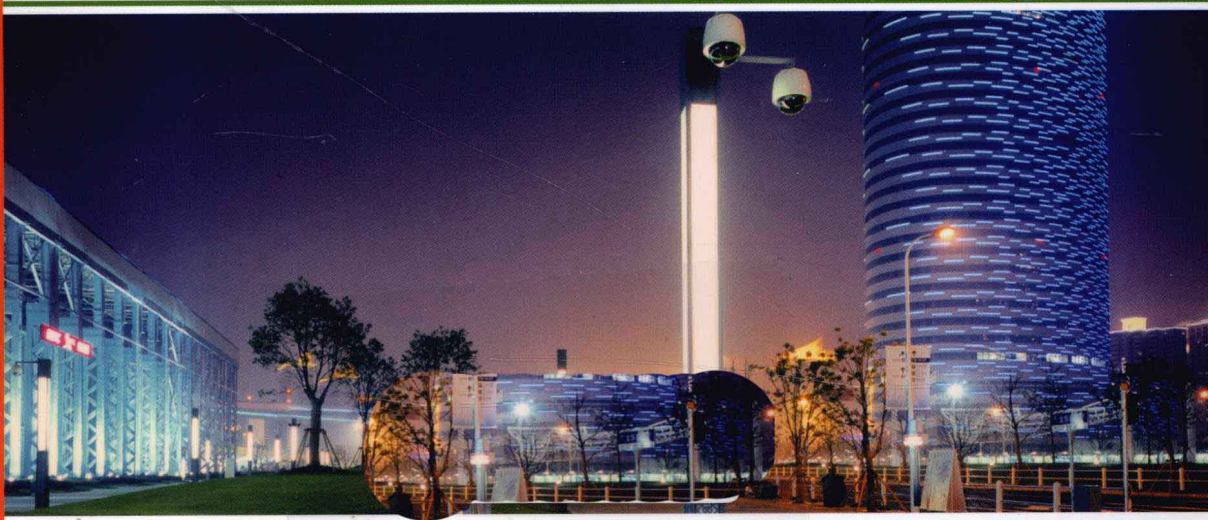




新能源工程应用系列丛书

LED热设计与 工程应用

◎ 周志敏 纪爱华 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



新能源工程应用系列丛书

LED热设计与 工程应用

◎ 周志敏 纪爱华 编著



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书结合国内外LED热设计最新应用技术,以LED热设计与工程应用为本书的核心内容,全面系统地阐述了LED热设计基础知识和LED热设计实用技术。全书共5章,系统地讲述了LED热设计基础知识;大功率LED衬底及基板、大功率LED热设计、LED驱动电路热设计、LED灯具热设计等内容。

本书题材新颖实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗,具有很高的实用价值,是从事LED研发、生产、器件集成及LED驱动电路设计与LED灯具设计的工程技术人员的必备读物,也可供相关专业高等院校、职业技术学院的师生阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

LED热设计与工程应用/周志敏,纪爱华编著. —北京:电子工业出版社,2012.1

(新能源工程应用系列丛书)

ISBN 978-7-121-15336-5

I. ① L… II. ① 周… ② 纪… III. ① 发光二极管-温度控制-设计 IV. ① TN383.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第246976号

策划编辑:富 军

责任编辑:徐云鹏 特约编辑:张燕虹

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:14.75 字数:377千字

印 次:2012年1月第1次印刷

印 数:4000册 定价:39.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言



LED 是一种可将电能转变为光能的半导体发光器件，属于固态光源。LED 优点众多，除了寿命长、耗能低外，控制极为方便，属于典型的绿色照明光源。随着 LED 技术的不断创新和发展，使 LED 在照明领域得以推广应用，使照明技术面临一场新的革命。

LED 作为一种新型的照明技术，其应用前景举世瞩目，LED 被誉为 21 世纪照明最有价值的光源，必将引起照明领域一场新的革命。由于 LED 在其工作过程中只有 15% ~ 25% 的电能转换成光能，其余的电能几乎都转换成热能，使 LED 的温度升高。在大功率 LED 应用中，散热技术是关键技术，它不仅影响 LED 的发光亮度，而且也直接影响 LED 构成系统的可靠性和使用寿命。

针对大功率 LED 器件级热设计这一技术难题，国内外的 LED 器件设计人员和制造商分别在结构、材料以及工艺等方面对 LED 器件的热系统进行了优化设计。在 LED 的工程应用中，也同样要面对 LED 热设计这一技术难题。为此，本书在讲述了从事 LED 热设计必备的基础知识的基础上，系统地把 LED 基板、大功率 LED 热设计及封装技术、LED 驱动电路热设计、LED 灯具热设计有机地结合起来；在写作中尽量做到有针对性、实用性和技术前沿性，在保证科学性的同时，注意通俗性；力求做到通俗易懂和结合实际工程应用，以便于读者掌握 LED 热设计方法和最新 LED 热设计应用技术。

参加本书编写的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪达安、纪和平等。本书在写作过程中无论从资料的收集和技术信息交流上都得到了国内外的专业学者和 LED 器件制造商、系统集成商的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于时间短，加之编者水平有限，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

