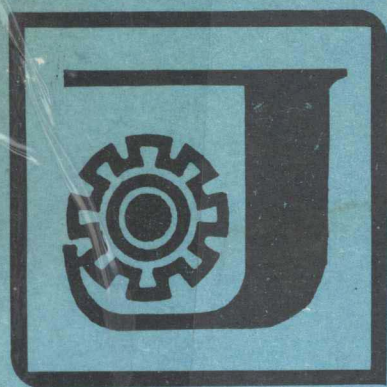




机械工程师进修大学

JIXIEGONGCHENGSHI
JINXIUDAXUE

机械工程师进修教材
(机械设计课程组)

侯镇冰 主编

机械结构 热变形 28

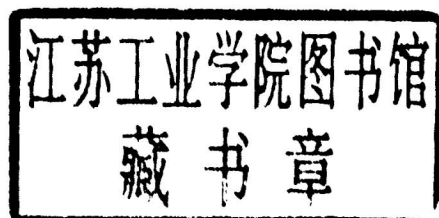
机械工程师进修教材

机械设计专业课程组

机械结构热变形

侯镇冰 主编

王诚德 诸乃雄 刘培权 编



机械工程师进修大学

内 容 提 要

随着科学技术的不断发展,机械结构的热变形问题愈来愈突出。本书是为满足机械工程技术人员扩充、更新知识的需要,使其获得一定的有关机械构件受热后温度分布和热变形的理论知识,以及相应的分析、计算能力,并利用这些知识解决生产实际问题而编写的。

内容包括绪论、传热学基础、机械构件温度分布的确定、机械构件热变形的计算、热变形问题的对策、温度分布和热变形的测试等。

本书取材丰富,联系实际,由浅入深,便于学习。除供机械工程师进修大学作教材用,还可供工科院校机械专业学生作为选修课教材。

机械结构热变形

侯镇冰 王诚德 诸乃雄 刘培权 编

*

机械电子工业部 中国机械工程学会主办

机械工程师进修大学教材编辑部编辑

机械工程师进修大学出版

北京水利电力出版社印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/16 9.75印张 210千字

*

1989年8月北京第一版 北京第一次印刷

北京刊一49号 只发学员 不准翻印

前 言

各种机械设备以及仪器仪表在运行过程中,温度分布在不断变化,从而导致各个环节的热变形,其结果是:正确的运行遭到破坏。尤其是一些精密的机械加工设备、动力装置、航天与航空设备、武器装备以及仪器计测装置的工作质量与工作效率和其热学特性有着密切的关系。随着科学技术的不断发展,对各种机械设备提出了越来越高的要求,机械结构的热变形问题也越来越突出。作为一个机械工程技术人员必须具备这方面的基本知识与解决生产实际问题的对策手段。

按照1987年2月在上海召开的机械工程师进修大学第二届教材会议通过的编写大纲,由同济大学、上海工业大学、南京工学院共同编写了《机械结构热变形》,以满足机械工程技术人员扩充知识的需要,使其在机械设备的开发设计与生产使用过程中,能运用这些知识去解决热变形这一日益重要的课题。

本书由同济大学侯镇冰教授主编;上海工业大学王诚德副教授、同济大学诸乃雄副教授、南京工学院刘培权副教授编写;全书由王诚德统稿。第一、二章由王诚德、侯镇冰编写;第三章由诸乃雄、侯镇冰编写;第四章由刘培权、侯镇冰编写;第五章由王诚德编写;第六章由诸乃雄编写。北京理工大学胡永生教授审阅了本教材,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

编者

1989年8月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 机械系统的热学特性及其影响.....	(1)
第二节 热变形问题的研究概况.....	(4)
第三节 本课程的特点与学习方法.....	(5)
第二章 传热学基础	(6)
第一节 热量传递的三种基本方式.....	(6)
第二节 热传导.....	(6)
第三节 对流换热.....	(17)
第四节 辐射换热.....	(26)
第五节 复合换热与结合面导热.....	(31)
第三章 机械构件温度分布的确定	(35)
第一节 综述.....	(35)
第二节 热源法求解温度场.....	(38)
第三节 有限差分法求解温度场.....	(54)
第四节 有限单元法求解温度场.....	(71)
第四章 机械构件热变形的计算	(86)
第一节 热变形和热应力的基本概念.....	(86)
第二节 解析法求解热变形.....	(91)
第三节 热变形的近似估算.....	(98)
第四节 数值法求解热变形.....	(108)
第五章 热变形问题的对策	(135)
第一节 减少发热和隔热.....	(135)
第二节 改善散热条件.....	(136)
第三节 热补偿措施.....	(137)
第四节 合理设计结构.....	(140)
第五节 控制环境条件.....	(141)
第六章 温度分布和热变形的测试	(143)
第一节 热态测试的常用仪器.....	(143)
第二节 测试内容与方案.....	(148)

