

考虑同轴度的汽车发动机曲轴孔镗削 工艺参数节能优化

张登永 李聪波* 吴少卿 张友 李承远

重庆大学高端装备机械传动全国重点实验室,重庆,400044

摘要:针对汽车发动机曲轴孔镗削加工后的同轴度值过大甚至超差,以及加工过程能效低等问题,开展了考虑同轴度的汽车发动机曲轴孔镗削工艺参数节能优化研究。分析了曲轴孔镗削同轴度影响因素,并基于有限元法和支持向量机回归算法建立了同轴度值预测模型;分析了曲轴孔镗削加工能耗特性,建立了以比能和最大同轴度值为目标的曲轴孔镗削加工工艺参数优化模型,并利用改进的多目标蜻蜓算法进行求解,确定了平衡能效和同轴度的最优工艺参数组合。案例研究表明,优化后最大同轴度值减小了 10.81%,比能降低了 4.61%,验证了优化模型的有效性。

关键词:汽车发动机曲轴孔;同轴度;节能优化;工艺参数;镗削加工

中图分类号:TH161

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Processing Parameter Energy-saving Optimization for Boring Automobile Engine Crankshaft Holes Considering Coaxiality

ZHANG Dengyong LI Congbo* WU Shaoqing ZHANG You LI Chengyuan

State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment, Chongqing University, Chongqing, 400044

Abstract: To address the issues of the coaxiality value of the automobile engine crankshaft holes was too large or even out of tolerance after boring, and the low energy efficiency of boring processes, a study of processing parameter energy-saving optimization for boring automobile engine crankshaft holes was conducted considering coaxiality. The influencing factors of coaxiality in boring crankshaft holes were analyzed and the coaxiality value prediction models were established based on the finite element methods and support vector machine regression algorithms. Then, the energy consumption characteristics of boring crankshaft holes were analyzed, and a boring parameter optimization model was established aiming at specific energy and maximum coaxiality value. The improved multi-objective dragonfly algorithm was used to solve the model and the optimal combination of processing parameters to balance energy efficiency and coaxiality was determined. Finally, the case study indicates that after the optimization, the maximum coaxiality value is reduced by 10.81%, and the specific energy is reduced by 4.61%, which verifies the effectiveness of the optimization model.

Key words: automobile engine crankshaft hole; coaxiality; energy-saving optimization; processing parameter; boring

0 引言

汽车发动机曲轴孔作为发动机的核心关键部件及曲轴的唯一承载体,其加工精度很大程度上决定着发动机的性能和使用寿命,因此,实际生产中对曲轴孔的精度要求很高。此外,曲轴孔镗削加工过程还有能耗高、能效低的特点,其单个机床每日耗电超 40 kW·h,但加工能效却不足 30%^[1],可见其节能潜力很大。因此,研究并优化曲轴孔的加工精度及加工能效具有重要意义。

针对发动机上孔的加工精度问题,国内外学者进行了大量研究。在加工精度建模方面,ZHANG 等^[2]提出了一种多尺度精度模型,可同时在宏观和微观上推导缸孔加工后的尺寸精度和表面纹理。AFZAL 等^[3]提出了一种混合驱动模型,该模型通过神经网络来校正和补偿分析模型的误差,提高了缸孔精加工粗糙度模型的精度。在工艺参数优化方面,VIEIRA 等^[4]将镗孔加工的进给速度、切削速度和夹具位置作为变量,并考虑刀具的悬伸和直径,基于进化算法对孔的粗糙度和圆度进行了优化。SINGH 等^[5]考虑孔的表面粗糙度和刀具磨损,以进给速度、主轴转速和刀

收稿日期:2024-07-02

基金项目:国家自然科学基金(51975075);重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2020jcsx-msxmX0221)

具直径为变量,基于响应面法进行了工艺参数优化。以上研究多是针对普通孔系或缸孔,少有学者针对曲轴孔开展研究。对发动机而言,曲轴孔同轴度影响着曲轴孔与曲轴的装配精度,继而影响发动机稳定性。若曲轴孔同轴度值过大,投入使用后会导致曲轴跳动、轴瓦抱死等故障,因此,需要对曲轴孔同轴度展开研究。

针对数控机床加工能耗问题,国内外学者大多通过建立工艺参数优化模型展开研究。ZHAO等^[6]基于多目标灰狼算法提出了柔性加工工艺参数能效优化方法,最终选取的最优加工刀具和工艺参数组合降低了26.3%的加工能耗。XIAO等^[7]构建了数控加工工艺参数优化模型,其最优解减短了加工过程的总时间,降低了总能耗和加工成本。CHEN等^[1]构建了面向广义能效的工艺参数和加工刀具集成优化模型,并进行了求解,最终结果减少了10.97%的能量足迹和7.96%的生产时间。以上研究多是将能耗和效率进行协同优化,精度仅作为约束,而在实际加工中由于环境、人员以及加工系统的精度等各种不确定因素,加工精度容易超过约束范围,从而导致不满足生产需求,因此,在进行能耗优化时以加工精度作为目标开展协同优化具有很大潜力。

关于能耗和加工精度协同优化的研究,已有学者开展了初步讨论。黎宇嘉等^[8]基于有限元法和多目标粒子群优化算法(MOPSO)探讨了表面粗糙度和能耗与工艺参数的关系,并构建了表面粗糙度和能耗的代理模型。SAHINOGLU^[9]建立了切削参数与能耗和粗糙度的数学方程,并采用多种优化方法确定了最优切削参数,在一定程度上降低了粗糙度和能耗。以上研究表明,综合考虑能耗和加工精度的优化研究潜力巨大,但目前该方面研究不够深入,缺少一个从分析到预测再到协同优化的全过程系统性研究。

综上,本文提出了考虑同轴度的汽车发动机曲轴孔镗削工艺参数节能优化方法。

1 曲轴孔镗削同轴度影响因素

同轴度是一种用以表征加工后孔或轴的实际轴线相对于基准轴线的符合程度的位置精度。国标中通过最小包容法来评定同轴度,如图1所示,当被测孔或轴的实际轴线与基准轴线的最大偏差值即同轴度值没有超过最小包容区域时,则评定同轴度合格,若超过则评定同轴度不合格(参考标准GB/T 1182—2018)。

