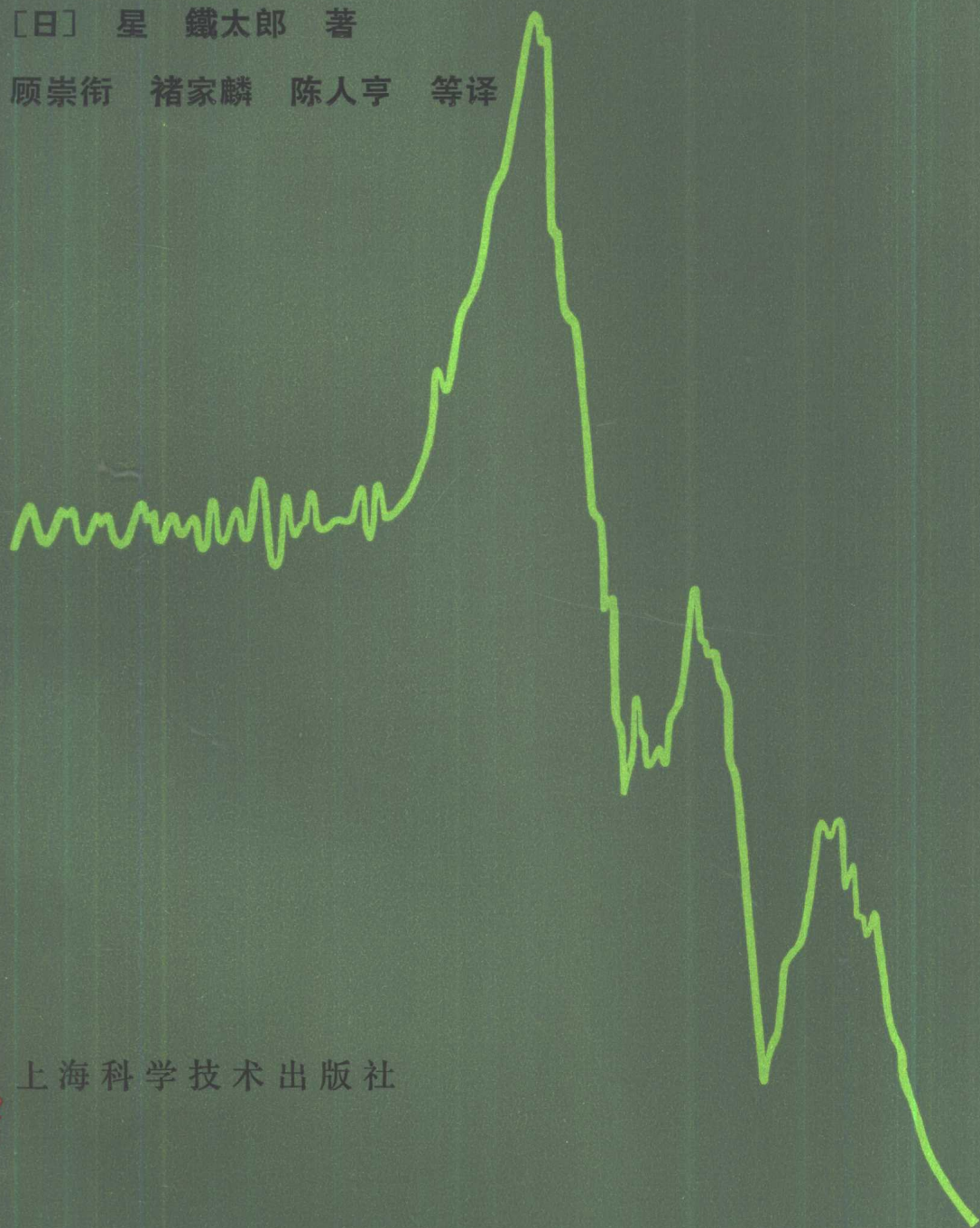


机械加工颤振的分析与对策

[日] 星 鐵太郎 著

顾崇銓 褚家麟 陈人亨 等译



502.14

上海科学技术出版社

机械加工颤振的分析与对策

[日] 星 鐵太郎 著

顾崇銜 褚家麟 陈人亨 等译

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了机械加工颤振的基本理论,并且十分注重理论的实际应用。理论与实践的紧密结合成为本书的特点。

全书共分十章,前四章简练而系统地阐述机械加工颤振的基本理论,包括各种颤振的特征、再生颤振的机理、切削过程的实际动态特性以及其他各种颤振的机理。第五、六章,介绍各种颤振的判别方法和研究颤振问题用的测试技术与测试仪器。第七、八章,介绍机床的结构分析和理论计算的原理,机床最优化设计的原理、方法和实例。第九章介绍机床的安装和安装基础的动态特性。第十章介绍变速切削法抑制再生颤振的原理、实验及其实用性的研究。

本书可作为工科大学有关专业《机械加工振动》课程的教材或研究生的参考书,也可供机械制造专业教师和工程技术人员参考。

機械加工びびり現象——解析と対策

京都大学助教授・工学博士 星 鐵太郎 著

工業調査会 1977 年

机械加工颤振的分析与对策

[日] 星 鐵太郎 著

顾崇銓 褚家麟 陈人亨 等译

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

本书由上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 11.25 字数 263,000

1984 年 11 月第 1 版 1984 年 11 月第 1 次印刷

印数: 1—7,100

统一书号: 15119·2353 定价: 1.80 元

译 者 序

本书是由日本京都大学副教授·工学博士星 鐵太郎所著日文《機械加工びびり現象——解析と対策》一书译成中文的。它系统地论述了关于机械加工颤振的基本理论,并结合机械加工的实践详细地介绍了各方面的实验研究和理论原理的实际应用。

