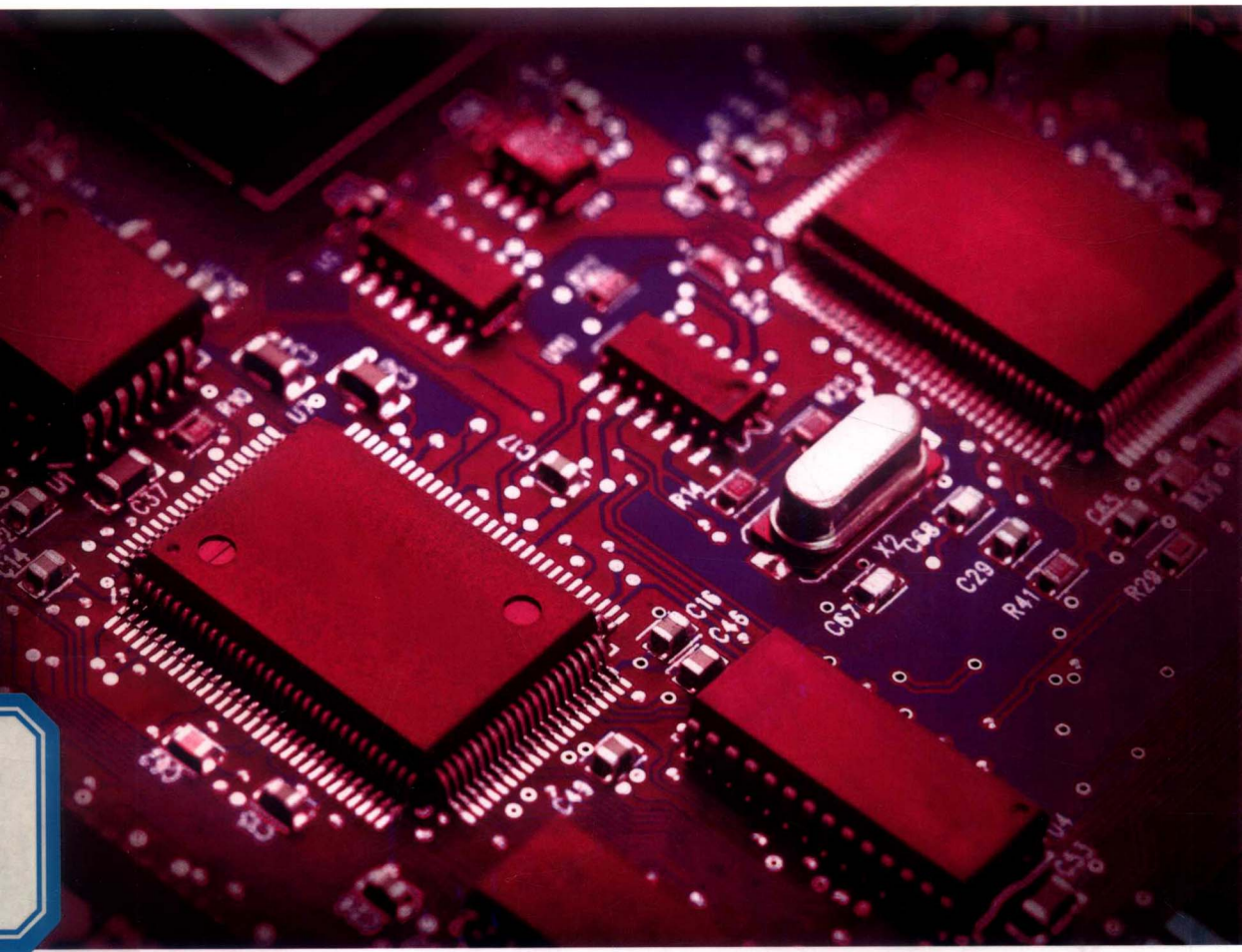


电子封装技术专业学术专著

微电子系统热管理

Thermal Management of Microelectronic Systems

张旻澍 谢安 莫堃 冯玲 林建平 著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

电子封装技术专业学术专著

微电子系统热管理

张旻澍 谢安 莫堃 冯玲 林建平 著



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了如何将传热学知识应用到微电子系统的散热设计与管理中,重点阐述了热工程师解决热问题的工程逻辑,引导读者由浅入深地完成学习。全书共分8章。前3章介绍传热学的基本知识,通过绘制热图像的方式引导读者理解导热微分方程背后的物理意义。第4、5章讲述如何从定性热分析过渡到半定性半定量分析,即采用热阻网络的方法分析微电子工程、工艺中的热问题。第6章介绍有限元方法的特点以及如何开展正确的数值分析。第7章介绍常见的热测量方法。第8章介绍非稳态导热问题。

本书适用于本科生、研究生阶段的教学,适用专业包括微电子技术、电子封装技术、机电工程等与微电子制造相关的专业。

图书在版编目(CIP)数据

微电子系统热管理/张旻澍等著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2019. 7

ISBN 978-7-5606-5320-4

I. ①微… II. ①张… III. ①微电子技术—散热—研究
IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 098798 号

策划编辑 邵汉平

责任编辑 王 静

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2019年7月第1版 2019年7月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 12.5

