

自适应观测器在车刀磨损估计的应用

揭景耀 何友义

(机械工程系)

摘 要 本文给出一种以新型模型为基础的车刀磨损估计方法^[1]。该方法应用自适应观测器,根据切削力测量,利用状态与参数估计技术在线估计车刀磨损量^[1]。也给出了车削时估计与实测结果^[1]。

关键词 刀具磨损估计;自适应观测器;状态估计;参数估计

分类号 TG 702

0 引 言

实现车刀磨损在线测量是实现车削过程自动化的关键^[1]。刀具磨损的在线测量问题是长期困扰制造行业工程技术人员的难题^[1]。在缺乏任何可靠的在线刀具磨损传感器的情况下,本文基于自应状态估计技术,给出一种新型车刀磨损量在线估计方法,这种车刀磨损在线估计方法是基于自适应控制理论,利用自适应状态观测器把车削过程处理为一个“黑箱”,仅仅涉及自适应观测器的实现^[1]。该车削过程的模型仅被用于(i) 决定自适应观测器阶数(ii) 指定输入(进给)、输出(切削力)、状态变量(后刀面磨损、月牙洼磨损)^[1]。在用为车刀磨损估计的自适应状态观测器实现之前,必须设计与调试该自适应状态观测器^[1]。自适应观测器设计基于刀具磨损动态模型^[1]。该方法利用在线状态和参数估计如图 1 所示^[1]。其中状态观测器用于估计过程模型的状态(即代表要测量刀具磨损量)^[1]。为了利用这个状态观测器,过程模型被变换成一个特殊最小实现形式(称之为观测器形式),该状态观测器利用可测量的输入、输出信号估计这个被变换过程模型的状态^[1]。因为这个状态观测器的参数随着加工过程的条件和材料性质而变化,所以需要有一个在线参数

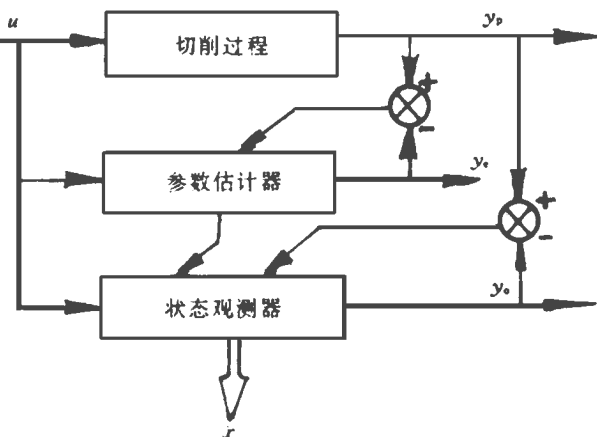


图 1 自适应观测器原理图

估计器如图1所示^[13]。这个参数估计器仅估计观测器形式模型参数^[13]。一旦观测器形式模型的状态已经被估计,它们必须被转换成原始模型(有物理意义)的状态(即磨损量),这可通过离线测量来实现^[13]。

1 基于自适应观测器的车刀磨损在线估计方法

本法利用自适应观测器在线估计刀具磨损^[13]。在本节讨论自适应观测器的设计^[13]。在第一部分讨论:若制造过程可由一个线性时不变,可观测模型表示,则可利用线性状态观测器估计状态^[13]。众所周知,切削过程(车削过程)仅能用非线性模型表示,因此必须应用自适应观测器估计其状态^[13]。在第二部分讨论了自适应观测的不同方法,并给出在这里用为刀具磨损在线估计方法^[13]。在第三部分讨论参数估计器,第四部分给出磨损量重构问题^[13]。

1.1 状态观测

Luenberger 状态观测器可估计线性定常模型状态^[13]。如果一个制造过程能用一个线性定常单输入单输出可观测确定性模型表示如下

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (1)$$

$$y = \mathbf{C}^T\mathbf{x} + Du \quad (2)$$

这时状态向量 $\mathbf{x}$ 包括我们所要估计的磨损分量,那末可设计一个观测器(状态估计器),以估计该切削过程的状态^[13]。在上面模型中, u 是标量输入, y 是标量输出, $\mathbf{A}$ 是一个系数矩阵, $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{C}$ 是系数向量, D 是一个常数^[13]。为了设计该观测器,上面模型[方程(1)和(2)]可被变换成离散方程(利用零阶保持器近似和一个恒定采样周期)^[13]。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{P}\mathbf{x}(k) + \mathbf{Q}u(k), \quad (3)$$

$$y(k) = \mathbf{C}^T\mathbf{x}(k) + Du(k). \quad (4)$$

该系统的传递函数可定义为

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0 + \sum_{j=1}^m b_j z^{-j}}{1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}} + D. \quad (5)$$

