

学术论文

难加工材料高速切削力非线性特征规律的 最大熵谱分析与小波分析

龙震海, 王西彬, 王好臣

(北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081)

[摘要] 在切削速度范围 157~1 000 m/min 内, 综合应用析因试验与速度单因素试验, 对航空用难加工材料 2Cr13 马氏体不锈钢进行了高速干式铣削试验。在分析其切削力显著性影响因素的基础上, 对切削力随机信号进行了现代谱分析与小波分析。研究表明, 高速切削马氏体不锈钢材料时, 切削速度和每齿进给量之间的交互作用对切削力有显著影响; 铣削深度和每齿进给量之间的交互作用在切削力响应信号中表现为低频周期信号; 低频周期信号与高频信号叠加后, 其波形的振幅将会增大。

[关键词] 难加工材料; 高速切削; 析因设计; Meyer 小波变换; Mallat 算法

[中图分类号] TG506.1; TG506.7 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)09-0028-04

1 前言

高速加工技术研究近 10 年来在国内外均取得了较大发展^[1~4]。高速铣削技术可以通过减少每齿材料切除量而大幅度地提高加工精度要求较高的工件的生产效率。因此, 在航空、航天以及国防等领域获得了广泛的应用^[5,6]。高速切削过程中的动态切削力作为研究材料变形机理与进行刀具结构设计时必须考虑的关键问题, 如何进行准确的描述和预报, 已成为高速切削技术研究中必须面对的课题。

文献 [7] 提出高速切削条件下, 随着切削速度的增加, 切削力会有所减小。但在难加工材料高速切削过程, 切削力的变化却并非如此。笔者综合应用现代数字信号处理工具中的最大熵谱分析法 (即 AR-Autoregressive 谱估计方法) 与小波分析方法, 在系统试验研究的基础上, 通过对在航空制造领域有重要使用价值的马氏体不锈钢 2Cr13 工件进行高速铣削试验, 考查高速切削条件下切削力的非线性特征规律, 发现了对切削力有显著影响的低频周期信号, 为准确预报高速切削难加工材料的切削力, 进一步研究难加工材料的切削变形机理、工艺

优化和系统仿真等提供了理论基础和试验依据。

2 试验方法与方案

笔者在研究中对所有的高速端面铣削试验均在机床工艺系统稳定性良好的 DMU 70e Volution 五轴加工中心上进行, 工件材料为马氏体不锈钢 2Cr13, 工件规格为 150 mm×35 mm×45 mm, 采用端面中心对称铣削方式进行单刃切削, 不使用切削液, 选择 SANDVIC ϕ 50 mm 高效铣刀盘, 刀片为 R-245 涂层硬质合金铣刀片, 切削力测量系统则由 Kistler9257B 三向动态压电式测力仪、Kistler5017A 电荷放大器、Measure Computing A/D 数据转换板和 Intel PIII 750 计算机组成。

为了研究切削用量各要素对切削力影响的规律, 首先选用 2^k 析因试验设计 (表 1), 安排试验线路, 确定切削力影响因素中的重要效应因素。表 1 中 “+” 与 “-” 分别代表各因素的高、低水平试验量。为了能够实现各因素的变化对切削力影响的程度, 高、低水平之间选择 4 倍的倍比。析因试验后, 进行切削速度单因素试验, 重点考查随切削速度的增加, 切削力的变化规律及其机理。

[收稿日期] 2004-03-15; 修回日期 2004-04-05

[基金项目] 国防基础预先研究基金资助项目 (41318. 1. 2. 2)

[作者简介] 龙震海 (1974-), 男, 湖南永州市人, 北京理工大学机械与车辆工程学院博士

表 1 析因试验因素水平

Table 1 Factors and levels for three-factor factorial experiment

	铣削深度 a_p /mm	每齿进给量 f_z /mm·z ⁻¹	切削速度 v_c /m·min ⁻¹
+	2	0.2	628.32
-	0.05	0.05	157.08

3 试验结果与分析

3.1 2³ 析因分析

对 2³ 析因设计试验结果进行对数变换和计算各因素效应估计量后，得到效应因素正态概率图如图 1。根据效应因素正态概率拟合线分布意义，沿拟合直线上的所有效应因素，因其归于误差正态分布区间，故可以忽略，而显著性高的效应因素则远离此直线。该分析表明，对切削力有统计学显著性影响的效应因素按作用强弱依次为：铣削深度、每齿进给量和二者之间的交互作用。这三个显著效应因素均为正效应，即随着效应因素水平的增加切削力也将增大。通过对试验数据的方差分析也可以得到相同的结论。

