

# 基于有限元法的高频开关电源 PCB 热仿真研究

## Thermal Simulation and Research of High-frequency SMPS PCB Based on FEM

杨晶晶, 王立龙

南京理工大学自动化学院 (江苏, 南京, 210094)

Yang Jingjing, Wang Lilong

School of Automation, Nanjing University of Science and Technology (Nanjing, 210094, China)

**摘要:** 为提高电源工作的可靠性, 论文提出通过安装热管散热器的方法来降低高频开关电源 PCB 的节点温度。基于有限元方法建立了热管模型以及高频开关电源 PCB 模型, 对热管管径以及安装两种散热器的高频开关电源 PCB 进行热仿真分析。热分析结果表明: 在一定功率范围内, 管径越大, 散热器散热效果越好; 安装热管散热器的高频开关电源 PCB 上器件温度明显低于安装传统散热器, 最大温差达到 33°C。实际中在不考虑强迫风冷散热设计时可以对 PCB 进行优化, 以及采用热管散热器对高频开关电源进行有效散热。

**关键词:** 高频开关电源 热管散热器 热分析 有限元法

**Abstract:** To improve the reliability of power supply operation, the paper proposes a method by installing a heat pipe radiator to reduce temperature in junction for high-frequency SMPS PCB. It establishes the model of heat pipes and high-frequency SMPS PCB based on FEM software. It simulates the heat pipe diameter and the PCB of two kinds of heatsinks. Thermal analysis results show that: in a certain power range, the larger the diameter, the better the cooling effect; the temperature of PCB device is significantly lower by installing heat pipe radiator than traditional radiator and the maximum temperature difference reaches 33°C. The PCB optimized and the use of heat pipe radiator can lead to a effective heat dissipation without considering the forced air cooling in practice.

**Key words:** High-frequency SMPS, Heat pipe radiator, Thermal analysis, FEM

中图分类号: TN86 文献标识码: A 文章编号: 1561-0349 (2014) 11- 0027-04

## 0 引言

开关电源的高频化对器件的温升控制提出更高的要求, 电源设计中的热分析显得尤为重要。通过对 PCB 的合理布局来改善散热路径, 以及利用焊盘、螺栓、过孔增加散热量, 可以降低电源的总体温度。但这种自然风冷的方法, 只适用于小功率损耗的电子电路<sup>[1]</sup>。另外, 可以安装风机和散热器, 利用强迫风冷的方法来对功率损耗大的开关电源系统进行散热<sup>[2][3]</sup>。热管作为一种极具高导热性能的新型传热元件, 在高频开关电源中应用的文献相对较少。在此基础上本文提出在自然风冷条件下, 通过安装平板热管散热器的方法, 来达到对较大功率损耗电源系统的有效散热; 基于有限元方法, 对热管直径以及高频开关电源 PCB 进行热仿真分析。

## 1 热分析基本理论和热设计方法

### 1.1 平板热管理论

平板热管散热器, 是将热管嵌入到普通散热器底面形式的散热装置, 其结构如图 1 所示。由于散热器由吸液芯、循环工质、管材和基材等多种材料组成, 故其导热系数的确定不能完全按照傅里叶导热公式进行求解, 且本文不考虑吸液芯中工质的复杂状态变化, 平板热管散热器的导热性能, 可以采用当量导热系数来表示<sup>[4]</sup>。其表达式用下式表示:

$$\lambda = \frac{H \cdot h}{R \cdot W \cdot L} \quad (1)$$

$$R = \frac{T_{\text{down}} - T_{\text{up}}}{Q} \quad (2)$$

其中： $R$  为底板热阻，单位为  $K/W$ ； $T_{down}$  及  $T_{up}$  分别为底板下表面和上表面平均温度，单位为  $K$ ； $Q$  为加热量，单位为  $W$ 。

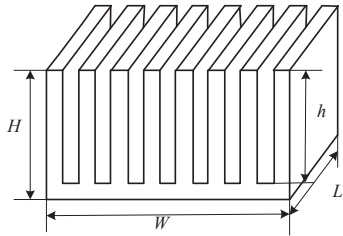


图 1 平板热管散热器结构

## 1.2 高频开关电源热设计

完整的热设计包括两方面：控制热源的发热量和将热源产生的热量散出去。元件的功耗是导致其发热的主要因素，一般认为电功耗为热功耗<sup>[5]</sup>。因此，从控制热源发热量的角度来考虑，必须尽可能地减少高频开关电源的元器件损耗及总损耗。针对第一点，高频开关电源主电路采用滞后臂串联二极管的移相全控桥 ZVZCS 电路，如图 2 所示。其中开关管 IGBT 的功耗计算由式 (3) 表示：

$$P_{IGBT} = P_{on} + P_{off} + P_s \quad (3)$$

其中： $P_{on}$ 、 $P_{off}$  分别为通态损耗和断态损耗， $P_s$  为开关损耗。由于主电路采用了零电压零电流软开关技术，开关损耗  $P_s$  为零，基本解决了开关频率高而产生的开关管损耗较大的问题。

