



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

切削振动和加工不稳定性控制：精密微纳加工的时频分析方法

**Control of Cutting Vibration and Machining Instability
A Time-Frequency Approach for Precision, Micro
and Nano Machining**

[美] C. 史蒂夫·苏 (C. Steve Suh) 著
刘孟坤 (Meng-Kun Liu)
郭新华 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



关于本书

本书提出了对于表征切削不稳定性十分关键且有效的分析工具，该分析工具本质上是复杂的，而且经常出现混沌状态。同时本书还针对不稳定性控制、系统辨识和信号处理提出了有效措施，这三个部分对于机床设计至关重要。本书构想的方法以及控制和设计原则新颖独特，通过设置实时同步振动和频率控制来抑制生产带来的不稳定性，包括机床颤振。



国际电气工程先进技术译丛

切削振动和加工不稳定性控制：精密微纳加工的时频分析方法

Control of Cutting Vibration and Machining Instability
A Time-Frequency Approach for Precision, Micro and Nano Machining

[美] C. 史蒂夫·苏 (C. Steve Suh) 著
刘孟坤 (Meng-Kun Liu)
郭新华 译



机械工业出版社

精密微纳加工是一门多学科综合的高级技术，要求具有高精度、高稳定性和高自动化。在精密加工制造过程中，切削的不稳定性控制和发展无颤振机床是两个重要的内容。

本书介绍了切削动力学和不稳定加工的主要特点，引入了切削振动和加工不稳定控制应用到的基本物理原理，在此基础上重点介绍了自适应滤波器和滤波- x LMS 算法、时频分析方法、小波滤波器组原理和应用、动态不稳定性的暂态特性和频谱特性、动态不稳定性的同步时频域控制、高速下不稳定铣削和振动的时频控制、不稳定微铣削的多维时频控制以及摩擦诱发的不稳定性的时频控制和同步时频域内的混沌同步等内容。

本书将精密加工技术与系统论、方法论、计算机技术、信息技术、传感器技术、数字控制技术相结合，形成了精密微纳加工中切削振动和加工不稳定的创新型控制算法，相应结果通过 MATLAB 语言和 Simulink 仿真工具进行验证，可以使读者快速了解和掌握。

本书目标读者群体广泛，适合机械制造及其自动化、控制理论与控制工程、电气工程等专业的研究生阅读参考，特别适合从事精密微纳加工的工程专业人士阅读使用，对于从事非线性动力学和非线性控制领域的专业研究人士也具有重要的参考价值。

译者序

精密微纳加工是一门多学科综合的高级技术，要求具有高精度、高稳定性和高自动化。随着精密加工、数字控制等领域的迅速发展，精密加工技术与系统论、方法论、计算机技术、信息技术、传感器技术、数字控制技术的结合，促成了精密加工系统工程的形成。由于生产的迫切需求，精密加工技术不断发展和进步，成为当今热门的研究领域。在精密加工制造过程中，切削的不稳定性控制和发展无颤振机床是两个重要的内容。时频分析作为分析时变非稳定系统的有力工具，成为现代信号处理研究的一个热点，它作为一种新兴的信号处理方法，近年来受到人们的广泛关注。

本书在探讨切削动力学的基础上建立和发展了创新型控制方法。研究耦合、交互和不同切削状态的演化，得出用来消除加工不稳定性 and 实现精密微纳制造的机床设计的可控临界参数，总结出切削不稳定性鲁棒控制的主要特点。

本书紧接着从基础的物理原理出发，介绍了有源滤波控制和滤波-x LMS 算法，详细地介绍了几种非线性系统响应特性的分析方法及非线性时频域控制的基本原理和特性。在此基础上引入了小波滤波器组和时频域分辨率的概念，详细阐述了基于非线性时频域控制的基本原理。

本书针对基于频域和时域的控制都无法解决的非周期响应和线路混沌问题，引入了时频域控制理论以及使混沌控制可行的控制器，应用高速制造和由摩擦引发的不连续的实例证明其可行性。

