

DOI: 10.3901/JME.2019.17.172

机床服役过程能量效率的可预测特性及 预测方法研究*

谢俊^{1,2} 刘飞³ 蔡维³

(1. 重庆工商大学制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室 重庆 400067;

2. 重庆理工大学机械工程学院 重庆 400054;

3. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400030)

摘要: 以机床为能耗主体的机械加工系统量大面广, 能量消耗总量巨大, 由其带来的环境问题日益严重, 以至于能量效率提升相关研究已经成为了全球共同关注的问题。通过分析机床运行过程中的时段能耗特性, 对各个运行时段的能量源的运行特性进行了系统研究; 然后, 从能量消耗机理出发, 对机床运行过程各时段能量消耗的可预测特性及预测方法进行研究; 最后提出了机床服役过程能量效率预测方法。案例研究和试验验证表明, 该方法的预测精度可以达到90%以上, 充分证明了该预测方法具有较好的实用性和较高的预测精度。该方法能够为能效提升研究提供工具支持, 具有较好的应用前景。

关键词: 机床; 能量效率; 可预测特性; 预测方法

中图分类号: T0

Research on the Characteristics and Methodology for Predicting Energy Efficiency during the Service Process of Machine Tools

XIE Jun^{1,2} LIU Fei³ CAI Wei³

(1. Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067;

2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054;

3. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract: The machine tools are numerous and are used in a wide range of applications in industry, the total amount of energy consumption by machine tools is extremely high, and the environmental problem caused by the energy consumption is more and more serious. For the reasons mentioned above, the researches on how to promote energy efficiency of machine tools have become the focus of many organizations and universities. In this paper, the running characteristics of energy consumption components are studied systematically based on the analysis of the energy consumption characteristics of each stage in manufacturing process, then the characteristics and method for predicting energy consumption in in each manufacturing process are studied based on the mechanism of energy consumption. Finally, the method for predicting energy efficiency during the service process of machine tools is presented. The experimental results indicate that the accuracy of this method can reach over 90%, and the feasibility and accuracy of the method is verified by the experimental results. The research is capable of providing method support for the research on energy efficiency promoting and have broad application prospect.

Key words: machine tools; energy efficiency; predictable characteristic; prediction method

0 前言

以机床为能耗主体的机械加工系统量大面广,

其能量消耗总量巨大, 其对环境的影响十分巨大。因此, 如何降低机床运行过程的能量消耗, 提高其运行过程的能量效率已成为了全球共同关注的课题。英国政府在《英国低碳转化计划》中要求到2020年碳排放量在1990年基础上减少34%^[1]。2013年欧盟在《2030气候和能源框架》中指出, 到2030年将能源利用率提高27%^[2]。美国与2014年提出建

* 国家自然科学基金(51705055)、重庆市基础科学与前沿技术研究专项(cstc2017jcyjAX0021)和重庆市教委科学技术研究(KJ1709227)资助项目。20180826收到初稿, 20190418收到修改稿

立专门机构关注能源密集型和数字信息密集型制造业的能源使用优化问题^[3]。我国在“中国制造 2025”发展战略报告中指出到 2020 年,重点行业单位工业增加值能耗、物耗及污染排放明显下降。

另一方面,近年来还有许多国内外专家和学者针对提高机床运行过程能量效率,从能效评价和车间节能调度等方面提出了很多卓有成效的研究。BEHRENDT 等^[4]基于标准工件详细地描述了不同试验步骤,进而提出了一种用于评价机床能量消耗的新方法。VIKHOREV 等^[5]针对车间节能运行,提出了一种监测和管理的架构,通过该架构能够使决策支持系统和企业服务能够考虑到每个生产资产所使用的能源和相关的能源使用过程,从而促进全球和当地能源的优化。SALONITIS 等^[6]对能源效率的相关研究方法进行了综述。主要集中在生产和机床两方面,以及如何将这两方面结合起来。此外,还从技术和文化两方面讨论了能源效率制造的主要挑战,确定了主要障碍。LIU 等^[7]以制造业中广泛使用的经典作业车间环境为研究对象,提出了一种最小化总功耗和总加权延迟的双目标问题的优化模型,并采用非优势排序遗传算法求解帕累托前沿。HE 等^[8]研究了车间节能优化方法,该方法针对机床选型和制定节能操作规程两方面对机床能量消耗进行优化,其机理是通过减少加工操作的能耗和减少机床运行的空载能耗来提高柔性车间的能量效率。MOUZON 等^[9]提出了一种解决多目标优化问题的框架,该框架能最大限度地降低总能耗和总延误,并通过一种新的贪婪随机多目标自适应搜索元启发式算法,得到了一组非支配解的近似帕累托前沿。

上述研究一方面是通过构建体系架构来对能量效率进行评价,另一方面是对车间任务进行调度来达到能效提升的目的。但上述研究要么缺少对于实际生产过程的详细实施过程描述,或因为不能获得加工车间能耗属性等原因,不便于指导实际生产过程中的能效提升。若能够事先对机床运行过程的能量消耗特性及能量效率进行预测,就能对工件加工过程各个能耗环节进行评价,并针对能效有待提升的能耗环节提出对应的提升手段;另一方面,通过能效预测方法还可以事前发现工艺方案中的不足之处,以便有针对性地优化工艺过程,使加工过程的能量效率得到提升。显然,能量效率预测是能效提升的重要支持工具。

因此,拟从机床的能耗源的构成分析入手,从能量消耗机理出发对其运行过程能耗特性进行系统的研究,从而研究其能量效率的可预测特性和实施预测的条件。能量效率预测方法能够为能效提升方法的提出提供理论依据和方法支持。

1 机床服役过程能量效率模型

机床服役过程能量效率通常被定义为其运行过程中有效能耗(或切削能耗)与总能耗之比。根据其定义,其表达是可以表示为

$$Eff = \frac{E_c}{E_{in}} \quad (1)$$

根据文献[10]研究,机床服役过程中,其能耗总是由若干个启动时段能耗、空载时段能耗以及加工时段能耗构成。其中,加工时段能耗分别由待机能耗、切削能耗以及附加能量损耗构成。数控机床服役过程能耗示意图如图 1 所示。

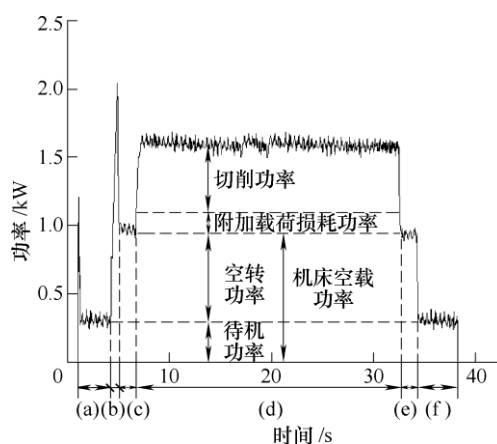


图 1 数控机床服役过程能耗示意图

机床服役过程能量效率模型可以进一步表达为

$$Eff = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} E_{c,i}}{\sum_{i=1}^{N_r} E_{r,i} + \sum_{i=1}^{N_{st}} E_{st,i} + \sum_{i=1}^{N_{un}} E_{un,i} + \sum_{i=1}^{N_M} E_{M,i}} \quad (2)$$

式中, E_r 是机床待机过程所消耗的能量; E_{st} 是机床主轴系统启动过程所消耗的能量; E_{un} 是机床处于空载状态所消耗的能量; E_c 是机床切削金属所消耗的能量; E_M 是机床切削工件过程中的总能量。

如果能够分别实现对模型(2)中每个参数进行预测,即可很容易对全过程的能量效率进行预测。因此,探讨机床的能量效率可预测特性,可以转换成探讨机械加工过程中各个运行时段所耗能量的可预测特性。

