

# 金属切削过程中的建模与仿真

赵敏荣, 张善文

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:**模型在产品制造中具有重要作用,对产品制造中的模型及其仿真作了分析,并讨论了产品制造中切削加工过程动力学模型的确定方法。首先直接获取冲击响应的原始信号,再将所有输入输出信号同时作高通和带通滤波,抑制了有害的干扰信号。数据处理时,在时域中按最小二乘法估计参数,参数估计收敛快,使观测总时间很短。因此,该方法简单实用,对加工过程具有十分重要的时间应用价值。

**关键词:**建模与仿真;产品制造;模型

**中图分类号:**TP278 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)06-0082-03

仿真的目的在于缩短产品制造周期,降低成本。制造过程仿真是仿真应用的传统方面。几乎每一种制造技术的进步都带来相应的模型和仿真应用的发展。从模型和仿真应用的发展角度来看,首先是从局部加工过程的研究和仿真,仿真内容是加工对象和加工设备在加工过程中的运行和状态,然后是对整个制造系统和生产过程的建模与仿真。

在制造业中,从产品的设计到制造以至测试维护的整个生命周期中计算机仿真技术贯穿始终<sup>[1]</sup>,如表1所示。

表1 计算机仿真在产品整个生命周期中的应用

阶段	计算机仿真应用
概念阶段	产品动力学分析,产品运动学分析。
详细设计	刀位轨迹仿真,加工过程仿真(NC代码),装配仿真。
加工制造	制造车间设计(布局、设备选择),生产计划及作业调度制定,各级控制器设计,故障处理。
测试	测试用仿真器。
培训/维护	训练仿真器。

由此可见,先进的制造技术的发展,为计算机仿真的应用提供了新的舞台,也提出了更高的要求。产品总是为特定的需求而存在,产品制造是把特定的功能需求映射为模型并加以实现的过程。而以计算机技术为基础的建模与仿真是人类模型化思维的延伸。因此,建模和仿真在产品制造中的应用具有重要的作用。

## 1 机械制造中的模型

建模与仿真在产品制造中的应用大致包括3个方面:

- 1)以产品制造为中心的仿真;
- 2)以制造系统模型为中心的仿真;
- 3)以产品开发过程为中心的仿真。

这三方面的应用随着制造业信息化进程的发展而发展,总的趋势是由局部到全局,由分散到集成,并更

收稿日期:2002-11-19

基金项目:国家高等学校骨干教师计划资助项目(GG-810-90039-1003)

作者简介:赵敏荣(1965-),女,陕西泾阳人,讲师,硕士,主要从事飞行器控制、制导与仿真研究。

加注重可视化技术的应用及与用户之间的交互。

模型是进行仿真的基础,仿真是模型在计算机上的运行。基于这种考虑我们首先分析产品制造中所涉及的模型,并以模型分类为基础描述仿真内容。就机械产品制造中所涉及的模型种类来说,大致可分为产品模型、制造系统模型和开发过程模型,这里的制造系统模型包括材料供应、加工、装配和检验等方面。

## 2 加工过程模型的确定<sup>[2-3]</sup>

加工过程是机械产品制造的关键一步,加工过程中的切削过程动力学模型直接影响着产品的质量及制造效率。下面介绍一种径向进给、单刀双刃车削工况下切削过程动态模型的确定。

工件是一根细长软刚轴料,刚度不大,因而切削过程中伴有明显的动态弹性变形,并且由于采用径向进给,动态变形情况基本稳定。实际被切削式样是一只铝盘,通过法蓝盘安装在轴上能产生最大变形的位。通过理论分析得到的切削过程动态模型结构为<sup>[4]</sup>

$$f_x(t) = \mu_x K_{xx} x(t-T) - K_{xx} x(t) - K_{x\dot{x}} \dot{x}(t) - K_{x\dot{y}} \dot{y}(t) + [f_{xd}(t)] \quad (1)$$

$$f_y(t) = \mu_x K_{yx} x(t-T) - K_{yx} x(t) - K_{y\dot{x}} \dot{x}(t) - K_{y\dot{y}} \dot{y}(t) + [f_{yd}(t)] \quad (2)$$

$$f_z(t) = \mu_x K_{zx} x(t-T) - K_{zx} x(t) - K_{z\dot{x}} \dot{x}(t) - K_{z\dot{y}} \dot{y}(t) + [f_{zd}(t)] \quad (3)$$

