

Analysis of Lifting Operation Methods in Confined Spaces

Xiaoming Zhao Chaojun Zhang Yuanzhi Wang

China Railway Engineering Equipment Group technical Service Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 461000, China

Abstract

This paper addresses the challenges of lifting operations in confined spaces, such as large underground facilities and renovation/expansion projects, highlighting the necessity and value of confined space lifting technology in terms of economic efficiency, safety assurance, and technological innovation. Through boundary condition analysis, the fundamental roles of geological, hydrological, and structural factors in formulating lifting plans are emphasized. Key techniques including hydraulic synchronous lifting, hydraulic self-climbing gantry cranes, and multi-equipment combined lifting methods in complex spaces are discussed, underscoring their advantages in precision, safety, and adaptability. The study notes that these technologies rely on simulation analysis, system integration, and detailed project management, and looks forward to the future development of lifting systems toward intelligence, unmanned operations, and sustainability.

Keywords

confined space; simulation analysis; lifting methods; synchronous lifting; equipment combination

关于受限空间吊装作业方法的浅析

赵小明 张朝军 王远志

中铁工程装备集团技术服务有限公司，中国·河南郑州 450016

摘要

本文针对大型地下设施、改扩建项目等现场空间受限的吊装作业难题，系统分析了受限空间吊装技术的必要性及其在经济效益、安全保障与技术创新方面的价值。通过边界条件分析，强调地质、水文与构筑物结构等因素对吊装方案的基础性作用。重点探讨了液压同步提升技术、液压顶升门式起重机以及复杂空间下的多设备组合吊装方法，突出其在精度、安全性和适应性方面的优势。文章指出，该类技术依赖于仿真分析、系统集成与精细化项目管理，并展望了未来吊装系统向智能化、无人化与绿色化方向的发展趋势。

关键词

受限空间；仿真分析；吊装方法；同步提升；设备组合

1 引言

许多大型地下设施、改扩建项目（如老旧厂房设备更新、市政管网下地、地铁站建设等）的现场空间极为苛刻，传统的大型、开放式吊装方法根本无法实施，受限空间吊装技术是唯一能完成任务的途径。

解决“不可达”与“不可逆”的工程矛盾，是实现现代化大型设施建设、改造和维护的关键技术保障，其价值体现在经济效益、安全保障和技术创新等多个维度。相比于“拆墙破屋”或“大开挖”来创造吊装空间，采用精密的受限空间吊装方案虽然前期技术准备成本高，但避免了巨大的结构破坏和恢复成本，总体上节省了时间和金钱，并减少了对周边环境和现有生产的干扰。

2 边界条件分析

首先要获得受限空间的地质、水文、构筑物结构、建造时序等边界条件，这不仅是开展仿真计算的前提，更是整个受限空间吊装方案成功的基石。将这些边界条件输入仿真模型，就如同为虚拟世界确立物理定律。忽略任何一项，仿真结果都会成为脱离现实的“数字游戏”，可能导致灾难性的现实后果。

地质与水文条件解决“脚下是否稳固”的问题。土壤承载力、土层分布、坡度等直接决定了吊装设备（如汽车吊、履带吊）的支腿布置和地基处理方案。地下水位、土壤含水量等，影响土壤的力学性质，在基坑、隧道等场景中，水文条件更是直接关系到边坡稳定性和作业安全，必须纳入仿真考虑。

构筑物结构解决“能否触碰与依靠”的问题。在受限空间中，经常需要利用现有构筑物的梁、柱、板、墙作为辅助吊点、滑移轨道支撑点或设备锚固点。构筑物的具体尺寸、

【作者简介】赵小明（1987-），男，中国河南许昌人，本科，高级工程师，从事机械设计制造研究。

内部管线、附属设施等，构成了吊装路径上的静态障碍物。

3 吊装方法分类

在现有边界条件下，根据仿真计算分析应力、变形、位移、碰撞风险等，优化吊点位置、设备选型、作业路径等，最终形成安全、可行的吊装方案。具体的吊装方案，在空间受限的情况下，往往需要采用多种设备组合（如液压提升器、滑移轨道、卷扬机等）和巧妙的工装设计。这促进了对现有设备潜力的深度挖掘和组合创新，提高了设备的利用价值。对于自行式起重机吊装，桅杆式起重机等常见设备起重，不在此赘述，更多侧重于与受限空间充分结合的非标专用设备起重。

3.1 液压同步提升技术

使用液压同步提升 / 顶升技术的重型构件吊装，一种广泛应用于大型工程项目的先进技术，通过液压系统实现多个提升器的同步操作，完成重型构件的精准提升和安装。计算机控制多台液压提升器同步工作，精度高可达毫米级、承载能力极大可达上万吨，相对安全可靠。

