

基于 CFD 的电子模块散热优化的场协同分析

山东建筑大学热能工程学院 于仓仓* 云和明^Δ

齐鲁工业大学(山东省科学院)、山东省科学院能源研究所、山东省生物质气化技术重点实验室 耿文广,
山东建筑大学热能工程学院 陈宝明 李 萌

摘 要 采用 CFD 技术对电子模块的散热情况进行数值模拟, 获得电子模块以及周围空气的温度场和速度场, 基于传热场协同理论分析了电子模块及其周围空气的速度场和温度场的协同程度, 并根据电子模块的温度水平以及电子模块的散热量为评价指标, 通过对电子模块的散热方案进行优化比选, 获得电子模块冷却的优化方案, 为探究电子模块高效散热机理打下坚实的基础。

关键词 CFD; 数值模拟; 场协同理论; 电子模块冷却

Field Synergy Analysis of Heat Transfer Optimization of Electronic Module Based on CFD Methods

Yu Cangcang, Yun Heming, Geng Wenguang, Chen Baoming and Li Meng

Abstract In this paper, the heat dissipation of electronic modules has been simulated numerically by using CFD methods. The temperature field and velocity field of surrounding air has been compared with each other. The synergy degree for air velocity and air temperature field has been analyzed based on the heat transfer synergy theory. The optimized scheme for electronics cooling has been obtained by comparison of the temperature and heat transfer of the electronic module.

Keywords CFD; Numerical simulation; Field synergy theory; Electronic module cooling

0 引言

随着科技水平的不断发展以及电子技术水平的不断提高, 电子模块微型化已然成为现代电子设备发展的主流趋势。当电子元器件不断趋于微型化, 电子模块的集成化也在不断提高, 随之而来的是电子模块的发热量大大增加^[1-4]。电子模块的可靠性是与其温度水平息息相关的, 研究和应用表明, 单个电子模块温度提高 10℃, 系统可靠性就下降 50%^[5]。根据有关研究发现, 现在包括 CPU 在内的电子设备失效问题的呈现形式, 55%是由于电子元器件负载过大、温度过高引起的。所以电子模块的高效散热问题一直是现代传热技术的研究热点之一^[6-7]。

根据传统强化传热理论, 可以用增大普朗特数和雷诺数来提高传热速率, 或者增加肋片以及表面粗糙度增加散热量, 因为这些措施往往伴随着流动阻力的增加, 从而在应用中会受到某些限制。根据清华大学过增元等人^[8]提出的场协同理论, 实现强化传热的方式除了增加普朗特数和雷诺数外, 也可以通过调节流场, 改变流速, 使冷却空间内的速度和

温度分布更加均匀, 减小速度场与温度场所形成的夹角, 增大速度场和温度场的协同性来强化传热^[9-11], 这个理论被称为“场协同理论”。

本文采用 CFD 流体固体共轭传热技术对小型电子模块的流动及换热问题进行研究, 模拟以空气作为冷却流体、在等散热面积条件下, 研究空气进口位置、电子模块位置以及电子模块形状不同所引起的散热量变化情况, 并结合模拟后的温度场和速度场, 基于场协同理论分析了温度场和速度场的协同程度, 最终获得电子模块冷却的优化方案。

1 问题描述及数学模型

在数值计算中, 选取 8 种方案, 对不同的散热方案进行数值模拟, 如图 1 所示, 选定壁面为绝热壁面, 阴影部分为电子模块, 电子模块的材质为陶瓷(比热: 0.84 kJ/kg·℃, 导热系数: 0.21 W/m·K, 密度: 500 kg/m³), 发热功率为 25W(相当于热流密度为 10⁶W/m³)。

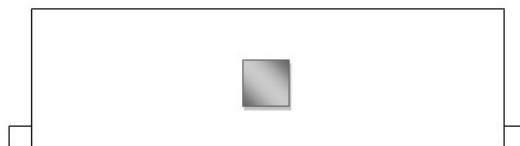


图 1 电子模块散热方案几何模型图

* 于仓仓, 男, 1996 年 12 月生, 在读硕士研究生

^Δ 云和明(通信作者)

