

车削颤振稳定性预测软件研究与开发

刘宇¹, 刘亚超², 张义民¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳新松机器人自动化股份有限公司, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 针对金属加工过程中颤振预测软件实现的工程需求, 设计了车削加工颤振稳定性叶瓣图实验测试软硬件系统, 研究了软件实现算法中的关键问题. 首先, 搭建了由采集卡、加速度传感器、模态力锤组成的硬件系统, 开发了具有频响函数测试和稳定性叶瓣图生成功能的系统软件. 其次, 设计了交互式软件采集及分析界面, 研究了基于 C# 编程语言频响函数测试过程中多通道高速同步触发采集的实现算法, 开发了具有由频域分析方法获得颤振稳定性叶瓣图功能的 C# 类. 最后, 对 CJ0625 车床加工系统进行稳定性预测, 结果表明软件预测结果与实验结果相吻合.

关 键 词: 车削; 颤振预测; 稳定性叶瓣图; 频响函数; 触发采集

中图分类号: TP 311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)03-0373-05

Research and Development of the Prediction Software for Turning Chatter Stability

LIU Yu¹, LIU Ya-chao², ZHANG Yi-min¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. SIASUN Robot & Automation Co., Ltd., Shenyang 110168, China. Corresponding author: LIU Yu, E-mail: yuliu@me.neu.edu.cn)

Abstract: In view of the engineering need for predicting chatter with software in metal processing, the hardware and software system for the chatter stability lobe diagram test in the turning process was designed. Some key problems existing in the algorithm of the software were researched. Firstly, the hardware system was built, which was composed of an acquisition card, an acceleration sensor and a modal force hammer. The software system, which was able to obtain FRF (frequency response function) of the tool and stability lobe diagram of a turning machine, was developed. Secondly, the interactive interfaces of acquisition and analysis were designed. The multi-channel high-speed synchronous trigger-acquisition algorithm in FRF testing based on C# language was studied. The class of C# to analyze the chatter stability lobe diagram was developed using the frequency domain analysis method. Finally, the stability prediction of CJ0625 was conducted. The results showed that the predicted results of the software coincide with the experimental results.

Key words: turning; chatter prediction; stability lobe diagram; frequency response function (FRF); trigger-acquisition

车削颤振是切削过程中刀具与工件之间的动态切削力激发的自激振动^[1]. 车削颤振不仅破坏加工零件的表面质量, 还破坏机床, 影响刀具寿命. 因此进行车削颤振稳定性预测就显得尤为重

要^[2-3].

目前, 国内外学者针对车削加工过程的颤振预测理论进行了大量的研究并已形成部分商用化的软件. Tobias 和 Fishwick 提出了车削颤振源于

收稿日期: 2015-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105067, 51135003); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(N120403011); “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2013ZX04011011).

作者简介: 刘宇(1980-), 男, 吉林长春人, 宁夏中卫人, 东北大学副教授; 张义民(1958-), 男, 吉林长春人, 东北大学教授, 博士生导师, 教育部“长江学者奖励计划”特聘教授.

加工系统的不稳定性理论,建立正交切削模型,得到车削颤振预测的稳定性叶瓣图(stability lobe diagram, SLD),给出了转速-切宽加工参数的稳定情况。Altintas 等^[4]提出了频域稳定性预测方法,采用零次近似和高次近似法得到稳定性叶瓣图,提高了稳定性预测精度。Stépán 等^[5-7]采用时域预测方法对具有时间延迟的周期线性系统进行研究,提出了半离散方法,提高了预测精度。Ding 等^[8-10]采用全离散法获得周期线性系统稳定性叶瓣图。

