

文章编号:0253-4339(2019)05-0090-06
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.05.090

数据中心刀片式服务器不同冷却方式的模拟对比

刘圣春 刘章 何为 贾子昂 罗翌琳 诸凯

(天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室 天津 300134)

摘要 本文以刀片式服务器的冷却为研究对象,应用 6SigmaDC 软件的电子热分析模块,构建了刀片式服务器模型,对不同参数下的翅片式散热器在刀片式服务器中的散热情况进行了数学模拟。得到翅片式散热器翅片高度、齿数、翅片厚度等多个参数对散热器散热性能的影响规律,通过对比分析得到翅片散热器的最优结构参数,及芯片风冷散热所能达到的最低温度。为优化芯片的散热,在相同服务器上构建冷水板水冷散热模型,与风冷散热时芯片的温度进行对比,得出芯片水冷散热性能是风冷散热的 1.3 倍。基于刀片式服务器内部温度分布分析,提出刀片式服务器采用风冷与水冷相结合的混合冷却为最佳散热方式,为数据中心服务器的散热设计提供了理论参考。

关键词 刀片式服务器;翅片散热器;风冷;水冷;混合冷却

中图分类号:TP368.5;TQ051.5

文献标识码:A

Simulation Comparison of Different Cooling Modes of Blade Server in Data Centers

Liu Shengchun Liu Zhang He Wei Jia Ziang Luo Yilin Zhu Kai

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China)

Abstract A blade server with fin heat sink was set as the research object of a cooling experiment and its performance was evaluated via an electronic thermal analysis module from 6SigmaDC software. The heat dissipation of the heat sink was simulated using different equipment parameters in blade server. The analysis concentrated on the effects of influencing factors such as fin height, number of teeth, fin thickness, on the heat dissipation performance of the heat sink. Through a comparative analysis, the optimal structure parameters of fin heat sink and lowest temperature of the chip were obtained through air cooling. Nevertheless, better results were achieved by chip cooling. A water-cooled cold plate model was constructed with the same blade server. In comparison with the temperature of the chip cooled by heat sink, the results indicated that the liquid cooling performance was 1.3 as that of than the air cooling. Thus, a hybrid cooling method of air and liquid cooling was proposed to provide a theoretical reference for the cooling design of the blade server.

Keywords blade server; fin heat sink; air cooling; liquid cooling; air/liquid hybrid cooling

随着互联网及电子计算机产业的飞速发展,数据中心朝着大型化集中化建设。受土地成本影响,服务器集成度越来越高。服务器按照其外形及应用环境一般可分为塔式、机架式和刀片式。塔式服务器外形及结构与平时使用的立式 PC 类似,其机箱较大,占用空间多。机架式服务器外观按照统一标准设计,配合机柜统一使用,宽度为 482.6 mm,高度以 U 为单位(1 U=44.45 mm),通常有 1、2、3、4、5、7 U 几种标准,但扩展性和散热问题受限制。刀片式服务器专门为高密度计算机环境设计,每一块“刀片”即一块系统主板,集成度更高,比机架式服务器更节省空间,但散热问题也更突出。目前数据中心中常用的是机架式

和刀片式服务器。服务器最常用的散热方式为风冷散热,最常用的芯片散热器为翅片式。其基本工作原理是散热器底板吸收 CPU 产热,热量传导至散热器翅片,再通过风扇转动强制对流散热。由于强制对流受高流速噪声和振动问题的限制,在面对高热流密度器件时,液冷散热取代风冷具有很好的研究前景^[1]。在服务器层面解决散热问题,可使今后数据中心进行任意的扩大或改建工程而不考虑机房现有的散热系统改造问题,数据中心的建设将更加灵活。

