

第二章 利用水库下游水作为冷却冷源的数据中心

数据中心是信息技术时代重要的基础设施建筑,其需求量与经济发展程度直接相关,经济发达地区对数据中心的需求量明显高于其他地区,例如北上广地区。然而数据中心的高能耗又限制了其在经济发达地区的布局,若能找到合适的冷源降低数据中心冷却系统的能耗,可有效解决这一问题。

2020 年国家发改委印发了《关于加快构建全国一体化大数据中心协同创新体系的指导意见》,指出到 2025 年,全国范围内数据中心形成布局合理、绿色集约的基础设施一体化格局,统筹围绕国家重大区域发展战略,根据能源结构、产业布局、市场发展、气候环境等,在京津冀、长三角、粤港澳大湾区、成渝等重点区域,以及部分能源丰富、气候适宜的地区布局大数据中心国家枢纽节点。从地区分布来看,长三角、粤港澳大湾区和成渝等区域是多江交汇或大江大河入海口的的位置,这些位置附近往往建有大型水库,这些水库向下游的排水常年一般都处于较低温度。若以大型水库的排水作为数据中心的冷源,在其附近建立大数据中心是一种解决经济发达地区数据中心能耗问题的可行方案。在大型水库附近建设大数据中心主要需要考虑三点问题:一是水库蓄水水温是否满足数据中心冷却要求,二是水库水流量所能产生的传热量是否满足数据中心散热要求,三是经过数据中心散热后的水如何处理能够不破坏生态环境。

调研国内外水库可以发现,水库的底层水水温跟坝高、地理位置、以及库容与径流量比相关。大型水库库底深层水温度常年保持较低水平,一般低于 14°C ,而低于 18°C 的冷却水即可满足数据中心机房散热需求,因此,若引用水库深层的低温冷水作为数据中心冷源,可避免使用冷冻机,实现数据中心全年自然冷却。在生态环境方面,已有研究报道因为大型水库库底常年保持低温,若水库下泄水温低于建库前天然河道水温,将对周边及下游生态环境带来负面影响^[1]。因此,利用数据中心的发热量提升水库排水水温,不仅不会对生态环境造成破坏,反而有利于良好生态环境的构建。由此可见在大型水库附近建设大数据中心具备可行条件。

1.1 我国水库现状及环境影响

我国水电能源丰富,为合理开发利用水资源,我国有一大批已建、在建及待

建的大型深水库^[2]。截至 2005 年年底，中国 30 m 以上已建在建大坝共有 4860 座，其中坝高 300 m 以上有 1 座，坝高 200~300 m 有 8 座，坝高 150~200 m 有 22 座，坝高 100~150 m 有 99 座，坝高 60~100 m 有 42 座，坝高 30~60 m 有 4308 座^[3]。截至 2014 年，我国已建和在建的大坝中超过 15 m 的约 23842 座，其中包括部分大坝坝高超过了 200 m，如二滩（坝高 240 m）等^[4]。这些水库的建设在防洪、发电、航运、养殖、供水等方面发挥了巨大的作用，对当地经济和社会发展发挥了不可替代的作用。但与此同时，由于水库的修建改变了原有的河道流水规律，水库的水温呈现规律的分布，造成溶解氧、硝酸盐、氮和磷等离子成层分布。上层水体温度较高，处于 18~21℃，水中溶解氧含量相对较高，有利于水生生物的生长。下层水体温度较低，常年低于 14℃，水中溶解氧含量相对较低，浮游植物进行氧化作用消耗水体中的溶解氧，产生对鱼类有害的 CO₂ 和 H₂S 等，进而导致下层水体成缺氧状态，若直接将下层水体排入下游河道，对下游水生生物的生长将产生很大的负面影响。^[5,6]

根据水库的水温分布，其底层水温由于常年低于 14℃，水库底层水非常适合用作数据中心冷却系统冷源。而且，经过数据中心换热后的回水温度可升高 3~5℃，将回水再排入水库下游，可有效解决其“滞温”难题，因此对于高能耗的数据中心，若采用大型水库下游的冷水作为数据中心冷源，利用其冷量后再将其排回下游，就可以较大限度地利用自然冷源。温度较高的回水排入下游后也可有效解决修建水库后导致排水温度下降的难题，有利于水生生物生长及鱼类繁殖，对生态大有裨益^[7]。

