

第三章 东江湖数据中心冷却系统案例分析

第一节 东江湖水文参数介绍

东江湖位于湖南省郴州市资兴市，水面宽 160 平方公里(24 万亩)，蓄水 81.2 亿立方米，是我国中南地区目前最大的人工湖泊，定位为常年调整性水库。东江湖区属于非自然灾害地区，没有地震、洪水、飓风灾害对设施的威胁。东江湖水面下 25~75 米处水温常年低于 5℃，拥有极为丰富的冷水资源。东江水库大坝，坝高 157 米，底宽 35 米，顶宽 7 米，坝顶中心弧长 438 米。东江湖水库采用底部排水方式，排水温度常年约为 4℃。小东江由上游的小东江水电站和下游的鲤鱼江水电站而成，为长约 12 公里的一条狭长平湖。

东江湖数据中心在东江大坝排水 10 公里处取水，靠近下游鲤鱼江水电站，取水处径流稳定，最低径流 40 立方米每秒，无环境冲击力。根据下游鲤鱼江水电站水文数据监测，近 20 年的流量和水位如图 1 和图 2 所示，历史最低流量为 40m³/s，最高流量为 598m³/s，最高水位为 147.35m，最低水位为 145.25m。可以发现小东江的水流量充沛，水位较为稳定。下游鲤鱼江水电站在 2018 年和 2019 年对小东江水面温度进行逐日监测，如图 3 所示，水电站出的水温常年处于 11~16℃。需要指出，水温监测点位于下游鲤鱼江水电站水电站，距离上游东江大坝排水 12 公里，如图 4 所示，距离数据中心取水点 2 公里左右，由于湖面空气换热，监测温度稍高于东江湖数据中心园区的取水温度。

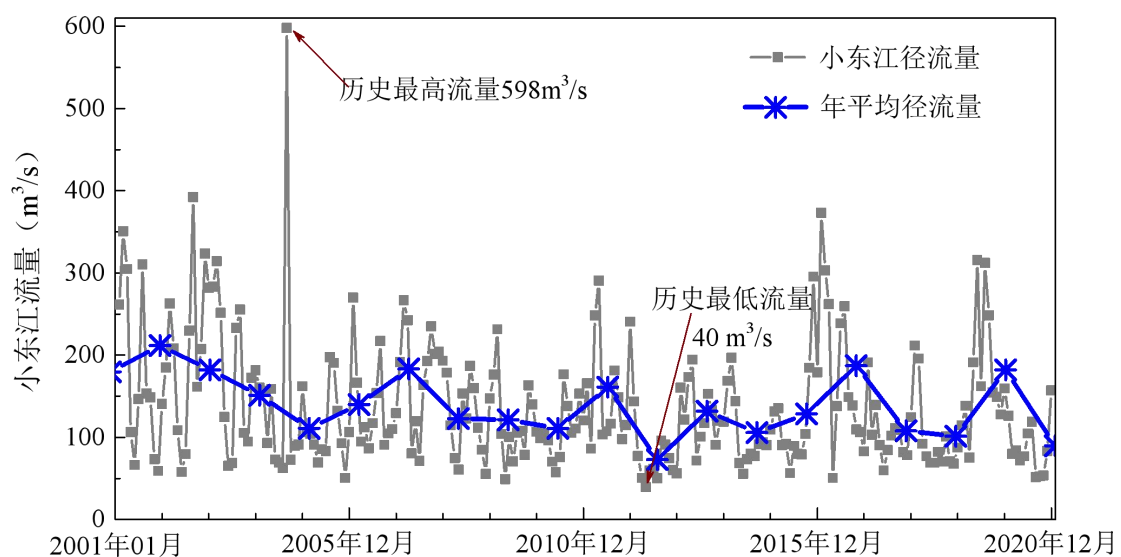


图 1 鲤鱼江水电站水文数据-小东江历史径流量

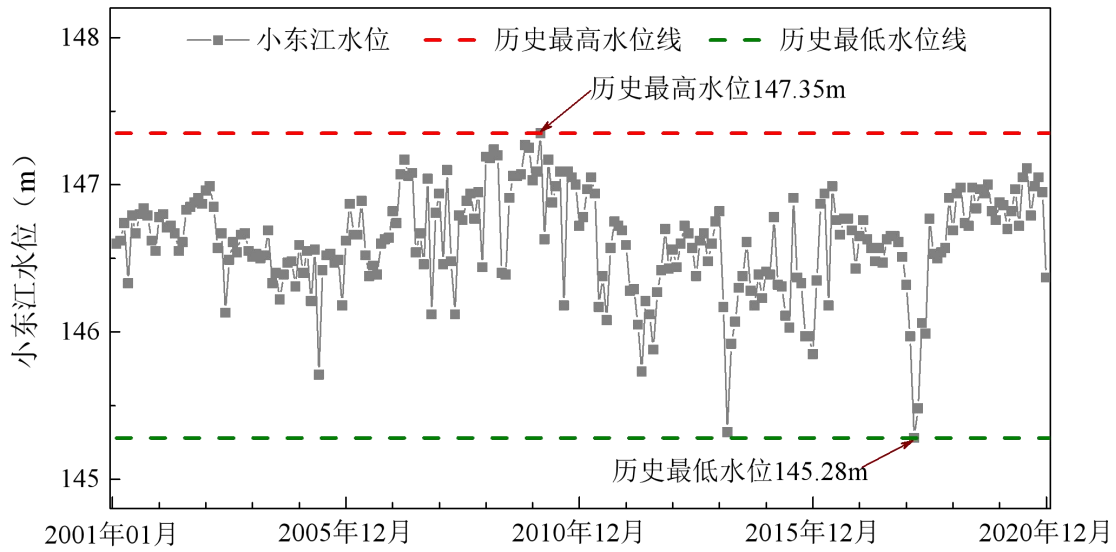


图 2 鲤鱼江水电站水文数据-下游东江水电站历史水位

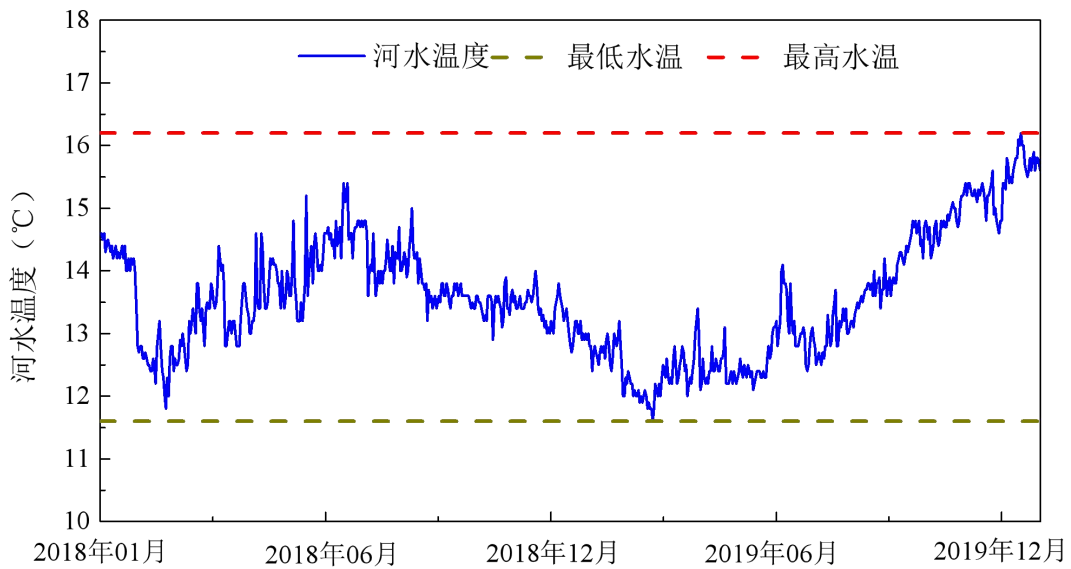


图 3 鲤鱼江水电站水文数据-小东江历史水温



图 4 东江水电站及数据中心位置

根据下游鲤鱼江水电站的水质监测显示，小东江水的大部分指标满足国家 I 类标准，但在溶解氧、氨氮、镉、总磷及大肠菌群数等指标稍有不足，但仍满足国家 II 类标准。综合来看，小东江的水质整体满足国家 II 类标准，即适用于集中式生活饮用水地表水源地一级保护区、珍稀水生生物栖息地、鱼虾类产卵场、仔稚幼鱼的索饵场等，可见其具有较高的水质，满足自然冷源洁净度要求。

第二节 东江湖数据中心冷却系统流程和参数

为了利用当地丰富的冷水资源，东江湖数据中心的冷却系统为集中式冷水空调。该系统由取水系统、冷冻水系统和末端系统组成，采用了“自然水冷技术”，可以根据室内环境状况和室外自然冷源的温度进行控制，以实现最大限度的节能。

2.1 取水系统

取水系统如图 5 所示，该系统由提升泵房和连接管路组成。提升泵房被设置在距离东江湖约 20m 处，系统工作时，湖水先在重力作用下流至提升泵房下部的一个沉降池中，初步处理水质。然后，沉降池中的湖水经由一台型号为 KP1415 的大型提升水泵（流量为 1500m³/h，扬程为 34m）与一台型号为 KP8015 的小型提升水泵（流量为 800 m³/h，扬程为 34m）抽取，通过横穿沿江北路的地下管路送至两台型号为 DLD-FZ-500 的自清洗过滤器（过滤精度 200μm）进行水质处理，最后送往数据中心机楼内冷水机房的板式换热器中进行换热。机楼与提升泵房的直线距离约 50m。

2.2 冷冻水系统

冷冻水系统采用湖水作为冷源。在冷水机房中，由提升泵房输送而来的低温湖水先在两台型号为 AC190/273/PN10/304/E 的板式换热器（额定换热量为 4800kW）中将机房输送来的冷冻水回水冷却至低温；再由两台型号为 KP80172-17A069 冷冻水泵（流量为 860m³/h，扬程为 44m）将冷却后的冷冻水送回数据机房，如图 6 所示。板式换热器预留有四个安装位置，目前已安装两台。冷冻水管路上设置有型号为 DLAP-350 全程综合水处理装置（最大流量 700 m³/h）和型号为 DLDY-800-L-1-0.6-2 的自动定压补水装置（功率 35 kW，补水水量 150 m³/h）。

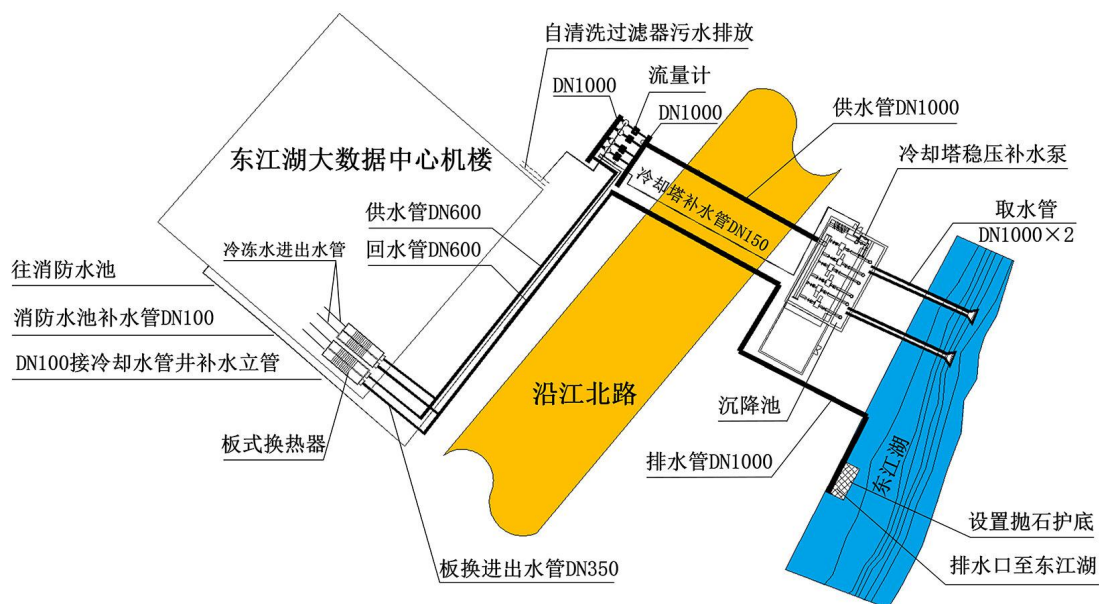
此外，冷冻水系统配置了两个 180m³ 的蓄冷罐，当系统进行模式切换或冷源突然中断时对系统进行应急供冷，确保空调制冷连续不中断。同时，冷冻水系统设计了一台冷水机组及其配套的冷却塔及冷却水泵等设备组成备用的机械制冷系统。冷冻水系统正常运行时，不启用机械制冷系统。

