

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312733

# 基于风电升压站的低 PUE 数据中心实现

王丽莉<sup>1,2</sup> 赵飞龙<sup>1,2</sup>(1. 中国移动通信集团海南有限公司 海口 571250; 2. 新一代移动通信技术国家工程研究中心  
海南自贸港分中心 海口 571250)

**摘要:** 低 PUE、低 WUE 和低 CUE 成为数据中心建设的关键审批指标和经济指标,全球诸多科研机构和企业都在探索相关的实现技术和方案。提出了一种以海上风电场的升压平台为承载,通过 AI 技术将海上风电、海洋循环水和液冷服务器进行联合优化,探索出一种  $PUE < 1.1$ 、 $WUE \approx 0$  和  $CUE \approx 0$  的新型数据中心实现技术。经试点项目分析,该技术 PUE 可达 1.067,通过联合设计将新能源与新基建的基础设施充分复用,经济效益突出,具备在我国东南沿海大规模复制推广,可解决双碳目标下的东部地区就近算力提供问题。

**关键词:** 数据中心;人工智能;PUE;风电升压站;能效测评

**中图分类号:** TP302 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Implementation of low PUE data center based on offshore substation

Wang Lili<sup>1,2</sup> Zhao Feilong<sup>1,2</sup>(1. China Mobile Group Hainan Co., Ltd., Haikou 571250, China; 2. National Engineering Research Center for  
New Generation Mobile Information and Communication Technology Hainan Branch, Haikou 571250, China)

**Abstract:** Low PUE, low WUE and low CUE have become key approval indicators and economic indicators for data center construction. Many scientific research institutions and enterprises around the world are exploring relevant implementation technologies and solutions. In this paper, based on wind plant offshore substation a new data center implementation technologies with  $PUE < 1.1$ ,  $WUE \approx 0$  and  $CUE \approx 0$  is provided, by optimizing offshore wind power, marine circulating water and liquid cooling server through AI technology. According to the analysis of the pilot project, the PUE of this technology can reach 1.067. Through joint design, the new energy and new infrastructure are fully reused, with outstanding economic benefits. It can be replicated and promoted on a large scale in the southeast coast of China, and can solve the problem of providing nearby computing power in the eastern region under the dual-carbon goal.

**Keywords:** data center; artificial intelligence; PUE; wind plant offshore substation; energy efficiency evaluation

## 0 引言

算力是被认为是数字经济的核心生产力<sup>[1]</sup>,但是承载算力的数据中心能耗问题在双碳目标下愈发突出。根据文献[2-5],全绿电和低电源利用效率(power usage effectiveness, PUE)  $\leq 1.15$  已经逐渐成为东部地区数据中心能评的追求指标,而液冷技术也被认为是实现的关键技术<sup>[6-7]</sup>。根据北京市发改委官网公示信息,2022年一季度报送能评的北京长海云通科技有限公司承建的大兴智慧科技产业园区及配套云计算数据中心,预计项目建成运行后,PUE 值将不高于 1.118。根据 Google 发布的报告<sup>[8]</sup>,其所有大型数据中心的年均 PUE 数据逐年下降,目前已稳定

在 1.11 左右,个别数据中心甚至可达 1.06。

传统的数据中心建设技术<sup>[9-10]</sup>已不能满足当前极致的 PUE 目标。微软和海兰信试点过海底数据中心<sup>[11-12]</sup>,海底数据中心存在容量小,维护难的问题;新加坡 Keppel 试点过海上浮动数据中心<sup>[13]</sup>,存在需要与近海养殖竞争生存空间的问题;美国国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)建立的能源系统集成设施(ESIF)中的高性能计算中心(HPC)通过引入人工智能(artificial intelligence, AI)技术能够更有效地利用温水废热回收系统,PUE 达到了创记录的 1.032<sup>[14]</sup>,但未与绿电相结合。

本文提出一种利用海上风电场的升压平台建设数据中

收稿日期:2023-02-04

心的新技术,将新能源与新基建相结合,通过联合设计,共建共享,利用AI技术实现更精细的能量供储平衡、计算负荷动态分配和水循环流速控制,从而实现极高能效比、零碳排放、零水排放的目标。方法具有造价合理、经济效益高,符合当前国内的政策要求,可在我国沿海风电场规模复制、推广。

