

The Review about Mechanisms and Control of Cutting Chatter

Zhang Yongliang Liu Yanyong Lin Rui

Department of Mechanical Engineering

The University of Shanghai for Science and Technology

Shanghai, China

Yongliangz7377@163.com

Abstract—The performance of machine and the surface quality of the workpieces were seriously affected by cutting chatter. With the rapid development towards high automation and precision of the modern manufacturing industry, the study on the mechanism and control of the chatter has been the hotspot among the international production engineering field. The survey on above two aspects was introduced; meanwhile new semi-active control and intelligent control of cutting chatter were discussed in detail. Finally the developing trend of this field was presented.

Keywords—cutting chatter; chatter mechanism; semi-active control; smart control

I. 引言

机床切削颤振属于自激振动，它是指在切削加工时在没有周期性外力的作用下，工件和刀具之间发生的强烈相对振动。机床切削颤振不仅会恶化切削过程，影响切削效率和工件表面的加工质量，而且还会产生噪声。随着数控机床技术、柔性制造系统(FMS)、智能控制系统(IMS)等先进制造技术的发展，在自动化加工环境中切削颤振的危害已经显得越来越突出。为了适应现代化机床高效率、高精度、多功能和自动化发展的趋势，防止颤振的发生是设计、制造和使用机床时要考虑的一个重要问题。

由于机床种类复杂多变，结构上也存在很大差异。因此诱发切削颤振的原因也是复杂多样的。目前，有关切削颤振机理的研究出现了多种理论和学派。早在1907年Taylor就对机床颤振理论做过阐述，认为机床产生颤振的主要原因之一就是在切削过程中，形成不连续切屑的周期与工件、刀架或者机床传动机构中的任一部分振动的固有周期相同；1946年Arnold提出切削力随切削速度增加而减少的切削力下降特性是颤振产生的主要因素。随后，在1953年Hahn提出的切削厚度变化的再生效应、1956年土井和加藤提出的切削力时滞理论、以及后来Shaw等人提出的剪切角变化理论等都被列为是引发颤振的主要因素^[1]。

而对切削颤振控制技术的研究在近三十年里得到了迅速的发展。从最初的被动控制到目前正方兴未艾的智能控制、半主动控制，国内外学者在此领域进行了大量的研究，取得了丰硕的成果。本文将对切削颤振的机理及控制方法的研究现状和存在的问题进行综合评述。

II. 机床颤振的机理研究

对于机床颤振机理的研究，主要包括以下几个方面：颤振产生的物理原因、切削过程的稳定性条件、影响颤振的因素等。颤振形成的物理原因可分为：再生型效应、摩擦效应、振型关联效应、刀具工作角度的动态变化效应、切削速度变化效应、进给速度变化效应及混沌效应等。需要指出的是，现实的切削过程受到许多因素的影响，其颤振往往是上面多个效应同时作用的结果。近年来随着科技的发展，不少人对切削颤振的复杂情况进行研究，提出了一些新理论与分析方法。

A. 再生型颤振

在金属切削过程中，假如前一次加工的表面残留有振纹，则下一次切削该表面时切削厚度自然会受到影响，从而导致切削力的波动，这种波动将迫使刀具与工件之间发生相对振动，并再次留下振纹。如此重复循环，就会在整个加工过程中形成颤振。这种切削厚度的变化效应简称为再生效应，由再生效应引起的切削自振称为再生颤振。目前国内外学者普遍认为：再生型颤振是切削颤振的主要形式。

对再生型颤振机理研究较多的是分析其稳定性极限，即通过绘制稳定性图，分析确定不同转速下发生颤振的极限切削宽度。浙江大学何庆稀利用实验测出了TK40A数控车床振动系统和切削过程的动力学参数，对再生型切削颤振系统的主轴转速与极限切削宽度之间的关系进行了计算机仿真，绘出了稳定性图，为现场操作人员选择最优转速以避免颤振提供了依据^[2]。吉林大学孔繁森、于骏一在切削颤振研究中首次考虑了模糊不确定性因素的影响，利用模

