

散热系统机械设计与制造一体化研究

李 冲

新乡市新豪机电有限公司, 河南 新乡 453000

[摘要]随着高功率密度设备以及高性能电子产品在各个领域的广泛运用,散热系统的性能已然成为决定设备可靠性以及运行效率的关键因素。此文以机械设计与制造一体化理念作为指导方向,从系统总体设计、结构优化以及制造工艺协同这三个层面着手,对散热系统在热传导、气流组织以及材料应用等方面所涉及的关键技术路径展开了相关研究。通过针对热传导路径、风道结构以及散热器几何形态进行综合优化处理,并且结合先进的制造技术以及智能化检测手段,最终形成了一种能够同时兼顾高效散热性能、结构强度以及制造可行性的散热系统一体化设计方案。

[关键词]散热系统;结构设计;一体化制造

DOI: 10.33142/aem.v7i8.17744

中图分类号: TH122

文献标识码: A

Research on the Integration of Mechanical Design and Manufacturing of Heat Dissipation Systems

LI Chong

Xinxiang Xinhao Electromechanical Co., Ltd., Xinxiang, He'nan, 453000, China

Abstract: With the widespread use of high-power density devices and high-performance electronic products in various fields, the performance of heat dissipation systems has become a key factor determining the reliability and operational efficiency of equipment. This article takes the concept of integrated mechanical design and manufacturing as the guiding direction, and starts from three aspects: overall system design, structural optimization, and manufacturing process collaboration. It conducts relevant research on the key technical paths involved in heat conduction, airflow organization, and material application of heat dissipation systems. By comprehensively optimizing the heat conduction path, air duct structure, and geometric shape of the radiator, combined with advanced manufacturing technology and intelligent detection methods, a heat dissipation system integrated design scheme that can simultaneously consider efficient heat dissipation performance, structural strength, and manufacturing feasibility has been developed.

Keywords: cooling system; structural design; integrated manufacturing

引言

现代机械设备以及电子系统当中,热管理方面的问题日渐变成制约系统性能还有寿命的重要因素。伴随功率密度不断升高以及结构集成程度逐步提升,散热系统得在更为有限的空间里面达成更高的传热效率。机械设计与制造一体化理念的引入,能够让散热系统在设计初始阶段就能够同步把制造以及装配方面的因素都考虑进去,进而达成热性能和结构性能的协同最优状态。本文从散热系统的总体原理着手,对其热传导以及气流组织机制展开分析,依据此提出系统性的结构优化方案,同时探讨制造一体化进程中那些关键的技术路径。借助热设计和制造工艺的融合,能够切实有效地缩短产品开发的周期,降低制造的成本,并且大幅度提升系统在热管理性能以及可靠性方面的表现。

1 散热系统的工作原理与总体设计

1.1 散热系统的功能与组成

散热系统关键功能是把热源所产生的热量有效地传出去、散开来,并且释放到所处的环境当中,以此来确保设备能够处于安全的温度范围之内正常运转。它的基本构成包含了热源接触的界面、导热的相关元件、散热器的主体部分以及辅助气流方面的装置等等这些部分。热量会从

热源开始,借助导热材料传递到散热器那里,然后再通过对流还有辐射这两种方式释放到空气或者是液体冷却介质里面。就高功率设备来讲,散热系统不单单要承担起热管理方面的功能,而且还得同时满足机械强度方面的要求、耐腐蚀性的要求以及装配稳定性的要求等等。伴随着一体化设计理念不断地发展,散热系统所具备的功能已经不再是仅仅停留在被动地释放热量这一层面了,而是凭借对结构设计加以优化以及合理匹配材料,达成在热、电、力多场耦合这样条件下能够高效地运行的状态。