1.2 水库冷却数据中心水温分析

1.2.1 水库出水温度分析

从数据中心节能角度来看，充分利用自然冷源可以有效减少数据中心空调系统的能耗。现有的常规精密空调系统中，对室内的温度进行调节，低于 18℃左右的冷却水即可满足机房散热要求。

对天然的河流，由于其水流速度较快，水深较浅，水在河道流动的过程中混合剧烈，水温在纵向上无显著的差异。修建水库并蓄水后，原有的天然河道形式不复存在，水坝拦截改变了河流的连续性，河道径流的年内分配和年际分配、水

文情势、水流过程和水体的年内热量分配，过流面积增加，水库水深增大，使河道原来流动的、水温基本混掺均匀的水体转变为相对静止或流动十分缓慢的大体积停滞水体。水在不同温度下，密度不同，这会让水体温度分布产生变化。

从水库冷水供应角度来看，对于给定的水库，决定水库温度变化的主要有以下几个部分：（1）水气界面的热量交换，包括太阳短波辐射、大气长波辐射、水体长波辐射、热传导能量、水面蒸发热损失；（2）入库水流输入的热量，包括入库流量和水温；（3）出库水流带走的热量，包括出库流量和水温；（4）同河床的热量交换，是通过固定边界的热传导进行的，由于库底土壤中的温度梯度小，热交换量很少，一般可忽略；（5）内部产生的热，主要包括水的热能转化为摩擦热及物质中的化学能经生化作用释放的热能，通常情况下，二者都非常小；（6）人为活动，包括废热的排放和水轮机摩擦生热等，对于大型水库常可忽略不计。

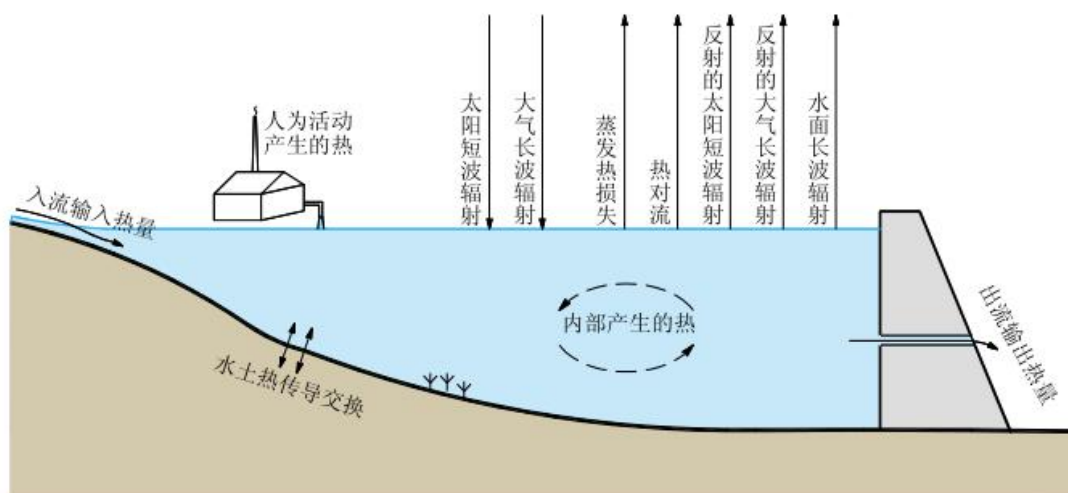


图 1 水库水体与外界热量交换示意图^[5]

水在不同的温度下具有独特的密度特点，水的最大密度出现在 4°C 左右，高于或低于此温度时的密度都要下降，当水温高于 4°C ，在受热不均匀的状态下，一旦上层水温高于下层，形成上低下高的密度梯度，水体将有可能形成温度分层。水库水温分布一般有三种类型：稳定分层型、混合型和过渡型^[8]。稳定分层型水库从上到下分为混合层、温跃层和滞水层，混合层水温随气温变化而变化，温跃层在垂直方向上具有较大的温度梯度，而滞水层水温基本均匀；混合型水库垂向无明显分层，上下层水温均匀，年内水温变化较大；过渡型水库介于两者之间，