字 数 292千字

印 数 1~3000册

定 价 45.00元

ISBN 978-7-5606-5320-4/TN

XDUP 5622001-1

如有印装问题可调换

前 言

早在高中物理的学习中，我们就知道热学是物理学的一个分支。高中物理介绍了热学的一些基本常识，例如温度、熵、能量的概念，再通过一些基本假设，可以运用高中数学的公式进行简化计算。然而，上述这些对于认知三维世界中的热现象是远远不够的。热学的本质是研究物质处于热状态时的有关性质和规律，它起源于人类对冷热现象的探索。在大学学习阶段，根据不同专业的不同培养要求，热学的学习也有所侧重，有的以传热学为主，有的以热力学为主。二者都属于热学研究的范畴，但又有所区分。传热学(Heat Transfer)是研究由温差引起的热能传递规律的科学。热力学(Thermodynamics)是从宏观角度研究物质的热运动性质及其规律的科学。简单说，前者是研究热场，即温度(T)是如何随时间(t)和空间(x, y, z)变换的；而后者是研究热能，即热能量(Q)是如何与其他形式的能量进行转化的。对于工程应用而言，前者更偏向厘清热传递的过程，后者偏向计算能量的最终状态。

那么，微电子系统的热管理应当侧重哪一方面的热学知识呢？众所周知，20世纪90年代开始至今，消费类电子产品已经从功能类工具演变为人们生活必不可缺的通信消费产品。微电子系统在生产和使用的过程中，存在着大量的热现象，其核心热源就是芯片。当电流经过芯片时，大部分电能转化为热能，并以封装体为载体导出系统，最后至外界。如果系统的散热效果不好，电子产品的热场(特别是与人接触的部分)可能会超过人类感知温度的上限(47°C)，从而发生烫伤等事故；而超过材料的温度极限(125°C)，就会造成电子产品失效，严重的还会引起锂电池爆炸。此外，由于变温引起的机械失效、电失效和腐蚀失效等，同样会对产品的质量 and 可靠性带来严重影响。因此，在电子产品的设计和制造中，更为关注的是热量的传递。微电子系统热管理的核心任务就是使

热场在电子产品的物理空间内合理分布。

本书系统地介绍了如何将传热学知识应用到微电子系统的散热设计与管理中,重点阐述热工程师解决热问题的工程逻辑,引导读者由浅入深地分四个阶段完成学习。第一阶段(第1~3章)教授传热学的基本知识。第二阶段(第4、5章)教授如何从定性分析到半定性半定量地采用热阻网络的方法分析微电子工程中的热问题。第三阶段(第6、7章)教授如何利用数值方法定量分析微电子工程中的热问题,并结合实验手段验证仿真结果。第四阶段(第8章)介绍非稳态导热问题。本书的内容适用于微电子技术、电子封装技术、微机电工程等与微电子制造相关的专业。

本书初稿完成之后,华中科技大学、哈尔滨工业大学、西安电子科技大学等兄弟院校的部分教师对本书进行了审定,提出了许多宝贵意见;定稿时,作者根据这些意见做了修改。本书的撰写和最终出版受到如下基金项目的资助:① 2017年福建省网络精品课程项目;② 2017年福建省高等学校创新创业教育改革项目;③ 厦门理工学院专著(教材)基金项目;④ 2018年福建省本科高校重大教育教学改革项目(FBJG20180339)。本书的顺利出版首先要感谢西安电子科技大学出版社邵汉平编辑及其同事的辛苦付出。同时,作者要感谢厦门理工学院的领导和同事一如既往的鼓励和支持。此外,作者还要感谢香港科技大学先进微系统封装中心、香港应用科技研究院、亚马逊中国、宸鸿科技集团(TPK)、晶宇光电(厦门)有限公司、福建省富顺光电有限公司等企业专家提供的宝贵意见。

限于作者的学识水平,书中难免会有不当之处,恳请广大读者批评指正,作者将不胜感激。

张旻澍

2019年2月于厦门集美

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 热管理概述	1
1.2 传热学概述	4
1.3 传热学在微电子系统中的应用	8
第 2 章 导热微分方程	12
2.1 傅里叶导热定律	12
2.2 导热微分方程的建立	15
2.3 单值性条件和热云图	17
第 3 章 稳态导热	23
3.1 一维单层平壁稳态导热	23
3.1.1 无内热源、一类边界条件	23
3.1.2 有内热源、一类边界条件	24
3.1.3 无内热源、三类边界条件	25
3.1.4 有内热源、三类边界条件	26
3.2 一维多层平壁稳态导热	28
3.2.1 无内热源、一类边界条件	28
3.2.2 有内热源、一类边界条件	29
3.2.3 无内热源、三类边界条件	29
3.2.4 有内热源、三类边界条件	30
3.2.5 封装体的一维稳态导热	30
3.3 二维稳态导热	31
第 4 章 定性热分析	35
4.1 封装的散热常识	35
4.2 电子材料的热性能	37
4.3 封装结构的热性能	39
第 5 章 热阻网络分析	42
5.1 热阻网络	42

