

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250522003

## 湖水自然冷却数据中心制冷系统模拟与优化研究

李长智<sup>1</sup> 唐少瀛<sup>1</sup> 谢冬梅<sup>2</sup> 刘晴晴<sup>3</sup> 吴学渊<sup>4</sup> 邵双全<sup>3</sup>

(1 数字广西集团有限公司 南宁 530022; 2 广西江才数字科技有限公司 南宁 530000;

3 华中科技大学能源与动力工程学院 武汉 430074; 4 广东省电信规划设计院有限公司 广州 510660)

**摘要** 随着数据中心向智能化转型,单机柜功耗密度提升,冷却能耗占比高,降低数据中心电能使用效率至关重要。本文提出一种结合自然水源与液冷技术的冷却系统,以广西来宾某数据中心为研究对象,构建系统模型,分析不同控制方式和运行条件下的系统性能,并与常规水冷冷水机组冷却系统对比。研究表明:冷冻水泵控制送风温度能耗更低,节能约10%且利于余热利用;冷却水泵控制冷冻水供水温度更节能,但节能率随水库水温的升高而下降;自然水源冷却系统全年节能率达73.5%,制冷负载系数为0.05,低于常规系统;送风温度设定点高时系统能耗波动小,综合考虑选取28℃较合适。该研究为绿色节能数据中心冷却系统设计提供了参考。

**关键词** 数据中心;冷却系统;自然水源;液冷;节能率

中图分类号: TU83; TP308

文献标识码: A

### Simulation and Optimization of Data-Center Cooling System with Naturally Cooled Reservoir Water

Li Changzhi<sup>1</sup> Tang Shaoying<sup>1</sup> Xie Dongmei<sup>2</sup> Liu Qingqing<sup>3</sup> Wu Xueyuan<sup>4</sup> Shao Shuangquan<sup>3</sup>

(1. Digital Guangxi Group Co., Ltd., Nanning, 530022, China; 2. Guangxi Jiangcai Digital Technology Co., Ltd., Nanning, 530000, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China; 4. Guangdong Planning and Designing Institute of Telecommunications Co., Ltd., Guangzhou, 510660, China)

**Abstract** Owing to the transformation of data centers toward intelligent computing, the power density per cabinet has increased, with cooling-energy consumption constituting a significant proportion. Reducing the power-usage effectiveness (PUE) of data centers is crucial. This study proposes a cooling system that combines natural water sources with liquid-cooling technology. Considering a data center in Laibin, Guangxi as the research object, a system model is constructed to analyze the system performance under different control methods and operating conditions; subsequently, it is compared with conventional water-cooled chiller cooling systems. The result shows that controlling the supply-air temperature through the chilled-water pump reduces energy consumption by approximately 10% energy as well as facilitates waste-heat utilization. Additionally, controlling the chilled water-supply temperature through the cooling water pump is more energy efficient, although the energy-saving rate decreases as the reservoir water temperature increases. The natural water-source cooling system achieves an annual energy-saving rate of 73.5% with a cooling load factor of 0.05, which is lower than that of the conventional system. When the supply-air temperature setpoint is higher, the system energy consumption fluctuates less. Based on a comprehensive consideration, 28℃ is a suitable temperature. This study provides a reference for the design of green and energy-efficient data-center cooling systems.

**Keywords** data center; cooling system; natural water source; liquid cooling; energy-saving rate

随着人工智能、云计算以及大数据的快速发展,算力需求爆发式增长,截止2023年底,全球算力规模达到910EFLOPS(FP32),同比增长40%,传统数据中心逐步向智能化转型,单机柜功耗密度大幅提升,性能与绿色双目标成为数据中心高质量发展的关键。冷却能耗在数据中心总能耗占比不低于30%<sup>[1-3]</sup>(图

1),提高冷却系统能效、降低数据中心PUE(电能使用效率, power usage effectiveness)至关重要。

目前数据中心冷却系统节能技术研究主要集中于自然冷却技术<sup>[4-5]</sup>、液冷技术<sup>[6-8]</sup>等方面。自然冷却技术根据冷源不同可分为风侧自然冷却与水侧自然冷却,通常风冷冷水机组适用于长江流域或以北的

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修回日期: XXXX-XX-XX; 录用日期: XXXX-XX-XX

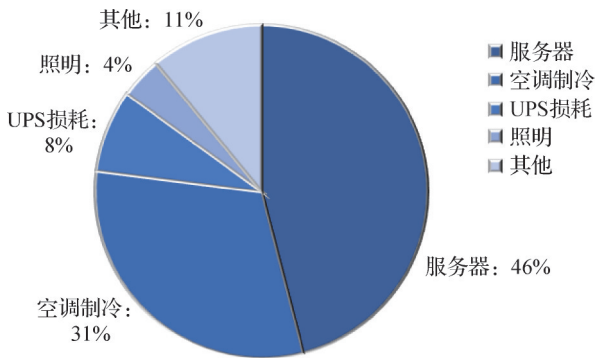


图1 数据中心各部分能耗分布

Fig.1 Distribution of energy consumption of various parts in the data center

大部分地区,水冷冷水机组系统适用于长江流域或长江以南的地区,且附近临水的数据中心,很多学者针对不同的地域研究了这2种冷却技术的实用性及经济性。L. Silva-Llanca等<sup>[9]</sup>对比空气自然冷却系统与传统冷却系统,J. Cho等<sup>[10]</sup>研究了空气自然冷却系统中空气侧经济器的节能和节水率,得出温度低于20℃、湿度高于60%时效益最好。Mi Ranran等<sup>[11]</sup>对水侧自然冷却的现场节能性能进行了检验和评价,并提出3种优化方案。目前自然冷却技术广泛应用于数据中心空调系统中,但仍需与机械制冷系统相结合,采用根据室外环境条件轮换运行的工作模式<sup>[12]</sup>,上述方案可以满足数据中心机房的冷量需求,但自然冷源冷却利用率欠佳。

