

CPU 空气强迫对流冷却系统设计

周建辉¹, 杨春信¹, AI QI², 鲁俊勇²

(1. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100083; 2. 奇宏电子(深圳)有限公司, 广东深圳 518104)

摘 要: 根据空气强迫对流冷却系统一体化设计理念, 对 9238CPU 风扇进行空气动力设计, 由 Fortran 程序输出三维空间曲线文件, 导入 Pro/E 实现实体造型. 通过标准风洞对 CNC 铣床雕刻出的样品进行风扇性能测试. 根据风扇数值模拟结果(风扇出口流场特性)设计系列放射状散热器. 采用分块六面体网格技术, 应用多参考旋转坐标系模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型对风扇和曲线型散热器进行整体数值模拟, 模拟结果表明曲线型散热器相对传统垂直型散热器热阻值降低 15.9%, 最后通过实验证明数值模拟的可信性. 一体化设计思想指导下的系列散热器能达到高性能散热效果.

关键词: 计算流体力学; 熵产最小化原理; 一体化设计; 风扇; 曲线型散热器

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 08-1592-06

CPU Air Forced Convection Cooling Systems Design

ZHOU Jian-hui¹, YANG Chun-xin¹, AI QI², LU Jun-yong²

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Asia Vital Components Co. Ltd, Shenzhen, Guangdong 518104, China)

Abstract: According to integration design concept of forced air convection cooling system aerodynamic design of small axial-flow 9238 fan for the CPU is implemented. File of 3D curves which are produced from Fortran procedure are imported into Pro/E to build solid modeling. The performance curve of fan prototype which is fabricated by CNC is measured in a standard wind tunnel. To reduce costs and shorten the design time, CFD is carried out to predict the performance of fan. According to outflow angle of fan series of radial heat sinks are developed. Based on the hexahedral block-grid strategy the numerical simulation is carried out on systems of fan and streamlined heat sink with Multiple Rotating Reference Frame and RNG $k-\epsilon$ Model. Results show that resistance of the streamlined heat sink reduces by 15.9% when compared to the traditional heat sink. The numerical simulation proves to be true by the experiment. Series of heat sinks can reach the aim of high thermal exchange effect under the direction of the integration design concept.

Key words: computational fluid dynamics (CFD); entropy generation minimization (EGM); integration design; fan; streamlined heat sink

1 引言

在科技发达的 21 世纪, 电子组件制造技术都朝轻、薄、短、小的方向发展, 电子设备的结构设计也趋向紧密性, 这种趋势会使得单位容积下热载荷急剧增加, 因此必须配置适当的散热装置将热量排除, 以维持组件运转的稳定性与可靠性. 在中央处理器 (CPU) 中, 最常使用的散热装置是以散热器搭配风扇构成的散热组件, 它可以为 CPU 提供良好的散热效果.

目前 CPU 散热研究主要集中在芯片内部微结构^[1]和散热器的传热设计^[2,3], 旋转机械的研究偏重于大型

风机和水泵^[4], 对小型风扇设计和对流散热冷却系统(风扇与散热器)的一体化设计研究并不多. 风扇与散热器一体化设计是当前空气强迫对流散热极端化设计的必然趋势. 根据风扇出口流场分布设计的曲线型散热器内部流动比较平顺, 流场与温度场协调, 改善了换热效果的同时降低了流动阻力, 整体设计的散热器熵产减少, 风扇的有用功损失降低. 同时相对风扇而言, 曲线型散热器可以起到静导叶的作用, 改善了风扇外特性和降低风扇散热器组件噪音.

