

8-17-2020

Prediction of Energy Efficiency of NC Machine Tools Based on Recursive Method with Discounted Measurements

Cai Lei

Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Wang Yan

Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Zhicheng Ji

Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Prediction of Energy Efficiency of NC Machine Tools Based on Recursive Method with Discounted Measurements

Abstract

Abstract: Aiming at the problem that the energy efficiency of numerical control machine tool is difficult to obtain directly, a new method combined with the recursive method with discounted measurements was presented to predict the energy efficiency of machine tool. *The estimation model of the cutting power was given in view of the power balance equation of the machine tool main drive system and the additional load loss function, further taking into account the additional load loss coefficients in model could not be directly measured, the recursive method with discounted measurements was adopted to identify the additional load loss coefficients as well as estimating the cutting power. Afterwards, the energy efficiency of machine tool was calculated according to its definition.* The experiment and simulation results show that the recursive method with discounted measurements has greater advantage on obtaining higher identification precision of the additional load loss coefficients than the traditional least-squares method and the efficiency of the machine tool which was obtained by using this method comes closer to the real value than other methods.

Keywords

parameter identification, NC machine tools, energy consume, energy efficiency prediction

Recommended Citation

Cai Lei, Wang Yan, Ji Zhicheng. Prediction of Energy Efficiency of NC Machine Tools Based on Recursive Method with Discounted Measurements[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(8): 1725-1731.

基于折息递推辨识算法的数控机床能效预测

蔡磊, 王艳, 纪志成

(江南大学 电气自动化研究所, 无锡 214122)

摘要: 针对数控机床能量效率难于直接获取的问题, 结合折息递推辨识算法给出一种新的机床能效预测方法。基于机床主传动系统功率平衡方程及附加载荷损耗函数, 得出切削功率的估计模型; 进一步考虑模型中的附加载荷损耗系数无法直接测量, 采用折息递推辨识算法对附加载荷损耗系数进行辨识, 从而估算出切削功率, 根据机床的能效定义计算出能效值。实验与仿真结果表明, 采用折息递推辨识方法估计附加载荷损耗系数, 能够比采用传统最小二乘估计获得更高的辨识精度, 求取的机床效率与其它方法相比更接近真实值。

关键词: 参数辨识; 数控机床; 能耗; 能效预测

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 08-1725-07

Prediction of Energy Efficiency of NC Machine Tools Based on Recursive Method with Discounted Measurements

Cai Lei, Wang Yan, Ji Zhicheng

(Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Aiming at the problem that the energy efficiency of numerical control machine tool is difficult to obtain directly, a new method combined with the recursive method with discounted measurements was presented to predict the energy efficiency of machine tool. *The estimation model of the cutting power was given in view of the power balance equation of the machine tool main drive system and the additional load loss function, further taking into account the additional load loss coefficients in model could not be directly measured, the recursive method with discounted measurements was adopted to identify the additional load loss coefficients as well as estimating the cutting power. Afterwards, the energy efficiency of machine tool was calculated according to its definition.* The experiment and simulation results show that the recursive method with discounted measurements has greater advantage on obtaining higher identification precision of the additional load loss coefficients than the traditional least-squares method and the efficiency of the machine tool which was obtained by using this method comes closer to the real value than other methods.

Keywords: parameter identification; NC machine tools; energy consume; energy efficiency prediction

引言

制造业在全球经济发展过程中起到了不可替

代的作用, 它不仅为消费者提供了必须的生活物品, 而且极大的推动了就业和社会发展。然而, 在造福大众的同时, 制造业也消耗了大量的能源(主要是电能), 导致 CO₂ 与 SO₂ 等污染物的排放量急剧增加, 对环境带来巨大的挑战。作为制造业工业航母的数控机床在我国拥有量超过 700 万台, 若以每台机床平均额定功率为 10 千瓦, 则我国机床总功率约为 7 000 万千瓦^[1]。由此可以看出我国机床



