

轻钢模块化数据中心智能化建造技术现状和思考

贺 晓¹, 金 鉴¹, 程 序¹, 郑梓豪², 陈宇欢², 李元齐²

(1. 中讯邮电咨询设计院有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要:近年来,随着云计算、人工智能、大数据和 5 G 等技术的快速发展,对数据中心建设需求也逐渐增加,并广泛服务于各银行和金融机构、城市基建、科研院所和航空航天中心等。本文以发展数字化、装配式数据中心为出发点,围绕标准化的模块单体设计原则,探讨了轻钢模块化数据中心的标准模块类别与尺寸,结构设计,参数化智能设计,模块的公路运输等环节应用协同的思想,进而提出了以互联网技术为媒介的数据中心一体化建造管理平台。最后,本文对未来智能化的数据中心建设进行了讨论和展望。

关键词:预制装配式模块;数据中心;协同设计;平台管理;智能化设计

中图分类号: TU201.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)04-0625-08

Modularization and intelligent construction of light-weight steel data center buildings

HE Xiao¹, JIN Jian¹, CHENG Xu¹, ZHENG Zihao², CHEN Yuhuan², LI Yuanqi²

(1. China Information Technology Consulting & Designing Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In recent years, with the rapid development of technologies such as cloud computing, artificial intelligence, big data and 5 G, the demand for data center construction has gradually increased and is widely used in banks and financial institutions, urban infrastructure, research institutes and aerospace centers. Starting from the development of digital and prefabricated data centers, this paper discusses the idea of how to apply collaborative design and construction in the data centers' design based on light-weight steel standardized modules, and then puts forward the Internet technology as the medium of data center integration construction management platform. Finally, future research topics for intelligent modular data centers is discussed.

Key words: container module; data center; collaborative design; platform management; intelligent construction

数据中心作为一类存储各种通信和辅助设备的建筑,是新一代信息通信技术的重要载体,随着云计算、人工智能、大数据、物联网、移动互联网和 5 G 技术的深入发展,对数据中心需求不断攀升,适用于信息化企业、银行和金融机构、城市基建、科研院所和航空航天等场所。2021 年 7 月,国家工信部印发《新型数据中心发展三年行动计划》指出:要“统筹推进新型数据中心发展;构建以新型数据中心为核心的智能算力生态系统”。2021 年 11 月发布的《“十四五”信息通信行业发展规划》中,数据中心的高质量建设与发展位列 9 大重点工程之一。

数据中心(Data Center)包含制冷模块、供电模块、IT 模块、辅助模块、交通模块等模块。近

年来,相比于一般的民用建筑,数据中心的建设具有以下几个特点:(1)投资成本高。数据中心的机电设备多且价格昂贵,虽层数不高但荷载远大于普通民用建筑,结构成本较高;(2)建设周期长、更新换代快。传统数据中心的建设周期在 2~3 a,而投入使用后,数据中心的服务器一般在 3~5 a 需要更新换代,整个数据中心的服务器时间大约在 15~20 a;(3)专业性强。因为数据中心功能的特殊性,在设计、建造和运维过程中都需要多专业协同配合,对所有项目团队提出了更高的要求,且运维过程中的电力能耗在建筑全生命周期中同样占据较大比重,在前期设计阶段,设备的节能设计也是重中之重;(4)需要有可扩展性。在数据中心运维过程中,可能会因业务扩张而需要对现

收稿日期: 2022-07-04

修改稿日期: 2022-08-23

基金项目: 中讯邮电咨询设计院有限公司资助项目(HX-ZXZB-FW-2021058)

第一作者: 贺 晓(1972—),女,教授级高级工程师,研究方向: 数据中心设计。E-mail: hexo@dimpt.com

有数据中心进行扩建,扩建过程周期要短,且不影响当前数据中心的运营。因此,数据中心建筑采用适合工业化建造的轻钢模块化钢结构体系^[1]具有整体优势。

目前,数据中心正迎来大规模生产和快速建造的需求浪潮。国内不少学者也都提出了装配式数据中心的构想。刘恋^[2]对比了传统混凝土结构数据中心、装配式混凝土结构和装配式钢结构数据中心的成本、建造周期等,说明了装配式数据中心在建造速度和建造成本上的优势。杨军志^[3]将装配式数据中心分为微模块、集装箱式及仓储式,同样突出了装配式建造模式对比传统数据中心在建造速度上的优势。