糊数学分析方法详细论述了切削过程再生颤振的模糊性分析问题,给出了模糊稳定性极限切削宽度集合的可能性分布及其置信区间,并用计算机编程绘制了模糊稳定性图^[3]。

引发再生型颤振的因素从最先研究的线性影响因素发展到现在的非线性影响因素,国内外学者在此方面已进行了大量深入的研究。C. J. Hook等在1963年发现有限振幅不稳定现象,并研究了机床结构的非线性因素和切削过程的非线性因素对切削颤振的影响。J. Tlustý等在1988年研究建立了再生型颤振的线性模型并发展了该理论。1995年Marui E用试验方法研究了刀具侧面与工件之间的干涉效应和再生效应^[4]。David E等研究了再生颤振模型,认为再生颤振是一种具有非线性时滞特性的自激振动,满足发生Hopf分叉的条件。最后,给出了系统稳定边界上特征值的准确描述方法、Hopf参数的演变、分叉解的周期及相应的Floquet指数^[5]。

国内学者梅志坚等在研究再生型颤振时引入了两个非线性因素——当颤振振幅超过一定值时刀具会部分离开工件加工表面引起的非线性和切削力对切削厚度的非线性依赖关系,并据此建立了微分方程来描述切削颤振过程^[6]。高国利等以非线性再生颤振理论为基础,推导出一种简化的再生型颤振数学模型。该模型是与非线性模型等效但方差最小的单自由度系统自由振动微分方程,对该模型进行计算机仿真,取得了令人满意的结果^[7]。它能够很好地解释以往的线性模型无法解释的非线性现象,便于对切削过程的稳定性及切削颤振的发展过程进行分析研究。但由于实际条件的复杂多变,该方法还有待试验的考证。

B. 摩擦型颤振

摩擦型颤振的产生机理是 K.N.Arnold 于 1946 年提出的,主要是指在切削速度方向上工件与刀具之间由于相对运动产生的摩擦而引起的颤振,这种摩擦主要存在于刀具的前、后刀面与工件之间。自 1970 年 J.Tlustý 提出“速度分量原理”以来,已有不少人研究过这种类型的颤振。李宝灵等研究了摩擦型颤振的机理,认为切削力主要由两部分组成,即做为主要部分的稳态切削力和做为次要部分的摩擦型动态切削力。切削力中的摩擦力部分随相对速度大小的变化而变化,属于周期性激励,导致了工件与刀具系统的自激振动。如果通过某些特殊的边界润滑方法改善刀具与工件摩擦副间的摩擦学性质,使摩擦力不随相对速度的变化而改变,那么在钢筒类零件切削时,即使工件表面曾留下很深的规则或不规则刀痕,再次进刀也不会形成再生型颤振。由此论文得出结论:摩擦自激振动是导致切削颤振的主要原因^[8]。虽然该文献中的理论有其合理性,但由于

受单一实验条件的限制,其结论还具有一定的局限性。此外,NETER STELTER 研究摩擦型颤振,建立了以简化悬臂梁在干摩擦作用下的摩擦型颤振理论模型,取梁的前两阶模态用数值法分析了梁系统在切削力和切削速度变化下的分叉行为,并且用试验验证了其正确性,最后又讨论了摩擦力的识别和梁系统的时域特性^[9]。

C. 振型耦合型颤振

考虑到实际的切削振动系统都是多自由度系统,当刀具的运动轨迹在各主振模态互相耦合互相关联的作用下,使切入工件时系统消耗的能量大于切出工件时系统贮存的能量时产生的颤振,被称为振型耦合型颤振。