本书最后应用联合时频域中施加并行控制的概念设计了一种混沌同步方案，其使用时频域控制法来缓解混沌，强调了在混沌同步中实现抑制自持的混沌加工颤振的意义。

本书内容丰富、实用性强。本书以精密微纳加工这一热门领域为基础，指出了精密微纳加工过程中存在的切削振动和不稳定性问题，并利用基于小波变换的非线性时频域控制法、混沌控制和混沌同步控制方法，理论基础翔实、应用实例丰富，系统而全面地阐述了切削振动和加工不稳定的控制方案可行性。

全书译稿由华侨大学郭新华副教授完成。翻译过程中得到以下学生的帮助，

IV 切削振动和加工不稳定性控制：精密微纳加工的时频分析方法

包括研究生张莹文、吴燕峰、薛娴、黄燕涛，以及本科生刘梦蝶、张昱芄。在本书译稿完成之际，对她们所做的工作表示感谢。

本书涉及的学科知识面广，翻译难度较大。尽管译者始终谨慎动笔，仔细校译，但难免还会存在疏漏，恳请读者批评指正。

译者 郭新华

原书前言

控制器一般在频域或时域下进行设计。当控制器在频域下进行设计时，其共同点是由相应的运动控制方程推导出传递函数。频率响应的设计方法，如波特图、根轨迹，通常用于基于频域设计的控制器。当控制器在时域下设计时，系统的微分方程根据相关联的状态变量被描述为状态空间模型。然后利用状态反馈或者其他时域控制规律研究所设计控制器的可控性和可观性。控制器的设计在任一域内都有自己的优势。频域设计的控制器可以提供不确定性性能。对于线性稳定的系统，设计一个反馈控制器，评估正弦输入时的输出幅值和相位响应一般是足够的。时域设计的控制器在不考虑频域上的要求时，可以适应多输入/输出及其对应的内部与外部状态。时域控制器和频域控制器只能单独地应用在线性稳定系统中。

对于一个线性时不变系统，仅系统输入的幅值和相位角发生改变，当输入频率与输出频率保持不变时，系统可以通过施加适当的反馈增益来保持稳定。而且，时域响应和频域响应应该同时有界。然而，上述条件在非线性系统中的混沌响应是不成立的。在时域中，混沌响应本是有界的，而在频域中成为不稳定的带宽，且这个频域在相图中含有无限多个各时期的不稳定周期轨道，被称为奇怪吸引子。它不保持在一个周期轨道内，且在这些不稳定的周期轨道间快速切换。如果混沌响应投影到 Poincaré 截面，将得到一个低维子空间的横向响应的轨迹，众多的交叉点会密集地聚集并限制在一个有限的区域内。这意味着混沌响应在时域中的特定范围内是有界的，在动态恶化的同时，变化的带宽频谱轨迹在无数个不稳定周期轨道内快速切换。这种现象多见于高速切削操作，其强非线性包括再生效应、摩擦的不连续性、切屑形成和刀具刚度，且为主导作用。

对于一个非线性、非稳定的系统，当它发生分叉直至最终混沌时，其响应时间不再是周期的。额外频率分量的带宽光谱响应作为结果出现。设计在时域中的控制器包含时域误差是无法克制不断增长的带宽。另外，设计在频域中的控制器限制带宽扩展，而在时域误差中失控。无论基于频域还是时域的控制器的都不足以解决非周期响应和线路混沌。这由不确定性原则推断进一步指出，在时域和频域的分辨率不能任意达到。然而，根据 Parseval 原理，在时域和频域中计算的能量是可以互换的，它可以一起纳入并满足时域和频域的要求，并实现具有可调和并发时间-频率分辨率的非线性的控制。

以上是我们意识里一个简要的版本，很多年前我们就考虑了以下两个问题：

- ①为什么动态响应在时域中是有界的，却在同一时刻的频域中成为不稳定带宽？
②为什么控制一个非线性系统必须同时在时域及频域中执行是可行有效的？在本书中记录的基于小波变换的时频域控制方法是我们对这些问题的具体解答。

