每道加工工序之后会进行几何形状检验和物理性能检验,部分工序才会进行内部缺陷

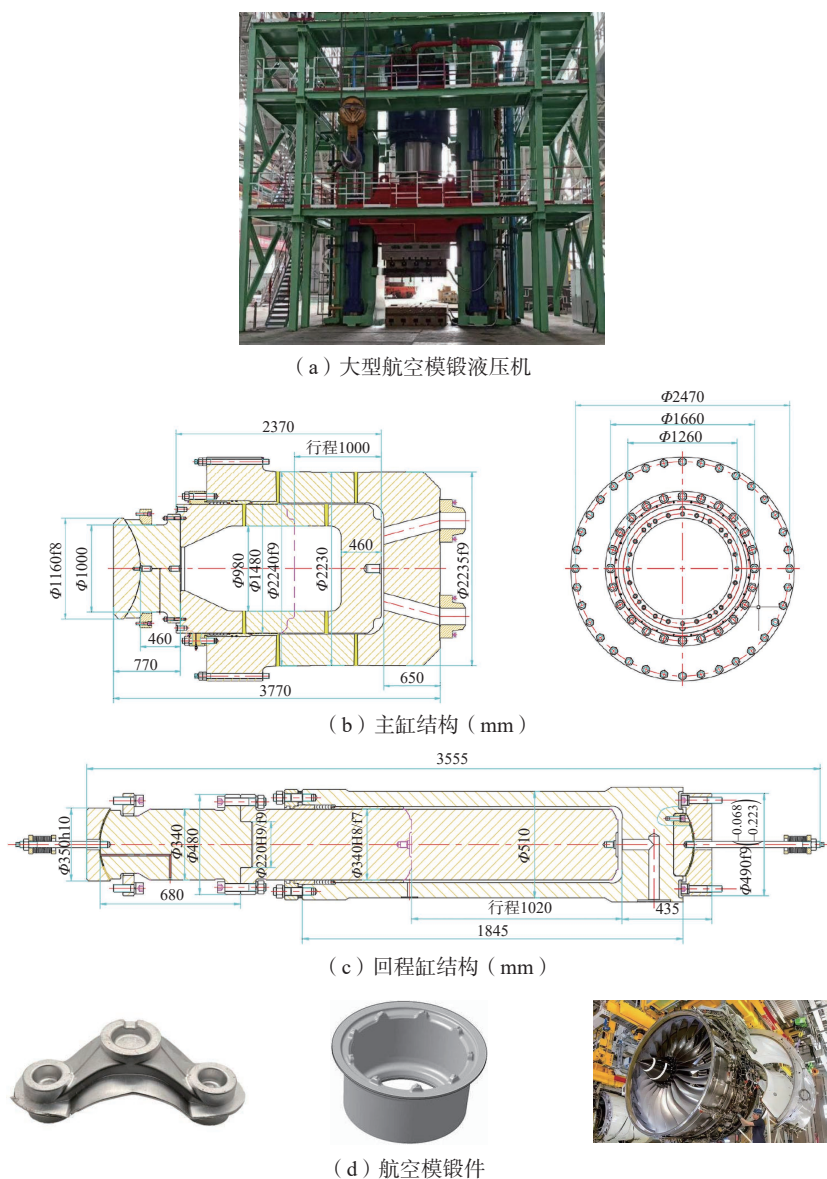


图1 大型航空模锻液压缸的结构和应用
Fig.1 Structure and application of large aviation die forging hydraulic cylinder

检测,由于质检工序嵌于加工工序之间,因此质检执行过程很大程度上会影响加工过程,若安排不合理也会对工件的流转产生阻滞作用。目前,很多工厂内的质检工作是由主管按经验分配,质检员自行安排检验任务的顺序,这使得任务实施时通常会出现部分员工任务过多及部分工件搁置很久未检的情况。除此之外,加工和质检人员任务分配不均时,出现次品的概率也会更高。因此通过加工和质检协同调度来提高任务分配均匀性的研究对于航空模锻液压缸的高效

高质量生产十分重要。

2 生产调度模型与算法

2.1 问题模型

模锻液压缸生产-质检工艺可以简述为以下过程。 N 个工件被分配到 M 台机床进行加工,加工工序完成后会分配给 W 个检验员进行质检,质检工序完成后才能继续进行下道加工工序,同一工件的两种工序数相同、成对出现,直到完成终检后整个过程才结束。因此该模型存在以下假设情况:(1)同一个工件在同一

时刻只能由1个机台加工或质检员质检,1个机台和质检员在同一时刻也只能处理1个工件;(2)工件的每道工序有顺序要求,且同一工件加工和质检工序为交替进行,不可连续执行加工和质检工序;(3)0时刻所有机台均可开始加工,所有质检员均可开始质检;(4)忽略质检员于不同机台之间的路程时间。整个流程的相关变量如表2所示。

目标函数为

$$\min f_1 = \max(S'_{iju} + P'_{iju}) \quad (1)$$

$$\min f_2 = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^M (T_k - \bar{T})^2 \quad (2)$$

$$\min f_3 = \frac{1}{u} \sum_{u=1}^W (T'_u - \bar{T}')^2 \quad (3)$$

式(1)表示最小化最大完工时间,由于整个加工过程以终检结尾,因此取质检的完工时间;式(2)和(3)分别表示最小化各机台总加工时间和各质检员总工作时间的方差值。

约束条件为

$$\begin{aligned} S_{ijk_1} + P_{ijk_1} &\leq S'_{ij_{u_1}} \leq S_{i(j+1)k_2} - P'_{ij_{u_1}} \\ &\leq S'_{i(j+1)u_2} - P_{i(j+1)k_2} - P'_{ij_{u_1}} \\ \forall i &= 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, (J_i - 1) \\ k_1 &\in M_{ij}, k_2 \in M_{i(j+1)} \\ u_1 &\in Q_j, u_2 \in Q_{i(j+1)} \end{aligned} \quad (4)$$