2 机床待机过程能耗源运行特性及预测方法研究

2.1 机床待机能耗特性研究

当机床主电源开启后,机床各个相关功能元件

将处于上电状态,以确保机床具备运行所需的基本功能。该状态是机床能够正常运行的基础,是机床运行所必需的、最基本的一种状态,即待机状态。

KALPAKJIAN 等对机床能耗源进行了系统地研究,根据机床能耗源功能的不同将其分成了七个子系统,具体能耗源及其功能分析如图2所示。

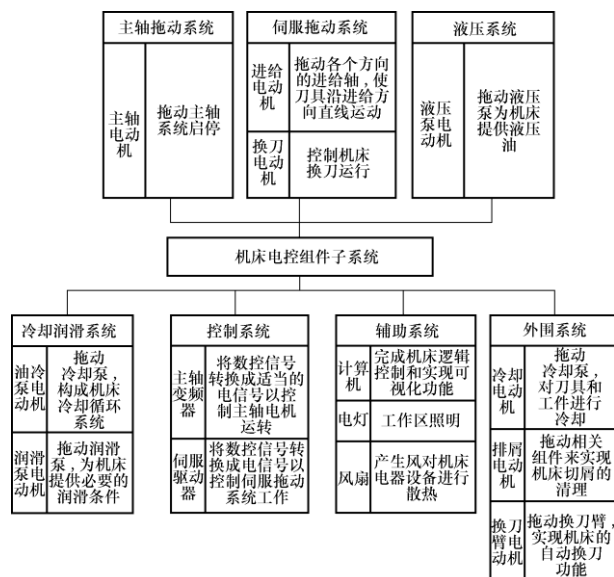


图2 机床能耗源功能分析图

待机过程的输入功率是机床运转所必须的功率。非必要能耗源只可能在工件加工过程中开启。因此,待机功率不包含其他非必要能耗源(如用于冷却、换刀、排屑等的动力部件)运行时的输入功率。

待机过程中,机床数控系统和伺服系统处于激活状态,其主要功能是保证主轴和进给轴处于特定的位置^[12]。此时机床外部载荷为零,只有机床原始定位负载。对于绝大多数机床而言,其定位负载都只与机床自身状态有关。因此,只要设备状态确定,其定位负载不变。即,机床待机过程中,主轴系统和伺服系统的功率为一恒定值。

待机过程中,能耗源为机床提供运行所必须的支持,该阶段液压系统和冷却润滑是最主要的能耗源,因此,其能量消耗属性将直接决定该过程的机床能耗属性。为了跟机床提供恒定的压力油,通常都通过溢流阀来实现压力控制。换言之,只有当卸载时,油压才会发生改变,从而导致液压泵电动机载荷的变化^[13]。因此,液压泵电动机绝大多数都处于恒功率工作状态。对于冷却和润滑系统,其工作过程通常都只会有一种单一的运行模式,其运行不会随加工载荷和机床运行状态的变化而变化。因此,也可以看作是恒功率工作过程。

机床控制系统主要是由半导体元器件组成的主轴变频器,伺服和放大系统等构成。其功率很低且

只有当负载发生变化时候其工作功率才会发生变化。当机床处于待机过程时,其负载恒定,因此,其消耗的功率也为一恒定值。

辅助系统是为了使机床在工作过程中具有处于一个更好的工作状态,使工人具有更好的操作环境。该系统运行过程与其他部件运行状态没有直接关系,其只与当前工作环境有关,且通常为单模式设定。因此,其功率为一固定值。

2.2 机床待机能耗预测方法研究

根据各能耗源能耗特性研究可知,待机过程中,其输入功率都近似为一固定值。即机床的输入功率仅与机床自身属性有关,即设备不变,其待机功率则为一定值 C_r 。因此,只需要通过对机床待机过程中的输入功率进行测量便可获得,即

$$P_r = C_r \quad (3)$$

工人在待机状态时主要进行如工件装夹,对刀等辅助工序,进行辅助操作的时间即为辅助时间。工件加工辅助时间可以根据实际过程中包含的辅助工作的多少以及繁简进行估算。因此,待机能耗可以采用模型式(4)进行预测。

$$E_r = C_r t_r \quad (4)$$

式中, t_r 是机床处于待机状态的时间。

3 机床启动能耗预测方法研究

3.1 机床启动功率模型

传统设备的主轴系统大多由普通异步电动机拖动机械传动系统构成^[14]。电动机学^[15]中将电动机拖动功率平衡方程表示为

$$P_1 = p_{Cu1} + p_{Fe} + p_{Cu2} + p_{mec} + p_{ad} + P_2 \quad (5)$$

模型中, P_1 是主轴系统运行过程中,电动机的输入功率; p_{Cu1} 是电动机运行过程中,定子绕组电流导致的铜损; p_{Fe} 是旋转磁场所产生的定子铁损耗; p_{Cu2} 是由于感应电流引起的转子线圈铜损; p_{mec} 表示电动机旋转过程中的机械损耗,即摩擦和风阻损耗; p_{ad} 是异步电动机中谐波磁通和基波磁通在线圈、铁芯及金属部件中所产生的附加铁耗和铜耗; P_2 是电动机用于拖动负载的功率,即输出功率。

根据如图3所示电动机等效电路,电动机拖动功率平衡方程可以表示为^[16]

$$P_1 = \frac{m_1(r_1 + r_m)U_1^2}{(r_1 + r_m)^2 + (x_1 + x_m)^2} + \frac{T_{mec}\pi n(sr_1 + r_2')}{30(1-s)r_2'} + \frac{(sr_1 + r_2')(k_{pa} + 1)P_2}{(1-s)r_2'} \quad (6)$$

式中, m_1 是电动机的相数; r_1 是定子线圈电阻; r_m 是电动机的等效励磁电阻, 是等效铁损耗的参数; U_1 是电动机的输入电压; x_m 是等效电路的励磁电抗; x_1 是定子绕组的漏抗; T_{mec} 是电动机旋转过程中的机械阻力矩; n 是主轴电动机的转速; s 是主轴电动机拖动负载运行时的转差率; r_2' 是等效电路转子电阻; k_{pa} 是电动机拖动负载附加损耗系数。

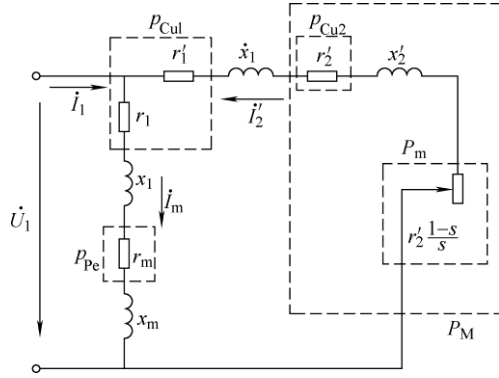


图3 异步电动机的等效电路^[15]

主轴系统运行过程中, 传动部分损耗主要包括与主轴角速度成正比的库伦摩擦损耗和与主轴角速度平方成正比的黏性摩擦损耗。根据与载荷是否有关又可以将库伦摩擦损耗功率分成载荷损耗功率(与载荷功率有关, 并近似成正比)和非载荷库伦摩擦损耗功率(与负载无关)。

文献[17]通过对传动系统的能量传递特性进行系

$$P_1 = \left(\frac{m_1(r_1 + r_m)U_1^2}{(r_1 + r_m)^2 + (x_1 + x_m)^2} + \frac{T_{mec}\pi n(t)(s(t)r_1' + r_2')}{30(1-s(t))r_2'} + \frac{(s(t)r_1' + r_2')(k_{pa} + 1)}{(1-s(t))r_2'} \left(M_{om} \frac{\pi n(t)}{30} + B_m \frac{\pi^2 n^2(t)}{900} + J_m \frac{\pi^2 n(t)}{900} \frac{d(n(t))}{dt} \right) \right) \quad (8)$$