## 1 实现方案

我国拥有  $3.2 \times 10^4$  km 的海岸线和近  $300 \times 10^4$  km<sup>2</sup> 的海域面积,为达成双碳目标,国家鼓励大力发展可再生能源,海上风电建设正方兴未艾。风电场需要将风机产生的电通过海底光电复合缆汇聚到海上升压平台,变压后再并入公共电网。数据中心利用升压平台提供的承载基础,共用升压站已有油机、配电、消防、传输等系统,联合对电气、制冷、新风过滤、给排水、消防、监控等子系统做工程设计。海上数据中心的设计指标要求能满足16级台风、9级抗震、海工防腐标准,高压部分需3路市电和48h高压油机备电,低压部分要求不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)备电时间低于30min。

图1给出了小型和大中型海上数据中心部署在升压平台的方案。大中型数据中心需与主体钢结构建筑共同设计,小型数据中心可以后期设计锚定在升压平台上。最大化共享海上风电场基础设施,复用两路直供风电与一路返送市电以及两路光电复合海缆设施,复用抽水泵直取海水循环散热,再直排海里。

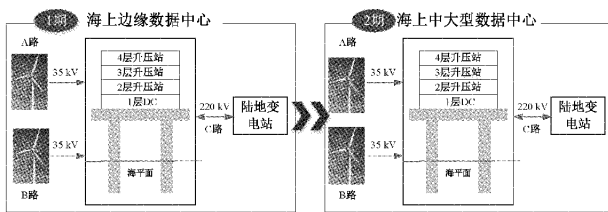


图1 海上数据中心总体技术架构

数据中心包括土建、动力、暖通、传输、消防、防腐、值守等多个子系统,与本文讨论的能效相关的重点是动力和暖通方案。

### 1.1 动力方案

数据中心可以从低压配电室取电,完全共享站内用电设施,包括35kV中压系统、750kVA低压变压器和柴油发电机。数据中心采用高密度模块化UPS供电,复用升压平台已有的储能系统,可最大程度提高空间利用率,负责数据中心内部信息技术(information technology, IT)、空调、弱电等系统供电,满足连续制冷要求。海上数据中心供电系统如图2所示。

### 1.2 暖通方案

数据中心直接采用海水自然冷却技术,如图3所示,取水深度位于海平面以下10~20m,直接海面排水可避免水流冷热短路,海水泵循环采用温差和变频调节控制逻辑,取

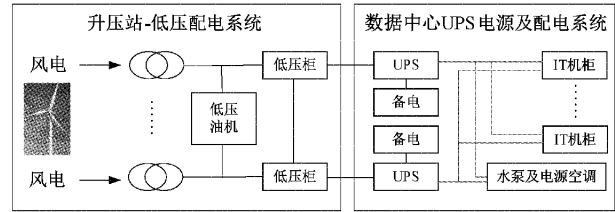


图2 海上数据中心供电系统

排水温差不超过5℃,满足环保要求。取水管路增加一级过滤,海水换热板换采用二级过滤,以满足海水正常循环。

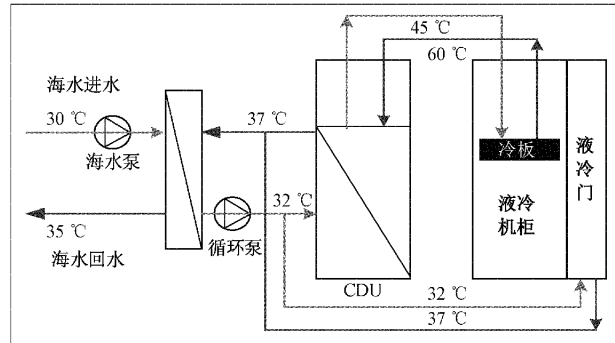


图3 海上数据中心海水冷却系统

一次侧通过海水潜水泵与板换进行换热供冷,二次侧通过循环水泵与冷却液分配单元(coolant distribution unit, CDU)及IT液冷机柜进行闭环式循环换热。一体化预集成海水换热系统按照2N架构设计,末端采用板式液冷机柜架构,IT液冷模块中70%的中央处理单元(central processing unit, CPU)器件热负荷通过液冷冷板的方式带走,剩余30%非CPU器件热负荷通过液冷门冷却的方式带走,实现近100%自然冷却。