以上离散时间模型[方程(3)和(4)]通过一个变换矩阵 T 能变换成状态观测器形式

$$\mathbf{x} = T\mathbf{x}_0. \quad (6)$$

例如 一个3阶线性模型的观测器形式为:

$$\mathbf{x}_0(k+1) = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 \\ -a_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}_0(k) + \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{Bmatrix} u(k), \quad (7)$$

$$y(k) = [1 \ 0 \ 0] \mathbf{x}_0(k) + Du(k). \quad (8)$$

现在可通过该形式状态观测器,状态 $(\hat{\mathbf{x}}_0(k))$ 的估计能够得到

$$\hat{\mathbf{x}}_0(k+1) = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 \\ -a_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_0(k) + \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{Bmatrix} u(k) + \begin{Bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{Bmatrix} [y(k) - \hat{y}(k)], \quad (9)$$

$$y(k) = [1 \ 0 \ 0] \hat{\mathbf{x}}_0(k) + Du(k). \quad (10)$$

这里 g_i 是观测器的增益,它是根据状态观测误差 $[e(k) = x_0(k) - \hat{x}_0(k)]$ 所要求收敛特性来选取⁽¹³⁾利用 (7) ~ (9) 可得到状态观测器误差方程

$$e(k+1) = \begin{bmatrix} -(a_1 + g_1) & 1 & 0 \\ -(a_2 + g_2) & 0 & 1 \\ -(a_3 + g_3) & 0 & 0 \end{bmatrix} e(k). \quad (11)$$

看出由适当选择 g_1 、 g_2 和 g_3 , 观测误差 $e(k)$ 能以要求速率消除⁽¹³⁾用在观测器[(9) 和(10)]模型参数(a_i 和 b_i) 和在模型[(7) 和(8)]相同⁽¹³⁾在这里一个基本要求是假定这些参数是已知的和时不变的⁽¹³⁾

1.2 自适应观测

假如车削过程能用一个线性定常可观测的模型表示,那末该过程的状态可用一个观测器来估计⁽¹³⁾然而,能用线性模型表示的过程极少⁽¹³⁾线性模型一般用为简化,仅能提供一个过程的近似表达,涉及制造过程,极为复杂的制造过程仅能用高度非线性模型表示,而且这些非线性模型参数依赖于刀具、工件组合和切削条件(切削速度、进给、切深)⁽¹³⁾

除制造过程高度非线性外,还带有不能建模的过程变量不确定性(例如,工件中的“硬点”和切屑缠绕)使得这种建模任务极为困难⁽¹³⁾但是可由仔细选择工件和切削条件使这些不能建模变量被消除⁽¹³⁾也假定能从测量信号中滤去噪声所以无须统计建模⁽¹³⁾车削过程能用确定性非线性模型表示⁽¹³⁾在过程能表示为非线性模型的情况下,状态变量仍能被估计⁽¹³⁾在这种情况下要用一个自适应观测器进行状态估计⁽¹³⁾

自适应观测器已由许多学者研究过⁽¹³⁾用在这里的自适应观测器是由参数估计和状态观测组成⁽¹³⁾在这种自适应观测器中,假定(i) 系统参数变化慢于状态变化⁽¹³⁾ii) 因为较差的初始参数收敛,初始观测误差是容许的⁽¹³⁾该自适应状态观测器与线性观测器有同样形式[方程(9) 和(10)],只是其参数(a_i 和 b_i) 是未知的,并必须用参数估计器来估计⁽¹³⁾

自适应观测器的设计包括一个线性观测器设计和一个参数估计器的设计⁽¹³⁾为了状态观测器设计,对已得到的非线性模型必须线性化⁽¹³⁾由于在这种观测器中快速收敛率是非常需要的,所以决定设置特征值在 Z 平面的原点,为此我们有

$$g_1 = -\hat{a}_1, \quad g_2 = -\hat{a}_2, \quad g_3 = -\hat{a}_3.$$

当然,应注意到,观测器的参数是未知的,必须用参数估计器来估计⁽¹³⁾所以在参数估计较差的情况下,这种观测器性能较差⁽¹³⁾

1.3 参数估计

当方程(7) 中线性模型参数是缓慢时变或者未知,一个参数估计器能被用来估计该模型的参数(a_i 和 b_i),每当其变化时就修改这些参数⁽¹³⁾参数估计算法有各种形式,常常根据具体问题要求进行选用⁽¹³⁾当车削过程能由确定性模型表示,选用最小二乘法形式⁽¹³⁾