其中, $s(t) \in (0, 1]$; $n(t) \in [0, n_t]$ 。

数控机床通过变频器改变输入电源频率来达到改变主轴电动机转速的目的。其在基频以上和基频以下调速模式分别为恒转矩调速和恒功率调速^[18]。

基频下调时候($f \leq f_{base}$), 为了不影响电动机的拖动能力, 就必须保证主磁通在调速过程中不发生改变。为保证主磁通恒定, 当输入频率 f_1 从基频 f_{base} 往下调时, 就必须同比例降低感应电动势 E_1 , 即恒电动势频率比控制。正常运转过程中, 感应电动势较大, 定子电阻和漏磁感抗产生的压降通常可以忽略, 此时, 输入电压约等于感应电动势, 即: $U_1 \approx E_1$ 。模型表示为

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_N}{f_{base}} \approx 4.44 N_1 K_{N1} \Phi_m = C \quad (9)$$

模型中, U_1 是主轴系统的输入电压; f_1 是主轴系统输入频率; U_N 是主轴电动机额定输入电压; f_{base} 是主轴电动机的基频; K_{N1} 是主轴电动机的绕

组研究, 构建出机床传动系统的能量传输模型为

$$P_2 = \alpha_m P_c + M_{om} \omega + B_m \omega^2 + J_m \omega \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

$$\alpha_m = \prod_{k=2}^n (1 + b_k)$$

$$M_{om} = j_2 M_{fo2} + \sum_{i=3}^n \prod_{k=2}^{i-1} (1 + b_k) j_i M_{foi}$$

$$B_m = j_2^2 B_{r2} + \sum_{i=3}^n \prod_{k=2}^{i-1} (1 + b_k) j_i^2 B_{ri}$$

$$J_m = j_2^2 J_2 + \sum_{i=3}^n \prod_{k=2}^{i-1} (1 + b_k) j_i^2 J_i$$

式中, α_m 是主轴传动系统的附加载荷损耗系数; M_{om} 是传动系统等效非载荷库伦摩擦阻力矩; M_{foi} 是第 i 个传动过程的阻力矩(非载荷库伦摩擦); B_m 是传动系统的等效黏性阻尼系数; B_{ri} 是第 i 个传动过程的黏性摩擦阻尼系数; J_m 是传动系统的等效转动惯量; J_i 是第 i 个传动过程的等效转动惯量; b_i 是第 i 个传动过程的载荷损耗系数; j_i 是第 i 个传动过程的等效传动比。

机床启动时, 主轴从静止状态开始加速到设定转速 n_t , 此时主轴电动机转速不断增加, 转差率随着转速的增加不断变小, 各传动环节的转动能量越来越大, 各个参量都是时间的函数。因此, 启动过程中的功率模型可以表示为

组因数; N_1 是电动机定子绕组线圈匝数; Φ_m 是主轴电动机的主磁通; C 是变频调速的压频比。

当在基频以上进行调速时($f > f_{base}$), 电动机输入电压不可能随着输入频率增大(不可能大于电网输出电压), 因此, 当频率升高时电动机必然处于弱磁状态运行。此时电动机的定子电抗也会随频率的改变而改变

$$x_1 = 2\pi f_1 L_1 \quad (10)$$

$$x_m = 2\pi f_m L_m \quad (11)$$

式中, L_1 和 L_m 分别是电动机定子绕组和励磁绕组的电感系数。

变频调速过程中, 转速与输入频率的关系为

$$n = \frac{60 f_1}{p} (1 - s) \quad (12)$$

模型中, p 是电动机的极对数。

根据以上分析可以将数控机床的启动功率综合表示为

$$P_1 = \begin{cases} \left[\frac{m_1(r_1 + r_m)C^2 f_1^2}{(r_1 + r_m)^2 + 4\pi^2 f_1^2 (L_1 + L_m)^2} + \frac{2T_{\text{mec}} \pi f_1 (s(t)r_1 + r_2)}{pr_2} + \frac{(s(t)r_1 + r_2)(k_{pa} + 1)}{r_2} \left(M_{\text{om}} \frac{2\pi f_1}{p} + B_m \frac{4f_1^2 \pi^2}{p^2} (1 - s(t)) - J_m \frac{4\pi^2 f_1^2}{p^2} \frac{d(s(t))}{dt} \right) \right] & f_1 \leq f_{\text{base}} \\ \left[\frac{m_1(r_1 + r_m)U_1^2}{(r_1 + r_m)^2 + 4\pi^2 f_1^2 (L_1 + L_m)^2} + \frac{2T_{\text{mec}} \pi f_1 (s(t)r_1 + r_2)}{pr_2} + \frac{(s(t)r_1 + r_2)(k_{pa} + 1)}{r_2} \left(M_{\text{om}} \frac{2\pi f_1}{p} + B_m \frac{4f_1^2 \pi^2}{p^2} (1 - s(t)) - J_m \frac{4\pi^2 f_1^2}{p^2} \frac{d(s(t))}{dt} \right) \right] & f_1 > f_{\text{base}} \end{cases} \quad (13)$$

3.2 机床启动能耗预测方法研究

根据模型式(7)、(12)可以看出,机床主轴启动过程中,输入功率将随着时间发生剧烈变化,其规律十分复杂。但其动态特性均由机床固有的属性决定。只要设备类型相同,其在相同转速下运行的启动过程具有相同的能耗特性,即其启动过程的功率的动态特性以及完成启动过程所需时间应相同。因此,机床启动过程中所消耗的能量是设定目标转速的单变量函数

对于普通机床,其转速是通过调节传动系统的传动比来实现转速调节,而不同传动链具有截然不同的等效特性,其各自对应的启动特性和时间也各不相同。因此,可以事先选取机床的所有的转速进行试验,分别记录各级转速下启动过程所消耗能量和达到稳定的时间(启动时间),并将测得的结果存储,从而得到不同转速下启动能耗对照表(表1)。

表1 转速—启动能耗/时间对照表

转速 $n / (\text{r/min})$	能耗 E_{st} / J	时间 t / s
n_1	$E_{\text{st}}(n_1)$	t_1
n_2	$E_{\text{st}}(n_2)$	t_2
\vdots	\vdots	\vdots
n_j	$E_{\text{st}}(n_j)$	t_j

数控机床是通过改变输入频率来实现变速,理论上可以将主轴转速设置为任意转速,因此不可能测量每个转速下的启动能耗和时间。在各级传动链下,分别测量若干个不同转速对应的启动能耗和时间,并根据试验结果拟合合成对应的拟合函数。具体的拟合函数表达式为

$$E_{\text{st}}(n) = \begin{cases} f_{\text{st},1}(n) & n \leq \frac{60f_{\text{base}}}{p} \\ g_{\text{st},1}(n) & n > \frac{60f_{\text{base}}}{p} \\ \vdots \\ f_{\text{st},j}(n) & n \leq \frac{60f_{\text{base}}}{p} \\ g_{\text{st},j}(n) & n > \frac{60f_{\text{base}}}{p} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $f_{\text{st},j}(n)$ 是机床处于第 j 级转速档,且设定转在基频对应转速以下时的启动能耗预测模型; $g_{\text{st},j}(n)$ 是机床处于第 j 级转速档,且设定转在基频对应转速以上时的启动能耗预测模型。

$$T_{\text{st}}(n) = \begin{cases} h_{\text{st},1}(n) & n \leq \frac{60f_{\text{base}}}{p} \\ k_{\text{st},1}(n) & n > \frac{60f_{\text{base}}}{p} \\ \vdots \\ h_{\text{st},j}(n) & n \leq \frac{60f_{\text{base}}}{p} \\ k_{\text{st},j}(n) & n > \frac{60f_{\text{base}}}{p} \end{cases} \quad (15)$$

$h_{\text{st},j}(n)$ 是机床处于第 j 级转速档,且设定转在基频对应转速以下时的启动时间预测模型; $k_{\text{st},j}(n)$ 是机床处于第 j 级转速档,且设定转在基频对应转速以上时的启动时间预测模型。

