

JICHUANG

机床

第二册

设计与计算

[联邦德国] M. 威克 著

机械工业出版社

机 床

第 二 册

设 计 与 计 算

[联邦德国] M.威克 著

沈烈初 译



机 械 工 业 出 版 社

本书是《机床》的第二分册，主要论述机床各部件的设计与计算，包括机身部件、基础、导轨、轴承、主传动箱及主轴箱等。书中采用了最新的试验研究成果与数据，重点论述了静态、动态及热特性的设计方法。本书内容新颖，插图丰富，反映了近代的机床设计观点，是有关专业的教学、科研及设计的理想参考书之一。

《机床》分四册出版：第一册——机床种类、结构形式和使用范围；第二册——设计与计算；第三册——自动化和控制技术；第四册——测试技术、试验与评价。

Werkzeugmaschinen

Band 2

Konstruktion und Berechnung

Prof. Dr. -Ing. Manfred Weck

Zweite, neubearbeitete und erweiterte Auflage

VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1981

* * *

机 床

第 二 册

设计 与 计 算

[联邦德国] M.威克 著

沈烈初 译

*

责任编辑 林佩珊

封面设计 刘 代

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 · 印张9³/₄ · 字数250千字

1987年3月重庆第一版·1987年3月重庆第一次印刷

印数 0,001—4,200 · 定价：2.85元

*

统一书号：15033·6546

译者的话

阿亨大学教授M. 威克博士专著《机床》共分四册。本册系专门论述机床的设计与计算, 包括基础部件、床身、地基、导轨、轴承、主传动箱及主轴箱等主要部件的设计与计算。作者采用了最新的试验研究成果与数据。为了满足加工的高精度、高效率、低噪声的要求, 现代化机床向高刚度、大功率及高速度方向发展, 特别是数控机床、加工中心及柔性生产单元的出现, 又要求机床具有高可靠性。因此, 机床设计也由传统的类比设计、经验设计转移到具有科学数据、采用现代化设计方法(包括计算机辅助设计)的基础上来, 以求得最佳的设计结构。本书内容不仅有一般的静刚度、静精度的设计计算, 而且有大量篇幅叙述动刚度、动精度的设计计算。因此本书是一本从事机床专业的教学、科研及设计的高级科技人员的理想, 参考书之一。

由于译者专业及德文水平较低, 翻译中肯定有很多不正确之处, 希望读者予以指正。本书承北京密云机床研究所张世莹同志校对, 在此一併致谢。

沈烈初

1985年10月

《机 床》前 言

机床是金属加工工业中最重要的生产手段。没有机床的发展，各工业国家目前所达到的高生活标准将是不可想象的。联邦德国的机床生产在世界上占领领先地位。所生产的机床占本国整个机械制造业总销售额的10%左右；机床制造业的从业人员占机械制造业的10%。

机床的应用范围很广，其设计结构和自动化程度是多种多样的。按照工艺方法，其广阔领域涉及铸造机械、锻压机械、切削机床（如金属切削机床和电腐蚀加工机床）直到接缝机。根据被加工工件的不同及其批量大小，这些机械具有不同的自动化程度和不同的柔度。因此，市场上既供应单能和专用机床，也供应应用范围广泛的万能机床。

基于对工效和精度的要求日益提高，机床设计师必须设计出结构最佳的各种机床零部件。他应具有机床零部件的物理性能方面的渊博知识。包罗万象的程序库目前已能使设计师利用计算机来进行设计。测试技术分析和客观评价方法，为获得工效和精度判据，如机床的几何、传动、动静态、热和声学特性等，并为作出必要的改进提供了可能性。

机床自动化的不断发展使控制技术成为一个范围广泛的学科。近年来电子技术的发展对机床的控制起着具有决定性影响的作用。微处理器和过程计算机能解决从前不可设想的控制技术上的难题。机械化和自动化的趋势还包括材料的运输和机床的上、下料。在这方面的深思熟虑导致了设计出适用于大量生产的自动线和适用于中小批生产的柔性制造系统。

本“研究和实践”丛书以《机床》为书名，分四册出版，可供加工技术专业的学生和机械制造业中各有关专业人员参考。此外，本丛书还以帮助用户选用合适机床（包括控制装置）为目