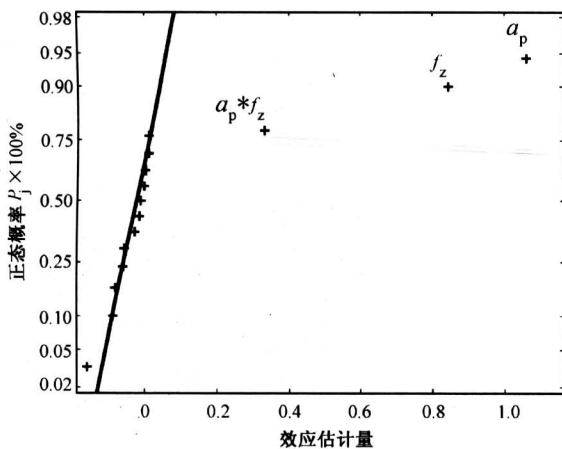


图 1 析因试验正态概率图

Fig.1 Normal probability plot of major effects on the cutting force in factorial experiment

关于铣削深度 a_p 和每齿进给量 f_z 对切削力的影响效应和作用机理，国内外学者已进行了大量的试验研究和理论分析，并得出较为确定的解释与结论，但有关 a_p 与 f_z 之间的交互作用对切削力影响的机理，尤其在难加工材料的高速切削领域，尚未见国内外相关研究的报道。

3.2 现代谱分析

谱分析是研究平稳随机过程的重要手段。谱密

度可提供随机过程所含不同频率成分的功率信息，故谱分析在动态测试数据处理中得到广泛应用^[8]。经典傅立叶谱分析对短数据的频率成分分辨率不高，存在能量泄露与频栅效应等问题，因此在需要高分辨率的场合，往往不及现代谱分析方法有效。

为了在频域上描述高速切削力信号的统计特性，区分不同频率成分的强弱，识别相应频域处的谱峰含有的强周期成分，对切削力响应信号进行了现代谱分析中 AR 谱估计。AR 谱估计采用最大熵谱伯格算法。虽然伯格法易于出现谱峰偏移和谱峰分裂现象，但其对短数据的频率成分分辨率高，谱图的谱峰明显、突出，随机波动较小和计算速度较快，因此适合于切削力平稳随机信号的谱估计。

图 2 中 (a), (b), (c) 分别为对主轴转速 $n = 1\ 000, 3\ 000, 6\ 000$ r/min 时切削力信号的 AR 谱估计功率谱图。图 2 (d) 是主轴转速 $n = 6\ 000$ r/min 时切削力信号的傅立叶谱估计功率谱图。

对比图 2 (a), (b), (c) 易见，随着主轴转速（即切削速度）的增加，切削力信号的 AR 谱估计谱峰数将会发生变化。当低速切削 $n = 1\ 000$ r/min 时，在主轴基频 16.67 Hz 附近只有一个独立谱峰。而当主轴转速超过 3 000 r/min 时，除了在主轴基频附近处存在一个谱峰外，在低频段 3~8 Hz 附近出现了第二个独立谱峰。这意味着在主轴频率外，又出现了一个低频周期信号。从图 2 (d) 对主轴转速 6 000 r/min 切削力信号的傅立叶经典谱分析中，同样可以证实该低频信号的存在。

不仅如此，随着切削速度的增加，笔者试验中的最高主轴转速为 12 000 r/min，这个低频信号的频率基本稳定在 3~8 Hz 范围内。对此现象，结合图 1 中对切削力有统计显著性影响因素的析因分析，推测该低频信号可能来源于铣削深度和每齿进给量交互作用 $a_p \times f_z$ 。

3.3 小波分析

鉴于切削刃周期性切入、切出工件时引起的切削力变化只是切削力测试系统的响应激励之一，当对切削力响应信号进行研究时，必须将不同频率激励信号合成的系统响应信号逐一分解，以便提供局部时间段上的频率信息。

为了深入研究高速切削过程中的低频信号的产生机理因素、特征规律及其对切削力的影响，利用小波分析方法，对高速切削阶段 ($n = 6\ 000$ r/min) 的离散切削力采样信号进行了 2 阶 Meyer 小

