DOI: 10.3901/JME.2019.10.217

基于产品制造过程内含能分级的冲压车间 节能调度研究*

熊 玮^{1,2} 黄海鸿^{1,2} 朱利斌^{1,2} 刘志峰^{1,2}

(1. 合肥工业大学机械工业绿色设计与制造重点实验室 合肥 230009;

2. 合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009)

摘要: 冲压制造离散性强、工艺复杂、能量损耗较大,为实现冲压制造过程的节能和高效运行,在保证最大完工时间受影响较小的前提下降低能耗,以冲压车间为对象进行了节能调度研究。建立面向冲压车间的多目标节能调度模型,采用多目标优化算法进行求解,得到 Pareto 解集。提出基于产品制造过程内含能分级的方案评价与选择方法,计算出不同调度方案下各产品的制造过程内含能并进行分级处理,选择出产品制造过程内含能较小的调度方案作为最优执行方案,提高了节能调度的可行性。最后,应用某冲压车间生产实例验证了节能调度模型和基于产品制造过程内含能分级的方案评价与选择方法的可靠性,与原始调度方案相比,车间总能耗与最大完工时间均实现了降低。

关键词: 冲压车间; 节能调度; 多目标优化; 制造过程内含能; 分级优选

中图分类号: TH186

Energy-saving Scheduling in Stamping Workshop Based on Ranks of Product Embodied Energy during Manufacturing

XIONG Wei^{1,2} HUANG Haihong^{1,2} ZHU Libin^{1,2} LIU Zhifeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Green Design and Manufacturing of Mechanical Industry,

Hefei University of Technology, Hefei 230009;

2. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: Stamping production composed by discrete flow and complicated processes consumes a great amount of energy. In order to realize energy-saving and efficient operation during stamping manufacturing, and reduce energy consumption while ensuring that the maximum completion time is less affected, an energy-saving scheduling for a stamping workshop has been conducted. The energy-saving scheduling model for the workshop is established and has been solved with a multi-objective optimization algorithm, and the Pareto solution set is obtained. Moreover, a method for evaluation and solution selection based on ranks of product embodied energy during manufacturing has been proposed. The embodied energy of each product during manufacturing under different schedules is calculated and ranked so that a schedule with smaller embodied energy of products is selected. As a result, the feasibility of energy-saving scheduling is enhanced. A case study of a stamping workshop is given to verify the reliability of the energy-saving scheduling model as well as the proposed method for solution evaluation and selection. The results show that the total energy consumption and the makespan in the workshop are both reduced compared with the original schedule.

Key words: stamping workshop; energy-saving scheduling; multi-objective optimization; embodied energy during manufacturing; optimal selection based on ranks

0 前言

节能减排是当今制造业面临的普遍问题,实施

低碳制造发展战略在各国已达成共识。冲压成形是金属加工行业的重要组成部分,是机械制造业的基础行业;我国制造业所用的钢材有 60%~70% 是板材,其中大部分被用于冲压加工^[1]。冲压产品以其强度高、重量轻等优点被广泛用于家用电器、汽车、航空航天等工业领域^[2]。然而,冲压加工生产线长、工序复杂;或者由于装备选型与使用不合

* 优秀青年科学基金(51722502)和国家自然科学基金国际(地区)合作与交流(51561125002)资助项目。20180604 收到初稿,20190109 收到修改稿

理,造成了冲压加工的能量浪费^[3],能耗相对较大。面向冲压成形加工开展低碳节能的研究具有重要的现实意义。

车间调度作为车间生产的重要组成部分,是影响制造业生产效率、质量和成本的关键因素,并对生产过程的能源消耗和环境排放等均产生影响^[4]。现代经济中日益强化的竞争趋势和不同客户定制变化的需求促使企业重新评估生产制造战略,合理的车间生产调度成为制造领域的重要研究课题^[5]。长久以来,车间调度问题的研究目标主要为减小完工时间、减小库存、提高设备利用率、降低生产成本等。近年来,低碳节能的生产方式已逐渐成为当前各国所认可的生产方式,是可持续发展的必然要求。考虑能耗的车间调度也逐渐被各国学者研究和应用。为有效降低车间能耗,一般以车间总电量或总能耗为调度目标,通过优化工艺和机器的配置以及操作速度等参数来实现^[6-8]。同时,机器的闲置能耗和辅助材料的消耗不可忽略,应将其列入调度计算模型中^[9-10]。近期,对于考虑实时电价的车间层节能调度逐渐兴起^[11],此方法更加灵活可靠且更符合实际生产情况。

考虑能耗的车间调度可有效提高作业车间的能效,但绝大多数是针对机加工车间进行分析,对于冲压车间节能调度研究较少。目前,针对冲压车间调度问题的研究主要侧重于传统调度目标,如最大完工时间最小^[12-15]、生产成本最小^[16-17]等。

