

数据中心机房楼模块化空间布局与净高协同设计

李晓利

中国中元国际工程有限公司 北京 100089

摘要:随着算力基础设施快速建设,金融级大规模数据中心对机房模块化布局、楼面重载、室内净高提出严苛要求。传统机房柱网密集,容易干扰机柜排布,出现结构梁侵占设备安装空间、层高与管线综合不匹配等矛盾。本文结合某总行级金融数据中心工程实例,分析机房模块化空间布局的设计要点,研究大跨度重载条件下柱网、宽扁梁体系与机房净高的协同控制方法,统筹建筑结构、机电管线、制冷配电多专业约束,解决无柱机房空间利用难题。研究成果可为同类型大规模、高功率密度数据中心机房设计提供工程参考。

关键词:数据中心;机房楼;模块化布局;大跨度结构;净高协同;重载机房

引言:我国算力基础设施建设持续提速,金融数据中心作为关键算力节点,既要满足 GB50174 A 级甚至 TIA-942 Tier IV 高等级标准,又要适配传统机柜、智算集群、液冷设备的灵活部署需求。传统机房设计常出现柱网尺寸与机柜模数不匹配,结构梁高过大压缩室内有效净高,机电管线、制冷设备与建筑空间互相挤占等问题,制约机房模块化扩展能力。本文依托和林格尔新区某金融数据中心项目,围绕机房模块化平面布局、重载大跨度结构选型、多专业净高协同开展研究,梳理空间设计关键技术,为超大规模数据中心机房楼设计提供实践依据。

1 数据中心机房模块化设计需求与约束条件

1.1 模块化机房的功能与空间需求

本项目为总行级金融数据中心,包含6栋机房楼,地上4层,建筑高度31.8 m,钢筋混凝土框架结构,抗震设防烈度8度,设计使用年限50年。机房楼一层布置门厅、变配电室、电池室、液冷机房等功能用房;二层布置电池室、变配电室、备用间;三、四层作为核心IT机房模块,可部署常规机柜、屏蔽机房以及高功率密度液冷智算设备。模块化机房强调空间“即插即用”,平面需要尽量减少室内立柱对机柜阵列的切割干扰,满足分期扩容、机柜灵活调整。同时机房内部集成机柜、封闭冷热通道、强弱电桥架、消防管道、制冷风管、液冷管路等大量设施,空间上需要同时满足设备摆放、管线敷设、运维检修多重条件。单机柜荷载要求达 16 kN/m^2 ,远高于普通办公建筑,属于重载建筑,结构设计 with 建筑空间布局深度耦合。

1.2 空间布局与净高的多重约束条件

机房净高受到结构构件、机电管线、制冷系统三重约束。结构方面,大跨度重载楼面若梁高过大,会直接压缩可利用室内高度;机电方面,强弱电桥架、消防管道需要预留敷设与检修空间;制冷方面,冷热通道封闭、间接蒸发冷却、冷板式液冷等不同制冷模式,对机房上部、地板下空间均有不同要求。应符合 GB 50174-2017 的相关规定,主机房净高应根据机柜高度及通风要求确定,不宜小于4m,高密度、液冷机房对净高要求进一步提高。若单纯加大建筑层高,会显著增加土建投资、提升制冷能耗;若压缩层高,又会造成管线打架、设备安装困难。因此不能孤立做平面布局或者只做结构设计,必须实现模块化平面、重载结构、管线综合、制冷工艺多专业协同^[1]。

1.3 传统机房设计存在的突出问题

传统机房普遍采用8-10 m常规柱网,室内立柱数量多,打断机柜模块化阵列,造成部分区域机柜无法布置,空间利用率下降。为满足重载,普通框架梁截面高度大,梁底标高过低,侵占机房有效净高。各专业分开设计,建筑定层高、结构定梁截面、机电再做管线排布,容易出现管线交叉堆叠,后期只能局部降板、改梁或者压缩检修空间,增加施工变更,也不利于后期设备迭代升级。

2 机房楼模块化平面布局设计

2.1 大跨度柱网模数化设计

为适配模块化机房,本项目创新采用最大跨度16 m大尺寸柱网。柱网尺寸结合标准机柜阵列模数开展模拟验算,尽量让立柱布置在机房模块边界,机房内部实现大面积无柱空间,消除立柱对机柜排布的干扰,提升平面灵活

