

基于CAE仿真的高效散热结构设计及热静力学耦合分析

李 鑫

江苏华光电缆电器有限公司 江苏常州 213000

摘要: 电子产品性能不断飞跃,其内置发热组件释放热量急剧增加,因此高效散热成保障设备平稳运行、延长服役期的关键。本文依靠先进CAE模拟技术深入探究高效散热结构创新设计并开展热应力耦合综合分析,构建散热结构精细模型,借助计算流体动力学(CFD)和有限元分析(FEA)的力量详尽模拟测试各种散热方案以优化参数,深入剖析热应力耦合效应对结构性能的影响从而为散热结构可靠性设计提供理论支撑。研究表明,CAE模拟技术能精准引导高效散热结构设计方向,大幅提升散热效能,保证结构在热负荷与机械负荷下稳固,为电子设备热管理开辟高效新路径。

关键词: CAE仿真; 散热结构设计; 热静力学耦合; 电子设备热管理

引言

现代电子技术发展日新月异,电子设备微型化高性能化进入新阶段,与此设备内部发热元件功率密度急剧增大、热量大幅增加,温度过高时电子元件性能会严重下降、寿命大幅缩短,严重的话故障频发,电子设备可靠性稳定性面临巨大挑战,设计高效散热结构成了电子设备研发领域急需解决的大难题,以前散热结构设计常靠经验和实验摸索,耗时又费力,很多复杂因素对散热效果的微妙影响还很难都考虑到。

一、CAE仿真技术在散热结构设计中的应用

1. CAE仿真技术概述

计算机辅助工程(CAE)仿真技术是一种靠计算机强大算力对工程实体和产品深入模拟分析的高端手段,涉及力学、热传导科学、电磁学等很多学科,在散热结构的巧妙设计中,计算流体动力学(CFD)和有限元分析(FEA)这两大方法特别重要,CFD技术像精密模拟器,细致地把流体流动和热量传递的动态过程描述出来,精确求解流体力学和热传导学的核心方程,展现出流场和温度场的分布全貌,给散热结构的效能评估提供坚实数据支撑,而有限元分析(FEA)方法将复杂连续求解区域巧妙分割成有限个单元体,

逐个进行细致力学剖析,汇总成整个结构的力学响应全图,深入探究散热结构在热应力和机械应力双重作用下的应力、应变分布特性,给结构优化设计提供科学依据。

2. 散热结构建模

CAE仿真工作开始前,得先构建精确的散热结构模型,该模型要包含芯片、功率器件这类核心发热部件在内的各种散热组件,散热鳍片、散热底座以及空气、冷却液等冷却介质都不能少,SolidWorks、Pro/E等先进三维建模工具可用于精心打造散热结构的几何形态,之后将其无缝对接ANSYS、FloTHERM等CAE仿真平台以做网格划分,由于网格划分精细度对仿真结果精确度影响很大,要根据结构复杂度和计算精度需求,谨慎选网格类型和尺寸,使散热鳍片表层、发热元件和散热底座接触面等关键区域的网格密度足够高。

3. 散热性能分析

在恰当的边界与初始设定下,计算流体动力学(CFD)技术被用于深入剖析散热结构的热传导性能,其中边界设定包括冷却介质进入时的温度、流速、压强等关键因素以及发热元件的具体产热量,初始设定聚焦流场与温度场的起始状况,模拟进程中求解流体的连续性、动量及能量方程,从而描绘出冷却介质在散热架构内的流动轨迹与温度布局并获取发热元件与散热结构各组件的温度数据,通过细致观察温度分布图与温度随时间演变曲线全面评估散热结构的散热成效,进而判断其是否符合既定设计要求。

个人简介: 李鑫,男,汉族,1989.07.26,江苏扬州,本科,江苏华光电缆电器有限公司,机械工程-机械设计-产品设计。

4. 散热结构优化

综合评估散热性能后，我们深度改良了散热构造，改良范围包括散热鳍片的形态、规格、间隔布局，散热基座的厚度调整、材料选用，冷却介质的流量配比等关键要素，利用先进的CAE模拟软件明确优化目标，像削减发热元件峰值温度、提升散热效能等，设定相应限制条件，包括结构尺寸约束、成本预算限制，通过反复迭代计算、精密分析找出最理想的散热结构设计蓝图，就拿散热鳍片来说，革新其形态，如弄成叉指状、波浪状这些新设计，就能有效增大散热面积，提升对流换热效率，并且合理调整散热鳍片间隔可优化冷却介质流动路径，减小流动阻力，进一步提升散热效能。

