

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.04.017

应用相变储能板的星载数据处理器热设计

胡凤姣,王升,刘江涛,赵静

(中国空间技术研究院西安分院,西安 710000)

摘要:某星载数据处理器采用标准机箱结构,实现整星对地遥测数据的存储与传输的功能。数据处理器总热耗较大,其中有3个数据处理单元在工作时热耗高达70 W。针对数据处理单元的周期性工作特点,填充有相变材料的储能板作为其散热措施使用。在数据处理单元工作时储热,间歇时散热,实现对数据处理单元的温度控制。为了验证该热设计措施的有效性,采用Flotherm软件进行仿真分析并设计了真空下的瞬态热平衡试验。仿真和试验结果均证明热设计方案合理,该相变储能板可以适应数据处理单元周期性工作的需求,且其内部所有元器件均满足一级降额设计要求。这种热设计方法为后续该类型周期性工作的大热耗单元热设计提供了参考意义。

关键词:数据处理器;相变储能;热设计;热平衡试验

中图分类号:V444

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2023)04-0104-05

Thermal design of a spaceborne data processor with phase change materials

HU Fengjiao, WANG Sheng, LIU Jiangtao, ZHAO Jing

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: The spaceborne data processor with the standard chassis can realize the storage and transmission of the telemetry data from the earth. The heat consumption of the data processor is extremely high and there are three 70 W data processing units in the processor. An energy storage plate full of phase change materials was used to control the temperature of the processor. Phase change material could store heat when the unit was running and dissipate heat when the unit stopped running. The thermal design scheme proved functional through the simulation with the Flotherm software and the periodic thermal balance test. The energy storage plate could meet the requirements of the processor with periodic working and the temperatures of the electronic components were below the derating temperature. This study provides an feasible way for the thermal design of periodical running equipment with high heat dissipation.

Key words: data processor; phase change; thermal design; thermal balance test

0 引言

随着电子科学技术日新月异地发展,电子设备也向着高集成化和高功率化不断迈进,在属于科技发展前沿阵地的航天领域更是如此。对卫星

功能要求的不断提升,带来了载荷数据量、运算量和传输量的剧增^[1],而随之产生的高热量和高热流密度非常容易导致相关设备和电子元器件工作温度偏高,甚至引起失效^[2]。研究表明,半导体元

收稿日期:2022-12-16; 修回日期:2023-01-13

基金项目:科技重大专项课题(编号:GFZX04013203)

引用格式:胡凤姣,王升,刘江涛,等.应用相变储能板的星载数据处理器热设计[J].空间电子技术,2023,20(4):104-108. HU F J, WANG S, LIU J T, et al. Thermal design of a spaceborne data processor with phase change materials[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(4):104-108.

器件的温度每升高 10°C , 电子产品的可靠性将下降 50% [3]。在追求高可靠性的航天领域, 这种下降显然是难以接受的, 因而必须严格控制电子元器件的温升, 热控系统的重要作用就是保障电子设备在合理的温度区间工作。在航天载荷中, 大功率周期性工作的设备(如数据处理器)越来越成为宇航电子产品热控的难点[4]。相变储能技术是应对这种周期性大功率设备热控的有效手段之一[5]。

相变储能是利用相变材料在发生相变过程时吸收大量热能, 并保持温度基本不变的特点实现控温的。待设备停止工作后, 储存在相变材料中的热能向环境逐步释放, 恢复到原始状态[6-8]。由于固-气、液-气相变都会产生气体, 导致相变前后体积变化巨大, 因此一般使用固-液相变材料用于储能, 而利用率最高的相变材料为石蜡类有机相变材料[9-13]。为了应对月球昼夜更替的巨大温差, 美国在 1971 年发射的月球车上应用了 3 套石蜡类相变储能热控系统[14], 中国的玉兔月球车上也搭载有相类似的相变储能系统。NASA 还将十二烷、十六烷和正十五烷分别用于在火星探测器和猎户座载人飞船的热控系统中[15]。

