

刀片服务器液冷系统的设计和探究*

高益兵^{1,2}, 刘超杰^{1,2}, 赵保周^{1,2}

(1. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 广东 深圳 518055;

2. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518055)

摘要: 文中介绍了一种刀片服务器的液冷散热系统, 对系统各部分的流量及管径进行了设计, 同时通过仿真分析和实验测试来验证其散热性能。结果表明, 液冷方案相比风冷方案能够将刀片内中央处理器(Central Processing Unit, CPU)支持的功率从165 W提升到300 W, 采用铲齿冷板和水工质并将流量控制在1.5 L/min以下能够提高液冷系统的散热性能。最后对比分析了液冷和风冷系统的成本, 液冷系统成本回收时间约为2.5年, 长期运行具有良好的经济性。

关键词: 液冷; 服务器; CPU功率; 冷板; 成本

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-5300(2020)06-0020-04

Design and Exploration on Liquid Cooling System of Blade Server

GAO Yibing^{1,2}, LIU Chaojie^{1,2}, ZHAO Baozhou^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China;

2. Zhongxing Telecommunication Equipment Corporation, Shenzhen 518055, China)

Abstract: A liquid cooling system of blade server is introduced in this article. The flow and the pipe diameter of various parts of the system are designed. And the performance of heat transfer is verified by simulation and experiments. The result shows that the liquid cooling solution can increase the power of the blade CPU (Central Processing Unit) from 165 W to 300 W compared with air cooling solution. And the performance of the liquid cooling system can be improved by using spade-tooth cooling plates and water refrigerant and controlling the flow below 1.5 L/min. The costs of liquid cooling and air cooling are compared. The payback time of liquid cooling system is about 2.5 years, so the liquid cooling system is more economical for long-term operation.

Key words: liquid cooling; server; CPU power; cooling plate; cost

引言

随着云计算及大数据等众多新兴技术的迅速发展, 计算存储领域正处于一个技术变革期, 高性能硬件平台的开发需求强烈。设备性能的提高将会直接导致功耗的大幅提升, 从而使得设备热流密度急剧增大, 这对设备的组成部件特别是作为服务器关键器件的中央处理器(Central Processing Unit, CPU)的影响非常显著。Intel Whitley平台CPU最高功率已达300 W, 因此高功耗下的散热问题对设备的可靠性至关重要。

高效的散热方式是电子设备长期可靠运行的基础。在一些高热耗场景中, 最常用的自然散热和风冷散热技术并不能满足器件的散热要求, 在卫星、火箭

等航天领域应用很久的液冷技术因而进入人们的视野^[1-2]。液冷技术是利用液体冷却介质与热源进行换热从而冷却热源的散热方式, 分为直接冷却和间接冷却^[3]。液冷技术从20世纪60年代起开始在大主机上采用, 如IBM System/360 Model 91、惠普Apollo 8000、富士通K-Computer等, 近年来在IT产品上的运用越来越多^[4]。随着设备处理的业务越来越复杂, 热负荷不断攀升, 液冷技术具有的高散热效率、低能耗成本、低噪音指标等优势将会更加凸显。

本文结合实际的研究项目, 对新开发的计算存储服务器进行了液冷系统设计, 并通过仿真和测试对系统散热效果进行了分析验证。同时对比了不同冷板形式、供液流量下液冷系统的散热能力, 最后对该液冷系统进行了成本分析。

* 收稿日期: 2020-08-26

1 液冷系统设计

1.1 系统组成及布局设计

1.1.1 整机组成说明

图 1 所示为某款 6U 刀片式服务器。整机前插 8 块刀片模块, 后插单板、电源、风扇等模块。设备兼容风冷/液冷两种设计, 热设计主要技术要求如表 1 所示。

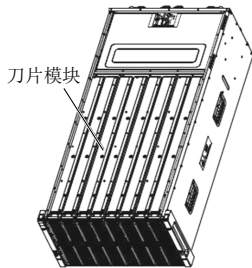


图 1 服务器模型

表 1 热设计主要技术要求

技术要求	具体描述
设备工作温度	环境温度满足长期 0 °C ~ 35 °C
CPU 支持要求	风冷方案单个 CPU 最大功率 165 W 液冷方案单个 CPU 最大功率 300 W
冷却工质要求	水工质, 供液温度高于环境温度 10 °C, 温升 5 °C ~ 15 °C

