

Research on liquid cooling and phase change material hybrid heat dissipation technology for power supply

Shengsheng Long Liangjun Chen Rui Zhang Tao Lu Mingyu Liao

Guizhou Aerospace Linquan Motor Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550081, China

Abstract

In response to thermal reliability issues caused by the operation of power equipment on weapons systems, this paper proposes a solution combining phase change materials with liquid cooling. First, based on the structural characteristics of the power supply, structural components and phase change materials were selected, and flow channel designs were carried out; then, using ANSYS Workbench thermal simulation technology, the relationship between the flow channel design and optimization of the power supply cold plate, as well as the relationship between phase change materials and cooling effects, was investigated and analyzed; finally, a prototype of a high-power power supply was developed based on the simulation results, and through experiments, the cooling performance of the phase change materials and liquid cooling in two different operating conditions (short-term operation during the payload stage and continuous operation during ground debugging) was evaluated, confirming the feasibility and effectiveness of the proposed solution.

Keywords

phase change material; liquid cooling; heat dissipation; flow channel design; high power supply

面向电源的液冷与相变材料混合散热技术研究

龙胜圣 陈良军 张瑞 路涛 廖鸣宇

贵州航天林泉电机有限公司, 中国·贵州 贵阳 550081

摘要

针对武器装备上电源设备运行时引起的热可靠性问题, 本文提出了相变材料与液冷混合散热的解决方案。首先根据研制电源的结构特点选用了结构件材料和相变材料, 并进行流道设计; 然后利用ANSYS Workbench热仿真技术探究了电源冷板的流道设计与优化、相变材料与散热效果之间的关系, 并进行分析; 最后结合仿真结果研制大功率电源实物样机一台, 并通过开展试验得到了在两种不同工况(弹载阶段短时工作和地面调试阶段持续工作)下电源样机相变材料与液冷混合的散热效果, 证实了所提出方案的可行性和有效性。

关键词

相变材料; 液冷; 散热; 流道设计; 大功率电源

1 引言

为了顺应武器装备的更新换代, 提高武器系统的战术性能, 弹载领域高精度制导已成为一种趋势^[1]。随着各种电子器件朝着轻量化、小型化和集成化的方向发展, 电子器件的热流密度越来越高, 在小型空间内工作会产生较大的损耗, 该损耗通常以热量的形式进行散失, 如果不能及时的对功率器件进行散热, 将会影响整个装备的运行效果, 严重降低了设备的性能和系统的可靠性。据统计, 电子设备失效率有 55% 是由于温度超过电子设备规定最大允许温度而引起的。因此, 为确保设备工作的可靠性, 热设计问题逐渐成为难点和重点^[2]。

根据导热介质的差异, 散热方式可分为液冷、风冷、相变材料散热等。在武器装备领域, 随着系统、设备的复杂化, 单一的散热方法通常不再能满足设备所需的散热需求, 需要耦合多种散热方式, 利用各自的优势实现冷却性能优化^[3]。基于此, 本文设计了一种液冷与相变材料混合散热的可行参考方案应用于大功率电源, 并建立仿真模型分析散热效果, 对其性能进行研究。

2 热设计分析

大功率电源(以下简称“电源”)在弹载装置上的工作时间只有几分钟甚至几十秒钟, 工作时间比较短, 在这个阶段内, 电源的热设计是一个时变的瞬态问题。另一方面, 电源在地面的调试过程中, 需要进行长时间, 多次数的上电测试, 工作时间一般在几分钟甚至几个小时, 在这个阶段内, 电源的热设计是一个稳定工作的稳态问题。电源的运行过程