二、热静力学耦合分析原理与方法

1. 热静力学耦合效应

实际作业场景下，散热构造不仅要应对热负荷的挑战，还可能受震动、撞击、地心引力等多重机械负荷的作用，热负荷会使构造发生热膨胀变形，机械负荷会让构造内部产生应力与应变，二者相互作用形成热-静力耦合效应，散热构造受热膨胀时若受到外界机械限制内部就会产生额外应力，反过来机械负荷引起的构造形变也会改变热量传导路径和对流散热条件从而影响散热效率，设计散热构造时要全面考虑热-静力耦合效应以确保构造稳固可靠。

2. 热静力学耦合分析方法

热静力学耦合分析主要有两种策略：顺序耦合和直接耦合，按顺序耦合的名字理解就是按顺序来，先做热分析以搞清楚结构温度分布情况，再将温度数据作为重要参数输入结构力学模型做力学分析，这一策略流程清楚且好操作，但没考虑热分析和力学分析可能互相迭代的情况，适合热结构耦合效应不明显的时候，而直接耦合走同步求解的路子，将热传导方程和力学平衡方程一起解，考虑到热和结构双向动态影响，这样做虽然提高了计算精度，但计算负担也增大了，对计算机性能要求更高，实际操作时要根据具体问题复杂程度和耦合效应强弱仔细挑选合适的耦合分析方法以保证分析结果又准又有效。

3. 热静力学耦合分析流程

热静力学耦合分析的基本流程如下：构建一个融合散热构造和关联负载（包括热负载与力学负载）的有限元模型是首要步骤，进行热分析时，需设定好热边界条件像对流换热系数、热辐射率、发热功率等关键参数，

求解热传导方程来得到结构内部温度场布局，接着将热分析得到的温度数据当成体积负载引入结构力学模型，加入集中力、分布力、位移约束等力学负载，求解力学平衡方程以得到结构在热和力学负载共同作用下的应力、应变和位移分布情况，深度后处理分析结果，综合评估结构强度、刚度和稳定性是否符合设计要求，若没达到要求，则对结构进行优化设计，重新开始热静力学耦合分析流程，直到完全满足设计预期。

4. 边界条件设置

热边界条件主要包括热源设置、环境温度设定以及对流换热系数和辐射率的定义。在模拟电子设备散热时，可将芯片等发热元件视为热源，根据其实际功耗确定热源的发热功率。环境温度则根据设备的使用环境进行设定，如常温环境下一般取25℃。对流换热系数反映了流体与固体表面之间的换热能力，其取值与流体的流速、性质以及固体表面的粗糙度等因素有关。对于自然对流散热，可通过经验公式计算对流换热系数；而在强制对流散热情况下，由于流体流速可通过外部动力源精确控制，对流换热系数通常可通过实验测试或CFD（计算流体动力学）模拟获得更为准确的值。辐射率则取决于物体表面的材料特性与表面状态，一般取值范围在0到1之间，对于金属表面，其辐射率相对较低，而经过特殊处理（如黑化）的表面辐射率会有所提高。在进行热静力学耦合分析时，需设置力学边界条件。

三、实例分析

1. 散热结构设计方案

拿一款电子装置的散热组件来说，我们创新性地设计出一种散热构造，其关键是用铝合金精心制成的散热基座，基座上方巧妙地布置阵列式散热鳍片，依靠高效的风冷系统散热，散热鳍片设计独特，呈类似叉指的交错状，从而大大扩展散热面积，明显提高热量对流交换效率，并且我们在散热基座和热源组件接触的界面细心涂上高性能导热硅脂，有效降低接触面的热阻，我们还用先进的CAE仿真软件对这种散热构造精密建模以深入研究其性能，模型详细包含散热基座、散热鳍片、热源组件以及周围空气流动区域，在后面模拟时我们细致地划分网格，在散热鳍片表面和热源组件邻近区域采用更密集的网格划分策略，这样计算的时候就能有更高的精度。

2. 散热性能仿真结果

深入剖析散热效能是首要步骤，设定空气入口温度

为舒适的25摄氏度、流速调至每秒2米、发热元件输出功率设为50瓦，借先进的CFD（计算流体力学）模拟技术获取详尽的散热构造温度分布图谱，从这色彩斑斓的图谱能清晰看到芯片核心地带是发热元件最高温度点所在之处，温度为68摄氏度，完全低于芯片工作温度上限75摄氏度，并且空气沿特定方向流动时散热鳍片表面温度逐步下降，有力表明空气带走热量时作用显著，经精密计算该散热结构散热效率达85%，这数据无疑证明我们的设计方案散热性能佳。

