

引用本文:王 凝,曾凡奎,高宇甲,等.超高层建筑顶升模架系统的优化设计及智能建造[J].建筑科学与工程学报,2023,40(2):69-76.
WANG Ning,ZENG Fankui,GAO Yujia,et al.Optimal design and intelligent construction of jacking formwork system for super high-rise buildings[J].Journal of Architecture and Civil Engineering,2023,40(2):69-76.

DOI:10.19815/j.jace.2021.08028

超高层建筑顶升模架系统的优化设计及智能建造

王 凝¹,曾凡奎¹,高宇甲²,杜广辉²,胡兆文³,黄 华¹

(1. 西安工业大学 建筑与工程学院,陕西 西安 710021; 2. 中建七局第四建筑有限公司,陕西 西安 710016;
3. 山东高速德建集团有限公司,山东 德州 253036)

摘要:为研究超高层建筑顶升模架系统优化设计与现场智能化施工的数字化融合,提高材料使用效率和结构合理性,以西安某超高层建筑中所使用的顶模钢框架结构为对象,采用 SIMP 插值模型法,约束次桁架悬挑端竖向位移,以减少顶模钢框架结构钢材用量为目标进行优化,依据优化结果对顶模钢框架结构进行设计。应用智能建造与建筑工业化协同发展的研究成果,以拓扑优化设计、系统化安装、智能化施工为实施框架,通过拓扑优化设计结合智能化控制操作等工具,实现基于智能建造的优化型顶模钢框架结构;系统梳理智能建造各阶段应用,利用施工管理平台,实现基于信息化模型的工程管控。结果表明:优化后顶模钢框架结构在满足约束条件情况下,在提升结构承载能力、刚度的同时,使钢框架自身重量减轻 20%,降低了顶模钢框架结构用钢量,提升了钢材的使用效率,加强了拓扑优化设计与现场智能化施工的数字化融合,推动了智能化施工装备的施工应用。

关键词:拓扑优化设计;智能建造;SIMP 插值模型法;超高层建筑顶升模架系统;钢框架结构

中图分类号:TU974

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)02-0069-08

Optimal design and intelligent construction of jacking formwork system for super high-rise buildings

WANG Ning¹, ZENG Fankui¹, GAO Yujia², DU Guanghui², HU Zhaowen³, HUANG Hua¹

(1. Civil & Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;
2. The Fourth Construction Co., Ltd. of CSCEC 7th Division, Xi'an 710016, Shaanxi, China;
3. Shandong Hi-speed Dejian Group Co., Ltd, Dezhou 253036, Shandong, China)

Abstract: In order to study the digital integration of the optimal design of the jacking formwork system of super high-rise buildings and the intelligent construction on site and improve the material utilization efficiency and structural rationality, taking the jacking formwork steel frame structure used in a super high-rise building in Xi'an as the object, the SIMP interpolation model method was used to constrain the vertical displacement of the cantilever end of the secondary truss, and the optimization was carried out to reduce the steel consumption of the jacking formwork steel frame structure. According to the optimization results, the jacking formwork steel frame structure was designed. The research results of the coordinated development of

收稿日期:2021-08-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFF0306301)

作者简介:王 凝(1997-),女,工学硕士研究生,E-mail:wn_y1029@126.com。

通信作者:黄 华(1979-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:huanghua23247@163.com。

intelligent construction and building industrialization were applied, and the topology optimization design, systematic installation and intelligent construction were taken as the implementation framework. Through topology optimization design combined with intelligent control operation and other tools, the optimized jacking formwork steel frame structure based on intelligent construction was realized. The application of intelligent construction in various stages was systematically sorted out, and engineering management based on an information model was realized using a construction management platform. The results show that the optimized jacking formwork steel frame structure can reduce the weight of the steel frame by 20% while improving the bearing capacity and stiffness of the structure under the condition of meeting the constraints, reducing the steel consumption of the jacking formwork steel frame structure, improving the efficiency of steel use, strengthening the digital integration of topology optimization design and on-site intelligent construction, and promoting the construction application of intelligent construction equipment.

