

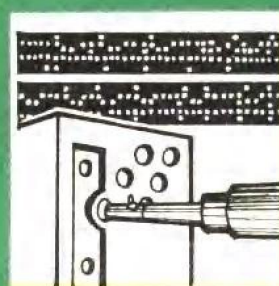
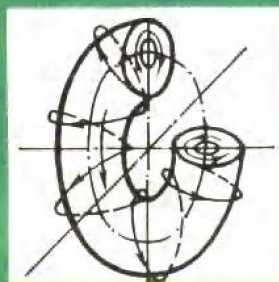
高等学校试用教材



机械制造中的 传热与热变形基础

(一)

浙江大学梁允奇 主编



机械工业出版社

机械制造中的传热与热变形基础

(一)

浙江大学梁允奇 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $15 \frac{3}{4}$ · 字数 379 千字

1982年7月北京第一版·1982年7月北京第一次印刷

印数 0,001—7,000 · 定价 1.65 元

*

统一书号: 15033·5121

前 言

《机械制造中的传热与热变形基础》是“机械制造工艺、设备及自动化”专业的一门技术基础课。其讲授任务在于使学生获得有关传热与热变形方面的基本知识以及温度场与热变形计算的基本方法。本书是根据1978年4月全国高等学校一机部对口专业座谈会的精神及同年6月一机部大连机制专业教材会议拟定的编写大纲编写的。此外,于1980年7月在福州举办了本教材的讲习讨论会,进行了试讲及进一步的审查。

近年来,“机床-夹具-刀具-工件”工艺系统的热变形,特别是机床的热变形,对零件的精加工与自动化加工的影响,日益引起重视。可以说,为了改善机床性能、提高所加工零件的精度,研究热变形并采取相应措施以减少或消除热变形,是生产技术发展所提出的要求。

本书着重介绍传热与热变形方面的基本知识。其具体内容为:工艺系统的传热与热变形问题概述,传热的基本知识,一维、二维稳定导热系统,有限差分法与有限单元法在求解导热微分方程中的应用,不稳定导热系统,热应力与热变形,量纲分析、相似理论及其应用。

简要叙述工艺系统的传热与热变形问题的目的,在于说明工艺系统热变形问题的起因、影响及其研究的方向,以期使读者了解学好传热与热变形基本理论的重要意义,也使读者对工艺系统热变形问题有一个概括的了解。六十年代中期以后,有限单元法及电子计算机等计算手段的运用,使机床及其构件热性能的研究,如温度场、边值条件、热变形与热平衡时间的研究,大大向前推进。为了介绍有限单元法,必须介绍传热与导热的基本理论,因而专辟一章来介绍传热的基本知识,也介绍了一维、二维稳定导热系统与不稳定导热系统等内容。在某些情况下,有限差分法还是简单适用的,因而将有限差分法与有限单元法一并介绍。为了计算热变形,对热应力的形成与计算也作了适当的介绍。最后介绍量纲分析与相似理论等内容,以扩大处理实际问题的选择能力。

在介绍基本理论与方法时,试图选用工艺系统中经过简化的实例,作为分析与计算的范例,一方面帮助读者通过实例来掌握这些理论与方法,另一方面也希望引起他们运用这些理论和方法去解决实际问题的兴趣,并向他们提供如何将实际问题进行简化的方法,如将三维导热方程简化为二维、一维方程,将尚未完全稳定的系统简化为稳定的系统,将第二、第三类边界条件简化为第一类边界条件等。当然这样简化虽使求解容易,但也带来偏离实际的误差。因而简化方案必须与有关实验或已有的实验成果相对照,偏离的误差越小,简化方案就越接近于实际情况。本书所选用的例题,仅能作为计算举例之用,其结果不宜作为解决实际问题的答案,至多只能作为参考之用。

在采用本书作为教材时,有些内容或某些举例可以不讲。根据教学时数及学生的具体情况,可以突出重点而酌情取舍。为此,本教材分(一)、(二)两册出版。(一)册为本课程的基本内容,可供40小时左右的讲课之用;(二)册内容较深,可作本课程的提高之用。各校可根据自己的情况,斟酌选用。

本书由浙江大学机械制造工艺及自动化教研室梁允奇同志担任主编、高承煜同志参加编写。山东工学院热工教研室裘烈钧同志担任主审、孙云凤同志参加审稿。

在编写过程中,大量引用有关教材和文献的内容,谨在此说明,并对它们的著者表示谢意。在编写期间承蒙山东工学院热工教研室蔡国琰同志于百忙中对我们的初稿进行仔细的审阅,提供了宝贵的建议。北京机床研究所盛伯浩同志、华中工学院张伯霖同志、哈尔滨工业大学侯镇冰同志、山东工学院庄莅之同志提供宝贵的资料,以及我们教研室郑善良同志、陈兆年同志、顾惠瑛同志提供宝贵的意见与帮助,在此表示衷心的感谢。

本课程是一门新课,本书的编写也是一种新的尝试,编者虽然力图在不忽视传热学一般原理的情况下应用数学手段对工艺系统热变形问题进行分析而又不是单纯的讲解数学问题,使数学理论为解决问题服务。然而,由于初次编写此书,水平有限,缺点错误一定不少,尚请读者不吝批评与指正。

编者

1980.3.