控制方法是自适应的，也就是说它监控并实时调整以提高其性能。新型控制中的对象参数需根据不断变化的系统输出进行实时辨识，并调整和更新控制规律。其结构体系的灵感来自于有源噪声控制中 FIR 滤波器识别系统和自动可调的 FIR 滤波器拒绝不可控输入。分析小波滤波器组被纳入控制系统。在控制信号合成之前，分析滤波器组分解输入和错误信号。当通过离散小波变换成对应于连续倍频程的各种尺度分量来解决一种动态响应，控制规律本质上是建立在联合的时频域内，从而方便时频的同步控制。不像有源噪声控制，其目的是减少噪声。当系统发生分叉或者混沌运动时，基于小波变换的时频控制是为了尽量减少在时频域内恶化的输出信号以便尽快恢复输出响应的周期性。这些特点一起为非线性、非稳定系统响应的控制提供了前所未有的优势。

本书提供了一个良好实践和训练基础，工程专业人士都可通过严格的探索在微制造、精密机床设计以及振动控制中实现重要的突破。根据高速不稳定切削控制和开发无颤振机床概念形成可行的解决方案。非线性动力学和非线性控制领域的专业研究人士也会发现大量如何充分缓解不连续性和混沌度的定性及定量的条款信息。

本书内容由 11 章组成。为了更好地理解不稳定性和车削工序颤振，第 1 章阐述了刀具工件的互动耦合性；第 2 章简要回顾了数学基础知识，同时包含第 7 章中有关于基于小波变换的非线性时频域控制法则推导的常见符号；第 3 章阐述了有源噪声控制和滤波-x LMS 算法的主要内容，在时频控制中，其功能是系统识别和减少错误；在第 4 章中探讨了时频域分析的概念，其中介绍了几种分析非线性系统适当表征的重要工具，这为理解小波滤波器组和第 5 章中的时频域分辨率的概念奠定了基础；第 6 章更详细地阐述了基于非线性时频域控制的基本原理；第 7 章介绍了时频域控制理论及使混沌控制可行的所有突出的物理特性；在第 8~11 章中，应用高速制造和由摩擦引发的不连续的例子证明其可行性；在最后一章即第 11 章中，探讨了另一种使用时频域控制法来缓解混沌的方案，强调了在混沌同步中实现抑制自持的混沌加工颤振的意义。

附录中列出了第 10 章和第 11 章中所有的结果和数据的两个 MATLAB 运行的 m 文件。一个是第 10 章中，摩擦引起的不稳定控制有一个广泛的有限元编码单元，其利用了几个用户定义的 MATLAB 函数在 Simulink 中计算梁的振动。在实施基于小波变换的非线性时频域控制法时，希望这些例子可以对实践经验的获得有所帮助。相当熟悉 MATLAB 语言和 Simulink 仿真工具的读者应该会发现其中的实例是丰富的、完整的及易于遵循的。

时域与频域控制首次设想于多年之前，当时众多才华横溢的人都致力于发展

其核心控制理念。在他们之中，如 Baozhong Yang 是探讨将瞬时频率作为非线性系统特征的首选工具；Achala Dassanayake 为我们全面展示了什么是不稳定的加工和加工颤振。

C. Steve Suh 和 Meng-Kun Liu
于美国得克萨斯州农工大学

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 切削动力学和不稳定加工	1
1.1 车削工序的不稳定	1
1.2 切削的稳定性	9
1.3 稳定与不稳定的界限	12
1.4 精细切削的稳定性	21
1.5 小结	29
参考文献	30
第 2 章 基本的物理原理	31
2.1 欧几里得矢量	31
2.2 线性空间	32
2.3 矩阵	33
2.4 离散函数	34
2.4.1 卷积和滤波运算	35
2.4.2 抽样定理	36
2.4.3 z 变换	37
2.5 动态响应的特征工具	37
2.5.1 傅里叶分析	44
2.5.2 小波分析	46
参考文献	48
第 3 章 自适应滤波器和滤波- x LMS 算法	50
3.1 离散时间 FIR 维纳滤波器	50
3.1.1 性能检测	50
3.1.2 性能函数的优化	52
3.2 梯度下降优化法	53
3.3 最小均方算法	55
3.4 滤波- x LMS 算法	57

