

HPC的回弹响应噪声。

技术对策：实施检测前须在洛氏硬度标准钢砧上进行率定（标称值 80 ± 2 ）。检测过程中施加恒定缓慢压力，确保弹击杆垂直于测试面。

3.1.2 碳化深度对回弹检测结果的影响及修正优化

HS-HPC因孔结构致密， CO_2 扩散系数极低，碳化进程缓慢。实测数据显示，C60及以上等级构件90d自然碳化深度通常不超过1.5mm。然而，微观致密基体中的碳化反应对表层硬度的贡献呈显著的非线性放大效应。

1. 表层硬化的非线性增强机制：碳化生成的 CaCO_3 晶体填充了微毛细孔，降低了表层孔隙率。由于HS-HPC基体硬度基数极高，微弱的表层致密化即可导致回弹值对碳化深度的敏感性显著高于普通混凝土。

2. 修正模型的边际效应不足：现行《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》（JGJ/T 23-2011）中的碳化修正项主要源于C60以下混凝土试验数据的经验回归。对于HS-HPC，当碳化深度介于1.0-2.0mm时，规范给定的修正幅度不足以抵消表面硬化效应，导致修正后强度推定值仍系统性地正向偏离3%-8%。

3. 碳化锋面判读的模糊性：HS-HPC碳化过渡区极窄，酚酞试剂显色边界存在目视误判风险，人工读数倾向于低估实际碳化深度。

优化修正策略：

- 测量精度升级：采用数显碳化深度测量仪替代游标卡尺目测，对显色模糊界面执行多点算术平均，降低人员判读误差。

- 专项修正系数引入：建议基于同条件芯样对比试验，建立区域性HS-HPC碳化修正系数库。当碳化深度 $d_c > 1.0\text{mm}$ 时，应在规范修正基准上额外引入2%-5%的强度折减系数。

- 仲裁机制保障：对于推定强度处于设计临界阈值的构件，必须采用钻芯法进行原位校核，以规避因碳化修正不足导致的安全误判。

3.2 超声回弹综合法检测技术要点

超声回弹综合法通过融合表面硬度（回弹值）与内部声学传播特性（超声脉冲速度），实现了对材料宏观弹性模量与内部缺陷的双参数表征，更契

合HS-HPC致密匀质的本构特征。在实施过程中，应选用对测法以提高声时测量精度，利用首波波形分析软件剔除由钢筋散射或内部微裂隙引发的声时畸变点。基于专用测强曲线，综合法可将HS-HPC的推定强度误差波动范围有效约束在5%以内。

3.3 钻芯法检测技术要点

钻芯法作为混凝土强度评定的基准方法，其结果是校正无损检测模型偏差的黄金准则。针对HS-HPC脆性高、硬度大的特点，钻取及加工工艺的规范性直接决定芯样力学性能的代表性。操作要点包括：（1）采用孕镶金刚石薄壁钻头，在低转速、恒冷却液供给条件下钻进，以抑制芯样表面热致微裂纹的萌生；（2）芯样脱离母体后应立即进行蜡封或保鲜膜密封，阻断水分迁移对强度测试结果的干扰；（3）采用双端面磨平机处理受压面，严格控制端面平整度不超过0.05mm；（4）芯样数量应满足小样本统计推断要求，对于变异系数大于12%的芯样组，需结合施工记录与微观分析判别其为材料本质缺陷抑或取样损伤所致。

四、工程实证分析

4.1 工程概况与试验设计

选取某超高层项目为验证载体，其外框柱采用C70强度等级HS-HPC泵送浇筑。为量化评估各检测方法的准确度，随机抽取6根截面尺寸相同的框架柱（编号Z1-Z6），分别采用标准统一曲线回弹法、工艺优化回弹法、超声回弹综合法及钻芯法进行对比测试。以同条件钻芯法抗压强度测试值作为该批次构件的强度真值参考基准。

4.2 试验数据与误差溯源

各构件的具体检测数据及相对偏差统计详见下表。

表1 C70 HS-HPC框架柱多方法检测结果对比分析

构件编号	回弹法 (统一曲线)/MPa	优化回 弹法/ MPa	超声回 弹综合 法/MPa	钻芯法 (仲裁) /MPa	统一曲 线偏差	优化回 弹偏差
Z1	79.2	70.5	71.3	69.8	13.50%	1.00%
Z2	81.5	72.3	71.8	70.6	15.40%	2.40%
Z3	77.6	68.9	69.5	68.2	13.80%	1.00%
Z4	80.3	71.6	70.9	70.1	14.60%	2.10%
Z5	78.4	69.7	70.2	68.5	14.40%	1.80%
Z6	82.1	73.1	72.4	71.5	14.80%	2.20%

