

高等学校试用教材

机床热态特性学基础

浙江大学 陈兆年 陈子辰 编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

高等学校试用教材

机床热态特性学基础

浙江大学 陈兆年 陈子辰 编

机械工业出版社

在机械加工的高精度化、自动化的进程中,机床热态加工误差问题日益突出。本书首次较为系统地论述机床热态特性学的基本理论。前四章主要介绍:机床热变形机理,机床传热与热变形,机床温度场、热源强度、热位移的计算分析。后三章主要介绍:机床热态特性的试验技术,机床热态加工精度控制技术,今后发展趋势。

本书是高等学校机械制造专业和其他有关专业的教材,还可以作为科研、生产单位工程技术人员的自学读本和参考书。

机床热态特性学基础

浙江大学 陈兆年 陈子辰 编

责任编辑:孙祥根 责任校对:张佳

责任印制:张俊民 版式设计:胡金瑛

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)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张11·字数264千字

1989年11月北京第一版·1989年11月北京第一次印刷

印数 0,001—1,300·定价:2.30元

ISBN 7-111-01799-4/TG·455(课)

前 言

本书是根据1985年10月高等学校机械制造（冷加工类）教材编审委员会机床教材编审组杭州会议制定的教学计划和教学大纲，以及审定的编写大纲编写的。“机床热态特性学基础”课程的讲授任务是使学生获得机床热态特性学的基本知识，掌握提高机床热态加工精度的基本理论和方法。

随着科学技术发展，航空航天工业、电子工业、能源工业、军事工业、交通运输等国民经济各产业部门不断地向机械加工工业提出新要求。在机械加工自动化、高精度化的进程中，工艺系统的热变形，尤其是机床（包括数控机床、加工中心等）热变形问题日益引起人们重视。热刚度，已与静刚度、动刚度一齐并列为机床的“三大刚度”；机床的热态特性，和机床的静态特性、动态特性、声学特性一样，成为不容忽视的重要特性。为了进一步提高加工精度和生产效率，研究机床热态特性并采取相应措施以减少或消除机床热态加工误差，已成为现代机械制造业面临的重要课题。但是，国内迄今少有公开发行的专门论述机床热态特性的书籍。为此，编写本书以满足教学需要，也为从事机床热态特性研究的科技人员以及从事机床设计、制造和机械加工的工程技术人员提供一本参考书。

“机床热态特性学基础”涉及广泛的基础知识和专门知识。我们在童忠钊教授、高承煜教授关心、指导下，总结了近10年来从事本科生、研究生的教学工作以及联合国内有关研究所、工厂进行的科研工作，努力吸收国内外学者、工程技术人员研究成果，力图较系统地介绍机床热态特性学基础知识：机床热变形机理及基本理论，机床温度场、热位移的分析、计算方法，机床热态特性试验技术及主要类型的机床热态特性分析，机床热态加工精度控制技术。此外，还概括介绍了今后的研究思路，以供读者参考。考虑到各高校选课时数和实验条件不尽相同，本书一些章节具有相对独立性，以供任课教师选用。

本书由浙江大学机械制造专业的陈兆年、陈子辰编写，其中第一章、第二章、第三章和第四章（除第五节外）等由陈兆年撰稿，第四章第五节、第五章、第六章和第七章等由陈子辰撰稿。本书承蒙同济大学机械学院院长侯镇冰教授主审，北京机床研究所盛伯浩高级工程师和同济大学诸乃雄副教授参加审稿并提供了宝贵意见；我们对上述专家的热情指导，表示衷心感谢。本书还引用了有关教材、文献资料，谨借出版之际向它们的作者表示谢意。

本课程是一门新课，本书写作也是一个新尝试。我们虽然不忽视基本理论，并力求联系实际、为解决生产问题服务，但是限于知识水平，书中不足或不妥之处，尚请读者不吝批评指正。

编者

1988年7月于求是园

符 号

物理量 名称	代号	单位符号
长度	L, l	m, cm, mm
面积	A	m^2
体积(容积)	V	$m^3(L)$
质量	m	kg
热力学温度	T	K
摄氏温度	t	$^{\circ}C$
温差	θ, Θ, T	K, $^{\circ}C$
热位移	u	mm, μm
旋转速度	ω	s^{-1}
转速	n	r/min
时间	τ	s
		min
		h
力	F	N
重力	W, P	N
正应力	σ	Pa
切应力	τ	Pa
压力压强	p	Pa
能量: 功	W	J
热	Q	J
功率	P	W
速度	v	m/s
		km/h

物理量 名称	代号	单位符号
		m/min
加速度	a	m/s^2
密度	ρ	kg/m^3
运动粘度	ν	m^2/s
动力粘度	μ	Pa·s
比热容	c	J/(kg·K)
传热系数	α	W/($m^2 \cdot K$)
热导率	λ	W/(m·K)
热扩散率	a	m^2/s
总热阻	$R_{t,}$	$^{\circ}C/W$
单位面积热阻	R_s	($m^2 \cdot ^{\circ}C$)/W
总传热系数	K	W/($m^2 \cdot K$)
厚度	δ, b	m, mm
正应变	ϵ	—
切应变	γ	—
泊松比	μ, ν	—
弹性模量	E	Pa
切变模量	G	Pa
热流量	ϕ	W
热流密度	q	W/ m^2
线胀系数	α_t	K^{-1}
体胀系数	α_v	K^{-1}