国外,美国的 MLI 公司进行车削颤振研究并开发了 MetalMax 系统,通过对刀具的敲击实验,找出车床主轴的最优转速。加拿大的 Altintas 等对车削加工过程中的颤振预测进行研究^[11],开发了 Cutpro 软件,对车削等加工过程进行颤振预测。丹麦的 B&K 公司对车床、铣床进行研究,开发了 PULSE 测试系统,对车床、铣床振动信号进行采集并得到其频响函数。国内,北京航空航天大学高效数控加工技术研究应用中心主任刘强教授进行相关研究^[12],开发了“基于数控加工过程动力学的仿真优化系列软硬件系统——X-Cut”,对数控车床进行颤振预测和仿真优化。但以上软件都不能根据得到的频响函数设置分析频率范围,不能根据用户需求进行叶瓣数等参数设置来绘制稳定性叶瓣图。

本软件基于再生型振动理论^[13-14],采用再生颤振的频域预测方法^[15]进行颤振预测,将信号采集与分析结合,实现了振动信号同步触发采集和变参数稳定性叶瓣图^[15]绘制的一体化。同时,系统能够进行频率分析范围设置,对输入参数进行判断识别。软件采用 C#语言^[16]编程,对系统进行了功能模块及界面设计。

1 系统需求分析

软件具有能够进行触发信号识别设置、振动信号同步触发采集、设置频响函数分析频率范围、变参数稳定性叶瓣图绘制、图形显示及数据保存等功能。

1.1 车削颤振稳定性预测软件设计的总体目标

软件系统涵盖车床测试的整个过程,形成完善的数据采集、数据分析体系。

1.2 车削颤振稳定性叶瓣图算法

车削加工系统主要存在 x, z 两个方向的振动。如果考虑刀尖半径的影响,则需要将切削和力分解到 x 或 z 方向上。忽略刀尖半径,则端面车削

时以 x 向振动为主,外圆车削时以 z 向振动为主。

忽略刀尖半径的端面车削,其车削加工系统动力学模型如图 1 所示。相对工件来说,刀架的刚度小很多,所以假设工件为刚性结构。

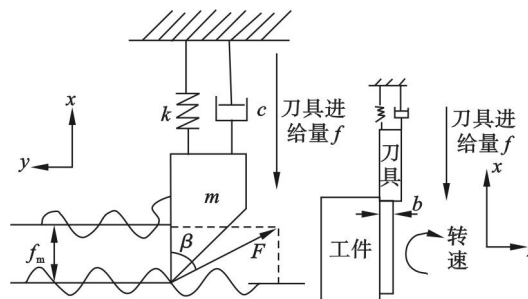


图 1 车削加工系统动力学模型

Fig. 1 Dynamics model of the turning system

$$f = f_m - x(t) + x(t - T) \quad (1)$$

式中: f 为车削加工实际进给量, mm/r; $x(t)$ 是在 t 时刻刀架在 x 方向的振动位移, mm; f_m 为名义进给量, mm/r; T 为主轴旋转周期, s。进给力由式(2)计算得出

$$F = K_s \times f \times b \quad (2)$$

式中: K_s 为切削力系数, N/mm²; b 为切削宽度, mm。

对于刀架系统,由图 1 可得

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F\cos(\beta) \quad (3)$$

由式(1)~式(3)得

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = K_s \cos(\beta) (f_m - x(t) + x(t - T)) b \quad (4)$$

式中 m 为等效质量, kg。

由式(4)得出传递函数:

$$\phi(s) = \frac{\omega_n^2}{k(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (5)$$

转换成复数域,则传递函数的实部和虚部分别为

$$H_{\text{real}} = \frac{1 - r^2}{k^2 [(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2]} \quad (6)$$

$$H_{\text{imag}} = \frac{2\xi r}{k^2 [(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2]} \quad (7)$$

式中: $r = \omega/\omega_n$, 为频率比; ξ 为阻尼比。

车削过程中的切削稳定性极限为

$$b_{\text{lim}} = -1/(2K_s \cos(\beta) H_{\text{real}}) \quad (8)$$

因为切削稳定性极限必须为正数,所以 H_{real} 应为负数,此时刀尖点系统才是稳定切削。

切削过程中主轴转速的计算公式为

$$n = f_c / (l + \frac{\varepsilon}{2\pi}) \quad (9)$$

式中: f_c 为颤振频率, Hz; l 为叶瓣图上的叶瓣数;

