

# PI分析中电流密度与PCB板升温关系研究\*

王学<sup>1</sup> 叶建芳<sup>2</sup>

(1. 上海贝尔 上海 201206; 2. 东华大学信息学院 上海 201620)

**摘要:** 印刷电路板(PCB)由于电流密度过高导致电路设计出现问题是电源完整性(PI)工程师关注的重要问题。随着集成化程度的不断提高,PCB中的电流密度也随之增加,而作为大电流比较集中的电源模块,更容易发生高电流密度导致的电路板过热,并由此对电路性能产生不良影响的问题。准确描述复杂电路 PCB 板温度上升与电流密度之间的关系是PI工程师必须妥善解决的重要问题。本文首先探讨如何根据 PCB 板上的电流密度准确测量及评估由电流导致的温升,以此来指导 PCB 设计并发现可能存在的电流密度过大产生热的问题。

**关键词:** PCB 温升;PI;电流密度

**中图分类号:** TN702 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

## Relationship research of current density and temperature rise on PCB

Wang Xue<sup>1</sup> Ye Jianfang<sup>2</sup>

(1. Shang Hai Bell, Shanghai 201206, China;

2. School of Information Science and Technology, Dong Hua University, Shanghai 201620,China)

**Abstract:** Thermal problems due to the high current density of printed circuit boards (PCB) is one of the important problems that PI (power integrity) engineers focus on. With the rapid development of integration, the current density of PCB is sharp increases also, especially the power module with a large current is easy to happen overheating as the circuit board with high current density, and thus have a negative impact to the circuit performance. An accurate description of the relationship between the temperature rise and the current density of the complex PCB is an important problem that the PI engineer must properly solve. In this paper, we will firstly discuss how to accurately measure and evaluate the temperature rise caused by the current density on PCB, and then use it to guide the PCB design and find the current density and thermal problems existed in the PCB.

**Keywords:** PCB temperature rise; PI; current density

## 0 引言

在电路 PCB 板设计中,通过电源模块给板上芯片供电。电路板设计密度越来越高,致使大电流通道设计的难度大大增加,并且 IC 芯片电源种类越来越多<sup>[1]</sup>,印刷电路板中经常会碰到电流大而通道小的瓶颈;加上由于过孔或者器件正好落在电源通道上,将会导致电源通道实际通流能力大大降低,电流密度急剧升高。而电流密度过高会带来如下几个问题:

1) 电流密度过高会因为导体的电阻效应以热的方式消耗功率,导致电源压降过大的同时,温度过高会导致 PCB 板性能下降甚至影响到芯片的正常工作。

2) 电流密度过高,材料与材料之间的互连部分也会发生电迁移(electro-migration)的现象<sup>[2-3]</sup>。

3) 过高的电流密度产生的强磁场会使得电磁辐射 EMC 出现严重问题,诱发电源噪声过大导致系统不稳定<sup>[4]</sup>。

在电子设计系统中并没有固定的指标来衡量电流密度多大时会对系统产生不良影响。本文希望通过分析电流密度与温度之间的关系,为判断 PCB 设计中电流密度是否过大提供指导依据。

## 1 电流密度 J 与 PCB 温升的关联

器件安装在 PCB 板的顶部或底部,板内电流通过功率消耗的方式产生热,热再通过传导和辐射传递到器件。这将影响到印刷电路板本身,也影响芯片的工作温度。一般印制板的耐温是 130 °C,而大部分工业级芯片的最高结温是 110 °C。室外应用允许的最高环境温度通常是 70 °C。

收稿日期:2017-03

\* 基金项目:华东大学非线性科学研究所基金项目(231080001)资助

这意味着,PCB 板本身的加热(包括走线和器件的热功耗)导致升温的范围只有 40~60 °C。简单使用电流大小很难评估电源通道的风险,如能找到温度上升与铜箔电流密度之间的关系,就可根据系统允许温升来判断电流密度是否满足温升容限要求。

PCB 中电源导线的模型如图 1 所示,由绝缘基材和电源导体组成。PCB 基材通常使用名为玻璃纤维环氧树脂的绝缘材料,电源导体使用 0.5~3 oZ 的铜箔(1oZ 铜箔约 1.4 mil 厚),通过压合及腐蚀处理形成电源导线。为了简化计算,定义导线截面为标准矩形,截面积为导线宽度与厚度的乘积(Width x Thickness),单位为 Mil<sup>2</sup>。

