

金属切削动力学

JIN SHU

QIE XUE DONG LI XUE

浙江大学出版社
李加种 编著

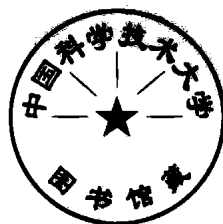
LIJIAZHONG BIANZHU

JINSHU QIE XUE DONG LI XUE

01
12

金属切削动力学

李加种 编著



浙江大学出版社

(浙)新登字10号

内容简介

本书主要介绍国内外学者在金属切削动力学学科的研究成果和应用,系统地阐述金属切削动力学的理论和实践。全书共分五章,内容包括:机床结构动态特性分析;切削颤振基本理论;切削过程动态特性分析;切削过程稳定性分析;切削颤振抑制技术及在线监控等。

本书可作为高等院校机械制造专业大学生选修课教材和研究生参考教材,也可供高等院校、科研部门、工厂企业从事机械制造专业的教师、研究人员、工程技术人员参考。

金属切削动力学

编著 李加种

责任编辑 李晓湘

浙江大学出版社出版发行

浙江大学出版社计算机中心电脑排版

杭州富阳何云印刷厂印刷

850×1168 32开 9.5印张 200千字数

1993年12月第1版 1993年12月第1次印刷

印数 0001—1500

ISBN 7-308-01444-4/TG·010

定价: 4.60元

序

为适应机制专业培养目标的需要,目前国内已有一些高校开出了《金属切削动力学》课程,但仍有更多的高校由于缺乏适合的教材而暂时开不出。早在1984年5月在华中工学院(现华中理工大学)召开的全国高等工业学校机械制造(冷加工)类专业教材编写委员会的一次全委会上,曾提出要组织力量编写一本《金属切削动力学》教材,供高校机制专业高年级学生使用,并讨论通过了教学大纲,由于种种原因,该计划始终未能落实,至今国内没有一本正式出版的《金属切削动力学》教材,这不能不引以为憾。

浙江大学多年来一直坚持将《金属切削动力学》列为机制专业高年级学生的选修课,该校李加种副教授在金属切削方面有很深的造诣,他所编写的《金属切削动力学》讲义经过多年教学实践,颇受师生们欢迎。基于上述有利条件,我曾建议李加种副教授能在百忙中抽出时间,在原有讲义基础上,参照教材编委会所讨论通过的教学大纲,作适当修改补充后公开出版供大家使用。他终于采纳了我的建议,经过一番艰辛劳动,该教材现已完稿,我有幸先睹为快。该教材文句流畅,阐述由浅入深,既有系统的理论分析,又能密切结合生产实际;既符合教学大纲要求,又能反映学科当前最新研究成果,是一本值得向全国高等院校推荐的好教材。该教材不久将由浙江大学出版社正式出版,这对我们高校来讲,无疑是一件“雪中送炭”的好事。

从该教材内容看来。它不仅仅是一本好教材,对科研单位、设计部门及工厂企业的科技人员来讲,也是一本值得参考的好书。

不言而喻,该教材的出版不仅为高校教材建设作出了贡献,促进了教学质量的提高,而且对进一步推动我国金属切削动力学研究工作的深入开展起到了有益的作用。因此,《金属切削动力学》的出版必

