

机械动力学工程应用丛书

中国振动工程学会机械动力学学会审定

机械加工振动的  
诊断、识别与控制

于骏一 吴博达 著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

## 内 容 简 介

这是一本专门论述机械加工振动类别的诊断、颤振征兆识别和在线振动控制技术的著作,反映了作者们近十年的研究成果。为帮助读者了解本书的基本内容,本书还增写了一部分与机械加工振动有关的基础知识,深入浅出地从物理意义上介绍了机械加工振动发生、发展和防治的一般规律,并附有工程应用实例。

本书理论分析简明扼要,理论与实际紧密结合,通俗易懂,实用性强。

本书可供从事机械加工工作的工程技术人员和高等工科院校机械类专业师生参考,也可作为高校机械制造专业选修课程教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械加工振动的诊断、识别与控制/于骏一,吴博达著。

北京:清华大学出版社,1994

(机械动力学工程应用丛书/《机械动力学工程应用丛书》编委会审)

ISBN 7-302-01483-3

.机... .于... 吴... .金属切削-振动测量-质量控制 .TH113.1 TG502

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 01914 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

印刷者:北京密云胶印厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开本:850×1168 1/32 印张:6.75 字数:173千字

版次:1994年7月第1版 1994年7月第1次印刷

本社分类号:TB·17

印数:0001—1600

定价:8.80元

《机械动力学工程应用丛书》  
编辑委员会

主任委员： 郇 明

副主任委员： 曹金榜

委	员：	于骏一	王奇浩	王启义
		陈克强	陈家骥	金瑞淇
		贺兴书	廖伯瑜	戴德沛

# 关于《机械动力学工程应用丛书》

当今世界,对机械的高速化、大型化、精密化和自动化的需求与日俱增。这一不可逆转的趋势,使得振动和动态设计日益成为现代科技发展的一个重大领域,特别是近二十年来,电子和计算机技术给动态研究提供了更加广阔的天地和全新的境界。

顺应这一发展形势,一些志同道合者在1981年成立了全国机床动力学研究会(1985年改名为中国振动工程学会机械动力学学会),十年来,这些同行们不但各自苦心钻研,奋力实践,而且作为一个学术性群体,经常聚首,磋切学问,交流成果,特别是为社会主义生产建设服务的成果。

这次本学会主持编写的“机械动力学工程应用丛书”是一部应用性的技术丛书,贯注着将科学技术转化为生产力的强烈意向,力求理论联系实际,深入浅出,简洁实用。丛书共分八册,将在五年内陆续出版。其主要对象是从事生产实际工作的科技人员,也可作为高等工程院校师生的专业参考书。

本丛书的编著者都是长期从事振动和动态设计诸领域研究的专家学者,他们愿将毕生琢磨领悟之所得无私地和盘托出,既是学问与信息的传播,也是感情和心血的奉献,以此表达对我国现代机械工业发展的深切期望。

在丛书编写过程中,国内外的一些企业、院校、研究所和清华大学出版社,在资料、人力、财力上给予我们许多帮助,在此致以衷心的感谢和敬意。

中国振动工程学会机械动力学学会

1991.1

# 目 录

前 言 .....	
第一章 绪论.....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 国内外研究概况 .....	2
参考文献.....	6
第二章 机械加工振动.....	9
2.1 机械加工中的受迫振动 .....	9
2.2 机械加工中的自激振动.....	14
一、概述 .....	14
二、产生自激振动的条件 .....	16
三、自激振动的激振机理 .....	19
2.3 机械加工工艺系统稳定性分析.....	27
一、机床切削的稳定性和稳定性极限 .....	27
二、再生型切削颤振的稳定性分析 .....	28
三、振型耦合型颤振的稳定性分析 .....	37
2.4 机械加工振动实例分析.....	42
机械加工振动分析实例之一.....	42
机械加工振动分析实例之二.....	44
参考文献 .....	50

