

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.016

高速滚齿加工工艺参数 GABP 预测模型 NSGA-II 优化

王玉峰¹, 于淼², 李峰³

(1. 濮阳技师学院, 河南 濮阳 457099;

2. 河南经济贸易技师学院, 河南 新乡 453001;

3. 河南科技大学, 河南 郑州 450064)

摘要: 为了进一步优化高速条件下滚齿工艺参数, 以遗传反向传播算法 (GABP) 为目标设计预测模型, 获得匹配滚齿工艺最优条件。采用新的非支配遗传算法 NSGA-II 设计相应的优化数学模型, 优化达到最低能耗以及最长的刀具使用期限。实验结果表明: 该模型获得 0.000 425 的最佳误差, 达到出色的稳定性。GABP 算法使刀具寿命误差减小 16%, 能量消耗减小 36%, 具备更优收敛性能。经过优化的 Pareto 解集在加工能耗和刀具寿命有显著下降, 实现加工能耗和刀具寿命处于最佳平衡状态。该研究结果对优化滚齿加工工艺参数以及提高机加工效率具有很好的实际应用价值。

关键词: 滚齿; 工艺参数; BP 神经网络; 遗传算法; 多目标优化

中图分类号: TH161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0083-04

Optimization of NSGA-II GABP Prediction Model for Machining Parameters of High Speed Gear Hobbing Machine

WANG Yufeng¹, YU Miao², LI Feng³

(1. Puyang Technician College, Puyang 457099, China;

2. Henan Economic and Trade Technician College, Xinxiang 453001, China;

3. Henan University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China)

Abstract: To further optimize the gear hobbing process parameters under high speed conditions, the genetic back propagation algorithm (GABP) is used as the target to set a prediction model and obtain the optimal conditions for matching gear hobbing process. A new non-dominated genetic algorithm NSGA-II is applied to design the corresponding optimization mathematical model, which optimizes the lowest energy consumption and the longest tool life. The experimental results show that the optimal error of the model acquires 0.000 425 with excellent stability. GABP algorithm can reduce the tool life error by 16%, energy consumption by 36%, with better convergence performance. The optimized Pareto solution set has a significant decrease in the machining energy consumption and tool life, achieving an optimal balance between the machining energy consumption and tool life. The research has a very good practical value for optimizing hobbing process parameters and improving machining efficiency.

Keywords: gear hobbing; process parameters; BP neural network; genetic algorithm; multi-objective optimization

0 引言

当前, 随着汽车动力传输控制技术的快速进步, 对齿轮零件制造过程中尺寸精度的控制也提出了更高的标准, 由此产生了许多创新加工技术^[1], 尤其是高速滚齿制造工艺因其能够满足大批量生产的高效率需求而备受青睐。然而, 在这一过程中, 由于热量难以迅速且均匀地散发, 导致局部区域温度明显上升, 进而引发齿轮内部组织结构发生应力集中, 这直接降低了齿轮精度与运行效能^[2-3]。针对以上情况, 必须对齿轮高速加

工方法进行深入分析调整, 以便有效散发切削产生的热量, 从而降低能耗并提高产品整体品质, 保证高速滚齿在加工期间能够实现最佳性能^[4]。

目前, 关于滚齿加工技术的优化工作主要集中在处理时长、尺寸控制以及振动调控等多个方面^[5]。丁国龙等^[6]研究不同频段尺度内子频带信号的幅值分布规律, 重构斜齿轮加工同步误差, 同步误差解耦到参与联动的各伺服轴, 验证补偿方法的有效性, 提高了斜齿轮的加工精度。樊隆祥等^[7]基于贝叶斯网络建立滚齿机热误差模型, 对聚类结果筛选得到建模所需的热关键点, 减少

基金项目: 河南省科技创新人才计划项目 (174100510007)

第一作者简介: 王玉峰 (1974—), 男, 河南固始人, 高级实习指导教师, 高级工程师, 硕士, 研究方向为数控机床装备制造与设计, yugaishao25824@163.com。

热误差实验测温的传感器数量,所提模型能有效预测滚齿机的热误差。程耀楠等^[8]提出加工工艺参数选择影响齿轮加工效率和机床加工误差优化平衡指标,分析优化目标和约束条件,总结出高速干式滚齿加工工艺参数优化中存在的技术难点。王四宝等^[9]提出基于子种群自适应思维进化算法优化反向传播网络的滚齿加工预测方法,有效提升神经网络的热-力变形预测准确度,所提模型平均预测精度为 95% 以上,具有很高的有效性和泛化性。