诚然,目前已有一些关于金属切削机床动力学的书籍,然而,本书有其独特之处:它反映了金属切削机床动力学近年来发展的新水平,把颤振的理论高度简练地系统化;它注重理论与实践的紧密结合,用最低限度的数学方法使难懂的理论通俗易懂,使读者能以最短的时间掌握机械加工颤振的基本理论和机床结构设计的分析计算原理。

本书基本概念清楚,既有理论的阐述,又有测试技术的介绍,还有实例的验证,对实际工程问题的解决能起具体的指导作用。本书可作高等学校机制专业教材或教学参考书,也可供机械加工工程技术人员参考。

我们对原书中发现的错漏尽量作了订正,并适当地加了译注。在不损害原作意图的条件下,对叙述不够恰当的部分以及多余重复的部分作了修改和删减;有些照片模糊不清,已不能用来翻印,我们根据不同情况予以删除或重描。但由于译者水平所限,又因时间仓促,译文定有不妥和错误之处,欢迎读者赐教。

本书由顾崇銓译第七章,褚家麟译第一及二两章,陈人亨译第六及八两章,林志航译第四章的一部分,黄协清译第九及十两章,万德安译第三及五两章,全部译稿由褚家麟和陈人亨校订、整理,最后由顾崇銓教授对主要章节作了重点审校。

译者 于西安交通大学

1981年8月

原 序

本书是供解决机械加工中常常出现的颤振问题用的,它阐述了实用性的知识和方法。

诚然,颤振问题的历史可以追溯到开始实行切削加工的最早年代,但是关于它的理论研究,迄今所知,则起始于 F. W. Taylor 的有名著作^{1)*}(1907)。

该书曾说:颤振是机械加工工人面临的问题中最为困难而微妙的问题,并详细列举了实际的处理方法。Taylor 在阐述颤振产生的理论时认为:形成不连续切屑的周期与工件、刀架或机床的传动机构中任一部分振动的固有周期相同,是产生颤振的主要原因之一。

照此所提出的理论,就认为由切屑形成机理决定的作周期性变化的交变切削力,或是由间断切削和其他任何强制原因产生的作周期性变化的交变力这二者所激起的振动就是颤振。这种解释,在最早期当然是流行过的。另一方面,许久以前,也曾有人考虑过颤振是否是自激振动的问题。N. Arnold 在 1946 年的论文²⁾中就说明过:由切削力的主分力相对于切削速度的下降特性而产生的自激振动,乃是颤振中的一种。他的实验,在今天来说,采用的是没有再生效应的特殊加工方式,那是在切削低碳钢(维氏硬度 HV156~180)的情况下进行的,产生了频率为 1104 到 3270 赫的颤振,报告说,当刀具后刀面的磨损一经变大,颤振就更容易产生。这种颤振,如今就称之为摩擦型颤振。

Arnold 还在同一论文的后半部分写到:实际使用的进给量常常远比刀具的切削宽度为小。在这种情况下,在前一转的切削中,由于振动而残留在工件表面某一点上的凹凸表面,就会影响到后一转中在同一点处切削时切削力的变动。而且,若前后两次切削时的振动相位相一致的话,就会明显地产生使交变切削力增大的巨大影响。这种现象在 1954 年 R. S. Hahn 的论文³⁾中取名为 regenerative chatter(再生颤振),并把它作为产生颤振的主要原因来对待的。Hahn 用了数学的理论分析来表示动态不稳定现象,并阐明了它是自激型的颤振现象。

Hahn 在那时所作的分析用了较难理解的数学公式,后来, J. Tlustý 与 M. Polacek (1963)⁴⁾、S. A. Tobias (1965)⁵⁾、H. E. Merritt (1965)⁶⁾等用了别的方法表达了这一现象,于是使颤振理论的说明变得更容易理解了。

此外,关于产生颤振的机理,还有各种不同的意见,例如:同一个 Hahn 还曾在 1953 年发表了对过渡失稳(transitional instability)⁷⁾的想法;从刀尖与被切削表面的摩擦状态过渡到切削时所产生的过渡性不稳定状态,会引起振动;1954 年,土井和加藤又提出了一个理论,他们认为:由于切削力水平分力的瞬时变化相对于切削厚度的瞬时变化产生了时间上的滞后,这就是自激振动的起因⁸⁾;等等。

1960 年以来,美国、英国、联邦德国、比利时、荷兰、日本和其他各国对颤振的研究盛极一时,许多研究成果已被应用于实际。此时,结合电子计测仪器以及电子计算机的飞速发展及普及,在各地的大学和研究所中进行了许多研究,诸如:在各自的实验室里人为地产生了各种类型的颤振,并对它们的机理和现象所进行的研究;根据实验和理论分析,查核机床的

* 这种标在右角上的数字,表示本书所附参考文献的代号。——译注

振动特性、谋求机床的改进和最优化的研究;积极地抑制颤振的控制方式的研究等等。与此同时,工业界也在排除由颤振引起的实际故障,通过机床结构动态特性的测定与结构设计的改进来提高机床的切削性能,应用阻尼器来衰减振动,利用计算机来分析结构设计等等方面都累积了很多经验和实际效果。

仅就切削加工而言,迄今为止,根据大学、研究所以及工业界所进行过的研究和经验,可以说产生各种颤振的机理已系统地建立了起来,达到了能被理解的程度,也达到了相当实用的程度。而且,当诊断颤振故障的程序、实验测定所必要的装置、仪器以及实验技术也已建立。现在,由于更新的计测仪器的普及,使这些工作朝着应用更方便的计测方法的方向继续进展。