收稿日期: 2015-09-06 修回日期: 2016-01-21;
基金项目: 国家 863 计划(2014AA041505), 国家自然科学基金(61572238), 江苏省杰出青年基金(BK20160001);
作者简介: 蔡磊(1988-), 男, 安徽亳州, 硕士生, 研究方向为离散制造系统能效预测和优化。

<http://www.china-simulation.com>

• 1725 •

装备耗电量之巨大。由文献[2]可知制造业碳排放量(以 CO₂ 为例), 2001 年已近 50 000 百万吨, 到 2030 年, 制造业的 CO₂ 排放量将在此基础上翻一番。因此, 面对如此严峻的能量和环境问题, 对机床节能减排问题的研究越来越受到关注。为此, 国内外的专家学者对机床能耗问题进行了研究。

制造系统能耗状态分析及其能效估评是降低制造系统能量消耗、提高能量效率的基础。为此, 美国能源部专门设立了以提高制造企业生产过程能量效率作为首要目标的“工业评估中心”^[3]。该中心依托美国 29 所高校, 对工业生产现场的能量消耗状况进行评估和研究。胡韶华^[4]对数控机床的能耗组成和特性进行了详细分析, 给出了机床能耗监测模型。Apostolos^[5]等把企业分为 4 个等级: 单个过程, 机床, 生产线和整个企业, 每个生产等级的能量效率定义为移除材料体积与所消耗能量的比值且此值大小与生产工艺参数有关。胡韶华、刘飞等^[6]提出一种在线监测机床能量效率的方法, 基于机床的能耗模型建立机床的能效模型, 进行能效的评估。但是, 此方法用最小二乘辨识算法求取附加载荷损耗系数时没有考虑到数据量偏大造成辨识算法出现数据饱和现象的问题。MIT 的 Kordonowy^[7]提出了一种基于额定功率的机床能量效率测算模型, 采用统计学的方法, 将机床能耗分为可变能耗和固定能耗。此方法简单方便, 但是没有考虑机床加工时的附加载荷损耗, 因此得到的数据偏差很大。文献[8]指出, 附加载荷损耗占到切削功率的 15%~20%, 这部分能耗是不可以省略的。

为此, 考虑到机床的附加载荷损耗和附加载荷损耗系数难以直接测量及测量成本较高的问题, 采用基于折息递推辨识算法来估计切削功率, 进而求取机床能效。在机床主传动系统功率平衡方程和附加载荷损耗函数基础上, 给出切削功率的估计模型。进一步, 采用折息递推辨识算法对估计模型中的附加载荷损耗系数进行辨识求解, 估算出切削功率, 根据能量效率计算公式获取机床的能量效率。最后, 利用实验验证本文的能效估计算法, 实验结

果表明用此方法求取的机床能效更接近真实值, 并且与实际机床能效之间的误差小于 5%。

1 问题描述

1.1 能效定义

机床能效以过程能效定义给出, 表述为一段时间或是加工某一工序时机床的能量效率^[9-10], 如公式(1)所示。

$$\eta = \frac{E_c}{E} = \frac{\int_{T_s}^{T_e} P_c(t) dt}{\int_{T_s}^{T_e} P(t) dt} = \frac{\int_{T_s}^{T_e} P_c(t) dt}{\int_{T_s}^{T_e} P_{rfo} dt + \int_{T_s}^{T_e} P_{sp}(t) dt} \quad (1)$$

式中: E_c 表示切削能耗; E 表示机床总能耗; $P_c(t)$ 表示切削功率; P_{rfo} 表示机床正常运行时的固定功率损耗; $P_{sp}(t)$ 表示主传动系统输入功率; T_s 表示加工开始时间; T_e 表示加工结束时间。