EAC63/07

定会得到金属切削界同行专家、广大科技人员及高校师生们的欢迎。

在此,我再一次向李加种副教授表示衷心地祝贺和感谢。祝贺他在金属切削动力学方面所取得的可喜成就;感谢他为我们大家做了件好事。

中国高校金属切削研究会

副理事长

全国高校机制专业教学指导委员会

委 员

上海工业大学 教授

喻怀仁

1993年5月于上海

前 言

随着科学技术的不断发展,先进的动态试验和数据分析处理技术日益完善,电子计算机技术的广泛应用,使“金属切削动力学”学科得到迅速发展,仅国内学者每年就有不少有关的论文发表,在生产中发挥作用。国内不少高等院校也相继开出了《金属切削动力学》课程或类似课程。遗憾的是这方面的书籍,特别是这门课程的教材还很少。为此,在1984年5月5日~13日在武昌华中工学院召开的“高等工业学校机械制造(冷加工)类专业教材编写委员会刀具教材编审组第三次编委(扩大)会议”上,讨论通过由华中工学院(师汉民),大连工学院(鲍绍箕),浙江大学(李加种)合作编写《金属切削动力学》一书,作为机械制造专业大学生选修课教材,并原则通过该教材的编写大纲。会议之后,编写人员分工编写,但由于出版工作无法落实,编写工作终于停止,《金属切削动力学》未能按时和读者见面。

本书是作者在为机械制造专业大学生开设的《金属切削动力学》选修课讲义的基础上,参照刀具教材编审组第三次编委(扩大)会议原则通过的《金属切削动力学》编写大纲,尽可能反映本学科的最新研究成果和生产实践经验,按照40学时的教学工作量编写的。

本书力求系统完整、逻辑推理清楚,分析论证由浅入深、循序渐进。着重基本概念论述,避免复杂公式理论推导,便于教学和阅读。本书可作为高等院校机械制造专业高年级大学生选修课教材和研究生参考教材,也可供高等院校、科研部门、工厂企业从事机械制造专业的教师、研究人员、工程技术人员参考。

全书共分五章,内容包括机床结构动态特性分析;切削颤振基本理论;切削过程动态特性分析;切削过程稳定性分析;切削颤振抑制技术及在线监控等。

本书在编写过程中得到浙江大学程耀东教授的热情支持并对全文仔细审阅,提出了许多宝贵意见,顾惠瑛副教授为本书的出版付出了辛勤的劳动。同时也得到兄弟院校许多同志的大力支持,特别是大连理工大学刘培德教授、山东工业大学艾兴教授、上海工业大学喻怀仁教授,多次鼓励和支持作者编写此书,喻怀仁教授还为本书作序。中国高校金属切削研究会也给于大力支持,在此,谨向他们致以衷心感谢。

由于作者水平有限,书中的缺点、错误在所难免,恳切希望读者和同行们帮助指正。

目 录

第一章 机床结构动态特性分析	1
1.1 机床结构动力学模型	1
1.1.1 集中参数模型	2
1.1.2 分布质量梁模型	4
1.1.3 有限单元模型	6
1.2 机床振动特性分析	8
1.2.1 单自由度系统的振动特性	9
1.2.2 多自由度系统的振动特性	20
1.3 物理系统的输入输出关系	27
1.3.1 常系数线性系统	27
1.3.2 系统对平稳随机信号的响应	31
1.3.3 系统对瞬态信号的响应	34
1.4 系统识别的时序分析方法	36
1.4.1 系统的数学模型	37
1.4.2 系统识别与 ARMA 模型	38
1.5 用激振法确定机床结构动态特性	41
1.5.1 机床结构动柔度表示法	41
1.5.2 机床结构动态特性实验分析	42
1.5.3 机床结构有效动柔度实验分析	51
1.5.4 用绝对激振法确定机床动柔度	55
1.5.5 等效系统常数的确定	58
1.6 机床结构动态特性试验技术	60
1.6.1 激振试验技术	60
1.6.2 切削试验技术	64

1.6.3	在线识别技术	67
1.6.4	模型试验技术	69
第二章	切削颤振基本理论	70
2.1	切削颤振的基本概念	70
2.2	再生型颤振	73
2.2.1	再生颤振形成过程	73
2.2.2	再生效应机理分析	74
2.2.3	多重再生效应	85
2.3	再生颤振的振纹分析	89
2.4	重叠系数及其时变特性	99
2.5	振型耦合效应	102
2.5.1	形成椭圆封闭轨迹的条件	105
2.5.2	幅值和相位差角对椭圆曲线的影响	106
2.6	振型耦合对再生效应的影响	107
2.7	受迫振动引起的切削颤振	108
2.7.1	位移干扰型切削颤振	109
2.7.2	外力干扰型切削颤振	113
2.8	切削颤振的非线性分析	120
2.8.1	切削过程的非线性因素	120
2.8.2	双频颤振与颤振的非线性分叉特性	129
2.8.3	时变切削过程颤振的时序分析	133
第三章	切削过程动态特性分析	139
3.1	动态切削过程的特点	139
3.2	动态切削力分析	142
3.2.1	动态切削力的来源	142
3.2.2	动态切削力的频域识别	144
3.3	切削动刚度的复数表达式	147
3.3.1	切入效应与切入力	147
3.3.2	切削动刚度的复数表达式	149