解决颤振问题的难易程度,对于切削加工和磨削加工而言是不同的。在比较精密的精加工工序——磨削方面,即使到今天,仍然有许多颤振问题还没有被充分理解。

在磨削加工的颤振现象中,已知有若干种为切削加工中所未见的特殊机理。在实验室中正在从理论和实验两方面进行相当仔细的研究。但是在工厂中产生了磨削振动问题时,为谋求解决这个问题而进行的实用性研究和改革,则不可否认要比切削加工の場合更为困难。

在机床设计的调研阶段,利用电子计算机作振动特性的分析计算是最有希望能获得实际效果的。象机床这样的立体结构体的振动现象,如果不利用电子计算机,则分析计算是不可能的。如今已经研究出了为机床设计用的动态特性分析法以及最优化设计的技术,正在供实际使用。

安装方法和安装基础对机床的振动特性有什么样的影响是实际中十分关心的问题。作者根据简化了的理论分析、模型试验、以及对若干实际机床所做过的实验测定,对实际工作提出了指导方针。

要象找到万能特效药那样找到能解决所有颤振问题的技术措施是不可能的,但是最近正在试行的变速切削法,对在粗加工中抑制颤振、提高重切削能力方面,已有显著的效果。由于它的作用机理易于理解,实施方法简单,设备费用少,并且效果确实可靠等理由,所以可以认为这是实用性较高的一种方法。

对于减小或消除机械加工中发生颤振的这个困难问题,近年来已进行了很多的研究,同时我们也非常关注把这些研究成果用于工程实际。为此问题日夜思索的机械制造厂的技术工作者、机床和工具制造厂的各有关方面,对掌握牵涉面很广而且与切身有关的颤振知识的重要性都有深切的体会,作者殷切地希望他们能对实际问题的解决发挥作用。

1977年5月 星鐵太郎

目 录

第一章 机械加工中的各种颤振	1
1.1 重切削中的颤振	1
1.2 精加工中的颤振	2
1.3 自激振动和强迫振动的混合型颤振	4
1.4 切屑形成的周期性引起的颤振	5
1.5 精密外圆磨削中的颤振	6
1.6 内圆磨削中的颤振	8
第二章 再生颤振的机理	11
2.1 再生效应	11
2.1.1 再生效应的原理	11
2.1.2 再生效应的公式	12
2.1.3 再生效应的图形	14
2.2 机械结构的动态特性	14
2.2.1 振动特性	14
2.2.2 振动特性的测定	15
2.2.3 传递函数的基本概念	16
2.2.4 传递函数的图形	17
2.3 稳定性极限	20
2.3.1 稳定性的判别	20
2.3.2 稳定性极限图	21
2.3.3 最大负实数部分	22
2.3.4 振痕的旋向	23
2.4 通常切削中的再生效应	23
2.4.1 重迭系数	23
2.4.2 通常切削过程的传递函数	25
第三章 切削过程动态特性的实测	29
3.1 随内调制波而来的交变切削力	29
3.2 用切削试验对动刚度等参数的测定	31
3.2.1 测定原理	32
3.2.2 试验方法	33
3.2.3 测定动刚度的实例	34
3.2.4 动态切削力系数的测定结果	35
3.2.5 内调制波虚数部分效应的测定结果	36
3.2.6 再生颤振的低速稳定性效应	37
3.2.7 刀瘤形成对再生颤振的抑制	38
3.2.8 切削试验的结论	39
3.3 内调制波造成的刀刃力和后面力的变动	39

3.3.1 刀刀力及后面力变动的机理	40
3.3.2 后面干涉的影响	42
3.3.3 刀具磨损的影响	43
3.4 再生颤振的现象	46
第四章 非再生颤振的机理	48
4.1 位移干扰型强迫颤振及混合型颤振	48
4.1.1 位移干扰型强迫颤振的理论	48
4.1.2 位移干扰型强迫颤振的试验证明	50
4.1.3 空运转时的振动引起强迫颤振的理论	52
4.1.4 位移干扰型强迫颤振的现象	54
4.2 断续切削时的颤振	54
4.2.1 端面铣削时再生颤振的机理	55
4.2.2 断续切削引起的强迫颤振	58
4.2.3 断续切削时颤振的现象	61
4.3 切屑形成的周期性引起的颤振	61
4.3.1 概述	61
4.3.2 切削黄铜时产生颤振的试验	62
4.4 摩擦型颤振	67
4.4.1 产生摩擦型颤振的理论	67
4.4.2 下降特性的测定方法	69
4.4.3 摩擦型颤振的现象	70
4.5 颤振的种类及其特征	71
第五章 颤振的判别与处理	73
5.1 切削加工中颤振的判别方法	73
5.2 判别与处理颤振的实例	76
5.2.1 研究的对象和产生颤振的情况	76
5.2.2 判别方法、试验装置和器材	77
5.2.3 试验结果	78
5.2.4 判别试验的结论及改进方案的制订	83
5.2.5 装有吸振器的刀架滑柱的效果	84
5.2.6 对判别与处理颤振实例的总结	85
第六章 研究颤振的测试装置	87
6.1 振动的测定装置	87
6.1.1 测定加速度的传感器	87
6.1.2 测定振动速度的传感器	88
6.1.3 测定相对位移的传感器	89
6.2 交变力的测定装置	89
6.2.1 电阻应变片式力传感器	89
6.2.2 压电式力传感器	89
6.3 观察及记录装置	90
6.3.1 同步示波仪	90
6.3.2 数据记录仪	90
6.3.3 电磁示波仪	90