本文研究内容主要包括两大部分(1) 风扇研究: 提出小型轴流风扇的设计流程, 对 9238CPU 风扇进行空气

动力设计和流场计算,通过实验验证数值模拟的合理性;(2)散热器研究:根据 9238 风扇出风口流场特性,设计出曲线型散热器并进行整体数值模拟。在相同体积设计条件下与斜/直型散热器作性能比较,验证一体化设计的合理性。发展和设计出系列放射状散热器(曲线加底板型和涡轮型),利用整体数值模拟通过熵产原理对系列放射状散热器性能做出评估和解释。最后通过实验验证数值模拟的可靠性。

2 CPU 风扇设计研究

2.1 CPU 风扇设计流程

风扇是整个散热系统的中枢,肩负着将热气流吹走的重任。本文根据流体机械原理与大型风扇的设计概念,由空气动力特性计算得到符合小型风扇低流速特点的空气动力参数,以 NACA 翼型设计出所需的风扇叶形。然后利用 Pro/E 软件将设计的扇叶与外框绘成三维实体模型并转换成 CNC 加工程序文件,利用 CNC 铣床进行加工做出风扇原型。再利用符合美国空气移控协会测试标准所设计的风洞进行风扇性能测试。为减少费时的实验证实及昂贵模型制作,用数值模拟将风扇内部流动情况和 P-Q 曲线表现出来,作为叶轮设计初期判断。经过各项参数的修正,重复数值模拟,判断是否产生平顺场及符合 P-Q 要求的气动性能,经数值模拟与设计参数的反复修正,确符合设计目标的风扇外型。用数值模拟可以缩短整个设计过程的时间,提升风扇竞争能力和降低研发成本等。详细的风扇设计流程见图 1。

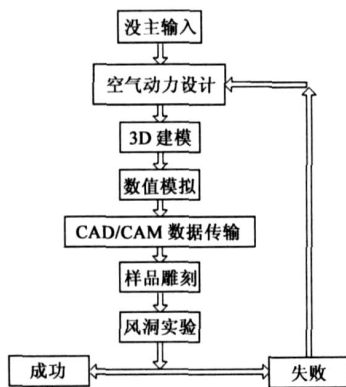


图 1 小型轴流 CPU 风扇设计流程

2.2 CPU 风扇设计

2.2.1 风扇叶片气动设计

CPU 风扇设计相对于大型风机有其独特之处:受机箱和马达空间限制及 CPU 生产商指定要求,轮毂高度和直径,叶轮外径基本上是给定的,由设计计算得到的轮毂比仅仅用来参考。具体的空气动力设计如下:

- (1) 确认已知条件:静压、流量、转速、轮毂直径和叶轮外径。
- (2) 计算动压、全压、叶轮外圆周速度、比转速、流量和全压系数以及轮毂比。
- (3) 确定计算截面半径和圆周速度。

(4) 根据各截面压头和轴面速度分布作进、出口速度三角形。

(5) 选择翼型。

(6) 计算各截面气流参数和叶片几何尺寸。

(7) 为了改善叶片的受力状况,各个计算截面的叶型径向叠合,采用重心对齐方式。同时采用按旋转方向线性增加前倾角的前倾叶片造型技术。

2.2.2 风扇叶轮实体造型

从上面的轴流风扇空气动力设计过程可以得到风扇叶轮的气流和几何结构参数。接下来通过坐标变换将各个截面的空间直角坐标转换成柱面坐标,空间平面曲线转换成三维曲线,以上空气动力设计和坐标转换两个过程通过 Fortran 语言编制成轴流风扇设计软件包,输出成可被 Pro/E 接收的 .IBL 文件。最后在 Pro/E 中,将由点所构成的曲线,做成曲面,旋转阵列单个叶片曲面然后转换成实体。

采用上述方法设计出的风扇的主要性能参数和几何结构参数见如下表 1 和 2,叶轮如图 2 所示。

表 1 Intel BXT 构架 CPU130W、DS09238 风扇的主要性能参数

转速 (rpm)	最大静压 (mmH ₂ O)	最大流量 (CFM)	进口速度 (m/s)	电压 (V)	电流 (A)
5000	16.3	103	6.7	12	0.55