3.3.3	主振型方向上的切削动刚度	151
3.3.4	再生振动的低速稳定性效应	154
3.4	影响切削动刚度的因素	155
3.4.1	刀具切削刃钝圆半径的影响	156
3.4.2	后刀面与加工表面干扰的影响	159
3.4.3	刀具磨损的影响	161
3.4.4	前后角变化的影响	164
3.5	切削动刚度的实验研究方法	165
3.5.1	动态切削试验原理	165
3.5.2	激振法求切削动刚度	168
3.5.3	时间序列分析切削动刚度	179
第四章	切削过程稳定性分析	185
4.1	切削过程稳定性概念	185
4.2	切削动力学模型及其传递函数	188
4.2.1	早期的切削动力学模型及其传递函数	189
4.2.2	新近的切削动力学模型及其传递函数	192
4.2.3	变切削宽度条件下的切削动力学 模型及其传递函数	196
4.3	再生颤振的稳定性判据	198
4.4	影响再生颤振稳定性的因素	204
4.4.1	重叠系数对稳定性的影响	204
4.4.2	切削刚度系数为复数对稳定性的影响	207
4.4.3	内外调制相位差角对稳定性的影响	210
4.5	多自由度加工系统的稳定性图	217
4.6	振型耦合的稳定性判据	225
4.7	非线性切削过程的稳定性分析	229
4.8	切削过程稳定性的实验研究	236
4.9	磨削过程稳定性判据	242
4.9.1	磨削颤振特点	242

4.9.2 磨削加工系统框图	247
4.9.3 磨削过程稳定性判据	249
第五章 切削颤振抑制技术及在线监控	252
5.1 切削过程振动诊断方法	252
5.2 生产中常用的抑振措施与方法	254
5.2.1 合理选用切削用量和刀具角度	254
5.2.2 改变机床结构主振型方向	259
5.2.3 其他措施	261
5.3 跟踪动态切削力原理的消振方法	261
5.4 变速切削抑制再生颤振	267
5.4.1 变速切削抑制再生颤振原理	267
5.4.2 影响变速切削抑振效果的因素	269
5.5 金属切削颤振的在线监控	272
5.5.1 切削颤振的特征量分析	273
5.5.2 切削颤振预兆的在线识别	278
5.5.3 切削颤振的在线监控	281
参考文献	284

第一章 机床结构动态特性分析

机床是由许多零、部件组成的,不仅结构复杂,而且还有许多相对移动的滑动面和固定结合部。因此,对这种复杂结构的动态特性进行分析是比较困难的。目前有两种方法用来确定机床的动态特性:一种是理论分析与试验相结合的方法,即建立机床结构动力学模型,导出子结构的运动微分方程、应用模态综合方法将它们结合起来,便可得到整机结构的运动方程式;另一种是试验分析测定方法。

评定机床结构动态性能(抗振性和稳定性)常用的振动特性指标有:

1. 位移、速度或加速度等振动量的时间历程;
2. 静刚度或静柔度;
3. 指定频率范围内的动刚度或动柔度,动刚度的幅频特性、相频特性或幅相特性;
4. 各阶(到指定的阶次为止)固有频率及阻尼比;
5. 各阶主振型。

