



自动化集装箱码头 数字基础设施设计与实现

陆志勇, 丁飞虎

(中交第三航务工程勘察设计有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对自动化集装箱码头数字基础设施设计标准缺失及研究不足的问题, 采用工程案例分析法, 系统总结数据中心、5G专网及F5G光网络的设计原则与实施策略。研究得出, 数据中心应遵循安全、可靠、绿色、节能原则, 5G专网需满足高可靠性要求以保障自动驾驶等关键应用, F5G光网络需满足高带宽与稳定性需求。提出的设计方案和原则可为智慧港口建设提供理论支持和技术指导, 为推动港口行业数字化转型提供参考。

关键词: 智慧港口; 集装箱码头; 数据中心; 5G专网; F5G光网络

中图分类号: U656.1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0215-07

Design and implementation of digital infrastructure for automated container terminals

LU Zhiyong, DING Feihu

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: In response to the lack of design standards and insufficient research on digital infrastructure for automated container terminals, this study adopts an engineering case analysis method to systematically summarize the design principles and implementation strategies of data centers, 5G private networks, and F5G optical networks. It is concluded that data centers should follow the principles of safety, reliability, greenness and energy efficiency. 5G private networks need to meet high reliability requirements to ensure key applications such as autonomous driving, while F5G optical networks need to meet high bandwidth and stability requirements. The design scheme and principles proposed in this article can provide theoretical support and technical guidance for the construction of smart ports, which is of great significance for promoting the digital transformation of the port industry.

Keywords: smart port; container terminal; data center; 5G private network; F5G optical network

根据国家相关部委关于新基建、数字化、大数据、自动化及智能化等新技术应用的要求, 新建码头均应按照智慧港口的标准进行建设, 统筹规划、分步实施智能化系统和基础设施^[1]。为实现上述要求, 新兴通信技术以及港口的计算、存储能力成为港口的关键数字基础设施, 包括数据中心、5G专网及F5G光网络。数据中心提供高性能计算、存储能力; 5G技术在港口行业主要应用

于自动化水平运输设备的自动驾驶通信、卫星惯导定位通信和自动化水平运输设备、大型装卸设备的远程操控等; F5G光网络作为新一代固定网络技术, 相比以太全光网络具有用户端口级带宽保障、更高的可靠性和稳定性等优点, 适合于日益增长的码头通信需求。

随着全球港口业的快速发展, 自动化集装箱码头的数字基础设施建设已成为提升码头运营效

收稿日期: 2024-09-27

作者简介: 陆志勇 (1985—), 男, 高级工程师, 从事港口工程自动化、智能化系统设计、研发、集成工作。

率和智能化水平的关键之一。本文重点研究当前自动化集装箱码头数字基础设施的设计和实施方案，特别关注数据中心、5G专网和F5G光网络的集成应用；通过分析国内外相关研究和实践案例，提出一套符合智慧港口建设要求的设计及实施方案，包含数据中心设计方案、5G技术在港口自动化中的应用方案和F5G光网络在满足码头通信需求中的应用方案，以期为新一代自动化码头和智慧港口的建设提供理论支持和实践指导，推动整个港口行业的数字化转型。

1 数据中心设计

1.1 架构设计

按照相关国家、行业、地方标准规范建设“安全、可靠、绿色、高效、智能”的数据中心，应建设2个互为灾备的数据中心，并按照B级、双活标准建设，以确保业务连续性和数据安全性，为生产管理系统、设备管理系统、远程控制系统、辅助系统、数据存储与备份等提供电子信息设备的运行环境。双活数据中心架构见图1。

