

(一) 海南海底数据中心示范工程

1. 案例概述

为提升我国沿海地区“数字新基建”体系化支撑能力，提供工业互联网、云计算、人工智能等数字经济底层基础支撑，海南利用丰富的海洋资源解决数据中心高能耗的难题，开发建设全球首个商用海底数据中心，践行国家“双碳”和“陆海统筹”发展战略，助力“东数西算”及数字经济建设。

海底数据中心是一种绿色低碳的新型数据中心方案。为解决数据中心发展面临的能耗及资源挑战，业界持续进行探索。其中，海底数据中心以充分利用自然冷源，以及省电、省地、省水、低故障等优势，引起越来越多的关注。海底数据中心将服务器安装在密封的压力容器中，安放在海底，利用海水的流动、体量对服务器产生的热量进行散热，能够有效节约能源和资源。

海底数据中心方案得到国内外广泛关注。海底数据中心的探索最早开始于微软在 2014 年启动的“纳迪克”项目。其实践证明，依靠海水自然冷源，服务器能耗显著降低。同时，服务器在海底密闭惰性气体环境中工作，故障率仅为陆地的八分之一。实验结果证明，海南数据舱内运行的 IT 服务器网络效能属于互联网数据中心最高级别，可以承载对延时性、互通量要求最高的业务。

海底数据中心解决方案填补了我国在海洋工程与数据中心新基建融合发展领域的空白，整体技术水平与产业化能力处于国际前列。探索与海上风电等新能源结合方案，为绿色可持续发展提供技术保障。

海底数据中心示范应用，满足海南省国资企业云主机及社会各界媒体存储需求，推动海南当地企业数字化转型。



来源：深圳海兰云数据中心科技有限公司

图 1 海底数据中心概念图

海底数据中心项目结合陆地数据中心成熟的机房技术与前沿的海工水下工程技术，并基于应用环境进行技术创新应用，实现以水下电力变压及分配技术、水下暖通环境控制技术、水下智能仪控技术为核心的全新海底数据中心解决方案，数据服务器通过在海底的数据舱实现了与外界是完全隔离，舱内的低温惰性气体密闭环境为客户的数据机房带来比陆地数据中心更稳定的工作运行环境，减少了电气设备因氧化、人为干扰、虫鼠害影响带来的故障概率。

同时，通过采用安全可靠的可重复上浮维护或通过船用吊机回收上甲板进行维护等多种海工方案，实现了海底数据中心在应急情况下所需的人工介入方式，相关工程技术方案合理可行。海底钢结构基础和舱体设计寿命高达 25 年以上，且在多个数据机房的生命周期内可