本文在分析数据中心建筑单元模块化和标准化的基础上,对模块单元的设计环节、模块单元运输环节、一体化建造及管理环节带来技术挑战及数字化技术运用等进行了分析和探索。最后总结了平台化、智能化数据中心建设的优势,对未来的应用研究提出了展望。

1 数据中心的标准化模块单元

模块化数据中心有两种标准化模式,一种是将IT机柜、电源和冷却设备集成在一起的单箱式模块,适合3个及以内机柜的需求;另一种是组合


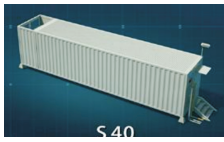
式模块,即按功能设计不同的模块,如IT模块,电力模块,蒸发冷却机组,风冷室外机组,辅助模块(楼梯、走道、储藏室)等。通过相应数量的模块数量满足需求,单栋数据中心最多可以容纳3 000个机柜。

单箱式数据中心在一个集装箱内放置电源/UPS(Uninterrupted Power Supply,不间断电源)、BBU集中柜,其余放置IT机架模块。同时,在模块的一端装备空调室外机舱,通常采用风冷型制冷。为方便模块单元的运输,依据我国现行国家标准《系列1集装箱分类、尺寸和额定质量》^[4],拟定单箱式模块标准宽度8'(8呎,2 438 mm),高度9'6"(2 896 mm),长度有三种,分别适配不同的计算/存储模块需求:18'(18呎,5 500 mm)、20'(20呎,6 058 mm)和40'(40呎,12 192 mm),见表1。

组合式模块建筑的各个功能模块示意图1。依据各个模块所存放设备的大小,制定不同的模块尺寸,宽度8呎(2 438 mm),高度13'6"(4 100 mm),长度有三种:20呎(6 058 mm),30呎(9 125 mm)和40呎(12 192 mm),见表2。组合式模块数据中心的规模可以根据需求来制定,一旦需求确定,就可以在满足模块组合规则的情况下生成多种不同的布局方式供设计师和客户选择。

表1 单箱式模块规格

Tab. 1 Modules specifications of single type

使用场景	图例	制冷方式	模块种类	模块尺寸(长×宽×高)/mm
单箱式	联通 20 尺单箱式产品 	风冷型	一体箱	18 尺: 2 438 × 5 500 × 2 896
	联通 40 尺单箱式产品 	风冷氟泵型		20 尺: 2 438 × 6 058 × 2 896 40 尺: 2 438 × 12 192 × 2 896

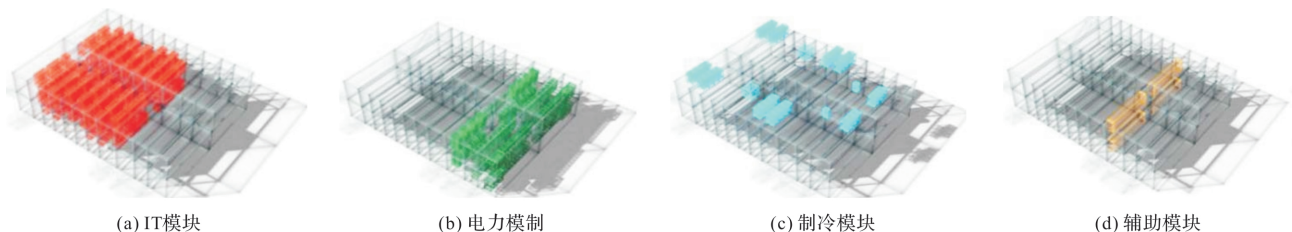


图1 组合式模块单模块示意图

Fig. 1 Modules using in combined type

表 2 组合式模块规格
Tab. 2 Modules specifications of combined type

使用场景	制冷方式	模块种类	模块尺寸(长×宽×高)/mm
组合式	蒸发冷却型	蒸发冷却机组	30 尺: 2 438×9 125×4 100
		IT 模块	40 尺: 2 438 ×12 192×4 100
		电力模块	40 尺: 2 438 ×12 192×4 100
		辅助模块	40 尺: 2 438 ×12 192×4 100
		风冷室外机模块	20 尺: 2 438 ×6 058×4 100
	风冷型		40 尺: 2 438×12 192×4 100
		IT 模块	40 尺: 2 438×12 192×4 100
		电力模块	40 尺: 2 438×12 192×4 100
		辅助模块	40 尺: 2 438×12 192×4 100

2 模块单元的标准化设计

轻钢模块化数据中心设计易实现标准化、参数化。因此,设计中在满足数据中心各专业设计规范和协同的同时,也要以“工业化制造”为指导,兼顾模块单元产品质量和成本。图 2 展示了标准化的数据中心单元的协同设计模式。