6.3.4 笔录示波仪	90
6.4 频率分析装置	91
6.4.1 频率分析的原理	91
6.4.2 带通滤波器及实时分析仪	93
6.4.3 回转周期测定装置	94
6.5 激振试验装置	94
6.5.1 激振器	95
6.5.2 传递函数分析装置	96
6.5.3 频率计数器	97
6.5.4 数字电压表	99
6.5.5 振型测量仪	99
第七章 机床的结构分析——分析计算的原理	101
7.1 结构分析的目的和功能	101
7.2 结构分析的原理(集中参数模型)	102
7.2.1 刚度矩阵	104
7.2.2 刚度矩阵的合成	105
7.2.3 质量矩阵	108
7.2.4 静态变形	110
7.2.5 振动方程式	110
7.2.6 特征值问题	111
7.2.7 频率响应的逐次计算	113
7.3 近似度较好的结构分析法	114
7.3.1 分布质量直杆模型	115
7.3.2 有限元模型	118
7.3.3 动刚度合成法的原理	121
第八章 结构的最优化	124
8.1 最优化设计的原理	124
8.1.1 模态柔度	124
8.1.2 利用能量分布改进设计的要点	126
8.2 结构分析的应用实例——立式车床的分析	128
8.2.1 分析对象及其理论模型	128
8.2.2 分析结果	130
8.2.3 对切削点处动刚度的评价	131
8.3 最优化设计的应用实例——修整装置的改进设计	132
8.3.1 分析用的理论模型和激振试验的方法	132
8.3.2 试验和分析计算的结果	133
8.3.3 改进设计的效果	136
第九章 机床的安装方法和基础的振动特性	138
9.1 基础和安装方法	138
9.1.1 基础	138
9.1.2 安装方法	139
9.2 基础和安装方法对机床动态特性的影响	139

9.2.1	研究方法	139
9.2.2	低频共振模的理论模型分析法	140
9.2.3	低频共振模的模型试验分析法	142
9.2.4	实际机床低频共振模的测定	143
9.2.5	基础共振模和动态地基系数的测定	144
9.2.6	安装构件刚度的推算	146
9.2.7	有关的结论	148
9.3	安装方法的选择	148
9.3.1	强迫振动对加工精度的影响	148
9.3.2	弹性安装的效果	149
9.3.3	精密加工机床安装方法的选择原则	150
第十章	用变速切削抑制再生颤振	152
10.1	变速切削的理论分析	152
10.1.1	从能量平衡来看再生颤振的产生机理	152
10.1.2	变动主轴转速时的能量转换	153
10.1.3	用简化的理论模型模拟的结果	153
10.2	变速切削法的基本试验	155
10.2.1	试验装置及试验方法	155
10.2.2	试验结果	156
10.3	与其他控制方法抑制颤振的比较	159
10.3.1	以前试用过的各种控制方法的缺点	159
10.3.2	变速切削法的结论和优点	160
10.4	变速切削法的实用性探讨	160
10.4.1	六角车床加工	160
10.4.2	钢工件的精镗加工	161
10.4.3	钢工件的粗镗加工	163
10.4.4	铸铁工件的镗孔加工(第一例)	164
10.4.5	铸铁工件的镗孔加工(第二例)	165
10.4.6	车床的镗孔加工	166
10.4.7	立式车床加工	166
10.4.8	探讨性结论	167
参考文献		169

第一章 机械加工中的各种颤振

消除振动是提高加工技术,改进机床性能的一个重要的关键。在切削或磨削加工中产生了振动,加工就不能继续进行,即使进行下去,也不能得到良好的加工表面。这种振动叫做颤振(chatter)。它常使从事机械加工的人们感到苦恼。生产现场虽然会发生很多颤振,但是从产生颤振的机理来考虑,可以分为若干类。

第一章将根据介绍的实例指出由不同原因产生的各种类型的颤振的特征;第二章及以后各章将对提出的问题作更详细的说明。

1.1 重切削中的颤振

今以某一大型车床在粗加工铸钢或锻钢的轧辊毛坯时产生的颤振问题为例进行说明。这台机床的主电动机是一只 300 马力的直流电动机,最大顶尖间距离是 6 米,最大加工直径是 0.9 米。在这台机床上进行重切削(切削速度是 40~70 米/分,进给量是 0.5~1.0 毫米/转,切削深度是 80 毫米)时,产生了强烈的颤振声,加工无法继续进行⁹⁾。

工件轧辊毛坯长约 4 米,中央部分的直径是 640~745 毫米,重量是 6~8 吨。工件的左右两端分别用卡盘和顶尖支承。由已加工表面上可见振痕的节距得知,颤振频率随工件的大小而略有差异,从 88~45 赫。在具有颤振的切削过程中,用非接触式测振仪测量工件在上下方向上的位移,再在频率分析装置上分析振动的波形,得到如图 1.1 的(a)图所示的结果。从而可知工件振动的基本频率是 43 赫,与振痕的频率 38~45 赫几乎是一致的。从图