因此,本文旨在以冲压车间为对象,进行节能调度研究,通过合理安排加工设备与产品工序的配置,在保证最大完工时间受影响较小的前提下,降低冲压车间的总能耗,实现冲压制造过程的节能和高效运行。同时,针对目前车间级多目标优化非劣解难以进一步抉择的问题,面向产品级,从制造过程内含能角度优选调度方案。

1 冲压工艺与制造过程内含能

1.1 冲压工艺与车间

冲压车间的工艺复杂,主要加工工序有拉延、切边、翻边等,如图1所示。其离散性较强,每一道工序往往都可由多台压力机完成,增大了排产难度。同时,考虑到冲压生产的经济性,冲压车间一

图1 冲压加工的主要加工工序

般采用分批轮番生产方式,既能节约成本,又不会扰乱整个生产系统的生产节拍。

冲压加工时,完成单个产品的一道工序一般需10~20 s;改变工序时通常需要更换模具,换模时间为20~50 min。二者时间差异较大,所以换模时间对生产加工的影响绝不可忽略。此外,同一产品在不同压力机上进行加工时,需要进行运输,运输时间的大小与运输距离成正比,跨越的压力机越多,运输时间越长。由于加工一道工序的时间远小于运输时间,因此运输时间同样不可忽略^[18]。

综上所述,冲压加工的生产线长、工序复杂、装备选型与使用往往不合理,造成了制造过程的能量浪费,能耗相对较大。面向冲压成形过程开展节能车间调度研究是解决该问题的有效手段。

1.2 制造过程内含能

内含能是一种旨在找出产品全生命周期所必需的能量总和的计算方法。研究内含能的根本目的是比较所涉及的产品生产所消耗的能量,对产品的能耗特性进行评价,并进行溯源。目前的研究主要集中在能源环境、汽车工业等行业的内含能测算方法^[19]、相关数据处理^[20],在加工制造业的研究尚处于起步阶段,多用于进行产品能效评价^[21-23]。

产品制造过程内含能是指产品本身的加工制造过程中所消耗的全部能量,表现为产品在制造过程中的直接能耗和间接能耗,如图2所示。其中,直接能耗可从装备级和车间级考虑,装备级能耗包括装备的各个状态如开关机、加工、空载能耗等;车间级能耗包括运输该产品所消耗的能量;间接能耗包括照明、通风、供暖等能耗。计算方法如式(1)所示

$$E_{x,e} = E_{x,S} + E_{x,P} + E_{x,N} + E_{x,T} + E_{x,I} \quad (1)$$

式中, $E_{x,e}$ 为产品 x 的制造过程内含能; $E_{x,S}$ 、 $E_{x,P}$ 、 $E_{x,N}$ 、 $E_{x,T}$ 和 $E_{x,I}$ 分别为生产产品 x 所产生的开机能耗、加工能耗、空载能耗、运输能耗和辅助能耗。

图2 产品制造过程内含能的范围

产品制造过程内含能不仅可以实现产品制造过程的能量分解、能耗分析与评价,更为重要的应用之处在于能够实现面向工艺-车间-产品的多层级能量分析与能效评价^[22]。例如,通过确定非生产性活动如机器开关机、空载及运输、相关辅助工艺的能耗占比,评估加工工艺的能效;通过揭示间接能耗,评价生产系统的能效;通过同时明确非生产性活动能耗和间接能耗,评价产品的能效。

2 冲压车间节能调度

2.1 问题描述

冲压车间节能调度的目标是找到合理的工序与压力机之间的分配方案,在满足生产约束的条件下,使车间总能耗与最大完工时间得到优化,具体可描述如下。

一个冲压车间包含 M 台机器,预计生产 X 个产品,每个产品包含 I_n 道工序,产品的工序顺序预先确定,每道工序可以在多台不同吨位的压力机上加工,工序的加工时间随压力机的性能不同而变化。

针对该节能调度问题做出以下假设。

- (1) 每个产品的加工工序及在每道工序花费的加工时间、成本和加工能耗已知。
- (2) 每道工序有多台设备可供选择并且已知。
- (3) 不同产品工序之间没有先后约束,同一批次产品工序之间有先后约束。
- (4) 开始加工之前,产品的批量、型号和工序数都已知且都可以被加工。
- (5) 某一产品的某个工序不能同时多台产品上加工。
- (6) 同一产品在同一时间只能被加工一道工序。

2.2 模型建立

2.2.1 冲压车间能耗模型

建立节能调度模型之前,需进行冲压车间的能耗分析,主要包括压力机的开机能耗(E_S)、空载能耗(E_N)、加工能耗(E_P),工序间运输能耗(E_T)和辅助设备的能耗(E_I)。由于不同车间的生产线自动化程度不同,上下料的方式有机械手作业、人工作业等,因此本文暂不考虑上下料消耗的能量。

