

文章编号: 1674-8085(2016)01-0006-05

超薄笔记本电脑底面温度场散热设计优化

*黄登峰^{1,2}, 朱彤¹

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 文思海辉技术有限公司, 上海 200241)

摘要: 越来越多的笔记本电脑采用了超薄设计, 导致散热空间变小, 使电脑底面会有过热现象。本文研究如何优化散热器结构及选用底面材料, 结合数值模拟技术, 提出了解决超薄笔记本电脑底面过热的方法。

关键词: 超薄笔记本电脑; 热分析; 数值模拟; 空气间隙; 底面材料

中图分类号: TK124

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2016.01.002

THERMAL DESIGN OPTIMIZATION OF THE ULTRA-THIN LAPTOP BOTTOM TEMPERATURE FIELD

*HUANG Deng-feng^{1,2}, ZHU Tong¹

(1. Mechanical and Energy Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Pactera Technology International Ltd., Shanghai 200241)

Abstract: More and more laptops adopt the ultra-thin design so that the thermal dissipation space has been lead to smaller and bottom of computer will overheating. In this paper, we study how to optimize the structure of the thermal module and select the bottom material combined with numerical simulation technology. Furthermore, we put forward the solution to the ultra-thin laptop bottom overheating.

Key words: ultra-thin laptop; thermal analysis; numerical simulation; air gap; bottom material

0 引言

随着消费者对电子产品的轻、薄、小、高速等性能的追求, 总厚度在 18 mm 以内的轻薄笔记本电脑已经是市场主流, 其空间有限, 散热问题一直是制约其发展的一大技术瓶颈^[1]。目前国内外笔记本电脑的散热研究主要集中于传统笔记本的过热问题研究, 研究方向有风扇的风量、通风口开孔率、翅片疏密度等。但是这些参数分别受限于噪音要求、安全规范要求 and Intel 芯片的压力要求, 只适合应用于特定的应用场景优化, 超薄笔记本电脑受 CPU 芯片发热影响, 过热区域主要集中在底面。

本文通过对 Intel Broadwell 平台的超薄笔记本电脑热设计研究, 主要从增加空气间距和优选底面材料的角度, 通过数值模拟仿真, 探讨了超薄笔记本电脑底面过热问题的解决方案。藉此, 改变了传统的设计、试验、再设计、再试验的产品开发模式, 缩短了产品的开发周期, 减少样机测试成本^[2]。

1 系统功耗和热阻

1.1 发热元件的功耗

每个笔记本电脑平台都有一个整体的热力学极限, 即平台上的所有器件功率持续负载。分析表明, 笔记本电脑热设计最坏的情况是通过网络玩 3D

收稿日期: 2015-07-30; 修改日期: 2015-12-10

作者简介: *黄登峰(1982-), 男, 江苏南通人, 工程师, 硕士生, 主要从事电子设备散热设计研究(E-mail:d.f.huang@hotmail.com);

朱彤(1969-), 男, 浙江杭州人, 教授, 博士生导师, 主要从事高效洁净燃烧技术, 工业加热及能源高效利用技术及理论的研究(E-mail: zhu_tong@tongji.edu.cn).