目前国内外很多专家学者对数据中心服务器散热方面进行了研究。尹秀忠^[2]设计了一款刀片式服务器,并通过仿真模拟进行结构与散热的优化,服务

器采用风冷强制对流实现散热,CPU 散热器采用铜制翅片散热器+热管的设计。黄高凡^[3]针对一款刀片式服务器散热方式进行优化设计,认为要根据实际情况建立散热模型,优化提高散热效率,实现均匀散热。何凌川等^[4]以某机架式服务器为研究对象,建立数学模型并进行仿真计算,采用基于实验设计的循序优化法和响应优化法分别对芯片布局和散热器结构进行优化设计。R. Lucchese 等^[5]就最小冷却成本问题设计了新型面向控制的、非线性的、对于空气流动可明确计算的刀片式服务器热模型,基于 CFD 技术由 m 个风扇和 n 个电子元件的热网格几何结构,并进行了模型验证。谢孟晓等^[6]对 3 种不同功率的服务器在数据中心的选型应用进行热环境分析优化,认为采用封闭冷通道、增加挡板和提高送风温度均能改善机房热环境。陈煜等^[7]在刀片式服务器机柜背部空间设计了冷却系统,面对机房扩容,可保证每个刀片式服务器稳定运行且不带入额外热负荷,满足机房正常环境温度,并模拟了制冷效果及对机房环境的影响。A. C. Kheiradadi 等^[8]对服务器电子工业领域的集中冷却方式进行了对比,包括风冷、单相和两相间接液冷、热管、池沸腾、喷射冷却及射流冲击等。直接对比服务器热负荷表明在高性能计算机中采用液冷很有必要。B. Fakhim 等^[9]认为数据中心能源消耗过高主要是由于局部冷却不足和服务器机架布局过于密集。研究了一个业务数据中心,进行温度现场测量,模拟分析了流场和温度场,找出热点并提出提高冷却效率的解决方案。M. J. Ellsworth 等^[10]从设备层面将超级计算机风/液混合冷却与传统风冷冷水机组和机房空调系统进行对比,同时预测了在高性能服务器热管理中使用水冷却与风冷却的节能效益。

这些学者研究了数据中心服务器的散热问题,但都是在数据机房层面或仅就现有的传统风冷散热模式进行优化分析,未在刀片式服务器层面对比液冷与传统风冷散热方式,构思新型服务器级别的散热模式。本文以数据中心刀片式服务器为研究对象,构建了服务器模型,分析了翅片散热器参数对散热效果的影响,得出最优散热器参数及散热效果,并与水冷式模型进行对比,得出水冷散热对高功率芯片散热的巨大优势。通过对比水冷芯片、风冷内存装置的冷却方式与单纯的水冷芯片,得出混合冷却方式最适用于目前的刀片式服务器冷却。

1 刀片服务器物理模型

本文应用 6SigmaET 进行建模研究,刀片式服务器模型如图 1 所示。风冷和水冷模型基本一致,芯片

散热器部分风冷模型采用翅片散热器,水冷模型采用冷水板。水冷模型与混合冷却模型基本一致,混合冷却模型保证服务器内有强制空气对流。前后壁面开孔便于空气流动,为模拟真实服务器,将开孔率设置为 65%。环境温度设为 20 ℃。

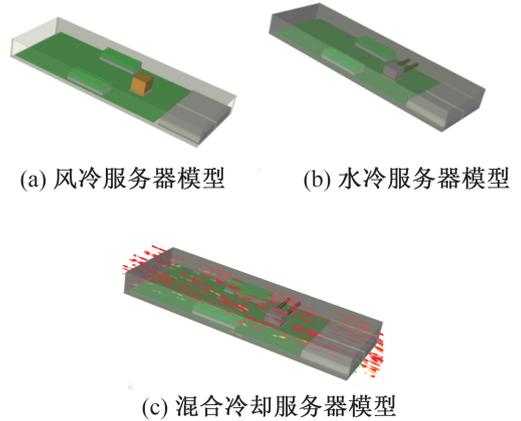


图 1 刀片式服务器模型
Fig.1 Model of blade server

刀片式服务器位于机壳内,在服务器外侧建立风洞,风洞设置风速条件来模拟风扇供应冷却气流。在芯片上初始建立散热器,芯片与散热器间由热阻为 0.02 ℃/W 的凝胶填充,散热器采用铜材,基本参数如表 1 所示。通过软件自动划分网格,为了提高运算精度,应用混合网格,并对芯片和散热器部分采用局部网格控制进行网格加密。

表 1 刀片式服务器基本参数
Tab.1 Basic parameters of blade server

项目	参数
服务器	51 mm×183 mm×510 mm,壁厚 1 mm
PCB 板	181 mm×388 mm,功率 10 W
插槽	2 mm×40 mm×40 mm
芯片	3 mm×35 mm×35 mm,功率 50 W
翅片散热器	基板 2 mm×35 mm×35 mm, 翅高 30 mm,齿数 20,翅厚 0.5 mm
内存	8 个,单个功率 1 W
硬盘	2 个,单个功率 6 W
环境温度	20 ℃
冷水板	35 mm×35 mm×35 mm
液体管路	直径 6 mm,壁厚 1 mm