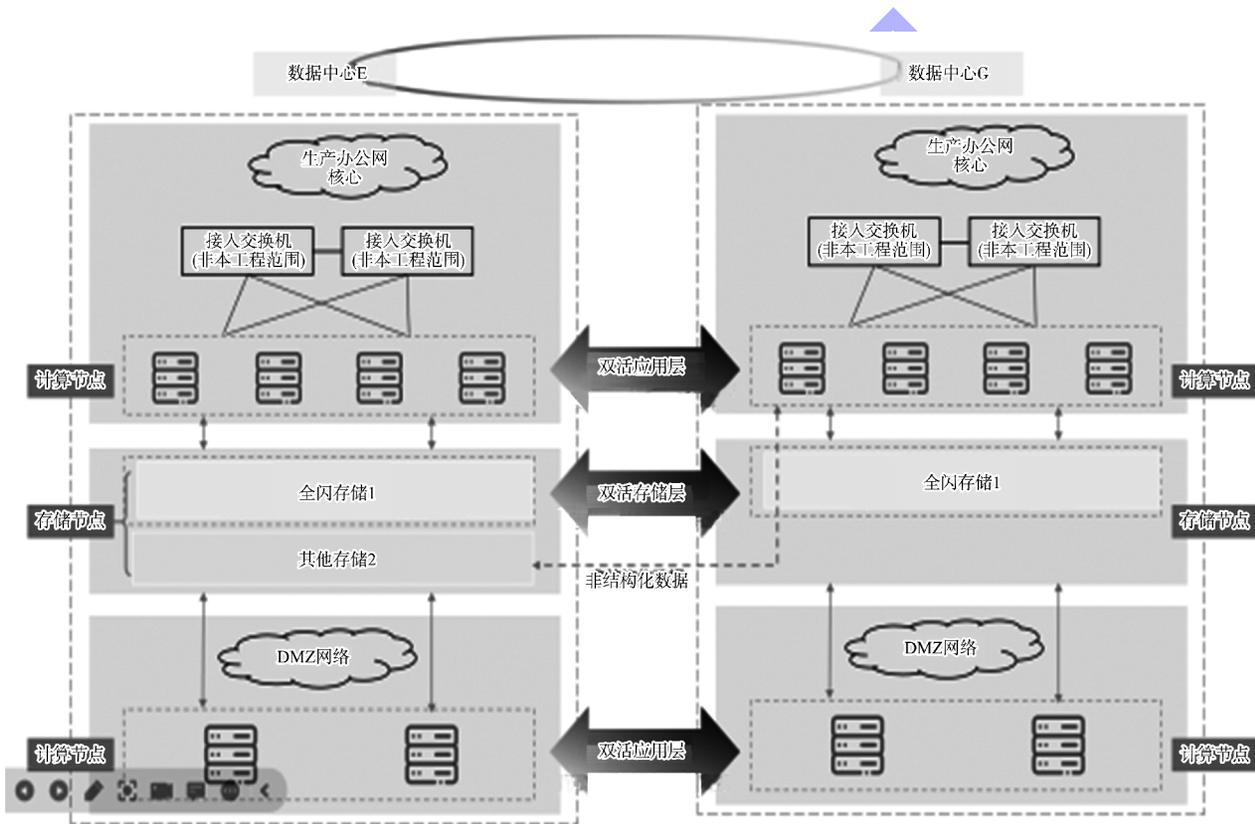


图1 双活数据中心架构

Fig. 1 Dual-active data center architecture

1.2 机房工程

机房工程设计应考虑多种安全因素，包括火灾、电力故障、通信故障等，以确保数据中心的稳定运行。所有材料均应选用非燃或难燃材料，以满足防火规范要求，并采取有效措施防止火灾、电力故障、通信故障、漏水、雷击、非法入侵、电磁干扰等造成的安全事故^[2]。机房工程包括机

房装修、监控中心、微模块、精密空调、配电系统、模块化机柜、新风系统、防雷接地、火警与消防、安防系统、监控与运维系统。新建数据中心的能源效率(power usage effectiveness, PUE)指标不宜大于1.4。

机房工程建设要求：1) 机房装修所有材料必须选用非燃或难燃，具有良好的气密性、隔热性，

不起尘、易清洁, 在温、湿度变化作用下变形小, 抗静电、绿色环保、无异味的材料^[3]; 2) 室内装修设计选用材料的燃烧性能应符合现行国家标准 GB 50222—2017《建筑内部装修设计防火规范》的有关规定^[4]; 3) 机房采用先进的管理手段, 保证安全、可靠运行的同时尽可能降低能源消耗和运行成本, 主机房和辅助区域的温度、露点温度和相对湿度均须符合电子信息设备的使用标准^[5]。

1.3 服务器及存储系统

服务器和存储系统的设计应采用虚拟化技术, 实现计算资源的均匀分布和存储双活, 以提高系统的可靠性和业务连续性。服务器及存储系统主要为3类应用提供计算服务资源, 根据网络规划分别部署于生产办公网、视频安防网、非军事化区 (demilitarized zone, DMZ) 内。系统架构见图2。