自J. Tlustý首次提出了振型耦合型颤振,吉林工业大学的于骏一等基于两自由度振动系统的动力学模型,分别研究了耦合型颤振、滞后型颤振及再生型颤振条件下工艺系统刚度主轴方位对切削过程稳定性的影响规律。理论研究和实验考证均表明:工艺系统刚度主轴方位对系统稳定性的影响与切削过程动态切削力的构成有关。如果动态切削力的构成不同,工艺系统刚度主轴的最佳方位也不同^[10]。Gasparetto等对刀具的运动轨迹进行研究,建立了振型耦合型颤振模型,得到了其切削稳定性条件^[11]。李成山等对振型耦合型颤振的机理进行了分析,推导出只有同时满足 $k_1 < k_2$ 和 $0 < \alpha < \beta$ 这两个条件,也就是当机床结构刚度较弱方向即 k_1 位于 $0 \sim \beta$ 区域内时,系统才能产生振型耦合型颤振,其中 k_1 、 k_2 是实际系统两个主振模态的刚度系数; α 为 k_1 方向与振动方向y的夹角; β 为切削力与振动方向y的夹角。该结论表明:通过改变对振型耦合型颤振起重要作用的 α 角和 k_1 和 k_2 的差值,可以提高机床抵抗这种颤振的能力。上述结论的正确性在文中得到了实验验证^[12]。

D. 切削过程的混沌效应

随着对机床颤振机理研究的不断深入,不少人发现了金属切削过程中的混沌现象,这给机床颤振机理研究领域增添了新的生机。混沌是一种确定性的非线性随机过程,通过混沌现象的研究,能够深入探讨各种强非线性系统的特征,为切削系统的建模开创了崭新的途径。1995年鲁宏伟等研究了机床颤振的混沌特性,用分维数刻画混沌吸引子的“奇异”程度^[13]。他们还对铣削加工系统做了研究,数值计算证明:当切削宽度在适当的范围内时,相应的切削力和位移信号呈现出混沌特性,并用庞加莱映射和系统吸引子的分形维数证明了该结论的正确性^[14]。Janez Gradisek等在提出切削过程存在混沌现象后,利用神经网络法对混沌切削过程进行了参数优化^[15];2002年Grzegorz Litak等

研究了再生型切削颤振的混沌效应^[16]；2003年Stepan G等研究了高速铣削中的混沌现象^[17]。

此外，针对机床颤振的其他机理如：刀具工作角度动态变化效应、切削速度效应等也有学者展开了大量有益的研究。杨辅伦等对刀具工作前角时变系统稳定性进行了研究^[18]。成志清用数字仿真技术研究了速度型切削颤振系统的非稳定状态与颤振状态^[19]。刘习军等针对速度型切削颤振，建立了刀架弹性子系统、工件弹性子系统在非线动态切削力耦合下的多自由度切削颤振理论模型，数值模拟显示：此系统存在内共振现象，从而解释了速度型切削颤振发生的振动机理^[20]。

III. 切削颤振的控制方法

借鉴控制理论的分类方法，可将现有的切削颤振控制方法分为主动控制、被动控制和半主动控制等方法。而近年来新出现的切削颤振的智能控制方法也显示出了非凡的优越性。

A. 被动控制

所谓被动控制是指通过附加的减振、隔振、吸振装置，对机床薄弱环节进行结构改进，或通过调整机床的支撑间隙，采用合理的装夹方式适当增加辅助支撑来抑制自激振动。被动控制不需外界能源，只需一个附加的减振装置，且装置结构简单，成本低廉，容易实现。调整间隙的控制方法简单易行，关键在于准确地确定调整部位与合理的间隙量。吴雅对 MX-4 车床系统进行了深入研究，通过将工件与中心架支承面之间的间隙调整至 0.12mm 左右，使系统振动频率由 530Hz 调整到 740Hz，有效的抑制了 MX-4 车床振动，从而降低了切削噪声并避免了第二汽车制造厂的断轴重大事故^[21]。Eugene 等研究了被动控制方法，对被动控制器进行了改进，设计出可调式动力阻尼吸振器，在主振系统动态特性发生改变时通过调阻尼器弹性元件、阻尼元件保证吸振器处于最佳工作状态^[22]。李立等研究了立轴平面磨床的动态特性，通过调整 M7475B 型立轴平面磨床的主轴轴承间隙，将系统由 169Hz 的第 4 阶振动模式改变为 43.4 Hz 的第 2 阶振动模式，有效控制了磨削颤振^[23]。上述被动控制方法虽然对某些条件下的振动可进行有效的抑制，但它们都属于离线控制，当切削状态发生变化时，被动控制无法实时调整系统参数，进行在线控制。