Key words: topology optimization design; intelligent construction; SIMP interpolation model method; jacking formwork system for super high-rise building; steel frame structure

0 引言

在超高层建筑高速发展的今天,超高层建筑顶升模架系统(简称“顶模”)迎合现代建筑高质量发展。在顶模实际应用过程中,顶模的安全性、适用性、经济性将会直接影响超高层建筑的结构质量及工程效益^[1-3],为此,国内外学者们对此进行了一系列研究。

顶模结构抗侧力体系是决定其结构是否经济合理的关键^[4-5],Shapira^[6]认为应采取极限状态设计法对作为临时结构的超高层模板体系进行设计计算,并对荷载分项系数给出取值,充分发挥材料性能;祖公博等^[7]通过分析超高钢筋墙防侧倾装置、超层绑扎高空作业安全防护构造和爬模爬升过程中核心筒爬件的免碰撞爬升技术,提出了基于爬模优化设计的超高层抗侧力施工技术,提高了顶模建造效率;针对超高层建筑施工场地及建筑面积的限制,Zhou等^[8]研究了模块化低位顶升模板系统在核心筒建筑施工中的应用,增强了顶模结构在核心筒变截面的适应性;阿联酋 Al HiKma 大厦^[9]核心筒施工中使用的液压爬升模架,为适应该工程模板中的阴角和拐角等操作不便的问题做出了相应的优化设计,可使模板体系架体和导轨之间互相爬升,增加模板周转次数,降低成本;曾凡奎等^[10]针对某超高层核心筒施工,设计出一套完整的液压顶升模架系统,并通过工程实践证明其具有安全、稳定等优点。这些研究多数采用理论分析和数值模拟方法,并将研究成果应用到实际工程中,有效降低现场施工难度,

加快施工进度,节约施工费用。但随着建造技术智能化同建筑工程深度融合^[11],顶模在节能设计、现场施工技术等方面与智能化、数字化融合不足,需要探索能有效替代人工,以设计和施工现场关键环节为重点,形成安全、高效、精确的智能化施工装备。

2020 年 7 月,住房和城乡建设部等 13 部门联合印发了《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》(以下简称《指导意见》)^[12],为推进数字化、网络化、智能化同工程建设深度融合提出了指导方向,加强了建筑施工作业应用,推动了涵盖设计、生产加工、施工装配、运营维护等全产业链融合一体的智能化建造产业体系^[13]的进程。

对本文所研究智能化超高层顶模钢框架结构而言,由于其钢框架结构次桁架悬挑端大,结构受力复杂,在施工过程中往往会出现因结构自重过大、结构承载能力、刚度不足而导致结构在施工中应力和位移过大、能源资源消耗较大,因此采用拓扑优化法中 SIMP 插值模型法,控制次桁架悬挑端竖向位移,以减少顶模钢框架结构钢材用量为优化目标进行优化,依据优化成果对顶模钢框架结构进行设计,通过拓扑优化与智能化控制操作等工具实现智能建造,以推进智能建造与建筑工业协同发展。

1 智能建造协同发展

智能建造实施方案主要从拓扑优化设计、系统化安装、智慧化施工^[14-16]三个方向深入,实现数据的有效传递、应用和集成。

首先,创建结构模型,在设计过程中对缺陷做出

及时调整,通过协同平台进行优化,进一步提升设计质量。通过虚拟分析与施工方案的结合,模拟整个施工过程的变化,提前发现施工阶段可能存在的问题,以便及时调整设计和施工方案,获得最优设计成果。

设计工作完成后,从模型中导出工厂生产所需数据,传输至数字化管理平台 and 中央控制系统,驱动生产设备运转,实现预制构件生产,构件生产完成并通过质量验收后,将所生产构件按照一定流程系统化安装,安装完成的智能化施工装备严格进行安全验收。

系统将模架信息同步至施工管理平台,实现基于信息化模型的工程管控。通过平台及时记录施工进度、质量、安全等信息,及时发现进度滞后等相关问题,并深入分析原因,调整原始计划,实现进度的有效把控^[17-19]。

2 基于 SIMP 法的拓扑优化设计

目前结构拓扑优化法有变厚度法、均质化法和变密度法^[20],但由于变厚度法无法应用于复杂三维连续体结构^[21]的优化,均质化法优化后的结构某些区域会生成介于 0~1 之间的密度,这些密度区域以目前的技术和工艺无法加工和生产,所以这两种方法存在较为明显的局限性。变密度法作为一种人为建立的材料密度与材料特性之间的关系,使用该方法对结构进行拓扑优化后的结构密度绝大部分都会呈现 0 和 1 的分布。因此对比三种拓扑优化法,变密度法具有较为明显的优势,而变密度法中应用比较多的模型是材料插值模型法,即 SIMP 法^[22-28]。