基本符号

 α —导温系数, $\lambda/c\rho$, 米²/秒 c —比热, 焦/(千克·开) C —热容量, 焦/开 Q —热量, 焦 λ —导热系数, 瓦/(米·开) ρ —密度, 千克/米³ v —速度, 米/秒 τ —时间, 秒 Φ —热流量, 瓦 A —截面横断面积, 米²; 换热面积, 米² q —比热流量, 瓦/米² V —体积, 米³ t —温度, °C t_w —壁面温度, °C t_f —流体温度, °C $\alpha_{\text{对}}$ —对流传热系数, 瓦/(米²·开) δ —厚度, 米 ν —运动粘度率, μ/ρ , 米²/秒 μ —粘度(动力粘度), 牛·秒/米² g —重力加速度, 米/秒² k —传热系数, 瓦/(米²·开) R —热阻, 开/瓦 $\tilde{R}$ —比面热阻, 米²·开/瓦 Λ —热导, 瓦/开 Λ' —比面热导, 瓦/(米²·开)

目 录

第一章 工艺系统的传热与热变形

问题概述 1

§ 1-1 引言 1

§ 1-2 工艺系统的热学特性 2

§ 1-3 工艺系统的传热与热变形对 机械加工精度的影响 4

§ 1-4 机床热变形的控制与防止 6

§ 1-5 机床热变形的具体解决方法 8

§ 1-6 本课程的任务 9

第二章 传热的基本知识 10

§ 2-1 传热的基本方式 10

§ 2-2 导热的基本概念 10

§ 2-3 对流、对流传热的基本公 式——牛顿公式 15

§ 2-4 热辐射、热辐射的基本定律、 热辐射换热及换热系数 25

§ 2-5 固体表面的放(换)热 33

§ 2-6 传热过程 36

§ 2-7 热传导的基本原理 41

第三章 一维稳定系统导热 47

§ 3-1 平壁稳定导热与传热 47

§ 3-2 圆筒壁的稳定导热和传热 57

§ 3-3 等截面细长杆(轴)周界放 热的一维导热 66

§ 3-4 端面放热的径向导热 76

§ 3-5 不等截面细长轴的一维导热 82

§ 3-6 相对运动的机械部件之间的 导热 89

第四章 有限单元法在求解导热微 分方程中的应用 100

§ 4-1 平面稳定温度场的有限单元 格式 100

§ 4-2 有限单元法的基本原理及进 行步骤 101

§ 4-3 各类不同温度场的泛函的构成 102

§ 4-4 建立二维平面稳定系统单元 内部温度 t 的近似函数 104

§ 4-5 单元 e 的泛函及对整个平面 求解区间的泛函求极值 106

§ 4-6 第一种边界条件无内热源平 面稳定温度场的求解 112

§ 4-7 解题具体步骤 113

第五章 热变形与热应力 122

§ 5-1 概述 122

§ 5-2 一维热变形(变形位移)与热 应力 126

§ 5-3 简单梁的变温挠度 130

§ 5-4 桁架的力与变形等问题的有限 单元法 134

§ 5-5 弹性力学中平面热变形问题的 有限单元法 152

§ 5-6 平面刚架的有限单元法 176

附表 193

附表 1 193

附表 2 193

附表 3 194

附表 4 195

附表 5 195

附表 6 196

附表 7 197

附表 8 198

附表 9 199

附表 10 200

附表 11 200

附表 12 201

附表 13 202

附录 204

附录一 矩阵代数基础知识 204

附录二 贝塞尔函数 219

附录三 变分原理简介 229

第一章 工艺系统的传热与热变形问题概述

§ 1-1 引言

传热学是研究热的传递过程。一般讲来，只要有温度差（温差）存在，热量总是从高温处向低温处流动，而将热量由高温物体传给低温物体。在自然界里温度差是普遍存在的，因而热的传递是一个很普遍的自然现象〔1〕。

在工程上传热学的应用很广泛，几乎一切工业部门都碰到传热问题。例如动力、冶金、制冷、建筑、机械制造、电工、化工、原子能、航空及宇航等工程领域的生产过程与生产技术都涉及到传热的问题。以机械加工而言，机械加工精度就受“机床-夹具-刀具-工件”工艺系统各环节热变形的影响，尤以精密零件和大型零件的精加工为突出，而工艺系统的热变形，又受着系统各环节的传热问题的支配。

人们对于工艺系统的传热与热变形问题，是逐步认识的。最先为人们所注意的是工件热变形对加工精度的影响。精密零件的重要尺寸在刚加工好时测量出的数值比冷却后再测量的数值要大些，这就是零件冷缩的结果。例如，磨床工人很早就发现这一现象而采取一些有效的措施，如等零件冷却后再进行一次测量而作必要的补充加工，或者在精加工中尽量减少磨削深度以减少发热量，或者将工件磨得稍大些，以便其冷缩后恰好符合尺寸精度的要求。又如刮削（刮研）大件的工人在精刮时往往也采取类似的措施。

随着测量技术的不断发展，人们发现用标准量具在不同室温下测量同一零件的某一尺寸时，也会有数值上的差异，特别是膨胀系数较大的合金（铝、铜合金）零件尤为显著。与此同时，量具也有热变形，因而要求恒温测量。

在自动车床、六角车床的调整法加工中，加工好一批零件的重要尺寸之间也存在尺寸上的差异（尺寸分散）。经过调查研究，除发现其它因素如刀具磨损等会影响尺寸分散之外，刀具的热伸长也具有一定的影响。

至于机床热变形对加工精度的影响则发现较晚。但座标镗床热变形对其定位精度的影响，发现最早，从1933年起瑞士人对座标镗床热变形进行了测量和研究。其它机床（如车、刨、铣、磨床等）热变形的研究还要晚些。直到20~30年之前，精密零件在机床上进行精加工时，其尺寸精度一般依靠操作工人边测量、边调整切（磨）削深度来取得。更为精密的尺寸则再加上一道研磨的工序。因此那时候人们对于机床热变形对加工精度的影响不甚注意。随着宇航技术的发展及电子计算技术在机床行业的应用，一方面某些零件的加工精度逐步提高，另一方面机床自动化不断发展，致使在新生成的精密机床上，操作工人对加工精度的控制逐渐为机床所代替。于是精密机床的传热与热变形对加工精度的影响，便逐渐引起普遍的重视。它在工艺系统的传热与热变形的研究中，占着突出的地位。