第三章 机械加工振动的诊断 .....	52
3.1 机械加工振动类别的诊断.....	53
一、各类振动的特征 .....	53
二、诊断程序 .....	53
三、诊断实例 .....	55
3.2 振型耦合型颤振的诊断.....	60
一、振型耦合型颤振的诊断原理 .....	60
二、相位差 的测量 .....	64
三、振型耦合型颤振的诊断程序 .....	68
四、试验结果 .....	69
3.3 再生型切削颤振的诊断.....	74
一、再生型颤振的诊断原理 .....	74
二、相位差 的测量 .....	76
三、再生型颤振的诊断程序 .....	79
四、试验结果 .....	80
五、诊断实例 .....	86
3.4 摩擦型颤振的诊断.....	90
一、摩擦型颤振的诊断原理 .....	90
二、 $k_F$ 的测量方法.....	96
三、摩擦型颤振的诊断程序 .....	98
四、试验结果 .....	99
3.5 滞后型颤振的诊断 .....	103
一、滞后型颤振的诊断原理 .....	103
二、相位测量与相位标定 .....	106
三、滞后型颤振的诊断程序 .....	108
四、试验结果 .....	109
参考文献.....	113

第四章	机械加工振动的防治.....	115
4.1	防治受迫振动的途径和方法 .....	115
	一、消除或减小机内外干扰力源 .....	115
	二、改善机床加工系统的动态特性 .....	116
	三、采用减振装置 .....	120
4.2	防治自激振动(颤振)的途径和方法 .....	120
	一、消除(或削弱)产生自激振动的条件 .....	120
	二、改善机床加工系统动态特性 .....	131
	三、采用减振装置 .....	136
4.3	变速切削 .....	136
	一、变速切削系统振动频率的变化特征 .....	138
	二、在变频激励力作用下机床加工系统的 振动响应规律 .....	145
	三、变速切削的减振原理 .....	150
	四、减振效果试验 .....	152
	五、电机电流试验 .....	157
4.4	减振装置 .....	162
	一、动力式减振器 .....	163
	二、摩擦式减振器 .....	165
	三、冲击式减振器 .....	166
	参考文献.....	168
第五章	机械加工振动的识别与控制.....	170
5.1	机械加工振动的反馈控制 .....	170
5.2	机械加工振动的预报控制 .....	175
	一、颤振征兆的早期识别和预报参数的选择 .....	176
	1. 用振动时域波形的不规则度系数对切削	

颤振进行早期预报 .....	177
2. 用切削力在幅值域内的频数差对切削	
颤振进行早期预报 .....	182
二、在线振动控制方法 .....	188
1. 在线调整机床主轴转速 .....	188
2. 在线调整进给量 .....	195
3. 在线调整刀具工作前角 .....	197
参考文献.....	201

# 前 言

机械加工中的振动现象,产生的机理复杂,起因往往不容易找准,一旦在机床加工中产生了振动,如经诊治还是解决不了,生产上往往采取降低切削用量的办法,以换取必要的加工质量。我国机床加工生产效率只有国外平均先进水平的一半,机械加工振动问题没有很好解决是其中的一个重要原因。为提高我国机械工业的生产水平和我国机械产品在国际市场上的竞争能力,急需在诊治机械加工振动方面取得新的技术进步,此书就是为适应这种需要写的。

这是一本以论述机械加工振动类别的诊断、颤振征兆的快速识别和在线振动控制技术为主要内容的著作。为帮助读者了解本书的基本内容,还增写了一部分与机械加工振动有关的基础知识,深入浅出地从物理意义上介绍了机械加工振动发生、发展与防治的一般规律。

本书是机械动力学工程应用丛书中的一本,重点在工程应用。讨论振动问题难免要用到一些数学力学公式,但论述的方式应该是简洁明了的,有兴趣的读者可进一步查阅书中标明的参考文献。

本书主要取材于以作者为主的科研群体近十年来完成的五个和机械加工振动的诊断、识别与控制有关的研究成果和所发表的70多篇学术论文及有关教材,也考证和引用了国内外有关学术著作和研究成果。

全书共分五章,第一、二、四、五章由于骏一执笔,第三章由吴博达执笔,全书由于骏一统稿,由东北大学王启义教授主审。应该说明,本书是集体创作的成果,作者决不限于上述人员,郑德涛、包

善斐、滕铁骑、杨辅伦、韩相吉、周晓勤、王文才、周长根、乔思茂、周晓凯、郑汪斌、杨国辉、孟祥龙、解小贤、张文国、张海燕、洪莉、勾治践等同志都以不同的方式参加了本书的写作。

作者水平有限，错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

于骏一

吴博达

1993年10月20日

# 第一章 绪 论

## 1.1 概 述

在机械加工中,虽不乏振动利用的实例,例如,振动料斗,振动切削,振动抛光,超声波清洗等等;但机械加工过程中产生的振动却是一种十分有害的现象,这是因为:

