



---

# Modeling and Simulation of Low Carbon Oriented Machining Centre Machines

Juan Wei, Yaxin Wei

School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, China

**Email address:**

weij@xust.edu.cn (Juan Wei), 1259550015@qq.com (Yaxin Wei)

**To cite this article:**

Juan Wei, Yaxin Wei. Modeling and Simulation of Low Carbon Oriented Machining Centre Machines. *Science Discovery*.

Vol. 11, No. 3, 2023, pp. 90-94. doi: 10.11648/j.sd.20231103.12

**Received:** April 13, 2023; **Accepted:** May 13, 2023; **Published:** May 18, 2023

**Abstract:** The whole country is working hard to achieve the goal of carbon peak and carbon neutrality, and carry out energy-saving and emission-reduction measures. In order to realize the low-carbon manufacturing of machine tools, the carbon emissions in the processing process of the machining center are analyzed, the carbon emission boundary and its composition are determined, and the mathematical model of carbon emissions of the machining center is established. The VERICUT software was used to simulate the machining center, and the carbon emission model was verified by orthogonal design by simulating the machining process in the software. The results show that the carbon emission model of the processing center established in this paper has high accuracy, and the error is within 4% compared with the actual processing carbon emission value, indicating that the model can accurately reflect the size of the carbon emission and verify the effectiveness of the model.

**Keywords:** Low Carbon, Machining Centre, Modelling and Simulation

---

## 面向低碳的加工中心机床建模与仿真

魏娟, 魏雅鑫

西安科技大学机械工程学院, 西安, 中国

**邮箱**

weij@xust.edu.cn (魏娟), 1259550015@qq.com (魏雅鑫)

**摘要:** 全国都在为了实现碳达峰, 碳中和的目标而努力, 进行节能减排措施。为实现机床的低碳制造, 针对加工中心的加工过程中的碳排放进行分析, 确定碳排放边界及其构成, 建立加工中心碳排放数学模型。采用VERICUT软件对加工中心进行仿真建模, 通过在软件中进行切削加工仿真, 利用正交设计对碳排放模型进行验证。结果显示, 本文建立的加工中心碳排放模型精度较高, 与实际加工碳排放值相比, 误差在4%之内, 说明该模型能够准确的反映出碳排放量的大小, 验证了模型的有效性。

**关键词:** 低碳, 加工中心, 建模与仿真

---

### 1. 引言

因为温室效应而造成的气候变暖问题已成为了全球范围内的重要热门话题之一, 该问题受到了各国政府与人

民关注。数据显示, 2020年我国二氧化碳排放量高达102.4亿吨, 占全球的31.7% [1]。为建立绿色低碳的生产系统, 国务院印发的《中国制造2025》中明确指出将绿色发展理念融入制造业生产中[2], 要实现绿色制造、绿色发展, 务必处理好制造业经济效益与碳排放之间的关系[3]。由于加

工中心的结构更为复杂,相对消耗的资源多,进而使其产生的碳排放量也相对高。为了能够达到绿色制造,低碳加工的效果,研究加工中心的碳排放量具有重大意义及前景。

在低碳制造方面,Thomas S and Cheng K. [4]对碳足迹进行新的定义,并计算制造过程中的碳排放量; Jeswiet J.等[5]论述出在电能碳排放系数下的零件碳排放计算方法。梅志敏[6]从机械制造实际加工的方向,研究制造业进行低碳转型的方法与策略。以工艺、加工设计、工件材料、及回收多维度详细分析低碳转型的过程与方法。尹瑞雪等[7,8]根据砂型铸造的技术特征,对砂型铸造的全流程进行了碳排放范围的研究,构建了一个面向全流程的全流程碳排放计算方法,并对车削、砂型铸造、CO<sub>2</sub>气体保护焊、自由锻等零件的全流程进行了碳排放计算。