第一章 绪 论

机械设备在运行过程中,在各种热源的作用下,各处温度不断发生变化。由于热源形式、分布情况和机械结构本身的复杂性,形成了不均匀的温度场。根据一般金属材料热胀冷缩的规律,机械的各个部件发生不同程度的热变形,从而使几何精度丧失,各个环节之间正确的相对位置关系遭到破坏。其结果是,机械设备正确的运行规律改变;机械加工时,机床的加工精度降低;严重时,急剧的温升还会使机械设备无法工作。

长期的生产实践,使人们逐渐认识到这种热效应的重大影响。许多机械设备,如金属切削机床、动力装置、航天航空设备以及一些仪器计测装置,它们的工作质量和效率,除了与力学特性(静刚度、动刚度)、声学特性(噪声)有关外,还与热学特性有密切的关系。机械加工工艺系统中,热效应的作用占有较大比重。据联邦德国阿亨工业大学H.Bräuning分析,认为用机床加工工件的制造误差中,由热变形引起的误差高达50%。英国伯明翰大学J.Peelen教授调查统计表明,在精密加工中,热变形引起的制造误差,占总制造误差的40~70%。日本京都大学的垣野義昭也有类似的估算。

热变形引起的加工误差不易检测与辨识,引起的几何误差难于用补偿装置或人工进行调整补偿。因此,热变形给机械设备的产品质量带来严重的潜在威胁。同时,热变形也给机械设备提高生产效率增加了困难。因为机械设备从开始工作到达整个温度场处于稳定状态,需要经历一段预热时间,为了寻求机械设备的正常工作或加工工件尺寸的稳定,只有等热变形基本稳定后才能开始工作,这就会降低设备的效率,并增加额外的能量耗损。

随着科学技术的不断发展,对各种机械设备提出了越来越高的要求,热变形问题也越来越突出,成为机械工程中一个重要的基础理论问题。作为一个机械工程技术人员,必须具备这方面的基本知识,无论在机械设备的开发设计,还是生产使用过程中,能运用这些知识去解决生产实际问题与提出对策。

第一节 机械系统的热学特性及其影响

一、机械系统热的来源

任何事物发生变化,都有一定的起因。机械设备的热变形,显然由于运行过程中出现的各种“热源”所引起。图1.1-1所示,描述了热源和运行规律或设备加工精度之间的关系。

热源一般可分为“工作热源”和“环境热源”两大类。工作热源包括机械设备运转时相对运动副产生的摩擦热和动力源能量消耗转化热,机械加工过程中产生的切削热。而环境热源是指周围环境温度的变化和各種热辐射(阳光、照明、暖气设备等)。其具体内容如图1.1-2所示。

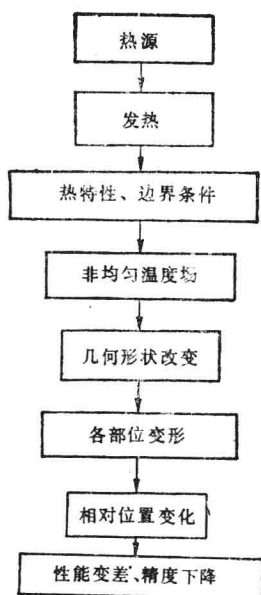


图 1.1-1 机械结构热变形机理

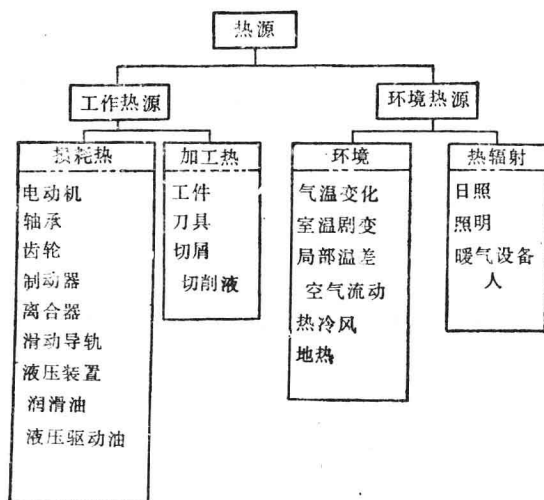


图 1.1-2 导致机械设备热变形的热源

机械设备有各种运动副，如主轴及传动轴的滚动轴承或滑动轴承、齿轮副、摩擦离合器、制动器、导轨副、丝杠螺母副等等，它们在相对运动时产生一定的摩擦力（或摩擦力矩）和摩擦热。摩擦热会导致机械构件温度的升高；另一方面，又会通过润滑油散布开来，使设备内的润滑油池，成为一个很大的热源。

电气、机械动力源的能量消耗也转化为热，如电动机、电气柜、油泵、液压操纵箱、油路系统等的发热，这些转化热在设备中形成另一种热源。

周围环境的温度，随气温变化及昼夜温度的变化而变化，局部室温差、空气对流、热冷风等，都会使机械设备的温度发生变化。机械设备受阳光照射，照射位置和照射强度不同，使设备的温升和变形也不同。照明灯光、取暖装置的影响，与日照的影响相类似。

