



中国矿业大学博士学位论文出版基金资助

磨削颤振与磨削表面形貌误差的研究

MOXIAO CHANZHEN YU MOXIAO BIAOMIAN XINGMAO WUCHA DE YANJIU

韩正铜 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

中国矿业大学博士学位论文出版基金资助

磨削颤振与磨削表面 形貌误差的研究

韩正铜 著

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

磨削颤振与磨削表面形貌误差的研究/韩正铜著.
—徐州:中国矿业大学出版社,2005.9
ISBN 7-81107-086-3

I. 磨… II. 韩… III. ①磨削—切削振动—研究
②磨削—误差—研究 IV. TG580.21

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第063811号

书 名 磨削颤振与磨削表面形貌误差的研究
著 者 韩正铜
责任编辑 耿东锋
责任校对 周俊平
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 850×1168 1/32 印张 4.75 插页 3 字数 128千字
版次印次 2005年9月第1版 2005年9月第1次印刷
定 价 25.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

磨削加工是机械制造中重要的加工方法之一。在磨削过程中,振动是一种十分有害的现象,它不仅会降低加工表面质量、缩短砂轮寿命、还会影响生产率的提高,严重时甚至导致加工无法进行。本书对动态磨削过程进行了建模和理论分析,深入研究了磨削过程稳定性和磨削颤振机理。对磨削过程中颤振的产生和发展规律以及由此产生的工件表面形貌误差进行了实验研究和理论分析。针对磨削颤振的复杂性,采用确定性混沌理论的分析方法研究磨削颤振信号与动态磨削过程。采用人工神经网络对磨削过程的稳定性与磨削颤振进行识别和预报。书中对变速磨削抑制颤振的机理做了全面、深入地研究。基于一系列磨削试验,提出了抑制磨削颤振的实用方法——工艺条件适配法,得出了切入速度对磨削颤振的影响规律方程。此外,还比较系统地论述了圆度、圆柱度误差分离技术。本书可供高等学校机械工程领域本科生、研究生以及机械制造企业的工程技术人员阅读。

本书是以作者的博士学位论文为基础撰写的。在此谨向导师张永忠教授表示衷心感谢!同时,对作者在上海交通大学访问学习期间的指导教师洪迈生教授表示衷心感谢!本书的出版得到了中国矿业大学研究生院、机电工程学院的资助,在此一并致谢!撰写本书参考了大量文献,谨向文献作者表示谢意!

由于水平所限,书中难免存在疏漏和不妥,欢迎批评指正。

作者

2005年6月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 机械加工颤振研究概况	3
1.2.1 切削颤振的研究概况	4
1.2.2 磨削颤振的研究与进展	7
1.3 精密检测中的误差分离技术(EST)概述	10
1.4 本书的主要研究内容	12
2 磨削过程动态模型与磨削颤振机理	13
2.1 引言	13
2.1.1 砂轮的接触刚度	13
2.1.2 砂轮的磨损	14
2.1.3 磨削中的几何干涉	14
2.2 磨削过程基础模型	15
2.2.1 模型的建立	15
2.2.2 磨削过程系统稳定性分析	17
2.3 磨削系统时域法建模与分析	19
2.3.1 时域模型的建立	20
2.3.2 磨削的无条件稳定性	22
2.3.3 磨削的条件稳定性	24
2.3.4 稳定性规律的时、频一致性	25
2.4 再生型磨削颤振	27
2.4.1 砂轮表面再生型磨削颤振	27

2.4.2	工件表面再生型磨削颤振	29
2.5	扭转振动对磨削颤振的影响	32
2.5.1	问题的提出	32
2.5.2	时域建模与分析	33
2.6	本章小结	36
3	磨削振动与磨削表面波纹度实验研究	39
3.1	强迫振动与磨削表面波纹理论分析	39
3.2	实验条件与实验系统	41
3.3	实验结果与分析	43
3.3.1	关于颤振信号的多频性和频率前移分析	47
3.3.2	关于振动信号的调制现象分析	49
3.4	磨削表面波纹度	53
3.5	砂轮特性与磨削表面波纹度	57
3.6	本章小结	58
4	磨削颤振的非线性分析	59
4.1	理论基础	60
4.1.1	混沌振动	60
4.1.2	李雅普诺夫(Lyapunov)指数	61
4.1.3	分形的概念	62
4.1.4	奇怪吸引子的维数	63
4.2	由单变量时间序列重建相空间吸引子	64
4.3	由单变量时间序列计算关联维数	66
4.4	由单变量时间序列计算 Lyapunov 指数	68
4.5	本章小结	70