2 刀片服务器冷却性能分析

2.1 风冷散热器

为了体现一般性,风冷模型采用最常见的翅片式

散热器。增大风速,可以增强对流换热,使芯片温度降低,但仅靠加大风速,芯片温度的下降幅度有限^[11]。在芯片功率为 50 W 时,芯片温度(下文中芯片温度均指平均温度)随风速的变化如图 2 所示。

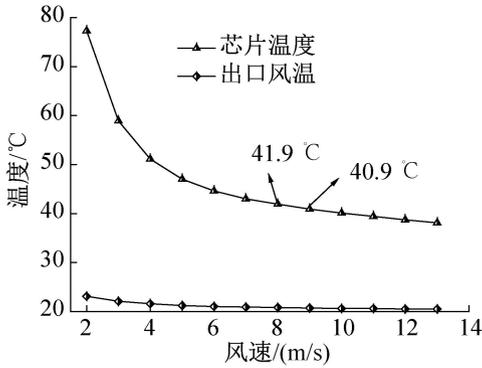


图 2 风速与芯片温度分布

Fig.2 Wind speed and chip temperature distribution

在风速增加的初始阶段,温度随风速的增大而降低,但当风速提升至 9 m/s(芯片温度 40.9 °C)后,芯片温度的下降趋势变缓(与风速 8 m/s 相比温度下降 <1 °C)。风速达到 12 m/s 后芯片温度几乎不变,且通风口出口温度几乎与环境温度相同,可见继续增大风速并不能使芯片温度得到明显下降,该方式可以降低至的最低温度为 38.1 °C。此外,风速过大时,风扇噪音与功耗问题也凸显出来。选风速 9 m/s 为最佳,对服务器内部热点温度进一步分析。

图 3 所示为芯片底部高 1 mm 处的截面温度分布,可知芯片部分温度约为 42 °C,硬盘和内存的测点温度仅为 23.7 °C 和 24 °C。此时刀片式服务器的热点主要在芯片部分,因此风冷重点在于对芯片的有效散热,进一步降低芯片温度,需要对散热器结构进行优化设计。

史忠山等^[12]对基板水平放置和垂直放置两种肋热沉进行数值模拟和结构优化,得出热沉热阻受肋厚、肋间隙、肋高等参数的影响。固定芯片功率为 50 W,风速为 9 m/s,在 25~30 mm 不同翅片高度下,对散热器翅片厚度和齿数同时进行优化。

翅片散热器的肋效率可由式(1)计算:

$$\eta_f = \frac{th(mH')}{mH'} \quad (1)$$

式中: $m = \sqrt{\frac{2h}{\lambda\delta}}$; $H' = H + \delta/2$; h 为表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; λ 为翅片散热器导热系数, $W/(m \cdot K)$; H 为翅片高度, mm; δ 为翅片厚度, mm。

由式(1)可知,翅片厚度与翅片高度均影响翅片的散热效率,且翅片齿数决定了翅片间距,也会影响

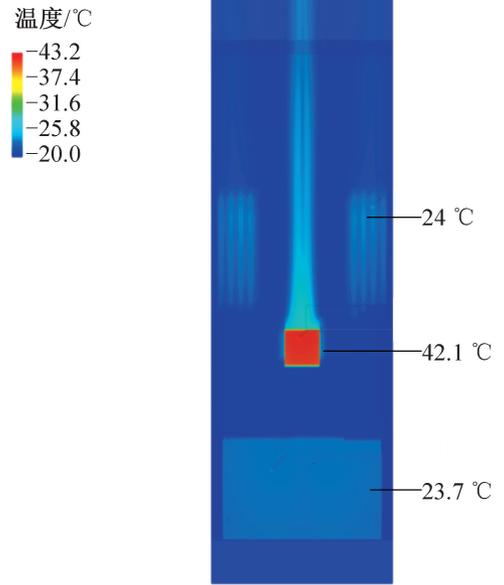


图 3 风冷散热器结构优化前温度截面(风速为 9 m/s)

Fig.3 Temperature cross section before structural optimization of air-cooled heat sink (9 m/s wind speed)