## 2 关键方法

### 2.1 整体AI联控技术

本方法采用基于集装箱的预制模块进行建设,IT设备分散在多个集装箱内,即数据中心被划为多个独立的区间。每个区内都有独立的供电、制冷和水循环系统。第*i*个区的  $PUE_i = Total_i / IT_i$ ,因此整个数据中心的PUE可以由式(1)计算。

$$PUE = \frac{\sum_{i=1}^N Total_i}{\sum_{i=1}^N IT_i} \quad (1)$$

其中,  $Total_i$  为总能耗包括IT设备和非IT设备(如照明、空调等)的能耗;  $IT_i$  为IT设备的能耗。可以证明  $PUE \geq AVG(PUE_i)$ ,最小值在  $PUE_i$  均相等时取得。

PUE优化的过程包括2个步骤:

1)大尺度优化。各区的供电、制冷和水循环系统等非IT设备的功耗均由系统基础功耗  $FL_i$  和负载动态功耗  $DL_i$  两部分构成,其中基础功耗  $FL_i$  是设计阶段根据机架数量确定,数据中心运行期间将保持为固定值,为降低基础

功耗  $FL_i$  的分摊比例, 数据中心的 AI 联控技术分配云资源池的 IT 负载时将根据各箱子的基础功耗进行动态调度, 使各区  $PUE_i$  尽量成直线排列。

2) 小尺度优化。在第  $i$  区内采集 IT 设备实时运行数据并加以预测, 通过调整水泵流速调优动态功耗  $DL_i$ , 使  $PUE_i$  尽量向 1 靠拢, 从而实现整体  $PUE$  的最优化。分区  $PUE$  联控技术如图 4 所示。

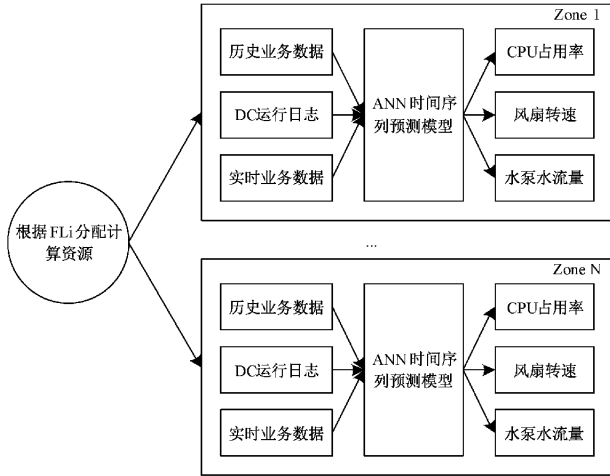


图 4 分区 PUE 联控技术

### 2.2 分区 AI 智冷技术

对于每一个分区, 由于 IT 设备工作负载会随着业务变化, 海水日常温度也会存在一定范围波动, 服务器的最佳工作温度与进风量要求也会不同, 为做到数据中心制冷与能耗的精准匹配, 引入从 IT 到动力设备全链路器件级 AI 智冷技术, 采用神经网络训练模型, 通过 AI 训练, 实现海水潜水泵、二次循环泵、电源电池散热空调、服务器风扇与 IT 的最佳匹配, 进而达到数据中心总能耗全天候最优。

本方法构建了一套 IT 与数据中心基础设施联动寻优的框架, 如图 5 所示, 该分区内有  $N$  个机柜, 其中 CS 为冷却系统 (cooling system, CS), 主要涉及海水潜水泵、二次循环泵、电源电池室空调设备;  $Fan$  为服务器背板风扇; IT 设备为液冷通用计算存储型服务器。

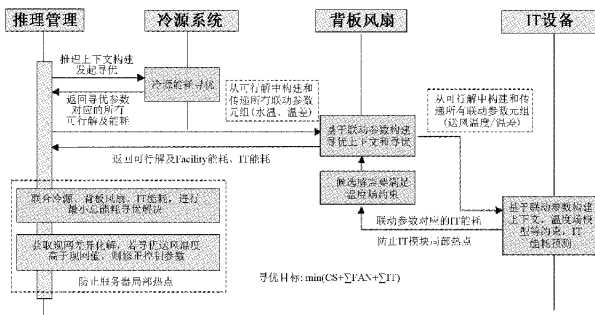


图 5 IT 与 DC Facility 联动寻优逻辑

其分区的最优化目标为:

$$\min(CS(f(\Delta P, L(Q, \Delta T))) + \sum_{i=1}^N Fan_i(Speed(T, n)) + \sum_{i=1}^N IT_i(L(Q, \Delta T)))$$

$$st. f(\Delta P, L(Q, \Delta T)) \in [35, 50]$$

$$Speed(T, n) \in [30\%, 100\%]$$

$$L(Q, \Delta T) \in [0, 200]$$

其中,  $f$  为水泵输出频率, 单位为 Hz;  $\Delta P$  为系统阻力, 单位为 kPa;  $L$  为流量, 单位为  $m^3/h$ ;  $Q$  为热负荷, 单位为 kW;  $\Delta T$  为温差, 单位为  $^{\circ}C$ ;  $Speed$  为风机输出百分比;  $T$  为温度, 单位为  $^{\circ}C$ ;  $n$  为风机转速, 单位为 r/min。

寻优算法采用人工神经网络 (artificial neural network, ANN), 其节点层包含 1 个输入层、1 个或多个隐藏层和 1 个输出层。每个节点是 1 个人工神经元, 它们连接到另一个节点,  $X$  代表不同输入条件  $x_i$  为阻力  $\Delta P$ 、热负荷  $Q$ 、温差  $\Delta T$ 、温度  $T$  等参数,  $z_j^{[k]}$ ,  $a_j^{[k]}$  为隐藏层节点, 代表流量  $L$ 、风机转速  $n$  等, 上标的  $[k]$  等代表当前为第  $k$  层级,  $y$  代表模型的输出, 如风扇电机转速、水泵电机转速和 CPU 占用率。神经网络训练模型如图 6 所示。

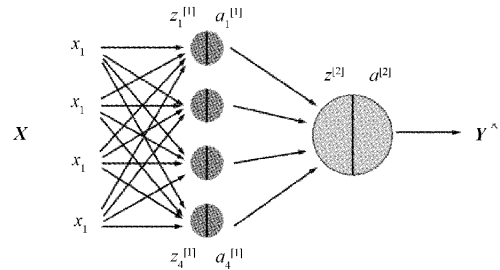


图 6 神经网络训练模型

基于均方误差定义损耗函数, 通过  $X$  输入不断计算每一层的  $z_j^{[k]}$  和  $a_j^{[k]}$ , 最后得到输出  $\hat{Y}$ , 根据它和真实值  $Y$  的差别来计算损失 (loss), 根据损失函数  $L(\hat{Y}, Y)$  来反算每一层的  $z_j^{[k]}$ 、 $a_j^{[k]}$  的偏导数 (梯度), 不断更新参数和深度学习进行模型训练。

$$loss = (1/n) \sum (\hat{y} - y)^2$$

### 2.3 水泵动态流控技术

数据中心采用液冷和风冷相结合的 IT 设备散热方案。其中液冷散热技术 (图 3), 每个液冷机柜上都配置有 CDU, 通过分支管路进水管对接液冷计算节点的进出水口, 进而连通液冷计算节点的内冷板管路, 实现液冷循环带走热量。其他如硬盘、接口卡等少量发热器件仍采用风冷散热系统, 但配合纵向涡发生器扰流强化技术, 提升换热系数。

冷板式液冷技术不需要昂贵的水冷机组, 在 60 L/min 的流量配置下, 能满足总功耗 45 kW 机柜的散热需求<sup>[15]</sup>, 但驱动水循环的水泵功耗约占非 IT 设备功耗的 65%, 成为控制  $PUE$  的关键。本文通过监控计算节点的运行负荷, 预测计算节点的负荷 (CPU 占用率), 将水泵流量控制

在最小的要求之内,从而可以控制水泵的功耗。根据传热计算分析,水泵流量与转速  $f$  成正比且为式(4)。

$$L = Q / (C \times \rho \times \Delta T) \quad (4)$$

其中,  $L$  为冷板散热水流量,单位为  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $Q$  为计算节点负荷,单位为  $\text{kW}$ ,  $\Delta T$  为进回水温差,单位为  $^\circ\text{C}$ ,  $\rho$  为密度,  $C$  为比热。即第  $n$  个时刻的水泵流量  $L_n$  正比于计算节点负荷  $Q_n$ 。

$$\overline{Q_n} = (1 - \alpha) \overline{Q_{n-1}} + \alpha \cdot Q_n \quad (5)$$