在碳排放建模方面, Mori [9]等表示机床能耗大多数来自于主轴与伺服中的电机,为此,给出了优化方法去降低主轴和伺服电机的能耗。Mativenga [10]等提出了可以使能耗降低的方法,就是用最优的工艺参数进行切削加工,这样得到的能耗就是最小的。Abele E等[11]搭建出一个能耗模型预测平台,采用人工神经网络优化算法进行了求解。李先广等[12]建立了机床制造过程的碳排放模型,给出了碳排放动态量化方法。唐任仲等[13]以活动的角度提出碳排放的计算方法,建立车间制造过程中的碳排放模型,并给出了计算方法。Li [14]等主要研究了机加工中的固定能耗,以电能消耗为主,包含了主轴驱动系统、伺服驱动系统、冷却润滑系统以及液压系统等工作时产生的电能耗。

本文以2443加工中心为对象,建立其碳排放模型,基于VERICUT软件对加工中心进行仿真建模,通过实际加工,验证模型的精度。

## 2. 机床碳排放建模

### 2.1. 加工中心的构成及特点

加工中心(Machining Center)具有工作台自动转位系统与刀库自动换刀系统,并能通过自动更换刀具完成对工件多工序(如铣、镗、钻、铰等)集成加工的数字控制机床[15]。在加工中心完成零件的加工,一般由机床主传动系统、机床进给传动系统、自动换刀系统以及机床辅助系统等组成。本文以2443加工中心为研究对象,实验机床如图1所示,主要参数如表1所示,加工中心的构成系统如图2所示。



图1 2443加工中心。

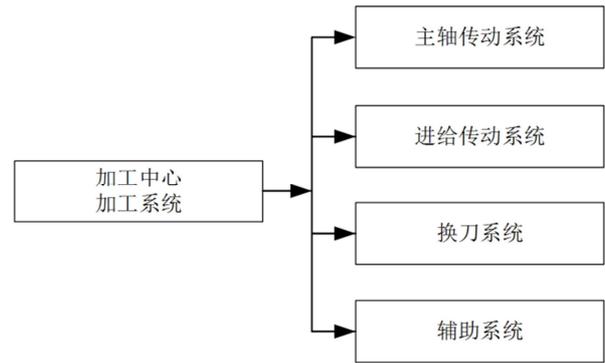


图2 加工中心的构成系统。

表1 加工中心主要参数。

参数名称	参数值
工作台尺寸	1250×650 mm
T型槽参数	5×18×125 mm
X轴行程	1100mm (-550, +550)
Y轴行程	610 mm (-305, +305)
Z轴行程	635 mm (125, 760)
主轴中心到立柱距离	685 mm
主轴转速	8~800 rpm
X, Y, Z轴快速进给	20/20/18 m/min
切削进给率	1~7600 mm/min
定位精度	±0.005 mm
重覆精度	±0.003 mm
刀具容量	20把
刀柄	BT40, CT40
拉杆螺栓	P40T-1
最大刀具直径	100 mm
最大工作台荷重	1200kg
机床总重	7500 kg

### 2.2. 加工中心碳排放的边界及构成

本文将从输入输出视角,研究加工中心的能源-物料-废料三个维度的数控加工过程中的碳排放及特性,计算碳排放数值。输入的有能源、原材料、切削液以及刀具;输出有产品和切屑、废气、废液等,它们都直接或间接的对环境造成影响,产生危害。

本文仅考虑间接碳排放,它主要包括了能源碳排放,物料碳排放和废料碳排放。其中能源碳排放是指机床完成整个加工过程中所消耗的电能引起的碳排放;物料碳排放是指在物料生产过程中,包括工件原材料、切削液、润滑油等生产过程中产生的碳排放;废料碳排放是在加工中由废弃物处理产生的碳排放,如切屑、废液、废气等的清理、收集、遗弃或回收等。加工中心的碳排放构成如图3所示。