针对第二点，在自然风冷的前提下，通过对高频开关电源 PCB 进行优化来有效散热。所采取的措施有：PCB 选用可以在环境较差和高温电路中广泛应用的 FR4 覆铜板；遵循热传导通路尽可能短、传导横截面积尽可能大的原则，留出通风散热通道，通风口处不设置过高元器件，且根据气流方向将元器件按长度方向纵向排列，如图 3 所示；采用大面积敷铜，增大散热面积，兼顾电磁兼容设计中的地线网格设计，大面积敷铜可设计成网状结构，防止铜箔过热引起的起泡和铜板翘曲<sup>[6]</sup>；对损耗大的滞后臂二极管和整流二极管，采用改进的散热装置。

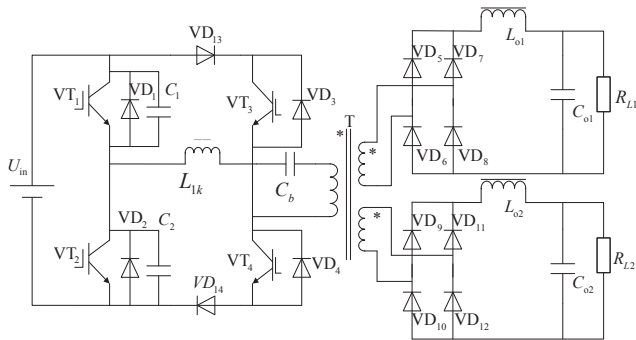


图 2 高频开关电源主电路图

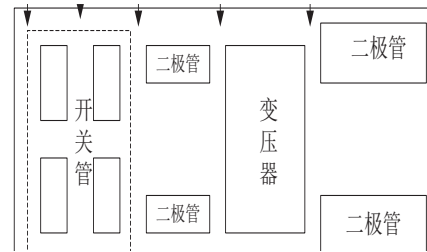


图 3 自然对流风冷布局

## 2 高频开关电源热仿真分析

### 2.1 仿真参数设置

研究对象为输入直流电压  $U_{dc} = 400V (\pm 5\%)$ ，两路输出为  $U_{out1} = 220V (\pm 20\%)$  及  $U_{out2} = 110V (\pm 20\%)$ ，输出功率  $U_{out} = 1320W$ 。从主电路可知，其热源主要有开关管、滞后臂串联的二极管、高频变压器和整流二极管。每个热源的结构都很复杂，利用基于有限元方法的 Ansys 软件，建立了高频开关电源 PCB 上各元器件的简化模型，并进行网格划分<sup>[7]</sup>。最后施加边界条件包括：环境温度为  $25^\circ C$ ，空气对流系数为  $20W/m \cdot K$ ，器件生热率  $H$ ，可按单位体积热功耗来计算。主要器件的功率损耗及材料属性如表 1 和表 2 所示。

表 1 主要器件的功率损耗

器件	开关管 IGBT	滞后臂二极管	高频变压器	整流二极管
功率损耗 (W)	3.97	16.34	19.58	42.1

表 2 仿真材料属性

材料	硅	铝	塑料封装	变压器铁芯	铜(管脚,线圈)	FR4(PCB)
导热系数 (W/mK)	82	237	1.57	12	400	8.37, 0.32, 0.32

### 2.2 热管直径对散热效能的影响

结合热源二极管尺寸大约为  $2mm^3$ ，以及功耗范围取为  $2W$ 、 $6W$ 、 $10W$ 、 $14W$ 、 $18W$ ，分别对嵌入 2 根  $\times 8mm$ 、3 根  $\times 6mm$  和 4 根  $\times 4mm$  热管的平板热管散热器，在以上不同热源功率处的散热效能进行仿真，其他边界条件均相同，仿真模型如图 4，仿真结果见表 3。

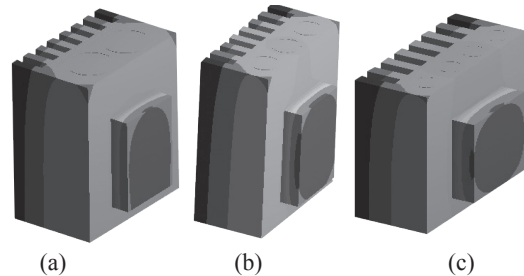


图 4 直径为 4mm、6mm、8mm 平板热管散热器仿真模型：(a) 2 根  $\times 8mm$ ；(b) 3 根  $\times 6mm$ ；(c) 4 根  $\times 4mm$

表 3 直径为 4mm、6mm、8mm 平板热管散热效能

功率 管径	2W	6W	10W	14W	18W
4mm	44.43°C	83.289°C	122.15°C	161.01°C	199.87°C
6mm	41.743°C	75.228°C	108.71°C	142.07°C	175.68°C
8mm	41.568°C	74.704°C	107.84°C	141.08°C	174.11°C