根据构建的启动能耗/时间预测表和预测函数,只要将对应传动链下对应的转速代入便可得到相应的启动能耗和时间,从而实现任意转速下的启动能耗和启动时间的预测。

4 机床空载能耗预测方法研究

4.1 机床空载功率模型

空载功率是指机床在无切削载荷运转时所需的功率,它是维持机床在一定转速下稳定运转的最小输入功率。机床处于空载状态时,切削负载为零,即 $P_c = 0$ 。由于无切削负载,电动机转差率非常小,一般 $s \ll 0.05$ ^[19],可以近似为 0。另一方面,由于该阶段主轴处于无负载稳定运转,主轴系统所具备的动能也为固定值,其转动功率 $J_m \omega \frac{d\omega}{dt} = 0$ 。因此,机床主轴系统空载过程功率模型可以表示为

$$P_u = \frac{m_1(r_1 + r_m)U_1^2}{(r_1 + r_m)^2 + (x_1 + x_m)^2} +$$

$$\frac{T_{\text{mec}} \pi + \pi M_{\text{om}} (k_{pa} + 1)}{30} n + \frac{B_m \pi^2 (k_{pa} + 1)}{900} n^2 \quad (16)$$

对于数控机床而言, 其采用变频技术来控制主轴转速, 但其在空载过程中具有相同的运行状态 ($P_c = 0$, $s \approx 0$, $J_m \omega \frac{d\omega}{dt} = 0$)。但由于在基频以上调速和基频以下调速机床具有不同的工作状态, 因此, 在对应的阶段其能量消耗特性也会有所不同。

当机床在基频以下进行调速时 ($f \leq f_{\text{base}}$), 机床为恒转矩控制, 根据前文恒转矩调速特性, 其空载功率模型可以表示为

$$P_u = \frac{m_1(r_1 + r_m)C^2 n^2 p^2}{3 \cdot 600(r_1 + r_m)^2 + 4\pi^2 n^2 p^2 (L_1 + L_m)^2} + \frac{T_{\text{mec}} \pi + \pi M_{\text{om}} (k_{pa} + 1)}{30} n + \frac{B_m \pi^2 (k_{pa} + 1)}{900} n^2 \quad (17)$$

当机床在基频以上进行调速时 ($f > f_{\text{base}}$), 机床为恒功率控制, 根据前文恒功率调速特性, 其空载功率模型可以表示为

$$P_u = \frac{900 m_1(r_1 + r_m)U_N^2}{900(r_1 + r_m)^2 + \pi^2 n^2 p^2 (L_1 + L_m)^2} + \frac{T_{\text{mec}} \pi + \pi M_{\text{om}} (k_{pa} + 1)}{30} n + \frac{B_m \pi^2 (k_{pa} + 1)}{900} n^2 \quad (18)$$

模型式(15)~(17)分别不同类别机床在不同调速模式下的空载功率模型, 其中涉及众多难以直接获取的电动机和传动系统设计参数。因此, 该模型很难用于计算实际工作过程的空载功率。

4.2 机床空载能耗预测方法研究

4.2.1 机床空载功率预测方法研究

通过分析上述模型可以看出, 无论采用什么调速方式, 传动系统所对应的机械传动链一定的情况下, 机床的空载功率模型都是主轴转速的单变量函数。因此, 对于特定的机床, 只要转速级和设定转速一定, 其空载过程的输入功率就可以确定。

对于普通机床来说, 机床通过调节齿轮箱匹配出不同的传动比来实现转速变换, 其对应的转速是离散数值。因此, 可以分别选取每一个转速进行空载试验, 测量并记录每个转速对应的空载功率值, 以此构建出机床空载功率表, 如表2所示。

表2 空载功率数据记录表

编号	参数	
	转速 $n/(r/min)$	功率 P_{un}/W
1	n_1	$P_{un}(n_1)$
2	n_2	$P_{un}(n_2)$
\vdots	\vdots	\vdots
$j-1$	n_{j-1}	$P_{un}(n_{j-1})$
j	n_j	$P_{un}(n_j)$

对于采用变频调速的数控机床, 可以在每个转速档下的基频以上和基频以下分别选取若干个转速进行空载试验。根据试验测量结果, 拟合出不同转速段的空载功率函数, 如式(19)所示。

$$P_{un}(n) = \begin{cases} f_{un,1}(n) & n \leq \frac{60f_{\text{base}}}{p} \\ g_{un,1}(n) & n > \frac{60f_{\text{base}}}{p} \\ \vdots & \\ f_{un,j}(n) & n \leq \frac{60f_{\text{base}}}{p} \\ g_{un,j}(n) & n > \frac{60f_{\text{base}}}{p} \end{cases} \quad (19)$$

式中, $f_{un,j}(n)$ 是机床处于第 j 级转速档, 且设定转速在基频对应转速以下时的空载功率预测模型; $g_{un,j}(n)$ 是机床处于第 j 级转速档, 且设定转速在基频对应转速以上时的空载功率预测模型。

只要将任意设定转速代入式(19)所示模型, 就可以对加工过程任意转速下的空载功率进行预测。

4.2.2 机床空载过程时间预测方法

机床空载主要包括两种情况, 一是伺服系统驱动伺服电动机拖动刀具向工件靠近, 直到开始切除工件材料; 二是完成工件加工, 刀具脱离工件并返回加工参考点。对于实际加工可以分为四个部分:

① 刀具相对与工件以快速定位速度 ($G00$) 从起始点 (x_1, y_1, z_1) 快速定位到切削点 (x_2, y_2, z_2); ② 刀具从切削点 (x_2, y_2, z_2) 开始以设定进给速度 ($G01$) 运动至工件接触点 (x_3, y_3, z_3); ③ 刀尖脱离工件本身, 并以设定进给速度 ($G01$) 从加工结束点 (x_4, y_4, z_4) 运动至退刀点 (x_5, y_5, z_5); ④ 刀具以快速定位速度 ($G00$) 从退刀点回到程序设定参考点 (x_1, y_1, z_1)。

机床的快速定位速度由机床出厂时设定, 其具体值可从机床说明书中获取; 切削进给速度 f_F 则是根据工件加工要求进行设定。因此, 工件加工过程空载时间计算式为

$$t_{un} = t_1 + t_2 \quad (20)$$

$$t_1 = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}}{f_0} + \frac{\sqrt{(x_1 - x_5)^2 + (y_1 - y_5)^2 + (z_1 - z_5)^2}}{f_0}$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2}}{f_F} + \frac{\sqrt{(x_5 - x_4)^2 + (y_5 - y_4)^2 + (z_5 - z_4)^2}}{f_F}$$

根据模型式(19)、(20), 机床空载能耗预测模型可以表示为

$$E_{\text{un}} = P_{\text{un}}(n) \cdot t_{\text{un}} \quad (21)$$

预测时, 只需要将编制程序设定的转速, 进给速度以及对应的特征位置点坐标代入模型式(21), 便预测出该加工过程中的空载能耗。

5 加工时段能耗预测方法研究

当机床处于加工时段时, 伺服系统根据数控程序控制各轴进给电动机拖动刀具或工作台实现工件的连续切削。由工件加工过程功率曲线图(图 1 所示)可以看出, 该阶段所消耗的功率除了包括维持机床正常运转的待机功率和空载功率外, 还包括用于工件切削能耗及其引起的附加载荷损耗功率。鉴于前文已经对待机和空载功率进行了研究, 以下主要对用于工件切削的能耗及其引起的附加载荷损耗的可预测特性和预测方法进行研究。

5.1 工件切削功率预测方法研究

切削功率是机床用于工件拖动刀具使切屑与工件分离所需的输入功率。

文献[20]研究表明, 工件加工过程所消耗的功率与加工过程的材料切除率成正比, 模型如(22)所示。同时, 还通过试验的方法得出了各种材料的比能系数 u_s , 如表 3 所示。

$$P_c = u_s \cdot MRR \quad (22)$$

式中, u_s 是切削单位体积的材料所消耗的能量; MRR 是单位时间切除工件材料的体积, 即材料切除率。

表 3 部分材料比能系数取值范围^[20]