液冷技术可分为接触和非接触式2种类型,接触式液冷技术主要包括浸没式和喷淋式,非接触式典型方案为冷板式液冷,其中冷板式液冷是应用最早、普及率最高的液冷技术。应用实践中,冷板式液冷通过设备内部管路可将大功率部件产生热量带走,而产热较少的其他器件仍需采用风冷形式散热,因此采用液冷与风冷结合的应用模式,有利于在总体

上实现效果、成本的最优。Qu Shengli等<sup>[13]</sup>以最小系统功耗为优化目标,以芯片温度为约束条件,对不同环境温度和热负荷下的最佳冷却塔风量、一次侧流量和二次侧流量进行研究。A. Heydari等<sup>[14]</sup>实验研究了不同液冷板冷却回路的传热效率与压降,并在高功率密度机架进行测试,验证了液气双通道冷却的可行性。冷板流道结构<sup>[15-17]</sup>也是研究热点之一。

由此提出一种利用自然水源结合液冷技术,机柜内阶梯利用冷量的冷却系统,扩大对自然冷源的利用,实现节能效益最大化。本课题以广西省来宾市某水库自然水源液冷数据中心冷却系统为研究对象,利用仿真软件建立冷却系统模型,对系统性能进行全年分析与优化设计,明确该系统的可行性与节能效果,以达到充分发挥自然冷源优势,助力绿色节能数据中心建设的目标。

## 1 水库水源自然冷却系统及模型构建

### 1.1 系统原理

图2所示为自然水源与风液机柜耦合的数据中心冷却系统。自然水源通过冷却水泵进入板式换热器中,与冷冻水进行热交换从而为机房提供冷量;冷冻水被冷却后先进入机柜背板冷却机房内热空气,然后进入CDU(冷量分配单元,coolant distribution unit)与来自高热流密度部件的冷却液进行换热,进一步升温后的冷冻水又进入板式换热器,如此循环往复;而冷却后的空气进入机柜带走低热流密度部件的热量,由机柜前门进入机房热通道,之后重新被冷冻水冷却。以上过程实现了冷量的阶梯利用,采用冷板式液冷使系统可以采用较高的冷冻水供水温度,最大限度地利用自然冷源。同时,由于无需压缩机这种高耗能设备,仅通过泵和风机输送冷量,冷却系统能耗可以保持在很低的水平,降低数据中心PUE。

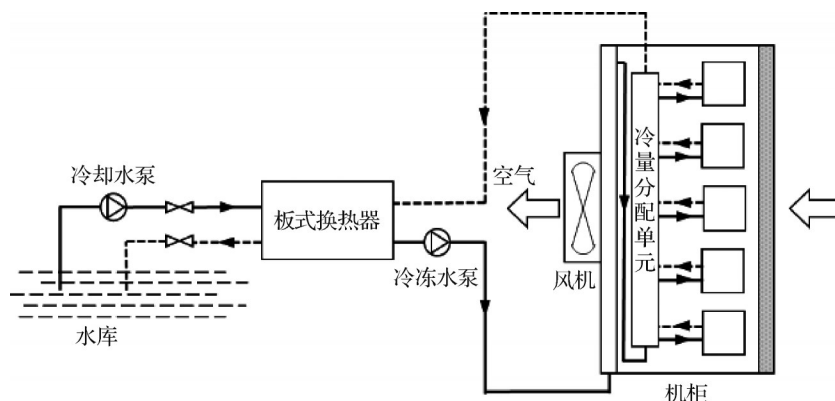


图2 水库水源冷却系统

Fig.2 The cooling system with water source of reservoir

采用冷板式液冷技术除了在降低能耗方面有巨大优势,更重要的是由于液体高热容的特点可以实现机架功率密度的提高<sup>[18]</sup>,有效提升单机架的计算能力。在该技术中,工作液体与被冷却对象分离,不与电子器件直接接触,而是通过液冷板等高效热传导部件将被冷却对象的热量传递至制冷剂中,提高了运行的安全性与可靠性。图3所示为机柜内内部示意图,水冷背板缩短了送风距离,减少了冷热空气发生混流的问题,系统节能的同时能够有效解决机房内存在局部热点的问题。

### 1.2 系统模型构建

本文采用某仿真软件进行模拟,系统模型如图4所示,该模型以单机柜作为对象。冷却系统能耗主要是末端风机能耗和水泵输运能耗;末端风机的能耗是机柜独立控制的,受机柜数量影响较小;水泵输运能耗中考虑了距离的影响,因此,本文以一个机柜的模型分析结果可以适合于不同规模的同类型的数据中心。运行时,需要水库水温与机柜负荷作为条件输入,负荷按照30%分配至风冷方式进行冷却,70%分配至水冷方式进行冷却的方式进行分配。图中水温读取部件读取水温后,将其输入至冷却水泵模块作为进水温度,而冷却水泵流量信号来自冷却水泵控制部件输出经冷却水泵变频部件处理后的信

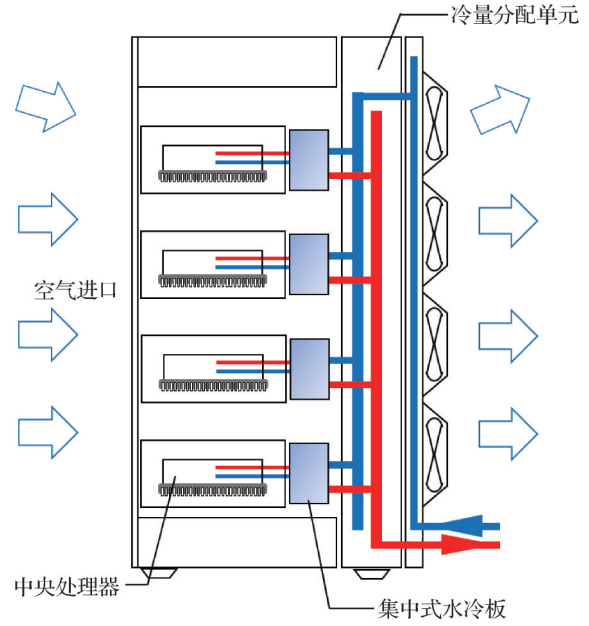


图3 机柜内部示意图

Fig.3 Schematic diagram of the interior of the cabinet

号。板式换热器同时接受来自冷却水泵的水温与流量信号以及来自水冷负荷部件的水温与流量信号,进行运算处理后将冷冻水供水温度信号传输至冷冻水泵部件。冷冻水泵和风机的流量信号来源与冷却水泵相似,均由控制部件经变频处理后得到。

