

# 埋入式电阻的热特性研究

陈清远, 容锦泉

(香港理工大学工业及系统工程学系, 香港 九龙红磡)

**摘要:** 通过对电阻的热功率、表面积的分析, 研究了 PCB 板中的埋入式电阻的热特性, 给出了 PCB 板中埋入式电阻的温升的解析表达式。计算了埋入式电阻在 PCB 板中的不同位置的温升情况, 详细讨论了多个埋入式电阻的温升与单个电阻温升的关系, 得到了计算具有多个埋入式电阻的 PCB 板的温升的方法。在设计 PCB 板时, 大功率埋入式电阻应安排在板的中部, 埋入式电阻的相互距离要分散并远离 PCB 板表面。

**关键词:** 电子技术; 埋入式电阻; PCB 板; 热特性; 设计规则

**中图分类号:** TN406      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-2028 (2005) 12-0061-03

## Investigation of Thermal Characteristics of Embedded Resistors

Chen C Y, Yung Winco K C

(Department of Industrial and Systems Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong)

**Abstract:** Thermal characteristics of embedded resistors in PCB (Printed Circuit Board) were studied. From the investigations of powers and surface areas of embedded resistors, the parse function of temperature rise in PCB was formulated. The differences in temperature rises against various locations in a PCB with embedded resistors also were calculated. From the analysis on relationships between single resistor and multi resistors, the calculation method of temperature rise in PCB with multi embedded resistors are presented. It was observed that an embedded resistor with large power should be placed at the center of a board and each heat source should maintain a distance among each other.

**Key words:** electronic technology; embedded resistor; PCB; thermal characteristics; design rules

埋入式电阻具有很多优点, 如可减小 PCB 板的尺寸、提高电路速度、增加电路的可靠性等, 是近年来研究和市场开发的热点之一。目前, 埋入式电阻的制备有薄膜淀积法、厚膜淀积法、低温共烧法、印刷膜法等几种常用的方法。随着研究的深入, 制备方法更加简便和精准。由于埋入式电阻在商业上的应用还处于初级阶段, 制备埋入式电阻的材料仅由少数几个公司提供, 不同公司的材料的阻值范围及精确度不同, 但是质量水平都在不断改善。

随着埋入式电阻研究的深入、市场应用的不断开发, 其在 PCB 板中产生的热问题将越来越突出。对埋入式电阻在 PCB 板中的热特性问题的研究, 还只是少数几个研究群体。已研究的成果表明, 埋入式电阻在 PCB 板中有一定的热应力, 在板中的位置不同, 其温升不同, 并对其邻近的器件有明显的温度影响<sup>[1,2]</sup>, 但是目前的研究集中在单个电阻的热应力的研究, 未见对多个埋入式电阻的相互影响的研究, 对埋入式电阻的设计规则还不清楚。研究表明埋入式电阻在 PCB 中

的温升与其表面积、位置和 PCB 板的形状有很大关系, 未见对这方面的研究。

笔者对以上目前研究的不足问题进行了研究, 得到埋入式电阻的温升的解析表达式, 并给出 PCB 板中埋入式电阻使用的设计规则, 为埋入式电阻的 PCB 板的制备工程师提供理论基础和设计规则。

### 1 理论分析

在 PCB 板中的埋入式电阻的传热机制主要是热传导, 是复杂的三维椭圆方程。电阻的温度场与其产生的热量、PCB 材料的热导率及其表面的环境冷却方式有关。电阻产生的热量是由其电能转化的, 电阻热  $P$  可为:

$$P = I_R^2 R \quad (1)$$

式中:  $I_R$  是流过电阻的电流;  $R$  是电阻值。带入稳态热传导方程:

$$\nabla^2 T = -\frac{1}{k} P \quad (2)$$

收稿日期: 2005-08-12      通讯作者: 陈清远

基金项目: 香港理工大学 CRG 基金资助项目 (G-T533)

作者简介: 陈清远 (1961—), 男, 香港人, 博士, 主要研究方向为自动化及材料处理。Tel: (852)27664980; E-mail: jinzhiling@tom.com。