5.2	界面热阻	48
5.3	扩散热阻	51
5.4	PCB 热阻	54
5.5	翅片与散热器	57
5.5.1	翅片方程	57
5.5.2	翅片热阻、功效和效率	61
5.5.3	散热器的热阻、功效和效率	64
5.6	系统冷却技术	71
5.6.1	封装体的冷却	71
5.6.2	PCB 的冷却	72
5.6.3	集成式冷却	73
第 6 章	数值热分析	76
6.1	有限元方法简介	76
6.2	力场计算流程	80
6.2.1	力场单元构造	80
6.2.2	ANSYS 力场分析过程	83
6.3	热场计算流程	89
6.3.1	热单元构造	89
6.3.2	ANSYS 热场分析过程	90
6.4	微系统热分析	97
6.4.1	单位统一	97
6.4.2	建模技巧	98
6.4.3	数值结果的正确性	102
6.4.4	封装案例分析	105
6.5	微系统热机分析	115
第 7 章	热实验	120
7.1	材料热参数的测量方法	120
7.1.1	导热率(导热系数)的测量	120
7.1.2	比热容的测量	122
7.1.3	热膨胀系数的测量	124
7.2	温度的测量方法	126
7.2.1	热电偶的单点温度测量	126

7.2.2	红外测温仪的表面温度测量	127
7.3	热阻的测量方法	129
第8章	非稳态导热	132
8.1	非稳态导热概述	132
8.2	非稳态导热的集总参数法	134
8.2.1	集总参数法温度场的分析解	134
8.2.2	集总参数法的适用范围	137
8.3	一维非稳态导热的分析解	138
8.3.1	平板导热	138
8.3.2	非稳态导热的正规状况阶段	140
8.4	非稳态导热仿真	142
8.4.1	非稳态热分析的控制方程	142
8.4.2	时间积分与时间步长	142
8.4.3	数值求解的过程	143
8.4.4	非稳态传热分析实例	144
附录	例题的有限元程序	160

第1章 绪 论

本章包含3节,先介绍热管理的任务与流程,后引出传热学和热管理的基本概念。

1.1 热管理概述

电子产品的“一生”经历了产品设计、生产制造、工作使用、拆解回收等几个阶段。除了产品设计,其他几个阶段都伴随着热现象。由于内热源、外部环境等不同,每一阶段的散热管理需分别考量^[1]。在生产制造阶段,电子产品本身没有内热源,在经历高温加工(例如回流焊、波峰焊)的过程中,产品被动地承载来自外部的热量。因此,保证电子材料在短时间的高温工艺下不失效是该阶段热管理的主要任务。同样的,在拆解回收阶段,电子产品也没有内热源,它被动地承载来自外部的热量。因此,保证被拆解器件在高温拆解后仍然能够正常使用是该阶段热管理的主要任务。在工作使用阶段,电子产品既有内热源(芯片),又有外部的热环境变化。因此,控制热场在电子产品的实体空间内合理分布,保证温度不会引起烫伤、自燃等事故,延缓变温对于产品寿命的影响,是该阶段热管理的主要任务。统筹考量各阶段的热管理任务,将散热解决方案融入电子产品的热设计中,才能有效提升电子产品乃至整个系统的散热性能。

一套完整的热设计流程大致包含五部分^[2]:散热需求提炼、定性评估、半定性半定量评估、定量评估和实验验证。首先,从工作条件、使用环境和可靠性要求入手,提炼产品主要的散热需求。工作条件指的是产品的功能定位、工作负载和使用频率。比如两种电子元器件,其功能分别是逻辑运算器件和存储器件,前者的运算能力要求高意味着工作中的负载或者功耗就高,即更多的电能被转化为热能,所以前者的散热需求比后者更加强烈。使用环境指的是产品在正常工作和休息中的外部热环境。比如在严寒地区、沙漠地区,昼夜温差变化大,必将严重影响产品的热场分布和整体变温。可靠性指的是产品寿命,热以及变温引起的热应力是影响产品衰老的重要因素,所以设计产品的使用寿命时就必须考虑其散热需求。

其次,从工程常识入手,初步判定产品的整体散热性能并给出散热初选方案,即定性分析。工程常识指的是工程师对于电子制造领域的常识性认知,包括封装结构和所选材料等。工程常识类似于人们的生活常识,比如生病发烧,人们总是先用手摸下额头,初步判断发热严不严重,然后再用体温计进一步测量体温,没人会用复杂的测温仪去测量,或者用数学公式去计算体温。同理,仍然是上述逻辑运算器件和存储器件的例子,逻辑芯片一般采用BGA(Ball Grid Array,球栅阵列)的封装方式,因为BGA在单位面积内可提供的I/O数远远超过QFP、QFN、SOP等封装方式,所以为了满足逻辑芯片运算的需要,逻辑运算器件总是采用阵列式封装^[3]。但是从BGA的基本结构和选材可以知道,有机基板作衬底的器件其散热效果很差,因为有机材料的导热系数(0.1~1 W/(m·K))远远低于铜

