

基于 Flotherm 的高性能个人电脑主机小型化散热优化设计

徐贤达

(电子科技大学 20160001 班, 成都, 610051)

摘要: 高性能个人电脑主机小型化目前最大的挑战是处理小型化带来的散热问题。基于 Flotherm 软件平台, 在传热学知识基础上, 本人研究了影响小型化电脑主机温度的因素, 完成了对小型化电脑主机散热进行优化的数字实验, 成功将一款风扇冷却小型高性能立式电脑主机改进到满足基本热性能的结构。在此基础上, 本人继续对其热性能进行优化, 在保证芯片温度小于 95℃的条件下, 将风扇噪声降到了 28.1 dB, 使得此小型化电脑主机满足了实际运行需求。

关键词: 小型化; 电脑; 散热; 优化; 数字实验

1. 设计背景及设计期望

1.1 设计背景

小巧便携、时尚美观、节能环保, 这些词汇是对小型化电脑主机最好的概括。小型化电脑主机弥补了传统台式主机的不足, 也十分贴合现代人的使用体验。因此, 近年来, 小型化电脑主机市场成为了台式机厂商寻求突破的希望, 国外代表有戴尔公司的 3050MFF 迷你商用主机, 国内代表则有大唐公司的 OPS 迷你主机。

但是, 高性能个人电脑主机小型化也带来了一些问题, 之一便是散热问题。芯片有最高的允许结温温度, 所以, 需要对主机内部进行散热处理。在散热处理中, 还需考虑结构的可行性与噪声的控制。

所以, 本次数字实验的目的就是设计一款风扇冷却小型化高性能立式电脑主机, 并且对其热性能进行优化, 使其既满足运行的需求, 又具有可靠地散热性能。

1.2 设计期望

设计主机机箱的尺寸为 125mm×125mm×250mm, 采用单风扇和单散热器的烟筒结构。机箱内布局有基本部件, 各尺寸材料功率等指标如下表 1 所示。

表 1 主机结构及内部部件参数

	尺寸(mm)	材料	发热功率(W)
机箱	125*125*250	Aluminum-6061	\
电源	33*120*200	Iron (Pure)	30
CPU	10*15*0.5	Silicon	95
GPU	20*28*0.5	Silicon	300
PCB	200*340*3	FR4	20
风扇NFB1212H	120*120*25	Fan Material	\
散热器	100*70*200	Aluminum-6061	\

本设计的期望是, 在环境温度为 25℃的情况下, 对机箱内部热性能进行优化, 使得不改变结构的条件下,

CPU 和 GPU 的温度小于允许结温温度 95℃。进一步, 尝试将两者温度尽量降到最小, 以满足噪声的要求(控制在 30dB 以下)。

2. 设计原理

2.1 热设计基本原理

2.1.1 生热与散热

电子设备工作时必须要通电, 根据欧姆定律, 电子设备的任何一个非超导体部件都会发热。

发热产生的热量会产生热流, 热流都是从高温流向低温。电子设备中任意一个零件产生的热量将通过零件外壳, 依次向散热器、设备内控件、设备外壳、环境流动, 这些位置的温度依次降低。一般温度最高点为热源, 温度最低点为外部环境。

然而, 电子设备用的所有元器件都有最高允许工作温度, 超过这个温度, 元器件的寿命就会在理化机理的作用下变短甚至瞬间损毁。

所以, 散热设计是电子设计的一个重要环节。

2.1.2 散热的三种主要途径

散热有以下三种途径

1. 传导

发热元件、散热器表面向周围空气的传热途径是对流和热辐射, 基本规律是傅里叶方程,

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right) S$$

2. 对流

空气对流散热的基本规律是牛顿散热定律,

$$Q = aS(T_2 - T_0)$$

3. 辐射

辐射散热的基本规律是,



作者介绍: 徐贤达 (1998-), 男, 电子科技大学英才实验学院二年级学生。
本文为工程实践创新课程论文。
指导老师: 霍中生

$$Q = c_0 \varepsilon S [(0.01T_2)^4 - (0.01T_0)^4]$$

2.1.3 热阻

对于确定的散热系统，热源发热功率与相对环境的“温升”之间是单调的确定关系。“热阻”这个概念便被引入，表示热量在传递路径上的阻力，

$$R_{nm} = \frac{\Delta T}{P} = \frac{T_n - T_m}{P} \quad (T_n > T_m)$$

热阻越小，说明热量在传递路径上的阻力越小，此传递路径的散热效果越好。

2.2 电子设备热控制方法

电子设备常用的散热方法包括自然冷却法、强迫风冷法、散热器法、热管技术法、半导体制冷法、液体冷却法等等，以下介绍本设计涉及的几种散热方法。

2.2.1 自然冷却

此方法利用设备中元件之间的空隙以及机壳的传导、自然对流、辐射等方式来达到冷却的目的。该方法属于被动散热，是低热流密度（大空间）最常用的方法。

2.2.2 强迫风冷

此方法的原理是，在牛顿散热定律的理论基础上，利用风扇加大空气流速，以增大换热表面的对流换热系数。此方法散热能力一般比自然冷却散热能力提高了 10 倍之多，是高热流密度常用的方法。