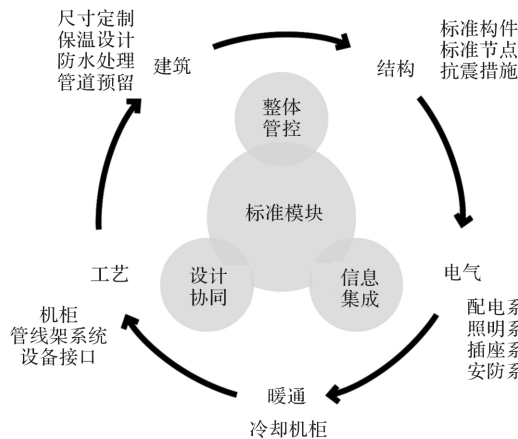


图 2 多专业系统数据中心协同设计
Fig. 2 Collaborative design of multi-discipline system for data center buildings

2.1 基于模块化的建筑和设备设计

在建筑设计方面,由于采用了标准化的集装箱尺寸,需要合理考虑整体功能空间的规划,所有内部尺寸都应尽量定制化,同时兼顾其他专业的需求。例如保温系统需要结合标准化模块单元的形式采用夹心保温的方式,缝隙为需要重点处理的部位;预留墙板洞、管道井,以解决各专管道穿行;防水模块尽量避免跨越缝隙,尽量在同一个集装箱内自成体系;集装箱防水接缝处理应考虑内部横向纵向接缝处理以及外部横向纵向接缝处理。

在电气与设备工艺设计方面,需要考虑将各种机电设备都能在工厂装配好,或在现场的移动

工厂提前安装在模块单元中。在设计时,依据标准集装箱规格合理安排动力配电系统、照明系统、插座系统、应急照明及疏散指示系统和安防系统。针对单箱式模块,电源是固定在边缘侧,只需在箱体内进行布线设计;针对组合式模块,则需要考虑由外市电引入,将高压柜、变压器、低压配电系统、UPS 配电系统、直流配电系统组成一个电源模块,并预留同 IT 模块、空调模块的管线连接接口。

2.2 模块单元的结构设计

传统模块化建筑可采用墙承重或柱承重的承重形式^[5-6]。结构设计时,从工厂化加工的角度,需尽可能做到构件截面、甚至单元层面的标准化。为此,本文提出两个原则:(1)为解决不同风荷载和地震作用的抗侧力要求对模块单元结构标准化的影响,可采用“承重与抗侧分离”的设计理念,通过配置满足不同抗侧能力需求的预制功能构件,在承重需求下解决模块单元的结构标准化问题,实现结构设计参数化。(2)为解决不同楼(屋)面荷载对模块单元结构标准化的影响,可采用桁架式楼(屋)面方案,通过变换桁架弦杆截面或桁架高度方式,实现结构方案标准化和结构设计的参数化。在此基础上,提出了由标准化截面构件、结构单元及节点构造的模块单元方案(图 3)。结构设计的另一个重点是模块单元模块之间连接设计,模块之间需要通过标准连接件和连接工艺,形成满足结构性能要求的标准化节点构造。连接节点主要涉及模块与模块、模块与屋面、模块与基础之间,其中又分为角节点、边节点、中节点。但在模块单元结构方案标准化的前提下,很容易实现这些节点构造的标准化^[7-9]。


以某一多层组合式模块建筑体系为例,在此阐明模块单元的结构设计标准化理念。对于多层模块结构体系,其上下相邻的模块受弯构件需要

进行连接以提高其承载力. 考虑到采用 H 型截面进行叠合连接方便, 且用钢量更小, 可作为首先推荐的截面类型. 此案例中, 采用的标准化构件截面为: BOX 250×12, HN 100×50×5×7, HW 100×100×6×8, HW 150×150×7×10, HM 148×100×6×9, HM 194×150×6×9, HW 200×200×8×12. 根据组合式模块建筑体系的平

面布置, 整理出标准的模块单元, 并对其进行编号. 模块单元的编号规则为 S/A(单箱式/组合式)-18/20/30/40(模块长度)-A/B(模块宽度)-I/II/III(首层/顶层/标准层), 例如, A-40-A-III 为标准层, 长 40 ft, 宽 2 438 mm, 用于组合式数据中心的模块单元. 其中, 标准模块的具体布置如表 3 所示, 标准构件与标准模块的对应关系如图 3 所示.