液压同步提升技术的安全性和成功，几乎完全依赖于固定措施（锚点系统）和受力点安置（吊点设计）的合理性与可靠性。整个系统可以理解为：被提升结构物 \leftrightarrow 吊点 \leftrightarrow 钢绞线 \leftrightarrow 提升器 \leftrightarrow 支承结构（永久或临时）。其中，“固定措施”和“受力点安置”贯穿了整个力流路径。固定措施的核心是为提升系统提供一个绝对稳固、高承载能力的反力支撑。这个支撑体系必须将巨大的提升力安全地传递到基础或永久结构上，主要分为临时支承结构系统和利用永久结构作为支承系统。永久结构支撑是最经济的方式，但必须经过严格的复核计算，当永久结构无法直接作为支撑时，需要专门设计和搭设临时结构支撑。

3.2 液压顶升技术及扩展

液压同步提升技术与顶升技术经常被一起提及，甚至有时被混用，但从严格的技术角度来讲，它们在工作原理、应用场景和系统构成上有本质的区别。相对于液压提升结构夹紧钢绞线的锚具系统，液压顶升的执行机构结构简单，就是一个传统的液压缸。在现代大型工程中，两种技术往往并存，甚至在同一项目中协作，共同构成了重型吊装领域不可或缺的技术支柱，本篇主要探讨液压顶升门式起重机的应用。

液压顶升门式起重机是传统起重机与液压顶升技术精髓的结合，其核心特点是通过液压系统实现门架的升降功能。工作原理可以分为两个主要部分，起重作业原理和自爬升原理，其目的是让起重机能够自己将自己一节一节地顶高，从而达到所需的工作高度。无需依赖其他大型辅助吊车来安装，尤其是在空间受限或无法进入大型吊机的场地，优势极其明显，可以根据项目需求灵活增加或减少标准节数量来调整高度。它通过巧妙的“自爬升”原理，解决了传统起

重机在超高、大吨位、受限空间安装难题，是现代重型工业建设和安装领域不可或缺的关键装备，代表了重型起重设备发展的一个重要方向。代表产品如中铁装备主要参与研制的MGYD400 吨液压顶升门式起重机，在大吨位，低空间高度情况下开展的起吊、移动、高难度翻身等工序作业。



3.3 复杂受限空间多设备组合吊装技术

在通道狭窄、高度受限、转弯等综合复杂空间下的多设备组合吊装技术，是现代工程中展现技术实力和精细化管理的典范。它超越了单一大型设备的力量美学，更侧重于技术巧思和系统集成。此类吊装侧重于模块化，将庞大的吊装任务分解为多个可控的、可并行的小单元，使用标准化设备进行组合。可实现毫米级的微调，特别适合就位精度要求高的安装作业。

一般需要卷扬机，手拉或电动葫芦等动力源提供主牵引，通过预埋件或者化学螺栓法兰等提供承载基础。卷扬机作为核心省力与变向机构，通过多倍率穿绕，将卷扬机的拉力放大数倍至数十倍，从而用小型卷扬机吊起更大重物，同时，能精确改变力的方向，适应复杂路径。滑轨和地坦克提供提供平滑、承重的路径。其中地坦克作为承载重物，实现原地 90° 转向、直行和微调，完美解决狭窄空间内的转弯和长距离移动难题。在此过程中，手拉葫芦可以另外提供微调和安全锁的作用。一是用于精确就位，在最后对口阶段进行毫米级调整；二是作为保险措施提供二次保护，与主吊索具串联，防止意外坠落。三是作为临时悬挂，在调整吊点时固定工件。

当然，以上设备的组合可根据需要增加数量和调整布置方式，便于应对特殊的场景。此种技术的应用绝非设备的简单堆砌，而是基于周密策划的系统集成。前期需要策划与仿真分析，通过 BIM 模型进行碰撞检查，精确规划设备布局、吊装路径、锚点位置，模拟每一步动作，提前发现并解决空间冲突。对每一个吊点、每一根索具、每一段滑轨进行严格的受力计算。校核建筑结构的承载能力。方案必须经过多方评审验证。

在复杂空间下的多设备组合吊装技术，是一门将传统起重智慧与现代工程科技完美结合的艺术。它代表了起重作业从力量型向技术型、智慧型发展的先进方向，是衡量一个团队工程技术能力和项目管理水平的重要标尺。

3.4 风险防控体系构建

3.4.1 风险多维识别与分级

风险识别要贯穿项目整个生命周期，以边界条件分析结果为基础，从环境、设备、人员、工艺四个方面建立风险清单。环境风险主要是地质水文条件突变（地下水位突然上升、土壤液化）、受限空间内有毒有害气体积聚、周边构筑物突然发生变形等；设备风险是液压系统泄漏、锚点疲劳损伤、索具磨损、地坦克等移动设备卡滞等；人员风险是操作技能不达标、安全意识薄弱、应急处置能力不足等；工艺风险是多设备协同误差超标、吊装路径规划疏漏、仿真模型与实际工况偏差等。用风险矩阵法对识别出来的风险进行分层，按风险发生概率和影响程度，分成重大风险、较大风险、一般风险、低风险这 4 种。像锚点失效、重型构件坠落这些属于重大风险，要单独制定防控方案，索具有点磨损、操作稍微走神那种算一般风险，日常巡检加按规矩来就行。

