DOI: 10.19659/j.issn.1008-5300.2021.03.007

VPX架构下高热流密度电子设备热设计*

陈焱飙,李澄宇

(中国电子科技集团公司第三十研究所,四川 成都 610041)

摘 要:随着电子设备的国产化、小型化以及各种功能的进一步集成,其热流密度不断增大,对电子设备的热设计 提出了更高的要求。文中基于VITA48.2定义的VPX模块进行电子设备整机热设计,提出了一种满足高热流密 度VPX模块散热要求的整机结构形式,分析了该种散热结构的热阻网络,并通过6sigma软件进行了热仿真分析, 根据仿真结果优化热设计方案,提高散热效率。文中的热设计方案及仿真结果可以为类似的风冷机箱热设计提 供有效的参考。

关键词:VPX模块;热设计;热仿真

中图分类号:TK124 文献标识码:A 文章编号:1008-5300(2021)03-0032-03

Thermal Design of High Heat Flux Electronic Equipment under VPX Framework

CHEN Yanbiao, LI Chengyu

(The 30th Research Institute of CETC, Chengdu 610041, China)

Abstract: With the localization and miniaturization of electronic equipment and the further integration of various functions, the heat flux density of electronic equipment is increasing, higher requirements for the thermal design of electronic equipment are put forward. The thermal design of electronic equipment is carried out based on the VPX module defined by VITA48.2 and an equipment structure satisfying the heat dissipation requirement of the high heat flux VPX module is proposed. The thermal resistance network of this kind of heat dissipation structure is analyzed and the thermal simulation analysis through 6sigma software is conducted. The thermal design scheme is optimized according to the simulation results, and the heat dissipation efficiency is improved. The thermal design of scheme and simulation results in this paper can provide an effective reference for the thermal design of similar air-cooled chassis.

Key words: VPX module; thermal design; thermal simulation

引 言

VPX标准是VME国际贸易协会(VME International Trade Association, VITA)组织提出的新一代高 速串行总线标准。该标准具有最高10 Gbit/s的数据 传输带宽,并能支持多处理器计算机架构,可以解决数 据处理、数据传输以及接口标准化的难题。VITA48.1, VITA48.2, VITA48.3分别定义了风冷、导冷以及液冷 3种加固型VPX模块结构。其中VITA48.2定义的导 冷模块配有专用助拔器,通过两侧楔形锁紧条与导轨 架固定,该种结构形式具有良好的抗冲击、振动性能, 在航空航天以及军用电子设备中使用最为广泛^[1]。

VPX模块通常采用纵向布置以提高空间利用率, 常规19英寸机箱可布置16个VPX模块。按VITA65

 $\cdot 32 \cdot$

标准规定的常规6U模块最大允许热功耗150 W估计, 整机热功耗可高达2400 W。但VPX标准并未对宿主 设备结构进行详细讨论,国内学者也未对整机散热提 出系统的解决方案,如何解决高热流密度机箱的散热 问题,是现有VPX架构设计所面临的重要问题。本文 对某型信号处理设备进行热设计,并使用6sigma软件 对其进行热仿真分析,优化了设备结构,提高了设备散 热效果。

1 模块散热热阻分析

针对VITA48.2标准的模块结构,整机风道形式主要分为贯穿风冷和传导风冷。该种模块两侧锁紧条占用大量通风面积,在保证标准VPX槽位间距及模块厚度的前提下,贯穿风冷系统风阻大,对系统风道设计和