其中,  $\alpha$  为指数滑动平均参数,取调度周期自然整数倍的倒数。

### 3 结果与讨论

试点海上风电场位于中国南海,升压站距离陆地 36 km。场址面积约  $187 \text{ km}^2$ ,海水正常涨落潮平均高度  $\pm 3 \sim 5 \text{ m}$ ,场区水深  $20 \sim 40 \text{ m}$ ,水温维持  $25 \text{ }^\circ\text{C} \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$  区间。风电场规划装机容量  $1\,500\,000 \text{ kW}$ ,  $220 \text{ kV}$  升压站一共 3 层,每层平面面积  $1\,500 \text{ m}^2$ ,甲板净高约 7 m,最下层与海平面垂直距离 15 m。数据中心部署在一层,安装 3 个预制集装箱,设计功率容量为  $200 \text{ kW}$ ,内置 8 个  $25 \text{ kW}$  的高功率机柜。

采用本文二步能耗优化方案,通过 IT 与数据中心基础设施的联动智能寻优风扇电机转速和水泵电机转速优化了非 IT 设备的能耗,寻优 CPU 占用率对 CPU 频率做精细控制,在满足 SLA 等级的前提下实现数据中心总能耗的降低。本文假设服务器装机率为 70%,等效有 1 120 个标准功率的服务器。仿真表明,目标温差不超过 5% 情况下节省了 15.17% 的电力消耗。系统仿真结果如表 1 所示。

表 1 系统仿真结果

	风扇电机 转速	水泵电机 转速	CPU 占用率
均方误差(MSE)	100	150	1.71
预测绝对误差/%	3.1	2.5	1.4

#### 3.1 关键指标分析

##### 1) 能效指标 PUE

PUE 定义为数据中心使用的总能量与 IT 设备使用的能量之比,是衡量数据中心性能和效率的最重要指标之一。

$$PUE[-] = \frac{\text{Total Data Center Energy}}{\text{IT Equipment Energy}} = \frac{\text{IT Eq. Energy} + \text{Non-IT Eq. Energy}}{\text{IT Equipment Energy}} = 1 + \frac{\text{Non-IT Equipment Energy}}{\text{IT Equipment Energy}} = 1 + CLF + PLF + OLF \quad (6)$$

非 IT 设备能耗主要由水泵、空调、电力损耗和其他辅助设施构成,如式(6),其中  $CLF$  是制冷负载因子,  $PLF$  是电力负载因子,  $OLF$  是其他负载因子,各因子的计算值受

海水温度影响较大,下面逐一分析。

##### (1) 水泵能耗模型

根据式(7)先确定水泵流量,进而根据流量-扬程(Q-H)曲线和流量-功耗(Q-N)曲线查表获得水泵的扬程和功耗。

$$L = 0.86 \times \lambda \times Q / \Delta T \quad (7)$$

本文系统采用海水,密度  $\rho$  和比热  $C$  两个常量的乘积为 0.86;计算节点总负荷  $Q$  取值  $200 \text{ kW}$ ;进回水温差  $\Delta T$  取值  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。  $\lambda$  为工程经验冗余系数,通常取值  $1.1 \sim 1.2$ ,鉴于本方案涉及深海取水,为保证水泵有足够流量,取 1.2。

根据式(7)计算为水泵的流量为  $41.28 \text{ m}^3/\text{h}$ ,结合上海凯士比泵有限公司的海水潜水泵和二次循环泵的流量-扬程(Q-H)曲线<sup>[16]</sup>,确定水泵的扬程分别为 35、25 m,满足由设备水压降、管路阻力、空调末端装置阻力、调节阀阻力、过滤装置阻力、海上平台提升高度组成的水泵扬程要求。进而根据两种水泵的流量-功耗(Q-N)曲线<sup>[16]</sup>,确定海水潜水泵额定功率为  $7.6 \text{ kW}$ ,二次循环水泵额定功率为  $4.0 \text{ kW}$ 。