在机械加工时，消耗于材料弹、塑性变形和刀具与工件切屑摩擦的切削能，极大部分转化为热能，这对机床的影响不容忽视。

研究热变形，显然首先要知道热源的情况，即它的分布位置、单位时间内的发热量和作用的持续时间。确定热源的分布位置和作用持续时间比较容易，但要准确地确定其发热量的大小，则比较困难。对一些发热量经常变动的工作热源（如主轴轴承的发热）更为麻烦，这些问题至今还没有得到完满的解决。对于结构形状复杂的机床等机械设备，其热源发热量的计算更显得困难。近年来，有人应用有限元法，根据热源周围少数几点的温度测定值，推算出热源发热量的大小及其变动情况，有待进一步深入研究和实践的检验。

二、机械系统热变形的影响

如前所述，由于热变形的影响，使机械设备的工作性能改变，在机械加工时，使加工精度下降。设备的工作性能，是指设备的运行规律、传动精度以及工作的稳定性等；而加

工精度，即指零件在加工后所得到的尺寸精度、形状精度、相互位置精度和表面粗糙度。影响这些精度与性能的因素较多，主要是受力变形与受热变形。对于一些精密设备，原始刚度较大，原始精度也较好，受力变形的影响一般处于次要地位，而热变形的影响显得十分突出。

在一定的工作条件下，热源产生的热量传给机械设备，使各部位产生温升，各零部件引起热膨胀，由于零部件的形状、结构、材料与边界换热情况的不同，引起拉伸、弯曲、扭曲等各种变形，致使机械设备的工作性能变差，机械加工时，加工精度下降。

各种热源的发热量以及环境温度，都随机械设备的运行情况和时间而变化；又因为机械设备都有一定的热容量，其温升存在一定的时间滞后。因此，热变形是随时间变化的非恒定现象。同时，在不少场合，热源、温度场、热变形三者之间的相互作用十分明显。例如，某些机械设备，主轴轴承在运转时发热，使轴承圈温度升高产生热膨胀，于是间隙减小，摩擦力增加，提高了发热量，从而使轴承热膨胀情况进一步恶化，直至轴承被卡住，设备无法正常运行。

机械加工时，工艺系统各个环节受各种热源的影响，产生复杂的变形，破坏了工件和刀具间正确的相对运动关系，直接影响被加工工件的精度。在精密加工与自动化加工中，显得尤为突出。在这些环节中，机床热变形最为主要。车、铣、镗类机床的主要热源是主轴箱的发热，导致箱体和床身的变形与翘曲、立柱倾斜，这种变形使主轴发生位移和倾斜，主轴相对工作台的正确位置发生变动。磨床类机床的主要热源是砂轮轴轴承的发热和液压系统的发热。砂轮轴轴承的发热，使轴线升高，并使砂轮架向工件趋近；而液压系统的发热使床身各处温升不同，致使床身弯曲和前倾。立式车床、龙门铣、龙门刨等大型机床，除因导轨摩擦发热引起的热变形外，车间温度的变化也会引起变形。

三、热平衡和热态几何精度

机械设备在运行过程中受各种热源的影响，通过传热而使其各个部分温度迅速上升，与此同时，传给它的热量又向周围的空间散失，当传入的热量与散失的热量相等时，即达到热平衡状态。此时，温升为一固定的数值，而设备上各点，由于其与热源的距离不同而有不同的稳定温升值。设备的热变形也达到一个稳定的数值。研究热平衡具有实际意义，因为在此状态下因热变形而形成的误差，一般为常值，不再变化不定，可以采取适当的措施予以消除和补偿。精密加工一般要在机床热平衡后才可进行，由于各种机床及其各种各样部件形状复杂，尺寸差异也较大，达到热平衡所需要的时间都不相同。一般机床，如车床，最热部位（主轴前轴承）的温升，通常不大于 40°C ，磨床温升一般不高于 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ ，这两类机床的热平衡时间在 $4\sim 6$ 小时之间。一些中、小型精密机床，由于采取各种措施，减少和排除其发热量，热平衡时间可以控制在2小时左右。大型精密机床，由于尺寸大，热容量大，导热慢，其热平衡时间很长，如SIP-8P坐标镗横梁的热平衡时间长达12小时。

机械设备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费的时间与所达到的几何精度对设备的性能或获得的加工精度影响很大。因此，希望机械设备本身的几何精度保持不变，而且希望在启动后不久便很快达到这一不变的精度数值。因此，提高机械设备特别是精密设备的热态几何精度与减少达到热平衡所花费的时间，成为目前重

要的研究课题之一，这是与机械设备传热有密切关系的问题。

第二节 热变形问题的研究概况

机械设备的热变形是个复杂而难处理的问题。机械设备在运行后，始终处在各种热源的作用之下，而且这些热源一般都是恒定的，特别是随着工作条件的不同，其变化程度也不同；同时，还受设备各个构件传热问题的支配，机械各个构件材料、形状、结构各不相同，因而各自的热惯性也不相同，联接件之间的接触热阻以及不尽相同的换热情况等等因素，使机械设备形成一个复杂的温度场；由于机械构件在温度场作用下产生的热应力、热应变又随材料的物理特性、构件形状以及支承联接状态的不同而变化，使机械设备的热变形更加复杂。所有这些都给热变形的研究带来很大困难。