1.2 切削功率估计模型

由公式(1)所知, 求取能效 η 需获取切削功率 $P_c(t)$ 、固定功率损耗 P_{rfo} 、主传动系统输入功率 $P_{sp}(t)$ 、加工开始时间 T_s 和加工结束时间 T_e 的信息。上述参数信息中: (1) 固定功率损耗 P_{rfo} 与主传动系统输入功率 $P_{sp}(t)$ 通过安装的功率传感器和智能电表获取; (2) 加工开始时间 T_s 和加工结束时间 T_e 由手持机扫描电子标签得到。式(1)中切削功率的获取有直接法与间接法两种途径。直接法是在主轴端安装扭矩传感器或力传感器, 测量扭矩或切削力计算出切削功率。直接法获取, 一方面安装传感器会影响机床的精度和刚性, 造成加工产品的精度降低; 另一方面, 扭矩或力传感器价格昂贵。利用间接法, 结合主传动系统功率平衡方程和载荷损耗函数间接估计切削功率, 可避免直接法的不足。

切削功率随着切削零件的不同和切削参数的不同而不同, 同时切削功率的变化也伴随着主传动系统输入功率的不同。主传动系统的能流量即空载功率, 切削功率和附加载荷损耗三部分^[4], 组成主传动系统功率平衡方程如(2)式所示:

$$P_{sp}(t) = P_u(t) + P_c(t) + P_{ad}(t) \quad (2)$$

式中: $P_u(t)$ 表示机床的空载功率; $P_{ad}(t)$ 表示机床的附加载荷损耗。其附加载荷损耗由电动机的电损耗和机械损耗以及由切削负载产生的机械传动损耗组成。附加载荷损耗是切削功率的二次函数^[10]:

$$P_{ad}(t) = a_0 P_c(t) + a_1 P_c^2(t) \quad (3)$$

其中: a_0 、 a_1 表示附加载荷损耗系数。

由公式(2)和(3), 可得:

$$P_{sp}(t) = P_u(t) + (1 + a_0)P_c(t) + a_1 P_c^2(t) \quad (4)$$

式(4)可改写为:

$$\hat{P}_c(t) = \frac{-(1 + a_0) + \sqrt{(1 + a_0)^2 + 4a_1(P_{sp} - P_u)}}{2a_1} \quad (5)$$

由式(5), 主传动系统输入功率 P_{sp} 、空载功率 P_u 可通过前面所述的方式测得, 而附加载荷损耗系数 a_0 、 a_1 无法直接测量, 可采用参数辨识方法估计。考虑传统最小二乘算法随着辨识数据的增长慢慢的失去修正能力, 出现数据饱和现象, 影响算法的修正和跟踪能力且参数估计精度不高。为此, 本文引入折息因子, 采用折息递推辨识算法 (Recursive method with Discounted Measurements, RDM) 求取附加载荷损耗系数。

2 基于 RDM 的附加载荷损耗系数辨识

2.1 RDM 算法

折息法是在最小二乘算法的基础上引入遗忘因子和加权因子, 引入遗忘因子降低旧数据在算法中的占有量, 增加新数据信息的含量修正算法; 引入加权因子对不同可信度的数据进行加权。折息法同时考虑加权因子和遗忘因子的作用, 将加权因子和遗忘因子融合在一起, 兼顾两者的优点。

考虑下列辨识模型:

$$z(k) = \mathbf{h}^T(k)\boldsymbol{\theta} + n(k) \quad (6)$$

式中:

$$\begin{cases} \mathbf{h}(k) = [-z(k-1), \dots, -z(k-n_a), \\ u(k-1), \dots, u(k-n_b)]^T \\ \boldsymbol{\theta} = [a_1, a_1, \dots, a_{na}, b_1, b_2, \dots, b_{nb}]^T \end{cases} \quad (7)$$

$z(k)$ 表示系统的输出, $\mathbf{h}(k)$ 是可观测的数据向量, $n(k)$ 是系统噪声。

取 $k = 1, 2, \dots, L$ (L 为数据长度), 由式(6)可构成如下线性方程组

$$z_L = \mathbf{H}_L \boldsymbol{\theta} + \mathbf{n}_L \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} z_L = [z(1), z(2), \dots, z(L)]^T \\ \mathbf{n}_L = [n(1), n(2), \dots, n(L)]^T \\ \mathbf{H}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{h}^T(1) \\ \mathbf{h}^T(2) \\ \vdots \\ \mathbf{h}^T(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z(0) & \dots & -z(1-n_a) & \dots & u(1-n_b) \\ -z(1) & \dots & -z(2-n_a) & \dots & u(2-n_b) \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ -z(L-1) & \dots & -z(L-n_a) & \dots & u(L-n_b) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