近年以来，人们不仅对精密测量要求在恒温条件下进行，而且对精密机床的制造、装配与使用，也要求在恒温室内进行。如何保持恒温，虽不是工艺系统所要研究的问题，但它却是传热学在建筑工程上的应用。

为了研究热变形及恒温问题，不得不研究传热学中的一些基本知识。

§ 1-2 工艺系统的热学特性

工艺系统热变形的产生原因与加工过程中的发热与传热有关，也与周围环境温度的变化有关。

一、工艺系统的热源

引起工艺系统热变形的热源，不外乎下列三大类：

(一) 切削或磨削热

在金属切削过程中，由机械能变为被切削材料的变形能，从而产生大量的热量，产生热量的多少将随被切削材料的性质及切削用量的大小而不同。车削时的发热量 Q 可由下式确定：

$$Q = P_z v \tau \quad \text{焦} \quad (1-1)$$

式中 P_z ——切削过程中的切削力的垂直分力（牛）。它与被切材料的性质、切削深度 t 、走刀量 s 及刀具几何参数有关；

v ——切削速度（米/秒）；

τ ——切削时间（秒）。

若 Q 以千卡计算， P_z 以公斤力计算，则上式改成

$$Q = \frac{P_z v \tau}{427} \quad (1-2)$$

切削所产生的热量主要通过传热分配到工件、刀具和切屑，其分配的百分比与切削速度有关。对于不同加工种类，其切削热的计算与分配各不相同。

在车削过程中，大量的热为切屑所带走（速度越高，百分比越大），传给工件的热量次之，一般在 30% 以下，而传给刀具的热量又次之，一般不大于 5%，高速切削时甚至在 1% 以下。

对于铣削及刨削加工，传给工件的热量一般在 30% 以下。对于钻孔和卧式镗孔，因有大量切屑留在孔内，故其传给工件的热量就比车削等为高，在钻孔加工中（特别是垂直钻孔中）传给工件的热量往往在 50% 以上。

对于铸件加工，一般不用切削液，大量切屑落在机床床身和工作台上，它对床身和工作台热变形的影响也是显而易见的。但大量切屑只有粗加工时才有，而机床热变形对粗加工精度的影响则一般可以忽视。至于精刨、精铣、精镗这类加工，由于走刀量和切削深度均比较小，切屑所携带的热量也比较小，故由切屑所引起的床身、工作台的热变形，是否需要考虑，要看具体情况而定。但在加工中心机床上，零件的粗、精加工往往在同一机床上进行，工作台的热变形的影响，就应予以注意。有的采用冷冻机强制冷却切削区以减少工件与刀具的热变形，从而也部分地解决床身、工作台的热变形问题。

至于磨削，因其传给磨屑的热量较少，大部分热量是传给工件的。据试验分析，传给工件的热量通常在总热量的 84% 左右，传给磨屑的热量仅占 4%，传给砂轮的热量约占 12% 左右。有时工件磨削区域的温度可达 800~1000℃ 以上，它将使部分工件表面出现烧伤缺陷并使工件产生较大的热变形，从而影响工件的加工精度。

至于研磨这类精密加工，发热量虽小，但也不可忽视，研磨速度往往受热变形的限制而不能选得太大。

（二）机床运动副的摩擦热和动力源的发热

机床主轴箱内有各种运动副，如主轴及传动轴的滚动轴承（或主轴的滑动轴承）、摩擦离合器、齿轮传动副、制动器、溜板（工作台）与导轨、丝杠与螺母等等。它们的运动件间产生一定的摩擦力（或摩擦转矩）和摩擦热而形成热源。这些热源使箱体的温度升高，箱内润滑油的飞溅带走这些发热点的热量而导致油池的温度升高，它对箱体底部的温升也有影响，由于箱体各点的温升不同，致使箱体产生歪曲的变形。

电动机本身的发热及液压系统（液压泵及液压系统）的发热，成为某些机床部件的热源，如液压系统常为磨床类机床床身的热源。

（三）辐射与周围环境气温变化等其它外界热源

靠近窗口的机床，常受日光照射的影响，上、下午之间的照射位置不同和照射强度不同，机床的温升和变形也不同。日光照射通常是单面的或局部的，其受到照射的部分与未经照射的部分之间出现温度的差异，就使机床产生与原来形状不同的变形。

大型零件受到日照的影响也会出现各点温升不均和形状改变的现象，例如机床床身在顶面和一侧面受到日照时将会出现顶部凸起和床身扭曲的现象。

取暖设备对机床的影响与日照的影响是大同小异的。

至于周围环境的温度，则随气温及昼夜温度的变化而变化，通过空气对流使机床及工件的温度也发生变化，不仅对机床的精度有一定的影响，而且也影响零件的加工精度。例如，在精滚大直径的斜齿轮时，要经过几昼夜的连续加工，昼夜温差将引起齿轮齿表面的波纹度误差。

以上所述为工艺系统的主要热源，前二者是与切削（磨削）加工有关的热源，称为内部热源；辐射及周围环境变化等外界热源，则为与切削基本无关的热源。它们对于工件、刀具、机床、量具、夹具的变形的影响，各不相同，可以概略地认为：切削（磨削）热对工件、刀具的变形影响较大；粗加工的切削热对夹具的变形有一定的影响；机床运动副的摩擦热及动力源的发热则对机床的变形有较大的影响；周围环境温度的变化及辐射等外界热源对于精密机床、精密零件的加工与测量的影响，较为显著。因此，精密零件的最后加工与测量一般均要求在恒温条件下进行，精密机床一般也要求放在恒温室内。