2.2.3 散热器

散热器总是和强迫风冷技术结合使用。散热器冷却原理，总的来说就是扩展了发热体和冷质体的换热接触面积。

散热器扩展了热源的热流通道，根据该热流通道，可以将散热器各部分以热阻的形式表示出来，并利用热阻的减小来提高散热效率。

散热器的热阻表达式为，

$$R_{sink} = R_{sp} + R_{con} + R_{conv}$$

式中热阻分别为：扩散热阻 R_{sp} ，传导热阻 R_{con} 和对流换热热阻 R_{conv} 。

根据每一项热阻的计算公式，我们可以提取出四个关键影响因子（不考虑改变散热器整体尺寸）：A-来流速度，B-肋片数目，C-基座厚度和 AB 交互效应。

实验^[1]研究发现，以上四个关键影响因子对于散热效果的影响度如表 2 所示。

表 2 各因子影响度

影响因子	A-来流速度	B-肋片数目	C-基座厚度	AB 交互效应
影响度 (%)	80.82	5.70	1.29	12.04

对于本实验设计而言，在风扇转速不变的情况下，对于散热器的优化主要集中在 B-肋片数目和 D-肋片和风粒子流交互效应之上。

当然，散热器的材料也是很重要的一个环节。铝的

导热率大约为 $200 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ，铜的导热率大约是铝的 2 倍左右。但是，考虑到材料的重量，散热器一般都采用铝合金，最常用的便是 Aluminum alloys 606x 系列，导热率大约为 $170 \sim 210 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 不等。

2.2.4 热管技术^[5]

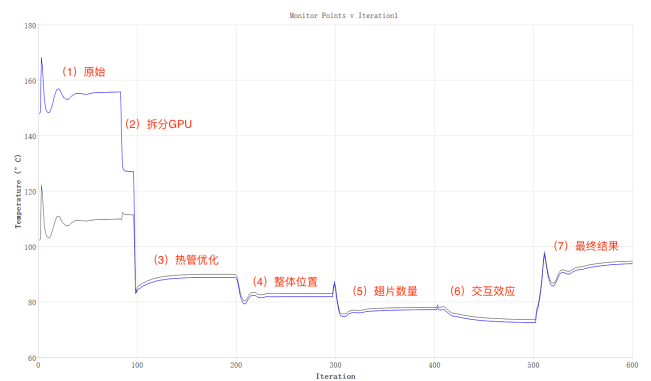
热管技术利用了相变冷却的原理，通过在全封闭真空管内液体冷媒的蒸发与冷凝这一相变过程产生大量吸放热效应，可等效为导热能力极强的传热元件。

本设计实验所采用的热管统一采用导热率 $10000 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ，密度 3000 kg/m^3 的材料建模。

3. 数字实验得到的优化规律

本数字设计实验过程中，本人经过长时间探索，发现了几个关键优化参数。按照主要矛盾到次要矛盾的顺序，本人设计了优化的整体流程。整个流程涵盖 5 个关键优化过程，最终顺利地将元器件温度控制在了 73°C 左右。流程图如下图 1 所示。

图 1 数字实验优化流程图



下面，本人就详细介绍一下优化的每一个环节。

3.1 GPU 拆分优化

本人将 CPU 和 GPU 放置在了散热器的同一侧。原始情况下，GPU 是 1 块，后来进行优化，将 GPU 拆分成 2 块，总功率不变，发现 GPU 温度大大下降。

图 1 和图 2 分别为拆分前后的切面温度图。

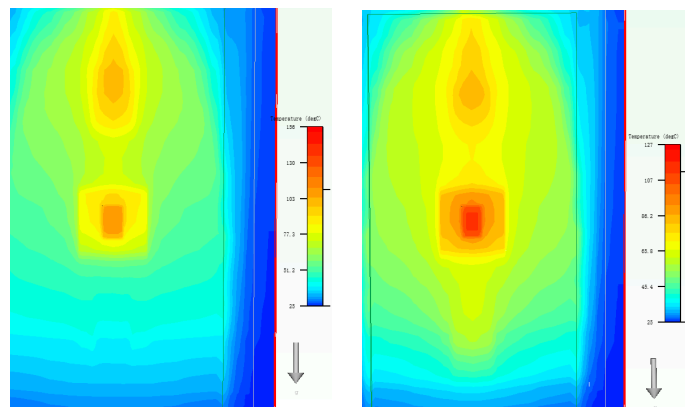


图 1 拆分前切面温度图

图 2 拆分后切面温度图

从两张图的前后对比，我们可以自然地找到原因。

GPU 拆分后，热量在散热器的铝板上分布地更加均匀，即有更多的铝板面积参与到了有效的导热过程中。

3.2 热管优化

本人在安置 CPU 和 GPU 一侧的散热器表面铺上了一层厚度为 3 毫米的热管。根据设计要求，热管宽 10 毫米，间距 2 毫米，且距离边缘为 5 毫米。

按照论文^[2]所述，平板热管方向应该与气流方向保持一致。在实验探究中，本人做了一套对比试验，即竖向热管与横向热管的散热性能对比。前者与气流方向保持一致，后者则垂直。