在曲轴孔镗削加工过程中,缸体由夹具夹紧

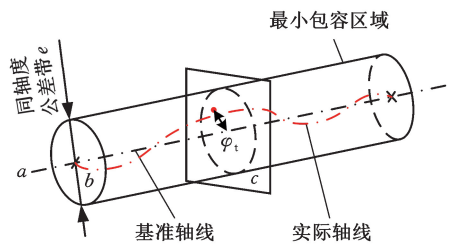


图1 最小区域法评定同轴度

Fig.1 The coaxial degree was evaluated by the minimum zone method

在工作台上,加工时主轴带动线镗刀执行旋转运动,机床将缸体曲轴孔基准轴线与刀杆基准轴线对齐后由工作台带动缸体沿刀杆轴向执行进给运动,且曲轴孔5个孔同时进行镗削,一次走刀完成加工。图2所示为曲轴孔镗削精加工过程,可知,曲轴孔作为典型的同轴孔系,被分为5个间断孔,平行等距排列在缸孔两侧,曲轴孔按进给方向从1到5排序,图中P点为某一加工时刻刀具与3号孔的接触点, F_x 、 F_y 、 F_z 分别为该点受到的切向、径向和轴向切削力。在曲轴孔镗削时,线镗刀刀头不断与曲轴孔进行碰撞、挤压、碎裂,本质是切削力的作用,其中,切向切削力 F_x 和轴向切削力 F_z 负责完成材料去除工作,对曲轴孔同轴度值几乎无影响,而径向切削力 F_y 垂直于曲轴孔内表面,是导致曲轴孔产生径向加工变形,从而导致曲轴孔镗削后出现同轴度值偏高甚至超差的最主要因素。

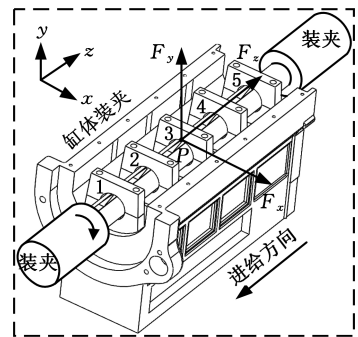


图2 曲轴孔镗削加工示意图

Fig.2 The schematic diagram of boring of the crankshaft hole

图3所示为径向切削力 F_y 对曲轴孔同轴度值的具体影响。图3a为曲轴孔镗削示意图,在图3a中P点处取曲轴孔径向剖面图(图3b),假设曲轴孔镗削加工时的理想镗削轨迹和曲轴孔基准轴线为 T_p 和 V_a ,由于径向切削力 F_y 的影响,加工时使得 T_p 偏离理想位置形成实际镗削轨迹 T'_p ,造成曲轴孔的加工变形,从而导致加工后曲轴孔各截面圆心偏离 V_a 形成实际轴线 V'_a 。对该曲轴孔的同轴度公差带取轴向截面如图3c所示, V'_a 中各截面圆心偏离 V_a 的距离为该截面的同心度值

ξ , 其中最大偏离值即最大同心度值 $\max \xi$ 便是该曲轴孔的同轴度值 φ_i , 若 φ_i 超过生产加工规定的

同轴度要求即图中的同轴度公差带 e (即 $\varphi_i > 0.5e$), 就会导致同轴度值超差。

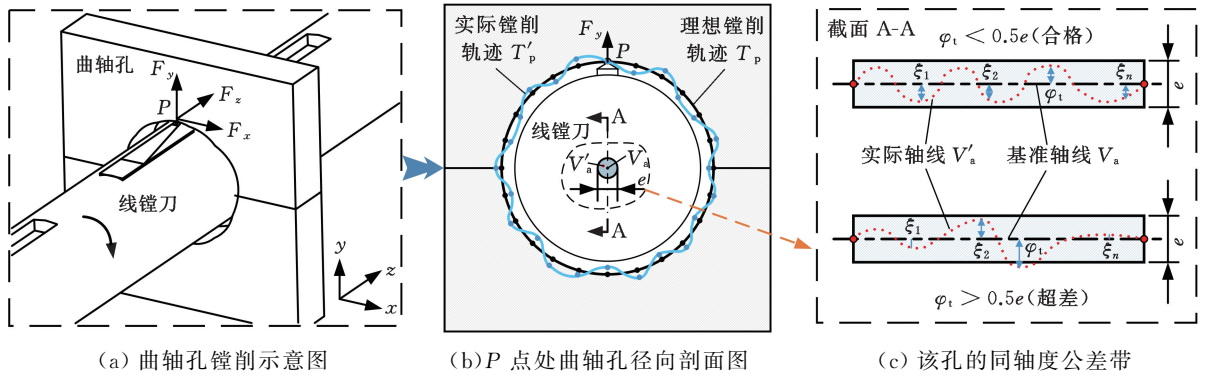


图 3 径向切削力对曲轴孔同轴度值的影响

Fig.3 The influence of radial cutting force on the coaxiality value of crankshaft hole

为了保证曲轴孔镗削后同轴度值不超差, 需对曲轴孔镗削加工时的径向切削力 F_y 进行深入分析。曲轴孔镗削加工过程中的径向切削力

$$F_y = \eta_F F_x \quad (1)$$

$$F_x = C_F a_p^{\alpha_F} f^{\beta_F} v_c^{\gamma_F} n^{\delta_F} K_F \quad (2)$$

式中: f 为进给速度; a_p 为径向切削深度; v_c 为切削速度, m/s , $v_c = \pi Dn / (60 \times 1000)$; n 为主轴转速; D 为线镗刀最大直径, mm ; $C_F, \alpha_F, \beta_F, \gamma_F, \delta_F, K_F$ 为与工件材料和切削条件有关的系数, 可查阅文献[10]得到; η_F 为与刀具材料、刀具参数、工件参数、切削位置等有关的系数。

由式(1)、式(2)可知, 加工时的切向切削力 F_x 由工艺参数决定, 且 F_y 与 F_x 之间存在比例关系 η_F , 在本文刀具和缸体结构参数确定的情况下, η_F 主要由切削位置决定[11]。又由于同轴度受径向切削力影响, 因此, 本文主要研究曲轴孔镗削同轴度受工艺参数和切削位置两方面的影响。

具体问题描述如下: 曲轴孔镗削加工时, 工艺参数为 (n, f, a_p) ; 切削力比例 η_{F-qj} 代表切削位置, 从而反映不同切削位置处的刀杆刚度, q 表示曲轴孔序号, 本文曲轴孔由 5 个孔组成, $q = 1, 2, 3, 4, 5$, j 表示在各曲轴孔上选取的多个测量截面, 一共 n 个截面, $j = 1, 2, \dots, n$ 。同时还综合考虑实际加工中的定位、装夹等随机性误差 γ_q 对曲轴孔同轴度值的影响。

此外, 曲轴孔同轴度值 φ_i 是曲轴孔各孔同轴度值 φ_{i-q} 中的最大值, 各孔同轴度值 φ_{i-q} 则为该孔的最大同心度值 $\max \xi_{qj}$, 因此, 可将曲轴孔同轴度值 φ_i 表示为工艺参数 (n, f, a_p) 、切削力比例 η_{F-qj} 和随机性误差 γ_q 的函数, 即

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i &= \max \varphi_{i-q} = \max(\max \xi_{qj}) \\ \text{s.t.} \quad \xi_{qj} &= f_{\xi}(n, f, a_p, \eta_{F-qj}, \gamma_q) \\ q &= 1, 2, 3, 4, 5; j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2 曲轴孔镗削同轴度值预测模型

根据上述工艺参数和切削位置对同轴度的影响规律, 开展工艺参数优化研究来控制同轴度超差, 这需要较多的实验数据来支撑优化研究, 而通过实验测量只能获得曲轴孔的最大同轴度值, 数据的量和维度太少。本文选择 ABAQUS 软件展开仿真实验, 通过仿真获得的曲轴孔加工数据建立曲轴孔镗削同轴度值预测模型, 通过大量的预测数据来支撑优化模型建立。