偶有不稳定的分层现象。

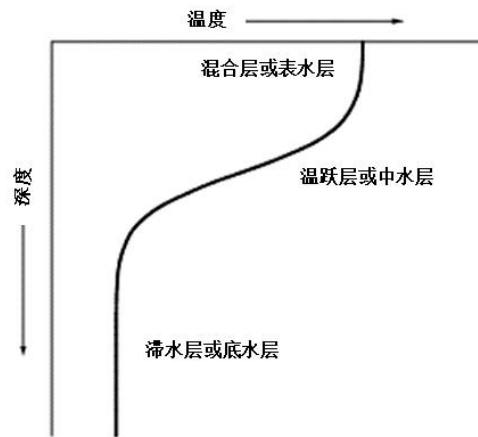


图 2 分层型水库垂向水温分布示意图

常见的水库水温分布情况判别模式有：参数 $\alpha - \beta$ 法（入流流量与库容比值法）、Norton 密度佛汝得数法、水库宽深比法等^[6]，其中前两种方法最为简单实用，经水库实测资料检验，其预测结果基本符合实际情况。

(1) 参数 $\alpha - \beta$ 法

日本学者提出的这一方法是目前国内判别水库是否产生分层的主要依据：

$$\alpha = \frac{\text{多年年平均入库总流量}}{\text{总库容}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\text{一次洪水总流量}}{\text{总库容}} \quad (2)$$

当 $\alpha < 10$ 时，水库为稳定分层型； $10 < \alpha < 20$ 时，为过渡型； $\alpha > 20$ 时，为混合型。一般而言， α 值可初步判断水库是分层型还是混合型，但当洪水条件不同时，分层型也可能成为混合型，所以采用 β 值作为第二判别标准，对于分层型水库，如遇 $\beta > 1$ 的大洪水，则洪水会破坏原有的水温结构，使其变为临时的混合型，而 $\beta < 0.5$ 的洪水，一般对水温结构没有显著影响，这种方法主要适用于年内洪枯分季不明显、洪水次数频繁而每次洪水量不太大的水库状况。

(2) Norton 密度佛汝得数法

1968 年美国学者 Norton 等提出用密度佛汝得数来判断水库的分层特性，密度佛汝得数是惯性力与由于密度差引起的浮力的比值，Fr 根据下式计算：

$$Fr = \frac{LQ}{HV} \sqrt{1/gE} \quad (3)$$

式中：L 为水库长度，m；Q 为入库流量，m³/s；H 为平均水深，m；V 为库容，m³；E 为标准化的垂向密度梯度， $E = \Delta\rho/(\rho_0H)$ ；g 为重力加速度，m/s²。根据哥伦比亚河上和 田纳西流域管理局的水库观测资料：Fr > 1.0 时水库为完全混合型；0.5 < Fr < 1.0 为混合型，0.1 < Fr < 0.5 为弱分层型，Fr < 0.1 时为稳定分层型。在采用参数 $\alpha - \beta$ 判别法判别出水库水温结构为过渡型时，可采用佛汝德数判别法对水温结构进行进一步的判别。

(3) 宽深比判别法

水库宽深比判别法公式为：

$$R=B/H \quad (4)$$

式中：B 为水库水面平均宽度，m；H 为水库平均水深，m；当 H > 15 m、R > 30 时水库为混合型，R < 30 时水库为分层型。

除上述两种普遍采用的经验公式法外，其他学者也提出了一些判别方法。Zheng Yu 等^[9]认为水体在垂向上每米温差超过 1℃（温跃层），就认定为温度分层；蔡为武^[10]认为水库水温分层强弱与水库调节性能、泄水孔口相对位置和泄水状况等因素有关。

