

## 电子线路板热可靠性分析方法的研究

孙 简<sup>①②</sup> 丁耀根<sup>①</sup> 陈仲林<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘 要:** 该文研究用 ANSYS 软件对电子线路板做热可靠性分析时的建模问题, 通过仿真分析, 得到如下两点推论: (1)铜箔分布的不均匀性对 PCB 传热有重要的引导作用, 因此在建模时应尽量予以考虑; (2)内部到外部热阻小的发热元件可以当作简单方块来处理, 这样就使整板的建模大大简化。根据以上推论对一种新型星载电子线路板进行了 ANSYS 建模和计算, 并把计算的结果与实验测试数据进行比较分析, 验证了这种简化建模方法具有足够的准确性, 使用方便, 可以应用于星载及真空等环境中各种电子线路板的热可靠性分析研究。

**关键词:** PCB 电子线路板; 热分析; ANSYS 建模

中图分类号: TN41

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-1013-04

## Research on the Thermal Analysis of PCB Circuit

Sun Jian<sup>①②</sup> Ding Yao-gen<sup>①</sup> Chen Zhong-lin<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In this article, the ANSYS modeling problem of PCB thermal reliability analysis is studied. By ANSYS analysis, two conclusions can be drawn: (1) Copper lead on PCB has significant thermal transmission effect, so it should not be omitted in modeling. (2) Component with little inner to exterior thermal resistance can be modeling as a simple block. Based on these conclusions, the ANSYS modeling of a satelliteborne PCB equipment is largely simplified. Compared the ANSYS calculation results with experiment datas, it is proved that the simplified modeling method achieves adequate precision and is very convenience to use. This technique can be adopted in the thermal reliability analysis of PCB equipments, especially for satelliteborne or vacuum environments.

**Key words:** PCB circuit; Thermal analysis; ANSYS modeling

### 1 引言

现代电子设备中广泛使用了 PCB 电子线路板。随着电子技术的发展, 电路板上的布线密度越来越高, 使得设备的体积功率密度大大增加, 散热问题日益突出。根据故障率统计, 高温是大多数电子元器件最严重的危害, 它会直接导致元器件的失效, 进而引起整个线路板的失效<sup>[1]</sup>。因此, 在设计、制造电子线路板时, 必须进行热可靠性方面的分析和计算。

有限元分析软件 ANSYS<sup>[2]</sup>在传热学分析方面具有强大的功能, 非常适合分析各种热可靠性问题。将 ANSYS 软件应用于 PCB 热可靠性分析的主要难点就是如何对电子线路板进行合理的 ANSYS 建模, 在保证分析精度的同时满足计算机的内存容量限制。

本文的工作, 来源于对某型星载行波管用 PCB 线路板<sup>[3]</sup>所做热可靠性分析工作。该设备为单块的 PCB 电路板,

工作在封闭的高温真空容器(卫星)内。热分析的目的, 就是计算该电子设备中各元器件的温度, 确认其在规定的工作条件下是否超过最高允许工作温度。由于该电子线路板的导线和元器件布置非常复杂, 难以进行非常精确的建模。所以, 必须对板上的各种元器件进行必要的简化, 从而建立恰当的 ANSYS 计算模型。

### 2 电子线路板简化建模方法

该电子线路板的主要发热器件为 9 个 MOS 管和 6 块集成电路块, 这些元器件在工作时将大部分损耗功率转化为热量。因此, 建模时主要需要考虑这些器件<sup>[4]</sup>。此外, 还要考虑布置在 PCB 基板上, 作为导线涂敷的铜箔<sup>[5]</sup>。它们在设计中不但起到导电的作用, 还起到传导热量的作用, 其热导率和传热面积都比较大。

#### 2.1 PCB 基板的建模

印刷电路板<sup>[6]</sup>(PCB)是电子电路不可缺少的组成部分, 它既提供元器件之间的电气连接, 又是元器件的支撑板。PCB 板的结构由环氧树脂基板和作为导线涂敷的铜箔组成。

环氧树脂基板的厚度为 4mm, 铜箔的厚度为 0.1mm。铜的导热率为  $400\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ , 而环氧树脂的导热率仅为  $0.276\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ 。