翅片散热器的散热效果,故会存在一个最佳参数组使散热效果最好。

图 4 所示为翅高为 30 mm 芯片温度随翅片厚度和齿数的变化。由图 4 可知,固定翅片高度,改变翅片散热器的翅厚、齿数,可以优化散热效果,降低芯片温度。且在相同的最低温度或很小的温度波动范围(差距在 0.5 °C 以内)内有多组参数满足。

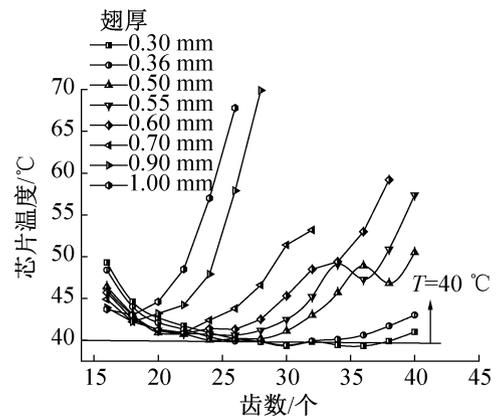


图 4 翅高为 30 mm 芯片温度随翅片厚度和齿数的变化
Fig.4 The change of chip temperature with fin thickness and tooth number of 30 mm wing height

散热器在不同翅厚、翅高下最低芯片温度与最优齿数变化如图 5 所示。由图 5(a)结构参数优化匹配规律可得:翅高不变时,在不同的翅厚下有不同的最优齿数,且最优齿数随翅厚的增加而减小。在 0.3 mm 翅厚下对应的最优齿数为 36;在 1 mm 翅厚下对

应的最优齿数为 18。相同翅厚下,不同翅高下最优齿数基本相同。因此,在进行散热器结构优化时,应主要优化翅厚与齿数间,翅高的影响较小。

图 5(b) 所示为不同齿数下最低芯片温度的变化,分析可知:不同翅高下对应的最优齿数不同,这是由于翅片散热器受多个参数影响,如式(1)所示。最低芯片温度随翅厚的减小而降低,不同翅高下均在 0.3 mm 翅厚取得最低芯片温度,但由于散热器翅厚越小,加工难度越大,故实际翅厚要看具体要求。翅高越大,芯片的最低温度越低。在低翅厚下翅高的影响很小,翅高超过 29 mm 后几乎不变;翅厚越大,不同翅高下芯片的最低温度差距越明显。

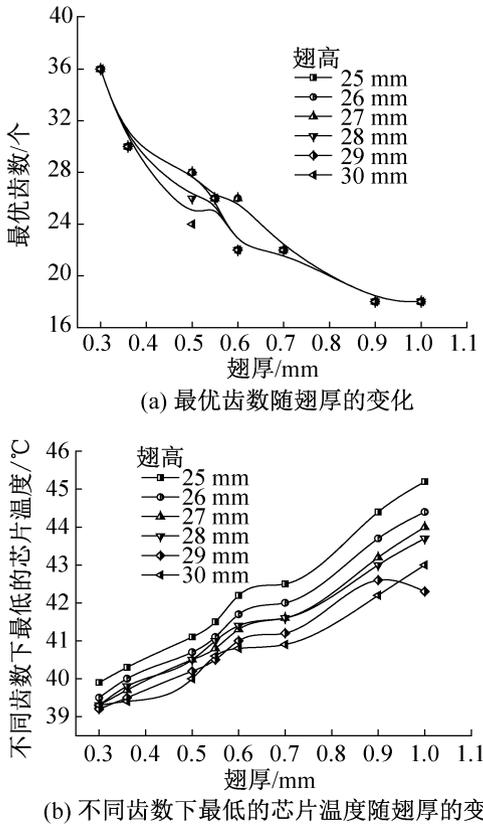


图 5 不同翅厚下最优齿数与芯片温度
Fig.5 Optimum tooth number and chip temperature under different wing thickness

综上所述,通过优化翅片式散热器的结构可使芯片温度降低,最低芯片温度为 39.2 °C。风速为 9 m/s 时,翅高 29 mm,翅厚 0.3 mm,齿数 36 处可达到该最低温度,下文选取该组参数作为模型进行对比分析。

2.2 水冷服务器

风冷散热时优化散热器结构,芯片温度会降低,但效果并不明显。唐玉兔等^[13]采用 FLUENT 软件对比研究了流量、管材和底板厚度对 IGBT 芯片最高温度的影响,并提出单根管路改为双根管路的优化方