B. 主动控制

主动控制是指在振动控制过程中，根据所检测到的振动信号，应用一定的控制策略，经过实时计算，进而驱

动作对控制目标施加一定的影响，达到抑制或消除振动的目的^[24]。

机床颤振的主动控制需要三大部件：即传感器、控制器和作动器。传感器用于检测机床的振动信号；控制器接收来自传感器的信号，对其进行实时处理分析，并发出控制信号实时控制作动器的作动方式。作动器是实施主动振动控制的关键部件，是主动控制系统的重要环节，其作用是按照控制器发出的控制信号来对受控对象施加确定的控制力，以减少机体的振动。Shiraishi 等用状态空间方法对切削加工过程建立模型，通过调节刀具和工件之间的相对位置来对切削颤振进行闭环控制^[25]。采用闭环控制的可靠性有一定的提高，但这必须是在对切削过程进行精确建模的基础上，而建立满足实际要求的精确的切削加工过程闭环控制模型是很困难的，而且调节刀具和工件之间的相对位置也并非易事。C. Mei 等综合运用时域和频域分析法绘制了切削系统稳定性图，并采用最优控制器对再生颤振实施了主动控制，系统的时频域综合稳定性图表明该控制方法效果较好^[26]。王先上提出了一种外圆车削振动的主动控制原理和方法，通过检测车削时径向切削力的动态分量，来产生与动态切削力大小相同而相位相反的动态控制力，补偿切削力的波动对切削过程的影响，从而达到抑制颤振的目的^[27]。这种主动控制方法的效果明显，但可靠性较差，如果处理检出信号和产生控制信号的部件调节不适当，反而有造成系统不稳定的危险。

C. 半主动控制

结合主动控制适应性强和被动控制可靠性高的特点，近年来控制领域又发展出新的分支——半主动控制。该方法所需的外部能量很小，可以对系统某些参数进行在线调整，从而达到实时控制振动的目的。已有研究表明，合理的半主动控制系统能够实现主动控制系统的控制效果^[28]。现有的调整切削参数及利用智能材料减振装置的切削颤振控制方法均可归入此类。这些方法虽然直接调整改变的是主轴转速、进给量、刀具角度等切削参数及作用在智能材料减振装置上的外加电压、电场强度及磁感应强度等电参数，但它们的本质都是对切削系统的刚度和阻尼进行在线调整，以此来破坏颤振产生的条件以消除或减弱颤振^[21]。这种控制方法使用起来简单易行，尤其在数控机床上非常方便。

通过改变主轴转速来抑制颤振有两种不同的方式。其中一种方式是通过连续改变主轴转速来抑制切削颤振，简称为变速切削法。变速切削法的优点是它适用于不同动态特性的切削系统，不存在最佳切削速度的选择问题，对它来

说, 调整的参数只是速度变化的形式和幅度。但变速切削法在实际应用中还存在一定的问题。由于机械传动系统存在较大的转动惯量和低的响应特性, 大的转速变动率和大的转速变动量幅值不易得到。此外, 变速切削不能适用于精加工, 而且还会造成很大的瞬间电流通过驱动电动机。另一种变主轴转速切削方法是当发现颤振征兆时, 直接调整主轴转速至最佳转速, 使切削过程处于稳定区内, 从而达到抑制颤振的目的。I. Bediaga等针对高速粗铣加工等需要保持较多材料去除率的切削系统, 研制了一种可以识别颤振并根据切削稳定性图主动选择主轴转速以抑制颤振的策略, 大量的模拟和试验结果均表明了该方法的有效性^[29]。Tarn Y.S提出了利用颤振频率修正主轴转速来抑制颤振的方法, 并通过Nyquist稳定标准分析了切削宽度、颤振频率与切削速度的关系, 给出了颤振频率与切削速度之间的定量表达式, 试验表明此方法效果较好^[30]。于骏一等对变速铣削机理进行了深入的研究, 认为变速铣削之所以具有减振作用的本质原因是变速切削时机床加工系统的振动响应属于变频激励条件下的瞬态响应, 另外它还具有向幅频响应曲线的衰减区转移的特性, 因此其振动幅值会显著减小。该研究还表明: 只有变速幅度取得足够大, 使铣削在不稳定区和条件稳定区交替进行时, 才能取得较好的减振效果^[31]。