1.1.2 液冷系统组成

由于目前受限于整机结构, 本项目只对前插刀片的 CPU 采用液冷设计, 硬盘及后插单板等部件仍采用风冷散热。整机液冷采用目前广泛应用的循环管路散热冷却设计^[5], 系统图如图 2 所示。冷却液从设备后端总接头进水口处的管路进入分水器, 通过分水器分流成 8 条支路分别进入各计算节点板上的冷板组件冷却冷板下方的 CPU, 再通过支路管路回流入分水器进行汇流, 最后由冷源机组冷却降温后, 经过水泵再进入总接头的进水口处, 完成整个循环过程。

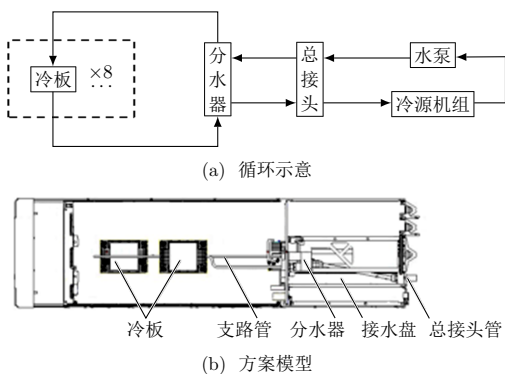


图 2 液冷系统

分水器由不锈钢机加而成, 整体分为进出水两层, 两层之间留有间隙以防进出工质之间换热, 见图 3。同时在分水器下方设置接水盘装置。冷板铜质且采用铲齿工艺, 板内采用硬铜管焊接, 防止冷却液泄漏, 保证可靠性。

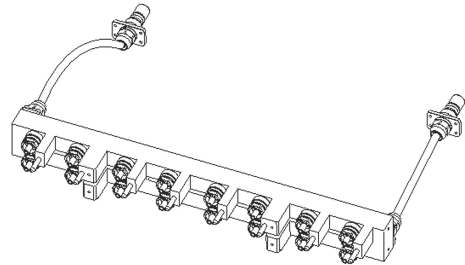


图 3 分水器模型

漏液检测系统采用漏液检测传感器进行控制, 当液体泄漏到传感器上时系统告警, 设备断电。刀片内部的漏液检测传感器沿管路及冷板缠绕布置; 接水盘内的传感器固定在接水盘四周。同时在接水盘上设计导液管, 在发生泄漏时可以将液体导出设备外, 降低泄漏危害。

1.2 系统流道设计与流量计算

系统所需流量为:

$$Q = \frac{60\,000P}{\rho C \Delta t} \quad (1)$$

式中: Q 为实际所需的流量, L/min; P 为系统总的热耗, W; C 为冷却液比热容, J/(kg·K); ρ 为冷却液密度, kg/m³; Δt 为冷却液的温升, °C。

计算节点中每个刀片包含两个前后串联的 CPU, CPU 的最大功率按照 300 W 设计, CPU 的总功耗为 4800 W。冷却液选取加 20% 缓蚀剂的去离子水, 设计进口水温为 45 °C。当冷却液温升为 7 °C 时, 需要的冷却液总流量约为 10 L/min, 单节点流量为 1.25 L/min。

根据管路流速的相关设计经验, 将总管路、分水器管路和支路管路的流速分别设定为 2.4 m/s, 1.5 m/s, 1.8 m/s, 并根据式 (2) 计算相应的管径尺寸, 计算结果见表 2。

$$R = 1\,000 \sqrt{\frac{Q}{60\,000 u \pi}} \quad (2)$$

式中: R 为管路半径, mm; Q 为实际所需的流量, L/min; u 为管路流速, m/s; π 为圆周率, 取 3.1415。

表 2 流速及管径尺寸计算值		
参数	值	
分水器总流量/(L·min ⁻¹)	10	
分水器流速/(m·s ⁻¹)	1.5	
分水器半径/mm	5.95	
总管路流速/(m·s ⁻¹)	2.4	
总管路半径/mm	4.7	
单路流量/(L·min ⁻¹)	1.25	
支路流速/(m·s ⁻¹)	1.8	
支路管路半径/mm	1.92	

根据流量计算结果及结构尺寸要求，选择管路半径为 7 mm 的分水器，选定设备总进出水插头为 8 mm 口径的滚珠锁紧连接器。此外为了防止漏液，选择口径为 3 mm 的双向大浮动的盲插接头。接头装配时设计粗导向和精导向，要求进入精导向前偏向在 2 mm 内。在盲插过程中，允许插头和插座 ±0.5 mm 的轴向偏差。