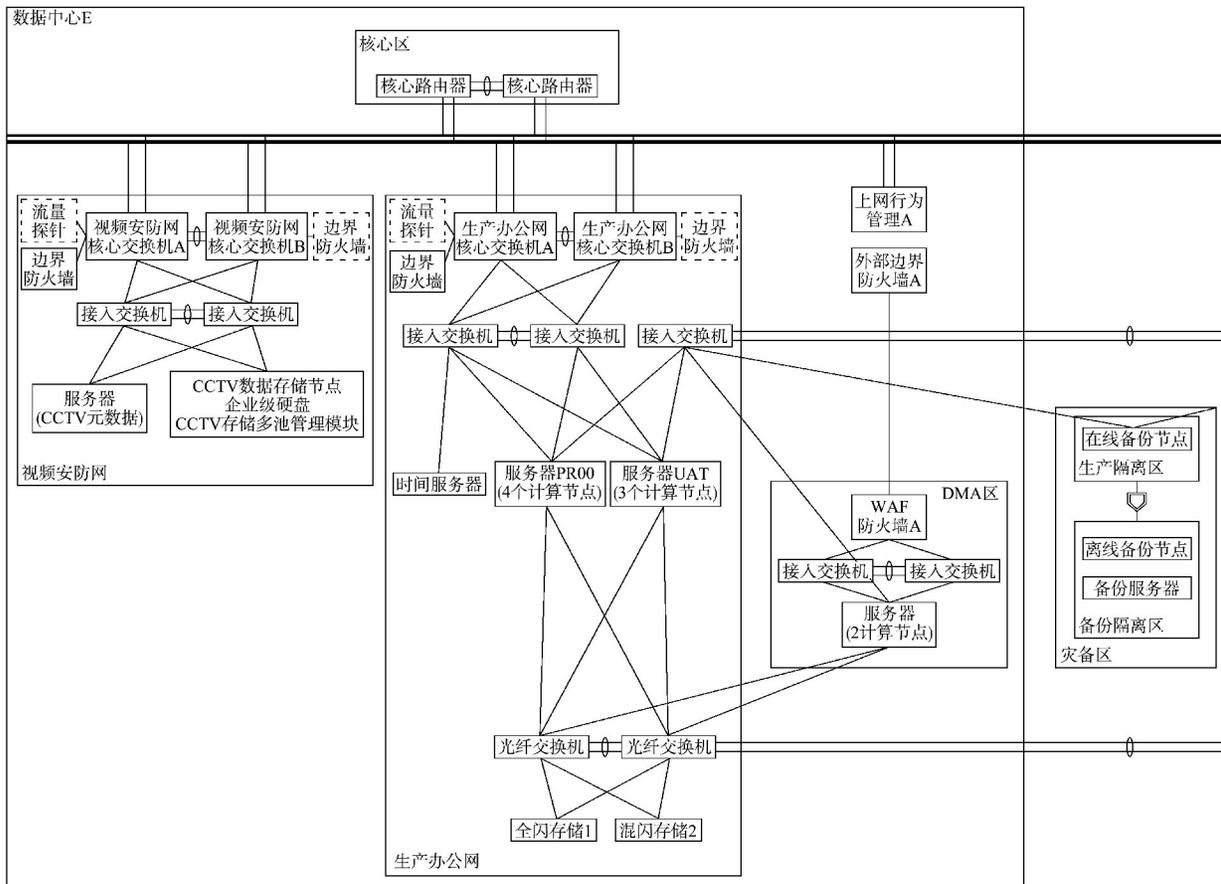


图2 系统架构

Fig. 2 System architecture

1.3.1 系统设计

1) 计算资源虚拟化, 将计算资源均匀分布到2个数据中心, 防止单个数据中心出现故障而导致业务中断, 从而实现服务器系统持续运行, 保证业务的连续性^[6]。

2) 存储双活, 存储设备支持在2个数据中心同时写入数据, 通过将底层磁盘阵列进行统一管理, 避免单个数据中心故障导致整个系统瘫痪。

3) 需拟机支持主流操作系统, 支持主流应用集群技术和容器解决方案。

4) 在虚拟化环境中实现软件定义的高可用^[7]。物理服务器出现故障, 可在具备容量的其他服务器节点上自动重启受影响的虚拟机^[8]。

1.3.2 服务器设计

1) 生产环境服务器。物理设备布置于生产办公网, 用于为生产办公、辅助系统、网络运维等

各类应用提供部署和运行环境。每个数据中心部署1套虚拟化服务器环境，按需配置中央处理器(central processing unit, CPU)、固态硬盘、配置磁盘阵列卡。