ε 为本次切削与上次切削的相位角差,rad,

$$\varepsilon = 2\pi - \tan^{-1}(H_{\text{real}}/H_{\text{imag}}) . \quad (10)$$

2 软件系统

2.1 系统结构

车削颤振稳定性预测软件主要包括信号采集模块和叶瓣图计算模块. 由采集卡得到的时域信号经 FFT 变换变为频域信号, 计算得到刀具的频

响函数,显示 FRF 并保存数据. 在叶瓣图计算模块中对频响应函数进行分析频率范围设置、切削力系数及叶瓣数设置, 然后绘制稳定性叶瓣图, 显示并保存数据.

2.2 软件界面

软件采集模块界面如图 2 所示, 主要由参数设置部分和绘图部分组成. 设置部分包括硬件设置、分析设置、触发设置、力锤加窗、加速度加窗和测试部分. 绘图部分依次显示频响应函数实部、虚部及相干性.

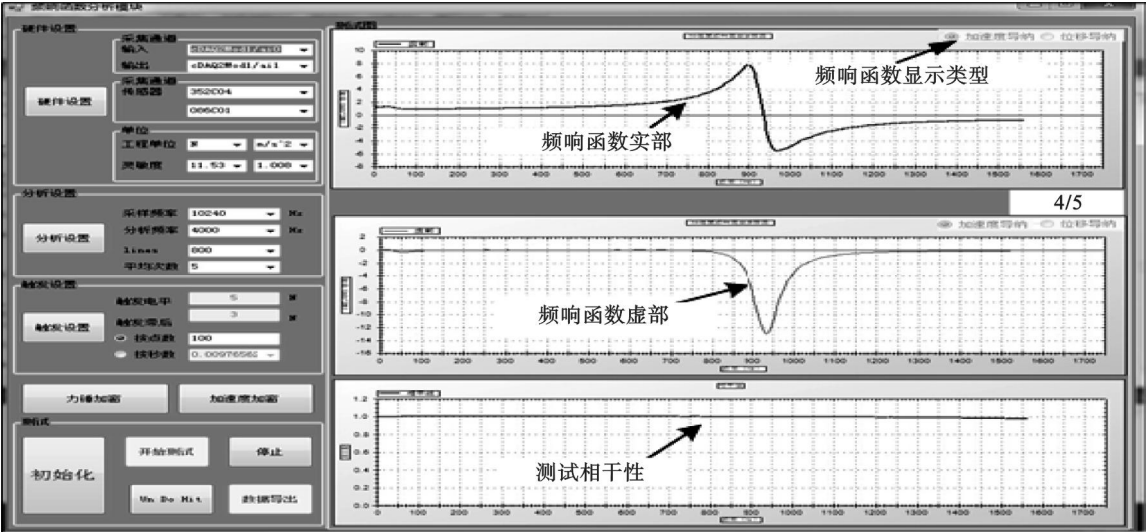


图 2 采集模块界面
Fig. 2 Gathering module interfaces

3 软件实现的关键技术

车削颤振稳定性预测软件的功能实现主要难题在于触发信号的识别、振动信号同步触发采集的实现、计算稳定性叶瓣图类的设计及绘图功能的实现.

3.1 触发信号的识别

信号触发采用上升沿触发方式, 即上升沿信号从低于触发滞宽线上升并超过触发电平才为触发信号. 软件触发设置如图 3 所示, 根据力锤敲击

的脉冲信号确定触发电平和触发滞宽. 图 3 中触发电平为 5N, 触发滞宽为 3N.