机床进给运动方向的动刚度比其他方向低得多, 对机床工作性能的影响也比较大。因此, 对进给速度的调整也可以做为抑制颤振的一种手段。机床的动刚度随进给速度的变化而变化。低进给速度时有较高的动刚度, 进给速度增加动刚度降低。基于以上理论通过适当降低进给速度应可以达到抑制机床切削颤振的目的。庞川等研究了变进给对外圆磨削颤振的抑制作用, 根据磨削由稳定阶段向颤振阶段过渡时, 振动信号在幅值域上概率密度曲线的变化趋势, 建立了颤振预报函数, 同时对时变进给抑振机理进行了分析。结果表明: 进给速度变化幅值越大, 频率越高, 抑振效果越好, 但过快的进给速度变化会在工件表面留下进给量变化波纹, 从而影响加工表面质量; 而变化频率太高可能会使步进电机出现失步现象, 对抑振造成负面影响。因此, 必须根据实际情况合理选择参数。由此, 论文设计了在线变进给抑制颤振的方法, 最后通过实验验证了其方法的有效性^[32]。徐燕申等提出采用有限随机进给法来抑制磨削颤振, 即在有限的范围内进行随机进给磨削。实验结果表明, 该方法确实可行, 有进一步研究和实用化的前景^[33]。改变刀具的前、后角等参数可以导致切削系统的刚度和阻尼发生变化, 由此F. Yang等对该方法进行了研究。试

验证明: 在同等条件下, 连续改变刀具前角, 可以更有效地削弱颤振, 并且抑振效果随着前角改变频率的提高而提高^[34]。但该方法需要附加在线调整刀具角度的装置, 使切削操作受到一定程度的限制。

近年来, 随着电、磁流变材料等智能材料的出现, 切削颤振的半主动控制技术又得到了新的发展。在切削系统中附加智能材料减振装置, 通过在线调整电压、电流等电参数, 就可以对切削系统的刚度和阻尼等动特性进行在线调整。基于这一控制策略, 王民等利用电流变材料设计了一种智能化镗杆, 通过连续小范围地改变电流变材料的阻尼和刚度进而改变镗削系统固有频率, 成功地实现了切削颤振的在线抑制^[35]。笔者将电流变减振技术引入车削系统中, 通过流变学动态模量测试方法, 求得了该系统的附加阻尼和附加刚度, 并对该系统振动响应特性进行了理论分析。同时, 利用设计的车床横刀架电流变液减振器对切削颤振进行了在线预报控制, 取得了很好的减振效果^[36]。浙江大学孔天荣等针对深孔镗削过程中的颤振问题, 设计了一种基于磁流变液的智能镗杆, 建立了该镗削系统的动力学模型。通过分析其稳定性, 发现当调节磁场强度使系统刚度或阻尼增大时, 切削系统的稳定性明显提高; 研究还发现随着系统固有频率的减小或增大, 系统稳定性极限叶瓣曲线将向左或向右平移, 其条件稳定区域也将随之发生改变。当系统不稳定时, 只要适当改变系统固有频率, 就可以使切削系统处于稳定区域内。利用该磁流变智能镗杆进行的切削颤振控制实验结果表明: 通过控制切削系统的固有频率在一定的范围内封闭型变化, 将有效地抑制镗削过程中颤振的发生^[37]。

D. 智能控制

智能控制技术是控制理论发展的新阶段, 主要用来解决那些用传统方法难以解决的复杂系统的控制问题。智能控制技术主要包括模糊逻辑控制、专家控制、神经网络、混沌控制和集成智能控制等, 其常用的控制优化算法有: 遗传算法、蚁群算法、免疫算法等。智能控制技术自20世纪70年代初由美国普度大学的傅京孙(K. K. Fu)教授提出以来, 受到了当代不少学者的关注, 下面就智能控制在切削颤振控制领域中的应用进行综述。

模糊控制是基于模糊集合论, 模拟人的近似推理的控制方法。模糊逻辑语言既可以描述应用系统的定量模型也可以描述其定性模型。模糊逻辑可适用于任意复杂的对象控制。但在实际应用中模糊逻辑实现简单的应用控制比较容易。李为民等提出基于多感知信息的数控铣削过程智能控制方法。该研究使用分频采样技术, 从单一测力

