

热/设/计/工/程/师/精/英/课/堂

热领科技 组编

LED 照明产品的 热设计与实战

何国安 编著

名企技术达人现身说法，深入行业剖析电子产品热设计。
一线工程师亲自操刀，真实案例助力提高产品可靠性。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

热领科技 组编

热设计工程师精英课堂

LED 照明产品的热设计与实战

何国安 编著



机械工业出版社

LED 照明产品正在引发全球照明领域的一场革命,给现代社会生活带来了不可估量的影响。热设计作为 LED 照明产品开发的关键技术之一,发挥着至关重要的作用。良好的散热设计可以提高 LED 照明产品的性能及可靠性,大幅度节约能源。尤其是在 LED 照明产品标准缺失,热设计人才匮乏的当下,热设计专业知识可以整体提升 LED 照明产业的发展能力,促进产业发展并走向成熟。

本书内容包括传热学基础、热设计基础、LED 的热特性、LED 照明产品种类及特点、LED 照明产品的热设计、LED 照明产品的热仿真、LED 照明产品的热测试、LED 照明产品热设计实例及失效性分析、LED 照明产品常见问题解析等 9 章。意在给出系统、独特、实用,并且具有思想性和指导性的内容、理念、技术与方法,以供从事 LED 照明产品设计开发的技术人员学习和参考,也可供从事其他各种大功率电子产品热设计的相关人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

LED 照明产品的热设计与实战/何国安编著. —北京:机械工业出版社, 2017. 3

(热设计工程师精英课堂)

ISBN 978-7-111-56116-3

I. ①L… II. ①何… III. ①发光二极管-温度控制-照明设计
IV. ①TN383.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 032681 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:任鑫 责任编辑:任鑫

责任校对:潘蕊 封面设计:路恩中

责任印制:常天培

北京京丰印刷厂印刷

2017 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13.75 印张 · 329 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-56116-3

定价: 49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066 机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294 机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

序 言

美国科锐 (Cree) 公司在 “Lighting Fair 2013” 照明技术展上, 展出了发光效率高达 208lm/W 的白色 LED 产品 “Cree XLamp MK-R”, 2013 年 2 月科锐宣布开发出了发光效率为 276lm/W 的 LED, 2014 年 3 月科锐宣布白光功率型 LED 实验室光效达到 303lm/W。

随着 LED 的功率、发光强度和发光效率大幅度提高, LED 作为新型照明光源在市场中的份额逐渐提高, 给现代社会生活带来了不可估量的影响, 正在引发一场全球照明领域的革命。

国家半导体照明工程研发及产业联盟产研部 (CSA Research) 公布的数据显示, 2015 年, 我国半导体照明产业整体规模达到 4245 亿元人民币, 较 2014 年增长 21%。其中, 上游芯片产值约为 151 亿元, 较 2014 年增长约 10%; 中游封装产值达到 615 亿元, 较 2014 年增长 30% 以上; 下游应用产值达到 3479 亿元, 较 2014 年增长接近 22%。并且, LED 通用照明仍然是市场发展的最主要推动力, 产值达 1552 亿元, 增长率为 32.5%, 渗透率超过 30%, 占应用市场的比重也由 2014 年的 41%, 增加到 2015 年的 45%。

LED 照明产品应用的趋势已定, 应用范围不断扩大。随之, LED 照明产品的各种技术问题也日益凸显并受到越来越多的重视, 散热问题就是其中之一。

LED 的发热量大, 并且是温度敏感器件。温度升高会影响 LED 的寿命、光效、光色、色温、光形, 以及正向电压、最大注入电流等光度、色度和电气参数及可靠性等。因此, 热设计 (散热设计) 是 LED 照明产品开发的关键技术之一, 良好的散热设计有助于改善 LED 照明产品的性能, 提高产品的可靠性。

LED 照明产品的热设计, 属于电子产品热设计的范畴。但是, 与其他电子产品相比, LED 照明产品的热设计具有一些自己的特点。例如, 首先, LED 照明产品种类繁多、结构形式多样、使用场合复杂多变, 其热设计一定要充分考虑各种产品的特点。其次, LED 照明产品的热设计要兼顾 LED 和驱动 (电子元器件) 两部分, 只有同时控制好 LED 芯片和电子元器件的温度, 才能实现 LED 照明产品长寿命的优势。再次, LED 照明产品属于消费品并且具有寿命长的优点, 热设计方案要力求简单、可靠、成本低。最后, LED 照明产品的散热片往往是产品结构的一部分, 其热设计与结构设计及外观设计的关系更为紧密。

本书内容包括传热学基础、热设计基础、LED 的热特性、LED 照明产品种类及特点、LED 照明产品的热设计、LED 照明产品的热仿真、LED 照明产品的热测试、LED 照明产品热设计实例及失效性分析、LED 照明产品常见问题解析等 9 章。意在给出系统、独特、实用, 并且具有思想性 (思路及思考方法) 和指导性的内容、理念、技术与方法, 以供从事 LED 照明产品设计开发的技术人员, 如热学、结构、电子、光学工程师学习和参考, 也可供从事其他各种大功率电子产品热设计的相关人员参考。