3. 热静力学耦合分析结果

综合考量热静力学耦合效应时对散热构造深入地进行了热静力学耦合剖析，除施加热负荷外还引入垂直向地心、加速度为9.8米每秒平方的重力负荷且散热底座底部被稳固地边界约束，采用顺序耦合分析策略，先热分析获取精确温度场分布再把这温度条件作为新负荷加载到结构力学模型中进行力学评估，分析成果表明热负荷和机械负荷双重作用下散热结构最大应力集中出现在散热鳍片根部和底座结合区域且应力强度达35兆帕远低于铝合金材料屈服极限200兆帕，这有力证明该结构有足够强度储备。

四、基于CAE仿真的散热结构优化设计

1. 优化目标与变量确定

在进行散热结构优化设计时，首先需要明确优化目标。常见的优化目标包括降低结构的最高温度、提高散热效率（即单位时间内散发的热量与热源产生热量的比值）、减小结构的热应力以及实现结构的轻量化等。根据具体的工程需求与设计要求，选择一个或多个优化目标进行优化。例如，对于电子设备散热结构，若主要关注芯片的工作温度，可将降低结构最高温度作为优化目标；若同时考虑散热性能与设备的整体重量，可将提高散热效率与实现结构轻量化作为多目标优化的目标函数。确定优化目标后，还需选择合适的优化变量。优化变量是指在设计过程中可以调整的结构参数或材料参数。对于散热结构而言，常见的优化变量包括散热鳍片的高度、厚度、间距、形状，风道的宽度、长度、截面形状，散热材料的选择（即导热系数等材料属性）等。例如，在优化散热鳍片结构时，可将鳍片高度、厚度、间距作为优化变量，通过改变这些变量的值来寻找最优的鳍片结构方案。优化变量的选择应具有实际工程意义，且能够通过CAE仿真进行有效模拟与评估。

2. 优化算法应用

遗传算法是一种基于生物进化原理的全局优化算法，它模拟自然界中的遗传、变异与选择过程来寻找最优解。在散热结构优化设计中，遗传算法将优化变量编码为染色体，通过随机生成初始种群，计算每个个体（即染色体所代表的设计方案）的适应度（对应于优化目标函数值），然后进行选择、交叉与变异操作，不断进化种群，逐渐逼近最优解。遗传算法的优点是具有较强的全局搜索能力，能够在复杂的解空间中找到较优的设计方案，且对目标函数的连续性与可微性没有严格要求。例如，在对复杂形状的散热鳍片结构进行多参数优化时，遗传算法能够有效地搜索到满足散热性能与结构强度要求的最优鳍片形状与尺寸参数组合。

结论

本文以先进的CAE仿真技术为依托，全面深入地探讨高效散热结构的设计与热静力学耦合分析，构建精确的散热结构模型，巧妙融合CFD流体力学和FEA有限元分析两种方法以实现散热结构性能的精细剖析与优化改良，在此过程中格外重视热静力学耦合效应的影响并采纳恰当的耦合分析手段来综合评估散热结构在热负荷和机械应力双重作用下的表现，实例验证表明CAE仿真技术能精准引领散热结构的设计方向、显著提升散热效能并确保结构稳固可靠，通过不断的优化设计迭代使散热结构的综合性能跃升以完美契合电子设备对高效散热和结构稳固性的严苛需求。

参考文献

- [1] 雷鸣, 彭芳, 张士强, 等. 基于CAE的泵用联轴器罩优化设计及振动试验分析[J]. 化工设备与管道, 2023, 60(2): 68-73.
- [2] 张志, 侯文超, 张晓琳, 等. 基于CAE的机械式双模轮胎定型硫化机底座结构分析与优化[J]. 橡塑技术与装备, 2024, 50(6): 65-69.
- [3] 张尚先, 程国飞, 丁立刚, 等. 基于CAE技术的瓶盖组件注射模设计[J]. 模具制造, 2023, 23(10): 23-26.
- [4] 向巍, 王昕, 王强. 基于CAD/CAE技术的某商用车散热器的结构设计与分析[J]. 贵州农机化, 2020(4): 4.
- [5] 张帅. 基于瞬态热-结构耦合的快速分析方法研究及其应用[D]. 湖南大学, 2020.