二、工艺系统的热平衡，机床的热态几何精度

工艺系统中的机床、刀具和工件在加工过程中受着各自热源的影响，通过传热而使它们的温度迅速上升。与此同时，传给它们的热量又分别向它们各自周围的空间散失。当传给它们的热量与由它们散失的热量大致相等时，便达到所谓的热平衡状态，此时它们的各自温升达到某一相对固定的数值（但每个环节上的各点由于其与热源的距离不同而有不同的稳定的温升值），因而它们的热变形也达到一个近于稳定的数值。但工件在切削过程中，随着切削点的移动，热量不断地输入，加热的位置也不断改变，所以在切削终结之前一般难于达到热平衡状态。研究机床、刀具的热平衡具有现时意义。在机床与刀具热平衡状态下加工出来的零件，除工件热变形外，其它热变形所形成的误差，一般为常值，不再变化不定，可以采取一些其它适当的措施予以消除。

机床在热平衡状态下的几何精度称为热态几何精度，达到热平衡状态所花的时间与它所达到的几何精度对精密加工的影响很大。在机床开车之后至达到热平衡这一段时间内，机床

几何精度一直变化不定。从零件加工精度来讲,我们总是希望机床本身的几何精度保持不变,而且在机床开动之后不久便能达到这一不变的精度数值。因此提高精密机床的热态几何精度与减少达到热平衡所花的时间,为目前精密机床制造业的重要研究课题。它们是与机床传热有着密切关系的问题。

§ 1-3 工艺系统的传热与热变形对

机械加工精度的影响

所谓机械精度,是指零件在加工后所取得的主要表面上的尺寸精度(如直径、长度、孔间距等)、形状精度(如不圆度、不柱度等)、相互位置精度(如不平行度、不垂直度和不同轴度等)和表面光洁度等。

影响这些精度的因素比较多,可以大体上认为表面光洁度与刀具的几何参数、刀具的刃磨质量、切削用量及机床的动态特性(如振动之类)有关;相互位置精度与工件的定位安装及夹具的制造质量有关;尺寸精度及形状精度与工艺系统的原始几何精度及其在加工中几何位置的改变有关,而它们在加工中的几何位置的改变则与工艺系统的受力变形(刚度)与受热变形有关。为了保持零件形状在加工以后的稳定性,还应尽量消除工件内部的应力所引起的变形(各种时效处理)。在精加工中,切削深度与走刀量比较小,切削力一般不大,工艺系统受力变形对加工精度的影响与热变形相比处于次要的地位,如果机床的刚度较大,它的影响可以忽略不计。一般讲来,精加工机床及精密机床的原始精度比较好,精加工中工件的定位安装与夹具的制造质量也具有一定的水平,因此减少机床的热变形,就成为提高机械精度的重要手段。据西德阿亨工业大学布鲁明分析,在用现代机床加工零件的制造误差中,机床热变形所引起的误差有时高达50%;英国伯明翰大学皮克林尼克的调查表明,在精密加工中这个比例高达40~70%;日本垣野义昭也有类似的估计。现在讨论工件、刀具及机床热变形对加工精度的影响:

一、工件热变形

各种加工方法对工件的加热情况不同,热变形的状态及其影响也就不同。例如在外圆的车削或磨削中,外圆表面的受热就比较均匀,在平面的铣削或刨削中,工件仅有加工面受热或者单面受热。以车削而言,开始切削时工件温度与车间温度相同,随着切削的进行,温度逐渐升高,直径逐渐膨胀,而待加工部分的直径增量又为尔后的切削所切除,加工终了之后,接近车床主轴箱部分的工件直径要比尾架部分的直径小些。工件冷却之后,这种现象进一步加强而使工件呈现锥度的形状误差。但在磨削时,工作台不断地往返快速运动,工件的受热要比车削均匀,锥度现象就要小得多,然而在工件冷却后将出现尺寸误差。至于平面加工,加工面附近的温度上升很快,远离加工面的区域则温升很小,甚至没有温升。由于上下两面的温差,使工件这两部分的膨胀不均,而致顶面呈现凸起的现象,这个凸起部分是由切削加工形成的,又为切削所切除,在工件冷却之后,工件收缩,反而出现中凹的现象。例如机床床身导轨在导轨磨床上磨削时,便出现这样的现象。当大型床身上下表面的温差为 2.4°C 时,导轨上凸变形可达0.02毫米,加工以后的冷却导轨出现下凹的形状误差0.02毫米。

消除各种形式误差的主要手段是从减少发热量与增加工件的散热能力下手。例如,在外

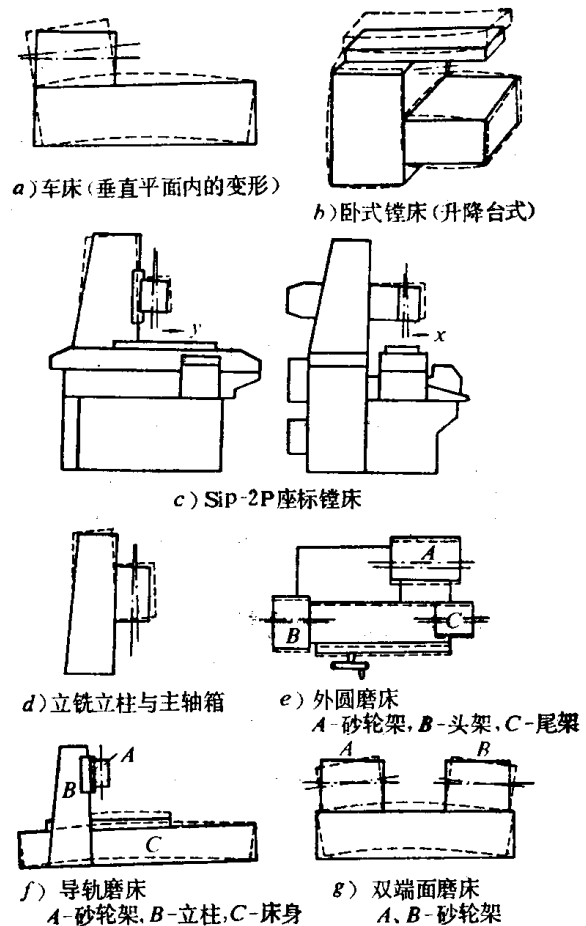
圆的精车中,采用小的切削深度和走刀量以及冷却液;在外圆磨削时喷射大量的冷却液以及在精磨时减小磨削深度和提高工件的线速度;在以碟形砂轮端面干磨床身导轨时,采用较小的磨削深度;在以砂轮周缘磨削床身导轨时,采用大量冷却液;在加工中心机床上进行多面的粗精加工时,采用强制冷却等等。这些措施的使用效果,也是与传热有关的问题。