4.3 实证结论

1.统一曲线偏差超限：标准回弹法统一测强曲线对C70 HS-HPC的强度推定值平均偏高14.4%，远超工程验收对精度要求（通常 $\leq 10\%$ ）。该数据证实了基准曲线外推失效的客观存在。

2.优化算法精度显著提升：通过离散性管控与碳化修正策略的介入，优化后的回弹法强度推定值与芯样强度的相对偏差均值降至1.7%，实现了高精度拟合。

3.综合法适用性验证：超声回弹综合法同样展现出与芯样强度高度吻合的检测结果，可在大面积HS-HPC构件质量普查中推广应用。

五、检测质量管控与行业发展建议

基于上述分析与实证结论，为推动HS-HPC实体检测技术向高精度、规范化发展，提出如下建议：

1.标准体系补强：建议修订现行无损检测技术规程，增设C60及以上强度等级混凝土专用测强曲线附录，明确HS-HPC碳化修正的附加条款与数据离散性控制指标。

2.人员能力提升：加强检测从业者对HS-HPC微观结构与宏观性能关联性的认知培训，重点提升在复杂现场环境下识别与抑制检测误差源的实操技能。

3.组合评定模式固化：确立“无损方法定性筛查+钻芯法定量验证”的双轨评定机制。对推定结果位于设计强度等级临界区间的构件，强制采用钻芯法

进行仲裁。

4.检测装备智能化迭代：推广应用集成AI算法自动识别测区、具备大数据实时修正功能的智能回弹仪与声波CT扫描系统，降低人为操作误差，提升检测数据溯源性。

六、结论

1.高强度、高性能混凝土基于低水胶比形成的致密孔结构与高弹性模量特性，导致传统普通混凝土检测方法在应用中存在显著的系统误差。回弹数据离散性的统计失控与碳化修正模型的非线性失配是制约检测精度的核心瓶颈。

2.针对回弹法，通过实施测区预处理、空间网格优化布点、异常值统计剔除可有效压缩数据离散区间；结合HS-HPC碳化反应特征，实施高精度碳化深度测量与专项系数修正，可将强度推定误差降至可控范围。

3.工程实证数据定量表明，采用“离散管控+碳化优化”策略的回弹法以及超声回弹综合法，在配合钻芯法基准校核的条件下，能够实现对HS-HPC实体强度的精准评定，综合检测偏差可稳定约束在3%以内。

4.行业层面亟需加快HS-HPC专项检测标准体系的建立，推动检测装备的数字化与智能化升级，构建覆盖检测全流程的质量保证体系，以保障高强度、高性能混凝土工程实体质量评定的科学性与公正性。



穿梁套管高效敷设的研究分析

■ 楚安建设集团有限公司 夏加明 夏明 洪伟 夏威

摘要：本研究聚焦于穿梁套管敷设工程中一次验收合格率的提升，通过深入分析施工现状，揭示了影响合格率的关键因素，并提出了优化施工工艺、强化材料质量控制、提升施工人员技能及完善施工管理流程等改进措施。实施后，合格率显著提升，带来了显著的经济效益和社会效益。

关键词：穿梁套管敷设；一次验收合格率；优化施工工艺；材料质量控制；施工管理流程

1 引言

1.1 穿梁套管敷设的概述

穿梁套管作为建筑工程中机电管线预埋的关键工序，直接影响建筑结构的完整性、功能性和后期维护的便利性。穿梁套管通常是指在混凝土梁体施工过程中预埋的管道结构，用于穿设给排水、消防、电力等管线系统。这类套管不仅为管线提供了物理通道，还需确保与混凝土结构的紧密结合以防止渗漏、开裂等质量问题^{[1][2]}。定位精度、固定方式及防水密封性能是决定工程验收合格率的核心要素。

1.2 提高验收合格率的意义

提高穿梁套管敷设一次验收合格率，不仅关乎工程成本控制，更是保障建筑使用功能和结构安全的重要环节。高验收合格率能够减少返工，降低资源消耗和碳排放，同时反映施工质量管理水平的完善程度，提升施工企业的市场竞争力，推动建筑行业向精细化、高效化方向发展。

1.3 研究背景与现状

随着建筑行业对施工质量管控标准的提高，穿梁套管敷设的一次验收合格率成为衡量施工工艺水平的重要指标。然而，当前施工中因预埋位置偏移、管体固定不牢、管口处理不当等问题导致的返