2.1 曲轴孔镗削加工有限元仿真

仿真过程主要包括构建几何模型, 划分网格, 设置材料属性, 确定分析类型、接触类型和边界条件, 最后输入工艺参数开始仿真并进行后处理, 仿真流程如图 4 所示, 具体流程如下: ① 使用 SolidWorks 软件建立缸体曲轴孔及线镗刀等几何模型; ② 对模型采用偏置属性划分网格, 确定最优网格数量, 并设置网格为 C3D8R 六面体单元; ③ 设置模型的密度、弹性模量等材料属性, 并选用 J-C 模型[12] 构建材料的本构模型和切削分离准则; ④ 设置模型的接触类型为通用接触, 摩擦因数为 0.2 以及刀具为弹性体且考虑装夹力; ⑤ 采用显式动力学分析来进行曲轴孔镗削加工仿真实验; ⑥ 记录各组工艺参数下各曲轴孔加工时的径向切削力值 F_y 和加工后测量截面上各采样点的坐标 (x, y) 。

2.2 切削力比例计算及同心度值拟合

1) 切削力比例计算。将不同工艺参数组合下仿真加工后采集的各孔各测量截面的径向切削力 F_y 与该参数下通过式(1) 计算得到的切向切削力 F_x 的比值进行算术平均拟合, 得到各孔各测量截面的切削力比例值 η_{F-qj} :

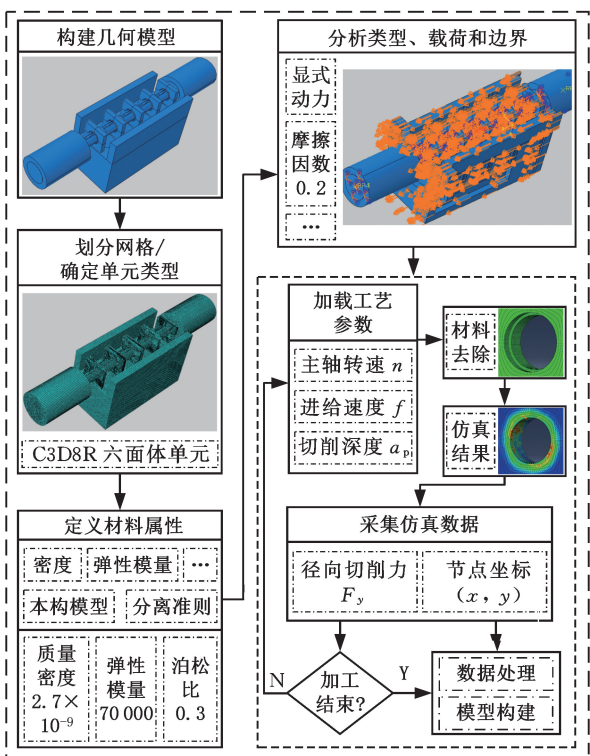


图4 曲轴孔镗削加工仿真流程

Fig.4 Boring simulation flowchart of the crankshaft hole

$$\eta_{F-qj} = \frac{1}{16} \sum_{g=1}^{16} \frac{F_{y-g-qj}}{F_{x-g}} \quad (4)$$

式中： F_{x-g} 为基于式(1)求得的第 g 组工艺参数下的切向切削力； F_{y-g-qj} 为第 g 组工艺参数下进行仿真实验后采集的曲轴孔第 q 个孔第 j 个截面的径向切削力。

2) 同心度值拟合。通过 2.1 节仿真获取的采样点坐标只能反映曲轴孔的加工变形情况，为了更直观地分析镗削加工后曲轴孔同轴度情况，本文通过最小二乘法对同一测量截面上的采样点坐标进行拟合得到该截面同心度值。具体流程如下：读取仿真加工后曲轴孔测量截面上采样点的坐标值 (x_p, y_p) ($p=1, 2, \dots, m$, p 表示在各测量截面上选定的采样点)，并建立最小二乘实际圆方程：

$$R^2 = (x_p - x_0)^2 + (y_p - y_0)^2 = x_p^2 - 2x_0x_p + x_0^2 + y_p^2 - 2y_0y_p + y_0^2 \quad (5)$$

其中， (x_0, y_0) 和 R 为仿真加工后实际圆的圆心和半径。将式(5)化为矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} A = -2x_0 \\ B = -2y_0 \\ C = x_0^2 + y_0^2 - R^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & y_m & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -x_1^2 - y_1^2 \\ -x_2^2 - y_2^2 \\ \vdots \\ -x_m^2 - y_m^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(6)即可求得加工后该截面实际圆心坐标 (x_0, y_0) 。同时，设该截面基准圆心坐标为 (x_a, y_a) ，则该截面同心度值

$$\lambda = \sqrt{(x_0 - x_a)^2 + (y_0 - y_a)^2} \quad (7)$$

最后，对曲轴孔各孔选定相同的多个截面进行测量，则拟合得到各曲轴孔同轴度值为

$$\varphi_{t-q} = \max(\lambda_{qj}) \quad (8)$$

$$q = 1, 2, 3, 4, 5 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

2.3 基于支持向量机回归的同轴度值预测模型

利用最小二乘法拟合得到各孔同轴度值后，本文采用支持向量机回归(SVR)来描述工艺参数、切削位置和同轴度值之间的关系^[13]。将工艺参数数据集 $S = \{n, f, a_p\}$ 和切削力比例 η_{F-qj} 融合，作为输入数据集 $x_i = \{(n, f, a_p, \eta_{F-qj}), i = 1, 2, \dots, h\}$ 。然后引入拉格朗日乘子 α_i 和 α_i^* 求解，得到基于仿真数据的曲轴孔各孔各截面同心度值预测模型：

$$f_{\xi}(x) = \sum_{i=1}^h (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b \quad \left. \begin{array}{l} \sum_{i=1}^h (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \quad 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C \\ K(x_i, x) = \varphi(x_i)^T \varphi(x) = \exp(-\gamma_s \|x_i - x\|^2) \end{array} \right\} \quad (9)$$

式中： $K(x_i, x)$ 为核函数，本文采用径向基函数(RBF)作为核函数； x 为核函数的中心； γ_s 为核函数系数； C 为惩罚因子。

由第 1 节分析可知，在机床、刀具和辅助设备工艺条件相同的情况下，仍有随机性误差对同轴度有一定影响，且随机性误差对同轴度的影响难以通过具体的参数或模型表示，因此，本文将工厂使用的经验工艺参数下的历史数据与仿真数据对比拟合来获得各孔的随机性误差 γ_q 。同时，考虑到零件损耗、环境以及人工等因素也会对机床切削加工产生影响，本文还加入高斯噪声 ϵ ($\epsilon \sim N(\mu, \sigma^2)$) 来模拟加工时的不确定性^[14]。