式中： $k$  是材料的热导率 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ ，由此理论上可以得到 PCB 板中的任一点的温度。为了降低热量，PCB 板常常在一定的冷却方式下工作，如风冷、自然对流冷却等。PCB 板表面冷却方程可为：

$$Q = hA\Delta T = hA(t_w - t_\infty) \quad (3)$$

式中： $h$  是表面对流冷却系数 $[150 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ ； $A$  是表面积 $(\text{m}^2)$ ； $t_w$  是 PCB 板的表面温度 $(^\circ\text{C})$ 、 $t_\infty$  是冷却空气温度 $(^\circ\text{C})$ 。

在很少的情况下，热传导方程可以理想化为一维的问题求解。通常三维问题的求解十分复杂，必须借助于分析工具，如有限元的求解工具 ANSYS。

## 2 PCB 中的埋入式电阻的温度分布及温升解析模型

为了研究埋入式电阻的温度分布规律，根据实验的埋入式电阻及 PCB 板的样品建立模型，PCB 板的尺寸是  $25.4 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm} \times 5.1 \text{ mm}$ ，PCB 板的材料是 FR-4，其热导率是  $1.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，PCB 板的环境温度是  $27^\circ\text{C}$ ，表面对流冷却系数是  $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

### 2.1 温度分布的计算

埋入式电阻的尺寸是  $2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 0.01 \text{ mm}$ ，放置于 PCB 板的中心，同时假设电阻的功率是  $5 \text{ mW}$ ，可计算出电阻表面热流是  $1170 \text{ W}/\text{m}^2$ 。通过分析软件对模型进行计算，得到如图 1 所示的 PCB 板的温度分布。

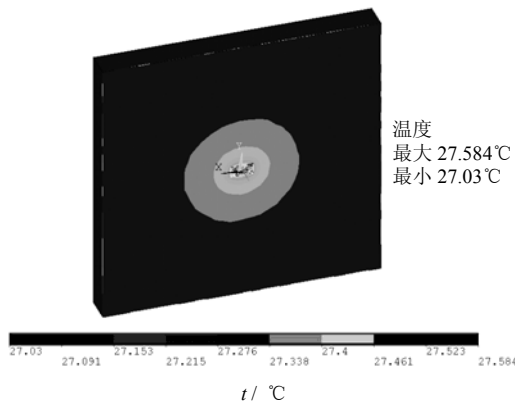


图 1 PCB 板中的温度分布  
Fig.1 Temperature contours in PCB

温度的范围是  $27.03 \sim 27.584^\circ\text{C}$ ，由于埋入式电阻的发热及表面冷却效率的有限，在 PCB 板的表面温度从  $27^\circ\text{C}$  上升到  $27.03^\circ\text{C}$ ，温度的最高点不在电阻表面，而是电阻的内部。

### 2.2 电阻功率的影响

PCB 板中各点的温度大小与电阻的功率有关，为计算功率的影响，计算了两种不同尺寸的埋入式电阻的温升情况，电阻尺寸是  $4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$  (大电阻)和  $2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$  (小电阻)。功率的取值范围是从  $0.05$  到  $5000 \text{ mW}$ 。通过拟合得到方程：

$$\Delta\{t\}_c = 0.061 \{P\}_{\text{mw}} + 0.06279 \quad (\text{大电阻}) \quad (4)$$

$$\Delta\{t\}_c = 0.09 \{P\}_{\text{mw}} - 0.01283 \quad (\text{小电阻}) \quad (5)$$

电阻发热量  $P$  的单位是  $\text{mW}$ 。即

$$\Delta t = kP + d \quad (6)$$

PCB 板得温升与电阻的功率是正比关系，大电阻的表面积大，温升小，方程(4)的斜率小，在图 2 中是上边的直线，小电阻的表面积小，在相同的功率下 PCB 板的温升大，直线的斜率大。所以 PCB 板的温升与埋入式电阻的功率的关系可以总结为方程(6)所示。