2) 测试环境服务器。物理设备布置于生产办公网，为测试环境各类业务应用提供部署和运行环境。

3) DMZ服务器。物理设备布置于DMZ，每个数据中心部署1套虚拟化服务器环境。

4) 时钟服务器。使用物理服务器部署时钟同步应用软件。

5) 全闪存储设备。用于结构化数据存储，双数据中心各部署1台存储设备，形成双活。

6) 混闪存储设备。用于非结构化数据存储。

7) 虚拟化集中管理与运维平台。实现2套虚

拟化平台、1套超融合平台的集中管理和硬件监控。

8) 光纤交换机及光模块。用于连接服务器和存储。

2 5G 专网设计

2.1 系统架构设计

5G 专网的高可靠性可确保港口中自动化水平运输设备的自动驾驶通信、卫星惯导定位通信和自动化水平运输设备、大型装卸设备的远程操控等应用安全、稳定运行。本文结合深圳港盐田港区某码头工程，从5G系统架构和业务需求两方面展开研究，分析自动化集装箱码头5G组网方案。

5G系统应包含核心网、承载网、无线网和接入终端侧建设，系统架构见图3。

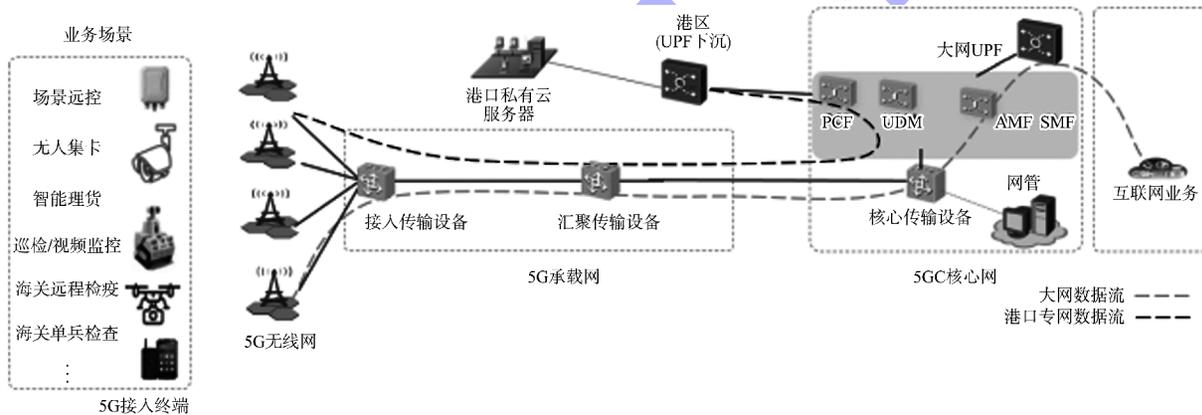


图3 5G系统架构
Fig.3 5G system architecture

2.2 业务需求分析

2.2.1 性能需求

为应对港口基于车路协同的自动驾驶系统以及港口自动化水平运输设备出现严重异常行为(车

辆异常加速、爆胎、冲撞电子围栏等)，需要在智能车管平台进行远程接管，通过摄像头查看周边环境，进行故障判断，远程操作自动化水平运输设备退出故障区^[9]，对5G网络的需求见表1。

表1 5G网络需求
Tab.1 Requirements for 5G network

业务名称	整体需求描述	带宽/(Mb·s ⁻¹)	传输时延/ms	可靠性/%	小区切换时延/ms
车辆远程控制	低时延、大带宽	≥80	≤30	≥99.99	-
车辆自动驾驶(控制部分)	低时延	0.05~0.10	≤30	≥99.99	≤100
车辆自动驾驶(视频部分)	大带宽	10~20	≤100	≥99.99	≤200
大型装卸设备远程控制(控制部分)	低时延、高可靠、大带宽	0.05~0.10	≤15	≥99.999	-
大型装卸设备远程控制(视频部分)	低时延、高可靠、大带宽	30~200	≤15	≥99.9	-
监控视频	大带宽、多并发	2~4	≤100	≥90	-