编著者

目 录



| | |
|-----------------------------------|-----|
| 第 1 章 LED 热设计基础知识 | 1 |
| 1.1 热设计的术语及热传递的方式 | 1 |
| 1.1.1 热设计的术语 | 1 |
| 1.1.2 热传递的方式 | 5 |
| 1.2 LED 热设计作用及热管理目的 | 7 |
| 1.2.1 LED 热设计作用 | 7 |
| 1.2.2 LED 热管理目的 | 10 |
| 1.3 LED 芯片结温 | 13 |
| 1.3.1 LED 的热量产生原因及结温热分析 | 13 |
| 1.3.2 LED 结温对性能的影响 | 18 |
| 1.4 LED 封装技术 | 21 |
| 1.4.1 LED 封装作用及类型 | 21 |
| 1.4.2 大功率 LED 封装技术 | 29 |
| 第 2 章 大功率 LED 衬底及基板 | 52 |
| 2.1 大功率 LED 衬底 | 52 |
| 2.1.1 大功率 LED 外延片与衬底材料 | 52 |
| 2.1.2 LED 衬底分类 | 54 |
| 2.1.3 蓝宝石为生长衬底的垂直结构氮化镓基 LED | 61 |
| 2.1.4 基于硅衬底的功率型氮化镓基 LED | 63 |
| 2.2 大功率 LED 散热基板类型 | 67 |
| 2.2.1 LED 散热基板 | 67 |
| 2.2.2 金属基印制板 (MCPCB) | 72 |
| 2.2.3 陶瓷散热基板 | 78 |
| 2.2.4 硅散热基板 | 87 |
| 第 3 章 大功率 LED 热设计 | 90 |
| 3.1 大功率 LED 热分析 | 90 |
| 3.1.1 大功率 LED | 90 |
| 3.1.2 影响大功率 LED 散热的因素分析 | 97 |
| 3.2 大功率 LED 热设计 | 102 |
| 3.2.1 大功率 LED 热计算 | 102 |
| 3.2.2 大功率 LED 散热技术 | 112 |
| 3.2.3 大功率 LED 热分析 | 115 |

| | |
|-----------------------------------|------------|
| 3.2.4 大功率 LED 散热和导热整体解决方案 | 126 |
| 第 4 章 LED 驱动电路热设计 | 129 |
| 4.1 LED 驱动电路 PCB 热设计 | 129 |
| 4.1.1 LED 驱动电路 PCB 热设计的基本原则 | 129 |
| 4.1.2 PCB 的热设计与热分析技术 | 136 |
| 4.1.3 表面贴装器件的热设计 | 139 |
| 4.2 LED 驱动电路的散热控制方案 | 143 |
| 4.2.1 LED 驱动电路的热管理 | 143 |
| 4.2.2 LED 驱动电路的温度补偿原理 | 155 |
| 4.2.3 LED 驱动电路热保护 | 164 |
| 第 5 章 LED 灯具热设计 | 168 |
| 5.1 LED 灯具特性及设计程序 | 168 |
| 5.1.1 LED 灯具 | 168 |
| 5.1.2 LED 灯具热特性 | 173 |
| 5.1.3 LED 灯具设计程序 | 184 |
| 5.2 LED 灯具散热器 | 191 |
| 5.2.1 大功率 LED 散热器 | 191 |
| 5.2.2 LED 散热器的设计要点 | 201 |
| 5.3 LED 路灯热设计 | 206 |
| 5.3.1 LED 路灯热设计的要素 | 206 |
| 5.3.2 LED 路灯热衬结构性能分析 | 210 |
| 5.4 LED 灯具热设计 | 215 |
| 5.4.1 LED 灯具热设计要素 | 215 |
| 5.4.2 LED 道路照明灯具设计 | 220 |

第1章 LED热设计基础知识

1.1 热设计的术语及热传递的方式

1.1.1 热设计的术语

① 温升。温升指元器件的温度与环境温度的差值。如果忽略温度变化对空气中物体的非线性影响，可以在一般环境温度下测量获得的温升直接加上最高可能的环境温度，获得在最高可能的环境温度下的元器件近似温度。例如测得某元器件温升为 40°C ，则在 55°C 最高环境温度下，该元器件的温度将为 95°C 。

② 热耗。热耗指元器件正常运行时产生的热量。热耗不等同于功耗，功耗指元器件的输入功率。一般电子元件的效率比较低，大部分功率都转化为热量。计算元器件温升时，应根据其功耗和效率计算热耗。当仅知道大致功耗时，对于小功率设备，可认为热耗等于功耗；对于大功率设备，可近似认为热耗为功耗的 75%。其实，为给设计留一个余量，有时直接用功耗进行计算。

③ 热流密度。热流密度指单位面积上的传热量，单位为 W/m 。

④ 导热系数。导热系数是表征材料导热性能的参数，它表明单位时间、单位面积、负的温度梯度下的导热率，单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 或 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

⑤ 对流换热系数。对流换热系数反映两种介质间对流换热过程的强弱，表明当流体与壁面的温差为 1°C 时，在单位时间通过单位面积的热量，单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 或 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

⑥ 黑度。黑度为实际物体的辐射力和同温度下黑体的辐射力之比，在 $0\sim 1$ 之间。它取决于物体种类、表面状况、表面温度及表面颜色。表面粗糙，无光泽，黑度大，辐射散热能力强。

⑦ 热力学。热力学研究物质的热平衡状态，确定系统由一种平衡状态变为另一种平衡状态所需的总热量。

⑧ 传热学。传热学研究能量的传递速率，是热力学的扩展。传热问题必须基于热力学和传热学才能被解决。

⑨ 热对流。热对流指流体由质点发生相对位移而引起的热交换。自然对流质点位移是由于流体内部密度差引起的，使轻者浮，重者沉。

⑩ 热辐射。热辐射指由于热（温差）的原因而产生电磁波在空间传递。热辐射不仅是能量转移，也是伴随着能量形式的转移。辐射传热不需要任何介质做媒介，可以在真空中传播。

① 结温。结温为：热阻 \times 输入功率 + 环境温度。因此，如果提高结温的最大额定值，即使环境温度非常高，LED 也能正常工作。例如，在白色 LED 中，有的 LED 芯片品种的可容许结温最高达到 $+185^{\circ}\text{C}$ 。结温可因 LED 的点亮方式而大为不同。例如，脉冲驱动（向 LED 输入断续电流驱动，间歇点亮）LED 时，结温就不容易上升；而连续驱动（向 LED 输入稳定电流驱动，连续点亮）LED 时，结温就容易上升。

