

〔联邦德国〕 M. 韦克 K. 泰佩尔 著



金属切削机床 的动态特性

机械工业出版社

金属切削机床的动态特性

〔联邦德国〕 M. 韦克 K. 泰佩尔 著

张慧聪 李兴福 译

姜勋昭 校



机械工业出版社

本书详细论述了以下几方面问题：机床动态特性试验的重要意义；机床产生颤振的原因和消振措施；国际上几种切削试验鉴定机床的方法，对车、铣、镗、磨、刨、插等各种类型机床所作试验结果的分析、计算与比较；采用测定动态柔度频率响应法鉴定机床的方法、理论关系式、测量技术、测量范围、测量结果以及鉴定验收标准等，并就这些方法的局限性与今后的发展阐明了看法，既有细致的理论分析，又有作者多年积累的丰富经验。

本书可供广大从事机床设计、制造和基础理论研究的工程技术人员以及教学工作者参考。

Dynamisches Verhalten spanender

Werkzeugmaschinen

M. Weck, K. Teipel

Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg,

New York, 1977

金属切削机床的动态特性

[联邦德国] M. 韦克, K. 泰佩尔 著

张慧聪 李兴福 译

姜勋昭 校

机械工业出版社出版 (北京马厂门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $7^{5/8}$ 字数 158 千字

1985 年 11 月北京第一版 · 1985 年 11 月北京第一次印刷

印数 0,001—6,170 · 定价 1.85 元

统一书号：15033·5904

译者序

机床动态特性试验已成为我国当前日益受到重视的一个研究课题，因为它与机床的设计、制造以及使用的质量有着极为密切的关系。我国机床制造业历来是很重视机床制造精度的，但是比较偏重于机床静态几何精度的提高，再加上采用机床传统的设计方法，因此对其动态特性的好坏，尚缺乏深入的了解和研究，以致最后制成的产品，在实际使用中往往不能充分发挥其加工精度和生产效率所应有的水平。

近年来，我国已开始重视对机床动态特性的试验研究。全国有关的机床研究单位和高等院校，相继建立了专门的机床动态特性试验室，开展了这方面的科研工作，并取得了一定的成果。本书作者之一M. 韦克教授，是联邦德国阿亨工业大学机械制造系机床试验室负责人之一，曾于1980年9月应我国机械工程学会的邀请前来我国进行讲学与座谈，得到了很好的反映。在本书中，M. 韦克和K. 泰佩尔比较系统地论述了鉴定机床动态特性的意义和现状、机床产生振动的原因及其影响因素；当前国际上通过切削试验和采用测定机床动态柔度的频率响应来鉴定机床特性的方法；对车、铣、镗、刨、磨、插等各类机床的具体测试方法，测试结果的分析、计算和比较；消除机床颤振的措施；用柔度频率特性鉴定机床的理论关系推导、测试方法、测量规范以及鉴定验收标准等问题，并对本方法的应用范围与今后发展表示了看法。这些内容既有一定的理论分析，又有作者本人多年在试验研究

工作中所积累的丰富经验。目前，由于我国在这方面的技术书籍和资料不多，我们相信，本书的翻译出版，将对广大从事机床设计、制造和基础理论研究工作的工程技术人员以及教学工作者有所帮助。

感谢已故姜勋昭老师审校了本书，为保证译文的忠实，付出了很大心血，本书将成为对他的永恒的纪念。

对 625 研究所乐国际同志在本书译稿的修改工作中所给予的帮助，特别是技术上的指导，也在此表示衷心的感谢。

因译者水平有限，译文错误与不当之处在所难免，祈望读者批评指正。

前 言

为了鉴定和评价机床的全部重要性能，需要客观地检测与表示这些性能的方法。对切削机床而言，除几何学、运动学、热学与声学等方面的性能以外，特别值得注意的是机床切削点的柔度特性，其中动态柔度特性（狭义而言，就是再生颤振倾向）尤为重要。因为这种特性往往会对机床功率的利用产生难以预料的影响。