5 磨削颤振的监控策略与抑制方法	72
5.1 磨削颤振的神经网络监测方法.....	72
5.1.1 引言.....	72
5.1.2 多层前向网络与 BP 算法.....	75
5.1.3 磨削颤振的监测.....	77
5.2 基于信号幅值域特征变化识别磨削颤振.....	80
5.2.1 颤振发展过程中信号幅域特征及 数学描述.....	80
5.2.2 应用 RBF 网络估算概率密度.....	82
5.2.3 磨削颤振的识别.....	86
5.3 变速磨削抑制颤振的机理.....	87
5.3.1 变进给速度抑制磨削颤振.....	87
5.3.2 变砂轮转速抑制磨削颤振.....	89
5.3.3 变工件转速抑制磨削颤振.....	91
5.4 抑制磨削颤振的实用方法——工艺条件适配法.....	94
5.4.1 正交试验设计与分析.....	95
5.4.2 单因素试验与分析.....	97
5.4.3 工艺条件的适配.....	99
5.5 本章小结.....	101
6 基于 EST 的磨削表面圆度、圆柱度误差研究	104
6.1 引言.....	104
6.2 三点法圆度误差分离原理.....	105
6.3 影响分离精度的因素及提高分离精度的措施.....	109
6.3.1 圆度误差分离谐波抑制及其消除.....	109
6.3.2 圆度误差分离的幅值传递.....	110
6.3.3 圆度误差分离的灵敏度分析.....	111

6.3.4	其他提高误差分离精度的途径	112
6.4	圆度误差分离的时域法	114
6.4.1	时域法圆度误差分离原理	114
6.4.2	时域法和频域法圆度误差分离技术的 联系与比较	116
6.5	三点法圆度误差分离的演化与近似方法	117
6.5.1	四点法与多点法	117
6.5.2	两点近似法	118
6.6	圆柱度误差分离技术	119
6.6.1	三点法圆柱度 EST	120
6.6.2	截面平均半径差	123
6.6.3	截面最小二乘圆心位置	125
6.6.4	圆柱体形状误差的重构	126
6.7	本章小结	129
7	主要结论	130
	参考文献	133

1 绪 论

1.1 引言^[1~5]

先进制造技术是当前国内外的一个重点研究方向,是推动国防、汽车等基础工业发展的高新技术,其最终目标是低成本、高效率、高质量地完成生产任务。制造过程自动化是先进制造技术的主要标志之一,其关键性技术基础为:

- (1) 并行工程环境下的 CAD/CAM 一体化;
- (2) 面向自动化的虚拟制造技术;
- (3) 制造过程中的检测、监控与诊断技术;
- (4) 机器人化制造技术。

可见,制造过程中的检测、监控与诊断技术已成为先进制造技术中重要的研究内容。制造过程的工况监测与故障诊断的目标是对生产过程中产生的各种信息进行获取、传输、处理、分析和应用,确保生产加工高效合格地进行。先进制造过程中可以依靠生产设备自身所具有的完善的自监视、自诊断及自动控制、补偿功能、故障自排除功能来保证无废品加工。先进制造中的监控技术是集传感器技术、计算机技术、信号处理及自动控制等为一体的综合性技术。

通过对制造过程进行检测、监控,可以保证加工质量、降低产品生产成本、保证加工系统的安全运行。当前在该领域所开展的研究工作主要包括:

- (1) 机床状态监控(如机床动态特性监控、机床运动精度诊断等);

- (2) 刀具状态监控(如刀具磨损、破损状态监控);
- (3) 加工过程监控(如加工中振动监控、温度监控等);
- (4) 工件加工质量监控(如工件尺寸、形状误差的检测与监控等)。