为了验证铜箔对 PCB 板传热的影响, 用 ANSYS 进行了模拟实验, 见图 1。在图 1 中, PCB 的环氧树脂基板上放置了两个温度恒定的铜块, 左边的铜块温度设置为  $80^{\circ}\text{C}$ , 而右边的铜块温度设置为  $20^{\circ}\text{C}$ , PCB 板的底部设置  $20^{\circ}\text{C}$  的恒温作为传导边界。图 1(a) 的铜块之间没有加铜箔, 而图 1(b) 在两个铜块间加了厚度仅有 0.1mm 的细铜箔。由图 1 可以看出, 尽管所加的铜箔很薄很细, 却对热量有强烈的引导作用, 因而在建模中是不能忽略的。

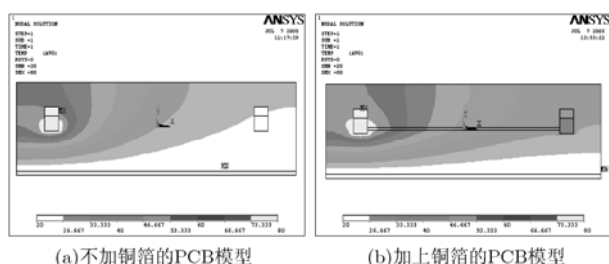


图 1

一般情况下, PCB 板上的铜箔分布是非常复杂的, 难以准确建模。因此, 建模时需要简化布线的形状, 尽量做出与实际 PCB 板接近的 ANSYS 模型, 见图 2。

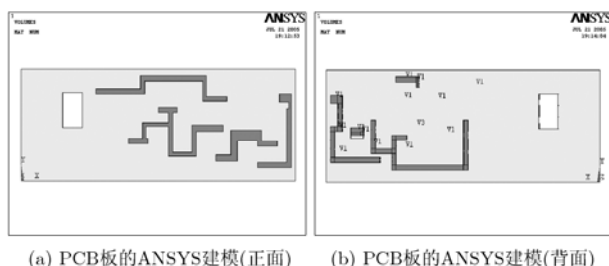


图 2

## 2.2 MOS 管器件的建模与分析

MOS 管由铜外壳、小硅片和二者之间起绝缘作用的氧化铍陶瓷组成, 热导率分别为  $400\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ 、 $3.2\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$  和  $80\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ <sup>[7]</sup>。小硅片在 MOS 管的内部, 是主要的发热部分, 测得的损耗功率为 0.4W。首先, 根据 MOS 管的结构图, 对安放在基板上的单个 MOS 管建立了详细的 ANSYS 模型。然后, 对小硅片加载 0.4W 的生热率载荷, 并在室温  $32^{\circ}\text{C}$ , 自然空气对流和自由辐射状态下, 计算 MOS 管的热分布状态, 见图 3。

由图 3 可见, MOS 管在常温下工作的最高温度为  $74.5^{\circ}\text{C}$ 。而且, 尽管 MOS 管是有复杂结构的空心体, 但是内部和外表面的温度只有几度的差异。根据热传导分析, 由

于该 MOS 元件的体积很小, 且主要的传热材料(铜和氧化铍)的传热性能都很好, 所以器件内部到表面的热阻低, 温差很小。因此, 在实际建模中可以把 MOS 管设置为简单的实心体, 只要与实际物体有相同的生热率、辐射和对流散热面积, 就可以得到与详细模型相同的模拟结果。

为了验证前面的设想, 本文进行了如图 4 所示的模拟实验: 在一块 PCB 板上设置了两块 MOS 管模型, 左边是按实际结构建立的复杂空心模型, 右边则是同样外形的简单实心结构。在两个 MOS 块上施加同样的 0.4W 发热功率, 通过热分布图来直观地比较两种不同建模方法的效果。模拟结果表明, 不论是在常温下( $32^{\circ}\text{C}$ ), 还是高温工作环境下( $60^{\circ}\text{C}$ ), 这两种模型所得到的效果是基本相同的。