(1) 当加工不同产品或者同一产品的不同工序时,需要更换模具,此时压力机需关机、开机一次,消耗的能量为

$$E_S = \sum_{x=1}^X \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{m=1}^M \alpha_{xin_xm} E_m^S = \sum_{x=1}^X \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{m=1}^M \int \alpha_{xin_xm} P_m^S(t) dt \quad (2)$$

式中, m 为压力机的序号; n_x 为产品批量的序号; N_x 为产品批量数; i 为产品工序的序号; I_n 为第 n 批产品的工序数量; E_m^S 为压力机 m 的开机能耗; α_{xin_xm}

为决策变量,当第 n_x 批产品的工序 i 在压力机 m 上加工时为 1, 否则为 0; P_m^S 为压力机 m 的开机功率。

(2) 压力机对产品进行加工时,一般由 5 个动作产生能耗,分别为快下、慢下、压制、快回、慢回,可表示为

$$E_P = \sum_{x=1}^X \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{m=1}^M Q_{xn} \alpha_{xin_xm} (E_{xin_xm}^{FF} + E_{xin_xm}^{SF} + E_{xin_xm}^{PR} + E_{xin_xm}^{FR} + E_{xin_xm}^{SR}) = \sum_{x=1}^X \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{m=1}^M Q_{xn} \int \alpha_{xin_xm} (P_{xin_xm}^{FF} + P_{xin_xm}^{SF} + P_{xin_xm}^{PR} + P_{xin_xm}^{FR} + P_{xin_xm}^{SR})(t) dt \quad (3)$$

式中, Q_{xn} 为第 n_x 批产品 x 的数量, α_{xin_xm} 为决策变量,当第 n_x 批产品 x 的工序 i 在压力机 m 上加工时为 1, 否则为 0; $E_{xin_xm}^{FF}$ 、 $E_{xin_xm}^{SF}$ 、 $E_{xin_xm}^{PR}$ 、 $E_{xin_xm}^{FR}$ 、 $E_{xin_xm}^{SR}$ 和 $P_{xin_xm}^{FF}$ 、 $P_{xin_xm}^{SF}$ 、 $P_{xin_xm}^{PR}$ 、 $P_{xin_xm}^{FR}$ 、 $P_{xin_xm}^{SR}$ 分别为第 n_x 批产品 x 的工序 i 在压力机 m 上加工时,快下、慢下、压制、快回、慢回动作的能耗和功率。

(3) 上下料过程中,压力机处于空载状态,空载时功率一般为定值,因此其空载能耗为

$$E_N = \sum_{x=1}^X \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{m=1}^M Q_{xn} \alpha_{xin_xm} P_{N,m} t_{N,xin_xm} \quad (4)$$

式中, $P_{N,m}$ 和 t_{N,xin_xm} 分别为压力机 m 的空载功率和空载时间。

(4) 冲压车间的工序间一般用叉车进行产品的运输,且为成批运输,运输能耗只与搬运时间有关,因此运输能耗为

$$E_T = \sum_{x=1}^X \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{m \geq 2}^M \alpha_{xin_xm} P_T t_{T,xin_xm} \quad (5)$$

式中, P_T 为运输车搬运产品时的功率; t_{T,xin_xm} 为第 n_x 批产品 x 由上一压力机搬运到压力机 m 的运输时间。

(5) 冲压车间进行生产作业时,需要照明、通风等辅助生产设备来维持车间的正常运转,由此会产生辅助能耗。该部分能耗与加工产品的完工时间成正比,当最后一件产品加工完毕后这些辅助生产设备才会被关闭,因此辅助能耗为

$$E_I = \sum_{x=1}^X P_{I,x} C_x = \sum_{x=1}^X \sum_{i=1}^{I_n} P_{I,xi} C_{xi} \quad (6)$$

式中, $P_{I,x}$ 为加工产品 x 时对应的照明、通风等辅助设备的功率; C_x 为产品 x 的完工时间; $P_{I,xi}$ 为加工产品 x 的工序 i 时对应的辅助设备的功率; C_{xi} 为工序 i 的完工时间。

综上所述,冲压车间的总能耗 E 为

$$E = E_S + E_P + E_N + E_T + E_I \quad (7)$$

2.2.2 冲压车间节能调度模型

一般有效降低车间能耗的同时必须保证产品

的高效加工。因此, 本文研究的冲压车间节能调度以最小化车间总能耗 E 和最小化车间最大完工时间 T 为目标, 建立面向冲压车间的多目标节能调度模型。

$$\begin{cases} \text{Obj. } f_1 = \min E \\ f_2 = \min T = \min (\max \{C_1, C_2, \dots, C_x\}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{s.t. } S_{xi} + t_{xi} \leq C_{xi} \quad (9)$$

$$C_{xi} \leq S_{x(i+1)} \quad (10)$$

$$C_{xi} \leq T \quad (11)$$

$$\gamma_{xrm} \in \{0, 1\} \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^M \alpha_{xim} = 1 \quad (13)$$