本文综合考虑基于仿真数据的同心度值预测模型、各曲轴孔上的随机性误差 γ_q 以及模拟实际加工中不确定性的高斯噪声 ϵ ，最终曲轴孔各孔各截面同心度值预测模型为

$$\xi_{qj}(x) = f_{\xi}(x) + \gamma_q + \epsilon \quad (10)$$

$$q = 1, 2, 3, 4, 5 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

本文发动机曲轴孔由 5 个孔组成，每个孔上取相同的 n 个截面进行测量，因此，对式(10)进行转换，得到最终曲轴孔镗削各孔同轴度值预测模型为

$$\varphi_{t-q}(x) = \max \xi_{qj}(x) \quad (11)$$

3 面向同轴度与能效的汽车发动机曲轴孔镗削加工工艺参数优化

3.1 多目标优化模型

3.1.1 决策变量

对于曲轴孔镗削加工过程，机床型号、缸体材料、刀具属性以及切削位置等因素都会对同轴度

和能效产生影响,但实际加工中,除工艺参数以外的其他因素均已确定,在优化过程中不再考虑。因此,本文选取主轴转速 n 、进给速度 f 和径向切削深度 a_p 三个工艺参数作为决策变量。

3.1.2 优化目标

在前文分析中已确定同轴度值作为优化目标之一,而通过阅读国内外文献以及在本文实际研究过程中发现,同轴度精度提高会导致加工能效的降低,使得能耗成本增加。基于此,本文通过信噪比对比分析了 n 、 f 、 a_p 三个工艺参数对同轴度值和比能的影响规律,如图5所示,三个工艺参数对同轴度值的影响程度为 $a_p > f > n$,对比能(SEC)的影响程度为 $f > n > a_p$ 。变量水平不同对优化目标有不同影响,且部分工艺参数对两个优化目标的影响规律也不同,反映出了比能和同轴度之间存在明显冲突关系,因此,需要将能效作为优化目标,通过优化获得合理的最优变量。

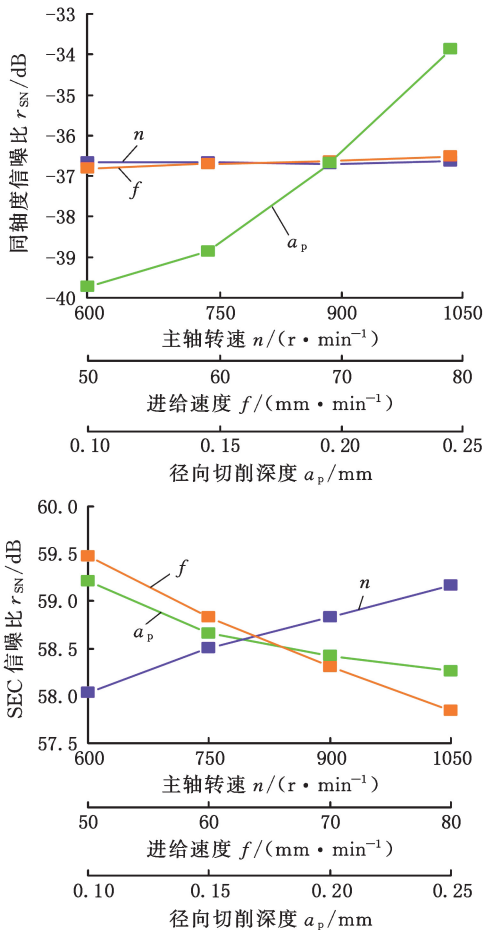


图5 同轴度和比能的信噪比分析

Fig.5 S/N analysis for coaxiality value and SEC

3.1.2.1 能效目标函数

数控加工中心在镗削曲轴孔时所消耗的能耗包括启动、待机、换刀、空切、切削5个时段的能耗^[1]。在实际加工中,机床启动时间极短,能耗很小,换刀能耗固定且不受工艺参数影响,因此,本

文忽略这两个时段的能耗,主要针对待机、空切、切削时段能耗进行优化,并选取比能作为能效目标。各个时段能耗分析如下。

1) 数控加工中心待机能耗 E_{st} 。待机能耗为机床启动但主轴和各进给轴未启动时的能耗,其功率一般为定值。本文将待机功率取定值计算,表示为

$$E_{st} = \int_0^{t_{st}} P_{st} dt = P_{st} t_{st} \quad (12)$$

式中: P_{st} 为待机功率; t_{st} 为待机时间。

2) 数控加工中心空切能耗 E_{air} 。主轴稳定旋转、工作台轴向进给但未切削工件所产生的能耗即空切能耗。空切能耗主要受转速影响。空切能耗 E_{air} 表示为

$$E_{air} = \int_0^{t_{air}} P_{air} dt = P_{air} t_{air} \quad (13)$$

式中: P_{air} 为空切功率; t_{air} 为空切时间。

3) 数控加工中心切削能耗 E_c 。刀具切削工件时所产生的能耗即切削能耗。切削能耗受工艺参数影响很大,工艺参数不同,切削能耗也就不同。切削能耗 E_c 表示为

$$E_c = \int_0^{t_c} P_c dt = P_c t_c \quad (14)$$

式中: P_c 为切削功率; t_c 为切削时间。

基于上述分析,曲轴孔镗削加工过程能效目标函数为

$$F_{SEC} = \frac{E_{st} + E_{air} + E_c}{V} \quad (15)$$

式中: V 为物料去除体积。

3.1.2.2 同轴度目标函数

由第1节可知,曲轴孔同轴度值是否出现超差由其5个孔中的最大同轴度值 φ_{t-max} 决定,因此用 φ_{t-max} 表征汽车发动机曲轴孔镗削同轴度。同轴度值与各种工艺条件、装夹方法以及工艺参数相关。实际加工中,工艺条件和装夹方法已经确定,切削位置也固定,各孔同轴度值主要由工艺参数决定,因此,同轴度目标函数为

$$\varphi_{t-max} = \max(\varphi_{t-q}(n, f, a_p), q = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (16)$$

3.1.3 约束条件

实际的曲轴孔镗削加工受加工环境和加工条件的限制。如,镗削的工艺参数主要受设备、刀具自身性能的限制,需要控制在设备和刀具制造商提供的参数范围内;镗削过程中的功率、切削力等则受数控加工中心本身的性能阈值约束。具体约束条件如下:

$$\begin{aligned} n_{min} &\leq n \leq n_{max} & f_{min} &\leq f \leq f_{max} \\ a_{pmin} &\leq a_p \leq a_{pmax} & \Delta &= a_p^r + a_p^f \\ P_c &\leq \eta P_{max} & F_c &\leq F_{cmax} \end{aligned}$$

式中： n_{\min} 、 n_{\max} 分别为数控加工中心主轴所允许的最小与最大转速； f_{\min} 、 f_{\max} 分别为数控加工中心所允许的最小与最大进给速度； $a_{p\min}$ 、 $a_{p\max}$ 分别为数控加工中心所允许的最小与最大径向切削深度； Δ 为总加工余量； a_p^r 、 a_p^f 分别为半精加工和精加工的径向切削深度； η 为数控加工中心功率的有效系数； P_{\max} 为数控加工中心额定功率； $F_{c\max}$ 为数控加工中心的最大切削力。