随着技术的发展, 相变储能不仅被应用于卫星系统级热控, 也在星载周期性工作的大功率设备内部热设计中发挥重要作用。相对于系统级热控, 相变储能技术在单机内部的应用对体积与质量的约束条件更严苛。单机内部元器件较大的热流密度对热设计也提出了更高的要求。文章介绍的是一种将相变储能技术应用于星载数据处理器内部数据处理单元的热设计案例, 利用 Flotherm 软件对热设计方案进行仿真, 并通过真空下的瞬态热平衡试验对方案的合理性进行了验证。

1 设计输入

某星载数据处理器是卫星上重要载荷, 实现整星对地遥测、数据存储与传输功能。该卫星在固定轨道工作, 绕地球一圈约 95 min , 数据处理器最大工作时长约 15 min , 最大热耗约 360 W , 属于周期性工作的大热耗单机。

该数据处理器采用 VITA48.2 协议设计的标准结构, 由机箱与 12 块功能相对独立的插板组成。如图 1 所示, 数据处理器结构分为上下两部分, 其中上

箱体安装插板, 下箱体安装母板与电源模块。为了减小上下两层箱体间的接触热阻, 在箱体侧壁上安装铜水热管, 将上箱体侧壁上的热量利用热管直接传导至下箱体。

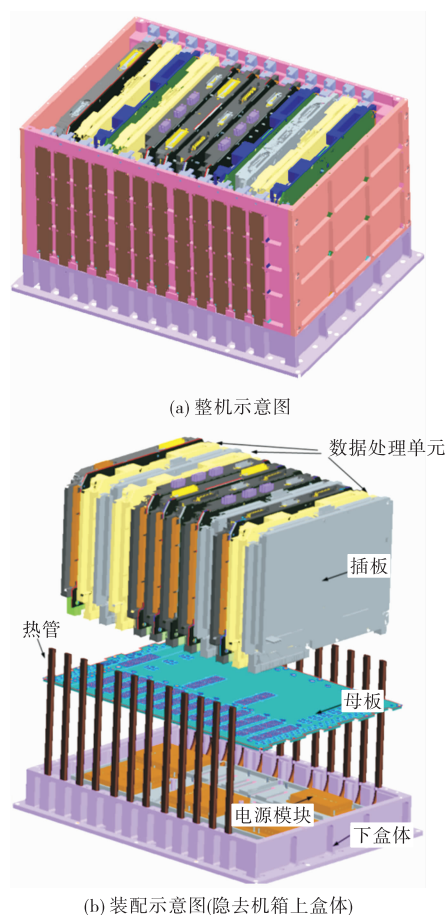


图 1 数据处理器结构示意图

Fig. 1 Schematic of the data processor structure

数据处理器主要热耗分布在插板与电源模块内部, 其中 3 个数据处理单元由于运算复杂, 数据处理量大, 其最高热耗, 单板约 70 W , 主要发热元器件热耗分布如表 1 和图 2 所示。由表 1 及图 2 中数据可知, 元器件热耗和热流密度较大, 其中 FPGA 热耗最大, 为 16 W , DSP 热流密度最大, 约为 $1.9\text{ W}/\text{cm}^2$ 。数据处理器在太空中工作时, 由于没有空气对流且各插板之间温差较小, 辐射散热效率较低, 元器件的热量主要通过与其接触的 PCB 或散热板传出。处理器的安装面最高温度为 40°C , 而一般元器件结温的一级降额温度为 85°C , 除去元器件结壳温升约 5°C , 只有 40°C 的热设计空间。因此, 设备热耗大、热流密度大、设计温度区间窄, 如何保障产品在周期性工作的工况中满足降额使用要求是热设计的难点。

表 1 数据处理单元主要发热元器件的具体参数

Tab.1 Parameters of the power components in the data processing unit

位号	名称	热耗/ W	结壳热阻/ ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	一级降额 温度/ $^{\circ}\text{C}$
U3/U4	FPGA	16	0.1	85
U56/U71	DSP	7.5	0.18	85
U86	FPGA	1.5	0.2	85
U6-U41	DDR3	0.15	3	85
U46-U55				
U1/U2	电源模块	1.5	2.75	85
U58/59	电源模块	2	1.5	85
U69				