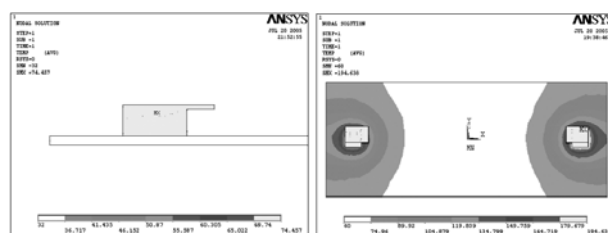


图 3 MOS 管的室温工作状态

图 4 MOS 管精确模型与简化模型的对比

## 2.3 集成电路块的建模

首先根据集成电路块的实际结构对其进行精确建模, 如图 5 所示。在图 5 中, 很小的发热硅体包裹在氧化铝陶瓷外壳中, 陶瓷导热系数为 21。整个元件通过引脚与底板连接, 引脚厚度为 0.1mm。为了简化建模, 根据相同热导率的原则, 对分立的引脚做了合并。图 5 的温度场模拟结果是在室温下, 有对流和辐射的情况下得到的。

由图 5 可见, 尽管对集成电路块的结构进行了精确的建模, 但是该器件的内部和表面之间温度差别很小。因此, 采用与前面 MOS 管相同的分析方法, 可以证明集成电路块的建模也可以用简单的方块来代替。

至此, 在前面的分析已经证明, 该 PCB 电路板上的两种主要发热元件(MOS 管和集成电路块)都可以用非常简单的方式来进行简化建模。

## 3 实验验证

前面对电子线路板中与热分析有关的 3 种主要部件进行了简化建模处理, 下面将这些简化模型组合起来, 建立了 PCB 线路板的整体 ANSYS 模型, 见图 6。

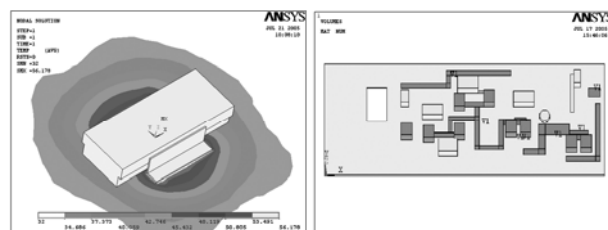


图 5 单个集成电路块的热分布图 图 6 PCB 线路板的整体建模

对图 6 所示的模型进行加载, 就可以进行分析计算。首先进行室温下的模拟: 以各电子元器件的损耗功率作为热分析的生热率载荷, PCB 线路板表面施加 32℃ 的空气自然对流, 作为辐射边界的环境温度为室温(32℃)。计算得到的热场分布如图 7 所示。

在本文的实际工作中, 使用红外热像仪对该电子线路板在常温空气环境下的工作温度进行了测量<sup>[8]</sup>, 如图 8 所示。表 1 是一些测试点上温度的计算值与实际测量值的对比。

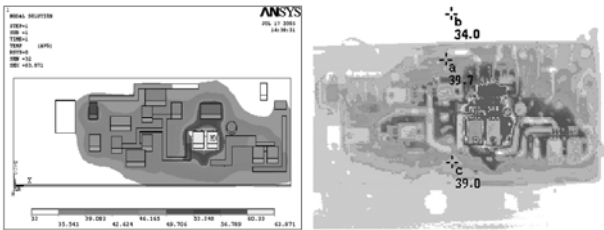


图 7 PCB 常温热分布计算图 图 8 红外热像仪测量的热分布图

表 1 温度计算值与测量值的对比

参数名称	ANSYS 计算值(℃)	实际测量值(℃)
元件最高温度(MOS管)	63.871	63.0
PCB板最高温度	55.018	51.4
板边缘温度 1(图 8: a 点)	37.312	39.7
板边缘温度 2(图 8: c 点)	40.803	39.0
环境温度(图 8: b 点)	32.0(温度计)	34.0(热像仪)

由于在建模工作中做了大量的简化工作, 所以这里给出的计算值在误差上是可以接受的。根据表 1 的数据可以认为, 用 ANSYS 软件计算出的温度分布与实测值符合得很好, 从而证明了这里的简化建模方法的可行的。

前面的实验是在室温空气环境下进行的。而在实际工作中, 该 PCB 电路板是工作在星载条件下的, 无法用实验的方法测试其温度场分布。因此, 下面就可以根据前面得到的简化建模方法, 用软件模拟该电子线路板在星载高温真空环境下的温度场分布, 如图 9 所示。

在图 9 中, 在 PCB 线路板的顶端安装了散热片, 而 PCB 基板与散热片的底部与 60℃ 的冷却空调连接。因此, 在 ANSYS 计算中, 基板和散热片的底部设置了 60℃ 的传热(冷却)边界条件。而辐射边界条件为设计给出的最高环境温度(60℃)。所有的元件都按照说明书给出的损耗功率(最高为 0.4W)作为生热率载荷。