2 热仿真分析

2.1 仿真模型设置

在设计初期应用热仿真分析法可有效缩短产品设计周期，提高开发效率^[6]。本文利用热学仿真软件 6SigmaET 对液冷系统进行建模仿真。建模时只建立单个刀片节点，且只对单个刀片上液冷覆盖的芯片，即 2 个 300 W 串联 CPU 进行建模，风冷芯片不建模。板内管路内径根据实际设计尺寸设置为 4 mm，供液温度为 45 °C，冷却工质为水。冷板分别采用埋铜管和铲齿冷板，尺寸均为 Intel 推荐的标准冷板尺寸（113 mm × 78 mm × 10 mm，长 × 宽 × 高）。仿真模型见图 4。下面对芯片在不同冷板结构和不同流量条件下的散热情况进行仿真分析。

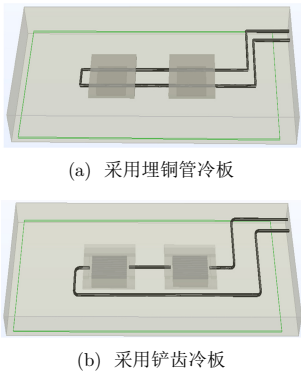


图 4 仿真模型

2.2 仿真结果分析

单个刀片节点采用不同冷板结构和不同流量时的仿真云图如图 5 所示。由图可知，铲齿冷板的散热效果明显优于埋铜管冷板。

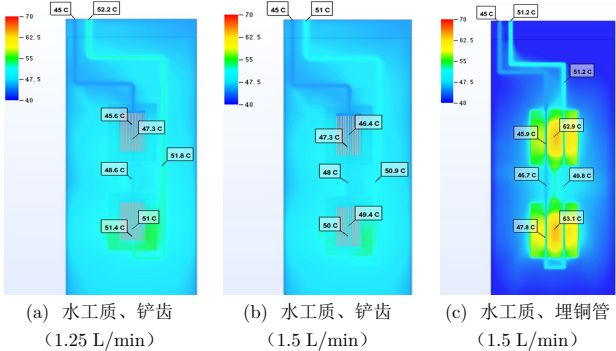


图 5 结果云图

不同工况下的主要仿真数据见表 3，分析和对比表中数据可得：1）在设计的所有工况下，器件及工质的升温都能满足要求；2）流量一定时，铲齿冷板与埋铜管冷板相比，系统的散热改善超过 10 °C，但管路系统的压损较埋铜管冷板系统有所增加；3）管路设计流量的增加有利于冷板和 CPU 器件的散热，但板内压损随之大幅提升，需增加管路内径（目前为 4 mm）以减小压损。当前设计的单路流量建议控制在 1.5 L/min 以下。

表 3 仿真数据结果

参数	工况 1	工况 2	工况 3
工质类型	水工质	水工质	水工质
冷板类型	铲齿	铲齿	埋铜管
流量/(L·min ⁻¹)	1.25	1.50	1.50
冷板壳温/°C	47.3/51.0	46.4/49.4	62.9/63.1
CPU 壳温/°C	49.2/53.2	48.4/51.5	64.3/64.6
工质温升/°C	7.2	6.0	6.2
压损/Pa	38 203	49 983	32 850

注：节点上前后冷板及前后 CPU 壳温值用“/”隔开。

3 测试验证

3.1 测试说明

为进一步探究和验证所设计的液冷系统的散热性能，现结合实际项目，应用该系统对刀片节点的散热能力进行实验测试。节点单板实物如图 6 所示。测试采用 Whitley 平台型号为 Icelake-300W 的 CPU，液冷工质采用去离子水，冷板采用 Intel 标准的铲齿冷板，在室温下进行散热性能测试。



图 6 测试节点单板

在热测试前，对设备液冷系统的冷板组件、外接管路、盲插接头等部件进行多次拆装和插拔，并对管

路进行通液, 检验设备是否正常运转以及系统是否漏液。

3.2 测试结果与分析

测试的具体数据见表 4, 通过改变供液流量来测试各节点上 CPU 的散热情况。

表 4 热测试数据					
参数	工况 1	工况 2	工况 3	降额温度 /°C	
节点流量/(L·min ⁻¹)	1.06	1.25	1.51	—	
进水温度/°C	35	35	35	—	
出水温度/°C	43.1	42	40.9	—	
工质温升/°C	8.1	7	5.9	—	
供水压力/MPa	0.409	0.493	0.596	—	
回水压力/MPa	0.188	0.122	0.102	—	
系统压损/MPa	0.221	0.371	0.494	—	
CPU 功率/W	300	300	300	—	
CPU 结温 /°C	节点 1	70/74	68/72	68/71	102
	节点 2	70/75	69/73	67/72	102
	节点 3	72/74	70/73	68/71	102
	节点 4	72/75	70/74	69/72	102
	节点 5	70/74	67/72	66/70	102
	节点 6	69/74	67/71	66/70	102
	节点 7	70/73	68/71	67/69	102
	节点 8	72/75	69/73	67/71	102