图 3 和图 4 分别为竖向热管与横向热管。

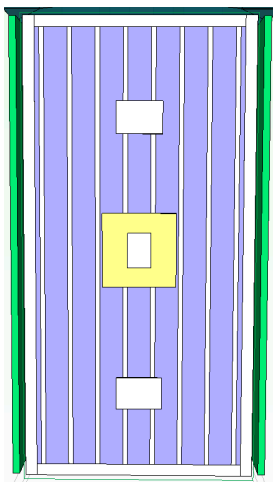


图 3 竖向热管

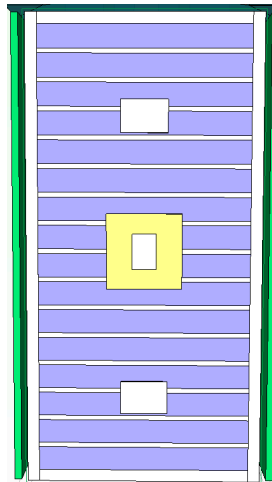


图 4 横向热管

数字实验计算发现，两种热管的使用都使得元器件的温度降到了 90℃ 左右，但是，虽然竖向的温度要低一些，但是差距很小，在 1℃ 以下。

图 5 和图 6 分别为两种热管的切面温度图。

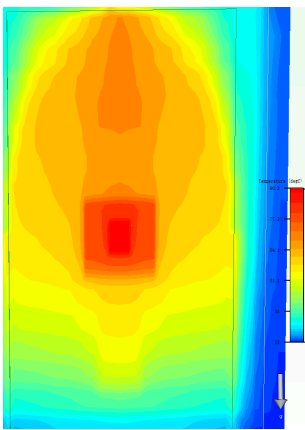


图 5 竖向热管切面温度图

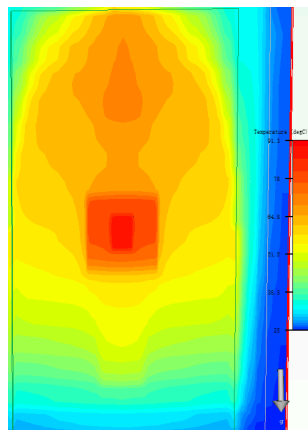


图 6 横向热管切面温度图

我们发现，两种热管的导热性能还是很强的，可能因为热管间距比较小，所以两种热管的散热差异性不大，参与导热的局域相似性很高。

3.3 风速优化

因为机箱整体尺寸较小，所以通过位置调整在自然冷却方面做大文章不太现实。

我们之前讨论到，风冷散热影响度最高的因素便是进风速度。进风速度，一方面与散热器两侧进风出风有关，另一方面与散热器内部翅片有关。

所以，我们接下来分别对这两个因素进行探究。分别对应着流程图里面的（4）和（5）。

3.3.1 散热器位置

我们先探究散热器顶部与风扇的最佳距离，如下面表 3 和图 7 所示。

表 3 温度与散热器顶部-风扇距离的关系

顶部-风扇距离(mm)	0	5	10	15	20
CPU温度(°C)	96.12	90.37	85.53	81.85	79.25
GPU温度(°C)	97.88	92.19	87.52	83.98	81.61

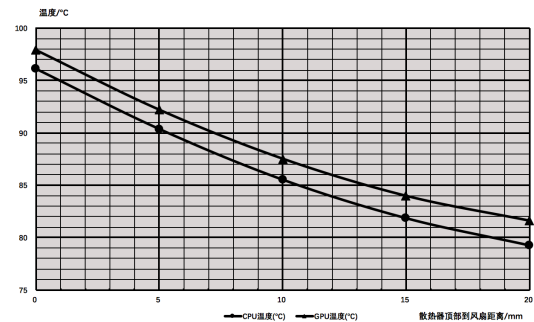


图 7 温度与散热器顶部-风扇距离的关系曲线

可见，散热器顶部-风扇距离越大，热源温度越低，原因是气流受容积限制收到的阻力减小。

我们再探究散热器底部与基座的最佳距离，如下面表 4 和图 8 所示。

表 4 温度与散热器底部-基座距离的关系

底部-基座距离(mm)	5	7	9	10	11	13	15	20	25	30
CPU温度(°C)	79.59	79.35	79.67	79.41	81.62	80.96	80.84	81.53	83.24	86.91
GPU温度(°C)	82.24	82.01	82.3	81.77	84.31	83.40	83.32	84.07	85.65	89.33