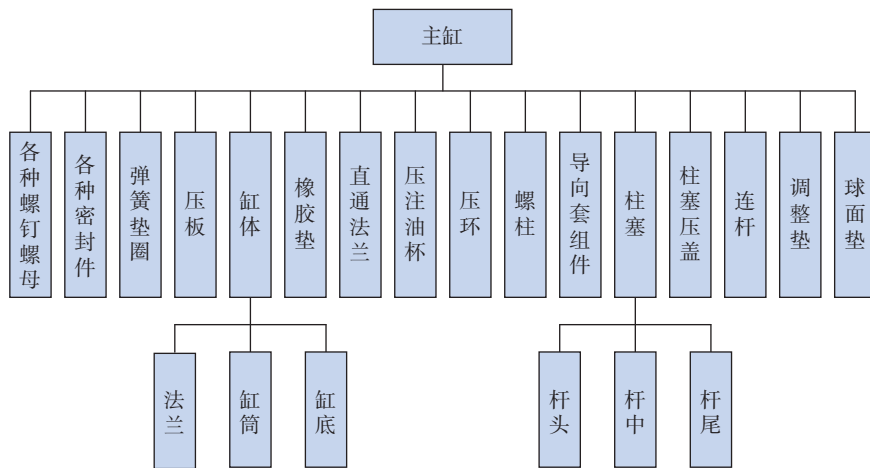


图2 某液压缸主缸的BOM结构图

Fig.2 BOM structure diagram of the hydraulic cylinder's main cylinder

表1 重要零件加工工序

Table 1 Processing procedures of the important parts

工序	连杆	柱塞	缸体
1	锻造, 锻后去应力退火	按图焊接, 去焊渣	焊前组装
2	粗车两端面和各级内外圆, 去毛刺	整体进炉去应力退火	焊接, 去焊渣
3	调质处理	车两端面总长, 车外圆, 倒角去毛刺	整体去应力退火
4	精车各级外圆和环槽及各球面, 倒角, 去毛刺	外圆表面不锈钢熔覆焊	精车左端面和法兰外圆及各级内圆, 倒角, 去毛刺, 精车端面 and 各级外圆, 倒角去毛刺
5	钻孔, 钻、铣沉螺孔, 去毛刺	整体进炉去应力退火	钻、铣、扩、铰孔, 钻、镗斜孔, 去毛刺
6	钻攻注油口, 去毛刺	铣左端平面、止口、外圆导向角、台阶外圆、十字槽及环槽	镗、铣两端面
7	钻孔, 去毛刺	车右端面, 车、磨、抛外圆, 倒角去毛刺	防锈入库
8	杆球表面高频淬火	防锈入库	—
9	防锈入库	—	—

表2 变量符号定义
Table 2 Definition of variable symbols

变量	定义
N	工件数
M	机台数
W	质检员数
J_i	工件 i 的加工 / 质检工序数
i, x	工件号 ($i=1, 2, \dots, N; x=1, 2, \dots, N$)
h	总工序号, $h=1, 2, \dots, 2J_i$
j, y	加工 / 质检工序号 ($j=1, 2, \dots, J_i; y=1, 2, \dots, J$)
k	机台序号 ($k=1, 2, \dots, M$)
u	质检员序号 ($u=1, 2, \dots, W$)
O_{ij}, O_{xy}	工件 i 的第 j 道加工工序, 工件 x 的第 y 道加工工序
O'_{ij}, O'_{xy}	工件 i 的第 j 道质检工序, 工件 x 的第 y 道质检工序
M_{ij}	工件 i 的第 j 道加工工序可选机台集合
Q_{ij}	工件 i 的第 j 道质检工序可选质检员集合
S_{ij}, S_{xy}	工序 O_{ij} 的开始时间, 工序 O_{xy} 的开始时间
S'_{ij}, S'_{xy}	工序 O'_{ij} 的开始时间, 工序 O'_{xy} 的开始时间
S_{ijk}	工序 O_{ij} 在机台 k 上的开始时间
S'_{iju}	工序 O'_{ij} 由质检员 u 处理的开始时间
P_{ijk}	工序 O_{ij} 在机台 k 上的加工时间
P'_{iju}	工序 O'_{ij} 由质检员 u 处理的质检时间
T_k	机台 k 的总加工时间
T	各机台平均总加工时间
T'_u	质检员 u 的总工作时间
T'	各质检员平均总工作时间
β_{ijk}	决策变量, 当 O_{ij} 在机台 k 上加工时为 1, 否则为 0
γ_{iju}	决策变量, 当 O'_{ij} 由质检员 u 处理时为 1, 否则为 0
θ_{ijxym}	决策变量, O_{ij} 和 O_{xy} 均选择机台 m 且 O_{ij} 先于 O_{xy} 加工为 1, 否则为 0 ($i=x$ 与 $j=y$ 不能同时成立)
η_{ijxyu}	决策变量, O'_{ij} 和 O'_{xy} 均选择质检员 u 且 O'_{ij} 先于 O'_{xy} 质检为 1, 否则为 0 ($i=x$ 与 $j=y$ 不能同时成立)
L	一个足够大的正数

$$S_{ijk} + P_{ijk} \leq S'_{iju} \quad \forall i=1, 2, \dots, N, j=J_i, k \in M_{ij}, u \in Q_{ij} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^M \beta_{ijk} = 1 \quad \forall i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, J_i \quad (6)$$

$$\sum_{u=1}^W \gamma_{iju} = 1 \quad \forall i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, J_i \quad (7)$$

$$S_{ij} + P_{ijm} \leq S_{xy} + L(1 - \theta_{ijxym}) \quad \forall i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, J_i, x=1, 2, \dots, N, y=1, 2, \dots, J_x, m \in M_{ij}, m \in M_{xy} \quad (8)$$

$$S'_{ij} + P'_{iju} \leq S'_{xy} + L(1 - \eta_{ijxyu}) \quad \forall i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, J_i, x=1, 2, \dots, N, y=1, 2, \dots, J_x, u \in Q_{ij}, u \in Q_{xy} \quad (9)$$

式(4)和(5)表示同一工件的质检和加工工序为交替进行,且工序为顺序执行;式(6)和(7)分别表示工件的特定工序只能由1台机器加工或只能由1名质检员进行质检;式(8)表示同一时刻同一机台只能加工1道工序;式(9)表示同一时刻同一质检员只能处理1道工序。