半导体组件内部的温度在 LED 中是指芯片内发光层（PN 结间设置多重量子阱构造的位置）的温度。LED 芯片的发光层在点亮时，温度会上升。一般情况下，结温越高，发光效率就越低。LED 随着输入电流的增加，尽管光通量会提高，但发热量会变大。由此会出现发光层的温度（结温）升高而使发光效率降低，功耗增加，从而使结温进一步上升的恶性循环。通过降低 LED 芯片封装及该封装安装底板的热阻，使芯片产生的热量得以散发，避免结温上升等改进措施，可以提高亮度。

LED 芯片的发光层在发光过程中，温度会上升。一般情况下，如果被称为结温的发光层部分的温度上升，发光效率就会降低，即使输入电力也不亮。通过降低 LED 芯片封装和封装底板的热阻，散发芯片上产生的热量，设法使结温不上升，能够使发光更亮。如果使用提高了结温最大额定值的 LED 芯片，在安装使用时能够获得很多优点。例如，由于增加了输入电力，可提高输出功率。还可以缩小底板的散热片等。

② 封装材料。将 LED 芯片安装到封装中时，为了将 LED 芯片发出的光提取到封装外部，封装的一部分或者大部分采用透明材料。透明材料使用的是环氧树脂和硅树脂，最近还在开发玻璃材料。环氧树脂用于作为指示器和小型液晶面板背照灯光源使用的、输出功率较小的 LED，而硅树脂则用于输出功率较大的 LED。

硅树脂与环氧树脂相比，可抑制材质劣化后光透射率的下降速度。用于照明器具和大尺寸液晶面板背光源等的高输出功率 LED 产品几乎全部采用基于硅树脂的封装技术。针对波长为 $400 \sim 450\text{nm}$ 的光，环氧树脂吸收高达 45% ，而硅树脂还不到 1% 。硅树脂的劣化速度也相对缓慢。有 LED 厂商称，若采用环氧树脂，LED 到达亮度减半时的寿命最多为 1 万小时；而采用硅树脂，亮度减半所需的时间延长到 4 万小时。顺便提一下，4 万小时的组件寿命与照明产品的设计寿命相同，因此在照明产品的设计寿命期间无须更换白色 LED。采用硅树脂作为封装材料，使用 1 万小时几乎不会发生劣化。

在大功率白色 LED 中，如果 LED 芯片的封装材料使用硅树脂，一方面， 400nm 左右的光的透射率比环氧树脂高，而且点亮 1 万小时后，亮度也几乎不会发生劣化。另外，由于环氧树脂吸收短波长的光，材质劣化导致透射率下降，因此亮度明显降低。

采用玻璃材料，其劣化抑制效果比硅树脂还要高。丰田合成等着手进行了研究，在陶瓷底板上设置金（Au）突起，在其上面安装蓝色 LED 芯片，然后利用混合了黄色荧光体的无机玻璃材料封装蓝色 LED 芯片整体。由于全部由无机材料构成，因此可靠性较高。

1. 热的单位

热是能量的形态之一，与动能、电能及位能等一样，也存在热能。热能的单位用“J”（焦耳）表示。电子设备若持续发热，热量连续不断流动时，用“每秒的热能量”来表示会更容易理解，单位为“J/s”。J/s 也可用“W”（瓦特）表示。能量不会突然生成，也不会突然消失。它不是传递到其他物质，就是转换为其他形态的能量。例如， 100J 的能量可使

100g 水的温度升高约 0.24℃。这并不是通过升高水的温度消耗了 100J 的能量，而是在水中作为热能保存了起来。能量无论在何处都一定会以某种形态保存起来。能量既不会凭空消失，也绝不会凭空产生。这就是最重要“能量守恒定律”。

比热容是单位质量物质的热容量。单位质量的某种物质温度升高 1℃ 吸收的热量叫做这种物质的比热容，用“ c ”表示。比热容是一个复合单位，是由质量、温度、热量的单位组合而成的。在国际单位制中，比热容的单位是焦耳/千克摄氏度，读做焦每千克摄氏度。

2. 热阻

热阻 (Thermal Resistance) 是物体对热量传导的阻碍程度，热阻的单位为℃/W，即物体持续传热功率为 1W 时，导热路径两端的温差，即为该对象的热阻。热阻用 R 表示。热阻大表示热不容易传递，因此器件所产生的温度就相对高，由热阻可以判断及预测器件的发热状况。热阻越低，表示器件中的热量向外界传导越快。

影响 LED 热阻的因素很多，例如，从 LED 的芯片线路连接方式、结架到光学覆盖层的材料特性，都会影响 LED 的热阻，而降低 LED 的热阻是提升 LED 寿命的重要手段。

热阻用于评估 LED 封装的散热效能，是热传设计中一个相当重要的参数，正确了解其物理意义以及使用方式对于 LED 的热设计有很大的帮助。在热量传递过程中，温度差是热量传递过程的动力，好像电学中的电压，换热量是被传递的量；好像电学中的电流，可以用电学中的电阻概念来理解导热过程的热阻。在 LED 的资料中，一般都会提供器件的 R_{jc} 和 R_{ja} 热阻， R_{jc} 是 LED 的 PN 结到壳的导热热阻； R_{ja} 是 LED 的 PN 结到壳导热热阻和壳与外界环境的对流换热热阻之和。这些热阻参数可以根据实验测试获得，也可以根据详细的 LED 内部结构计算得到。根据这些热阻参数和 LED 的热耗，就可以计算得到器件的结温。热路和电路参数对应见表 1-1。