2.1 钢框架结构组成

本文所研究钢框架结构由 4 根高度为 2.5 m 的主桁架和 35 根高度为 1.7 m 的次桁架组成。主桁架和次桁架全部由桁架单元拼装而成。主桁架 4 榀,单榀长 14.2 m;次桁架 1、7、12、15、18、23、28、34 长度为 7.477 m,次桁架 2、8、13、16、19、22、27、33 长度为 9.929 m,次桁架 3、17、20、35 长度为 9.794 m,次桁架 5、11 长度为 2.394 m,次桁架 29 长度为 1.998 m,次桁架 21 长度为 4.2 m,次桁架 30 长度为 8.395 m,次桁架 6 长度为 3.2 m,次桁架 26、31 长度为 4.8 m,次桁架 4 长度为 4.255 m,次桁架 14 长度为 5.6 m,次桁架 10 长度为 12.2 m。考虑到吊装施工便利,钢框架中主桁架的安装和布置应留有充足的空间,并选择连接桁架的专用仪器对顶模钢框架中主、次桁架进行连接,连接形式具体见图 1。

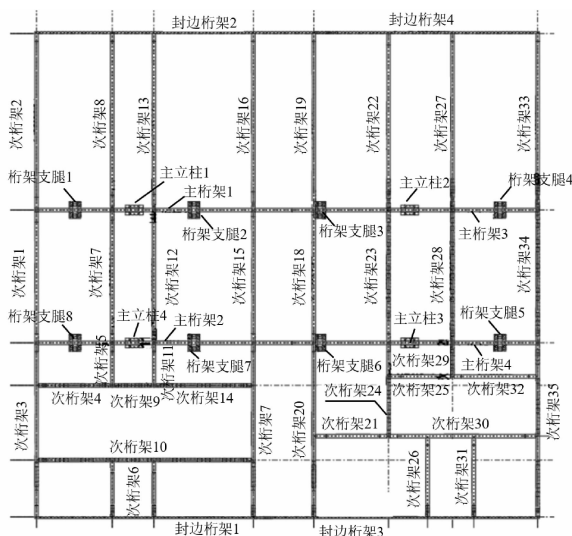


图1 顶模钢桁架主次桁架平面布置

Fig.1 Plane layout of primary and secondary trusses of jacking formwork steel truss

为了方便模板的拆装和外架杂物的清理,外架结构与核心筒墙体之间应预留一定的空间(工程预留 400~500 mm)。钢框架结构作为模板、挂架、施工机具和施工材料的载体,其结构承载能力、刚度必须满足规范要求。钢框架结构位于 4 个主立柱之上,与立柱刚性连接,将模板、挂架、施工机具和材料的荷载通过钢框架传至主立柱。

2.2 钢框架结构拓扑优化模型的建立

2.2.1 单元类型选择

建立拓扑优化初始结构的有限元模型应当注意结构的受力和约束特点^[25-26],且模型要便于计算。通过对顶模钢框架结构特点及约束形式分析,根据有限元软件对单元性质分析来看,本文建立拓扑优化的初始模型应当选用实体单元。

2.2.2 单元参数设置

组成顶模钢框架的主次桁架初始结构建模,模型均可用厚度为 200 mm 的平板来模拟,顶模封边桁架初始建模可用厚度为 100 mm 的平板来模拟。在材料属性定义中定义材料弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.3,结构材料密度为 $7\ 850\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。顶模钢框架结构初始有限元模型如图 2 所示。

2.2.3 约束条件的设置和荷载的施加

模架结构承受钢框架自重、模板、挂架、钢平台自重、钢筋和施工人员荷载。顶模钢框架与主立柱之间为刚性连接,在有限元软件中定义顶模钢框架中主桁架与 4 个主立柱连接处约束均为全自由度,即全约束。拓扑优化初始模型(图 3)荷载施加选用