学者们在探讨滚齿加工能耗方面大多集中于加工参数设置的内容。目前的研究方法存在反馈不足的问题,神经网络正好弥补该方面的缺陷。班希翼等^[10]研究了高速条件下的滚齿工艺参数设置与优化方面的工作,采用非支配遗传算法建立高速条件下的滚齿工艺参数优化模型,以遗传反向传播神经网络预测适应度函数,确保加工能耗和刀具使用寿命同时达到最佳状态。本文在前人研究的基础上,充分考虑目标模型求解的效率,深入剖析了齿轮切削过程中对机床进行独立参数控制的工作,同时制定了实验计划以确定最佳参数范围,进而构建了优化滚齿加工参数条件下的能耗评价系统。

1 本文方法

1.1 GABP 算法

遗传优化神经网络(GABP)通过特定编码方式及迭代计算的过程,有效克服了传统 BP 网络面临的问题,显著增强了预测结果准确性^[11]。

利用 GABP 算法进行预测,并对齿轮加工工艺数据集进行训练,从而达到优化的效果。将 H 和 P 作为加工和输入集合,同时将加工效果集合 O_p 及约束集合 S 作为输出集合。为了确保数据量和计算效率之间的平衡性,设计了一种含单一隐层的网络结构,隐层和输出层、输入层和隐层的神经元数目分别为 N 和 M ,隐层节点数目 C_M 通过以下公式进行确定。

$$\sum_{i=0}^N C_M > K \quad (1)$$

式中 K 为样本个数。

考虑到每个输入项量纲不同,因此需先完成样本参数的归一化:

$$d' = \frac{2(d-d_{\min})}{d_{\max}-d_{\min}} - 1 \quad (2)$$

式中 d, d' 分别对应初始数据与处理后数据。

GABP 优化参数通过二进制编码的方法对 LF 阈值、OF 与 LF 连接权重、LF 与 IF 连接权重以及 IF 阈值进行配置。为了使 BP 网络实现更低预测误差,设置了适应度函数,该函数基于预测输出与期望目标的误差范数进行计算。具体计算式如下:

$$\|X\|_2 = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \quad (3)$$

式中: x_i 表示能耗预测结果与刀具寿命预期值和实际值差异; X 是利用 x_i 建立的一维矩阵。

1.2 NSGA-II 优化参数

为了精确控制能耗并估算滚刀寿命,必须合理配置进给速率、刀具头数以及主轴旋转速度等工艺参数。本研究采用改进 NSGA-II 算法构建优化模型,并利用遗传神经网络(GABP)算法建立新的组合模型,对生成的参数进行迭代优化,以获得 Pareto 最佳解集,进而提高算法的稳定性和适应性^[12]。

在本研究中对齿轮切削参数的优化决策开展深入探讨,并在应用改进 NSGA-II 算法时,引入了最优前沿参数和动态调整系数。该算法通过监测前沿个体集的拥挤程度进行动态调整系数,从而筛选出高质量个体,剔除那些密集分布在前沿的个体,避免陷入局部最优解的难题。

1.3 目标模型求解

在设定齿轮加工参数时,在系统中计入迭代参数集 P_F ,并对操作参数 O_p 进行优化。通过上述处理构建得到以下用于预测加工能耗与刀具寿命的数学模型函数^[13]:

$$\begin{cases} F\{G_{ABP}(H, P, O_p)\} = (T_{\max}, W_{\min}) \\ p_{ij\min} \leq p_{ij} \leq p_{ij\max}, \quad j=1, 2, 3, 4 \\ s_{i1} \leq M_{AX-T}, \quad s_{i2} = E_{LL-Q} \end{cases} \quad (4)$$

式中: F 表示数据映射; p_{ij} 是样本数据集; s_i 表示制品质量; $T_{\max}, W_{\min}$ 依次表示最大加工时间与最小加工能耗; E_{LL-Q} 表示合格指标。具体处理过程如图 1 所示。

本研究重点对高速齿轮切削工艺参数进行配置改进,运用先进非支配遗传 NSGA-II 算法构建优化问题的函数模型,由此实现能耗最小化和刀具寿命最大化的目标。此外,本研究还利用遗传反向传播(GABP)神经网络构建了预测分析模型。