目 录

符号

第一章 绪论	1
第一节 研究机床热态特性的重要性	1
第二节 机床热态特性的研究历史	3
第三节 机床热变形机理	4
第四节 机床热变形对策	5
第二章 传热的基本知识及热弹性运动方程	7
第一节 热量传递的三种基本方式	7
第二节 导热	7
第三节 对流传热	10
第四节 辐射传热	21
第五节 复合传热和接合面导热	28
第六节 导热微分方程式与热弹性运动方程式	29
第三章 机床热变形	39
第一节 概述	39
第二节 几类机床的热变形	39
第三节 机床热变形的简单分析	45
第四章 机床的温度场、热源、热位移场的计算	49
第一节 引言	49
第二节 用有限元法求解温度场	49
第三节 温度场的计算	54
第四节 列入边界条件	64
第五节 机床主要内热源发热强度计算	70
第六节 机床热变形计算	75
第五章 机床热态特性测试技术	97
第一节 机床温度测量仪器	97
第二节 机床热位移测量仪器	112
第三节 试验类型和测试方案	116
第四节 机床模型模拟试验技术	121
第五节 误差分析和数据处理	127
第六章 机床热态加工精度控制技术	138
第一节 改进机床结构设计	138
第二节 强制冷却、控制温升	145
第三节 设置人工辅助热源, 稳定和提高热态加工精度	148
第四节 热态加工精度数控补偿技术	153
第五节 环境温度控制	161
第七章 进一步开展机床热态特性学的研究	163
附表 1	165
附表 2	167
主要参考文献	168

第一章 绪 论

第一节 研究机床热态特性的重要性

机械加工中的加工精度受到“机床—夹具—刀具—工件”这个工艺系统各个环节热变形的影响。根据联邦德国阿亨工业大学H. Brauning分析：现代机床加工工件的制造误差中，由热变形引起的误差比例高达50%；英国伯明翰大学J. Peckenik的调查表明：精密加工中由热变形引起的加工制造误差所占的比例为40%~70%；1985年苏联莫斯科自动化工程研究所A. V. Push指出：机床热变形引起的加工误差占25%~75%^{〔1〕~〔8〕}。这些足以说明工艺系统热变形对加工精度影响的严重性。

随着科学技术的发展，航天工业、微电子工业等高、精、尖工业对机械工业提出了新的要求。原机械工业部为适应机械加工精度日益提高的趋势，提出近期要突破下述目标：0.1角秒级的分度技术；0.1微米级的精密位移技术；1微米/米级直线度加工技术；0.01微米级圆度加工技术；四级精密丝杠，三级精密蜗轮及3A级滚刀的精密机械加工和测试技术等等。由于精加工中切削力一般不大，工艺系统受力变形对加工精度的影响和热变形相比处于次要地位，因此减少工艺系统各环节的热变形就成为提高机械加工精度的重要问题。

工艺系统各环节热变形对加工精度的影响讨论如下：

一、工件热变形

各种加工方法使工件受热情况不同，其热变形也就不同。如在车削加工中，工件温度逐渐升高，直径逐渐膨胀，加工结束时，靠近主轴箱的工件直径要比靠近尾架部分的直径小。例如某车床加工 $\phi 56\text{mm}$ 工件，加工时主转速 760r/min ，切深 1mm ，进给量 0.12mm/r ，加工结束时，由于靠近主轴箱的工件沿径向热膨胀量为 $6.7\mu\text{m}$ ，离开主轴端 20mm 处为 $6.2\mu\text{m}$ ，离开 40mm 处为 $5.7\mu\text{m}$ ，热胀量越大，被加工切削去的部分也越多，所以加工終了时出现锥度。在外圆磨削加工中，由于工作台快速往返运动，工件受热比车削时均匀，锥度现象小得多。至于平面加工中，加工面附近温度上升很快，远离加工面的区域温升很小，工件上下存在温差，膨胀不均匀，从而导致顶面凸起，加工时被多切除，工件冷却之后，出现中凹现象。例如，在导轨磨床上磨削机床床身时，长度约 6m 的大型床身上下表面温差为 2.4°C ，导轨上凸变形可达 0.02mm ，加工后导轨冷却下凹 0.02mm 。

二、刀具热伸长

在切削过程中，刀具由于切削热传入而伸长。车刀热伸长对加工直径影响较大。例如，在某车床上加工如图1-1a所示阶梯轴时，由于A、C为加工段，车刀在不加工段B时自然冷却，实测得加工该阶梯轴时的车刀热膨胀如图1-1b所示。

三、机床热变形

机床在加工过程中，电动机输出功率是它空转时消耗的功率与切削时消耗的功率的总和。在精密加工中，后者的消耗远比前者小。机床的空转功耗是精加工机床的主要热源。因此，把机床空运转下的热学特性（温升、热态几何精度等）作为衡量机床质量的重要指标。