表 1-1 热路和电路参数对应

| 热路 | 电路 | 热路 | 电路 |
|---|----------------------------------|---|------------------------------------|
| 热耗 P/W | 电流 I/A | 热容 $C = WC_p$, 单位为 $cal/^\circ C$ | 电容 C 的单位为 F |
| 温差 $\Delta T = T_2 - T_1$, 单位为 $^\circ C$ | 电压 $V_{AB} = V_A - V_B$, 单位为 V | 热阻串联 $R_{th} = R_{th1} + R_{th2} + \dots$ | 电阻串联 $R = R_1 + R_2 + \dots$ |
| 热阻 $R_{th} = \Delta T/P$, 单位为 $^\circ C/W$ | 电阻 $R = V_{AB}/I$, 单位为 Ω | 热阻并联 $1/R_{th} = 1/R_{th1} + 1/R_{th2} + \dots$ | 电阻并联 $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots$ |

两个名义上相接触的固体表面，实际上接触仅发生在一些离散的面积元上，如图 1-1 所示，在未接触的界面之间的间隙中常充满了空气，热量将以导热和辐射的方式穿过该间隙层，与理想中真正完全接触相比，这种附加的热传递阻力称为接触热阻。降低接触热阻的方法主要是增加接触压力和增加界面材料（如硅脂）填充界面间的空气。在涉及热传导时，一定不能忽视接触热阻的影响，需要根据应用情况选择合适的导热界面材料，如导热脂、导热膜、导热垫等。

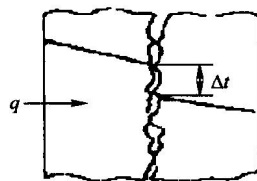


图 1-1 两个相接触的固体表面

影响 LED 热阻的主要因素有：

① LED 芯片结构与原物料也是影响 LED 热阻大小的因素之一，减少 LED 本身的热阻是先决条件。

② 不同导热系数的热衬材料，如铜、铝等对于 LED 热阻大小的影响也很大，因此选取合适的热衬材料也是降低 LED 组件热阻的方法之一。

③ 即使用相同的热衬材料，也和散热面积的大小有直接关系，二次散热设计好，面积大，也就相应地降低了热阻，这对 LED 的发光效率和寿命的延长有很大作用。

④ LED 芯片用导热胶还是与金属直接相连，包括导热胶和金属的不同种材料都会影响 LED 热阻的大小，要尽量减少 LED 与二次散热器之间的热阻。

⑤ LED 组件的工作环境温度过高也会影响 LED 组件的热阻大小，应尽量降低环境温度。

选用一定的材料与控制额定输入功率等技术，是以提高 LED 发光效率和延长 LED 寿命为前提的，为此，在 LED 设计时必须考虑到以下几点：

① 降低芯片的热阻。

② 最佳化热通道。

- 热通道结构：长度 (L) 越短越好；面积 (S) 越大越好；环节越少越好；消除热通道上的热传导瓶颈。

- 热通道材料的导热系数 λ 越大越好。

- 改良封装工艺，令热通道环节间的接触更紧密可靠。

③ 强化电通道的导/散热功能。

④ 选用导/散热效能更高的出光材料。

3. 界面热阻

由于散热器底面与 LED 芯片表面之间会存在很多沟壑或空隙，其中都是空气，尽管散热器底面与 LED 芯片表面之间的间隙很小，但由于材料本身平整度问题还会存在 80% 微细气穴。由于空气的导热系数很小，仅仅只有 $0.03\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，有很大的界面热阻相当于一种绝热材料。由于空气是热的不良导体，增加了界面热阻，所以空气间隙会严重影响散热效率，使散热器的性能大打折扣，甚至无法发挥作用。为了减小芯片和散热器之间的空隙，增大接触面积，必须填充高导热系数的导热材料，排除空气，提高导热性能，以降低界面热阻。导热材料包括导热胶带、导热垫片、导热硅脂、导热黏合剂、相转变材料等。其中，又以导热垫性价比最高，操作最为方便。导热垫的导热系数是空气的导热系数的几十倍到近百倍，可以大幅提高导热性能、降低界面热阻；导热垫可以提高界面的平整度、减少微细气穴、增加有效接触面积。

Liqui-BondSA2000 导热胶是一种高导热性而绝缘的硅胶黏合剂，它在低温或高温的情况下都能保持良好的机械性能和化学性能。这种物质的韧性有助于在热传导中减低 CTE 压力，同时由于该产品在升温过程中产生固化，导热系数为 $2.0\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

DM6030HK-SD 高导热银胶是一种高导热掺银有机黏合剂，是专门为大功率 LED 黏合固定芯片应用而开发设计的新产品。该产品对分配和黏合大量部件时具有较长时间的防挥发、干涸能力，并可防止树脂在加工前飞溅溢出，导热系数高达 $50\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

4. JEDEC 芯片封装的热阻和热性能参数

(1) 热阻参数

JEDEC 芯片封装的热阻参数如下。

R_{ja} 为结（芯片）到空气环境的热阻：

$$R_{ja} = (T_j - T_a) / P \quad (1-1)$$

R_{jc} 为结（芯片）到封装外壳的热阻：

$$R_{jc} = (T_j - T_c) / P \quad (1-2)$$

R_{jb} 为结（芯片）到 PCB 的热阻：

$$R_{jb} = (T_j - T_b) / P \quad (1-3)$$

(2) 热性能参数

ψ_{jt} 为结到封装顶部的热参数：

$$\psi_{jt} = (T_j - T_t) / P \quad (1-4)$$

ψ_{jb} 为结到封装底部的热参数：

$$\psi_{jb} = (T_j - T_b) / P \quad (1-5)$$

式中： T_j 为芯片结温，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ； T_a 为空气环境温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ； T_b 为芯片根部 PCB 表面温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