表 3 标准模块单元的构件布置及其截面分类

Tab. 3 Component assignment and section classification of standard module unit

标准模块	构件分类	截面分类/mm
	框架柱	BOX 250×12、BOX 280×12
	框架梁	HW 150×150×7×10、HM 148×100×6×9
		HM 194×150×6×9
	上弦杆	HW 200×200×8×12
		HM 194×150×6×9
	桁架梁	HN 100×50×5×7
		HW 100×100×6×8
	腹杆	HW 150×150×7×10
		组合截面 2×HW 150×150×7×10
	下弦杆	HW 200×200×8×12
	次梁	HW 100×100×6×8、HM 148×100×6×9
	顶部桁架腹杆	HW 100×100×6×8

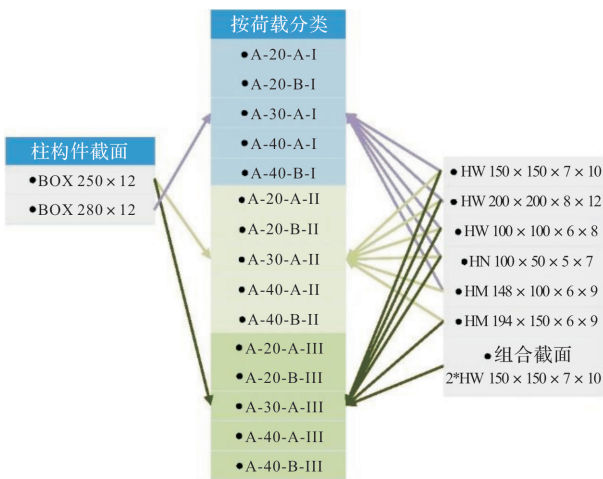


图 3 模块单元与截面对应关系

Fig. 3 Correspondence between module unit and section

最终, 将标准的模块单元组装为所需的模块建筑, 并对该体系进行各工况下的结构及构件验算. 对于上述案例中的组合式数据中心, 标准模块的组装方案如图 4 所示.

2.3 参数化智能设计

在数据中心建筑中, 单箱式模块数据中心只有一个模块(如表 1), 而组合式数据中心是诸多功能模块的组合(如表 2), 其 IT 机组、电源机组、

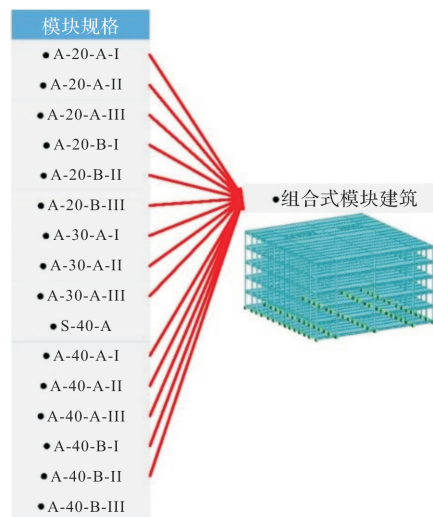


图 4 标准模块单元与数据中心结构体系对应关系

Fig. 4 Correspondence between standard module units and structural system of data center buildings

冷却机组的数量和相互约束是在选型时的重要考虑. 组合式数据中心的智能化设计的重点在功能模块数量和组合连接关系的参数化表达, 以及在不同数量下模块之间的组合形式变化. 以 IT 机组需求和电源机组需求为例, 本文将展示组合式数据中心的参数化智能设计的方法.

IT 模块是数据中心的核⼼部分,其布设情况将影响其他模块,在参数化组合时宜优先考虑。单个 IT 模块可提供 32 个设备位置,除去 PDF 与消防设备(共占用 3 个设备位置),剩下 29 个空位布设机柜和空调。IT 单模块内的机柜与空调除需满足上述的位置数量的约束外,空调制冷量也应满足数据机柜的制冷需求。同时,考虑到制冷设备故障等突发状况,需预留一台空调设备作为应急备份,则可归纳出如式(1)的约束关系。