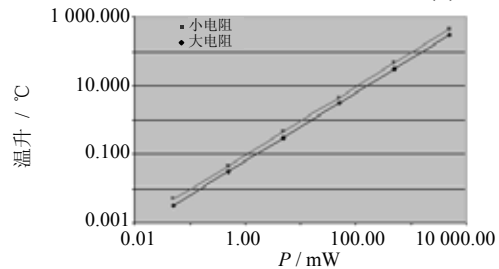


图 2 PCB 板温升与埋入式电阻功率的关系  
Fig.2 Temperature rise in PCB vs the power of the embedded resistor

### 2.3 埋入式电阻表面积的影响

为了计算电阻表面积的影响，把电阻的功率固定在  $5 \text{ mW}$ ，计算了两种不同形状电阻的变化，一种是矩形，另一种是立方体。

埋入式电阻的尺寸是  $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ ， $0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ ， $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ ， $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ ， $1.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ ， $1.2 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ ， $1.4 \text{ mm} \times 1.4 \text{ mm} \times 1.4 \text{ mm}$ ， $1.6 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$ ， $1.8 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$  等九种。

图 3 给出了 PCB 板的温升与电阻表面积  $S$  的关系，在双指数的坐标下，温升与电阻表面积是反比关系，线性度很好。可用直线拟合，得到：

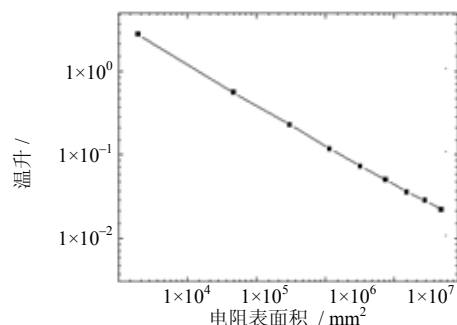


图 3 PCB 板温升与埋入式电阻的表面积关系  
Fig.3 Temperature rise vs the embedded resistor surface area

$$\Delta t = e^{3.43} S^{-0.477} \quad (7)$$

结合方程(6)，温升和电阻的功率的关系，可有：

$$\Delta t = 6.26 P S^{-0.477} \quad (8)$$

因此，PCB 板温升与埋入式电阻的功率和表面积的关系式是：

$$\Delta t = \beta P S^{-\alpha} \quad (9)$$

式中： $\alpha$  和  $\beta$  与 PCB 板的热导率、电阻的形状、电阻

在 PCB 板中的位置有关的常数。

### 3 PCB 板温升与埋入式电阻位置关系

PCB 板的温升与埋入式电阻在板中的位置有重要的关系, 已有的研究<sup>[1]</sup>表明电阻从板中移到板的表面, 其温度升高 30%。本研究发现电阻位置的影响远非如此简单, PCB 板的温升的变化, 即电阻的温度变化  $\Delta t$ , 在 PCB 板表面的不同位置温度升高  $\Delta t$  是不同的, 如果认为 PCB 板是一个长方体, 电阻在 PCB 板的小面积表面的温升比在大面积的表面的温升高。

图 4 给出了埋入式电阻从 PCB 板的中心到表面中心的温升的变化, 说明电阻的温升越靠近表面越高。

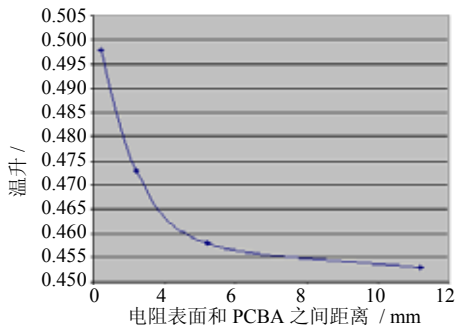


图 4 PCB 板温升随电阻从体内到表面的变化  
Fig.4 Temperature rise in PCB from center to surface

### 4 多电阻温升

当 PCB 板中的埋入式电阻的数量不只一个时, 温升的规律将更加复杂, 本研究首先从两个电阻的温升入手, 比较两个电阻的温升和一个电阻的温升的变化规律, 最后研究多个电阻的温升情况, 得到 PCB 板中有多个埋入式电阻时的温升规律。

