

基于人工智能的机械绿色制造系统设计研究

李虹兵

浙江杭可科技股份有限公司 浙江杭州 311231

摘要: 本文以人工智能技术为支撑,针对机械绿色制造系统的设计问题展开研究。首先,详细分析了数控机床能耗问题,建立了综合评估建模方法。其次,搭建了数控机床能耗参数模型,包括数控机床稳态过程和加工过程效率模型。然后,提出了基于BP神经网络的数控机床能耗预测模型。最后,通过实验数据分析验证了该模型的有效性。研究发现表明,基于人工智能的绿色制造系统设计方案能够显著提升机械制造过程的效率和可持续发展水平。

关键词: 人工智能;数控机床;绿色制造系统;BP神经网络

引言

机械制造是工业领域的重要组成部分,随着社会经济的发展和技术进步,人们对于机械制造系统的效率和环保性要求日益提高^[1]。然而,传统的机械制造系统在生产过程中存在能源消耗大、环境污染严重等问题,这些问题不仅影响了企业的可持续发展,也对环境造成了严重的伤害^[2]。为了解决这一问题,近年来人工智能技术在制造业中得到了广泛应用。人工智能具有数据处理、模式识别、智能决策等功能,可以在制造过程中对大量数据进行实时监测和分析,利用机器学习算法实现生产效率的提升和资源的合理利用。因此,基于人工智能的机械绿色制造系统设计成为了一个备受关注的研究领域。

一、数控机床能耗建模方法

(一) 数控机床能耗分析

数控机床是一种典型的机电液一体化产品,具有高精度、高效率,以及高度自动化等特点,已广泛应用于宇航、汽车、造船、军工和模具等领域。数控机床一般由输入装置(即数控代码操作面板)、数控装置、液压系统、冷却系统、辅助系统、主轴驱动系统、进给驱动系统、机床主体,以及反馈系统等主要耗能部件组成,如图1所示。数控机床具有广泛的加工性能,其数控加工过程可描述为,通过机床操作面板输入数控代码,数控装置依据输入的数控代码控制机床的各个系统协同运动,而将零件按照图纸的技术要求自动的加工出来,同时消耗能量^[3]。

不同分割方式对应着机床评价的不同建模方法,目前主流的机床评价建模方法主要分为五种。一是按照机床组成系统进行评价建模,即机床主传动系统、辅助系统、进给系统、液压系统、冷却系统、数控系统等;二是按照机床运行状态进行评价建模,即机床开机状态、待机状态、空载状态、加工状态、关机状态等;三是按照机床评价属性进行建模,即机床固定评价、可变评价;四是按照机床主要评价部件进行建模,即机床主轴电机和进给电机、润滑油泵和冷却泵、换刀装置、显示器、照明灯、风扇和排屑装置等;五是按照机床功能性运动进行评价建模,即机床加工过程调整、切削工件、换刀、机床冷却和加热、废物处理等^[4]。



图1 数控机床主要耗能部件

(二) 综合评估建模方法

在许多实际问题中,我们要处理的数学模型往往有多个目标函数,且各个目标函数之间往往是相互作用且相互冲突的,无法同时取得最优。例如在工件的数控加工过程中,当生产效率最优时,加工质量目标和能耗目标可能达不到最优;当加工质量最优时,生产效率目

标和能耗目标可能达不到最优。由此可知,多目标优化问题并不能简单等同于单目标优化问题,在求解单目标优化问题时,可以在所有候选解中选出一组绝对最优解。但是在求解多目标优化问题时,由于各个目标之间相互制约,所以最优解不一定只有一个,通常存在许多组难以直接比较孰优孰劣的解集。多目标优化问题,一般可表述为如下形式^[5]:

$$\min \{z_1 = f(x), z_2 = f(x), \dots, z_r = f(x)\} \quad (1)$$

$$s.t. \quad g_i(x) \leq 0 \quad i=1,2,\dots,m$$

式中, $z_i = f_i(x) (i=1,2,\dots,r)$ 表示 r 个线性或非线性的目标函数,这里我们常把各目标函数统一为最小化或最大化; $x = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为决策向量, $g_i(x) \leq 0$, $(i=1,2,\dots,m)$ 为约束条件。