2.3 空调末端

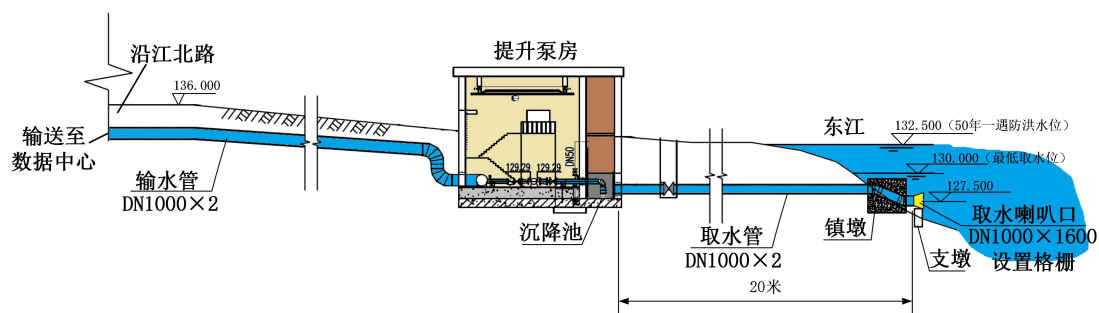
数据机房的空调末端采用冷通道封闭的地板集中送风的形式，每个机房共设置十一台额定冷量为 110kW 的精密空调（CRAH），如图 7 所示。运行时，不同 CRAH 的排风在地板下混合后送至不同列机柜的冷通道，然后被两侧机柜内的服

务器吸入并用于设备散热。服务器的风扇将换热升温后的空气排至热通道中，由 CRAH 各自吸入，并由冷水机房供应的冷冻水进行换热冷却至推荐温度，进入下一个循环。

每间配电室的空调末端采用五台 40kW 的多联热管空调，如图 8 所示。热管空调是依靠重力和制冷剂蒸气的浮力作为驱动力的冷却设备，无需额外的驱动部件。运行时，热管蒸发器的风扇将配电设备和不间断电源（UPS）排出的热风吸入，通过制冷剂的相变换热将其冷却至推荐温度，最后排回室内对设备进行冷却。同时，热管蒸发器内的制冷剂吸热蒸发后通过气管输送至走廊的冷量分配单元（CDU）进行冷却，冷却后的液态制冷剂在重力的作用下流回蒸发器进行下一个循环。



a. 主视图



b. 侧视图

图 5 湖水取水系统图

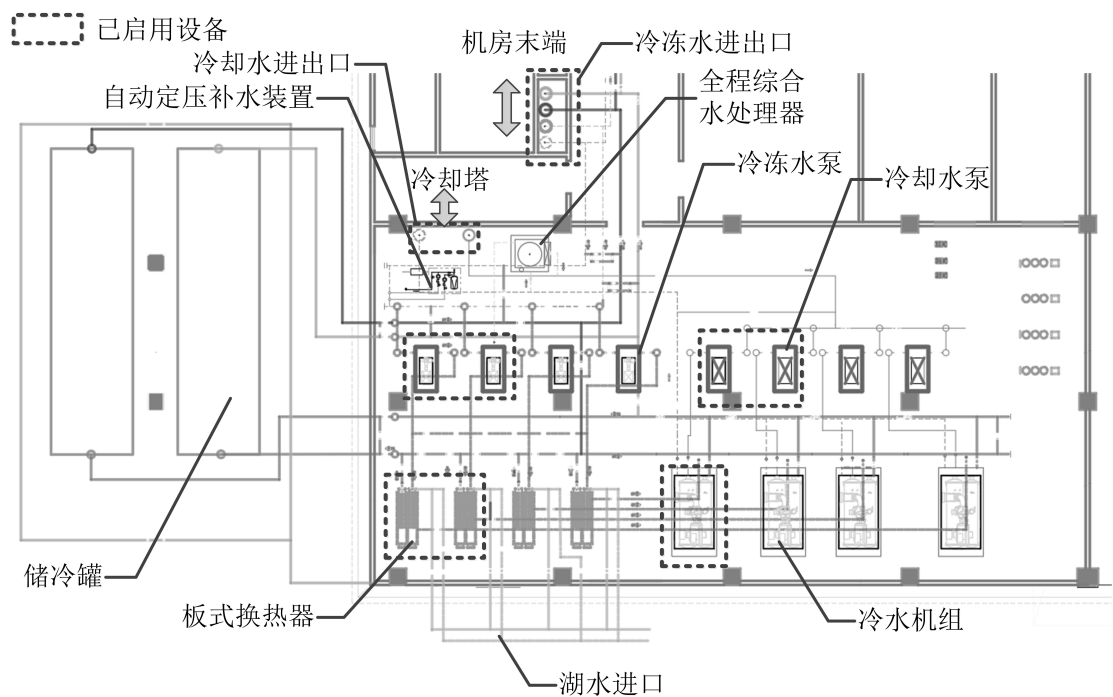


图 6 冷水机房系统图

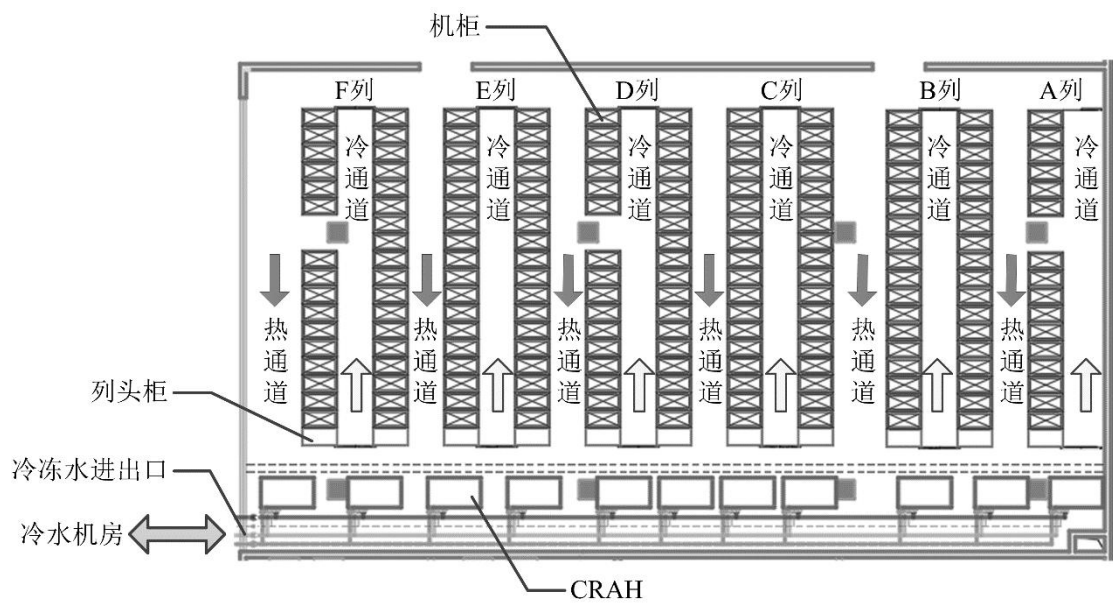


图 7 二楼 1 号数据机房冷却系统图

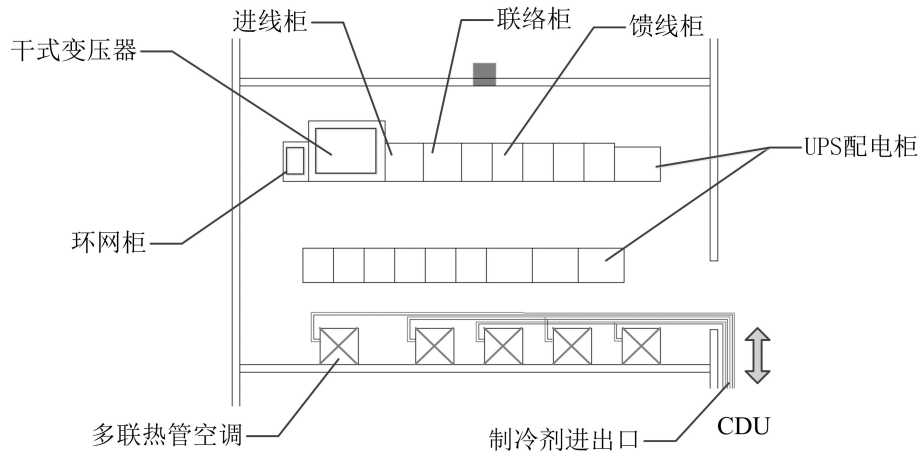


图 8 IT 变配电室 2A 冷却系统图

2.4 主要设备参数介绍

冷却系统的基本设备参数如表 1 所示，外观如图 9 所示。

表 1 设备基本参数表

序号	设备名称	数量	设备型号	设备规格
1	板式换热器	2	AC190/273/PN10/304/E	额定换热量 4800 kW
2	自动定压 补水排气 装置	1	DLDY-800-L-1-0.6-2	功率 35 kW，补水水量 150 m ³ /h， 额定压力 0.6MPa，补水箱容积 1.5 m ³
4	智能水处 理器	1	DLAP-350	额定电压 220V，最大流量 700 m ³ /h，额定压力 1.0 MPa
5	大型提升 水泵	1	KP1415	流量 1500m ³ /h， 扬程 34 m，功率 180 kW
6	小型提升 水泵	1	KP8015	流量 800 m ³ /h， 扬程 34m，功率 110 kW
7	自清洗过 滤器	2	DLD-FZ-500	过滤精度 200μm，额定流量 2000 m ³ /h，额定压力 1.0 MPa
8	蓄水罐	2		容积 180 m ³
9	精密空调	11	SCU1300	制冷量 110 kW
10	热管空调	5		制冷量 40 kW



图 9 冷却系统设备

2.5 冷却系统运行模式介绍

2.5.1 取水系统运行模式

取水系统根据数据中心总体热负荷情况通过调节管道阀门开度和提升水泵的频率来控制湖水的供水流量。

2.5.2 冷冻水系统运行模式

如图 10 所示，冷冻水系统采用免费冷却模式，直接将湖水引入冷水机房内的板式换热器，将机房处输送来的冷冻水回水冷却至低温，再将被加热的湖水排回东江。在实际运行过程中，数据中心全年采用免费冷却模式即可保证机房内冷通道温度处于 GB50174-2017 的 A1 标准推荐温度范围内，无需机械制冷。

2.5.3 末端设备运行模式

由于每个机房内所有末端 CRAH 的排风均在地板下混合，因此根据机房冷通道温度控制开启的 CRAH 台数，并根据不同列机柜负载率的高低控制不同

位置的 CRAH 开启或关闭。由于配电室的负载率变化很小，水冷多联分离式热管空调处于常开状态。

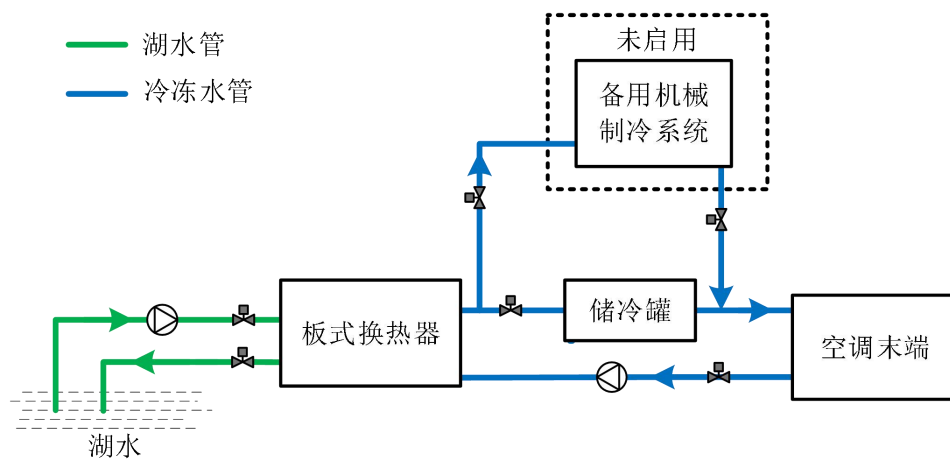


图 10 冷冻水系统免费冷却运行模式

第三节 东江湖数据中心运行能耗分析及对水环境的影响

湖南云巢东江湖数据中心于 2017 年建成投入运营，已经运行将近三年时间。前两年服务器数量和负载逐年增加，2020 年受到疫情影响，IT 设备负载略有降低，总体趋于稳定。整个数据中心全年湖水免费冷却，目前虽仍处于低负载工况下运行，但整个系统保持着高效率，实测年平均 PUE 值为 1.18。

3.1 数据中心用电整体概况

2019 年 11 月 01 日至 2020 年 10 月 31 日，湖南云巢东江湖数据中心计量电表显示全年累积用电量 12245880 kW·h，月均耗电量 1020490 kW·h，日均耗电量 33550 kW·h；IT 设备的全年累积用电量 10357878 kW·h，月均耗电量 8631567 kW·h，日均耗电量 28378 kW·h。东江湖数据中心的实测年平均 PUE 值为 1.18，逐月耗电量及 PUE 变化如图 11 所示。