250101 山东省济南市历城区凤鸣路 1000 号

15264139511

E-mail: yunheming@163.com

收稿日期: 2020-10-19

如图 1 所示: 为研究在同一条件下的电子模块冷却优化方案, 8 种方案均将冷却流体设置为 293K 的空气, 送风口风速为 5 m/s, 送风压力为 1 atm, 送风口与出风口尺寸为 5 mm, 冷却空间为 10 cm×3 cm 的矩形, 为保证不同形状下的电子模块发热功率相同, 8 种方案内的电子模块面积相等。

系统内流体流动和传热的控制方程为:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \rho \beta (T - T_0) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + S \quad (4)$$

式中: u , v , p , T 分别为 x , y 方向速度分量、压力和温度; β , g , η , a , ρ , S 分别为热膨胀系数, 重力加速度, 粘性系数, 热扩散系数, 密度和内热源项, ρ_0 , T_0 分别为流体的参考工作密度和参考工作温度。

2 求解方法

本文研究的是流体固体共轭传热问题, 采用 CFD 建立物理模型并划分网格, 计算过程中采用有限元法离散方程, 同时求解流体的连续性方程、动量方程和能量方程。选取标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型, 采用二阶迎风差分格式进行离散。进口边界条件给定空气的进口平均流速、进口温度、 k 、 ε 等值; 出口边界条件设定相对压力为零; 电子模块给定等热流密度, 其他壁面绝热。并且计算做了如下基本假设: (1) 流体在壁面上无滑移; (2) 空气的物性参数为常数; (3) 电子模块给定等发热量条件; (4) 流体的流动是定常的; (5) 在重力方向上考虑浮升力的影响, 满足 boussinesq 假设。

3 进风口位置对电子模块冷却效果的影响

3.1 几何模型及描述

为探究空气入口位置对电子模块散热的影响, 选用 3 种方案如图 2 所示, 通过对空气进风口位置的改变, 对不同的散热方案进行数值模拟, 得出电子模块散热的优化方案。选定壁面为绝热壁面, 阴影部分为电子模块, 电子模块尺寸为 1 cm×1 cm, 电子模块的材质为陶瓷。

如图 2 (a)、图 2 (b)、图 2 (c) 所示: 方案一使用强迫送风冷却, 在冷却空间左下角设置为空气

进风口, 右下角设置为空气出风口, 电子模块位于冷却空间正中间, 进、出口的尺寸均是边长为 5 mm 的正方形; 方案二使用强迫送风冷却, 将进风口放置在冷却空间左边的中间位置, 右下角设置为空气出风口, 电子模块位于冷却空间正中间, 进、出口的尺寸均是边长为 5 mm 的正方形; 方案三是在方案一的基础上, 把空气的送风口放置在冷却空间的左上角, 进出口尺寸和电子模块的位置与方案一相同。