参考文献	60
第 4 章 时频分析	61
4.1 时间和频率的对应关系	62
4.2 时域和频域的分辨率	63
4.3 不确定原理	64
4.4 短时傅里叶变换	65
4.5 时间连续的小波变换	66
4.6 瞬时频率	68
4.6.1 基本概念	69
4.6.2 瞬时频率的误读	72
4.6.3 多模结构的分解	76
4.6.4 瞬时频率的示例	79
4.6.5 非线性响应的特性	81
参考文献	84
第 5 章 小波滤波器组	85
5.1 小波实例	85
5.2 多分辨率分析	87
5.3 离散小波变换和滤波器组	93
参考文献	96
第 6 章 动态不稳定性的暂态特性和频谱特性	97
6.1 时频域中线性化的含义	98
6.2 时频域中的混沌路径	104
6.3 总结	112
参考文献	112
第 7 章 动态不稳定性的同步时频域控制	114
7.1 混沌路径的性质	114
7.1.1 稳态和非稳态下 Hénon 映射的 OGY 控制	115
7.1.2 稳态和非稳态下基于李雅普诺夫控制的杜芬振子	116
7.2 混沌控制的特性	120
7.3 混沌控制的有效性	128
参考文献	135

第 8 章 高速下不稳定铣削和振动的时频控制	138
8.1 铣削控制问题	138
8.2 高速低浸没铣削模型	139
8.3 混沌路径和铣削不稳定性	140
8.4 铣削不稳定控制	144
8.5 小结	147
参考文献	148
第 9 章 不稳定微铣削的多维时频控制	149
9.1 微铣削控制问题	149
9.2 非线性微铣削模型	151
9.3 多变量微铣削的不稳定控制	152
9.4 微铣削的不稳定控制	159
9.5 小结	167
参考文献	167
第 10 章 摩擦诱发的不稳定性的时频控制	169
10.1 摩擦诱发的振动控制问题	169
10.2 连续旋转盘圆盘模式	171
10.3 摩擦诱发的动态振动	175
10.4 摩擦诱发的不稳定控制	180
10.5 小结	184
参考文献	184
第 11 章 同步时频域内的混沌同步	186
11.1 混沌同步	186
11.2 非自控的混沌系统的动力学	187
11.3 同步方案	190
11.4 混沌控制	190
11.4.1 方案 1	190
11.4.2 方案 2	193
11.5 小结	196
参考文献	196
附录 非线性时频控制的 MATLAB 编程实例	198

第 1 章 切削动力学和不稳定加工

材料切除加工（作为制造业最重要的工序）正面临着不断增长的挑战：提高高速制造在微纳米层次上的能力。亚微米级三维外形和自由曲面的加工要求在准确度、精密度和生产率方面达到前所未有的性能。然而，能否满足显著提高质量和效率的要求，要视进行机械加工的机床的优化设计而定。现代精密机床的结构一般是几个基本部件的集成，包括过程检测和控制、电源和驱动器、模具和夹具以及提供刚度和稳定性的构架。由于动态不稳定性本来就显著，且其在高速精密切削中的危害尤其严重，故在设计精密机床系统中动力学设计受到青睐^[1]。该方法采用计算机为基础的分析 and 设计工具来优化系统级别机床设计的动态性能。它很大程度上依赖于一条重要信息——机床的振动。由于有大量参数影响切削振动，如修复效果、刀具非线性特性、切削间歇性、间断的摩擦激励和环境噪声等，故该方法的有效性要求加工动力学的全面建立贯穿整个过程。

本书探讨了以切削动力学为基础，建立和发展创新型控制方法。研究耦合、交互和不同切削状态的演化，以便确定机床设计的可控基本临界参数，这一参数可用来消除加工不稳定性 and 实现更好的精密微纳米制造。