以进行回收再部署、重复使用，提升了数据中心的经济效益。

海底数据中心系统基于海岸和海底，由岸站、海底高压复合缆、海底分电站、海底数据舱四个部分组成。海底数据中心可以模块化部署，具备按需扩展能力。

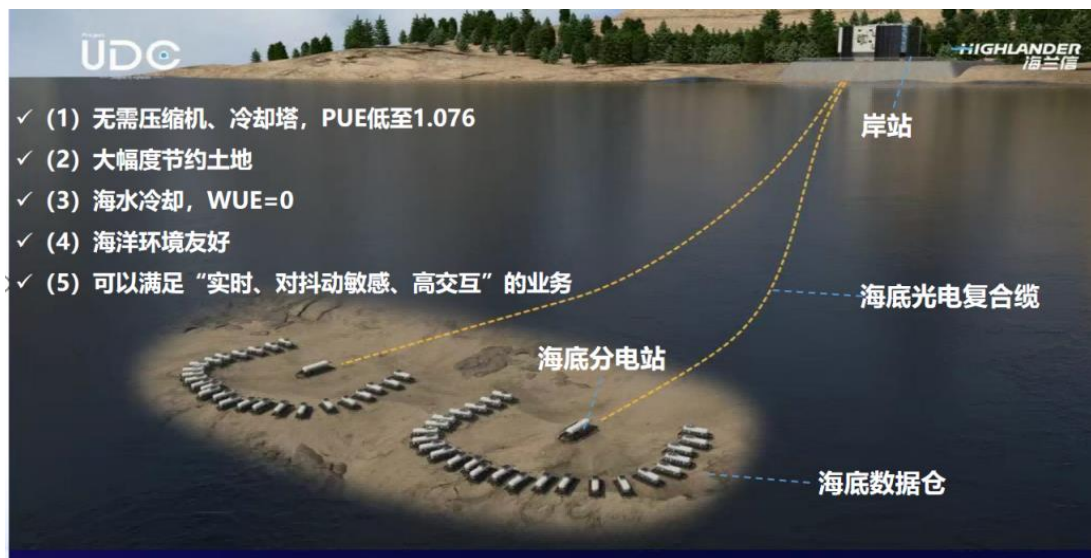


图 2 海底数据中心解决方案概念图

岸站基地为整个项目的岸上区域，主要包括高压配电系统、柴油发电机组、岸上监控中心（RCC）等主要功能区。岸站具备占地面积小、预制化建造、模块化部署等特点，还可与风力发电、海洋大数据平台等其他业务形态集约发展。

海底分电站与数据舱为圆柱形罐体，采用海工成熟技术，保证舱内恒湿、恒压、无氧的安全密闭环境。满足使用海域环境下 25 年使用寿命要求，可重复开启。冷却系统、传感器、海缆等关键元器件实现穿舱密封。本体与基础之间的连接设计便于锁定和解锁，满足定期回收设备要求。

配电系统按国标 A 级标准, 提供双路市电+UPS 供电; 满足海底、海岸全链路“2N”供电系统需求; IT 舱与电力舱分离, 空间利用率高,

系统安全可靠。

冷却系统利用海水作为冷源，全年实现数据舱自然冷却。不使用压缩机，末端采用背板机柜级冷却，没有冷热通道的高风机能耗，机房没有局部热点出现。总体能效较传统 IDC 提升 40%—60%。

监控系统能完成对各个部件子系统的完整监控，所有数据实时汇聚到岸站的 UDCM 平台做实时“监、管、控”。UDCM 系统基于数字孪生技术，可实现所见即所得的海底舱 3D 全景运维。

系统维护提供吊机回收、上浮式等多种解决方案。方案采用成熟海工技术，可在不断电、不断网、不中断业务的情况下开展海上维修作业，舱外部件可水下更换。

在数字经济新基建的背景下，作为基础设施的数据中心在持续快速增长的同时，也面临着高能耗的挑战。2021 年全国数据中心能源消耗达 2166 亿千瓦时，较 2020 年增加 44%，占全社会用电量的 2.6%。其中制冷设备耗电约占数据中心总耗电量的 30—40%，急需有效解决方案来提升制冷散热效率，降低冷却系统能耗。

作为全新的系统解决方案，海底数据中心通过技术创新、方案创新、应用创新，促进了海洋领域与数据中心关键核心技术新突破。海底数据中心采用创新的海水无动力散热技术，实现低能耗制冷，有效解决现有数据中心高能耗问题。整个散热设计无动力驱动，将热管原理应用在水下数据舱，利用管路的高度差创造重力条件，冷媒把舱内的高温带出来通过冷凝器和海水进行热交换，靠舱内设备导致的温升和海水之间的温差驱动冷媒循环散热。

本方案将服务器产生的热量传导向蒸发器，流经蒸发器的冷却介质吸热升温。管路中的液体冷却介质通过相变作用，变成气态冷却介质。冷凝器设置在水环境中，相比于蒸发器中的冷却介质温度，冷凝器中的冷却介质温度更低，在温差的作用下，蒸发器中的气态冷却介质会朝向冷凝器中流动。当带有热量的气态冷却介质处于冷凝器中时，被周边冷的水体所冷却，实现降温，进而始终保持温差的存在。此时气态冷却介质通过相变作用变成液态冷却介质。蒸发器与冷凝器的布置高度不同，冷凝器中的液态冷却介质在重力的作用下自然下落回流到蒸发器侧。服务器产生的热量传导向蒸发器，流经蒸发器的液体冷却介质吸热升温，通过相变作用变成气态冷却介质。如此反复，实现整个冷却系统中的冷却介质的无动力循环流动。相比于现有技术中的冷却系统，本技术方案不需要设置动力泵和冷却塔等装置，节省了相关的制造与维护成本。