从仿真结果可知，在管径一定时，随着热源功率的增大，热源最高温度也呈线性升高趋势；在热源功率一定时，随着热管直径的增大，热源最高温度呈降低趋势；当管径从 4mm 增大到 6mm 时，温度降低比较明显，且随着热源功率越大，温度相差越大，效果越好；当管径从 6mm 增大到 8mm 时，温度也有所降低，但相差不大，最大温差不超过 2°C。由此可知，当增大热管直径，即吸液芯的厚度时，平板热管散热器的当量导热系数增大，其散热效果越好。考虑高频开关电源总体尺寸，采用嵌入 2 根 × 8mm 平板热管散热器。

### 2.3 高频开关电源 PCB 总体热仿真分析

按照布局规则对高频开关电源 PCB 进行建模，其中滞后臂二极管和整流二极管采用平板热管散热器进行散热，划分网格施加边界条件，仿真得到其总体热分布云图，如图 5 所示。

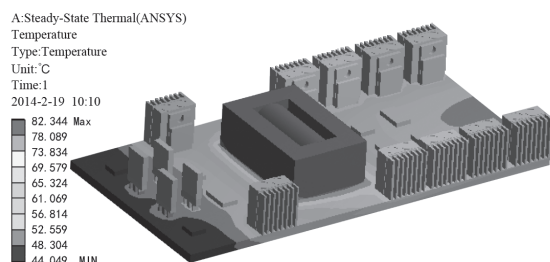


图 5 安装平板热管散热器的 PCB 热仿真云图

按照相同的布局规则，将散热器换成相同尺寸的传统铝散热器，以相同的网格划分方法以及施加相同的边界条件，得到高频开关电源 PCB 的热分布云图，如图 6 所示。

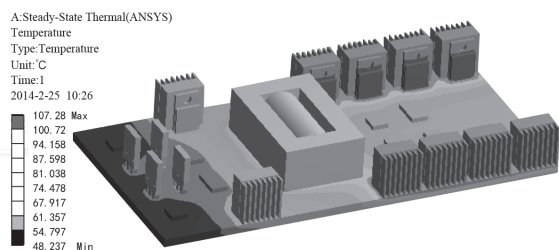


图 6 安装铝散热器的 PCB 热仿真云图

根据仿真结果，将关键元器件最高温度对比，如表 4 所示。

表 4 仿真结果对比

器件	IGBT	滞后臂二极管	整流二极管	高频变压器
热管散热器	69.579°C	65.324°C	73.834°C	82.344°C
铝散热器	87.598°C	74.478°C	107.28°C	94.158°C

由仿真云图和对比表格可知，对高频开关电源采用平板热管散热器和传统铝散热器，其散热效能，在对高频开关电源 PCB 主要元器件温度及总体温度分布上都有体现。

(1) 采用平板热管散热器的开关电源，PCB 中主要元器件温度均低于采用传统铝散热器，主要体现在热功耗较大的整流二极管上，温差达到 33°C，其散热性能明显优于传统的铝散热器，能够达到长期散热要求。

(2) 从温度由高到低的分布上，采用平板热管散热器的 PCB 上依次是变压器、整流二极管、开关管、滞后臂二极管；而采用传统铝散热器的 PCB 中损耗最大的整流二极管温度最高，再是变压器、开关管和滞后臂二极管。从温度分布上再次体现了平板热管散热器的散热效果。

### 3 结束语

开关电源的高频化对可靠性的要求更加严格，常用的自然风冷以及强迫风冷是传统散热手段。本文提出将电路设计与 PCB 散热设计结合的方法，在减小热源热量的同时兼顾 PCB 布局优化与散热设计。基于有限元法，对散热器的优化及高频开关电源 PCB 进行热仿真分析，得出热管直径能够影响散热器的导热系数，在一定热功率范围内，随着直径的增大，其散热效果越好，并选取管径为 2 根 × 8mm 的热管来设计散热装置；从温度分布云图对比可知，采用平板热管散热器的开关电源 PCB 中，主要元器件温度均低于采用传统铝散热器，最高温差达到 33°C，在自然风冷的前提下能对高频开关电源进行有效散热，节省了资源，提高了可靠性。不足之处在于未对平板热管散热器的设计进行详细步骤说明。

### 参考文献

- [1] 艾华斌, 王卫国, 袁亚飞. 航天器 DC/DC 变换器热分析研究 [J]. 现代电子技术, 2013, 36(18): 35-38.
- [2] 何文志, 丘东元, 肖文勋, 张波. 高频大功率开关电源结构的热设计 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 185-191.
- [3] 杨雄鹏, 周晓东, 陈长安, 蔡萧. 基于 Flotherm 分析的光伏逆变器的散热设计 [J]. 电力电子技术, 2013, 47(3): 54-56.
- [4] 刘红, 童思成, 蒋兰芳. 热管散热器数值仿真模型 [J]. 材料、结构及工艺, 2012, 33(2): 194-196.
- [5] 丁成斌, 王克成, 张文革, 武荣. 基于 Flotherm 的一种电源设备热仿真分析 [J]. 机电元件, 2011, 31(4): 28-31.
- [6] Negrea C, Rangu M, Svasta P. Optimization of a boost switching-mode power supply using electro-thermal modeling and simulation [C]. IEEE 16th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging, 2010: 291-296.

(下转第 32 页)