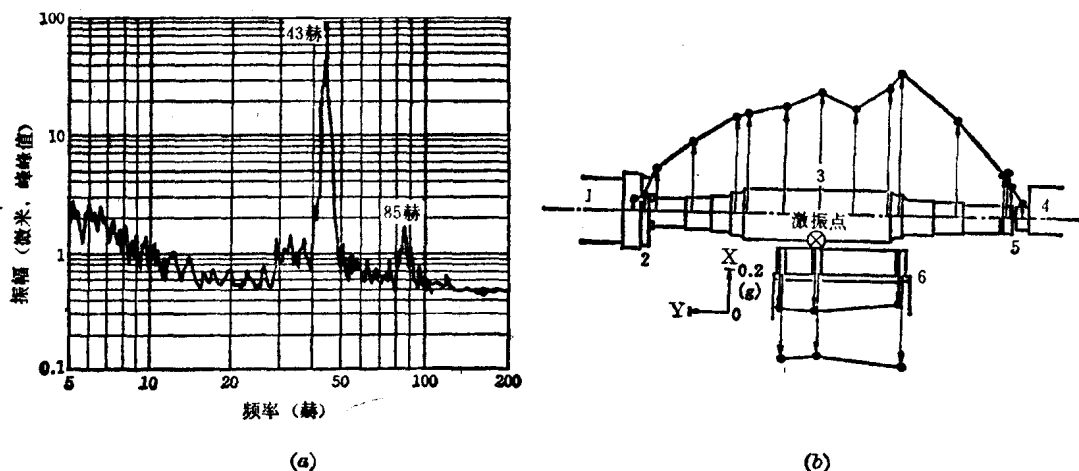


图 1.1 大型轧辊车床上的颤振

- (a) 在切削过程中测出的轧辊毛坯中央部分在上下方向的振动 工件—锻钢轧辊毛坯; 直径 640 毫米; 切削速度—68 米/分(34 转/分); 进给量—1 毫米/转; 切削深度—80 毫米; 刀具材料—硬质合金刀具, 主偏角 45°;
- (b) 装卡在车床上的轧辊毛坯在水平方向的振型 激振频率—43 赫; 激振力—200 千克力, 峰峰值; 预加载荷—300 千克力; X 方向激振
- 1—主轴; 2—卡盘; 3—轧辊毛坯; 4—尾座; 5—顶尖; 6—横刀溜板

前端相对位移的非接触式位移传感器。在侧刀架滑柱的前端也同样安装上两个传感器,它们都能测出刀具在切入方向(X方向)上的振动位移。结果是:当机床以18.5转/分(工件内径是980毫米,因此切削速度是57米/分)精加工孔的内表面时,用频率分析仪分析所产生的振动发现:23.3赫的频率分量最为显著。

在相同的切削速度下,作改变切削深度的切削。研究频率为23.3赫的振动分量的振幅,作出图1.3。在图中看不到振动的振幅随切削深度而变化的迹象。其实,即使切削深度为零(即只使工件空转,不进行切削),也产生同样强度的振动。因此可以肯定:在空运转时刀具与工件之间产生的相对振动的位移,在切削过程中几乎原封不动地存在,从而在加工表面上残留下波纹。这种颤振就是所谓位移干扰型强迫颤振(displacement disturbance-type forced chatter)。

有关这一类颤振的产生机理将在4.1节中予以说明。为了解决这一颤振问题,就必须查明空运转中在刀具与工件之间产生的强迫振动到底来自何处,只有找到它的来源后才能加以消除。继续进行试验的结果,了解到有关这一台大型立式车床的下列情况:

(1) 如果驱动工作台回转运动的传动系统中的变速齿轮系的啮合状态不变,只改变直流电动机的转速,使工作台回转,主振频率(如上所述,在18.5转/分时是23.3赫)的变化与工作台的转速成正比。因此,强迫振动可能产生于使工作台回转的传动系统的某个环节。

(2) 用激振器人为地激振主刀架滑柱,测定其频率响应,结果表明:在23.3赫的频率下,机械结构系统的振动虽不太显著,但仍表示出它是一种共振状态。可见,若使工作台在这一共振频率附近、以能产生20赫以上的强迫振动的转速回转,则强迫振动就会引起共振,在刀具与工件之间会出现相对振动。

(3) 这个成为问题的强迫振动,是由工作台传动系统的变速齿轮箱中第4传动轴产生的。在这根轴转一转的时间内产生两次振动。

根据从试验结果导出的上述情况,改变变速齿轮箱的设计,消除第4轴上产生回转振动的原因,同时进行结构改进,使包括这根轴在内的所有传动轴的最高转速的两倍都达不到20赫以上的频率。经过这样的改进,当初成为问题的颤振就消除了,但接着又发现在程度上比它更微弱的、可以认为是由别的原因产生的次要的颤振。

在重复进行了与上述相同的试验之后,发现作为主电动机的直流电动机的回转轴与变速齿轮箱的输入轴的连接尚有改进之处,只要改进了这一点,就可以消除这个颤振。这样,经过两次试验和两次改进,使这台立式车床的精加工性能大大提高,工作很有成效。

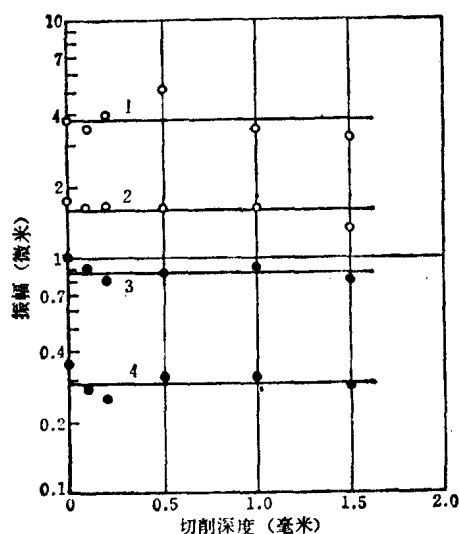


图1.3 在空运转及以各种切削深度切削时,在主振频率为23.3赫的振动分量在X方向的振幅(峰值)与切削深度的关系

工作台转速—18.5转/分(切削速度57米/分);
进给量—0.54毫米/转;使用硬质合金刀具
1—在主刀架附近工件的振动; 2—在侧刀架附近工件的振动; 3—主滑柱前端的振动;
4—侧滑柱前端的振动

