DOI: 10.3901/JME.2019.17.222

基于双砂轮架数控随动磨床的曲轴磨削 加工过程优化*

李 静^{1,2} 朱 凯^{1,2} 沈南燕^{1,2} 高华钰^{1,2} 吴 洋^{1,2}

(1. 上海大学机电工程与自动化学院 上海 200072;

2. 上海大学上海市智能制造及机器人重点实验室 上海 200072)

摘要: 对汽车发动机曲轴生产线中双砂轮架数控随动磨床这一核心装备的曲轴磨削加工过程进行优化,通过合理规划双砂轮磨削工序,制定双砂轮维护策略,有效缩短加工耗时,降低生产成本。为了充分发挥双砂轮架系统独立随动的优势,将加工过程看作多旅行商问题,建立以单件曲轴平均加工耗时和磨削成本为优化目标,以生产节拍、磨床结构等为约束的加工过程优化模型。该模型除了砂轮档位磨削时间、砂轮移动时间和辅助时间以外,还考虑到生产线长期加工过程中修整砂轮时间和砂轮报废后更换时间,更加符合实际生产过程。针对由于磨床结构约束双砂轮不能始终同时磨削的情况,建立了允许某一个砂轮退回安全位等待的加工过程优化模型作为补充,使工艺优化具有更好的实用性。选择不同加工耗时和成本的权重设置,对某种规格曲轴进行双砂轮加工过程优化,将得到的最优加工方案与企业原有方案进行对比,验证了所提出模型的正确性及算法的有效性。

关键词: 非圆磨削; 工序优化; 多旅行商问题; 曲轴生产线; 改进遗传算法

中图分类号: TG58

Optimization of Crankshaft Grinding Process Using CNC Tracing Grinding Machine with Double Grinding Carriages

LI Jing^{1,2} ZHU Kai^{1,2} SHEN Nanyan^{1,2} GAO Huayu^{1,2} WU Yang^{1,2}

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072;

2. Shanghai Key Lab of Intelligent Manufacturing and Robotics, Shanghai University, Shanghai 200072)

Abstract: Based on CNC tracing grinding machine with double grinding carriages, which is the core equipment in the automobile engine crankshaft production line, a research on the optimization of crankshaft grinding process is made to shorten machining used time and reduce production cost through reasonable planning double grinding wheels' work steps and formulating maintenance strategies. To fully develop the advantage of double grinding carriages servo systems, regard the grinding process as a multiple travelling salesman problem, build the grinding process optimization model at which make average machining used time and production cost of single crankshaft as optimization target, use cycle time of production line and structure of grinding machine as restrain. This model still considers the time of dressing grinding wheels and replacing the scrap grinding wheels during long period grinding process in production line except the grinding time, the movement time and the auxiliary time, more according with actual situation. An additional optimization model which allows one of the grinding carriages return to safety position waiting is built as supplement when there is no feasible solution satisfying the condition that double grinding carriages always work simultaneously due to the structural constraints of grinding machine, making the technology has more practicability. The grinding process of a specific crankshaft is optimized under different sets of weights to obtain the corresponding optimal solutions. The correctness of the proposed model and the validity of the algorithm are verified by comparing the solutions before and after optimizing.

Key words: non-circular grinding; process optimization; multiple traveling salesman problem; crankshaft production line; improved genetic algorithm

* 国家科技重大专项资助项目(2016ZX04004003)。20181226 收到初稿,
20190311 收到修改稿

0 前言

曲轴是汽车发动机中的关键零件之一,需求量大,精度要求高。近年来,快节奏、长期无故障连续运行、高工艺指数要求的汽车发动机曲轴生产线得到广泛开发与应用。磨削作为曲轴精加工成形工艺,其加工效率对生产线节拍有着十分重要的影响。非圆磨削技术通过控制曲轴旋转运动(C轴)和砂轮架往复运动(X轴),提高了磨床的加工适用范围和调整效率^[1-2],减少了曲轴生产线磨削加工工位。因此,汽车发动机曲轴生产线广泛采用数控随动曲轴磨床,尤其是英国 LANDIS 公司的 LT2e 曲轴/凸轮轴磨床、德国 JUNKER 公司的 JUCRANK 6S 系列磨床以及国内上海机床厂的 MK8220/SD 双砂轮架数控曲轴随动磨床等^[3]。这些磨床都配置了具备独立随动运动控制功能的双砂轮架系统,适应自动化生产线快节奏、低成本的生产需求。为了充分发挥生产线中双砂轮架数控随动磨床核心装备的作用,提高双砂轮同时加工的能力,进一步缩短加工耗时,降低生产成本,就必须对生产线大批量加工需求下的双砂轮磨削工序、砂轮修整间隔以及报废后更换方式进行优化。

双砂轮曲轴非圆磨削过程优化属于机械加工中单道工艺的过程优化问题。目前对这方面问题的研究主要集中在孔群加工路径优化^[4-6]、钣金折弯顺序优化^[7-9]等方面,研究中将这些加工过程归纳为一种旅行商问题,建立优化模型,利用智能算法进行求解。LIU 等^[6]把孔群加工过程表示为动态的有向图,于是有向图中连接所有节点的最短路径即为最优解。ZAHID 等^[9]基于分支限界法建立钣金折弯优化模型,评价工艺和材料对折弯精度的影响,将影响结果作为模型的输入进行优化。遗传算法、蚁群算法、贪心算法等^[10-13]为过程优化问题提供了解决思路。WANG 等^[12]基于两阶段蚁群算法优化总生产成本。LI 等^[13]针对双刀平行钻孔工序优化方案提出一种具有自适应交叉和突变的遗传操作的进化算法。但是少有文献讨论曲轴双砂轮加工过程优化问题,刘霁等^[14]研究了 5 种双砂轮磨削工序方案下对节拍的影响,但考虑的方案有限,不能代表整体最优结果,同时没有考虑加工成本的因素。

因此,本文对自动化生产线中的双砂轮曲轴非圆磨削过程进行研究,为得到加工耗时和成本综合最优的方案,基于多旅行商问题建立双砂轮加工模式下的非圆磨削过程优化模型;并在受磨床结构约束而无解情况下,提出允许某一个砂轮退回安全位

等待的加工模式下的优化方法;利用改进的遗传算法对模型求解,得到包含双砂轮磨削工序、双砂轮修整间隔以及更换方式的最优加工方案,以满足汽车发动机曲轴大批量生产快节奏、低成本的需求。