在多数水深超过 30m 的水源水库中都会普遍出现温度分层现象^[11]，并且以年为周期循环变化。由于水库水流缓慢，太阳辐射的热量除了一小部分被水面反射掉以外，其余大部分均被水体吸收，并向更深处的水体传递。大气辐射、库底辐射、进出流水体热量、水体大气之间的热交换以及各种生化作用产生或者消耗的热量都对水库内的热量收支产生影响。在水体内部，也进行着各种热传递，包括上层水体与下层水体间的热传导；水体纵向对流产生的热交换；垂直环流产生的热掺混。水体在多方面因素的联合作用下，形成了特殊的水温分层结构。

大型水库库内水深流缓，热量传输能力下降，进入初夏后，库面水受到太阳辐射而增温，密度减小，停留在温度较低、密度较高的下层水之上，一旦风和波浪等因素无法使其在垂直方向混合时，就会形成水体的温度分层。进入秋天后，库表水体先行降温，密度增大，在重力作用下冷水下沉，与下层水混合，当混合

作用扩展至库下水层后，垂向水温均匀^[9]。表 2 为国内外部分水库水温测试情况。表中所列的水库库底年平均水温均低于 14℃，可较好地满足机房冷却水温度要求（低于 18℃）。

表 1 国内外部分水库实测水温情况

水库名称	坝高 (m)	多年平均 气温(℃)	水库表面年平 均水温(℃)	库底年平均 水温(℃)	备注
丹江口	97.00	15.67	18.44	12.10	1970-1974 年实测值
新安江	105.00	17.30	21.10	10.40	1961-1962 年实测值
丰满	90.50	5.10	11.80	6.20	1954-1956 年实测值
古田一级	55.00	19.80	19.70	13.10	1959-1961 年实测值
佛子岭	75.00	16.58	18.21	13.08	1963-1964 年、1970 年 实测值
官厅	45.00	9.90	13.80	11.00	1958 年实测值
新丰江	105.00	21.70	21.40	12.00	1962-1964 年不完整实 测值
诺里斯 (美国)	81.00	14.00	18.20	7.90	多年平均
鲍尔德 (美国)	221.00	22.30	21.40	12.00	多年平均

下面对我国典型水库温度分布情况举例进行分析。

1) 新丰江水电站

新丰江水电站位于广东省河源市，距河源市区 6 公里。现装机总容量 33.61 万千瓦，总库容 138.96 亿立方米，有效库容 64.89 亿立方米，死库容 43.068 亿立方米，为多年调节水库。水库正常蓄水位 116 米，死水位 93 米。集水面积 5740 平方公里。坝址多年平均年径流量 60.5 亿立方米，多年平均流量 192m³/s。其水库实测水温如图 3 所示。

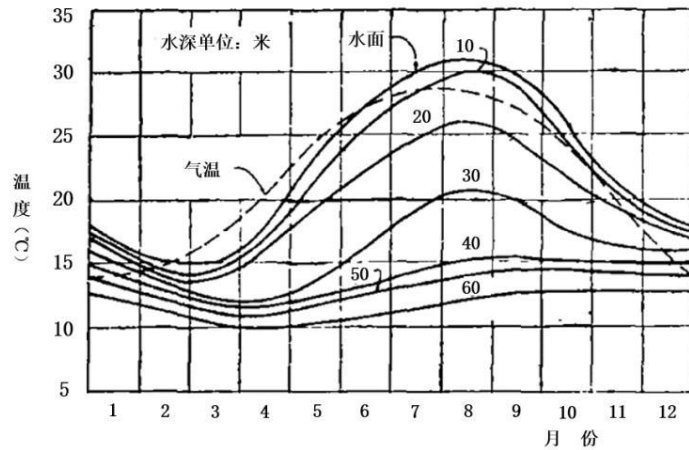


图 3 新丰江水电站实测水温^[12]

2) 三板溪水电站

贵州大型水电站分布较为集中，且年气温较高，选取典型水电站——三板溪水电站进行水温分布分析。三板溪水电站 2006 年开始蓄水，水库水温呈稳定分层型，下游约 25 km 的锦屏水文站作为三板溪下游水温影响的控制断面。图 4 为 2009 年三板溪水电站实测水温。该水电站水深 80 米以上为其死水区，全年温度均在 10℃左右，可较好满足数据中心冷却需求。