式中  $f_x(t)$   $f_y(t)$   $f_z(t)$  为切削力在  $x, y, z$  3 个方向上的相对于其稳态值发生的动态交变分量;  $x(t)$ 、 $y(t)$  为工件在  $f_x(t)$   $f_y(t)$  作用下的在  $x, y$  方向上产生的动态偏移;  $K_{xx}$ 、 $K_{yx}$ 、 $K_{zx}$  为切削刚度系数;  $K_{x\dot{x}}$ 、 $K_{y\dot{x}}$ 、 $K_{z\dot{x}}$  为进刀速度系数;  $K_{x\dot{y}}$ 、 $K_{y\dot{y}}$ 、 $K_{z\dot{y}}$  为切削速度系数;  $\mu_x$  为前后两次切削的重叠率,  $T$  为前后两次重叠切削之间的时延;  $f_{xd}(t)$   $f_{yd}(t)$   $f_{zd}(t)$  为切削过程中  $x, y, z$  3 个方向上的未知扰动输入力。

现在的任务就是根据切削过程中实际测出的  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  和  $x$ 、 $y$  信号确定方程(1)、(2)、(3)中的诸系数。具体方法是:

1) 先对式(1)两边取拉氏变换

$$f_x(s) = [\mu_x K_{xx} e^{Ts} - K_{xx} - S K_{x\dot{x}}] x(s) - S K_{x\dot{y}} y(s) + [f_{xd}(s)] \quad (4)$$

对  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$ 、 $x$ 、 $y$  等信号做高通和带通滤波,可等效的看成是对上式两边执行一种以线性算子  $L(S) = H_b(s)H_b(s)$  表示的线性运算,从而得出

$$L(S)f_x(s) = L(s) \{ [\mu_x K_{xx} e^{Ts} - K_{xx} - S K_{x\dot{x}}] x(s) - S K_{x\dot{y}} y(s) + [f_{xd}(s)] \} \quad (5)$$

因方程(1)是线性的,允许交换使用于  $x(s)$  和  $y(s)$  上的线形变换次序,于是

$$\hat{f}_x(s) = [\mu_x K_{xx} e^{Ts} - K_{xx} - S K_{x\dot{x}}] \hat{x}(s) - S K_{x\dot{y}} \hat{y}(s) + L(s)[f_{xd}(s)] \quad (6)$$

2) 再将式(6)作反拉氏变换,可得

$$\hat{f}_x(t) = [\mu_x K_{xx} \hat{x}(t-T) - K_{xx} \hat{x}(t) - K_{x\dot{x}}] \hat{x}(t) - K_{x\dot{y}} \hat{y}(t) + [f_{xd}(t)] \quad (7)$$

由于从带通滤波器输出的  $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$  已是主要频率的震荡信号,故其导数  $\hat{\dot{x}}$ 、 $\hat{\dot{y}}$  可以从 7 阶巴特沃斯滤波器获得。由此可得广义方程误差为

$$\xi(t) = [\hat{f}_{xd}(t)] = \hat{f}_x(t) - \mu_x K_{xx} \hat{x}(t-T) + K_{xx} \hat{x}(t) + K_{x\dot{x}} \hat{\dot{x}}(t) + K_{x\dot{y}} \hat{\dot{y}}(t) \quad (8)$$

对应于第  $K$  次观测有:

$$\xi(h) = \hat{f}_x(t_k) - \varphi_k^T \theta, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (9)$$

式中,  $\varphi_k^T = [\hat{\dot{x}}(t_k - T), \hat{x}(t_k), \hat{\dot{x}}(t_k), \hat{y}(t_k)]$ ;  $\theta = [\mu_x K_{xx}, -K_{xx}, -K_{x\dot{x}}, -K_{x\dot{y}}]^T$

3) 根据第  $N$  次观测,可得  $\theta$  的最小二乘估计为

$$\hat{\theta}_N = (\phi_N^T \phi_N)^{-1} \phi_N^T Y_N = P_N \phi_N^T Y_N \quad (10)$$