由于时间仓促、水平有限, 书中错误之处在所难免, 敬请指正。

何国安

2016 年 12 月

目 录

序言

第1章 传热学基础 1

1.1 传热学概述 1

1.1.1 温度 1

1.1.2 热量 2

1.1.3 传热方式 3

1.2 导热 5

1.2.1 导热及导热定律 5

1.2.2 一维导热及通过平板的导热 7

1.2.3 导热设计 8

1.3 对流 10

1.3.1 流体流动的两种形态 10

1.3.2 热对流及对流传热 10

1.3.3 对流传热公式及表面传热系数 12

1.3.4 边界层 13

1.3.5 对流传热的强化 15

1.4 自然对流传热的实验关联式 15

1.4.1 自然对流传热概述 15

1.4.2 大空间自然对流传热的实验 关联式 16

1.4.3 有限空间自然对流传热的实验 关联式 19

1.5 热辐射 20

1.5.1 热辐射及物体表面的发射率 20

1.5.2 辐射传热的计算 22

1.5.3 辐射传热系数及复合传热系数 25

1.5.4 热辐射强化 26

1.6 热阻 27

1.6.1 热阻概述 27

1.6.2 热阻抗 28

1.6.3 接触热阻 29

1.6.4 扩散热阻 29

第2章 热设计基础 30

2.1 热设计概述 30

2.1.1 热设计的必要性 30

2.1.2 热设计的几个概念 31

2.1.3 热设计的层次 34

2.1.4 热设计的原则 35

2.1.5 热设计的思路 35

2.1.6 热设计的流程 36

2.2 常用的散热技术 38

2.2.1 空气冷却：自然对流冷却和强制 对流冷却 38

2.2.2 液体冷却：直接液体冷却和间接 液体冷却 38

2.2.3 射流冲击冷却 38

2.2.4 相变冷却 38

2.2.5 热管传热 39

2.2.6 微通道技术 41

2.2.7 制冷 41

2.2.8 复合冷却系统 42

2.3 散热新技术 43

2.3.1 液态金属冷却技术 43

2.3.2 离子风冷却技术 43

2.3.3 合成射流散热技术 44

2.3.4 旋转散热片技术 45

2.3.5 纳米散热技术 46

2.4 PCB的热设计 47

2.4.1 PCB选材 47

2.4.2 PCB布线 47

2.4.3 元器件的排布 47

2.5 散热片的设计 48

2.5.1 散热片的成型方式 48

2.5.2 肋片效率 52

2.5.3 散热片的设计参数 53

2.5.4 自然对流散热片的结构设计 54

2.5.5 强制对流散热片的结构设计 55

2.6 风扇 57

2.6.1 风扇的类型 57

2.6.2 风扇的轴承和叶片 58

2.6.3 风扇的特性曲线 58

2.6.4 风扇的转速 60



2.6.5 风扇的使用: 抽风与吹风	60	4.2.4 LED 车灯	98
2.6.6 风扇的噪声	60	4.3 LED 照明产品的发展方向	100
第3章 LED 的热特性	62	4.3.1 模块化	101
3.1 照明术语及 LED 概述	62	4.3.2 散热设计	101
3.1.1 照明术语	62	4.3.3 光学及照明设计	102
3.1.2 LED 概述	63	4.3.4 驱动	102
3.2 LED 的封装	64	4.3.5 智能控制	102
3.2.1 LED 封装概述	64	附录 相关 LED 照明产品数据	103
3.2.2 LED 封装类型	65		
3.2.3 LED 封装技术	67	第5章 LED 照明产品的热设计	107
3.3 LED 的热阻	69	5.1 LED 照明产品的热阻分析	107
3.3.1 LED 热阻的概念	69	5.1.1 LED 照明产品的热流通路	107
3.3.2 LED 热阻的环节	70	5.1.2 LED 照明产品的热阻网络	109
3.3.3 大功率 LED 理论热阻的计算	75	5.2 LED 照明产品的热阻控制	112
3.4 LED 热阻的测量	77	5.2.1 减小 LED 封装热阻	112
3.4.1 稳态法测量 LED 的标称热阻	77	5.2.2 减小接触热阻	112
3.4.2 瞬态法测量 LED 的实际热阻	78	5.2.3 减小扩散热阻	112
3.4.3 多晶片 LED 热阻的测量	80	5.2.4 减小导热热阻	113
3.5 LED 的发光效率及发热量	80	5.2.5 减小对流传热热阻	113
3.5.1 LED 的发光效率	80	5.2.6 减小辐射传热热阻	113
3.5.2 LED 的发热量	82	5.3 LED 照明产品常用的散热方式	113
3.6 温度对 LED 的影响	82	5.3.1 自然对流散热	114
3.6.1 温度过高会对 LED 造成永久性 破坏	82	5.3.2 热管辅助传热	114
3.6.2 温度升高会缩短 LED 的寿命	82	5.3.3 风扇强制对流散热	115
3.6.3 温度升高会降低 LED 的发光 效率	83	5.3.4 合成射流散热	116
3.6.4 温度对 LED 光色的影响	84	5.4 LED 照明产品常用的导热材料	116
3.6.5 温度对 LED 正向电压的影响	85	5.4.1 LED 系统线路板	116
3.6.6 温度过高会限制 LED 的最大注入 电流	85	5.4.2 散热片材料	118
3.7 LED 的寿命预测	86	5.4.3 热界面材料	119
3.7.1 LED 寿命测试方法	86	5.4.4 电子灌封材料	121
3.7.2 LED 寿命预测模型	88	5.4.5 其他导热材料	121
附录 陶瓷基板的分类	89	5.5 LED 照明产品驱动的散热	122
第4章 LED 照明产品种类及特点	91	5.5.1 LED 驱动的分类	122
4.1 灯具及 LED 照明产品	91	5.5.2 LED 驱动的散热	124
4.1.1 灯具及其分类	91	第6章 LED 照明产品的热仿真	129
4.1.2 LED 照明产品	94	6.1 热仿真概述	129
4.2 LED 照明产品的特点	94	6.1.1 热仿真的原理	129
4.2.1 LED 室内照明产品	94	6.1.2 热仿真的特点	130
4.2.2 LED 户外照明产品	96	6.1.3 热仿真的过程	132
4.2.3 LED 特种照明产品	98	6.2 流体流动与传热的控制方程	137
		6.2.1 连续性方程	137
		6.2.2 流体运动微分方程	138
		6.2.3 雷诺方程	138
		6.2.4 $k-\varepsilon$ 方程	139