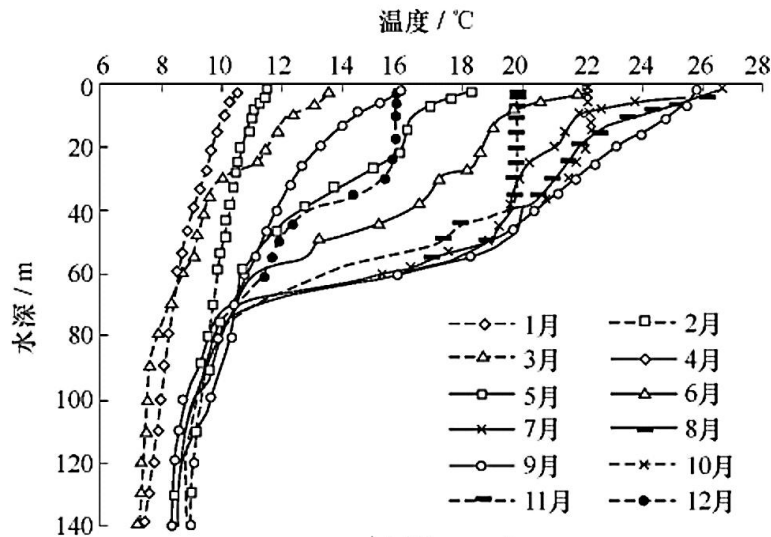


图 4 三板溪水电站实测水温^[13]

3) 紧水滩水电站

国网电力紧水滩水力发电站位于浙江省丽水市云和县紧水滩镇，是国家“七五”重点工程，是华东电网调峰与事故备用的主力电厂。紧水滩水电站是国家开发瓯江流域龙泉溪干流梯级发电的第一级水电站，下游为石塘水电站。电站控制

流域面积 2761 km²，多年平均流量 31.6 亿 m³。千年一遇洪峰流量 11700 m³/s。电站正常蓄水位 184 m，死水位 164 m，调节库容 5.48 亿 m³，具有年调节性能。紧水滩水库水温结构为稳定分层型，135 米以下为滞水层，135~150 米为温跃层，150 米以上为混合层。根据 1993 年至今的水温监测，库区 125 米高程以下库容 0.35 亿立方米，水温常年保持在 13℃ 以下；库区 130 米高程以下库容 0.61 亿立方米，水温常年保持在 15℃ 以下。

数据中心紧挨水电站建设，遇到溃坝、洪水等危险时会影响数据中心运行安全，为避免发生这些情况，同时保证最大限度使用水库底部排水的冷却资源，一般将数据中心建设在距离坝体 1~2 公里的位置。当环境温度较高时，排出水库的底层冷水在下游流动时不断与外部热环境进行换热，冷水温度将相对升高。对我国南部地区某水库，在夏天，下游水的水温温升率一般在 1.5℃/km 左右，即下游冷水取水口的温度比水库出水口冷水温度高 3℃ 左右^[14]。冬天时由于环境温度比水体温度更低，水温将持续下降。由于一般水库底层水温常年低于 14℃，考虑环境温度较高时外界对水体的加热升温过程，下游取水口处水温依然一般可以低于 18℃，满足数据中心冷却需求。

综上所述，一般来说，稳定分层型即多年年平均入库总流量与总库容之比小于 10，且滞水层温度低于 18℃ 的水库附近适合建设大数据中心。水温情况跟水库所处的地域密切相关，少数北方水库，由于气候本身属于寒冷区域，即使是过渡型或混合型（多年年平均入库总流量与总库容之比大于 10）水库，其滞水层温度也常年低于 18℃，依然适合作为水库型全自然冷却数据中心的冷源。