注: 节点上前后 CPU 温度值用 “/” 隔开。

分析不同工况下的测试数据后可得:

1) 节点供液流量为 1.06, 1.25 和 1.51 L/min 且供液温度为 35 °C 的条件下, 系统使用 300 W CPU 时满足散热要求, CPU 最高结温为 75 °C, 还有约 30 °C 的裕量; 各节点前后 CPU 温差约为 3 °C ~ 5 °C, 设备所有节点 CPU 温度的整体一致性良好。可见液冷系统能够支持 Intel Whitley 平台全系列 CPU, 与风冷系统相比散热性能大幅提升。

2) CPU 的温度随着节点供液流量的增加而降低, 同时系统压损会随之增加。目前流量下压损在 0.22 ~ 0.49 MPa 之间, 后续系统优化升级可增大管路管径或连接器直径, 以降低系统压损。

对设备液冷系统的冷板组件、外接管路、盲插接头等部件进行多次拆装和插拔, 并对管路进行通液, 设备运转正常, 无漏液。

4 成本分析

为进行全面比较, 现对风冷和液冷散热方案的成本进行预估对比分析。整体成本包括初期投入的硬件成本和后期运营成本。具体分析场景如下: 整机放置于环境温度为 35 °C 的机房内运行。采用风冷时, CPU 最大功率可达 165 W, 对应的整机功率为 6 000 W, 此时风扇全速运转 (功率 850 W) 才能满足系统的散热需求; 采用液冷时, CPU 最大功率可

达 300 W, 对应的整机功率约为 7 500 W, 实测风扇转速为 65% (功率 170 W) 即可满足散热需求。

经初步计算, 两种方案的硬件成本 (风扇、液冷分水器系统、机房空调) 和运营成本 (耗电量) 情况见表 5 和表 6。

表 5 硬件成本对比			元
硬件	液冷散热	风冷散热	
散热物料	43 970	3 950	
机房空调	6 750	15 000	
总计	50 720	18 950	

注: 1) 液冷暂不考虑冷水机组或者冷却塔及机房管路的成本; 2) 机房空调成本按整机所需投入的冷量进行估算。

表 6 运营成本对比		
项目	液冷散热	风冷散热
风扇功耗/W	390	910
冷源功耗/W	240	—
机房空调功耗/W	1 040	2 300
年运行天数/d	365	365
年耗电量/(kW·h)	14 629.2	28 119.6
电价/(元/(kW·h))	1	1
总成本/元	14 629.2	28 119.6

注: 机房空调能效比按 2.6 计算, 空调耗电 = 设备风冷总功率/2.6。

从一次性投入的硬件成本来看, 液冷方案的初期投入约为风冷方案的 2.7 倍, 造价较高; 在运营成本方面, 液冷方案的能耗明显低于风冷, 全年运行电费可节省约 50%。若整机持续使用液冷散热, 则液冷成本回收时间约为 (50 720 - 18 950)/(28 119.6 - 14 629.2) = 2.335 年, 即使用 2 年多以后设备的经济性将凸显。并且设备的 CPU 可在 300 W 功率下运行, 与风冷相比, 设备的使用性能得到提高。尽管液冷方案初期投入较高, 但随着液冷技术的逐渐成熟, 其成本将会得到降低, 液冷在节能、散热方面的优势将会更加突出。这与国家大力提倡的节能减排发展方向一致, 更具前景。

5 结束语

针对所开发的服务器设备的重要模块进行液冷方案的设计, 整个液冷系统由流体接头、分水器、冷板、冷源及相应管路等部分组成。

仿真分析和实验测试表明, 液冷方案能够支持 1U 刀片内前后两个 300 W 串联 CPU 的散热, 突破了风冷散热无法实现的散热瓶颈, 散热性能优越。但是, 在工质种类、冷板形式和流量大小上要综合考虑后进行选择, 确保液冷系统的性能。