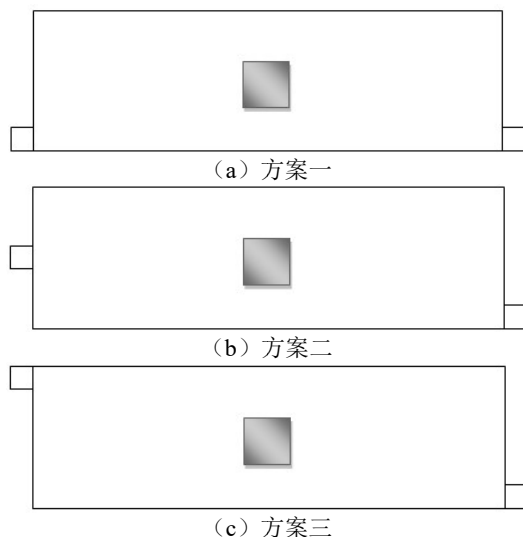


图 2 电子模块变进、出口位置的散热方案示意图

3.2 计算结果与讨论

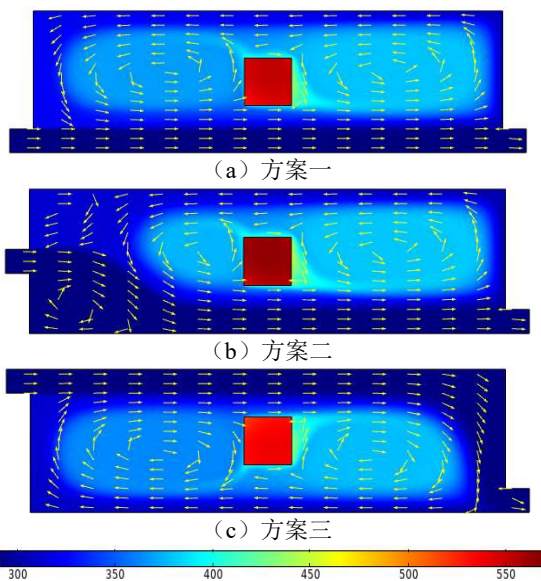
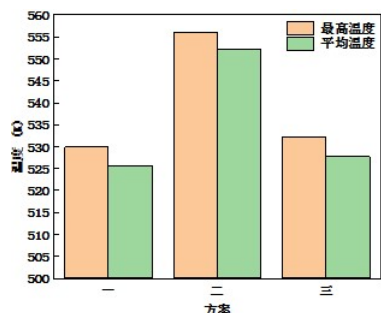


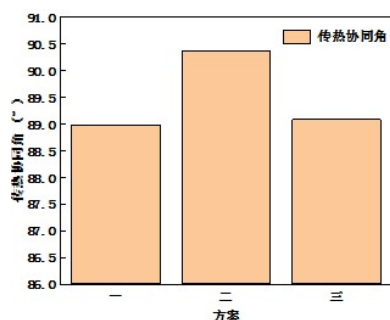
图 3 电子模块变进、出口位置时速度场和温度场分布示意图

从图 3 (a)、图 3 (b)、图 3 (c) 可看出, 方案一由于空气经进风口流入空间, 在空气经过电子模块到达冷却空间右壁面后, 由于冷却空间壁面的阻挡作用, 从壁面处回流再次对电子模块进行降温。根据图 4 可以看出方案一的电子模块温度水平明显

低于方案二和方案三, 经过模拟得出结果方案一相比于方案二, 最高温度下降了 4.7%, 平均温度下降了 4.79%, 传热协同角由 90.38° 降低至 88.983° , 相比于方案三, 最高温度下降了 0.41%, 平均温度下降了 0.38%, 传热协同角由 89.083° 降低至 88.983° 。



(a) 电子模块最高温度和平均温度对比图



(b) 电子模块周围空气的平均传热协同角对比

图4 电子模块变进、出口位置的传热优化指标对比

从图4中还可看出, 结合场协同原理, 在方案一中, 即当送风口位于冷却空间左下部时, 最高温度及平均温度达到最低点, 冷却效果更好, 当冷却效果越好时, 传热协同角越小, 代表此时温度场与速度场协同程度越好, 从而第一种方案的电子模块冷却效果要优于另外两种方案。

4 电子模块位置对冷却效果的影响

从上面可以看出, 当将进风口放置于冷却空间左壁面的左下角时, 电子模块的冷却效果要优于另外两种方案, 在此基础上, 通过对电子模块在冷却空间的不同位置进行模拟分析研究, 探究电子模块位置对冷却效果的影响,

4.1 几何模型及描述

在研究电子模块位置对电子模块散热的影响问题中, 选用3种方案, 相同条件下通过对电子模块位置的改变, 进一步对不同的散热方案进行数值模拟, 进而获得电子模块散热的优化方案。选定壁面为绝热壁面, 阴影部分为电子模块, 电子模块尺寸为 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$, 电子模块的材质为陶瓷。

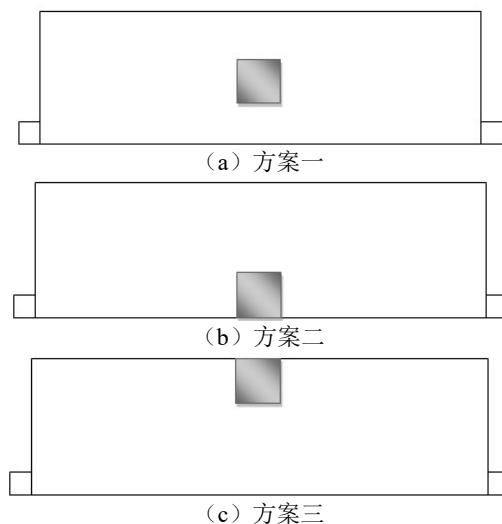


图5 电子模块位置散热方案示意图

如图5(a)、图5(b)、图5(c)所示: 方案一采用强迫送风冷却, 将进风口放置在冷却空间的左下角, 右下角设置为空气出风口, 电子模块位于冷却空间正中间, 进、出口的尺寸均是边长为 5mm 的正方形; 方案二采用强迫送风冷却, 在方案一的基础上, 将电子模块设置在冷却空间底部; 方案三采用强迫送风冷却, 在方案一的基础上, 将电子模块设置在冷却空间的顶部。