2 实例验证

本研究采用数控高效滚齿机开展实验测试,

通过 Matlab 工具构建了 GABP 预测算法模型。在神经网络中设置了 4 个输出变量,包含了刀具寿命等指标,并利用由 50 个样本组成的数据集进行训练,另外选择 12 个样本开展验证分析。在网络结构中将输入层与输出层的节点数分别设定为 12 和 2,而隐层的节点数为 23。从测试得到的均方误差可以看出,经过五轮迭代后,误差降至 10^{-5} ,并获得 0.000 425 的最佳误差,说明该网络模型达到了出色的稳定性。

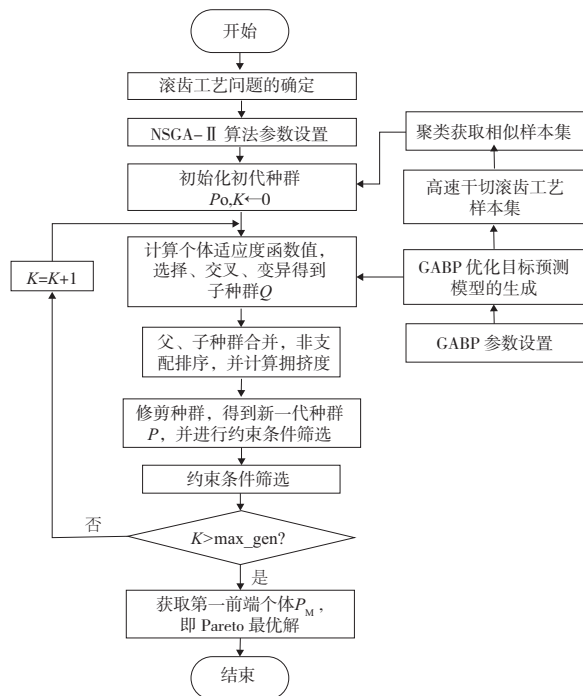


图1 滚齿参数优化流程

本研究进一步对比了 GABP 算法与 BP 神经网络的寿命和能耗的预测误差,结果如图 2、图 3 所示。从图中可以发现,GABP 算法误差均值与 BP 神经网络的误差均值相比,GABP 算法使刀具寿命误差减小 16%,能量消耗减小 36%。

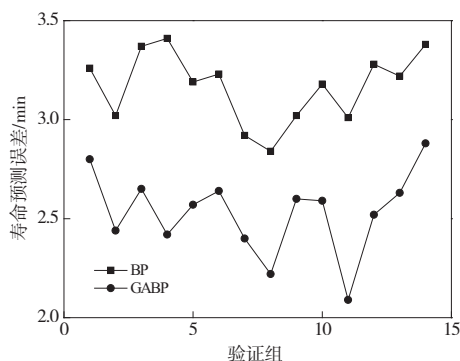


图2 刀具寿命预测误差

图 4 所示为以迭代计算获得的预测误差曲

线,可以明显看出 GABP 算法具备优秀的收敛性能,在训练 70 次遗传迭代次数后达到预测误差要求,表明本文算法具有很好的运算效率。

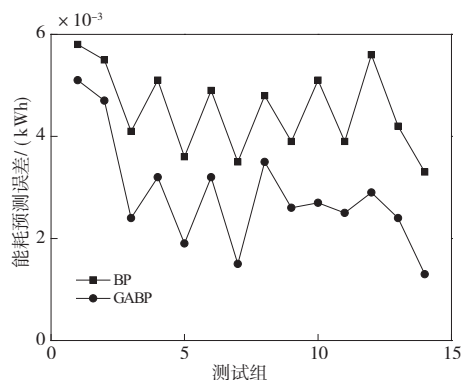


图3 能耗预测误差

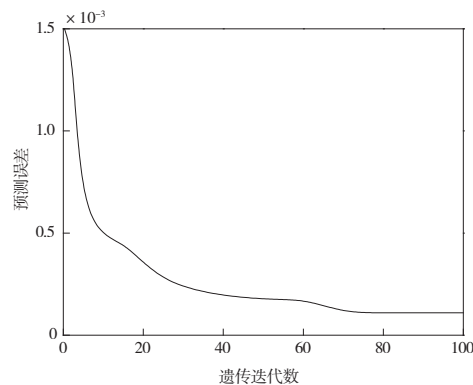


图4 预测误差变化曲线

采用多目标调控策略实施迭代,得到了 Pareto 最优解,加工测试效果如图 5 所示。从图 5 中可知,在刀具寿命延长的过程中,先发生加工能耗的下降,随后到达约 66.45×10^{-3} kWh 的稳定阶段,具有很高的节能效率,这证明采用本文方法进行能耗计算具备高稳定性。