1 发动机生产线曲轴磨削加工优化

1.1 双砂轮数控随动磨床曲轴非圆磨削加工

传统汽车发动机曲轴生产线精加工通常采用数控外圆磨床磨削曲轴主轴颈以及 POST 端,采用偏心夹具式磨床磨削曲轴连杆颈,曲轴在多工位影响加工精度和效率。而双砂轮架数控随动磨床基于非圆磨削技术,可以在一次装夹中完成对曲轴主轴颈、连杆颈以及 POST 端的进行磨削加工,减少了加工工位。如图 1 所示,数控随动磨床的双砂轮架具有独立的随动运动能力,兼备头架变速驱动、砂轮在线修整、在线测量、自动上下料等辅助功能。其双砂轮配置由曲轴规格决定,当加工的曲轴主轴颈与连杆颈档宽相同时,配置两片等宽的砂轮。当加工的曲轴主轴颈与连杆颈档宽不一致时,配置两片砂轮分别与主轴颈、连杆颈的档位等宽,一片用于主轴颈磨削,另一片用于连杆颈及 POST 端磨削。

图1 双砂轮架数控随动磨床图

为了尽可能减少砂轮退刀等非磨削时间,如图 2 所示,加工过程中两砂轮分别由各自安全位(S_1 、 S_2)快速移动到进刀位,同时进刀直至接触到曲轴表

图2 曲轴双砂轮磨削示意图

面后, 切换成加工进给速度进行磨削; 且砂轮每加工完成一个曲轴档位, 只退回到砂轮进刀位进行档位间的移动, 而非砂轮等待位。待另一砂轮磨削完成退回砂轮进刀位后, 两砂轮再同时移动到各自下一磨削档位的进刀位, 重复上述过程完成曲轴所有档位的磨削。

双砂轮同时磨削的工作模式可以获得最高的磨削精度和效率, 但是由于磨床结构约束, 许多双砂轮同时磨削的工序难以实现, 尤其是加工主轴颈和连杆颈不等宽的曲轴工件时, 可能不存在双砂轮同时磨削的可行工序。因此, 在满足生产节拍的前提下, 可以采用双/单砂轮曲轴加工模式, 在个别档位采用单砂轮工作方式, 即令磨削连杆颈的砂轮退让至安全位, 使另一砂轮移动至下一主轴颈磨削档位, 这样虽然增加了一定的非磨削时间, 但产生了许多实际可行的磨削工序, 也可达到生产中对磨削精度和效率的要求。

1.2 双砂轮数控随动磨床曲轴加工过程优化方法

结合磨床参数、曲轴参数以及工艺参数等基础条件, 设计了如图 3 所示的双砂轮曲轴磨削加工过程的优化流程, 对双砂轮磨削工序、双砂轮修整间隔以及报废后更换方式进行优化。

图 3 双砂轮曲轴磨削加工过程优化流程图

优先采用双砂轮同时磨削的最优工艺, 在双砂轮曲轴加工模式下基于多旅行商问题建立过程优化模型, 通过遗传算法生成不同的加工方案 $S_i (i=1, 2, \dots, iter_{\max}; iter_{\max}$ 为最大迭代次数), 迭代寻找满足磨床结构、工艺基准以及生产节拍等约束的最优加工方案 S_{best} 。达到迭代终止条件后, 若不存在最优加工方案 S_{best} , 对于加工对象是主轴颈和连杆颈档宽不同的曲轴, 可基于第 1.1 节所述在个别档位允许单砂轮工作的加工模式建立优化模型, 寻找满足所有约束条件并使得磨削过程砂轮中砂轮退至安全位次数最小的加工方案作为最优方案 S_{best} 。对于加工对象是主轴颈和连杆颈档宽相同的曲轴, 在此加工模式下由于存在局部单砂轮磨削耗费时间, 加工时间变长, 不可能存在当前加工参数下满足节拍约束的可行方案。最终若不存在最优加工方案 S_{best} , 则说明针对当前加工对象及工艺, 为了达到生产线节拍要求, 必须提高磨除率以缩短磨削时间或增加磨削装备以提高单位时间内产量。

2 双砂轮模式下曲轴加工过程优化

在双砂轮同时工作的模式下, 采用多旅行商模型描述双砂轮曲轴磨削过程, 以单件曲轴平均加工耗时和生产成本为优化目标, 以磨床结构、工艺基准和生产节拍为约束, 构建曲轴加工过程优化模型, 采用改进的遗传算法进行求解, 寻找最优加工方案。

2.1 基于多旅行商的加工过程优化问题描述

多旅行商问题是一种典型的组合优化问题, 通常描述为: M 个旅行商从同一个城市(或不同的城市)出发, 分别走一条旅行线路, 使得每个城市有且仅有一个旅行商经过, 且总旅行路程最短^[15]。将双砂轮曲轴磨削过程类比多旅行商问题, 把曲轴档位与砂轮安全位看成节点(相当于旅行商问题中的城市), 两片砂轮看作两个旅行商, 砂轮在档位间的移动时间以及磨削时间看作旅行商到达城市所需时间以及在城市停留时间, 那么每个砂轮的磨削工序就是访问一定数量节点的序列。与传统多旅行商问题相比, 双砂轮曲轴磨削过程因其工艺和磨床结构的特殊性, 还包括以下几个方面的约束条件。