取准则函数为:

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^k \Gamma(k, i) [z(i) - \mathbf{h}^T(i)\boldsymbol{\theta}]^2 \quad (10)$$

式中: $\Gamma(k, i)$ 表示折息因子。其与加权因子 $\Lambda(i)$ 和遗忘因子 $\mu(j)$ 的关系为:

$$\Gamma(k, i) = \Lambda(i) \prod_{j=i+1}^k \mu(j) \quad (11)$$

根据式(9), 准则函数式(10)可以写成二次型

$$J(\boldsymbol{\theta}) = (z_L - \mathbf{H}_L \boldsymbol{\theta})^T \boldsymbol{\Gamma}_L (z_L - \mathbf{H}_L \boldsymbol{\theta}) \quad (12)$$

其中

$$\boldsymbol{\Gamma}_L = \begin{bmatrix} \Gamma(L, 1) & & & \mathbf{0} \\ & \Gamma(L, 2) & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & \Gamma(L, L) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_L \boldsymbol{\theta} \text{ 表示}$$

模型的输出, $J(\boldsymbol{\theta})$ 是用来衡量模型输出与系统输出的接近情况。

通过极小化 $J(\boldsymbol{\theta})$, 求得的模型参数估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 将使模型的输出更好的接近其实际值。则 k 时刻的参数估计值:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \left(\sum_{i=1}^k \Gamma(k, i) \mathbf{h}(i) \mathbf{h}^T(i) \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^k \Gamma(k, i) \mathbf{h}(i) z(i) \right) \quad (13)$$

$$\text{令 } \mathbf{P}(k) = \left[\sum_{i=1}^k \Gamma(k, i) \mathbf{h}(i) \mathbf{h}^T(i) \right]^{-1}, \text{ 则有}$$

$$\mathbf{P}(k) = \left[\mu(k) \mathbf{P}^{-1}(k-1) + \Lambda(k) \mathbf{h}(k) \mathbf{h}^T(k) \right]^{-1} \quad (14)$$

令 $\mathbf{K}(k) = \Lambda(k) \mathbf{P}(k) \mathbf{h}(k)$, 推导出如下的折息递推辨识算法:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \mathbf{K}(k) [z(k) - \mathbf{h}^T(k) \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)] \\ \mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k-1) \mathbf{h}(k) [\mathbf{h}^T(k) \mathbf{P}(k-1) \mathbf{h}(k) + \frac{\mu(k)}{\Lambda(k)}]^{-1} \\ \mathbf{P}(k) = \frac{1}{\mu(k)} [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k) \mathbf{h}^T(k)] \mathbf{P}(k-1) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ 为 k 时刻参数的估计值; \mathbf{I} 是单位矩阵; $\mathbf{K}(k)$ 表示增益矩阵; $\mathbf{P}(k)$ 是协方差矩阵。

式(15)中的协方差矩阵 $\mathbf{P}(k)$ 是用来累计数据信息量的, 随着时间的增长, 旧数据在 $\mathbf{P}(k)$ 中不断积累, 到了一定程度新数据的信息就无法再添加进去, 以致最小二乘辨识算法逐渐失去修正能力导致得到的辨识参数精度不高, 为此本文引入折息因子解决这一问题。引入折息因子, 使得 RDM 算法具有更多的可调参数。在实际应用中, 根据具体对象, 合理选择折息因子, 将有效提高算法的修正和辨识精度。