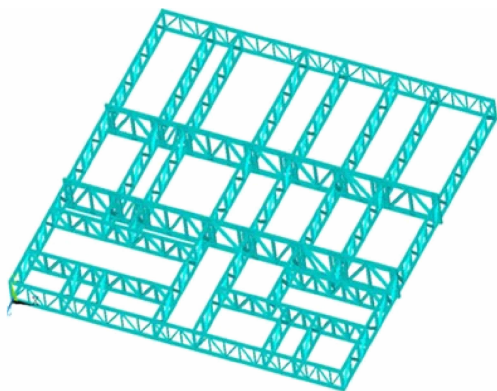


图 2 顶模钢桁架结构初始有限元模型

Fig. 2 Initial finite element model of jacking formwork steel truss structure

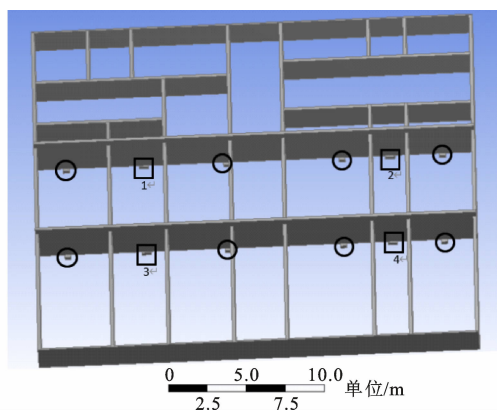


图 3 拓扑优化初始模型

Fig. 3 Initial model diagram for topology optimization

1.35D+0.98L 的荷载组合,其中恒载 D 包括钢框架自重共 104 t,钢模板重量 $315 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,共 110 t,挂架重量(不含挂架梁自重) $274 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,共 95 t,挂架梁自重共 50 t;活载 L 包括施工人员重量和钢筋堆载重量,其中挂架走廊在施工阶段活载为 1.5 kPa ,按双层走廊计算,顶升阶段、立柱提升阶段走廊活载为 0 kPa ,钢框架平台在施工阶段平台活载为 1.5 kPa ,钢筋堆载为 40 t,顶升阶段、自爬阶段平台活载为 0.5 kPa ,无钢筋堆载。

2.2.4 定义拓扑优化目标及设计约束

对图 3 所示的顶模钢框架主次桁架进行优化,要求是在满足主、次桁架悬挑端竖向位移不超过其计算长度的 $l/125$,即 $2l/250$ 的基础上将结构体积缩减至最小,其中 l 为次桁架杆件在有效约束点间的几何长度。

目标函数为结构体积最小;设计约束为主、次桁架结构竖向变形即挠度不大于其计算长度的 $2l/250$ 。

2.2.5 执行迭代

完成上述定义后便可将图 3 所建模型代入至有限元软件自带的拓扑优化求解器中进行迭代优化,本次迭代优化以结构体积最小为优化目标,以结构次桁架悬挑端挠度变形不超过设计规范值为优化约束,经过 29 次迭代后得出拓扑优化结果,取拓扑优化后结构的密度阈值为 0.3,得到最终拓扑优化结果,具体优化结果如图 4 所示。

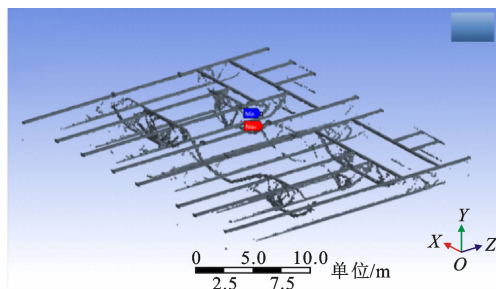


图 4 初始模型拓扑优化结果

Fig. 4 Topology optimization results of initial model

由分析结果可知,该结构主桁架靠近主立柱的上、下弦杆区域材料分布较多,因此主桁架靠近主立柱区域上、下弦杆杆件截面需要加强,主桁架靠近主立柱区域腹杆增多且呈树冠状分布,优化结果显示主桁架上弦杆跨中无需材料,但考虑到结构的稳定,在后面的建模中应该补上。钢框架结构次桁架悬挑端材料分布较少,而次桁架靠近主桁架的部分结构材料分布较多,因此在设计次桁架时靠近主桁架处次桁架上下弦杆杆件截面应增大,次桁架悬挑端应力较小,杆件截面可适当减小,优化结果显示次桁架无需腹杆,但为保证优化后的结构稳定,后面的建模中应该把腹杆补上。

从拓扑优化结果中可以看出,钢框架结构整体的拓扑传力路径比较清晰,可以作为优化结果的建模指导。考虑到生产工艺等实际情况的约束,为方便顶模钢框架的加工生产,依照可制造化原则^[16]对拓扑优化后的结构杆件采用标准型钢进行替换,对构件缺失或不完整的部分进行补全和改进,型钢搭建拓扑优化后的顶模结构如图 5 所示。

2.3 拓扑优化前后顶模钢框架结构性能对比

本文研究顶升模架系统承载能力极限状态下荷载效应的基本组合选用 $1.35D+0.7 \times 1.4L$, $1.2D+0.98L+1.4W$ 为顶模结构抗侧移极限状态时的荷载组合,其中 W 为本工程所受风荷载,按照西安地区 10 年一遇基本风压和垂直于 3 号次桁架平面的风向考虑,基本风压取值 0.25 kPa 。由于顶

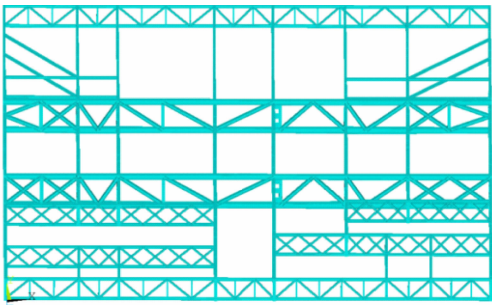


图 5 型钢搭建拓扑优化后的顶模结构

Fig. 5 Jacking formwork structure with topology optimized steel frame construction