6.2.5	能量方程	140	8.1.1	可行性分析	169
6.2.6	通用微分方程	140	8.1.2	方案制定	169
6.3	控制方程离散化方法	140	8.1.3	方案验证	171
6.3.1	有限差分法	141	8.1.4	试量产	171
6.3.2	有限元法	141	8.1.5	量产	171
6.3.3	有限体积法	141	8.2	某民用LED照明产品热设计实例	171
6.3.4	有限分析法	141	8.2.1	某LED射灯的可行性分析	171
6.4	网格	141	8.2.2	某LED射灯的方案制定	172
6.4.1	网格分类	141	8.2.3	某LED射灯的方案验证	177
6.4.2	网格选用	142	8.2.4	某LED射灯的试量产及量产	179
6.5	LED照明产品热仿真软件	143	8.3	某车载LED照明产品热设计实例	181
6.5.1	CFD软件分类	143	8.3.1	某H4 LED模组初始散热方案	181
6.5.2	FloEFD简介	143	8.3.2	某H4 LED模组热管散热方案	183
6.5.3	FloEFD的基本操作	144	8.3.3	某H4 LED模组风扇散热方案	184
6.5.4	FloEFD的常见问题	146	8.4	LED照明产品失效性分析	185
6.6	LED照明产品热仿真方法及案例 分析	147	8.4.1	LED的失效	185
6.6.1	某LED吸顶灯散热方案预测	147	8.4.2	LED驱动的失效	186
6.6.2	某LED射灯散热片的优化	148	8.4.3	散热系统的失效	186
第7章	LED照明产品的热测试	151	第9章	LED照明产品常见问题解析	187
7.1	热测试概述	151	9.1	环境温度及空气流动对LED照明产品 散热的影响	187
7.1.1	热测试的目的	151	9.1.1	热仿真模型	187
7.1.2	热测试的内容	151	9.1.2	环境温度对LED照明产品散热 的影响	188
7.1.3	热测试项目及设备	151	9.1.3	空气流动对LED照明产品散热 的影响	190
7.2	热电偶	155	9.1.4	小结	191
7.2.1	热电偶测温原理	155	9.2	材料导热性对LED照明产品散热 的影响	192
7.2.2	热电偶的特性	156	9.2.1	理论分析	192
7.2.3	热电偶分度号	157	9.2.2	测试结果	193
7.2.4	热电偶的使用	157	9.2.3	小结	195
7.2.5	热电偶焊接机	159	9.3	LED用PCB的热特性	195
7.3	热像仪	160	9.3.1	PCB的热特性	196
7.3.1	红外测温原理	160	9.3.2	PCB传热的理论计算	196
7.3.2	热像仪的概述	161	9.3.3	数值模拟与理论计算的对比	197
7.3.3	热像仪的使用	162	9.3.4	PCB的热特性分析	199
7.4	LED照明产品热测试的特点	165	9.3.5	小结	201
7.4.1	LED照明产品热测试的目的	165	9.4	LED照明产品过温保护功能的设定及 其特性	202
7.4.2	LED照明产品热测试的注意 事项	166	9.4.1	LED照明产品过温保护的原理	202
7.4.3	LED照明产品热测试的环境 要求	166	9.4.2	LED照明产品过温保护的设定 方法	203
第8章	LED照明产品热设计实例及 失效性分析	169	9.4.3	LED照明产品过温保护的 特性	205
8.1	LED照明产品的开发流程	169	参考文献		210

第 1 章

传热学基础



☆☆ 1.1 传热学概述 ☆☆

传热学是研究由温差引起的热量传递规律的一门学科。

1.1.1 温度

温度是表示物体冷热程度的物理量。

微观上来讲，温度代表物体分子热运动的剧烈程度，分子热运动如图 1-1 所示。

从分子运动论观点看，温度是物体分子平均动能的标志。例如，对于理想气体（分子势能可以忽略），分子平均动能可以写作式 (1-1)，其分子平均动能与绝对温度成正比。

$$E = \frac{ikT}{2} \quad (1-1)$$

式中， E 为分子平均动能，单位为 J；

k 为玻尔兹曼常数 ($= 1.38 \times 10^{-23}$)，单位为 J/K； i 对单原子、双原子、三原子及多原子分子，分别取 3, 5, 6； T 为绝对温度，单位为 K。

温度数值的表示方法叫做温标，常用的温标主要有摄氏温标、热力学温标、华氏温标、兰氏温标、国际实用温标等。

摄氏温标是经验温标之一，亦称百分温标，常用 t 表示，单位是摄氏度，国际代号是 $^{\circ}\text{C}$ 。用摄氏温标表示的温度称为摄氏温度。

摄氏温标是将一个大气压下，纯水的冰点定为 0°C ，纯水的沸点定为 100°C ，两个标准点之间分为 100 等分，每等分代表 1°C 。

热力学温标，又称为开尔文温标、绝对温标。用热力学温标表示的温度称为热力学温度或绝对温度。热力学温标常用 T 表示，单位为开尔文，简称“开”，用 K 表示。

热力学温标是建立在热力学第二定律基础上的一种和测温物质无关的理想温标，它完全不依赖测温物质的性质。热力学温度定义，水的三相点的温度 (0.01°C) 为 273.16K ， 1K 等于水的三相点的热力学温度的 $1/273.16$ ，因此， 0K 对应于 -273.15°C ，称为绝对零度。绝对零度是热力学的最低温度。理论上，若粒子动能低到量子力学的最低点时，物质即达到绝对零度，不能再低。实际上，绝对零度是不可能达到的最低温度，自然界的温度只能无限