人们对于热变形问题的认识，最先是在机械加工时开始的。首先注意到的是工件热变形对加工精度的影响。工件在刚加工完所测得的尺寸与冷却后再测量的尺寸不一样，这是工件冷却后收缩的结果。磨削加工时，有经验的工人往往采取一些措施，如等工件冷却后再测量并作一定的修正加工，或者有意识地将工件磨得稍大一些，以便冷缩后的工件尺寸刚好符合精度要求。

作为一种典型的机械设备——机床，其热变形问题，开始注意的时间较晚。如果从1933年瑞士对坐标镗的热变形进行分析研究算起，至今也不过50多年。这段过程，大致可划分为三个阶段。

1.30年代到40年代末期。对若干种机床的热变形情况，进行一些分散性的分析，偏重于对个别机床作一些实用性改进。

2.50年代到60年代中期。对各类机床开展系统的试验研究，并初步建立起若干理论，这些理论由于采用种种简化条件，显得十分粗糙。这一阶段基本上停留在定性分析和对比试验的水平上。

3.60年代末期至现在。由于电子计算机、红外热象仪、激光全息摄影以及有限元法分析测试手段的应用，研究有了新的突破，使理论分析由定性开始进入定量阶段。

许多国家将热变形问题列为重点研究课题，进行了系统的理论探讨和试验研究，其中以日本和联邦德国的研究阵容为最大。特别是日本东京大学，形成以佐田登志夫为首的学派，将机床热变形看作是由于温度变化引起机床结构刚度的不足，提出“热刚度”的概念，并从结构变形对加工精度产生影响的角度出发，将静、动、热刚度三者统一起来研究，依此提出控制机床结构变形的计算机辅助设计(CAD)；同时，还提出使机床在加工前迅速稳定，加工过程中保持稳定温度分布的计算机辅助制造(CAM)，从而大大推动了理论研究的发展，使热变形问题的分析达到了一个新的高度。

我国在60年代初开始机床热变形方面的研究。一些工厂、科研机构和高等院校进行了不少分析计算与试验研究工作，取得了很多研究成果，改进了被研究机床的热态特性，提高了加工精度。十年动乱，我国在这方面的研究工作基本停顿下来，而这段时期，正是国外科学技术飞速发展的时期，在机床热变形的理论与实用性研究方面，我们和国外先

进水平相比,已经存在很大差距。随着我国四化建设事业的蓬勃发展,热变形问题的重要性,已为人们认识并给予足够的重视。机械电子工业部正式将机床的热态特性作为检验机床质量、评选优质产品和出口产品的主要考核指标之一。许多单位先后恢复与开展了这项研究工作。从全国范围讲,成立了由高等院校、科研机构以及一些工厂组成的学术组织,将各方面力量组织起来,对研究工作进行协调,力争很快缩短与国外先进水平的差距,使热变形问题的研究工作以更快的速度向前发展。

第三节 本课程的特点与学习方法

随着科学技术的发展和对各种机械设备性能要求的提高,热变形问题愈来愈显得突出。为了适应机械工程技术人员扩充知识的需要,设置了“机械结构热变形”课程。本课程是机械专业的一门技术基础课。其任务是,使学员获得一定的有关机械结构温度分布、热变形的理论知识,以及相应的分析、计算能力。

在学完本课程后,应达到如下要求:

- 1.熟悉传热学的基本知识。能对典型的机械构件在不同表面换热条件下的温度分布,进行分析和计算。
- 2.掌握机械结构变温后变形的基本规律,能对典型的机械构件在不同约束条件下变温后的变形,进行分析和计算。
- 3.能初步分析和估算机械系统中各种机械构件的热变形,并提出相应的对策。
- 4.熟悉有关温度分布和热变形量的测试手段与实验方法。

本课程理论性较强,学员应具有高等数学、工程力学等预备知识,应先修包括线性代数、积分变换、微分方程在内的工程数学课,以及有限元法的基本知识。

由于热变形问题十分复杂,如果完全应用理论分析与计算的方法,并不完全有效。在实际中,通常采用计算和试验相结合的方法。先对需要改进的机械设备进行空运转试验,测得各种有关数据,并确定有影响的部件或构件。然后应用传热理论、热变形理论建立传热数学模型,算出温度分布、热变形值和达到热平衡所需时间。将计算结果与试验结果进行比较,在此基础上反复修改设计与计算新设计构件的温度分布与热变形值,直至满足规定的设计要求。

本课程讨论的一些问题,都具有解决手段多样化的特点。例如,导热方程式的求解,有包括分离变量法、积分变换法等解析法,有限差分法、有限元法的数值法,以及热源法等。在学习时,注意这些方法的适用范围,根据具体内容选择有效的办法。