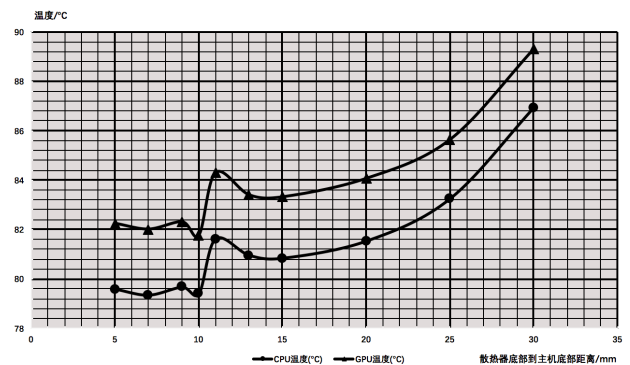


图 8 温度与散热器底部-基座距离的关系曲线

可见，散热器底部-基座距离为 10 毫米的时候，热源温度最低，此时气流速度达到最高。

3.3.2 散热器内部翅片

散热器内部翅片的主要作用，是增加空气流过的散热器表面积。但是，翅片数量如果太多，由于流体粘滞效应，空气流动阻力大大提高，使得空气速度降低。

所以，我们接下来来探究一下最适合的翅片数量，下表 5 和图 9 便说明了热源温度和翅片数量的关系。

表 5 温度与散热器翅片的关系

散热器翅片数量(个)	5	6	7	8	9	10
CPU温度(° C)	94.87	88.24	83.86	79.25	77.71	75.79
GPU温度(° C)	97.43	90.75	86.29	81.61	80.14	78.4
散热器翅片数量(个)	11	12	13	14	15	
CPU温度(° C)	74.24	76.47	79.34	86.82	98.35	
GPU温度(° C)	77.1	79.71	83.08	90.82	102.7	

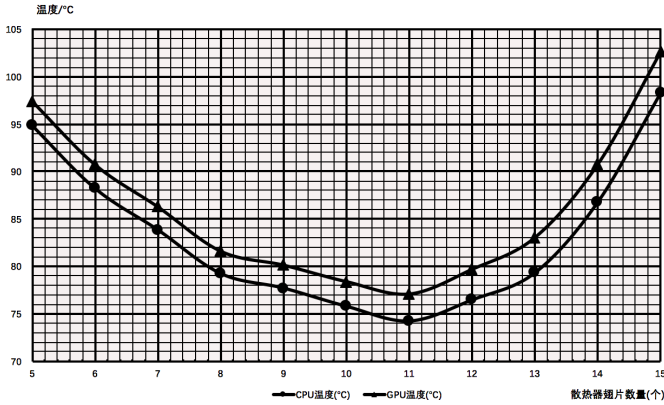


图 9 温度与散热器翅片的关系曲线

可见，当翅片数量为 11 时，热源温度最高，此时气流速度达到最高。

本人又想，如果增加散热器中心间距，即增加最中间两块肋片之间的距离，会不会使得效果更好呢？毕竟中心的粘滞效应减少了。结果如下表 6 所示。

表 6 温度与散热器翅片中心间距的关系（翅片数 11）

散热器中心间距	0	3	7.5	15	22.5	30
CPU温度(° C)	74.24	75.69	75.59	82.78	97.06	118.31
GPU温度(° C)	77.10	78.59	78.67	86.56	101.43	122.42