4.2 计算结果与讨论

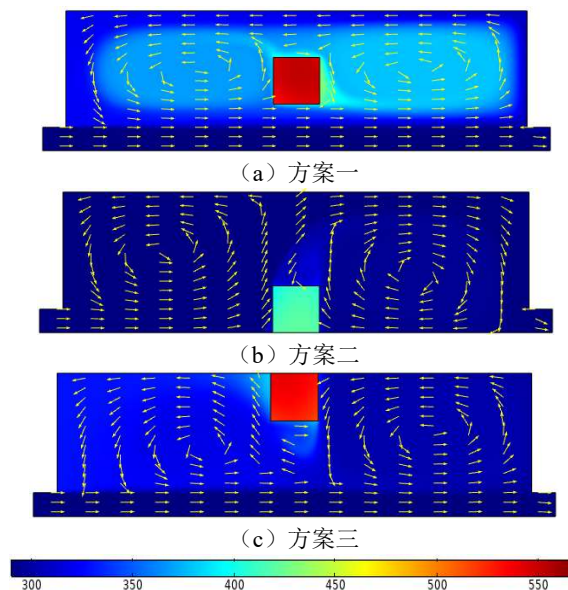
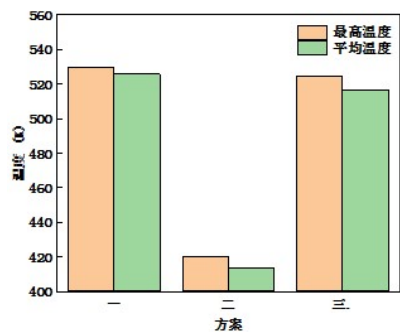


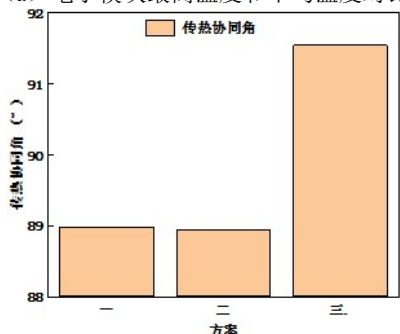
图6 电子模块变位置时速度场和温度场分布示意图

从图6(a)、图6(b)、图6(c)来看, 方案二由于空气经进风口直吹电子模块的迎风面, 在空气经过电子模块到达冷却空间右壁面后, 由于冷却空间壁面的阻挡作用, 从壁面处回流再次对电子模块进行降温, 而方案一和方案三由于空气在流经电

子模块壁面附近时受到热浮升力的影响, 没有与电子模块进行充分地接触, 尚未对电子模块进行有效的冷却, 从而在电子模块温度方面, 方案二的电子模块温度水平明显低于方案一和方案三, 由图 7 可以看出方案二相比于方案一, 最高温度下降了 20.35%, 平均温度下降了 20.94%, 传热协同角由 88.983° 降低至 88.937° , 相比于方案三, 最高温度下降了 19.63%。平均温度下降了 19.52%, 传热协同角由 91.545° 降低至 88.937° 。



(a) 电子模块最高温度和平均温度对比



(b) 电子模块周围空气的平均传热协同角对比

图 7 电子模块变位置时传热优化指标对比

根据图 7 可以看出, 在方案二中, 即当进风口位于冷却空间左下角、电子模块位于冷却空间底部时, 最高温度及平均温度达到最低点, 冷却效果更好; 在进风口位于左下角时, 电子模块放置于冷却空间底部时的冷却效果要明显强于电子模块处于冷却空间中部以及顶部, 此时, 最高温度、平均温度和传热协同角要明显小于其他两种方案, 冷却效果最好。