案。贺荣等^[14]对水冷板式散热器进行了理论计算,利用 Fluent 软件模拟了散热器的散热过程并进行了实验研究,说明模拟方法能真实反映水冷散热器内部复杂流动,为散热器的设计和改进提供理论依据。在相同的刀片式服务器上,替换翅片散热器为水冷板。目前水冷散热器型式多样,本文采用实际中最普通、工艺最简单的“U”型水冷板,如图 1(b) 所示。在水管进出口分别设置虚拟的水泵来模拟进出口水的流动,入口水温设置为与环境温度相同的 20 °C。风洞的风速设置为 0 m/s,水流量变化范围为 1~80 mL。

图 6 所示为芯片温度随水流量的变化,芯片温度随流量的增大而降低。在流量增加的初始阶段,降低效果明显;当流量增至 50 mL/s 后,芯片温度的变化较为平缓,且回水温度几乎与进水温度相同,由 $Q = cpt\Delta Tq$ 可知,继续增大流量,散热效果并不会再有大的提升,且流量的增大伴随着泵功的提升。当流量增至 80 mL/s 时,芯片温度为 30.1 °C。下文选取 50 mL/s 流量为研究对象。

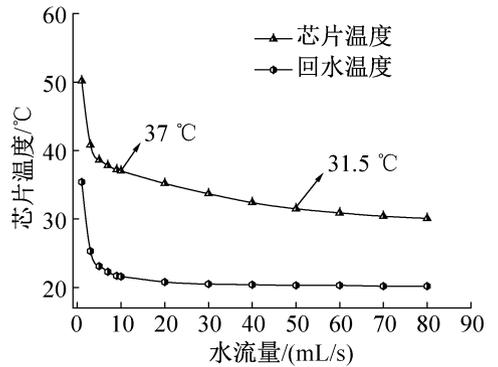


图 6 芯片温度随水流量的变化
Fig.6 Chip temperature varies with water flow

图 7 所示为水冷服务器截面温度分布图。由图 7 可知,刀片式服务器芯片采用冷板散热虽然芯片的热量可以被水带走,但内存条及存储单元的温度会很高,完全超出正常工作温度范围,而对于这些热流密度较小且因结构设计并不利于布置水冷散热装置的单元而言,采用水冷易造成工艺过于复杂,成本过高等。故对于这些单元仍考虑采用风冷较为合适。

2.3 混合冷却服务器

图 8 所示为混合冷却服务器截面温度分布。由图 8 可知,增加水冷散热服务器风洞 3 m/s 的风速,此时,芯片温度为 30.9 °C,而内存与存储单元的温度分别为 27.4 °C 和 28.3 °C,服务器温度分布均匀,各元件温度较低且相差很小,刀片式服务器的所有元件均能被很好的散热。