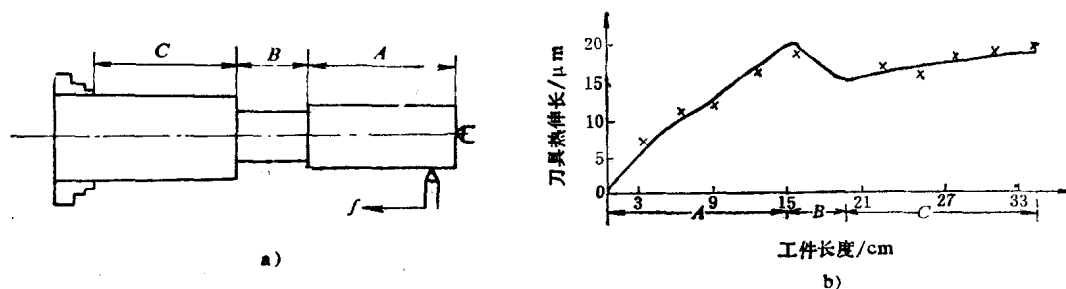


图1-1 加工过程中改变加工条件的车刀热变形 (×——实测值, 曲线——计算值)

A、C段切削条件: $f=3.75\text{mm/s}$, $v=143\text{m/min}$, $a_{pA}=0.75\text{mm}$, $a_{pC}=0.5\text{mm}$

图1-2为各类机床热变形示意图, 可以看出机床热变形对加工精度的影响情况。例如最大加工直径 $\phi 400\text{mm}$ 的某车床, 主轴前轴承温升在开车6.5h达 10°C , 前、后轴承沿水平方向的热位移分别为 28.3 、 $20.2\mu\text{m}$, 沿垂直方向抬高量分别为 123.5 、 $153.4\mu\text{m}$ 。又如某平面磨床在开车6.5h主轴前轴承温升 17°C , 后轴承温升 17.2°C , 磨头主轴线倾斜量见图1-3, 初时磨头前轴承比后轴承低, 后来立柱后仰, 使磨头前轴承渐渐高于后轴承。重型数控镗床在主轴转速为 300r/min 、运行4h后, 轴承温升 15.2°C , 而在主轴转速 1000r/min 时, 运行50min轴承温升就超过 24°C 。主轴前端在水平、垂直、轴向的热位移, 当主轴以 300r/min 转速运转4h以后, 分别为 $49\mu\text{m}$ 、 $54.1\mu\text{m}$ 、 $156.6\mu\text{m}$; 而当主轴以 1000r/min 转速运行50min以后, 分别为 $19.8\mu\text{m}$ 、 $71.8\mu\text{m}$ 、 $224.6\mu\text{m}$ 。数控镗床主轴热位移严重地影响加工精度。同样地, 其他机床也有各自的热变形规律, 也要影响它们的加工精度, 其中尤以精密机床与自动化机床的热变形危害性较为严重, 也较难于解决, 因此, 本书主要讨论工艺系统中机床的热变形。

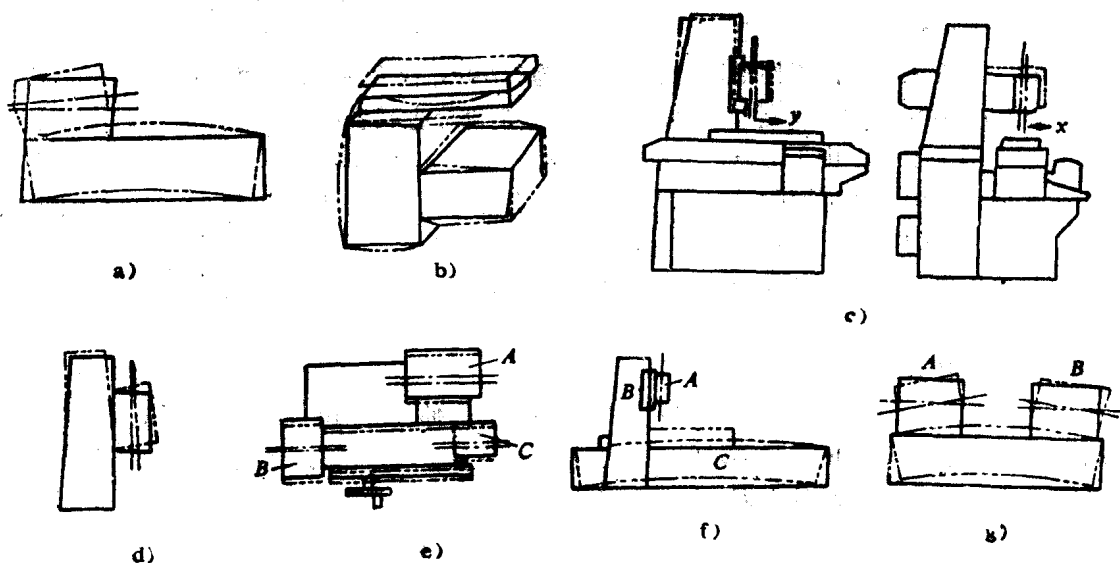


图1-2 各类机床热变形示意图

实线——原始位置 虚线——变形位置 a) 车床 (垂直平面内变形) b) 卧式磨床 (升降台式)
c) Sip-2P坐标磨床 d) 立铣立柱与主轴箱 e) 外圆磨床 (A—砂轮架 B—头架 C—尾架)
f) 导轨磨床 (A—砂轮架 B—立柱 C—床身) g) 双端面磨床 (A、B—砂轮架)