二、数控机床能耗参数模型

(一) 数控机床稳态过程功率模型

数控机床加工过程中,稳态过程主要是指数控机床在对工件进行加工时,加工状态持续进行、加工时加工功率保持规律性的稳定变化的加工过程(简称稳态过程)。在本文模型中,对于数控机床稳态过程功率模型主要分为:辅助状态功率模型、空切状态功率模型、材料切削状态功率模型^[6]。

(1) 辅助状态功率模型:在数控机床的运行中,照明装置、喷冷却液装置、排屑装置等产生的功率,一般会被称为辅助功率。该部分功率为机床在加工过程中主要是起到辅助作用,并且是选择性开启的,不会伴随着机床开启而一直运行。除却这些选择性开启的装置产生的功率,机床在开启后,维持机床正常运行,但实际机床不进行切削(包含空切)的状态,称为待机运行。

(2) 材料切削状态功率模型:在数控机床加工过程中,当刀具触碰到工件时,材料切削活动开始。其中材料切削功率中,也因具体的加工活动不同,分为恒材料切削功率与变材料切削功率。其中,在数控机床中恒材料切削功率主要是车外圆过程;在数控机床中,变材料切削功率主要是车端面过程。材料切削状态功率模型可以表示为:

恒材料切削功率:在数控机床中,恒材料切削功率主要是车外圆过程,车外圆过程的恒材料切削功率可以表示为:

$$P_{MC_T} = C_{PT} \cdot v_c^{n_{PT}} \cdot f^{y_{PT}} \cdot a_p^{x_{PT}} \quad (2)$$

其中, P_{MC_T} 为车外圆切削功率, W ; C_{PT} 、 n_{PT} 、 y_{PT} 、 x_{PT} 为系数; v_c 为切削速度, m/min ; f 为进给量, mm/r ;

a_p 为切削深度, mm 。

变材料切削功率:车端面过程的变材料切削功率可以表示为:

$$P_{MC_F} = \begin{cases} v(v_0 - \frac{2fm^2}{60000}t)^f f^c (a_p t / t_{en})^n & 0 \leq t < t_{en} \\ v(v_0 - \frac{2fm^2}{60000}t)^f f^c a_p^n & t_{en} \leq t < t_{en} + t_{fcut} \end{cases} \quad (3)$$

其中, P_{MC_F} 为车端面切削功率, W ; v , v_0 分别为切削速度、初始切削速度, m/min ; f 为进给量, mm/r ; a_p 为切削深度, mm ; n 为主轴旋转速度, r/min ; t 为刀具切入时间, t_{fcut} 为完全切削阶段持续时间, t_{en} 为刀具切入阶段持续时间, s 。

(二) 数控机床加工过程效率模型

在本文中建立的加工过程效率模型,其定义为:加工过程中单位时间内材料去除体积,相较于传统的材料去除率本文所建立的加工过程效率模型考虑的是整个加工过程的效率,而不是单指数控机床的切削过程,二者的所考虑的材料去除体积是相同的,而不相同在于时间的考虑,如图2所示。

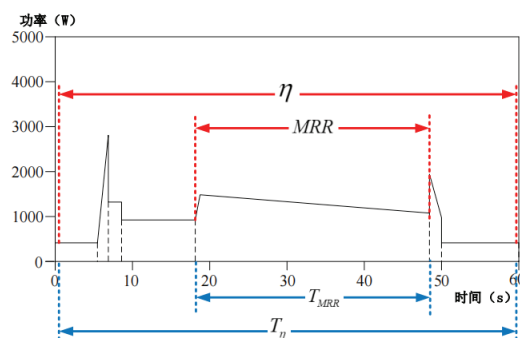


图2 η 与 MRR 对比图

该加工过程效率模型可以表示为:

$$\eta = \frac{V}{T} \quad (4)$$

其中, η 为加工过程效率,即为加工过程中单位时间内材料去除体积, mm^3/s ; V 为加工过程中需去除的总体积, mm^3 ; T 为加工过程时间, s 。当加工的零件、工艺确定时,需去除的总体积为确定值,其公式可以表达为:

$$V = \pi \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} - a_p \right)^2 \right] \cdot l \quad (5)$$