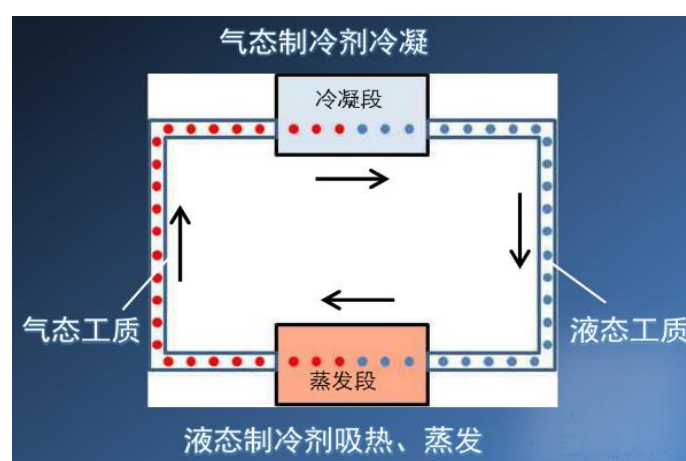


图 3 冷媒循环管路系统示意图

海底数据中心利用广袤海水做冷源，对服务器等 IT 设备产生的热量进行无动力散热，有效节约电力能源。清华大学传热与能源利用北京重点实验室出具的海底数据中心能效测试报告表明，利用本冷却

技术的海底数据中心电能利用效率 PUE 值低至 1.076。

除了海水无动力散热技术外，海底数据中心科研团队还创新研发了基于复杂海况的可靠性设计、立体化综合管理系统、全链路微结点智控技术、可拓展的模块化建设方案、水下高可用配电技术、与海上新能源结合的立体化用海方式、包括上浮式在内的多种运维方案等。

2. 应用场景

海底数据中心示范项目位于海南省。海南作为热带岛屿，其区域内数据中心发展长期存在能源短缺、淡水和土地有限、高温高湿气候环境、台风高发的问题，同时未来自贸岛对数据中心的需求难于估量。在海南岛这类热带沿海地区，海底数据中心的价值特征将更加凸显。海域选址在海南岛东岸琼东上升流影响海域内，满足海底数据中心对低温海水的建设需要。

海南海底数据中心项目分三期进行。第一期为示范工程项目（2021-2022），建设并布放海底数据中心 5-6 个舱，海底分电站 1 个，建设岸站基地 1 座（包含动力中心、运营中心、测试中心及科研配套园区等设施），铺设光电复合海缆 2 条。第二期为规模化开发项目（2023-2024），将完成合计 50 个舱及岸站整体的建设；第三期为商业化推广开发项目（2025-），将完成合计 100 个舱的建设。

场景：海底数据中心海南示范项目

依靠算力高、时延低、省电省水、故障率低等优势，海底数据中心适宜于政府、科研、互联网、电信等多类用户需求。面向政务云、超算中心、人工智能等应用场景，海底数据中心可以提供高算力、安

全可靠的服务。面向网络游戏、视频交互、电商平台、社交网络等应用场景，海底数据中心可以满足其注重时延、低碳发展的需求。

海底数据中心海南示范项目产业化应用稳步推进。该项目一期客户包括海南电信、商汤科技、光环新网和 ATLAS（新加坡）公司，分别代表电信运营商、人工智能、第三方数据中心运营商、WEB3.0 等不同应用场景。二期将重点开拓头部互联网和超算客户。长期来看，海南自贸岛封关后，海南将迎来大量的离岸数据中心需求。基于示范项目落地，海底数据中心有望不断拓展，向珠三角、长三角、福建、山东等沿海发达地区延伸，逐步建立起以海底数据中心为核心的综合性海洋新技术产业园。

在数字经济时代，算力成为一种新的生产力，广泛融合到经济与社会方方面面，为各行各业的数字化转型提供基础动力。作为算力的物理承载，数据中心成为数字经济的关键基础设施。然而，传统数据中心在快速发展的同时，面临着能耗、土地、水资源等多方面挑战。

第一，数据中心具有高能耗特征。由于需要大量电力维持服务器、存储设备、冷却系统等基础设施运行，数据中心能耗较高。据测算，电力成本占数据中心运营总成本的 60%-70%。2021 年，全国数据中心能源消耗达 2166 亿千瓦时，较 2020 年增加 44%，占全社会用电量的 2.6%。因此，数据中心的节能减排成为我国实现双碳目标的重要任务。

第二，数据中心运行对水资源的需求高。数据中心的设备十分精密，通常采用的水冷却，必须使用淡水。据统计，数据中心若采用水冷却空调，一座数据中心每天就要用掉数以百万加仑（1 加仑约合 3.8