有助于切削不稳定性鲁棒控制的主要特点是

- 1) 对切削运动中切削和干扰的动力学规律的理解。
- 2) 在各种工况下机床系统以最小的振动运转，如高速运转以实现加工表面的优质抛光。
- 3) 提高生产率，以实现利润最大化及运营和维护成本最小化。
- 4) 关注明显的不连续性，这种不连续性可让复杂的机床系统运动的性质得以全面确立，用以减少复杂间歇切削的同步时频非线性控制的应用既新颖又独特。对材料切除过程的影响减缓了由摩擦和刀具非线性引起的切削不稳定和混沌运动。
- 5) 关于切削不稳定控制和适用于高速切削加工过程的机床设计的概念的发展。

1.1 车削工序的不稳定

这里以关于加工不稳定性的一个综合调查研究来展开本书，通过采用三维模型^[2,3,4,5]解决问题：发展至今的切削动力学模型都未能掌握车削作业的动力学规律和应用模型建立的稳定性图不足以确定真正的稳定区域。研究的具体目标是正确地解释切削不稳定性，从而为切削不稳定性控制创建知识库。

复杂的加工模型描述了耦合的刀具-工件动力学，它受制于非线性再生切削力、瞬时切削深度和材料不平衡造成的工件旋转。在模型中，工件可视为一个三转子段的系统（未加工的、正在加工的和已加工成型的），它们通过一个柔性轴连接，于是使得工件相对于刀具运动且刀具相对于加工表面运动，从而组成三维，建立主轴转速、切削

深度、材料去除率和旋转的函数。图 1.1 所示为用于啮合被削减部分的刀具配置，质量中心到几何中心的偏差构成了描述工件旋转的离心率。可以观察到，利用模型中刀具和工件的一组丰富的非线性特性，包括在不同的切削深度下的倍周期分叉和表明加工不稳定性程度的混沌。结果显示与文献里记录的实际实验一致。结果表明至少在在一定切削深度范围内，旋转是加工动力学基本特征中不容忽视的部分。与普遍观念相反的是，发现旋转对刀具运动有着微不足道的影响。记录在参考文献 [2, 3, 4, 5] 中的研究也表明线性化车削模型低估了时域上的刀具振动，而高估了频域中的系统性能。然而非线性模型与文献记载的描述加工稳定性和振动的实际结果一致。非线性模型描述的耦合工件-刀具的振动在揭露真实的加工运行状态方面比对应的线性化更实用。在定性意义上，模型也揭示了与不稳定情形有关的刀具固有频率的宽带特性。然而，当在一定的切削深度（DOC）且无振荡中常见的随机性时，利用线性化模型得到的振动幅度处于发散中。此外，线性化模型认为在低切削深度时不稳定，且预测不稳定运动的分叉状态，运用物理参数，此不稳定运动被描述为混沌。基于这个模型能获得很多重要启示，事实上包括，如果要建立加工基础动力学且准确鉴定稳定极限，非线性模型的线性化是不可取的。

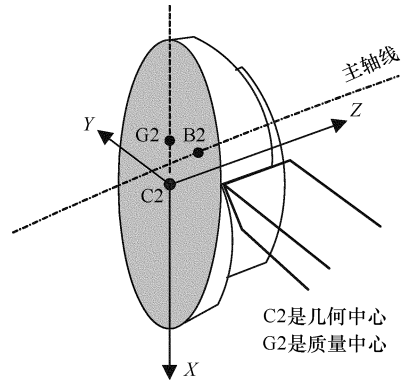


图 1.1 正被加工部分的结构

下面介绍耦合回转和刀具几何参数对加工的影响。

影响材料去除率（MRR）和确定切削力度及其功率损耗的，除了速度、进给率和切削深度，刀具几何形状也是影响加工效率的重要参数之一。表面粗糙度、切屑形成的变化和流屑角也受到刀具几何形状的影响。尽管流屑角与刀具角有关，但流屑角只是切削深度的函数。图 1.2 给出了处在切削运行中的刀具前角， α 的视图。刀具前角决定了最新形成的切屑流。通常那个角度在 $-5^\circ \sim +5^\circ$ 之间。为了与参考文献 [6] 中发表的实验结果相比较，这里考虑一个恒定的主轴转速 $\Omega = 1250\text{r/min}$ 、恒定的木屑宽度 $t_0 = 0.0965\text{mm}$ 、离心率 $\varepsilon_1 = 0.2\text{mm}$ ，与之一道的还有几个不同的切削深度，包括 $\text{DOC} = 1.62\text{mm}$ 和 2.49mm 。工件是机械部分为一个 0.25m 长 (l_0)、半径 $r_3 = 20.095\text{mm}$ 的 4140 型钢筋。硬质合金刀具的起始位置设置在离卡盘 0.15m 处。接下来给出的图里分为三类。首行绘出了其时间轨迹，而中间行给出利用瞬时频率得到的相应的时频响应（这部分将在第 4 章详细讨论）。末行展示了李雅普诺夫频谱，且展示了其中最大的李雅普诺夫指数。利用瞬时频率来理解加工不稳定性的细微的特征特性。