^{*} 收稿日期:2020-11-08

风机选型要求更高。本文主要考虑传导风冷,VPX模 块通过传导将热量传到导轨架,再由强迫风冷将热量 带走。

设计模块方案时通常将高热流密度芯片焊接在印制板上,芯片表面通过导热衬垫与模块腔体紧贴,将热量传导至模块腔体上。模块两侧肋条上安装有便于模块维护的楔形锁紧机构,当模块插入机架冷板插槽后利用楔形锁紧机构对模块进行锁紧,通过紧贴的肋条和楔形锁紧机构与机架冷板实现热交换。热传导路径如图1所示,热阻网络如图2所示。图中:*R*_{ct,0}为导热垫接触热阻;*R*_m为模块传导热阻;*R*_{wg}为锁紧条热阻;*R*_{ch}为机架传导热阻;*R*_{cv}为空气对流热阻;*R*_{jc}为结壳热阻;*T*_j为结温;*T*_f为环境温度。



热阻是热量转移过程的阻力,其定义如下^[2]:

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \tag{1}$$

式中:ΔT表示两节点间的温差;Q表示节点间传递的 热流功率;热阻R表示两节点在传递单位热流功率时 的温差,反应介质或介质间的传热能力。对于传导热 阻,可按下式计算:

$$R = \frac{L}{KA} \tag{2}$$

式中:L为传热的距离;K为材料的导热系数;A为传 热的截面积。由于通常情况下相互接触的表面既不 平整也不光滑,因此微观上两个面之间的接触是由空 气间隙隔开的许多点对点的接触。由于空气的热传 导率只有0.026 W/(m·°C),相比常用散热器材料铝 的传导率200 W/(m·°C)要低得多,所以相互接触的 界面之间会形成接触热阻。接触热阻计算的理论模 型复杂,影响因素较多,工程上一般通过试验测量的方 法得到。根据文献[3-4]可以得到导热垫的接触热阻 $R_{\rm ct,0} = 0.04$ °C/W以及单个楔形锁紧条锁紧处总热 阻 $R_{\rm wg} \approx 0.33$ °C/W。

模块散热壳体的材料通常采用6063铝板,其 导热系数K = 200 W/(m·°C),传热截面积 $A = 0.16 \times 0.01 = 0.0016 \text{ m}^2$,模块的平均传导热阻:

$$R_{\rm m} = \sum_{i=0}^{n} \frac{L_i}{2nKA} = 0.2 \,^{\circ}{\rm C/W}$$
(3)

式中,n为壳体上离散点的总数。

机 架 的 传 导 热 阻 $R_{ch} = 0.007/(2 \times 200 \times 0.0016) = 0.01 °C/W。对于一个 槽位, 估算 换热 面积 <math>A = 0.16 \times 0.02 \times 10 = 0.032 m^2$, 取常规强迫风 冷对流换热系数 $h = 100 W/(m^2 \cdot °C)$, 机架空气对流 热阻 $R_{cv} = \frac{1}{hA} = 0.31 °C/W$ 。按模块功耗100 W计 算得到热阻、温升分布, 如表1所示。

表 1 系统热阻、温升分布

参数	导热垫	模块 传导	锁紧条	机架 传导	空气 对流
热阻/(°C·W ⁻¹) 温升/°C	$\begin{array}{c} 0.04 \\ 4 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.20\\ 20 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.16 \\ 16 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.01 \\ 1 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.31\\ 31 \end{array}$

由热阻网络分析可知,在高热流密度下,每一点热 阻都会产生较高的温升,最终导致元器件高温失效,所 以必须对散热路径上的热阻进行优化。当选定芯片 后,芯片结壳热阻就已确定,无法改变。导热衬垫和锁 紧条的接触热阻主要与压紧力和材料表面粗糙度有 关,在VITA48.2的模块中,通过选择合适的热界面材 料和控制压紧力来尽可能地减少接触热阻。模块传导 热阻和机架空气对流热阻在整个热阻网络中占比最 大,尽可能对其进行控制是整机热设计的关键。