3.4.2 风险防控关键技术与措施

不同的风险等级需要根据吊装技术的特点采取有针对性的控制方法。技术上采用实时监测系统是主要手段之一，在锚点、索具、构件及周边构筑物上安装高精度的应力传感器、位移传感器、气体检测仪，采用物联网实现风险数据的实时传输与分析。监测数据大于设定阈值就会发出预警信号，同时自动液压系统停机、应急制动等，实现风险早发现。管理上创建全流程的管控体系。方案设计阶段，把风险防控要求融入到吊装方案当中；在重大的风险点增设冗余设计，在关键锚点处设置了一主一备的双保险模式；施工前组织所有的参与人开展专项的培训和技术交底；强调风险点的识别方法和应急处理流程，并进行实战化演练；实施双人监护的制度，人员一名负责数据监测和分析，另一个人负责现场的安全检查；作业结束后对设备的状况以及风险控制的效果进行反思总结；形成经验资料库供未来项目使用。数字化技术给风险防控赋予了新途径，依靠 BIM 技术创建包含风险点的三维可视化模型，把风险等级、防控举措、监测数据等信息同模型关联起来，从而达成风险的动态追踪和可视化经营。并且利用大数据分析的技术去挖掘历史项目中已经出现过的风险点，预测类似项目会有什么潜在的风险点从而给方案改进提供数据支持。

3.4.3 应急处置与复盘优化机制

应急处置和复盘优化属于受限空间吊装风险防控的闭环核心部分，要创建起“快速反应 - 科学处置 - 复盘改进”的全流程机制，符合受限空间视野受限、救援复杂的特性，坚持精准高效、因地制宜的原则，防止二次风险。应急处置采取分级响应：一级响应针对监测数据轻度超标，班组长暂停作业、组织技术复核；二级响应对应设备局部故障或者构件微偏移，启动专项预案，通过备用锚点切换等方式进行处理；三级响应针对锚点失效等重大险情，指挥小组统筹撤离、警戒，并联动专业救援。各流程确定责任与时限，保证指令

明确。应急保障适配空间特性：设专属物资区，配备便携式应力检测仪、应急通风设备和防毒面具等；定期校验；组成技术骨干和安全员的应急分队，熟悉布局，每月进行一次“盲演”，强化快速加固、人员转移能力。复盘优化融入全周期当中，作业及应急后的多个部门经由调取数据和录像展开复盘工作，梳理出风险识别的遗漏之处、防控的薄弱环节以及改进的方面，形成一份包含问题、原因、改进措施、责任人、时限的问题清单报告。建立案例数据库关联解决方案，为同类项目提供支撑，实现防控能力持续提升。

3.4.4 党建引领发展

重大工程技术的发展与成功实践，离不开坚强有力的组织保障和思想引领。在我国众多大型复杂工程的背后，党建工作始终发挥着至关重要的政治核心和战斗堡垒作用。在受限空间吊装这类高技术、高风险的工程实践中，党建工作通过多种方式提供了坚实保障：首先，通过强化思想政治建设，筑牢安全质量意识，使“生命至上、安全第一”和“精益求精”的理念深入人心，为技术方案制定和现场作业树立了最高标准。其次，通过组建党员突击队、设立党员示范岗，在技术攻关和急难险重的吊装任务中，充分发挥党员的先锋模范作用和奉献精神，有效带动整个团队攻克技术瓶颈、保障工程节点。再者，党建工作促进了跨部门、跨专业的协同联动，通过构建高效的沟通协调机制，确保了设计、仿真、施工、安全等各环节紧密配合，形成了推动技术创新的强大合力。最后，严格的党风廉政建设和监督机制，为项目营造了风清气正的氛围，确保了资源高效配置、决策科学透明，从源头上保障了工程质量的投资效益。将党的政治优势、组织优势转化为技术发展和管理提升的创新优势、竞争优势，是中国特色工程建设管理的一条重要经验，中铁工业的三峰党建工作为此提供了较多实例样板。

4 总结

吊装技术的发展日新月异，未来的吊装系统会配备更先进的传感器，如高精度位移、视觉传感器，基于人工智能（AI）算法对环境和吊物进行实时分析，实现自动避障、路径规划、精准定位和自适应控制。未来吊装技术的发展，将是智能化、无人化、绿色化以及新设备新技术应用深度融合、协同演进的过程。其核心目标是追求更高的安全性、效率、精度和环保效益。

参考文献

- [1] 马政纲、邵凯平、申建义、马国平、王伟.《液压整体提升施工工法》工法编号-YJGF204-2006
- [2] 杨华勇、李建斌等.《智能盾构理论与方法》北京：人民交通出版社股份有限公司，2024：283-293
- [3] 刘源. 空间受限跨运营公路钢箱梁吊装技术 [J]. 安装, 2023, (03): 56-59.
- [4] 张涛,杨志平,张星钰,等. 基于BIM技术的受限空间钢箱梁施工研究 [J]. 市政技术, 2020, 38 (06): 97-100+106.