材料	能耗值	
	hp·min/in ³	W·s/mm ³
铝合金	0.15~0.4	0.4~1.0
镁合金	0.1~0.2	0.3~0.6
铜合金	0.5~1.2	1.4~3.2
结构钢	0.7~3.4	2~9
高熔点合金	1.1~3.5	3~9
高温合金	1.2~3	3.2~8
不锈钢	0.8~1.9	2~5
镍合金	1.8~2.5	4.8~6.7
铸铁	0.4~2	1.1~5.4
钛合金	0.7~2	2~5

注: 若刀具不锋利, 以上系数取 1.25 倍。

当选择不同的加工过程, 不同的加工条件对工件加工时, 其切削比能通常很不相同^[21-22]。因此, 将材料切除率作为整体变量构建出的切削功率预测

模型的预测精度不稳定, 且表 3 中所列材料比能系数范围较大, 系数的选取具有很强的主观性, 其预测精度很难保障。

文献[16]采用试验研究的方法, 通过对不同材料进行实际切削, 并根据测量结果工件了工件切削能耗的预测模型。但由于该模型的系数与加工条件具有很强的相关性, 当加工条件不同时, 参数会发生较大变化。因此该模型只适用于特定加工条件下的切削功率预测。

另一方面, 许多学者通过预测切削力来间接预测切削功率。目前已有的切削力模型主要理论模型和经验模型^[23]两大类。

理论模型是基于材料去除机理研究构建的模型, 目前用的较多的切削力理论计算模型如式(23)所示^[24-26]。

$$F_c = \tau_s b_D h_D \left(\frac{A_h^2 - 2A_h \sin \gamma_o + 1}{A_h \cos \gamma_o} \right)^n \times \left(\frac{A_h - \sin \gamma_o}{\cos \gamma_o} + \tan \psi \right) \quad (23)$$

模型中, τ_s 是材料在单位应变时的剪切屈服强度(MPa); b_D 是切屑的公称宽度(mm); h_D 是切屑的公称厚度(mm); n 是工件的强度系数; ψ 是切削合力与材料剪切面之间的角度; γ_o 是切削刀具前角; A_h 是切除材料的压缩比。

该模型是基于工件切削过程中各相关参数关系来建模, 能够很好地表征加工过程对切削力的影响因素。但涉及的参数不便于获取, 且没办法事先得知切屑的相关参数, 因此很少用于实际预测。

经验模型由于具有较好地可操作性, 且其预测精度相对较高(尤其在特定的加工条件下), 实际应用中得到广泛应用。文献[27-28]构建的切削力预测模型如式(24)所示, 并提出了在不同加工条件下的修正系数。

$$F_c = C_{F_c} a_{sp}^{x_{F_c}} f^{y_{F_c}} v_c^{n_{F_c}} K_{F_c} \quad (24)$$

式中, C_{F_c} , x_{F_c} , y_{F_c} , n_{F_c} 是模型参数(由加工条件决定); $K_{F_c} = K_{M_{F_c}} K_{k_{F_c}} K_{\gamma_{0F_c}} K_{\lambda_{sF_c}}$ 是不同加工条件下的修正系数; $K_{M_{F_c}}$ 是不同工件材料的强度和硬度的修正系数; $K_{k_{F_c}}$, $K_{\gamma_{0F_c}}$, $K_{\lambda_{sF_c}}$ 分别是刀具主偏角, 前角以及刃倾角的修正系数。

除此之外, 针对一些特殊加工过程的切削力预测也开展了许多研究。

KHAMEL^[29]针对立方氮化硼刀具加工轴承钢材料的切削过程进行了研究, 并建立了其切削力计算模型。LALWANI 等^[30]通过试验研究构建

了陶瓷刀具加工 18Ni(250)马氏体时效钢的切削力计算模型。Abou-El-Hossein 构建了涂层硬质合金刀具铣削加工 AISI P20 工具钢的切削力预测模型^[31]。

现有研究在各自的适用条件下都具有较高的预测精度。另外, 诸多研究证明在工件加工全过程中, 用于刀具切除工件材料所消耗能量占消耗总能量比例通常低于 30%^[14], 案例中的汽车制造产线的最高能效只有 14.8%。因此, 对加工过程中切削能耗进行预测即使存在一定的误差, 其对加工全过程的能效预测精度影响甚小。

5.2 机床附加载荷损耗功率预测方法研究

刀具切削工件时, 主轴电动机输入电流会增大以平衡负载扭矩。而主轴电流增大必然会增大定子和转子中的铜损和杂散损耗; 另一方面, 切削负载还会增大机械传动系统间的摩擦损耗。根据机床稳定运行过程中的功率平衡方程, 附加载荷损耗功率可以表示为

$$P_{ad} = P_i - P_{un} - P_c \quad (25)$$

综合上述分析, 机床运行过程的附加载荷损耗功率模型可以表示为

$$P_{ad} = \frac{(sr_1 + r_2')(k_{pa} + 1)\alpha_m - (1-s)r_2'}{(1-s)r_2'} P_c + \frac{T_{mec}\pi n(sr_1 + sr_2')}{30(1-s)r_2'} + \frac{(sr_1 + sr_2')(k_{pa} + 1)\left(\pi M_{om}n + \frac{B_m\pi^2}{30}n^2\right)}{30(1-s)r_2'} \quad (26)$$

基于文献[33]的研究结论可知, 电动机的转差率 s 与载荷 T_c 近似成正比。通过分析模型(26)可知, 机床稳定运行过程中的附加载荷损耗功率是以切削功率和设定转速为自变量的二元函数。也就是说, 在给定转速下, 附加载荷损耗功率只与切削功率有关。

HU 等^[34]通过大量的试验研究表明, 当转速一定的时候, 载荷损耗功率 $P_{ad}(t)$ 可以拟合为切削负载的二阶模型, 其模型表示为

$$P_{ad}(t) = a_2 P_c(t)^2 + a_1 P_c(t) \quad (27)$$

模型中, a_1 和 a_2 分别是主轴系统的载荷损耗功率模型拟合系数。

因此, 可以在各转速下进行对应的切削试验, 并根据试验结果拟合得到机床在特定转速下的附加载荷损耗功率模型, 从而对任意转速和切削负载条件下的附加载荷损耗进行预测。

当转速档位不同时, 同样的负载在电动机端的

等效负载通常也不同, 其负载引起的附加载荷损耗功率也不同。因此, 对于不同的转速档, 需要分别对其附加载荷损耗系数进行单独获取。

在各个转速档位分别选取 k ($k \geq 2$) 组试验参数进行切削试验, 并分别记录下每组试验参数下的输入和输出, 将得到的试验结果构建如式(28)所示方程组。

$$\begin{cases} P_{i1}(t) - P_{un1}(n) = (a_1 + 1)P_{c1}(t) + a_2 P_{c1}^2(t) \\ \vdots \\ P_{ik}(t) - P_{unk}(n) = (a_1 + 1)P_{ck}(t) + a_2 P_{ck}^2(t) \end{cases} \quad (28)$$

将方程组用回归矩阵表示为

$$Y = X\beta \quad (29)$$

$$Y = \begin{pmatrix} P_{i1}(t) - P_{un1}(n) \\ P_{i2}(t) - P_{un2}(n) \\ \vdots \\ P_{ik}(t) - P_{unk}(n) \end{pmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} P_{c1}(t) & P_{c1}^2(t) \\ P_{c2}(t) & P_{c2}^2(t) \\ \vdots & \vdots \\ P_{ck}(t) & P_{ck}^2(t) \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} a_1 + 1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