【作者简介】龙胜圣(1999-), 男, 穿青人, 中国贵州六盘水人, 硕士, 助理工程师, 从事电子科学与技术研究。

中需兼顾弹载装置上的短时运行需求和地面上调试长时间运行的工作需求。

在地面调试阶段,电源经常处于高功率持续工作状态,其自身的冷却资源一般不能满足该工作状态要求。但是,由于该工作阶段主要在地面上进行,因而有较多的散热方式可供选择,比如液冷,风冷等。因电源小体积,高功率密度的设计需求,其一般为高集成度结构,受该限制影响,外界的风冷资源很难通过普通的方式进入电源内部而实现高效散热,若只对电源本体表面进行风冷,则会导致电源内部中心位置因热量无法有效传导而使器件过温失效。液冷则填补了这个空缺,在这种条件下是一种很有效的冷却资源。

在文献^[4]中,为对方形电池散热,采用了流道液冷板,体现了较好的散热效果;Wu等在文献^[5]中详细阐述了液冷散热方式在大规模电化学储能系统的重要应用,优化设计和控制方法,并提出了多种散热技术耦合方法在未来的发展潜力。WILKE等^[6]通过进行实验证明了采用相变材料冷却可以有效地预防电池组发生热失控。

受电源冷板结构尺寸的限制小,其不足之处在于电源冷板与外界水路的互联问题。现如今,随着科学技术的发展和生产需要,自循环液冷冷却系统的出现已解决了电源冷板与外界水路的互联问题,可实现电源冷板和外置的装置热容的连接。

在弹载阶段,电源内部各器件工作时的产热是一个随时间累积的过程,在这个过程中,温度逐渐升高。根据式(1)。

$$Q = \lambda M \Delta T \quad (1)$$

式中:Q为热损耗(单位:J); λ 为比热容(单位:J/(kg·°C)); ΔT 为温升(单位:°C)。一方面,在热损耗一定的情况下,为了得到较低的温升,就要求选取较大即高热容的材料。另一方面,器件的发热需要快速传导至较远处热容,使散热效果最佳。因此,在弹载阶段对高热容,高导热的特性要求较高。

为兼顾像这种多种运行模式下系统的可靠性,近年来有研究者提出了复合型散热的方法。RAO等在文献^[7]中提出了一种相变材料和液冷微通道耦合的方法用于电池管理系统,并对冷却液流量、相变材料温度、相变材料导热系数等对电池模组温控性能的影响进行了分析;Zhang等^[8]针对锂离子电池组工作温度过高或温差过大将导致其容量和寿命降低的问题,设计了一种新型的复合相变材料/液冷/翅片耦合散热系统,通过数值模拟分析了在高温环境下冷却液流向、石蜡中膨胀石墨的百分含量及冷却液流速对该系统散热性能的影响;文献^[9]中为解决动力电池组温度过高和不均匀的问题,设计了复合相变材料与液冷结合的复合电池冷却系统,研究不同参数对动力电池复合冷却系统性能的影响,与单一相变冷却系统相比,复合冷却系统具有较好的环境适应性。

综上所述,电源的热设计应同时考虑两个使用场景,

一是弹载阶段短时工作的高热容,高导热的特性要求,二是要兼顾地面调试阶段高功率持续工作要求,以实现电源热设计的灵活性和可靠性。

3 热设计方案

在大功率电源的研制过程中,可以将散热归结于器件,组件,冷板。器件为发热源,要合理选取并保证其结温在设计范围内;组件为器件,电路板的载体,一般作为传热介质;冷板为组件的散热核心,各种冷却方式通过冷板实现。

3.1 结构件热容消耗式冷却(弹载阶段)

电源结构设计一般体积,重量受限。对于低功耗的热设计,通常利用结构件热容消耗式冷却来进行散热,将结构件作为发热器件的热沉。该冷却方法简单,不需额外设备,但对结构件材料的热容和导热性要求较高,不适用于高功率密度电源持续工况。

3.2 相变材料消耗式冷却(弹载阶段)

结构件热容消耗式冷却效果完全由结构件本身的有限热容决定,只能适用于有限时间,一定热损耗的散热问题。在大多数场景,仅仅依赖于结构件散热是不可靠的,因此需要考虑增加热容量。