工现象仍较为普遍。文献研究指出，传统套管预埋方法常因模板支撑系统变形、钢筋绑扎干扰等因素导致套管偏移，进而引发管线安装困难或结构缺陷^{[1][3]}。尽管部分工程通过引入BIM技术、新型固定装置等措施改善了施工质量，但整体合格率的提升仍面临诸多挑战。

2 工程概况与背景简介

2.1 工程概况

以某住宅建筑工程为例，总建筑面积约20万平方米，包含12栋高层住宅楼及地下两层车库。工程采用钢筋混凝土框架-剪力墙结构体系，建筑高度最高达80米。穿梁套管的预埋精度直接影响后续机电管道安装的顺畅性，因此成为工程质量管理的关键环节。

2.2 前期施工现状调查

前期施工现状调查显示，穿梁套管敷设工程中存在定位偏差、固定不牢、保护层厚度不达标及尺寸规格错误等问题。统计分析近三年12个在建项目的施工数据，发现一次验收合格率平均为67.3%，显著低于行业基准值。定位偏差、固定措施失效及保护层厚度不达标是主要质量问题，合计占比超过75%。

近3年穿梁套管敷设一次验收合格率调查表

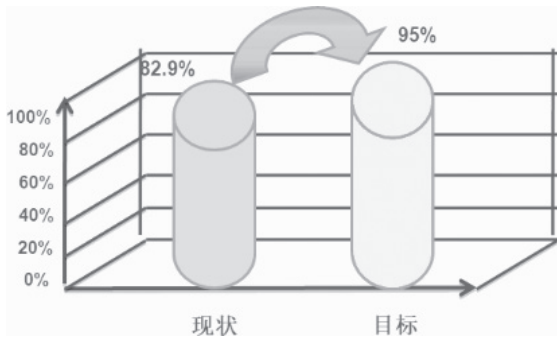
序号	时间	检查点数	合格点数	合格率	平均合格率
1	2022年	150	128	85.3%	82.9%
2	2023年	150	124	82.7%	
3	2024年	150	121	80.7%	

2.3 合格率统计与分析

通过统计分析近三年穿梁套管工程的验收数据，发现一次验收合格率呈现波动下降趋势，近三年平均合格率为82.9%，低于企业设定的90%目标值。问题集中于套管偏移超标、固定不牢、密封性能不足三类质量缺陷。施工工艺、材料管理、人员操作及环境约束等多维度因素共同影响了验收合格率。

2.4 目标设定与可行性分析

基于行业统计数据和历史施工数据，本研究提出将穿梁套管敷设一次验收合格率提升至95%以上的核心目标。从技术、管理和资源三个维度进行可行性分析，认为现有BIM技术、激光定位系统及新型固定支架技术等能够有效解决定位偏差和固定不牢等问题。同时，通过构建PDCA质量闭环管理系统和加强资源投入，目标实现具有较高可行性。



3 找出原因并分析出主要原因

3.1 影响因素分析

通过现场观察、施工日志分析及人员访谈，将影响穿梁套管敷设一次验收合格率的原因归纳为材料供应、施工工艺、人员操作、施工环境及管理措施五类关键要素。其中，材料质量不稳定、施工工艺不规范、人员操作技能不足及过程管控不到位是主要问题。

3.2 主要原因的确认与分析

运用因果图和帕累托图进行要因筛选与量化评估，发现施工工艺缺陷、人员操作失误及测量控制

失效是影响验收合格率的首要要因，累计影响占比达78.6%。这些问题形成质量风险传导链，需通过工艺标准化、技能培训强化及过程监测智能化等综合措施进行系统性改进。

序号	末端因素	确认内容
1	技术交底内容不明确	技术交底内容对症结影响程度
2	未制定严格奖惩措施	奖惩措施制定与否对症结影响程度
3	夜间照明不足	照明不足是否影响焊接质量，从而影响套管倾斜
4	测量仪器未检定	测量仪器是否检定对症结的影响情况
5	混凝土浇筑过快	混凝土浇筑速度是否对套管未打通产生影响
6	混凝土未分层浇筑	是否分层浇筑对症结影响程度
7	定位方法不当	定位方法不当对症结影响程度
8	加工长度过短	套管加工长度与梁宽差值-5~10mm以内
9	切割机保养次数少	切割机保养次数少，对套管倾斜影响

