

超危大钢结构工程施工安全风险管控体系及应用研究

白尧尧, 许毅, 李俊杰, 张桂军

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430081

DOI:10.61369/ME.2026010013

摘 要 : 针对超危大钢结构工程施工安全风险高、管控难度大的技术瓶颈, 以中原高铁港展厅钢结构安装工程为研究载体, 构建“风险辨识—评估—管控—创新—应急”五位一体的施工安全风险管控体系。通过多方法融合的风险辨识、风险矩阵法分级评估, 从组织、制度、技术、过程、应急五个维度制定针对性管控措施, 结合智能监测、自动化控制等技术创新, 实现施工安全风险的全流程闭环管控。工程实践表明, 该体系有效规避了各类安全风险, 实现施工全过程零安全事故, 重大隐患整改合格率、特种作业人员持证上岗率均达 100%。研究成果为超危大钢结构工程施工安全提供了科学、系统、可操作的解决方案, 具有重要工程应用价值。

关 键 词 : 超危大工程; 钢结构; 安全风险管控; 风险辨识; 风险评估; 管控体系; 技术创新

Research on the Construction Safety Risk Management and Control System and Its Application for Extra-large and High-risk Steel Structure Projects

Bai Yaoyao, Xu Yi, Li Junjie, Zhang Guijun

China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430081

Abstract : Addressing the technical bottlenecks of high safety risks and challenging management and control in the construction of extra-large and high-risk steel structure projects, this study takes the steel structure installation project of the Central Plains High-Speed Rail Port Exhibition Hall as the research subject to construct a five-in-one construction safety risk management and control system, encompassing "risk identification-assessment-control-innovation-emergency response." Through multi-method integrated risk identification and risk matrix-based hierarchical assessment, targeted control measures are developed from five dimensions: organization, system, technology, process, and emergency response. Combined with technological innovations such as intelligent monitoring and automated control, a full-process closed-loop management and control of construction safety risks are achieved. Engineering practice demonstrates that this system effectively avoids various safety risks, achieving zero safety incidents throughout the construction process, with a 100% compliance rate for rectifying major hazards and a 100% certification rate for special operation personnel. The research findings provide a scientific, systematic, and operable solution for construction safety in extra-large and high-risk steel structure projects, holding significant engineering application value.

Keywords : extra-large and high-risk projects; steel structure; safety risk management and control; risk identification; risk assessment; management and control system; technological innovation

引言

超危大钢结构工程因结构复杂、施工难度大、高风险作业集中等特性, 其安全风险管控已成为工程建设领域核心难题^[1-3]。随着我国建筑工程向大跨度、复杂化方向发展, 会展中心、体育场馆等超危大钢结构工程日益增多, 施工过程涉及起重吊装、高空作业、焊接作业等多重高危环节, 安全管控难度显著提升^[4-5]。根据《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》(住房和城乡建设部令第37号), 跨度36m及以上钢结构安装工程、单件起吊重量100kN及以上起重吊装工程均属超危大工程, 需编制专项施工方案并组织专家论证^[6]。尽管我国已出台多项法律法规与技术标准, 但超危大钢结构工程安全事故仍时有发生, 给人民生命财产安全造成重大损失^[7]。

中原高铁港展厅钢结构安装工程单榀桁架跨度99.5m、最大提升重量7940kN, 远超超危大工程界定标准, 施工过程面临起重伤害、高空坠落等多重风险。本文基于该项目施工实践, 构建科学完善的安全风险管控体系, 研究风险辨识、评估、管控及技术创新关键技术, 为同类工程提供技术参考。



图1 项目效果图

一、工程概况与安全风险辨识

（一）工程基本情况

中原高铁港数字展贸城展厅项目位于河南省郑州市航空港区，总建筑面积488866 m²，包含16个钢结构展厅。展厅采用五弦弧形管桁架+铰接钢管柱+背拉索结构形式，共计164 榀屋面桁架，总重量32554t，单榀桁架跨度 99.5m、重量198.5t。项目划分为四个工区同步施工，采用分区分块液压同步提升技术安装，施工周期123个工作日。工程核心超危大风险点包括：桁架跨度超36m限值，液压同步提升设备属非常规起重设备且提升重量超100kN限值，施工过程高危作业集中，安全管控难度极大。