相变材料的相变过程可吸收大量潜热,适合作为弹载阶段的散热材料。相变材料主要有固-固、固-液两种。固-固是指一种固体形态相变到另一种固体形态;固-液则是指固体形态相变到液体形态。而固-固相变材料因其材料本身属性、单位质量相变潜热较低的缺点应用较少,固-液相变材料研究和应用较为广泛。

3.3 液冷循环冷却方法(地面调试阶段)

液冷循环冷却方法在高热流密度大功率电源中应用非常广泛,液冷散热具有强大的载热能力,可以满足系统长时间运行。液冷散热通过在电源的结构件内部设计流道,与外部连通。再通过水泵使冷却液在电源内部的流道和外部容器中循环,通过热传递的方式将电源内部的热量导出。这在地面试验时,是非常理想的散热方式。随着冷板加工技术的提高,各种超薄冷板技术已经不是技术壁垒,特别是电火花、扩散焊等技术的应用,冷板流道也变得复杂,功能更完善可靠。

经上述讨论,随着总体要求的变化,特别是小型化、轻量化的要求越来越重要,单一的冷却方式已不适用于各种应用场景的需求,为此,本文提出了采用液冷-相变的混合散热方案。

首先从结构件材料上,考虑到铝的体积比热容和导热系数较为均衡且需满足电源的轻量化和结构强度要求,也是结构件热容消耗式冷却的重要热设计材料,因此选用了铝作为结构件材料。冷板作为其中最重要的散热结构,采用“工”字型结构,冷板由机壳I和机壳II焊接为一个整体,如图1所示。

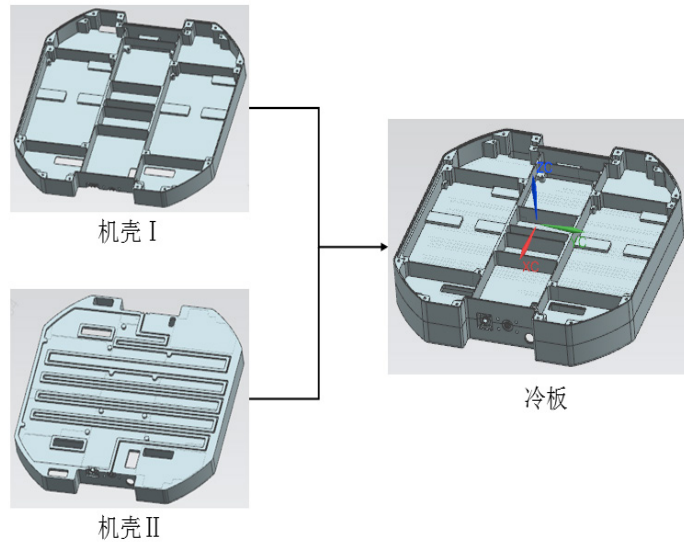


图 1 冷板结构示意图

冷板中的主要腔体设计为发热器件的形状，其余腔体是为了实现轻量化进行减重设计。电源所用功率器件紧贴冷板安装在冷板两侧的腔体中，采用导热性能优越的导热胶将电源器件灌封在腔体内，保证器件与冷板良好接触，提高了导热能力，中间的公共部分作为热沉。流道设计在功率器件底部，当两块机壳焊接在一起后流道周围的间隙即形成相变材料填充腔体，使一块冷板兼具液冷流道和相变材料填充腔体。

液冷流道采用“蛇形流道”设计，填充腔体分布在液冷流道四周，在满足力学应用条件下，流道周围尽可能多地设计填充腔体，最大程度的提升整机热容并减轻整机重量。在生产过程中，将相变材料填充于冷板中，并将填充口密封。液冷流道有进水口和出水口并保持开放，用于后期的液冷散热。以此实现液冷和相变材料混合散热。