游戏时发生的,此时所有器件几乎满负荷运行,若不能有效排出器件运行所散发的热量,则单位面积功耗大的器件将出现温度超标。图1给出了该平台

参考设计的主要发热器件的相对位置,表1是Intel Broadwell平台3D游戏时系统的实测功耗。

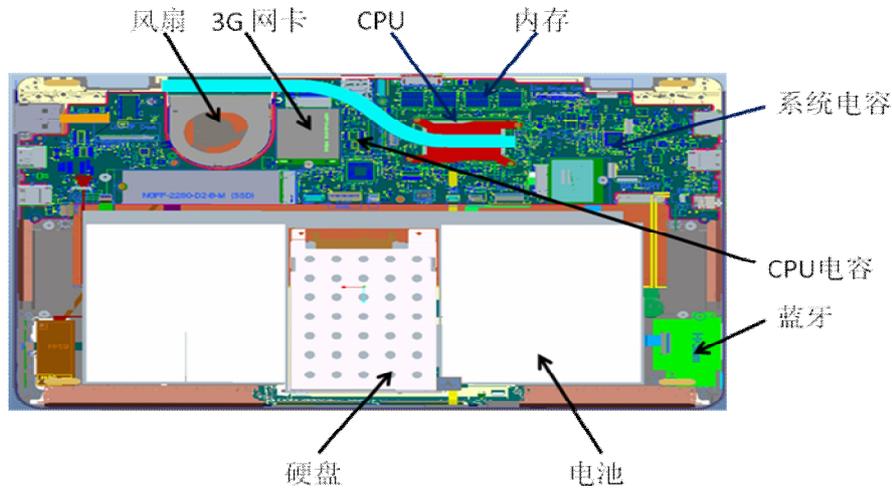


图1 主要发热器件的相对位置
Fig.1 Main components location

表1 系统功耗(不含屏幕)
Table 1 System power (not including Panel)

器件名称	功耗(W)
CPU	15
内存	1
硬盘	1.7
3G 网卡	0.5
蓝牙	0.5
CPU 电容	1.3
系统电容	1.5
风扇	1.5
电池充电损失	1.6
其他损耗	0.8
屏幕功耗	3.2
系统总功耗	28.6

另外,由Intel Boardwell之前的平台实验研究成果表明:热源的功率误差与温升几乎成比例关系,即热耗误差5%,温升也会产生5%左右的误差^[3]。

1.2 关键部件的接触热阻

两壁面之间只有紧密接触的地方才能直接导热,若在接触处存在空隙,热量是通过接触面及其之间空隙内的流体导热作用传递的,因此两接触面之间将出现温差,即存在传热阻力,称为接触热阻^[4]。笔记本电脑的CPU与导热板之间存在接触热阻,芯片上方热管处的温度值与芯片表面温度值有一定差值。若能够有效降低接触热阻,可改善芯片的结点温度。尽管接触热阻不是物性参数,但在数值模拟时,需要赋予相应的热阻值,以便尽可能真实反映散热情况。表2是热设计功耗为15W的Boardwell CPU的各段接触热阻值^[5]。

表2 接触热阻参数
Table 2 Thermal contact resistance parameter

CPU 热设计功(W)	T_j 最大值(°C)	R_s (°C-cm ² /W)	R_t (°C-cm ² /W)	R_b (°C-cm ² /W)	R_{hp} (°C-cm ² /W)	R_{j-p} (°C-cm ² /W)
15	100	0.023	0.2	0.1	0.15	0.47

注: T_j 是CPU结点温度; R_s 是CPU硅的接触热阻; R_t 是导热材料的接触热阻; R_b 是铍铜的接触热阻; R_{hp} 是一根直径6mm的热管压到1.5mm的接触热阻; R_{j-p} 是结点与热管间的总接触热阻

2 数值模拟

在数值模拟中,物理模型、几何模型与实际情

况差异的大小将直接影响仿真结果的准确性^[6]。本文根据每个部件的形状和位置,相应地在仿真软件中建立仿真分析模型,其中,CPU、3G网卡、风扇

等利用原厂提供的精确几何模型。这类器件结构复杂并且对系统发热和散热影响大,不宜用简化模型替代。对于一些不发热的元器件,或者发热功率较小可以忽略不计的部件,根据材料性质建立简易的物理模型,但是不赋予发热功率值。

2.1 边界条件

本文数值模拟中,边界条件主要包括环境温度、环境压力、辐射条件、风量、流动状态等参数。另外,笔记本电脑处于强迫对流中,部件之间温度接近,因此不需要考虑辐射传热。不过,重力方向对对流影响较大,影响系统的温度分布,需要特别设置。以下是建立求解区间内的环境及边界条件:

强迫对流风量: $3.4 \text{ m}^3/\text{h}$;

环境压力: 1 atm ;

重力方向: Z 向,以笔记本电脑底面 $xy = 0$ 为平面,厚度方向为 Z 方向^[7];

环境温度: $25 \text{ }^\circ\text{C}$;