2.2.2 操作需求

1) 泊位的操作要求。每个泊位后方不少于28台无人智能集卡(autonomous intelligent truck, AIT)同时运行, 每个泊位区域仅考虑同时1台AIT故障需远程接管。

2) 重箱堆场的操作要求。重箱堆场箱区道路每200m需满足不少于5台AIT同时运行的业务需求。每个重箱堆场区域仅考虑同时1台AIT故障需远程接管。

3) 空箱堆场的操作要求。整个空箱堆场区域不少于25台AIT同时运行。

2.2.3 功能需求

1) 应满足自动化水平运输设备控制信号和视频信号区分优先级分别通过不同客户前置终端设备(customer premise equipment, CPE)传输。

2) 应满足多台自动化水平运输设备同时故障需远程接管的需求。

3) 港口数据不出港区。

4) 多接入边缘计算(multi-access edge computing, MEC)系统下沉到港区部署。

5) 核心网应具备与大网断链时的应急接入能力^[10]。

2.3 5G组网方案

2.3.1 5G核心网组网

在5G网络中部署双重核心网, 实现核心网的

冗余备份。港口内部2个数据中心各部署1台用户面功能(user plane function, UPF)设备, 2台UPF设备采用热备级容灾架构组网。

核心网设计应遵循MEC下沉到港区部署原则, 核心网包含用户面UPF设备和5G核心网, 其中用户面UPF下沉部署至港区数据中心, 保障港口数据不出港区。控制面核心提供用户接入管理功能, 当与运营商大网光缆中断的情况下, UPF应急核心网控制面可实现惯性运行, 港区网络具备容灾能力。

2.3.2 5G承载网组网

有源天线单元(active antenna unit, AAU)和室内基带处理单元(building baseband unit, BBU)采用板间热备份环形组网+板间负荷分担组网。基站可配置多块基带单板, 实现基带板间冗余备份。

2.3.3 5G无线网组网

根据自动化水平运输设备数量及其对应的单台设备带宽需求模型, 可以测算港区网络吞吐量的需求。

1) 无线网络总体组网结构。BBU集中堆放在客户机房, AAU装在基站塔侧, 塔底放置室外电源柜、室外交流配电箱, 通过室外光缆连接BBU和AAU设备。

2) 终端侧组网。根据业务需求, 1台大型装卸设备和自动化水平运输设备配置1台路由+2台CPE以实现双发选收, 其实现原理见图4。

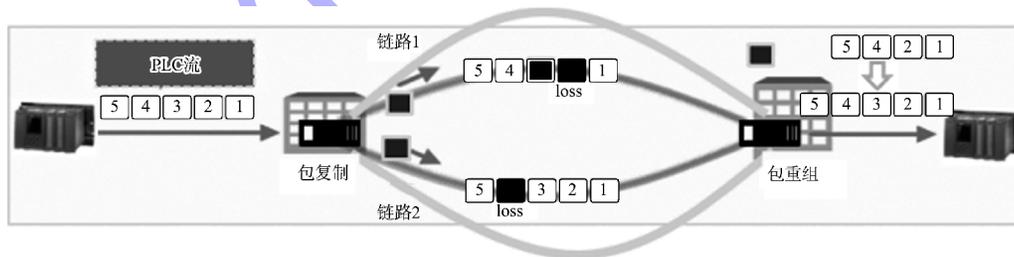


图4 双发选收实现原理

Fig. 4 Implementation principle of dual-transmission and selective-reception

3 F5G光网络系统设计

3.1 F5G光网络系统的特点

F5G光网络采用点到多点架构, 由光线路终端(optical line terminal, OLT)、无源光分配网络(optical distribution network, ODN)和光网络单元(optical network unit, ONU)构成^[11]。其无源分光技