综上，建立综合考虑能效和同轴度的曲轴孔镗削加工工艺参数多目标优化模型如下：

$$\min F(n, f, a_p) = (\min F_{\text{SEC}}, \min \varphi_{t-\max}) \quad (17)$$

$$\text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \\ f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \\ a_{p\min} \leq a_p \leq a_{p\max} \\ \Delta = a_p^r + a_p^f \\ P_c \leq \eta P_{\max} \\ F_c \leq F_{c\max} \end{array} \right.$$

3.2 基于改进蜻蜓算法的多目标优化模型求解

多目标蜻蜓算法 (multi objective dragonfly algorithm, MODA) 在 DA 基础上融入了 Pareto 支配关系，引入外部档案以保存非劣解，并采用轮盘赌法和自适应网格法从外部档案里为蜻蜓选择食物和天敌位置^[15]。但 MODA 在初始化时，蜻蜓的步长和位置是随机的，会对算法的收敛精度和寻优效率有影响，因此，本文引入精英反向学习策略 (elite opposition-based learning, EOBL) 同时搜索可行解和精英反向解，比较两者的适应度，选择最优解作为下一代，进一步提高种群的多样性以及算法的寻优性能和收敛精度。最终提出 EOBL-MODA 算法，算法流程如图 6 所示。

4 案例分析及验证

4.1 实验设备及条件

为了验证所提方法的有效性和可行性，本文在重庆某发动机制造厂的 MAZAK HCN6000ST 数控加工中心上开展曲轴孔加工实验。如图 7 所示，机床额定功率 88.3 kW，功率有效系数 0.8；实验所用线镗刀长 537.7 mm，直径 48 mm，刀杆材料为合金钢，刀头材料为硬质合金 YG8；待加工缸体型号为 H15RT，曲轴孔部位内径小于 48 mm，宽 18 mm，两孔间距 82 mm，材料为铝合金 YL113；各材料属性如表 1 所示。加工过程采用主轴旋转带动刀具旋转，缸体沿轴向进给走刀。

基于正交试验法设计 $L_{16}(4^3)$ 曲轴孔镗削加工仿真实验，各因素水平如表 2 所示。仿真模型的网格数共 365 359；各组实验都加工到曲轴孔内径为 48 mm；仿真结束后，记录每组工艺参数下各曲轴孔的径向切削力值 F_y 和各测量截面上各采

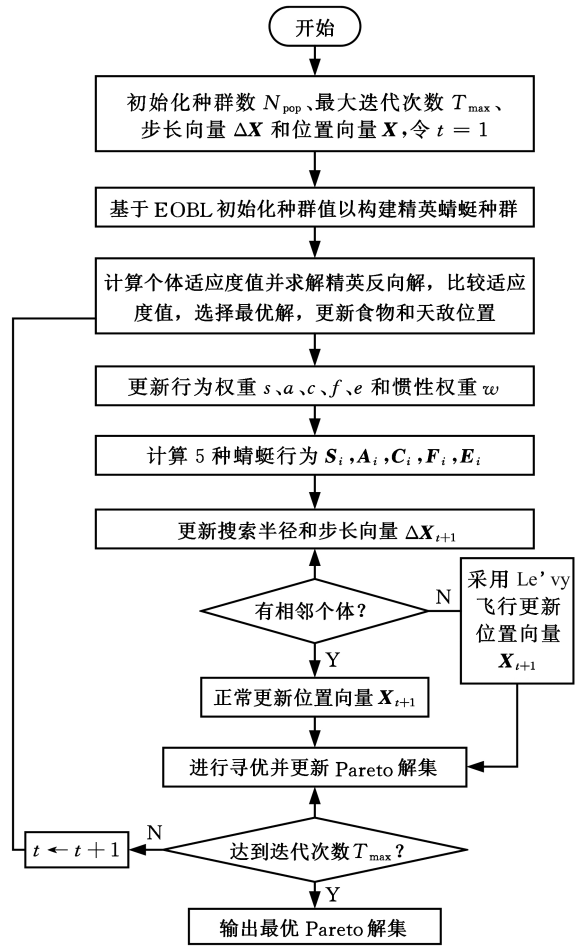


图 6 EOBL-MODA 算法流程图

Fig.6 Flow chart of EOBL-MODA algorithm

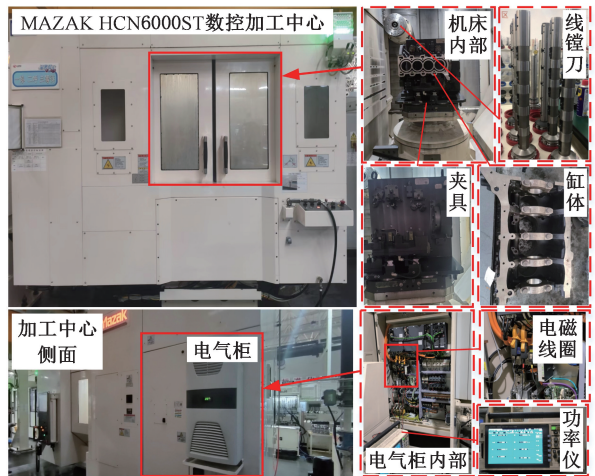


图 7 实验设备

Fig.7 Laboratory equipment

表 1 实验中所涉及材料属性

Tab.1 The material properties involved in the experiment

部件	材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性 模量/ GPa	抗拉 强度/ MPa	屈服 强度/ MPa
缸体	YL113	2740	0.33	70	230	170
刀杆	合金钢	7700	0.28	210	724	620
刀头	YG8	14 500	0.22	640	10	

表 2 仿真实验各因素水平表

Tab.2 Factor levels of simulation experiments

因素水平	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	$f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	a_p/mm
1	600	50	0.10
2	750	60	0.15
3	900	70	0.20
4	1050	80	0.25

样点的坐标 (x, y) ; 最后, 对仿真数据进行处理, 以获得各孔各测量截面的切削力比例 η_F 及在每组工艺参数组合下的同心度值 ξ 。其中, 选取各曲轴孔宽度为 3、7、11、15 mm 处的截面圆周作为 4 个测量截面, 各截面圆周上选取 8 个对称的采样点, 测量位置的选取如图 8 所示。

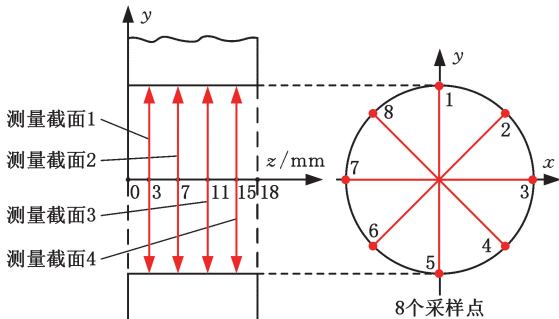


图 8 曲轴孔测量截面及采样点

Fig.8 The measure sections and points of the crankshaft hole

4.2 同轴度值预测案例分析

4.2.1 数据准备

为保证有充足的同轴度值预测模型训练数据, 本文开展了 16 组仿真实验, 每组实验采集选定的 20 个测量截面的径向切削力值 F_y 和各测量截面上选定的 8 个采样点的坐标 (x, y) , 并采用 2.2 节数据拟合方法对采集的仿真数据进行拟合, 得到 16 组工艺参数下镗削仿真加工后曲轴孔 5 个孔的同轴度值 φ_{1-5} , 如表 3 所示, 其中各孔的同轴度值为该孔 4 个测量截面的最大同心度值。