根据(29)所示回归矩阵, 机床主轴系统载荷损耗功率模型拟合系数求解模型为

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (30)$$

根据所拟合得到的机床载荷损耗功率模型拟合系数就能对特定转速和特定机床负载下的附加载荷损耗功率进行预测。

5.3 切削时间预测方法研究

切削时间是机床拖动刀具连续完成切削的时间, 可以根据刀具路径与设定进给速度进行估算。对不同复杂程度的加工过程, 可分别采用直接估算法和自动估算法来对其加工时间进行估算。

(1) 直接估算法。

直接估算法是直接利用刀具切削路径长度除以设定进给速度来进行估算。该方法只能用于计算如外圆车削等刀具路径简单的切削时间估算, 其计算式可以表示为:

$$t_c = \frac{60L}{nf} \quad (31)$$

模型中, L 是刀具切削工件时的总位移, mm; n 是工件加工过程的设定转速; f 是工件加工过程

设定的进给速度。

(2) 自动估算法。

对于工件结构比较复杂的工作,其加工过程的刀具路径通常需要多轴联动来实现,其刀具路径长度很难直接得到,也不能用直接估算法来对其加工时间进行估算。由于其刀具路径需要多轴联动得到,因此,绝大多数情况都采用自动编程软件来编制其刀具轨迹。自动编程软件能够根据工艺人员设定的加工策略和进给量可以直接获得加工全过程持续时间(数控程序从 M03 运行至 M30),而刀具切削工件的时间可以近似采用工件切除体积除以设定的材料切除率获得,即

$$t_c = \frac{V}{MRR} = \frac{60V}{a_{sp} f v_c} = \frac{60\,000V}{a_{sp} f \pi \bar{D} n} \quad (32)$$

式中, V 式加工过程中切除工件的体积 (cm^3); $v_c = \pi \bar{D} n / 1\,000$ 是加工过程中的切削速度 (m/min); f 是加工过程中设定的进给速度 (mm/r); a_{sp} 是加工过程中设定的背吃刀量 (mm); \bar{D} 是工件直径 (mm)。

6 应用案例及试验验证

为了验证上述预测方法的有效性,利用上述预测方法对某盘类零件(图 4)在 C2-50HK/1 型数控机床上加的能量效率进行预测;同时,采用 HIOKI 3390 功率分析仪和 KISTLER 9257B 型多分力测力仪对实际加工过程的能量效率进行测量,最终与预测结果进行比较,以验证上述预测方法的有效性和预测精度。C2-50HK/1 型数控机床信息如表 4 所示。

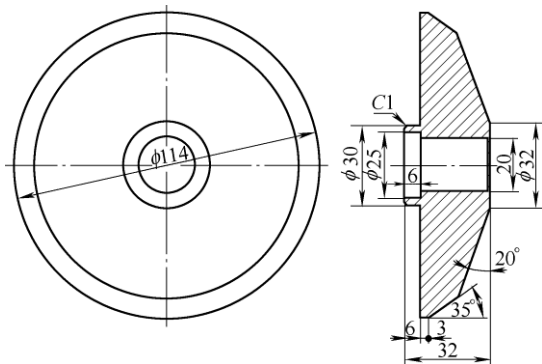


图 4 零件图

表 4 C2-50HK/1 设备信息表

参数	数值
转速范围/(r/min)	50~2 000
主轴电动机额定功率/kW	7.5
最大加工直径/mm	500

根据上述方法,要实现机床服役过程能量效率的预测,必须先通过试验的方法获取机床能量效率预测基础数据。

6.1 机床能量效率预测基础数据获取

(1) 机床待机功率获取。

通过分析机床待机过程各能耗源工作特性可知,机床待机过程的输入功率只与机床本身有关且只有一种工作状态。因此,采用功率分析仪测量机床待机状态下的功率,该值便是机床的待机功率。试验采用日置 HIOKI 3390 功率分析仪测得 C2-50HK/1 在待机状态下的输入功率为 225 W,即

$$P_r = 225 \text{ W} \quad (33)$$

(2) 机床启动能耗预测模型获取。

通过研究机床启动能耗模型可知,在同一转速档,机床启动能耗是主轴转速的函数。因此,在 C2-50HK/1 所对应的三个转速档下,分别选取若干转速进行启动试验,试验测得对应转速下的启动能耗如表 5 所示。

表 5 启动过程试验参数及结果

档位	转速 $n/(r/min)$	功率 E_{st}/J	转速 $n/(r/min)$	功率 E_{st}/J	转速 $n/(r/min)$	功率 E_{st}/J
低速档	50	598.4	200	2 584.2	350	6 727.6
	100	1 094.1	250	3 700.6	400	8 542.3
	150	1 784.2	300	5 034.1	450	10 837.4
中速档	100	651.7	500	3 122.6	900	8 868.8
	200	1 039.3	600	4 371.9	1 000	10 857.6
	300	1 554.7	700	5 735.7	1 100	13 524.9
	400	2 338.4	800	6 983.9	1 200	16 402.4
高速档	100	611.7	700	4 299.3	1 300	12 468
	200	997.1	800	5 411.9	1 400	14 465.2
	300	1 436.7	900	6 433	1 500	16 634.9
	400	2 006.8	1 000	7 471.1	1 600	19 452.6
	500	2 737.5	1 100	9 076	1 700	22 770.2
	600	3 530.5	1 200	10 657	1 800	25 704.6

将表 5 所列启动能耗拟合成转速的二阶函数得到的拟合曲线如图 5 所示,拟合出的启动能耗预测模型如模型式(34)所示。

$$E_{st} = \begin{cases} 0.050\,23x^2 + 0.09562x + 544.03 & \text{低速档} \\ 0.011\,92x^2 - 1.632\,45x + 894.26 & \text{中速档} \\ 0.008\,57x^2 - 2.250\,32x + 1\,325.06 & \text{高速档} \end{cases} \quad (34)$$

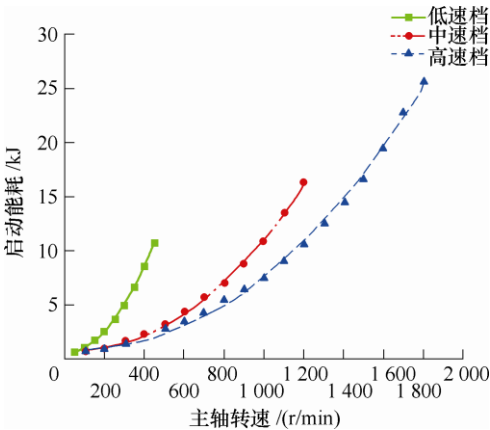


图 5 启动能耗拟合曲线

(3) 机床空载功率预测模型获取。

根据机床空载过程能耗特性分析可知，机床无负载运行时，其输入功率是主轴设定转速的单变量函数。因此，在 C2-50HK/1 所对应的三个转速档下，分别设置不同转速进行空载试验，将各个设定转速下的输入功率纪录如表 6 所示。

表 6 空载试验参数及结果

档位	转速 $n/(r/min)$	功率 P_{un}/W	转速 $n/(r/min)$	功率 P_{un}/W	转速 $n/(r/min)$	功率 P_{un}/W
低速档	50	576	200	1 274	350	1 907
	100	815	250	1 425	400	2 134
	150	1 060	300	1 674	450	2 361
中速档	100	528	500	1 371	900	1 973
	200	727	600	1 460	1 000	2 242
	300	948	700	1 572	1 100	2 418
	400	1 170	800	1 790	1 200	2 696
高速档	100	462	700	1 356	1 300	2 189
	200	604	800	1 522	1 400	2 419
	300	761	900	1 663	1 500	2 644
	400	918	1 000	1 787	1 600	2 867
	500	1 072	1 100	1 899	1 700	3 184
	600	1 221	1 200	2 048	1 800	3 515

根据如图 6 所示转速-负载特性曲线可知，低速档的基频转速为 200 r/min，中速档的基频转速为 500 r/min，高速档的基频转速为 800 r/min。