##### (2) 空调能耗模型

空调由电源电池模块散热系统和 IT 液冷模块组成。电源电池散热空调按照数据中心最大负载能耗不超过  $200 \text{ kW}$  为基线,根据电源效率 96.5% 测算电源电池散热需求约  $7 \text{ kW}$ 。

$$W = Q \times (1 - \eta) / EER \quad (8)$$

其中,  $W$  为空调功率,单位为  $\text{kW}$ ;  $Q$  为 IT 设备负荷,单位为  $\text{kW}$ ;  $\eta$  为 UPS 电源效率,取 96.5%;  $Q \times (1 - \eta)$  为电源电池散热制冷需求,单位为  $\text{kW}$ ;  $EER$  为空调能效比,采用高效的小型风冷型精密空调,选用直流变频涡旋式,整机全年平均能效在  $3.1 \sim 3.5$ <sup>[17]</sup>。

IT 液冷模块中 CPU 器件热负荷通过液冷冷板的方式带走,占比约 70%;非 CPU 器件热负荷通过液冷门冷却的方式带走,占比约 30%,采用液冷方式仅需考虑水泵能耗。根据 1982~2012 年研究区域夏季平均海表温度  $28.5 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[18]</sup>,上述制冷量充裕,送风温度始终低于 IT 设备能力  $1 \sim 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,无需额外增加空调补冷。

##### (3) 电力损耗模型

本项目电源系统负责数据中心内部 IT、空调、弱电等所有系统供电,满足连续制冷要求。电源满载运行工艺负荷  $230 \text{ kW}$ ,UPS 系统 2 N 架构设计,支持环保(ecological, ECO)模式,最高效率可达 99%。

本技术中 IT 设备由 8 个  $25 \text{ kW}$  机柜组成共  $200 \text{ kW}$ 。综上主要设备功耗分析以及其他辅助用电设备,项目总体工艺负荷如表 2。

本项目 PUE 计算主要采用 UPS 智能在线 ECO 模式,根据全年海水温度数据变化,PUE 设计值达到 1.067,详细测算如表 3。

##### 2) 水消耗指标 WUE

水使用效率(water usage effectiveness, WUE)定义为

表 2 项目总体工艺负荷表

设备	功率/kW
液冷 IT(含风扇)	200
CDU 循环	0.2
海水潜水泵	7.6
加药控制	0.2
二次循环泵	4
补水系统	0.2
风冷空调(电源电池模块)	4.0
补冷空调(液冷 IT 模块)	5.3
新风/排风	0.2
智能监控	0.2
消防配电	0.2
智能照明	0.1
配电损耗	7.8
合计	230

数据中心各系统(水循环、绝热塔、加湿、水驱动能源生产等)中的用水量与 IT 组件的能源消耗之间的比值。

$$WUE[\frac{l}{kWh}] = \frac{Data\ Center\ Water\ Consumption}{IT\ Equipment\ Energy} = WEF \times PUE \quad (9)$$

本技术中给排水系统完全利用海水循环,海水泵直取和自排,基本不存在水量消耗,不发生用水和排污等费用,仅需少量定期补水,极少水消耗,因此碳排放因子 WEF 和 WUE 近似为 0。

3)碳排放指标 CUE

碳使用效率(carbon usage effectiveness, CUE)定义为数据中心产生的二氧化碳排放量与 IT 设备能耗之间的比值,用于衡量污染物排放的程度。

$$CUE[\frac{kgCO_2}{kWh}] = \frac{Data\ Center\ Total\ CO_2\ Emission}{IT\ Equipment\ Energy} = CEF \times PUE \quad (10)$$

表 3 全年平均 PUE 计算

月份	月均 PUE	海水温/℃	IT 功耗/kWh	水泵功耗/kWh	空调功耗/kWh	电力损耗/kWh	其他功耗/kWh
1	1.066	20.2	148 800	6 473	1 302	1 566	471
2	1.067	20.8	134 400	5 846	1 302	1 415	426
3	1.067	23.9	148 800	6 473	1 389	1 567	471
4	1.067	27.0	144 000	6 264	1 476	1 517	456
5	1.068	29.2	148 800	6 473	1 649	1 569	472
6	1.069	30.1	144 000	6 264	1 736	1 520	457
7	1.069	30.0	148 800	6 473	1 736	1 570	472
8	1.069	29.9	148 800	6 473	1 736	1 570	472
9	1.069	29.6	144 000	6 264	1 649	1 519	457
10	1.067	28.1	148 800	6 473	1 389	1 567	471
11	1.066	25.0	144 000	6 264	1 337	1 516	456
12	1.066	21.0	148 800	6 473	1 302	1 566	471
汇总	—	—	1 752 000	76 212	18 002	18 462	5 554