1.2.2 水库数据中心对生态环境的影响

由前述分析可知，水温分层型水库表层和底层水温差可达 20℃ 左右。若水库下泄水温低于建库前天然河道水温，将给周边及下游生态环境带来负面影响^[1]。首先，水库底层取水形成的下泄低温水会对下游农作物造成不利影响，尤其是在农作物比较敏感的 4~8 月期间。如在水稻的分蘖期，水温由 22℃ 降低到 21℃ 时，抽穗期平均延迟 3~4 天，减产 10% 左右。同时，水库温度分层现象也会对水生生物产生不利影响。水温分层型水库下层水体温度较低，溶解氧含量较少，CO₂、H₂S 等有害物质较多。由于鱼类产卵和孵化均对水温有严格的要求，且大部分鱼

类在初春至夏末时期繁殖，而此时也往往是水库下泄低温水的时期。低温水会造成鱼类产卵推迟或者不产卵。如美国格伦峡谷大坝的修建，低温下泄水使下游的科罗拉多河中 8 种鱼类中的 3 种已经消失，另外 60 多个物种受到威胁。

因此，大型水库库区水温分布不仅影响库区水体的生态系统结构，而且对水库下游水质、水生微生物及鱼类的繁殖生长以及农作物收成产生一定的影响。水库冷却型数据中心的构建将会提升水库排水水温，不仅可以获得绿色稳定的自然冷源，也对水库下游的水生生物、农作物及枢纽工程本身都具有重要意义。

1.3 水库冷却冷量分析

随着信息技术的集成度逐渐增大，单机架的算力逐渐提升，单机架功率不断增长，假定数据中心单机架功率为 6kW（高于目前的 4.8kW），冷却水侧进出口温差设定为 5℃，则一台机架所需冷水流量 0.28kg/s，一年需要 9010 吨冷水冷却。考虑 10%的裕量，单机架一年约需 10000 吨冷水进行冷却。

数据中心采取底层取水方式，取底层温度较低的水作为数据中心的冷源对机房进行散热。为满足数据中心全年不间断运行要求，应保证在水库最小径流量^[15]、^[16]条件下依然满足冷却需求。在不影响水电站正常运营情况下，取水电站年最小径流量的 10%作为可用给数据中心冷却的冷水流量。若在表 2 列出大型水库旁建设数据中心，其冷水冷量可冷却 280 万座机架，而 2021 年数据中心机架数目的预估值为 350 万架，即可满足我国大部分数据中心机架的冷却需求。这种将水库底层的冷水作为冷源的自然冷却方式将避免使用制冷机，大幅度降低冷却系统的能耗，从而提高数据中心整体能效。在我国典型水电站旁建设数据中心的分布如图 5 所示。

表 2 我国部分水电站可供数据中心冷却的理论机架数

水电站名称	理论机架数（万）	水电站名称	理论机架数（万）
鲁布革	2.83	龙滩（一期）	27.92
沙沱	16.37	小浪底	23.02
索风营	7.41	三门峡	23.31
思林	14.72	丹江口	20.81
引子渡	2.43	龙羊峡	11.28

东风	5.74	新安江	6.19
乌江渡	8.38	新丰江	3.61
洪家渡	2.69	二滩	15.44
三板溪	4.16	水口	29.83
构皮滩	12.42	湖南镇	1.45
天生桥一级	10.62	珊溪	1.02
岩滩	30.70	紧水滩	1.73