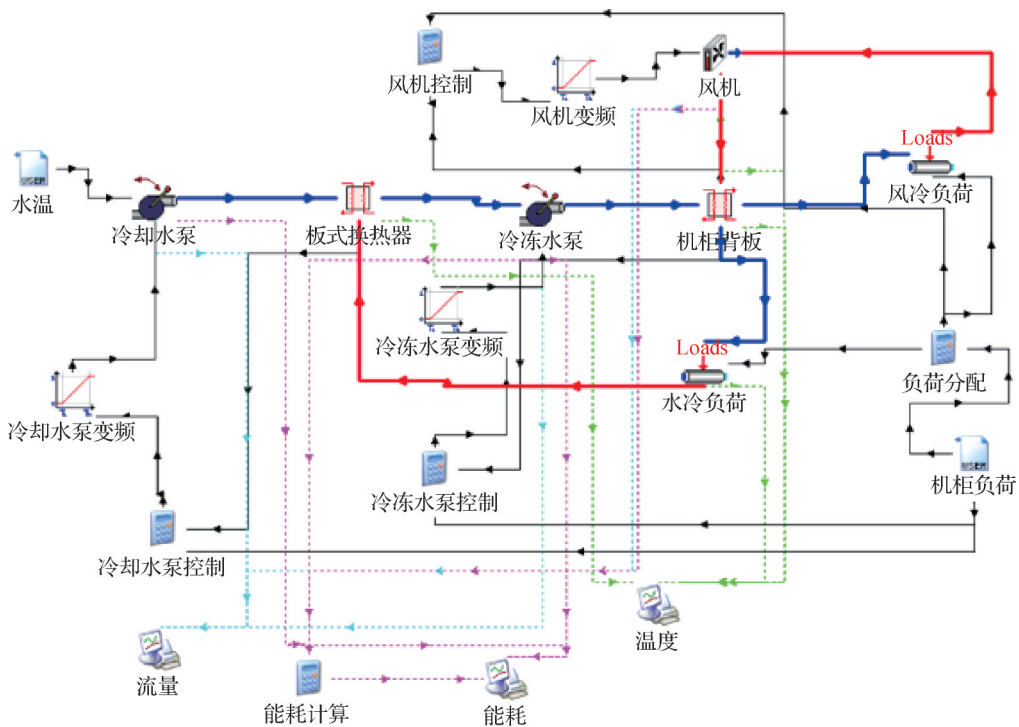


图4 数据中心冷却系统模型

Fig.4 Model of the data center cooling system

## 2 案例分析

本项目数据中心位于广西省来宾市,其全年干球温度与湿球温度变化如图5所示。水库水温数据来自于红水河下游迁江站,具体数据如表1所示。该地区最低平均水温出现在2月,为16.9℃;最高平均水温出现在9月,为26.5℃,水温全年温度波动较小。

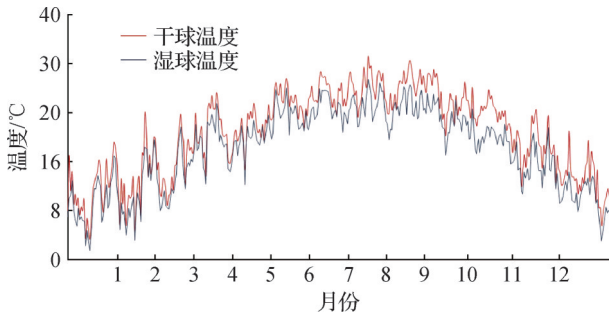


图5 来宾市全年干球温度与湿球温度变化

Fig.5 Changes in the dry-bulb temperature and wet-bulb temperature in Laibin City throughout the year

数据中心全年正常运行时间超过99%,这与其他公共建筑有显著区别,运行时间约为一般公共建筑的3倍,因此其负荷也需要24 h输入。机柜负荷参考了一般数据中心典型负载率,工作日负荷情况如图6所示,一天中最低负载率超过60%,且约有10 h负载率超过90%,全天负载率保持在较高水平,周末负荷按平时的80%计算。

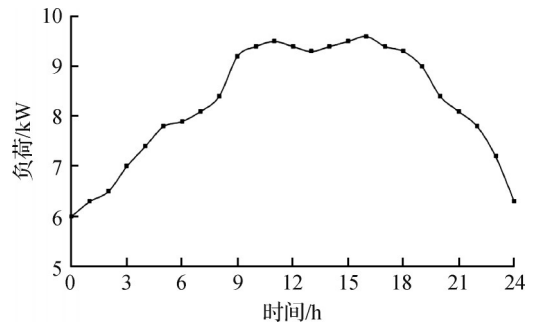


图6 24 h 机柜负荷模拟曲线

Fig.6 Simulated curve of the 24-hour cabinet load

表1 红水河下游迁江站各月份平均水温

Tab.1 Average monthly water temperatures at qianjiang station in the lower reaches of the Hongshui river

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
水温/℃	17.5	16.9	17.6	18.9	21.2	23.3	24.8	26.0	26.5	23.0	23.0	20.4