1.3 自激振动和强迫振动的混合型颤振

在专门进行切削性能试验的车间,使几台机床连续运转,其中一台车床产生了颤振^[11]。

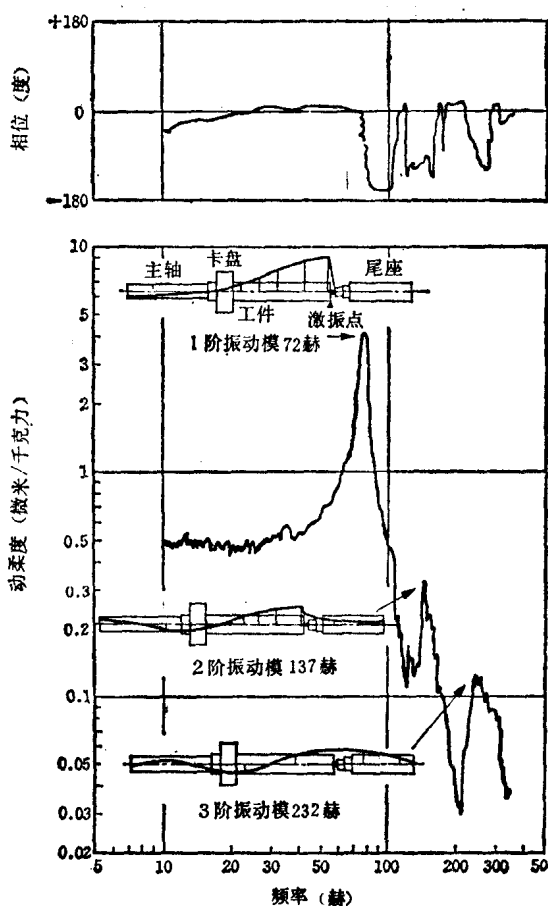


图 1.4 在切入方向激振时车床主轴、工件、尾座系统的频率响应及振型的测定结果
激振力—10 千克力, 峰峰值

这是一台主电动机为 30 千瓦直流电动机的 14 英尺车床。加工工件为直径 200 毫米、长 968 毫米的钢棒料,用卡盘和顶尖分别支承工件的左右两端。颤振发生在车削外圆的时候。分析振动波形的结果表明:颤振的主振频率是 70 赫。就在上述安装的状态下,进行人为的激振试验,结果就如图 1.4 所示;在频率为 72 赫时,主轴-工件-尾架套筒系统产生显著的一阶弯曲共振。

若再在各种不同的加工条件下进行切削试验,当切削深度在 1 毫米以上时,振动的振幅就变大;当切削深度小于 1 毫米时,振幅就变小,只有 0.5 微米左右。可以认为:这种颤振多半是再生颤振,它的产生原理可能与本章开头所说明的大型车床的颤振原理相同。而且用不同横切刃角 (side cutting edge angle)* 的刀具(切削深度为 4 毫米)切削所得的振痕总是向左上方倾斜,这个特征也是与再生颤振理论相符合的。

可是仔细一研究又发现:这台车床的颤振还不能这样简单地加以处理,而是一种更复杂的现象。即使在切削深度是 0.5 毫米(这一数值按理已在稳定性阈限以下)的情况下进行切削,有时振幅也会突然增

加到 10 微米(峰值)左右,有时又会减小到 0.5 微米左右。而且即使在不进行切削的空运转时,工件也以 70 赫左右的频率振动,其振幅在 0.35~1.5 微米的范围内。甚至在机床停止转动时,工件有时仍以大约 70 赫的频率振动,其振幅约为 2.5~2.9 微米。但有时工件的振动又迅速消失。

因此,就怀疑工件的振动是外来的振动,研究的结果发现:当与这台车床(设为车床 A)为邻的另一台车床(设为车床 B)在以比较高的转速运转时,车床 A 的工件就会出现强迫振动。车床 B 是一台老式的 14 英尺车床。对这一台车床进行振动测定的结果发现:主轴每转一转产生大约 12 次强迫振动。因此当车床 B 的主轴在 350 转/分附近运转时,恰好产生与车床 A 上工件的共振频率相符合的、约为 70 赫的振动。

* 根据日本工业标准(JIS),车刀几何角度的定义与我国不同。此处日文的“横切刃角”就等于我国的主偏角的余角。在译文中一般都改成“主偏角”,其数值都经过相应的换算。——译注

在这个实例中,当强迫振动的频率碰巧与再生颤振的固有频率相接近时,就产生了这两者的混合型颤振(transition-type chatter)。这种颤振很难与自激振动区分开来。而且此时只要车床 B 产生的强迫振动的频率稍有变化,或是车床 A 的工件的回转速度稍有变化,都会使空运转的振动振幅较切削过程中的振动振幅大好几倍,或是相反,衰减到几分之一。这种极不规则的现象很容易使人感到迷惑不解。它的详细机理将在 4.1 节中予以说明。

在这一实例中,最后把车床 B 的主轴拆卸开来,检查后发现:主轴的前轴承由于长期使用已破损。通过调换轴承,问题就解决了。

1.4 切屑形成的周期性引起的颤振

在切削含锰、铬的高耐磨性阿德迈特 (Adamite) 铸钢* 的大型轧辊毛坯(肖氏硬度 HS 40~50)时,产生了颤振,声音非常刺耳,并且在颤振很显著时,就必须停止加工,改变切削条件。此时所使用的机床是具有 400 马力直流电动机的大型车床,它的最大顶尖间距离是 7.5 米,最大加工直径是 1.5 米。工件中央部分的直径为 1.2 米、重量约为 38 吨。在工件外圆表面上要进行纵向车削和横向切槽。