本人用 CC 里面的最优化求解，结果显而易见，散热器翅片中心翅片为 0 的时候，温度最低。

本人又想，会不会是中心粘滞效应的改善导致两侧粘滞效应的加强呢？于是把翅片数改为了 10 重新进行 CC 求解，结果还是中心间距为 0 的时候，温度最低。

所以，看来，翅片数（肋片数）为 11，中心间距为 0 的时候，粘滞效应和表面积效应达到最佳状态。

此时风速的最优化还可以通过观察风扇工作点来证明。如下图 10 所示，风扇工作在较好的工作状态，即压力和风量达到一个平衡。

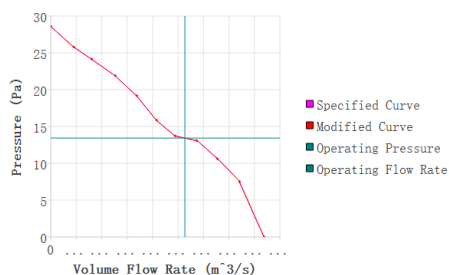


图 10 风扇工作状态示意曲线

3.4 交互效应优化

本人在观察粒子流图的时候，惊奇地发现，散热器

内部出现了一些问题。

散热器内部粒子流图如下图 11 所示。

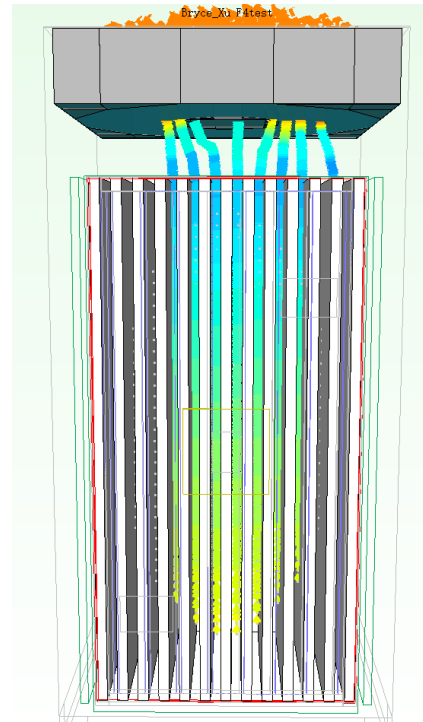


图 11 散热器内部粒子流图像

问题有两个：

第一，左侧的几个翅片中粒子流非常微弱。

第二，中间的几个翅片阻挡了粒子流。

于是，本人开始尝试解决这两个问题。

针对第一个问题，本人想，既然左侧的几个翅片中粒子流如此微弱，那么，说明其风冷效应比较微弱。换句话说，强迫风冷方法在左侧的几个翅片中效率很低。

所以，首先，本人用铝片填充了左侧的三个翅片间的距离，发现效果很差。其实，虽然强迫风冷方法在它们上的效率很低，但它的效率还是比直接填满铝片的效率高。

然后，本人因为当时不知道强迫风冷比自然冷却效果好很多，所以尝试在散热器上装上几个外部翅片，果然也失败了，曲线如下图 12 所示，三段分别对应外翅片数量为 2-1-0 的热源温度图。

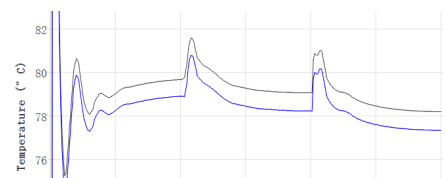


图 12 外部翅片的改变对于温度影响图

想不出什么有效方法，于是本人开始考虑第二个问题。中间的几个翅片阻挡了粒子流，那么，势必对于风粒子的穿梭造成了一定影响。所以，何干脆将翅片的厚度变小？

本人突然想到，翅片的厚度变小，不是给在左侧的

三个翅片间填充一定厚度的热管创造了空间吗？

所以，本人做出了如下图 13 的优化。

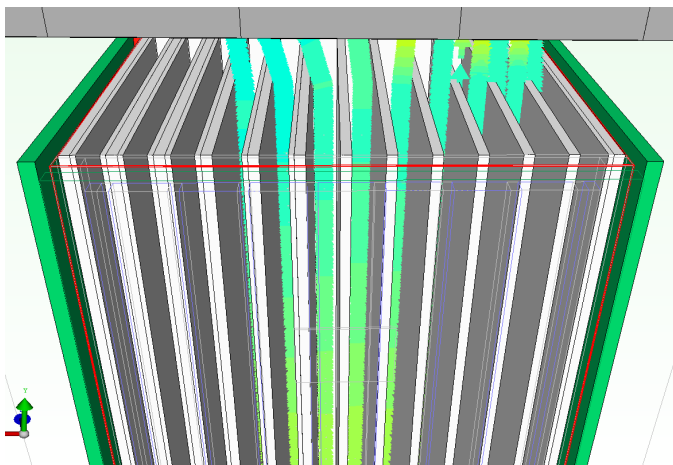


图 13 针对图 11 问题所做出的优化效果图

本人首先将翅片的厚度从 4 毫米改为 2 毫米，翅片数量保持 11 个不变。

在此基础上，本人观察图 11，在粒子流稀疏的地方，加上 2 毫米厚的铝片层。

效果如图 13 所示，实际上就是将翅片改成不同厚度，粒子流密集的地方薄，粒子流稀疏的地方厚。所以，粒子流通过散热器时，受到来自翅片的阻力减小。

虽然此处优化使温度下降了 2°C 左右，但本人认为此优化不具有实际意义。此处优化的出发点便是本人观察散热器内部粒子流图像所引发的问题，问题不具有普遍性；其次，散热器翅片做成不同厚度成本高昂，所以实际价值需要考量。

需要说明的是，本人后来阅读有关散热器的文献^[3]才发现，散热器内部翅片的厚度对于热源温度的影响是十分低的，所以本次优化翅片厚度改变的影响几乎可以看做忽略不计。

另外，我之前在原理部分提到，散热器翅片与风粒子的交互效应是影响散热器散热效果排名第二的影响因素。而此处的优化，后来发现，正是基于这个交互效应，即让粒子流与翅片充分接触，翅片对于粒子流的阻碍同时也达到最低。

3.5 材料优化

在原理部分提到，如今散热器材料使用最多的是以 Aluminum alloys 606x 系列为代表的铝合金。这种材料相对于铜合金最大的优势便是轻便，同时导热率还可以。