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同送风温度控制方式能效分析

送风温度控制作为机房温度控制的优先选择,利用仿真软件建立的系统模型对比了冷却水泵控制与冷冻水泵控制2种方式能耗,运行工况如下:单机架额定功率为10 kW,分别对负载率70%、75%、80%、85%、90%的工况进行能耗模拟,即实际运行功率为7.0、7.5、8.0、8.5、9.0 kW,水库所提供冷却水温为24℃,冷冻水供水温度设定值为26℃,送风温度设定值为28℃,机房回风温度不超过35℃。

图7所示为各工况下2种控制方式主要设备功率与回水温度。可以看到,系统中冷却水泵与风机耗能占比较大,分别约为45%与40%,这主要由于冷却水泵流量与风机流量均远高于冷冻水泵流量,因此后续进一步节能需着重考虑减少这部分能耗。对比各负载下采用不同送风温度控制方式总功率,结果显示各工况下冷冻水泵控制送风温度方式均更为节能,且较风机控制节能率约在10%。另一方面,负载更高时,PUE更低,这是因为冷却系统能耗增长与IT设备能耗不成正比,高负荷下数据中心整体效率

更高,因此实际运行时可以考虑先尽可能提高单机架负载率,而避免采用多个机架以较低负荷工况运行。

对比冷却水泵控制与冷冻水泵控制2种方式下冷冻水回水温度,由于冷冻水泵控制下冷冻水流量低于风机控制下冷冻水流量,相同负荷下冷冻水温度变化更大,因此冷冻水泵控制回水温度约为47℃,风机控制回水温度约为39℃,冷冻水泵控制下回水温度明显更高,同时又不会过热,仍能保证数据中心安全稳定运行。此时余热高效利用成为可能,充分利用该部分能量可以实现对办公场所供热和卫生用水、有效减少供热设备的能耗,从而大幅降低整个园区的碳排放,有利于进一步提高能量利用率。

### 3.2 不同冷冻水供水温度控制方式能效分析

冷冻水供回水温度对整个空调系统自然冷源使用时间即能耗水平影响较大,通常冷冻水供水温度提高1℃,冷机能效可提高2%~3%。因此,近年来新建、设计数据中心供回水温度有提升趋势,对于机架级空调末端形式其供回水温度可以提高至15℃/21℃甚至更高<sup>[19]</sup>。本文系统直接利用水库水作为冷却水,因此冷却水供水温度受自然环境影响,模拟时冷却水进水温度作为变量控制冷冻水供水温度,对

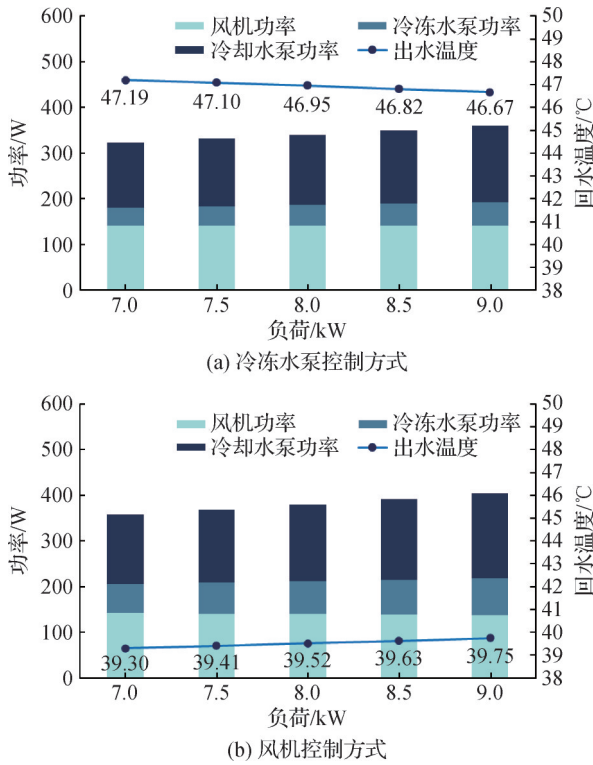


图7 各工况下两种控制方式主要设备功率与回水温度

Fig.7 Power of main equipment and return water temperature under two control methods in various working conditions

比冷却水泵控制与冷冻水泵控制2种方式的能耗。

模拟条件如下,单机架额定功率为10 kW,负载率为90%,即实际运行功率为9 kW,水库所提供冷却水温分别为18、20、22、24、26 °C,冷冻水供水温度设定值为26 °C,送风温度设定值为28 °C,机房回风温度不超过35 °C。需要注意的是,在冷却水进水温度为26 °C时,冷冻水供水温度无法达到设定值,但误差在可接受范围内。

表2 不同冷却水温度下主要设备总功率及CLF

Tab.2 Total power of main equipment and CLF under different cooling water temperatures

冷却水温/°C	冷冻水泵控制		冷却水泵控制	
	功率/W	CLF	功率/W	CLF
18	485.54	0.054	355.43	0.039
20	488.39	0.054	367.57	0.041
22	491.45	0.055	381.10	0.042
24	494.70	0.055	400.00	0.044
26	498.11	0.055	437.97	0.049

CLF(制冷负载系数,cooling load factor)为数据中心制冷设备耗电与IT设备耗电的比值。表2所示为不同冷却水温度下主要设备总功率及CLF,由表2可

知,冷冻水泵控制下相比于冷却水泵控制下CLF略高。但2种控制方式下冷却水进水温度更高时系统总功率明显均高于进水温度低时的总功率,但冷却水泵控制方式受影响更大,该控制方式下能耗波动更明显,这主要是因为冷却水进水温度升高时,为保证冷冻水供水温度稳定,冷却水泵需要增加自身流量从而传递相同冷量,其流量随冷却水进水温度变化波动更大,导致能耗变化较大。而冷却水泵本身流量较小,冷却水温度变化产生的影响引起的流量波动较小,能耗变化相对较小。因此,冷却水泵控制在各工况下均更为节能,但18 °C时节能率为26.8%,26 °C时节能率降至12.1%,出现明显降低。