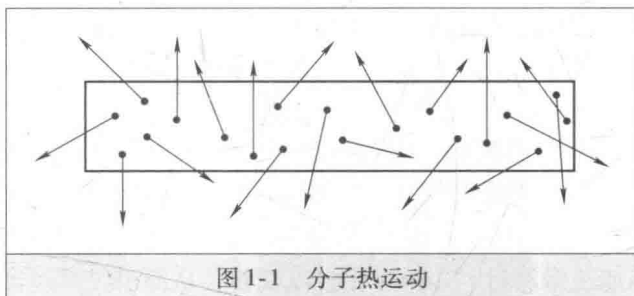


图 1-1 分子热运动

地逼近绝对零度。

热力学温度与摄氏温度的关系是，热力学温度比摄氏温度的数值大 273.15，即 $T(K) = 273.15 + t(^{\circ}C)$ ，并且 1K 的温差与 $1^{\circ}C$ 的温差相等，即 $\Delta T(K) = \Delta t(^{\circ}C)$ 。

本书只涉及摄氏温度和热力学温度（绝对温度），为方便，统一使用符号 T 表示，具体可根据其单位的不同进行区分。

1.1.2 热量

热量指的是由于温差的存在而传递的能量，热量的单位为 J。

要注意热量与物体内能的不同。

物体的内能指的是物体内部所有分子做无规则运动（即热运动）的动能和分子势能的总和。做功和传热是内能变化的两个途径。

热量是过程量，描述能量的流动；内能是状态量，描述能量本身。当两种不同温度的物质处于热接触时，它们便交换内能，直至双方温度一致，也就是达到热平衡，这里从一种物质到另一种物质所传递的能量便等同于所交换的热量。简单讲，传热学只考虑一种特定的物质产生转化或传递了多少热量，而不考虑一种物质包含多少热量。

凡是有温差的地方就有热量自发地从高温物体传向低温物体，或者从物体的高温部分传向低温部分。自然界和生产技术中几乎到处都存在着温度差，所以热量的传递（以下也写作“传输”或“传播”）是自然界和生产技术中一种非常普遍的现象，在能源动力、化工制药、材料冶金、机械制造、电气电信、建筑工程、交通运输、航空航天、纺织印染、农业林业、生物工程、环境保护和气象预报等部门中存在大量的热量传递问题，而且还常常起着关键作用，如图 1-2 所示。又如，离开热传递，人的生命马上就会受到威胁，以致热射病的死亡率高达 50% ~ 70%。热射病也就是重度中暑，指因高温引起的人体体温调节功能失调，不能正常散热，体内热量过度积蓄，从而引发神经器官受损。

热量就像是水，水总是往海拔低的地方流，热量总是向温度低的地方传递，如图 1-3 所示。

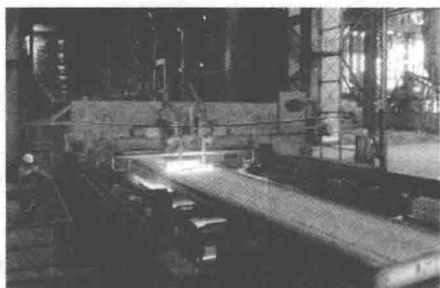


图 1-2 生产技术中的温度差



图 1-3 水往低处流

为直观，可以把“热量”与“水”类比，同样把“热源”与“水源”、“热流”与“水流”、“温度”与“高度”、“温差”与“高度差”等概念相类比，如图 1-4 所示。

热源就像是水源，水源不断地有水涌出，如果这些水不能流出去，则水源处的水位就会不断上升；同样，如果热源的热量不能传递出去，则热源的温度将不断升高，直至熔化。

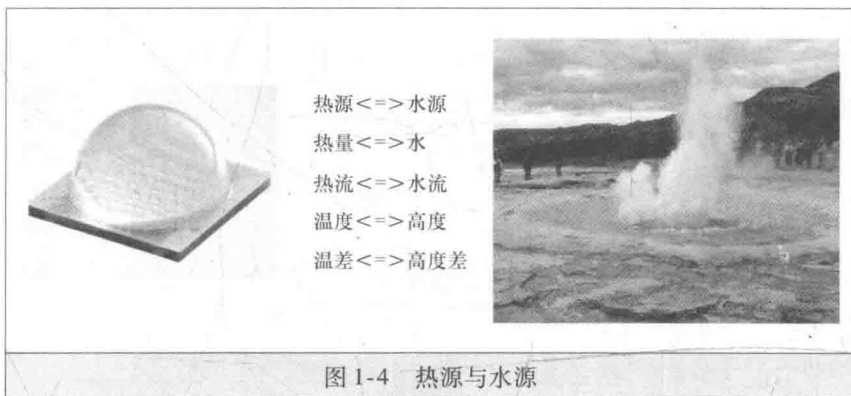


图 1-4 热源与水源

例如, 假设某 LED 晶片 (芯片) 的面积为 $1.2 \times 1.2 \text{ mm}^2$, 厚度为 0.2 mm , 那么晶片的体积约为 $2.88 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$; 晶片材料为 GaAs, 比重为 5.318 g/cm^3 , 比热为 $0.33 \text{ J/(kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$; 晶片的正向电压为 3.3 V , 电流为 350 mA , 则功率为 1.15 W , 假设其中 80% 的功率转变为热量, 则发热量约为 0.924 W 。如果晶片的热量不能向外传递, 在接通电流 1 min 后, 假如晶片可以不熔化的话, 则其温度将升高 109608°C 。即使只有 1% 的热量没有传输出来, 通电 1 min 后, 晶片的温度也会升高 1096°C 。