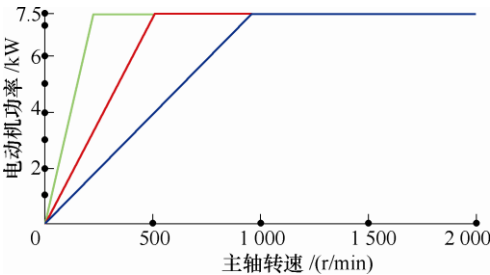


图 6 C2-50HK/1 机床的转速-负载特性曲线

根据表 6 所示结果，将对应转速档下的空载功

率分别在基频以上和基频以下拟合出对应的空载功率模型。拟合曲线如图 7 所示，得到的空载功率模型如(35)所示

$$P_{un} = \begin{cases} \begin{cases} 4.678x+346.5 & n \leq 200 \\ 0.002\ 09x^2+3.098\ 57x+553.29 & n > 200 \end{cases} & \text{(低速档)} \\ \begin{cases} 2.129x+310.1 & n \leq 500 \\ 0.001\ 24x^2-0.179\ 4x+1\ 128.61 & n > 500 \end{cases} & \text{(中速档)} \\ \begin{cases} 1.513\ 57x+308.39 & n \leq 800 \\ 0.001\ 24x^2-1.299\ 09x+1\ 810.446 & n > 800 \end{cases} & \text{(高速档)} \end{cases} \quad (35)$$

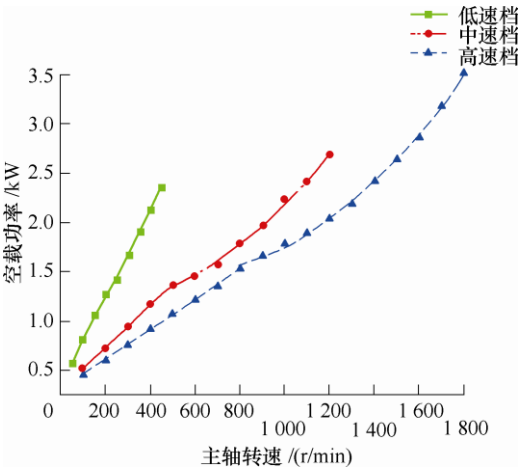


图 7 空载功率拟合曲线

(4) C2-50HK/1 附加载荷损耗系数获取。

根据模型(26)可知，在给定转速下，附加载荷损耗功率只与切削功率有关。因此，分别在 C2-50HK/1 数控车床三个转速档分别设定多组不同试验参数进行切削试验，根据测得各组试验结果按照第 5 节所述方法拟合出各转速档的附加载荷损耗系数。试验得到的 C2-50HK/1 数控车床低速档、中速档和高速档的附加载荷损耗系数为

$$\begin{cases} a_{l1} = 0.243 \\ a_{l2} = 3 \times 10^{-4} \end{cases} \quad \begin{cases} a_{m1} = 0.3867 \\ a_{m2} = 1.8 \times 10^{-5} \end{cases} \quad \begin{cases} a_{h1} = 0.346 \\ a_{h2} = 6 \times 10^{-5} \end{cases} \quad (36)$$

6.2 机床服役过程能量效率预测

在机床基础数据获得的基础上，还需要根据工件材料属性及其详细的工艺过程参数才能对全过程的能量效率进行预测。案例所选工件材料为铝合金，毛坯为 $\phi 120 \times 35$ 的圆盘。其工艺路线及工艺参数如表 7 所示。

表 7 案例工件工艺路线及参数

参数	工序		
	车 $\Phi 30$ 外圆	车内孔	车锥面
背吃力量 a_{sp}/mm	1 600	360	1.00
转速 $n/(\text{r}/\text{min})$	1 360	330	1.30
进给速度 $f/(\text{mm}/\text{min})$	1 000	280	1.85

工件加工过程中各个工序所用刀具及其参数如表 8 所示。

表 8 刀具及其参数

参数	刀具		
	90°外圆车刀	内孔车刀	90°外圆车刀
材料	硬质合金	硬质合金	硬质合金
κ_r	90°	75°	90°
γ_0	10°	15°	10°
λ_s	0°	0°	0°

根据制定的工艺路线及工艺参数,编制出对应工序的数控加工程序如图 8 所示。

车 $\Phi 30$ 外圆:	车内孔:	车锥面:
00132 (00132);	00133 (00133);	00134 (00134)
M41 S1360;	M41 S1000;	M41 S1600;
M8;	M8;	M8;
T0101 M3;	T0404 M3;	T0101 M3;
G0 X126 Z0.3;	G0 X18 Z30;	G0 X126 Z-9;
G72 W1.3 R0.6;	Z1;	G72 W1 R0.6;
G72 P1 Q2 U0 W0 F330;	G71 U1.85 R0.3;	G72 P1 Q2 U0 W0 F360;
N1 G0 Z-11;	G71 P3 Q4 U0 W0 F280;	N1 G0 Z-23;
G1 X114;	N3 G0 X26;	G1 X114;
Z-7;	G1 Z0;	X98.82 Z-12.16;
X112 Z-6;	X25 W-0.6;	X32 Z0;
X30;	Z-6;	N2 X15;
Z-1;	X21;	G0 X230 Z130 M5 M9;
X28 Z0;	X20 W0.6;	M30;
N2 X15;	N4 Z-33;	%
G0 X230 Z130 M5 M9;	G0 Z6 M5;	
M30;	Z130 M9;	
%	X290;	
	T0101 M30;	
	%	

图 8 工件加工数控程序

根据前文所述预测方法和已获得的机床能效预测基础数据,将工件加工过程参数代入对应的预测模型得到的各个工序的预测结果如表 9 所示。

表 9 能效预测结果

预测项	工序		
	车 $\Phi 30$ 外圆	车内孔	车锥面
待机能耗/kJ	15.3	2.55	15.3
启动能耗/kJ	14.12	7.64	19.664
空载能耗/kJ	131.23	27.34	382.31
切削能耗/kJ	41.28	2.195	98.803
附加载荷损耗/kJ	17.44	0.79	40.923
工序能效(%)	18.82	5.41	17.74
总能效(%)	17.4		

6.3 试验验证及误差分析

为验证案例工件加工过程能量效率的预测精度,采用表 7 所示工艺路线和参数加工工件,并分别测量加工过程的能量效率。加工出的工件图如图 9 所示。

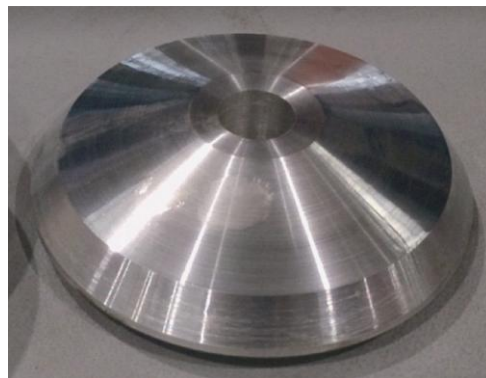
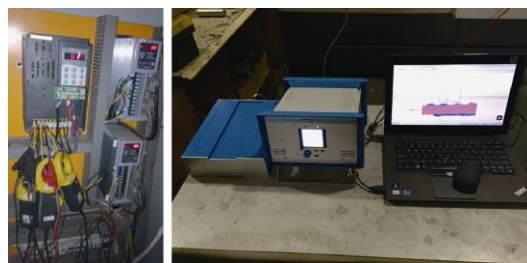


图 9 工件图

试验验证过程中,采用日置 HIOKI 3390 功率分析仪接入机床主轴系统电源输入端测量工件加工过程机床主轴系统的能量消耗;用 KISTLER 9257B 型多分力测力仪测量工件加工时的切削力,以此间接测量工件切削过程实际能耗。试验装置安装如图 10 所示。



功率采集接线图

切削力采集连接图

图 10 数据采集现场图

通过实际加工工件并测量加工过程的能耗信息,所得结果如表 10 所示。

表 10 试验验证实测结果

测量项	工序		
	车 $\Phi 30$ 外圆	车内孔	车锥面
切削能耗/kJ	43.385	2.38	107.03
总能耗/kJ	241.637	41.74	574.10
工序能效(%)	17.95	5.70	18.64
总能效(%)	17.82		