本章将着重介绍机床结构动力学模型建立的基本概念、机床振动特性分析,通过激振试验确定机床振动特性。

1.1 机床结构动力学模型

机床结构动力学模型是对机床进行动态分析和动态设计的基础,只有建立起既能确切描述实际机床结构的动态特性,又便于分析计算的动力学模型,才能对机床的动态性能进行分析计算,达到预定的目的。根据机床实际结构或设计图纸,经过不同的简化,可建立起不同型式的动力学模型。常见的有:集中参数模型、分布质量梁模型

和有限单元模型。

1.1.1 集中参数模型

对于复杂的机床结构,它的惯性(质量和转动惯量)、弹性和阻尼都是相当复杂的,必须作某些简化才能建立起可供实际应用的动力学模型。最方便的简化办法是,结构的质量用分散在有限个适当点上的集中质量来置换,结构的弹性用一些没有质量的当量弹性梁来置换,结构的阻尼假设为迟滞型结构阻尼,结合部简化为集中的等效弹性元件和阻尼元件,这样,整个结构就可简化为一系列集中的惯性元件、弹性元件和阻尼元件组成的动力学模型,简称为集中参数模型。

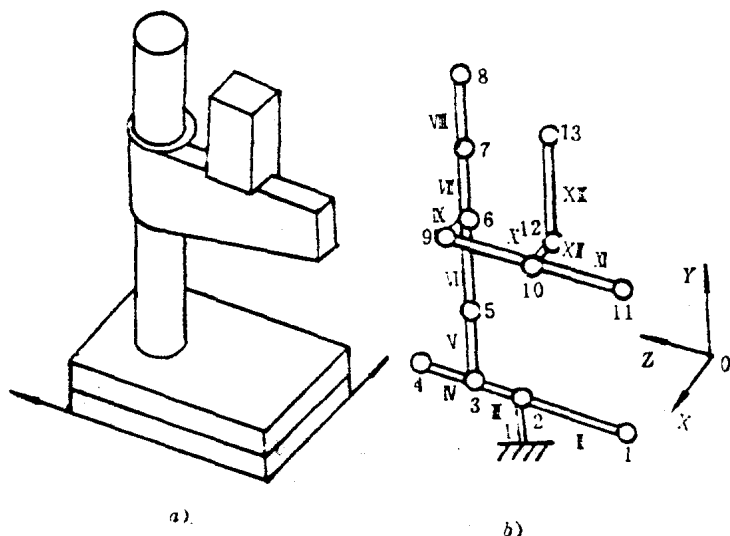


图 1-1 摇臂钻床的集中参数模型

图 1-1a)是摇臂钻床的结构示意图。它的集中参数模型表示在图 1-1b)。整台机床共划分为 13 个子结构,如图中标号 I、II... 所示,其中立柱划分为 4 个子结构(V ~ VII),摇臂划分为 2 个子结构(X、XI)等等。每个子结构都模型化为一根等截面的当量弹性梁和两个集中质量。当量弹性梁的弯曲刚度、扭转刚度和轴向刚度应与它所置

换的子结构的相应参数相等,从而由子结构的截面形状、尺寸和材料可计算出当量弹性梁的长度、横截面积、截面惯性矩等参数。当量梁的轴线与子结构的横截面中心重合,子结构的质量按重心不变的原则集中在当量弹性梁的两端。

机床零部件之间相互结合的部位为结合部。机床上的结合部有些是可动的,例如,工作台和床身的导轨结合,轴和轴承的结合等;有些是固定的,例如,立柱和底座的螺栓结合,锥度配合、压配合等。无论是可动结合还是固定结合都属于“柔性结合”,因为结合面上的接触压力总限制在一定的范围内,不可能无限大;接触表面又有一定的几何形状误差和微观不平度;有些结合面间还存在有润滑膜等等。当机床振动时,结合面间会产生微小的相对位移或转动,使结合部既储存能量,又消耗能量,表现出既有弹性又有阻尼。结合部的这种特性将对机床的动态性能产生影响,使机床阻尼增加,固有频率降低。因此,要建立机床结构的动力学模型,还必须建立起结合部的动力学模型,结合部的弹性和阻尼可用等效弹性和等效阻尼器来描述,如图1-2所示。结合部的弹性和阻尼性质可直接应用测试数据或通过试验与分析计算相结合来确定。