正倾角能使刀具锋利，但与负倾角相比，它也削弱了刀具。负倾角更适用于粗切削。刀具几何参数的选择取决于特定工件和刀具材料的选定。为了确立刀具角度确实对切削稳定性有显著影响，接下来利用两套刀具几何形状来测定切削力度。它们的值如表 1.1 所示。这两套都取自用于参考文献 [6] 中实验的刀具刀片。由于数值研究中

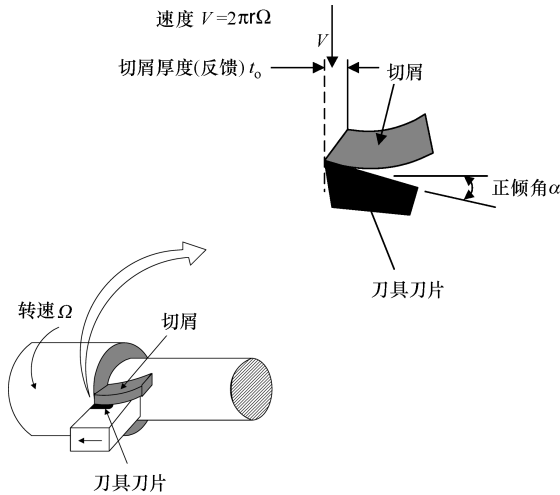


图 1.2 刀具前角的切削运动

考虑的切削深度小于 1mm，并且可被认为是非粗切削，故所有情况下都认为前角是正向的。注意：负倾角更适用于粗加工。本研究中运用了三个切削深度（0.9mm、0.75mm 和 0.5mm）和一个 1250r/min 的主轴转速及每转 0.0965mm 的进给。

表 1.1 刀具角度

组数	侧切入角	前角	倾角
1	45°	3.55°	3.55°
2	15°	5°	0°

除了图 1.6 和图 1.7，图 1.3 ~ 图 1.8 都给出了时间响应、3 ~ 5s 的瞬时频率响应和相应的李雅普诺夫频谱。验证 x 轴方向的系统响应以演示工件的运行，分析 z 轴响应以研究刀具的运动。再看图 1.1 为被加工部分定义的坐标，在右半边的图对应于 1 号刀具的几何条件，左半边的图对应于 2 号刀具角。在图 1.3 中，2 号刀具几何形状的 x 轴方向振动的振幅是 1 号的两倍。然而，在工件的固有频率为 3270Hz 和旋转频率为 20.8Hz

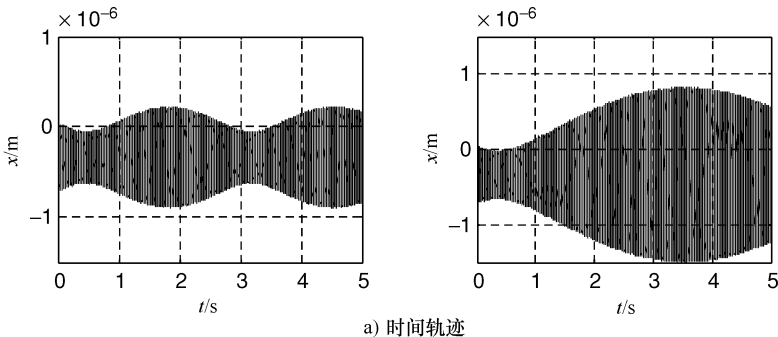


图 1.3 当 $DOC = 0.90\text{mm}$ 且 $\Omega = 1250\text{r/min}$ 时，1 号（左）和 2 号（右）的 x 轴方向的时间响应，及对应的瞬时频率和李雅普诺夫频谱