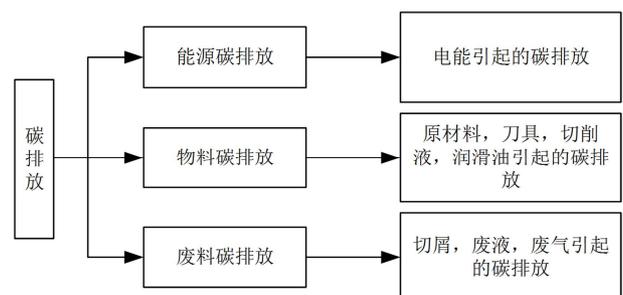


图3 加工中心的碳排放构成。

### 2.3. 能源碳排放

根据加工中心的运动状态, 将其分为待机碳排放、物料碳排放及废料碳排放三部分。故能源碳排放表示为:

$$C_E = C_{DJ} + C_{KZ} + C_{QX} \quad (1)$$

为了量化加工中心各状态下的碳排放, 本文仅给出基本计算公式。

待机碳排放

$$C_{dj} = \sum_{r=1}^j f_e \cdot f_1^r(t_r) \cdot s_r(t) \quad (2)$$

式中:  $f_1^r(t_r)$  表示第 $r$ 个系统的待机能耗( $KWh$ ),

$s_r(t) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ , 1表示系统开启, 0表示系统关闭;  $P_{DJ}^r$  表示第 $r$ 个系统的待机功率( $KW$ ), 这部分功率一般不受外界影响, 不论是否加入负载或是否改变工艺参数和更换刀具, 机床的待机功率基本都不会改变, 可以用功率仪测得数值;  $t_{DJ}^r$  表示第 $r$ 个系统所用的待机时间( $min$ )。

空载碳排放

$$C_{KZ} = f_e \cdot (P_{xn} + m_1 n + m_2 n^2) \cdot t_l \quad (3)$$

式中:  $P_{xn}$  表示机床的最低空载功率( $KW$ ),  $t_l$  表示是稳定空载状态持续时间( $min$ )

切削碳排放

$$C_{QX} = f_e \cdot (1 + k_m) \cdot \frac{C_{Fc} a_p^{x_F} f_z^{y_F} a_e^{u_F} d^{1-q_F} n^{1-w_F} z K_{Fc} v_c}{60 \times 1000} \cdot t_c \quad (4)$$

式中:  $d$  是铣刀直径( $mm$ );  $C_{Fc}$  为切削材料以及切削条件共同决定的系数;  $z$  是铣刀齿数;  $x_F, y_F, u_F, -q_F, -w_F$  分别代表铣削深度、每齿进给量、铣削宽度、铣刀直径与主轴转速的影响系数;  $K_{Fc}$  为修正系数,  $t_c$  是铣削加工切削时间( $min$ )。  $k_m$  是附加载荷损耗系数, 取值范围为 0.15 ~ 0.25。

### 2.4. 物料碳排放

主要考虑切削工件时, 刀具磨损引起的碳排放, 其计算公式为:

$$C_{dao} = \frac{T_w}{T_t} \cdot W_t \cdot f_d \quad (5)$$

$$T_t = \frac{C_T}{a_e^w \cdot n^x \cdot a_p^y \cdot v_f^q} \quad (6)$$

式中:  $T_w$  表示加工时间( $min$ );  $T_t$  表示刀具寿命;  $W_t$  表示刀具质量( $kg$ );  $f_d$  表示刀具的碳排放因子, 查文献

后, 选取  $f_d = 29.6 kgCO_2 / kg$ ;  $C_T, w, x, y, q$  表示与刀具寿命相关的系数。

### 2.5. 废料碳排放

主要考虑去除工件材料的切屑引起的碳排放量, 计算公式为:

$$C_{qies} = f_a \cdot M_m' \quad (7)$$

式中:  $M_m'$  是产品加工所产生的切除物料的质量( $kg$ );  $f_a$  是切屑碳排放因子。

## 3. 仿真模型的建立与验证

### 3.1. 仿真模型的建立

基于VERICUT平台, 以2443加工中心为实验对象, 建立其仿真系统, 并通过对具体零件的加工仿真应用, 实现虚拟数控机床仿真系统的建立和数控程序的验证修改。在仿真中可以合理的选用加工工艺参数, 以达到碳排放量最小, 从而可应用在实际加工中, 实现低碳制造。2443加工中心的仿真模型如图4所示。