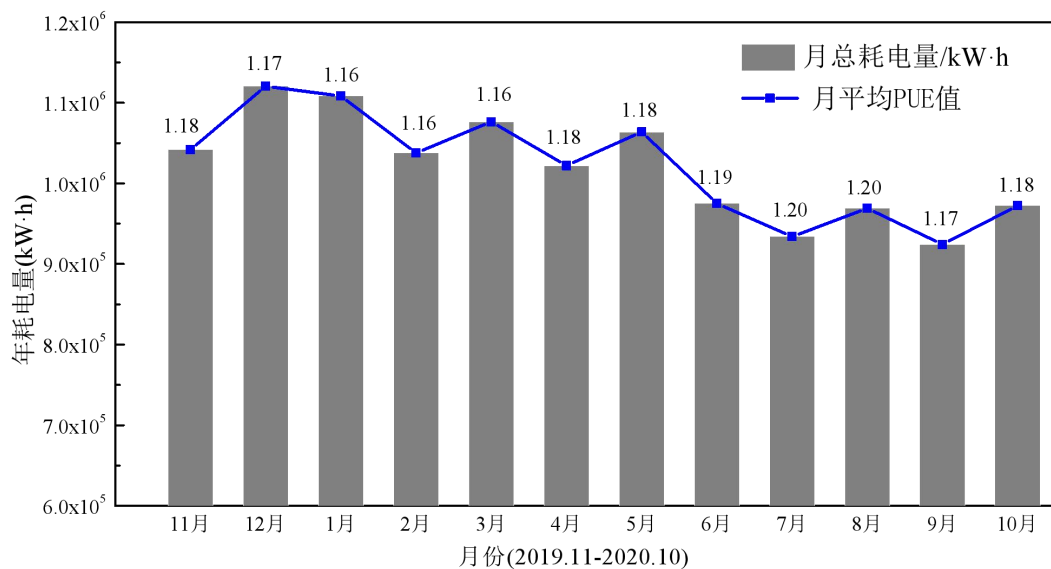


图 11 数据中心总耗电量逐月变化趋势

3.2 数据中心用电构成

湖南云巢东江湖数据中心采用准 Tier IV 的电气设计，市电、UPS 完全冗余设计，同时使用，柴发部分冗余设计，至少 8 小时油量储备，电气设计流程如图 12 所示。冷水机组直接接入 10kV 电网，其它用电设备通过数据中心多个变配电室接入电网，其中 UPS 连接 IT 服务器、末端空调精密空调及热管空调和冷冻水泵，保证 IT 设备安全运行。

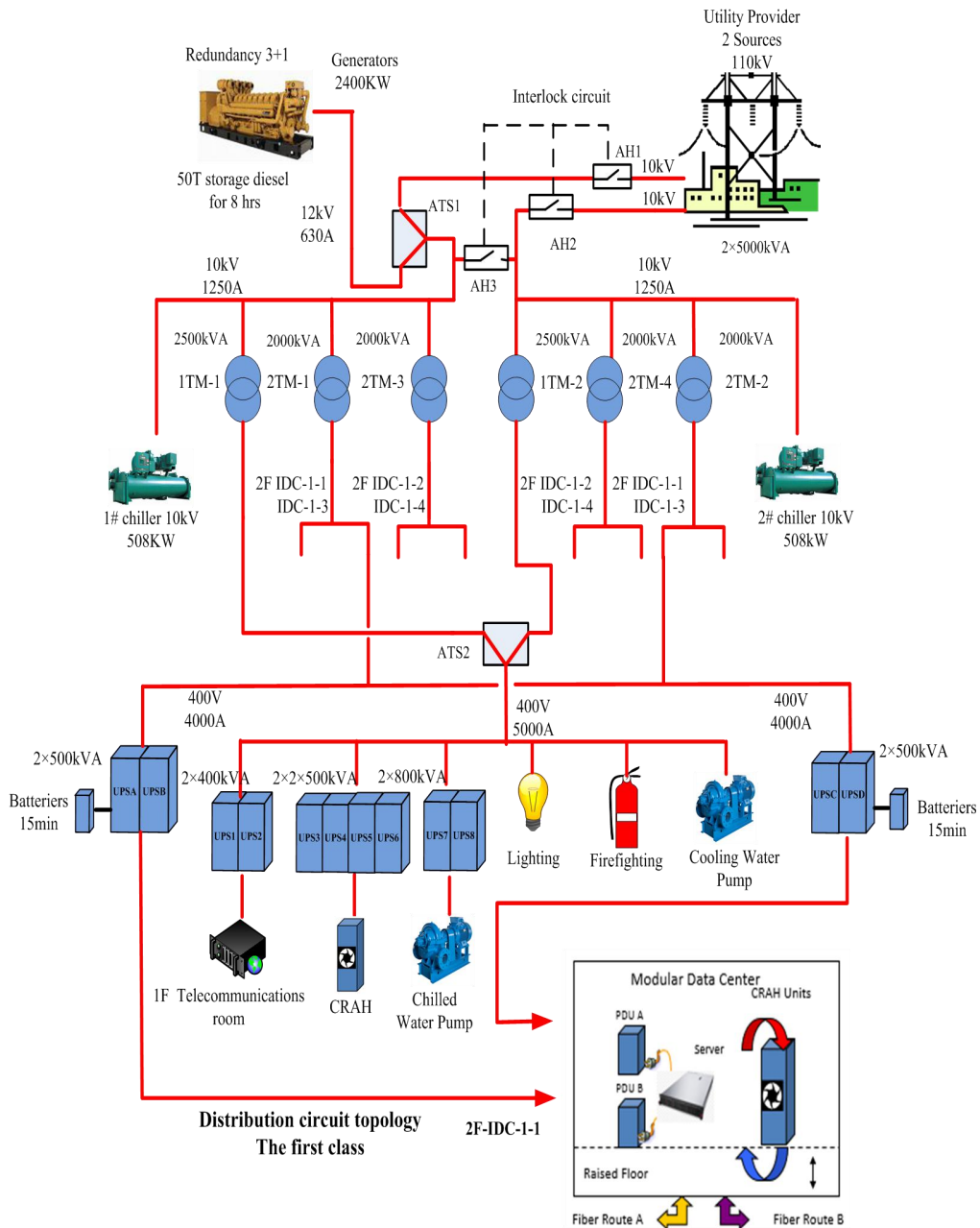


图 12 数据中心配电设计流程图

数据中心整体用电量统计采用市电输入量，包括以下 5 个部分：一层变配电室，二层北变配电室，二层南变配电室，河边变配电室，高压冷机，用电损耗。其中，用电损失主要是由于市电接入到室内变配电室的变压器电损。统计 2019 年 11 月至 2020 年 10 月的各部分全年耗电量，如图 13 所示，一层变配电室占 19.28%，二层北变配电占 57.78%，二层南变配电占 18.92%，河边变配电室占 2.17%，高压冷机占 0.02%，用电损耗占 1.82%。需要指出，一层变配电室用电设备包括：冷冻泵、冷却泵、精密空调、冷却塔、机房照明、公共照明、电梯、新风机、消防等；二层变配电室用电设备包括：模块化机房 IT 服务器设备、UPS

损耗、线路传输损耗等；河边变配电室用电设备包括：湖水水泵、泵房照明、泵房行车、餐厅、生活水泵等。为了设备维护需求，高压冷机、冷却塔等长期备用闲置设备，需要定期开启巡检，因而产生了耗电量。

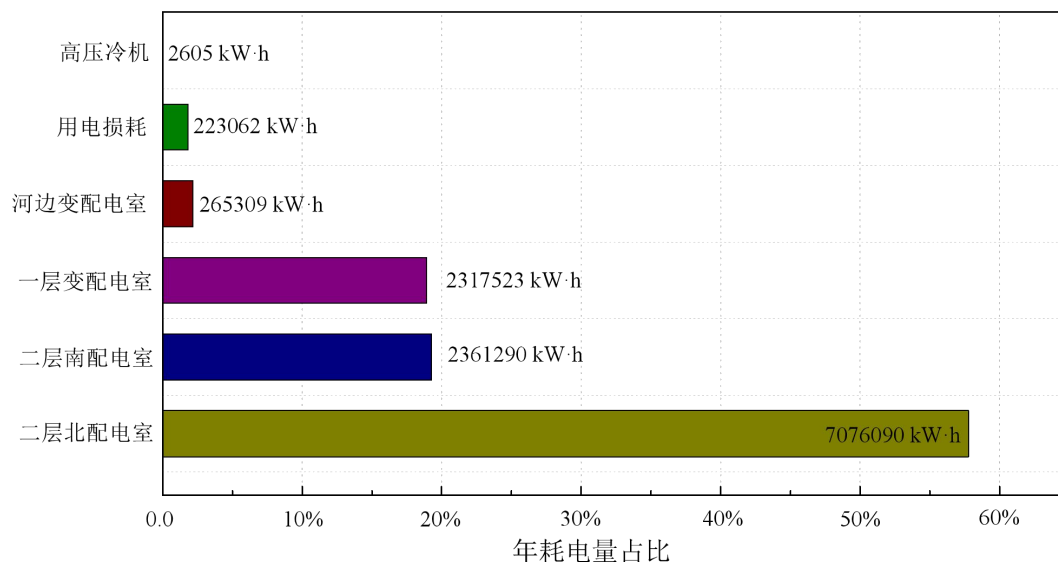


图 13 数据中心全年整体用电构成图

3.3 数据中心总耗电量分析

东江湖数据中心 IT 设备耗电量与数据中心总耗电量的逐月变化趋势如图 14 所示。可以发现，IT 设备耗电量和总耗电量逐月的变化趋势一致，两者之间存在着明显正相关。小东江湖水月平均水温与数据中心总耗电量的逐月变化趋势如图 15 所示。全年小东江湖水的水温基本保持恒定，温度波动范围在 12℃至 13℃之间，东江湖数据中心全年实现湖水完全免费冷却。