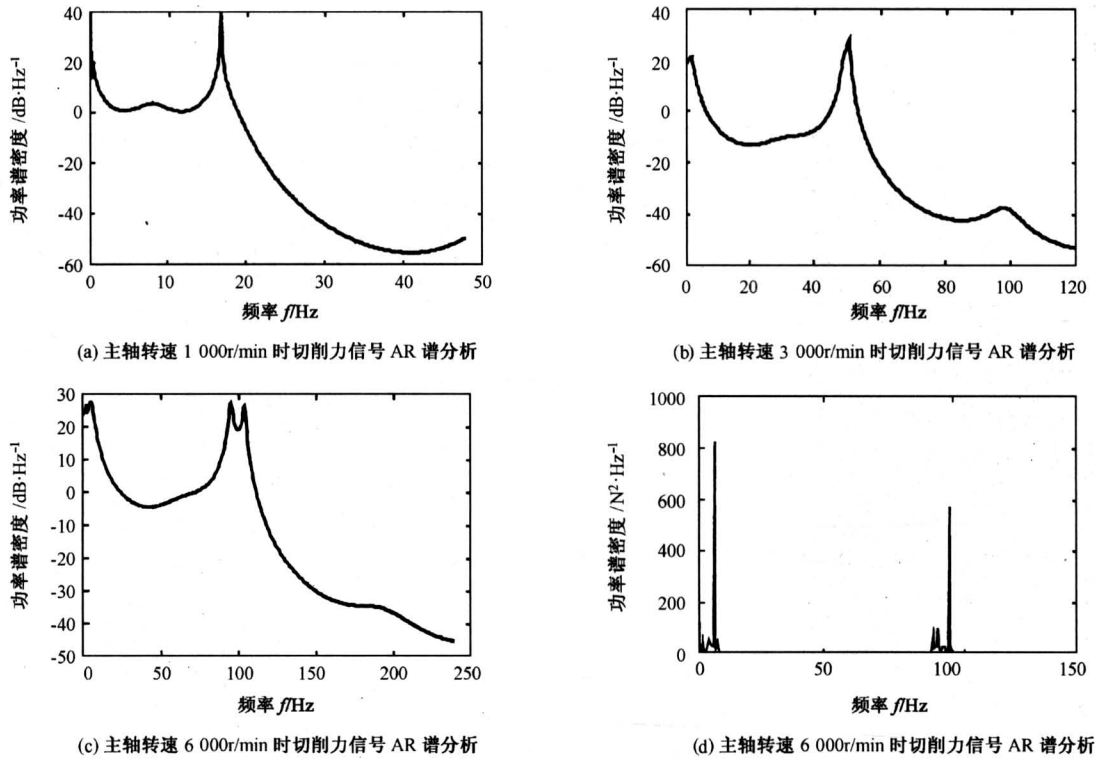


图 2 高速切削力平稳随机信号功率谱图

Fig.2 Power spectral density plot of random cutting force signals

波变换, 并使用 Mallat 算法对该信号进行了 2 层多分辨率分析。选用 Meyer 小波基是因为其在频

域内具有紧支集的同时, 还具有任意阶正则性^[9]。离散切削力信号与其多分辨率分析结果见图 3。

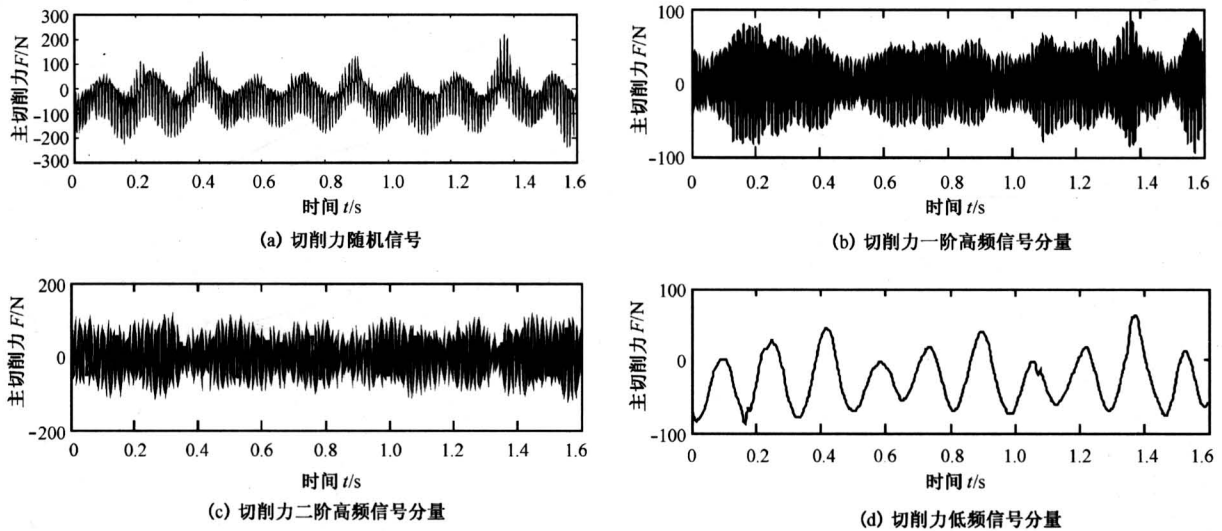


图 3 切削力随机信号及其多分辨率分析 (主轴转速 $n = 6\ 000\ \text{r/min}$, 采样频率 $f_s = 500\ \text{Hz}$)