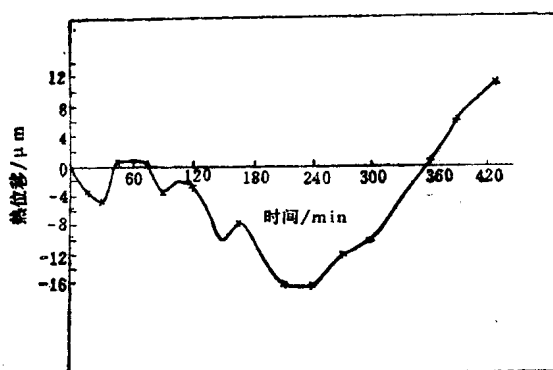


图1-3 磨头热倾斜量—时间曲线

第二节 机床热态特性的研究历史

任何一台机床运转后始终处于内、外热源的作用下，而且这些热源从根本上说都是非恒定的，亦即是变化的。特别是由于加工条件不同，变化的程度也不相同；机床各零部件的材料、形状、结构各不相同，各自热惯性亦不相同；再加上联接件之间接合面热阻，机床表面不尽相同的传热状况等因素，使机床形成一个复杂的温度场。在这样的温度场作用下机床构件材料产生了热应力、热应变，而热应力场、热位移场随材料物理特性、零部件形状以及支承联接状态的不同而不同，从而使机床热变形更加复杂，给我们研究机床热变形带来很大困难。

人们对于机械加工中传热和热变形对加工精度影响的问题是逐步认识的。最先为人们所注意的是工件热变形。精密零件的重要尺寸，在刚加工完的时候所测得的尺寸与冷却以后再测量时尺寸不一致，这就是零件冷缩的结果。因此有经验的磨床工人往往采取一些措施以减少热变形造成的误差，例如等零件冷却后再测量，尔后作一些必要的补充加工；或者在精加工时减少切深以降低发热量；或者有意识地将工件磨得稍大些，以使冷缩后的零件恰好符合尺寸精度的要求。

人们对机床热变形影响加工精度的问题发现得较晚。1933年瑞士对坐标镗床热变形进行了测量和研究，发现了坐标镗床热变形影响定位精度。其他机床如车、刨、铣、磨等机床的热变形研究还要晚些。直到50年代，精密零件在机床上进行精密加工时，其尺寸精度的控制往往还须依靠操作工人边测量、边调整、边加工，因为那时人们对机床热变形的规律还不甚了解和注意。

60年代中期以前，日、美、苏、联邦德国等国家对机床热变形的试验研究仅限于各类机床试验阶段，并且局限于定性分析。随着宇航技术及微电子工业的发展和机械加工日益精密化、自动化、高效率化，机床热变形对加工精度的影响，逐渐引起了重视。1984年CIRP年会上，会议主席Chisholm在发言中强调：“研究工作不能简单地靠直接经验，而要靠科学的研究方法”。研究机床热变形，应基于精确的测试，进而探究其机理，分析其规律，使正确的感性认识提高到理性认识。60年代以后电子计算机的应用、有限元法计算技术的推广、新测试手段的出现，使机床热变形的研究开始进入了定量分析阶段。目前，世界上一些国家系统地

进行了机床热变形试验研究和理论探讨,并初步地建立了热变形研究理论,向CAD和CAM方向发展,取得了一定成果。

我国在50年代开始了机床热变形研究,当时大连工学院曾对一台内圆磨床作了提高精度的研究,他们加工了一大批零件并进行了测量,应用统计方法画了一张热变形—时间曲线图,发现总趋势是一条指数曲线,零件尺寸随着加工时间围绕该曲线波动。第一个零件与最后一个零件尺寸相差 $40\mu\text{m}$ 。通过分析,发现打砂轮的架子随加工时间增长而往后退,产生此现象最重要原因是机床的热变形。他们找到了问题的症结,稍作改进,就使加工精度达到 $10\mu\text{m}$ 以下,还提高了生产效率,收到了显著的效果。在50年代末、60年代初,我国组织了精密机床会战,很多单位都进行了热变形研究,如北京机床研究所、沈阳机床一厂、沈阳机床二厂、昆明机床厂、上海机床厂等,积累了不少原始资料和试验数据。70年代后期,有关机械制造中传热与热变形的课程在不少高校先后展开。1984年正式成立了全国机床热变形研究会,标志我国机床热变形的科研和学术活动进入了新的阶段。

第三节 机床热变形机理

1969年Spur和Fisher提出了机床热变形机理^[2]。图1-4简单地描述了热源和加工精度之间的关系。

1977年垣野义昭提出了更为详细的热变形机理^[4]。在加工过程,影响机床加工精度的热源大致可以分为内热源和外热源两大类(见图1-5),其作用过程如图1-6所示。在一定工作条件下,热源产生的热量 $\{Q\}$ 传给机床,使各部位产生温升 $\{T\}$,各零、部件产生热膨胀(钢或铸铁的热膨胀系数约为 $11\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{K}$),由于零件形状、结构不同,引起拉伸、弯曲、