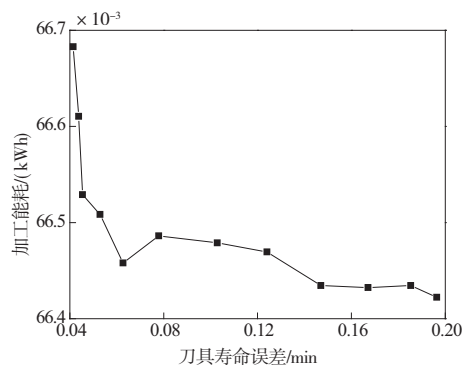


图5 加工能耗分布

NSGA-II 算法优化 GABP 前后的加工能耗与刀具寿命数据如表 1 所示。根据表 1 可以发现,经过优化的 Pareto 解集在加工能耗和刀具寿命误差方面有显著下降,说明采用遗传算法优化处理后的神经网络在解集上表现出了更优适应性。由此可见,采用多目标优化的方法可以实现加工能耗和刀具寿命误差处于最佳平衡状态。

表 1 加工效果统计

参数	优化前	优化后
加工能耗/(kWh)	0.091 2	0.085 4
	0.087 5	0.081 2
	0.963 3	0.898 4
	0.926 0	0.887 4
	0.885 6	0.823 0
刀具寿命误差/min	33 222	31 463
	32 650	30 524
	29 963	25 563
	28 964	24 510
	30 255	26 570

3 结语

本文通过对高速滚齿加工工艺参数 GABP 模型的 NSGA-II 优化,取得以下有益结果。

1) 经过 5 轮迭代后,误差降至 10^{-5} , 获得 0.000 425 的最佳误差,说明该模型达到出色稳定性。GABP 算法使刀具寿命误差减小 16%, 能量消耗减小 36%, 具备更优收敛性能。

2) 经过优化的 Pareto 解集在加工能耗和刀具寿命误差方面有显著下降,在解集上表现出了更优适应性,实现加工能耗和寿命处于最佳平衡状态。

参考文献:

[1] 刘艺繁,阎春平,倪恒欣,等. 基于 GABP 和改进

NSGA-II 的高速干切滚齿工艺参数多目标优化决策[J]. 中国机械工程,2021,32(9):1043-1050.

- [2] 杜彦斌,李博,杨潇,等. 干切滚齿机床温度场特性辨识及分布优化[J]. 航空制造技术,2022,65(6):54-61.
- [3] 杨潇,曾令万,陈鹏,等. 干切滚齿机床热流复杂特性及多维调控策略[J]. 中国机械工程,2022,33(5):623-629.
- [4] 何中原,汪中厚,刘雷,等. 基于 CATIA 的高精度滚齿加工仿真与精度验证[J]. 机械强度,2021,43(6):1485-1491.
- [5] 李钧亮,王时龙,王四宝,等. 基于工件材料去除率的滚齿机床能耗模型[J]. 中国机械工程,2020,31(21):2626-2631.
- [6] 丁国龙,周明成,吴熙,等. 基于小波包算法的斜齿轮滚齿加工误差补偿[J]. 机床与液压,2023,51(8):42-47.
- [7] 樊隆祥,周启武,彭东林,等. 基于有限元及贝叶斯网络的数控滚齿机热误差建模研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(9):77-83.
- [8] 程耀楠,马春杰,张剑宇,等. 高速干式滚齿加工工艺参数优化研究进展[J]. 哈尔滨理工大学学报,2022,27(2):10-20.
- [9] 王四宝,郭忠政,马驰,等. 数控滚齿机工作台热-力变形分析及预测建模[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(10):2761-2772.
- [10] 班希翼,李强,贺小龙,等. 车轴滚齿加工工艺参数 GA-BP 模型 NSGA-II 优化[J]. 机械设计与制造,2024(10):145-148,156.
- [11] 高宗帅,郝涛,徐伟雄,等. 基于改进遗传算法-反向传播神经网络的升降机健康评价研究[J]. 机电工程,2021,38(3):313-318.
- [12] 陈有权,范丽丹,张国福,等. 改进 NSGA-II 算法的液压混合动力车辆动力系统参数优化[J]. 机械设计与制造,2020(11):179-182,187.
- [13] 李浩,刘根,焦起超,等. 基于 NSGA-II 的产品服务系统多目标优化配置设计[J]. 机械设计与制造,2019(8):201-206,210.

收稿日期:2024-08-12