2.2 算法过程

NSGA-II 对于求解具有多个正相关性较低目标的问题有着很优良的性能,但它也有收敛速度慢、易陷入局部最优解的缺点^[13]。MOSA 的思想来源于金属的退火热处理过程,通过温度下降控制劣质解接受概率由高逐渐降低,使得高温时解集个体更多样化,低温时优质个体更容易保留,从而达到跳出局部最优解的目的。MOSA 是针对多目标求解,因此常根据实际问题模型对原 Metropolis 准则设置对应的权重向量进行优化,得出对应的接受概率^[14-15]。本文开发了一种 NSGA-MOSA 算法,用 MOSA 弥补 NSGA-II 算法的缺陷,以提高整体算法的性能。

2.2.1 编码与解码

NSGA-MOSA 采用双工序混合的双层编码^[16]方式,包括工序层 OS 和目标层 TS,如图3所示。OS 编码层存在加工和质检两种工序,同一工件的加工和质检工序交替进行、成对出现,因此可以通过工件的总工序号 h 的奇偶性判断工序类型。当 h 为奇数则为加工工序,加工工序号为 $(h+1)/2$; h 为偶数则为质检工序,质检工序号为 $h/2$ 。TS 编码层则是 OS 编码层对应工序的可选机台 / 质检员集合里的选择号,决定工序的执行对象。

2.2.2 算法步骤

NSGA-MOSA 结合了遗传算法和模拟退火算法的特点,既包含对种群的交叉变异等步骤,又引入多目标模拟退火的接受准则及逐代降温的操作,其流程如图 4 所示,以下为具体步骤。

步骤 1: 设置交叉率、变异率、种群数、最大迭代数(G_{max}),以及 Markov 链长度、步长因子、初温、衰减参数(α)、终温(t_{end}),并初始化种群。

步骤 2: 计算初代种群个体的各目标函数值。

步骤 3: 先将 OS 编码与 TS 编码各点对应关系保存,再将 OS 编码执行 pox 交叉,即两段编码交叉后再调整编码各工件数,防止赘余和缺失,交叉完毕后重组 TS 编码,以保持与 OS 编码原本的对对应关系;而后对 TS 编码执行均匀交叉,即同工件的同工序所对应 TS 编码的值进行交叉。

步骤 4: 与步骤 3 类似,先将 OS 编码与 TS 编码各点对应关系保存,再在 OS 编码上选取编码段并采用插入变异,完成后同样重组 TS 编码;对于 TS 编码段则自动选取工作时间较少的目标号。

步骤 5: 计算新种群个体各目标函数值。

步骤 6: 新种群和父代种群结合,进行非支配排序,根据 Pareto 层级升序和拥挤距离降序的方式选择新种群。

步骤 7: 对 Pareto 前沿个体执行变异操作,由步长因子调整变异区域范围,区域内 OS 段采用逆序变异,TS 段目标值也改为随机选取,计算新个体的目标函数值,Markov 链增加 1 个步长。

步骤 8: 设置权重向量,其原则是如果将当前个体的目标函数 f_1 、 f_2 、 f_3 的值分别变成种群最优的目标函数值,假设此过程改变的绝对值分别为 Δf_{1max} 、 Δf_{2max} 、 Δf_{3max} ,则