表 2 DS09238 风扇几何结构参数 单位(mm)

叶轮 半径	轮毂 半径	叶片 数	轮毂 高	叶顶 尖隙	弦长		安装角(°)	
					叶根	叶顶	叶根	叶顶
43	18	5	23	1.25	30	50	42	35

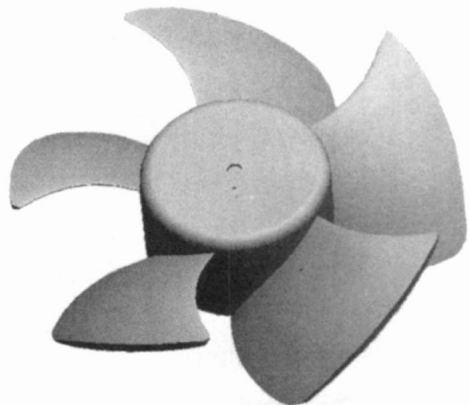


图 2 风扇叶轮实体模型

2.3 风洞实验

测试风扇性能采用 AMCA 210-85 规范的出口式风洞(参见图 3),主要包括主体、整流板、多喷嘴、辅助风机、风量调节装置。其中主体、整流板与多喷嘴提供良好稳定测量流场,可以得到完整的性能曲线。辅助风机及风量调节装置是不可或缺的。同时测量仪器、数据存取设备及其他辅助设备,其完整性对测量结果有密不可分关系,故应对其使用范围特别留意。

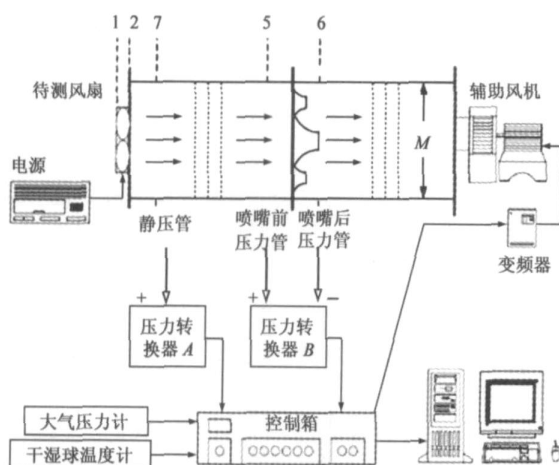


图3 实验装置示意图

2.4 数值模拟

2.4.1 计算区域及网格划分

按照 AMCA-210-85 标准测试规范建立起数值风洞模型,如图4所示。

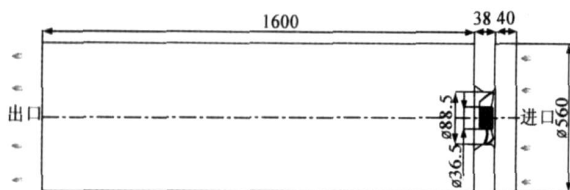


图4 数值风洞模型平面示意图

由于物理模型具有周期性,本文选取1/5作为计算区域,采用ICEM-CFD划分六面体网格,叶轮壁面网格尺寸0.9mm。实际生成的网格如图5所示,共生成约8万网格,可以保证计算结果网格无关性。

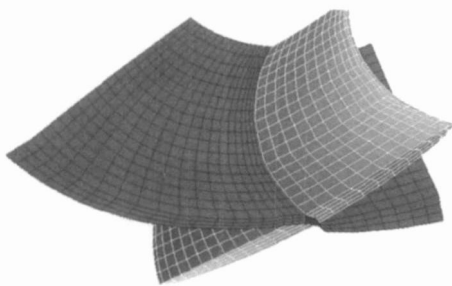


图5 风扇网格划分

2.4.2 边界条件和相关设置

所需要的边界条件主要有:

(1) 压力进口边界:进口总压为0 mm H₂O,湍流强度0.05和水力直径560mm。

(2) 压力出口边界条件:可以通过调节背压来获得不同工况。

(3) 流体运动条件:将叶轮段流体设置为运动流体,旋转速度为风扇叶轮转速5000rpm。进出口段流体为绝对静止流体。

(4) 固壁边界:风道内壁面及叶片均取壁面边界条

件。采用壁面函数法可以避免在壁面附近采用过细的网格。

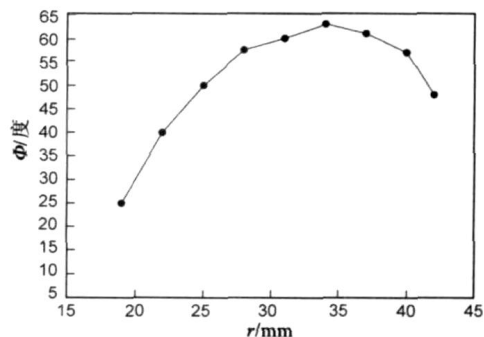
(5) 周期边界:由于只计算1/5流道,所以采用了周期性边界条件。

CPU风扇的进、出口气流方向均为轴向,气流为稳定流动,气体不可压缩。由于空气流速较大,在计算中忽视了重力对流场影响。在Fluent中采用RNG $k-\epsilon$ 湍流模型^[5]和多参考系坐标模型(MRF)。

计算机配置:CPU为P4 3.0G,内存2G。对于低背压,每一个工况计算大约需要2000次迭代就能达到收敛(收敛准则为 $10e-4$),计算时间约为60分钟。高背压时收敛比较慢。

2.4.3 计算结果讨论和误差分析

(1) 风扇出口径向柱面流场分布:风扇出口流场因风扇旋转,使得风扇流道内的流体受旋转力的作用,造成速度分量沿旋转中心轴旋转切线射出,因此出风口处流线并非垂直向下与中心轴平行。由图6可以看到在不同半径下流场流向角变化情况。

图6 4mmH₂O背压工况下风扇出口速度角

(2) 风扇外特性曲线

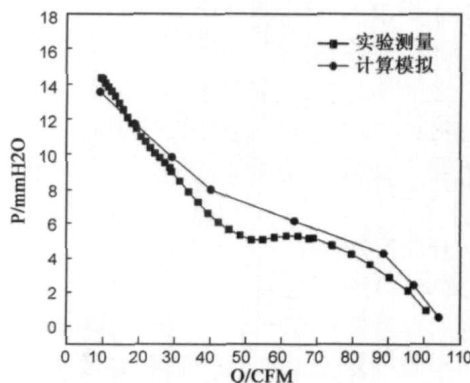


图7 风扇外特性曲线

图7给出了转速 $n=5000\text{rpm}$ 下计算和实验得到的流量-静压曲线。由图中可以看出,CFD计算的特性曲线与实验特性曲线的趋势吻合得比较好,在具体数量上有一定的误差。在设计工况点的静压数值模拟值与试验值间的相对误差为1.8%,而在非设计工况点的相对误差相对较大,但最大相对误差值为10%。

(3) 误差分析

数值模拟具有可重复性优点,目前数值模拟结果与实验对比有一定误差,其误差原因可能存在如下几方面:(a)物理模型:因采用周期性边界条件,没有考虑风架框架的支架和切口影响。(b)数学模型:本文采用的 MRF 模型、RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和壁面函数法有其自身约束,这将增大模拟值和实验值的差距。(c)风洞实验方面:风扇本身转速存在飘移,无法固定在定转速运转;实验本身的校对性;多数的被测体本身的不完整,如模型与 CNC 加工中几何外型的偏差。