术使得ODN不需供电, 并通过动态带宽保证技术确保每个ONU都能达到无源光网络(passive optical network, PON)端口的最大带宽。

3.2 F5G光网络系统需求分析

码头全光网系统主要包括核心交换区和全光接入网。根据自动化集装箱码头业务类型, 全光

接入网分为工业控制网、生产办公网、视频安防网等。

3.3 全光网系统设计原则

F5G 光网络在接入端设计方面与以太网存在较大差异, F5G 全光接入端在借鉴以太全光网已有标准的基础上需根据自身特点进行创新。

1) 考虑各子网隔离要求, 工业控制网、生产办公网、视频安防网各子网接入端网络设备需独立建设、不共用。

2) F5G 全光工业控制网络应采用冗余架构, 保护方式应为 TYPE-C 双归属保护。

3) F5G 全光生产办公网应采用极简 2 层架构部署, 采用 TYPE-B 双归属保护。其中智能理货和智能闸口业务推荐采用 TYPE-C 双归属保护。

4) F5G 全光视频安防网应采用极简 2 层架构部署, 采用 TYPE B 双归属保护。

5) 终端侧 ONU 接入各类终端设备, 建议根据终端设备数量等情况选择 4、8、24 口 ONU。ONU 选型需考虑部分终端对 POE 供电的需求。

6) OLT 设备部署在数据中心机房, 分光器 ODN 推荐部署在变电所、弱电间等数据传输密集场所, 光网络设备 ONU 推荐部署在各大机设备弱电间, 以实现数据传输直达终端设备。

3.4 工程案例

深圳港盐田港区某在建码头为国内首个大规模应用 F5G 技术的自动化集装箱码头。垂直装卸采用自动化岸桥和自动化轨道吊。有线接入网采用 F5G 无源光局域网 (passive optical LAN, POL), 核心交换机-OLT-分光器 ODN-ONU 架构。工业控制网 ODN 选用 1:16, ONU 设备网络侧配置 2 个对称的 10G PON 接口, TYPE C 双归属保护。为保证自动化装卸设备的调试不影响港区生产作业, 港区变电所布置有调试环境分光器和生产环境分光器, 通过控制单机上 ONU 接入不同的分光器, 实现工业控制网大机的调试/生产环境切换。

生产环境下工业控制网络采用 F5G 全光冗余

架构, 所有光网络设备 ONU 通过 TYPE C 双归属上联至光线路设备 OLT。互为备份的 2 台 OLT 安装在不同的机房。生产环境下岸桥设备最大数量为 21 台, 轨道吊最大数量为 72 台。ODN 分光配置方案见表 2、3。工业控制网调试环境和生产环境所需分光器见表 4。生产网和视频网的接入端网络设备需要依据具体业务进行设计。

表 2 生产环境岸桥 ODN 分光配置方案
Tab.2 ODN splitting configuration scheme of shore cranes in production environment

用途	数量/台	分布	备注
岸桥控制	4	1 [#] 、2 [#] 变电所各 2 台	每个分光器下挂 10~11 台岸桥(远期按 21 台考虑)
岸桥视频	8	1 [#] 、2 [#] 变电所各 4 台	每个分光器下挂 5~6 台岸桥(远期按 21 台考虑)
总计	12	-	-

表 3 生产环境轨道吊 ODN 分光配置方案
Tab.3 ODN splitting configuration scheme of rail-mounted gantry cranes in production environment

用途	数量/台	分布	备注
轨道吊控制	12	1 [#] 、2 [#] 、3 [#] 、4 [#] 变电所各 3 台	每个分光器下挂 12 台轨道吊(远期按每个变电所接入 36 台轨道吊考虑)
轨道吊视频	16	1 [#] 、2 [#] 、3 [#] 、4 [#] 变电所各 4 台	每个分光器下挂 9 台轨道吊(远期按每个变电所接入 36 台轨道吊考虑)
总计	28	-	-

表 4 工业控制网 ODN 需求数量
Tab.4 Demand quantity of ODN in industrial control network

环境	1:16 分光器使用设备	数量/台	备注
调试环境	岸桥	6	控制分光器 2 台, 视频分光器 4 台
	轨道吊	18	控制分光器 8 台, 视频分光器 10 台
生产环境	岸桥	12	控制分光器 4 台, 视频分光器 8 台
	轨道吊	28	控制分光器 12 台, 视频分光器 16 台
总计	-	64	-