图8所示为各工况下两种控制方式主要设备功率,可知,冷冻水泵控制下的冷却水泵功率在总功率占比很高,而受冷冻水泵控制时冷却水泵功率变化很小,因此系统总功率同样变化较小。且冷却水进水温度降低时,冷冻水供水温度及送风温度均将降低,冷冻水泵一方面为控制供水温度流量需要增加,另一方面为控制送风温度流量需要减小,2种控制作用叠加使冷却水泵很难达到理想的控制效果,需要结合其他设备控制,因此采用冷却水泵控制供水温度更加合适,这样可以避免上述矛盾,同时系统整体能耗更低。

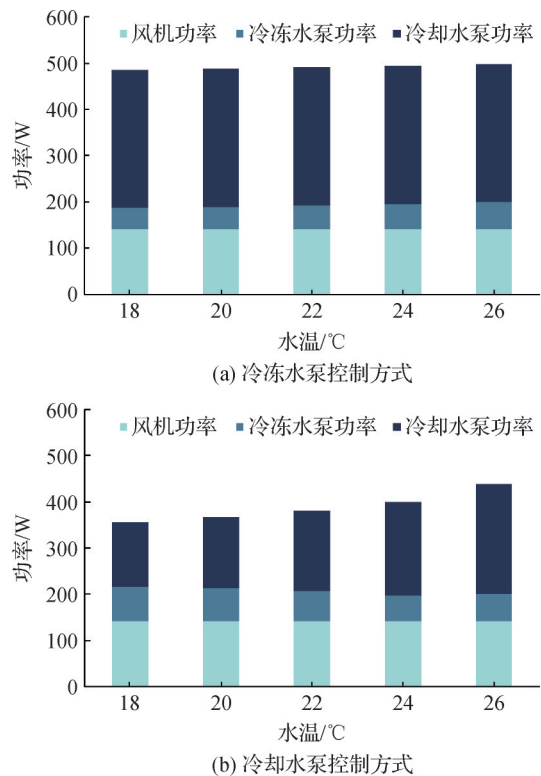


图8 各工况下两种控制方式主要设备功率

Fig.8 Power of main equipment under two control methods in various working conditions

### 3.3 不同冷却系统全年能效对比分析

目前数据中心最常用冷却系统由冷却塔+板式换热器+水冷冷水机组+末端精密空调组成,为对比本文研究冷却系统能耗情况,建立如图9所示的常规水冷冷水机组系统模型。对比自然水源冷却系统,冷水机组冷却系统最大区别在于冷量获得方式,该系统利用机械制冷保证了冷冻水出水温度满足要

求。而本文提出的自然水源冷却系统在夏季冷却水 26.5 °C 水温下,按照额定水量风量设计,冷冻水供水温度为 28.5 °C,背板出风温度 30.5 °C,服务器出风温度为 35.5 °C。采用加大水量和风量的运行方式,服务器出风温度可以控制在 35 °C 以内,可以保障服务器的正常运行。

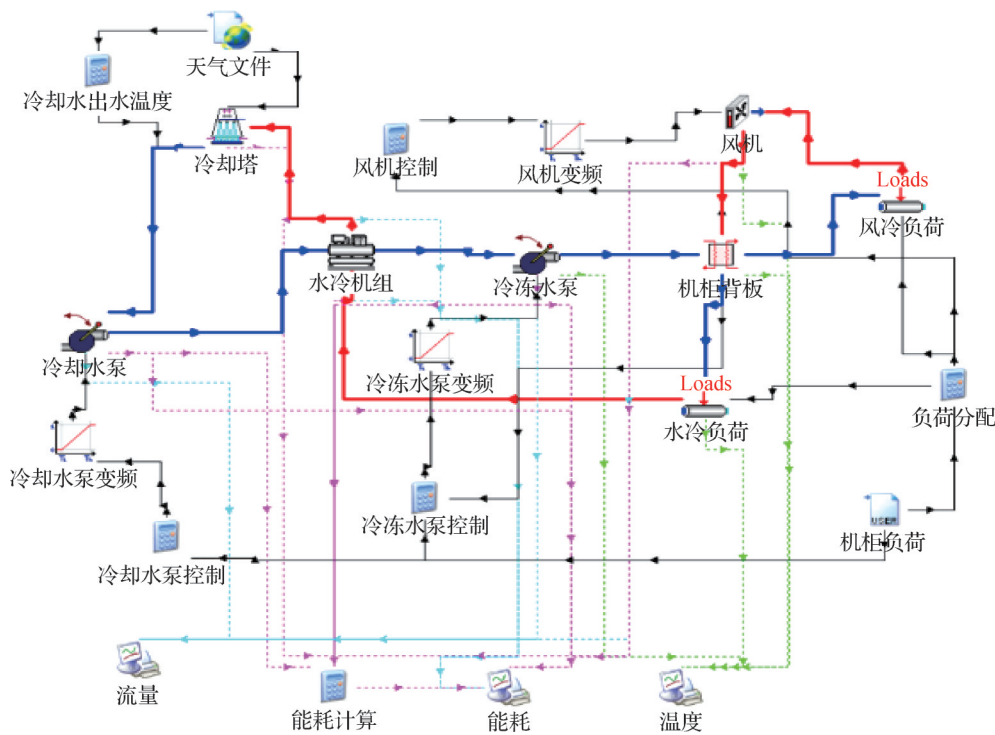


图9 常规水冷冷水机组冷却系统系统模型

Fig.9 Model of the conventional water-cooled chiller cooling system

图10所示为自然水源冷却系统与冷水机组冷却系统全年各月的能耗对比,可以看出冷水机组冷却系统能耗远高于自然水源冷却系统,采用自然水源冷却全年节能率可达73.5%,节能效果显著。冷水机组制冷过程冷却温度范围广且运行稳定,但由于该系统使用压缩机做功整体能耗较高。最大平均每日节能量出现在5月,整体上看自然水源冷却系统在气温较高时表现出较高的节能量,这说明高温气候对冷水机组冷却系统的不利影响更大,主要原因在于水库中水的比热容远大于空气,水温随季节变化较气温变化小,水温在1年内温差约10 °C,而全年气温差距在25 °C以上。因此采用水库水作为冷却水的自然水源冷却系统受影响较小,能耗波动也较小。