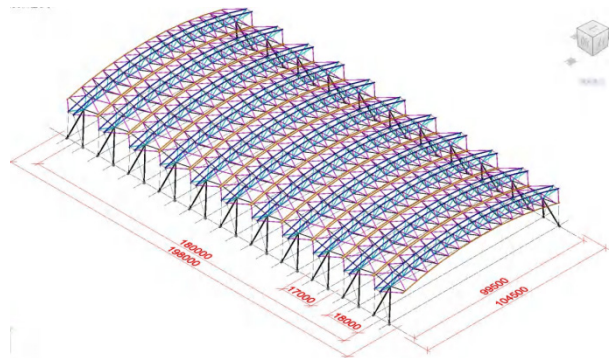


图2 单个标准展厅钢桁架主结构模型图

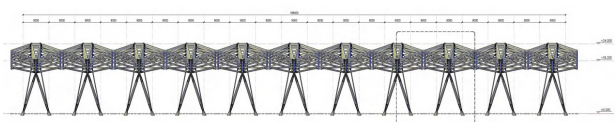


图3（a）单个标准展厅横向立面图

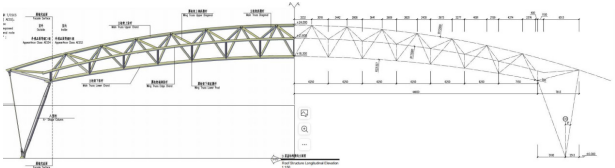


图3（b）单个标准展厅纵向立面图

（二）安全风险辨识

采用文献研究法、现场调研法、专家访谈法、工作分解结构法，对施工全过程进行系统风险辨识，将风险划分为6个一级风险单元、若干二级风险单元，共辨识出247项安全风险，如下表：

表1 安全风险辨识结果表

一级风险单元	风险数量（项）	核心风险内容	I级重大风险（关键项）
体系管理风险	32	专项方案编制、论证、安全技术交底、特种作业持证、安全生产责任制落实等	未编制专项施工方案、专项方案未论证、特种作业人员无证上岗
文明施工风险	28	施工现场封闭管理、扬尘污染控制、材料堆放规范、防火管理、现场办公与住宿合规等	易燃易爆物品未分类储藏、未设置消防通道和消防水源、动火作业未办理审批手续
起重吊装风险	45	起重机械制造许可证、钢丝绳磨损状态、吊装荷载控制、吊点设置合理性、同步提升稳定性、起重司机持证上岗等	起重机械无制造许可证、钢丝绳报废标准超标、吊装超载、同步提升失控
施工机具风险	36	电焊机漏电保护器安装、气瓶使用合规、运输车辆手续齐全、空压机防护罩设置、小型起重机具验收等	司机未经专门培训无操作证、空压机未履行验收程序、小型起重机具未验收
高处作业风险	48	高空坠落防护、物体打击防范、临边防护到位、安全网搭设合规、洞口防护措施、攀登作业规范等	高空坠落、临边防护不到位、洞口防护措施缺失
施工用电风险	58	临时用电三级配电二级保护、漏电保护器有效性、电线敷设规范、配电箱安装合规、外电防护措施等	临时用电未采用三级配电二级保护、漏电保护器失效、外电防护措施不到位

（三）风险评估

采用风险矩阵法进行风险分级，横坐标为风险发生可能性（分为极高、高、中、低、极低5级），纵坐标为后果严重程度（分为极其严重、严重、较严重、一般、轻微5级）^[9]，将风险划分为I－IV级，风险评估见下表：

表2 风险评估结果表

风险等级	风险数量（项）	占比	管控策略
I级（重大风险）	32	12.96%	专项管控，明确责任人和管控时限，实行挂牌督办
II级（较大风险）	68	27.53%	重点管控，加强日常巡查与动态监测
III级（一般风险）	87	35.22%	常规管控，纳入日常安全管理体系
IV级（低风险）	60	24.29%	常规管控，定期排查维护

二、超危大钢结构工程施工安全风险管控体系构建

（一）管控体系框架

构建“组织保障－制度保障－技术保障－过程管控－应急保障”五位一体的管控体系，形成全员参与、全过程控制、全方位覆盖的安全风险管控格局^[10]，实现风险从辨识到应急的全链条闭环管理。