(1) 节拍约束: 生产线的节拍要求规定了单件曲轴在此磨削工序的最长耗时。

由此, 构建约束条件 1: 优化的双砂轮曲轴加工方案需使单根曲轴从装夹到所有档位磨削完毕并卸下的时间少于要求时间, 否则该优化工艺无效。

(2) 基准先行: 基准档位优先加工以防止其跳动和尺寸变化影响其余档位加工精度。

由此, 构建约束条件 2: 采用两片相同宽度砂轮配置时, 左右基准档同时最先加工; 采用两片不同宽度砂轮配置时, 右基准档最先加工。

(3) 磨床结构: 双砂轮架数控随动式曲轴磨床结构存在(a)两砂轮不能同时磨削相邻主轴颈和连杆颈; (b)两砂轮不允许越过彼此进行档位磨削的情况。

由此, 构建约束条件 3: 双砂轮同时磨削曲轴两档时, 右砂轮磨削档位节点号至少比左砂轮磨削档位节点号大一位。

(4) 曲轴参数: 曲轴主轴颈与连杆颈档宽不同时, 分别使用两片对应宽度的砂轮进行磨削。

由此, 构建约束条件 4: 磨削主轴颈和连杆颈档宽不同的曲轴时, 一砂轮仅可磨削主轴颈, 另一砂轮仅可磨削连杆颈和 POST 端。

2.2 双砂轮曲轴加工过程优化模型

2.2.1 参数定义

本文所建立的双砂轮曲轴磨削加工过程优化模型涉及的参数如表 1 所示。

表 1 双砂轮曲轴磨削加工过程优化模型参数

参数	含义
w	1 为左砂轮, 2 为右砂轮
$V_z/(\text{mm/s})$	砂轮移动速度
$V_{sw}/(\text{m/s})$	砂轮 w 线速度
g_w/mm^3	砂轮 w 加工单根曲轴的磨削量
N	曲轴档位总数
K, K'	两砂轮磨削档位个数中的较小值
Q, Q'	两砂轮磨削档位个数中的较大值
d_{ij}/mm	档位节点 i 到 j 的距离
d_l/mm	两砂轮粗磨后移到精磨基准档中的较大值
d_r/mm	粗磨中两砂轮移动距离较大值
d_f/mm	精磨中两砂轮移动距离较大值
T_{jt}/s	砂轮进退刀时间
T_{zw}/s	砂轮 w 移动与修整耗时
t_{ij}/s	粗磨中档位节点 j 磨削时间
t_{fj}/s	精磨中档位节点 j 磨削时间
t_{mr}/s	两砂轮粗磨时间中的较大值
t_{mf}/s	两砂轮精磨时间中的较大值
$T_{\text{cycle}}/\text{s}$	加工节拍
n_{wr}	砂轮 w 粗磨过程共磨削的档位个数
n_{wf}	砂轮 w 精磨过程共磨削的档位个数
O_w	左右基准档对应节点号
$O_{wr}(k)$	砂轮 w 粗磨过程第 k 步对应的节点号 ij
$O_{wf}(k)$	砂轮 w 精磨过程第 k 步对应的节点号 ij
X_{wj}	若砂轮 w 磨削曲轴档位 j 时值为 1, 否则为 0
α_i	符号变量 ($i=1, 2, 3, 4$)
β	配置不等宽砂轮时左砂轮磨削主轴颈, $\beta=1$; 右砂轮磨削主轴颈, 则 $\beta=0$ 。

2.2.2 优化目标

如式(1), 通过单件曲轴平均加工耗时和生产成本两个子目标加权构建曲轴双砂轮磨削加工过程优化目标函数。

$$\min F = \omega_1 \cdot f'_1 + \omega_2 \cdot f'_2 \quad (1)$$

式中, ω_1, ω_2 由实际生产需要分配, 且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$, 并对模型中两子目标做归一化处理, 即

$$f'_i = \frac{f_i - \min(f_i)}{\max(f_i) - \min(f_i)} \quad (i=1, 2) \quad (2)$$

(1) 以单件曲轴平均加工耗时建立目标函数 f_1

在生产线上长期大批量加工过程中, 曲轴加工耗时由粗磨磨削过程耗时、辅助加工耗时、修整砂轮耗时和砂轮报废后更换砂轮耗时组成, 综合考虑这些时间因素得出曲轴单件平均加工耗时

$$f_1 = t_r + t_f + t_z + t_c + t_s \quad (3)$$

① 粗磨过程总耗时 t_r

粗磨过程总耗时为双砂轮移动时间、进退刀时间以及粗磨磨削时间的总和, 即

$$t_r = \frac{d_r}{v_z} + Q \cdot T_{jt} + t_{mr} \quad (4)$$

为保证曲轴每档之间的形位误差符合要求, 曲轴各档位粗磨完成后进行各档位精磨。粗磨过程中, 若两片砂轮磨削档位个数不等, 则先结束磨削任务的砂轮需要退回其安全位等待, 直至另一砂轮完成所有粗磨加工任务, 两砂轮由当前工位直接进入各档轴颈精磨工序。每次磨削曲轴档位时左右砂轮同时移动, 同时进退刀运动, 则上述参数计算如下

$$d_r = d_1 + \sum_{i=1}^K \max(d_{O_{1r}(i)O_{1r}(i+1)}, d_{O_{2r}(i)O_{2r}(i+1)}) + \alpha_1 \cdot \sum_{i=K+1}^{n_{1r}-1} d_{O_{1r}(i)O_{1r}(i+1)} + \alpha_2 \cdot \sum_{i=K+1}^{n_{2r}-1} d_{O_{2r}(i)O_{2r}(i+1)} \quad (5)$$

$$t_{mr} = \sum_{i=1}^K \max(t_{O_{1r}(i)}, t_{O_{2r}(i)}) + \alpha_1 \cdot \sum_{i=K+1}^{n_{1r}} t_{O_{1r}(i)} + \alpha_2 \cdot \sum_{i=K+1}^{n_{2r}} t_{O_{2r}(i)} \quad (6)$$

$$K = \min(n_{1r}, n_{2r}) \quad (7)$$

$$Q = \max(n_{1r}, n_{2r}) \quad (8)$$

$$\begin{cases} \alpha_1=1 & \alpha_2=0 & (n_{1r} > n_{2r}) \\ \alpha_1=0 & \alpha_2=1 & (n_{1r} < n_{2r}) \\ \alpha_1=0 & \alpha_2=0 & (n_{1r} = n_{2r}) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} O_{1r}(Q+1)=O_1 & O_{2r}(K+1)=N & O_{2r}(K+2)=O_2 & (n_{1r} > n_{2r}) \\ O_{1r}(K+1)=1 & O_{1r}(K+2)=O_1 & O_{2r}(Q+1)=O_2 & (n_{1r} < n_{2r}) \\ O_{1r}(Q+1)=O_1 & O_{2r}(Q+1)=O_2 & & (n_{1r} = n_{2r}) \end{cases} \quad (10)$$

$$d_1 = \begin{cases} \max(d_{O_{1r}(Q)O_{1r}(Q+1)}, d_{O_{2r}(K+1)O_{2r}(K+2)}) & (n_{1r} > n_{2r}) \\ \max(d_{O_{1r}(K+1)O_{1r}(K+2)}, d_{O_{2r}(Q)O_{2r}(Q+1)}) & (n_{1r} < n_{2r}) \\ \max(d_{O_{1r}(Q)O_{1r}(Q+1)}, d_{O_{2r}(Q)O_{2r}(Q+1)}) & (n_{1r} = n_{2r}) \end{cases} \quad (11)$$