然而，还是有更好的材料。

目前，最有前景的散热器材料之一便是 Applied Nanotech 公司研发的一款 CarbAl 材料。正如其名，这款材料的组成是：20% 的铝和 80% 的两款具有很好导热性的碳源材料。它的导热率为 $425 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，比纯铝和纯铜的导热率都高，难能可贵的是，它的密度和铝相似。

按照铝的密度， $425 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 的导热率，我在实验

中创建了此种材料，应用于散热器上。果然，散热效果明显，下降了 3°C 左右。但考虑到此种材料尚未普及，本人并未把材料的优化添入优化的流程当中。

4. 设计结果

4.1 噪声的最终优化

4.1.1 风扇噪声的产生

风量和风压是风扇的两个最重要的性能参数。

风压越大，风的力量越大，更加容易把内部结构的细微部件吹透；风量越大，同一时间通过风扇的气流量越大。

风扇在追求高风量和高压时，扇叶高速旋转，与空气的摩擦振动系数大，气流不能准确地流向所需的方向，导致空气乱流产生振动，造成噪音。

当前的强迫风冷以轴流风扇为主，在低风压区可得到大风量，且在该处风扇噪音最小。所以，应尽量使风扇的工作点在低风压区域。

4.1.2 实验设计噪声的优化

本实验设计最低噪声的优化，主要是在之前散热优化模型的基础上，改变风扇的降额因子，寻找使得热源温度低于 95°C 的前提下最低的风扇噪声。

本人先通过 CC 求解出温度关于噪声的大致关系曲线图（突出了温度高的 CPU 温度），如下图 14 所示。

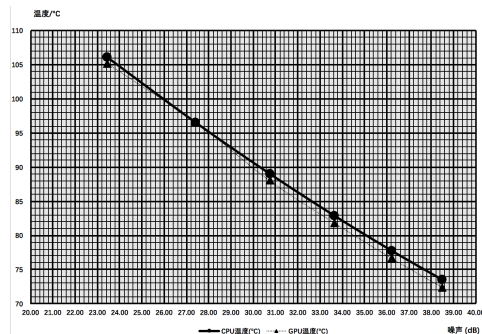


图 14 温度关于风扇噪声的关系曲线图

最终，本人得到，当风扇的降额因子为 0.64 时，风扇能够取得最低噪声 28.81 dB ，此时热源的温度为 94.8°C ，符合要求。

此时，风扇的工作点处于低风压下的合适工作点，如下图 15 所示。

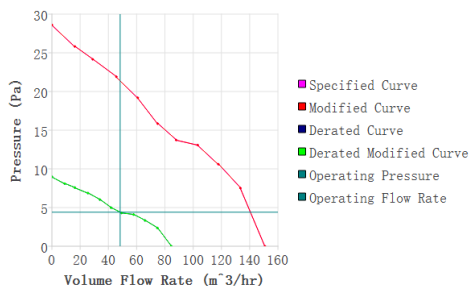


图 15 风扇工作状态示意曲线

研究发现^[4]，按照噪音的大小，可以把噪音划分为

多个区间段。40 分贝以下是比较安静的正常环境，超过 50 分贝影响睡眠和休息；70 分贝以上就会造成心烦意乱，精神不集中。可以说，本次实验设计的小型化高性能个人电脑主机达到实际的使用噪声标准。

4.2 结果的最终呈现

4.2.1 立体结构前后对照图

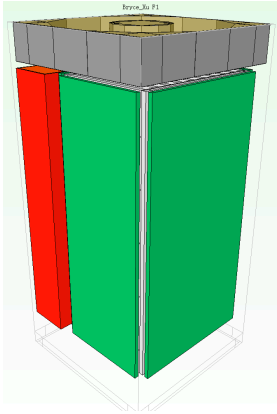


图 16 初始侧视图

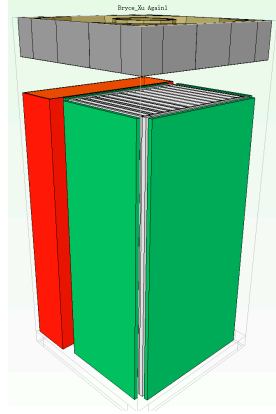


图 17 结果侧视图

由上面侧视对照图，在结构位置方面，除了调整电源，散热器等中间部件距离底部的距离，其他没有改变。

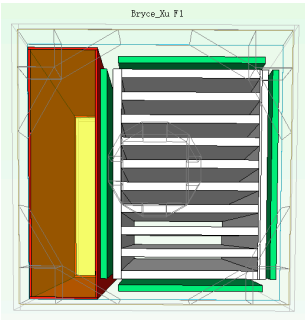


图 18 初始俯视图

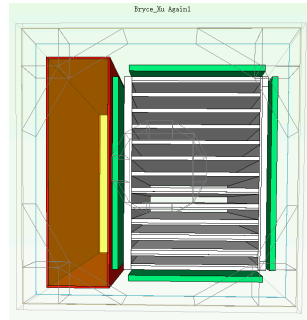


图 19 结果俯视图

由上面俯视对照图，优化 3.3 和 3.5 修改了散热器的翅片数量和部分间距，但是，某些位置约束并未改变，4 块 PCB 板都距离散热器 3 毫米，电源的通风率保持 30%。