升模架系统在风烈度超过 6 级时便不会再顶升和提
升,因此风荷载对钢框架结构影响研究只会在施工
工况中提到。

2.3.1 拓扑优化前顶模钢框架结构分析结果

拓扑优化前结构承载能力极限状态下的应力、
位移云图如图 6 所示。由图 6 可知,顶模结构在施
工工况下钢框架结构位移矢量和为 88.09 mm,结
构在荷载作用下竖向位移最大值为 87.74 mm,顶
模钢框架结构应力最大值为 310.79 MPa。

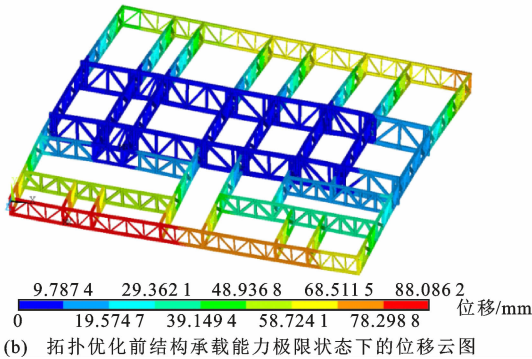
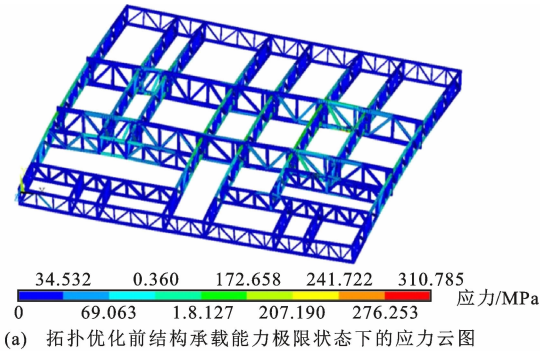


图 6 拓扑优化前结构承载能力极限状态下的应力、
位移云图

Fig. 6 Stress and deformation cloud diagram under limit
state of structural bearing capacity before topology
optimization

2.3.2 拓扑优化后顶模钢框架结构分析结果

拓扑优化后结构承载能力极限状态下的应力、

位移云图如图 7 所示。由图 7 可知,优化后的顶模
结构在施工工况下钢框架结构位移矢量和为 78.25
mm,结构在荷载作用下竖向位移最大值为 77.97
mm。最大位移处在桁架悬挑端,结构在风荷载作
用下水平方向的位移最大值为 75.4 mm,位于次桁
架靠近悬挑端,结构应力最大值为 216.69 MPa,位
于次桁架上弦杆处。

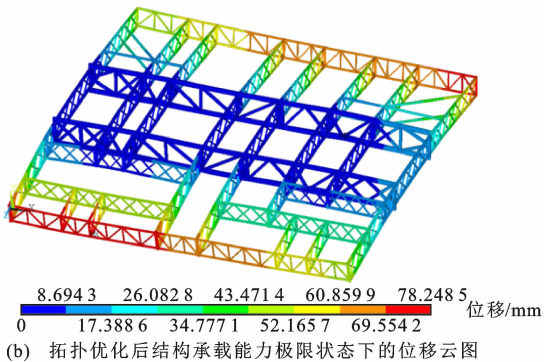
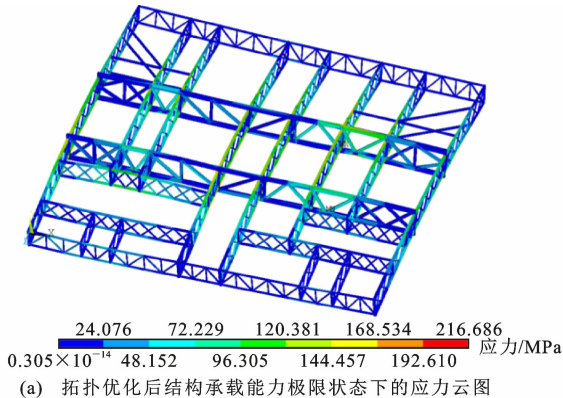


图 7 拓扑优化后结构承载能力极限状态下的应力、
位移云图

Fig. 7 Stress and displacement cloud diagram under limit
state of structural bearing capacity after topology
optimization

2.3.3 拓扑优化前后结构性能对比

拓扑优化前后的顶模钢框架结构在施工工况下
结构应力、位移及结构质量对比结果如表 1 所示。

表 1 拓扑优化前后顶模钢框架结构对比

Table 1 Comparison of jacking formwork steel frame
structure before and after topology optimization