在设备长期运行过程中, 液冷方案的综合成本将

(下转第 41 页)

参考文献

- [1] 王政, 王雪丽. 军用方舱发展趋势[J]. 现代军事, 2016(5): 72-74.
- [2] 王雪丽. 我国军用方舱技术发展综述[J]. 专用汽车, 2016(3): 46-50.
- [3] 赵鑫, 葛磊. 基于液冷技术的电子方舱综合环控方案探讨[J]. 低温与超导, 2019, 47(2): 99-103.
- [4] 王双宝. 方舱系统舱内热环境设计[J]. 科技经济导刊, 2017(21): 85.
- [5] REDA I, KHALIL E E, ABOUDEIF T M, et al. Air flow regimes and thermal comfort in vehicle cabin considering solar radiation[J]. Fluid Mechanics, 2017(4): 1-7.
- [6] MARSHALL G J, MAHONY C P, RHODES M J, et al. Thermal management of vehicle cabins, external surfaces and onboard electronics: an overview[J]. Engineering, 2019(5): 954-969.
- [7] 高鼎涵, 章琦, 万峻麟. 一种大型设备方舱结构设计与分析[J]. 新技术新工艺, 2019(6): 30-32.
- [8] 王向东, 李智, 庄信武. 某型车载方舱调温系统的设计及设备选型[J]. 机电产品开发与创新, 2016, 29(5): 3-5.
- [9] 陈文博, 刘新博. 某军用通信方舱的升温试验及有限元仿真分析[J]. 电子机械工程, 2019, 35(4): 48-51.
- [10] 张梦龙, 蒋敏, 黄永. 某电子方舱舱内热环境的模拟研究[J]. 装备环境工程, 2018(4): 5-9.
- [11] 曹晔, 朱勇军, 张凤雷. 基于6Sigma的电子设备内部电池寿命优化分析[J]. 电子元器件与信息技术, 2019, 3(5): 64-66.

矫海男, 1969年生, 工程师, 主要从事电子设备结构设计及军用电子方舱车整车集成设计工作。

(上接第7页)

- Signal Processing, 2013, 45(1): 91-104.
- [14] O'CALLAHAN J, AVITABILE P, RIEMER R. System equivalent reduction expansion process(serep)[C]//Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference, 1989.
- [15] TARPØ M, NABUCO B, GEORGAKIS C, et al. Expansion of experimental mode shape from operational modal analysis and virtual sensing for fatigue analysis using the modal expansion method[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 130: 1-19.
- [16] 陈宇轩. 基于Kriging方法的大跨度拱桥模态扩展及有

- 限元模型修正[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [17] SKAFTE A. Applications of expansion techniques in operational modal analysis[D]. Aarhus, Denmark: Aarhus University, 2016.
- [18] 李海洋, 周金柱, 杜敬利, 等. 面向智能蒙皮天线电补偿的位移场重构[J]. 电子机械工程, 2017, 33(1): 19-24, 51.

王林男, 1997年生, 硕士研究生, 主要研究方向为天线的形变感知重构。

周金柱男, 1979年生, 教授, 主要研究方向为新型智能蒙皮天线及场重构理论和形性补偿控制等。

(上接第23页)

逐渐优于风冷方案, 并在设备的散热、节能、降噪等方面持续发挥着较大的优势。液冷散热具有良好的应用前景。

后期计划对液冷设备的长期可靠性及机房级运用进行进一步的深入研究, 为液冷技术规模化商用作准备。

参考文献

- [1] 周海峰, 邱颖霞, 鞠金山, 等. 电子设备液冷技术研究进展[J]. 电子机械工程, 2016, 32(4): 7-10.
- [2] 金旻霖. 一种新型的液冷机箱及冷板散热系统的研究[J].

- 电子技术与软件工程, 2016, 5(8): 111-114.
- [3] 陈洁琼. 高效能云计算中心制冷技术节能研究[J]. 制冷与空调, 2019, 19(6): 7-9.
- [4] 谢丽娜, 郭亮. 对液冷技术及其发展的探讨[J]. 信息通信技术与政策, 2019, 46(2): 22-25.
- [5] 石育佳, 王秀峰, 王彦青. CPU液体冷却器件及冷却液材料研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(11): 56-60.
- [6] 刘启航, 陈正江, 黄巍. 基于6SigmaET的液冷设备热分析及优化[J]. 电子机械工程, 2017, 33(6): 32-35.

高益兵男, 1985年生, 硕士, 主要从事IT及通讯设备热设计工作。