② 精磨过程总耗时 t_f

精磨过程中双砂轮从精磨基准档位开始磨削, 磨削完成后双砂轮退回砂轮安全位。精磨过程总耗时即

$$t_f = \frac{d_f}{v_z} + Q' \cdot T_{jt} + t_{mf} \quad (12)$$

同理, 相应参数表达式为

$$d_f = \sum_{i=1}^{K'} \max(d_{O_{1f}(i)O_{1f}(i+1)}, d_{O_{2f}(i)O_{2f}(i+1)}) + \alpha_3 \cdot \sum_{i=K'+1}^{n_{1f}-1} d_{O_{1f}(i)O_{1f}(i+1)} + \alpha_4 \cdot \sum_{i=K'+1}^{n_{2f}-1} d_{O_{2f}(i)O_{2f}(i+1)} \quad (13)$$

$$t_{mf} = \sum_{i=1}^{K'} \max(t_{O_{1f}(i)}, t_{O_{2f}(i)}) + \alpha_3 \cdot \sum_{i=K'+1}^{n_{1f}} t_{O_{1f}(i)} + \alpha_4 \cdot \sum_{i=K'+1}^{n_{2f}} t_{O_{2f}(i)} \quad (14)$$

$$K' = \min(n_{1f}, n_{2f}) \quad (15)$$

$$Q' = \max(n_{1f}, n_{2f}) \quad (16)$$

$$\begin{cases} \alpha_3 = 1 & \alpha_4 = 0 & (n_{1f} > n_{2f}) \\ \alpha_3 = 0 & \alpha_4 = 1 & (n_{1f} < n_{2f}) \\ \alpha_3 = 0 & \alpha_4 = 0 & (n_{1f} = n_{2f}) \end{cases} \quad (17)$$

$$O_{1f}(n_{1f}) = 1 \quad O_{2f}(n_{2f}) = N \quad (18)$$

③ 平均修整砂轮时间 t_z

生产线中砂轮的修整周期通常以累积的磨削量来判断, 达到磨削量上限时必须进行修整以保证加工精度。曲轴加工过程优化模型中会令双砂轮尽量同时加工使其磨削量接近, 因此规定任一砂轮的磨削量达到上限 $g_{\max}$ 时, 双砂轮均退回安全位, 而后同时移至各自修整位进行修整。双砂轮中移动和修整耗时较长的为双砂轮单次修整砂轮时间, 则单件曲轴平均修整时间为

$$t_z = \frac{\max(T_{z1}, T_{z2}) \cdot \max(g_1, g_2)}{g_{\max}} \quad (19)$$

④ 平均更换砂轮时间 t_c

在双砂轮修整间隔确定的情况下, 砂轮损耗基本为磨削和修整损耗, 此时砂轮寿命最大值为修整

间隔与最大修整次数之积。由于 CBN 砂轮成本比较昂贵, 考虑生产效率以及成本的约束, 有两种更换砂轮的方式: 更换方式 1 是在一个砂轮报废后两片砂轮同时更换。这样虽然浪费一定磨料, 但节省了更换一片砂轮所需的停线生产时间 T_c ; 更换方式 2 是在某片砂轮报废时立刻更换该砂轮, 这样不存在磨料浪费的情况, 但需要双倍的停产时间以更换砂轮。因此单件曲轴平均更换砂轮时间为

$$t_c = \begin{cases} \frac{T_c}{n_{\min}} & (\text{更换方式1}) \\ \frac{T_c \cdot (n_{\max} + n_{\min} - O(n_{\max}, n_{\min}))}{n_{\max} \cdot n_{\min}} & (\text{更换方式2}) \end{cases} \quad (20)$$

其中 $n_{\min}$ 为磨削量大的砂轮可磨削曲轴件数, $n_{\max}$ 为磨削量小的砂轮可磨削曲轴件数, $O(n_{\max}, n_{\min})$ 为两砂轮可磨削曲轴件数的最大公约数。

⑤ 辅助工序时间 t_s

辅助工序时间 t_s 包括工件上下料、装夹和对刀时间等, 为固定值。

(2) 以单件曲轴平均加工成本建立目标函数 f_2

磨削成本与工序时间和设备损耗有关, 因此单件曲轴磨削的生产成本包括: 工时费和加工设备损耗费, 其中工时费包括人员、电耗、设备折旧等费用, 加工设备损耗主要是砂轮损耗, 考虑砂轮寿命的影响。

设磨削加工过程中单位时间费用率为 M , 那么工时费用为 $M \cdot t$, 单件砂轮成本为 Pr , 左右砂轮磨削单件曲轴损耗费为 C_1 和 C_2 , 则单件曲轴平均磨削成本为

$$f_2 = M \cdot t + C_1 + C_2 \quad (21)$$

$$C_1 + C_2 = \begin{cases} \frac{2 \cdot Pr}{n_{\min}} & (\text{更换方式1}) \\ Pr \cdot \frac{(n_{\min} + n_{\max})}{n_{\min} \cdot n_{\max}} & (\text{更换方式2}) \end{cases} \quad (22)$$

2.2.3 约束条件

根据第 2.1 节分析的约束条件, 模型约束如式 (23)~(30) 所示。

约束条件 1(加工节拍约束)

$$t_r + t_f + t_s \leq T_{\text{cycle}} \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^2 n_{ir} = N, \sum_{i=1}^2 n_{if} = N \quad (24)$$

$$\sum_{w=1}^2 X_{wj} = 1 \quad (j=1, 2, \dots, N) \quad (25)$$

约束条件 2(基准先行约束), 采用两片等宽砂轮配置时, 应有

$$\begin{cases} O_{1r}(1)=1 & O_{2r}(1)=N \\ O_{1r}(2)=O_1 & O_{2r}(2)=O_2 \\ O_{1f}(1)=O_1 & O_{2f}(1)=O_2 \end{cases} \quad (26)$$

采用两片不等宽砂轮配置时, 应有

$$\begin{cases} O_{1r}(1)=1 & O_{2r}(1)=N \\ O_{1r}(2)=O_2 & O_{2r}(2)=N \quad (\beta=1) \\ O_{1f}(1)=O_2 & O_{2f}(1)=N \quad (\beta=1) \\ O_{2r}(2)=O_2 & O_{1r}(2)=1 \quad (\beta=0) \\ O_{2f}(1)=O_2 & O_{1f}(1)=1 \quad (\beta=0) \end{cases} \quad (27)$$

约束条件 3(磨床结构约束)

$$\begin{cases} O_{1r}(i)+1 < O_{2r}(i) & (i=1 \sim K) \\ O_{1f}(i)+1 < O_{2f}(i) & (i=1 \sim K') \end{cases} \quad (28)$$

约束条件 4(曲轴参数约束)

$\beta=1$ 时

$$\begin{cases} X_{1j}=1 & (\text{档位}j\text{为主轴颈}) \\ X_{2j}=1 & (\text{档位}j\text{为连杆颈}) \end{cases} \quad (29)$$

$\beta=0$ 时

$$\begin{cases} X_{2j}=1 & (\text{档位}j\text{为主轴颈}) \\ X_{1j}=1 & (\text{档位}j\text{为连杆颈}) \end{cases} \quad (30)$$

2.3 基于遗传算法的优化模型求解

遗传算法是一种全局概率搜索优化算法, 它可以解决双砂轮曲轴加工过程优化模型不连续、非线性的问题。在求解模型中, 综合应用择优交叉、基于可行解变异的遗传操作以及精英保留策略, 提高遗传算法全局搜索能力和算法执行效率。