性能指标	应力/MPa	位移/mm	质量/t
拓扑优化前	310.79	88.09	104.00
拓扑优化后	216.69	78.25	82.78

针对本文所研究的超高层建筑顶升模架系统结
构中的钢框架结构,选用拓扑优化法重新规划了结
构材料在空间的分布形式,使得结构受力更加合理。
通过有限元模拟计算得出新结构应力从优化前的

310.79 MPa 减至优化后的 216.69 MPa,位移从优化前的 88.09 mm 减至优化后的 78.25 mm,质量从优化前的 104 t 减至优化后的 82.78 t,在提升结构承载能力、刚度的同时也使得钢框架自身重量减轻 20%,降低工程用钢量,提升了钢材的使用效率。

3 系统化安装

在拓扑优化设计工作完成之后,从模型中导出工厂生产所需构件数据,传输至数字化管理平台和中央控制系统,实现预制构件生产,构件生产完成并通过质量验收后,将生产的构件按照一定流程系统化安装(图 8),具体流程为在地面拼装液压主立柱、支腿桁架、支腿、导向腿→地面拼装主次桁架→整体吊装支撑结构(支撑立柱、支腿、导向腿)就位→连接控制系统→吊装主次桁架→主次桁架与支撑立柱连接→安装次桁架下部型钢→安装内外挂架→吊挂体系连接模板→铺设上部工作平台及堆料平台。

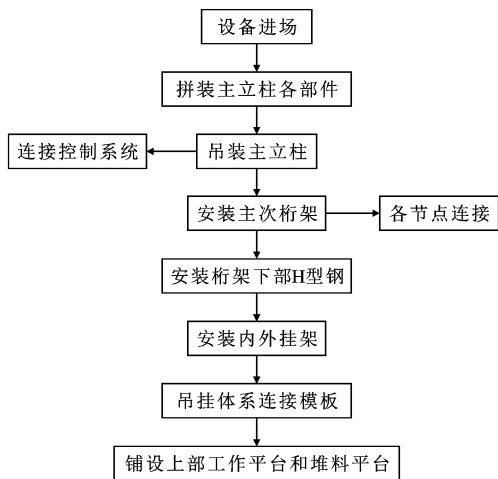


图 8 顶模安装流程图

Fig. 8 Installation flow chart of jacking formwork

主桁架组拼完成后,需要现场塔吊进行整体吊装。

4 智能化施工

智能化超高层建筑顶模钢框架系统由 4 个液压升降伸缩主立柱、主桁架、次桁架、墙模板及完整的多层作业平台组成,其目的是可以一次性地将整个核心筒的内外墙模板提起,并在浇注循环周期结束后,利用智能化控制操作实现自爬。

本工程顶升模架系统由桁架吊挂竖向模板组成,主要用于竖向墙体结构施工及该阶段的安全防护。由 4 个大行程的液压油缸驱动的支撑主立柱坐在浇筑好并有一定强度的墙顶上,顶升其上的主次

桁架和封边桁架体系。桁架的上弦上部有完整的上工作平台,下部吊有模板及内外挂架(模板装拆及钢筋绑扎的工作平台)。自爬时,桁架支腿支在墙顶上,主立柱上的支腿导向腿收回,主立柱自爬到上层墙顶。绑筋,拆模,顶升,合模,浇混凝土,完成竖向混凝土结构施工,而后自爬。再重复同样的过程,在不用塔吊的条件下实现模板的垂向施工。顶升自爬模板体系包括钢桁架系统、支撑与顶升系统、挂架与安全防护系统以及模板系统。

智能化控制操作中通过触摸屏总控制面板(图 9)来控制提升方式,可以同时一次性提升所有的墙模和挂架。可编程的浇注高度和每个主立柱的位置显示可以实现精确的移动,独立触摸屏控制可以实现每一根主立柱的支撑腿单独自爬。自动同步定位以确保整个桁架体系在顶升过程中,始终处于同一水平状态。

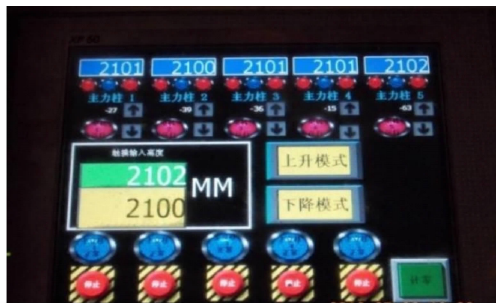


图 9 智能化控制系统

Fig. 9 Intelligent control system

5 结语

(1)针对顶模钢框架自重过大、结构承载能力、刚度不足的问题,应用 SIMP 插值模型法,以结构位移为约束条件,以结构体积最小为优化目标,通过不同参数控制进行拓扑优化,得出优化后的钢框架结构。