二、刀具热伸长

刀具在切削过程中,由于切削热的传入而伸长。车刀热伸长对加工直径的影响较大。开始伸长较快,以后逐渐减慢,而在接近于热平衡时达到一个最大值。由于车刀的热容量小,达到热平衡的时间一般在12~16分之间。在车削加工中,一般工件的加工时间比较短而且还需进行磨削加工,车刀的热伸长对加工精度的影响可以不予考虑。只有在加工时间长的圆柱体的精车加工中,才应引起重视,因车刀热伸长将会引起工件的锥度而需设法排除。

三、机床热变形

机床在加工过程中,电动机的功率消耗分为机床的空转功率消耗与切削功率消耗两部分。在精加工中,后者的消耗远比前者为小,机床的空转功率消耗为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、热平衡时间、热态几何精度)作为衡量机床质量的重要指标^①。由于机床各部件的体积大,热容量大,各部件的温升一般不高,其达到热平衡时间却比较长。对于车床,最热部位(主轴前轴承)的温升,一般不大于40℃。磨床温升一般不高于15~25℃,这两类机床的热平衡时间一般在4~6小时之内。由于精密机床制造业,千方百计减少和排除机床的发热量,以减少热变形,这些机床部件的温升进一步下降。某些中小型座标镗床如Sip-2P,其主轴箱内部的最大温升仅为2~3℃,其外壳的温升在2℃以下,各点的温差不到1℃。因而它们的热平衡时间可以控制到2小时左右,而大型精密机床的热平衡时间还是比较大,如座标镗床Sip-8P横梁的热平衡时间需要12小时。在机床达到热平衡以前,机床的几何精度一直变化不定,影响零件的加工精度。例如,外圆磨床在开车以后,砂轮主轴轴承的温升不断提高,砂轮架受热变形,砂轮主轴轴线向前移动,工件主轴与砂轮主轴之间的距离不断减小,



图中符号: 实线—原始位置;
虚线—变形位置;
粗中心线—主轴原始位置;
细中心线—变形后主轴位置。

图1-1 各类机床热变形示意图

① 应该指出,温升、热平衡时间及热态几何精度这三个指标,均为一些接近于常量的数据,而不能当作绝对数据来看待,因为达到完全热平衡的时间相当长。从实用意义来讲,当温升(或热变形)达到其最大值95%时,便可视为已达到热平衡的状态。

致使调整好的加工直径变小，且不稳定。在达到热平衡之前所加工的一批工件直径上，出现尺寸上的差异，而且砂轮主轴侧母线和上母线倾斜，使工件产生几何形状误差和螺旋线缺陷（在磨削后的表面上出现明暗相间的螺旋线痕迹）。座标镗床的热变形将导致主轴轴线的热位移和热倾斜而影响它的定位精度和主轴轴线对工作台的垂直度。其它机床也有其各自的变形规律，也要影响它们的加工精度。图 1-1 为各类机床热变形的示意图。于此可以看出机床热变形对加工精度的影响。

精密机床热变形的数值一般并不太大。例如，在外圆磨床上，某些资料介绍，在到达热平衡时，主轴轴线与砂轮轴轴线的距离将缩小 27~28 微米，这个缩小量是在 4~6 小时内形成的，每个零件的磨削时间比较短，如以每小时加工 10 个零件计算，每个零件的尺寸缩小量平均不过 1 微米，似乎微不足道，可是加工一批零件的尺寸分散就很大了，最大直径与最小直径之差可达 54~56 微米，若零件的尺寸为 $\phi 50$ 毫米，其 2 级公差亦不过 17 微米，热变形所引起的最大误差竟为公差的 3 倍以上。这在自动化的外圆磨床上，就不能等闲视之了。又如座标镗床 Sip-2P 的主轴轴线在 2 小时内的热位移仅为 4 微米，就更小了，然而座标镗床所要求的定位精度一般为 5~2 微米。而且机床出厂之后，热平衡所需的时间以及达到热平衡时所产生的变形量，一般是无法改变的，而成为一个先天性的缺陷。虽可先让机床预运转一段时间，等到机床热平衡后再进行零件的精密加工，以进行补救，但也不过是一种消极手段罢了。由此可见，精密机床热变形的危害性是相当严重的，在自动化机床中，问题尤为突出。

§ 1-4 机床热变形的控制与防止

基于上节分析，机床的传热与热变形是工艺系统各环节中较为麻烦的问题。相对来讲，工件、刀具热变形就比较容易对付一些。因此，机床热变形是当前引起普遍重视而成为重点研究的对象。为此，人们提出了许多控制与防止机床热变形的措施，归结起来，可以分成以下几种。

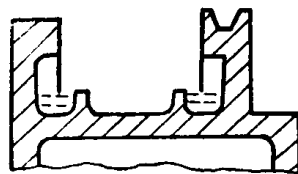
一、减少热源的发热量

热变形的主要原因是热源的发热，减少热源的发热量是减少热变形重要措施之一。如提高滚动轴承的质量；对于一般传动轴尽量采用小尺寸的轴承；改善主轴轴承及传动轴轴承的润滑条件（如采用低粘度的润滑油及锂基润滑脂润滑或采用油雾润滑）及装配质量，提高齿轮的制造质量（如采用磨齿齿轮）及安装质量；改善机床导轨的摩擦润滑条件（如采用低摩擦系数的导轨材料或采用静压导轨之类）及改善丝杠-螺母的运动条件（如滚动丝杠及滚动螺母）等，以上均为减少热源发热的重要措施。除后面两种为减少直线运动部件的发热措施而外，其它均为减少主轴及主轴箱的发热措施。减少主轴前后轴承的发热量并使两者的发热量接近相等，对减少主轴的热倾斜量有着重要的作用。此外，还有采用直流调速电动机或液压马达作为主驱动装置，进行无级调速，以减少主动箱齿轮副及传动轴与轴承的数目，从而减少主传动箱内的发热量。