1.2 热传导、对流与辐射机理分析

散热系统里的热传递过程,主要涵盖传导、对流以及辐射这三种形式,这些形式一道形成了系统内部能量迁移以及散热效率的关键机制。传导指的是热能在固体材料当中的直接传递流程,它依靠材料的导热系数、厚度、界面接触的状态以及内部晶格结构的有序程度。像铜、铝这类导热系数高的金属,在传导这个环节有着明显的优势,而复合材料还有纳米导热填料的运用,更是让局部热扩散的性能得到了进一步的提升。对流换热是在散热表面和流体(也就是空气或者冷却液)之间发生的,它的效率会受到气流速度、湍流特性、边界层厚度以及散热器几何形状等

方面的影响。通过对风道进行合理的设置并且优化鳍片的排列方式,能够强化流体的扰动,进而提高整体的对流换热系数。辐射换热依靠的是材料表面的发射率、温差以及空间的形态,在高温或者真空这样的环境当中显得尤为重要。这三种方式在系统里面是相互交织在一起的,在其中传导和对流占据着主导地位,而辐射则在特定的工况之下起到辅助的作用。凭借针对热传递机理所开展的定量分析,可以构建起热阻网络模型,以此来对热阻的分布情况以及能量传递的路径展开系统的阐述,从而给结构设计以及性能优化给予科学方面的依据。随着热管、相变材料等导热系数较高的元件被引入进来之后,系统的热传导效率以及均温的能力都获得了明显的提升,再加上配合风道的优化以及鳍片几何方面的调整,不但强化了对流换热的效果,而且还达成了热管理性能的整体平衡以及效率的最大化。

1.3 系统总体设计方案与技术参数

散热系统总体设计要以热负荷分布和散热目标为中心,综合考量传热路径、气流组织以及结构强度等诸多方面因素。在设计进程里,一开始依照热源功率密度还有环境条件来确定散热器类型以及冷却方式,像自然对流、强制对流或者液冷方案这类情况。接着,借助建立三维模型并且联合计算流体力学(CFD)分析的方式,对温度场和流场分布展开模拟操作,以此来确定最为适宜的结构尺寸以及材料搭配组合。在具体参数选取方面,得把控散热器热阻处于 $0.1\sim 0.3^{\circ}\text{C/W}$ 这个区间范围之内,保障热源温度能够稳定保持在安全阈值之下。系统的机械设计还必须符合安装空间、质量限制以及振动工况方面的相关要求,达成热设计和机械结构的有机结合与统一状态。

2 散热系统结构优化设计

2.1 热传导路径优化设计

优化热传导路径需要重新设计热源与散热器之间的热传导路径,如采用多层导热界面材料来降低界面热阻,提升热传导效率。首先,在设计中使用导热硅脂和导热垫片的组合,其中导热硅脂填充微小缝隙,导热垫片提供良好接触表面,组合使用可将界面热阻降低至 $0.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 。其次,在高热流密度区域采用热管进行传导,将热量迅速从热源传递到远离热源的散热鳍片。热管的一端紧贴在热源表面,通过相变传导原理将热量高效传递至远端,从而降低热源附近的温度。在提高底座导热性能的散热器底座上采用铜片镶嵌的方式。暖气片铝制底座上镶嵌铜片,利用铜片导热高的特性,可以极大地提升暖气片底座的导热效能。其次,在暖气片关键位置加入热管网,与暖气片底座紧密结合,采用焊接或内嵌的方式,形成热传导的高效通道。还有,给热管和散热鳍片接触的地方加上高导热的填充材料,如此一来,就能让界面热阻变小一点,确保热量传导能够连贯起来。在设计散热鳍片的时候,一边给鳍片表面做阳极氧化处理,好让散热效率提升起来,另一边