式中, 式(8)为优化目标函数, T 为所有产品的最大完工时间, 即车间的最大完工时间; 式(9)和式(10)表示产品每道工序完工时间的先后顺序约束, S_{xi} 和 t_{xi} 分别为产品 x 的工序 i 的开始加工时间和加工时间; 式(11)表示每个产品的完工时间不大于车间最大完工时间; 式(12)中 γ_{xrm} 为决策变量, 若压力机 m 先加工产品 x 之后即加工产品 r , 则取 1, 否则取 0; 式(13)表示一台压力机在同一时刻只能加工一个产品的一道工序。

2.3 优化求解

针对多目标优化问题, 为使所求解集分布更均匀, 提高获得全局最优解集的概率, 同时降低计算的复杂度, 采用快速非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)进行求解, 得到 Pareto 解集并进行分析。

NSGA-II 是目前最可靠的多目标遗传算法之一, 利用快速非支配排序方法并引入精英策略, 同时提出了个体拥挤距离的概念来保持种群的多样性, 具有运行速度快, 解集收敛性好等优点, 成为了求解多目标优化问题的标准算法^[24-26]。

如图 3 所示, NSGA-II 算法的优化流程主要包括以下步骤。

- (1) 编码及初始种群的生成。
- (2) 快速非支配排序。
- (3) 对种群执行遗传操作。
- (4) 将父代种群和子代种群合并。
- (5) 快速非支配排序和拥挤距离计算。
- (6) 精英策略生成新的种群。
- (7) 是否符合终止条件, 如果否, 进化代数+1并转入步骤(4)。
- (8) 结束。

图 3 NSGA-II 优化流程图

在离散型车间的生产调度中, 不仅要确定工序的加工顺序, 还需为每道工序选择一台合适的机器, 因此仅采用基于工序的编码方法不能得到问题的解。本文采用一种双层编码方法, 第一层为基于工序的编码, 用于确定各工序的加工顺序; 第二层为基于机器的编码, 用于选择各工序的加工机器。基于这种双层编码方法, 可以得到冲压车间节能调度问题的一个可行解。

图 4 显示了一个基于双层编码的染色体示例, 其中基于工序编码的基因串可确定工序的加工顺序, 基于机器编码的基因串为每个产品所有工序的加工机器。因此, 示例染色体表示的工序与机器的序列为 $(O_{11}, m_2), (O_{31}, m_3), (O_{41}, m_4), (O_{21}, m_2), (O_{42}, m_1), (O_{12}, m_4), (O_{22}, m_3), (O_{32}, m_4), (O_{13}, m_1), (O_{43},$

图 4 基于工序和机器的双层编码

$m_4)$, (O_{14}, m_3) , (O_{23}, m_5) , 其中 O_{xi} 为第 x 个产品的第 i 道工序。

经过后续编程运算, 得到冲压车间节能调度问题的 Pareto 解集, 并采用一种方案评价与选择方法, 从解集中选取最优执行方案。

2.4 调度方案优选

多目标优化问题的 Pareto 解集中包含了若干可行生产方案, 它们处于同等的非劣级别, 通常决策者会根据以往的生产经验或者企业生产倾向(经济性原则、环保性原则等)来选择最终的执行方案^[22]。本文提出一种基于产品制造过程内含能分级的方案评价与选择方法, 从产品角度直观地表现出生产能耗, 更便于选择执行方案, 且可清晰地进行产品生产能耗水平的对比。

为实现基于产品制造过程内含能的分级评价, 根据式(1)计算出不同调度方案下各产品的制造过程内含能 $E_{x,e}$ 后, 将不同调度方案下各产品的制造过程内含能以等级形式表达。具体操作如下所述。

(1) Pareto 解集中, $E_{x,e}^{\min}$ 和 $E_{x,e}^{\max}$ 分别指代产品 x 的最小和最大制造过程内含能, 则调度方案 k 下的产品 x 的制造过程内含能 $E_{x,e}^k$ 可根据标准化处理值 $S_{x,e}^k$ 进行分级, 其中

$$S_{x,e}^k = \frac{E_{x,e}^k - E_{x,e}^{\min}}{E_{x,e}^{\max} - E_{x,e}^{\min}} \quad (14)$$