第二章 传热学基础

自然界和各个技术领域中，普遍存在着温度的差异。凡是有温差的地方，就有热量的传递。传热学就是研究热量传递规律的一门科学，它不仅论述热量为什么能传递，而且研究在具体条件下热量传递的速率和温度随时间的变化关系。

当机械构件传入和传出的热量不平衡时，其温度就要发生变化；在温度改变的同时，构件本身势必产生相应的变形。因此，机械构件的热变形问题和传热学关系极为密切，在机械设计、运行过程中大量地应用传热学的有关知识。

第一节 热量传递的三种基本方式

根据物理本质的不同，热量的传递可分为导热、对流和辐射三种基本方式。

热量通过固体或静止的流体（气体或液体）进行扩散而传递的现象称为导热（又称热传导）。在不同的介质中，其传热机理也不同。在气体中，导热是气体分子不规则热运动时相互碰撞的结果。金属导体中的导热主要靠自由电子的运动交换能量。在液体和非导电的固体中的导热，是通过晶格结构振动的传递，即通常称之为弹性波的作用实现。单纯的导热过程中，物体各部分之间不发生相对位移，也没有能量形式的转换。

对流是指流体各部分之间发生相对位移时引起的热量传递过程。对流只出现在流体中，而且总是伴随着流体本身的导热作用。在工程上经常遇到的是流体流过固体壁面时所发生的热交换过程，称为对流换热。对流换热是流体的对流和导热联合作用的结果。

物体通过电磁波传递能量的过程称为辐射。由于热的原因而发出辐射能的过程称为热辐射。在工业温度（ $<2000^{\circ}\text{C}$ ）范围内，有实际意义的热辐射波长位于波谱的 $0.38\sim 1000\mu\text{m}$ 之间，且大部分能量位于红外线区段的 $0.76\sim 20\mu\text{m}$ 范围内。热辐射不仅产生能量的转移，而且还伴随着能量形式的转化，从热能转化为辐射能，或者由辐射能转化成热能。

不同的热传递方式遵循不同的换热规律。但通常是几种基本方式同时发生，这就使得实际的热传递过程显得比较复杂。常将几种传递方式联合作用的热交换过程给予一些专门的名称。例如，将热量从一流体通过固体间壁传往另一流体的过程称为传热过程。整个过程是串联着的三个换热环节的组合作：即一流体流向壁面的对流换热，通过间壁的导热，壁面到另一流体的复合换热。

第二节 热传导

直接接触的物体或物体本身各部分温度不同，将有能量的转移，这就是导热现象，热量从温度较高的部分传递给温度较低的部分，力图将温度逐渐拉平。

通常，只有在紧密的固体中才能发生单纯的导热，而流体在各部分温度不同时，既发生导热，同时还伴随着对流现象，只有当流层极薄时，才不考虑对流的作用。相对而言，在流体中，与其它热传递形式比较，导热的作用一般不大。

一、温度场

要讨论导热现象，必须涉及物体的温度分布情况。在某一瞬间，物体空间所有各点温度分布的综合，称为温度场。一般温度 t 是空间坐标和时间 τ 的函数，可用

$$t=t(x, y, z, \tau) \quad (\text{直角坐标系}) \quad (2.2-1)$$

$$t=t(r, \varphi, z, \tau) \quad (\text{圆柱坐标系}) \quad (2.2-2)$$

$$\text{和} \quad t=t(r, \varphi, \psi, \tau) \quad (\text{球坐标系}) \quad (2.2-3)$$

描述。

温度分布随时间变动的温度场称为非稳态温度场（或非定常温度场）。例如机械在启动、停车或者工况改变时就出现这种温度场。如果物体各点的温度不随时间而改变，这种温度场称为稳态温度场（或称定常温度场）。机械在稳定工作条件下工作，就出现稳态温度场。这时， $\frac{\partial t}{\partial \tau}=0$ ，如在直角坐标系中，温度场表示为

$$t=t(x, y, z)$$

在特殊情况下，温度变化只局限在一个或两个坐标方向上。这时，相应地称为一维或二维温度场。

应该强调指出，由于温度是标量而不是矢量，所以，温度场不是矢量场，而是标量场。

发生在稳态温度场中的导热，称为稳态导热；而发生在非稳态温度场中的导热，则称为非稳态导热。

温度场还可用等温面、等温图等进行几何描述。同一瞬间，物体上有着同样温度各点的轨迹，称为等温面。等温面上任何一曲线都称之为等温线。等温面彼此不能相交，否则在相交处会出现两种不同的温度。对于某一截面，等温面表现为等温线。图2.2-1为一专用车床倾斜式床头箱温度场的等温线图。所示截面内，各点温度不均匀，因此，就有热量的流动。显然，这一温度场并不是一维的。

由于热量总是自发地由高温处流向低温处，可见，热流是一个矢量。因为在等温面上各处的温度相同，所以在等温面上没有热量的流动，热量只能沿着垂直于等温面且朝着温度减少的方向流动。有了温度场，便可作出热流线，显示其热量流动的情况（如图2.2-2所示）。