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + \frac{P(k-2) \hat{\theta}_{k-1}}{\beta + \hat{\theta}_{k-1}^T P(k-2) \hat{\theta}_{k-1}} [y(k) - \hat{\theta}_{k-1}^T \hat{\theta}_{k-1}] \quad (12)$$

$$P(k-1) = \frac{1}{\beta} \left[P(k-2) - \frac{P(k-2) \hat{\theta}_{k-1} \hat{\theta}_{k-1}^T P(k-2)}{\beta + \hat{\theta}_{k-1}^T P(k-2) \hat{\theta}_{k-1}} \right] \quad (13)$$

式中 $y(k)$ 是被测变量 y 在 $t = k$ 时刻($k = 0, 1, 2, \dots$) 值;

$\hat{\theta}_k$ 是被测变量的向量;

$\hat{\theta}(k)$ 是估计参数向量;

$P(k)$ 是估计增益矩阵;

β 是指数加权值^[13]

对于其方程能写为 $y(k) = \hat{\theta}(k)^T \hat{\theta}(k)$ 任何过程, 最小二乘法递归地修正被估计参数向量 $\hat{\theta}(k)$ ^[13]

人们注意到刀具磨损量适中时参数变化不大, 每当刀具磨损过度时参数急剧变化^[13]

对于三阶线性模型时, $\hat{\theta}$ 和 $\hat{\theta}$ 为

$$\hat{\theta} = [\hat{\alpha}_1(k) \quad \hat{\alpha}_2(k) \quad \hat{\alpha}_3(k) \quad \hat{b}_1(k) \quad \hat{b}_2(k) \quad \hat{b}_3(k)], \quad (14)$$

$$\hat{\theta}(k) = [-\hat{\alpha}_1(k-1) \quad -\hat{\alpha}_2(k-2) \quad -\hat{\alpha}_3(k-3) \quad u(k-1) \quad u(k-1) \quad u(k-1)]^{(13)}$$

$$\text{这里 } \hat{\alpha} = y(k) - Du(k) \quad (13)$$

1.4 磨损量重构

从被观测状态进行磨损量的重构需要一种变换^[13]这种变换仅能从已知的线性模型两种形式(观测器形式和原始形式)取得^[13]因为把切削过程处理为“黑箱”, 所以线性模型的原始形式是不可能得到的^[13]为了取得这种变换需要进行一定量的离线测试^[13]

现假定切削过程中, 仅针对一种刀具磨损的存在进行分析^[13]这种假定符合实际情形, 在车削过程中, 控制在一定切削条件下只有后刀面磨损占优势^[13]表示这种切削过程瞬态特性的线性模型为

$$x = a' \dot{x} + b' u, \quad (16)$$

$$y = c' \dot{x} + d' u \quad (17)$$

其中 x —— 磨损量; u —— 输入; y —— 输出^[13]

a' 、 b' 、 c' 和 d' —— 模型系数, 取决于切削条件, 刀具和工件组合^[13]

为了使上面模型[(16)、(17)]适于数学计算, 上面的连续时间线性模型被转换成离散时间模型(利用零阶保持器和恒定采样周期)^[13]其离散时间形式为:

$$x(k+1) = p' x(k) + q' u(k), \quad (18)$$

$$y(k) = c' x(k) + d' u(k) \quad (19)$$

为了设计自适应观测器, 上述模型被转换成观测器形式:

$$x_0(k+1) = -ax_0(k) + bu(k); \quad (20)$$

$$y(k) = x_0(k) + d' u(k); \quad (21)$$

$$x = T' x_0 \quad (22)$$

$$\text{这里 } T' = \frac{1}{c'}, \quad (23)$$

那么, 观测器形式为:

$$\hat{x}_0 = -\hat{a}\hat{x}_0 + \hat{b}u(k) + g[y(k) - (\hat{x}_0 + d')u(k)]. \quad (24)$$

这里 $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$ 、 $\hat{d}'$ 和 $\hat{x}_0$ 是 a 、 b 、 d' 和 x_0 的估计值, g 是观测器增益^[13]

被估计状态 $\hat{x}_0$ 将必须被转换成刀具磨损估计值 $\hat{x}$ (即原始模型状态)^[13]为进行这种转换, 需要知道 T' 方程(22)^[13]对于车削这种简单情况(即只有一种磨损量占优势)^[13]参见式 23^[13]

其中 c' 表示原始线性模型中状态变量和输出之间关系^[13]由于切削过程被处理为“黑箱”,

原始模型是未知的⁽¹³⁾参数 c' 也是未知的⁽¹³⁾这就意味着变换矩阵 T' 是未知的, 被估计状态的磨损量不能重构⁽¹³⁾然而, 参数 c' 是代表刀具磨损对输出的影响, 参数 c' 能通过离线测试来估计⁽¹³⁾这样从被估计状态到磨损量重构是可能的, 只要通过单个参数离线测试就能解决⁽¹³⁾