其中, V 为加工过程中需去除的工件材料体积, mm^3 ; d 为工件直径, mm ; a_p 为切削深度, mm ; l 为切削长度, mm 。

(三) 数控机床加工过程参数

根据上述分析,对于固定的机床型号来说,本文的研究对象为数控机床C2-6150HK/1a,数控机床加工过程的能耗变化不仅与时间参数有关,同时还与待机功率、机床空载功率、材料切削功率以及辅助阶段功率有关。其中,待机功率、主轴转速、材料属性、刀具属性、切削参数等是数控机床加工过程中的主要影响因素。由于待机阶段、机床空转阶段的能耗值可直接测量且比较恒定,材料属性和刀具属性在实际加工中不会发生改变,在不考虑刀具磨损的情况下,影响数控机床加工能耗的主要为时间参数、主轴转速和切削参数。故本文研究主要考虑数控机床切削加工能耗及相应的切削参数:切削速度、切削深度和进给量。

三、基于BP神经网络的数控机床能耗模型预测

(一) BP神经网络原理及特点

人工神经网络利用仿生的方法,在生物神经元工作过程的基础上,通过模拟其过程,建立具有其结构和特点的运算模型,图2是人工神经网络的结构示意图。它从信息处理角度对人脑神经网络进行抽象,建立某种简单模型,按不同的连接方式组成不同的网络,它看似结构简单,但却由大量的节点(或称神经元)之间相互联接构成,每个节点代表一种特定的输出函数,称为激励函数(activation function)。每两个节点间的连接都代表一个对于通过该连接信号的加权值,称之为权重,这相当于人工神经网络的记忆。网络的输出则依网络的连接方式,权重值和激励函数的不同而不同。

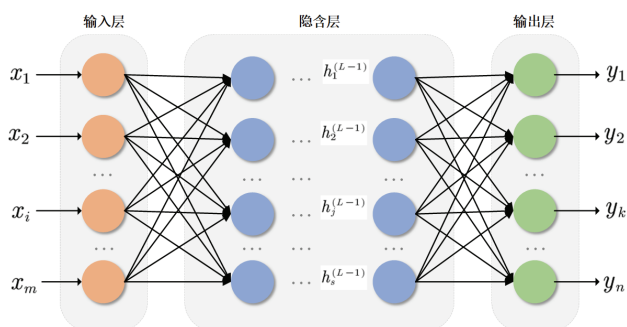


图3 BP网络拓扑结构

如图3所示,BP网络与感知器模型不同,传递函数必须是可微的,不能使用感知器网络中的二值数。为具体说明BP网络的学习过程,流程如下:

(1) 输入层结点数为 I ,隐含层结点数为 J ,输出层结点数为 K ;相应各层结点的编号 $i=1, \dots, I; j=1, \dots, J; k=1, \dots, K$ 。

(2) $[W_{ji}]$ 表示输入层与隐含层各结点之间的连接权重矩阵, $[B_j]$ 表示隐含层各结点的阈值向量。

(3) $[X]$ 表示输入层的输入, $[T]$ 表示输出层的期望输出。

(4) 输入层的输出为 $[X]$,隐含层的输出为 $[H]$,输出层的实际输出为 $[Y]$ 。

隐含层和输出层的激励函数采用Sigmoid函数:

$$F(z-b) = \frac{1}{1 + \exp[-(z-b)]} \quad (6)$$

式中: z 为神经元收到的加权信号和。 b 为神经元的阈值。

隐含层第 j 号结点的输入和阈值分别为 z_j 和 b_j ,且:

$$z_j = \sum_{i=1}^I w_{ji} x_i \quad (7)$$

(二) BP神经网络能耗状态预测模型

(1) BP神经网络结构参数:torch库中的nn.Module是torch库中自带的经典神经网络架构,本文搭建的神经网络通过继承的方式构建3层神经网络的基本架构,再将切削速度、切削深度和进给量 t 作为自变量,机床的切削能耗为因变量,搭建出BP神经网络车削能耗预测模型,其中各层之间的激活函数采用可以修正线性单元的ReLU函数,ReLU函数相较于其他激活函数具有稀疏性,可以更好地挖掘数据特征、不出现梯度饱和和梯度消失等情况、计算方便等优势。