2.2 折息递推载荷损耗系数辨识

以式(4)为辨识模型求取附加载荷损耗系数, 式(4)移项变形得:

$$P_{sp}(k) - P_u(k) = \begin{bmatrix} P_c(k) & P_c^2(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 + 1 \\ a_1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式(16)整理成式(6)的形式为:

$$z(k) = \mathbf{h}^T(k) \boldsymbol{\theta} \quad (17)$$

$$\text{其中 } \begin{cases} z(k) = [P_{sp} - P_u] \\ \mathbf{h}(k) = [P_c, P_c^2]^T \\ \boldsymbol{\theta} = [u_0, u_1]^T \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{式(18)中, } \mathbf{P}_c = \begin{bmatrix} P_{cl} \\ \vdots \\ P_{cl} \end{bmatrix}, \mathbf{P}_c^2 = \begin{bmatrix} P_{cl}^2 \\ \vdots \\ P_{cl}^2 \end{bmatrix}, \begin{cases} u_0 = a_0 + 1 \\ u_1 = a_1 \end{cases}$$

采用折息递推辨识算法式(15)对载荷损耗系数进行估计, 选取协方差矩阵 $\mathbf{P}(k)$ 的初始值为

$\mathbf{P}(0) = 10^\beta \mathbf{I}$, β 为充分大的正整数, 估计初始值为 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(0) = \boldsymbol{\varepsilon}$, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为充分小的实向量。加权因子和遗忘因子的取值在(0,1]之间即: $0 < \Lambda(k), \mu(k) \leq 1$, 经过试验分析本文选择 $\mu(k) = 0.95$, $\Lambda(k) = 0.6$ 。

通过以上分析, 基于 RDM 折息递推辨识算法估计机床能效的流程如图 1 所示。

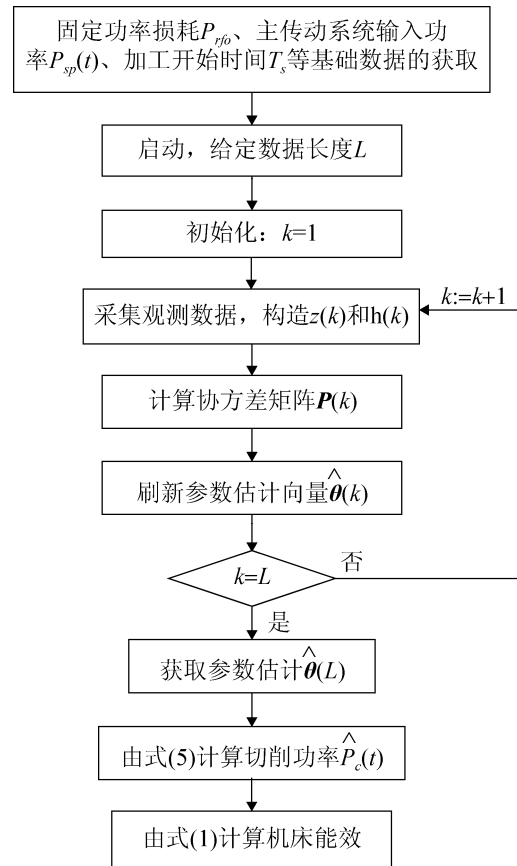


图 1 RDM 参数能效估计流程

由图 1 能效估计流程可知, 获取机床的能效需要知道机床负载无关的能量消耗 P_{rfo} 、主轴的输入功率 P_{sp} 和空载时刻的功率 P_u 等数据, 如表 1 所示。

表 1 求解机床能效所需的数据/参数

基础数据/参数	含义
T_s	加工开始时间
T_e	加工结束时间
A_0, a_1	载荷损耗系数
P_u	空载功率
P_{sp}	主传动系统输入功率
P_{rfo}	固定能量损耗
P_c	切削功率

其中: 参数的获取分为 3 个部分, 分别为:

(1) 基础数据: 采用智能电表采集机床的空载功率 P_u 和固定能量损耗 P_{rfo} , 功率传感器测量主传动系统输入功率 P_{sp} 。

(2) 测量数据: 加工开始时间 T_s 和加工结束时间 T_e 通过手持机读取加工零件上的电子标签获得。

(3) 辨识估计数据: 根据折息递推辨识算法求出附加载荷损耗系数 a_0 、 a_1 , 进而求出机床的切削功率。

获取以上主传动系统输入功率 P_{sp} 、空载功率 P_u 和附加载荷损耗系数 a_0 、 a_1 就可以估算出时刻 t 的切削功率 $P_c(t)$, 求出公式(1)能效公式中的分子。能效公式(1)分母中的固定能耗和主传动系统输入功率采用智能电表和功率传感器获取, 此时就可以计算出机床的能量效率。

3 实验研究

3.1 实验简介

为便于算法比较, 本实验采用与文献[6]相同的加工实验环境进行切削实验, 相关的主轴技术参数见表 2。

表 2 主轴的技术参数

电机类型	异步电机
电机极对数	2
电机额定功率/kW	5.5
电机额定转差率	5%
主轴转速范围/(r/min)	45~2 100

在数控机床总电源处和主轴电机变频器前分别安装电能表和功率传感器来实现对机床用能的实时监测和统计, 同时还通过安装在切削区域的扭矩传感器来测量切削功率, 来验证所求能量效率的准确性, 数据采集周期为 50 ms。

3.2 实验过程

实验过程描述如下:

(1) 空载功率的获取。为了得到真实有效的机床空载功率数据, 在实验测试采集数据前先要将机

床的主轴开启运行, 预热半个小时左右, 使机床得到很好的磨合和润滑。调整转速, 使用智能电表测量在不同转速下的空载功率, 如图 2 所示。

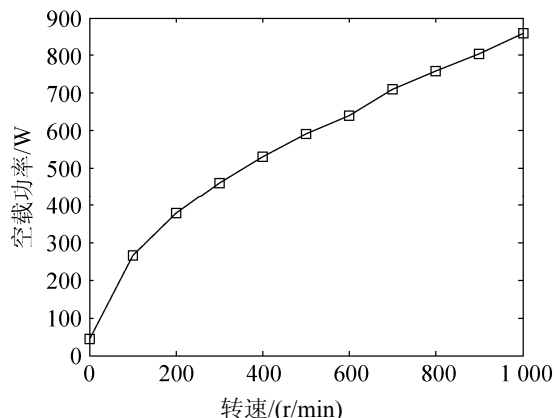


图 2 空载功率与转速的关系

(2) 载荷损耗函数的获取。

记录机床在某个转速下的空载功率, 其次在相同主轴转速下制定切削用量不同的加工方案, 具体的实验参数如表 3 所示, 数据长度 L 取值 5000。由第 2 节介绍, 经过折息递推参数辨识算法求出附加载荷损耗系数。载荷损耗系数辨识结果如图 3~4 所示。

由图 3 和图 4 可以看出折息递推辨识算法求取的附加载荷损耗系数比传统最小二乘辨识获得的系数收敛更快、波动性更小。

表 3 实验参数

主轴转速/(r/min)	进给量/(mm/r)	背吃刀量/mm
100	0.2	0.8
200	0.4	0.8
400	0.4	0.1
400	0.4	0.4
600	0.4	0.4
600	0.4	0.8
800	0.4	0.4
800	0.4	0.8
1 000	0.4	0.4
1 000	0.4	0.8