R_{ja} 是封装的品质度量（Figure of Merit）。 R_{ja} 是芯片封装的热性能品质参数（用于性能好坏等级的比较），不能应用于实际测试/分析中的结温预计分析。

从 20 世纪 90 年代起，相对于 R_{ja} ，更需要对实际预计芯片温度有价值的热参数。为适应此要求出现了三个新参数： R_{jb} 、 ψ_{jt} 和 ψ_{jb} 。

ψ_{jb} 可适当地运用于热分析中的结温分析， ψ_{jt} 可适当地运用于实际产品热测试中的结温预计。 R_{jc} 是结到封装表面离结最近点的热阻值。在 R_{jc} 测量中，设法使热流“全部”由封装外壳通过。

ψ_{jt} 与 R_{jc} 完全不同，并非是器件的热阻值，只是个数学构造物，只是结到 TOP 的热特征参数，因为不是所有热量都是通过封装顶部散出的。在实际应用中， ψ_{jt} 对于由芯片封装上表面测试温度来估计结温具有有限的参考价值。

R_{jb} 用来比较装于板上表面安装芯片封装热性能的品质参数（Figure of Merit），针对的是 2s2pPCB，不适用板上有不均匀热流的芯片封装。 R_{jb} 与 ψ_{jb} 有本质区别， $R_{jb} > \psi_{jb}$ 。与 ψ_{jt} 同理， ψ_{jb} 为结到 PCB 的热特征参数。



1.1.2 热传递的方式

电子产品完全遵守能量守恒定律，从电源流入的电能会在产品内部转换为热能，然后只会向周围的物体及空气传递。在接通电源后的一段时间内，多半转换的热能会被用于提高装置自身的温度，而排出的能量仅为少数。之后，在装置温度升高一定程度时，输入的能量与排出的能量必须一致，否则温度便会无止境上升。热能传递有 3 种方式，分别为“传导”、“对流”及“热辐射”。传导与对流的文字相似，但绝不相同。

1. 传导

传导是指在物体（固体）中的热能的传递。铝和铁的导热性都很出色。如果用数值表

示物质导热性，树脂为 0.2 ~ 0.3，铁为 49，铝为 228，铜为 386。这些都是指该物质的导热率（导热系数），单位为“W/(m·℃)”。越容易导热的物质，该数值越大。

如果用一句话来表述热导率的含义，即“有一种长为 1m、断面积为 1m²的材料，其两端的温度差为 1℃时，会流动多少 W”。如果将其单位“W/(m·℃)”写成

$$\frac{\text{W} \times \text{m}}{\text{m}^2 \times \text{℃}} \rightarrow \text{W} \frac{\text{长度}(\text{m})}{\text{断面面积}(\text{m}^2) \times \text{温度差} \text{℃}} \quad (1-6)$$

导热过程中传递的热量按照傅里叶（Fourier）导热定律计算：

$$Q = \lambda A(T_h - T_c) / \delta \quad (1-7)$$

式中：A 为与热量传递方向垂直的面积，单位为 m²，T_h 与 T_c 分别为高温与低温面的温度，δ 为两个面之间的距离，单位为 m。λ 为材料的导热系数，单位为 W/(m·℃)，表示了该材料导热能力的大小。

一般说，固体的导热系数大于液体，液体的大于气体。例如，常温下纯铜的导热系数高达 400W/(m·℃)，纯铝的导热系数为 236W/(m·℃)，水的导热系数为 0.6W/(m·℃)，而空气仅为 0.025W/(m·℃) 左右。铝的导热系数高且密度低，所以散热器基本都采用铝合金加工，但在一些大功率芯片散热中，为了提升散热性能，常采用铝散热器嵌铜块或者铜散热器。

2. 对流

对流换热是指运动着的流体流经温度与之不同的固体表面时与固体表面之间发生的热量交换过程，这是电子设备散热中应用最广的一种换热方式。根据流动的起因不同，对流换热可以分为强制对流换热和自然对流换热两类。前者是由于泵、风机或其他外部动力源所造成的，而后者通常是由于流体自身温度场的不均匀性造成不均匀的密度场，由此产生的浮升力成为运动的动力。

在终端产品中主要是自然对流换热，自然对流散热分为大空间自然对流（例如终端外壳和外界空气间的换热）和有限空间自然对流（例如终端内的单板和终端内的空气）。值得注意的是，当终端外壳与单板的距离小于一定值时，就无法形成自然对流，例如手机的单板与外壳之间就只是以空气为介质进行热传导。对流换热的热量按照牛顿冷却定律计算：

$$Q = hA(T_h - T_c) \quad (1-8)$$

式中：A 为与热量传递方向垂直的面积，单位为 m²；T_h 与 T_c 分别为固体壁面与流体的温度，h 是对流换热系数，自然对流时，换热系数在 1 ~ 10W/(℃·m²) 量级，实际应用时一般不会超过 3 ~ 5W/(℃·m²)；强制对流时，换热系数在 10 ~ 100W/(℃·m²) 量级，实际应用时一般不会超过 30W/(℃·m²)。

3. 辐射

辐射是指经由红外线、光及电磁波等从物体表面传递的方式。太阳的热量穿过真空宇宙到达地球，这也属于辐射。辐射中热量是否易于吸收和放出取决于表面的温度及颜色等。就颜色大体而言，黑色容易吸放，而白色较难。