$$x+y=29 \quad (1)$$

式中: x 表示机柜数量; y 表示空调数量。

此外,空调制冷量应满足数据机柜的制冷需求,而考虑到制冷故可得出机柜数量与空调数量之间还存在如式 4.2 的供需关系。

$$40(y-1) \geq xb \quad (2)$$

式中: 40 表示单个空调制冷量(单位: kW); x 表示机柜数量; y 表示空调数量; b 表示单个机柜功耗。

据式(1)和(2)确定出每个 IT 单模块内容纳的机架数量后,用户输入对 IT 机柜的需求,就可确定 IT 单模块的总数量,如式 3。

$$\beta = \lfloor a/x \rfloor + 1 \quad (3)$$

式中: β 表示 IT 单模块的总数量; a 表示机柜数量; x 表示空调数量。

之后可确定电源模块的数量。在此之前,需要确定不同供电地区的 PUE 值。PUE 表示数据中心总能源消耗与 IT 负载消耗的能源比值,值越大表明数据中心为实现 IT 设备运行所消耗的电能越大,是衡量一个数据中心性能和绿色程度的重要指标。根据上述概念,数据中心总电力需求 θ 即可表示为公式(4)。

$$\theta = \delta \cdot b \cdot \alpha / 0.95 \quad (4)$$

$$\delta = \begin{cases} a, & \text{投资优先} \\ \beta x, & \text{性能优先} \end{cases} \quad (5)$$

式中: δ 表示总机架数量,计算方式如式(4)、(5); b 表示单个机架能耗; α 表示 PUE 值; α , β , 和 x 的含义同公式(3)。

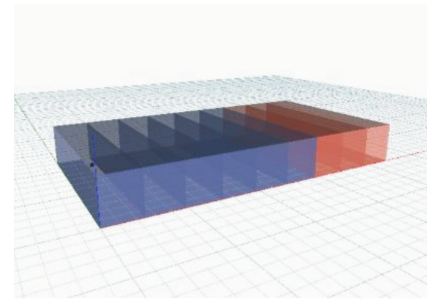
为保障供电,需对 θ 进行一定的系数放大 0.95。最终,电源模块的数量 N 则可用公式(6)表示:

$$N = \theta / q \quad (6)$$

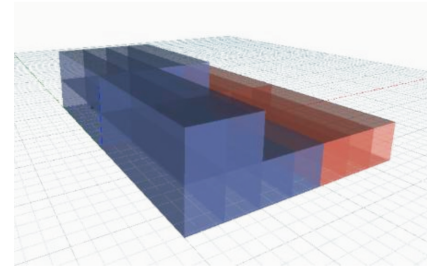
式中: 表示电力模块数量; θ 表示总电力需求; 表示单个电源模块可供电量。

同时,考虑到数据中心对可靠性和安全性的需求,可以选择 N 型供电系统或 $2N$ 型供电系统。

图 5 和图 6 分别展示了在不同机架需求和供电模式下的模块化数据中心生成结果。

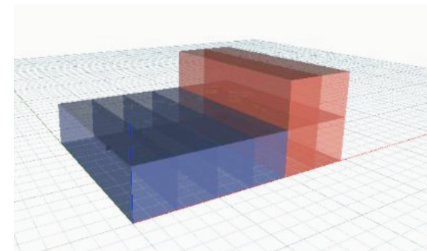


(a) 满足50个机架需求的形式

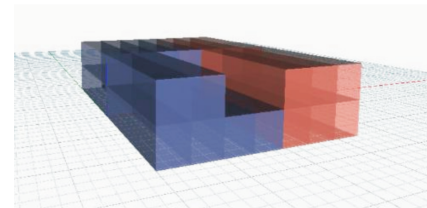


(b) 满足230个机架需求的形式

图 5 N 型配电系统下电源模块组合的不同形式
Fig. 5 Module configurations of N-type powering system



(a) 满足50个机架需求的形式



(b) 满足230个机架需求的形式

图 6 2N 型配电系统下电源模块组合的不同形式

Fig. 6 Module configurations of 2N-type powering system

参数化的模块数据中心生成方式增强了设计的自动化,能够快速生成符合各专业的模块方案,方便了业主及设计师做分析与决策。

3 模块运输环节

模块单元的运输是在进行标准化设计时不可忽视的环节,如果在前期协同设计中提前制定好运输方案,保证满足运输条件及运输过程中的安全性,则可以避免不必要的运输成本。针对国内的模块化数据中心,主要考虑公路运输方式。传

统的运输方案设计流程可参考图7。传统运输方案主要流程有:

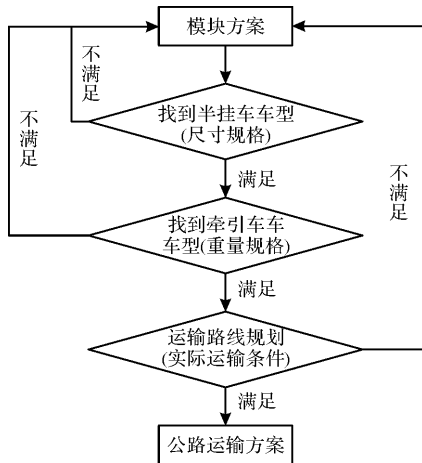


图7 传统运输方案设计流程

Fig. 7 Design scheme of traditional transportation plan

(1) 确定半挂车车型。根据我国公路运输相关标准《货车挂车系列型谱》^[10] (GB/T 6420-2017) 规定, 集装箱运输半挂车运载的集装箱规格有 20 呎, 30 呎和 40 呎, 最大长度不得超过 13.95 m, 最大宽度不得超过 2.55 m;

(2) 确定牵引车车型。集装箱运输半挂车允许的总质量有 35 t、40 t 和 45 t 三档, 依据挂车轴载质量与挂车总质量的关系^[11], 如公式(7), 可以确定牵引车的最小牵引重量, 以此来选择牵引车的规格。

$$G_{\text{牵引质量}} \geq G_{\text{总}} - G_{\text{轴载质量}} \quad (7)$$

式中: $G_{\text{牵引质量}}$ 代表牵引座上最大质量; $G_{\text{轴载质量}}$ 表示挂车轴载质量; $G_{\text{总}}$ 代表挂车总质量。

(3) 确定公路运输条件。在进行公路运输方案设计时, 在设计时还需考虑到中国各级城市公路和高速公路的运输和限行规则, 依据车辆的限高、限宽和限重, 牵引车的型号, 运行时间等, 合理选择运输道理。

标准化模块的运输方案设计如图8。

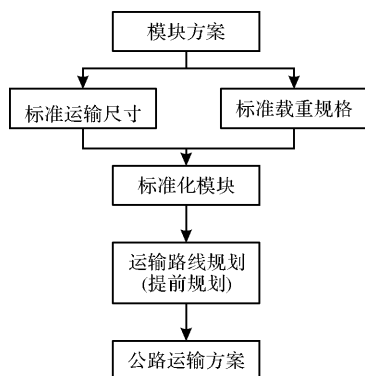


图8 标准化运输方案设计流程

Fig. 8 Design scheme of standard transportation plan

在模块的标准化中已经考虑了运输半挂车车

型以及牵引车车型的选择, 所有的模块都可以找到符合要求的交通运输工具。一旦交通运输工具确定, 可以借助路径规划工具自动优选合适的运输道路, 解决诸多可能造成设计返工的问题。

4 建造全过程一体化

模块数据中心的建造数据需要集成管理与协调共享, 从参数化设计到工程制造, 从模块运输到现场建造, 全过程阶段都要与各个专业模块同步。建筑模型信息化与建筑云平台技术的运用, 将使模块化数据中心迈上现代化建设的新台阶。将保存有全专业的模块化数据中心的 BIM 模型存入后台数据库, 打造信息 BIM 数据库, 利用互联网技术, 同步管理平台、设计端、采购端和建造端, 搭建起各专业的协同平台, 以形成高效、适合于工业化建造的数据中心结构体系以及支持实现数字化、智能化建造的一体化平台, 平台框架如图9所示。

建立的一体化建造平台原型如图10所示。数据中心云平台具有如下特征:

(1) 全专业全过程一体化管理。一体化管理平台包括: 权限管理、角色管理、人员管理、供应商管理、供应商产品管理、合同管理、项目管理、运输路径规划、成本优化、项目进度管理、项目进度可视化、全过程数字化建造、流程管理等模块功能, 如图10(a)。数字化建造的逻辑及技术实现是一体化平台的关键所在;

(2) 包含各模块化数据中心的全信息模型。建筑的全信息模型是指包含数据中心的单体模块到组合式模块建筑各专业的全部信息, 如出柜率、机柜数、建材 BOM(Bill of Material)清单、模块加工图等。对于组合式模块建筑, 还可以对建筑面积、容积率等进行自动校核;

(3) 数据中心从项目立项到交付后运维的全流程管理。平台可以实现模块化数据中心从立项、设计、供应商管理、施工管理的模块化建设全流程工作, 并且可以实时进度跟踪、人员管理、变更等功能。在数据中心投入使用后, 可以统计数据中心设备运行情况, 融合 BIM+IBMS+FM(设备设施管理系统), 实现设备设施的可视化运维管理, 如图10(b)。数据中心的所有建造数据都保存在云平台中, 可以服务于未来的数据中心扩建改造工作;

(4) 智能化平台。一体化平台还可以调用当前的一些已有的 API, 在网页端实现可视化与智能化的管理, 比如利用高德地图的 API 实现运输路径的优化, 或者利用一些模型轻量化工具以及 WebGL

实现模型在网页端的3D展示.以运输路径自动规划为例,输入集装箱尺寸和重量,接着,转化为运输

挂板车的尺寸和重量,将参数传给高德地图API,直接在平台上进行运输路径的智能规划和查看.