4.2.2 预测结果及对比

为保证模型训练效果, 将 16 组工艺参数下共 320 条数据用于训练, 每组参数均包含 20 个测量截面的同心度值。同时, 将工厂所使用的经验工艺参数下的历史数据与其仿真数据进行对比并拟合, 得到各曲轴孔的随机性误差分布为 $\gamma_1 \sim N(0.000\ 21, 0.002\ 12^2)$, $\gamma_2 \sim N(0.000\ 24, 0.0031^2)$, $\gamma_3 \sim N(0.000\ 44, 0.003\ 88^2)$, $\gamma_4 \sim N(0.000\ 22, 0.003\ 01^2)$, $\gamma_5 \sim N(0.000\ 17, 0.0021^2)$ 。另外, 为验证同轴度值预测模型的精度, 将 $n = 850\ \text{r/min}$, $f = 75\ \text{mm/min}$, $a_p = 0.13\ \text{mm}$ 的仿真实验值与模型测试值进行对比, 结果如图 9 所示。

表 3 各组工艺参数下曲轴孔 5 个孔的同轴度值

Fig.3 The coaxiality value of 5 holes of crankshaft hole under each group of process parameter

序号	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	$f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	a_p/mm	$\varphi_i/\mu\text{m}$				
				孔 1	孔 2	孔 3	孔 4	孔 5
1	600	50	0.10	5.43	8.87	10.03	8.66	5.23
2	600	60	0.15	5.89	9.82	11.35	9.73	5.72
3	600	70	0.20	7.61	12.40	14.69	12.29	7.44
4	600	80	0.25	10.67	16.95	20.45	16.89	10.62
5	750	50	0.15	5.78	9.61	11.13	9.45	5.65
6	750	60	0.10	5.54	8.96	10.17	8.76	5.30
7	750	70	0.25	10.49	16.80	20.29	16.75	10.45
8	750	80	0.20	7.8	12.89	14.95	12.73	7.65
9	900	50	0.20	7.23	12.05	14.38	11.94	7.07
10	900	60	0.25	10.35	16.70	20.21	16.64	10.32
11	900	70	0.10	5.62	9.08	10.31	8.99	5.44
12	900	80	0.15	6.22	10.08	11.64	10.00	6.13
13	1050	50	0.25	10.19	16.58	20.10	16.52	10.15
14	1050	60	0.20	7.40	12.25	14.61	12.19	7.31
15	1050	70	0.15	6.08	9.97	11.54	9.88	5.99
16	1050	80	0.10	5.75	9.27	10.75	9.19	5.57

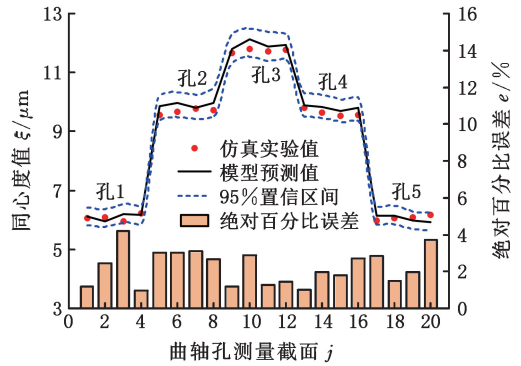


图 9 仿真实验值与模型测试值对比

Fig.9 Comparison of simulated and predicted values

由图 9 可知, 曲轴孔镗削后 20 个测量截面处同心度值的模型预测值与仿真实验值的变化趋势基本吻合, 所有数据均在 95% 置信区间内, 并且绝对百分比误差均小于 5%, 表明本文所建立的曲轴孔镗削同轴度值预测模型是有效的。

此外, 为了验证本文基于 SVR 建立的同轴度值预测模型的准确性, 将其与使用高斯过程回归 (Gaussian process regression, GPR) 和径向基函数 (radial basis function, RBF) 建立的模型进行对比分析, 同样采用上一段所使用的工艺参数组合进行测试, 测试结果如图 10 所示, 评价指标如表 4 所示。由图 10 和表 4 可知, 本文 SVR 同轴度值预测模型有更好的拟合效果; 同时, 均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAD) 和决定系数 R^2 均优于 GPR 和 RBF, 且 R^2 值更接近于 1, 体现了本文模型的优越性和准确性。

4.3 工艺参数节能优化案例分析

4.3.1 能效模型构建

本文采用数据驱动构建曲轴孔镗削加工能效

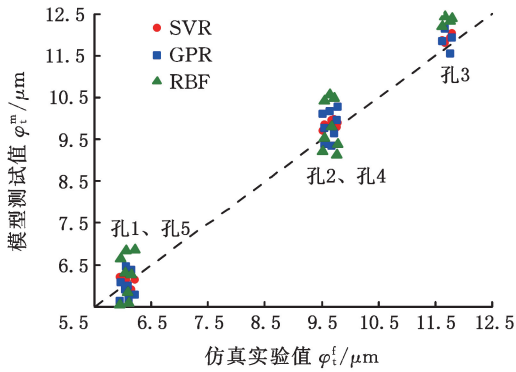


图 10 三种方法在测试参数下的结果

Fig.10 The results on test parameters of the three models

表 4 三种方法结果评价指标

Fig.4 Evaluation indexes of the test results of three methods

测试参数	模型	RMSE	MAD	R ²
$n=850 \text{ r/min}$	SVR	0.0974	0.0318	0.9573
$f=75 \text{ mm/min}$	GPR	0.1257	0.0473	0.9158
$a_p=0.13 \text{ mm}$	RBF	0.1624	0.0534	0.8765

模型。基于实际加工经验,将待机功率和待机时间设为定值,并采用 RBF、响应面法(response surface method,RSM)和克里金法(Kriging)三种方法来拟合空切功率和切削功率,以建立两个时段的能效模型。用于建立能效模型的数据集共 64 条,如表 5 所示,均采集实际加工中的数据,数据集的输入为工艺参数,输出为功率值,选取 15%数据集作为测试集。使用测试集测试三种方法建立的能效模型,评价指标如表 6 所示。

表 5 能效建模的数据集

Tab.5 Data set for energy efficiency modeling

实验序号	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	a_p/mm	P_{air}/kW	P_c/kW
1	600	50	0.10	9.29	13.41
2	600	60	0.15	9.34	13.46
3	600	70	0.20	9.31	13.53
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
63	1050	70	0.20	10.52	16.14
64	1050	80	0.25	10.54	16.22