如果用数值来表示，其数值范围为 0 ~ 1。理论上讲，全黑物质为 1，铝为 0.05 ~ 0.5，铁为 0.6 ~ 0.9，黑色树脂为 0.8 ~ 0.9，这就是热辐射率（没有单位）。

辐射是通过电磁波来传递能量的过程，热辐射是由于物体的温度高于绝对零度时发出电磁波的过程；两个物体之间通过热辐射传递热量称为辐射换热。物体表面之间的热辐射计算是极为复杂的，其中最简单的两个面积相同且正对着的表面间的辐射换热热量计算公式为：

$$Q = A \times 5.67e^{-8} / (1/\varepsilon_h + 1/\varepsilon_c - 1) \times (T_h^4 - T_c^4) \quad (1-9)$$

式中： A 为与热量传递方向垂直的面积，单位为 m^2 ； T_h 与 T_c 分别为固体壁面与流体的温度； ε 是物质表面的黑度或发射率，该值取决于物质种类、表面温度和表面状况，与外界条件无关。

由于辐射换热与温度不是线性关系，当环境温度升高时，终端的温度与环境的相同温差条件下会散去更多的热量。塑料外壳表面喷漆，PWB表面会涂敷绿油，表面黑度都可以达到0.8，这些都有利于辐射散热。对于金属外壳，可以进行一些表面处理来提高黑度，强化散热。

对辐射散热的一个最大错误认识是黑色可以强化热辐射，通常散热器表面黑色处理也助长了这种认识。实际上，物体温度低于 1800°C 时，有意义的热辐射波长位于 $0.38 \sim 100\mu\text{m}$ 之间，且大部分能量位于红外波段 $0.76 \sim 20\mu\text{m}$ 范围内，在可见光波段内，热辐射能量比重并不大。颜色只与可见光吸收相关，与红外辐射无关。夏天，人们穿浅色的衣服降低太阳光中的可见光辐射吸收。



1.2 LED热设计作用及热管理目的



1.2.1 LED热设计作用

1. 热设计作用及目的

热设计被称为“古老的新技术”，意思是说其基础传热工学和流体力学早已确立，而其应用技术热设计会因电子设备的不同而变化。设计的方法和设计人员的作用也须随电子设备的变化而变化。热设计有三个作用：保证功能和性能、保证寿命、保证安全性。在过去的热设计中，保证寿命占的比重较大，能够影响保证功能、性能和安全性问题极为罕见。

热设计的目的是采用适当可靠的方法控制产品内部所有电子元器件的温度，使其在所处的工作环境条件下不超过稳定运行要求的最高温度，以保证产品正常运行的安全性、长期运行的可靠性。通过控制产品内部所有电子元器件的温度，使其在所处的工作环境条件下不超过标准及规范所规定的最高温度。最高允许温度的计算应以元器件的应力分析为基础，并且与产品的可靠性要求以及分配给每一个元器件的失效率相一致。

如今热设计成了决定保证功能及性能的主要因素，热设计应考虑的因素包括结构与尺寸、功耗、产品的经济性、与所要求的元器件的失效率相应的温度极限、电路布局、工作环境。热设计应遵循的原则如下。

① 热设计应与电气设计、结构设计同时进行，使热设计、结构设计、电气设计相互兼顾。当出现矛盾时，应进行权衡分析，折中解决；热设计不能盲目加大散热余量，应尽量使用自然对流或低转速风扇等可靠性高的冷却方式。使用风扇冷却时，要保证噪声指标符合标准要求。

② 热设计应遵循相应的国际标准、国内标准、行业标准。

③ 热设计应满足产品的可靠性要求，以保证设备内的元器件均能在设定的热环境中长

期正常工作。

④ 每个元器件的参数选择及安装位置及方式必须符合散热要求。

⑤ 在规定的使用期限内，冷却系统（如风扇等）的故障率应比元件的故障率低。

⑥ 在进行热设计时，应考虑相应的设计余量，以避免使用过程中因工况发生变化而引起热耗散及热阻的增加。

⑦ 热设计应考虑产品的经济性指标，在保证散热的前提下使其结构简单、可靠且体积最小、成本最低。所有的冷却系统应是最简单又最经济的，并适合于特定的电气和机械、环境条件，同时满足可靠性要求；冷却系统要便于监控与维护。

2. 热设计功耗（TDP）与功耗（ P ）的区别

TDP 的英文全称是“Thermal Design Power”，中文翻译为“热设计功耗”，是反映热量释放的指标，它的含义是当器件达到负荷最大的时候，释放出的热量，单位为瓦（W）。

热功耗（TDP）并不是真正功耗（ P ），功耗（功率）是热设计重要物理参数，根据电路的基本原理，功率 $P = \text{电流} I \times \text{电压} V$ 。功耗（功率）等于流经器件核心的电流值与电压值的乘积。TDP 是指电流热效应以及其他形式产生的热能，它们均以热的形式释放。显然，热功耗（TDP）远远小于功耗（ P ）。换句话说，功耗（ P ）是对 LED 电压和电流提出的要求，而 TDP 是对散热系统提出要求，要求散热系统能够把 LED 发出的热量散发掉，也就是说，TDP 功耗是要求 LED 的散热系统必须能够驱散的最大总热量。两者的公式是不同的。

功耗：

$$P = V \times I \quad (1-10)$$

热功耗：

$$\text{TDP} = T_j - T_a = P_c (R_{Tj} + R_{Tc} + R_{Tr}) = P_c \times R_{Tz} \quad (1-11)$$

式中： T_j 为热源温度，芯片结温； T_a 为环境温度； P_c 为热源功率、芯片热功耗； R_{Tj} 为芯片到外壳的热阻； R_{Tc} 为芯片外壳与散热器的接触热阻； R_{Tr} 为散热器热阻； R_{Tz} 为总热阻， $R_{Tz} = R_{Tj} + R_{Tc} + R_{Tr}$ 。