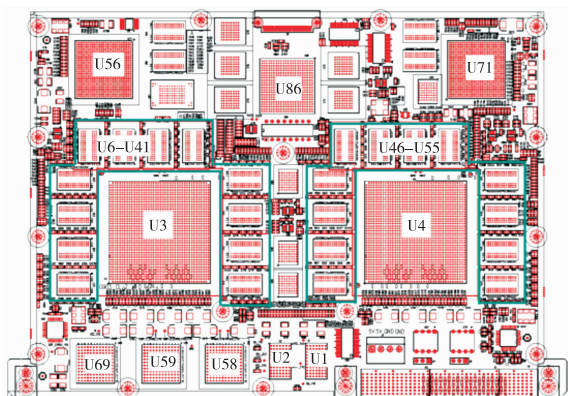


图 2 数据处理板主要发热元器件分布示意图

Fig.2 Power map of the data processing unit

通过热耗分布可以看出,数据处理单元的热耗分布较为平均,且都位于印制电路板正面,有利于在其正面采取散热措施。

2 相变储能板

针对数据处理器周期性工作的特点,在数据处理单元正面设计一块相变储能板,如图 3 所示。



图 3 数据处理单元结构

Fig.3 Schematic of the data processing unit

在其工作时相变材料吸收元器件释放的热量,实现控温的要求。设备停止工作后,相变材料逐步

释放热量,恢复初始状态。相变储能板的结构由铝合金制成,内部填充有复合石蜡类有机相变材料,其具体性能参数如表 2 所列。根据计算,相变材料充灌量约 125 g。

表 2 相变材料的具体参数

Tab.2 Parameters of the phase change material

参数名称	指标
熔融范围	69 $^{\circ}\text{C}$ ~ 71 $^{\circ}\text{C}$ 典型温度:70 $^{\circ}\text{C}$
凝固范围	70 $^{\circ}\text{C}$ ~ 66 $^{\circ}\text{C}$ 典型温度:70 $^{\circ}\text{C}$
储热容量 $\pm 7.5\%$	230 kJ/kg
潜热与显热之和 (温度范围 62 $^{\circ}\text{C}$ ~ 77 $^{\circ}\text{C}$)	64 Wh/kg
比热容	2 kJ/kg $\cdot$ K

由表 2 数据可知,该相变材料潜热大,相变点温度为 70 $^{\circ}\text{C}$,与元器件一级降额温度 85 $^{\circ}\text{C}$ 存在较大的温差,利用相变材料在吸热融化时温度基本保持不变的特点,可以有效的控制数据处理单元内元器件温度满足一级降额使用要求。

3 热分析

文章采用 Flotherm 软件作为分析工具,分析网格模型如图 4 所示,利用软件内部的相变模型对相变材料进行定义。为了提高计算速度,在不影响计算精度的前提下,分析模型适当简化忽略了一些几何特征,对非数据处理单元的插板不建立详细模型,不会影响数据处理单元内的温度分布。分析模型共有网格 16433 187 个,网格单元最大长宽比为 19.75。

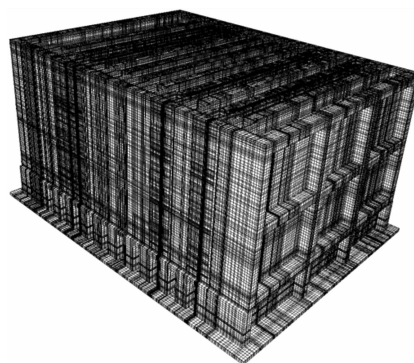


图 4 数据处理单元网格模型示意图

Fig.4 The grid model of the data processing unit

仿真针对最严苛的工况进行,即数据处理器采取周期性工作模式,单次开机时长 15 min,在最大热

耗情况下工作,最高工作环境温度为 40°C 。单机底部舱板布置有作为热沉的热管,安装面温度较为均匀,故仿真过程中将安装面定义为定温边界。作为星载电子设备,数据处理器在真空下工作,没有对流传热,故其传热方式仅为热传导与热辐射。设定辐射环境温度与安装面温度一致,均为 40°C 。

通过仿真可知,开机后,数据处理器内部温度随时间不断攀升。 15 min 时元器件温度达到最高值,此时数据处理单元内部温度分布如图5所示。 U3 FPGA壳温最高,温度为 71.6°C ,其结温为 73.2°C , U2 电源模块结温最高,温度为 75.3°C 。由仿真数据可知,数据处理单元内部所有元器件结温均小于一级降额,满足热设计要求。设备关机后,元器件温度逐渐下降。关机 80 min 时,元器件温度基本恢复到初始温度状态,即 40°C 附近,如图6所示。