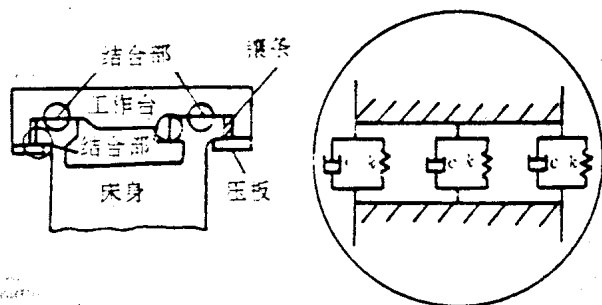


图 1-2 结合部的动力学模型

集中参数模型的基本单元是两端有集中质量的当量弹性梁,每

一个子结构都简化为这样一根单元梁,只是由于各子结构的形状、尺寸不同,因而置换各子结构的单元梁的参数也不相同而已。只要推导出一根单元梁的运动方程,代入不同参数后就可以得到所有子结构的运动方程,然后应用机械阻抗法或模态综合法将各子结构的动态特性耦合起来,就可以得到整台机床结构的动力学模型和动态特性。子结构运动方程式的建立和结构动态特性的综合方法详细介绍可参考有关资料[2]。

1.1.2 分布质量梁模型

集中质量模型,特别是子结构较大时,将质量集中在当量单元梁的两端是比较粗糙的,不可能很好的逼近结构的动态特性,精度较低。增加子结构数目,改进子结构质量的简化方式都可以提高模型的模拟精度。将子结构简化为质量均匀分布的等截面梁就是一种更加接近实际、计算也比较简单的方法,这种模型称为分布质量梁模型。例如,将图 1-3 所示的卧式铣床简化为分布质量模型,其动力学模型