表 6 三种方法结果评价指标

Tab.6 Evaluation indexes of the test results of three methods

目标模型	空切功率 P_{air}			切削功率 P_c		
	RMSE	MAD	R ²	RMSE	MAD	R ²
RBF	24.4685	7.3511	0.9256	33.5427	11.6623	0.9522
RSM	28.6624	8.8452	0.9174	46.7634	18.9246	0.8987
Kriging	18.3351	5.4627	0.9617	35.4825	14.7264	0.9348

由表 6 可知,以空切功率为目标时,基于 Kriging 的能效模型在 RMSE、MAD、R² 上优于另外两种模型;同理,以切削功率为目标时,RBF 能效模型更优。综上,选择 Kriging 和 RBF 方法分别构建空切能效模型和切削能效模型。

4.3.2 工艺参数优化结果及分析

本文采用 MATLAB 编写优化算法,改进的多目标蜻蜓算法的参数设置如下:蜻蜓种群数量 $N_{\text{pop}}=200$,最大迭代次数 $T_{\text{max}}=150$,Pareto 解集 $N=20$ 。求解后,得到的 Pareto 解集如图 11 红色点集所示。在 Pareto 解集中,综合对比最大同轴度值最小的解、比能最小的解和综合最优解,即第 1、第 20 和第 10 点。第 1 个点虽然最大同轴度值小,但比能偏大,不符合加工需求;最后一个点虽然比能小,但最大同轴度值过大,超过生产加工所允许误差范围。综合比较,选择第 10 个点作为考虑同轴度的曲轴孔镗削工艺参数节能优化的最优解。同时,为验证本文多目标优化算法的有效性,将以比能和最大同轴度值为目标的多目标优化结果与单独优化比能、单独优化最大同轴度值以及经验方案进行对比,结果如表 7 所示。

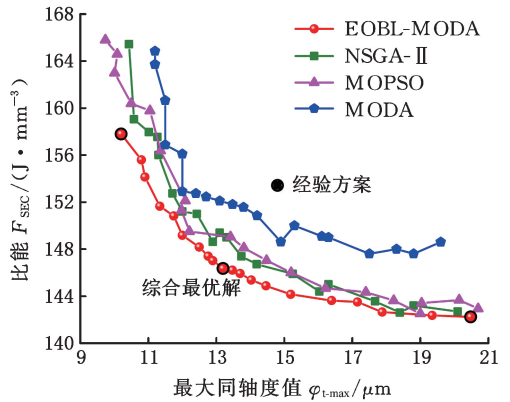


图 11 优化问题的 Pareto 解集

Fig.11 Pareto solution sets of optimization problem

表 7 优化结果对比

Tab.7 Comparison of optimization results

方案	优化类型	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	a_p/mm	$\varphi_{t-\text{max}}/\text{mm}$	$F_{\text{SEC}}/(\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$
1	综合 φ_t 和 SEC	712	73.8	0.148	13.2	146.3
2	单独 SEC	621	79.6	0.245	20.6	141.5
3	单独 φ_t	1030	51.9	0.105	9.9	160.7
4	经验方案	950	65.0	0.170	14.8	153.4

由表 7 可知,综合优化与经验方案相比,主轴转速和径向切削深度减小较多,进给速度增大较多,最终最大同轴度值降低了 10.81%,比能降低了 4.61%。此外,与单独优化比能相比,最大同轴度值降低了 35.92%,但比能增大了 3.41%。与单独优化最大同轴度值相比,比能降低了 8.91%,但最大同轴度值增大了 33.33%。由此可知,对最大同轴度值或比能开展单目标优化都存在不足之处,会造成另一目标的逆向增长,不利于实现综合控制。因此,本文综合考虑比能和最大同轴度值两个目标,选择综合优化方案作为本文最优工艺

参数组合,以此在满足曲轴孔镗削加工同轴度的生产需求的前提下,尽可能提高加工能效。

此外,为验证所提出 EOBL-MODA 算法的优越性,将其与多目标粒子群算法(multi objective particle swarm optimization, MOPSO)、二代非支配排序遗传算法(non-dominated swarm genetic algorithms- II, NSGA- II)以及多目标蜻蜓算法(MODA)进行对比,4 个算法的 Pareto 解集如图 11 所示。由图 11 可知,MODA 的 Pareto 解集分布性相对还行,但整体而言,其收敛性较差;其次是 NSGA- II 和 MOPSO,这两种经典算法的 Pareto 解集都比较逼近 EOBL-MODA,有着不错的优越性;所提出的 EOBL-MODA 与其他三种算法相比,得到的 Pareto 解集最优。

另外,选取了超体积(hyper volume, HV)和反世代距离(inverted generational distance, IGD)作为评价指标,当 HV 越高且 IGD 越低时,说明算法的收敛性和多样性越好,对比结果如图 12 所示(实线为 HV,虚线为 IGD)。由图 12 可知,EOBL-MODA 算法相比于其他几种算法,收敛速度更快且 HV 和 IGD 的值更好,说明 EOBL-MODA 算法在收敛性和多样性方面具有一定的优势。因此,所提出的 EOBL-MODA 算法在求解本文汽车发动机曲轴孔镗削同轴度和能效协同优化问题上优于其他算法。

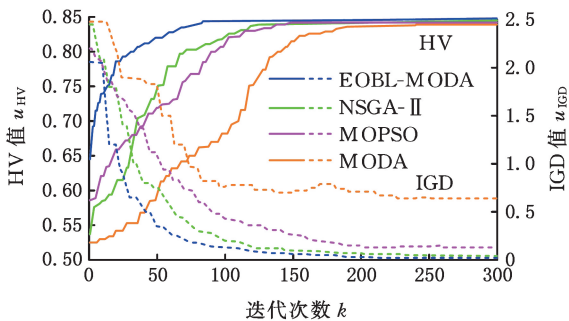


图 12 HV 和 IGD 指标值结果

Fig.12 The results of HV and IGD metric

4.4 实验验证

为验证仿真数据能否真实反映实际加工情况,在重庆某发动机制造厂的 MAZAK HCN6000ST 数控加工中心上进行了实验验证,选取表 7 方案 1、2、3 的工艺参数组合作为验证数据集,各方案下均开展了 3 次实验,每次实验均采集并计算得到比能和最大同轴度值,最后各方案分别取 3 次实验的平均值。

曲轴孔镗削加工实验中,通过将 HIOKI 3390 功率分析仪与机床电气柜相连来采集机床运行时各时段功率数据。在实验完成后,通过产

线上的 MARPOSS 质量检测机检测曲轴孔同轴度合格与否,并在检测完成后输出曲轴孔 5 个孔中的最大同轴度值 $\varphi_{t,max}$ 。测量现场如图 13 所示。实验结果如表 8 所示。