3 散热器研究

3.1 系列放射状散热器设计

一般传统 CPU 散热器肋片大都是笔直的,风扇出口流场不是均匀流,存在一定流向角流体进入笔直肋片的散热器流道时,由于受阻会在肋片上方会产生回流,无法顺利地进入散热器底端将热量带走,此时流场与单体风扇流场状况有一定差距。本文设计的散热器肋片外形为顺着风扇出风口流场流线,能够将冷空气气流平顺地送到散热器底部,快速有效地将热量散开。以 9238 风扇出口流向角作为曲线型散热器设计参考,设计出来的曲线型散热器如图 8 所示,具体设计参数如表 3 所示。

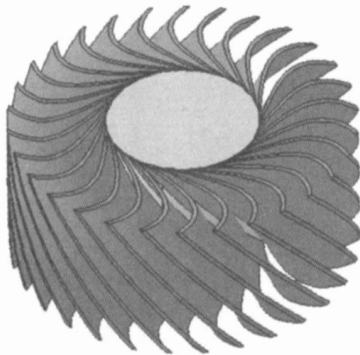


图 8 曲线型散热器

由于风扇轮毂下方区域几乎无流速,同时考虑到固体的快速导热效应,将中心圆柱区域设计为铜柱。利用铜的高导热性快速将 CPU 热量从底部抽出,通过曲线形肋片的对流换热传给周围空气。为了降低加工难度和减少数值模拟工作量,本文只设计了肋片数较少的情况,具体的散热器结构尺寸优化在进一步研究工作中展开。

表 3 曲线型散热器设计参数 单位:mm

	材料	高度	肋片厚度	铜柱半径	散热器外半径	肋片数
曲线型	铜	36	1	19	43	30

本文接着发展了系列放射状散热器:斜板型、曲线加底座型和涡轮型。考虑到加工制作的难易度和成本,本文在相同体积等条件下设计加工了传统的垂直型肋片散热器,用于实验以证明数值模拟的可靠性。

(1)斜板型散热器设计:根据风扇在出风口处流场状况,取半径加权流向出口平均角 55 度作为斜板肋片设计参数。

(2)曲线加底座型散热器设计:为了使沿肋片半径方向上温度分布更加均匀的目的,在散热器底部添加 2mm 圆盘铜板,散热器总体尺寸与原来相同。

(3)涡轮型散热器设计:为了改善中心圆柱根部区域的散热环境,采用中心圆柱流线型壁面的散热器设计方案,避免出现流动死区和热量累积。

3.2 放射状散热器整体数值模拟

3.2.1 物理模型与网格

用 CATIA 建立外框、放射状散热器与 9283 轴流风扇物理模型(如图 9),风扇框架、CPU 和外框几何尺寸见表 4。采用分块网格技术,用 ICEM 六面体网格分别划分风扇和放射状散热器区域网格(网格量分别 35 万和 30 万)。

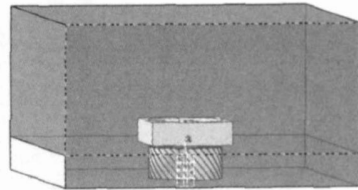


图 9 整体物理模型

表 4 相关几何尺寸

单位:mm

	L	W	H
风扇框架	95	95	27
CPU	24	24	2
外框	350	350	188

3.2.2 边界条件及相关设置

本文主要研究在风扇转速 5000rpm 与 CPU 最大发热量 130W 下放射状散热器的散热效果,其边界条件设定如下:CPU 热流密度 230000W/m²,外框上表面为压力进口边界条件(设定总压为 0 mmH₂O),外框四周为压力出口条件(设定静压为 0 mmH₂O),风扇转速 5000rpm。在 Fluent 中设置多参考坐标系和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型。迭代 1000 多步收敛。

3.2.3 模拟结果讨论

热阻定义如下:

$$R_{\text{sink}} = \frac{T_{\text{cpu}} - T}{Q} \quad (1)$$

散热器熵产率公式^[6]:

$$\dot{S}_{\text{fingen}} = \dot{S}_T + \dot{S}_P = Q \frac{T_{\text{cpu}} - T}{T_{\text{cpu}} T} + \frac{\dot{m}}{T} (P_{\text{in}} - P_{\text{out}}) \quad (2)$$