（二）组织保障措施

1. 组织架构层面：设立三级安全管理组织机构，以项目经理为总指挥，常务经理、项目总工、安全总监为副指挥，各部门负责人、工区负责人、专职安全员为核心成员。明确责任分工：项目经理为安全生产第一责任人，对整体安全负总责；常务经理协助统筹安全管理；项目总工负责安全技术保障；安全总监主导日常风险管控监督协调；各部门及工区负责人对分管领域风险负直接责任；专职安全员负责现场巡查管控，形成“决策-执行-监督-落地”责任闭环。

2. 团队配置层面：实行“工区+总部”双重专职安全员配置，每个工区配备4名专职安全员，项目总部增配6名，所有安全管理人员均具备相应资质与实操经验。严格落实特种作业人员持证上岗制度，涵盖焊工、起重工、信号司索工、电工等关键岗位，212名特种作业人员100%持证上岗。建立常态化培训机制，定期开展专业培训与交流，提升管理团队风险处置能力。

（三）制度保障措施

1. 安全生产责任制：建立全员覆盖的安全责任体系，明确从项目经理到一线作业人员的岗位安全职责，签订责任书界定安全目标、责任范围及考核标准。将安全绩效与薪酬直接挂钩，实行奖惩制度，定期考核责任落实情况，考核结果作为评优、晋升重要依据。

2. 风险管控制度：建立“辨识-评估-管控-隐患治理”全链条机制，每月开展全面风险辨识，每周开展重点风险辨识，重大施工节点或条件变化时进行专项辨识，动态更新管控清单。隐患治理实行“发现-登记-整改-复查-销号”闭环管理，一般隐患24小时内整改，重大隐患立即整改。

3. 专项方案管理制度：严格执行超危大工程专项施工方案“编制-审核-论证-审批”流程，由项目总工组织编制，经公司技术负责人审核、5名及以上专家论证、监理总监理工程师审批、建设单位项目负责人签字确认后方可实施；方案实施前需技术交底，实施中不得擅自修改，确需调整的需重新履行全套程序。

4. 配套管理制度：完善安全技术交底、安全检查、安全教育培训、特种作业人员管理、应急管理、施工用电管理、动火作业管理等专项制度，形成全方位、无死角的制度体系。

（四）技术保障措施

1. 起重吊装安全技术：

（1）设备选型与检验：选用合规起重机械与提升设备，进场前严格审查制造许可证、产品合格证等资料，对液压提升器、钢绞线等关键设备进行荷载试验，合格后方可使用，建立设备台账并定期维护。

（2）吊点与吊具设计：根据桁架受力特点优化吊点布置，经有限元分析验证，吊具选用高强度材料，进场前检验并定期检查。

（3）同步提升控制：采用液压同步控制系统，实时监测各吊点位移与受力，制定设备故障、同步失控等应急处置措施。

（4）吊装警戒与监护：作业区域设置警戒线与警示标志，配备专职警戒人员，大型吊装设专人监护。

2. 高处作业安全技术：

（1）安全防护设施：搭设安全操作平台、防护栏杆（高度 $\geq 1.2\text{m}$ ）、安全生命线，安全网搭设符合规范，操作平台承载力经计算验证。

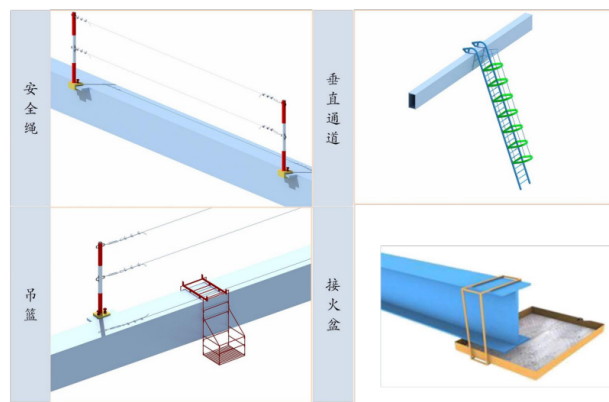


图4 安全防护设施

（2）个人防护用品：作业人员佩戴合格安全带（高挂低用）、安全帽、防滑鞋，定期检查更换损坏、过期用品。

（3）作业平台设置：桁架拼装与提升过程中设置临时作业平台与挂篮，经承载力验证，安装牢固并配备防护设施。

3. 焊接作业安全技术：

（1）焊接防火措施：作业区域配备灭火器材与接火盆，清除周围易燃物，动火作业办理审批手续并配备监护人。

（2）焊接用电安全：电焊机单独设置开关箱并配备漏电保护器，一次侧电源线 $\leq 5\text{m}$ ，二次侧电源线 $\leq 30\text{m}$ ，外壳接地接零可靠。