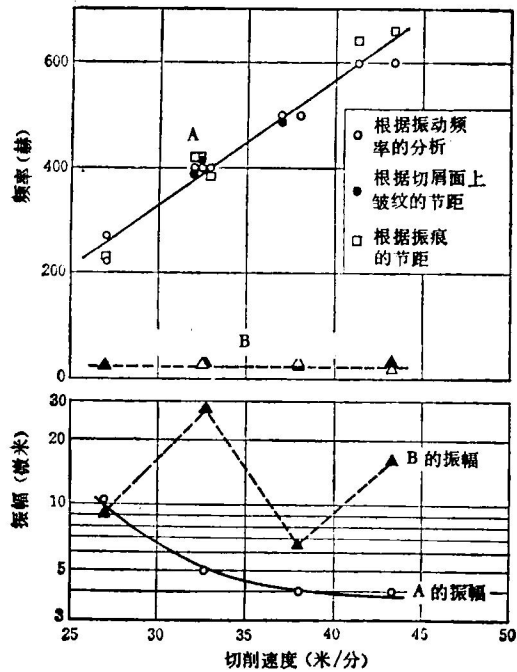


图 1.5 在切屑形成的周期性引起的颤振中两种频率分量相对于切削速度的变化情形
振动 A 及 B 的振幅分别是刀具和工件在横向切入方向测定的数值(峰值)

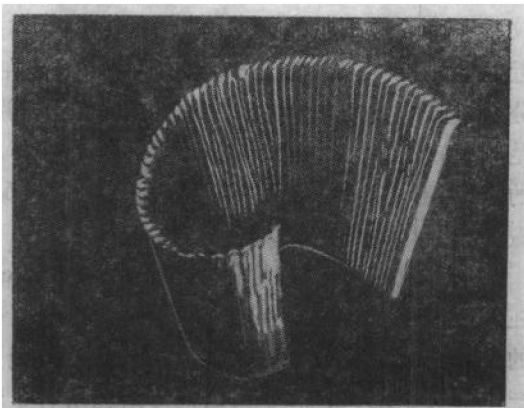


图 1.6 切削阿德迈特钢得到的切屑
切削方式为纵向车削外圆。切削速度—40 米/分;
切削深度—75 毫米;进给量—1.4 毫米/转;刀具
材料硬质合金 P30**;主偏角—60°

* 这种铸钢的化学成分是: C 1.25~3.5%, Si 0.5~2.0%, Mn 0.45~0.7%, P<0.12, Ni 0.25~1.0%, Cr 0.5~1.0%, S<0.05%。——译注

** 根据日本工业标准 JIS B4104-1970, 硬质合金刀片分为 P、M 及 K 三种系列。P 系列用于加工钢,其成分如下(摘录):

	W(%)	Co(%)	Ti(%)	Ta(%)	C(%)
P10	50~80	4~9	8~20	0~20	7~10
P20	60~83	5~10	5~15	0~15	6~9
P30	70~84	6~12	3~12	0~12	6~8

——译注

如果用测振仪对切削过程中刀具和工件的振动波形进行测定,并进行频率分析,结果发现:在颤振中混杂着两种频率的振动分量。其中一种振动分量可以认为是与轧辊毛坯的弯曲振动同时产生的固有振动,它的频率约为 20 赫;另一种振动分量是频率约为 200~700 赫的振动。由于后一种振动处在人们听觉的频率范围(30~20000 赫)内,这就很明显地成为产生噪声的原因。

采用各种不同的切削宽度、进给量以及切削速度,研究在工件直径约为 1.1 米处横向切入的情况,结果发现:在听觉范围内的振动(称它为振动 A)频率随加工条件而变化。例如:若切削宽度是 60 毫米,进给量是 0.7 毫米/转,切削速度在 27~43 米/分的范围内变化时,振动 A 的频率的变化情况,就如图 1.5 的上图所示,呈线性的变化,它随着切削速度的增加而增加。与此相反,在共振频率附近约 20 赫的振动(称它为振动 B)频率,却没有表现出随加工条件而变化的情况。

观察所产生的切屑(图 1.6),在切屑的自由表面(即不与刀具前面相接触的那一面)上清楚地呈现出周期性的皱纹。这种现象表明:切屑形成时产生的剪切变形并不是恒定不变的,而是周期性地变化的。测定切屑自由表面上皱纹的节距,计算一下剪切变形产生的频率(如图 1.5 的上图中黑圆点所示),就可以确定它与振动 A 的频率是一致的。再改变进给量进行切削,振动的频率亦发生变化:进给量增大,频率就下降。当横向切削的宽度从 60 毫米增加到 125 毫米时,虽然频率几乎没有变化,但是却发现振动的振幅增大了。

在产生再生颤振时,随着切削厚度的周期性变化,切屑表面也自然会出现与此类似的皱纹。然而,在再生颤振的情况中,它的频率是在机械结构系统表现出显著共振的共振点附近,而且几乎不随加工条件而变化。可是,在这个例子中所见到的颤振,却具有由两种振动分量组成的特征:一种是在共振点附近、频率几乎不随加工条件而变的振动分量 B;另一种是频率较高、且随加工条件而变的振动分量 A。因此,这种颤振与被切削材料本身所特有的、切屑形成时所引起的剪切应力周期性地集中的性质有关,而且是与机械结构系统的固有振动相结合而产生的。

这种由切屑形成的周期性引起的颤振(chatter induced by periodic chip formation),在加工通称为 60 (机械结构用碳钢)或 SS (普通结构用轧制钢材)等普通钢材时是看不到的,但是在切削商品黄铜(含铅的易切削黄铜)时,这种颤振是与不连续切屑的形成过程同时产生的典型现象。对于铭铅钢等结构用合金钢、奥氏体型不锈钢、钛及钛合金等多种所谓难切削材料,在切削加工时都产生这种颤振。有关产生这种颤振的机理到目前为止还不十分清楚,这种在实用上有重要意义的颤振的基本现象,将在后面的 4.3 节中再予以详细的说明。