2 基于VITA48.2标准的整机热设计

根据热平衡方程,整机所需的通风量:

$$Q_{\rm f} = \frac{Q}{\rho C_p \Delta t} \tag{4}$$

式中: ρ 为空气密度,60°C时, $\rho = 1.06 \text{ kg/m}^3$; C_p 为空 气的比热, $C_p = 1005 \text{ J/(kg·°C)};Q$ 为总损耗功率, $Q = 1000 \text{ W};\Delta t$ 为冷却空气出口与进口的温差,这里 初定 $\Delta t = 10$ °C。

经计算, $Q_{\rm f} = 5.63 \, {\rm m}^3/{\rm min}$,考虑系统风压阻力并 留取一定安全裕量,选取3个Bi-Sonic的BP1202512H 风机预计能够满足设计需求,单个风机最大风量为 3.398 m³/min。

由于气流在转角和通道尺寸变化时会产生压力 损失,理想情况下的通风面积应该与风机尺寸相同, 并且转角处通过光滑圆弧过度。试验表明,通风面积 降低到理想通风面积的60%前,流量不会产生明显变 化。预估整机通风面积 $S = 0.6 \times 120 \times 120 \times 3 = 25920 \text{ mm}^2$ 。所以对于该种结构形式,采用前进后出 的风道,标准7U(1U = 44.45 mm)机箱能够满足其散 热需求。

3 热仿真分析及优化

3.1 热仿真分析

对某型处理设备进行热仿真分析,模块的热分布 见图3,单板热功耗总计91.7 W。



图 3 模块热功耗分布

通过6sigma软件进行热仿真计算,环境温度设为 45°C,得到温度云图如图4所示。可以看到,该条件下 模块到导轨间温升较高,芯片最高温度为95.1°C,高 于主流工业档电子器件允许工作最高温度85°C,不利 于硬件设计与选型,需要优化散热。



3.2 优化设计

由仿真结果可知,模块传导热阻较大是机箱散热的瓶颈之一。传统均温组件一般选用高导热系数的金属材料(如紫铜),而均温板作为一种高效气-液相变传热器件已经越来越多地作为均温组件应用于电子设备散热中^[5-6]。均温板实际上是一种具有蒸发面和冷凝面的平板热管,热源作用于蒸发面,热量通过工作介质的蒸发、冷凝、回流过程扩散到整个热管腔内,并且温度在热管壁面分布均匀。均温板的导热系数可达800 W/(m·K),将模块散热壳体由常规铝板改为均

温板,可以大大提高其传热效率。均温板结构见图5。



将模块壳体更换为均温板后重新进行热仿真分析 (图6),芯片最高温度为82.1°C,散热效果提升明显。



图 6 均温板散热壳体热仿真温度云图

对于该种结构形式,散热导轨的长、宽、齿高、基板 厚度等基本尺寸已由板卡尺寸和机箱尺寸决定,能够 优化的主要参数为散热齿齿厚和齿间距。以齿厚和齿 间距为自变量,芯片最高温度为目标函数进行仿真,结 果如表2所示。可以看到,由于整机采用前后通风的 结构形式,风道通畅,齿间距在2mm以上时,缩小齿厚 和齿间距并不会对系统风阻产生显著影响,却可以增 加强迫风冷的换热面积,有效提高换热效率。系统流 场和压力场如图7、图8所示,风速均为5m/s左右。

表 2 散热齿参数与芯片最高温度及系统风压关系表

参数	齿厚,齿间距/mm					
	2.5, 7.5	1, 3	1, 2	0.5, 2	0.5, 1	
芯片最高 温度/°C	82.1	78.3	76.7	75.7	78.3	
系统风压/Pa	66	62	65.7	64	70	



图 7 齿厚2.5 mm齿间距7.5 mm时机箱流场和压力场

(下转第45页)