仪同时获得切削力和振动信息,根据切削力信号,采用模糊逻辑控制改变进给速度实现恒力加工,同时系统对振动信号的功率谱进行辨识,以确定主轴转速。进给速度和主轴转速的同时调整,达到了实时抑制切削颤振的目的。该方法采用的模糊逻辑本质上是非线性的,因此将其用于控制非线性的铣削力,具有良好的鲁棒性和稳定性^[38]。然而该模糊控制器输入信息较少,很难全面反映切削过程的动态品质,因此其动态性能不佳。何凤琴等设计了一种新型的电流变液减振器,并建立了相应的模糊控制算法,同时用MCS-51单片机和协处理器F200模糊控制芯片构成了单片机模糊控制减振系统。仿真结果表明该方法的减振效果比较明显^[39]。该方法在实际条件下的效果如何还有待实验验证,但它却为利用电流变效应控制切削颤振提供了一种可供借鉴的控制策略。

神经网络模拟人脑神经元的活动,利用神经元之间的联结与权值的分布来表示特定的信息,通过不断修正连接的权值进行自我学习,以逼近理论为依据进行神经网络建模,并以直接自校正控制、间接自校正控制、神经网络预测控制等方式实现智能控制^[40]。王新晴等研究车削过程出现的颤振,指出依靠简单的参数调整与控制来消除再生颤振难度较大,而利用具有误差逆传播特性的BP神经网络作为输入控制调整环节来抑制颤振则比较容易达到目的。因此,论文将人工神经网络理论引入具有非线性及不稳定行为的车削过程,形成了一种基于神经网络控制技术的消除车削过程自激振荡的新方法,仿真结果表明,该方法在消除残留振痕引起的再生颤振、提高车削稳定性方面具有特殊的作用^[41]。Tansel I N等应用人工神经网络的方法,对切削颤振进行在线监测与控制,也取得了比较好的效果^[42]。

近年来,混沌理论不断发展为切削颤振的混沌控制打开了诱人的前景。混沌控制有以下两种典型方法:参数扰动法和纳入轨道法。最近的研究表明:控制混沌的一种最直接的方法就是改变系统参数,使系统从原有混沌参数条件转变到各种需要的稳定的规则有序的参数条件。孔繁森等以Grabcc提出的混沌颤振模型为基础,探讨了切削过程混沌颤振的控制方法,建立了混沌颤振仿真分析的SIMULINK模型和混沌颤振控制的随机噪声控制模型。仿真表明:在x,y方向同时施加延迟控制对消除颤振具有良好的效果^[43]。

集成智能控制是将两种或以上的智能技术结合在一起的 control 方法。比如模糊神经网络,模糊逻辑的专家系统等。王民等考虑到切削颤振发生的时间极短,将模糊逻辑、人类专家知识和神经网络的优势结合起来,应用在镗

削加工颤振的在线快速预报控制中,加快了网络学习与判别的速度,从而缩短了颤振控制的响应时间,有效抑制了颤振的发生。与其它网络模型相比,Fuzzy ARTMap无论在线还是离线都具有较高的预测精度、速度和数据压缩能力^[44]。但由于其采用的是无监督学习,网络参数(表示颤振征兆的警戒阈值等)容易随加工条件的变化而改变,因此可能出现误判和漏判。

IV. 展望

综合目前国内外对机床切削颤振机理及控制方法的研究,可对该领域的未来发展趋势做如下展望:

- 切削过程并非是一个确定性过程,它受许多随机因素的影响,因此将切削系统视为非线性随机振动系统进行研究,是对切削颤振理论研究的发展和完善;
- 由于切削系统的非线性和模型结构的不确定性,传统的控制方法难以满足其控制要求,因此研究切削颤振的智能控制必将成为该领域的发展方向。