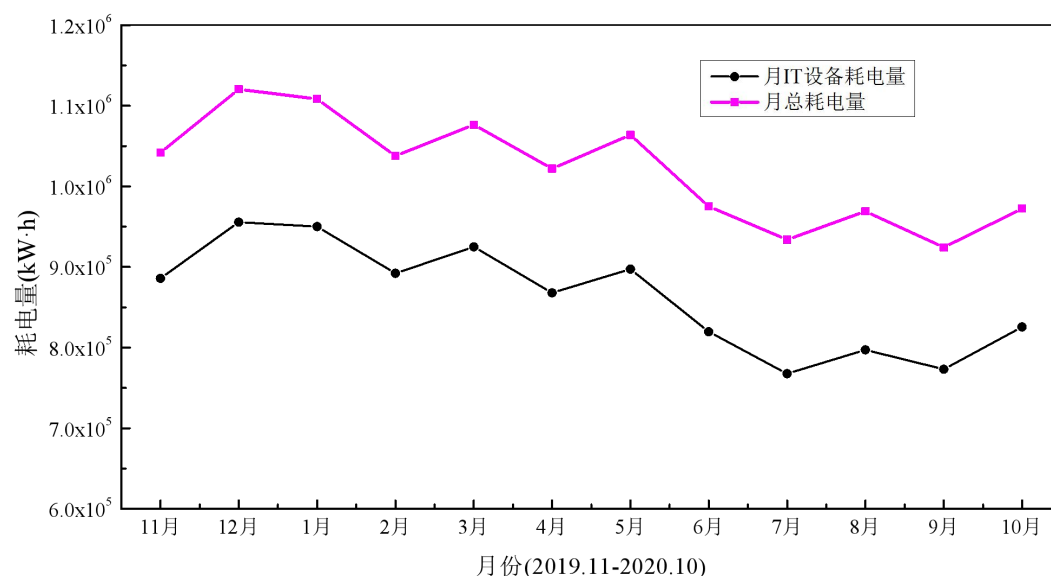


图 14 IT 设备耗电量与数据中心总耗电量

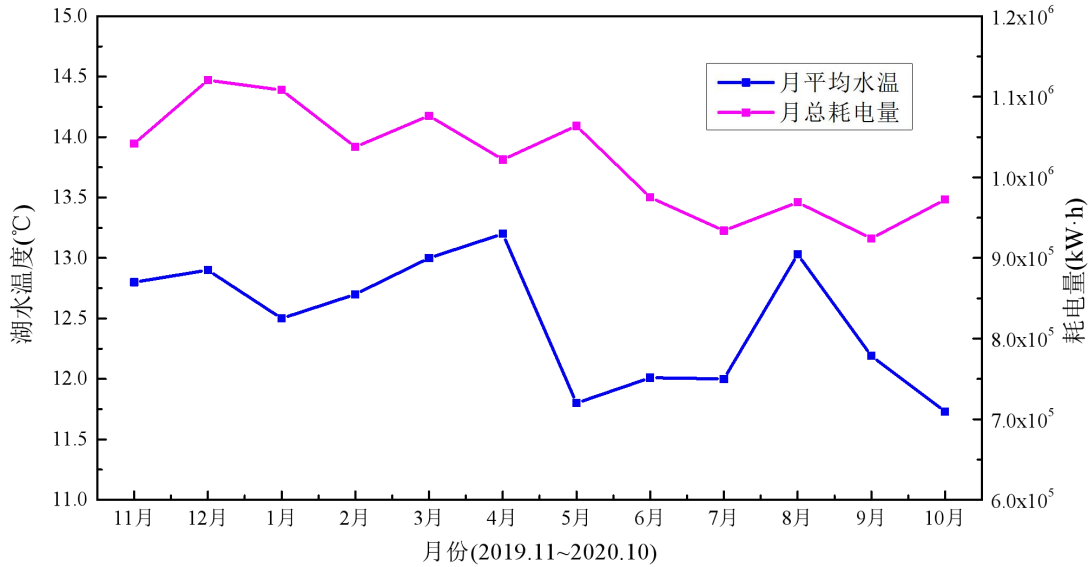


图 15 湖水平均温度与数据中心耗电量

3.4 数据中心 GCOP 测试分析

为了测试东江湖数据中心的实际 GCOP 值及不同辅助设备的能耗，测试时间为 2020 年 10 月 16 日至 2020 年 10 月 23 日，测试期间的蓄水池温度和气象参数如图 16 所示。数据中心 GCOP 计算原则： $GCOP = (\text{数据中心总耗电量} - \text{冷却系统能耗}) / \text{冷却系统能耗}$ 。数据中心总耗电量包括 IT 设备耗电量和辅助设施耗电量两个部分，IT 设备耗电量计量包括 M1~M4 模块化机房、接入机房及自用机房的服务器机架的输入电量；辅助设施耗电量包括制冷设备（湖水泵、冷冻水泵、室内末端空调）、用电损耗（变压器配电、UPS 及传输损失等）及其它（照明、电梯、水系统定压补水装置等）。数据中心总耗电量每小时平均值为 1474.9kW·h，其中 IT 设备为 1247.5 kW·h，制冷设备 123 kW·h（湖水泵为 17.0 kW·h，冷冻水泵为 30.3 kW·h，室内末端空调为 75.7 kW·h），变压器配电损耗为 22 kW·h，UPS 损耗为 77.8 kW·h，其它设备电损耗为 4.7 kW·h，如表 4 所示。需要指出，其它设备耗电量包括水泵定压补水装置 0.4 kW·h，照明、电梯及等单位时间耗电量 4.3 kW·h。因此，可计算出东江湖数据中心 $GCOP = (1474.9 - 123) / 123 = 11$ ，IT 设备及辅助设备的耗电量分布占比如图 17 所示。东江湖数据中心规划机架数为 2500 个左右，单机架负载为 4kW，而目前实际安装机架数为 1000 个左右，负载率仅为 10.8%，仍然处于低负载下运行。全年湖水温度较为稳定，PUE 实测值

为 1.18。可以发现，在低负载运行工况下，整个冷却系统已经具有非常高的能效。

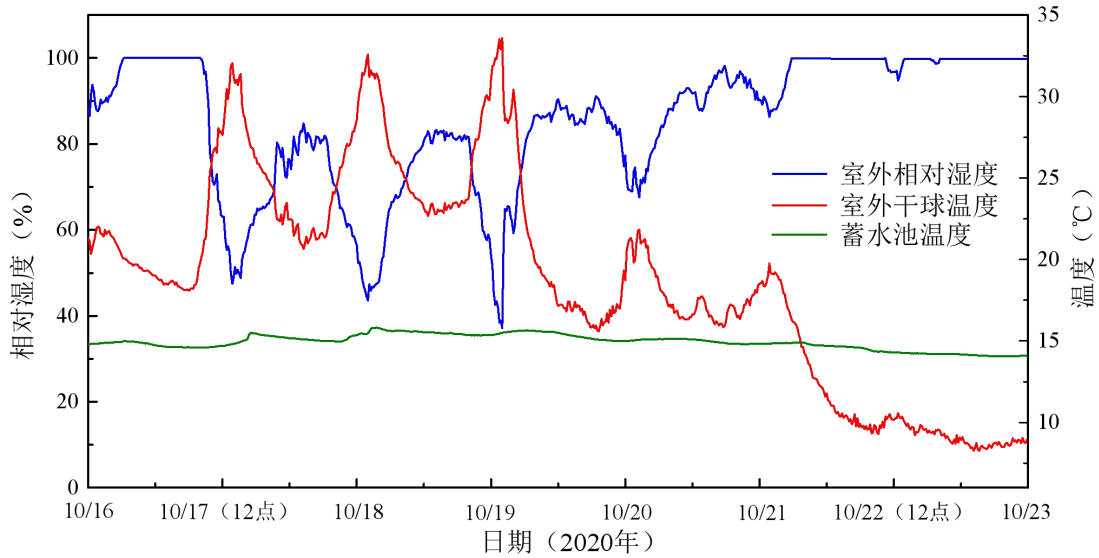


图 16 测试期间的蓄水池温度及气象参数

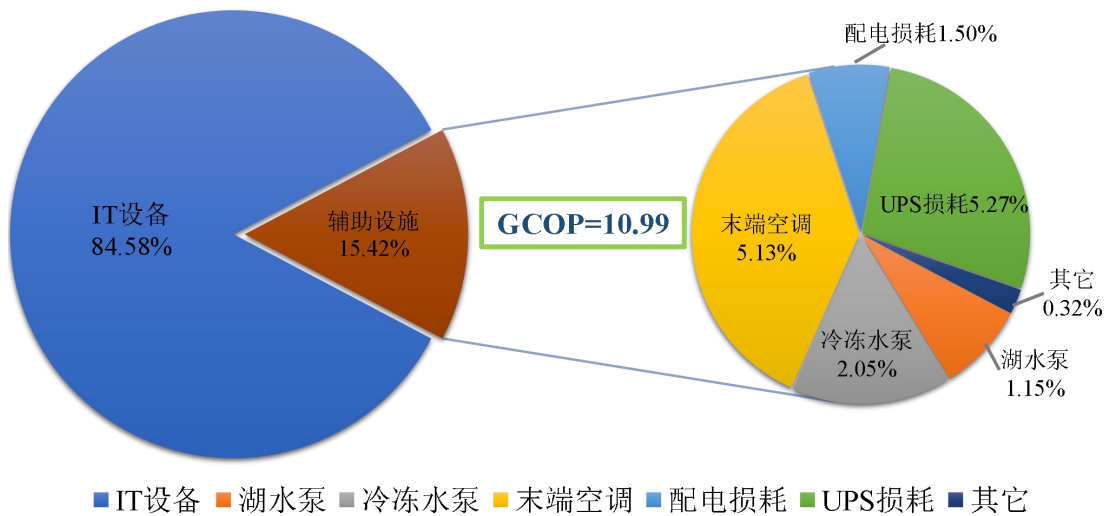


图 17 数据中心 IT 设备及辅助设施用电量构成图

测试期间的湖水供回水温度及冷冻水供回水温度如图 18 所示，温度监测点为板式换热器的进出口。其中，湖水的供回水温差约 4°C，冷冻水的供回水温差约 2°C，均属于小温差大流量的运行工况，主要原因是为了保护水泵，设定了水泵最低运行频率（30Hz），测试期间的湖水提升水泵和冷冻水水泵处于最低频率下运行。如果将湖水侧及冷冻水侧的换热温差加大到 5°C，可将湖水流量及冷冻水流量分别减少到原来的 0.8 及 0.4，从而能有效地减少水泵的输送电耗，理论上可提高数据中心 GCOP 20%左右。

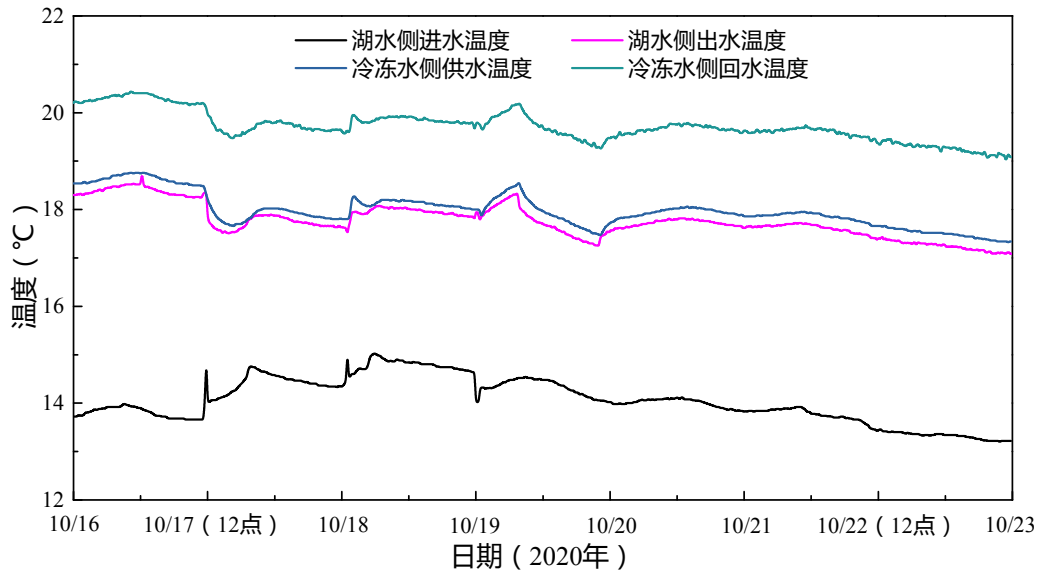


图 18 测试期间的湖水进出水及冷冻水侧供回水温度

3.5 数据中心室内热环境测试分析

现有湖南云巢东江湖数据中心主要包含了模块机房和辅助用房，分别对其室内热环境进行了测试和分析，测试时间为 2020 年 10 月 21 日至 10 月 23 日。

(1) 模块机房

现有的模块机房在每个冷通道内安装两个温湿度传感器，分别置于靠近两端封闭门第五个机架的顶部，用于监测每个冷通道的热环境。为了研究模块化机房的温度分布，2020 年 10 月对东江湖数据中心 2 层 M1 模块机房的室内热环境进行了现场测试，该模块化机房的动环监控系统可视化平面布局如图 19 所示。M1 模块化机房共有 6 个冷通道，选取负载率较高的 B 列冷通道 B22 机架进行了垂直方向的温度场分布测试，在机架 B22 的进风和出风垂直方向分别均匀布置 10 个热电偶温度传感器，如图 20 所示。