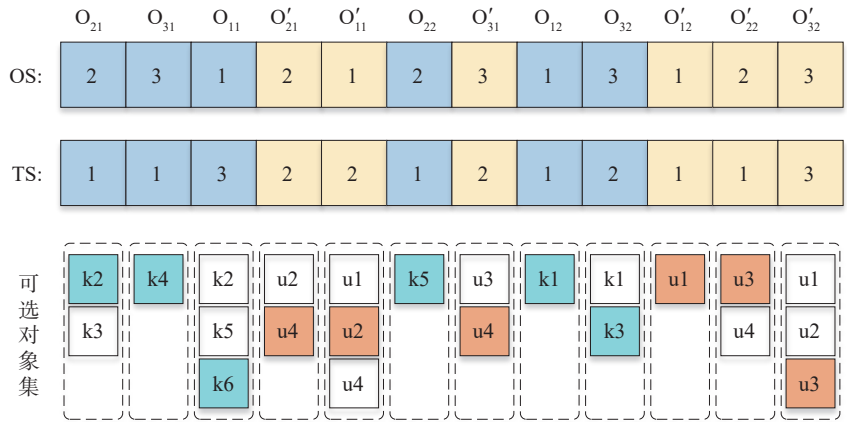


图 3 编码与解码示意图
Fig.3 Encoding and decoding diagram

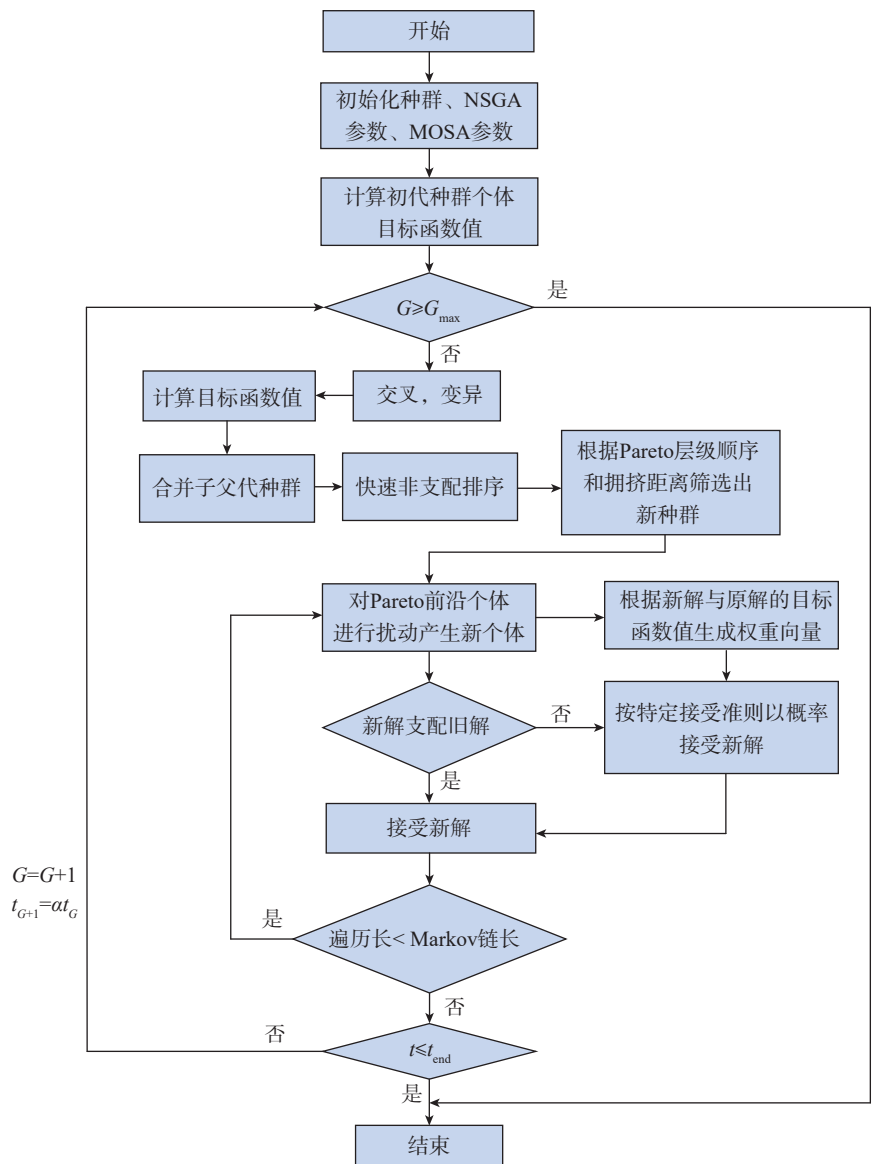


图 4 NSGA-MOSA 流程图
Fig.4 Flowchart of NSGA-MOSA

各权重系数需将它们调整成同一标量 $\max(\Delta f_{1\max}, \Delta f_{2\max}, \Delta f_{3\max})$, 进而第 n 个权重系数为 $\lambda_n = \max(\Delta f_{1\max}, \Delta f_{2\max}, \Delta f_{3\max}) / \Delta f_{n\max}$, 其余系数同理, 最后组成权重向量。

步骤 9: 判断步骤 7 中的新解是否支配旧解, 若是, 则替换旧解; 若否, 则以

$$p = \min \left(1, \prod_{i=1}^n \exp \left\{ \frac{\lambda_i (f_i - f_{i\text{新}})}{t_G} \right\} \right)$$

的概率接受新解 (t_G 为第 G 代温度, n 为目标函数个数)。

步骤 10: 判断当前 Markov 链长度是否遍历完毕, 若否, 则返回步骤 7。

步骤 11: 判断当前温度是否小于或等于终温, 若是, 则结束算法; 若否, 则将温度按 $t_{G+1} = at_G$ 式进行降温, 当前代数 (G) 加 1。再判断是否当前代数已超出最大迭代数, 若否, 则返回步骤 3; 若是, 则结束算法。

2.3 试验分析

采用 NSGA-II、MOEA/D 和 NSGA-MOSA 这 3 种方案进行对比测试, 使用 MATLAB R2018a 在 Intel Core i5 处理器、16 GB 内存、Windows 11 的环境下运行。将标准算例 MK01~MK10 作为加工算例, 改编自 MK01~MK10 的 QC01~QC10 作

为质检算例, QC 算例的工件数和工件对应的工序数与相应的 MK 算例保持一致, 时间取 0.25~0.75 倍加工时间。NSGA-II 种群数为 100, 迭代数为 100, 交叉率和变异率分别为 0.3 和 0.4, NSGA-MOSA 的遗传算法部分参数一致, 最大迭代数设置为 100, 衰减因子为 0.99, 初温和终温分别为 100 和 0, Markov 链长 50, 步长因子为 1, MOEA/D 的种群数、交叉变异率和迭代数与 NSGA-II 保持一致; 运行结果采用 HV (Hypervolume) 指标进行衡量, 该指标表征了 Pareto 前沿解集所包围的超体积大小, 其值越大, 表示该解集在目标空间中的分布越好, 即解集中解越多, 越接近真实 Pareto 前沿, 其计算方式为

$$HV = \delta \left(\bigcup_{a=1}^{|S|} v_a \right) \quad (10)$$

式中, δ 为 Lebesgue 测度, 用于测量体积; $|S|$ 为非支配集数; v_a 为参考点与解集中第 a 个解构成的超体积。3 种算法 10 次运行的平均 HV 值如表 3 所示, 其中选取 MK02+QC02 算例运行的 Pareto 前沿解集作对比, 如表 4 所示, 其散点图见图 5 (a)。

使用 NSGA-MOSA 计算 MK02+QC02 算例, 并取各代 Pareto 前沿解

集的所有目标函数值的最大、最小、平均值, 如图 5 (b)~(d) 所示。图 6 为最后一代 Pareto 前沿解集中最大完工时间值最小的解所对应的加工和质检工序甘特图。

3 调度系统开发与应用

调度系统是一种用于管理车间产品制造过程的工具, 主要专注于生产调度的具体操作层面, 是 MES 系统中的一个关键组成部分。张杰^[17]和李狄威^[18]在电站阀门制造的动态调度方面对调度系统进行了深入研究; 李思远^[19]将调度系统应用于汽车底盘工件生产调度, 取得了良好的效果。对于航空模锻液压缸的生产过程, 同样也需要相应的平台实施调度计划, 以保证加工过程的效率和质量。

基于前文中车间生产过程的问题和调度算法理论, 本节介绍一种基于 Windows Forms 开发的数字化集成管控平台^[20-21]的调度系统。在算法方面, MATLAB Engine API for .NET 为 C# 的框架中调用 MATLAB 提供了完善支持, 方便程序进行调度系统与 MATLAB 之间的交互。

3.1 调度系统架构

本文调度系统分成 3 个主层级: 基础设施层、综合业务层和车间应用层。基础设施层提供系统的基础支持, 包括网络通信、数据采集、数据备份等功能, 确保系统能够正常运行, 并提供必要的支持和保护, 例如数据采集卡、网线、网关、SQL server 数据库。综合业务层负责处理与车间调度相关的业务逻辑, 包括物料导入、工艺编制、调度算法参数调节和进度查询等, 同时还负责管理和调用历史数据及调度系统所需的其他信息, 其历史数据主要是来自车间应用层反馈的使用数据, 如加工、质检实际工时及其对应的物料信息、工序信息、物料规格信息、对应机台和检验员等