(2)优化型顶模钢框架结构在满足结构安全、正常使用的前提下,其应力和位移在减小的同时自重减轻了 20%。

(3)顶升模架系统通过拓扑优化设计结合智能化控制操作等工具实现智能建造,可有效替代人工,进行安全、高效、精确的施工作业,促进建筑业与先进信息技术、节能技术的融合,推动中国建筑业实体经济的快速发展。

参考文献:

References:

[1] 曾凡奎,穆召龙,张建华.某超高层核心筒大行程顶升

- 模架设计与施工[J]. 钢结构, 2016, 31(10): 84-87, 92.
- ZENG Fankui, MU Zhaolong, ZHANG Jianhua. Great-trip jacking formwork design and construction for the core tube of a super high-rise building[J]. Steel Construction, 2016, 31(10): 84-87, 92.
- [2] 王建波, 王天爽, 刘书建. 超高层核心筒吊模工艺模板体系选择及节点设计[J]. 施工技术, 2017, 46(9): 132.
- WANG Jianbo, WANG Tianshuang, LIU Shujian. Selection of formwork system and joint design of hanging formwork for super-high-rise core tube[J]. Construction Technology, 2017, 46(9): 132.
- [3] 曹鹏, 宗乃旭. 海外超高层项目模架体系探析[J]. 施工技术, 2019, 48(2): 67-73.
- CAO Peng, ZONG Naixu. Study on formwork system of overseas super high-rise building[J]. Construction Technology, 2019, 48(2): 67-73.
- [4] 汪大绥, 包联进. 我国超高层建筑结构发展与展望[J]. 建筑结构, 2019, 49(19): 11-24.
- WANG Dasui, BAO Lianjin. Development and prosperity of structural design of super tall buildings in China[J]. Building Structure, 2019, 49(19): 11-24.
- [5] 张慎, 尹鹏飞, 王杰, 等. 超高层建筑结构方案智能设计工具的开发与实现[J]. 建筑结构, 2022, 52(23): 100-106, 138.
- ZHANG Shen, YIN Pengfei, WANG Jie, et al. Development and implementation of intelligent design tool for super high-rise building structure scheme[J]. Building Structure, 2022, 52(23): 100-106, 138.
- [6] SHAPIRA A. Rational design of shoring-tower-based formwork[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 1995, 121(3): 255-260.
- [7] 祖公博, 曾小辉, 胡亮, 等. 基于超高层建筑核心筒钢筋超层绑扎的爬模优化技术[J]. 建筑施工, 2022, 44(7): 1584-1588.
- ZU Gongbo, ZENG Xiaohui, HU Liang, et al. Climbing formwork optimization technology based on passing layer binding of core tube reinforcement in super high-rise building[J]. Building Construction, 2022, 44(7): 1584-1588.
- [8] ZHOU J Z, LIN Q, LIAO M P, et al. Application of modularized low-position jacking formwork system in core-tube building[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 405-408: 3103-3107.
- [9] 张国光. 爬模系统在迪拜 Al Hikma 大厦施工中的应用[J]. 建筑技术, 2014, 45(8): 693-695.
- ZHANG Guoguang. Application of climbing formwork system in construction of Al Hikma tower project of Dubai[J]. Architecture Technology, 2014, 45(8): 693-695.
- [10] 曾凡奎, 穆召龙, 张建华. 某超高层建筑核心筒大行程顶升模架施工技术[J]. 钢结构, 2017, 32(9): 110-114, 46.
- ZENG Fankui, MU Zhaolong, ZHANG Jianhua. Construction techniques of long-trip jacking formwork of a super high-rise building core tube[J]. Steel Construction, 2017, 32(9): 110-114, 46.
- [11] 张颖. 13 部门联合发文推动智能建造与建筑工业化协同发展[J]. 中国勘察设计, 2020(8): 6.
- ZHANG Ying. 13 departments jointly issued a document to promote the coordinated development of intelligent building and building industrialization[J]. China Engineering & Consulting, 2020(8): 6.
- [12] 《住宅产业》编辑部. 十三部门联合发文推动智能建造与建筑工业化协同发展[J]. 住宅产业, 2020(7): 7.
- Editorial Department of *Housing Industry*. 13 departments jointly issued papers to promote coordinated development of construction intellectualization and building industrialization[J]. *Housing Industry*, 2020(7): 7.
- [13] 廖玉平. 加快建筑业转型 推动高质量发展:《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》解读[J]. 住宅产业, 2020(9): 10-11.
- LIAO Yuping. Accelerating construction industry transformation of and promoting high quality development — interpretation of the “guiding opinions on promoting coordinated development of intelligent construction and construction industrialization” [J]. *Housing Industry*, 2020(9): 10-11.
- [14] 关婧. 推进建筑机械智能化 促进建筑施工安全管理: 建筑业建筑安全与机械(专业)专家工作经验交流会在长沙市召开[J]. 建筑安全, 2021, 36(6): 4.
- GUAN Jing. Promoting the intelligentization of construction machinery and promoting the safety management of construction — an exchange meeting on the working experience of experts in construction safety and machinery (specialty) was held in Changsha[J]. *Construction Safety*, 2021, 36(6): 4.
- [15] 邹春光. 建筑施工智能化现状与展望[J]. 科技风, 2021(11): 117-119.
- ZOU Chunguang. Status and prospect of intelligent building construction [J]. *Technology Wind*, 2021(11): 117-119.
- [16] 苑康文. 智能化背景下土木工程施工技术应用[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(10): 79-80.