先进制造技术的发展,对加工过程与产品质量检测、监控提出了更高的要求,要求其于制造自动化、智能化、柔性化及集成化相适应。

磨削加工是机械制造中重要的加工方法之一。它不仅是精密加工的主要方法,而且随着 CBN 磨料的使用,高速、强力磨削(如缓进给深磨等)技术的推广,以及磨削过程自动化、数控化和智能化的发展,已成为一种高效率的加工方法。磨床在加工机床中也占有相当大的比例。1997 年欧洲机床展览会(EMO)的调查数据表明,25%的企业认为磨削是他们应用的最主要的加工技术,占 47%,而车削只占 23%,铣削占 22%,其他占 8%;而磨床在企业中占机床的比例高达 42%,车床占 24%,铣床占 22%,钻床等占 12%。我国从 1949~1998 年,开发生产的通用磨床有 1 800 多种,专用磨床有几百种,磨床的拥有量占金属切削机床总拥有量的 13%左右。可见,磨削技术在机械制造业中占有极其重要的位置。目前,磨削技术的发展趋势是:发展超硬磨料磨具;研究精密及超精密磨削、高速高效磨削机理并开发有关新的磨削工艺技术;研制高精度、高刚性的自动化磨床。其关键技术为:磨削机理及磨削工艺的研究;高速、高精度主轴单元制造技术;精密、高速进给单元制造技术;砂轮制造及其新技术;机床支承及辅助单元制造技术;砂轮在线修整技术;环境友好的相关磨削技术;磨削过程的检测控制技术;磨削过程的仿真与虚拟技术。

磨削过程的检测与控制,主要是通过传感器拾取有关信号,并对其进行分析与处理,进而实现对磨削过程实时监控。例如,对砂轮的磨损及破损情况进行监测和控制,对工件的尺寸、形状与位置

精度和加工表面质量进行监控。与国外相比,国内在磨削过程的在线监测、监控技术等方面具有较大差距。国内应以实用化为目标,加强对砂轮磨损及破损、工件的加工质量等在线监控技术的研究,开展自适应控制及智能控制的研究。随着计算机技术及模拟技术的发展,利用计算机进行磨削基本参数及磨削工艺的仿真,通过模拟磨削过程,分析和预测不同条件下磨削效果和磨床性能,也将成为重要的研究内容。

在磨削过程中,振动是一种十分有害的现象,它不仅会降低加工表面质量、缩短砂轮的寿命,还会影响生产率的提高,严重时甚至导致加工无法进行。因此本书主要研究磨削过程振动,特别是磨削颤振(自激振动)现象产生的机理,对磨削过程振动进行检测、监控,提出抑制振动的技术措施以及对磨削表面形貌误差进行分析。此项工作的开展具有重要的理论意义和实用价值,符合磨削技术的发展和现代制造过程的要求。2001年8月在法国南锡举行的第51届CIRP(国际生产工程研究学会)大会磨削方面的主题报告为“磨削颤振——产生和抑制”,也充分说明此项工作的重要意义。

1.2 机械加工颤振研究概况

加工过程中的振动一般分为两类——强迫振动和自激振动(颤振)。前者产生的原因和解决办法一般比较明确,而后者产生的机理、发展规律以及对加工系统的影响比较复杂。

机械加工中颤振的研究,自20世纪50年代以来,一直是制造业中的主要研究课题之一。20世纪80年代以来,一方面,加工质量、生产效率、自动化程度的提高以及现代化制造系统的发展,要求对颤振实施在线监控技术;另一方面,计算机技术、控制论、系统论、信息论的深入应用,各学科之间的日益相互渗透与交叉,为颤振研究提供了更为广阔的理论基础与技术手段,使得切削颤振的研究无论在理论研究还是在实用技术开发方面都较过去有了较深

刻的变化与长足的发展。集中体现在以下四个方面:① 颤振机理与模型的研究,主要包括颤振产生的物理原因、线性或非线性数学模型、稳定性条件等;② 系统动态特性的研究,主要包括机床结构的动态特性、切削过程的动态特性、机床切削系统的辨识;③ 颤振预防与控制的研究,主要包括机床结构的设计与改进、减振装置的使用、切削参数的调整等;④ 颤振的在线检测与监控,主要包括颤振征兆的特征与判别、控制策略等。