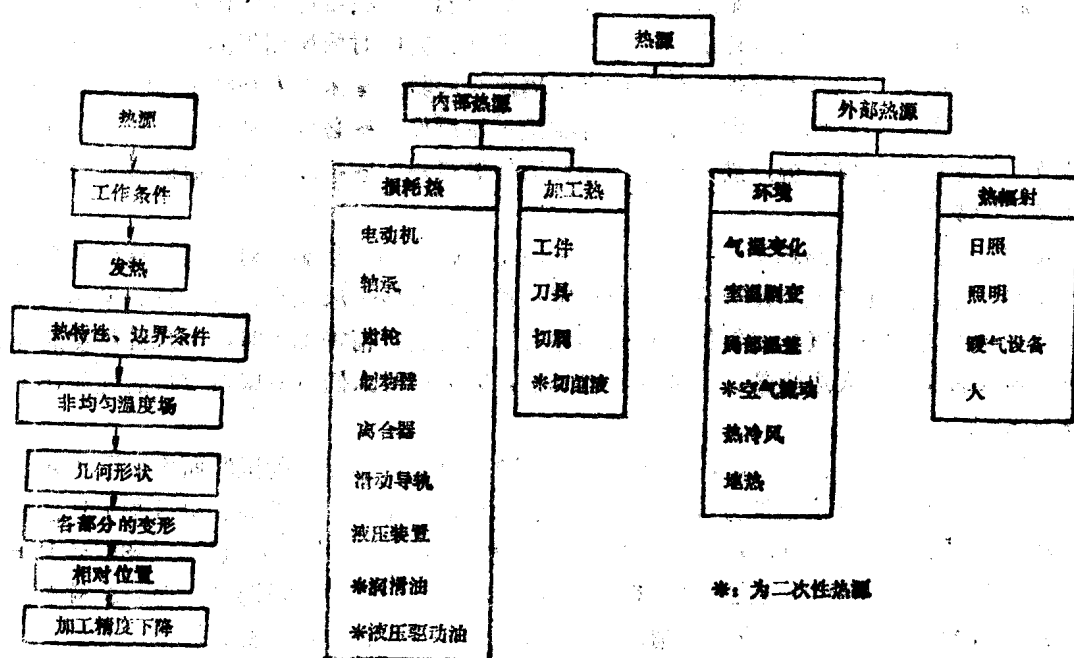


图1-4 机床热变形的简单机理

图1-5 导致机床热变形的热源

扭曲等各种热位移 $\{u\}$ ，使与加工精度有关的点（或线、面产生相对位移，即加工精度下降 $\{\delta\}$ 。各种热源的发热量以及环境温度均随加工内容、时间而变化，同时，因为机床有一定热容量，其温升必然存在时滞现象，所以从根本上说，机床热变形是随时间而变化的非恒定现象。

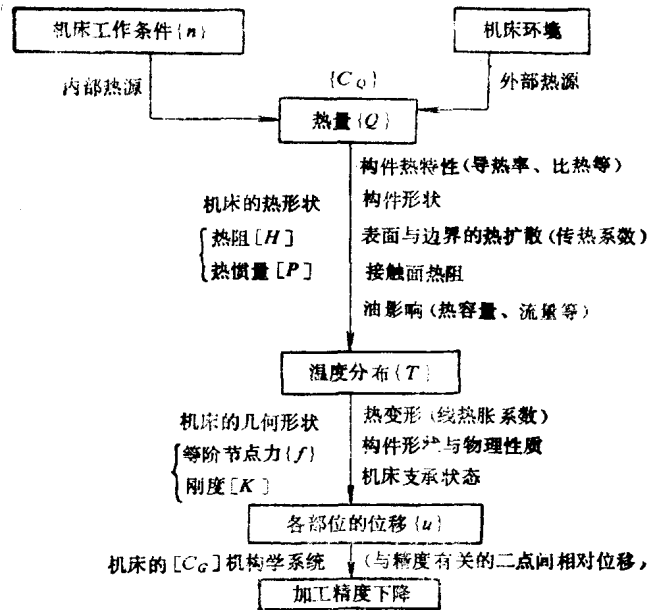


图1-6 机床热变形机理

第四节 机床热变形对策

研究机床热变形是为了控制机床热变形。综观国内外控制机床热变形的措施，主要有：

一、改进机床的结构设计

利用“热对称面”概念，设计热对称结构或使热源对称分布。此外，还可以把热源从机床本体中分离出去或减少其发热量等；从机床的热刚度着手进行机床热态特性优化设计，进一步可综合考虑静刚度、动刚度、热刚度的总体优化设计。

二、强制冷却，控制机床温升

整机设计定型后，对内热源强制冷却，是近来采用较多的措施之一。一些国家已开发利用热管，有目的地传递热量以均衡机床温升或向外排除热量。

三、设置辅助热源

利用人工热源，促使机床缩短温升平衡过程、减少加工中温升场变化，以达到稳定热态加工精度目的^{〔6〕}。

四、补偿技术

在生产中测出大批量工件尺寸，然后对下次加工用量进行补偿。随着数控机床的发展，

产生了热位移数控补偿技术：分析机床零、部件，特别是工件与刀具的相对热位移规律，建立热位移数学模型，实行开环或闭环补偿。

五、控制环境温度

建立恒温车间（甚至恒温工厂），可实行季节性调温。或进行喷油冷却控制机床局部环境温度，使机床外部温度变化的影响减到最小。

本书主要论述机床传热和热变形的基本理论、计算分析和控制方法，涉及多方面的学科知识。因此，本课程是一门工程基础理论课，要求同学运用所学过的数学、力学、电子学、计算机等知识研究机床热变形，学习用理论解决实际问题的过程和步骤，培养同学解决机床设计、制造和机械加工中热态精度问题的初步能力。