由于数控机床应用日广，早在六十年代起，就对机床颤振稳定性的鉴定与表示方法，以及据此采取的改善颤振稳定性的相应措施，进行了广泛的探索和研究。

问题之所以复杂，在于必须考虑机床动态特性与切削过程传递特性的相互关系。近年来，在这两方面都做了大量研究工作，其间的关系已基本搞清。

鉴于国际上正着手制订切削机床动态特性验收标准，本书的题目就有了高度的现实意义。值得庆幸的是，有了本书这样的对现有各种鉴定方法作的严谨评述，以及对最新研究成果的清晰阐述。因为这正是机床制造厂和机床用户都同样求之不得的资料。

H. 奥匹茨

1977 年 7 月于阿亨

作 者 序

本书旨在阐明金属切削机床产生振动的原因与影响以及消振措施，从而向机床制造厂为设计动态特性优良的机床提供参考，并向机床用户介绍防止颤振与最佳利用机床的方法。

本书还论述了一些机床动态特性鉴定方法。用这些方法，机床可按动态性能要求客观而定量地划分质量等级。机床制造厂可据此保证机床产品的动态性能，机床用户则可根据此客观地进行验收。

本书的大部分内容已在1971年机床制造厂协会(VDW)召开的设计师工作会议上作为同名会议资料发表过。现对主要章节重加整理，并补充了最新研究成果。

机床制造厂协会的切削机床动态特性鉴定工作组的大力支持，对阿亨工业大学机床与企业管理实验室(WZL)的研究工作起了关键的作用，并确保了这一复杂课题的研究得以面向实际。

在此，对WZL实验室中参加本书编纂工作以及以往研究工作有助于本书著述的新老机床振动学者们表示感谢，特别对K.克伦佩尔先生、E.普勒斯勒先生和A.克尔斯登先生表示深切的谢意。

M. 韦克 K. 泰佩尔

1977年7月于阿亨

所用符号

大写字母

B	毫米	宽度 (加工区)
B	毫米	切削宽度*
B	赫	滤波器带宽
D	—	阻尼量
F	毫米	弹动量
F	牛顿	力
$G_{ij}(j\omega)$	微米/牛顿	柔度频率特性
		i — 力的坐标方向
		j — 位移的坐标方向
$G_o(j\omega)$	—	开环频率特性
$[G]$	微米/牛顿	机床柔度频率特性矩阵
H	毫米	高度 (加工区)
$K_{ob}(j\omega)$	牛顿/微米 ²	单位动态切削刚度频率
L	毫米	长度 (加工区)
M	牛顿米	力矩
N	—	表面法向矢量
P	千瓦	功率
P_{dyn}	千瓦	动态功率特性值
SH	%	总概率
$S_{xx}(\omega), S_{yy}(\omega)$	—	功率谱

* 按 DIN 6580 《啮合量 e 》。

$S_{xy}(j\omega)$	—	正交功率谱
T	秒	分析时间, 观察时间
T_i	秒	无效时间

希腊字母

α	度	切削力角度
α	度	后角
β_{orth}	度	动态切削力方向与切屑厚度变化方向之间的角度
γ	度	前角
γ^2	—	相关函数
δ	度	切屑厚度内外表面变化量之间的角度
η	—	效率
κ	度	刀具基准系统中的主偏角
κ_M	度	机床坐标系统中的主偏角*
λ	度	刃倾角
μ	%	重叠系数
φ	度	$x-y$ 平面内的刀具安装角(绕旋转轴为数学正)
φ	度	位移和力之间的相移
ω	1/秒	角频率
ω_0	1/秒	固有角频率

小写字母

a	毫米	切削深度
-----	----	------

* 为了明确规定刀具刃边在机床坐标系统中的位置, 应用了角度 κ_M 。与 DIN 6581 中规定的主偏角 κ 相反, κ_M 不以刀具的刀刃平面和工作平面之间的角度为基准 (刀具基准系统), 而以刀具刀刃与垂直于刀具或工件平面之间的角度为基准, 从正 z 轴方向测量。