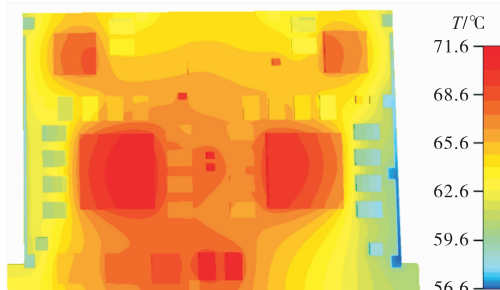


图5 数据处理单元温度分布示意图

Fig.5 Temperature figure of the data processing unit

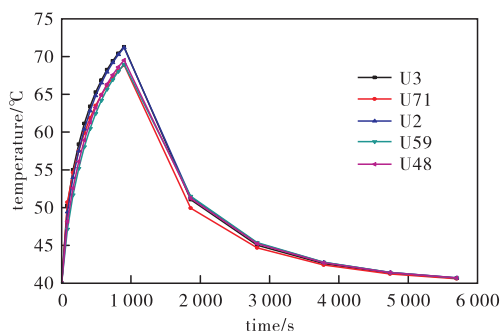


图6 主要元器件最高温度随时间变化曲线

Fig.6 The temperature of the electronic components

4 热平衡试验

根据航天器电子设备热设计指南,利用瞬态热平衡试验可以验证采用周期性瞬态工况工作的航天器电子设备热设计的有效性,其平衡的判据为在连续4个试验周期的对应时刻,监测点温度值的变

化在 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 内。对数据处理器进行热平衡试验时,连续检测4个周期内元器件温度随时间的变化,每个周期 95 min ,其中设备正常开机 15 min 。

数据处理单元上主要测点分布如图7所示(其中10~13号测点布置在器件背面)。试验过程中,控制数据处理器外壳控温点温度达到 $40 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

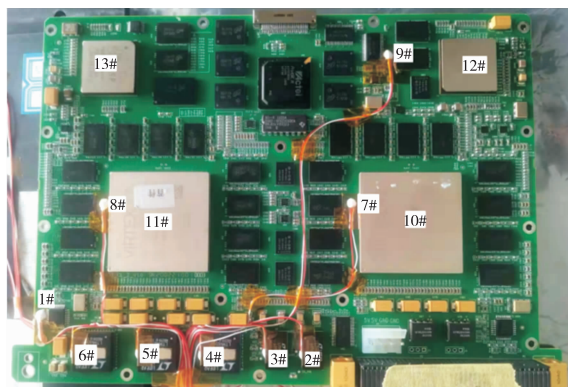


图7 主要测温点分布示意图

Fig.7 location of the temperature sensor

选取关键发热元器件上的测点作为分析对象,其温度随时间变化曲线如图8所示。在数据处理器连续工作的4个周期内,各测点温度随时间的变化一致,对应时刻监测点温度值的变化在 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 内,满足热平衡试验要求。可以看到,每次关机后所有测点温度都能降低到环境温度,此时相变储能板内部的相变材料也回到了试验初始状态。由此可知相变材料的充灌量满足数据处理单元周期性循环工作的需求。

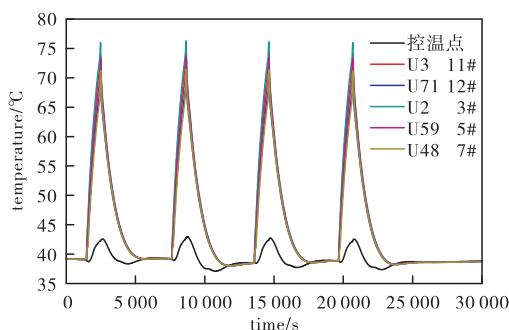


图8 测温点随时间变化曲线

Fig.8 The temperature of the sensor in the test

由于真空罐的降温速率限制,设备控温点的温度并没有一直稳定在 40°C 。利用稳态热平衡实验数据对仿真模型进行修正,再利用修正后的仿真模型校核试验过程中主要元器件的最高温度,结果如表3所列。主要元器件试验温度与仿真计算温度最大绝对偏差为 3.7°C ,证明仿真模型正确可靠。试