其中:Q 是 CPU 散热量(W),m 是冷却空气质量流量(kg/s),P_{in}和 P_{out}为散热器进出口压力(Pa),T_{cpu}和 T 代表 CPU 表面最高温度和来流温度(K), \dot{S}_T 和 \dot{S}_P 分别代表温差传热和摩擦熵产(W/K)。

风扇摩擦熵产公式:

$$\dot{S}_{\text{fingen}} = \dot{m} R \ln(1/\dots) \quad (3)$$

其中：是风扇效率。

整体熵产：

$$\dot{S}_{gen} = \dot{S}_{fingen} + \dot{S}_{fangen} \quad (4)$$

根据数值模拟结果得到的结论如表 5 所示,垂直型、斜板型、曲线型散热器的热阻呈逐渐降低趋势。扭曲肋片换热面积相对平直肋片有所增加,但因与风扇出口流场匹配,流动阻力没增加,反而下降,熵产达到最小。曲线加底盘型和涡轮型散热器的流阻略有增加,但散热效果得到进一步改善,热阻减小,熵产减小,尤其是涡轮型散热器的瞬时蓄热能力得到提高。从式(4)中可以看出熵产在一体化设计中能够体现风扇和散热器工作点自动匹配,能同时考虑风扇的流动阻力和散热器的传热性能,还能把风扇的效率特性曲线和 $P-Q$ 线结合到一个公式里进行综合衡量。在一体化设计思想指导下设计出的涡轮型散热器散热系统的不可逆损失整体达到最小,能量做功能力损失最小,温度场和速度场的协同程度最好,从而使得对流换热的整体传热性能达到最优。

表 5 系列散热器性能对比

散热器类型	垂直型	斜板型	曲线型	加底盘型	涡轮型
CPU 温度 K	350	344	342	340	339
压降 Pa	18.2	17.8	17.2	17.5	17.7
热阻 K/W	0.384	0.338	0.323	0.307	0.3
熵产 W/K	0.0642	0.0576	0.055	0.053	0.052

3.3 散热器性能实验设备

散热器热阻恒温箱测试实验台可以仿真真实的环境,提供恒定的温度和湿度,可以用来做 FAN 的高低温运转及放置测试、高温高湿运转及放置测试以及为散热器热阻测试提供恒定的温湿度环境。

本文将风扇与散热器组合后一起放入恒温箱内(如图 10)做测试,其测量结果如表 6 所示;由表中可看出转速为 5000rpm,测量功率 80~130W 时,热阻值基本维持在 0.395K/W 左右。由此可知在不同功率下,若转速相同其热阻值也几乎相同。然而如果转速慢慢上升时,周围流体运动也越来越激烈,很快地将 CPU 所产生的废热带走,会导致热阻值逐渐下降。

表 6 5000rpm 热阻值

功率(W)	80	90	100	110	120	130
热阻(K/W)	0.397	0.39	0.4	0.395	0.398	0.395

在风扇转速 5000rpm, CPU 给予 130W 功率时,数值模拟结果热阻值为 0.3846(K/W),而在相同条件下,实验热阻值为 0.395(K/W),误差值为 2.6%。造成此误差主要原因:散热器上肋片利用整体锡焊接方式将肋片固定在中心柱沟槽上,因此在接触面上会存在一定的接触热阻;另外风扇的模拟有一定的误差。