所以, LED 或其他电子元器件所产生的热量必须要传递 (散失) 到环境中去, 就像水源流出的水最终要流到大海中去一样, 如图 1-5 所示。

如何更为有效地将电子产品产生的热量传递 (散失) 到环境中去就是电子产品散热的宗旨所在。环境是指产品周围的空气及固体 (表面) 或天空 (大气层) 等。

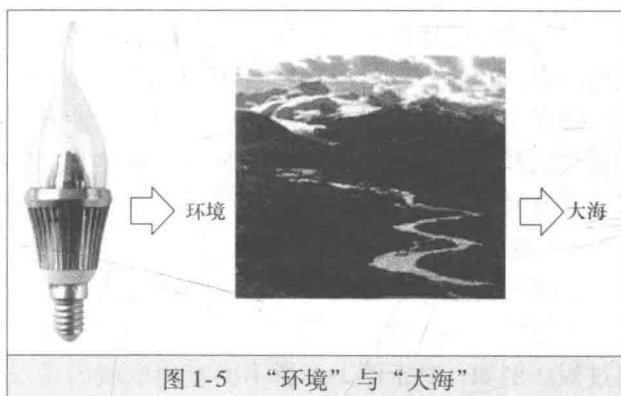


图 1-5 “环境”与“大海”

1.1.3 传热方式

一般, 热量传递的方式 (传热方式) 有三种, 即导热、对流和热辐射。

例如, 在一个风和日丽的下午, 你悠闲地漫步在海滩上, 阳光照在身上暖暖的, 即热辐射; 脚下的沙子还有点热, 即导热; 一阵海风吹过带来丝丝凉意, 即对流传热, 如图 1-6 所示。

物体各部分之间不发生相对位移, 只依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递, 称为热传导, 简称导热。

热对流是指由于流体的宏观运动 (即流体的流动), 从而使流体各部分之间发生相对位移、冷热流体相互掺混所引起的热量传递过程。

热对流只能发生在流体中, 由于流体中的分子同时还在进行着不规则的热运动, 因而对流必然伴随着导热现象。

工程上特别感兴趣的是流体流过一个物体表面的热量传递过程, 称之为对流传热, 以区别于一般意义上的热对流。为方便, 对流传热常简称为对流。



图 1-6 阳光、沙滩、海风

物体通过电磁波来传递能量的方式称为辐射。物体因热的原因发出辐射能的现象称为热辐射或辐射传热。辐射传热伴随着能量形式的转换。

由以上可以看出导热、对流、热辐射三种传热方式的传热机理完全不同。在一般情况下，导热只能转移热量，只有对流和热辐射才能把热量带走（散失到环境中），从而避免热源温度的不断升高。

在实际问题中，导热、对流、热辐射三种传热方式往往不是单独出现的，而是同时共存、共同构成某一传热过程。例如，对于图 1-7 所示的室内取暖的暖气片来说，热量传递过程中各个环节的传热方式如图 1-8 所示。



图 1-7 暖气片

最后一个环节，对流传热主要是管子外壁与周围空气之间进行的，辐射传热则主要是管子外壁与周围温度较低的其他固体表面（如墙面）之间进行的。

分析一个复杂的实际热量传递过程由哪些串联环节组成，以及在同一环节中有哪些热量传递方式起主要作用，是求解实际传热问题的基础。

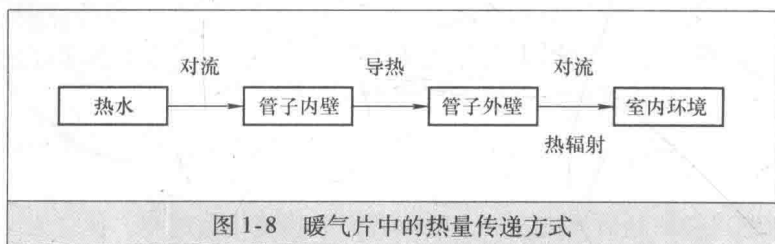


图 1-8 暖气片中的热量传递方式



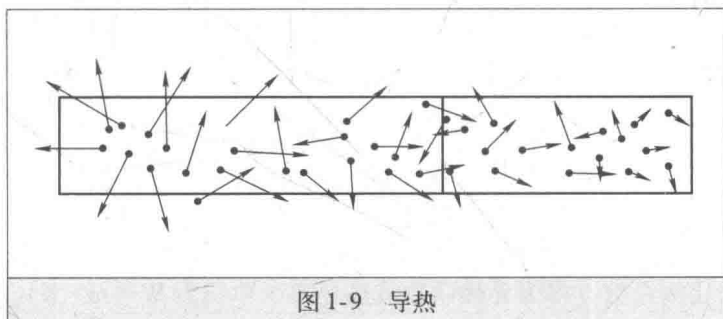
☆☆ 1.2 导热 ☆☆

1.2.1 导热及导热定律

★1. 导热机理

从微观角度，气体、固体、液体导热的机理各不相同。

气体导热是气体分子不规则热运动相互碰撞的结果，如图 1-9 所示。气体温度越高，其分子的动能越大，不同能量水平的分子相互碰撞的结果使热量从高温处传到低温处。



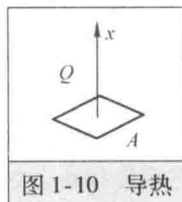
导电固体中有相当多的自由电子，它们在晶格之间像气体分子那样运动（称为电子气），自由电子的运动在导电固体的导热中起着主要作用。非导电固体中，导热是通过晶格结构的振动，即原子、分子在其平衡位置附近的振动来实现的。晶格结构振动的传递在文献中称为弹性声波，弹性声波能量的量子化表示称为声子，与辐射能量的量子化表示——光子相类似。