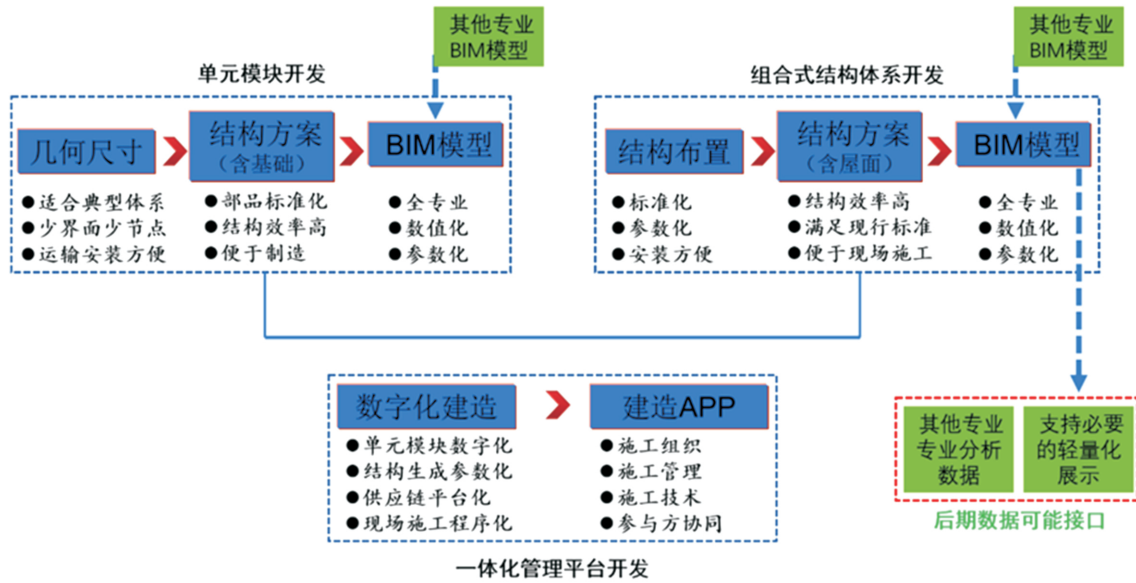


图9 一体化集成管理平台框架

Fig. 9 Framework for an integrated management platform



(a) 一体化平台项目管理面板



(b) 一体化平台进度管理面板

图10 一体化管理平台原型

Fig. 10 Prototype of the integrated management platform

5 发展展望

本文提出了数据中心建筑采用装配式模块化智能建造的一体化解决方案.首先按不同的功能和尺寸制定了标准化的数据中心模块,以标准化

模块的功能约束与空间排布规则提出了智能化的参数设计方法,探讨了模块化数据中心的公路运输方法,最后,从一体化管理的角度提出了基于全过程的模块化数据中心的管理平台.基于标准化模块单元的轻钢结构模块化数据中心解决方案,与传统数据中心建造相比,引入标准化设计、智能化运输和一体化管理的全新理念,具有标准化程度高、全自动化设计、全数字化平台管理等优势.

但模块化数据中心的工业化建造方案正处于初期发展的阶段,仍缺乏系统性、智能化的成熟推广方案.对基于标准化模块单元的轻钢模块化数据中心解决方案,未来还需考虑以下技术性问题:

(1)数据中心模块单元及建筑体系标准化.对于组合式集装箱产品,需要根据不同应用场景(包括不同IT设备需求、不同配电容量等)确定模块个数,再从单个模块拼装成整体数据中心建筑.建立起建筑、机电设备及通讯等专业的需求对应表,从标准化模块单体到一体式模块数据中心,形成标准的预制装配式集装箱数据中心产品体系;

(2)基于产品思维的正向设计理念.基于模块数据中心的标准化、系列化的集装箱产品,赋予产品物理力学性能,机电运行指标等,实现结构的一键式审核并且建立起与专业结构分析软件的导入接口.最终借助标准产品数据库和产品化设计思想,形成集装箱数据中心正向设计基本准则和方法;