(2) 定义损失函数和优化器:搭建BP神经网络车削能耗预测模型在继承nn.Module形成基本架构之后,需要对神经网络定义损失函数和优化器。损失函数,又叫目标函数,是编译一个神经网络模型必须的两个要素之一,另一个必不可少的要素是优化器。

(3) 学习速率的选择:为了根据各个阶段误差的情况进行调节,一般采用自适应的学习速率。当误差减小时,会采用较大的学习速率以加快网络的收敛速度;相反,在误差增大时,会采用较小的学习速率,以避免误差进一步扩大,通过阅读相关文献,BP神经网络学习速率通常设置在0.01-0.1之间,使用Adam优化器默认的初始学习率为0.01。根据学习速率的设置范围手动调整,并通过预测模型测试集损失确定最佳学习率为0.04。

四、实验结果分析

为了直观的表现各模型预测结果与实际能耗值之间的关系,本文采用Python中的matplotlib库进行绘图,将

测试集中的25组测试结果与实际能耗值进行比较。图4为各模型预测值与实测值对比图。

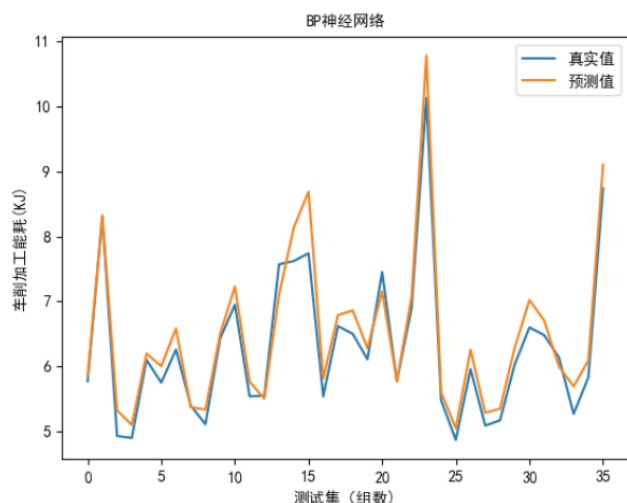


图4 BP神经网络预测值与实测值对比图

通过各模型之间的预测值与实测值的对比,可以看出拟合效果做好是BP神经网络状态监测模型。对于数控机床切削加工状态监测来说,BP神经网络模型具有较强的可行性。根据本文的研究对于数控机床切削加工能耗预测优先推荐随机森林能耗预测模型。

结论

本研究的创新点在于将人工智能技术与绿色制造系统设计相结合,提出了一种全新的解决方案,为传统机械制造业的转型升级提供了有力支撑。同时,本文的研究成果对于推动制造业的绿色发展、提高产业竞争力具有重要实际应用价值。

参考文献

- [1] 王欣.基于改进NSGA-Ⅱ算法下的机械绿色制造系统多目标优化研究[J].农机使用与维修,2023(09):72-75.
- [2] 朱小勇.制造企业精益绿色制造系统集成效应及协同机制研究[D].武汉大学,2021.
- [3] 邓乾旺,李卫明,李珣,等.机械产品回收与再制造系统中绿色影响因子关联仿真模型[J].中国机械工程,2015,26(22):3064-3075+3115.
- [4] 李洪丞.机械制造系统碳排放动态特性及其碳效率评估优化方法研究[D].重庆大学,2014.
- [5] 刘继全.通用机械加工车间绿色制造系统工程思路探索[J].山东工业技术,2018(20):31.
- [6] 王志中.机械制造业中的绿色制造技术应用模式分析[J].中国机械,2024(14):64-67.