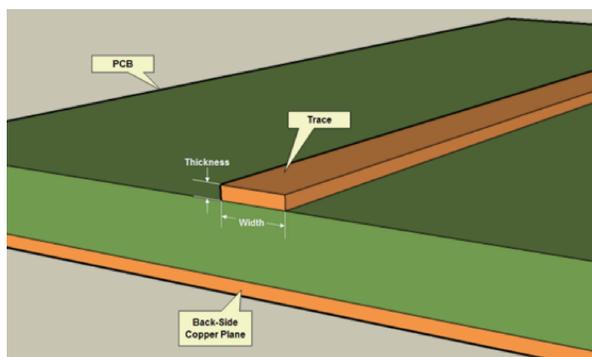


图 1 PCB 板中电源导线模型

根据 IPC 标准,可得到两种计算方式关联电流密度与温度的关系,论文将通过实际探测到的温度与理论值进行对比,来验证理论计算的准确性。

1) IPC-D-275 标准的 6.2 中描述了 PCB 电路板中走线截面积与载流能力及温升的关系<sup>[5]</sup>,IPC 标准提供的具体计算公式:

$$A = (I / (k \times \Delta T^{0.44}))^{1/0.725}$$

$$\Delta T = (I / (k \times A^{0.725}))^{1/0.44}$$

式中: $k$  为修正系数,一般导线在内层时取 0.024,在外层时取 0.048; $A$  为导线面积,单位为 mil<sup>2</sup>; $\Delta T$  为最大温升,单位为 °C。

由式可知,温升与电流大小以及导线截面积相关,将其进一步简化为:

$$\Delta T = (\rho \cdot A^{0.275} / k)^{1/0.44} \quad (1)$$

式中: $\rho$  为电流密度,单位为 A/mil<sup>2</sup>。

目前许多在线 PCB 走线通流能力计算工具及计算软件都运用此式进行计算。

2) 根据 IPC-2152 标准估计电流密度与温度上升的关系,参考该标准的章节 5.2 可知温升是一个离散值<sup>[4]</sup>,但在固定温升曲线中,对数坐标中电流大小与导体截面积是线性的,70 mil 板厚,3 oZ 铜导体截面积  $A$  与电流  $I$  的关系图如图 2 所示。对数坐标中的线性意味着可用一个多项式来描述电流与截面积关系,表示为  $A = K1 \times (I)^{K2}$ 。为了适

应工程需要,提取了一个简化的近似估算公式<sup>[6]</sup>:

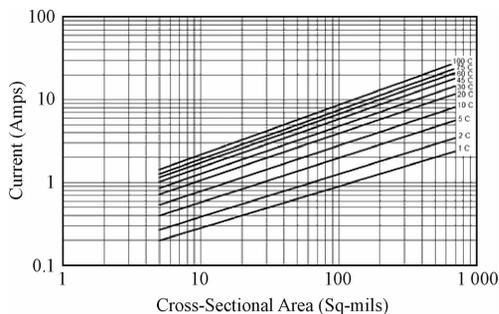


图 2 IPC-2152 3oZ 铜导体 A/I 关系

$$A = (117.55 \times \Delta T^{-0.913} + 1.15) \times i^{0.84 \Delta T + 1.159} \quad (2)$$

该式是一个关联了温度、电流与导线截面积的拟合公式,为求解温升与电流密度关系提供了简便且非常实用的计算方法,在工程上得到广泛应用。在此式的基础上,考虑 PCB 板厚、板材等因素的影响而引入修正因子,可进一步提高温升估算的准确度<sup>[7-8]</sup>。“Saturn PCB Design Toolkit”是以式(2)为基础,综合考虑各种因素影响条件下开发的一款辅助计算工具,工具的初始界面如图 3 所示。在界面中除了需要输入导体截面积  $A$ 、电流  $I$  之外,还需输入以下参数:①板厚;②导线到相邻参考铜平面距离;③铜箔厚度最后计算得到温升  $\Delta T$ 。

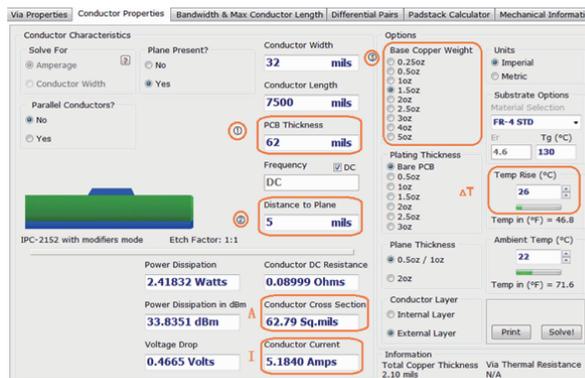


图 3 Saturn 工具界面

## 2 测试方案及结果分析

### 2.1 测试方案

论文设计了两种不同的测试方案,通过现场测量获取导体在不同电流密度下导致的温升,并将实测温度与论文 2 中介绍的两种计算方式得到的温度数据进行分析对比,以此判断其准确度,为 PI 工程师电源设计提供指导。