2 实验设计与结果^[3]

设计实验目标是实现自适应观测器以估计车削过程中(一种磨损分量占优势)的刀具磨损量(车削时刀具后刀面磨损量)⁽¹³⁾通过观察参数估计器的被估计参数突然变化也能检测出刀具破损⁽¹³⁾实验设计原理框图如图 2 所示⁽¹³⁾自适应观测器实现是基于切削力为输出信号⁽¹³⁾所以一个力传感器是需要的⁽¹³⁾由于被测切削力受过程噪声影响, 所以也需要模拟滤波器将信号与噪声分开⁽¹³⁾选用适当的切削条件以保证只有后刀面磨损占优势⁽¹³⁾车削实验结果如图 3 所示⁽¹³⁾

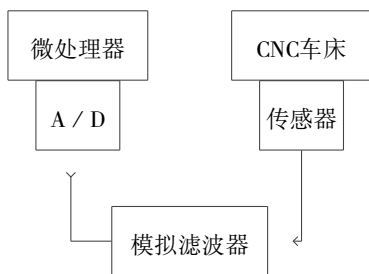


图2 实验装置原理图

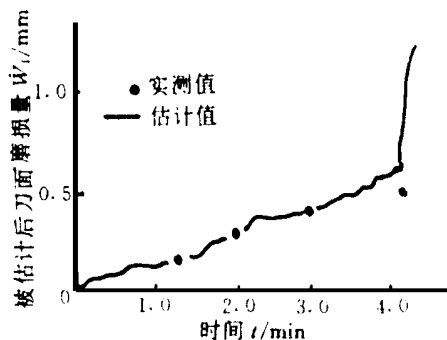


图3 被估计的后刀面磨损曲线

3 结束语

本文介绍的方法是利用线性自适应观测器, 实现车削过程(仅一种磨损分量占优势)刀具后刀面磨损量的在线估计⁽¹³⁾一种基于刀具磨损机理建立的车削制造过程模型被利用⁽¹³⁾刀具磨损量作为状态变量包括在该模型中, 测得的输出是切削力与该模型一起用来估计刀具磨损量⁽¹³⁾本方法的实现困难在于车削制造过程模型的非线性以及模型参数的变化⁽¹³⁾在只有一种磨损分量占优势情况下取得如图 3 所示结果已经相当满意⁽¹³⁾多种磨损成分并存的情况留待进一步研究⁽¹³⁾可以考虑进一步应用非线性自适应观测器, 以及建立多输入多输出制造过程模型(将进给、切削速度作为输入、切削力和温度作为输出), 以期得到一个更为精确, 更富柔性的刀具磨损在线监测系统⁽¹³⁾

参 考 文 献

- 1 K Danai, A G Uisooy. A dynamic state model for on-line tool wear estimation in turning. ASME Journal of Engineering for Industry, 1987, 109(4): 396~399
- 2 K Danai, A G Uisooy. On-line flank wear estimation using an adaptive observer and computer vision. part I theory Mechanical systems and signal processing, 1987, 1(2): 211~225

- 3 K Danai, A G Uisoy · On-line flank wear estimation using an adaptive observer and computer vision part II Results mechanical systems and signal processing, 1987, 1(2):227~240
- 4 G C Goodwin, S Sirovica · Adaptive filtering, prediction and control · Prentice-hall englewood cliffs New Jersey, 1984

An Adaptive Observer for On-line Tool Wear Estimation in Turning

Jie Jingyao He Youyi

(Mechanical Engineering Department)

Abstract In this paper, a New model-based approach for tool wear estimation has been proposed. This approach is an adaptive observer, based on the force measurement and with parameter and state estimation techniques. The implementation of the adaptive observer in turning and experimental results are also presented.

Key words tool wear estimation; adaptive observer; state estimation; parameter estimation

(上接第 7 页)

A Way to Transform the Electric Control System of Offset Press J2108 to PLC Control System

Ning Li Xiong Guoliang Hong Jiadi Hu Lixin

(Mechanical Engineering Department)

Abstract This paper investigates the defects of electric control system in offset press J2108 and analyzes the logistic control relations between the control components and executive components. Based on the investigation and the analysis, an overall design is put forward to transform the electric control system to a digital control system by using PLC. Then the system control logics are re-designed and the corresponding ladder diagram is presented. Hence the research on remaking the control system of offset press J2108 is successfully carried out.

Key words offset press; PLC