1.5 精密外圆磨削中的颤振

到前一节为止,已介绍了切削加工中颤振的实例。由于在磨削加工中产生的振动问题比切削加工中的振动问题更为复杂和难于理解,所以到现在为止还未能充分阐明整个磨削振动的问题。磨削加工中,也往往发生颤振,它产生的机理与切削加工中有名的再生颤振的机理相同。就外圆磨削的情况而言,现在已经知道:

(1) 在工件的转速较高,且当机械结构系统中较显著的固有振动产生在远低于 200 赫以下时,很容易产生颤振。

(2) 在工件转速较低, 系统的固有频率在 200 赫以上时, 若砂轮不经修整连续使用, 砂轮外圆就会逐渐磨损成波纹的形状, 复映到工件表面上, 形成所谓砂轮表面再生效应 (wheel regeneration effect)。

磨削加工大多是继切削加工之后所进行的精加工, 这时, 原先在切削加工中不曾成为问题的、振幅在 1 微米以下的微弱的振动, 现在就成为问题了。在多数场合下, 由于这样微小的振动早已不能用测振仪测出, 因此只能用残留在加工表面上的表面状态作为唯一的线索来进行研究。即使在同样的加工情况下进行磨削试验, 每次试验都会出现不同频率的颤振。看来, 在多数情况下, 很难把磨削颤振问题集中到某一特定的频率上去研究。

特别是在想要获得表面粗糙度 (最大高度 $R_{\max}$) 在 1 微米以下的、接近镜面的加工表面时, 尽管用刚修整的、锋利的砂轮进行精磨, 还往往会出现沿着工件的圆周方向作等距离排列的、与轴向几乎是平行的磨削条纹*。特别是对于象圆柱塞规、锥度塞规这样的工件, 它们要和其他零件多次反复地配合使用, 上述磨削条纹就成为一个特别重要的问题。

为了简单地检查磨床在这一方面的优缺点, 只要用刚修整好的、锋利的砂轮对未淬硬的钢棒料作一次或数次的纵向磨削, 再用砂纸把加工后的工件表面轻轻地擦一下就可以了。

下面介绍万能磨床在作这种精磨时的颤振实例。万能磨床的砂轮轴使用麦肯森式非真圆流体动压轴承, 标准砂轮直径是 355 毫米, 砂轮转速是 1900 转/分, 最大顶尖间距离是 1000 毫米。为了搞清楚精磨时颤振的产生机理, 利用这台机床进行了由三种试验组成的一

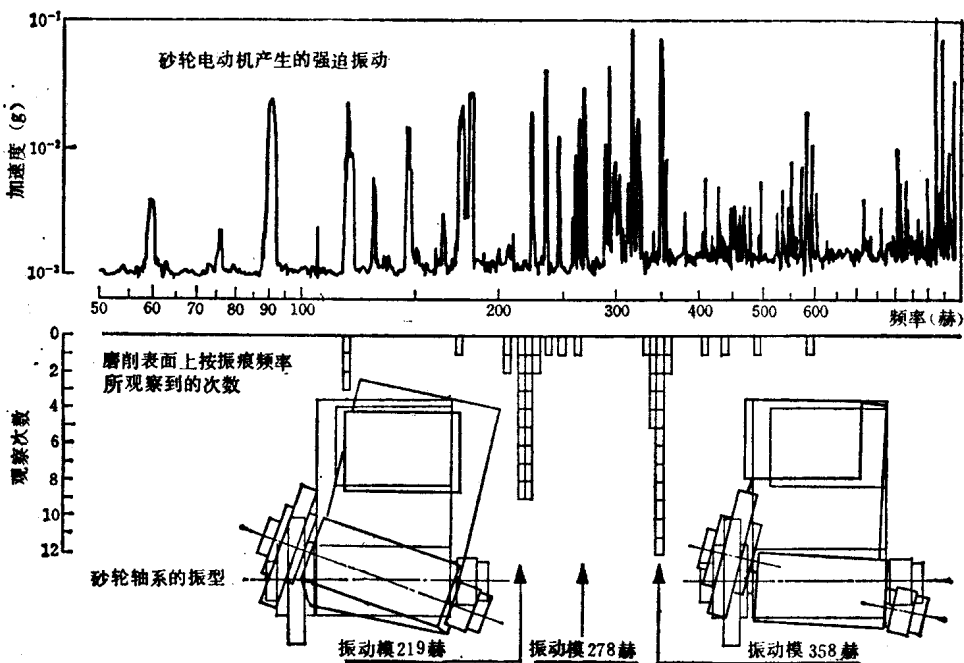


图 1.7 用万能磨床磨削得到的加工表面振痕的频率, 砂轮电动机的强迫振动及砂轮轴系的固有模的相关比较图

* 虽然也会出现磨削条纹与轴向有较大倾斜、形成明显的螺旋线, 但此时并不存在真正的再生颤振, 而是砂轮表面上的倾斜波纹在加工表面上复映而产生的。产生这种条纹的原因有两种不同的情况: 第一, 在修整砂轮时虽然进行了多次往复的无火花修整, 但修整器向左和向右的移动速度若有微小的差别, 就在砂轮表面上留下倾斜的条纹状的波纹。在这种情况下, 或是使修整器向左向右移动的速度严格地相同, 或是只从一个方向修整砂轮, 问题就可以解决。第二, 在修整砂轮时产生了再生颤振, 在砂轮表面上残留下螺旋状的振痕。在这种情况下, 必须消除修整砂轮时的颤振。