的。本丛书还向机械制造者介绍了设计机械零部件、驱动和控制装置的最佳途径，以及根据测试技术分析和客观的评价方法作出改进的可能性。

本书的内容系根据莱因维斯特法伦阿亨工业大学的“机床”讲课教材编纂而成，各分册的书名为：第一册——机床种类、结构形式和使用范围；第二册——设计与计算；第三册——自动化和控制技术；第四册——测试技术试验与评价。

M. 威克

1978年9月于阿亨

第二册“设计与计算”第二版前言

机器零、部件的有针对性与可靠的设计结构是一台机器在使用时获得高效能与省去费时的修改与匹配工作的前提。这一点特别对要求在承受静负荷、动负荷及热负荷的条件下保证获得很高精度的机床很重要。

本书（第二册）的目的是，为设计师提供与现代技术水平相适应的机床零、部件设计结构与计算所需要的设计辅助资料。

满足正确要求的机床零件的设计结构可提高机床加工精度与效率，因此，对被加工件的质量与经济生产有重要影响。

本书将分别叙述：支承与机身、基础、轴承及导轨系统、主传动的电机，有级和无级变速机构及离合器。送进机构因为从控制技术观点出发将在第三册中详细叙述。根据详细设计的要求，本书将既讨论常规的解决方法，也叙述最新的解决方案。

详细阐述适应于加工任务的机器负载，无疑对机器设计是十分必要的。这将在W. 柯尼希的专著“工艺与制造方法”中论述。

本册第二版 2.7 节低噪声设计是新增加的，静压轴承计算这一节有很多补充与扩展。

M. 威克

1980年10月于阿亨

公式符号与缩写

大写字母			I_A	A	电极电流
A	mm^2	面积	I_P	mm^4	极面转动惯量
A	mm	轴距	I_T	mm^4	扭转阻力
A_F	Ns/m^3	辐射系数	I_x, I_y	mm^4	轴面转动惯量
A_R	mm^2	摩擦面积	J	kgm^2	转动惯量
B	mm	宽度	K	—	振动特征值
B	—	转速范围	K	$\text{N}/\mu\text{m}$	刚度
B_d	—	直径范围	L	mm	长度
B_0	—	无级传动转速范围	L	dB	声级
B_{st}	—	有级传动转速范围	L_{WA}	dB	声功率级
B_s	—	速度范围	M	Nm	扭矩
C	N	离心力	M	—	轴承特性值
C	—	电动机常数	M_B	Nm	加速力矩
L	mm	长度	M_{Last}	Nm	负载力矩
D	mm	轴承外径	M_{Leer}	Nm	空载力矩
D	—	阻尼值	M_{mot}	Nm	电动机力矩
D_W	mm	滚动体直径	M_s	Nm	操纵力矩
E	N/mm^2	弹性模量	M_{th}	Nm	传递力矩
F	N	力	P	W	功率
F_F	N	导向力	P	W	声功率
F_M	N	质量力	P_{mot}	W	电动机功率
F_P	N	连杆力	P_R	W	摩擦功率
F_R	N	摩擦力	Q	cm^3/s	流量
F_s	N	冲压力, 在冲程方向的力	Q_{mot}	cm^3/s	液压马达吸入量
F_z	N	每个滚动体负载	Q_P	cm^3/s	液压泵排量
G	$\mu\text{m}/\text{N}$	柔度	Q_s	cm^3/s	需要油量
$G(j\omega)$	$\mu\text{m}/\text{N}$	柔度频率特性	R	Ω	阻力
I	A	电流	R	Ns/cm^5	液阻
			R	—	在一个十位指数中分组数
			R	dB	声绝缘量