4 结语

1) 为保护关键数据免受火灾、电力故障和通信中断等风险, 数据中心应采用最高安全标准; 同时, 为了确保业务连续性, 数据中心还应采用双活架构, 实现实时数据备份和故障切换。

2) 自动化码头的自动驾驶和远程控制操作要求 5G 网络具有极低的延迟和极高的可靠性。建议采用双核心网设计,以实现网络的冗余备份,确保关键通信不受单点故障的影响。

3) 为满足码头日益增长的通信需求, F5G 光网络提供了必要的带宽和稳定性。建议采用点到多点的星型架构,通过 ODN 实现高效的数据传输。

4) 未来的研究应关注数字基础设施的长期可维护性和可扩展性,以及通过技术创新降低运营成本 and 环境影响。同时,研究应考虑如何整合新兴技术,如人工智能和物联网,以进一步提升码头的智能化水平。

参考文献:

- [1] 丁飞虎. 装配式高桩码头智能化系统基础设施应用技术[J]. 水运工程, 2023(5): 178-181.
DING F H. Application technology of intelligent system infrastructure for prefabricated high-piled wharf[J]. Port & waterway engineering, 2023(5): 178-181.
- [2] 郭峰. 合资铁路机房建设实践. 中国高新技术企业(中旬刊), 2012(11): 74-75.
GUO F. Practice of joint venture railway machine room construction [J]. China high technology enterprises (middle journal): 2012 (11): 74-75.
- [3] 李健彰, 杨艳国, 郑铁成. 信息化机房建设理论与实践. 计算机光盘软件与应用, 2012(2): 36, 38.
LI J Z, YANG Y G, ZHENG T C. Theory and practice of information computer room construction[J]. Computer CD software and applications, 2012(2): 36, 38.
- [4] 中国建筑科学研究院. 建筑内部装修设计防火规范: GB 50222—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
China Academy of Building Research. Code for fire protection design of interior decoration of buildings: GB 50222-2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017.
- [5] 由一. 数据中心机房动力环境监控系统(四): 第四讲数据中心机房空调系统的监控[J]. UPS 应用, 2017(10): 59-64.
YOU Y. Data center room power environment monitoring system (4): Lecture 4: Monitoring of air conditioning system in data center room [J]. UPS application, 2017(10): 59-64.
- [6] 宋欣, 黄文, 马骏涛, 等. CDP 技术在图书馆数据保护中的应用[J]. 中华医学图书情报杂志, 2014(8): 76-80.
SONG X, HUANG W, MA J T, et al. Application of CDP technology in protecting data in libraries [J]. Chinese journal of medical library and information science, 2014(8): 76-80.
- [7] 蒋飘蓬, 于德海, 王红丽. 基于云计算的数据中心服务架构研究与实践[J]. 电脑知识与技术, 2017(22): 96-97.
JIANG P P, YU D H, WANG H L. Research and practice of data center service architecture based on cloud computing [J]. Computer knowledge and technology, 2017(22): 96-97.
- [8] 罗世雄, 卢乐天, 李烽. 数据中心计算资源池规划设计方法研究[J]. 电信技术, 2018(1): 20-24.
LUO S X, LU L T, LI F. Planning and design method for data center computing resource pools[J]. Telecommunications technology, 2018 (1): 20-24.
- [9] 任勤雷. 5G 港口行业应用标准体系框架探讨[J]. 科技资讯, 2021, 19(33): 4-7, 61.
REN Q L. Discussion on the application standard system framework of 5G port industry [J]. Science & technology information, 2021, 19(33): 4-7, 61.
- [10] 梁健堂, 陈嘉明, 许小婉. 基于 PIN-NPN 的 5G 专网解决方案研究[J]. 邮电设计技术, 2023(9): 26-32.
LIANG J T, CHEN J M, XU X W. Research on 5G private network solutions based on PIN-NPN [J]. Designing techniques of posts and telecommunications, 2023(9): 26-32.
- [11] 黎永东. F5G 全光网在转化医学中心应用的研究[J]. 数字通信世界, 2023(10): 116-118.
LI Y D. Research on the application of F5G all optical network in translational medicine center [J]. Digital communication world, 2023(10): 116-118.

(本文编辑 王传瑜)