相变材料选用固-液种类，包括无机水合盐、有机物等类别。无机水合盐潜热大、熔点固定，不足之处在于其物理和化学性质较为活泼，对金属具有一定的耐腐蚀性要求。同时，反复使用时因结晶水的不稳定性等因素导致性能不

稳定。有机物类化学稳定性好、无毒无腐蚀、潜热值也较为可观，在各个领域均有大规模的应用。据此，选定 70# 微晶蜡作为本次技术研究的相变材料。70# 微晶蜡滴熔点为 (67 ~ 72)℃，是一种无味的蜡状固体，密度约为 0.9g 每立方厘米，比热容为 $(2.14-2.9) \cdot 10^3 \text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，绝缘性能优越，相变热为 (200 ~ 220)J/g，广泛应用于相变材料散热领域，是一种良好的相变材料。

通过讨论不同阶段的工作场景，从结构件材料，冷板结构设计和相变材料选用，确定了电源的热设计方案。将液冷散热和相变材料散热耦合，结合两者的优点，能有效满足弹载阶段轻量化散热和地面调试阶段长时间运行的要求。

4 仿真分析

受试电源选用的器件工作温度范围为 -50℃ ~ +125℃。根据设计方案进行仿真分析，受试电源在弹载阶段工作时无液冷的损耗情况如下：整个工作时间为 280s，状态 1 工作 100s，无热损耗，状态 2 工作 80s，热损耗约为 922W，状态 3 工作 30s，热损耗约为 727W，状态 4 工作 20s，热损耗约为 463W，状态 5 工作 50s，热损耗约为 374W。如图 2 所示。