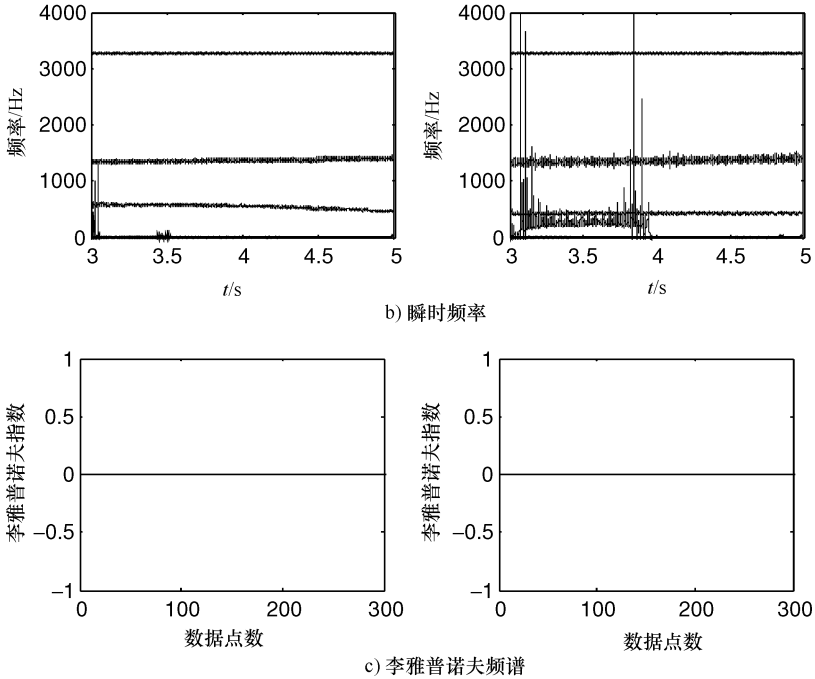


图 1.3 当 $DOC=0.90\text{mm}$ 且 $\Omega=1250\text{r/min}$ 时，1 号（左）和 2 号（右）的 x 轴方向的时间响应，及对应的瞬时频率和李雅普诺夫频谱（续）

的情况下，它们的频域特性相似。2 号展示了另外两个频率，一个接近刀具固有频率即 425Hz ，且另一个频率为 250Hz ，它在 3.9s 后消失。1 号只有一个刀具激励频率。可以看到其频率在 2s 内从 580Hz 降到 460Hz ，说明刀具几何形状是一个影响工件稳定性的不容忽视的参数。

如图 1.4 所示，当切削深度降至 0.75mm 时，振荡振幅上仍然存在差异。随着其直径的减小，工件固有频率减小到 3250Hz 。当旋转频率保持不变时，一个 900Hz 的元件，

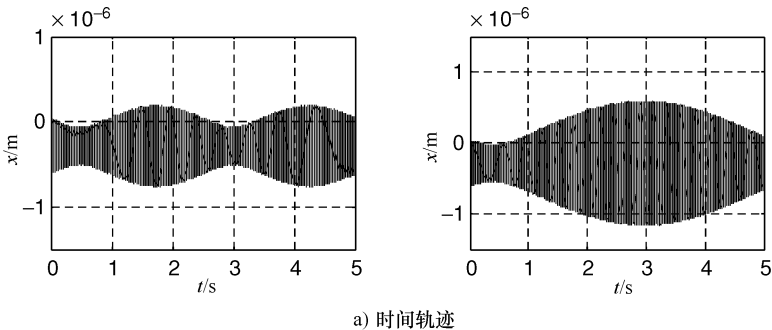


图 1.4 当 $DOC=0.75\text{mm}$ 且 $\Omega=1250\text{r/min}$ 时，1 号（左）和 2 号（右）的 x 轴方向的时间响应，及对应的瞬时频率和李雅普诺夫频谱