第二章 传热的基本知识及热弹性运动方程

第一节 热量传递的三种基本方式

机械制造中的工艺系统处于内外热源作用之下,使该系统的温度有高低差异,而热量总是从高温处向低温处传递,这就是导热。机床作为工艺系统的一个环节,温度也有高、低的差异,再加上机床的内、外约束,就会使机床产生不均匀的热变形,影响机械加工精度。机床的热变形与热量的传播和温度分布有关。传热学就是一门研究热量传播规律,研究热量传递及温度分布基本知识的学科。

机床的热量传递是一个复杂的过程,根据传热的物理本质,热量传递有三种基本方式:导热、对流和辐射。

导热是热量通过固体或静止的流体由温度较高的部分传递到温度较低的部分,例如在切削加工时,切削热量由刀头传向刀体,这就是导热传热。而热量由温度较高的物体传递到与之接触的温度较低的另一物体,如运转车床主轴箱的热量传到与之接触的温度较低的床身,也是导热传热。

在纯导热过程中,物体各部分之间不发生宏观的相对位移,也没有能量形式的转换。

对流仅在流体中出现,当不同温度的流体发生扰动和混合时,热量从一处带到另一处的这种传热现象叫作对流。流体流经固体表面时,两者之间发生的热交换称为对流换热。例如,机床主轴箱内的飞溅润滑油与箱体壁面之间就是以对流换热方式为主的传热。

对流只有流体宏观的相对位移,没有能量形式的转换,对流过程必然伴随有导热现象。

热辐射是物体通过一定波长范围的电磁波进行热量传递的现象。由于热的原因而产生的波长在 $0.1\sim 100\mu\text{m}$ 范围内的电磁波称为热射线,热射线的辐射能量被另一物体吸收以后就转变成热能,热辐射的大部分能量在 $0.7\sim 25\mu\text{m}$ 的红外线区段内。热辐射不仅产生能量的转移,还伴随着能量形式的转化。例如,机床运转中产生的热量要向车间进行热辐射,而阳光对机床的照射或车间暖气等的热辐射也会引起机床的温升,这些都是热辐射的例子,我们如不控制辐射换热,将影响精密机床及大型机床的精度。

导热和对流换热要在介质中进行,而热射线可以在真空中传播而不需要任何介质。

第二节 导 热

一、温度场

机床温度场是在某一瞬间机床上若干点的温度分布的总称,温度场是时间和空间位置的函数,在直角坐标系中温度场表示为

$$t = t(x, y, z, \tau) \quad (2-1)$$

温度分布随时间而变化的温度场称为非稳态温度场,如式(2-1)。

温度分布随时间的变化而变得很小的温度场（小于2%或5%）称为稳态温度场，如式(2-2)

$$t = t(x, y, z) \quad (2-2)$$

如果非稳态温度场只是一个空间坐标或两个空间坐标的函数，则称之为二维或三维非稳态温度场。

$$\left. \begin{aligned} t &= t(x, \tau) \\ t &= t(x, y, \tau) \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

由于温度是标量而不是矢量，所以温度场是标量场。

二、等温面

人们常用等温面来描述温度场，所谓等温面是在同一瞬间物体内部相同温度的点连接成的曲面。因为物体内的任意一点不可能同时有两个不同的温度，所以等温面不会相交，而且是连续的。

如图2-1a所示，导热体内微小面积 dA 处于温度为 t 的等温面上，流过 dA 的热流量的方向必定和温度为 t 的等温面垂直，且朝着温度降落的方向，（图上 n 是温度梯度的方向），其热流量的大小又必定和该方向上的温度降落的强烈程度有关。

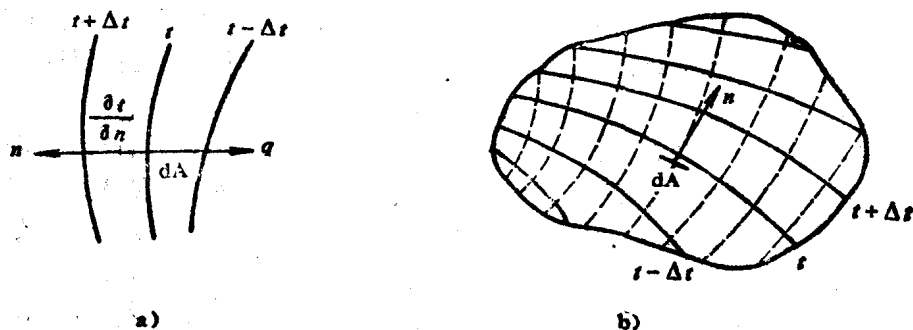


图2-1 温度梯度、热流方向、等温线与热流线

a) 温度梯度与热流方向的关系 b) 等温线(实线)与热流线(虚线)

三、温度梯度

温度场内任意一点在垂直其所在等温面方向上的温度变化的强烈程度，可用该点的温度梯度来表示。温度梯度是等温面法线方向温度增量与法向距离之比的极限。温度梯度是矢量，其方向指向高温见图2-1b，且与等温面的法线方向相一致，但与热流量的方向相反。温度沿等温面法线方向的变化率记为 $\text{grad } t$