度,支持后期普通机柜向高功率智算、液冷设备平滑升级。在功能分区上,采用模块化分区模式:机房楼层划分为若干独立IT模块,模块周边集中布置变配电室、电池室、空调区、备件库。供电、制冷设备就近服务对应IT模块,缩短供电距离,降低线路损耗。本项目单栋机房楼三层、四层划分多个独立机房模块,A2、B2机房楼还设置屏蔽机房模块,不同模块可分期投产,局部模块改造不会干扰其余模块正常运行,实现弹性部署。

2.2 楼层功能竖向模块化划分

竖向采用分层模块化思路。机房楼一层集中布置货运入口、消防安防分控室、10 kV 配电室、电池室、水处理及加压泵房、液冷机房;二层主要布置电池室、变配电室、备用间;三、四层作为核心IT机房模块。将供电、电池、大型制冷设备集中在下层,IT主机房布置在上层,实现动力负荷与IT负荷竖向分离,动力线缆、制冷管路垂直短距离接入上层机房,缩短管线路径,降低传输损耗。

2.3 模块之间交通与运维空间控制

模块之间预留运维通道、设备运输通道,货运通道满足大型机柜、液冷机组搬运需求。机房内部严格区分冷通道、热通道,冷热通道封闭边界与模块划分对齐,便于后期气流组织仿真优化^[2]。平面布局阶段同步预留桥架、风管、管道竖井位置,把强弱电竖井、制冷管井设置在模块交界位置,避免竖井切割IT机房有效使用面积,实现平面功能、运维流线、管井布置一体化统筹。

3 重载条件下结构体系与净高协同关键技术

3.1 密布宽扁梁重载框架结构选型

大跨度、高楼面荷载条件下,如果采用普通框架梁,梁高往往需要显著加大,会严重挤压机房净高。本项目选用C60高强度混凝土、HRB500级高强钢筋,采用密布宽扁梁体系,把主梁梁高严格控制在1.1 m以内。通过增加梁的宽度、适度加密梁的数量,分散楼面重载,在满足单机柜16 kN/m²荷载要求、8度抗震设防前提下,有效控制梁底标高,保障机房梁下净高≥4 m。宽扁梁体系需要重点验算挠度、裂缝以及抗震性能,通过多组构件截面比选,兼顾构件自重、材料用量、层高收益。相比普通高梁方案,密布宽扁梁虽然钢筋混凝土用量略有上升,但可以降低整体楼层高度,减少围护结构与制冷能耗,综合经济效益更优。

3.2 净高多维度协同验算方法

机房有效净高不是简单等于楼层高度减去梁高,需要扣除桥架、风管、消防管道、设备安装、检修操作所需空

间。项目采用BIM建模,开展多专业净高协同验算。

验算逻辑:楼层建筑高度-宽扁梁高度-上层楼板构造厚度-机电管线叠加高度-设备安装检修余量=机房可用净高。

针对不同机房模块分别开展验算:普通机柜模块、屏蔽机房模块、液冷机房模块制冷工艺不一样,管线、设备占用高度存在差异,分别给出最小净高控制阈值。对管线密集区域,在模型中做碰撞检查,优化桥架、风管、消防管道的排布顺序,尽量错层敷设,减少管线叠加造成的局部净高不足。

3.3 管线综合与结构构件协同优化

结合宽扁梁的梁格划分,将大截面风管、大尺寸桥架尽量布置在梁格的凹槽区间内,利用梁与梁之间的空间容纳管线,降低管线对梁下净空的侵占。强弱电桥架分层排布,电力桥架与通信桥架保持安全间距,减少电磁干扰。液冷供回水管、消防管道避开主梁关键受力位置,管线孔洞提前在结构模型中预留,避免后期现场开洞削弱构件承载力^[3]。

4 工程实施要点与质量控制

4.1 前期多专业联合方案论证

模块化机房布局与净高协同不能等到施工图阶段再协调,必须在方案及初步设计阶段就开展多专业联合论证。建筑、结构、暖通空调、电气、消防、工艺运维等专业应共同参与,围绕机柜布置方案、单机柜功率、制冷形式等核心工艺参数进行反复磋商,据此反推楼面荷载、柱网尺寸、层高、梁截面控制指标,把净高约束条件前置到方案阶段,从源头减少后期设计变更。项目利用6SigmaRoom气流模拟软件和BIM建模工具,完成气流组织仿真、管线碰撞检查与净高模拟分析,预判高功率液冷模块后期改造对空间的要求,确保方案阶段即形成各专业协同的设计边界。通过前期联合论证,有效避免了传统“建筑定层高、结构定梁截面、机电再排管线”的串行设计模式带来的返工与浪费,为后续施工图设计和现场施工奠定了坚实基础。