（3）焊接烟气防护：设置焊烟收集器，作业人员佩戴防毒面具。

4. 施工用电安全技术：

（1）临时用电布置：采用三级配电、二级保护系统，总配电箱靠近电源，分配电箱位于设备集中区域，开关箱与用电设备距离 $\leq 3\text{m}$ 。

（2）线路敷设：电缆埋地深度 $\geq 0.7\text{m}$ 或架空敷设，与建筑物、脚手架保持安全距离，电线绝缘良好、接头牢固。

（3）接地接零保护：采用TN-S接零保护系统，保护零线单独敷设，接地电阻 $\leq 4\Omega$ ，重复接地电阻 $\leq 10\Omega$ ，定期检测。

（五）过程管控措施

1. 安全技术交底：专项方案实施前，编制人员向现场管理人员交底，现场管理人员向作业人员交底，内容涵盖施工工艺、安全风险、管控措施、应急处置，采用书面形式签字确认，重点部位与关键工序进行专项交底。

2. 安全检查：实行日常巡查、定期检查、专项检查相结合的制度。专职安全员每日巡查，项目经理每周组织全面检查，每月开展专项检查，对发现问题下达整改通知并跟踪落实。

3. 安全教育培训：对进场人员进行公司级、项目级、班组级三级安全教育培训，内容包括法律法规、管理制度、技术知识、应急处置，培训合格后方可上岗。采用新技术、新工艺时进行专

4. 动态风险监测：对起重吊装、高处作业等关键环节进行动态监测，采用位移传感器、应力传感器、风速传感器等设备，实时监测结构变形、受力及环境参数，数据实时传输至中央控制室，建立预警机制。

1. 应急组织体系：建立应急救援指挥部，下设抢险救灾组、协调联络组、后勤保障组、安全保卫组、医疗救治组，明确各组职责，由项目经理任总指挥，常务经理、项目总工程师、安全总监任副总指挥。

3. 应急物资准备：配备挖掘机、起重机、发电机、潜水泵、灭火器、急救箱、应急灯、对讲机等物资，建立台账并定期检查，明确存放位置与管理人員。

三、风险管控技术创新

采用超然大钢结构工程施工安全智能监测系统,集成位移监测、应力监测、环境监测、视频监控功能,采用物联网技术实现传感器与中央控制室实时联动,监测数据更新频率 10Hz,预警响应时间 ≤ 3 秒,具备实时监测、智能预警、数据分析、视频联动等功能。



如图6、图7所示,采用了液压同步提升自动化控制技术和模

A photograph showing a row of industrial elevators in a factory setting. Each elevator has a red safety cover with the text "业升机电" (Yesheng Electric) and "2017/10/2" printed on it. The elevators are made of metal and have a complex mechanical structure.

图6(a) 液压提升器



图6(b) 液压泵源系统

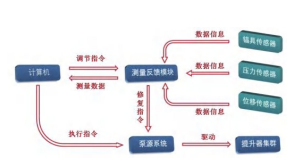


图7(a) 计算机控制原理

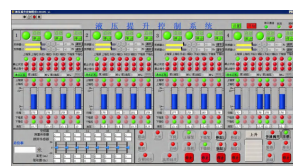


图7(b) 计算机控制人机界面

采用了高处作业智能防护系统,包括智能安全绳、智能安全帽、人员定位系统等。智能安全绳内置拉力传感器,当作业人员发生坠落时自动锁定并报警;智能安全帽集成定位、通话、报警功能;人员定位系统采用 UWB 技术,定位精度 $\pm 0.5\text{m}$,靠近危险区域自动报警。

采用了焊接作业安全智能控制技术，包括焊接烟气智能净化系统、焊接防火智能监测系统等。焊接烟气智能净化系统根据烟气浓度自动调整净化功率，净化效率达95%以上；焊接防火智能监测系统实时监测温度与烟雾浓度，异常时自动报警并启动灭火装置。