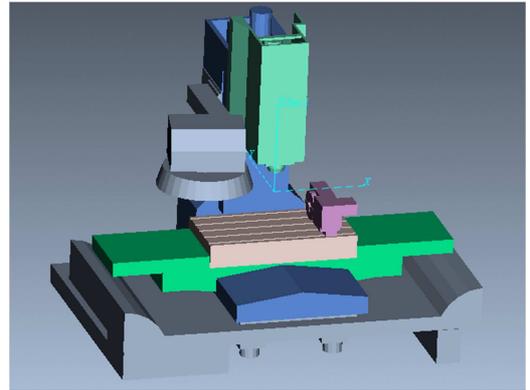


图4 2443加工中心的仿真模型。

### 3.2. 实验验证与分析

在加工中心通过铣削加工对碳排放模型进行验证。选取尺寸为100mm×100mm×50mm的零件为加工对象, 零件材料选择45号钢, 采用硬质合金铣刀为切削工具, 刀齿为4, 刀具直径12mm。表2为选定的碳排放系数。采用正交试验对碳排放模型进行设计, 实验设计如表3所示。

表2 碳排放系数。

碳排放因子	数值
电能碳排放系数 ( $kgCO_2 / kWh$ )	0.8078
去除材料碳排放系数 ( $kgCO_2 / kg$ )	7.048
刀具碳排放系数 ( $kgCO_2 / kg$ )	29.6
矿物油切削液碳排放系数 ( $kgCO_2e / L$ )	2.85
切屑碳排放系数 ( $kgCO_2 / kg$ )	10.2
废液碳排放系数 ( $kgCO_2e / L$ )	0.2

表3 正交实验设计。

水平	加工参数			
	$n(r/min)$	$f_z(mm/z)$	$a_p(mm)$	$a_e(mm)$
1	4500	0.05	0.5	2
2	5500	0.10	1	3
3	6500	0.15	1.5	4

按照正交表进行实验9次，记录相应的实验数据。根据处理后所得出的碳排放量试验数据进行拟合，并将工艺参数代入碳排放模型，从而得出碳排放量的预测值，计算结果如表4所示。

表4 正交试验结果。

实验编号	主轴转速 $n(r/min)$	每齿进给量 $f_z(mm/z)$	切削深度 $a_p(mm)$	切削宽度 $a_e(mm)$	碳排放实验值 $kgCO_2$	碳排放预测值 $kgCO_2$
1	4500	0.05	0.5	2	1004.605	1012.201
2	4500	0.1	1	3	967.201	983.8
3	4500	0.15	1.5	4	912.367	923.102
4	5500	0.05	1	4	985.413	987.924
5	5500	0.1	1.5	2	971.682	979.301
6	5500	0.15	0.5	3	932.769	941.605
7	6500	0.05	1.5	3	971.382	973.302
8	6500	0.1	0.5	4	867.941	875.531
9	6500	0.15	1	2	906.843	912.23

计算结果显示，2443加工中心碳排放的实际值与预测值误差都在4%之间。表明碳排放量的实测值与理论估计值之间具有非常好的相合程度，证明了本文中所构建的碳排放量模型具有较高的精度。