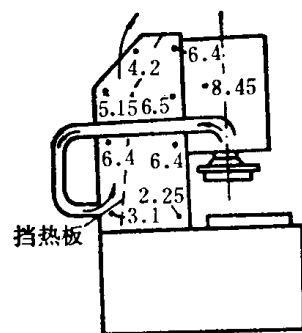
二、将热源的部分热量移到构件温升较低的部分以均衡构件的温升

减少构件本身各点的温差，是减少热变形的另一个有效手段。虽然构件在均匀温升的情况下也可能出现翘曲之类的热变形（当构件尺寸不均匀或受到外在约束而不能自由膨胀时），

但一般讲来, 构件的弯曲或翘曲的热变形是由构件本身具有不均匀的温升 (即点与点间出现温差) 引起的。温差愈小, 热变形愈小。图 1-2 所示的改进结构便是采用减少构件温差的例子。图 1-2 a 为 M7140 平面磨床床身顶部结构上的改进, 在导轨下面添加如图所示的油沟, 将床身底部油池内的热油引导到这些油沟内, 以均衡床身上下部的温差而减少其变形, 其效果比将油池从床身底部移出为好。当油池放在床身底部, 床身底部的温度高于其顶部, 床身顶面中部下凹; 反之, 当油池全部从床身移出, 床身顶部因工作台移动的摩擦发热而致其顶部温度高于其底部, 床身顶面将出现中部上凸。



a)



b)

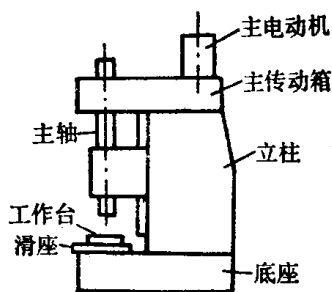
图1-2 改变机床构件的受热情况

在图 1-2 b 中, 平面磨床立柱的中空部分安装有挡热板, 将由主轴轴承处吸出的热风导入热挡板与立柱后壁之间以加热其后壁, 减少立柱前后壁的温差, 从而减少立柱向后的倾斜。图中黑点附近的数字代表该处的温升值 ($^{\circ}\text{C}$)。

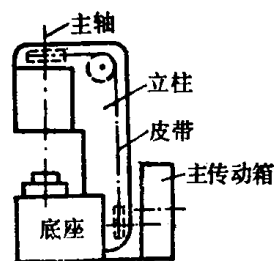
又如将车床床头箱的油池移到床身前脚的底部, 不仅减少床头箱的温升和热变形, 而且使前脚的温升均匀化, 从而减少床身弯曲变形, 以致减少主轴轴线对床身导轨的热倾斜量。

三、将热源置于易于散热的位置

将主电动机置于易于散热之处。如图 1-3 a 的座标镗床上将主电动机置于主传动箱的顶部, 并使风扇吸出的热风由电动机的顶部吹出, 不仅主电动机的热量易于散失, 而且主传动箱的散热条件也较好, 减少了立柱的受热并使其顶部受热均匀, 从而改善立柱的弯曲变形。



a)



b)

图 1-3

图 1-3 b 为一座标镗床的布局示意图, 它将主传动箱和主电动机放在机床的外面 (立柱背后的单独装置), 用皮带将动力传到主轴上, 以消除整个主传动系统发热对机床的影响。

四、使机床部件的热变形向不影响精度的方向发展

图 1-4 a 为车床主轴箱与床身导轨连接的一种形式, 主轴中心 O 对导轨定位面 1、2 的水平与垂直方向的距离分别为 B 及 H , 其相应的热位移为 ΔB 及 ΔH 而导致主轴中心 O 向右上方偏移, 从而导致工件轴线与刀具刃口之间的位置变化, 影响工件直径上的变化。若将连接形式改成图 1-4 b 的形式, 将中心 O 直接置于水平方向定位面 1 的上方, 而致 B 及 ΔB 为零, 只有 O 在垂直方向的位移 ΔH , 从而使直径的加工精度大为提高, 这是因为车削加工中影响直径误差的主要因素为 ΔB 的缘故。

五、在机床结构设计中采用自动热补偿装置

某双端面磨床曾发生过主轴前端热伸长量超差的问题。其热伸长量达到 0.08 毫米, 前轴承

的温升达到 27°C 。针对上述情况采取一些措施,如采用二号润滑脂以减少轴承的发热量,在壳体 2 与前轴承之间增添一个过渡套筒 3 (图 1-5),当前轴承发热时过渡套筒向后伸长以补偿主轴 1 向前的热伸长量,取得了较为满意的效果。