1.2.1 切削颤振的研究概况

就切削(如车削、铣削、钻削等)颤振的研究而言,在上述四个方面国内外学者已经取得显著成果,形成了大量的文献性资料。

在颤振机理与模型研究方面,根据颤振形成的物理原因,目前得到公认的有再生型颤振、振型耦合型颤振和摩擦型颤振,其中再生型颤振在实际中最为多见。再生型颤振是由于上次切削所形成的振纹与本次切削的振动位移之间的相位差导致刀具切削厚度的不同而引起的颤振,也称切削厚度变化效应。在线性理论范围内,一般采用控制理论中传递函数方块图的方法求出系统的稳定性条件,或直接由系统微分方程得到特征方程而求出系统的稳定性条件。再生颤振的非线性理论则考虑了切削过程的非线性因素(诸如后角限制、刀具振离工件表面等)与机床结构的非线性因素(诸如机床结构的非线性刚度等)建立非线性模型。非线性模型及其研究方法无疑是再生颤振研究的重大进展,它使再生颤振在理论与研究方法上更加完备,在应用中更接近实际。振型耦合型颤振是由于振动系统在两个方向上的刚度相接近导致两个固有振型相接近(即耦合)时而引起的颤振。耦合型颤振一般是对两自由度线性系统而言,一般采用振动理论中模态分析方法即可得到系统的特征方程与稳定性条件。耦合型颤振的理论对机床设计时考虑如何配备机床各部件在不同方向上的刚度具有指导意义。摩擦型颤振是指切削速度方向上刀具与工件之间的相互摩擦所引起的颤振,而

产生这种相互摩擦的原因较多,如切削速度增大时切削力的下降特性,切削力相对于切削速度与刀具前角的动态变化的相位滞后特性,等等^[6]。再生颤振是指刀具与工件之间在切入方向(横向)上的相对振动。摩擦型颤振则是指切削方向(周向)上的振动,就目前的研究情况来看,对这种颤振产生原因与物理机理的认识比较一致,但还没有提出描述这种颤振的较为合理的数学模型。需要指出,除上述公认的三种颤振类型外,星铁太郎还提出了一种混合型颤振,称为“位移干扰强迫振动”^[7],这是由强迫振动频率与机床切削系统的颤振频率相重合时所引起的一种振动。后有人^[8]更新了星铁太郎的这一概念,提出了强迫再生振动的概念,并进行了深入研究。

对机床切削系统动态特性的研究可分为三个方面:机床结构动态特性的研究,切削过程动态特性的研究和机床切削系统辨识。机床结构动态特性的研究主要有有限元计算分析法和试验模态分析法,这在20世纪80年代甚为盛行^[9~13]。计算分析法在计算中很难准确地计入实际刚度与阻尼,对复杂机械结构还必须作适当的简化,计算结果只能大体反映机床结构的动态特性;而实验分析法与计算分析法相结合,共同确定机床结构的动态特性已经发展得较为成熟,但其缺点在于,机床非工作状态下的动态特性往往与工作(切削)状态下的动态特性有较大差别,因此试验结果很难反映切削状态下的机床切削系统的动态特性。切削过程的动态特性主要是指切削力的动态特性,可通过动态切削力系数(Dynamic Cutting Force Coefficient, DCFC)进行研究。这一研究具有以试验为基础,再根据试验结果确定理论公式的特点。DCFC的试验方法分为静态法与动态法。静态法是利用稳态切削的结果经理论计算而确定DCFC,动态法则是进行动态切削(如造波切削、去波切削等)而确定DCFC,研究中多采用动态法^[14~19]。分析DCFC的目的是为了研究与机床结构动态特性无关的、切削过程本身所固有的