3.2 振动信号同步触发采集实现

以采样率 $f_s = 4\,096$ 个/s, 预触发样本数为 100, 样本数 $N = 2\,048$, 触发位置 1 000 为例, 分析信号获取过程如图 4 所示. 程序每次从 PC 缓存中读取 N 个数据存入 data 中, 通过 FindTrigger 函数寻找触发信号, 将不包含触发信号的数据块存入预触发缓存 pretrigger 中, 然后由 DAQmx 中的异步回调函数从 RAM 中读取下一个数据块. 未找到触发时, 将数据存入上次的 pretrigger 中, 继续读取数据, 直到找到触发信号. 找到触发后, 将触发位置前 100 个数据及剩余的 1 048 个数据保存到数据表中, 继续读入 900 个数据, 保存到数据表中.

3.3 稳定性叶瓣图计算类的设计

稳定性叶瓣图类包含字段、属性、构造函数和方法. 其计算叶瓣图的流程如图 5 所示.

3.4 绘图功能的实现

软件采用了开源的 .NET 图表类库: ZedGraph, 实现了图形的平移、缩放、保存及数值的显示等功能.

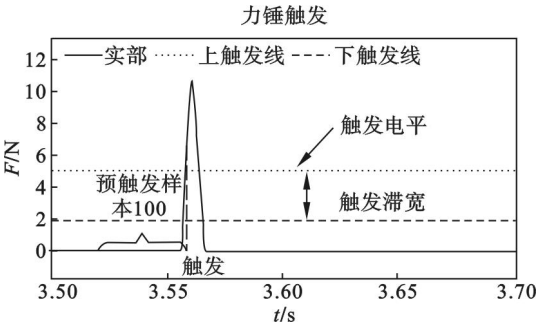


图 3 系统触发条件设置
Fig. 3 Trigger condition setting of the system

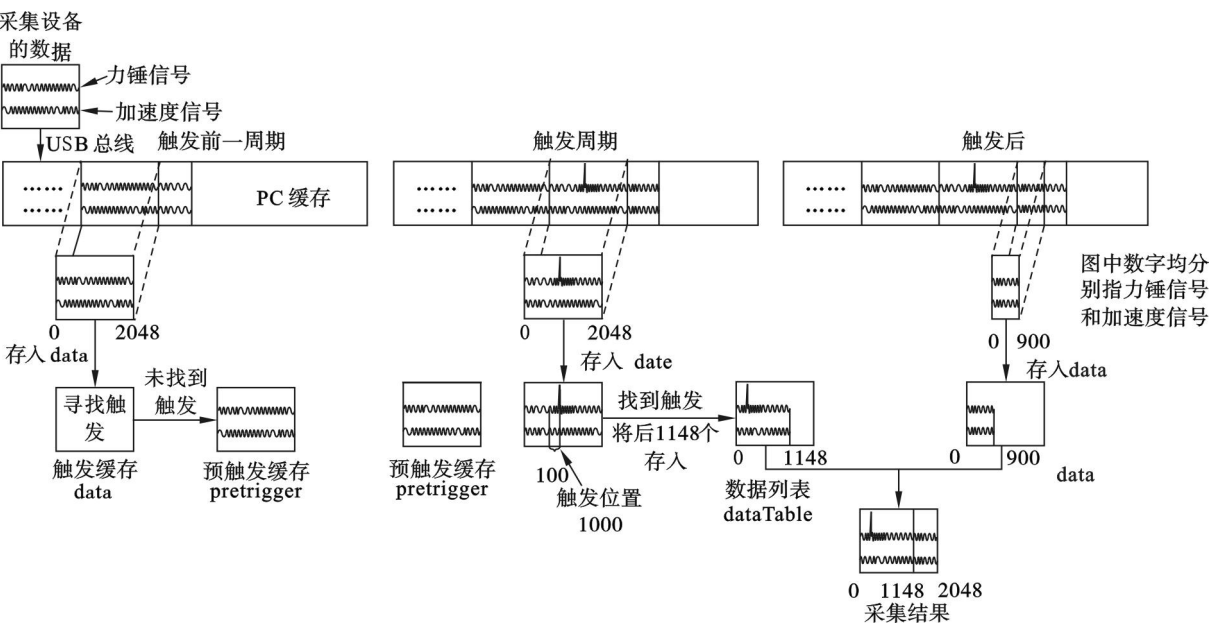


图 4 分析信号获取过程

Fig. 4 Analytical signal acquisition