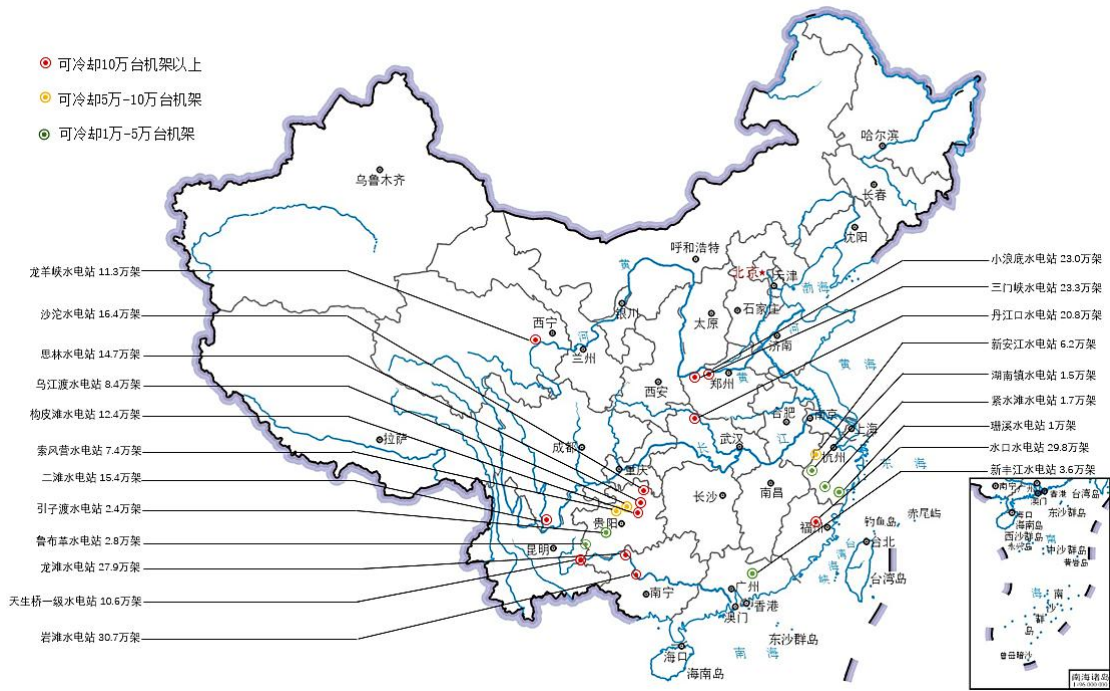


图 5 水库型数据中心建设分布

1.4 水库型全自然冷却数据中心方案

1.4.1 水库型全自然冷却数据中心冷却系统

由于水库滞水层水温常年保持在 18°C 以下，因此在水库附近建设大型数据中心无需部署额外的冷源设备，将水库排水的低温冷水引入一个合适的蓄水池，经初步沉淀后，利用水泵将其送至过滤装置进行水质处理，再送至换热器中吸收机房的热量，最后排至水库下游。图 6 给出了水库下游排水对数据中心的冷却过程。

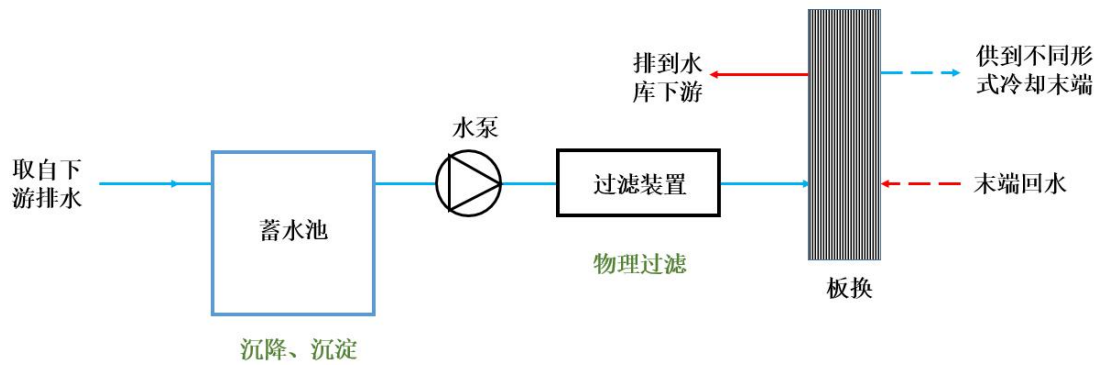


图 6 水库下游排水冷却数据中心流程图

1.4.2 能效分析

对以水库下游冷水作为冷源的数据中心，若采用高效冷却末端，如热管分布式冷却技术，依靠重力实现循环换热，无需额外的输配能耗，仅列间级和机柜级的末端风机耗电，由于分布式冷却采用小风量大焓差的冷却模式，风机耗电量也大幅减少。根据实测数据，列间级和机柜级的末端 COP（制冷量/耗电量）可高达 50 以上；根据数据中心取水点与数据中心的地理位置差异，可能还需用到水泵。则水库型全自然冷却数据中心冷却系统的 GCOP（能效比，Coefficient of Performance）值可按下式估算：

$$GCOP = \frac{\text{总耗电量} - \text{冷却系统耗电量}}{\text{冷却系统耗电量}}$$

与当前数据中心比较，按我国数据中心年耗电量 2500 亿度电，其中冷机耗电量约为 210 亿度/年（冷机 COP 为 8，平均 PUE 值取 1.5）。若采用水库水冷却，每年可节省 210 亿度电。