$R_A \text{ Gen}$	Ω	发电机欧姆电枢电阻			$(D+d)/2$
			d_{max}	mm	最大工件直径
$R_A \text{ Mot}$	Ω	电动机欧姆电枢电阻	d_{min}	mm	最小工件直径
			d_{01}	mm	齿轮 1 分度圆直径
S	m^2	声辐射面积			径
T	K	温度	d_{02}	mm	齿轮 2 分度圆直径
T	s	时间常数			径
U	V	电压	e	mm	偏心
U	mm	节点位移	f	Hz	频率
$\dot{U}$	mm/s	节点速度	f_x	Hz	滚动频率
$\ddot{U}$	mm/s ²	节点加速度	h	mm	高度
$U_A \text{ Gen}$	V	发电机电枢电压	h	mm	冲程
$U_A \text{ Mot}$	V	发电机电枢电压	h	mm	隙缝高度
U_K	—	传递系数	i	—	传动比
V	cm^3	吸入或输送量	i	A	阀门流量
V	cm^3	体积	i	—	滚动体排数
V_{Mot}	cm^3	电动机吸入量	k	N/ μm	刚度
V_P	cm^3	泵输送量	k	—	标准数列中标准
W_A	W	外界功			数位置
W_B	W	加速度功	k	—	修正系数
W_I	W	内功	k	—	重叠比
W_{Gen}	W	总操纵功	k	—	常数
W_{Reib}	W	摩擦功	k_A	N/ μm	前轴承刚度
Z	Ns/m	阻抗	k_B	N/ μm	后轴承刚度
小写字母			k_F	N/ μm	弹簧刚度
a	mm	叶片厚度	k_h	N/ μm	由于主轴箱刚度
a	mm	悬伸长度			引起力传入位置
a	m/s ²	加速度			的刚度
b	mm	宽度	k_L	N/ μm	由于轴承刚度引
b	mm	轴距			起力传入位置
c	m/s	声速			的刚度
c	—	算术级跳	k_{SP}	N/ μm	由于主轴刚度引
c	Ns/cm	阻尼常数			起力传入位置
d	$\mu\text{m}/\text{N}$	柔度			的刚度
d	mm	直径	l	mm	泄漏长度
d_m	mm	平均轴承直径	l	mm	劈缝长度

l_c	mm	滚动体承载长度	y_{SP}	μm	由于主轴（主轴 部件）的柔性 而产生的径向 主轴位移
m	—	表面特性值			
m	mm	模数			
m	kg	物体质量			
m'	—	劈缝比缩	y_1, y_2	—	标准辅助量
n	r/min	转速	z	—	油囊数
n_P	r/min	泵转速	z	—	活塞数, 叶片数 及齿数
n_{0ao}	r/min	次级调节时空载 转速	z	—	台阶数
n_{0Pr}	r/min	初级调节时空载 转速	z	—	每排滚动体数量
			z_b	mm	齿宽
p	%	切削速度下降			
p	N/mm ²	表面压力	注脚		
p	bar	压力	A		电枢
p	—	极对数	An		以起动运转为基准的
p_p	bar	泵的油压	AP		工作点
r	mm	半径	B		加速度
s	mm	路程	Gen		发电机
s	mm	壁厚	K		毛细管, 活塞
s	—	滑动, 滑差	L		轴承, 负载
t	s	时间	Mot, M		电动机
t_R	s	摩擦时间	N		与额定运转为基准的
v	m/s	速度	P		泵
v_0	m/s	上限速度	T		袋, 囊
v_u	m/s	下限速度	Vent		阀
v_s	m/s	流动速度	a		轴向的
x	—	标准数值	dyn		动力的
y	μm	总径向偏移量	e, eff		有效的
y_L	μm	由于轴承（轴承 部分）的柔性 而产生径向主 轴位移	f		激磁
			ges		总的
			i		感应
			kipp		相关于倾覆点, 相关于临界 点
y_K	μm	由于轴承周围部 分（主轴箱） 柔性产生的径 向主轴位移	max		最大的
			mech		机械的
			min		最小的

o	无负载情况, 空载		λ	m	波长
opt	最佳		μ	—	质量比例
r	径向的		μ	—	摩擦系数
s	同步		ν	cm ² /s	运动粘度
stat	静态的		ν	—	谐振回路放大系数
th	理论的				数
u	圆周方向		ξ	—	节流比例
v	前		ψ	—	相对偏移
verl	损失		ψ_0	度	负载区的角度
			φ	—	几何级跳
			φ	度	转角
{...}	矢量		ρ	g/mm ³	密度
{...} ^T	交变矢量		σ	N/mm ²	垂直应力
{...}	矩阵		σ	—	辐射度
{...} ^T	交变矩阵		δ	K	温度
			δ_0	—	温度场
希腊字母			τ	s	时间常数
α	度	角	τ	N/mm ²	剪切应力
α	度	接触角	ω	1/s	旋转频率
α	度	斜盘调整角	ω	1/s	轴的角速度
α	$\mu\text{m}/\text{m}$	倾角	ω_A	1/s	工作点的角速度
α	—	表面特性值	ω_m	1/s	滚动体组的角速度
β	—	弹性系数			度
δ	μm	支承弹性	$\omega_{1/2}$	1/s	传动、被传动角速度
δ	μm	弹簧行程			速度
δ_s	μm	弹簧的弹性部分	Ω_0	1/s	旋转自振频率
δ^*	μm	无间隙支承的弹性	ΔL	dB	声级差
		性	Δn	1/s	转速下降
δ_{max}	μm	垂直滚子的弹性	D_{npr}	min ⁻¹	初级调整时转速
ϵ	—	泵效率			下降
ϵ	—	伸长	D_{aso}	min ⁻¹	次级调整时转速
η	Ns/cm ²	动力粘度			下降
κ	—	阻力比例	ϕ	Vs	磁通