测量方案 1 使用热像仪对 PCB 板热点温度直接扫描,该方案简单方便,但该测量方法不适合测量太靠近板边的走线温度,因为边缘效应会带来较大的误差<sup>[9-10]</sup>。测量方案 2 用热电偶来测量温度,需要在 PCB 中预先植入热电偶,这样测量得到的温度最接近被测实体,但会增加设计成

本。由于显示的温度是热电偶的温度,热电偶是根据自身两端产生一个与温度相关的电势差,当电流较大时,热电偶会移除部分热量导致读数偏低<sup>[11]</sup>。

为了准确获取温升  $\Delta T$ ,减少诸如板内缺口、螺丝孔等非相关因素可能导致的测量误差,论文专门设计了一块测试电路板,如图 4 所示。测试板使用最常用的 FR4 材料,板厚为 80 mil。在板上两侧分别安装了电源连接器 X1、X2 及电源夹具以方便准确连接可调电流源;为了减少电流波动的影响,专门设计一款高稳定性恒流源提供参考电流<sup>[12]</sup>;板内外层设计了多种宽度均匀的走线以获得均匀电流密度,并在导线的中间位置植入热电偶用于获得导线温度,用来评估内外层导线在不同电流密度下所带来的温升差别;同时,在走线通道上禁止放置有源器件,避免其它热源引入导致温度测量出现偏差。

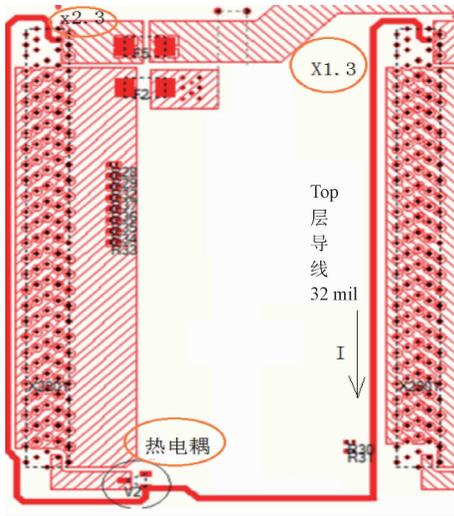


图 4 测试板示意图

首先,对板外层电源导线进行分析。测试板上 Top 层设计一条宽为 32 mil 的电源导线,从连接器 X1 的 3 脚输入电流,到连接器 X2 的 3 脚输出,导线中间位置 V2 为热电偶,如图 4。导线具体参数为:宽度 32 mil,1 oZ 铜厚(1.4 mil),供电电流 5 A。计算得到电流密度为  $111.6 \text{ mA}/\text{mil}^2$ 。采用四种方式得到的温升分别如下:

1) 方式 1:根据式(1),计算可得电流密度  $p = 0.092 \text{ A}/\text{mil}^2, A = 32 \times 1.4 \text{ mil}^2, \Delta T = 73.3 \text{ }^\circ\text{C}$

2) 方式 2:除需要电流  $I$ 、导体截面积  $A$ ,还需要板厚、铜箔以及导线到相邻铜平面距离。分别指定  $I = 5 \text{ A}$ ;宽度 = 32 mil;铜厚 = 1 oZ;Top 层到第二层参考铜层间距为 8 mil。根据 Saturn 工具计算所得温升  $\Delta T = 29 \text{ }^\circ\text{C}$

3) 测量:环境温度为  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 5、图 6 分别给出热像仪及热电偶测量获取的温度数据。

由图 5、6 可知,热像仪实测温度为  $51 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 51 - 22 = 29 \text{ }^\circ\text{C}$ ;热电偶实测温度为  $47 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 47 - 22 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。表 1 给出 Top 层走线温升实测值与理论计算结果的对比。