3. 增强散热方式

下面给出的具体散热增强方式，是根据基本传热方程来增加散热量的。

① 增加有效散热面积。例如，在芯片表面安装散热器；将热量通过引线或导热绝缘材料导到 PCB 中，利用周围 PCB 的表面散热。

② 增加流过器件表面的风速，可以增加换热系数。

③ 破坏层流边界层，增加扰动。紊流的换热强度是层流的数倍，抽风时，风道横截面上速度分布比较均匀，风速较低，一般为层流状态，换热壁面上的不规则凸起可以破坏层流状态，加强换热。针状散热器和翅片散热器的换热面积一样，而换热量却可以增加 30%，就是这个原因。吹风时，风扇出口风速分布不均，有主要流动方向，局部风速较高，一般为紊流状态，局部换热强烈，但要注意回流低速区换热较差。

④ 尽量减小导热界面的接触热阻。在接触面可以使用导热硅胶（绝缘性能好）或铝箔等材料。

⑤ 设法减小散热热阻。在封闭狭小空间内的单板器件主要通过空气的受限自然对流和

导热、辐射散热，由于空气的导热系数很小，所以热阻很大。如果将器件表面和金属壳内侧通过导热绝缘垫接触，则热阻将大大降低，减小温升。

4. 热设计的一般流程

所谓热设计就是把设备输入的热量降至最低，并提高散热效果，把设备内部有害的热量排出到电子设备的外部环境中，获得合适的工作温度使其不超过可靠性规定的限值，确保设备可靠、安全地工作。电子设备的热设计可分为3个层次。

① 对电子设备机箱、机框及方腔等系统级别的热设计，即系统级（SYSTEMS）的热设计。

② 对于电子模块、散热器、PCB级别的热设计，即封装级（PACKAGES）的热设计。

③ 对于元器件级别的热设计，即组件级（COMPONENTS）的热设计。

系统级的热设计主要研究电子设备所处环境的温度对其影响。环境温度是电路板级热分析的重要边界条件，其热设计是采取措施控制环境温度，使电子设备在适宜的温度环境下进行工作。

系统级制造商所面对的最大问题是研发一种散热效率高的灯座，LED装置可以方便地插入这一灯座，而热量可以迅速地导入环境中。每一种LED的设计考虑都是不同的，并且需要清楚地了解LED所受的尺寸限制和性能。LED系统设计的本质是有效地将热量从LED散热片、金属块或引脚传递到周围环境中。在金属块和印制电路板垫片间必须进行可靠和有效的连接。通常，热量通过PCB上的热过孔到达另一层的铜块上。之后，热量通过导热的方式进入到外壳或外部散热器中。

当一个外壳内需要散发大量的热时，需要一个外部散热器。LED散热器常用的材料是铝或铜。由于散热器和空气之间的对流换热热阻影响很大，所以有必要对散热器的几何外形进行优化。散热器的性能取决于材料、翅片数、翅片厚和基座厚等参数。外部散热器扩展了换热表面，便于热量进入到空气中。优化设计必须考虑散热器周围的空气流动情况，而这一区域的空气流动又受到散热器的影响，所以对设计产生了不小的挑战。

铜具有很高的热导率，但相同体积下铝的重量更轻，同时价格也更便宜。在一些PCB中通过使用一些基板来提升传热能力，这些基板使用陶瓷或者覆有铁、铝或其他材料。

LED应用中最大的难题是，要求用一密封的外壳来保护LED。解决这一难题可以使用高导热率的外壳材料。当然，也采用一些复杂的方法。例如，空对空（air-to-air）热交换设计使用内部风扇将热量传递给内部翅片；之后，热量由内部翅片通过导热方式进入到外壳中；最后，通过外部风扇对连接在外壳上的外部翅片进行冷却。热量通过对流-导热-对流三个步骤进入到空气中。

很明显，在设计一个LED系统时需要考虑许多设计变量，所以在热设计过程中需对设计变量进行优化。DOE关于热管理的Fact Sheet中明确注明：过热会影响LED短期和长期的性能。短期的影响是产生偏色和减少光输出。减小偏色对于LCDTV等紧急应用中的背光很重要，在这些应用场合日益增加的LED功率密度促使图像颜色发生偏差，这就使散热更具挑战性。急剧升高的结温会严重影响LED的使用寿命和可靠性。优化热设计对产品的成本也有很大影响。例如，热设计可能要确定是否需要使用一个散热器，这就会增加产品的成本。

电子设备进行封装级的热设计在国外发展较为成熟,出现了电子器件封装(Electronic Packaging)专业。电子设备封装级的电子模板和 PCB 热设计是与设备的电路设计、结构设计密切相关同步进行的。对于 PCB 基材进行适当的选择是电子设备封装级热设计的重要内容,覆铜箔层压板的种类、特性是印制电路板设计和制造工艺人员所关心的项目,除了一般要求的强度、绝缘、介质系数等外,对覆铜板的热性能有特殊要求。覆铜板的热性能有 2 个方面的内容:

① 覆铜板的耐温特性。环氧玻璃布覆铜箔层压板具有优良的电性能和化学稳定性,工作温度为 $-230 \sim 260^{\circ}\text{C}$ 。聚酰亚胺覆铜箔层压板,除上述优良性能外,还具有介电系数小,信号传输延迟小的特点。

② 覆铜板的导热性能。选用耐高温、导热系数高的材料来作为印制电路板的材料。金属芯印制电路板具有相对优良的热性能。在相同的条件下,环氧玻璃布层压板图形导线温度升高可达 40°C ,而金属芯印制电路板图形导线温度升高不到 20°C ,因而金属芯印制电路板在电子设备中得到了广泛的应用。