5 电子模块形状对冷却效果的影响

在确定空气进风口以及电子模块位置对电子模块冷却效果的优化方案后, 可探究在相同的条件下, 对何种形状的电子模块的效果比较好。

5.1 几何模型及描述

在研究电子模块形状对电子模块冷却效果影响时, 将选用 4 种方案, 通过改变电子模块的形状, 对

不同的电子模块散热方案进行数值模拟, 得出电子模块散热的优化方案。选定壁面为绝热壁面, 阴影部分为电子模块, 为保证电子模块散热面积相同, 方形电子模块尺寸为 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$, 菱形电子模块的长度为 1cm , 半圆形电子模块的半径为 7.98 mm , 圆形电子模块的半径为 5.64 mm 。电子模块的材质为硅玻璃。

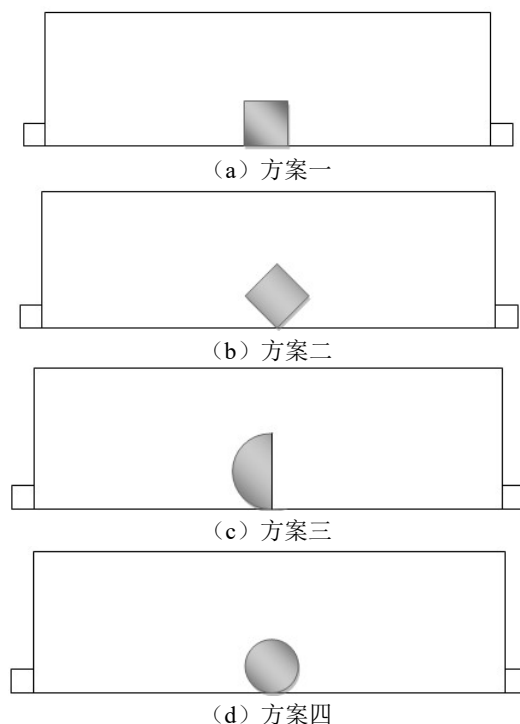


图 8 电子模块变形状散热方案示意图

如图 8 (a)、图 8 (b)、图 8 (c)、图 8 (d) 所示: 方案一采用强迫送风冷却, 空气进风口设置在冷却空间的左下角, 出风口设置在冷却空间的右下角, 电子模块设置为正方形电子模块, 电子模块位于冷却空间底部; 方案二在方案一的基础上, 将电子模块由正方形改变为菱形; 方案三在方案一的基础上, 将电子模块由正方形改变为同等面积的半圆形; 方案四在方案一的基础上, 将电子模块由正方形改变为同等散热面积的圆形。

5.2 计算结果与讨论

根据图 9 可看出, 在四种散热方案中, 由于电子模块都是迎风面正对空气的进风口, 所以电子模块的表面温度总体上看差别比较小。从图 9 中可以看出方案三中电子模块温度明显低于方案一、方案二和方案四, 即在相同的条件下, 空气对半圆形电子模块的冷却效果要优于对正方形、菱形以及圆形电子模块的冷却效果。根据图 10 可以看出, 方案三相比于方案一, 最高温度下降了 9.27% , 平均温度下降了 9.67% , 传热协同角由 88.937° 下降至 88.369° ;

方案三相比于方案二,最高温度下降了 3.2%,平均温度下降了 3.68%,传热协同角由 88.757° 下降至 88.369° ;方案三相比于方案四,最高温度下降了 3.55%,平均温度下降了 4.02%,传热协同角由 88.535° 下降至 88.369° 。