Fig.3 The wavelet analysis of random cutting force signals (spindle speed $n = 6\ 000\ \text{r/min}$; sampling frequency $f_s = 500\ \text{Hz}$)

图 3 (a) 为主轴转速 6 000 r/min 的切削力采样信号, 采样频率为 500 Hz。在 6 000 r/min 时的

切削力随机信号中, 可以预期有 100 Hz 的主轴基频存在, 即在 1 s 的时间段内, 应该存在稳定的 100 个切削力周期信号。从图 3 (a) 中可以明显地看到, 在切削力平稳随机信号中除了这个高频周期切削信号外, 还存在一个明显的低频周期信号。

图 3 (b), (c), (d) 为对主轴转速 6 000 r/min 的切削力采样信号进行多分辨率分解后得到的不同尺度随机信号分量。图 3 (b), (c) 为高频信号成分, 频率约为 100 Hz。图 3 (d) 为低频信号成分, 频率约为 6 Hz 左右。不难证明, 这个低频信号成分就是图 2 (c), (d) 中出现的低频分量。进一步对比图 3 (c), (d) 中高、低频信号的波形振幅大小, 还可以发现, 该低频信号成分对切削力响应信号的贡献, 与高频信号成分, 即周期性切削过程信号对切削力响应信号的影响程度基本相同。

因此, 在高速切削阶段, 除了切削层金属、切屑和工件表面金属之间的弹性变形和塑性变形所产生的切削抗力与摩擦阻力外, 铣削深度和每齿进给量之间的交互作用对切削力也会产生重要影响。

4 结论

1) 随着切削速度的增加, 铣削深度和每齿进给量之间的交互作用会对切削力产生重要影响。

2) 铣削深度和每齿进给量之间的交互作用在切削力响应信号中表现为低频周期信号。

3) 高速切削时, 切削力响应信号中的低频周期信号与高频信号叠加后, 波形的振幅将会增大。

参考文献

- [1] 王西彬, 杨广勇. 超高速干铣削灰铸铁的研究[J]. 兵工学报, 1999, 20(3): 263~268
- [2] 王西彬, 解丽静. 超高速切削技术及其新进展[J]. 中国机械工程, 2000, 11(2): 190~194
- [3] Smith T S. Current trends in high speed machining [J]. Journal Manufacturing Science & Engineering, ASME, 1997, 119: 664~666
- [4] Lopez de lacalle L N, Perez J, Llorente J I, Sanchez J A. Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 100: 1~11
- [5] Anil Saigal, Yang Weiguo. Analysis of milling of iron aluminides [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 6388: 1~8
- [6] Koshy P, Dewes R C, Aspinwall D K. High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel (58HRC) [J]. Journal of Materials Processing Technology 2002, 127: 266~273
- [7] 刘战强, 万 熠, 艾 兴. 高速铣削中切削力的研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(9): 170~174
- [8] 林洪桦. 动态测试数据处理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995
- [9] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002

Study on the Nonlinear Characteristics of Cutting Forces in High-speed Face-milling of Difficult-to-cut Materials by AR Spectrum Analysis and Wavelet Analysis

Long Zhenhai, Wang Xibin, Wang Haochen

(School of Mechanical & Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

[Abstract] Factorials experiment and velocity single-factor experiment are applied in the dry high-speed milling experiments of Martensitic stainless steel 2Cr13, which is used in aerospace industry. Based on the analysis of cutting regimes' influences on milling force, the spectrum analysis and wavelet analysis are applied on the random cutting force signals. This study shows that in high speed milling of Martensitic stainless process, the interaction of depth of cut and feed per tooth has significant effect on the cutting force; the interaction of feed per tooth and depth of cut introduces a lower frequency periodic signal; this low frequency signal coupled with high frequency signal could remarkably increase the amplitude of cutting force signals.

[Key words] difficult-to-cut materials; high speed machining; factorials design; Meyer wavelet transform; Mallat algorithm