升) 的水, 用来冷却因运转而发热的设备。如此大的体量, 对于水资源相对匮乏的我国来说, 在水资源利用率上是一项严重挑战。

依靠海水自然冷源、无氧、无尘、模块化部署等条件, 海底数据中心在能耗、土地、水资源、故障率、交付周期等方面较陆地数据中心有着独特的优势。根据清华大学传热与能源利用北京重点实验室出具的能效测试报告, 海底数据中心的单舱 PUE 值为 1.076。这一指标保证了海底数据中心节能降耗, 在其生命周期内具备比陆地数据中心更好的经济优势。由于海底数据中心散热不需要消耗水, 运营过程中每年每个机柜可以节约 200 立方米的水资源。海底数据中心通过工程预制实现了快速部署, 建设由“工地”迁移到“工厂”, 具备了工业化的本质, 可实现一体化交付, 规模化运维。我国东部地区具有临海的区位优势, 集聚了全国超过 45%的人口和近 60%的 GDP。对于上海、深圳这一类沿海超大城市, 海底数据中心的价值特点尤为突出。



图 4 海底数据中心实施成效

海底数据中心的实施成效主要体现在以下方面: 第一, 经过前期的测试试验验证, 证明了海底数据中心在节能、省地、省水、低时延、高可靠以及模块化生产交付、可快速部署等方面优势明显。第二, 环

境影响符合环保要求。根据青岛环海海洋工程勘察研究院出具的《海底数据中心项目海洋生态环境影响评估报告》。项目运营期对环境的影响主要为温排水温升、取排水卷载、牺牲阳极溶出。各类环境影响极小，符合环保要求。第三，与陆上 IDC 网络传输性能一致，根据中国信息通信院出具的与岸基的私有网络的检测报告，项目千兆端口带宽为 939Mbps，抖动在 0.001ms-0.004ms 之间，单向平均时延在 1.002ms-1, 671ms 之间，平均丢包率在 0-0.0015%之间。基于以上结果，并根据 YD/T1171，在 UDC 环境下网络实测结果可满足类别 0 也就是“实时、对抖动敏感、高交互”业务的 QoS 要求。第四，极低 PUE 赛道内，综合成本比液冷低 30%，同时服务器也可以使用常规中高密度服务器，冷却直接使用热管海水冷却交换，免除了全套液冷设备。第五，海底数据中心高度模块化，单舱部署灵活可靠，周期最短可达 3 个月。

海南海底数据中心示范工程项目具有良好的经济效益和社会效益。该项目的实施，为当地提供众多创业、就业机会，促进当地经济和谐发展；还可带动互联网企业在区域内的落地，促进当地信息技术、互联网经济的可持续发展，有利于上下游产业链延伸。

海底数据中心是海洋经济和数字经济的融合创新，不仅为数字经济发展提供底层基础，促进海南自贸港“跨境数据安全有序流动”政策落地和“智慧海南”建设，也拉动数据中心关键技术与系统研制工作，促进高端数据中心工程设备、高端海洋工程装备、海洋电子信息设备、海洋环境及海洋经济活动的交叉融合，与海南数字经济、海洋

产业发展规划高度契合，代表了相关领域与行业的发展方向。

通过技术攻关与装备研制所形成的产品成果，将大幅提升以数据中心和海洋工程装备领域的技术先进水平与经济效益。实现批量化生产与应用后，能够进一步降低项目建设成本，不断拓展海底数据中与其他海洋经济活动融合功能，与海上风电、波浪能等清洁能源结合，以集约用海方式实现海洋资源的充分开发。海底数据中心中水下电力系统、暖通系统、监控系统、环境感知系统、海洋工程结构的示范性应用，有助于推动构建海南高端海洋产业及海洋电子信息产业发展新格局。

在国家“双碳”背景下，海底数据中心为数字经济发展的底层基础提供了绿色低碳的技术路径，符合数字经济未来发展方向。数据中心项目，吸引数字经济、海洋科技领军企业共同建设和开发，形成完整的产业链，充分挖掘海底数据中心的基础技术、应用技术、商业价值和社会价值，为海南贡献 GDP、税收并吸引高层次人才。以技术创新和模式创新打造样板工程和生态，未来以海南为基点和起点，辐射全国沿海城市并力争向“一带一路”沿岸国家推广。

海底数据中心项目采取企业与社会融资模式建设。本项目完成后将面向以人工智能为代表的高新技术企业、大型互联网及云服务供应商、中外金融机构、电信及 IT 服务提供商、大型私营企业和跨国公司提供数据中心租赁、宽带租赁、算力云服务等多种服务模式。服务客户将主要聚焦城市边缘计算客户，适宜于高交互、低时延、单机柜功率要求较高方向，如超算、AI、云服务、工业互联网（制造）、金融、