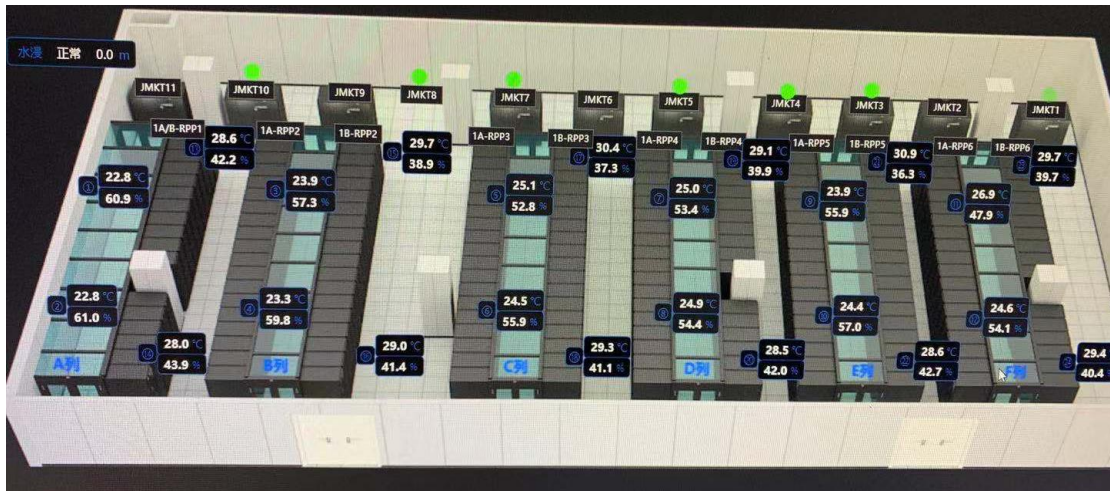


图 19 二层 M1 模块机房动环监控系统可视化平面

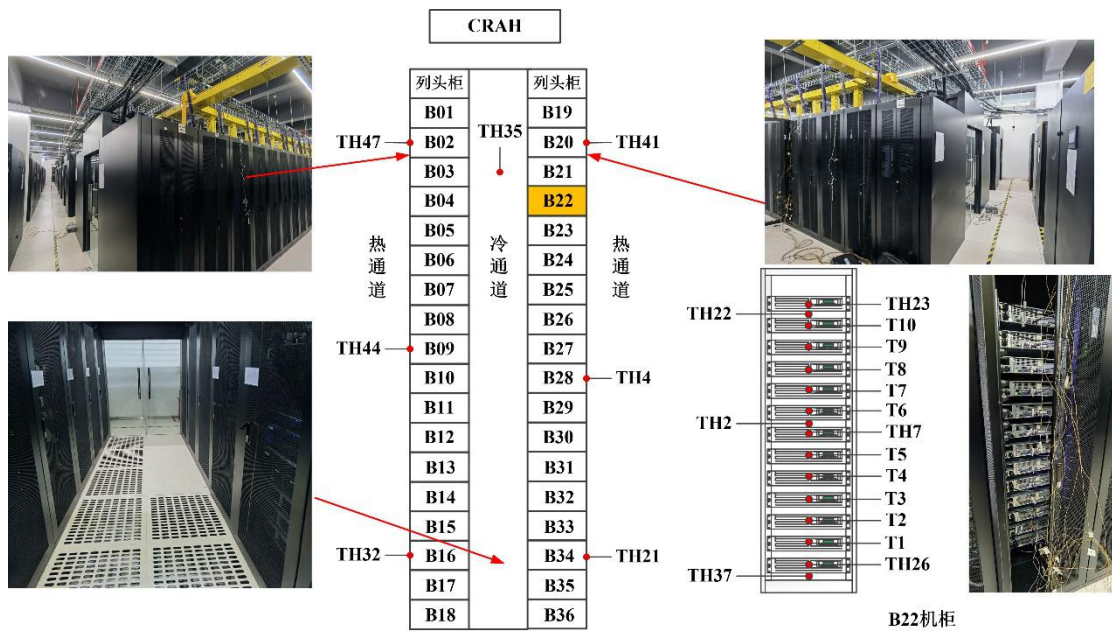


图 20 机柜 B22 垂直方向的热电偶布置示意图

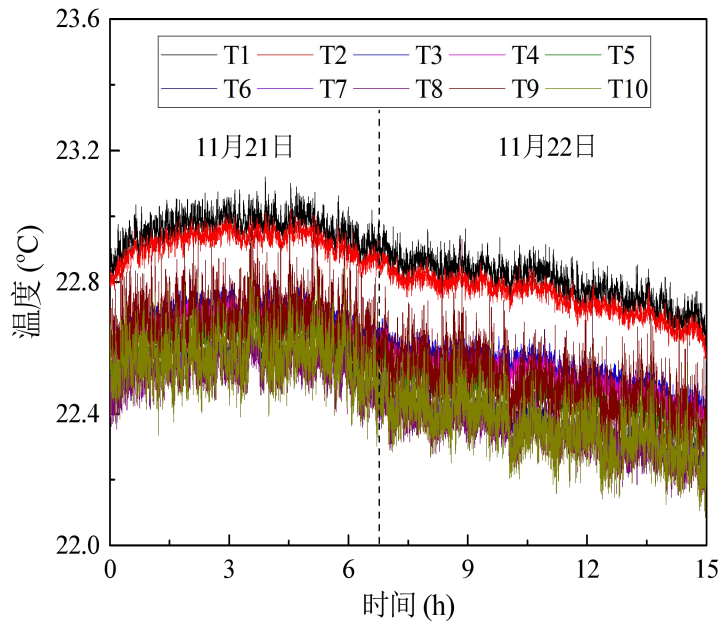


图 21 机柜 B22 服务器送风温度

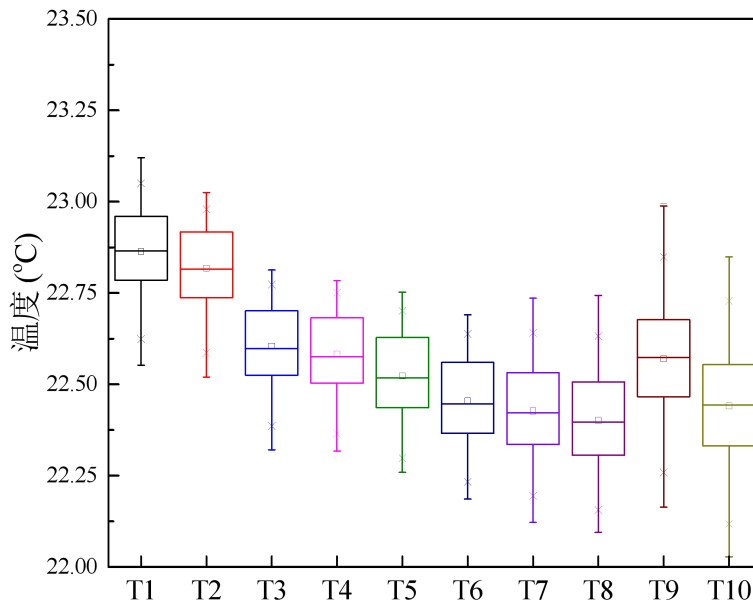


图 22 机柜 B22 各测点送风温度

图 21 和图 22 为机房内 B 组机柜列中 B22 号机柜（13 台服务器）服务器进风口的逐时温度和测点平均温度。很明显，在测试的 15 个小时内，机柜进风口的温度基本保持恒定，温度波动范围在 22℃至 23℃之间。同时，对于 T1 至 T10 的平均温度，可以发现，T1 处的平均送风温度最高，随着测点高度的增大，平均送风温度逐渐降低，在 T8 点处达到最小值。当冷空气由机柜底部送出时，由于射流速度较快，最底层的服务器风扇无法抽吸到足够的冷空气，导致 T1 处的送风温度较高。随着冷空气上升，风速逐渐降低，服务器风扇更容易抽吸冷空气，

因此，位置较高的服务器送风温度会较低。

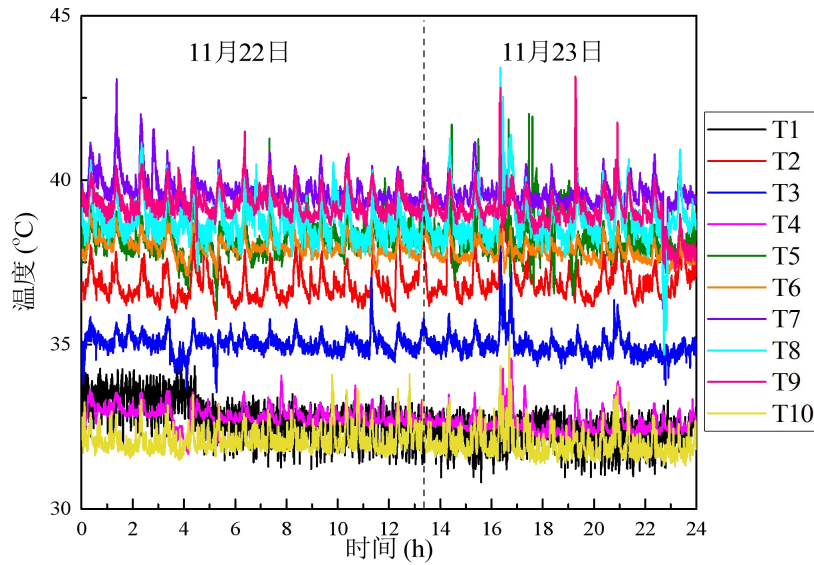


图 23 机柜 B22 服务器垂直方向各测点温度变化

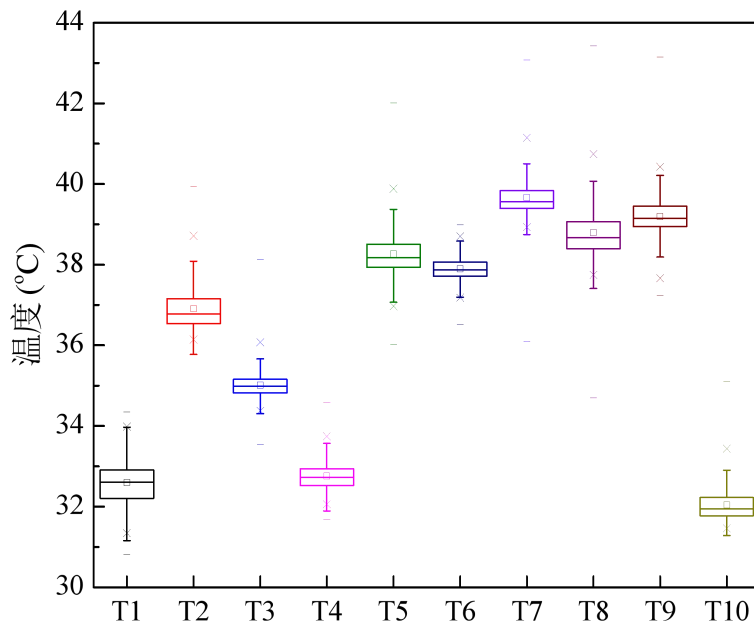


图 24 机柜 B22 服务器垂直方向各测点 24h 温度分布

图 23 和图 24 为 B22 机柜服务器出风口的逐时温度和测点平均温度，相比于服务器的送风温度，服务器各测点出风温度随时间的波动明显较大，这主要是由于服务器工作过程中负荷不断变化，导致元件散热量变化，进而影响出风温度。另外，各测点出风温度未呈现出特别的规律，说明测点高度和出风温度间没有明显的关系，主要受到该测点位置的服务器工作负荷的影响。

(2) 辅助用房

该项目的辅助用房主要包含变配电间和 IT 配电电池室，其采用的冷却系统是水冷多联热管系统。以 2 层 IT 变配电间 2 为例作为辅助用房热环境的分析。IT 变配电间室 2 平面布置如图 25 所示。该 IT 变配电间主要包含 UPS 柜、干式变压器柜、环网柜及馈线柜等等。从现场对 IT 变配电室的红外摄像仪分析（如图 26 所示），可以获得 IT 变配电室的热量主要来源于干式变压器柜和 UPS 柜。对于 UPS 柜出风口的温度高达 35.2℃，UPS 柜的温度 30℃ 左右，而对于干式变压器柜的温度高达 38.5~39.1℃。因此，选用变配电室①、和②作为温度和相对湿度测试点。同时，利用温湿度自记仪测试了热管空调机组的出风和回风的温度和相对湿度值（其测试点分别为③和④）。热管空调采用上送下回的送风方式，其性能参数见表 2。

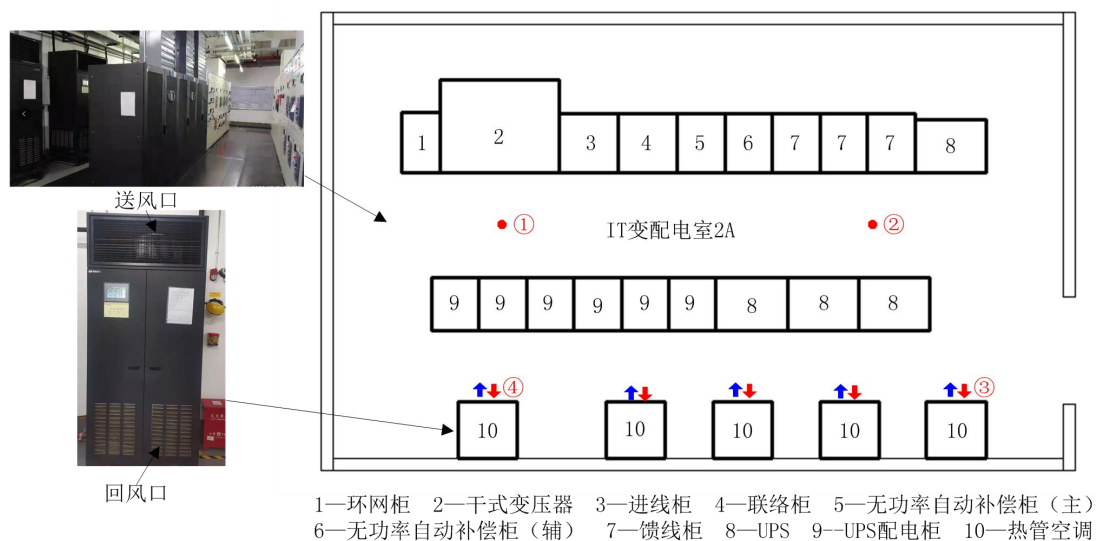
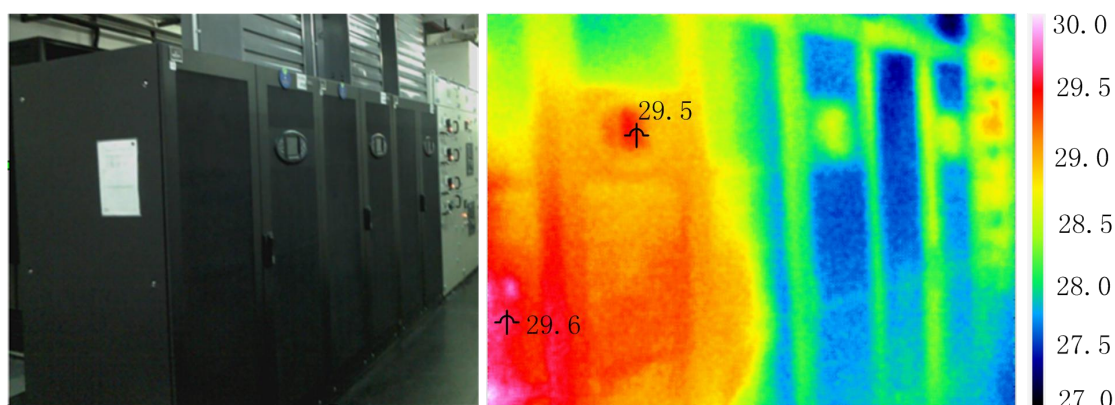
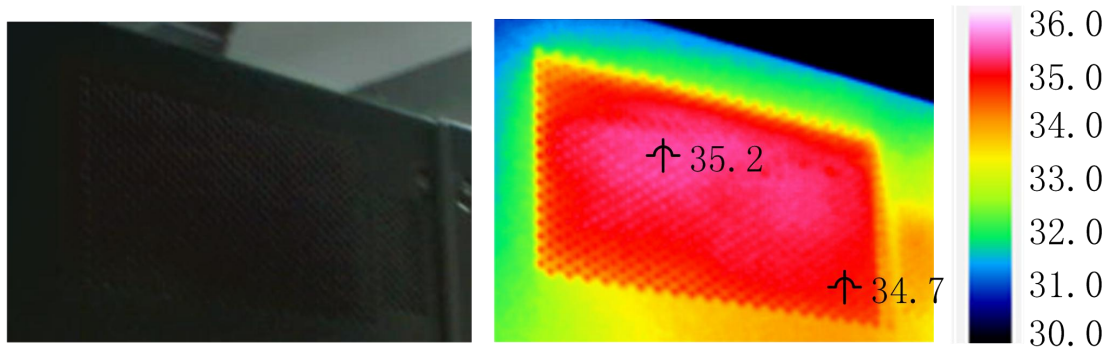