1. 刀具相对于工件加工表面的振动会使加工表面产生振痕,这将严重影响机器零件的使用性能。有人曾对 307 轴承的表面质量做过寿命试验,如果轴承内圈表面的波纹度由  $0.5\ \mu\text{m}$  加大到  $2\text{—}2.5\ \mu\text{m}$ ,轴承寿命就要降低一倍多,可见影响之大。

2. 刀具相对于工件振动时,切屑截面、切削角度、切削力等都将随之发生周期性的变化,工艺系统的各个组成环节将承受动态载荷的作用,刀具易于磨损,严重时将产生崩刃;机床连接特性会受到破坏,严重时甚至使切削加工无法继续进行。例如,某厂从美国进口的一台 Mx-4 型曲轴车床上就曾多次发生因车削过程发生剧烈的切削颤振而使被加工曲轴产生断轴的重大事故,把一根正在加工中的曲轴掰成几截。

3. 切削过程中发生的高频振动,有时还会伴随产生一种刺耳的尖叫声,造成噪声污染,危害操作者的身心健康。

4. 为了避免发生振动或减小振动,有时不得不降低切削用量,致使机床、刀具的工作性能得不到充分发挥,限制了机械加工生产效率的提高。我国目前的机床加工效率(包括车削、铣削、磨削、钻削和拉削等)只相当于国外平均先进水平的一半<sup>[1]</sup>,机械加工振动问题没有很好解决是其中的一个重要原因。工业发达国家

生产厂所用切削速度一般为 300—600m/min, 我国生产厂所用切削速度一般为 100—200m/min; 工业发达国家生产厂所用磨削速度为 60—80m/s, 我国生产厂所用磨削速度为 25—50m/s。从当前我国各机械制造厂的生产情况看, 迫切要求解决机械加工振动问题的呼声不算太大, 而这是用降低生产效率为代价换来的暂时“平静”。

机械加工过程中产生的振动, 可分为受迫振动和自激振动两大类。机械加工中的受迫振动与一般机械工作中的受迫振动没有什么本质上的区别, 一般较易识别, 也比较容易解决。机械加工中的自激振动(又称为颤振)与一般机械工作中产生的自激振动虽也有相同之处, 但它的发生、发展规律与机械加工过程本身有着十分重要的联系, 影响因素甚多, 一般较难识别, 也不容易解决。切削(磨削)颤振是本书讨论的重点。

## 1.2 国内外研究概况

有关切削颤振的描述在金属切削技术的早期研究中就出现了。1907年美国学者 F. W. Taylor 在他写的一篇论文《金属切削的技巧》<sup>[2]</sup>中首先研究了切削振动现象, Taylor 认为切削振动是由于切屑形成过程中产生的切削力的波动频率与加工系统中某一薄弱环节的固有频率相接近引起共振激发的。1937年苏联学者 H. A. 在他写的一篇题为《车削加工机床振动问题》<sup>[3]</sup>的论文中, 用试验结果首次对 Taylor 提出的切屑单元体理论提出了异议, 并首次提出了自激振动的概念。他在这篇文章中指出:“如果切屑单元体理论是正确的话, 那么切削振动频率应该等于一秒钟时间内形成的切屑单元体数, 颤振频率应和切削速度成正比增加; 且切削切屑单元体倾向表现较为明显的铸铁应该比切削切屑单元体倾向表现得不太明显的软钢的振动大; 然而这些推论均未被试验

所证实”。1944年苏联学者 . . a 在他撰写的一本著作《金属切削振动的研究》<sup>[4]</sup>中提出了负摩擦理论,他在这篇专著中详尽地引用了大量试验数据证明:“在刀具对工件进行的切削过程中,在一定速度范围内,切削力有随切削速度的增加而减小的负摩擦现象。”据此,他建立了切削颤振的负摩擦理论。1946年英国学者 R. N. Arnold 也在他写的一篇论文《钢材切削中刀具的振动机理》<sup>[5]</sup>中,用试验证明了在一定速度范围内切削力有随切削速度的增加而下降的现象。50年代中期, R. S. Hahn 在他写的两篇论文《金属切削颤振及其防治》<sup>[6]</sup>、《精磨加工再生型颤振理论》<sup>[7]</sup>中提出了切削颤振的再生理论,他认为切削振动的产生是在有波纹的表面上进行切削而由波纹再生引起的。接着捷克学者 J. Tlustý<sup>[8]</sup>、苏联学者 A. B. 等相继在试验中发现:“在机械加工系统发生颤振时,振动体在空间的振动轨迹不是一条直线而是一个空间封闭曲线”,并据此建立了切削颤振的振型耦合理论。