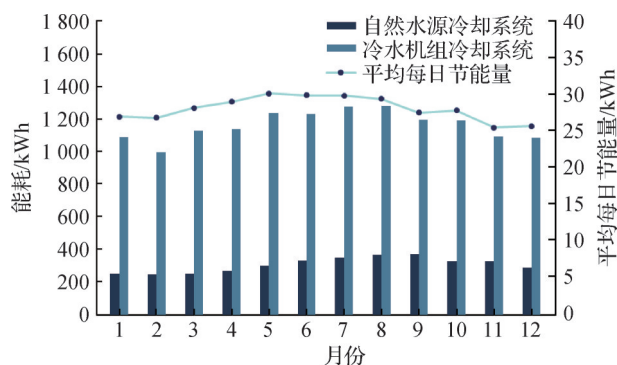


图10 两种冷却系统能耗对比

Fig.10 Comparison of energy consumption of the two cooling systems

表3所示为两种冷却系统各部件能耗占比及CLF,通过对比可知,在冷水机组冷却系统中水冷冷水机组能耗占比最高,为68.5%,达到了9572.95 kW·h,而其他各部件能耗占比均未超过20%。以自然冷

源冷却系统中占比最高的冷却水泵能耗为例,自然水源冷却系统该部件全年能耗为1886.58 kW·h,而冷水机组冷却系统中为2018.19 kW·h,两者差别较小,冷冻水泵与风机能耗也较为相近,这说明2种冷却系统能耗差异较大的主要原因在于水冷冷水机组。

系统模拟数据中心位于来宾市,属于亚热带季风气候,夏热冬冷,冷水机组冷却系统仅利用室外空气作为冷源提供冷量,自然冷源利用率受到限制并需要冷水机组进行机械制冷;而自然水源冷却系统采用温度适宜的水库水源作为冷却水,可全年充分利用自然冷源,使冷却能耗明显降低。因此,自然水源冷却系统全年 CLF 为 0.05,低于冷水机组冷却系统的 0.20,采用自然水源冷却系统优势明显。

表3 两种冷却系统各部件能耗占比及 CLF

Tab.3 Proportion of energy consumption of each component in the two cooling systems and CLF

冷却系统	冷却水泵	冷冻水泵	风机	水冷冷水机组	冷却塔	CLF
自然水源	50.46%	14.47%	35.07%	0	0	0.05
冷水机组	14.53%	4.48%	8.96%	68.53%	3.50%	0.20

### 3.4 节能优化分析

送风温度设定点同时影响了冷却水泵、冷冻水泵与风机3个主要设备能耗,下面对不同送风温度设定点能耗进行分析。

本次模拟送风温度设定点为 26、27、28、29、30 °C 这 5 种工况,冷冻水供水温度设定点为 26 °C,机房回风温度不超过 35 °C。如图 11 所示,送风温度设定点分别为 26、27、28、29、30 °C 时自然水源冷却系统总能耗随气候变化趋势基本相同。月最大能耗量出现在 8、9 月份,均约为 350 kW·h,月最小能耗量出现在 2 月份,约为 280 kW·h,但送风温度设定点为 29、30 °C 时系统能耗波动较小,这主要是由于送风温度设定值较高时,冷却水泵供给冷却水温度在夏季高温时与送风温度仍有较大温差,所需流量与冬季低水温时所需流量相差较小,从而所需流量能耗占比较高的冷却水泵流量变化较小,最终系统总能耗在全年各月波动较小。

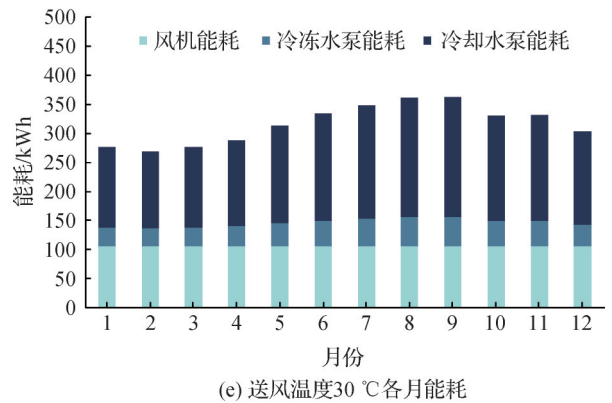
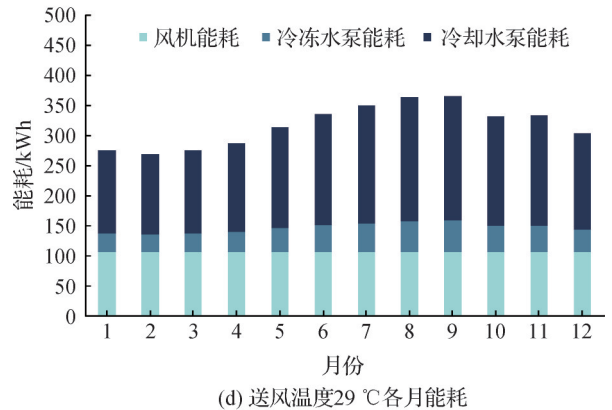
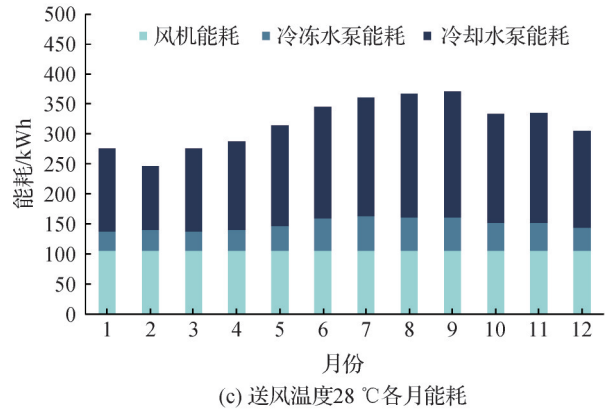
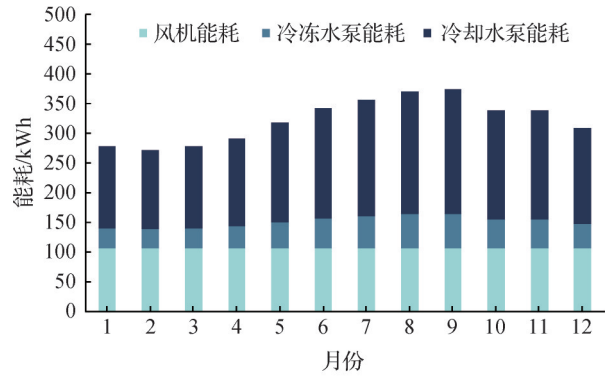
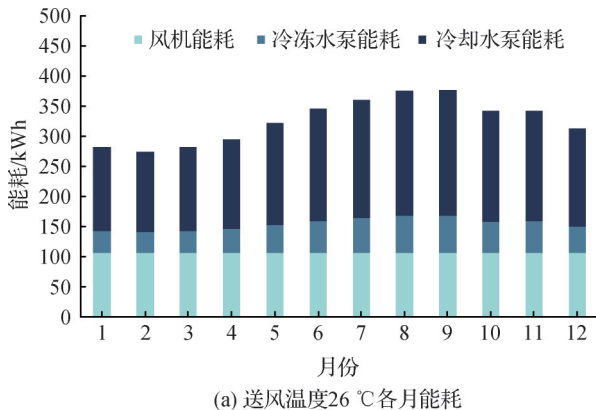