六、其它措施

如采用冷冻装置冷却润滑油,再用这种冷却油对齿轮、轴承进行循环冷却以减少传动箱的变形;采用冷风散热装置;在热源与构件之间安装隔热装置等。

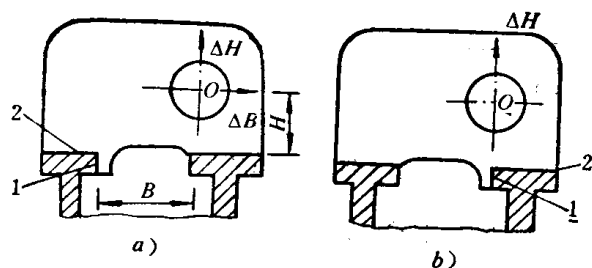


图1-4 车床床头箱的连接形式对主轴轴线热位移的影响

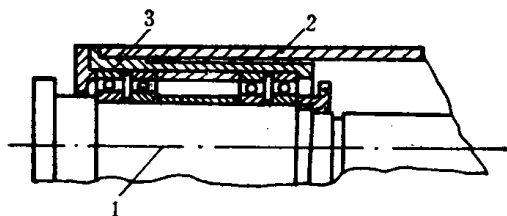


图1-5 主轴部件的结构改进

此外,机床床身的紧固状态,如龙门刨床床身地脚螺钉的紧固状态(某些螺钉的松紧程度),对床身的热变形也有一定的制约作用。

§ 1-5 机床热变形的具体解决方法

一台机床是由若干个构件(如主轴箱、床身、立柱、工作台、升降台等)组合而成,如何把上节控制热变形的定性措施恰当地运用到各个构件以使各构件间的变形起着相互的制约作用而达到预期的精度要求,是设计人员所面临的一个困难问题。最早的方法是通过试验来解决,目前已开始采用计算方法,以期能用定量的计算来解决。

一、试验法

对需要改进的机床进行空运转试验,测出各主要构件或部件的热平衡时间及它们在热平衡后的温度分布(温度场)和它们各自变形状况(如主轴箱的变形、床身的弯曲度、立柱的倾斜量)以及这些变形对机床几何精度如主轴轴线对床身导轨的倾斜度或对工作台的垂直度等的影响。经过分析找出对加工精度有影响的主要构件或部件,再对这些挑出的主要构件或部件进行仔细的分析,找出热源、传热与热变形之间的关系,提出改进措施(如减少热源发热量、将热源的部分热量移到构件温升较低之处、改变热源位置等)作出定性的结论,以进行新的设计。根据新的设计进行试制,再对新制产品进行上述同样的试验,以检验改进的效果。如测定的结果不能满足预期的要求,再修改设计。经过 2~3 次“改设计—试制—试验”循环之后便能基本上取得满意的结果。这是一种直观的、行之有效的方法,普遍地得到应用。

二、计算法

这个方法的第一步和上述方法完全一样,所不同的是在提出定性的改进措施之后,做些定量的计算工作。

根据试验数据,分析各有关构件的热源及传热情况,假定各构件的导热方程与边值条件,

用数值计算法（有限单元法或有限差分法）算出各构件在热平衡时的温度分布和热变形数值（如有可能也算出达到热平衡状态所花的时间）。将计算结果与试验结果进行比较，看其是否一致。如不一致再修改边值条件，甚至修改导热方程，进行重算直至计算结果与试验数据基本接近为止。这样我们就找到了各构件的近似导热方程与边值条件，亦即建立起它们的导热数学模型。然后再改变各构件的设计，假定其热源的发热量（或将其部分热量移置到构件的其它部位），参考前此建立的数学模型算出新构件的温度分布与热变形数值。与此同时也可配合模型试验以检验计算的结果[⊖]。于是建立起来的各构件的导热数学模型就更为可靠了。在此基础上，修改各主要构件的设计，用计算方法算出各构件的热变形并将各构件相互制约的变形结果计算出来，这样算出的综合热变形便为新设计所预期的机床热态几何精度。算出的热态几何精度与机床所要求的热态几何精度进行对比，看其能否满足。如不能满足，再修改设计直至算出的结果能够基本满足设计要求为止。此后再把新设计投产试制。

可以看出，计算法与试验法的主要区别，是计算法以多次“计算—修改”循环代替试验法的多次“改设计—试制—试验”循环。试制的次数大为减少，改进设计的生产费用与生产周期均将大为缩减，其优越性是显而易见的。与此同时，几个改进的设计方案可以同时进行，通过计算以找出一个最佳的方案，进行试制。在上述过程中，在考虑热学特性影响的同时，还可考虑机床动力学特性（动刚度与稳定性）、声学特性（噪声）及经济性等内容，从而使机床最后质量达到各种特性综合平衡的效果。

上述方法，不仅可以用于机床构件的研究与改进，而且可以用于复杂零件和复杂刀具在加工过程中的传热、温度分布与热变形的研究。

§ 1-6 本课程的任务

用定量计算来对机床及其他工艺问题的热变形的分析研究是一件很有意义的工作。但要进行这方面的分析研究，需要进行一系列的理论准备，如传热学的基本知识、稳定与不稳定系统的导热、温度场与热变形的数值计算等等。本课程的任务在于提供上述必要的理论知识。本章介绍的有关工艺系统热变形的基本概况将有助于上述任务的完成。

⊖ 有人用含有铜粉的塑料制造构件的缩小模型，用电炉（或热油）模拟热源的发热量，对模型的温度分布与热变形进行测定并用数值法进行计算，与此同时也对实物进行同样的实测与计算，其结果是相互吻合的^[2]。

第二章 传热的基本知识

§ 2-1 传热的基本方式

在自然界的各种传热现象中，虽然存在着各种不同的传热方式，但根据传热过程的物理本质，热的传递基本方式通常有三种：导热、对流和辐射。例如在切削加工形成切屑的过程中，机械能转变为变形能，同时产生热能。存在于切屑中的这些热能通过导热把一部分热量传给刀具和工件，而其余大部分热量则随着断落的切屑而落到机床床身、工作台（溜板）或积屑盘上去。切屑开始落下时，温度很高，但不久之后因热量在空气中散失，致使切屑温度下降而逐渐接近于室温。工件在加工过程中吸收热量温度逐渐升高，离开机床之后因散热而温度又逐渐下降。如果在切削过程中应用冷却液，把切屑、工件和刀具的热量带走，则温升减慢，而且以后的冷却也加快，这些热量传递都是由导热与对流方式起着主要的作用。又如人在冬天阳光下感到温暖，炼钢炉门打开后，人在近旁感到灼热，就是辐射传热的作用。