参考文献

- [1] 吴家龙. 弹性力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016: 70-90.
- [2] 倪振华. 振动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006: 40-120.
- [3] 邓训,徐远杰. 材料力学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 90-120.
- [4] 方同, 薛璞. 振动理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998: 230-300.
- [5] 邱成悌,赵惇殳,蒋全兴. 电子设备结构设计原理(修订版)[M].南京:东南大学出版社,2005:130-133.
- [6] STEINBERG D S. 电子设备振动分析 [M]. 王建刚, 译. 3版. 北京: 航空工业出版社, 2012: 76-121.
- [7] 季馨, 王树荣. 电子设备振动环境适应性设计 [M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2012: 155-214.
- [8] SJ 20594-1996 军用电子设备振动与冲击手册[S]. 1996.
- [9] 施荣明,朱广荣,吴飒. GJB 150.16A—2009 军用装备实 验室环境试验方法,第16部分:振动试验[S].北京:总装 备部军标出版发行部,2009.
- [10] 王树荣. 环境试验技术[M]. 北京: 北京人民邮电出版社, 2016: 193-200.
- [11] 刘笑天. ANSYS Workbench结构工程高级应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015: 175-188.

- [12] 许京荆. ANSYS 13.0 Workbench 数值模拟技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 290-297.
- [13] 程诗叙.印制电路板与集成电路组件的模态分析及振动 可靠性研究[D].成都:电子科技大学,2005:50-58.
- [14] 胡玉琴, 陶秋帆, 邓宗白. 楔形锁紧装置的力学性能分析 [J]. 水利电力机械, 2007, 29(12): 203-206.
- [15] 石进峰, 王炜, 夏思宇, 等. 轻量化层叠式电子设备的振动分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(19): 155-160.
- [16] 贲少愚. 直升机载雷达结构设计关键技术分析与研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011: 46-49.
- [17] 王尚礼. 某航空机箱动力学性能仿真技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 8-20.
- [18] 朱继元,周德俭,吴兆华. 板级电路振动分析及元器件布 局优化技术研究[J]. 电子机械工程, 2007, 23(1): 1-4.

李剑平 男,1978年生,硕士,高级工程师,主要从 事加固计算机系统设计和加固设计工作。

李风新 男,1981年生,高级工程师,主要从事电 子设备加固设计和热设计工作。

景三辉 男,1981年生,高级工程师,主要从事电 子设备加固设计工作。

(上接第34页)



图 8 齿厚1 mm齿间距2 mm时机箱流场和压力场

4 结束语

传导风冷相比贯穿风冷风道形式更加简单,空间 利用率更高,通常对于标准6U板卡,机箱高度为7U。 但对于高热流密度模块,常规铝板传导热阻较大,无法 将热量及时传出,需要使用均温板或者热管等方式提 高传导效率。文中风道形式风压阻力较小,在保证齿 间距2 mm的基础上,缩小齿厚和齿间距可以有效提 高风冷换热效率。由于均温板是一种气-液相变传热 组件,其工作原理和瞬态工况较为复杂,用其稳态导热 系数进行仿真可能存在一定偏差,其瞬态过程有待进 一步分析、验证。

参考文献

- [1] 张尧. 一种基于VITA48.1的抗冲击插箱设计[J]. 新产品 开发,2016(11): 42-46.
- [2] 叶发亮. 基于VPX总线的机载设备的热设计[J]. 电子机 械工程, 2013, 29(5): 4-7.
- [3] 白振岳,杨明明,郭建平. 电子设备模块与机箱导轨接触 热阻测量[J]. 机械工程师, 2014(7): 58-59.
- [4] 胡家渝, 敬成君. 基于热瞬态测试方法的楔形锁紧条热阻 测试[J]. 电子器件, 2016, 39(4): 774-779.
- [5] 周驰, 左敦稳, 孙玉利, 等. 应用于LED肋片散热的均温板 效果实验研究[J]. 微电子学, 2015, 45(1): 136-144.
- [6] WANG J C, WANG R T, CHANG T L, et al. Development of 30 Watt high-power LEDs vapor chamber-based plate[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(19): 3990–4001.

陈焱飙 男,1989年生,工程师,主要从事结构设 计工作。