(3)承重与抗侧分离理念. 除了设计应用于不同抗震分区不同系列化模块产品来满足建筑抗震与抗风的需求,从模块产品的角度,可以设计专门用于抗侧的功能模块. 通过将抗侧模块分离,普通功能模块只需满足自身对竖向力的抵抗需求以及刚度需求,同时增减抗侧模块的数量来抵抗不同地震分区和风荷载分区给整体结构带来的侧向力;

(4)智能深化设计. 组合式模块建筑的模块单体可以分为IT模块、电力模块、辅助模块,针对不同的冷却方式,有蒸发冷却机组模块和风冷室外机模块. 参数化的模块数据可以通过简洁的数学模型加以模拟,通过既定的模块间的关系自动生成组合式模块数据中心,并且依据一定的优化收敛准则,得到最终的水平和竖向排布方案;

(5)模块单元运输和吊装过程中的安全性问题. 数据中心的模块单元具有设备荷载大、单元规格长、集成化程度高的特点,还应针对模块在不同交通条件的运输过程及不同阶段吊装过程中受到的动力荷载,考虑其在运输和吊装过程中的安全性问题,保证数据中心模块在运输过程中的完好性;

(6)数据中心成本优化. 模块化的数据中心可以依据大规模生产、流水线式的工厂生产流程、成熟的供应链、平台化管理、智慧型运维,降低数据中心整体建设和运维的成本.

参考文献 References

- [1] 李元齐,吴雨杭. 冷弯型钢轻钢集成体系建筑工业化建造技术发展现状与展望[J]. 四川建筑科学研究, 2021, 47(3): 1-19.
LI Yuanqi, WU Yuhang. State-of-the-arts on industrialized construction technology of light-weight steel integrated buildings using cold-formed steels [J]. Sichuan Building Science. 2021, 47(3): 1-19.
- [2] 刘恋,刘帆,朱丽. 装配式数据中心:开启数字化新基建的“加速度”[J]. 工程建设标准化, 2021(9): 79-82.
LIU Lian, LIU Fan, ZHU Li. Prefabricated data center opens the “acceleration” of new digital infrastructure[J]. Standardization of Engineering Construction. 2021(9): 79-82.
- [3] 杨军志. 仓储式、微模块、集装箱式数据中心[J]. 智能建筑, 2015(10): 37-9.
YANG Junzhi. Storage type, micro module, container type of data center [J]. Intelligent Building. 2015 (10): 37-9.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 系列1集装箱分类、尺寸和额定质量[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.

- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Series 1 container classification, size and nominal mass[S]. Beijing: Standards Press of China. 2008.
- [5] 陈志华,冯云鹏,刘佳迪,等. 柱承式钢模块建筑体系适用高度研究[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(1): 31-9.
CHEN Zhihua, FENG Yunpeng, LIU Jiadi, et al. Research on the applicable height of column-supported modular steel building structure systems[J]. Progress in Steel Building Structures. 2021, 23(1): 31-9.
- [6] 李爱群,周通,缪志伟. 模块化建筑体系研究进展[J]. 工业建筑, 2018, 48(3): 132-9, 50.
LI Aiqun, ZHOU Tong, LIAO Zhiwei. State of the art of modular building system [J]. Industrial Construction. 2018, 48(3): 132-9, 50.
- [7] 中国钢结构协会,中国国际海运集装箱(集团)股份有限公司. 集装箱模块化组合房屋技术规程[S]. 北京:中国计划出版社, 2013.
China Steel Construction Society, China International Marine Containers (Group) Ltd. Technical specification for modular freight container buildings[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [8] 天津大学,中冶天工集团有限公司. 钢结构模块建筑技术规程[S]. 北京:中国计划出版社, 2018.
Tianjing University, MCC Tiangong Group Corporation Limited. Technical specification for steel modular buildings[S]. Beijing: China Planning Press. 2018.
- [9] 刘学春,任旭,詹欣欣等. 一种盒子式模块化装配式钢结构房屋梁柱节点受力性能分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(5): 62-9.
LIU Xuechun, REN Xu, ZHAN Xinxin, et al. Mechanical property analysis of beam-to-column connection in a box-type modular prefabricated steel structure building[J]. Industrial Construction. 2018, 48(5): 62-9.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 货运挂车系列型谱[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Freight trailer series pedigree [S]. Beijing: Standards Press of China. 2017.
- [11] 王达生. 集装箱半挂车系列化设计[J]. 专用汽车, 1996(2): 15-7, 48.
WANG Dasheng. Series design of container semi-trailer[J]. Special Purpose Vehicle. 1996(2): 15-7, 48.

(编辑 沈 波)