目 录

公式符号与 缩 写

1. 引 言	1
2. 机身与机身部件	6
2.1 对机床机身的要求	6
2.2 机身部件的材料	7
2.3 静力载荷的判据	8
2.3.1 静力载荷	8
2.3.2 静力特征值	9
2.3.3 力流与变形分析	11
2.3.4 结构形状的设计观点	12
2.3.4.1 抗弯曲截面形状	12
2.3.4.2 抗扭曲截面形状	14
2.3.4.3 加筋	14
2.3.4.4 开孔	21
2.3.4.5 力的传递	21
2.3.4.6 接缝连接	23
2.3.5 设计举例	27
2.4 承受动力载荷时的设计判据	30
2.4.1 动力载荷	30
2.4.2 动力特征值	31
2.4.3 结构造型的设计观点	33
2.4.3.1 机身中的阻尼	34
2.4.3.2 辅助质量阻尼器, 摩擦阻尼器	36
2.5 热载荷的判据	38
2.5.1 热载荷	38
2.5.2 热特征值	41
2.5.3 结构的设计观点	41
2.6 机身部件的计算	44

2.6.1	原理	44
2.6.2	有限元法的原理	45
2.6.2.1	单元刚度矩阵的推导	46
2.6.2.2	单元刚度矩阵叠加为总刚度矩阵	50
2.6.3	用有限元法计算可能性的概述	52
2.6.4	计算举例	54
2.6.4.1	机身部件静力特性计算	54
2.6.4.2	机身部件动力特性计算	54
2.6.4.3	机身部件热特性计算	59
2.7	低噪声机床设计	60
2.7.1	原理	61
2.7.2	降低噪声的举例	68
3.	机床基础设计	74
3.1	具有足够固有刚度的机床的基础设计	76
3.2	压力加工机床的安装及基础设计	79
3.3	不具备足够固有刚度的精密加工机床的基础设计	83
3.4	不具备足够固有刚度的大型机床的基础设计	84
4.	导轨与支承	89
4.1	液体动压滑动导轨与滑动轴承	92
4.1.1	摩擦与润滑原理	92
4.1.1.1	粘度的概念	92
4.1.1.2	液体动压的形成	95
4.1.1.3	摩擦的种类	103
4.1.1.4	斯特里白克 (Stribeck) 曲线	104
4.1.1.5	爬行现象	105
4.1.1.6	材料副及磨损影响	108
4.1.2	液体动压滑动导轨	111
4.1.2.1	导轨元件及其特点	112
4.1.2.2	夹紧装置	117
4.1.2.3	导向误差的补偿	119
4.1.2.4	静力与动力特性	121
4.1.3	液体动压滑动轴承	122
4.1.3.1	压力建立与起动过程	123