在基本认识切削颤振激振机理的基础上,人们开始注意研究切削振动的控制问题。1965年 H. E. Merritt 撰文<sup>[9]</sup>报导了他对切削过程进行传递函数分析所得到的结果,为直接利用现代控制理论研究颤振控制问题开辟了道路。此后,国内外有许多专家学者研究机械加工颤振的反馈控制和适应控制问题。图 1-1 列出了切削振动的控制框图,由检测装置检出振动系统的某一状态量(切削力  $F$  或振动位移  $y$ )的变动,然后把与该状态量变动相对应的控制量通过执行装置加到这个状态量或别的状态量上去,使加工系统的振动限制在许可的范围内。

这类反馈控制的控制方式很多<sup>[10-13]</sup>,它们在特定的试验条件下虽都能取得一定的振动控制效果,但这类控制方法对控制系统的要求较高,如果处理检出信号和产生控制信号的部件调节不当,对提高系统的稳定性非但没有效果反而会使系统变得更加不稳定。有没有可能在颤振即将发生之前,就抢先调整加工状态,以破

图 1-1 机械加工振动控制框图

坏颤振所赖以产生的条件,使颤振不再发生,这就是近十年来国内外许多学者正热衷研究的颤振预报控制的命题<sup>[14-18]</sup>。在颤振即将发生之前,监测系统抢先把切削过程即将发生颤振的信息通报控制系统,是实现切削颤振预报控制的关键。为使颤振征兆的预报准确、及时,正确选择预报参数是最为重要的。所确定的预报参数必须能够充分反映机械加工颤振孕育过程的本质与特征;同时还必须考虑信号采集和数据处理的简便易行,使监测系统有可能在0.5s时间内完成所有的计算工作并向控制系统发出控制信号。在机械加工颤振的预报控制中,正确选择振动控制方法也是非常重要的。吉林工业大学的研究结果表明,学习变速控制策略<sup>[18]</sup>较为有效。

前面说过,机械加工振动有受迫振动和自激振动(颤振)之分。机械加工颤振中又有摩擦型、再生型、振型耦合型等不同类别。不同颤振类别有它各自不同的激振机理,因而也就有不同的消振减振方法。从实际解决现场生产中发生的机械加工振动问题考虑,正确识别机械加工振动的类别是十分重要的。一旦明确了现场生产中发生的振动主要是属于哪个类型的颤振,便可有针对性地采取

相应的消振减振措施,使振动减小到许可的范围内。本着此种宗旨,日本学者星铁太郎首次提出了颤振类别诊断命题,他在1977年撰写发表的一本专著《机械加工颤振的分析与对策》<sup>[19]</sup>中系统地分析了各类机械加工颤振的特征,深入地研究了机械加工受迫振动的诊断技术;对于机械加工自激振动类别的诊断技术也有一定论述,但不够明确。1981年吉林工业大学立项研究机械加工振动的诊断技术,主要研究了再生型、耦合型、摩擦型等主要颤振类别的诊断技术<sup>[20-22]</sup>。在研究机械加工颤振类别的诊断技术中,确定诊断参数是最为重要的,所确定的诊断参数必须是能够充分反映并仅仅只是反映该类颤振本质特征参数,同时还必须考虑实际测量的可能性。

从简化分析考虑,在研究机械加工颤振问题时,多数学者选用的动力学模型都是线性动力学模型,即假设惯性力与振动加速度呈线性关系变化,阻尼力与振动速度呈线性关系变化,弹性恢复力与振动位移呈线性关系变化,且假设动态切削力也与振动响应呈线性关系变化。根据线性动力学模型求得的振动解与实际测量所得到的振动响应往往差别较大,这说明实际加工系统不都是线性系统。非线性机械加工颤振理论的研究最早可追溯到40年代苏联学者

研究负摩擦效应时所给出的数学模型<sup>[4]</sup>,用能量平衡法求解非线性动力学方程,最后给出了机械加工系统稳定性条件。1965年N. H. Hanna和S. A. Tobias<sup>[23]</sup>考察了振动幅值较大时,切削力与切削厚度之间的非线性关系以及机床结构存在的非线性刚度对切削稳定性的影响,理论分析所得结论可以初步解释颤振试验中出现的“振幅的稳定性”、“有限振幅的不稳定性”以及“起振阈和消振阈的分离性”等非线性颤振特征。1981年J. Tlusty考察了刀刃振离工件表面的非线性因素和机床主轴轴承的非线性刚度对切削颤振的影响<sup>[24]</sup>。1984年华中理工大学师汉民深入地研究了颤振振幅较大时,刀刃会在部分时间内振离工件表