本技术 100%使用风电可再生能源,碳排放因子 CEF 为 0,风电场发电量远大于数据中心用电量,仅在少数不适宜天气期间,会停止风力发电,采用应急柴油机发电或市电返送。因此,CUE 近似为 0。

3.2 与现有技术对比

为便于对比,以当前主流的钢筋混凝土+水冷技术数据中心、海底胶囊+液冷技术数据中心、海上平台+液冷技术中心为代表,在相同功率容量 4 MW 下,从建维成本、经济效益、运维难度、发展空间、政策支持等多个方面进行对比分析。

通过对比表 4 可以看到现有主流方案存在以下 3 个严重短板:

1)占用大量的建设用地。一个典型的 5 000 个机架的

大型数据中心,需要占用土地近 40 亩。

2)中心城市无法获取足够的光伏、风电、LNG 等清洁能源,碳排放指标取决于电网水平,水资源不平衡,PUE、CUE 和 WUE 往往很难同时达到目标。

3)单一工程无法系统性复用,基础设施造价昂贵。数据中心需要双路外市电、大型柴油机和 UPS 作为可靠动力系统,需要两路以上完全独立路由的传输系统和变电站供配电系统。这些系统多采用冗余设计,使用率低,建设和维护成本都极高。

本文提出的建设技术则有以下 3 个突出的优点:

1)“0”占地:不占用宝贵的土地资源,数据中心建设不用重复做用海审批、环境评估等;

2)“0”碳排:共享升压站变配电系统,采用两路风电直

供,无需单独引外市电即可实现双路供电,实现100%绿电;

3)“0”耗水:直接获取升压站平台下海水,近100%自然冷却下,实现零耗水下的超低PUE。

表4 3种主流数据中心建设技术对比

对比维度	钢筋混凝土+水冷技术	海底胶囊+液冷技术	海上平台+液冷技术
建造规模	5 kW×800	0.5 MW/舱×8	25 kW×160
CUE	0.5~0.75	0.5~0.75	0
PUE	1.301	1.076	1.067
WUE	2.5	0	0
建造成本/(万元/kW)	5~6	11~12	6.5~7.5
维护成本/(万元/年)	500.0	1 000	750
电费/(万元/年)	3 191	2 639	2 094
水费/(万元/年)	43.8	0	0
ROI/年	8	12	8
运维难度	运维方案成熟	定期打捞维护施工难度大	定期防腐涂层,施工难度小
发展空间	受政策影响限制,发展空间小	符合海洋发展战略,空间大	符合海洋发展战略,空间大
政策支持	用地审批难	单独用海审批对海床有要求存在不确定性	与海上风电场共同审批流程容易

注:表中电费按0.7元/kWh计,海上数据中心因就近采用绿电直供,电费为市场价的80%;水费按照5元/吨计。

### 3.3 投资效益分析

#### 1)TCO

$$TCO = CapEx + OpEx \quad (11)$$

总体拥有成本(total cost of ownership, TCO)是数据中心的总拥有成本,包含资本性支出(capital expenditure, CapEx)、运营性支出(operational expenditure, OpEx)。其中,CapEx主要指建设成本;OpEx包含维护成本、电费、水费,具体数据见表4,计算周期为10年。

海上数据中心因为复用了海上风电场的相当大部分基础设施,增加的投资主要来自液冷机柜、耐腐蚀、海水换热、智能控制、无人值守系统。

通过对比表4可以看到,海上数据中心方案CapEx总体比传统水冷数据中心高21%左右。海上数据中心由于采用全自然冷,PUE更低,且靠近风力发电厂,电费低于市场价,OpEx仅相当于传统数据中心的76%左右。以数据中心常规10年折旧生命周期计算,海上数据中心的TCO相当于传统数据中心的95%。

#### 2)ROI

$$ROI = CapEx / (Revenue - OpEx) \quad (12)$$

其中,Revenue为数据中心收益,等于单机柜出租收益乘以总机柜数,单机柜出租收益按2.4万/kW/年<sup>[19]</sup>估算。

投资回报率(return on investment, ROI)一般都比较低,ROI主要取决于机柜上架率、能源价格与能效指标、算力综合成本等影响因素。海上数据中心以VIP整机柜租赁和云服务商业模式相结合,实现算力与电力完美匹配,可以获得更高的基础设施利用率。