液体中的导热机理还存在不同的观点，有一种观点认为定性上类似于气体，只是情况更复杂，因为液体分子间的距离比较近，分子间的作用力对碰撞的影响比气体大。另一种观点则认为液体的导热机理类似于非导电固体，主要靠弹性声波的作用。

★2. 导热定律

大量实践经验证明，单位时间内通过单位截面面积所传导的热量，正比于当地垂直于截面方向上的温度变化率，如图 1-10 所示，即

$$\frac{Q}{A} \propto \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1-2)$$



式中， Q 为热流量（单位时间内通过某一给定面积的热量），单位为 W ； A 为垂直于热流方向的截面（以下称为导热截面）的面积，单位为 m^2 ； $\frac{Q}{A}$ 为单位时间通过单位面积的热流量，称为热流密度，用 q 表示，单位为 W/m^2 ； T 为温度，单位为 $^{\circ}C$ ； x 为垂直于面积 A 的坐标轴； $\frac{\partial T}{\partial x}$ 为物体沿 x 方向上的温度变化率，单位为 $^{\circ}C/m$ 。

引入比例常数，可得

$$Q = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1-3)$$

这就是导热基本定律，即傅里叶导热定律的数学表达式，式中负号表示热量传递的方向指向温度降低的方向。傅里叶导热定律用文字表达为：在导热过程中，单位时间内通过给定截面的导热热量正比于垂直该截面方向上的温度变化率和截面面积，而热量传递的方向则与温度升高的方向相反。

傅里叶导热定律用热流密度 q 表示为

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1-4)$$

式中， q 为沿 x 方向传递的热流密度，单位为 W/m^2 。严格地说热流密度是矢量， q 是热流密度矢量在 x 方向的分量，即 q_x 。

当物体的温度是三个坐标的函数时，三个坐标方向上的单位矢量与该方向上热流密度分量的乘积合成一个空间热流密度矢量，记为 $\vec{q} = q_x \vec{x} + q_y \vec{y} + q_z \vec{z}$ 。傅里叶导热定律的一般数学表达式是对热流密度矢量写出的，其形式为

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \vec{n} \quad (1-5)$$

式中， $\text{grad}T$ 为空间某点的温度梯度； \vec{n} 为通过该点的等温线上的法向单位矢量，指向温度升高的方向； λ 为比例系数，称为导热系数或热导率，单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

在连续的温度场中，过任意一点温度变化率最大的方向位于等温线的法线方向上，称过该点的最大温度变化率为温度梯度，用 $\text{grad}T$ 表示， $\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial n} \vec{n}$ 。

傅里叶导热定律是分析导热问题的经典导热理论，在传热学中具有极其重要的地位。

傅里叶导热定律认为热量传播速度无限大，所以一般情况下不需要考虑热量传递快慢的问题。

只有在纳秒 ($1\text{ns} = 10^{-9}\text{s}$) 级的超短时间内，热流密度极高条件下的热加工工艺中，经典导热理论已无法给出满意的解释时，才需要考虑热量的有限传播速度，必须对傅里叶导热定律进行适当修正之后才能用。考虑热量有限传播速度的导热统称为非傅里叶导热。

★3. 导热系数

导热系数 λ 是一个表征材料导热能力大小的物理参数。导热系数的大小取决于材料的种类和温度等因素。材料在某种条件下的导热系数可以用导热仪来测定。

一般金属的导热系数较高，如纯铜为 $398\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，纯铝为 $236\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；气体的导热系数很小，如 20°C 时干空气的导热系数为 $0.0259\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；液体的导热系数介于金属和气体之间，如 20°C 时水的导热系数为 $0.599\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；非金属固体的导热系数在很大范围内变化，如合成金刚石的导热系数为 $2000\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，硅的导热系数为 $146\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，耐火黏土砖 20°C 时的导热系数为 $0.71 \sim 0.85\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，导热系数小的甚至会低于空气的导热系数。

各种材料的导热系数都会随温度变化，工程计算中，在比较大的温度区间内，大多数材料的导热系数都可以认为与温度呈线性关系，即 $\lambda = \lambda_0(1 + bT)$ ，式中， T 为温度， b 为常量。工程上，在温度变化不大及计算精度要求不高的情况下，材料的导热系数可以认为是定值。

常见材料的导热系数见表 1-1。



表 1-1 常见材料的导热系数

材料	典型温度 /°C	导热系数 /[W/(m·K)]	材料	典型温度 /°C	导热系数 /[W/(m·K)]
银	20	427	导热硅脂/导热膏	50	0.8~6.0
黄金	20	315	导热硅垫片	50	0.8~16.0
纯铜(紫铜)	20	398	导热砂胶布	50	0.8~1.2
黄铜(70Cu-30Zn)	20	109	导热电子灌封胶	50	0.2~2.0
纯铁	20	81.1	导热胶水	50	0.5~2.5
锡	20	67	InS 铜箔金属导热片	50	86
纯铝	20	236	泥土	20	0.83
铝合金 AA6061 T4	25	154	水泥	30	0.3
铝合金 AA6063 T5	25	209	玻璃	45	0.65~0.71
铝合金 AA5052	25	138	PMMA(有机玻璃)	25	0.18
铝合金 ADC12	25	96	刚性 PVC	25	0.17
铝合金 AA1050	25	209	柔性 PVC	25	0.14
铝合金 AA1060	25	230	PU(刚性聚氨酯)	25	0.25
铝合金 AA1070	25	226	空气	20	0.026
铝合金 A360	25	113			
铝合金 A380	25	109			
铝合金 LY12	25	151			