4.2.2 配件参数前后对照表

表 7. 原始配件参数

	尺寸(mm)	材料	发热功率(W)
机箱	125*125*250	Aluminum-6061	\
电源	33*120*200	Iron (Pure)	30
CPU	10*15*0.5	Silicon	95
GPU	20*28*0.5	Silicon	300
PCB	200*340*3	FR4	20
风扇NFB1212H	120*120*25	Fan Material	\
散热器	100*70*200	Aluminum-6061	\

表 8. 结果配件参数

	尺寸(mm)	材料	发热功率(W)
机箱	125*125*250	Aluminum-6061	\
电源	33*120*200	Iron (Pure)	0
CPU	10*15*0.5	Silicon	95
GPU1	20*14*0.5	Silicon	150
GPU2	20*14*0.5	Silicon	150
PCB1	200*100*3	FR4	6
PCB2	200*100*3	FR4	6
PCB3	200*70*3	FR4	4
PCB4	200*70*3	FR4	4
风扇NFB1212H	120*120*25	Fan Material	\
散热器	100*70*200	Aluminum-6061	\

参照上面配件参数对照表，在尺寸方面，优化过程中，本人将 GPU 拆成大小相同的 2 块，总功率不变。在进行组装时，为了满足要求，本人将 PCB 拆成了大小相同的 4 块，总功率不变。其余各主要部件尺寸参数未变。在功率方面，因为电源的 30 瓦功率比较难加，且对于热源温度影响不大，所以在优化时，电源功率为 0。

4.2.2 热源温度图

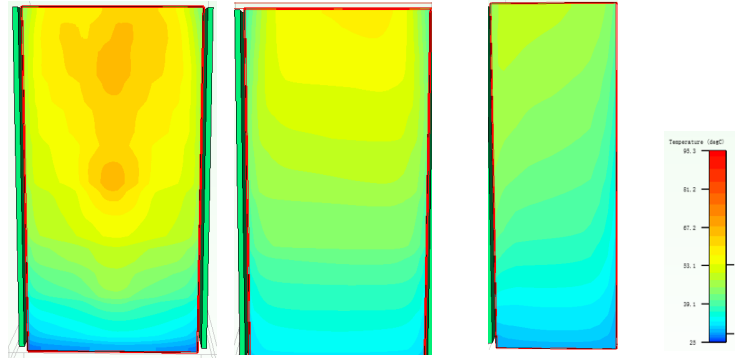


图 20 PCB 表面温度分布图(靠热源 PCB-靠电源 PCB-侧面 PCB)

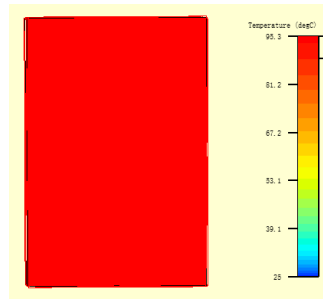


图 21 CPU 表面温度分布图

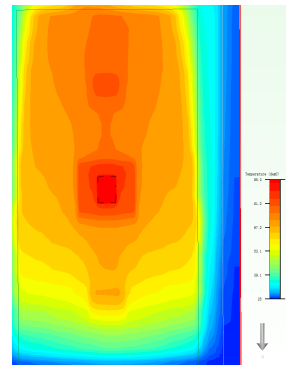


图 22 CPU 切面温度分布图

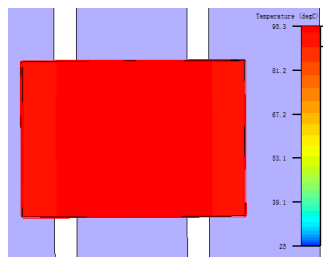


图 23 GPU 表面温度分布图

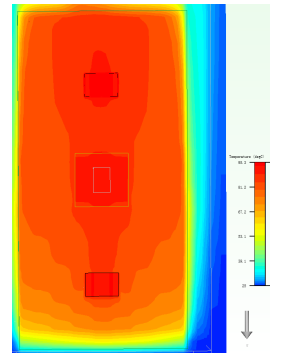


图 24 GPU 切面温度分布图

4.3.3 粒子流图

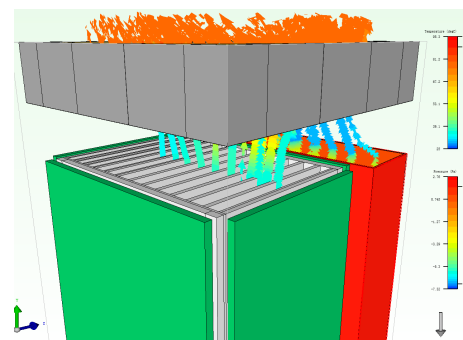


图 25 粒子流图像

4.3 网格可行性验证

本实验设计中，部件的网格设置都按照要求，网格的总体情况如下表 7 所示。

表 9 网格设置示意图

总体网格个数	116770		
系统网格设置	Medium		
关键部位网格	长	宽	厚
CPU	max2mm	max2mm	2div
GPU	max2mm	max2mm	2div
PCB	max10mm	max10mm	2div
其余部位网格	全部局域化		