式中,  $\phi_N = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N]$ ;  $Y_N = [\hat{f}_x(t_1), \hat{f}_x(t_2), \dots, \hat{f}_x(t_N)]$ ;  $P = (\phi_N^T \phi_N)^{-1}$ 。

当取得第  $N+1$  组新观测数据后,可递推出:

$$\hat{\theta}_{N+1} = \hat{\theta}_N + N+1 P_N \phi_{N+1} [\hat{f}_x(t_{N+1}) - \varphi_{N+1}^T \hat{\theta}_N] \quad (11)$$

式中,  $\gamma_{N+1} = 1/(1 + \varphi_{N+1}^T P_N)$ ;  $P_{N+1} = P_N - \gamma_{N+1} P_N \varphi_{N+1} \varphi_{N+1}^T P_N$ 。

### 3 实例

在切削力动态模型方程(1)、(2)、(3)中  $K_x$ 、 $K_y$ 、 $K_z$  等项数值上比其他项小很多,这些项的系数估计值对拟合残差平方和取极小化运算很不敏感,辨识效果差,在实际中可忽略不计。则切削力动态模型式(1)、(2)、(3)可简化。

在工件转速为 300 r/min(对应的切削速度为 146.3 m/s)情况下,当切削宽度为 0.36 mm、切削厚度为 0.1 mm 时,利用施加锤击后工件旋转的第一个周期内的观测数据,在计算机上利用上述算法确定出的参数  $\hat{K}_{xx}$ 、 $\hat{K}_{yy}$ 、 $\hat{K}_{zz}$  等随观测次数增加而变化的情况如图 1 所示。可以看到由此方法确定的模型参数进入收敛较快,最后得到的估计精度较高。

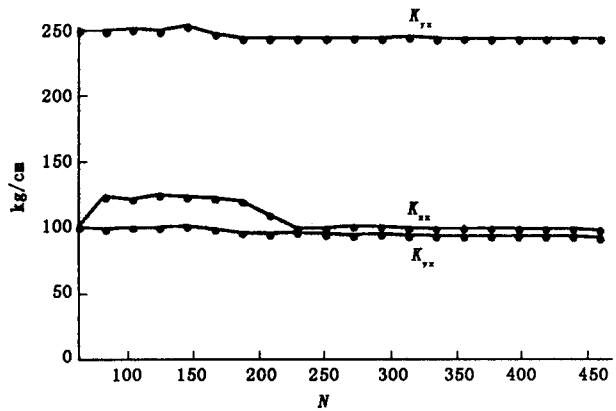


图 1 参数  $\hat{K}_{xx}$ 、 $\hat{K}_{yy}$ 、 $\hat{K}_{zz}$  等随观测次数增加而变化的情况

### 4 结束语

本文介绍的方法,先直接获取冲击响应的原始信号,再将所有输入输出信号同时作高通和带通滤波,抑制了有害的干扰信号,为获取导数信号  $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$  提供了方便;最后就广义方程误差按最小二乘法参数估计,在数据处理时在时域中进行,参数估计收敛快,使观测总时间很短,该方法简单实用。

#### 参考文献:

- [1] 熊光楞. 计算机仿真及其在制造业中的应用[J]. 计算机仿真学报,1998,13(1):31-34.
- [2] 吴剑,孙秀霞. 一种连续系统辨识方法及其在飞行规律辨识中的应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2002,3(5):4-8.
- [3] 熊光楞,王昕. 产品制造中的建模与仿真[J]. 计算机仿真学报,1999,11(5):337-339.

(编辑:田新华)

## Modeling and Simulation in process of Metal Cutting

ZHAO Min - rong, ZHANG Shan - wen

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

**Abstract:** Models are very important in product manufacturing. The models and simulation application to product manufacturing are classified in this paper, and the method of dynamics model finding is discussed in process of metal cutting. First, the signal of pulse response is obtained directly. Then, the input signals and output signals are processed by both low-pass-filter and high-pass-filter. Finally, the parameter is calculated.

**Key words:** modeling and simulation; product manufacturing; model

(本卷终)