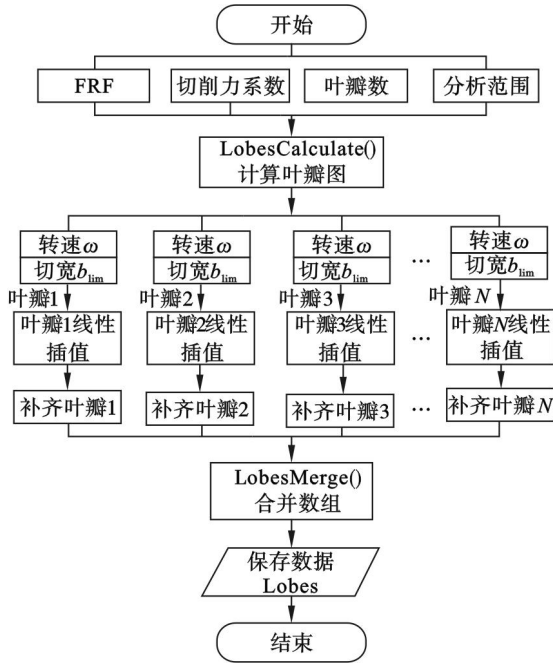


图 5 叶瓣计算的流程图

Fig. 5 The flow diagram of the lobes calculation

4 实 验

使用该软件在 CJ0625 车床进行刀尖点测试,得到车床加工系统的位移频响应函数. 考虑到低频数据对测量结果的影响,故只分析 10 ~ 400 Hz 范围内的频响应函数. 图 6 为加工系统位移频响应的实部与对应的虚部.

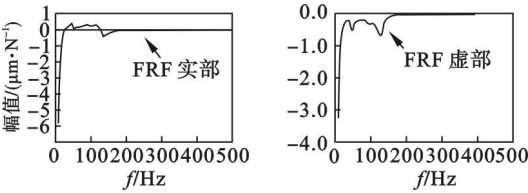


图 6 CJ0625 台式车床加工系统频响应函数

Fig. 6 FRF of the CJ0625 machine system

由测试得到的频响应函数进行稳定性叶瓣图绘制,得到其在主轴转速 ω 在 500 ~ 3 000 r/min 时的车削颤振稳定性叶瓣图,如图 7 所示.

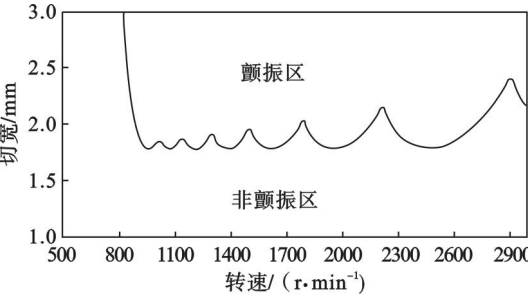


图 7 主轴转速在 500 ~ 3 000 r/min 车刀的稳定性叶瓣图

Fig. 7 Stable lobes at a rotated speed of 500 ~ 3 000 r/min

由图 7 可以看出,当转速为 1 800 r/min,切宽为 2 mm 时,加工系统发生颤振. 当切宽为 1.8 mm 时,加工系统稳定. 用端面车刀 45#钢工件进行切削实验,工件表面如图 8 所示,这与预测结果吻合.