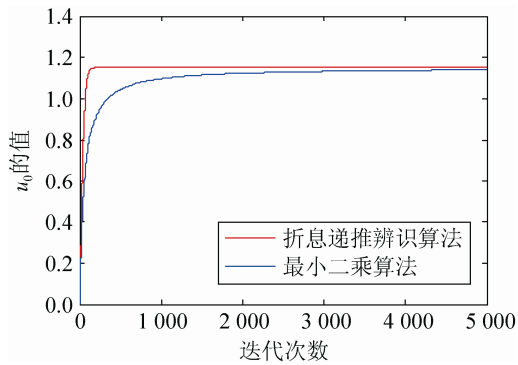
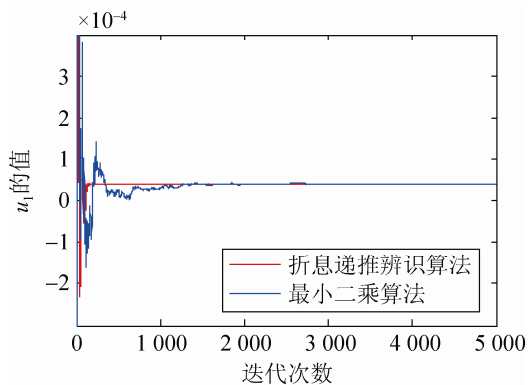
图 3 载荷损耗系数 u_0 对比图图 4 载荷损耗系数 u_1 对比图

图 3 中,折息递推算法在迭代 300 次就开始收

敛,而最小二乘算法将近迭代 2500 次才收敛。图 4 中,最小二乘算法在迭代 1000 次时还处在上下波动状态,此时折息递推算法早已无波动。折息递推辨识算法在传统最小二乘法的基础上引入加权因子对不同时刻的数据给予不同的信度;引入遗忘因子,对旧数据逐渐衰减,增加新数据的信息量,增强算法的修正能力,两个因子的引入使得算法的综合性能得到了提高。辨识结果得出: $u_0 = 1.1603$, $u_1 = 5.2 \times 10^{-5}$ 。由此求出附加载荷损耗系数为:

$$\begin{cases} a_0 = u_0 - 1 = 0.1603 \\ a_1 = u_1 = 5.2 \times 10^{-5} \end{cases} \quad (19)$$

由式(3)附加载荷损耗函数为:

$$P_{ad} = 0.1603P_c + 5.2 \times 10^{-5}P_c^2 \quad (20)$$

(3) 切削功率的评估和能效的计算。选择在数控车床上进行切削加工实验,选用表 3 的切削用量对一个长 80 mm,直径为 60 mm 的 45#钢棒料在不同主轴转速下进行车外圆加工。选择六组切削实验结果,实验结果见表 4 所示。

表 4 切削功率估计和机床效率值

切削参数 (S, f, a_{sp})	空载功率 P_u /W	负载无关能 耗 P_{rto} /W	附加载荷 损耗 P_{ad} /W	切削功率估 计值 P_c /W	切削功率测 量值 P_{cm} /W	能效估计 值 η /%	实际能 效值 /%	估计误差 E_{err} /%	最小二乘辨 识误差 /%
(400,0.153,2)	420	630	72	395	400	26.04	26.37	-1.25	-2.50
(400,0.198,2)	420	630	116	590	577	33.41	32.67	2.25	3.11
(400,0.243,2)	420	630	198	947	955	43.14	43.51	-0.84	-1.57
(800,0.153,2)	500	630	161	794	780	37.90	37.32	1.79	1.92
(800,0.198,2)	500	630	261	1 179	1 205	45.88	46.89	-2.16	-2.90
(800,0.243,2)	500	630	466	1 890	1 920	55.10	55.98	-1.56	-2.08

注: S 主轴转速(rpm), f 进给量(mm/r), a_{sp} 切削深度(mm), 估计误差 $E_{err} = (P_c - P_{cm}) / P_{cm} \times 100\%$

从表 4 可以看出,在切削参数一致的情况下,本文方法求取的切削功率估计值和机床能效值比参考文献[6,11]求取的估计值更接近测量真实值,而且误差都在 $\pm 5\%$ 以内。此方法为能效的获取和进一步的优化提供了一种参考。

4 结论

生产现场机床能量效率的方便获取是制造系

统能效评估与机床能效评价的关键问题之一。为此,基于折息递推辨识算法求取附加载荷损耗系数,估计出切削功率进而获取机床能量效率,实现了只需要现场检测机床主传动系统输入功率,就可获得机床的现场能量效率的目的。并且,应用案例结果表明,此方法不仅可以获得误差较小的现场机床能量效率,而且可以用于机床能效评价、能效监控和能效优化研究中,具有较广阔的应用前景。此