热流量的大小与给定方向上温度变化的程度有关。温度场内某一点在垂直其所在等温面法向上的温度变化程度，可用该点的温度梯度表示。温度梯度就是等温面法向上温度增量 Δt 和法向距离 Δn 之比的极限，用 $\text{grad}t$ 表示

$$\text{grad}t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \frac{\partial t}{\partial n} \quad (^\circ\text{C}/\text{m}) \quad (2.2-4)$$

温度梯度是一个矢量，通常将温度增加的方向作为其正方向，因而，它与热流线的方向恰好相反。

在直角坐标系中, 温度沿各个坐标方向的变化率, 等于温度梯度在该坐标轴上的投影, 即

$$\left. \begin{aligned} \text{grad}_x t &= \frac{\partial t}{\partial n} \cos(n, x) = \frac{\partial t}{\partial x} \\ \text{grad}_y t &= \frac{\partial t}{\partial n} \cos(n, y) = \frac{\partial t}{\partial y} \\ \text{grad}_z t &= \frac{\partial t}{\partial n} \cos(n, z) = \frac{\partial t}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (2.2-5)$$

对于温度只在 x 方向有变化的一维稳态温度场,

则

$$\text{grad } t = \frac{dt}{dx} \quad (2.2-6)$$

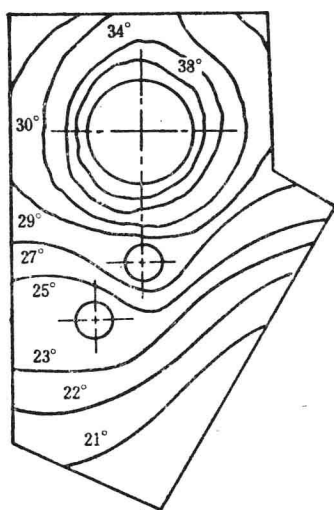


图 2.2-1 专用车床床头箱的温度场

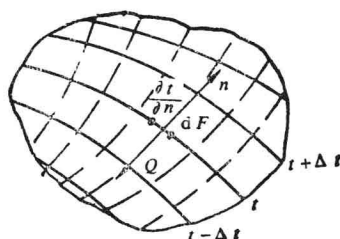


图 2.2-2 等温线(实线)、热流线(虚线)和温度梯度

二、付里叶定律

法国物理学家付里叶 (Fourier) 根据丰富的实验资料、热力学定律和数学推理建立了导热基本定律, 即付里叶定律。它指出, 在均匀一致的导热体中, 单位时间内通过垂直热流方向面积 dF 的热量 Q , 与该处的温度梯度 $\frac{\partial t}{\partial n}$ 和微元面积成正比, 用公式表示, 即

$$Q = -\lambda dF \frac{\partial t}{\partial n} \quad (W) \quad (2.2-7)$$

式中: λ —— 导热系数; 负号表示热量传递方向与温度增高方向相反。

单位时间内通过一给定面积的热量称为热流量; 单位时间内通过单位面积的热量称为热流密度, 付里叶定律按热流密度的形式, 可写为

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (W/m^2) \quad (2.2-8)$$

付里叶定律说明, 只有当导热体中温度梯度不为零时, 才可能发生热流。温度梯度是确定热流的唯一物理参数, 而各点间的温度差还不能完全说明这种特性, 因温差相同, 而两者间的距离不同, 将导致热流量的不同。

当已知物体内的温度场时, 由式 (2.2-7) 就可以计算热流量。因为, 已知温度为空间坐标的函数, 此函数对空间坐标的偏导数也就被确定了; 但是相反, 若已知热流量, 温度

场尚不能完全确定，还必须给出为确定积分常数的其它条件。

三、导热系数

导热系数 λ 说明物体的导热能力，在数值上等于单位温度梯度作用下物体内产生的热流密度值，其单位为 $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

工程上各种物质的导热系数值，都是用专门的实验设备测定出来的。一些常用物质的导热系数值列于表2.2-1和表2.2-2中。

导热系数取决于该物质的化学成分、组织结构以及温度等。一般，导热系数以金属为最大，非金属固体次之，液体较小，气体最小。例如，常温下银、混凝土、水、空气的导热系数分别为458、1.28、0.58和0.023 $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

图2.2-3所示，为几种物质的导热系数和温度的关系。对于大多数材料，可采用线性近似关系。

$$\lambda = \lambda_0 (1 + kt) \quad (2.2-9)$$

式中： λ_0 —— $0^\circ C$ 时的导热系数；

k ——实验常数。对多数金属， k 为负值；对气体、隔热材料 k 为正值。

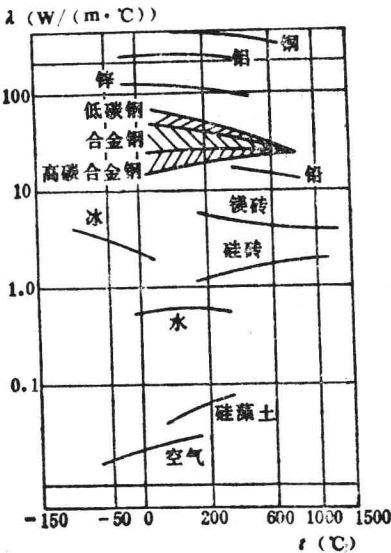


图 2.2-3 导热系数和温度的关系

通常将在常温下导热系数小于 $0.23 W/(m \cdot ^\circ C)$ 的材料称为隔热材料或保温材料，如石棉、橡胶材料、泡沫塑料、硅藻土、纤维板等，都具有良好的隔热作用。