§ 2-2 导热的基本概念

一、导热

导热又称热传导，是指直接接触的物体各部分热能量交换的现象，如切屑把热量传给刀具、工件、床身、工作台之类。在液体、气体中也有导热现象，但以固体比较显著。一般认为导热是物体各部分没有相对位移的一种传热方式。在不同的介质中，其传热机理不同，在液体和非金属固体介质中，能量的转移主要靠分子运动弹性波的作用（类似于声音的传递）；固体金属则主要依靠自由电子的运动；气体主要依靠分子的不规则运动〔1〕。

温度是物质分子热运动激烈程度的衡量指标。温度愈高，物质分子热运动就愈激烈，其热运动的能量也愈大。高温部分与低温部分分子热运动的程度不同，能量也不同，两者碰撞的结果，热运动能量大的分子就将能量转移给热运动能量小的分子。导热的本质正是由组成物质的分子、原子等粒子不断碰撞而引起能量的转移，在现象上就表现出热量由物体的一部分传递到它的另一部分。由于金属结构中分子动能的传递主要依靠自由电子的运动，它的导热要比分子只能在平衡位置附近振动的非金属固体快得多，液体的结构介于气体、固体之间，分子可作幅度不大的位移，其热量的传递不仅依靠分子的振动，而且还依赖分子间的相互撞击。

一般只有在密实的固体中，才能看到单纯的导热现象。当流体（气体和液体）各处的温度不同时，在发生导热的同时还伴随着对流的现象。只有在流层极薄时，其对流方式可以不予考虑。

二、温度场

导热就是热量从高温处向低温处流动。所以，研究导热必须涉及物体的温度分布。在某一瞬时内，物体各点温度分布情况，称为温度场。它就象电场等一样，是物体中一切点的

温度分布的总称。一般讲来，物体的温度分布是空间坐标和时间的函数，即

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

式中 x, y, z 为空间直角坐标， τ 为时间坐标。

物体的温度场有两大类。一类是物体温度分布与时间无关，而只是位置的函数。这时，物体各点温度不随时间变动，这种温度场称为稳定温度场或定常温度场。另一类是随时间而改变的温度场，例如在开始机械加工的一段时间内，刀具和机床构件上的温度分布就是不断变化的。这时，温度分布随时间而改变，这种随时间改变的温度场称为瞬时温度场，也称不稳定温度场或非定常温度场。在稳定的温度场内，

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$$

这时温度分布的表达式简化为

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

当刀具、机床构件达到热平衡状态时，其温度场便为稳定温度场。在特殊情况下，物体温度变化仅局限于一个或二个坐标方向上，称为一维、二维温度场。一维稳定温度场或称单向稳定温度场，其方程具有最简单的形式：

$$t = t(x) \quad (2-3)$$

温度场中同一时刻相同温度各点相连成的曲面称为等温面，对于某一截面则成为等温线。温度场习惯上就用等温面表示。图 2-1 所示为水冷的燃气轮机叶片的温度场，其上标注不同温度数值的曲线为不同温度的等温面〔4〕。可以看出，在所示的截面内温度是不均匀的，其内兼有 x, y 方向的热量流动 ϕ_x, ϕ_y ，因而便不是一维导热。如仅在截面内 x, y 二个方向有热量流动而在轴向 z 无热流时，则为二维导热；若在轴向 z 也有热流则为三维导热。当燃气轮机叶片上温度场（如图所示）不随时间而变时，则其传热为稳定导热，其温度场便为稳定温度场。当燃气轮机开始起动时叶片传热未达热平衡之前，温度场随时间而变，此时的导热及温度场便是不稳定的。

因为温度不是矢量，所以温度场不是矢量场而是标量场。

三、热流线与温度梯度

由于热量总是自发地由高温处向低温处流，而在等温面上各处的温度相同，所以在等温面上便没有热量流动，因而热量只能沿着等温面的法线方向流动。试证明如下：

在图 2-2 a 上，设热流量 Φ 的方向与等温面 S 的法线方向成 θ 角，则热流量 Φ 可以分解为法向和切向两个分量 $\Phi_{\text{法}}$ 和 $\Phi_{\text{切}}$ ，但 S 面上无热流，故 $\Phi_{\text{切}} = 0$ ，因而 $\Phi = \Phi_{\text{法}}$ ，即热流沿法

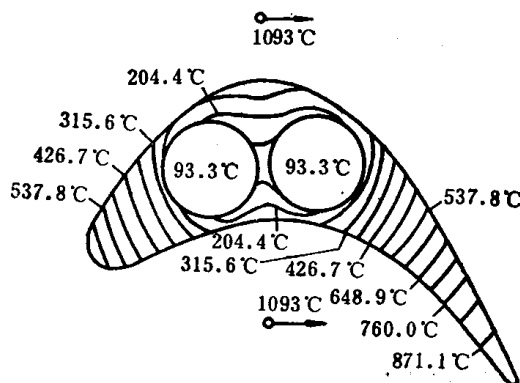


图2-1 水冷的燃气轮机叶片的温度场

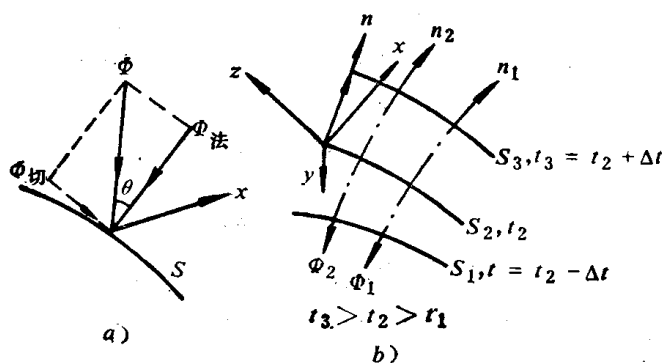


图 2-2