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial n} \quad (2-4)$$

在直角坐标系中，温度沿各坐标方向的变化率等于温度梯度在该坐标轴上的投影

$$\left. \begin{aligned} \text{grad}_x t &= \frac{\partial t}{\partial x} \\ \text{grad}_y t &= \frac{\partial t}{\partial y} \\ \text{grad}_z t &= \frac{\partial t}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

式中 t ——温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

四、傅里叶定律

傅里叶对热传导作了大量实验研究, 得出的导热基本定律: 单位时间内通过垂直于热流方向面积为 dA 的热流量, 其数值与该处温度梯度的绝对值成正比, 方向和温度梯度的方向相反。即

$$d\Phi = -\lambda dA \frac{\partial t}{\partial n} \quad (2-6)$$

式中 λ ——热导率, 单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;

Φ ——热流量 (它是单位时间通过某一给定面积的热量), 单位为 W 。

单位时间通过单位面积的热量称为热流密度记为 q , 傅里叶定律的热流密度表达式为

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (2-7)$$

式中 q ——热流密度, 单位为 W/m^2 。

由式(2-7)可知, 当物体内的温度场已知时, 可以计算热流量或热流密度, 反之, 当热流量已知时, 温度场就不能唯一地被确定下来, 还必须给出其他一些条件。

五、热导率 λ

$$\lambda = -\frac{q}{\frac{\partial t}{\partial n}} \quad (2-8)$$

由式(2-8)可见, 热导率 λ 等于单位温度梯度, 单位时间内通过单位面积的热流量或热流密度, 其单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

热导率是表示材料导热性能的一个参数, 几种典型物质在 20°C 时的热导率的数值是:

纯铜的热导率为: $384\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

钢材的热导率为: $46.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

纯水热导率为: $0.58\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

空气热导率为: $0.023\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

习惯上将热导率小于 $0.23\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的固体材料称为隔热材料。如石棉、泡沫塑料等。

大多数金属的热导率随着温度的升高而降低, 某些金属则有随着温度升高而增大的现象; 大多数液体的热导率 (除水和甘油以外, 也随着温度的升高而减小, 水的热导率要比其它液体高几倍; 气体的热导率则随温度升高而升高, 这是因为气体温度升高时, 其分子的不规则运动速度加快的缘故。某些黑色金属, 双合金和液体的热导率在低温时

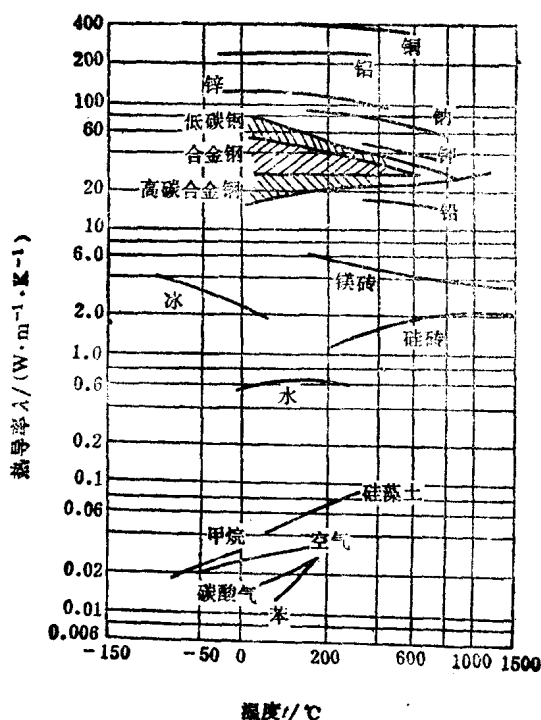


图2-2 热导率对温度的依赖关系

有随着温度升高而增加，并在高温时随温度升高而下降的现象。氢和氦的热导率要比一般气体高得多（高5~10倍）。因此原来用空气冷却的发电机，改用氢气冷却后，其冷却效果要好得多，图2-2所示为各种物质的热导率对温度的依赖关系。从图中可以看出，大多数材料在较大的温度区间内的热导率，可以采用下列近似公式进行计算

$$\lambda = \lambda_0 (1 + bt) \quad (2-9)$$

式中 λ_0 ——0℃时的热导率值，单位为W/(m·K)；

t ——温度，单位为℃；

b ——常数，由实验确定。

当热导率随着温度上升而减小时， b 为负值，例如多数金属材料；反之则为正值，如气体，隔热材料。

有些材料，象木材，石墨等，其各向的结构不同，所以热导率随着导热方向不同而有很大的差别。这些材料称为各向异性材料。对它们必须指明导热方向才能查得正确的热导率数值。

从式(2-9)可以看出， λ 不为常值，因此在式(2-6)~式(2-8)中， λ 不能视为常值，而为某个局部温度范围 t 的函数 λ_t 。在实际工程计算中，如温度变化不太大，热导率可以采用在该范围内的平均值 $\lambda_{平均}$ ， λ 如与常温相差不大，也可采用附录中的数值。