图 9 中给出的计算结果表明, 在冷却空调正常工作的条件下, 板上器件的最高温度只比空调温度略高几度, 远远低

于设计要求的最高安全工作温度(80℃)。相反, 如果模拟冷却空调失效的状态, 在模型中不加入 60℃ 的冷却边界条件, 而是仅仅依靠辐射方式来散热。那么, 根据 ANSYS 的计算, MOS 管上的最高温度将超过 150℃ 的最大允许值, 会被烧毁, 见图 10。

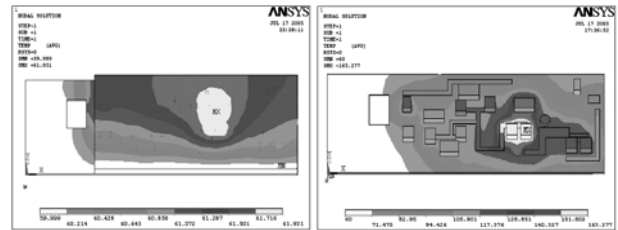


图 9 PCB 正常工作状态的温度分布 图 10 不加空调时的温度分布

#### 4 结束语

根据前面的分析, 在对 PCB 电子线路板做热可靠性分析时, 在建模方面可以做出很大的简化。而简化的前提条件是: 对于所要简化的发热器件, 从内部的发热部分到外部表面的热阻应当非常小。只有这样, 才能把具有复杂内部结构的电子元件当作简单方块来建模处理。

采用简化建模方法对 PCB 电路板进行 ANSYS 热分析, 能大大减少计算机对内存的需求, 而且计算时间也显著缩短。实验表明, 该方法具有足够的准确性, 而且使用非常方便, 能够很好地完成对复杂电子线路板进行热可靠分析的工作。

#### 参考文献

- [1] 机械电子工业部电子标准化研究所等. GJB/Z27-92 电子设备可靠性热设计手册[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会批准, 1992: 3-6.  
Institute of Electronics Standardization(MMBEI), et al. GJB/Z27-92 Thermal design handbook for reliability of electronics equipment[S]. Beijing: Commission of Science Technology and Industry for National Defense, 1992: 3-6.
- [2] ANSYS Company. ANSYS Release 10.0 Help. 2005.
- [3] 刘红民, 张锐, 阴和俊. 星载EPC的可靠性分析[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(7): 1168-1172.  
Liu Hong-min, Zhang Rui, and Yin He-jun. Reliability analysis of spaceborne EPC[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(7): 1168-1172.
- [4] 黄艳飞, 张荣标, 凌万水等. 基于有限元的 PCB 板上关键元件热可靠性分析[J]. 微计算机信息, 2005, 21(11-2): 164-165.  
Huang Yan-fei, Zhang Rong-biao, and Ling Wan-shui, et al. The analysis of heat reliability of the key component on PCB board [J]. *Microcomputer Information*, 2005, 21(11-2): 164-165.
- [5] 付桂翠, 高泽溪, 方志强等. 电子设备热分析技术研究[J]. 电

- 子机械工程, 2004, 20(1): 13-16.
- Fu Gui-cui, Gao Ze-xi, and Fang Zhi-qiang, *et al.* A study on thermal analysis of electronic system [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2004, 20(1): 13-16.
- [6] 李方明. 电子设计自动化技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 405-406.
- Li Fang-ming. Technology and Application of Electronics Design and Automatization [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 405-406.
- [7] 马之庚, 任陵柏. 现代工程材料手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 22-27.
- Ma Zhi-geng and Ren Ling-bai. Modern Engineering Material Handbook[M]. Beijing, National Defense Industry Press, 2005: 22-27.
- [8] 李振民, 张锐, 阴和俊. 一种基于红外热成像技术的星载 EPC 可靠性状态检测方案研究[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(3): 410-415.
- Li Zhen-min, Zhang Rui, and Yin He-jun. A new reliability detection method of spaceborne EPC based on infrared thermal imaging technique [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(3): 410-415.
- 孙 简: 男, 1973 年生, 博士生, 研究方向为大功率微波器件.
- 丁耀根: 男, 1942 年生, 研究员, 研究方向为大功率微波器件.
- 陈仲林: 男, 1974 年生, 助理研究员, 研究方向为星载行放高压电源.