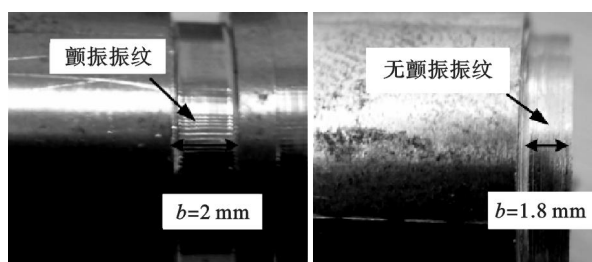


图8 加工表面
Fig. 8 Workpiece surface

5 结 论

1) 基于 C# 开发了车削颤振稳定性预测软件,研究了频响函数测试过程中多通道高速同步触发采集的实现算法,开发了具有由频域分析方法获得颤振稳定性叶瓣图功能的 C# 类。

2) 建立了正交车削加工动力学模型,对 CJ0625 车床的端面车刀进行实验.结果表明车削颤振稳定性预测软件能够对车削颤振进行预测。

参考文献:

- [1] 刘习军,陈予恕.机床速度型切削颤振的非线性研究[J]. 振动与冲击,1999,18(2):5-9.
(Liu Xi-jun, Chen Yu-shu. Nonlinear analysis of speed type cutting chatter of machine tools[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 1999, 18(2):5-9.)
- [2] 王晓军.车削加工稳定性极限预测的研究[D].长春:吉林大学,2005.
(Wang Xiao-jun. Study on the prediction of stability limits in turning[D]. Changchun: Jilin University, 2005.)
- [3] 曲兴田,吴博达,刘笑羽,等.车削加工中心切削颤振的预报控制[J].吉林工业大学学报(自然科学版),1998,28(2):24-28.
(Qu Xing-tian, Wu Bo-da, Liu Xiao-yu, et al. The predictive control of cutting chatter at the center of turning process[J]. *Journal of Jilin University of Technology (Natural Science Edition)*, 1998, 28(2):24-28.)
- [4] Budak E, Altintas Y. Analytical prediction of stability lobes in milling [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1995, 44(1):357-362.
- [5] Insperger T, Stépán G. Updated semi-discretization method for periodic delay - differential equations with discrete delay [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 61(1):117-141.
- [6] Insperger T, Stépán G. Semi-discretization method for delayed systems [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2002, 55(5):503-518.
- [7] Elbeyli O, Sun J Q. On the semi-discretization method for feedback control design of linear systems with time delay [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 273(1):429-440.
- [8] Ding Y, Zhu L, Zhang X, et al. Second-order full-discretization method for milling stability prediction [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(10):926-932.
- [9] Ding Y, Zhu L, Zhang X, et al. A full-discretization method for prediction of milling stability [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(5):502-509.
- [10] Huang T, Zhang X, Ding H, et al. An efficient linear approximation of acceleration method for milling stability prediction [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 74:56-64.
- [11] Altintas Y, Ko J H. Chatter stability of plunge milling [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2006, 55(1):361-364.
- [12] 赵明,刘强,彭翀.面向制造企业应用的切削数据库研究与开发[J].制造技术与机床,2011(6):35-40.
(Zhao Ming, Liu Qiang, Peng Chong. Research and development on cutting database for manufacturing enterprises [J]. *Journal of Manufacturing Technology and Machine Tool*, 2011(6):35-40.)
- [13] Taylor F W. On the art of cutting metals [J]. *Transaction of ASME*, 1906, 28:31-244.
- [14] Tlustý J, Polacek M. The stability of machine tools against self excited vibrations in machining [C]// Proceedings of the International Research in Production Engineering Conference. New York: ASME, 1963:465-474.
- [15] Schmitz T L, Smith K S. Machining dynamics: frequency response to improved productivity [M]. New York: Springer, 2009:58-97.
- [16] 钱哨,李挥剑,李继哲. C# WinForm 实践开发教程 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2010:125-156.
(Qian Shao, Li Hui-jian, Li Ji-zhe. C# WinForm practice development tutorial [M]. Beijing: China Water Power Press, 2010:125-156.)