游戏、医疗、视频、媒体等。

海南海底数据中心项目整体计划建造 100 个数据舱，项目总投资 56 亿元，项目建设分三期完成。项目全投资财务净现值及资本金财务净现值 NPV 均大于零，说明该项目动态收益率超过了该行业应达到的最低收益水平。全投资内部收益率 IRR 大于行业基准收益率，说明该项目的动态收益是可行的。

社会效益方面，《中共中央、国务院关于构建更加完善的要素市场化配置体制机制的意见》中明确将数据作为新时代重要的生产要素。数据中心作为数据的存储、计算的基础设施，属于新基建的范畴，是数字经济发展的基石。本项目以建设海底数据中心项目为契机，联合行业领军企业，联动数字经济、海洋科技等产业，构建基于海底数据中心项目的产业聚集，将产生以下社会效益。

第一，响应国家东数西算及双碳政策要求。作为全球首个商用海底数据中心，本项目凭借自身极低 PUE、低延时、高可靠性、多能互补、环境友好的特点，发展沿海城市极低 PUE 数据中心，将助力国内数据中心产业绿色发展。本项目以海水为冷源解决数据中心冷却高能耗问题，创新探索出绿色低碳、陆海统筹、节省资源的新型数据中心。该项目研发了是国内首家的海底数据中心整体解决方案，技术全球领先，有效解决陆上 IDC 土地及淡水资源紧张、能耗高、安全可靠偏低等问题。

第二，提供新型绿色低碳数据中心建设的技术路径和解决方案，有效节约了电、水、地等资源。海底数据中心将服务器安装在密封的

压力容器中，安放在海底；用海底复合缆供电、并将数据回传至互联网；利用海水的流速、体量对服务器产生的热量进行散热，有效地节约了能源和其他资源。海底数据中心没有冷却塔，运营过程中每年每个机柜可以节约 200 立方米的水资源。海底数据中心对海洋的使用不是排他性的，用于布放海底数据中心的海域既可以包容海洋牧场、渔业网箱等生态类活动，又可以与海上风电、海上石油平台等工业类活动互相服务。海底数据中心的这些特性是生态用海、集约用海的最好体现。

第三，助力海南数字产业发展及海南国际数据港的建设。海底数据中心作为智慧海南信息化建设的平台载体，搭载面向海南企业的国资云、公有云业务，可以助力提升企业信息化管理效率，提高企业经营决策水平和效率，推动技术创新，激发商业模式创新，不断催生新业态，给企业、行业领域带来价值，提升企业信息化管理效率，助力海南自贸港新型基础设施建设和数据安全自由流动。海底数据中心有利于促进当地传统 IDC 产业结构优化。本项目将在科学研究、资源调配、生产、销售、仓储、物流运输等环节实现信息集成，有利于促进当地产业升级，提升产业核心竞争力。

第四，促进立体用海，开拓海洋经济新空间。将数据中心建设在海底，可以有效利用海洋资源，促进海洋经济立体创新。在布放海底数据中心的海域，还可以发展海洋牧场、海上新能源、海洋监测网海洋旅游等产业。联合开发将大大降低综合成本，实现多重效益。海底数据中心和海上大型工业整合，可形成大型工业体系数字化孪生，建

设海上大型工业物联网。海底数据中心充分利用波浪能、潮汐能、海上风能等海洋可再生能源，可实现多能互补、循环利用。

第五，海底数据中心将为沿海地区居民提供更好的数字经济服务，促进就业与收入提升。海底数据中心的服务器可靠性高，有利于保证整个网络的高效率、稳定性和完整性。海底数据中心为当地带来更多的就业机会，安置待业人员。项目建设期间需要大量的建筑、施工工人，项目单位的管理、运营也需要招聘员工，本项目实施后将能够直接或间接增加当前就业岗位。项目运营后，年均上缴税金规模可观，在增加当地税收方面发挥着积极作用。

3. 案例总结

创新数据中心部署方式，探索海底数据中心绿色安全运行。海底数据中心一是采用海水无动力散热技术，实现低能耗制冷，有效降低数据中心运行能耗。二是创新全链路微结点自控技术，满足水下数据中心的少维护免维护需求。三是采用模块化高可用配电技术，满足海底数据中心空间受限、快速部署的要求。四是综合运用近岸雷达系统、无人船系统、水下监测技术等，满足水下数据中心日常运维和安全保障等需求，实现陆上、水下、海底综合监控及运维。