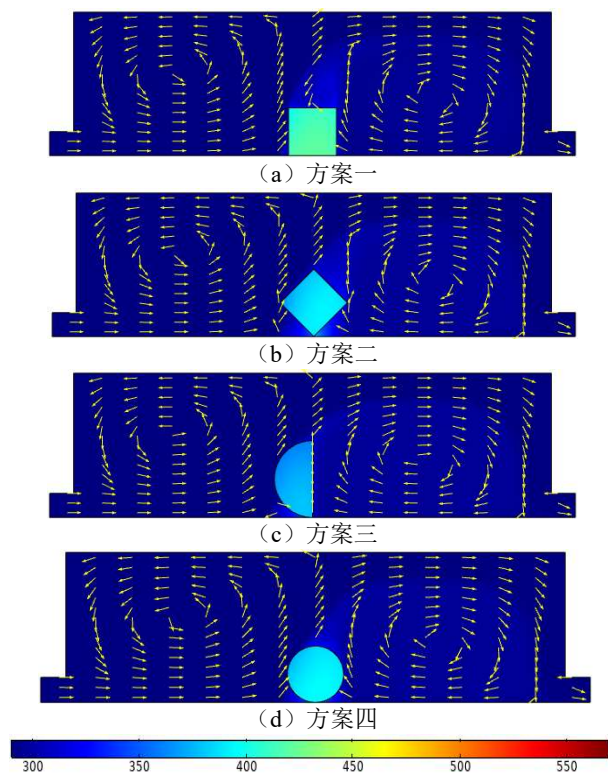
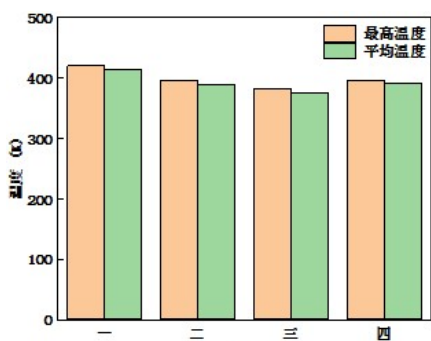
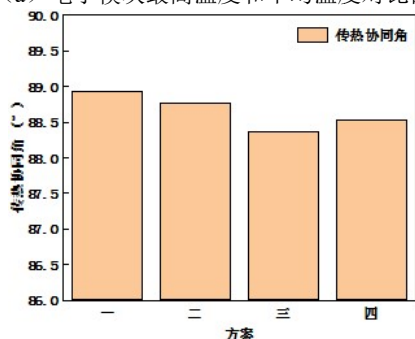


图9 电子模块变形时的速度场和温度场



(a) 电子模块最高温度和平均温度对比图



(b) 电子模块变形时周围空气平均传热协同角的对比

图10 电子模块变形时传热优化指标对比

根据图 10 可以看出,结合场协同原理,在方案三中,即当进风口位于冷却空间左下角时,最高温度及平均温度优于其他三种方案,冷却效果好;即在相同的工况条件和等散热面积条件下,空气对半圆形电子模块的冷却效果要优于空气对正方形、菱形和圆形电子模块的冷却效果,进而半圆形电子模块冷却方案的温度场和速度场的协同程度也要优于正方形、菱形和圆形电子模块的冷却方案。

6 结论

本文采用流固共轭传热的求解方法,在保证进口风速和电子模块发热量相同条件下对电子模块及其周围空气的温度场、速度场和压力场进行数值模拟,主要结论如下:

(1) 空气进口位置对电子模块散热有重要的影响,当空气进口位于冷却空间的左下角时冷却效果最好,传热协同角最小。

(2) 电子模块位置对其散热效果有着重要的影响,当电子模块位于冷却空间的底部时冷却效果最好,传热协同角最小。

(3) 电子模块形状对其冷却效果有重要的影响,在空气进口位于冷却空间左下角,将电子模块放置于整个冷却空间的底部时,半圆形电子模块冷却效果最好,传热协同角最小。

参考文献

- [1] 王栋,陈宝明,云和明,李圣安.不同形状电子元件对冷却效果影响的数值研究[J].制冷与空调,2012,26(6)
- [2] 朱冬生,雷俊禧,王长宏,等.电子元器件热电冷却技术研究进展[J].微电子学,2009,39(1)
- [3] 吉亚萍,云和明,郭训虎.电子元件冷却的场协同分析[J].煤气与热力,2019,39(6)
- [4] 云和明,程林,陈宝明,杜文静.电子元件散热的优化分析[J].工程热物理学报,2005(3)
- [5] 云和明,程林.基于 CFD 的电子器件散热最优间距的数值研究[J].电子器件,2007,30(4)
- [6] 马芳芳,云和明,李永真.基于场协同理论的电子元件散热 CFD 数值模拟[J].2016,16(9)
- [7] 云和明,李真,陈宝明.微小空间电子器件散热研究[J].山东建筑工程学院学报,2004,19(1)
- [8] 徐超,何雅玲,杨卫卫,齐永强.现代电子器件冷却方法研究动态[J].制冷与空调,2003,3(4)
- [9] 过增元.对流换热的物理机制及其控制:速度场与热流场的协同[J].科学通报,2000,45(19)
- [10] 吕金升,杨竹强,路广涛,等.湍流场协同模型构建及减阻应用[J].热科学与技术,2017(3)
- [11] Liu W, Liu Z C, Huang S Y. Physical quantity synergy in the field of turbulent heat transfer and its analysis for heat transfer enhancement[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(23)