表 3 算法结果平均 HV 值对比

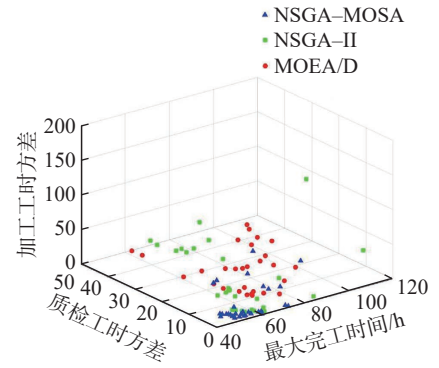
Table 3 Comparison of average HV values for algorithm results

序号	算例	NSGA-II	MOEA/D	NSGA-MOSA
1	MK01+QC01	0.274	0.231	0.316
2	MK02+QC02	0.389	0.373	0.431
3	MK03+QC03	0.351	0.334	0.358
4	MK04+QC04	0.298	0.313	0.324
5	MK05+QC05	0.285	0.288	0.297
6	MK06+QC06	0.127	0.138	0.304
7	MK07+QC07	0.346	0.314	0.355
8	MK08+QC08	0.418	0.395	0.453
9	MK09+QC09	0.216	0.193	0.221
10	MK10+QC10	0.067	0.071	0.083

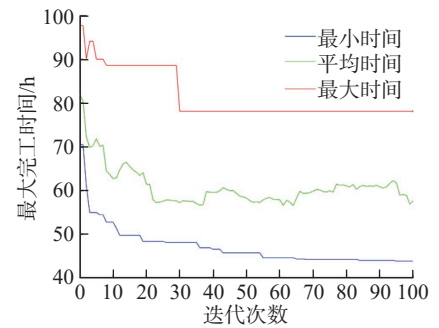
表4 Pareto 前沿解集对比

Table 4 Comparison of Pareto frontier solution set

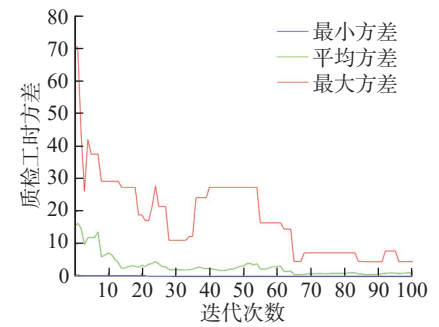
序号	NSGA-MOSA			NSGA-II			MOEA/D		
	最大完工时间/h	质检工 时方差	加工工 时方差	最大完工时间/h	质检工 时方差	加工工 时方差	最大完工时间/h	质检工 时方差	加工工 时方差
1	56.5	0.01	96	80.7	0.04	178.7	76.16	0.32	54.8
2	78.1	0.01	62.97	106.5	0.01	53.1	58.99	46.71	8.56
3	50	4.54	2.26	43.6	27.3	72	54.23	0.25	75
4	43.9	3.11	59.06	63	1.13	1.46	67.15	9.17	7.76
5	60.8	0.25	1.06	46.8	27.37	62.96	65.11	0.03	102.96
6	54.2	0.12	65.1	45.5	10.81	127.37	47.51	2.88	73.36
7	44.4	2.04	8.4	85	0.83	3.87	55.42	39.93	17.86
8	61.2	0.01	40.7	44.9	18.89	72	50.49	20.7	26.16
9	69	0.14	33.36	68.3	0.09	46.96	49.55	0.77	75
10	46.8	1.13	11.46	46.6	8.3	105.06	71.23	0.4	39.46
11	44.1	4.5	52.4	47.1	3.45	86.66	47.6	11.64	53.76
12	63.7	0.12	34.56	47.5	14.51	81.06	57.46	15.22	19.86
13	47.5	3.99	5.5	48.5	6.45	27.6	62.22	0.11	84
14	72.7	0.16	2.16	49.4	4.21	34.96	54.31	0.41	135.36
15	46.9	0.43	11.4	49.9	2.25	12.97	60.77	14.41	11.86
16	48.1	0.17	22.2	46.9	16.7	72	69.19	0.53	22
17	52.1	0.14	11.86	58.6	0.21	25.1	63.58	1.81	25.76
18	49.1	1.51	5.46	45.7	17.6	76.8	54.99	0.14	128.66
19	71.4	0.21	4.4	54.3	2.25	7.2	60.01	0.19	78.26
20	59.2	0.14	5.6	48.8	0.23	36.7	59.07	4.28	22.7
21	49.6	1.38	5.5	51.4	2.31	10.66	50.66	0.77	115.86
22	53	0.36	4.57	57.7	0.59	7.2	53.72	0.87	44.26
23	51.5	0.31	8.8	61.5	0.21	9.9	66.21	7.77	14.7
24	50.9	0.43	5.2	58.1	1.85	6.16	66.13	0.23	66.96
25	50.1	1.5	2.26	48.7	2.22	42.26	56.27	0.34	104.66
26	54.8	1.4	2.3	48	1.95	42.96	56.95	0.62	30.56
27	54.8	0.28	8.6	52.4	0.8	9.46	52.36	0.44	73.86
28	56	0.31	5.5	47.7	1.95	46.6	51.51	1.01	40.26
29	60	0.25	5.46	53.1	0.23	10.97	58.73	0.19	113.5
30	49	0.27	11.46	—	—	—	—	—	—
31	47.1	4.53	5.46	—	—	—	—	—	—



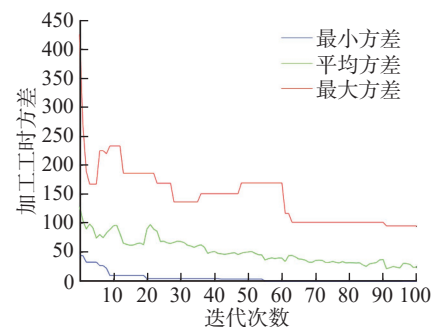
(a) Pareto前沿解集对比散点分布



(b) 最大完工时间变化



(c) 质检工时方差变化



(d) 加工工时方差变化

图5 NSGA-MOSA 算法运行结果图
Fig.5 NSGA-MOSA algorithm operation result graph

特征信息；用于调度的工时数据则是由这些历史数据及对应特征信息按深度学习模型预测并通过系数修正得到。车间应用层的主要功能是将方案推送到加工工人的工控机和质检员电脑上，加工工人和质检员则按照调度方案所指定顺序进行加工和质检。加工和质检过程的时间会被记录，并与相关的特征信息一起反馈回综合业务层或在屏幕展示。具体系统架构如图7所示。