(2) 根据 $S_{x,e}^k$ 值的范围, 可确定各产品的制造过程内含能等级 $R_{x,e}^k$, 具体级别划分如表 1 所示。

表 1 基于产品制造过程内含能的级别划分

标准化处理值 $S_{x,e}^k$	内含能等级 $R_{x,e}^k$	评价
$0 \leq S_{x,k} < 0.25$	A	优
$0.25 \leq S_{x,k} < 0.5$	B	良
$0.5 \leq S_{x,k} < 0.75$	C	一般
$0.75 \leq S_{x,k} \leq 1$	D	差

为使决策者选择出更具竞争力的调度方案, 应尽量选择 A、B 较多的调度方案而尽可能避免 C、D 较多的调度方案。

3 案例研究

为解决实际生产中面临的能量消耗大、加工设备与产品工序的配置不合理等问题, 并验证所建立的冲压车间节能调度模型和所提出的基于产品制造过程内含能分级的方案评价与选择方法的可靠性, 本文以某工业车辆冲压车间中某一主要生产系统为例进行分析。

3.1 车间生产信息

该生产系统包括 5 台压力机, 其中吨位为 800 t 的压力机 2 台, 编号为 m_1 和 m_2 ; 吨位为 500 t 的压力机 2 台, 编号为 m_3 和 m_4 ; 吨位为 400 t 的压力机 1 台, 编号为 m_5 。相邻压力机间隔距离相等, 结合生产实际, 将相邻两台压力机之间进行产品的成批运输时间取值为 300 s。图 5 为生产系统的排布示意图。

图 5 生产系统排布示意图

1. 物料箱 2. 操作工人 3. 压力机 4. 照明、通风等设备 5. 运输电叉车

该生产系统主要生产 4 种产品, 分别为内燃机罩体、围板、筋板和水箱盖板, 经过车间调研和数据实测, 得到各产品的加工工序、各工序的可选设备集以及各工序对应的加工时间和能耗, 如表 2 所示。

表 2 产品各工序的加工信息

产品	总量 Z_x	工序 O_{xi}	工序名称	可选设备
内燃机罩体	200	O_{11}	拉延	m_1/m_2
		O_{12}	切边	m_1/m_2
		O_{13}	翻边	m_3/m_4
		O_{14}	翻边	m_1/m_2
围板	400			m_3/m_4
		O_{21}	拉延	m_1/m_2
		O_{22}	切边	m_1/m_2
		O_{23}	翻边	m_3/m_4
筋板	450			m_5
		O_{31}	拉延	m_1/m_2
		O_{32}	冲孔	m_3/m_4
				m_1/m_2
水箱盖板	500	O_{41}	落料	m_3/m_4
		O_{42}	拉延	m_1/m_2
		O_{43}	冲孔	m_1/m_2
				m_3/m_4
				m_5

进行数据实测时, 结合式(2)~(7), 压力机的加工功率、开机功率和空载功率由功率仪测量并进行相应的处理得到, 叉车的运输功率和辅助生产设备的功率由工作手册查询得到。

3.2 求解与结果分析

3.2.1 调度模型构建

为进行节能调度优化, 首先建立该生产系统的多目标节能调度模型, 如下所示

$$\begin{aligned}
 f_1 = \min E = & \min (E_S + E_P + E_N + E_T + E_I) = \\
 & \min \left(\sum_{x=1}^4 \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{m=1}^5 \int \alpha_{xin_xm} P_m(t) dt + \right. \\
 & \left. \sum_{x=1}^4 \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{m=1}^5 Q_{xm} \int \alpha_{xin_xm} \left(\begin{aligned} & P_{xin_xm}^{FF} + P_{xin_xm}^{SF} + P_{xin_xm}^{PR} \\ & + P_{xin_xm}^{FR} + P_{xin_xm}^{SR} \end{aligned} \right) (t) dt + \right. \\
 & \left. \sum_{x=1}^4 \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{m=1}^5 Q_{xm} P_{N,m} t_{N,xin_xm} + \sum_{x=1}^4 \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{m \geq 2}^5 \alpha_{xin_xm} P_T t_{T,xin_xm} + \right. \\
 & \left. \sum_{x=1}^4 P_{1,x} C_x = \sum_{x=1}^4 \sum_{i=1}^{I_x} P_{1,xi} C_{xi} \right) \\
 & x, i = 1, 12, 13, 14, 21, 22, 23, 31, 32, 41, 42, 43 \\
 f_2 = \min T = \min (\max \{C_1, C_2, C_3, C_4\}) \\
 \text{s.t. } S_{xi} + t_{xi} \leq C_{xi} \\
 C_{xi} \leq S_{x(i+1)}
 \end{aligned} \quad (15)$$