注: A560、A380 是美国铸铝合金的牌号, 这一牌号系列有 A360.0、A360.1、A360.2, A380.0、A380.1、A380.2 等。LY12 是国内的材料代号, 现已改为 2A12, 是一种硬质铝合金, 对应美国的 2124、日本的 2024 牌号。

1.2.2 一维导热及通过平板的导热

对于工程中经常遇到的一维导热问题, 即热量只沿一个方向传导, 傅里叶导热定律可以写成如下形式:

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (1-6)$$

或

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1-7)$$

式中, A 为导热截面的面积, 单位为 m^2 ; $\frac{dT}{dx}$ 为热流方向上的温度梯度, 单位为 K/m ;

工程中很多导热现象可以简化为通过平板的导热, 如图 1-11 所示, 平板的 4 个侧面绝热, 另外两个表面维持均匀的温度, 则热量仅沿平板厚度方向均匀传导。通过平板的导热公式可以写成

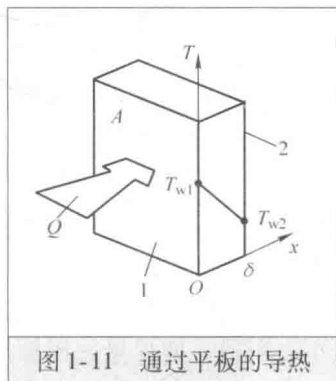


图 1-11 通过平板的导热

$$Q = \lambda A \frac{\Delta T}{\delta} = \lambda A \frac{(T_{w1} - T_{w2})}{\delta} \quad (1-8)$$

式中, Q 为通过平板的热流量, 单位为 W ; λ 为平板的导热系数, 单位为 $W/(m \cdot K)$; T_{w1} , T_{w2} 分别为平板两个表面的温度, 单位为 $^{\circ}C$; A 为平板的面积, 单位为 m^2 。

由式 (1-8) 可以推出

$$\Delta T = \frac{Q\delta}{\lambda A} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 可以用来计算导热通路上各环节产生的温差, 在电子产品的散热设计中, 温差大的环节需要特别注意并尽量改善该环节的传热。

例如, 某 LED 灯具采用单颗大功率集成 LED 作为光源, LED 安装在如图 1-12 所示的 LED 基座上。

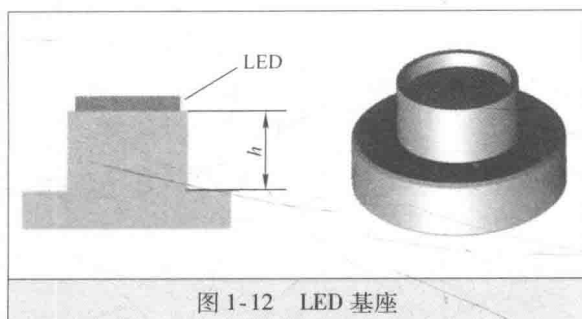


图 1-12 LED 基座

假设 LED 发热功率为 $10W$, LED 基座凸台的直径为 $15mm$, 高度为 $10mm$, 采用铝合金 6063 制作时, 凸台导致的温升计算如下:

$$\Delta T = \frac{Q\delta}{\lambda A} = \frac{10 \times 10 \times 10^{-3}}{201 \times 3.14 \times (7.5 \times 10^{-3})^2} ^{\circ}C = 2.8^{\circ}C$$

采用不同材料、不同凸台高度导致的温升见表 1-2。

表 1-2 LED 基座凸台的温升

(单位: $^{\circ}C$)

凸台高度/mm	材料 铝合金 6063 [导热系数为 $201W/(m \cdot K)$]	纯铜 [导热系数为 $398W/(m \cdot K)$]
5	1.4	0.7
10	2.8	1.4
15	4.2	2.1
20	5.6	2.8

所以, 可以根据表 1-2 的计算结果选择 LED 基座的材料及高度, 设计合适的 LED 基座。

1.2.3 导热设计

热量流过导热材料就像水流过河道, 想要水流顺畅, 就一定要保证河道的通畅 (河道宽阔且阻力小), 并且尽量缩短河道的长度。

如式 (1-9) 所示, 导热设计的目的就是, 对于一定的热流量 Q , 控制温差 ΔT , 使其尽可能小。所以, 要尽量选用导热系数 λ 大的材料, 增大导热截面的面积 A , 并缩短导热通路的长度 δ 。