由表4可以看到海上数据中心投资回报周期约8年,与传统水冷数据中心持平,比海底胶囊数据中心12年要短。

## 4 结 论

本文充分复用大量海上风电的基础设施并引入AI技术实现了一种低建设成本、高经济效益、高能效、低碳排放和低水消耗的海上数据中心建设方法。该方法将新能源和新基建相结合,从方案设计、装配生产、交付调试、运维运营全过程共建共享,实现了1+1>2的综合效应。

基于该技术建设数据中心,再通过海上风电场提供的海底光缆网,将多个大中型数据中心组成资源池,就可以形成一个超大型数据中心,对外提供相当的计算能力。该技术可以规模化复制推广,解决了我国东部地区算力资源紧缺的问题,且能将风能有效转换为“算能”,缓解“弃风弃光”的问题。该技术符合我国的国情,是一项具有战略意义的集成创新工作。

在产业推广中,还应重视高温、高盐、高湿恶劣环境下的可靠性设计,提升建筑物使用寿命,重点解决防腐、无人值守等技术难题。

### 参考文献

- [1] 于施洋, 窦悦. 算力:新时代数字经济发展的新引擎[J]. 中国经贸导刊, 2019, 24:2.
- [2] 魏进武, 刘郑海. 面向“双碳”战略的通信网络实践[J]. 信息通信技术, 2022, 16(4):4-8.
- [3] 王月, 张一星, 李洁. 数据中心低碳发展分析与展望[J]. 通信世界, 2021, 15:3.

- [4] 李昆. 既有数据中心冷源系统节能改造与运行能效优化控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [5] 韩晓雷, 孙杨, 潘洪涛. 数据中心间接蒸发制冷技术应用探讨[J]. 通信电源技术, 2022, 39(4):3.
- [6] 李洁, 李孝众, 李典林, 等. 数据中心液冷服务器系统总体技术要求和测试方法: T/CCSA 269-2019[S]. 北京: 中国通信标准化协会, 2019.
- [7] 开放数据中心标准推进委员会. 液冷技术与应用发展白皮书: ODCC-0500H-2018[R/OL]. <http://www.renrendoc.com/paper/295062497.html>.
- [8] TRAN T T, BECK J C. Report: Google data center scheduling[R]. Toronto: University of Toronto, 2023.
- [9] 曹颖. 通信企业 IDC 机房节能减排的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [10] 王旻响. IDC 数据通信中心机房节能技术研究和设计应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [11] SIMON K. Project Natick-Microsoft's self-sufficient underwater datacenters[J]. IndraStra Global, 2018, 4(6): 4.
- [12] 小杉尚史, 高橋晋, 亀井清正. Underwater data center: JP20160159497[P]. 富士通株式会社, 2023.
- [13] WEE T H, KUMAR S. Modular floating data centre park: WO2019SG50453[P]. [2023-09-26].
- [14] MARTHA SYMKO D, JUAN T. Energy systems integration facility (ESIF) facility stewardship plan revision 2.1 [R]. National Renewable Energy Laboratory, 2018.
- [15] 郭亮, 谢丽娜, 盛凯, 等. 数据中心液冷服务器系统能源使用效率技术要求和测试方法: YD/T 3983-2021[S]. 中国通信标准化协会, 2022.
- [16] 吴飞, 崔彦枫, 李祥立, 等. 水泵性能曲线方程研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(10):4.
- [17] 华为技术有限公司. 精密空调压缩机技术列比白皮书[J]. UPS 应用, 2016(6):30-42.
- [18] 张雷, 任国玉, 宝乐尔其木格, 等. 基于卫星观测的南海表层温度气候学特征及长期变化[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(3): 189-197.
- [19] 中国数据中心工作组. 2021 年中国数据中心市场报告[R]. CDCC 第九届数据中心标准峰会, 2021.

### 作者简介

王丽莉, 高级工程师, 本科, 主要研究方向为移动通信、人工智能、数据中心。

E-mail: wanglili@hi.chinamobile.com

赵飞龙(通信作者), 正高级工程师, 博士, 主要研究方向为移动通信、大数据与人工智能、算力网络与数据中心。

E-mail: somethingnothing@163.com