$$C_{xi} \leq T \quad (18)$$

$$\gamma_{xrm} \in \{0, 1\} \quad (19)$$

$$\sum_{m=1}^5 \alpha_{xim} = 1 \quad (20)$$

3.2.2 产品制造过程内含能计算

为优选调度方案, 需分别计算四件产品的制造过程内含能, 如下所示

$$E_{1,e} = E_{1,S} + E_{1,P} + E_{1,N} + E_{1,T} + E_{1,I} \quad (21)$$

$$E_{2,e} = E_{2,S} + E_{2,P} + E_{2,N} + E_{2,T} + E_{2,I} \quad (22)$$

$$E_{3,e} = E_{3,S} + E_{3,P} + E_{3,N} + E_{3,T} + E_{3,I} \quad (23)$$

$$E_{4,e} = E_{4,S} + E_{4,P} + E_{4,N} + E_{4,T} + E_{4,I} \quad (24)$$

3.2.3 优化结果

利用 NSGA-II 算法进行优化求解时, 设置种群数为 40, 遗传代数为 100, 交叉率为 1, 突变率为 10%。使用 Matlab 进行编程运算, 得到 Pareto 解集, 并统计出各产品的制造过程内含能等级, 如表 3 所示。

表 3 Pareto 解集与各产品制造过程内含能等级

Pareto 解集序号	总能耗 $f_1/\times 10^6$ kJ	最大完工时间 f_2/h	调度方案	产品制造过程内含能等级 R_{xi}^e			
				内燃机罩体	围板	筋板	水箱盖板
1	4.723	8.401	224243311141 242422424141	B	C	C	B
2	4.718	8.407	114141334222 122211234133	B	D	C	B
3	4.699	8.414	443141231212 414222112423	C	C	D	B
4	4.697	8.425	342412431121 411124532221	C	D	C	B
5	4.695	8.439	342412431121 411124432242	B	D	B	C
6	4.685	8.446	413341114222 424224222142	D	D	C	D
7	4.679	8.462	221244334111 141522442213	B	C	C	C
8	4.660	8.473	123444322111 213325445422	C	B	D	C
9	4.650	8.483	231424231114 142122323112	A	D	B	C
10	4.634	8.484	243322441111 234333112312	D	D	C	A
11	4.620	8.489	342412431121 311123412221	A	D	D	B
12	4.605	8.491	343211441221 413122152421	B	D	A	D
13	4.598	8.492	432421431121 141212543214	B	D	C	B
14	4.586	8.501	212211433144 124422224124	C	D	A	C
15	4.573	8.503	144313241221 132144151353	B	B	C	D
16	4.568	8.504	312123214144 422241113112	B	C	C	D
17	4.560	8.505	144313241221 132443252254	C	C	C	D
18	4.557	8.509	441213231241 121233121341	B	C	C	C
19	4.547	8.512	144313241221 231343252454	B	C	B	C
20	4.511	8.522	243224431111 222112341313	D	D	C	D
21	4.489	8.537	441242111213 321243121143	B	D	C	B
22	4.465	8.543	331221121444 221122231321	D	C	C	B
23	4.457	8.557	144313241221 241334252233	C	B	D	C
24	4.454	8.560	433211442121 314213224134	D	A	B	D
25	4.450	8.571	144313241221 132444151351	C	D	A	D
26	4.440	8.581	211112423344 121142214122	B	D	D	C
27	4.433	8.615	342412431121 212124414251	D	A	D	D
28	4.428	8.622	144313241221 132443152144	A	B	D	D

对于多目标优化问题, 很难保证所有目标同时最优, 只能从非劣解集中选择出最适合的方案。如果经济性原则为首要考虑目标, 则选择执行最大完工时间最小的方案 1; 若优先考虑可持续原则, 则选择执行总能耗最小的方案 28。

为提高企业竞争力, 满足客户的环境意识需求, 可以考虑以各产品制造过程内含能为分级指标的方案选择方法。分析可知, 方案 1 和方案 19 等级 D 最少, 由于本研究更倾向于节能, 而方案 19 的总能耗较小, 因此选择方案 19 为最终执行的调度方案。图 6 为方案 19 的甘特图。

图6 优选方案的生产甘特图

图6中, 数字x0i代表第x个产品的第i道工序, 例如压力机 m_1 上的“402”代表第4个产品的第2道工序在压力机1上加工。运输过程在换模过程进行的同时完成。所有产品都可在压力机上加工且满足所有工序、时间的约束条件, 因此方案19是可行的调度方案。

该冲压生产系统原始的调度方案为(134241231412|234214341435), 其总能耗为 4.585×10^6 kJ, 最大完工时间为8.620 h。与原始调度方案相比, 车间总能耗降低了0.81%, 最大完工时间减小了1.28%。因此该优化方案是可靠的。