的导热系数($389 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), 所以采用 BGA 方式封装的逻辑器件的散热性能总是要比以铜为衬底的存储器件差很多。通常情况下, 在同一块 PCB 上工作的多数器件, 只有 CPU 或者 GPU 等逻辑器件组装了散热器和热风扇, 而存储器件则都“轻装上阵”, 如图 1-1 和图 1-2 所示。需要说明的是, 在图 1-1 中, 由于现实中散热片和风扇的遮挡, 很难在 PCB 上直接观察到 BGA 器件, 所以图示中的前两张图移除了散热片和风扇部分。综上, 从电子封装的工程常识出发, 散热工程师可以定性评估初步的散热解决方案。定性分析和判断是必不可少的环节, 它需要工程师对封装结构、工艺、材料都有一定的认知。针对封装结构、工艺和材料的热相关知识介绍将在第 4 章展开。

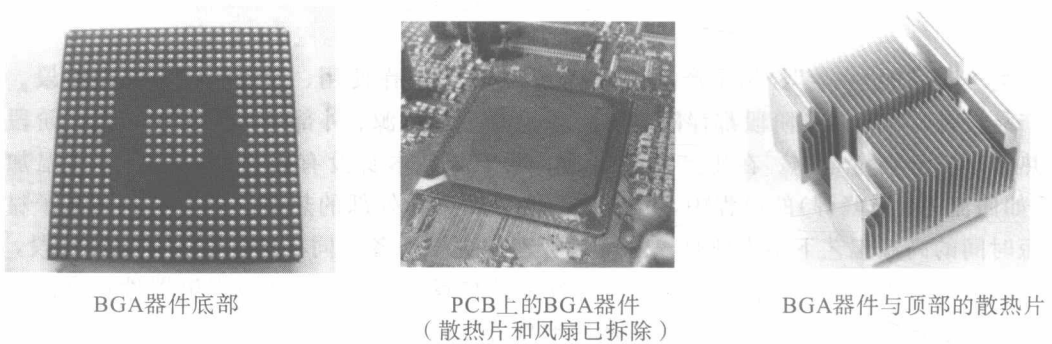


图 1-1 典型逻辑运算器件的封装

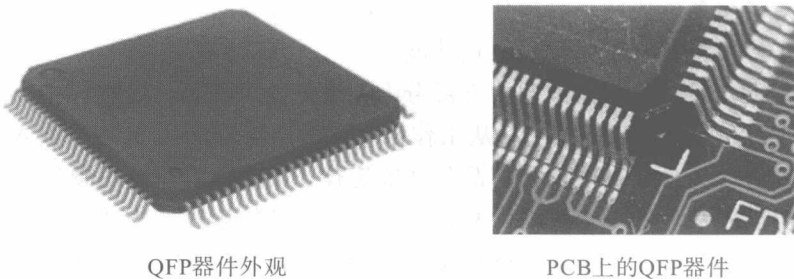


图 1-2 典型存储器件的封装

再次, 热工程师运用传热学知识并结合工程经验开展进一步分析, 即半定性半定量分析。例如, BGA 器件的核心发热源是芯片, 由于封装体的长、宽要远大于其厚度, 所以芯片上的大部分热量都是向上或向下传递到外界的。基于上述情况, 可以假设热量只在封装体内做一维热传递, 那么根据热阻的定义和 BGA 的封装结构可以绘制出热阻网络, 通过计算 BGA 器件的热阻来进一步评估其散热性能, 如图 1-3 所示。该例子中简化计算模型的技巧即为工程经验, 热阻网络即为传热学知识。如何更多、更合理地应用工程经验去简化复杂的热问题, 简化条件的取舍对于热评估的影响程度等工程应用问题将在第 5 章中全面展开。

随着当代计算机水平的突飞猛进, 在半定性半定量分析后, 工程师通常还利用数值分析方法计算产品的热场, 再次验证之前的散热方案并提出优化办法。工程中的定量热分析一般借助商用仿真软件平台, 因为封装的内部结构复杂且不规整, 基本无法应用传热学的

传统知识进行理论推导与运算。仍然沿用上述 BGA 器件的例子,虽然在半定性半定量的分析中已经评估了器件的热阻,但这毕竟是个简化的一维问题。在时间、经费等甲方的需求下以及实际工作中,一个三维热仿真往往是精确评估微电子系统热场的必要途径。热仿真具体包括几何建模、模型简化、材料参数与载荷添加、数据分析与结果绘图等,如图 1-4 所示。具体的数值软件介绍、使用操作和案例分析将在第 6 章展开。