4.1.3.2	结构形式	124
4.1.3.3	机床中液体动压主轴—轴承系统	128
4.2	液体静压滑动导轨与轴承	130
4.2.1	原理、功能原理及概念	130
4.2.1.1	供油系统	133
4.2.1.2	轴承计算	136
4.2.1.3	动态特性	146
4.2.1.4	所需能量及液压回路	148
4.2.2	液体静压滑动导轨	152
4.2.2.1	设计特点及结构形式	152
4.2.2.2	应用举例	155
4.2.2.3	导向误差的补偿	158
4.2.3	液体静压滑动轴承	159
4.2.3.1	结构形式	159
4.2.3.2	压力建立	160
4.2.3.3	轴承设计	161
4.2.3.4	密封	165
4.2.4	机床中的液体静压主轴—轴承系统	166
4.2.5	液体静压丝杠—螺母系统	167
4.3	气体动压与静压滑动导轨与轴承	170
4.3.1	原理与功能原理	170
4.3.2	特性	171
4.3.2.1	空气消耗与承载性能	171
4.3.2.2	动态特性	173
4.3.3	应用举例	175
4.4	滚动导轨与滚动轴承	175
4.4.1	滚动导轨	175
4.4.1.1	设计原则	176
4.4.1.2	结构形式	176
4.4.1.3	预加负载	178
4.4.2	滚动轴承	178
4.4.2.1	轴承结构种类概述	178
4.4.2.2	主轴支承用轴承与其周围零部件的公差	179

4.4.2.3	轴承间隙	181
4.4.2.4	径向轴承的弹性与预加应力	181
4.4.2.5	轴向轴承的弹性与预加应力	186
4.4.2.6	不同轴承种类的径向、轴向弹性特征曲线的对比	187
4.4.2.7	径向轴承保持架的打滑	188
4.4.2.8	轴承作为振动的激振源	188
4.4.2.9	润滑与温度特性	189
4.4.2.10	滚动轴承特性与其它种类轴承的 比较	191
4.4.3	机床用滚动轴承支承的主轴—轴承系统	193
4.4.3.1	要求的形状与设计原则	193
4.4.3.2	静态特性	196
4.4.3.3	动态特性	201
4.4.3.4	热特性	205
4.4.4	滚珠丝杠系统	206
5.	主驱动装置	208
5.1	发动机	208
5.1.1	电动机	209
5.1.1.1	直流电动机	209
5.1.1.2	同步电动机	217
5.1.1.3	异步电动机	219
5.1.2	液动机	223
5.1.2.1	回转式液压驱动装置	225
5.1.2.2	直线液压驱动装置	231
5.1.2.3	调速	232
5.1.3	驱动装置的起动过程	236
5.2	传动机构	239
5.2.1	一般要求	239
5.2.2	均匀变速传动机构	241
5.2.2.1	有级变速传动机构	241
5.2.2.2	无级变速机构	255
5.2.3	非均匀变速传动机构	273
5.2.3.1	摆动的曲柄摇摆机构	273
5.2.3.2	曲柄	275

5.2.3.3 曲柄摆杆	275
5.2.3.4 凸轮机构	276
5.3 离合器	276
5.3.1 一般要求	276
5.3.2 不能操纵的离合器	277
5.3.2.1 刚性离合器	277
5.3.2.2 柔性离合器	279
5.3.3 可操纵的离合器	281
5.3.3.1 外界操纵的离合器	281
5.3.3.2 自动操纵的离合器	290
6. 结束语	293
7. 参考文献	294

1. 引言

一台生产设备的工作精度、效率及环境性能在很大程度上影响在其上加工的产品质量及机床进行经济加工的适用范围。

对设计师来说，要保证机床性能满足对其提出的各项要求与所期望的运行条件。

在设计阶段就能预先决定机床性能的可能性，对机床的发展周期与费用具有重大意义。

在图 1-1 左边大体表示出设计的过程。从已有的概念出发，大致分为绘草图、结构设计与计算、拆零件图及生产文件的准备等各阶段。每个阶段有不同的辅助手段提供其使用。在“结构设计与计算”阶段中，可以应用下面的一些辅助手段：

- 机床部件及整机特性计算软件；
- 决定实际机床特性的测量与分析方法（第四卷）；
- 最佳适合于所给定任务的快速简易结构设计用的参考资料目录；
- 评价所得到的机床特性的尺度（第四卷）。

根据任务的种类与范围，设计师为了进行日常的熟练运算，可使用小型计算机或台式计算机。为解决大量设计任务可使用大型计算机。

可使用从各次测量和一系列测量中取得的很多的测量结果作为评价一台机床的比较标准，后者既体现了当前的技术水平，又可作为设计师的决策依据。从实测机床、模型实验和用各种计算方法对计算模型的参数研究中得到的结果，越来越多地被编写在设计手册中。设计师可以将手册中的知识应用到解决具体任务上。

如果用少量的影响因素不能识别设计质量，则可用使用价值分析，或使用相应的机床性能图表等作为决策基础，以便在短时