3.3 主要原因影响程度的评估

采用定性与定量相结合的评估体系，确定各影响因素的权重系数及作用机制。材料因素、施工工艺执行偏差及管理措施缺失是影响验收合格率的三大主因，累计贡献率达70.8%。评估结果为后续制定针对性改进对策提供了明确的技术依据。

穿梁套管敷设质量调查表

组别	检查数量	穿梁套管倾斜量	穿梁套管倾斜量占比	套管未打通量	套管未打通占比
1	130	10	7.7%	6	4.6%
2	165	16	9.7%	11	6.7%
3	155	14	9.0%	8	5.2%

4 制定相应的对策并实施对策

4.1 对策制定与实施

针对材料质量不稳定、施工工艺不规范等问题，研究制定了多维度、系统化的改进对策，包括建立全链条质量管控体系、开发可调节式预埋支架、实施分级培训机制及构建多级质量检查网络等。对策制定遵循PDCA循环原则，结合工程实践与技术创新，形成综合性解决方案。实施后，通过全过程动态管控机制和“三检制”质量管理体系，重点把控套管预埋定位、固定方式等关键节点，显著提升了施工质量。

(下转第19页)

封闭式吊顶内部挡烟垂壁做法

■ 襄阳市建设工程质量监督站 邓文龙

摘 要：为进一步明确封闭式吊顶内挡烟垂壁相关要求，方便设计人员选用相应的做法，设置排烟系统的场所或部位应采用挡烟垂壁、结构梁、隔墙等划分防烟分区，在发生火灾后烟气应能控制在相应的防烟分区，通过自然或机构的方式进行排烟。挡烟垂壁的深度不应小于储烟仓高度，对于全封闭式吊顶，吊顶内的空间高度不得计入储烟仓高度，但挡烟垂壁在吊顶范围内应设置。

关键词：消防；吊顶；防烟分区；储烟仓高度；挡烟垂壁；

引言

当前在公共建筑中封闭式吊顶较为普遍，而封闭式吊顶范围内是否施工挡烟垂壁在规范与图集中存在不一致的地方，导致设计与施工人员存在较多争议，为进一步明确封闭式吊顶范围内挡烟垂壁做法，文章通过控制烟气蔓延、封闭式吊顶内未设置火灾探测器、封闭式吊顶内未设置洒水喷头等三个方面简要阐述了封闭式吊顶内部应设置挡烟垂壁，供参考。

1. 烟气的危害

在火灾事故中烟气是导致人员伤亡的主要因素，烟气主要材料经高温分解或燃烧时所产生的固、液体颗粒和气体的混合物，并混有卷吸入或混入燃烧产物中的空气量，烟气的主要危害表现为以下几个方面：

1.1 烟气降低能见度

烟气的遮光性主要表现在影响能见度和寻找逃生路线。人在烟气中会迷失方向，看不到出口标志或其它有助于疏散的可见物，疏散速度会降低，致使人们在烟气中滞留的时间更长。另一方面对于消

防救援来说，大量的烟气会令他们很难找到火源，也会使他们在建筑中迷失方向；

1.2 烟气毒性

人滞留在浓度足够高的火灾烟气环境中，就会受到伤害甚至死亡，火灾烟气中含有大量的毒性物质，包括一氧化碳和其他的一些燃烧产物。一氧化碳为含碳材料不完全燃烧的产物，建筑火灾产生的大量一氧化碳是建筑火灾致人死亡的主要原因。防排烟系统是控制建筑火灾烟气的关键消防设施，其功能为防止或减缓火灾烟气在建筑内部的扩散和蔓延，给人员的疏散和消防救援提供足够的时间和空间。

1.3 烟气的高温危害

火灾烟气的高温对人、物可产生不良影响。人暴露在高温烟气中，65度时人可短时忍受，在100度左右时，一般人只能忍受几分钟，人暴露在高温烟气中则会使口腔及喉头肿胀而发生窒息。

2. 挡烟垂壁的相关要求

挡烟垂壁按安装方式分为：固定式挡烟垂壁，代号D；活动式挡烟垂壁，代号H。挡烟垂壁应设置永久性标牌，标牌应牢固，标识内容清楚。

2.1 挡烟垂壁材料要求

挡烟垂壁应采用不燃材料制作。制作挡烟垂壁的金属板材的厚度不应小于0.8mm，其熔点不应低于750℃。制作挡烟垂壁的不燃无机复合板的厚度不应小于10.0mm，其性能应符合GB 25970的规定。制作挡烟垂壁的无机纤维织物的拉伸断裂强力经向不应低于600N，纬向不应低于300N，其燃烧性能不应低于GB 8624A级。制作挡烟垂壁的玻璃材料应为防火玻璃，其性能应符合GB 15763.1的规定。挡烟垂壁在(620±20)℃的高温作用下，保持完整性的时间不应小于30min。