X

b	毫米	宽度
b	毫米	切削宽度
b_z	毫米	铣刀刀刃分度尺寸
c	牛顿·秒/米	阻尼系数
d_{ij}	—	方向系数
d	毫米	直径
f	赫	频率
f_o	赫	固有频率
f_R	赫	谐振频率
h	毫米	高度
k	牛顿/米	刚度系数 (弹性系数)
k_{ob}	牛顿/微米 ²	单位动态切削力系数
k_g	牛顿/微米	定向矢量轨迹曲线的最大负实数部分的倒数 (定向刚度最小值)
k_s	牛顿/米 ²	单位切削力
j	—	$\sqrt{-1}$
m	公斤	质量
n	转/分	转速
r	毫米	半径
s	—	标准偏差
s	毫米	进给量
t	秒	时间
u	毫米	动态切削厚度
u	毫米/分	进给速度
v	米/分	切削速度
x	微米	变形量、位移
x, y, z	—	坐标方向

<i>z</i>	—	刀刃数
	<u>下标</u>	
<i>B</i>		钻头
<i>b</i>		宽度 (以切削宽度为基准)
<i>c</i>		正交方向 (垂直于切削厚度的方向)
<i>c</i>		颤振—
<i>cr</i>		极限—、临界—
<i>d</i>		直接 (切削厚度方向)
<i>dyn</i>		动态
<i>F</i>		铣刀
<i>Fu</i>		卡盘
<i>g (ger)</i>		定向的
<i>ge</i>		逆铣
<i>gl</i>		顺铣
<i>el</i>		电
<i>i</i>		切屑内表面变化, 切入
<i>i, j</i>		可变数
<i>I (Im)</i>		虚数
<i>K</i>		触点
<i>Lage</i>		位置耦合
<i>m (mittel)</i>		平均—
<i>Ma</i>		机床
<i>min</i>		最小的
<i>neg</i>		负的
<i>o</i>		切屑外表面变化, 切出
<i>pos</i>		正的
<i>R (Re)</i>		实数

Ⅺ

<i>res</i>	总的
<i>Rech</i>	计算
<i>S</i>	砂轮
<i>Sp</i>	主轴
<i>stat</i>	静的
<i>St</i>	干扰-
<i>st</i>	稳定的
<i>vergl</i>	比较
<i>vers</i>	试验
<i>W</i>	工件
<i>x, y, z</i>	以坐标轴为基准
<i>z</i>	刀刃数
<i>zul</i>	容许的

目 录

所用符号

1. 引言	1
2. 切削机床验收条件的现状	3
2.1. 验收条件概述	3
2.2. 动态特性验收条件详述	10
3. 对颤振的各种影响	13
3.1. 振动原因概论	13
3.1.1. 他激振动	13
3.1.2. 自激振动	14
3.1.2.1. 切削力的背景噪声	14
3.1.2.2. 切削速度方向上的振动; 切削力-切削速 度下降的特性	15
3.1.2.3. 积屑瘤的形成	16
3.1.2.4. 再生效应	16
3.1.2.4.1. 用一定几何形状的刀具切削时出现的 再生效应	16
3.1.2.4.2. 磨削过程的再生效应	21
3.1.2.5. 位置耦合	22
3.1.3. 结论	22
3.2. 振动原因的识别	23
3.3. 颤振特性的影响因素	25
3.3.1. 机床的影响	26
3.3.1.1. 地基和安装条件	26
3.3.1.2. 机床部件的位置	28