四、工程应用效果

中原高铁港展厅钢结构安装工程通过应用构建的超危大钢结构工程施工安全风险管控体系,圆满完成16个刚桁架屋面的提升安装任务,并取得了良好的应用效果:



图8 屋面钢桁架提升后现场图

（一）安全目标实现

施工过程中未发生任何安全事故，实现了责任工亡率、重伤率、重大火灾事故发生率、群死群伤事故发生率等安全目标均为0的要求。特种作业人员持证上岗率100%，重大隐患整改合格率100%，一般隐患整改及时率100%，安全技术交底覆盖率100%。

（二）风险管控有效

通过风险辨识与评估，明确了各项安全风险管控重点，采取针对性管控措施，Ⅰ级风险全部得到有效控制，Ⅱ级风险得到重点管控，未发生风险失控情况。施工过程中共排查发现各类隐患326项，其中重大隐患8项，全部整改完成，隐患整改合格率100%。

（三）作业环境改善

通过采用焊烟净化技术、智能通风设备等，改善了作业环境，焊接作业区域烟尘浓度符合国家标准（ $\leq 10\text{mg}/\text{m}^3$ ），高空作业安全防护设施完善，作业人员安全感显著提升。施工现场扬尘污染得到有效控制，扬尘浓度监测数据符合环保要求。

（四）管理水平提升

通过建立完善的安全管理制度与管控体系，规范了安全管理流程，提高了安全管理效率与水平。安全管理人员的风险识别能力、应急处置能力显著提升，作业人员的安全意识、操作技能明显提高。项目安全管理经验得到了建设单位、监理单位的高度认可。

障-制度保障-技术保障-过程管控-应急保障”五位一体的超危大钢结构工程施工安全风险管控体系，研究了风险辨识、评估、管控、创新与应急等关键技术，得出以下结论：

1.采用多种方法全面辨识出超危大钢结构工程施工过程中的247项安全风险，涵盖6个类别，为风险管控提供了基础。

2.采用风险矩阵法对安全风险进行评估与分级，明确了不同等级风险的管控策略，提高了风险管控的针对性。

3.从五个维度构建了超危大钢结构工程施工安全风险管控体系，形成了全员参与、全过程控制、全方位覆盖的安全风险管控格局。

4.研发了多项风险管控技术创新，提高了安全风险管控的智能化、自动化水平。

工程实践表明，该管控体系有效控制了超危大钢结构工程的施工安全风险，实现了施工全过程零安全事故，具有重要的工程应用价值。未来研究方向：一是进一步完善风险辨识与评估方法，引入大数据、人工智能等技术，提高风险辨识的全面性与评估的准确性；二是加强智能化、信息化技术在安全风险管控中的应用，研发更加先进的智能监测与预警系统；三是开展超危大钢结构工程施工安全风险管控标准化研究，制定相关标准与规范。

五、结论与展望

本文基于中原高铁港展厅钢结构安装工程，构建了“组织保

参考文献

- [1]王树坤，李忠献.超危大工程施工安全风险管控研究进展[J].建筑科学与工程学报，2022，39(2): 1-12.
- [2]刘志强，张宏.超危大钢结构工程施工安全管理[J].施工技术，2020，49(11): 1-5.
- [3]李猛，王静.大跨度钢结构施工安全风险分析与管控[J].建筑安全，2021，36(7): 23-27.
- [4]张兴虎，刘芳.超危大工程安全法规体系研究[J].工程管理学报，2020，34(3): 134-138.
- [5]王强，李娟.大跨度会展中心钢结构施工安全风险管控[J].钢结构，2021，36(8): 112-116.
- [6]住房和城乡建设部.危险性较大的分部分项工程安全管理规定[S]. 2018.
- [7]李明，王艳.超危大工程施工安全事故统计分析与预防[J].中国安全科学学报，2021，31(5): 165-171.
- [8]李国强，周健.建设工程安全风险辨识方法研究[J].建筑结构学报，2019，40(8): 1-9.
- [9]刘学武，王勇.风险矩阵法在超危大工程安全评估中的应用[J].施工技术，2021，50(8): 76-79.
- [10]王仕统，陈驹.超危大工程施工安全管控体系构建与应用[J].建筑施工，2021，43(7): 1345-1348.