采用数字编码策略形成染色体来描述双砂轮访问各节点序列。以图 1 曲轴为例, 节点 1 到 12 分别代表 S_1 、 J_5 、 P_4 、 J_4 、...、 $POST$ 端、 S_2 , 设置断点将两砂轮访问节点序列进行区分, 染色体中位于断点之前的节点顺序为左砂轮访问各节点的序列; 其余为右砂轮访问各节点的序列。根据粗精分开工艺需求针对粗磨、精磨两个加工过程分别生成初始种群。将砂轮安全位节点和基准档位节点取出, 其余档位节点为可调节节点, 对可调节节点随机排列, 并随机产生断点, 形成多条双砂轮访问节点序列的染色体。当粗磨、精磨两个过程染色体条数都达到设定的种群大小时, 完成初始种群的生成。若一条染色体所表达的序列为[10 4 5 2 9 7 3 11 6 12 1 8], 断点为 6, 则它代表左砂轮访问各节点的序列为 $P_1 \rightarrow J_4 \rightarrow P_3 \rightarrow J_5 \rightarrow J_2 \rightarrow P_2$; 右砂轮为: $P_4 \rightarrow POST \rightarrow J_3 \rightarrow S_2 \rightarrow S_1 \rightarrow J_2$ 。

采用择优交叉操作解决种群演化初期早熟收敛

及后期随机漫游等问题^[16]。在父代种群中遍历抽样形成种群集合, 选择每个种群集合中适应度值最高的个体进入子代种群并进行交叉操作。

采用的变异算子是针对减少种群中的不可行解而提出的^[17], 磨削主轴颈和连杆颈等宽的曲轴时, 随机选择断点前后可调节点中同时磨削的一对节点。若满足加工条件, 则不进行交换, 否则进行交换。变异操作的意义在于使个体满足磨床的结构约束。

同时, 为避免交叉、变异运算破坏上一代种群中的精英个体, 故采取精英保留策略存储迭代过程中的精英个体^[16]。该策略主要是把种群进化过程中出现的精英个体复制到下一代中, 利于提高算法的收敛能力。

3 双/单砂轮模式下曲轴加工过程优化

无法寻找到双砂轮曲轴加工模式下最优加工方案时, 在尽可能保证双砂轮同时工作的情况下, 允许个别档位采用某一个砂轮退回安全位等待的单砂轮工作方式。此时, 双/单砂轮曲轴加工模式下的过程优化问题可认为是在连杆颈磨削用砂轮访问节点序列中插入该砂轮的安全位节点以形成新的节点序列, 寻找满足所有约束条件并且插入安全节点数最少的加工方案。

3.1 双/单砂轮模式下曲轴加工过程优化模型

双/单砂轮曲轴加工模式下, 曲轴加工过程优化目标函数仍如式(1)所示, 其中变量(t_z 、 t_c 、 t_s)以及子目标函数 f_2 计算过程与第 2.1 节模型相同; 而子目标函数 f_1 中粗磨过程总耗时 t_r 和精磨过程总耗时 t_f 的表达式有所变化。因此, 本节重点对 t_r 和 t_f 进行详细分析。

粗磨过程中若至少插入 d 次砂轮安全位节点, 完成曲轴粗磨, 则相应 d_r 、 t_{mr} 参数表达式为

$$d_r = d_1 + \sum_{i=1}^K \max(d_{O_{1r}(i)O_{1r}(i+1)}, d_{O_{2r}(i)O_{2r}(i+1)}) + \alpha_1 \cdot \sum_{i=K+1}^{Q-1} d_{O_{1r}(i)O_{1r}(i+1)} + \alpha_2 \cdot \sum_{i=K+1}^{Q-1} d_{O_{2r}(i)O_{2r}(i+1)} \quad (31)$$

$$t_{mr} = \sum_{i=1}^K \max(t_{O_{1r}(i)}, t_{O_{2r}(i)}) + \alpha_1 \cdot \sum_{i=K+1}^Q t_{O_{1r}(i)} + \alpha_2 \cdot \sum_{i=K+1}^Q t_{O_{2r}(i)} \quad (32)$$

$$K = \min(n_{1r} + (1-\beta) \cdot d, n_{2r} + \beta \cdot d) \quad (33)$$

$$Q = \max(n_{1r} + (1-\beta) \cdot d, n_{2r} + \beta \cdot d) \quad (34)$$

$$\begin{cases} \alpha_1=1 & \alpha_2=0 & (n_{lr}+(1-\beta)\cdot d > n_{2r} + \beta\cdot d) \\ \alpha_1=0 & \alpha_2=1 & (n_{lr}+(1-\beta)\cdot d < n_{2r} + \beta\cdot d) \\ \alpha_1=0 & \alpha_2=0 & (n_{lr}+(1-\beta)\cdot d = n_{2r} + \beta\cdot d) \end{cases} \quad (35)$$

同理按照磨削工艺粗精分开的要求, 得到如下表达式。

$\beta=1$ 时

$$\begin{cases} O_{lr}(Q+1)=O_2 & O_{2r}(K+1)=N \\ O_{lr}(K+1)=1 & O_{lr}(K+2)=O_2 & O_{2r}(Q+1)=N \end{cases} \quad (36)$$

$$d_l = \begin{cases} d_{O_{lr}(Q)O_{lr}(Q+1)} & (n_{lr} > n_{2r} + d) \\ \max(d_{O_{lr}(K+1)O_{lr}(K+2)}, d_{O_{2r}(Q)O_{2r}(Q+1)}) & (n_{lr} < n_{2r} + d) \\ \max(d_{O_{lr}(Q)O_{lr}(Q+1)}, d_{O_{2r}(Q)O_{2r}(Q+1)}) & (n_{lr} = n_{2r} + d) \end{cases} \quad (37)$$

$\beta=0$ 时

$$\begin{cases} O_{lr}(Q+1)=1 & O_{2r}(K+1)=N & O_{2r}(K+2)=O_2 \\ O_{lr}(K+1)=1 & O_{2r}(Q+1)=O_2 \end{cases} \quad (38)$$

$$d_l = \begin{cases} \max(d_{O_{lr}(Q)O_{lr}(Q+1)}, d_{O_{2r}(K+1)O_{2r}(K+2)}) & (n_{lr} + d > n_{2r}) \\ d_{O_{2r}(Q)O_{2r}(Q+1)} & (n_{lr} + d < n_{2r}) \\ \max(d_{O_{lr}(Q)O_{lr}(Q+1)}, d_{O_{2r}(Q)O_{2r}(Q+1)}) & (n_{lr} + d = n_{2r}) \end{cases} \quad (39)$$