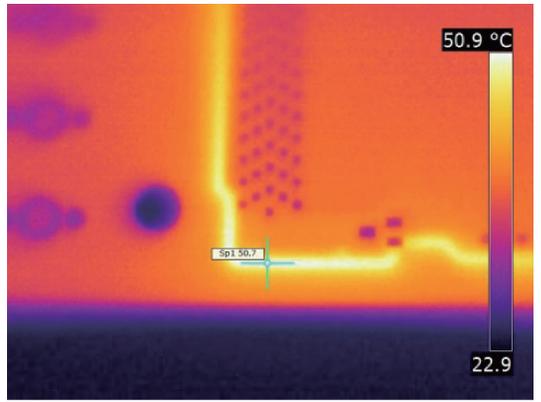


图 5 热像仪测量示意图

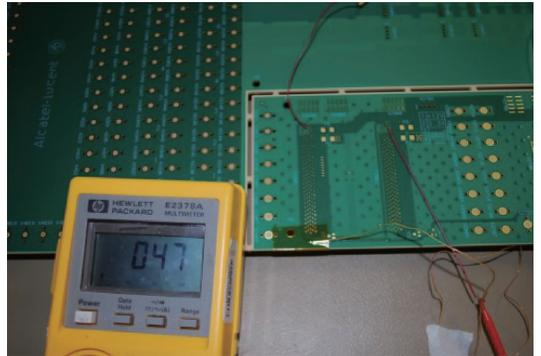


图 6 热电偶测量示意图

表 1 Top 层走线温升实测值及理论计算值

电流/A	方式 1 (IPC-D-275)	方式 2 (IPC-2152)	测量 1 热像仪	测量 2 热耦
2	9.1	4	6	4
3	22.9	10	12	10
4	44.1	18	19	18
5	73.3	28	29	26
6	111	44	45	36

对内层走线也分别用上述方法进行测量,其走线宽度为 20 mil,走线层为第 3 层,铜箔厚度为 1.5 oZ(2.1 mil),到第二层参考铜层间距为 8 mil。温升统计如表 2 所示。

表 2 内层走线温升实测值与理论计算值

电流/A	方式 1 (IPC-D-275)	方式 2 (IPC-2152)	测量 1 热像仪	测量 2 热耦
2	49	4.5	7	5
3	123	11	13	10
4	237.1	20.5	23	18
5	394	33	35	29
6	595	50	54	42
7	846	74	76	59
8	1145	99	104	73

## 2.2 测试结果分析

根据文中 3.1 给出的测试结果,分别给出 Top 层与内层导体电流与温升变化曲线对比分别如图 7、8 所示,其中曲线 1、曲线 2 分别为方式 1(IPC-D-275 标准)及方式 2(IPC2152 标准)的计算结果,曲线 3、4 分别代表热像仪测量曲线及热电偶测量曲线图。图 8 给出的是内层导体温升曲线对比,因为 IPC-D-275 计算结果偏差较严重,并没有统计到图 8 中。

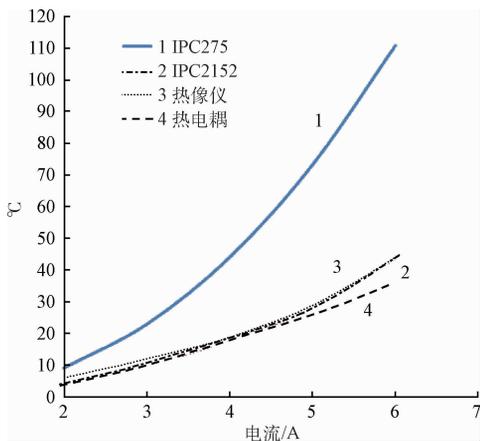


图 7 Top 层温升曲线对比

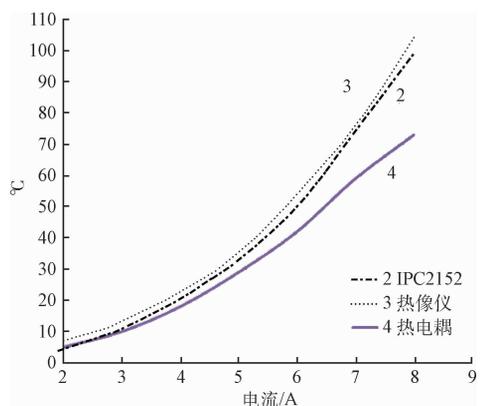


图 8 内层温升曲线对比

除了对测试板外层及内层走线进行温升测量对比之外,还跟踪了多个测试样本。包括不同的板厚、铜箔、走线宽度等,可发现:

1) IPC-D-275 计算方法(方式 1)高估了实际的温度上升。特别是内层走线严重高估了温度上升,并随着电流密度增大,结果的发散更趋严重,如图 7 中曲线 1(IPC275 标准),与其他 3 个曲线对比有较大偏差。运用该方式计算得到的温升与实际测量值有较严重的偏离,不适合需要准确估算升温的复杂电路设计。

2) 热电偶测量在电流较大时会出现测量结果偏低现象,甚至出现大于 20 °C 的偏差,如图 8 中曲线 4(热电偶),电流越高偏差越大。这是因为热电偶特性所决定,并且该