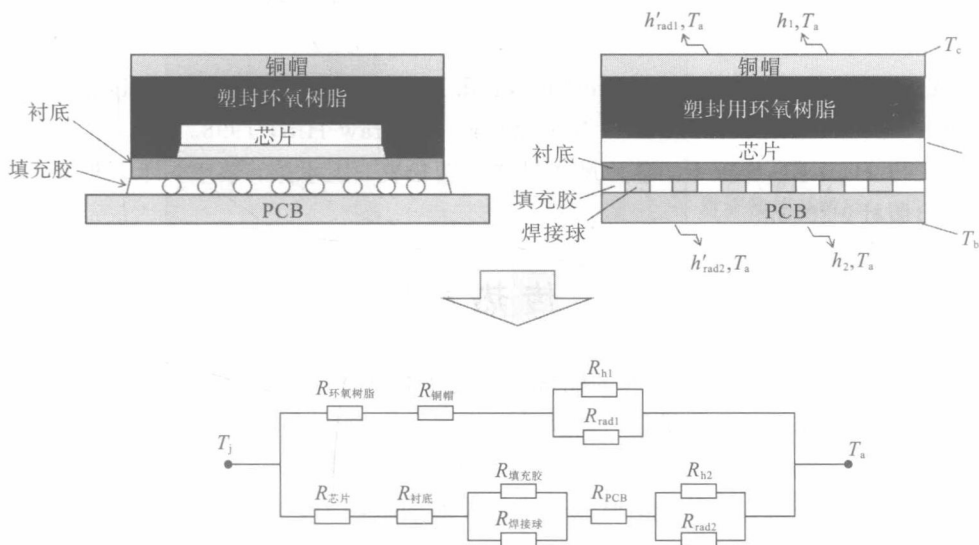
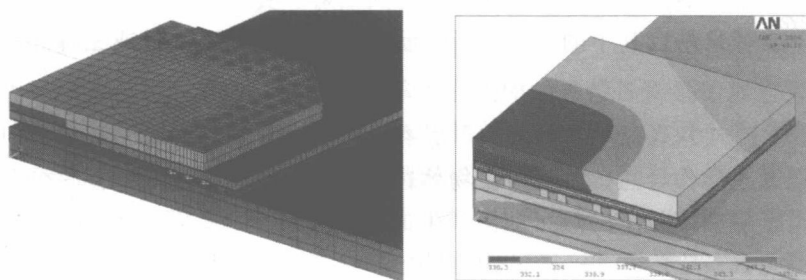


图 1-3 典型的器件简化模型和热阻网络



器件的有限元建模

热分析结果(热云图)

图 1-4 典型的封装热仿真

最后,将仿真结果与实验相比较,验证方案的可行性与可靠性。一些典型的热实验包括热电偶的单点测温、红外仪的外表面测温等(第 7 章的内容)。总结来说,热设计过程就是利用恰当的传热技术来有效冷却电子设备。然而,热设计过程不只是一次设计,热工程师提出的热设计方案不是一劳永逸的,它始终贯穿产品设计的全过程。热工程师应当全程参与产品设计,提出电子产品热范围内可以接受的机械与电气布局方案,判断设计调整后产品是否还能被合理冷却,或者提出顺应设计调整后的热设计建议。

讨论

1. 电子产品如手机、平板电脑、笔记本电脑等,使用一段时间后会感觉到它们在发热

吗?请列举你的生活体验。

2. 为何电子产品会发热呢?请描述你认为的发热理由。假如你是一位散热工程师,你要如何去评估它们是过热、比较热还是正常?

参考文献

- [1] TUMMALA R R. 微系统封装基础. 黄庆安, 唐洁影, 译. 南京: 东南大学出版社, 2005.
- [2] LAU J H, WONG C P, Prince J L, et al. Electronic Packaging: Design, Materials, Process, and Reliability [M]. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [3] LAU J H, LEE S W R. 芯片尺寸封装. 贾松良, 王水弟, 蔡坚, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003.

1.2 传热学概述

传热学是研究由于温差而引起的能量传递规律的学科。众所周知,热力学第一定律表明,在一个热力学系统内,能量是可转换的。它可从一种形式转变成另一种形式,但不能自行产生或毁灭,此为能量守恒。热力学第二定律表明,热量可以自发地由高温热源传给低温热源,即有温差就会有传热,温差是热量传递的推动力。因此,传热学就是以热力学第一定律和第二定律为基础的^[1]。如果用数学公式表达,传热学就是求解物体内部温度分布随时间的变化、放热量随时间的变化,即 $T=f(x,y,z,t)$, $Q=f(t)$ 。在自然界,热量传递的三种基本方式分别是热传导、热对流和热辐射。实际的热量传递过程都是以这三种方式进行的,或者只是以其中的一种进行,但很多情况都是以两种或三种热量传递方式同时进行。