- YUAN Kangwen. Application of civil engineering construction technology under background of intelligence[J]. Building Technology Development, 2021, 48(10):79-80.
- [17] 恽燕春,阮玲波,丁泓.智能建造与建筑工业化协同发展实践应用[J].施工技术,2021,50(10):1-4.
- YUN Yanchun, RUAN Lingbo, DING Hong. Application of coordinated development of intelligent construction and building industrialization[J]. Construction Technology, 2021, 50(10):1-4.
- [18] 毛超,彭窑胭.智能建造的理论框架与核心逻辑构建[J].工程管理学报,2020,34(5):1-6.
- MAO Chao, PENG Yaoyan. The theoretical framework and core logic of intelligent construction[J]. Journal of Engineering Management, 2020, 34(5):1-6.
- [19] 刘占省,孙佳佳,杜修力,等.智慧建造内涵与发展趋势及关键应用研究[J].施工技术,2019,48(24):1-7, 15.
- LIU Zhansheng, SUN Jiajia, DU Xiuli, et al. Smart construction connotation and development trend and key application research[J]. Construction Technology, 2019, 48(24):1-7, 15.
- [20] 焦洪宇,周奇才,李英.基于SIMP材料插值模型的周期性结构拓扑优化[J].应用力学学报,2014, 31(4):578-581, 9.
- JIAO Hongyu, ZHOU Qicai, LI Ying. Optimal design of periodic structures using SIMP method[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(4):578-581, 9.
- [21] 丁卯,耿达,周明东,等.基于变密度法的结构强度拓扑优化策略[J].上海交通大学学报,2021, 55(6):764-773.
- DING Mao, GENG Da, ZHOU Mingdong, et al. Topology optimization strategy of structural strength based on variable density method[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(6):764-773.
- [22] ZHANG S S, LI H M, HUANG Y C. An improved multi-objective topology optimization model based on SIMP method for continuum structures including self-weight[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 63(1):211-230.
- [23] CHU S, XIAO M, GAO L, et al. Topology optimization of multi-material structures with graded interfaces[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 346:1096-1117.
- [24] 陈弼,叶堃,杨春鹏,等.基于有限元分析的某型雷达天线舱框架的拓扑优化减重设计[J].雷达与对抗,2021,41(2):48-51.
- CHEN Bi, YE Kun, YANG Chunpeng, et al. Topology optimization and weight reduction design of a radar antenna cabin frame based on finite element analysis[J]. Radar & ECM, 2021, 41(2):48-51.
- [25] 赵传凯,杨振宇,高原.基于动力特性的整体钢平台模架体系优化设计分析[J].施工技术,2015,44(8):25-29.
- ZHAO Chuankai, YANG Zhenyu, GAO Yuan. Optimum design of integral steel platform system based on dynamic characteristics[J]. Construction Technology, 2015, 44(8):25-29.
- [26] 王登峰,毛爱华,牛妍妍,等.基于拓扑优化的纯电动大客车车身骨架轻量化多目标优化设计[J].中国公路学报,2017,30(2):136-143.
- WANG Dengfeng, MAO Aihua, NIU Yanyan, et al. Lightweight multi-objective optimization design for body frame of pure electric large bus based on topology optimization[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2):136-143.
- [27] 王文甲,吴长风,张勇,等.客车骨架局部结构的多工况拓扑优化设计[J].客车技术与研究,2018, 40(1):26-29.
- WANG Wenjia, WU Changfeng, ZHANG Yong, et al. Topology optimization design of bus local framework structure under multiple conditions[J]. Bus & Coach Technology and Research, 2018, 40(1):26-29.
- [28] XU S Z, LIU J K, ZOU B, et al. Stress constrained multi-material topology optimization with the ordered SIMP method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021, 373:113453.