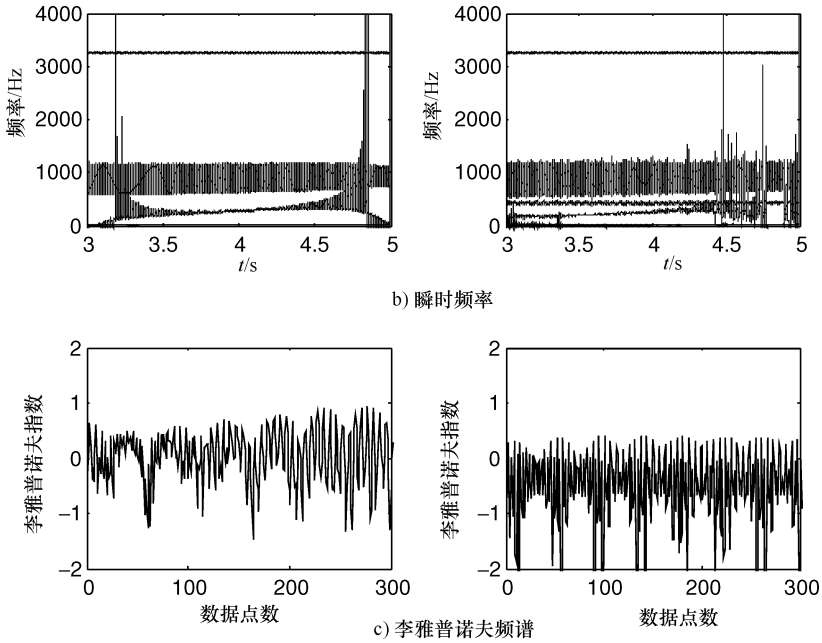


图 1.4 当 $DOC=0.75\text{mm}$ 且 $\Omega=1250\text{r/min}$ 时, 1 号 (左) 和 2 号 (右) 的 x 轴方向的时间响应, 及对应的瞬时频率和李雅普诺夫频谱 (续)

其带宽为 500Hz , 在两个系统中占主导地位。从 2 号可以看出, 在 4.8s 之后固有频率为 425Hz 的刀具激励的分叉减弱了。另外, 1 号却没有分叉。它有一个 $250 \sim 400\text{Hz}$ 的频率分量的增加。此频率分量之后消失。两者的李雅普诺夫频谱都在 0 附近振荡, 因此引发了这些系统是否精确地稳定的问题。图 1.5 中把切削深度进一步减小到 0.5mm , 意味着两个系统展示了以正的李雅普诺夫指数为标志的一种不稳定的情况。图 1.6 中较大力的波动解释了从 2 号刀具几何形状中观察到的大振幅。大幅波动的力推动工件偏移更多。有趣的是, 尽管刀具几何形状的变化会影响到切削力, 但对于两套刀具几何形状, x 轴方向的力幅度几乎完全相同。

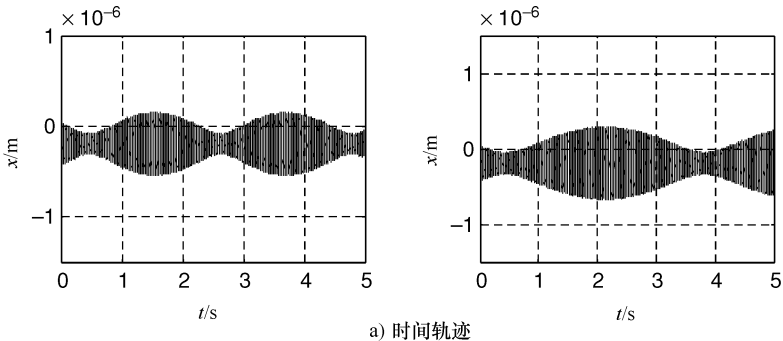


图 1.5 当 $DOC=0.50\text{mm}$ 且 $\Omega=1250\text{r/min}$ 时, 1 号 (左) 和 2 号 (右) 的 x 轴方向的时间响应, 及对应的瞬时频率和李雅普诺夫频谱