1.5 本章小结

1. 国家大力发展新基建，数据中心是其重要的组成部分。为充分利用自然冷源，数据中心建设宜选址在大型水库下游。利用流入河流下游的水库底层冷水作为数据中心冷源，可取消机械制冷，有效地减少数据中心空调系统能耗，充分节约能源。

2. 技术方面，将水库下游排出的低温冷水引入蓄水池，沉降水中附着的泥沙，对冷水进行初步清洁。上层洁净的冷水（一次水）流入数据中心板式换热器与二

次水进行充分换热，温度较高的一次水排出到水库下游河道中。

3.在水库下游搭建数据中心并利用下游水作为冷源，将会升高下游水温。对数据中心，可获得绿色稳定的自然冷源，节约能源。从数据中心排出的温度较高的江水也可有效解决修建水库后导致排水温度下降的难题，对生态环境及枢纽工程本身具有重要意义。

4.为保证数据中心的运行安全，数据中心应选址在离水坝有一定距离，且地势比较高的下游区域，避免溃坝和洪水的风险。同时，应考虑下游河流水温随距离坝体距离的关系，确保水坝选址点可满足数据中心冷却需求。

5.数据中心的选址与搭建需与水利部门紧密配合，统一规划。应确保数据中心与水利工程的协同发展，与相关水利部门充分沟通，将数据中心冷却作为水库应用之一，保障下游水引流到数据中心的最小径流量，避免风险，安全取水。

本章参考文献

- [1] 甘衍军, 李兰, 武见, 等. 基于 EFDC 的二滩水库水温模拟及水温分层影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(4):476.
- [2] 何洁. 水库分层取水及其水温变化试验和数值模拟研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2013.
- [3] 戴凌全. 大型水库水温结构特征数值模拟及下泄水生态影响研究——以三峡水库为例[D]. 湖北: 三峡大学, 2011.
- [4] 李广宁. 大型水库水温结构及取水口前流场研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [5] Sebnem Elci. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality[J]. Limnology, 2008, (9): 135-142.
- [6] Milstein A., Zoran M.. Effect of water withdrawal from the epilimnion on thermal stratification in deep dual purpose reservoirs for fish culture and field irrigation[J]. Aquaculture International, 2001,(9): 81-86.
- [7] 王煜, 戴会超. 大型水库水温分层影响及防治措施[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2009, 31(06): 11-14+28.
- [8] 张少雄. 大型水库分层取水下泄水温研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [9] Yu, Z., Yang, J., Amalfitano, S. et al. Effects of water stratification and mixing on microbial community structure in a subtropical deep reservoir. Sci Rep 4, 5821 (2014).
- [10] 蔡为武. 水库及下游河道的水温分析[J]. 水利水电科技进展, 2001, (5): 20-23.
- [11] 脱友才, 刘志国, 邓云, 等. 丰满水库水温的原型观测及分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(005):731-738.
- [12] 朱伯芳. 库水温度估算[J]. 水利学报, 1985(02):12-21.
- [13] 颜剑波, 楚凯锋, 张德见, 等. 一种常用水库水温计算经验公式的改进研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(10):73-77.
- [14] 李晓路, 胡振鹏, 张文捷. 大坝下游河道水温变化规律及其影响[J]. 江西水利科技, 1995(03):167-173.
- [15] 王玲慧. 水库生态服务功能及价值评估研究[D]. 昆明理工大学, 2016.
- [16] 许伟. 龙羊峡、刘家峡河段梯级水库联合运用相关问题研究[D]. 清华大学, 2015.