还采用薄片化的样式,把它们高密度地排布起来,以此增加散热的面积。并且,还要通过仿真分析去优化鳍片之间的间距,进而获取到最佳的散热性能。

2.2 风道结构与气流组织优化

风道的设计在散热系统里是提高对流换热效率的重要部分。科学的气流安排一方面能加快散热器表面的流动速度,另一方面又能防止出现局部热堆积的情况。在设计的时候,要依据流体力学方面的原理,针对风道截面的形状、导流板所处的位置以及进排风口的布局展开系统的优化工作。借助引入流线型的导流通道还有分流结构的方式,能够让气流在散热器鳍片之间形成较为均匀的流场,从而降低死区以及回流区存在的可能性。实际操作显示,在确保风量相同的情况下,经过优化之后的风道结构可以让散热效率提升 $15\%\sim 20\%$ 。而且,还需要凭借数值仿真的手段来分析气流速度场和温度场之间的耦合关联,对风机的转速以及气流的方向做出相应的调整,进而达成噪声、功耗以及散热性能之间的平衡状态。风道结构的优化在注重装配可行性的也要考虑到维护的便利性,通过采用模块化的设计方式来满足多样化的应用需求,给系统的一体化制造给予强有力的支撑。

2.3 散热器结构创新与材料应用

散热器是热量释放的关键部件,它的结构以及所选用的材料会直接影响到系统的整体性能表现^[1]。传统的铝制散热器虽说有着重量比较轻、导热性能较好以及成本相对较低等诸多优点,然而在高热流密度的条件之下,它很容易出现局部过热的情况。针对这一状况,可以考虑采用铜-铝复合结构的设计方案,具体来讲就是以铜作为底板,而把铝当作鳍片,如此一来便能够做到既具备较高的导热性能又能够实现轻量化的目标。除此之外,新型的复合导热材料,像是石墨烯增强的铝合金、碳纳米管填充的材料等,正在逐步变成相关研究领域的热点所在,这些新型材料能够在很大程度上降低热阻,并且还能进一步提升耐高温方面的性能。从结构创新的角度来看,通过改变鳍片的形状以及排列的方式,举例来说像采用波纹鳍片、针状鳍片或者微通道结构等形式,可以有效地增加传热的面积,同时也能提高湍流的强度。先进的散热器往往会将拓扑优化算法和增材制造技术相结合,以此来达成对复杂几何形态进行高精度加工的目的,进而实现极限散热性能与结构强度的统一。

2.4 结构轻量化与模块化设计

在保证散热性能能够得以满足的条件之下,去达成系统方面的轻量化以及模块化,这已然成为现代机械设计当中极为重要的一项目标所在。轻量化这其不但有益于削减设备的整体能耗,而且对于材料成本的降低同样是有帮助的,除此之外,它还能够促使系统的动态响应性能以及结构稳定性都得到进一步的提升。在设计的具体过程之中,可以通过实施材料方面的替代操作、开展拓扑优化相关工

作以及对壁厚做出调整等不同的方式方法,以此来削减那些没有实际作用的质量部分。比如说,在要满足机械强度所提出的要求这种情况之下,可以把散热器的主体部分从原本使用整块铝材的情况替换成采用中空蜂窝式的结构形式,如此一来,就能够使得质量减少 30%以上。与此模块化的设计理念能够让散热系统拥有快速装配这样的一种优势,而且还具备可维护性的长处。借助标准化的接口以及可以进行插拔操作的模块,便可以在不同功率等级以及各种各样的应用场景之下实现快速的配置操作。模块化结构本身还能够对生产流程起到简化的作用,进而让机械加工以及装配工艺都能够实现标准化,从而为制造一体化给予更为灵活的技术层面的支撑。

3 散热系统制造一体化设计与工艺研究

3.1 一体化设计理念与工艺原则

机械设计与制造一体化乃是现代工程设计所朝着的发展方向,其关键之处就在于把设计环节、工艺环节、装配环节以及检测环节紧密地结合到一起,以此达成设计可制造性同产品性能的协同优化效果。就散热系统所具有的特殊性而言,一体化设计应当从材料的选择、结构的形式一直到工艺路径,全整个流程都去考量热传导效率和加工精度二者之间的平衡关系^[2]。在设计阶段当中,需要运用三维数字化建模以及虚拟装配方面的技术,针对关键零部件的尺寸公差、热变形情况以及连接方式等展开仿真验证工作,进而降低制造出现的误差以及装配产生的干涉现象。一体化设计遵循的原则包含了功能集成、工艺简化还有可维护性优先这几个方面,以此来保障散热系统在能够满足热性能要求的基础上,还拥有不错的生产可行性以及经济性方面的特性。