验数据表明数据处理单元内部所有元器件的结温均满足一级降额温度 85℃ 的设计要求,结温最高的元器件为电源模块 U59,最高结温 74.1℃。

表 3 主要测温点的仿真与试验数据对比

Tab.3 Temperature data of the simulation and the test

热电偶 序号	位号	名称	试验壳 温/℃	试验结 温/℃	仿真结 温/℃
11#	U3	FPGA	72.1	73.7	73.2
12#	U71	DSP	67.1	68.5	70.6
3#	U2	电源模块	73.7	77.9	75.3
5#	U59	电源模块	71.1	74.1	72.6
7#	U48	DDR3	69.1	69.5	73.2

5 结论

某星载数据处理单元采用 VITA48.2 协议设计标准机箱结构,在轨周期性工作,开机 15 min 后,关机 80 min,最大热耗约 360 W,其中数据处理单元约 70 W。为了解决数据处理单元的散热难题,文章提出在电路板大热耗器件面安装相变储能板作为热控措施。通过仿真,计算出数据处理单元内部元器件的最高温度满足设计要求。通过真空瞬态热平衡试验,验证了热控方案的有效性,设备内部所有元器件均满足一级降额设计要求,元器件结温最高为 74.1℃(电源模块 U59)。由数据处理器的热控方案可知,相变材料可以较好地应对周期性工作的大热耗单元散热问题,为后续同类型大热耗设备热控方式提供一定参考。

参考文献:

- [1] 陈乃松. 高速无线数据传输系统研究及仿真实现[D]. 成都:电子科技大学,2016:1-2.
- [2] 李伟健. 间歇大功率相变热沉研究[D]. 大连:大连理

工大学,2019:1-5.

- [3] 李琴,刘海东,朱敏波. 热仿真在电子设备结构设计中的应用[J]. 电子工艺技术,2006,27(3):165-167.
- [4] 张立,王升,赵静. 相变材料深空控温技术研究[J]. 空间电子技术,2022,19(1):34-40.
- [5] 谢标. 复合相变材料储能及热控的理论和实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016:1-4.
- [5] 黄欣鹏. 复合相变储能材料的传热特性研究[D]. 南京:东南大学,2018:2-3.
- [6] 解佳毅. 新型波纹板式相变蓄热器热特性研究[D]. 济南:山东大学,2020:3-6.
- [7] 张毅,冯春花,刘洋,等. 相变储能石膏板传热过程测试及有限元分析[J]. 太阳能学报,2015,36(8):2016-2020.
- [8] 李静,李绍伟,蔡迪,等. 石墨烯气凝胶复合相变材料的热物性研究[J]. 物理学报,2021,70(4):040503.
- [9] 林文珠,凌子夜,方晓明,等. 相变储热的传热强化技术研究进展[J]. 化工进展,2021,40(9):5166-5179.
- [10] 宋志昊,张昆华,闻明,等. 相变存储材料的研究现状及未来发展趋势[J]. 材料导报,2020,34(11):21099-21104.
- [11] 朱孟帅,张华,闫勤学,等. 泡沫金属填充率对相变材料强化换热的机理研究[J]. 制冷学报,2021,42(5):127-133.
- [12] 陈光,闫孝红. 一种模拟气液相变过程的相变模型[J]. 化工学报,2020,71(S2):62-69.
- [13] 徐众,侯静,李军,等. 膨胀石墨/有机质复合相变材料的制备及性能[J]. 化工进展,2020,39(7):2758-2767.
- [14] 马勉军,霍红庆,张小青. 月面载荷被动热控技术[J]. 中国空间科学技术,2010,30(5):64-68.
- [15] SWANSON T D, BIRUR G C, NASA thermal control technologies for robotic spacecraft[J]. Applied Thermal Engineering,2003,23(9):1055-1065.

作者简介:胡凤姣(1986—),湖南株洲人,硕士,高级工程师。主要研究方向为热设计。E-mail:hufengjiao1314@163.com