图 11 不同送风温度系统各月能耗  
Fig.11 Monthly energy consumption of systems with different supply air temperatures

以送风温度设定点为 28 °C 工况为例,图 12 所示为各月主要设备能耗占比,可以看到冷却水泵能耗

占比与自然水源水温变化基本同步,在2月份达到最低,为42.9%,在9月份达到最高,为56.7%,这说明冷却水泵能耗受自然水源水温影响显著,其能耗随水温升高而显著增加;冷冻水泵能耗占比变化较小,而风机能耗占比与冷却水泵能耗占比变化相反。

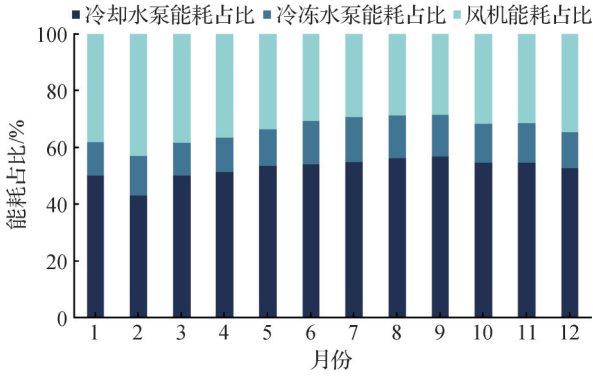


图12 各月主要设备能耗占比

Fig.12 Proportion of energy consumption of main equipment in each month

各送风温度设定点下冷却系统全年总能耗如图13与表4所示,随送风温度上升,系统总能耗呈下降趋势,但送风温度升至28℃时,能耗下降速率降低,考虑到机柜安全运行,送风温度采用28℃更合适,此时各月平均出风温度均未超过35℃。

对比不同送风温度下各设备能耗占比,由于送风温度主要受冷冻水泵控制,送风温度升高,冷冻水泵能耗占比在系统总能耗增加的情况下仍明显降低。风机能耗占比随送风温度的升高逐渐上升,这是由于送风温度升高的情况下有必要适当增加出风量以保证设备在适当温度内安全稳定运行。

#### 4 结论

本文以广西省来宾市某数据中心为研究对象,

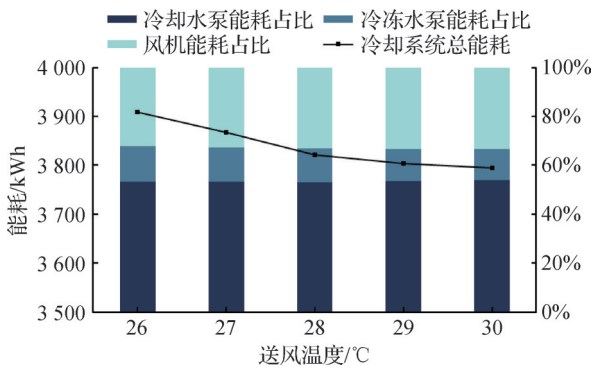


图13 不同送风温度下全年总能耗及各设备能耗占比

Fig.13 Annual total energy consumption and proportion of energy consumption of each device under different supply air temperatures

表4 不同送风温度下全年总能耗及各设备能耗占比  
Tab.4 Annual total energy consumption and proportion of energy consumption of each device under different supply air temperatures

送风温度/℃	总能耗/(kW·h)	冷却水泵能耗占比/%	冷冻水泵能耗占比/%	风机能耗占比/%
26	3909.35	53.80	14.82	32.43
27	3867.52	53.19	14.03	32.78
28	3820.62	53.03	13.79	33.18
29	3802.96	53.72	12.94	33.34
30	3794.13	53.80	12.78	33.41

提出一种自然水源冷却系统,该系统仅利用泵与风机驱动冷量输送,极大降低了冷却系统能耗,通过建立系统各设备数学模型并根据数学模型构建设备模块,对送风温度控制方式与供水温度控制方式进行分析,并在此基础上对比常规水冷冷水机组冷却系统分析全年能耗,进行节能优化分析,得到结论如下:

1)模拟结果显示,在各种负载下冷冻水泵控制送风温度系统整体能耗更低,较风机控制下节能率约为10%,另一方面,冷冻水泵控制时回水温度更高,有利于进行余热利用。

2)对比冷冻水供水温度的2种控制方式,冷却水泵控制在各工况下能耗均更低,但其节能率随水库水温的升高有所下降,18℃时节能率为26.8%,而26℃时降至12.1%。

3)自然水源冷却系统能耗远低于冷水机组冷却系统能耗,全年节能率为73.5%,且气温高时每日节能量更高;自然水源全年CLF为0.05,低于冷水机组冷却系统的0.20,在夏热冬冷地区采用自然水源冷却系统具有显著优势。

4)各送风温度设定点自然水源冷却系统总能耗随气候变化趋势基本相同。月最大能耗量出现在8、9月份,均约为350 kW·h,月最小能耗量出现在2月份,约为280 kW·h,但送风温度设定点高时系统能耗波动较小。

#### 参考文献

[1] Kargar S, Moran J L. Combining direct and indirect free cooling for data centers via transformation into a building-scale heat exchanger [J]. Applied Energy, 2025, 392: 125973.

[2] Borkowski M, Piłat A K. Customized data center cooling system operating at significant outdoor temperature fluctuations [J]. Applied Energy, 2022, 306 (Part B) :

- 117975
- [3] Fan Chengliang, Zou Binwei, Liao Yundan, et al. Evaluation of energy performance and ecological benefit of free-cooling system for data centers in worldwide climates [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 108: 105509.
- [4] 陈石鲁, 张小松, 赵善国. 基于蒸发冷却的数据中心热管背板空调系统研究[J]. *制冷学报*, 2023, 44(5): 32-40. (Chen Shilu, Zhang Xiaosong, Zhao Shanguo. Research on heat-pipe backplane air-conditioning system based on evaporative cooling in data center [J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(5): 32-40.)
- [5] 严政, 吴学渊, 黄翔, 等. 水侧自然冷却技术在雄安新区城市计算中心的应用研究[J]. *建筑科学*, 2023, 39(1): 93-100. (Yan Zheng, Wu Xueyuan, Huang Xiang, et al. Application of water side natural cooling technology in Xiongan Urban Computing Center [J]. *Building Science*, 2023, 39(1): 93-100.)
- [6] Ma Shuaiyin, Liu Yuyang, Liu Yang, et al. Artificial intelligence-enabled predictive energy saving planning of liquid cooling system for data centers [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2025, 65: 103283.
- [7] Samal S K, Chang H C, Fulpagare Y, et al. Thermal management of data centers: Chip-scale cooling using novel distributed inlet-outlet jet impingement liquid cold plate [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 271: 126360.
- [8] Miao Jie, Li Chao, Pan Minqiang. Experimental and numerical analysis of variable cross-section channel liquid cooling plate for server chips thermal management [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2024, 49: 102470.
- [9] Silva-Llanca L, Ponce C, Bermúdez E, et al. Improving energy and water consumption of a data center *via* air free-cooling economization: The effect weather on its performance [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 292: 117344.
- [10] Cho J, Lim T, Kim B S. Viability of datacenter cooling systems for energy efficiency in temperate or subtropical regions: Case study[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 55: 189-197.
- [11] Mi Ranran, Bai Xuelian, Xu Xin, et al. Energy performance evaluation in a data center with water-side free cooling [J]. *Energy and Buildings*, 2023, 295: 113278.
- [12] Cheung H, Wang Shengwei. Optimal design of data center cooling systems concerning multi-chiller system configuration and component selection for energy-efficient operation and maximized free-cooling [J]. *Renewable Energy*, 2019, 143: 1717-1731.
- [13] Qu Shengli, Duan Kaiwen, Guo Yuxiang, et al. Real-time optimization of the liquid-cooled data center based on cold plates under different ambient temperatures and thermal loads[J]. *Applied Energy*, 2024, 363: 123101.
- [14] Heydari A, Gharaibeh A R, Tradat M, et al. Experimental evaluation of direct-to-chip cold plate liquid cooling for high-heat-density data centers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 239: 122122.
- [15] 何平, 卢浩, 范益伟, 等. 工字形流道液冷板式换热器用于电池热管理的数值研究[J]. *制冷学报*, 2023, 44(5): 78-87. (He Ping, Lu Hao, Fan Yiwei, et al. Numerical investigation of battery thermal management using liquid-cooling plate exchanger with I-shaped flow channel [J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(5): 78-87.)
- [16] Pan Chaofeng, Wu Jiabin, Wang Jian, et al. Topology optimization-based design and performance analysis of liquid cooling plates for lithium-ion batteries [J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 124: 116842.
- [17] Zhang Furen, Wang Yufeng, Li Xue, et al. Thermal characteristics and optimization of a novel liquid cooling plate with cavities and flow-enhancing fins[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, 165: 109042.
- [18] Hnaino M, Chehade A, Klabi H, et al. Performance analysis of new liquid cooling topology and its impact on data centres [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 213: 118733.
- [19] 罗海亮, 李印, 王学军. 数据中心冷却系统的温度与温差浅析[J]. *制冷与空调(北京)*, 2021, 21(5): 83-88. (Luo Hailiang, Li Yin, Wang Xuejun. Analysis on temperature and temperature difference of data center cooling system [J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2021, 21(5): 83-88.)

#### 通信作者简介

邵双全, 博士, 教授, 华中科技大学能源与动力工程学院, 13520177661, E-mail: shaoshq@hust.edu.cn。研究方向: 高效热湿环境控制理论及其在舒适性空调、食品保质贮运加工全程冷链、电子产品及数据中心冷却等方面应用的关键技术研究。

#### About the corresponding author

Shao Shuangquan, Ph.D., professor, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 86-13520177661, E-mail: shaoshq@hust.edu.cn. Research fields: theory of efficient thermal-humidity environment control and its key technology applications in comfort air-conditioning, full-chain cold chain for food quality preservation during storage, transportation and processing, as well as cooling of electronic products and data centers.