1. 热传导

热传导通常也称作导热,它是指在物体内部或相互接触的物体表面之间,由于分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递现象。导热依赖于两个基本条件:一是必须有温差,二是必须直接接触(不同物体)或在物体内部传递。导热现象既可以发生在固体内部,也可以发生在静止的液体和气体之中。在气体中,导热的机理是气体分子因不规则热运动时的相互碰撞而传递能量;在固体中,导热机理是:在导电的固体中自由电子的运动是主要的导热方式,在非导电固体中晶格振动是主要的导热方式;而液体的导热机理则比较复杂,有兴趣的读者可以参考文献[2]和[3]。通常情况下,本书只讨论在固体内的导热。液体和气体只有在静止的时候(没有了液体或气体分子的宏观运动)才有导热发生。在实际生活中,导热的快慢和材料种类、厚度及温差等因素相关。以一维问题举例来看,一块平板两侧有稳定而均匀的温度,其长、宽远大于其厚度,因此热量 Q 只能沿厚度 x 方向传递,且不随时间变化,那么图 1-5 中的导热热流量可以用下面的公式来计算:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{Ak}{L}(T_1 - T_2) \quad (1-1)$$

式中, \dot{Q}_{cond} 是单位时间内传递的热量,称为热流量,单位为 W; A 是导热物体的表面积 (yOz 平面); k 是材料的导热系数或称导热率,单位是 $W/(m \cdot K)$; L 是物体的厚度; T_1

和 T_2 是板子两侧的温度。其中的导热系数 k 是一种材料参数，其数值的大小反映了物体导热的能力， k 越大它的导热能力越强。式(1-1)还可以改写成

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{L}{Ak}} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{\text{cond}}} \quad (1-2)$$

式中， $R_{\text{cond}} = L/(Ak)$ 称为导热热阻，单位为 K/W。

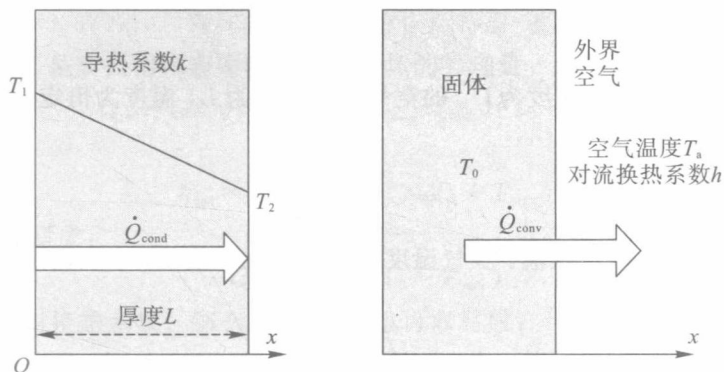


图 1-5 热传导和热对流示意图

2. 热对流

热对流是指由于流体的宏观运动，不同温度的流体相对位移而产生的热量传递现象。对流只能发生在流体中，且一定伴随着流体分子的不规则热运动产生的导热。当流体流过一个固体表面时，由于流体具有黏性，因此附着于固体表面的很薄的一层流体为静止的，在离开固体表面的方向上，流体的速度逐渐增加到来流速度。这一层厚度很薄、速度很小的流体称为边界层。在边界层内，流体与固体表面之间的热量传递是边界层外层的热对流和附着于固体表面的静止的边界层底层的流体导热两种基本传热方式共同作用的结果，这种热现象在传热学中称为对流换热。对流换热按流动起因的不同分为自然对流和强迫对流两种。同样以一维问题举例来看，一块无限大平板(热量沿 x 方向传递)，边界温度为 T_0 ，平板外界是空气，空气的温度为 T_a ，其中 $T_0 > T_a$ ，如图 1-5 所示。对流换热的计算可以由如下公式表达：

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = Ah(T_0 - T_a) \quad (1-3)$$

式中： \dot{Q}_{conv} 是单位时间内的对流热量； A 是换热表面积； h 是该界面的对流换热系数，单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。对流换热系数 h 是对流换热问题的核心，它受多种因素的影响，包括流体的物理性质，换热表面的形状、大小和布置方式、流速等。通常，液体对流换热系数比气体大几个数量级；流速高的液体的换热系数较大；物体表面与物体之间的温度差或重力加速度较大，那么自然对流换热系数则较大。同样可以将式(1-3)改写为

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = \frac{T_0 - T_a}{\frac{1}{Ah}} = \frac{T_0 - T_a}{R_{\text{conv}}} \quad (1-4)$$

式中， $R_{\text{conv}} = 1/(Ah)$ 称为对流换热热阻，单位为 K/W。综合式(1-2)和式(1-4)来看，类似于电学中电阻等于电压除以电流的概念，热阻等于温差除以热流量(热源功率)：

$$R = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \quad (1-5)$$

热阻单位为开尔文每瓦特(K/W)或摄氏度每瓦特(°C/W)。本书的讨论中常用的空气对流换热的一些简化公式如下:

▶ 空气强制对流层流: 速度为 U_∞ 的空气外掠长度为 L , 温度为恒定的平板, 对流换热系数为

$$h = 3.9 \left(\frac{U_\infty}{L} \right)^{1/2} \quad (1-6)$$

▶ 空气强制对流湍流: 速度为 U_∞ 的空气外掠长度为 L , 温度为恒定的平板, 对流换热系数为

$$h = 5.5 \left(\frac{U_\infty^4}{L} \right)^{1/5} \quad (1-7)$$

▶ 垂直平板的自然对流层流: 空气温度为 T_a , 平板长度为 L , 表面温度为 T_0 , 竖直放置的平板其对流换热系数为

$$h = 1.4 \left(\frac{T_0 - T_a}{L} \right)^{1/4} \quad (1-8)$$

▶ 垂直平板的自然对流湍流: 空气温度为 T_a , 平板长度为 L , 表面温度为 T_0 , 竖直放置的平板其对流换热系数为

$$h = 1.1 (T_0 - T_a)^{1/3} \quad (1-9)$$

其他对流换热系数的详细计算本书就不全部展开了, 读者可以在专门介绍传热学的文献或教材^[4]中查找。

3. 热辐射

热辐射是由于物体内部微观粒子的热运动(或者说由于物体自身的温度)而使物体向外发射辐射能的现象。热辐射具有以下 3 个特点:

- (1) 热辐射总是伴随着物体的内能与辐射能这两种能量形式的相互转化;
- (2) 热辐射不依靠中间媒介, 可以在真空中传播;
- (3) 物体间以热辐射的方式进行的热量传递是双向的, 只要物体的绝对温度高于 0 K, 它就会对外发送热辐射。

总而言之, 物体之间的辐射换热量与它们的表面特性、温度、相互位置等因素有关。热辐射的计算往往是复杂和繁琐的, 本书只考虑辐射换热最简单的情况。如图 1-6 所示,

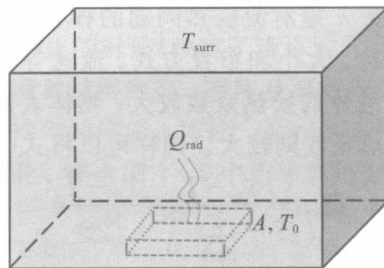


图 1-6 热辐射示意图

一个物体具有温度 T_0 以及表面积 A , 暴露在环境温度为 T_{surr} 的“大空间”中。这里所谓的“大空间”是指以物理壁面围绕这个物体所形成的一个密闭的空间。那么物体与周围环境之间的净辐射传热量为

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A (T_0^4 - T_{\text{surr}}^4) \quad (1-10)$$

其中, T_0 和 T_{surr} 是绝对温度, 其单位为开尔文(K)。它与摄氏温度的关系如下:

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (1-11)$$

式(1-10)中的 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, 称作斯特潘-玻尔兹曼常数; ϵ 是表面发射率, 取值范围为 $0 \sim 1$, 是表征物体表面辐射性能好坏的物理量。展开式(1-10)可以写成:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A (T_0^2 + T_{\text{surr}}^2)(T_0 + T_{\text{surr}})(T_0 - T_{\text{surr}}) \quad (1-12)$$

令

$$h_{\text{rad}} = \epsilon \sigma (T_0^2 + T_{\text{surr}}^2)(T_0 + T_{\text{surr}}) \quad (1-13)$$

式(1-12)又可以写成:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = h_{\text{rad}} A (T_0 - T_{\text{surr}}) \quad (1-14)$$

其中, h_{rad} 称作辐射换热系数。那么式(1-14)也可以写成:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \frac{(T_0 - T_{\text{surr}})}{1/(h_{\text{rad}} A)}, \quad \dot{Q}_{\text{rad}} = \frac{(T_0 - T_{\text{surr}})}{R_{\text{rad}}} \quad (1-15)$$

式中, $R_{\text{rad}} = 1/(Ah_{\text{rad}})$, 称为辐射换热热阻, 单位为 K/W 。然而物体周围的环境温度 T_{surr} 与物体周围的流体(或空气)温度 T_a 并不相同。例如, 夏天房间中的温度通常会低于墙的温度。考虑电子产品工作时的散热状态, 往往采用物体周围的空气温度 T_a 会比较方便。那么对式(1-10)乘以 $(T_0 - T_a)$, 并除以 $(T_0 - T_a)$, 得到

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \frac{\epsilon \sigma (T_0^4 - T_{\text{surr}}^4)}{T_0 - T_a} A (T_0 - T_a) \quad (1-16)$$

令

$$h'_{\text{rad}} = \frac{\epsilon \sigma (T_0^4 - T_{\text{surr}}^4)}{T_0 - T_a} \quad (1-17)$$

则有

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = h'_{\text{rad}} A (T_0 - T_a) = \frac{T_0 - T_a}{1/(h'_{\text{rad}} A)} = \frac{T_0 - T_a}{R'_{\text{rad}}} \quad (1-18)$$

式中, $R'_{\text{rad}} = 1/(Ah'_{\text{rad}})$ 称为修正辐射换热热阻, 单位为 K/W 。式(1-18)和式(1-4)都采用了一样的参考温度, 便于第5章的热阻网络建立。

讨论

1. 试用你的生活经验分析图1-7(a)、(b)、(c)中, 哪一种情况下的包子馅最热。如果以包子馅为研究对象, 请运用传热学概述中的基本概念分析这几种情况中的包子馅都在进行着什么样的热传递。

2. 夏天太热, 人们的降温方式有哪些? 它们是属于热传导主导还是热对流主导? 哪些降温方式更加高效?

