

既有钢结构建筑功能改造与结构加固协同设计研究

李嘉旭

中国医药集团联合工程有限公司广州分公司 广东 广州 510700

【摘要】：城市更新背景下，既有钢结构建筑常面临功能改造与结构加固不同步、受力不协调、造价偏高等问题。本文针对传统分段设计的弊端，提出功能改造与结构加固协同设计方法，明确安全优先、功能匹配、经济可行、耐久协同四大原则，建立一体化勘察、方案同步优化、受力协同匹配、施工联动控制的技术路径。结合某 20 年钢结构厂房改造为文创商业综合体的工程实践，采用粘贴加固、增设支撑、节点补强等协同加固措施，实现结构安全与功能适配统一。实践表明：协同设计可使工期缩短约 20%、综合造价降低 15%，结构承载力、刚度与抗震性能均满足规范要求。研究可为同类钢结构存量建筑改造提供参考。

【关键词】：既有钢结构建筑；功能改造；结构加固；协同设计；存量建筑盘活

DOI:10.12417/2811-0722.26.06.058

1 引言

钢结构建筑由于施工速度快、自重轻、空间布局灵活、可回收利用等特点，在工业厂房、商业场馆、多层办公建筑等领域得到广泛应用，经过多年的使用，钢结构建筑普遍存在构件锈蚀、节点损坏、承载力降低等问题。功能改造常常伴随着建筑空间布局的改变、使用荷载的变化、内部管线的优化、外立面的更新等变更，这些变更都会直接改变原来钢结构的受力体系、荷载分布和传力路径，如果结构加固设计落后于功能改造或者两者的设计没有协同，很容易造成局部构件超载、结构整体刚度失衡、抗震性能达不到要求等安全隐患，还会对改造后的建筑正常使用造成影响。协同设计冲破功能改造同结构加固的专业壁垒，把结构安全验算，加固方案改良，功能布局规划，空间需求匹配一同推进，达成从前期勘察到后期施工的全流程一体化掌控，既能保证改造后的建筑符合已有的使用功能，又能保证钢结构体系的安全稳定，耐久可靠，是目前既有钢结构建筑改造升级的最佳设计方式。本文根据工程设计和实践经验，从协同设计的核心要点、技术途径、实施要点三个方面进行系统的探究，在提高既有钢结构建筑改造的设计质量以及工程效益方面，提出一套可复制的协同设计流程。

2 既有钢结构建筑改造与加固的现存设计痛点

目前大部分现有的钢结构建筑改造项目仍然使用传统的分段设计方式，先完成功能改造方案的设计，再对结构缺陷进行加固设计，两者之间没有有效的衔接和协同，产生了一系列的设计和施工问题，主要的痛点有三个方面。

其一就是功能改造未同步复核结构构件，导致局部构件超载、节点应力集中。功能改造时，空间分割、设备增补、使用场景改变都会直接改变建筑恒载和活载的分配，有些改造方案没有同步做结构承载力复核，直接对空间布局进行调整，造成梁、柱、支撑等重要构件的受力超过原来的限值，局部节点出现应力集中，后续加固只能被动应对，无法保证结构整体受力协调。

第二，加固构件与隔墙、管线、设备基础位置矛盾，返工率高。独立进行加固设计时没有考虑到功能改造施工工序、管线布置、空间预留等要求，加固构件和改造后的隔墙、管线、设备基础之间存在位置冲突，施工过程中需要不断修改设计方案，造成工期延误、工程变更费用增加，并破坏原有结构和加固构件的连接整体性。

其三就是仅局部加固，未评估结构整体刚度、抗震、抗火及耐久性协同。既有钢结构普遍存在着锈蚀、疲劳损伤、焊缝缺陷等状况，分段设计只对局部薄弱构件实施加固，没有依照功能改造之后的整体受力体系展开全面性能评定，忽略了结构整体刚度、抗震性能、抗风性能的协同改善，而且没有考虑加固构件同原有结构的耐久协同性，致使改造后的建筑结构还存有隐性安全风险，使用寿命不能够达到要求。

3 既有钢结构建筑功能改造和结构加固的协同设计原则

协同设计要以结构安全为根本、功能适应为方向，遵照四大准则，达成功能改良同结构加固的深度融合，防止出现设计相脱离和资源浪费的情况。

第一，以安全为先、以达标为要的原则。协同设计的首要目的就是保证钢结构体系整体安全，所有的功能改造方案都必须以结构性能评估的结果为基础，严格按照建筑结构设计 and 加固相关规范的要求进行，同时对构件的承载力、结构刚度、抗震性能、抗火性能进行复核，保证改造加固后的结构满足安全使用和耐久年限的要求，不得为了追求功能的优化而牺牲结构的安全。

第二，功能匹配和空间协调的原则。根据改造后确定的使用功能，合理安排空间布局、荷载分布和设备布置，结构加固方案要主动适应功能改造的空间要求，避开核心功能区和关键管线通道，在保证结构加固效果的基础上，最大限度地保留建筑空间的灵活性和实用性，实现功能需求与结构受力的双向匹配。