求解域: 求解域包括与关注结果相关的所有物体和环境。但是求解域的尺寸并非越大越好,无意义的放大求解域会造成求解计算时间的延长和计算资源的浪费。笔记本电脑无论在温度测试还是在日常使用中,主要置于桌面上。桌面与笔记本电脑的底面形成一个狭窄的风道,使风扇的工作环境恶劣,在进行笔记本电脑数值模拟时需要把桌面包含在求解域内。沿着气流主流方向上可以适当的放大求解域,在另外两个方向上求解域可以与笔记本电脑外壳面重合。

2.2 网格独立性

网格的划分对于一个仿真模型,起到非常重要的作用。过密的网格虽然可以带来相对较高的精度,但对于计算机硬件的要求也相应提高,模拟计算的时间也会过长;而稀疏的网格无法准确反映流动、传热过程,有可能使分析的结果与实际相差过大,所以,合理的网格疏密程度和网格属性为求解的准确性和求解速度提供了重要的支持^[8]。

模拟计算结果与实验值之间的误差来源主要有:物理模型近似误差,差分方程的截断误差及求解区域的离散误差,迭代误差,舍入误差等。在通常的计算中,离散误差随网格变细而减小,但由于网格变细时,离散点数增多,迭代误差、舍入误差也随之加大。

超薄笔记本电脑数值模拟应保证固体边最小单元数在 2 以上,在流体间隙中,至少保证最小网格单元数为 3,最大网格长度比小于 20。通过多个不同网格数量的数值模拟结果比较发现,在 X、Y、Z 三个方向上,最小间距分别为 0.6 mm 、 0.2 mm 、 0.9 mm ,网格数为 100 万左右,网格独立性得以保证。

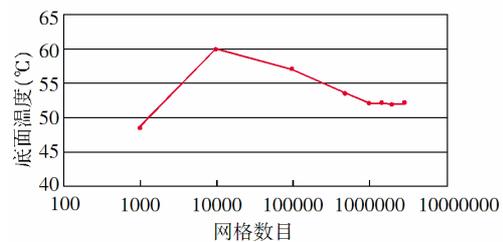


图2 网格独立性检验

Fig.2 Grid independence

3 设计优化

3.1 散热器的设计

散热器主要由热管、翅片、压紧结构等组成,如图 3 所示。笔记本电脑中发热量比较大的半导体器件主要是 CPU,而 CPU 散热是通过热管将热量传递出去的。为减小热管上的铜板与器件上部之间的接触热阻,铜板与器件之间一般涂有导热膏。半导体器件则通过表面贴装焊接在主板上。热管冷凝端有散热翅片。风扇出口的空气流经热管冷凝段的翅片,将热管传递过来的 CPU 热量带走。

本次研究的超薄笔记本厚度是 16.8 mm ,Z 向堆叠如表 3 所示。由于屏幕、键盘、主板、CPU 的厚度是系统选型决定的,导热介质厚度为 0.2 mm ,热管管径受导热能力的约束,机壳材料的厚度受限于最小成型工艺,要增加空气间隙,只能从压紧结构入手。

表 3 超薄笔记本电脑 Z 向堆叠

Table 3 Z stack-up of ultra-thin laptop

器件名称	厚度 (mm)
屏幕	5.8
键盘	3.8
主板	1.2
CPU	1.5
导热介质	0.2
压紧结构	t
热管	1.5
空气间隙	a
底壳厚度	1.2
系统总厚度	16.8

由表 3 可见,除空气间隙、压紧结构厚度外,其余器件的厚度为 15.2 mm,空气间隙与压紧结构之间的关系为:

$$a=16.8-15.2-t \quad (1)$$

传统散热器压紧结构是用弹簧螺丝提供压紧力,压铸件提供弹簧螺丝的支撑,同时为了保证高热导率,在压铸件内需要嵌入铜块。这样分段式的传统压紧结构厚度大而且制造工艺复杂,不适合用在超薄笔记本电脑的设计中。铜合金中性能最好的高级弹性材料是铍铜,既能提供 CPU 所需的压紧力,又有良好的导热性,是取代传统压紧结构中弹簧螺丝、压铸件、铜块的理想材料,如图 4 所示。铍铜厚度是 0.5 mm,图 3 中压铸件厚度 1.1 mm。