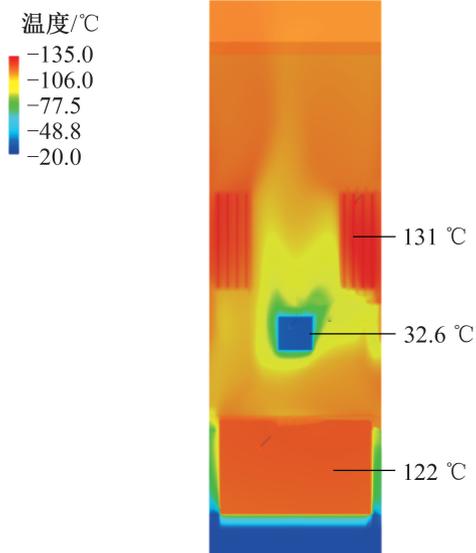


图 7 水冷芯片服务器温度截面

Fig.7 Temperature cross section of water cooling chip server

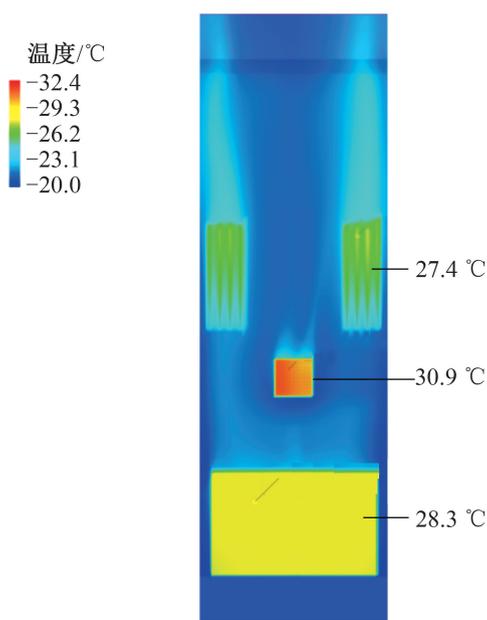


图 8 混合冷却服务器温度截面

Fig.8 Temperature cross section of mixing cooling server

2.4 性能对比分析

对比分析风冷散热刀片式服务器与水冷散热刀片式服务器温度分布,可以看出就刀片式服务器而言,风冷散热服务器温度最高的部位在芯片部分,芯片温度明显高于水冷和混合冷却式,且截面温度分布不均衡;水冷散热虽然芯片温度较低,但存储单元与内存单元若不单独考量,散热出现问题;混合冷却式服务器不仅芯片温度更低,且各热源温度接近,整个服务器内部温度分布均匀。

风冷散热时风速为 9 m/s,混合冷却时风速可降为 3 m/s,但增加了提供 50 mL/s 水流量的泵功。目前,DC30A-1215 系列循环水泵提供该流量功耗约为 2 W,与常用电脑 CPU 机箱风扇功率相当,故在功耗层面采用混合冷却并未增加,却大大降低了刀片式服务器内部风速,在实际应用中,机柜的风扇完全可以满足该风速,刀片式服务器甚至不在需要设计单独的风扇,使刀片式服务器的应用更加灵活。

由传热学可知,热流密度与芯片温度成正比^[15]。改变模拟芯片的功率,得到不同功率下 3 种冷却方式芯片温度的变化,如图 9 所示。由图 9 可知,芯片温度与芯片功率近似为线性关系,在相同芯片功率下采用冷板散热的芯片温度始终低于风冷散热器散热的芯片温度,且随着芯片功率的增加,这一差距变得越来越大,可知对于芯片散热水冷散热的散热效果明显优于风冷散热,且对于高热流密度这一优势将更加显著。改变为混合冷却后,芯片温度也会受空气强制对流影响而降低。

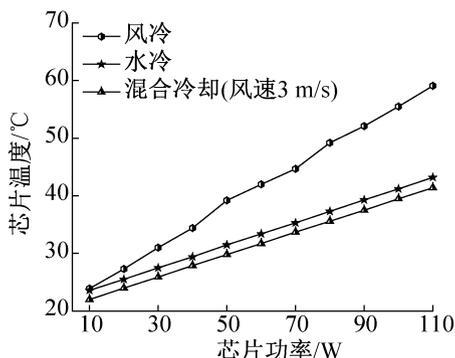


图 9 不同功率下 3 种冷却方式芯片温度的变化

Fig.9 Temperature change of chip under different power by three cooling methods

3 结论

本文通过数值仿真的方法,构建了刀片式服务器模型,研究了服务器风冷散热与水冷散热,通过散热效果的对比,得出如下结论:

1) 刀片式服务器的“热点”集中在芯片部分,风冷散热时芯片温度随风速的增大而降低,但达到一定风速后,降低幅度有限,应重点改变散热器结构与散热方式。

2) 翅片式散热器存在最优的翅高、翅厚与齿数的配比。本设计模型在 9 m/s 风速下,通过结构优化可使服务器芯片温度从 40.9 °C 降至最低为 39.2 °C。

3) 冷水板散热在流速为 50 mL/s 时可使功率为 50 W 的芯片温度降至 31.5 °C。当流量增至 80 mL/s

时,温度降至 30.1 ℃,明显优于风冷散热风速 13 m/s时所能达到的最低温度 38.1 ℃。对于芯片散热,芯片功率越高,水冷散热比风冷散热的效果越显著。

4)采用混合冷却(水冷与风冷散热)方式,使刀片式服务器的温度分布均匀,散热效果最优越。

在刀片式服务器中,芯片的热流密度较其他部件高。通过模拟对比 3 种冷却方式,提出芯片采用水冷,其他部件采用风冷的方式较为合理。且就设计结构而言,除芯片外的其他部件,水冷散热器不便于布置,风冷更便于调控。