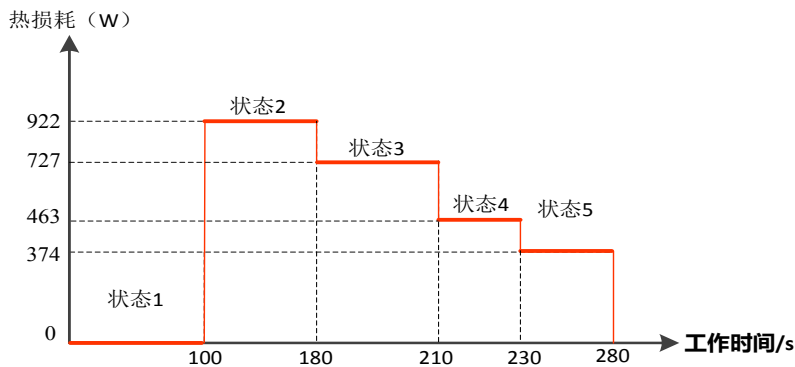


图 2 受试电源工况示意图

据此工况和电源 UG 三维模型在 ANSYS 中进行建模, 得仿真结果如图 3 所示。可知, 在无液冷条件下, 整机温度

最高点为 95.099℃, 电源器件允许的最高温度为 125℃, 仍有约 30℃的温升裕量, 满足热设计要求。

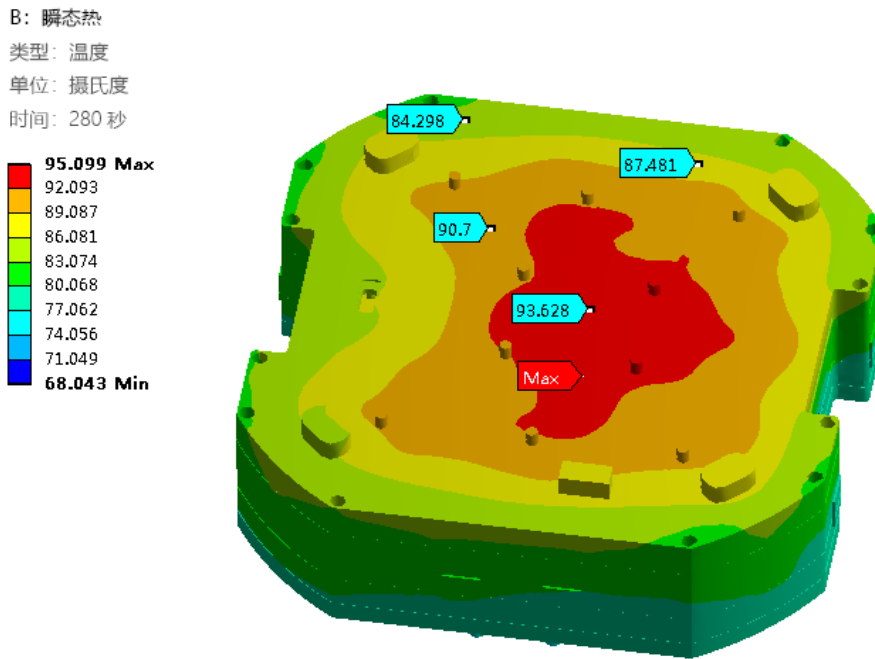


图 3 弹载阶段温升仿真结果

经实物样机验证, 样机在弹载阶段工况结束后, 测得整机温度最高点约为 98℃。在地面调试阶段, 样机可保持长时间持续正常工作, 达到热平衡后, 其温度主要取决于外部冷却资源的设定温度。

5 结论

为兼顾大功率电源在弹载阶段的短时工作要求和地面调试阶段的持续工作要求, 同时针对电源高集成度限制的特点, 本文从结构件材料选择、冷板流道设计、相变材料选择进行了讨论, 结合电源的两种不同工况, 提出了液冷与相变材料混合散热的热设计方案。在弹载阶段, 电源的工作散热依赖于结构件的导热和热容以及相变材料(石蜡)的热容和相变过程吸热; 地面调试阶段, 电源长时间持续工作的散热由与电源互联的外部冷却资源主导, 利用液体循环将电源内部的热量带出。通过在 ANSYS Workbench 中建立仿真模型, 得出电源在弹载阶段工作结束后整机温度最高点小于器件可承受最高温度, 满足工作要求; 在地面调试阶段, 优化了冷板的流道设计保证流道的流量充足, 保证了电源长时间持续正常工作的可靠性。最后, 以设计的实物样机进行实验, 实验表明样机可在两种工况下正常工作, 验证了热设计方案的可行性和有效性。

参考文献

[1] 辛晓峰, 钱吉裕, 夏艳. 有源相控阵导引头的热设计研究[J]. 现代雷达, 2020, 42(10):86-90.

[2] 吴志林, 王涛, 张济众等. 基于无人机航测的防空雷达部署研究[J]. 现代雷达, 2018, 40(3):5-10.

[3] 吴超, 王罗亚, 袁子杰, 马昌龙, 叶季蕾, 吴宇平, 刘丽丽. 液冷散热技术在电化学储能系统中的研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10):1127-1131.

[4] HUO Y T, RAO Z H, LIU X J, et al. Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 89:387-395.

[5] 吴超, 王罗亚, 袁子杰, 马昌龙, 叶季蕾, 吴宇平, 刘丽丽. 液冷散热技术在电化学储能系统中的研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10):1127-1131.

[6] WILKE S, SCHWEITZER B, KHATEEB S, et al. Preventing thermal runaway propagation in lithium-ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study[J]. Journal of Power Sources, 2017, 340:51-59.

[7] RAO Z H, WANG Q C, HUANG C L. Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system[J]. Applied Energy, 2016, 164:659-669.

[8] 张群, 尚小标, 王文博, 等. 基于CPCM-液冷-翅片耦合作用的锂电池高温散热性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(4):82-89.

[9] 吴学红, 郎旭峰, 吕财, 高磊, 刘勇等. 动力电池组复合冷却系统优化及实验研究[J]. 可再生能源, 2022, 40(10):1415-1420.