方法会增加测量成本,并不适用于 PI 工程师做为常用评估验证手段。

3) IPC-2152 计算方法(方式 2,采用 Saturn 辅助计算工具)计算的结果与实际测量结果比较接近,特别是与热像仪测量方式得到的曲线 3 基本重合,说明方式 2 可用来准确描述电流大小与温升的关系。可见,IPC-2152 计算方式和热像仪测量为 PI 工程师评估电源通道提供了较为准确的计算方法和测量手段。

4) 在温升与电流关系中,电源通道变细,电流密度升高将导致温升急速上升。如图 9 所示,当 100 mil 电源通道载流 7 A 时,带来温升是 40 °C。设计过程中因为过孔或其它因素影响,电源通道变成了 50 mil,将导致温升急速增加到 85 °C。

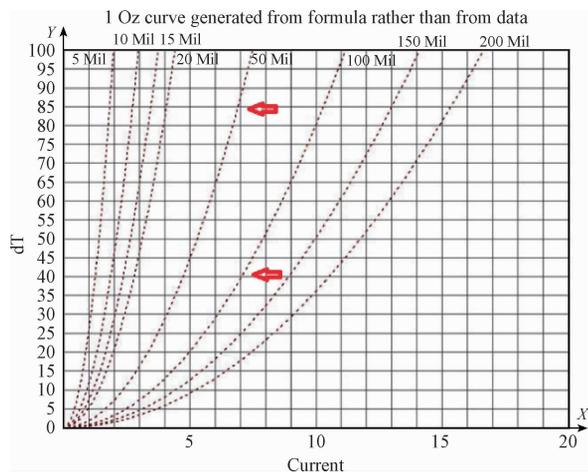


图 9 不同宽度电源导体电流温升对比

## 3 结 论

本文通过计算与测量的方式对比分析了 PCB 板电流密度与温升的关系,可知 IPC-2152(方式 2)能较准确的反应电流与温升的关系,虽与热像仪测量结果对比略有偏低,但对比 IPC-D-275 计算方法(方式 1),温度偏差得到很好的修正,并且在电路设计中很容易根据电流及线宽计算得到温升,所以方式 2 可作为 PI 工程师评估电源通道的有效工具。在分析研究的同时发现 PCB 中铜箔的载流能力与温升是相互促进的,同样的导线在更高的温升允许条件下载流能力更强,可允许的电流密度也更高;反之电源通道因客观因素变窄会导致导体的温度急速上升,影响到系统的稳定运行。PI 工程师在电源通道设计中需要考虑如何平衡电流与温升的关系,保证系统的稳定运行。

## 参考文献

- [1] 苏胜新,杜新纲,乔彦彬. 集成电路芯片热机械应力特征研究[J]. 电子产品世界, 2014(11):44-45.
- [2] 陆裕东,何小琦,恩云飞. 电迁移引起的倒装芯片互连

- 失效[J]. 固体电子学研究与进展, 2010, 30(2): 313-316.
- [3] 林金堵, 吴梅珠. 离子迁移的机理、危害和对策[J]. 印制电路信息, 2014(2): 48-50.
- [4] 卢炜, 黄光明. 双通道任意波形发生器信号间耦合问题的研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(4): 9-12.
- [5] IPC-D-275. Standard for Generic Standard On Printed Board Design[S]. 1999. <http://www.ipc.org>
- [6] IPC-2152. Standard for Determining Current Carrying Capacity in Printed Board Design[S]. August, 2009, <http://www.ipc.org>
- [7] 曾耀德, 王换宝, 张凯. 覆铜箔板热导率对导体温升影响的研究[J]. 印制电路信息, 2012(11): 21-23.
- [8] BROOKS D G. How AC currents affect PCB trace temperatures tied to frequency? [J]. Printed Circuit Design & Amp; FAB, 2016(09).
- [9] 李云红. 基于红外热像仪的温度测量技术及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [10] 苏佳伟, 石俊生, 汪炜稽. 距离对红外热像仪测温精度影响及提高精度的实验研究[J]. 红外技术, 2013, 35(9): 587-590.
- [11] 李静, 曲贵波, 吴东艳. 基于 K 型热电偶的中低温度测量系统的设计[J]. 黑龙江工程学院学报, 2016, 30(5): 43-45.
- [12] 王波, 戴曙光. 高稳定性数控恒流源设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(8): 14-18.

## 作者简介

**王学**, 1978 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为通信电子设计及信号仿真。

E-mail: wmovie\_wang@163.com

**叶建芳**, 1964 年出生, 副教授, 主要研究方向为射频电路及无线通信。