3.2 调度系统应用

调度系统的运行流程大致可以概括为工艺编制、调度算法、调度方案推送、执行状态监控等部分，具体流程如图8所示。

各零件图在MES系统中已经和对应合同实现绑定，操作人员将相应合同导入便可以得到该合同所需加工的所有零件，工艺编制人员为各需加工的工件添加工艺及具体要求即可生成工艺路线，工艺编制界面如

图9所示。

物料的名称、总重、尺寸、工序等特征信息具备之时，系统的调度模块会根据历史数据中的工时数据和相关特征信息由系统中的BP神经网络模型预测得出预计加工时间和质检时间，为调度算法提供数据依据，预测的时间也可以适当修正或手动调整，如图10所示。选定对应的算法后，就可以设置算法对应的参数，调度人员勾选需要进行调度的零件，

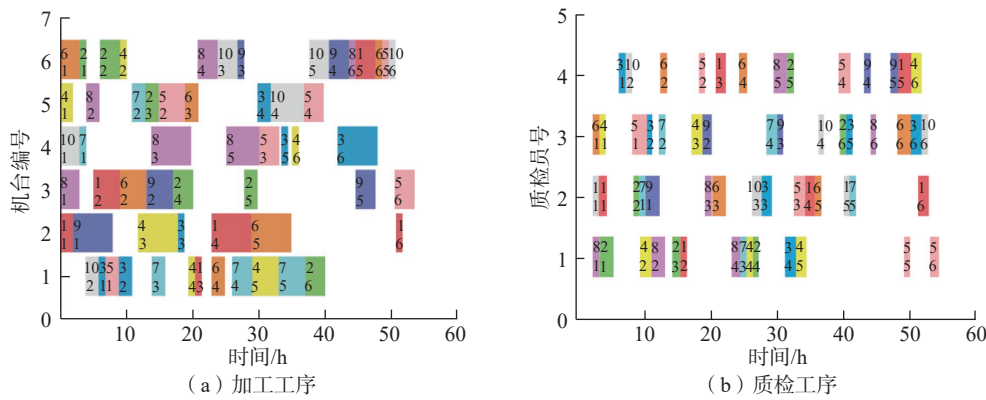


图6 加工与质检工序甘特图

Fig.6 Gantt chart for processing and quality inspection processes

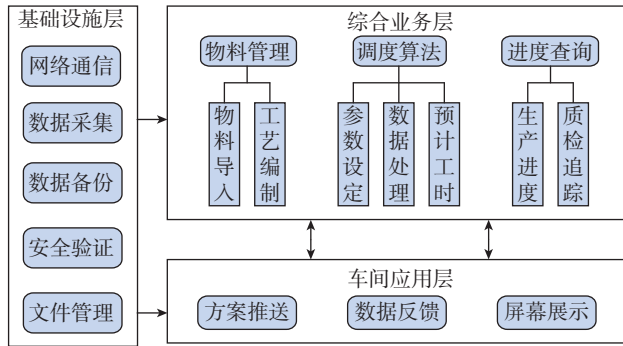


图7 系统总体架构

Fig.7 Overall system architecture

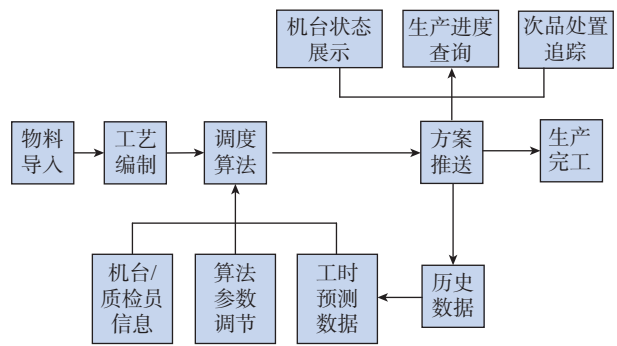


图8 调度系统流程图

Fig.8 Scheduling system flowchart

物料代号	物料名称	物料材料	单重数量	物料单重	物料长度	物料分类	备注	对象索引	关系索引
0399453000P	球面轴	45100-7	1	1170	1170	零件		35315...	35315...
0399453000P	球面轴I	35	24	0.02	0.48	零件		35315...	35315...
0399453000P	压杆	45	1	620	620	零件		35315...	35315...
0399453000P	连杆	45	1	4095	4095	零件		35315...	35315...
0399453000P	螺栓M414-370	40Cr	24	9.3	223.2	零件		35315...	35315...
0399453000P	轴套压盖	45	1	1141	1144	零件		35315...	35315...
0399453000P	调整轴II	35	24	0.94	22.56	零件		35315...	35315...
0399453000C	导向座组件I	组件	1	527	527	零件		35315...	35315...
0399453000P	导向套I	45	1	651	651	零件		35315...	35315...
0399453000P	螺栓M414-600	40Cr	36	16.2	353.2	零件		35315...	35315...
0399453000C	导向座组件II	组件	1	357	357	零件		35315...	35315...
0399453000P	导向套II	45	1	468	468	零件		35315...	35315...
0399453000C	柱套	45	1	2197	2197	零件		35315...	35315...

(a) 物料导入界面

工序代号	工序名称	工艺要求	特殊加工
1	1 焊	按图焊接，去焊渣。焊前必须预热至200℃，焊时边加热边焊。	
2	2 热	焊后必须整体进行炉内退火，必须将炉内炉温加热至200℃，保温2h，以500℃/h升温并升至300℃(2h)，以500℃/h升温并升至350℃(2h)，以500℃/h升温并升至400℃(2h)保温。注：甲方现场监控。	
3	3 车	车两端面总长，两端面圆度0.02mm，车外圆直径140±0.03，倒角去毛刺。	
4	4 探	焊缝超声波探伤，探伤要求按GB/T11345-2013进行。	
5	5 焊	从图去除了所有的焊缝，焊前必须预热至200℃，焊时边加热边焊。1.先内圆焊缝，一层10-13层厚1-1.5mm；2.第二层焊缝20-13，层厚2mm；注：焊后必须进行炉内退火，焊后必须整体退火。	
6	6 热	焊后必须整体进行炉内退火，必须将炉内炉温加热至200℃，保温2h，以500℃/h升温并升至300℃(2h)，以500℃/h升温并升至350℃(2h)，以500℃/h升温并升至400℃(2h)保温。注：甲方现场监控。	
7	7 铣	铣内圆端面，1) 铣完端面后，铣外圆端面(即图中位置)，铣削公差±0.02，走台阶；2) 工作由内向外，铣平端面总长，±0.5公差，铣出外圆端面，铣十字槽并开槽，总长度100%，倒角去毛刺。	
8	8 车	车上下工段料，加工数控加工；车右端端面总长，车右端圆度0.02mm，车外圆直径140±0.03，倒角去毛刺。	
9	9 位	终检入库。	