电子设备的各个部件是由各种不同材料的元器件(如硅芯片、氧化硅绝缘膜、铝互连线、金属引线框架和塑料封装外壳等)组成的。这些材料的热膨胀系数各不相同,一旦遇到温度变化,就会在不同材料的交界面上产生压缩或拉伸应力,因此产生了热不匹配应力,简称热应力。材料热性质不匹配是产生热应力的内因,而温度变化是产生热应力的外因。



1.2.2 LED 热管理目的

1. LED 热管理的目的

由于热管理对于 LED 的性能和使用寿命至关重要,所以在研发初期就要考虑 LED 的散热问题。由于 LED 的使用寿命是结温的函数,所以热管理对于 LED 的性能至关重要。到目前为止,热管理是 LED 系统设计最重要的一个方面。LED 系统生产商通过寻求优化的散热器、高效印制电路板、高热导率外壳和其他先进热设计技术来应对这一挑战。由于热仿真可以在物理模型建立之前,从散热的角度评估不同设计方案和优化系统级设计,所以热仿真的作用日益凸现。LED 热管理的目的是:

- ① 确保器件在合适的条件下工作,以达到高可靠性。
- ② 防止在超应力条件下驱动,以延长 LED 的工作寿命。
- ③ 在最大可能电流下工作,以提高光输出性能。

热管理的要点是通过导热和散热使 LED 工作温度保持在合理的范围内。通常,依靠热传导将 LED 的热量导向散热片,再将“埋在”散热片中的热量散发出去。这一“导”一“散”非常重要,缺一不可,并且散热不仅要依靠传导,而且还要靠对流和辐射等方式。

在进行热管理分析时,常用的基本定律是热流定律,即所谓“热欧姆定律”。在分析电流传输时,欧姆建立了众所周知的欧姆定律,即 $V = R \times I$,这里 R 为电阻, I 为电流, V 为电阻 R 两端的电位差。在热流传输时有形式上与其相似形式的定律,即

$$\Delta T = R_{th} \times P_0 \quad (1-12)$$

该定律也被一些应用者称为“热欧姆定律”(实际上,此定律与欧姆无关)。这里 R_{th} 表

示热阻, 表征热流传输的阻力, 单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$; P_0 为热流, 即单位时间传输的热量 $P_0 = Q(\text{热量})/t(\text{时间})$, 量纲与功率相同; ΔT 表示热流传输途中两点间的温差, 即此两点间热阻上的温差。

在检测电子电路时常用万用表检测相关结点的电位和电位差即电压, 而在检测热流传输时则可用点温计、热电偶及红外热像仪来检测热流传输路径上相关结点的温度及温差。

在欧姆定律中, 串联电路中电流处处相等, 而热流传输则并不如此, 在某些点会因为热阻过大而使热流传输受阻, 使热量积聚。用“热欧姆定律”可以检测和估算的有:

- ① 类似于电路分析中建立等效电路, 在热流分析时也可建立等效热流路径图。
- ② 检测和估算 LED 结温 T_j 。
- ③ 判别相关结点间的散热效果、热阻大小。
- ④ 使用不同材质散热器时 LED 工作状态的优劣。

在热流分析时有几个重要的温度结点是:

- ① 芯片 PN 结的结点温度 T_j , 应小于产品规定的额定值, 以使其工作在安全范围内。
- ② 焊点温度 T_a , 即 LED 引出端与基座板焊盘处的温度。
- ③ 散热器片与外环境界面温度 T_a 。

要使热源 LED 产生的热散发出来, 使结温 T_j 保持在合理安全的数值, 以在器件允许的最大正向电流 I_F 下获得最高的发光效率。

2. LED 热特性

由于 LED 的光输出会随着温度发生变化, 所以良好的热管理是功率 LED 照明应用的一个重要问题。通过降低 LED 的温度, 可以使其保持较高的效率。在实际的应用环境中, LED 温度越低, 其输出的流明也越多。

这就意味着在 LED 在实际应用中, 其结点至环境的真实热阻是 LED 照明设计的一个重要因素。令人感到遗憾的是, 不同 LED 供应商提供的产品热阻和其他与温度相关的特性参数不一样。因此, 不同的热标准机构也已经开始进行 LED 热管理的相关标准制定工作。现今, JEDEC JC15 协会正在起草一部关于 LED 热阻测量的新标准。此外, 国际照明协会成立了两个新技术协会 (TC-2-63 和 TC-2-64), 以处理 LED 热方面的问题。在这些协会之间逐渐达成了一个共识: 供应商在采用式 (1-13) 计算 LED 热阻时, 必须考虑实际的光功率 P_{opt} (换而言之, 辐射光通量):

$$R_{\text{th}} = \Delta T_j / (I_F \times V_F - P_{\text{opt}}) \quad (1-13)$$

式中: LED 正向电流和正向电压 ($I_F \times V_F$) 的乘积是 LED 工作所需要的电功率, ΔT_j 是 LED 的结温变化量。

当确定 LED 热阻时忽略光功率会得到比 LED 实际应用更低的热阻。如果在 LED 照明设计中使用这些数据去计算 LED 的光输出量, 其结果是他们的设计往往无法满足实际的光输出量的要求。实际情况中的热阻会更高, 相应的 LED 结温也会更高。由此, 实际 LED 照明设备发出的光通量会比预期的低。获取 LED 实际的热特性数据是成功设计 LED 的关键。

3. 导热和散热

导热和散热是两个不同的概念, 以 LED 来说, 基板的角色是导热而非散热, 将热从传