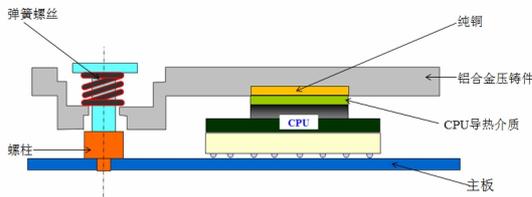


图 3 传统压紧结构
Fig.3 Traditional press fitting

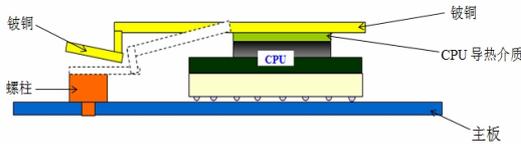


图 4 铍铜压紧结构
Fig.4 BeCu press fitting

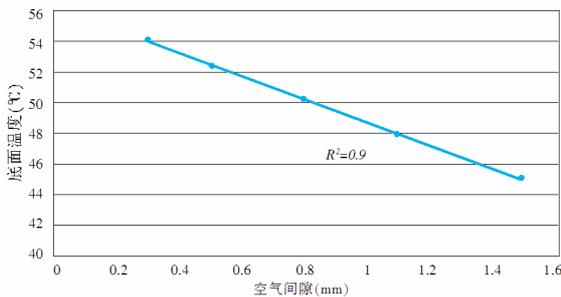


图 5 空气间隙与底面温度影响关系
Fig.5 Air Gap and temperature relationship

通过数值模拟结果分析,可以发现底面空气间隙 a 对底面温度 T 影响很大,如图 5 所示,两者呈线性相关,空气间隙 a 越大,底面温度 T 越低。不过,空气间隙 a 越大,则要求压紧结构的厚度越薄。综合考虑,空气间隙 a 为 1.1 mm 合适。

3.2 底面材料选择

传统笔记本电脑底面的材料通常是工程塑料,这种材料的成本低,加工工艺简单,但是热导率小于 $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$,过低的热导率也是底面过热的一个原因,这就要求底面材料的选择要考虑散热的性能。

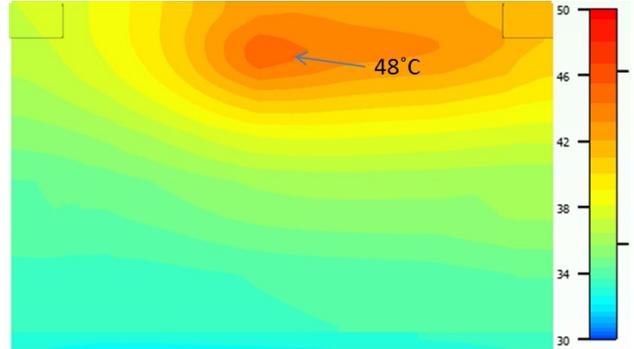


图 6 塑料底面温度模拟结果
Fig.6 Plastic bottom thermal simulation picture

图 6 是数值模拟计算得到的工程塑料底面温度分布图,发现其最高点温度为 $48 \text{ }^\circ\text{C}$ 。而该产品的表面温度要求小于 $43 \text{ }^\circ\text{C}$ 。所以在设计时要放弃工程塑料机壳的方案,选择导热性能较好的金属材料。

表 4 给出了几种常用材料的热导率,通过数值模拟仿真,得到底面热点的最高温度。

表 4 底面材料及仿真结果
Table 4 Simulation result with different material

	工程塑料	铝	铜	不锈钢	镁铝合金
密度 (10^3 kg/m^3)	1.67	2.7	8.9	7.9	1.8
热导率 ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	0.25	209	385	20	73
热点最高温度 ($^\circ\text{C}$)	48.0	40.8	37.7	46.6	42.3