系统网格如果设置成 Fine 的话，总共会有 764781 个网格，这对于计算而言时间耗费太长。所以，本实验的所有结果都是基于总体网格个数为 116770 的基础上得到的。

为了验证结果的准确性，本人在实验结束后在总体网格为 764781 的基础上重新跑了一遍数据，结果如下图 26 和 27 所示。

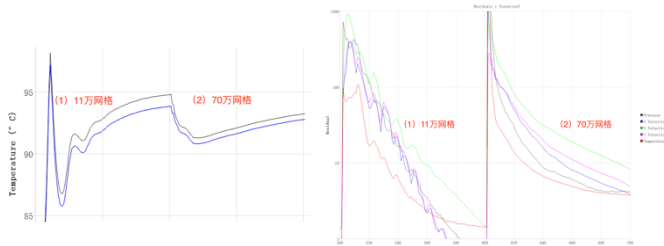


图 26 不同网格热源温度对比图 图 27 不同网格热源残差曲线

从图中可以看出，误差属于可接受范围之内。

5. 总结与讨论

5.1 实验总结

本人通过长时间反复探索，算是比较成功地对小型化高性能个人电脑主机进行了热性能优化，在满足元器件工作温度的条件下，使得风扇噪声降到了满意的额度。可以说，此设计模型，具有一定可靠性与使用性。

但是，此实验设计毕竟是在高度理想化的条件下进行，其实际性，需要打上大大的问号。首先，在结构设计时，过于理想化，比方说将其余所有电子器件都集成在了 PBC 板上。其次，在优化上，也过于理想化，比方说对于 GPU 的拆分和位置调整过于随意，交互效应优化

太过天马行空。所以，如果以后要专注于研究此方向的内容，必须将结构模型按照实际模型高度还原，在优化上，要加入技术和成本的双重考虑。

5.2 个人体会

本次工程实践创新课程，对于我来说，真是一次充满挑战性却又很刺激的漫长旅程。

既有实质上的收获。首先，借此机会，我了解了有关传热学的知识；其次，虽然我可能今后不会再有机会使用 Flotherm 软件，但是这次软件学习的经历让我懂得了如何去学习一款新软件；最后，之前，我一直认为对称是物理设计中至高的准则，但是实际设计中发现，有时候不对称比对称做得更好，事实上，对称只存在于绝对理想化的情况下。

又有精神上的收获。首先，一次次经过努力，得到温度下降的成功带给我的激动和喜悦至今记忆犹新；其次，几次和同学之间的讨论让我印象深刻，优化中的几个思想一定程度上是我们讨论时激发的灵感；最后，我还认识到了规划的重要性，时间的规划，论文的规划，等等，都对于我今后的科研有着重要的作用。

但是，我还是暴露出了一些不足需要改进。比方说，好几次试验忘记起名字另外保存，导致下一次做的时候不知道上一次做了什么调整，做事情还不够细致。

5.3 一些建议

整个课程的设计，从教学到实践，我觉得还是让我们学生有很大收获的。霍老师作为引路人，一步一步带领着我们向未知探索着前行。我们很感激和崇敬霍老师这位喜欢折腾的学长。

但最后，我想提一点小小的建议。在课程前半部分的演示讲解中，我觉得效果不怎么好。首先，投影演示对于后排的同学不是很友好，有些小地方看得不是太清楚；其次，如果有一些环节落下了，后面就很难跟上了。我觉得，讲义上的步骤已经很详细了，所以，我们可以按照讲义上的步骤一步一步自己操作完成前面的数字实验。霍老师您在课上不需面面俱到，可以只讲一下关键的思路流程，后面的具体细节可以留给我们自己完成，有些不懂的再提出共同解答。这样子效率会高一点。

最后，再次感谢霍老师在这学期的辛勤付出！

[1] 何伟. 电子设备散热特性分析与仿真方法研究. 电子科技大学. 5. 1, 2011.

[2] 余莉, 韩玉, 曹业玲, 蒋彦龙. 电子设备散热用平板式热管的实验研究. 南京航空航天大学学报. 2008, 40(5):607-631.

[3] 李玉宝, 王建萍, 吕召会. 矩形肋片散热器几何参数对散热的影响分析. 电子机械工程. 2012, 28(2).

[4] 席芳. 降低风扇噪音的改进结构探讨. 中国高新技术企业

业. 2016, 18.

[5] 杨世铭, 陶文铨. 传热学. 高等教育出版社. 2006. 1-608.

[6] GJBZ27-92. 电子设备可靠性热设计手册. 1992. 1-296.