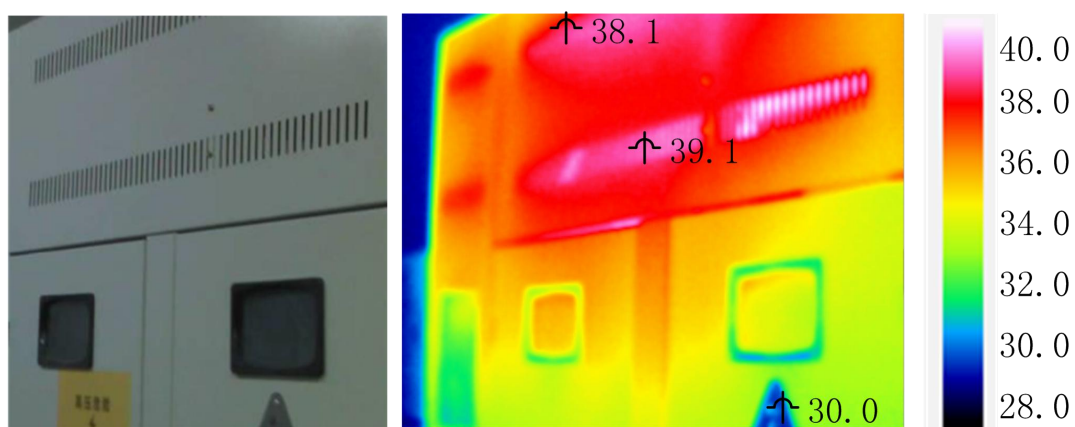
图 25 IT 变配电间 2 平面布置示意图



(a) UPS 柜



(b) UPS 柜出风口



(c) 干式变压器柜

图 26 变配电室红外摄像仪照片

表 2 热管空调的性能参数

型号	外形尺寸（宽×深×高） （不含底座）	显热量 （kW）	风量 （m ³ /h）	功率 （kW）
MRG-40-LG	1000×800×1950	40	11000	1.75

由于 IT 变配电室的热负荷相对稳定，选用某一天 24 小时进行测试并分析其热管空调的运行效果。图 27 为 IT 变配电室测试点①和②的温度测量结果，可以看出测点①和测点②所在区域的温度 26℃~28℃ 区间，均满足《数据中心设计规范 GB50174-2017》对于辅助区温度设计的要求。测点①的温度略高于测点②的温度的主要原因是测点测点①周围总共有 4 个 UPS 柜，而对于测点②的热源主要来源于干式变压器柜。测点①和测点②的相对湿度测量值都在设计要求范围（35%~75%）内。图 28 和图 29 分别为测试点③和测试点④的温度测量结果，可以看出测试点③处的热管空调在实际运行过程中的温差大概为 3℃ 左右，而测试点④处的热管空调在实际运行过程中的温差大概为 1.5~2℃ 左右。由于 IT 配电室热源的分布不均匀的特性，使得测试点③处热管空调的回风温度比测试点④处

热管空调的回风温度高，对于热管空调来说蒸发段（室内侧）与冷凝段（CDU部分）的温差越大，热管的运行效果越好。因此，测试点③处热管空调的换热量大于测试点④处热管空调的换热量。

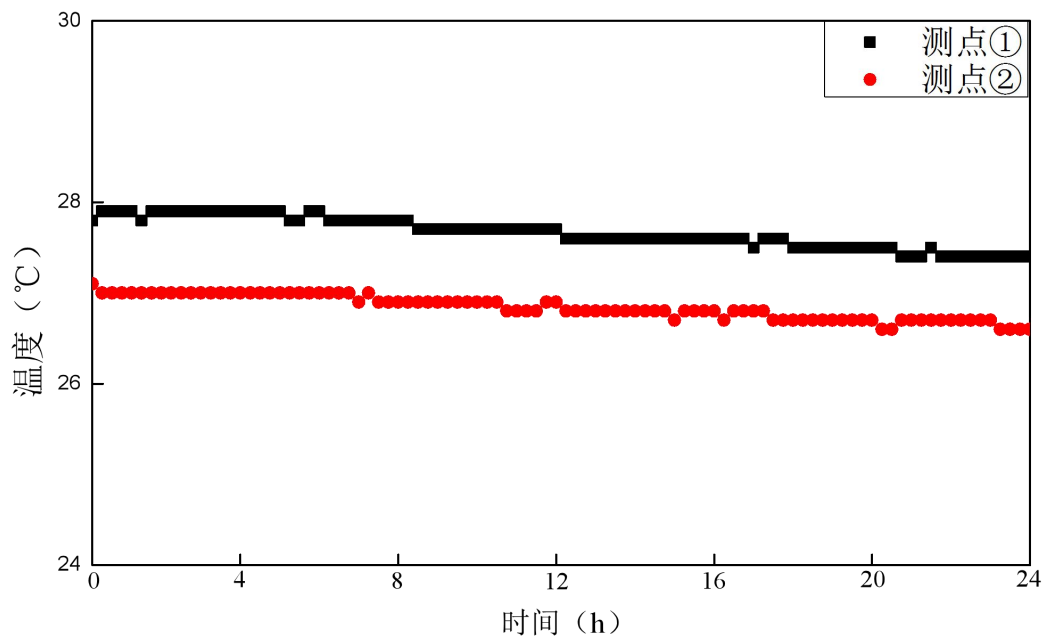


图 27 测点①和测点②在 24 小时的温度测量值

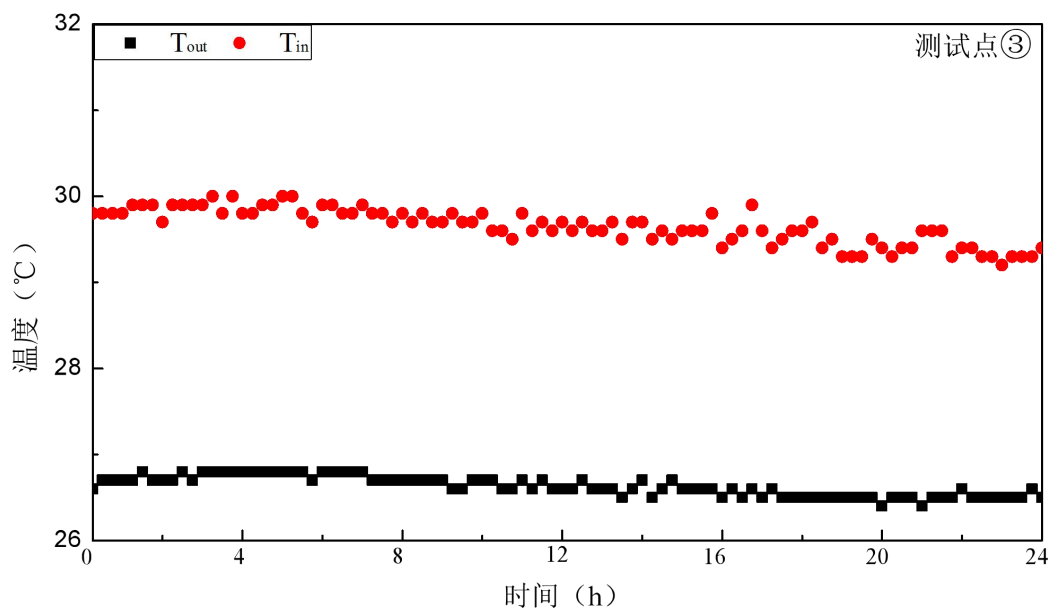


图 28 测点③在 24 小时的温度测量值

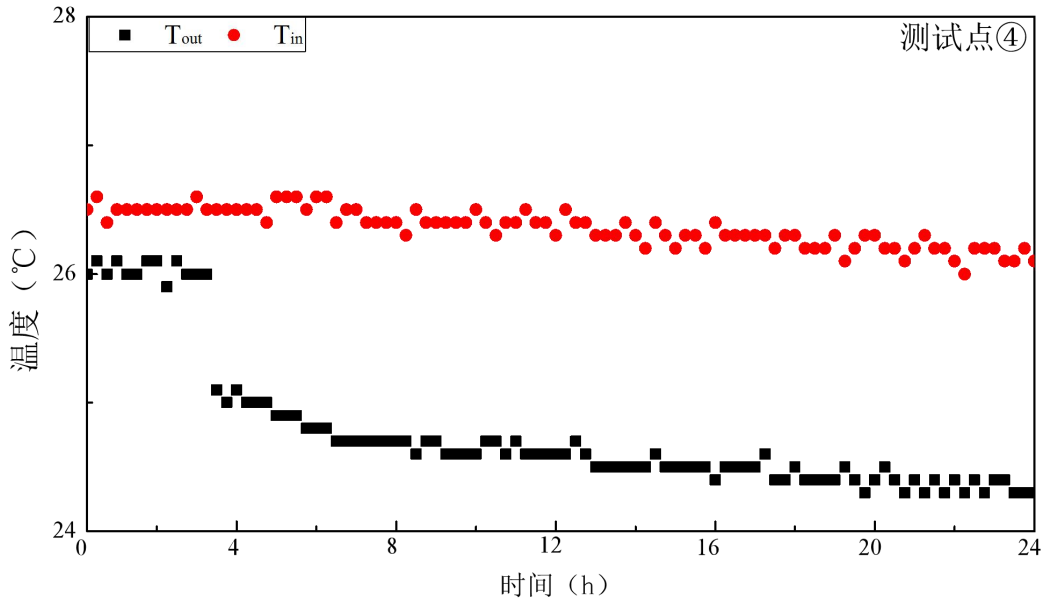


图 29 测点④在 24 小时的温度测量值

综上对 IT 变配电室的分析，由于 IT 变配电室的主要热源是干式变压器和 UPS 柜，对原有的热管空调布置可以按图 30 进行重新布置，热管空调②和④分别靠左右墙布置，使得热管空调更加靠近热源，因而热管空调的进口温度越高，使得热管空调的换热效果更好。由于 IT 变配电室的热负荷较稳定，那么对于热管空调可以减小风量来保证一定量的制冷量，从而加少了热管空调的能耗。同样，对于采用热管空调系统的辅助用房，都可以通过改变热管空调与热源的位置或者其他的措施使得辅助用房的气流组织更加合理，使得热管空调的换热效率更好，从而降低整个数据中心的能耗。

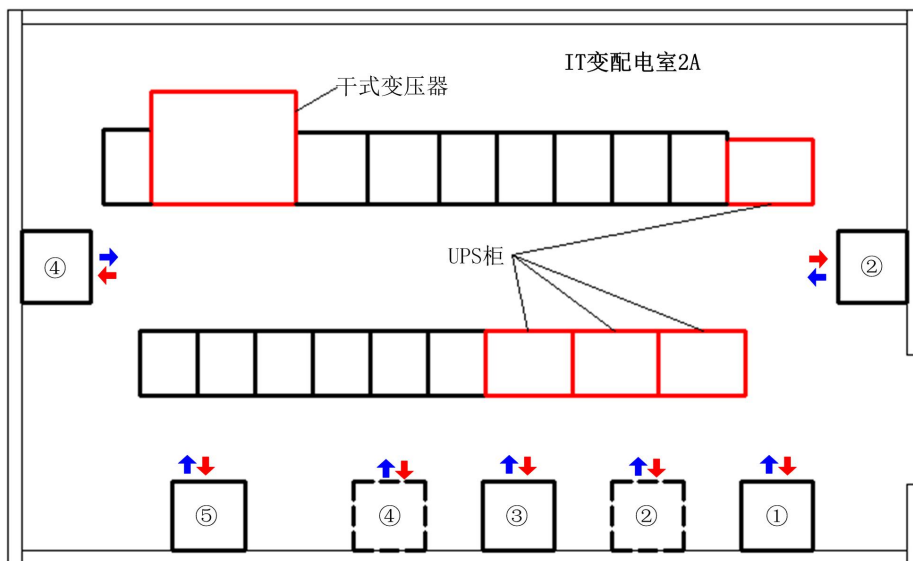


图 30 变配电室新的热管空调布置形式

3.6 数据中心建设对水环境的影响

根据环境保护行业标准《环境影响评价技术导则-地表水环境》，各类地面水域规模是指地面水体的大小规模，标准中规定河流与河口的划分原则是根据所建工程项目排污口附近河流的多年平均流量或平水期平均流量，具体划分方式如表 3 所示。