有些材料，如木材、石墨等，由于其结构的方向性，导热系数随方向的不同而有很大差异，在使用时，应指明其导热方向。

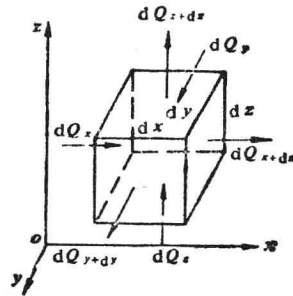


图 2.2-4 微元六面体的导热分析

四、导热微分方程式

一维导热的温度场，可应用付里叶定律直接积分求解，但对于多维的导热问题，则必须解决不同坐标方向间导热的相互联系。一般采用这样的步骤：从机械构件中取出一六面微元体进行分析，利用付里叶定律以及能量守恒定律，求得描述导热体内温度分布的微分方程式。

任意方向的热流总可以分解成 x ， y ， z 三个方向的分热流。以 x ， y ， z 为坐标取出的平行六面微元体，边长为 dx ， dy ， dz ，分别平行于坐标轴 x ， y ， z (图2.2-4)。为了减少问题的复杂性，假定导热系数 λ ，比热 c ，密度 ρ 为常量，且材料各向同性。

表 2.2-1 金属材料的热容、比热容和导热系数

材 料 名 称	20℃			导 热 系 数 λ W/(m·℃)										
	密 度 ρ kg/m ³	比 热 容 C_p J/(kg·℃)	导热系数 λ W/(m·℃)	温 度 ℃										
				-100	0	100	200	300	400	600	800	1000	1200	
纯 铝	2710	902	236	243	236	240	238	234	228	215				
杜拉铝(96Al—4Cu, 微量Mg)	2790	881	169	124	160	188	188	193						
铝合金(92Al—8Mg)	2610	904	107	86	102	123	148							
铝合金(87Al—13Si)	2660	871	162	139	158	173	176	180						
镁	1850	1758	219	382	218	170	145	129	118					
纯 铜	8930	386	398	421	401	393	389	384	379	366	352			
铝青铜(90Cu—10Al)	8360	420	56		49	57	66							
青铜(89Cu—11Sn)	8800	343	24.8		24	28.4	33.2							
黄铜(70Cu—30Zn)	8440	377	109	90	106	131	143	145	148					
铜合金(60Cu—40Ni)	8920	410	22.2	19	22.2	23.4								
黄 金	19300	127	315	331	318	313	310	305	300	287				
纯 铁	7870	455	81.1	96.7	83.5	72.1	63.5	56.5	50.3	39.4	29.6	29.4	31.6	
阿娟口铁	7860	455	73.2	82.9	74.7	67.5	61.0	54.8	49.9	38.6	29.3	29.3	31.1	
灰铸铁(C≈3%)	7570	470	39.2		28.5	38.4	35.8	37.2	86.6	20.8	19.2			
碳钢(C≈0.5%)	7840	465	49.8		50.5	47.5	44.8	42.0	39.4	34.0	29.0			
碳钢(C≈1.0%)	7790	470	43.2		43.0	42.8	42.2	41.5	40.6	36.7	32.2			
碳钢(C≈1.5%)	7750	470	36.7		36.8	36.6	36.2	35.7	34.7	31.7	27.8			
铬钢(Cr≈5%)	7830	460	36.1		36.3	35.2	34.7	33.5	31.4	28.0	27.2	27.2	27.2	27.2
铬钢(Cr≈13%)	7740	460	26.8		26.5	27.0	27.0	27.0	27.6	28.4	29.0	29.0		
铬钢(Cr≈17%)	7710	460	22											
铬钢(Cr≈26%)	7650	460	22.6											
铬镍钢(18~20Cr/8~12Ni)	7820	460	15.2	12.2	14.7	16.6	18.0	19.4	20.8	23.5	26.3			