(b) 添加工艺界面

图9 工艺编制界面

Fig.9 Process planning interface

确认后系统就会生成调度方案并为各工件的各工序匹配特定记录编号,调度人员保存方案则实现下发。由技术人员选定可调度机台和质检员范围,调度计划中的工件不会占用所有机台和检验资源,系统下发的时间设定为工人开始工作的时间,确保机台和质检员可用,同时调度计划也不会占用工人所有工作时间,而是每日会留有 30% 的缓冲时间可以自行调整,防止未在调度计划内的其他在制工件无法继续生产,对应界面如图 11 所示。

调度方案下发后,系统会根据工控机对应的机台编号和质检员工作电脑的账户名对应的质检编号推送对应的任务,在调度界面生成的记录编号起顺序判断作用,加工人员或质检员将记录编号升序排列即是任务顺序,正常情况下记录编号默认为升序,加工人员工控机和质检员工作电脑显示界面如图 12 所示。系统中含对机台的数据采集展示模块,显示机台的运行状态、运行时间、产量等信息,另外还有生产加工与检验进度查看界面,如图 13 所示。



图 10 参数调节界面
Fig.10 Parameter adjustment interface



图 11 生产调度界面
Fig.11 Production scheduling interface

4 结论

本文针对一类大型航空模锻液压缸的生产特点和要求,提出了一种加工和质检耦合的生产调度模型,设计了 NSGA-MOSA 算法进行优化求解,并开发了生产调度系统进行应用。通过研究得到以下结论。

(1) 通过将 MOSA 算法与 NSGA-II 算法结合,开发出一种更为优良的混合优化策略, Pareto 前沿求解效率更高。以加工人员和质检员的工时分配均匀性为目标函数,可以降低因工作任务过多而制出次品或误检的概率。

(2) 双工序混合的双层编码方式和根据总工序号奇偶性判断工序类型的解码方法为同时优化加工和质检提供了模型依据,对于航空模

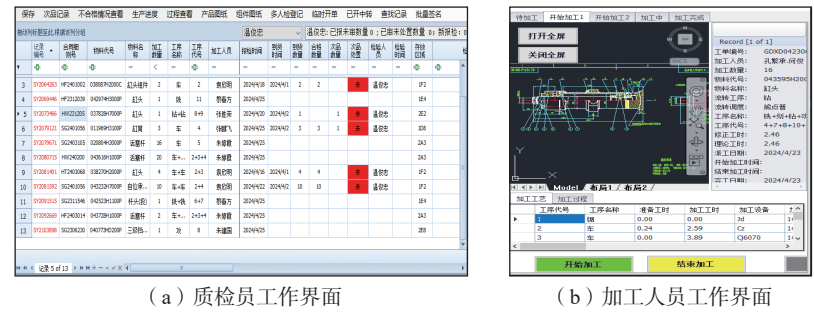


图 12 质检员及加工人员工作界面
Fig.12 Work interface of quality inspectors and processing operators

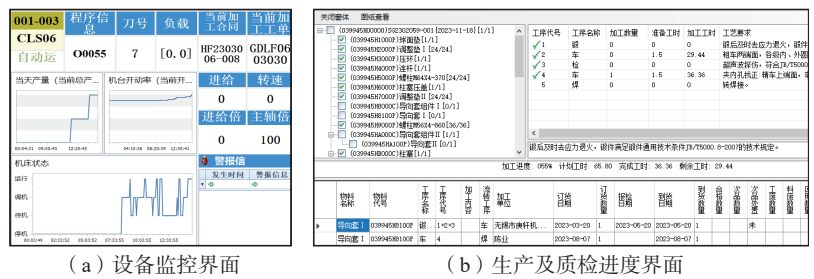


图 13 设备状态与生产进度监控界面
Fig.13 Interface of device status and production progress monitoring

锻液压缸的高效、高质量生产起到重要作用。本文开发的航空模锻液压缸的生产调度系统,可实施调度计划和生产监控以保证加工过程的效率和质量。

未来调度系统将更加注重数据精度和实际生产环境中的测试,同时需要增强适应性和灵活性,引入多样化算法和模型,实现智能化生产调度。对于次品审理和处置过程引起的重调度问题将作为后续主要研究对象,其中对于次品审理和处置时间的预测也将是未来重点研究的一项内容。