表 3 河流规模划分

河流规模	平均流量 (m ³ /s)
大河	≥150
中河	15~150
小河	<15

在确定某项具体工程的地面水环境调查范围时，应尽量按照排放后可能的达标范围，具体如表 4 所示。

表 4 不同排入量时河流环境调查范围

污水排放量(m ³ /d)	大河(km)	中河(km)	小河(km)
>50000	15~30	20~40	30~50
50000~20000	10~20	15~30	24~40
20000~10000	5~10	10~20	15~30
10000~5000	2~5	5~10	10~25
<5000	<3	<5	5~15

通过东江站实测的水文参数分析可知，小东江的河流规模属于中河。当前东江湖数据中心建设规模为 18000 台机柜，按照平均每台机柜 4kW 计算，同时考虑包含其他产热设备（按冗余系数 1.2 计），则总的产热量 $Q=18000 \times 4 \times 1.2=8.64 \times 10^4 \text{kW}$ ，由此冷却湖水的热平衡关系式可得： $Q=c_p \cdot m \cdot \Delta t$ ， Δt 取 5℃ 温差，则质量流量 $m=4228 \text{kg/s}$ ，体积流量即为：4.228m³/s。即东江湖数据中心冷却水排放量 365300 m³/d >50000m³/d，由表 4 可得该工程地面水环境的调查范围应为 20~40km，受限于计算资源，实际进行数值模拟时选择下游 20km 范围，同时为了使来流速度分布更符合实际情况，选择上游大拐弯前较平缓位置（距离东江湖数据中心约 1.5km），为方便计算结果影响范围的分析，将整体研究段分为上游

段、中游段及下游段，整体计算域如图 31 所示。本研究利用 ANSYS-Fluent 软件对排入河流的热水进行温度场数值模拟求解，根据平均水深情况（均值 6m），其水深尺寸远小于宽度及长度尺寸，为此，本研究将实际三维流动传热简化为二维，即如图 31 所示河面几何结构，根据河流平均流量 $136\text{m}^3/\text{s}$ ，水面宽为 160m，则模型入口流速为 $0.148\text{m}/\text{s}$ ，平均水温为 12.9°C ，模型出口为自由出流。数据中心取水及排水大致位置如图 31 所示。根据上述计算得到的取、排水体积流量，假定排水口为水面长 1m、水深 6m 的矩形孔（与二维简化相对应），则取水口及排水口的流速为 $0.705\text{m}/\text{s}$ ，取水温度 12.9°C ，排水温度 17.9°C 。河道设置为壁面无滑移边界条件。



图 31 东江湖数据中心排入水影响区域选取示意图

针对东江湖数据中心远景规划，计划扩容至 200000 台机柜，总的产热量 Q 为 $9.6 \times 10^5 \text{kW}$ ，换热问取 5°C ，则质量流量 $m=45714\text{kg}/\text{s}$ ，体积流量： $45.714\text{m}^3/\text{s}$ 。根据计算得到的取、排水体积流量，假定排水口为水面长 1m、水深 6m 的矩形孔，则取水口及排水口的流速为 $7.62\text{m}/\text{s}$ ，取水温度 12.9°C ，排水温度 17.9°C 。

查询小东江的姊妹河舂陵水（小东江下游段偏西 20km 左右）的水温资料如图 32 所示，其历年平均水温为 18.3°C ，由此可知小东江兴建水库前的水温也应处于 18.3°C 左右，而当前 12.9°C 的平均水温是由于兴建水库后水深增加引起较明显的水温分层作用之结果，因此，向小东江下游水体适度排入热量能够起到一定程度的热修复作用。

模拟计算得到的温升区间的包络范围统计结果如表 5 及图 33(a-b)所示，结果列出了水体不同温升区间的包络范围（ m^2 ）。可以看到，在当前东江湖数据中心建设规模下，（18000 台机柜，每台机柜 4kW ）热排水热修复范围主要集中在 $0.0\text{-}0.2^\circ\text{C}$ 温升范围，全域面积占比达 93.52%，且上、中、下游均有大面积分布，

此后，在 0.2-0.4℃温升热修复范围全域面积占比急剧降低至 3.78%，1.0-5.0℃温升热修复范围全域面积占比为 1.33%，且基本集中在上游河段的 1.0-2.0℃温升热修复范围。在远期规划的东江湖数据中心建设规模下（20000 台机柜，每台机柜 4kW），其所造成的热修复范围主要集中在 1.0-2.0℃温升范围，全域面积占比达 94.59%，热修复后的水体温度范围为 13.9-14.9℃，小于春陵江的平均水温 18.3℃。此外，该温度区间范围在上、中、下游均有大面积分布，此后，在 2.0-5.0℃温升范围全域面积占比急剧降低至 0.05%，0.0-1.0℃温升范围全域面积占比为 5.36%，且基本集中在上游河段的 0.0-0.2℃温升范围。综合来看，与其姊妹河春陵江相比，数据中心建设能够对小东江水温起到一定的热修复作用，且不为对水质产生任何影响。

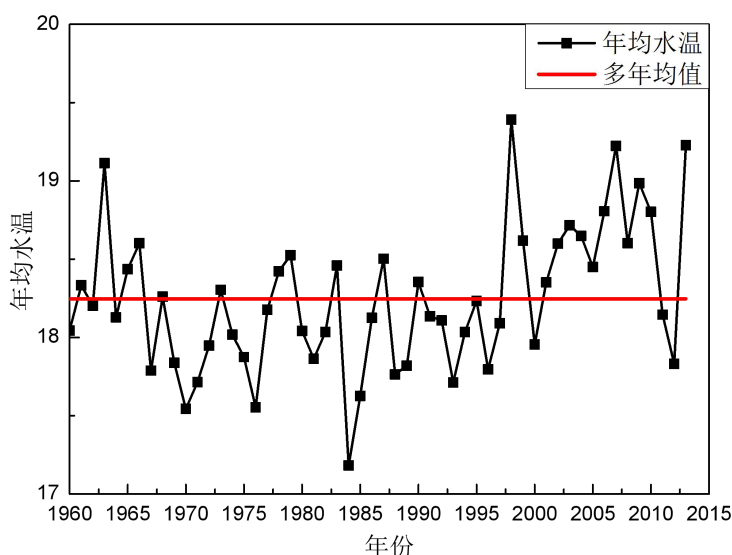
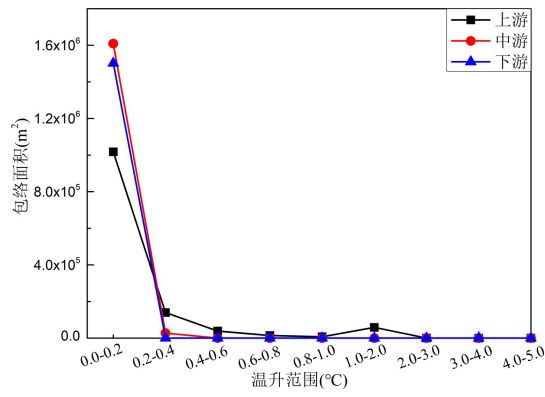


图 32 春陵江水域平均水温年际变化曲线

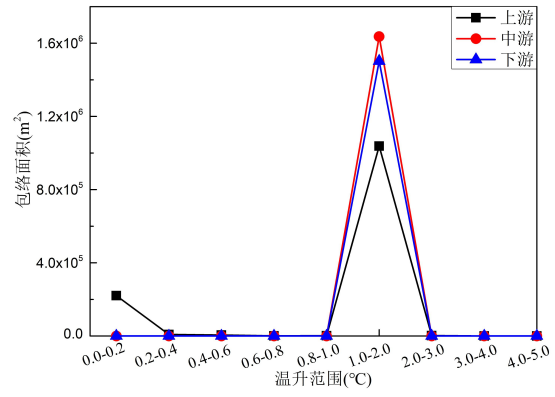
表 5 18000 机架的河水温升包络范围（单位：m²）

机架规模	区段	温升区间(°C)								
		0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1.0	1.0-2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0
18000 机架	上游	1017960	139610	38651	14128	7315	58756	170	24	2
	中游	1609100	27371	0	0	0	0	0	0	0
	下游	1502260	0	0	0	0	0	0	0	0
	占比 (%)	93.52	3.78	0.88	0.32	0.17	1.33	0.00	0.00	0.00
200000 机架	上游	220728	8457	5263	450	1589	1037950	2172	61	2
	中游	0	0	0	0	0	1636440	0	0	0
	下游	0	0	0	0	0	1502260	0	0	0
	占比	5.00	0.19	0.12	0.01	0.04	94.59	0.05	0.00	0.00

(%)									
-----	--	--	--	--	--	--	--	--	--



(a)



(b)

图 33 包络范围随温升变化曲线：(a) 18000 机架；(b) 200000 机架

第四节 在东江湖建设大型数据中心的规划和可能的节能潜力

4.1、东江湖建设大型数据中心区位规划

大数据产业园位于郴州资兴市，为湖南“两型社会”示范城市、郴州市市域次中心城市、现代工业文明城市、生态宜居旅游城市。历来是粤港澳大湾区的“后花园”，是湖南“先行先试”、改革开放的高地。地处东部沿海地区和中西部地区过渡带、长江开放经济带和沿海开放经济带结合部，位于粤港澳大湾区、长株潭、武汉等数据活跃爆发城市群的中部区域，处于长沙、广州等地高铁 1 小时经济圈内，500 公里可以辐射到粤港澳、长株潭、武汉城市群和南昌、桂林等地，可为整个湖南乃至华中、华南提供服务，区位优势明显。

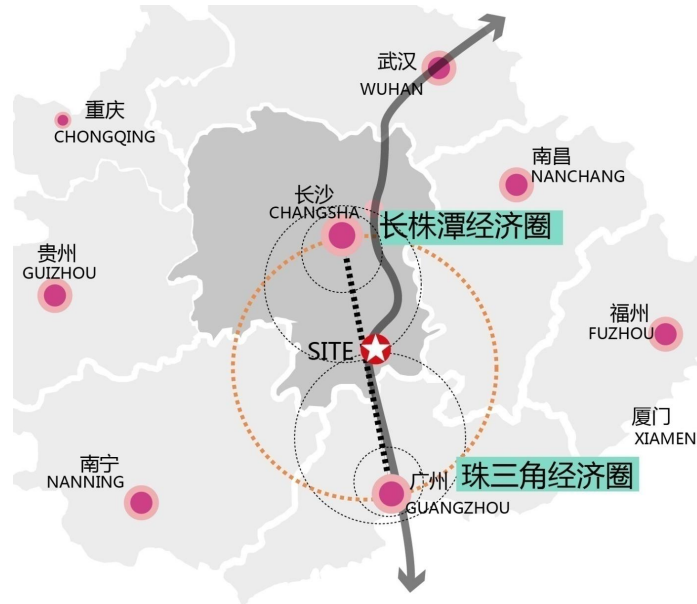


图 34 郴州资兴市区位规划示意

4.2、电力与水资源规划

丰富的冷水资源是资兴市大数据产业的核心优势。东江湖大数据产业园紧靠优质水冷资源，东江湖面积 160 平方公里，蓄水量 81.2 亿立方，水温常年保持在 8-13℃，可以作为服务器散热冷源。东江湖大数据中心经过近三年正式运营测定，年均 PUE 值低于 1.2，远远低于目前全国数据中心 PUE 值，也低于内蒙古自治区 1.28 和贵州省数据中心 PUE 值平均 1.56，节能 45% 以上，大大降低数据中心运营成本。规划一期设置 2 个集中供冷站房，一个位于方舟路北侧，一个位于资兴大道北侧，出水口位于鲤鱼江水电站大坝西侧。二期设置一个集中供冷站房。供冷站房冷水机组采用 N+2 配置确保系统可靠供冷供热管网采用环状的方

式布置。一期规划沿站前路、竹园路、莲花路、桂花路、资兴大道设置 DN1000-DN1200mm 2N 冷冻水供回水管，1 组 DN400mm 供热供回水管，沿其他城市道路敷设 DN600-800mm 冷冻水供回水支管和 DN200-DN250 热水供回水支管。