3. 加热食物, 人们的烹饪方法有哪些? 哪些属于热传导主导? 哪些属于热对流主导? 哪些加热方式更加高效?



图 1-7 包子的热传递

参考文献

- [1] 严加騄. 工程热力学. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [2] 苏亚欣. 传热学. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009.
- [3] WELTY J R, WICKS C E, WILSON R E. Fundamental of Mass, Heat and Momentum Transfer. Hoboken: John Wiley and Sons, 1998.
- [4] 何燕, 张晓光, 孟祥文. 传热学. 北京: 化学工业出版社, 2015.

1.3 传热学在微电子系统中的应用

微电子系统(产品)在生产和使用过程中,存在着大量的热现象,其核心热源就是芯片。当电流经过芯片时,大部分电能转化为热能,并以封装体为载体导出到系统,最后至外界。如果系统的散热效果不好,就会出现电子产品的热场(特别是与人接触的部分)超过人类的感知温度($20\sim 47^{\circ}\text{C}$),从而发生烫伤等事故。如果温度持续升高直至超过材料的极限,就会发生产品失效,严重的还会引起锂电池爆炸。此外,由于变温引起的热应力也会对产品质量和可靠性带来严重影响。电子产品的失效率随着温度的升高而愈发严重,如图 1-8 所示。失效率与元器件温度呈近似指数关系,如果温度从 75°C 升高到 125°C ,失效率会增加 5 倍以上^[1]。因此,微电子系统热管理的核心任务就是控制热场在产品的物理空间内合理分布,提出电子产品热范围内可以接受的机械与电气布局方案。

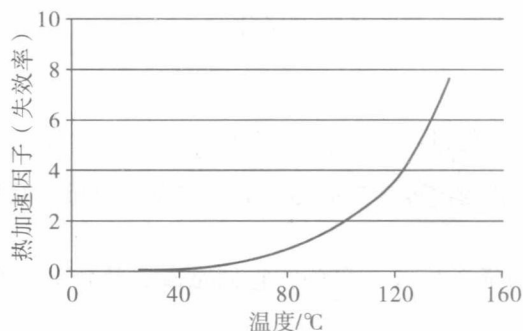


图 1-8 温度对失效率的影响

表 1-1 总结了电子制造各阶段的内外热源情况以及相对应的传热学应用。在生产制造阶段,电子产品需经历大量的热处理工艺,一般的黏合剂的固化温度为 $125\sim 150^{\circ}\text{C}$,有铅焊的最高温为 $200\sim 220^{\circ}\text{C}$,无铅焊的最高温为 $240\sim 260^{\circ}\text{C}$ 。工程上既要保证热处理工艺的加热均匀性和工艺质量,又要保证封装材料在高温状态下不失效、不变形。这些热处理工艺都属于非稳态导热的范畴。在工作使用阶段,从开机至产品平稳使用后,电子产品长期处在内部由芯片发热、外部随外界温度变化的状态下,芯片的理想温度范围为 $70\sim 90^{\circ}\text{C}$,最高一般不超过 125°C (因为 $125\sim 150^{\circ}\text{C}$ 是大多数有机封装材料的玻璃转化温度区间)^[2]。在电子产品的工作时间足够长的情况下,类似的工程问题都可以归为稳态导热、稳态热对流换热的范畴。此外,在某些特大功率器件工作的情况下也要考虑热辐射的影响。在拆解回收阶段,热处理工艺与生产制造阶段类似,也是非稳态导热的范畴。

表 1-1 微电子制造各阶段的传热学应用

阶段	内热源	外部热环境	传热学应用
生产制造	无	回流焊、波峰焊等热处理工艺	非稳态导热
工作使用	芯片发热	外界环境变化	稳态导热、稳态热对流、热辐射
拆机回收、返工返修	无	高温拆解等热处理工艺	非稳态导热

本书的章节设计和知识点分布也是依据表 1-1 中不同制造阶段的不同传热学应用来制定的。第 2、3 章主要介绍传热学的基本知识和稳态导热问题,第 4 章介绍定性分析方法,第 5 章介绍热阻网络(半定性半定量)分析方法,第 6 章介绍数值(定量)分析方法,第 7 章介绍实验方法和行业检测标准,第 8 章介绍非稳态导热问题。为了方便读者学习和统一标识,本书中的典型术语列在表 1-2 中。

表 1-2 术语总表

符 号	单 位	名 称
A	m^2	表面积
A_b	m^2	翅片的基底面积(或无翅片时基底面积)
A_c	m^2	翅片截面积
A_f	m^2	翅片总表面积
Bi		毕渥(Biot)数(第 5 章 5.3 节中表示为扩散热阻计算式中的一个参数符号)
a		翅片导热方程中的自定义变量
C	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	比热容
E		翅片功效
h	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	热对流换热系数
h_{rad}	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	辐射换热系数
h'_{rad}	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	修正辐射换热系数
h_{comb}	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	综合换热系数
k	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	导热系数(导热率)
L	m	长度或厚度