3.3 讨论

如前文所述, 目前的研究在分析车间能耗时仅考虑了生产所有产品消耗的能量, 而并未计算每种产品在制造过程中的能耗, 即产品制造过程内含能。因此, 本文提出了产品制造过程内含能的计算方法, 并基于此方法优选调度方案。相比于仅考虑每个调度方案下的总能耗, 此方法可以得到更准确的结果。

此外, 为分析 Pareto 解集中车间总能耗和最大完工时间的变化趋势, 对这两个目标进行了量纲一化处理, 结果如图7所示。可以看出, 车间总能耗与最大完工时间都随着解的增多而明显变化, 这表明车间总能耗与最大完工时间对调度方案都有较强的敏感性。因此, 冲压车间的生产调度必须在车间

总能耗与最大完工时间之间实现权衡, 以保证制造过程的节能和高效。

图7 Pareto解集的量纲一化处理值

4 结论

为实现冲压制造过程的节能和高效运行, 在保证最大完工时间受影响较小的前提下, 降低冲压车间的总能耗, 针对冲压车间进行了节能调度研究, 并提出一种基于产品制造过程内含能分级的方案评价与选择方法, 优选内含能较小的调度方案, 提高节能调度的可行性。

建立了面向冲压车间的多目标节能调度模型, 基于工序与机器的双层编码方法, 采用NSGA-II算法进行求解, 得到 Pareto 解集。基于产品制造过程内含能分级的方案评价与选择方法, 将不同调度方案下各产品的制造过程内含能以等级形式表达, 选择出最终执行的节能调度方案。最后, 应用某冲压车间生产实例验证了节能调度模型和基于产品制造过程内含能分级的方案评价与选择方法的可靠性, 与原始调度方案相比, 同时减小了车间总能耗与最大完工时间。提出的基于产品制造过程内含能分级的方案评价与选择方法可以推广至多个行业的方案决策中。

未来的研究将进一步结合生产实际, 完善和改进冲压车间节能调度模型, 并尝试采用其他多目标优化算法进行求解探索; 细化方案评价与选择方法, 提高调度方案的可行性。同时, 从节能调度问题出发, 研究生产制造过程的节能管理; 并结合生产系统仿真方法, 识别制造系统能耗, 明确主要耗能环节, 为构建面向装备-工艺-车间的能源管理系统提供基础支撑。

参 考 文 献

- [1] 鄂大辛. 成形工艺与模具设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.

- E Daxin. Forming technology & die design[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [2] Grand View Research, Inc. Metal stamping market analysis by process (blanking, embossing, bending, coining, flanging), by application (automotive, industrial machinery, consumer electronics), and segment forecasts, 2018-2025[EB/OL]. [2018-05-31]. [http : //www.grandviewresearch.com/industry-analysis/metal-stamping-market](http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/metal-stamping-market).
- [3] GAO Mengdi, HUANG Haihong, LI Xinyu, et al. Carbon emission analysis and reduction for stamping process chain[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91: 667-678.
- [4] 何彦, 刘飞, 曹华军, 等. 面向绿色制造的机械加工系统任务优化调度模型[J]. 机械工程学报, 2007, 43(4): 27-33. HE Yan, LIU Fei, CAO Huajun, et al. Job scheduling model of machining system for green manufacturing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(4): 27-33.
- [5] 郑峰, 孙树栋. 混合型企业生产调度问题综述[J]. 制造业自动化, 2004, 26(2): 1-4. ZHENG Feng, SUN Shudong. Survey of schedule problem of hybrid process[J]. Manufacturing Automation, 2004, 26(2): 1-4.
- [6] ZHANG Liping, LI Xinyu, GAO Liang, et al. Dynamic rescheduling in FMS that is simultaneously considering energy consumption and schedule efficiency[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 87(5-8): 1-13.
- [7] LIN Wenwen, YU Daoyuan, ZHANG Chaoyong, et al. Carbon emissions reducing mechanisms on integrated process parameter optimization and scheduling problem considering makespan and carbon emissions[J]. Advanced Materials Research, 2013, 869-870: 1015-1023.
- [8] 李聪波, 沈欢, 李玲玲, 等. 面向能耗的多工艺路线柔性作业车间分批优化调度模型[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 12-23. LI Congbo, SHEN Huan, LI Lingling, et al. A batch splitting flexible job shop scheduling model for energy saving under alternative process plans[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 12-23.
- [9] MASHAEI M, LENNARTSON B. Energy reduction in a pallet-constrained flow shop through on-off control of idle machines[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2013, 10(1): 45-56.
- [10] LIN Wenwen, YU Daoyuan, ZHANG Chaoyong, et al. A multi-objective teaching-learning-based optimization algorithm to scheduling in turning processes for minimizing makespan and carbon footprint[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 101: 337-347.
- [11] ZHANG H, ZHAO F, SUTHERLAND J W. Scheduling of a single flow shop for minimal energy cost under real-time electricity pricing[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017, 139(1): 014502.
- [12] 常剑峰, 钟约先, 韩赞东. 轿车车身冲压生产线虚拟制造系统的研究[J]. 塑性工程学报, 2004, 11(4): 61-66. CHANG Jianfeng, ZHONG Yuexian, HAN Zandong. A virtual manufacturing system for the press production line of car body[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004, 11(4): 61-66.
- [13] 常剑峰, 钟约先, 韩赞东. 虚拟环境下汽车冲压车间动态调度的研究[J]. 塑性工程学报, 2004, 11(6): 84-88. CHANG Jianfeng, ZHONG Yuexian, HAN Zandong. Research on scheduling of the automobile press shop in virtual environment[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004, 11(6): 84-88.
- [14] 张晓东, 严洪森. 多级车间生产计划和调度的集成优化[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 98-105. ZHANG Xiaodong, YAN Hongsen. Integrated optimization of production planning and scheduling for multi-stage workshop[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 98-105.
- [15] 李峥峰, 喻道远, 杨超英, 等. 基于启发规则的双向冲压生产线调度研究[J]. 华中科技大学学报, 2009, 37(6): 60-63. LI Zhengfeng, YU Daoyuan, YANG Chaoying, et al. Research on the scheduling of the bi-directional press line based on heuristic rules press line scheduling based on operation constraints parallel machine model[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2009, 37(6): 60-63.
- [16] 徐兵, 李建军. 基于混合蚁群遗传算法的冲压生产调度研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(13): 215-217. XU Bing, LI Jianjun. Research on press production schedule based on mixed ant colony genetic algorithm[J]. Computer Engineering, 2012, 38(13): 215-217.
- [17] ROYCHOWDHURY S, ALLEN T, ALLEN N. A genetic algorithm with an earliest due date encoding for scheduling automotive stamping operations[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 105: 201-209.
- [18] 史登松. 江淮汽车车身冲压生产调度研究与系统实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. SHI Dengsong. Research on JAC stamping plant scheduling problems and system implementation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [19] 李书华. 电动汽车全生命周期分析及环境效益评价[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