图 35 供冷站规划示意图

园区周边 10 公里以内分布有多座水力、火力发电站，装机容量共 261 万千瓦，还有 500kV 变电站 1 座、220kV 变电站 2 座，110kV 变电站 4 座，是全国首批 106 个增量配电业务改革试点项目之一。规划两座 220kV 变电站同时供电，可实现“双市电”接入，同时配置 UPS 电池组和柴油发电机；110kV 高压线沿主干路铺设，均为高架线路，规划沿城市主次干道地下敷设 10kV 及以下电力电缆，形成电力环网，为依托 500kV 郴州东变和大东江电厂为电源点的单环网加强型结构。此外，新组建的电力有限公司已于 2019 年 7 月初运营，通过发展分布式能源，以及积极争取省、市财政补贴等措施，积极争取降低电价。对于大数据产业园此类重大项目，通过“一事一议”的办法确定优惠电价，满足入园重点数据中

心电价方面成本控制的要求。

4.3、网络规划

网络方面，东江湖大数据产业园区 2500G 专线带宽已实现直连国家骨干网。三大运营商宽带已接入园区，东江湖大数据中心接入到中国电信“京—汉—广”核心骨干网，成为湖南电信第三个互联网骨干节点，电信天翼云平台已入驻，接入带宽达到 1520G，部署直达国际路由。三大运营商可以根据项目业务需求开通直连港澳带宽，基本满足了东江湖大数据中心网络传输需求。同时，园区通过发展数据中心，已带动一批数据研发应用、创投孵化、网络安全、移动互联网+、电商企业和增量配电、能源中心站等园区基础配套设施项目入驻，有力推动了园区产业发展和资兴市经济转型升级。

表 6 在建数据中心及配套规划

序号	项目名称	任务内容	投资规模	实施期限
1	东江湖大数据产业园增量配售电工程	公用电网新建 220kV 变电站 2 座，新增变电容量 1680MVA。新建 220kV 线路 6 条，总长度 79.8 公里。	60 亿元	2020-2022
2	东江湾水资源综合开发及循环利用能源站建设项目	借助东江湖天然水冷资源，将可再生能源作为低品位冷热源，采用湖水直供的方式为大数据产业园内数据中心供冷，采用水源热泵技术对园区内的其他民用建筑实施供冷（热）。	2.58 亿元	2020-2021
3	骨干网络优化项目	完善园区连接衡阳的光纤骨干直连通道建设，直连带宽达到 500Gbps。	2 亿元	2020-2025
4	互联网数据专用通道建设项目	建设园区直连武汉、粤港澳等地互联网数据专用通道，提升互联网数据传输能力。	5000 万元	2020-2022
5	5G 商用网络部署	加快 5G 商用网络三种应用场景在园区的全覆盖。	5000 万元	2020-2025
6	数据中心集群区域品牌打造项目	占地面积 4500 亩、容纳 20 万个机架、500 万台服务器规模的数据中心和 1000 家以上互联网企业的东江湖大数据产业园。借助大数据基础平台，引进数据研究、云计算、软件设计、电商总部和电子制造等上下游产业，打造全国最节能环保的大数据产业示范基地。	200 亿元	2020-2025

7	易信科技项目	占地 100 亩，建设 4 栋共 8000 个机架的数据中心、酒店、创投中心等。	10 亿元	2020-2023
8	东江湖大数据中心（绿色数据园中心）项目	机楼 1.6 万平方米、共 3000 个机架已于 2017 年 6 月投产运营。获得国际组织 UPTIME 的 M&O 运维能力认证、中国数据中心产业发展联盟 2018 年“优秀数据中心”、2018 年“创新节能数据中心”称号，中国电信集团授予“钻石五星级机房”。阿里巴巴、腾讯、深圳网宿科技、长沙政务云灾备、中国电信、中国联通、省电子政务云外网平台灾备、长沙银行等行政企事业单位批量进驻服务器。	4.5 亿元	2015-2022
9	重点大数据项目建设工程	推进湖南省大数据灾备中心、湖南省政务数据中心、湖南省国土资源厅地理信息数据灾备中心等项目建设。推进有色金属数据交易中心建设，促进全国有色金属数据资源在东江湖大数据产业园存储汇聚。	5000 万元	2020-2025

4.4 节能潜力分析

(1) 末端节能潜力

在东江湖数据中心现有的数据机房中，其空调末端均为机房精密空调 CRAH，送回风方式则采用冷通道封闭的地板集中送风形式。该方式虽然能显著减少局部热点，解决冷热气流掺混所带来的问题，但在实际运行及测试中，仍存在送风阻力过大、风量分配不均、无法实现精确制冷等许多不足，导致精密空调风机长时间高转速运行，从而产生不必要的末端输送能耗。

为了解决上述问题，东江湖数据中心尚未运行的数据机房、以及大数据园区内在建的数据中心，未来可将背板空调作为为主要的末端形式，从而减少末端输送能耗，从而进一步挖掘全自然湖水冷却系统的节能潜力。由于背板空调靠近热源制冷，风阻及风机能耗有所降低，以第 3.5 节中的二层 M1 模块机房为例，以单机柜功耗 6kW，送风温度 23℃ 计算，单台背板空调风机总功率约为 160W-200W，则 198 台背板空调总消耗功率为 31.68kW-39.6kW，对比正常运行 11 台机房精密空调的总功率 75.7kW，采用背板空调可节约末端风机能耗 36kW 左右，GCOP

可提升 44%。

此外，由于背板空调的机房温度场分布均匀，在规范要求及服务器正常运行的允许范围内，可以适当提高背板空调末端的出风温度。冷却末端方式的改进，可以进一步提高冷冻水供水温度的要求上限，提升了使用自然冷源的安全裕度和保证率。

（2）UPS 节能潜力

UPS 损耗可分为变压器损耗、滤波电感损耗及开关损耗。东江湖数据中心 UPS 型号为 Emerson Libert NX 系列，2N 冗余设计。由于该数据中心现阶段的总机架负载率仅为 10.8%左右，UPS 处于超低负载下运行。根据 UPS 相关技术参数及实测可得，此工况下的 UPS 功率因数为 0.68-0.87、电源转换效率 83%-87%，从而导致 UPS 损耗较高。若当负载率 $>80\%$ ，UPS 的功率因数将 >0.98 ，电源转换效率 87%-90%，冷却系统 GCOP 降低 0.8%，数据中心总能耗降低 1%。

此外，大数据园区内的部分数据中心拟对高压直流电源系统进行试点。高压直流电源采用模块化配置，没有逆变电路，内部整流模块等系统组件均为并联设置，可以灵活调整模块开机数量，从而使电源负载率保持在较高水平。因此，高压直流电源具有可靠性高、功率因数高、转换效率高、电源损耗低、节省建设投资和运维成本等优点。在东江湖数据中心当前的超低负载工况下，若采用高压直流电源，其功率因数大于 0.95、转换效率大于 92%、热损耗降低 20%以上。从而使得电源系统总消耗功率降低 10%以上，变配电室冷负荷降低 20%以上，冷却系统 GCOP 降低 1.5%，数据中心总能耗降低 2%以上。

（3）IT 设备节能潜力

IT 设备是数据中心的核⼼部分，也是数据中心能耗的重要组成部分之一。根据相关统计研究及东江湖数据中心实测发现，IT 设备的负载分布存在较大的不均匀性，且平均负载率仅为 30%左右，而在低负载下，IT 设备的供电、运行效率也处于较低水平；同时，IT 设备集群的负载不均匀性与气流组织的温度场不均匀性相叠加，会进一步导致局部热点的恶化和冷量的不必要浪费，从而变相增大机房空调的能耗。因此，提升 IT 设备的能效水平，对挖掘数据中心的节能潜力有着重要影响。

因此，IT 设备可采用基于热感的负载调度技术，实现空调系统运行效率的提升，减少空调系统能耗。根据相关研究，基于服务器进风温度和芯片温度的 IT

设备负载调度技术，通过对工作热环境较差的 IT 设备减少运行负载（如布置在机柜底部和顶部的 IT 设备），并协同优化送风量和送风温度，可在负载率<50%的情况下，显著降低 IT 设备热状态的不均匀性，避免过热及过冷，进一步实现数据中心冷却系统能耗降低 10%，GCOP 提升 3.2%。

（4）水泵节能潜力

东江湖数据中心的湖水取水系统主要由一台 KP1415 的大型提升水泵与一台型号为 KP8015 的小型提升水泵组成；在冷冻水系统中，采用两台型号为 KP80172-17A069 冷冻水泵（一用一备）将冷却后的冷冻水送回数据机房。同时，为了适应服务器动态负荷的变化，水泵采用变频调速运行。

然而，在现阶段实际运行工况下，由于服务器上架率较低，数据中心处于低负荷下运行。因此，湖水侧仅开启一台小型提升水泵取水，且长时间处于 30Hz 最低频率下，水泵无法随着负荷的变化继续降低其转速，此时变频器效率、电机效率和水泵效率均处于较低水平，导致节能效果不佳。因此，若在数据中心远期满负荷运行时，大型提升水泵与小型提升水泵将同时开启，此时水泵频率能正确适应数据中心负荷的变化，且均能在最佳工况下运行。与现阶段相比，预计冷却系统 GCOP 可提高 10.9%以上。

此外，在现阶段实际运行工况下，湖水温度完全满足数据中心冷却需求，且数据中心排水未对水体环境产生不利影响，因此湖水换热温差仍有提升空间。若湖水侧换热温差提升至 5℃，冷冻水侧换热温差也进行相应提升，预计湖水流量及冷冻水流量可分别减少 20%、60%，冷却系统 GCOP 可提高 21%。

4.5 经济性分析

（1）初投资分析

以东江湖数据中心一期部分负荷运行为例，需要配置 1 台 4420kW 冷水机组投资 120 万元，4 台冷却塔投资 101 万元，冷却系统相应的管路、水泵及工程投资 100 余万元，共计冷水机组工程初投资 320 余万元。若以远期满负荷运行为例，需要配置 4 台 4420kW 冷水机组及相应冷却塔、冷却水泵，相应工程投资 1200 余万元。东江湖数据中心完全采用全湖水自然冷却，无需采用机械制冷机组作为湖水的替代冷源，而仅采用蓄水池作为应急备份，可以节省工程初投资约 1200 余万元。

（2）运行费用分析

根据资兴市东江湖湖水的自然条件，在数据中心远期满负荷运行时，对比传统冷水机组与东江湖湖水全自然冷却技术，作如下分析：若采用全冷水机组冷却模式，按照 PUE=1.5 计算，冷却系统的运行能效 GCOP 按照 3.7 计算，一年空调系统的运行耗电量约为 2745 万 kW·h；而采用湖水作为自然冷源供冷，冷却系统的运行能效 GCOP 按照目前测试值 11 计算，一年空调系统的运行耗电量约仅为 923 万 kW·h，可节省用电量 1552 万 kW·h 左右，减少用电量 57%。按照目前园区实际电价 1 元/kW·h 计算，一年相当于节约电费 1552 万元。

总结

东江湖数据中心采用小东江湖水作为冷源，是一种长期的、稳定的、可持续的自然冷源，低温湖水经板式换热器制取冷冻水帮服务器降温，换热后的湖水经密闭管道排放至小东江下游，整个过程不对湖水水质造成影响，不影响水体的周边环境和生态；此外，系统配置高压水冷离心机组及配套设施作为备用，配置两个 180m³ 的蓄冷罐，当湖水制冷量不足或湖水不能使用时，开启集中式冷冻水系统，确保空调制冷连续不中断。**东江湖数据中心冷却系统创新性地采用低温湖水源，实现全年无主机自然冷却，在全国绝无仅有。**为了实现数据中心全年自然冷却，需要对自然冷水的储水量、水温、径流量以及水质等进行全方位的调研。

该数据中心自 2017 年建成投入使用以来，全年完全采用东江湖水作为冷源，实现全自然冷运行，冷水机组只在定期巡检时开启。目前，数据中心的负载率仅为 10%左右，处于低负载工况运行，湖水泵及冷冻水泵处于低效运行状态，实测年平均 PUE 值为 1.18。可以预测，随着未来负载率的持续增加，冷却系统 GCOP 仍存在较大的提升空间。

通过对东江湖数据中心的全面测试调研，从初投资及运行效益上分析，完全湖水自然冷却方案，可以减少冷水机组及冷却塔的初投资，同时可以大幅降低数据中心冷却系统的运行费用。东江湖数据中心仍存在能效提升的途径：1) IT 设备用房采用房间级精密空调的冷却末端，在实际运行及测试中，仍存在送风阻力过大、风量分配不均、无法实现精确制冷等许多不足，导致精密空调风机长时间高转速运行，从而产生不必要的末端输送能耗；2) 辅助用房采用水冷热管空调，实际运行及测试中，靠近主要热源（变压器和 UPS）的性能更加优越，辅助用房的空调布置仍存在提升空间；3) 目前低负载运行工况下，湖水泵和冷冻水泵长期处于单台最低频率下运行，湖水侧换热温差 4℃，而冷冻水侧换热温差只有 2℃，

换热温差仍有待提高，水泵输送能耗存在较大的降低空间；4) IT 设备负载分布未进行优化，若将 IT 负载分布和冷却系统控制参数进行联合优化，存在较大的节能潜力。