设计的 PCB 板的尺寸同图 1 所示, 两个电阻的位置及坐标表示如图 5 所示。埋入式电阻的尺寸是  $2\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.01\text{ mm}$ , 两个电阻的距离是 20 mm。

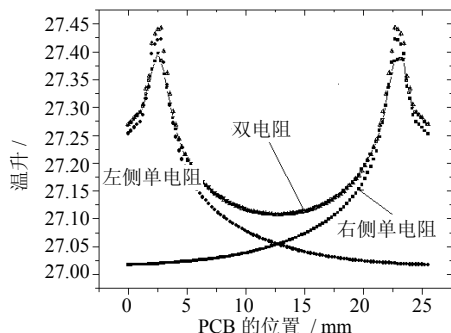


图 5 PCB 板中两个埋入式电阻的温度分布曲线图  
Fig.5 Temperature contours of two embedded resistors in PCB

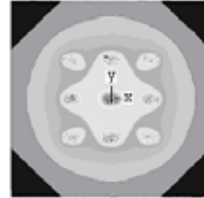
图 5 给出了 PCB 板中具有两个电阻时的温度分布, 通过两个电阻的中线上各点的温度, 在两个电阻的附近温度较高, 温升可达  $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 5 给出了两个单电阻时的温度曲线, 这两条曲线的叠加曲线与两个电阻同时存在的温度曲线重合, 说明 PCB 板中的温升

是电阻单独存在时的温升的叠加。

图 6 给出了多电阻时的 PCB 板的温度分布, 由此可以得到, PCB 板中各点的温升  $\Delta t$  是其内部的电阻单个存在时该点温升  $\Delta t_i$  的叠加,  $i$  是电阻数量, 即

$$\Delta t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (10)$$

$n$  是埋入式电阻的数量。



(PCB 板中各点温升为其内部的电阻单个存在时该点温升的叠加)

图 6 多电阻的 PCB 温度分布

Fig.6 Temperature contours of multi embedded resistors in PCB

### 5 PCB 板的温度极值及设计规则

PCB 板的温升与电阻的数量、电阻的位置、板的形状等因素有关, 因此具有  $n$  个埋入式电阻的 PCB 板的温升存在最低和最高温度范围。

**最低温升:** 电阻的距离较远, 温升的最高点在电阻的内部, 其它的电阻对其的影响较小, 并可以忽略。此时, PCB 板的温升  $\Delta t$  最低是埋入式电阻单独存在时的最大的温升  $\Delta t_{\max}$ 。

**最高温升:** 埋入式电阻相互靠近, 近似认为电阻的表面在一起, PCB 板的温升是各个电阻的温升的叠加, 温升的最高点是所有电阻单个存在时在此点的温升之和, 其不一定在某个电阻的内部。

PCB 板中埋入式电阻版图安排的设计规则: (1) 大功率埋入式电阻安排在板的中部; (2) 埋入式电阻的相互距离要分散并远离 PCB 板表面安排。

### 6 结论

研究了 PCB 板中埋入式电阻的热特性, 得到了 PCB 板的温升与电阻参数的解析表达式, 即板的温升与单个埋入式电阻的功率、表面积等的关系式。通过研究单电阻、双电阻和多电阻的温度分布特性, 总结出 PCB 板的温升是电阻单独存在时的温升的叠加。最后, 给出了 PCB 板中的埋入式电阻在版图上的安排规则。

**致谢:** 本项目得到香港理工大学工业及系统工程学系的高瑞文硕士和颜才绩博士在研究过程中的帮助。

### 参考文献:

- [1] Stubbs D M, Pulko S H, Wilkinson A J. An investigation of the sensitivity of embedded passive component temperatures to PCB structure [J]. IEEE Trans Comp Packag Technol, 2002, 25(4): 701-705.
- [2] Rao Y, Wong C P, Qu J. Electrical and mechanical modeling of embedded capacitors [A]. 1999 International Symposium on Advanced Packaging Materials [C]. 1999.

(编辑: 尚木)