参考文献

- [1] 曾凡昌. 航空工业模锻装备的应用及其发展趋势[J]. 金属加工(热加工), 2014(1): 58-63.
- [2] ZENG Fanchang. Application and development trend of die forging equipment in aviation industry[J]. MW Metal Forming, 2014(1): 58-63.
- [3] 周杰, 刘左发, 屈志远, 等. 大型航空关键构件整体精密模锻成形技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(5): 14-25.
- [4] ZHOU Jie, LIU Zuofa, QU Zhiyuan, et al. Research progress of integral precision die forging technology for large aviation key components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(5): 14-25.
- [5] 隋少春, 牟文平, 龚清洪, 等. 数字化车间及航空智能制造实践[J]. 航空制造技术, 2017, 60(7): 46-50.
- [6] SUI Shaochun, MOU Wenping, GONG Qinghong, et al. Digital workshop and intelligent manufacturing practices[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(7): 46-50.
- [7] 王玉芳, 华晓麟, 曾亚志, 等. 面向航空结构件的双资源约束批量流调度[J/OL]. 计算机集成制造系统, 2023. [2023-08-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230814.1154.002.html>.
- [8] WANG Yufang, HUA Xiaolin, ZENG Yazhi, et al. Dual-resource lot streaming scheduling for aviation structural components[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023. [2023-08-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230814.1154.002.html>.
- [9] 杨博见. 基于多 Agent 的航空结构件柔性制造车间动态调度方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [10] YANG Bojian. Research on dynamic scheduling method of flexible manufacturing shop for aviation structural parts based on multi-Agent[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [11] 刘环宇. 某航空产品制造车间排产智能管理系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [12] LIU Huanyu. Research on intelligent management system of production scheduling in an aviation product manufacturing workshop[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [13] 甘翔宇, 周新志, 杨秀清, 等. 基于区域失衡子空间的领先 NSGAI 算法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2022, 59(2): 85-93.
- [14] GAN Xiangyu, ZHOU Xinzh, YANG Xiuqing, et al. A leading NSGAI algorithm based on regional unbalanced subspace[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2022, 59(2): 85-93.
- [15] 董明佶, 林宝军, 刘迎春, 等. 基于多目标模拟退火算法的导航卫星激光星间链路拓扑动态优化[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0706004.
- [16] DONG Mingji, LIN Baojun, LIU Yingchun, et al. Topology dynamic optimization for inter-satellite laser links of navigation satellite based on multi-objective simulated annealing method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0706004.
- [17] 李章萍, 贺亚蒙. 基于 GA-SA 组合算法的山区复杂环境无人机起降点选址[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(2): 850-857.
- [18] LI Zhangping, HE Yameng. Site selection of unmanned aerial vehicle take-off and landing points in mountainous complex environment based on GA-SA combination algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(2): 850-857.
- [19] 李艳波, 李若尘, 史博, 等. 基于改进模拟退火遗传算法的高速公路服务区自治能源系统高效优化[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(1): 197-207, 216.
- [20] LI Yanbo, LI Ruochen, SHI Bo, et al. Optimization of high energy efficiency for self-consistent energy system in highway service area via simulated annealing algorithm-genetic algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(1): 197-207, 216.
- [21] 唐颖达. 液压缸手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [22] TANG Yingda. Handbook of hydraulic cylinder[M]. Beijing: China Machine Press, 2021.
- [23] 唐颖达. 液压缸设计与制造[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [24] TANG Yingda. Design and manufacture of hydraulic cylinder[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [25] 卢义桢, 李西兴, 朱传军, 等. 基于自适应遗传模拟退火算法的多目标车间布局优化[J]. 制造技术与机床, 2022(7): 173-179.
- [26] LU Yizhen, LI Xixing, ZHU Chuanjun, et al. Multi-objective workshop layout optimization based on adaptive genetic simulated annealing algorithm[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022(7): 173-179.
- [27] 李金忠, 夏洁武, 曾小荟, 等. 多目标模拟退火算法及其应用研究进展[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(8): 77-88.
- [28] LI Jinzhong, XIA Jiewu, ZENG Xiaohui, et al. Survey of multi-objective simulated annealing algorithm and its applications[J]. Computer Engineering & Science, 2013, 35(8): 77-88.
- [29] SUPPAPITNARM A, SEFFEN K A, PARKS G T, et al. A simulated annealing algorithm for multiobjective optimization[J]. Engineering Optimization, 2000, 33(1): 59-85.
- [30] 唐红涛, 杨基源, 张雁翔, 等. 考虑次品处理的液压缸制造车间动态调度研究[J]. 数字制造科学, 2023, 21(4): 309-314.
- [31] TANG Hongtao, YANG Jiyuan, ZHANG Yanxiang, et al. Research on dynamic scheduling of flexible job shop considering defect handling[J]. Digital Manufacture Science, 2023, 21(4): 309-314.
- [32] 张杰. 电站阀门柔性作业车间动态调度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
- [33] ZHANG Jie. Research on dynamic scheduling of power station valve flexible job shop[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2023.
- [34] 李狄威. 电站阀门柔性作业车间调度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
- [35] LI Diwei. Study on flexible job shop scheduling of valve in power station[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology,

2023.

[19] 李思远. 汽车底盘工件生产车间调度方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.

LI Siyuan. Research on production scheduling method of automobile chassis parts[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.

[20] 张伟, 胡晓平, 唐红涛, 等. 高性

能液压缸数智化设计与制造平台的构建与应用 [J]. 工程设计学报, 2024, 31(1): 31–41.

ZHANG Wei, HU Xiaoping, TANG Hongtao, et al. Construction and application on high-performance hydraulic cylinder digital intelligent design and manufacturing platform[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2024, 31(1): 31–41.

[21] 唐红涛, 张伟, 张雁翔. 面向高端

液压缸离散制造的 PLM/ERP/MES 全生命周期管控平台构建与应用研究 [J]. 机床与液压, 2023, 51(1): 63–70.

TANG Hongtao, ZHANG Wei, ZHANG Yanxiang. Research on the PLM/ERP/MES information integration platform construction and application for high-end hydraulic cylinder discrete manufacturing[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(1): 63–70.

Production Scheduling System and Application of Large Aviation Die Forging Hydraulic Cylinder

TANG Hongtao¹, HONG Runer¹, ZHANG Wei^{1,2}, ZHANG Yanxiang², ZHANG Xiaoyong², LIU Tao²

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430079, China;

2. Shaoguan Hydraulics Co., Ltd., Shaoguan 512029, China)

[ABSTRACT] The large aviation die forging hydraulic cylinder is the core component of the aviation die forging hydraulic press, providing a power source for the production of important die forging components in aircraft and aero-engines. Based on the constraints of quality inspection on the processing and the coupling relationship between two processes in the high-quality production process of such hydraulic cylinders, a production scheduling model for large aviation die forging hydraulic cylinders considering quality inspection was proposed to optimize the scheduling of both processing and quality inspection processes simultaneously. A dual-process hybrid double-layer coding method was designed, along with a decoding method based on the parity judgment of the total process numbers to determine the type of process. A scheduling system with functions such as parameter adjustment, task allocation, progress monitoring, and data feedback was developed based on the theories of NSGA-II and MOSA algorithm, and the effectiveness of the model and algorithm was verified through examples. Finally, the scheduling system was applied to a hydraulic production enterprise, ensuring that the quality of large aviation die forging hydraulic cylinders was excellent while significantly improving production efficiency.

Keywords: Aviation die forging hydraulic cylinder; Non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II);

Multi-objective simulated annealing (MOSA); Quality control; Scheduling system

(责编 逸飞)