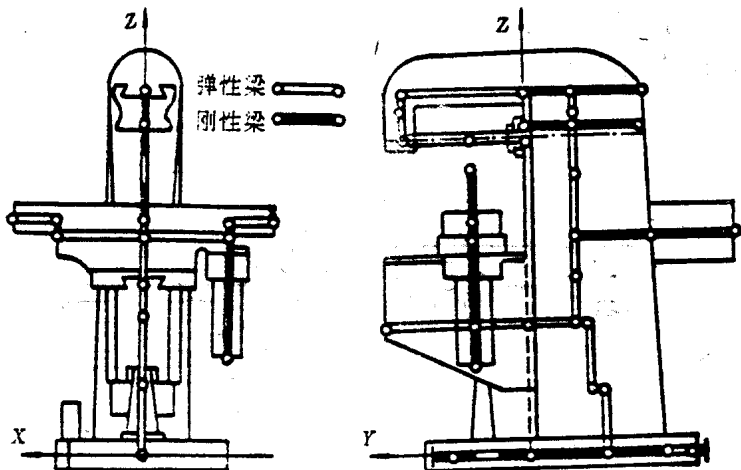


图 1-3 卧式铣床的结构简图

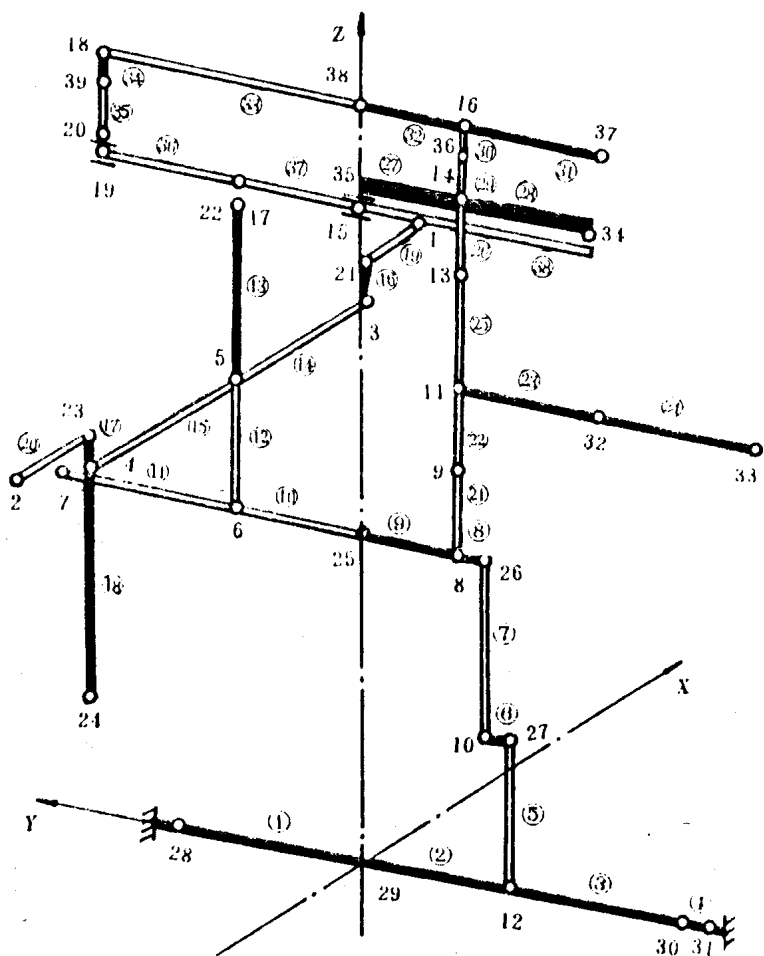


图 1-4 卧式铣床的分布质量梁模型

就可以用图 1-4 来表示。它总共划分为 37 个子结构,采用两种梁——弹性梁和刚性梁。弹性梁为分布质量的等截面梁,其当量长度、

横截面积、截面惯性矩等参数由相应子结构的形状和尺寸确定,为了保证模型在空间的相对位置与实际机床一致,弹性梁之间采用刚性梁结合,如图中的粗实线所示,它没有弹性只能作刚体运动。此外,象悬伸安装的电机等,其刚度很高,本身的弹性变形对整机影响很小,也可简化为刚性梁。

比较分布质量梁模型与集中参数模型,可以看出它们之间的主要差别仅是各子结构的质量简化方式不同,因此,当应用分布质量梁模型时,推导子结构的振动特性的整个过程都和集中参数模型子结构的振动特性的推导没有什么差别,只是分布质量梁模型的振动特性通常用动柔度的形式表达,并可根据弹性体振动理论直接求出^[2]。

1.1.3 有限单元模型

有限单元是一种数值计算方法,在很多科学技术领域中得到广泛应用,有限单元模型同上述两种模型相比,是模拟实际结构的精度最高的一种理论模型,模拟精度随单元的増加和逼近模式的复杂性而提高,但计算工作量增大。有限单元模型,简单地说,就是将结构分割成有限个离散的单元,而每个单元则又是连续的。例如图 1-5 所示的一台坐标镗床的有限单元模型,它由 227 个矩形平板单元组成。对每个矩形平板单元进行分析,然后加以综合。

有限单元法的基本过程是这样的:对求解区域作“区域剖分”,即划分单元;对单元进行分片插值,选定有限单元的逼近模式;构造单元的刚度矩阵、惯性矩阵、等效节点力列阵等特征矩阵;集合单元的各特征矩阵为总刚度矩阵、总惯性矩阵、等效节点力列阵,从而构成整个结构的有限单元方程组;求解有限单元方程组,获得问题的解答。

“区域划分”就是将被分析的结构分割为若干某种几何形状的小块,每一小块称为一个单元,一般并不要求各单元的形状相同,尺寸相等。在结构分析中最常用的是三角形平板单元和矩形平板单元。相邻单元之间,假设仅以其共同边界上的有限个节点(如三角形单元的三个顶点)联结起来,在这样的剖分下,如果能够求得每一个单元