精磨过程中若至少插入 d' 次砂轮安全位节点, 完成曲轴精磨, 则相应 d_f 、 t_{mf} 参数表达式为

$$d_f = \sum_{i=1}^{K'} \max(d_{O_{lr}(i)O_{lr}(i+1)}, d_{O_{2r}(i)O_{2r}(i+1)}) + \alpha_3 \cdot \sum_{i=K'+1}^{Q'-1} d_{O_{lr}(i)O_{lr}(i+1)} + \alpha_4 \cdot \sum_{i=K'+1}^{Q'-1} d_{O_{2r}(i)O_{2r}(i+1)} \quad (40)$$

$$t_{mf} = \sum_{i=1}^{K'} \max(t_{O_{lr}(i)}, t_{O_{2r}(i)}) + \alpha_3 \cdot \sum_{i=K'+1}^{Q'} t_{O_{lr}(i)} + \alpha_4 \cdot \sum_{i=K'+1}^{Q'} t_{O_{2r}(i)} \quad (41)$$

$$K' = \min(n_{lr} + (1-\beta)\cdot d', n_{2r} + \beta\cdot d') \quad (42)$$

$$Q' = \max(n_{lr} + (1-\beta)\cdot d', n_{2r} + \beta\cdot d') \quad (43)$$

$$\begin{cases} \alpha_3=1, \alpha_4=0 & (n_{lr}+(1-\beta)\cdot d' > n_{2r} + \beta\cdot d') \\ \alpha_3=0, \alpha_4=1 & (n_{lr}+(1-\beta)\cdot d' < n_{2r} + \beta\cdot d') \\ \alpha_3=0, \alpha_4=0 & (n_{lr}+(1-\beta)\cdot d' = n_{2r} + \beta\cdot d') \end{cases} \quad (44)$$

3.2 双/单砂轮模式下曲轴加工过程优化模型求解

为得到实际可行的最优方案, 构造加工方案对应的序列时: 首先, 为满足基准先行的约束条件, 将砂轮安全位节点和基准档节点取出; 为满足曲轴结构的约束条件, 即一砂轮仅磨削主轴颈, 另一砂轮仅磨削连杆颈和 POST 端, 确定染色体断点, 将主轴颈节点和连杆颈及 POST 端节点分别插入断点前后。然后, 如图 4 所示, 在粗磨连杆颈序列中插入 d ($1 \leq d \leq n_{2r}$) 个砂轮安全位节点, 在精磨连杆颈序列中插入 d' ($1 \leq d' \leq n_{2r}$) 个砂轮安全位节点, 穷举最小 d 和 d' 条件下粗精磨削过程双砂轮访问节点序列中同时符合磨床结构约束的加工方案。最后在所有已满足约束条件 2、3、4 的加工方案中寻找令目标函数值最小的方案, 若该方案满足生产线节拍要求, 则为双/单砂轮曲轴加工模式下的最优方案 S_{best} 。

图4 双/单砂轮曲轴加工过程优化流程图

4 实例分析

为验证所建立两种模式下加工过程优化模型的正确性以及算法的有效性, 以企业实际加工的某种

曲轴为实例进行建模、求解并分析。

4.1 试验方案

企业长期加工某规格曲轴，其档位间距及砂轮进刀位、左右安全位的位置如图 5 所示。该曲轴主轴颈 $J_1 \sim J_5$ 、连杆颈 $P_1 \sim P_4$ 的轴颈部分以及 POST 端均需磨削。针对是否需要加工曲轴连杆颈与曲柄之间的过渡圆角，企业有两种加工要求：加工要求 1 中不加工过渡圆角，此时主轴颈和连杆颈磨削宽度相同，可配置两片等宽的砂轮，并且优先磨削左右基准档 J_5 、 J_2 ；加工要求 2 中需要加工连杆颈过渡圆角，此时可配置两片不等宽砂轮，一片用于主轴颈磨削，一片修整左右圆角用于连杆颈及 POST 端磨削，并且优先磨削右基准档 J_2 。为保障磨削精度，通常将粗精磨削过程再细分成几组磨削余量与进给速度，采用 Fenar L 量仪尺寸控制功能^[18]，磨削至设定尺寸后数控系统自动切换下一组磨削用量进行加工。该曲轴参数及磨削用量如表 2 所示，其中砂轮在各档位的磨削量根据曲轴参数及直径余量计算得到^[19]。

图 5 曲轴档位、砂轮进退刀位及左右安全位示意图

表 2 曲轴参数及磨削用量

		主轴颈	连杆颈	POST 端
曲轴参数	档位宽度/mm	20.15	22.75	59.74
	初始直径/mm	56.80	50.20	32.80
	直径余量/mm	0.8	1.2	0.8
粗磨用量	进给速度 1/(mm/min)	6.00	9.00	6.00
	直径余量 1/mm	0.30	0.30	0.30
	总磨削量/mm ³	894.95	1 417.20	1 527.24
精磨用量	进给速度 1/(mm/min)	1.2	3.0	1.2
	直径余量 1/ mm	0.15	0.25	0.15
	进给速度 2/(mm/min)	0.9	1.5	0.9
	直径余量 2/ mm	0.05	0.15	0.05
	进给速度 3/(mm/min)	0.2	0.9	0.2
	直径余量 3/ mm	0	0.05	0
	进给速度 4/(mm/min)	--	0.15	--
	直径余量 4/mm	--	0	--
	总磨削量/mm ³	535.54	470.98	912.12

企业原有方案 S_p 中双砂轮粗磨工序：左砂轮

($S_1 \rightarrow J_2 \rightarrow J_1 \rightarrow J_5 \rightarrow J_4 \rightarrow J_3 \rightarrow S_1$)、右砂轮($S_2 \rightarrow S_2 \rightarrow S_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_4 \rightarrow \text{POST} \rightarrow S_2$)，精磨工序：左砂轮($S_1 \rightarrow J_2 \rightarrow J_1 \rightarrow J_5 \rightarrow J_4 \rightarrow J_3 \rightarrow S_1$)、右砂轮($S_2 \rightarrow S_2 \rightarrow S_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_4 \rightarrow \text{POST} \rightarrow S_2$)，根据上表左右砂轮磨削量得到每加工 225 件修整一次砂轮，任一砂轮报废后立刻停机更换。

使用双砂轮曲轴加工过程优化模型对该曲轴的两 种加工要求分别进行优化，节点 1 到 12 分别代表 S_1 、 J_5 、 P_4 、 J_4 、 $\cdots$ 、POST 端、 S_2 ，模型中使用的相关参数取值如表 3 所示，其中档位磨削时间由磨削量和进给速度计算得到。