- LI Shuhua. Life cycle assessment and environmental benefits analysis of electric vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [20] 陈红敏. 中国出口贸易中隐含能变化的影响因素: 基于结构分解分析的研究[J]. 财贸研究, 2009, 20(3): 66-73.
- CHEN Hongmin. Influential factors analysis of embodied energy change in exports of china: based on structural decomposition analysis[J]. Finance and Trade Research, 2009, 20(3): 66-73.
- [21] 刘飞, 王秋莲. 机械制造系统能效评价的特点、研究现状及发展趋势[J]. 中国机械工程, 2013, 24(11): 1550-1556.
- LIU Fei, WANG Qiulian. Energy efficiency assessment of mechanical manufacturing system: characteristics, state-of-the-art and future trends[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(11): 1550-1556.
- [22] SEOW Y. A framework for modelling embodied product energy to support energy efficient manufacturing [D]. Loughborough: Loughborough University, 2011.
- [23] KARA S, IBBOTSON S. Embodied energy of manufacturing supply chains[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science & Technology, 2011, 4(3): 317-323.
- [24] 刘琼, 田有全, SUTHERLAND J, 等. 产品制造过程碳足迹核算及其优化问题[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2336-2343.
- LIU Qiong, TIAN Youquan, SUTHERLAND J, et al. Calculation and optimization of product carbon footprint in its manufacturing process[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2336-2343.
- [25] 刘琼, 梅侦. 面向低碳的工艺规划与车间调度集成优化[J]. 机械工程学报, 2017, 53(11): 164-174.
- LIU Qiong, MEI Zhen. Integrated optimization of process planning and shop scheduling for reducing manufacturing carbon emissions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(11): 164-174.
- [26] LIU Qiong, TIAN Youquan, WANG Chao, et al. Flexible job-shop scheduling for reduced manufacturing carbon footprint[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(6): 061006.
-
- 作者简介: 熊玮, 女, 1990 年出生, 博士研究生。研究方向为可持续制造、制造系统节能管理。
E-mail: xw19902004@163.com
- 黄海鸿(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为绿色制造、再制造与回收再资源化等。
E-mail: huanghaihong@hfut.edu.cn
- 朱利斌, 男, 1990 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为可持续制造、绿色制造、清洁加工技术、干切削技术。
E-mail: libinz@hfut.edu.cn
- 刘志峰, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机电产品绿色设计理论与方法、金属成形装备低碳制造技术等。
E-mail: zhfliuhfut@126.com