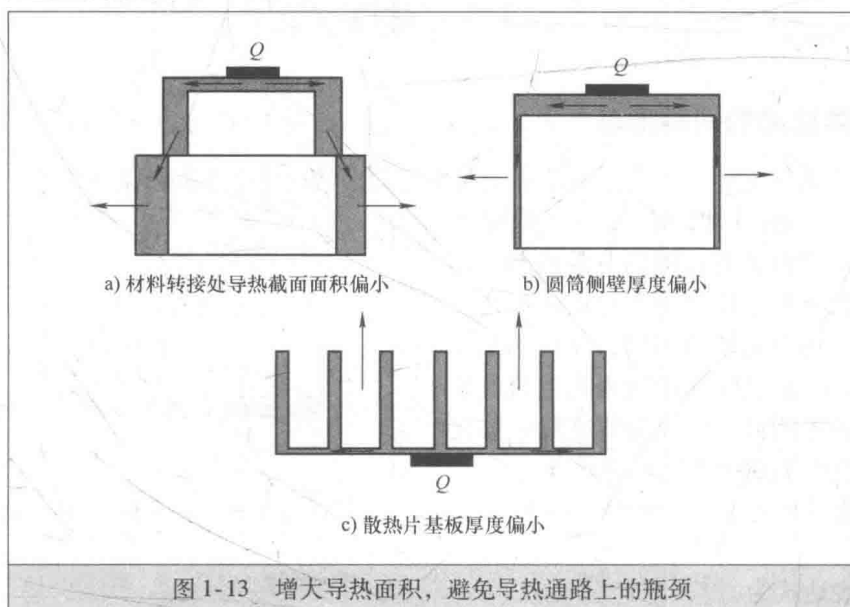
★1. 选用导热系数大的材料

LED 照明产品常用的导热材料参阅本书 5.4 节中的内容。

★2. 增大导热截面的面积

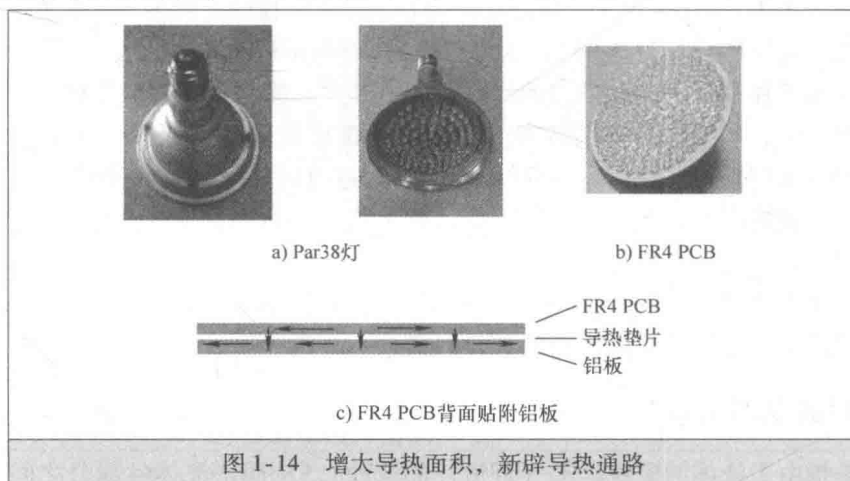
增大导热截面的面积，主要包括以下两个方面：

1) 尽量避免导热通路上的热流瓶颈。产品设计中经常出现热流瓶颈的情况，如图 1-13 所示。其中，图 1-13a 材料转接处导热截面面积偏小；图 1-13b 圆筒侧壁厚度偏小；图 1-13c 散热片基板厚度偏小。



2) 开辟导热通路，即在产品高温与低温零部件之间增加导热材料或零部件，以增大导热截面的面积。

例如，图 1-14 中的 Par38 灯，由于采用的是直插式 LED（草帽 LED），因此只能使用 FR4 PCB。FR4 PCB 导热系数较小，热量由中间向周边传递困难。在 PCB 的下方贴附一片铝板（PCB 与铝板中间使用导热垫片以保证绝缘和导热），可以增加一条导热通路，大部分热量将通过铝板传输到铝外壳，减小了热源与外壳之间的温差。



★3. 缩短导热通路的长度

缩短导热通路的长度也可以减小温差，但是往往受到产品整体结构及散热设计的限制。例如，在图 1-12 中，减小 LED 基座凸台的高度，可以减小凸台导致的温升，但凸台高度是结构设计的需要；又如图 1-13b 中，减小圆筒侧壁的高度，可以缩短导热通路的长度，但是圆筒壁的外表面积也会减小，不利于产品的散热。所以，缩短导热通路的长度一般要综合考虑各因素，以便达到最佳的产品设计及散热效果。

☆☆ 1.3 对流 ☆☆

1.3.1 流体流动的两形态

1883 年，雷诺实验发现实际流体运动存在着内在结构完全不同的两种形态，即层流和湍流（紊流），如图 1-15 所示。层流时流体微团沿着主流方向做有规则的分层流动，湍流时流体各部分发生剧烈的混合。两种流态不仅流体质点运动的轨迹不同，其内部结构也完全不同，因而反映在能量损失或流体扩散规律上也各不相同，所以分析实际流体运动时，必须首先判别流体流动的形态。

流体形态（流态）的判别准则为临界雷诺数。

雷诺数表达式为

$$Re = \frac{ud\rho}{\mu} = \frac{ud}{\nu} \quad (1-10)$$

式中， u 为流体流速，单位为 m/s ； d 为流道断面的特征长度，单位为 m ； ρ 为流体密度，单位为 kg/m^3 ； μ 为流体动力粘度，单位为 $Pa \cdot s$ ； ν 为流体运动粘度，单位为 m^2/s 。

对于圆形管道， d 为圆管直径；对于非圆形管道， d 一般取水力直径。

水力直径为水力半径的 4 倍，水力半径为流体断面的面积与润湿周长之比。例如，圆形管道的水力半径为 $R = A/P = D/4$ ，水力直径为 D ，即圆管直径；长为 a ，宽为 b 的矩形管道的水力半径为 $R = A/P = ab/2(a+b)$ ，水力直径为 $2ab/(a+b)$ 。

雷诺数表示流体惯性力与黏性力的比。雷诺数越大，流动就越容易发展成为湍流。一般临界雷诺数有两个，即下临界雷诺数 Re_C 和上临界雷诺数 Re'_C 。当 $Re < Re_C$ 时，流动为层流；当 $Re > Re'_C$ 时为湍流；当 $Re_C < Re < Re'_C$ 时为过渡区，流动处于不稳定状态，可能为层流或湍流。一般情况下，上雷诺数比下雷诺数大很多，且不固定，随有无外界扰动而变。工程上习惯以下临界雷诺数作为判别标准。

例如，对于平直圆管， $Re_C = 2000$ ；对于明渠均匀流， $Re_C = 500$ 。

流体流动的形态是影响对流传热的重要因素之一。

1.3.2 热对流及对流传热

热对流是指由于流体的宏观运动（即流体的流动），从而使流体各部分之间发生相对位