参考文献

- [1] GENG H. Data center handbook [M]. New Jersey: John Willy & Sons, Inc., 2015.
- [2] 尹秀忠. 刀片服务器的结构和散热优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012. (YIN Xiuzhong. Optimized design of structure and thermal of blade server[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [3] 黄高凡. ATCA 刀片式服务器散热方案的优化设计[J]. 工业控制计算机, 2013, 26(5): 48-49. (HUANG Gao-fan. Optimized thermal design for atca blade server[J]. Industrial Control Computer, 2013, 26(5): 48-49.)
- [4] 何凌川,杜平安. 机架式服务器热特性数值仿真与优化[J]. 机械设计与制造, 2009(12): 196-198. (HE Lingchuan, DU Pingan. Numerical simulation and optimization of thermal characteristic of rack server[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(12): 196-198.)
- [5] LUCCHESI R, OLSSON J, LJUNG A L, et al. Energy saving in data centers: a framework for modelling and control of server's cooling[C]. Kidlington Oxford: IFAC-PapersOnLine, 2017:9050-9057.
- [6] 谢孟晓,刘金祥,牛晓峰,等. 数据中心机架式服务器选型对其热环境的影响及优化分析[J]. 低温与超导, 2016(8):74-78. (XIE Mengxiao, LIU Jinxiang, NIU Xiaofeng, et al. Effect and optimization of rack servers selection in data center on the thermal environment[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2016 (8):74-78.)
- [7] 陈煜,傅允淮,巨永林. 刀片服务器机柜冷却系统设计及其对现有空调机房的影响[J]. 低温与超导, 2011, 38(12): 31-35. (CHEN Yu, FU Yunzhu, JU Yonglin. The cooling system design of the blade server case and its influences on the air-conditioning room[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2011, 38(12):31-35.
- [8] KHEIRABADI A C, GROULX D. Cooling of server electronics: a design review of existing technology[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 105:622-638.
- [9] FAKHIM B, BEHNIA M, ARMFIELD S W, et al. Cooling solutions in an operational data centre: a case study[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(14):2279-2291.
- [10] ELLSWORTH M J, IYENGAR M K. Energy efficiency analyses and comparison of air and water cooled high performance servers [C]//ASME 2009 InterPACK Conference. San Francisco: Electronic and Photonic Packaging Division, 2009:907-914.
- [11] 唐金沙. CPU 风冷散热器的实验研究及流场和温度场的数值模拟[D]. 湘潭:湘潭大学, 2009. (TANG Jinsha. Experimental testing of CPU air cooling radiator and numerical simulation of its flow field and temperature field[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2009.)
- [12] 史忠山,李骥. 自然对流板肋热沉的三维数值结构优化[J]. 制冷学报, 2013, 34(1): 45-51. (SHI Zhongshan, LI Ji. 3D numerical geometric optimization of plate fin heat sinks in natural convection heat transfer[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(1):45-51.)
- [13] 唐玉兔,丁杰. 管式 IGBT 水冷散热器性能的数值模拟研究[J]. 机电工程, 2014, 31(7): 870-874. (TANG Yutu, DING Jie. Numerical simulation on performance of tubular water-cooled radiator for IGBT module [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2014,31(7): 870-874.)
- [14] 贺荣,龚曙光,李纯,等. 基于 Fluent 的水冷板式散热器数值模拟与试验研究[J]. 流体机械, 2010, 38(2): 57-60. (HE Rong, GONG Shuguang, LI Chun, et al. Experimental study and numerical simulation of the water-cooled plate radiator based on fluent[J]. Fluid Machinery, 2010, 38(2):57-60.)
- [15] 诸凯,王彬,王雅博,等. 用于芯片冷却的重力式热管散热器实验研究[J]. 工程热物理学报, 2017(8): 1748-1752. (ZHU Kai, WANG Bin, WANG Yabo, et al. Experimental study of gravity heat pipe sink used for chip cooling[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017(8): 1748-1752.)

通信作者简介

刘圣春,男,教授,天津商业大学,13920682426, E-mail: liushch@tjcu.edu.cn. 研究方向:制冷系统节能及自然工质替代研究。

About the corresponding author

Liu Shengchun, male, professor, Tianjin University of Commerce, +86 13920682426, E-mail: liushch@tjcu.edu.cn. Research fields: energy saving for refrigeration system, natural refrigerant substitution.