续表

材 料 名 称	20℃			导 热 系 数 λ W/(m·℃)										
	密 度 ρ kg/m ³	比 热 容 C_p J/(kg·℃)	导热系数 λ W/(m·℃)	温 度										
				℃										
	-100	0	100	200	300	400	600	800	1000	1200				
铬镍钢(17~19Cr/9~13Ni)	11.8	14.3	16.1	17.5	18.8	20.2	22.8	25.5	28.2	30.9				
镍钢(Ni≈1%)	40.8	45.2	46.8	46.1	44.1	41.2	35.7							
镍钢(Ni≈3.5%)	30.7	36.0	38.8	39.7	39.2	37.8								
镍钢(Ni≈25%)														
镍钢(Ni≈35%)	10.9	13.4	15.4	17.1	18.6	20.1	23.1							
镍钢(Ni≈44%)		15.7	16.1	16.5	16.9	17.1	17.8	18.4						
镍钢(Ni≈55%)	17.3	19.4	20.5	21.0	21.1	21.3	22.5							
锰钢(Mn≈12~13%, Ni≈3%)			14.8	16.0	17.1	18.3								
锰钢(Mn≈0.4%)			51.0	50.0	47.0	43.5	35.5	27						
钨钢(W≈5~6%)		18.4	19.7	21.0	22.3	23.6	24.9	26.3						
铅	37.2	35.5	34.3	32.8	31.5									
镁	160	157	154	152	150									
铝	146	139	135	131	127	123	116	109	103	93.7				
镍	144	94	82.8	74.2	67.3	64.6	69.0	73.3	77.6	81.9				
铂	73.3	71.5	71.6	72.0	72.8	73.6	76.6	80.0	84.2	88.9				
银	431	428	422	415	407	399	384							
锡	75	68.2	63.2	60.9										
钛	23.3	22.4	20.7	19.9	19.5	19.4	19.9							
铀	24.3	27	29.1	31.1	33.4	35.7	40.6	45.6						
铯	123	122	117	112										
铈	26.5	23.2	21.8	21.2	20.9	21.4	22.3	24.5	26.4	28.0				
钨	204	182	166	153	142	134	125	119	114	110				
钨	179													

表 2.2-2

保温、建筑及其它材料的密度和导热系数

材 料 名 称	温 度 t ℃	密 度 ρ kg/m ³	导 热 系 数 λ W/(m·℃)	材 料 名 称	温 度 t ℃	密 度 ρ kg/m ³	导 热 系 数 λ W/(m·℃)
膨胀珍珠岩散料	25	60~300	0.021~0.062	玉米梗板	22	25.2	0.065
沥青膨胀珍珠岩	31	233~282	0.069~0.076	棉 花	20	117	0.049
磷酸盐膨胀珍珠岩制品	20	200~250	0.044~0.052	丝	20	57.7	0.036
水玻璃膨胀珍珠岩制品	20	200~300	0.056~0.065	锯 木 屑	20	179	0.083
蛭 石	20	395~467	0.10~0.13	硬泡沫塑料	30	29.5~56.3	0.041~0.048
膨胀蛭石	20	100~130	0.051~0.07	软泡沫塑料	30	41~162	0.043~0.056
沥青蛭石板管	20	350~400	0.081~0.10	铝箔间隔层(5层)	21		0.042
石 棉 粉	22	744~1400	0.099~0.19	红砖(营造状态)	25	1860	0.87
石 棉 砖	21	384	0.099	红 砖	35	1560	0.49
石 棉 绳		590~730	0.10~0.21	松木(垂直木纹)	15	496	0.15
石 棉 绒		35~230	0.055~0.077	松木(平行木纹)	21	527	0.35
石 棉 板	30	770~1045	0.10~0.14	水 泥	30	1900	0.30
磷酸镁石棉灰		240~490	0.077~0.086	混凝土板	35	1930	0.79
硅藻土石棉灰		280~380	0.085~0.11	耐酸混凝土板	30	2250	1.5~1.6
粉煤灰砖	27	458~589	0.12~0.22	黄 砂	30	1580~1700	0.28~0.34
矿 渣 棉	30	207	0.058	泥 土	20		0.83
玻 璃 丝	35	120~492	0.058~0.07	瓷 砖	37	2090	1.1
玻璃棉毡	28	18.4~38.3	0.043	玻 璃		2500	0.52~1.1
软 木 板	20	105~437	0.044~0.079	聚苯乙烯	30	24.7~37.8	0.04~0.043
木丝纤维板	25	245	0.048	花 岗 石		2643	1.73~3.98
稻草浆板	20	325~365	0.068~0.084	大 理 石		2499~2707	2.70
麻 杆 板	25	108~147	0.056~0.11	云 母		290	0.58
甘 蔗 板	20	282	0.067~0.072	水 垢	65		1.31~3.14
葵 芯 板	20	95.5	0.05	冰	0	913	2.22

设 x 方向自左面进入微元体的热量为

$$dQ_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dydzd\tau \quad (a)$$

经过 $x+dx$ 自右面导出微元体的热量, 亦可根据导热基本定律写出

$$dQ_{x+dx} = -\lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(t + \frac{\partial t}{\partial x} dx \right) dydzd\tau, \quad (b)$$

同理, 沿 y 方向进入的热量

$$dQ_y = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} dxdzd\tau \quad (c)$$

传出的热量为

$$dQ_{y+dy} = -\lambda \frac{\partial}{\partial y} \left(t + \frac{\partial t}{\partial y} dy \right) dxdzd\tau \quad (d)$$

沿 z 方向进入的热量

$$dQ_z = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} dxdydz \quad (e)$$

传出的热量为