3.2 关键部件制造与装配工艺

在散热系统里,关键部件的制造精度对传热性能以及整体装配质量有着直接影响。像热管、散热底板还有鳍片这类元件,在加工的时候得用高精度数控铣削、真空钎焊以及高能激光焊接等比较先进的工艺,以此来保证导热路径能够保持连续性,并且结合面也得是平整的^[3]。对于铜铝复合结构而言,运用爆炸复合或者超声焊接技术,可以有效地防止界面出现氧化情况,进而提升热导率。在装配的过程中,必须要严格把控压紧力以及界面接触的状态,避免因为装配偏差而使得热阻有所上升。现代的装配工艺往往会引入自动化定位系统还有机器人辅助装配技术,凭借视觉识别以及力控反馈,达成高精度且一致性很好的装配效果。

3.3 智能制造与质量检测技术

在制造一体化进程里,智能制造技术得到广泛应用,

这使得散热系统生产的精度、效率以及整体可控性都获得了明显提升。借助引入工业互联网、物联网感知设备还有大数据分析平台,能够针对制造过程中那些关键参数展开实时监控与动态优化,进而达成对加工状态、温度、压力以及设备运行状况的全方位把控。智能制造系统可在线反馈加工偏差,并且会结合算法模型适时修正,以此来保证散热结构在尺寸精度、几何形状以及表面质量等方面都能够满足设计要求,同时也可减少人为操作误差以及生产损耗。在质量检测方面,除了传统几何尺寸测量以及表面粗糙度检测之外,还应当广泛运用红外热成像、非接触式热阻测试以及超声检测等先进技术,对散热器的导热性能、热分布均匀性以及装配质量实施快速且精准的评定。这样的智能化、多维度检测方式,一方面大大提高了检测精度与效率,另一方面能将检测数据实时反馈至制造环节,从而实现从设计、加工直至检测的闭环优化,让生产过程变得更加可追溯且可控。凭借智能制造与智能检测技术的深度融合,散热系统在性能一致性、可靠性以及制造质量方面均实现了全面提升,给机械设计与制造一体化给予了稳固的技术保障,也为未来高性能散热系统的批量化、标准化生产打下了基础。

4 结语

散热系统机械设计与制造一体化研究显示,唯有立足于热管理机理剖析、结构优化设计以及制造工艺协同等方面,才可达成散热性能、结构强度和制造经济性的整体最优状态。凭借引入先进材料以及数字化制造技术,散热系统设计正从依靠经验的状态逐渐转变为由数据驱动以及仿真验证所推动的模式,进而达成了高效、智能且具备可持续性的技术路径。在未来,伴随人工智能、增材制造以及多物理场仿真技术的持续发展,散热系统的一体化设计会变得更加智能化、柔性化并更具生态性,从而给高端装备制造以及电子产业奠定稳固的热管理基础。

[参考文献]

- [1]梁伟波.整机散热系统机械结构设计的性能分析与改进[J].现代制造技术与装备,2024,60(7):79-81.
- [2]梁国宝,林博,韦海,等.工程机械散热系统匹配设计的准确性提升研究[J].工程机械,2022,53(2):13-18.
- [3]时伟,周忠博,乔锐,等.一种工程机械的散热系统及控制方法[J].工程机械,2023,54(12):10-13.

作者简介:李冲(1983.8—),毕业于河南科技大学,所学专业:机械设计制造及其自动化,就单位:新乡市新豪机电有限公司,职务:技术部长,现有职称:中级工程师。