4.2 结构施工阶段构件质量管控

密布宽扁梁属于重载关键构件,其施工质量直接关系到结构安全与净高保障效果。C60高强混凝土需要严格控制浇筑、振捣、养护工艺,确保混凝土强度达到设计要求,防止因养护不当产生裂缝或强度不足。HRB500高强钢筋应把控接头质量,严格落实钢筋位置,防止保护层偏差影响构件受力性能与耐久性。施工阶段做好挠度监测,对大跨度梁开展施工阶段变形观测,确保后期

满载使用状态下变形满足规范限值,避免过大变形造成吊顶、管线开裂。所有楼板、梁上设备管线洞口严格按照图纸预留,严禁后期随意切割受力钢筋。同时,对宽扁梁的截面尺寸、配筋率、混凝土保护层厚度等关键指标进行逐项验收,形成隐蔽工程验收记录,确保结构构件满足重载与抗震要求。

4.3 机电安装阶段净高动态复核

机电管线安装前,以 BIM 模型为依据,对机房各个分区梁下净高进行现场实测复核,确保实际结构与模型一致。管线优先利用梁格空间,优化风管、桥架的走向与标高,管线密集区域优先调整路由,不随意压低管线标高,避免局部净高不足影响机柜安装与运维检修。对于液冷机房等特殊模块,同步校验液冷管路、阀门、支架占用高度,保证设备安装、运维检修空间满足使用要求。施工过程中建立净高动态复核机制,每完成一个区域的管线安装即进行实测,发现净高不足及时调整,避免大面积返工^[4]。完工后分区开展净高实测,形成检测记录,作为竣工验收的组成部分。通过全过程净高管控,确保机房各区域净高满足普通机柜、屏蔽机房及液冷智算设备的部署要求。

5 存在问题与优化方向

本项目通过大跨度柱网、密布宽扁梁、多专业 BIM 协同,实现机房内部大面积无柱空间,梁下净高 $\geq 4\text{ m}$,满足普通机柜、屏蔽机房、高功率液冷智算集群的部署条件,但仍存在可优化空间。第一,密布宽扁梁体系高强材料用量较大,C60 高强混凝土与 HRB500 高强钢筋的采用虽有效控制了梁高,但土建造价有所提高,后续可结合预应力构件进一步优化材料消耗,在保证承载力和刚度的前提下降低构件截面与配筋量,实现结构经济性与净高保障的更好平衡。第二,现阶段净高协同主要针对建成静态条件,算力迭代升级后,若后期更换更高尺寸的制冷设备、液冷管路或配电装置,仍存在空间

约束,后续设计可适度预留净高冗余,为设备升级改造留出余量。第三,BIM 净高协同高度依赖各专业输入条件,机柜功率、制冷方案若发生重大调整,需要同步更新结构与管线模型,否则协同结果可能失效,因此应建立模型动态更新机制,确保设计与工艺变更同步联动。

未来数据中心向着更高功率密度智算中心发展,楼面荷载、设备外形尺寸持续变化,需要进一步建立“机柜工艺—平面布局—重载结构—净高—机电管线”一体化参数化设计流程,实现各专业参数联动与自动校核,提升模块化机房设计效率与精度,为超大规模金融数据中心机房楼设计提供更系统的技术支撑。

结束语

算力基础设施建设背景下,金融级大规模数据中心机房对模块化弹性空间、重载结构、室内净高提出多重约束。本文依托实际工程,分析传统机房柱网密集、净高不足的问题,研究大跨度模数化柱网平面布局,采用密布宽扁梁高强混凝土结构,结合 BIM 开展多专业净高协同验算,实现机房大面积无柱模块化空间,保障有效净高满足多类型 IT 设备部署。工程实践表明,必须将机柜工艺、建筑平面、重载结构、机电制冷提前联合论证,才能平衡空间灵活性、结构安全与建设成本。该套设计思路可为同类高等级算力机房建设提供借鉴。

参考文献

- [1] 高本瑞,于仲安,陈锋升,等.考虑互联网数据中心灵活调度的柔性配电网运行优化方法[J].浙江大学学报(工学版),2026,60(7):1504-1514.
- [2] 王翔.双碳战略下的绿色金融数据中心建设[J].数字化用户,2024(30):127-128.
- [3] 谈爱斌.数字化时代下企业数据中心建设与业财融合的实践与探讨[J].中国电子商情,2025,31(2):123-125.
- [4] 唐春芹.数据中心建设中超融合技术的应用研究[J].数字通信世界,2025(3):79-81.