表 3 双砂轮曲轴加工过程优化模型参数取值表

参数	数值	
	加工要求 1	加工要求 2
砂轮移动速度 V_z /(mm/s)	400	
砂轮线速度 V_{s1}, V_{s2} /(m/s)	200	
进退刀时间 T_{jt} /s	1	
砂轮移动与修整耗时 T_{z1}, T_{z2} /s	60,60	60,90
单片砂轮更换时间 T_c /s	14 400	
辅助工序时间 t_s /s	32	
加工节拍 T_{cycle} /s	220	
最大磨削量 g_{max} /mm ³	2 250 000	
单位时间费用率 M /(元/s)	0.02	
单件砂轮成本 Pr /(元/s)	180 000	
S_1, S_2 档粗磨磨削时间 $t_{r1}, t_{r12}, t_{r1}, t_{r12}$ /s	0	
J_2 粗磨时间 t_{r8} /s	3.68	
J_2 精磨时间 t_{f8} /s	21.44	
POST 端粗磨时间 t_{r11} /s	8.67	
POST 端精磨时间 t_{f11} /s	17.34	
主轴颈粗磨时间 $t_{r2}, t_{r4}, t_{r6}, t_{r10}$ /s	2.50	
连杆颈粗磨时间 $t_{r3}, t_{r5}, t_{r7}, t_{r9}$ /s	3.00	
主轴颈精磨时间 $t_{f2}, t_{f4}, t_{f6}, t_{f10}$ /s	14.58	
连杆颈精磨时间 $t_{f3}, t_{f5}, t_{f7}, t_{f9}$ /s	15.83	

4.2 实例讨论与分析

设置以下两组极值情况下加工耗时和成本的权重组合对两种加工要求下的双砂轮磨削加工过程进行优化。

权重设置 1： $\omega_1=1$ 、 $\omega_2=0$ ；权重设置 2： $\omega_1=0$ 、 $\omega_2=1$ 。

无需磨削连杆颈过渡圆角时，配置等宽双砂轮，由于不存在砂轮磨削曲轴档位类型的限制，左右砂轮磨削完基准档位后可同时移至曲轴任一档位继续磨削。在双砂轮加工模式下通过改进的遗传算法得到这两种权重下的最优加工方案，如表 4 所示。

表 4 两种加工要求不同权重设置下的最优加工方案

		加工要求 1		加工要求 2	
		权重设置 1	权重设置 2	权重设置 1	权重设置 2
砂轮修整周期/件		247	261	225	225
砂轮更换方式		更换方式 1	更换方式 2	更换方式 1	更换方式 2
粗磨工序	左砂轮	$S_1 \rightarrow J_5 \rightarrow P_4 \rightarrow P_3 \rightarrow J_3 \rightarrow J_4$	$S_1 \rightarrow J_5 \rightarrow J_4 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4$	$S_1 \rightarrow J_2 \rightarrow J_1 \rightarrow J_3 \rightarrow J_4 \rightarrow J_5 \rightarrow S_1$	$S_1 \rightarrow J_2 \rightarrow J_1 \rightarrow J_3 \rightarrow J_4 \rightarrow J_5 \rightarrow S_1$
	右砂轮	$S_2 \rightarrow J_2 \rightarrow P_1 \rightarrow \text{POST} \rightarrow J_1 \rightarrow P_2$	$S_2 \rightarrow J_2 \rightarrow J_3 \rightarrow P_1 \rightarrow \text{POST} \rightarrow J_1$	$S_2 \rightarrow S_2 \rightarrow S_2 \rightarrow \text{POST} \rightarrow P_1 \rightarrow P_2$ $\rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow S_2$	$S_2 \rightarrow S_2 \rightarrow S_2 \rightarrow \text{POST} \rightarrow P_1 \rightarrow P_2$ $\rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow S_2$
精磨工序	左砂轮	$J_5 \rightarrow P_4 \rightarrow J_4 \rightarrow J_3 \rightarrow P_3 \rightarrow S_1$	$J_5 \rightarrow P_4 \rightarrow J_4 \rightarrow J_3 \rightarrow P_3 \rightarrow S_1$	$S_1 \rightarrow J_2 \rightarrow J_1 \rightarrow J_3 \rightarrow J_4 \rightarrow J_5 \rightarrow S_1$	$S_1 \rightarrow J_2 \rightarrow J_1 \rightarrow J_3 \rightarrow J_4 \rightarrow J_5 \rightarrow S_1$
	右砂轮	$J_2 \rightarrow P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow J_1 \rightarrow \text{POST} \rightarrow S_2$	$J_2 \rightarrow P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow J_1 \rightarrow \text{POST} \rightarrow S_2$	$S_2 \rightarrow S_2 \rightarrow S_2 \rightarrow \text{POST} \rightarrow P_1 \rightarrow P_2$ $\rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow S_2$	$S_2 \rightarrow S_2 \rightarrow S_2 \rightarrow \text{POST} \rightarrow P_1 \rightarrow P_2$ $\rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow S_2$

磨削连杆颈过渡圆角时,配置不等宽砂轮,左砂轮磨削主轴颈(S_1 、 J_5 、 J_4 、 J_3 、 J_2 、 J_1);右砂轮磨削连杆颈以及 POST 端(P_4 、 P_3 、 P_2 、 P_1 、POST 端、 S_2),基准档位 J_2 由左砂轮单独。优化结果显示:配置不等宽砂轮时,由于磨床结构约束,不存在双砂轮始终同时在线加工的方案。基于图 4 所示的双/单砂轮曲轴加工过程优化流程,在右砂轮粗磨和精磨工序所表示的节点序列中插入一定数量的节点 12,重新生产新的节点序列,在两种权重设置下分别选择所有新的节点序列中使各自目标函数值最小的作为最优方案,如表 4 所示。

权重设置 1 和权重设置 2 分别注重对加工耗时和生产成本的优化,将以上两种权重设置下的最优加工方案与企业原有加工方案比较,如表 5 所示。

表 5 最优方案与原有方案优化结果

	加工要求 1		加工要求 2		原有方案
	权重设置 1	权重设置 2	权重设置 1	权重设置 2	
单件耗时 f_1 (s/件)	150.64	151.02	198.05	198.19	201.52
耗时缩短量 (%)	25.25	25.06	1.72	1.65	—
单件成本 f_2 (元/件)	6.99	6.77	8.33	7.85	7.92
成本降低量 (%)	11.76	14.44	-5.24	0.84	—

注:耗时缩短量 $= \left(f_1(S_p) - f_1(S_{\text{best}}) \right) / f_1(S_p) \times 100\%$;

成本降低量 $= \left(f_2(S_p) - f_2(S_{\text{best}}) \right) / f_2(S_p) \times 100\%$ 。