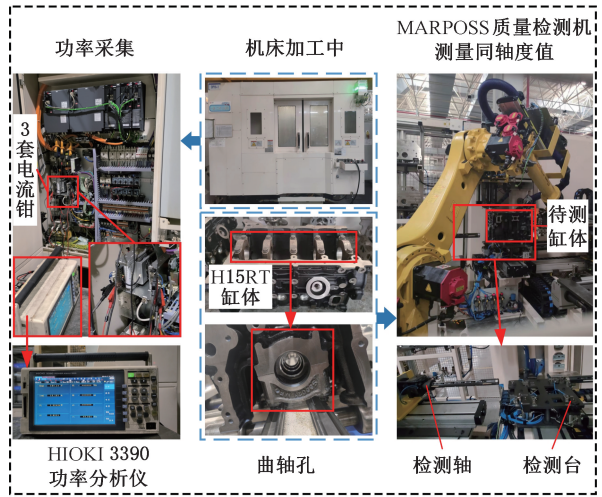


图 13 测量现场

Fig.13 Measurement site

表 8 优化结果与实验结果对比

Tab.8 Comparison of optimization and experimental

方案	最大同轴度值			比能		
	仿真结果/mm	实验结果/mm	误差率/%	仿真结果/(J·mm ⁻³)	实验结果/(J·mm ⁻³)	误差率/%
1	0.0132	0.0139	5.3	146.3	150.5	2.82
2	0.0206	0.0218	5.82	141.5	147.9	4.52
3	0.0099	0.0107	8.08	160.7	166.4	3.55

结果表明,在三种方案中,最大同轴度值的最大误差率为 8.08%,最小误差率为 5.3%,平均误差率为 6.4%,均小于 10%,说明了仿真数据可以较为准确地反映真实曲轴孔镗削加工后的同轴度值。同时,比能在三种方案下的实验结果误差率均小于 5%,表明了所建立的汽车发动机曲轴孔镗削同轴度值预测模型以及面向同轴度与能效的工艺参数优化模型的可靠性较高,能够比较准确地反映真实加工情况,能对汽车发动机曲轴孔镗削加工的比能和同轴度值实现可靠的预测和优化。

5 结论

1) 本文分析了曲轴孔镗削同轴度影响因素,建立了基于有限元和 SVR 的曲轴孔镗削同轴度值预测模型。该模型综合考虑了工艺参数、切削力比例和随机性误差对同轴度的影响。

2) 基于实际数据构建了数据驱动的能效模型,并建立了以工艺参数为变量,能效和同轴度为目标,加工工艺条件为约束的工艺参数优化模型,最后利用改进的多目标蜻蜓优化算法进行求解。

结果表明,综合优化实现了能效和同轴度的协调最优。通过实验验证了本文模型的可靠性。

本文在研究考虑同轴度的汽车发动机曲轴孔镗削工艺参数节能优化时并未考虑机床老化和刀具磨损的影响,因此,下一步工作的重点是考虑机床老化和刀具磨损的影响,开展汽车发动机曲轴孔镗削工艺参数节能优化研究。

参考文献:

- [1] CHEN Xingzheng, LI Congbo, YANG Qingshan, et al. Toward Energy Footprint Reduction of a Machining Process[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021, 19(2): 772-787.
- [2] ZHANG X, ZHOU Z, YAO Z, et al. Analytically Predicating the Multi-dimensional Accuracy of the Honed Engine Cylinder Bore[J]. Journal of Tribology, 2020, 142(9):091201.
- [3] AFZAL B, ZHANG X, SRIVASTAVAA K. Enhanced Hybrid Model to Predict the Surface Roughness of Honed Cylinder Bore[J]. Journal of Tribology, 2022, 144(1):011201.
- [4] VIEIRA J T, PEREIRA R B D, FREITAS S A, et al. Multi-objective Robust Evolutionary Optimization of the Boring Process of AISI 4130 Steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112:1745-1765.
- [5] SINGH M, DHIMAN S, SINGH H, et al. Optimization of Modulation-assisted Drilling of Ti-6Al-4V Aerospace Alloy via Response Surface Method[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2020, 35(12):1313-1329.
- [6] ZHAO X, LI C, CHEN X, et al. Data-driven Cutting Parameters Optimization Method in Multiple Configurations Machining Process for Energy Consumption and Production Time Saving[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing—Green Technology, 2022, 9:1-20.
- [7] XIAO Y, JIANG Z, GU Q, et al. A Novel Approach to CNC Machining Center Processing Parameters Optimization Considering Energy-saving and Low-cost[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 59:535-548.
- [8] 黎宇嘉, 黄兵, 鲁娟, 等. 基于有限元模拟的 Ti6Al4V 铣削过程参数多目标优化[J]. 中国机械工程, 2021, 32(13):1555-1561.
- LI Yujia, HUANG Bing, LU Juan, et al. Multi-objective Optimization of Cutting Parameters in Ti6Al4V Milling Processes Based on Finite Element Simulation[J]. China Mechanical Engineer-

ing, 2021, 32(13):1555-1561.

- [9] ŞAHINOĞLU A. Investigate Energy Efficiency, Cutting Force and Surface Roughness in Hard Turning of AISI S1 Steel for Sustainable Manufacturing [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2024, 238(7):2772-2781.
- [10] 艾兴, 肖诗刚. 切削用量简明手册[M]. 3版. 北京:机械工业出版社, 1994.
- AI Xing, XIAO Shigang. Concise Manual of Cutting Parameters [M]. 3th edition. Beijing: China Machine Press, 1994.
- [11] 卢秉恒. 机械制造技术基础[M]. 4版. 北京:机械工业出版社, 2017.
- LU Bingheng. Foundation of Mechanical Manufacturing Technology[M]. 4th edition. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [12] ZHANG Y, YAO S, HONG X, et al. A Modified Johnson-Cook Model for 7N01 Aluminum Alloy Under Dynamic Condition[J]. Journal of Central South University, 2017, 24(11):2550-2555.
- [13] NAJM S M, PANITI I. Predict the Effects of Forming Tool Characteristics on Surface Roughness of Aluminum Foil Components Formed by SPIF Using ANN and SVR[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2021, 22:13-26.
- [14] ZHU H T, GENG G Q, YU Y, et al. Probabilistic Analysis on Parametric Random Vibration of a Marine Riser Excited by Correlated Gaussian White Noises [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2020, 126:103578.
- [15] MIRJALILI S. Dragonfly Algorithm: a New Meta-Heuristic Optimization Technique for Solving Single-objective, Discrete, and Multi-objective Problems[J]. Neural Computing and Applications, 2016, 27(4):1053-1073.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:张登永,男,1998年生,硕士研究生。研究方向为绿色制造、智能制造。李聪波*(通信作者),男,1981年生,教授、博士研究生导师。研究方向为绿色制造、智能制造、制造系统能效。E-mail:congboli@cqu.edu.cn。

本文引用格式:

张登永,李聪波,吴少卿,等.考虑同轴度的汽车发动机曲轴孔镗削工艺参数节能优化[J].中国机械工程,2025,36(6):1280-1289.

ZHANG Dengyong, LI Congbo, WU Shaoqing, et al. Processing Parameter Energy-saving Optimization for Boring Automobile Engine Crankshaft Holes Considering Coaxiality[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1280-1289.