动态特性,然而,由于试验必须在机床上进行,所取的动态切削力信号中必然包含机床结构动态特性的信息,很难肯定由此得出的DCFC就完全是单纯切削过程的动态特性。以上两方面研究是对机床切削系统中的两个环节分别加以研究,但由于机床结构与切削过程是相互耦合在一起的,很难将两者的动态特性绝对分开。20世纪80年代以来,发展了对机床切削系统进行系统辨识的方法。这种方法是在切削加工状态下,以机床切削系统为对象,对整个系统进行辨识,而不是研究其中的单个环节。以S. M. Wu为代表的学者将时序分析与系统辨识相结合,进行机床切削系统动态特性的辨识与分析,开展了大量的研究^[20~24]。由于时序分析通常是测取机床切削加工状态下的振动信号进行建模、分析,由此得出的是整个机床切削系统的动态特性。

关于颤振预防与控制的研究可归纳为三类方法:(1)机床结构改进与优化设计的预防方法,该方法以增大机床结构的刚度与阻尼为手段,在设计阶段考虑机床的抗振性;或是在机床的使用阶段对机床的薄弱环节进行结构改进以增大刚度和阻尼。(2)采用吸振器或附加装置的控制方法,该方法多采用被动型的吸振器,最为典型的是用于镗杆消振的冲击吸振器,其基本结构是在镗杆中装入一个冲击块,依靠冲击块与镗杆孔的摩擦阻尼而消耗镗杆的振动能量。(3)反馈控制减振器法,就是应用控制理论从外部供给能量进行主动补偿控制,如采用激振器在刀具与工件之间施加一个与颤振同频率、同振幅但反相位的振动位移,或施加与动态切削力同频率、同振幅但反相位的激励力,以抵消刀具与工件之间的相对振动^[27,28]。上述控制方法总需要对机床结构附加一套吸振或消振装置,使用不太方便。调整切削参数的控制方法主要是通过调整切削参数,如主轴转速、进给量、切削深度、刀具角度等,实质上是改变切削刚度与切削阻尼,以抑制颤振。在调整切削参数的控制方法中,特别值得指出的是变速切削的控制,即按照一定的规律(如

正弦波、三角波、方波等)连续改变主轴转速以抑制颤振。此方法国内外进行了许多研究^[29~31]。变速切削对于不同动态特性的机床切削系统,只需通过软件改变控制系统的变速规律便可进行控制,因此具有较好的适应性。

切削颤振的在线监视与控制技术,是20世纪80年代开始迅速发展起来的一项实用技术。这是因为,一方面,上述对颤振机理、系统动态特性与颤振控制的研究实际上不可能完全避免颤振;另一方面,现代测试技术、信号处理技术、计算机技术、自动化技术以及有关理论的发展,为颤振的监控提供了必要的技术与理论基础。因此,颤振的在线监控日益受到广泛的重视,国内外学者开展了大量的研究工作^[32~37]。这项研究是在线监视切削过程的动态信号(如振动信号、切削力信号等),提取颤振预兆作为特征量并进行分类,对颤振进行早期预报,以及时采取控制措施避免颤振,其关键在于特征量的构造及其准确性。需要指出,随着人工智能、专家系统技术在工程上的广泛应用,颤振在线监控的智能化将成为切削过程工况检测与故障诊断技术发展的趋势。

1.2.2 磨削颤振的研究与进展

磨削颤振是磨削加工中最重要的误差源之一,对工件最终几何精度有直接的影响。磨削过程中有两种基本形式的振动——强迫振动和自激振动。强迫振动的主要原因是砂轮不平衡和偏心,易于确定。消除砂轮不平衡和偏心可通过多次平衡和整形交替进行。而颤振(自激振动)很难确定和成功地抑制。

除机床结构动态特性研究方面(1.2.1部分已有所论述)以外,与切削颤振的研究相比,磨削颤振的研究在各方面显得进展较慢,主要原因在于磨削过程的特殊性(使用特殊刀具——砂轮),使得影响磨削过程动态特性的因素十分复杂,给磨削颤振机理与监控的研究带来很大困难。尽管如此,长期以来,国内外学者一直不断地进行磨削颤振理论和实验研究,以揭示磨削颤振产生机理、发

展规律,寻求监控和抑制磨削颤振的有效方法。自 1954 年 R. S. Hahn 提出磨削过程的再生颤振理论后,一个时期(至 20 世纪 70 年代)以来一批学者对磨削颤振现象进行了较为深入的研究,在磨削过程动态建模与分析方面形成了两种流派:

(1) 频域法:它是基于经典控制理论中的传递函数法建立系统的数学模型,求得系统的传递函数,由其特征方程获得系统的稳定性判据,在复频域中画出 Nyquist 图进行分析。该方法最具代表性的是 R. Snoeys 的磨削过程频域动态模型^[38]。

(2) 时域法:它由系统的微分方程解得系统的稳态响应,进而由系统参数获得稳定性判据,进行稳定性分析。该方法最具代表性的是 R. A. Thompson 的磨削过程时域动态模型^[39]。

从国内外学者对磨削颤振的研究情况看,绝大多数以 Snoeys 模型为基础进一步研究系统的稳定性,揭示颤振产生机理、发展规律和寻求抑制颤振的办法。Inasaki 等应用磨削过程的特征方程,通过研究其根,来研究稳定极限和不稳定增长系数^[40]。F. Hahimoto 等对砂轮与工件之间动态几何干涉的表达、特征根形态、接触刚度的处理及颤振增长率进行了理论研究和实验分析^[41,42]。Srinivasan 根据特征方程及其根的分布,提出再生谱的概念(它是一种基于特征方程的频域函数),利用再生谱函数进而分析系统的稳定性^[43]。T. Matsubara 等^[44,45]和 M. Weck 等^[46]分别就工件再生颤振和砂轮再生颤振研究了系统的动态过程稳定性。H. Tetsutaro^[47]进行了改变磨削参数抑制磨削颤振的研究。国内学者徐燕申、李刚将接触阻尼引入动态模型,并将模型中各参数视为磨削状态的函数进行研究和分析^[48,49];于骏一、韩相吉等在变速磨削抑制颤振方面进行了理论和实验研究^[50,51]。

自 20 世纪 90 年代起,在磨削过程时域建模与仿真以及磨削颤振监控方面取得了一定的进展。文献[52]基于所建模型,将磨削过程中振动对砂轮和工件表面的影响进行计算机仿真:输入为砂

轮的横向进给量,输出为砂轮的总磨损量和工件的总磨除量,并将砂轮和工件的磨损(除)进展情况绘出图形输出,在此基础上进一步分析磨削过程的动态特性。文献[53]根据磨削过程系统方块图模型,建立了对应的 Simulink 模型,以具体的磨削数据运行该模型可获得所需变量的数据或有关图形。在磨削颤振的识别和分类与监控研究中,K. Mori 等^[54]研制了一种磨削过程振动诊断系统,它集成了神经网络和基于知识的系统。文献[55]将熵函数用于磨削再生颤振分类中,并与神经网络方法进行了比较。文献[56]提出了识别砂轮寿命的神经网络方法,网络输出只有一个,表示颤振是否发生,即按照网络输出值识别出颤振加速度的阈值。

尽管对磨削颤振国内外学者进行了大量的研究,但在以下方面仍待进一步深化和加强。

(1) 对于磨削颤振的产生机理尚待进一步认识和研究,如横向上的两种再生颤振类型——砂轮再生型颤振、工件再生型颤振的具体形成条件的再认识,以及周向颤振的研究。

(2) 关于磨削过程动态模型的建立与分析。目前对砂轮与工件之间的接触参数的描述和求取还不够完善(如仅以静态接触刚度作为接触参数);在建模分析中除横向振动外,还应考虑工件和(或)砂轮的扭转振动加以研究,在这一方面虽有人涉足^[57],但还不够完善。

(3) 处于加工状态下的机床结构与磨削过程构成一个闭环系统,其中两个环节是相互耦合在一起的,很难将两者的动态特性绝对分开。因此,在探索磨削颤振产生、发展规律的研究中应重视使用系统辨识的方法(如时间序列分析方法),即在加工状态下,以磨削系统(磨床—砂轮—工件系统)为对象,对整个系统进行辨识。

(4) 实际的磨削动态过程为非线性时变系统。对这种复杂系统的研究,一方面应继续利用人工神经网络的优势加以研究,另一方面还应重视混沌理论与分析方法的应用。目前已开展了有关切