REFERENCES

- [1]Yang Su, Tang Hengling, Liao Boyu. Machine Dynamics(I , II). Beijing:China Mechine Press, 1983.
- [2]He Qinx, Controlling vibration stimulated by itself in cutting based on TK40A NC lathe. Mechaninal & Electrical Engineer Ingmagazine. 2007,24(3):55~57.
- [3]Kong Fansen, Yu Junyi, Pan Zhigang. Fuzzy Stability Analysis of Regenerative Chatter in Cutting Process. Journal of Vibration Engineering. 2007,24(3):55~57.
- [4] Wang Ligang, Liu Xijun, Jia Qifen. Studies and Developments about Cutting Chatter of Machine Tools. Machine Tool & Hydraulics. 2004,11:1~5.
- [5]David E.Gilsinn.Estimating Critical Hopf Bifurcation Parameters for a Second-Order Delay Differential Equation with Application to Machine Tool Chatter Nonlinear Dynamics.2002,30:103~154.
- [6]Mei Zhijian, Yang Shuzi, Shi Hanmin. Early Stage Diagnosis and Monitored Control for the Chatter of Machine Tools. Journal of Vibration Engineering. 1988, 1(3):8~17.
- [7]Gao Guoli, Wang Qiyi. A Simplified Non-linear Chattering Model for Cutting. Journal of Northeastern University(Natural Science). 1995,16(2):190~193.
- [8] Li Baoling, Gao Shanghan, Gao Zhongyong, Wei Gao. The Experimental Analysis of self-excited vibration during Metal-cutting process. Manufacturing · Materials. 2004,42(480):51~53.
- [9]NETER STELTER.Nolinear Vibrations of Structures Induced by Dry Friction.Nonlinear Dynamics,1992(3):329~345.
- [10]Yu Junyi, Yang Fulun, Bao Shanfei, Influence of the Orientation of Stiffness Spindle on the vibration System in Metal Cutting. Journal of Vibration Engineering. 1988,1(4): 36~43.
- [11] Gasparetto , Alessandro. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control. Transactions of the ASME.1998,120(4):545~548.
- [12]Li Chengshang, Yu Chao, Zhang Guimu. Research on stability of Machine cutting process. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering. 2005,22(4):29~31.
- [13]Lu Hongwei, Tang Yanbing, Wu Ya, Yang Shuzi. Fractal dimension estimation and its application in Chaos Research on machine tool chatter. Mechanics and Practice. 1995,23(6):105~108.
- [14]Lu Hongwei, Tang Yanbing, Wu Ya, Yang Shuzi. The Chaotic Nature of Machine Tool Chatter. J.Huazhong Univ. of Sci.&Tech. 1995,23(6):105~108.