根据工件加工过程能量效率预测结果(表 9)和试验验证的测量结果(表 10),可以构建出如表 11 所示误差分析表。

表 11 误差分析表

误差项	工序			全过程
	车 $\Phi 30$ 外圆	车内孔	车锥面	
切削能耗(%)	4.85	7.77	7.69	6.88
总能耗(%)	9.22	2.93	2.98	4.73
能效(%)	4.81	4.98	4.85	2.26

试验验证及误差分析是为了验证上述方法的实用性和有效性,且并不是针对具有标准流程的生产过程。因此预测过程中直接用实际加工过程的辅助时间和空载时间来预测其加工过程的能效。在实际生产中,工件加工通常都是连续加工,其生产节拍相对比较固定,其辅助时间和空载时间能较容易地预测;另一方面,由于待机过程输入功率通常较小,空载过程时间很短,因此待机和空载时间的估算精度对工件加工全过程能量效率预测精度的影响不大,且加工时间越长,其影响就越小。

根据案例及试验验证可以看出,所述方法能够较准确地预测工件加工过程各个工步、工序以及全过程的能耗及能量效率,具有很好的实用性;另一方面,该方法能够为能效提升和评价研究提供方法支持,具有很好的应用前景。

7 结论

(1) 对机床服役过程各个运行时段的能耗源构成及其运行状态进行了系统地分析,进而对待机时段、启动时段、空载时段以及加工时段能量消耗的可预测特性进行了研究,从能量消耗机理上揭示了机床服役过程能量效率是可以被预测的这一结论。机床服役过程能量效率可预测特性研究研究了各时段能耗预测条件,为提出能效预测方法提供了理论基础。

(2) 根据机床服役过程各时段能耗源的运行特性及能耗特点,构建了各个运行时段的能耗理论模型,在此基础上提出了各个运行时段中能量消耗的预测方法以及机床服役全过程能效的预测方法。通过案例研究和试验验证表明,该方法的预测精度可以达到 90% 以上,充分证明了该预测方法具有较好的实用性和较高的预测精度。该方法能够为能效提升研究提供工具支持,具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Department of Energy & Climate Change. The UK low carbon transition plan: National strategy for climate and energy[M]. London: The Stationery Office, 2009.
- [2] European Commission. 2030 climate & energy framework [EB/OL]. [2018-01-27]. <https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/>, 2014.
- [3] Advanced Manufacturing Partnership. Report to the president accelerating U.S. advanced manufacturing [EB/OL]. [2017-02-24]. http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/PCAST/amp20_report_final.pdf, 2014.
- [4] BEHRENDT T, ZEIN A, MIN S. Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2012, 61(1): 43-46.
- [5] VIKHOREV K, GREENOUGH R, BROWN N. An advanced energy management framework to promote energy awareness[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 43: 103-112.
- [6] SALONITIS K, BALL P. Energy efficient manufacturing from machine tools to manufacturing systems[J]. Procedia CIRP, 2013, 7: 634-639.
- [7] LIU Y, DONG H, LOHSE N, et al. An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 65: 87-96.
- [8] HE Y, LI Y, WU T, et al. An energy-responsive optimization method for machine tool selection and operation sequence in flexible machining job shops[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 245-254.
- [9] MOUZON G, YILDIRIM M B. A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine[J]. International Journal of Sustainable Engineering, 2008, 1(2): 105-116.
- [10] 刘飞, 刘霜. 机床服役过程机电主传动系统的时段能量模型[J]. 机械工程学报, 2012, 48(21): 132-140.
LIU Fei, LIU Shuang. Multi-period energy model of electro-mechanical main driving system during the service process of machine tools[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(21): 132-140.
- [11] KALPAKJIAN S, SCHMID S R. Manufacturing engineering and technology[M]. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2006.
- [12] WECK M, BRECHER C. Werkzeugmaschinen konstruktion und berechnung[M]. 8th ed. London: Springer, 2006.
- [13] LI W, ZEIN A, KARA S, et al. An investigation into fixed energy consumption of machine tools[C]// Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 268-273.
- [14] 胡韶华. 现代数控机床多源能耗特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
HU Shaohua. Energy consumption characteristics of multiple-component of modern CNC machine tools[D].

- Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [15] 胡虔生, 胡敏强. 电动机学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- HU Qiansheng, HU Minqiang. Electromechanics[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [16] LV J, TANG R, JIA S, et al. Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools[J]. Journal of Cleaner Production, 2015.
- [17] 刘飞, 徐宗俊, 但斌, 等. 机械加工系统能量特性及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- LIU Fei, XU Zongjun, DAN Bin, et al. Energy characteristics of machining systems and its application[M]. Beijing: China Machine Press, 1995.
- [18] 李方园, 李亚峰. 数控机床电气控制简明教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- LI Fangyuan, LI Yafeng. Brief tutorial on electrical control of CNC machine tools[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [19] 李发海, 朱东起. 电动机学(第四版)[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- LI Fahai, ZHU Dongqi. Electromechanics[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2007.
- [20] GUTOWSKI T. Machining[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [21] OBERG E, JONES F D, HORTON H L, et al. Machinery's Handbook 29th Edition[M]. New York, USA: Industrial Press, 2012.
- [22] BOOTHROYD G, KNIGHT W A. Fundamentals of machining and machine tools[M]. New York, USA: Marcel Dekker, Inc., 2006.
- [23] ARRAZOLA P J, ÖZEL T, UMBRELLO D, et al. Recent advances in modelling of metal machining processes[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2013, 62(2): 695-718.
- [24] 陈日曜. 金属切削原理: 高等学校使用教材[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- CHEN Riyao. Theory of metal cutting[M]. Beijing: China Machine Press, 1985.
- [25] 周泽华. 金属切削原理: 高等学校使用教材[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.
- ZHOU Zehua. Theory of metal cutting[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984.
- [26] 《金属切削理论与实践》编委会. 金属切削理论与实践[M]. 北京: 北京出版社, 1985.
- Editorial Board of Metal Cutting Theory and Practice. Theory and practice of metal cutting[M]. Beijing: Beijing Press, 1985.
- [27] 机械工程手册电动机工程手册编辑委员会. 机械工程手册: 机械制造工艺及设备卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- Editorial Board of Mechanical Engineering Manual. Mechanical engineering handbook[M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [28] 刘英, 袁绩乾. 机械制造技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- LIU Ying, YUAN Jiqian. Mechanism manufacture technology basis[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [29] KHAMEL S, OUELAA N, BOUACHA K. Analysis and prediction of tool wear, surface roughness and cutting forces in hard turning with CBN tool[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 26(11): 3605-3616.
- [30] LALWANI D I, MEHTA N K, JAIN P K. Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206(1-3): 167-179.
- [31] ABOU-EL-HOSSEIN K A, KADIRGAMA K, HAMDI M, et al. Prediction of cutting force in end-milling operation of modified AISI P20 tool steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182(1-3): 241-247.
- [32] GUTOWSKI T, DAHMUS J, THIRIEZ A. Electrical energy requirements for manufacturing processes[C]// 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Leuven, Belgium, 2006.
- [33] CHAUDHARI S. Load-based energy savings in three-phase squirrel cage induction motors[D]. Morgantown: West Virginia University, 2005.
- [34] HU S H, LIU F, HE Y, et al. Characteristics of additional load losses of spindle system of machine tools[J]. Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, 2010, 4(7): 1221-1233.

作者简介: 谢俊(通信作者), 男, 1987 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为绿色制造、制造系统能量效率。

E-mail: xiejun10_11@foxmail.com

刘飞, 男, 1948 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为绿色制造、制造系统工程和数字化制造。

E-mail: fliu@cqu.edu.cn

蔡维, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为制造系统能量效率。

E-mail: caiweijixie@163.com