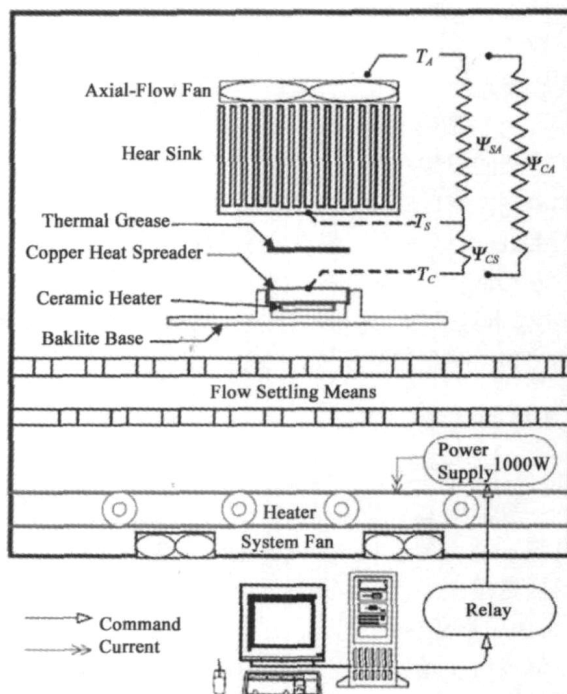


图 10 恒温环境系统

4 结论和进一步工作

本文突破以往单体设计概念,为从整体角度提高散热器冷却效果,首先对 CPU 风扇进行研究,内容分为两部分:(1)9238 小型 CPU 轴流风扇设计。(2)采用 CFD 方法对 CPU 轴流风扇内流场进行数值模拟。通过计算结果和试验测量数据对比,证明模拟结果精度良好,可靠性较高,可以为叶轮方案的设计、比较和选择提供有价值的信息。接着以 9238 轴流风扇出风口处流场流向为参考,设计符合风扇出风口流场的曲线型肋片散热器。将设计的散热器搭配 9238 轴流风扇,并在转速 5000rpm 情况下进行数值模拟;流场分析中发现散热器内部流体流动平顺,很少有回流现象发生,热阻值为 0.323K/W。基于模拟结果,提出了系列放射状太阳花散热器的设计,并进行数值模拟。在相同体积等条件下,曲线型散热器的换热性能略优于斜板型,而斜板型相对与传统的垂直型散热器热阻得到了很大的改善,曲线型相对传统垂直型散热器热阻值降低 15.9%,说明一体化设计的可行性。为了验证数值模拟的可靠性,对垂直型肋片散热器进行实验分析。结果表明本文的数值模拟是可信的,最终从数值模拟和实验角度验证了一体化思想的合理性,该系列散热器能达到高性能散热效果。本文的研究处于优化的前期阶段即形状优化,下一步工作拟开展结构尺寸的优化,采用多学科优化思想对曲线型散热器的各种结构参数(肋高、肋厚、肋片数和肋长等)进行优化。

参考文献:

- [1] 董涛,侯丽雅. 电子芯片冷却用微管道散热器的换热性能分析[J]. 电子学报,2003,31(5):737-741.
Dong Tao, Hou Liya. Analysis of heat transfer performance about microchannel heat sinks for electronic equipment cooling [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(5):737-741. (in Chinese)
- [2] Jing Yan. Correlations Based on CFD and their applications in optimization for staggered and parallel plate fin heat sinks[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, 9(1):25-30.
- [3] Culham J R, Muzychka Y S. Optimization of plate fin heat sinks using entropy generation minimization[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2001, 24(2):159-165.
- [4] 王福军. CFD 在水力机械湍流分析与性能预测中的应用[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(4):75-80.
Wang Fujun. Application of CFD to turbulent flow analysis and performance prediction in hydraulic machinery [J]. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(4):75-80. (in Chinese)
- [5] 陶文栓. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1998.
- [6] Bejan, Adrian. Entropy Generation Minimization[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press Inc, 1995. 71-90.

作者简介:



周建辉 男,1976年生于江西.北京航空航天大学人机与环境工程专业博士.主要研究方向为计算传热学和流体力学等.
E-mail: yzhou130@ase.buaa.edu.cn

杨春信 男,1965年生于湖南.北京航空航天大学人机与环境工程专业博士生导师.主要研究方向为多相流传热、飞机环境控制与安全救生、人机与环境工程等.