加工要求 1 中两种权重设置下的最优方案使单件曲轴平均加工耗时和成本较原有方案都有很大的缩短:加工耗时最多缩短 25.25%,成本最多降低 14.44%,充分体现了双砂轮同时在线磨削的优势。加工要求 2 中权重设置 1 的最优方案加工耗时较原有方案缩短 1.72%,但成本上升 5.24%;权重设置 2 下的最优方案可以使缩短加工耗时 1.65%,同时降

低成本 0.84%。

若以企业每年有 250 个工作日,每个工作日生产 22 个小时计,优先考虑最短耗时方案,加工要求 1 下年产量比原有方案多 33 186 件,加工要求 2 下年产量也能比原有方案多 1 719 件;若以订单 20 万根的生产需求计算,加工要求 1 下成本最低的方案比原有方案节约 22.86 万元,加工要求 2 下比原有方案节约 1.33 万元。

5 结论

(1) 考虑生产节拍、磨床结构等加工约束,采用多旅行商模型描述双砂轮曲轴磨削过程,以加工时间和成本为目标函数,构建双砂轮曲轴加工过程优化模型,并利用改进的遗传算法进行求解。

(2) 针对受磨床结构约束而无法使双砂轮始终同时工作的曲轴,允许采用某个砂轮退回安全位等待,另一砂轮优先磨削主轴颈的加工模式,并建立相应的加工过程优化模型,寻找令砂轮退回次数最少的加工方案为最优解,进一步完善了优化方法,使其具有更好的实用性。

(3) 所建立的优化模型符合生产线运行实际情况,不仅优化粗磨、精磨过程中双砂轮的磨削工序,还充分考虑了长期大批量加工过程中砂轮修整时间以及砂轮报废后的更换方式。

本文提出的优化方法没有考虑不同加工方案对曲轴加工质量影响的差异,认为在零件通过性试验阶段,通过对磨削工艺系统的调整,所有磨削方案都能满足加工质量的要求。因此后续研究中会引入影响曲轴磨削质量方面的约束条件,对优化模型作进一步完善。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Manchao, YAO Zhenqiang. Grinding performance in crankshaft pin journal path-controlled

- grinding of 40Cr using CBN wheel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(9-12): 1581-1586.
- [2] 沈南燕, 王为东, 李静, 等. 非圆磨削加工过程中磨削能耗建模与分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(15): 208-216.
- SHEN Nanyan, WANG Weidong, LI Jing, et al. Modelling and analysis of grinding energy consumption in non-circular grinding process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(15): 208-216.
- [3] 俞红祥, 张昱, 潘旭华. 曲轴新型非圆随动磨削运动模型的研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 167-174.
- YU Hongxiang, ZHANG Yu, PAN Xuhua. Research on novel motion model of noncircular follow grinding for crankshaft[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 167-174.
- [4] DEWIL R, LUTEYN C, CATTRYSSSE D, et al. A critical review of multi-hole drilling path optimization[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2019, 26(2): 449-459.
- [5] ABIDIN N, AB RASHID M, MOHAMED N. A review of multi-holes drilling path optimization using soft computing approaches[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2019, 26(1): 107-118.
- [6] LIU Xiaojun, HONG Yi, NI Zhonghua, et al. Process planning optimization of hole-making operations using ant colony algorithm[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(1-4): 753-769.
- [7] MOGHADDAM M J, SOLEYMANI M R, FARSI M A. Sequence planning for stamping operations in progressive dies[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2015, 26(2): 347-357.
- [8] KUMAR S, HUSSEIN H M A. AI applications in sheet metal forming[M]. Springer Singapore, 2016.
- [9] FARAZ Z, HAQ S W U, ALI L, et al. Sheet-metal bend sequence planning subjected to process and material variations[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 53(11): 157-163.
- [10] 马峰, 张华, 曹华军. 面向低能耗少切削液的多目标加工参数优化[J]. 机械工程学报, 2017, 53(11): 157-163.
- MA Feng, ZHANG Hua, CAO Huajun. Multi-objective machining parameters optimization for low energy and minimum cutting fluid consumption[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(15): 157-163.
- [11] 黄凤立, 左春桢, 顾金梅, 等. 基于加工操作单元的多态蚁群装夹规划方法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 164-172.
- HUANG Fengli, ZUO Chunzheng, GU Jinmei, et al. Polymorphic ant colony clamping planning method based on the machining operation unit[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 164-172.
- [12] WANG Jinfeng, WU Xuehua, FAN Xiaoliang. A two-stage ant colony optimization approach based on a directed graph for process planning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(5-8): 839-850.
- [13] LI Shujuan, LIU Yong, ROBERT G. An adaptive evolutionary algorithm for optimizing process planning of parallel drilling operations[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5-8): 1247-1263.
- [14] 刘霖, 朱晓民. 磨削工艺方案对曲轴加工精度及节拍的影响[J]. 制造业自动化, 2011, 33(5): 40-42.
- LIU Ji, ZHU Xiaoming. The effect of crankshaft grinding process layout on precision and cycle time[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(5): 40-42.
- [15] DEFERNY C, SÖRENSEN K. Multi-objective optimisation models for the travelling salesman problem with horizontal cooperation[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 267(3): 891-903.
- [16] 窦建平, 李俊, 苏春. 基于可行工序序列遗传算法的工序排序优化[J/OL]. 计算机集成制造系统, 2018[2018-10-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20180809.1542.028.html>.
- DOU Jianping, LI Jun, SU Chun. A feasible operation sequence oriented genetic algorithm for optimization of operation sequencing[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018[2018-10-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20180809.1542.028.html>.
- [17] 赵诗奎, 方水良. 基于工序编码和邻域搜索策略的遗传算法优化作业车间调度[J]. 机械工程学报, 2013, 49(16): 160-169.
- ZHAO Shikui, FANG Shuiliang. Operation-based encoding and neighborhood search genetic algorithm for job shop scheduling optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(16): 160-169.
- [18] MARPOSS S.P.A, Inc. Crankshaft measurement gauge on grinder[EB/OL]. [2018-10-14]. <https://www.marposs.com/eng/product/crankshaft-measurement-gauge-on-grinder>.

- [19] 赵星, 宋丽培, 孔强, 等. 离轴非球面加工中最接近球面及研磨去除量的求解[J]. 光学学报, 2009, 29(s1): 61-64.
- ZHAO Xing, SONG Lipei, KONG Qiang, et al. Resolving of the best-fit sphere and the material removal in off-axis asphere fabrications[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(s1):

61-64.

作者简介: 李静, 女, 1982 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为先进制造装备及磨削技术。

E-mail: ian1982@shu.edu.cn

沈南燕(通信作者), 女, 1982 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为智能机床及磨削技术。

E-mail: shny@shu.edu.cn