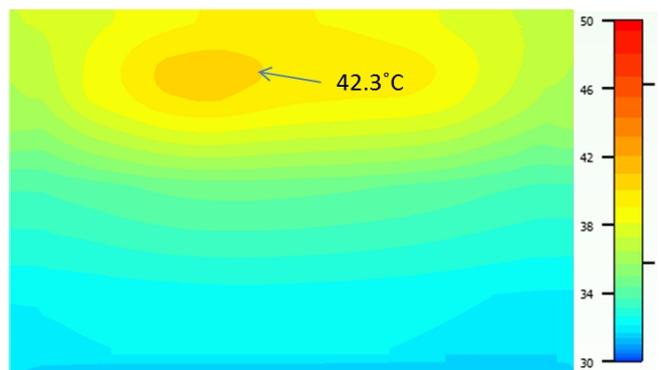


图 7 镁铝合金底面温度模拟
Fig.7 Mg-Al alloy bottom thermal simulation picture

由表 4 可知,相同底面尺寸下,随着材料热导

率的增加,底面的散热性能提高比较明显。但是在考虑热导率的同时,还需要兼顾材料的价格和其他机械性能。对于铜,由于质地比较柔软、密度过大、价位昂贵不适宜大范围使用;对于不锈钢来说,机械性能较好,但是热导率低,对热量需要快速扩散的超薄笔记本电脑效果不佳;铝的热导率较好,是常用散热材料,但由于纯铝的硬度较低,用于平面度要求较高的笔记本电脑,制造难度较大。在实际使用中纯铝常加入其他材料制成铝合金提高其硬度。镁铝合金与纯铝相比,镁铝合金的热导率有所降低,但是其密度低,铸造工艺简单,并且能达到底面温度的要求。

4 测试验证

在测试的过程中,通过独立封闭空间以及空调恒温等保证环境温度的设定以及自然冷却对流条件的实现。

表5给出了测试样机装配超薄散热器和镁铝合金底壳时,运行3D游戏,监测点实验值和模拟值的误差分析。对于温度场仿真而言,误差在5%以内,说明仿真结果是真实有效的。造成误差的原因是由于实验环境并不能在一种状态保持绝对的稳定,易受到其他情况的影响,同时CPU等的真实功耗与模拟计算的边界条件与仿真建模不能完全一致所引起的。

表5 各监测点温度值(°C)
Table 5 Monitor temperature (°C)

监测点	实验值	模拟值	误差 /%
CPU	84.6	87.3	3.2
内存	66.0	69.3	5.0
3G网卡	54.6	57.0	4.4
硬盘	47.2	48.8	3.4
电池	38.0	39.1	2.9
键盘热点	40.8	41.6	2.0
底面热点	41.8	42.3	1.2

5 结论

通过数值模拟仿真,对15W CPU的超薄笔记本电脑底面过热问题进行了分析,重点研究了空气间隙和底面材料对底面温度的影响,得到以下结论:

1)底面温度与底面空气间隙是反比关系,且强相关。为了增加空气间隙,提出了铍铜压紧结构,由于其一体式设计,可增加空气间隙,降低底面温度;

2)底面材料的热导率越高,底面温度越低。铜、铝的热导率分别是镁铝合金的5.3倍和2.9倍,但底面温度并没有显著下降,综合加工工艺,镁铝合金是超薄笔记本电脑底壳的优选材料。

参考文献:

- [1] 高翔,凌惠琴,李明,等. CPU 散热技术的最新研究进展[J]. 上海交通大学学报,2007,41(41):48-53.
- [2] 宋印东,姚寿广,陈静. 某型号笔记本计算机散热分析[J]. 江苏科技大学学报:自然科学版,2012,26(4):361-565.
- [3] 李伟荣,谢英俊. 热仿真技术在笔记本电脑测试中的应用探讨[J]. 电子机械工程,2004,20(5):7.
- [4] Liou JH, Chang CW, Chao C, et al. Visualization and thermal resistance measurement for the sintered mesh wick evaporator in operating flat-plate heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53 (7):1498-1506.
- [5] Intel, Inc. Mobile Thermal Mechanical design guide [EB/OL]. http://pcache-www.intel.com/cd/00/00/54/21/542132_542132_SKL_TM DG_Rev0.95.
- [6] Bar-Cohen A, Iyengar M. Design and optimization of air-cooled heat sinks for sustainable development[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(4): 584-591.
- [7] 林潘忠,孙蓓蓓,赵天. 基于接触热阻模型的笔记本电脑散热性能分析与优化[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2014,44(1):96.
- [8] 李波,李科群,俞丹海. Flotherm 软件在电子设备热设计中的应用[J]. 电子机械工程,2008,24(3):11-13.