第三节 对 流 传 热

一、对流传热过程

机床在运转时，总会遇到流体流过机床上某些壁面而发生的热交换现象，这种过程叫对流传热，对流传热是流体的对流与导热两者联合作用的结果。

可将对流传热区分为强迫对流与自然对流两大类。自然对流是由于流体冷热部分的密度不同所引起的流动。而强迫对流则系由于压差造成流体之流动。

机床大件（床身、立柱、横梁、底座等）总是由一些水平，竖直或倾斜的平壁或曲面组成的，其对流传热是流体流过这些壁面时的对流传热。现以平壁为例，当流体纵向流过平壁时，流动的流体与平壁表面接触后，由于粘性作用，紧贴表面的流体速度减到零。离开壁面稍远一点的流体，由于贴壁流体的粘滞作用，速度也有所减慢。如此一层层地影响邻层，在离开壁面一定距离后，流体的流速就与来流基本上一样了。但在这一薄层内，流体的流动保持层流状态，称为层流边界层，在层流边界层内的传热主要是导热。

当流体继续沿平板流动时由于粘滞作用，速度减缓的区域越来越大，即边界层越来越厚。到一定厚度后，边界层内的流体质点开始不成层状运动，逐渐变成紊流，这时的边界层称为紊流边界层，在紊流边界层内流体才有因扰动和混合而产生的以对流传热为主的传热。但是，即使在紊流边界层中，由于静止表面与流体之间的粘滞作用，在紧靠固体表面的那一薄层中，流动依

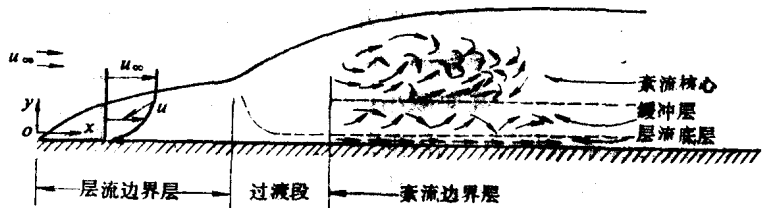


图2-3 纵掠平板时速度边界层的形成和发展

然保持层流，这一薄层称为紊流边界层中的层流底层。在层流底层和紊流边界层的紊流核心之间，还可分出一层由层流向紊流过渡的缓冲层见图2-3。沿着平壁的长度方向，边界层的流动由层流转变成紊流也不是突然而来的，其间还存在一个过渡段。

二、牛顿冷却公式

单位时间内，单位面积上的对流传热的热量用牛顿冷却公式来计算

$$\left. \begin{aligned} \text{流体被冷却时} \quad \Phi &= \alpha_c A (t_f - t_w) \\ &Q = \alpha_c (t_f - t_w) \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{流体被加热时} \quad \Phi &= \alpha_c A (t_w - t_f) \\ &Q = \alpha_c (t_w - t_f) \end{aligned} \right\} \quad (2-11)$$

式中 A ——传热面积，单位为 m^2 ；

α_c ——单位表面对流传热系数，简称对流传热系数，单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；

t_w ——固体壁面温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 或 K ；

t_f ——与壁面接近处的稳定流体的温度，其单位为 $^{\circ}\text{C}$ 或 K 。

三、热阻

式(2-11)也可以改写成

$$\Phi = \frac{t_w - t_f}{\frac{1}{\alpha_c A}} = \frac{\Delta t}{\frac{1}{KA}} = \frac{\Delta t}{R_{t,t}} \quad (2-12)$$

或

$$q = \frac{t_w - t_f}{\frac{1}{\alpha_c}} = \frac{\Delta t}{\frac{1}{K}} = \frac{\Delta t}{R_t}$$

将这两式同电学上的欧姆定律 $I = U/R$ 对比，可以看出它们在形式上是类似的：热流密度对应于电流强度 I ；温差 Δt 对应于电位差 U ，而 $1/K$ 对应于电路中的电阻，称之为热阻。式中 $R_{t,t}$ 表示整个传热面积上的热阻， $\frac{1}{K}$ 或 R_t 表示单位面积上的热阻，其单位分别为 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 及 $(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{W}$ 。当热量传递的路径上传热面积沿途不变时，可以用单位面积上的热阻，但当传热面积沿途变化时，宜采用总面积上的热阻。

应用热阻的概念可以使一些工程上的传热计算变得简单明了。例如，对于由多个环节串联组成的传热过程，分析其热阻的组成，弄清各个环节热阻在总热阻中所占的地位，能使我们更好地了解传热过程。

四、传热过程

机床在运转时，主轴箱、油箱的内壁常常是润滑油或工作油液，其外壁常常是比油液冷的空气。主轴箱箱壁在热平衡后的传热是稳定的，但一般不是一维的，因为除了垂直于壁的方向有传热之外，沿着壁的方向也有热量传递。而液压系统中油箱在热平衡时，可以认为油箱内油的温度是均匀的，其传热，近似一维稳定传热。

象油箱这种热量由壁面一侧的热油液穿过壁面传到另一侧的冷空气中去的过程是一种传热过程，传热过程是工程上经常遇到的一种典型的热量传递过程。

现在来研究作为单层平壁一维稳定传热过程的油箱的传热。

如图2-4所示，平壁左边是温度稳定的油液，其温度为 t_1 ，对流传热系数 $\alpha_{c,1}$ ，平壁右边