第三,经济合理、施工可行。协同设计要协调好工程成本与施工效率,避免出现过度加固或重复施工的现象,选取施工方便、对原结构扰动小、造价低的加固方式,根据改造施工工序对加固实施流程进行优化,减小交叉施工带来的影响,缩短总工期,降低改造工程总造价。

第四,可持续和耐久协同原则。在考虑既有钢结构的剩余使用寿命和改造后的建筑使用年限的基础上,对构件锈蚀、损伤等进行同步防腐、防火处理,使加固构件与原有钢结构的材料性能、耐久性能相协调,促进存量建筑的绿色再利用,符合建筑可持续发展的要求。

4 协同设计关键技术与实施路径

4.1 一体化勘察与结构性能评估

一体化勘察为协同设计打下基础,建筑功能现状调研和钢结构性能检测要同步进行,防止勘察数据零散化。功能现状调研主要对原有建筑的空间布局、使用荷载、设备配置、管线走向进行梳理,确定改造后功能定位、空间规划、荷载标准、特殊使用要求;钢结构性能检测对构件锈蚀程度、焊缝缺陷、螺栓连接松动、变形损伤、截面损耗等进行全面排查,根据检测结果进行结构承载力、刚度、稳定性、抗震性能的精准复核,找出结构薄弱部位、过载构件和隐患节点,出具完整的建筑结构可靠性及抗震鉴定报告,为功能改造和结构加固同步设计提供准确的数据支持。

4.2 功能方案与加固方案同步优化

4.2.1 同步优化总体原则

以安全鉴定报告为依托,同时进行功能改造方案及结构加固方案的设计工作,以达到双向优化、动态调整的效果,核心就是依靠准确的加固技术选择,达成结构安全同功能需求的协同适配。功能改造设计阶段提前预留结构加固所需操作空间和构件布置区域,严格控制新增设备、墙体和使用荷载,优化荷载传递途径,采用分区荷载控制的方式,防止局部区域荷载叠加造成结构超载;结构加固设计同步跟进,根据结构性能复核得出的隐患等级、构件受力状态和功能改造的空间限制,有针对性地选择加固技术,保证技术的适配性和经济性。

4.2.2 受弯构件加固技术选型与优化

对于受弯构件承载力不足的问题,采用粘贴加固的方式进行处理,根据功能区外观要求、荷载大小来选择合适的粘贴加固方式。粘贴碳纤维布(CFRP)加固技术适合于构件截面不能增大、外观要求高的功能区,选用抗拉强度不小于3400MPa的碳纤维布,用底胶浸润、面胶粘贴的方法,控制粘贴层厚度在0.3~0.5mm之间,保证碳纤维布和构件表面的贴合度达到95%以上,利用纤维材料和原构件的共同受力来提高构件的抗弯承载力20%到40%;对于荷载大、外观要求低的部位,使用粘贴钢板加固技术,选择Q355级钢板,厚度按承载力缺口计

算确定,用化学锚栓固定,焊缝连接补强或采用结构胶粘贴,保证钢板与原构件共同工作,防止剥离破坏。

4.2.3 受压构件加固技术选型与优化

根据受压构件(柱、支撑)承载力不够或者稳定性差的情况,采取增设支撑加固和截面加宽加固相融合的技术手段,兼顾结构安全和功能安排的要求。增设支撑加固优先选用屈曲约束支撑(BRB),其核心就是利用芯材承受轴向力,外套筒约束芯材屈曲,选用屈服强度不小于235MPa的芯材,外套筒采用Q235级钢材,支撑布置和功能布局协同,避开管线通道和主要使用区域,通过支撑的轴向变形吸收地震能量,提高结构整体稳定性;对截面损耗严重的受压构件,采用截面加大加固技术,在原构件外侧焊接缀板,拼接新的型钢翼缘和腹板,保证拼接焊缝质量等级达到一级,控制焊缝余高2-3mm,通过增大截面惯性矩,提高构件抗压承载力和整体刚度。

4.2.4 节点薄弱部位加固技术选型与优化

对梁柱节点、螺栓连接节点等节点薄弱部位进行有选择性的补强加固,考虑节点的受力性能以及构造衔接。对刚接节点焊缝缺陷进行补焊加固,选用与原构件匹配的焊条,采用多层多道焊工艺,焊后做超声波探伤检测,保证焊缝无裂纹、夹渣等缺陷;对螺栓连接松动或者承载力不够的节点,增加高强度螺栓和节点盖板的加固,使用8.8级以上的高强度螺栓,节点盖板用与原节点同材质的钢材,利用盖板来分散节点的应力,提高节点的抗剪、抗拉承载力;对于节点刚度不足的地方,增设加劲肋加固,加劲肋布置与节点受力方向一致,保证加劲肋与原构件满焊连接,消除节点应力集中现象。