面这一非线性因素,并同时考虑了切削力的非线性特性,建立了机床颤振的非线性模型,理论分析所得结论与试验结果相符<sup>[25]</sup>。非线性颤振理论至今仍是各国学者竞相研究的热点。

纵观国内外已经进行的有关机械加工颤振的研究工作,可对机械加工颤振的研究水平和今后的发展作如下分析:

1. 就切削加工而言,有关颤振产生机理的研究工作,已大体告一段落,60年代之后在此研究领域里未见有新的研究成果发表。切削颤振的激振机理已达到可以被理解的程度,也达到了相当实用化的程度。相比较而言,磨削颤振比切削颤振更复杂,磨削颤振发生发展的有些规律迄今尚未达到能被理解的程度,有待今后深入研究。

2. 藉助于计算机控制技术,近20年来,机械加工颤振的控制技术发展很快,但迄今仍未达到实用的程度。正在世界范围内涌动的机械加工自动化浪潮急切地呼唤人们研究能经得起自动化生产考验的机械加工颤振控制技术。

3. 开展机械加工振动诊断技术的研究工作,能够帮助现场工程技术人员正确判别机械加工振动的类别,找到解决问题的途径,但所用诊断设备必须简便,机械加工颤振诊断技术的研究工作尚有待深入。

4. 非线性颤振理论的研究工作只是刚刚开始,尚不够系统深入。在非线性颤振理论的研究工作达到完全可以被理解的程度之前,人们所提供的振动控制技术不能认为是十分完善的。

## 参 考 文 献

1. 梁训 ,“论振兴机床工具工业的战略与方针”,《机床》,1987年第1期
2. Taylor F. W. ,“On the Art of Cutting Metals”, ASME, 1907
3. . . ,“K Bo ocy o B p

- ”, 《 》, No.22, 1937
4. . . , “ ” ;  
《 》, 1944
  5. Arnold R. N. , “ The Mechanism of Tool Vibration in the Cutting of Steel ”, 《Proc. of Inst. Mech. Eng. 》, Vol.154, London, 1946
  6. Hahn R. S. , “ Metal-Cutting Chatter and Its Elimination ”, 《Trans. ASME》, Vol. 75, 1953
  7. Hahn R. S. , “ On the Theory of Regenerative Chatter in Precision-Grinding Operations ”, 《Trans. ASME》, Vol.76, 1954
  8. Tlustý J. and Spacek L. , “ Self-Excited Vibrations in Machine Tools ”, Prague, 1954
  9. Merritt H. E. , “ Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter ”, 《Trans. ASME》, Vol. 87, No. B-4, 1965
  10. 苏洪, 王善庆, “ 车削加工反馈消振问题的研究 ”, 《中国机械工程学会机加学会第三届年会论文集》, 1982 年
  11. 森胁俊道, “ 切削力の直接补偿によるびびり振動の防止 ”, 《精密機械》 38 卷 10 号, 1972
  12. Srinivasan K. , “ Identification and Active Adaptive Control of Chatter in Single-Point Machining Operations ”, 《A Thesis Submitted to the Faculty of Purdue University》, 1976
  13. 王先上, “ 车床振动的自动控制 ”, 《机械工程学报》, 1986 年第 2 期
  14. Eman K, Wu S. M. , “ A Feasibility Study of On-Line Identification of Chatter in Turning Operation ”, 《Trans. ASME, J. of Eng. for Ind. 》 Vol.102, 1980
  15. 襦口峰夫, 上井雅博, 盖子正己, “ 旋削加工におけるびびり振動の発生判定関り研究 ”, 《日本機械学会論文集(c)》, Vol. 52, No. 477, 1986
  16. 梅志坚, 杨叔子, 师汉民, “ 机床颤振的早期诊断与在线监控 ”, 《振动工程学报》, 第 1 卷第 3 期, 1988 年
  17. 于骏一, 周晓凯, 包善斐, “ 切削颤振的预报控制 ”, 《振动工程学报》, 第 3 卷第 1 期, 1990 年
  18. 于骏一, 周晓勤, “ 机械加工振动征兆识别及学习变速控制策略的研究 ”,