外, 对于目前机床能效低的现状, 如何提高机床的能效还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] Liu F, Xu ZJ, Dan B. Energy characteristics of machining systems and its application [M]. Beijing, China: Machine Press, 1995.
- [2] Demirbas C. The global climate challenge: recent trends in CO₂ emissions from fuel combustion [J]. Energy Educ Sci Technol Part A (S1308-772X), 2009, 22: 179-193.
- [3] IAC, Industrial Assessment Centers [EB/OL]. (2013-02-20) [2015-09-06]. <http://iacs.rutgers.edu>.
- [4] 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.
- [5] Apostolos F, Alexios P, Georgios P, et al. Energy efficiency of manufacturing processes: A Critical Review [J]. Procedia CIRP (S2212-8271), 2013, 7(5): 628-633.
- [6] Shaohua Hu, Fei Liu, Yan He, et al. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools [J]. Journal of Cleaner Production (S0959-6526), 2012, 27(6): 133-140.
- [7] Kordonowy D. A power assessment of machining tools [D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [8] Shaohua HU, Fei LIU, Yan He, et al. Characteristics of Additional Load Losses of Spindle System of Machine Tools [J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing (S1881-3054), 2010, 4(7): 1221-1231.
- [9] 刘飞, 王秋莲, 刘高君. 机械加工系统能量效率研究的内容体系及发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(19): 88-92.
- [10] 黄文帝. 数控机床主传动系统运行能耗状态在线监视系统研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [11] J Ma, X Ge, S I Chang, et al. Assessment of cutting energy consumption and energy efficiency in machining of 4140 steel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (S0268-3768), 2014, 74(9/12): 1701-1708.
- [12] 萧德云. 系统辨识理论及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [13] 冯强, 于盛林, 张维. 基于细胞神经网络的图像复原新方法 [J]. 中国图像图形学报, 2009, 14(3): 430-434.
- [14] Nakayama Y, Hosokawa Y, Nishio Y. Possibility of image processing by CNN using two kinds of cloning templates [C]// IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks. USA: IEEE, 2013: 81-84.
- [15] Arun P V, Katiyar S K. Cellular neural network-based hybrid approach toward automatic image registration [J]. Journal of Applied Remote Sensing (S1931-3195), 2013, 7(1): 1-11.
- [16] Elango P, Murugesan K. Digital Image Inpainting Using Cellular Neural Network [J]. Int. J. Open Problems Compt. Math (S1998-6262), 2009, 2(3): 439-450.
- [17] Swathy P S, Sabarathinam S, Suresh K, et al. Chaos synchronization and transmission of information in coupled SC-CNN-based canonical Chua's circuit [J]. Nonlinear Dynamics (S0924-090X), 2014, 78(2): 1033-1047.
- [18] 张文娟, 康家银. 一种用于轮廓线探测的 CNN 改进算法 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24(8): 1629-1632. (Zhang Wenjuan, Kang Jiayin. Modified CNN Algorithm for Contour Detection [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2012, 24(8): 1629-1632.)
- [19] Yang L, Chua L O, Krieg K R. VLSI Implementation of Cellular Neural Networks [J]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (S0271-4310), 1990, 384(3): 2425-2427.
- [20] Lehtonen E, Laiho M. CNN using memristor for neighborhood connections [C]// 2010 12th International workshop on cellular nanoscale networks and their application (CNNA). Berkeley, California, USA. 2010: 1-4.
- [21] Itoh M, Chua L O. Memristor Cellular Automata and Memristor Discrete-Time Cellular Neural Networks [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos (S0218-1274), 2009, 19(11): 3605-3656.
- [22] 黄立宏, 李雪梅. 细胞神经网络动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [23] 李志军, 曾以成, 李志斌. 改进型细胞神经网络实现的忆阻器混沌电路 [J]. 物理学报, 2014, 63(1): 010502.

(上接第 1724 页)