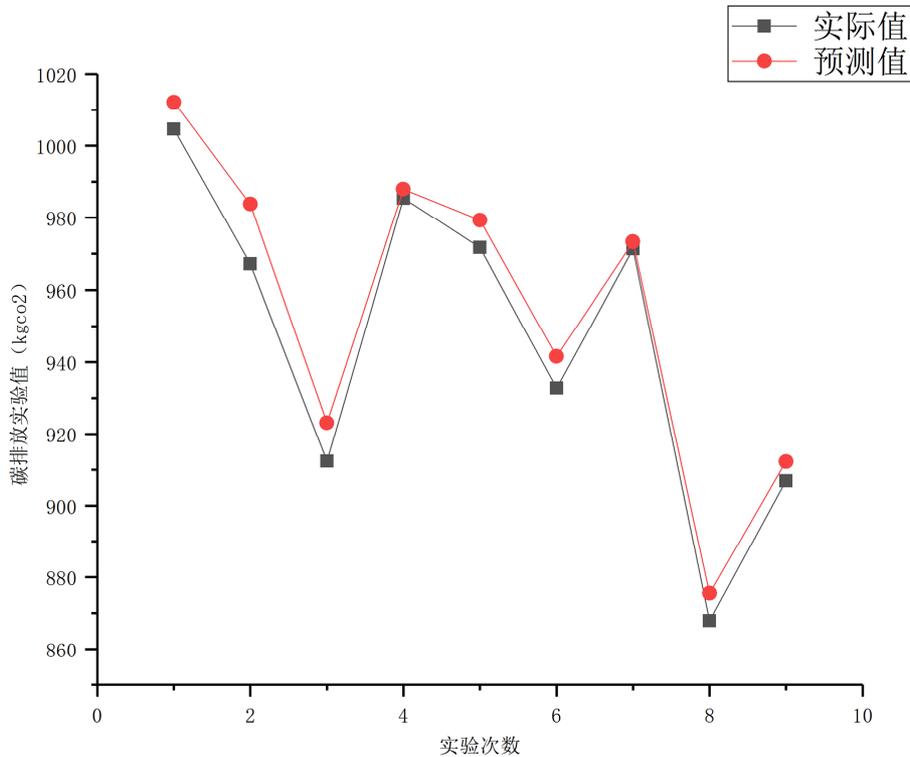


图5 碳排放实际值与预测值对比。

之间，说明本文建立的加工中心碳排放模型具有较高的精度，为工艺参数优化提供了基础。

#### 4. 结论

本文以2443加工中心为研究对象，建立其碳排放模型。利用VERICUT软件，对2443加工中心建其仿真系统，并通过对具体零件的加工仿真应用，实现虚拟数控机床仿真系统的建立和数控程序的验证修改，避免在实际加工中试错，并利用正交设计的方法对模型的精度进行验证，结果表明，2443加工中心碳排放的实际值与预测值误差都在4%

#### 参考文献

- [1] BP p.l.c. BP statistical review of world energy [R]. 2021.
- [2] 国务院. 中国制造2025 [z]. 2015-05-08.

- [3] 原嫒, 席强敏, 孙铁山等. 产业结构对区域碳排放的影响——基于多国数据的实证分析 [J]. 地理研究, 2016, 35 (1): 82-94.
- [4] Tridech S, Cheng K. Low carbon manufacturing: characterization, theoretical models and implementation [J]. International Journal of Manufacturing Research, 2011, 6 (2): 403-412.
- [5] Jeswiet J, Kara S. Carbon emissions and CESTM in manufacturing [J]. CIRP Annals- Manufacturing Technology, 2017, 57 (1): 17-20.
- [6] 梅志敏, 张融, 熊晴等. 机械产品制造过程低碳化转型的分析与研究[J]. 机械制造与自动化, 2012, 02: 75-78.
- [7] 尹瑞雪, 曹华军, 李洪丞, 等. 砂型铸造生产系统碳排放量化方法及应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 05: 1071-1076.
- [8] 尹瑞雪, 曹华军, 李洪丞. 基于函数化描述的机械制造工艺碳排放特性及其应用[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 09: 2127-2133.
- [9] Mori M., Fujishima M., Inamasu Y., Oda Y. A study on energy efficiency improvement for machine tools [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60 (1): 145-148.
- [10] Mativenga P. T., Rajemi M. F. Calculation of optimum cutting parameters based on minimum energy footprint [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60 (1): 149-152.
- [11] Abele E, Braunb S, Schraml P. Holistic Simulation Environment for Energy Consumption Prediction of Machine Tools [J]. Procedia Cirp, 2015, 29: 251-256.
- [12] 李先广, 李聪波, 刘飞等. 基于 Petri 网的机床制造过程碳排放建模与量化方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18 (12): 2723-2735.
- [13] 唐任仲, 贾顺, 吕景祥. 基于活动的产品车间制造过程碳排放量计算方法 [J]. 机电工程, 2011, 28 (06): 639-644.
- [14] Li W, Zein A, Kara S, et al. An investigation into fixed energy consumption of machine tools [M] //Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 268-273.
- [15] 胡狄. 面向加工中心的机械加工工艺过程节能优化方法研究 [D]. 武汉科技大学, 2016.