- [15] Janez Gradisek, Govekar E., Grabec I. A chaotic cutting process and determining optimal cutting parameter values using neural networks. *Int. J. MTM*, 1996, 36(10):1161~1172.
- [16] Grzegorz Litak. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process. *Chaos, Solutions & Fractals*. 2002, (13):1531-1535.
- [17] Stepan G, Szalai R, Hogan S J. The chaotic oscillations of high-speed milling. *Int. J. MTM*. 2003, (6):8~13.
- [18] Yang Fulun, Yu Junyi, Zhang Haiyan. A Study on Stability of Tool Working Orthogonal Rake System with Time-Variation. *Journal of Vibration Engineering*. 1994, 7(1):80~85.
- [19] Cheng Zhiqing. The Digital Simulation of Cutting System with Speed-Type Chatter. *Journal of Nanjing Aeronautical Institute*. 1993, 25(2):240~244.
- [20] Liu Xijun, Chen Yushu. Nonlinear Analysis of Speed Type Cutting Chatter of Machine Tools. *Journal of Vibration and Shock*. 1999, 18(2):5~9.
- [21] Wu Ya. The Chatter of cutting system on machine tool and its control. Beijing: Science Press. 1983.
- [22] Eugene I, Rivin, KANG Hongling. Enhancement of dynamic stability of cantilever tooling structures. *Int. J. MTM*, 1992, 32(4):539~561.
- [23] Li Li, Xu Yanshen, Sun Rongxi, Peng Zemin. The analysis and improvement of the dynamic characteristics of vertical surface grinding machine with regeneration of spectral Computing technology. *The Fourth Machine Tool Design and Research Conference Proceedings*. Beijing, 1987:175~182.
- [24] Li Haibin, Bi Shihua, Yuan zengfeng. An Overview and Assessment on Active Vibration Control. *Journal of Vibration and Shock*. 1998, 17(3):38~42.
- [25] Shiraishi M, Yamanaka K, Fujita H. Optimal Control of Chatter in Turning [J]. *Int. J. MTM*, 1991, 31(1):31~43.
- [26] C. Mei, J. G. Cheng, Y. Wang. Active Control of Regenerative Chatter During Metal Cutting Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2006, (128):346~349.
- [27] Wang Xianshang. The Automatic Control of lathe vibration. *Authoritative Academic journal in Mechanical Engineering of China*. 1986, 22(2):38~47.
- [28] Zhou Yun, Tan Ping. The theory and technology on Magnetorheological damping control. Science Press. 2007.
- [29] I. Bediaga, J. Muñoa, J. Hernández, etc. An automatic spindle speed selection strategy to obtain stability in high-speed milling. *Int. J. MTM*, 2009, 49(5):384~394.
- [30] Tarn Y. S, Lee E. C. Critical investigation of the phase shift between the inner and outer modulation for the control of machine tool chatter, *Int. J. MTM*, 1997, 37(12):1661~1672.
- [31] Yu Junyi, Wu Boda, Meng Xianglong, Yang Guohui. An Experimental Investigation of the Milling Process with Varying Spindle Speed. *Acta Armamentar II*. 1995, 1:86~89.
- [32] Pang Chuan, Xiong Huanting. The Prediction and Time-Varying Feed Control for grinding chatter Cutting into Cylindrical Grinders and grinding. 1998, (3):28~31.
- [33] Xu Yanshen, Niu Wentie, Li Gang. A New Method for Suppressing the Grinding Chatter-Limited Random Feed Method. *Diamond & Abrasives Engineering*. 2003, (3):40~42.
- [34] F. Yang, B. Zhang, J. Yu. Chatter Suppression via an Oscillating Cutter ASME. 1999, 2:54~60.
- [35] Wang Min, Fei Renyuan, Yang Jianwu, Guan Jian, Wu Jimao, Liu Xuan. The Study of Application of electro-rheological materials for Changing the Dynamics of Boring Bar. *China Mechanical Engineering*. 1999, 10(12):1351~1354.
- [36] Zhang Yongliang, Yu Junyi, Hou Dongxia, Zhang Shouqin, Wu Hua. Research on Turning Chatter Prediction Control Based on Electrorheological Effect. *Chinese journal of Mechanical Engineering*. 2005, 41(4):206~211.
- [37] Kong Tianrong, Mei Deqing, Chen Zichen. Research on mechanism of cutting chatter suppression based on magnetorheological intelligent boring bar *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*. 2008, 42(6):1005~1009.
- [38] Li Weimin, Xu Anping, Huang Tian. Multi-sense Based Intelligent Control on End Milling Process. *Journal of Hebei University of Technology*. 2001, 30(5):6~11.
- [39] J. Tlustý, F. Ismail. Basic Nonlinearity in Machining Chatter. *Anna, CIRP*, 1981, 30 (1):299~304.
- [40] Zhang Huaguang, Meng Xiangping. The Basic theory and application of intelligent control. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [41] Wang Xinqing, Wang Yaohua, Yan Jun. Simulative Study on Eliminating of Self-excited Oscillation in Turning Process Via Neural. *Authoritative Academic journal in Mechanical Engineering of China*. 2001, 37(6):102~105.
- [42] Tansel I N. Recognition of chatter with neural networks [J]. *Int. J. MTM*, 1991, 31(4):539~557.
- [43] Kong Fansen, Zhao Xingang, Liu Chunying. Simulation Study of Chaotic Chatter Control in Cutting Process. *Journal of Vibration and Shock*. 2008, 27(11):22~27.
- [44] Wang Min, Fei Renyuan, Yang Jianwu, Wu Jimao, Guan Jian. Research on Fast Prediction of Boring Chatter. *Mechanical Science and Technology*. 2002, 21 (4):520~523.