3.3.1.3. 主轴转速	30
3.3.1.4. 溜板和工作台的运动	31
3.3.1.5. 松动、反向不灵敏区、非线性影响、预紧力	32
3.3.1.6. 工作温度	35
3.3.2. 与方向性有关的影响	35
3.3.2.1. 车削过程中的主偏角	37
3.3.2.2. 刀具-工件的配置	37
3.3.3. 工件-刀具的影响	40
3.3.3.1. 工件柔度	40
3.3.3.2. 工件质量	41
3.3.3.3. 工件直径和刀具直径	42
3.3.3.4. 工件夹紧	43
3.3.3.5. 刀具柔度、刀具夹紧、刀具尺寸	43
3.3.4. 切削过程的影响	46
3.3.4.1. 工件材料的影响	50
3.3.4.2. 刀具几何形状(后角、前角)	51
3.3.4.3. 磨损情况	52
3.3.4.4. 刀尖半径	53
3.3.4.5. 切削速度	54
3.3.4.6. 进给量	55
3.3.4.7. 确定极限切削宽度时的滞后	56
3.3.4.8. 刀具-切削材料的配置、多刃刀具的不均匀性、冷却润滑剂	56
3.3.5. 改善颤振特性的措施	57
3.3.6. 各种可能的机床试验方法的结论和分类	59
4. 机床的加工试验鉴定法	62
4.1. 极限切削功率的测定	62
4.2. 各国在加工试验方面的进展	64

4.2.1. BAS 加工试验	66
4.2.1.1. 卡盘车床和顶针车床	69
4.2.1.2. 铣床和镗床	73
4.2.2. UMIST 加工试验	76
4.2.2.1. 顶针车床	77
4.2.2.2. 卡盘车床和半自动卡盘车床	80
4.2.2.3. 仿形车床	82
4.2.2.4. 立式铣床	83
4.2.2.5. 卧式铣床	83
4.2.2.6. 卧式镗铣床	86
4.2.2.7. 立式车床	89
4.2.3. VDF 加工试验	91
4.3. 确定加工条件的一般标准	92
4.3.1. 卧式铣床	94
4.3.2. 升降台式立式铣床	95
4.3.3. 龙门铣床	100
4.3.4. 立式车床 (单柱式和龙门式)	101
4.3.5. 卧式镗铣床	102
4.3.6. 摇臂钻床、立式钻床	103
4.3.7. 刨床、插床	104
4.3.8. 磨床	105
4.4. 结论	106
5. 用测定的柔度频率特性鉴定机床	107
5.1. 理论关系的推导	109
5.1.1. 柔度特性表示法	109
5.1.2. 颤振回路的稳定性分析	118
5.1.2.1. 再生效应	118
5.1.2.2. 位置耦合	125
5.1.3. 关于颤振回路稳定性与复杂切削过程传递特性	

关系的分析研究	127
5.2. 测试技术	129
5.2.1. 分析方法	129
5.2.1.1. 用正弦信号分析	129
5.2.1.2. 用随机信号分析	130
5.2.1.3. 用非周期信号分析	135
5.2.2. 各种试验信号的振型分析	136
5.2.2.1. 正弦试验力信号的振型分析	136
5.2.2.2. 随机信号与非周期信号的振型分析	137
5.2.3. 产生各种测试力信号的激振器	139
5.2.4. 各种激振器与分析方法的比较	145
5.3. 柔度试验注意事项	146
5.3.1. 静态预压力与动态激振力的选择	146
5.3.2. 频率特性测量误差的修正	148
5.4. 根据测定的柔度频率特性鉴定机床的方法	155
5.4.1. 测量规范	156
5.4.1.1. 测量点的位置	157
5.4.1.2. 机床的工作状态	168
5.4.1.2.1. 机床的安装状态	170
5.4.1.2.2. 机床的运动状态	171
5.4.1.2.3. 机床的预紧状态	174
5.4.2. 分析处理规范	177
5.4.2.1. 刚度特性值的确定	178
5.4.2.2. 极限切削参数的计算	180
5.4.2.3. 动态功率特性参数 P_{dyn} 的推导	187
5.4.2.4. 特性参数的统计求法	196
5.4.3. 鉴定标准	198
5.4.3.1. 基准值的选择	198
5.4.3.2. 动态功率基准特性值	205

5.4.3.2.1. 车床的动态功率特性	206
5.4.3.2.2. 铣床的动态功率特性	207
6. 本方法的应用范围	211
7. 总结	215
8. 参考文献	217