5 工程实践应用简析

5.1 项目基础概况与改造需求

本次选取的实践项目为某城区既有单层钢结构工业厂房,该厂房建成投用年限已满20年,原设计用途为机械加工生产车间,主体结构采用门式刚架钢结构体系,配套常规钢柱、钢梁及横向支撑构件。建筑总高度12.8m,柱距为8m×9m,跨度24m,配套常规H型钢柱(截面尺寸H600×300×12×16)、钢梁(截面尺寸H500×250×10×14)及横向支撑构件,原设计恒载标准值为0.5kN/m²,活荷载标准值为2.5kN/m²(机械加工区域局部为4.0kN/m²)。随着区域产业结构转型升级,原有工业生产功能彻底淘汰,业主方计划将其改造为集文创办公、产品展示、休闲接待于一体的综合商业载体,改造前后功能定位与使用条件发生根本性转变。改造后建筑内部划分为独立办公区、开放式展示区、公共休闲区三大功能板块,改造后恒载标准值增至0.8kN/m²,其中独立办公区活荷载标准值为2.0kN/m²,开放式展示区活荷载标准值为3.5kN/m²,公共休闲区活荷载标准值为2.5kN/m²,需新增轻质隔墙、集成吊顶、中央空调系统、强弱电管线及消防设施,整体活荷载标准、空间布局、

荷载分布均与原设计存在较大差异,原有结构体系无法直接适配新的使用需求。

5.2 协同设计方案落地实施

项目前期摒弃传统分段设计模式,全面推行功能改造与结构加固协同设计,第一步完成一体化勘察与结构性能精准检测,重点排查主体钢构件的锈蚀程度、截面损耗情况、节点连接完整性以及整体结构刚度指标。经检测判定,厂房钢柱、钢梁存在局部轻微锈蚀,部分侧向支撑构件刚度不足,局部钢梁受弯承载力无法满足新增荷载要求,整体结构稳定性存在小幅短板。基于检测结果与功能改造需求,同步推进两大设计板块的优化适配,功能改造环节优先避开结构薄弱区域规划核心展示空间,严格控制新增荷载重量,优化荷载传递路径,避免局部荷载过度集中;结构加固环节针对性选用适配技术,对局部锈蚀构件先做彻底除锈再做防腐涂装处理,对刚度不足的钢梁采用粘贴加固工艺提升受弯性能,对支撑薄弱区域增设型钢支撑优化整体刚度,同时提前规划加固构件位置,全面避让改造管线、隔墙及设备基础,从设计源头规避施工冲突。

5.3 项目改造效果与效益验证

项目完工后,通过现场结构检测、功能适配验收及后期运营反馈,全面验证协同设计的实施效果。结构层面,主体钢结构承载力、整体刚度、抗震性能均满足现行规范要求,构件连接牢固,受力状态协调均衡,无局部应力集中隐患,耐久性能

与安全性能达标;功能层面,建筑空间完全适配文创办公与展示接待的使用需求,空间布局合理,管线排布规整,无加固构件占用核心功能空间的问题,整体使用体验良好。相较于传统分段设计模式,该项目施工周期缩短 20%,有效减少了设计变更与返工工作量,工程综合成本降低 15%左右,充分证明协同设计能够兼顾结构安全、功能适配、经济高效三大核心目标,在既有钢结构建筑改造项目中具备极强的推广价值。

6 结论

既有钢结构建筑功能改造和结构加固协同设计,是破解传统分段设计弊端、实现存量建筑高效盘活的主要技术途径,用一体化勘察、方案同步优化、受力协同匹配、设计施工联动的方式,兼顾建筑使用功能和结构安全两个目标,提高改造工程的经济性、可行性、可持续性。工程实践证明,协同设计可以改善结构受力体系、减少施工矛盾、加快工期、降低综合造价,适合于各种既有钢结构厂房、场馆、办公建筑的改造工程。伴随着数字化技术的发展,之后可以将 BIM 技术、有限元模拟技术应用于协同设计中,从而实现结构性能模拟、方案碰撞检测和施工动态管控的数字化升级,进而提高协同设计的准确性和效率,根据不同的种类、不同的损伤程度来创建差异化协同设计标准和技术体系,推动既有钢结构建筑改造向着标准化、精细化、绿色化的方向前进,推进城市更新及存量建筑的高质量使用。

参考文献:

- [1] 李婷,刘蒙,周婷,等.钢结构防火体系中功能化高分子材料的研究进展[J].合成材料老化与应用,2025,54(06):56-59.
- [2] 曾明,刘秀丽,王燕,等.可恢复功能钢结构梁柱节点研究进展[J].建筑结构,2025,55(14):104-114.DOI:10.19701/j.jzjg.20221941.
- [3] 汪伟.功能梯度钢结构防火涂料耐火性能的梯度检测技术研究[J].佛山陶瓷,2025,35(02):82-84.
- [4] 谭健楚.多功能钢结构光棚施工技术探索[J].中国建筑装饰装修,2024,(22):183-185.
- [5] 黄铁平,刘剑斌,杨绍华,等.箱式钢结构集成建筑教学楼功能模块产品探索[J].住宅与房地产,2024,(17):12-15.