2.2 挡烟垂壁安装要求

挡烟垂壁的挡烟高度应符合设计要求，其最小值不应低于500mm，最大值不应大于企业申请检测产品型号的公示值。采用不燃无机复合板、金属板材、防火玻璃等材料制作刚性挡烟垂壁的单节宽度不应大于2000mm；采用金属板材、无机纤维织物等制作柔性挡烟垂壁的单节宽度不应大于4000mm。挡烟垂壁挡烟高度的极限偏差不应大于±5mm。挡烟垂壁单节宽度的极限偏差不应大于±10mm。

2.3 挡烟垂壁漏烟量要求

在(200±15)℃的温度下，挡烟部件前后保持(25±5)Pa的气体静压差时，其单位面积漏烟量(标准状态)不应大于25m³/(m²·h)；如果挡烟部件由不渗透材料(如金属板材、不燃无机复合板、防火玻璃等刚性材料)制造，且不含有任何连接结构时，对漏烟量无要求。

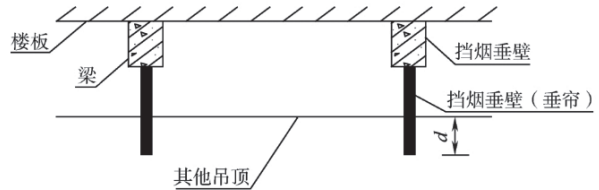
3. 防排烟规范与图集示意图不统一

防烟分区设置的主要目的就是将在着火区域所在的空间范围内，并限制烟气从储烟仓内向其他区域蔓延，火灾时烟气上升至建筑物顶部，并积聚在挡烟垂壁形成的储烟仓内，设置在储烟仓内有自然排烟窗或机械排烟口将烟气排出。

3.1 防排烟技术标准条文解释要求

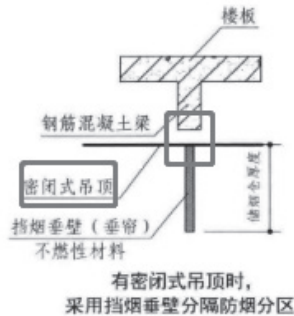
《建筑防排烟系统技术标准》GB51251-2017中要求设置排烟系统的场所或部位应采用挡烟垂壁、结构梁及隔墙等划分防烟分区。挡烟垂壁等挡烟分隔设施的深度应符合规范要求的储烟仓厚度。对于有吊顶的空间，当吊顶开孔不均匀或开孔率小于或等于25%时，吊顶内空间高度不得计入

储烟仓厚度，条文解释已给出了明确做法(见下图)。根据该图显示一般吊顶及封闭式吊顶范围内应设置挡烟垂壁，只是吊顶范围内挡烟垂壁不计入储烟仓高度。



3.2 防排烟技术标准图示要求

按照《建筑防排烟系统技术标准》图示要求(见下图)，封闭式吊顶范围内不需设置挡烟垂壁，只需要在吊顶下方设置挡烟垂壁即可。



因此对于封闭式吊顶内部是否设置挡烟垂壁设计单位、图审机构在选取标准时存在争议，不方便指导现场施工。

4. 在封闭式吊顶内设置挡烟垂壁的必要性

挡烟垂壁的本质是将烟气控制在着火区域所在的空间范围内，并限制烟气从储烟仓内向其他区域蔓延，为预防烟气蔓延有必要在封闭式吊顶内设置固定式挡烟垂壁，主要有以下三个原因。

4.1 有效防止烟气蔓延

设置挡烟垂壁能有效将烟气控制在着火区域这个防烟分区内，非防火区域形成正压，防止烟气从着火区域蔓延到其他防烟分区，如果封闭式吊顶内未设置挡烟垂壁会导致防烟分区长边增加，烟气水平射流的扩散中会卷吸大量冷空气而沉降，不利于烟气的及时排出。

4.2 封闭式吊顶内未设置火灾探测器(除吊顶上方闷顶外)

《火灾自动报警系统设计规范》GB50116-2013

要求，下列场所应单独划分探测区域：敞开或封闭楼梯间、防烟楼梯间、防烟楼梯间前室、消防电梯前室、消防电梯与防烟楼梯间合用的前室、走道、坡道、电气管道井、通信管道井、电缆隧道、建筑物闷顶、夹层。封闭式吊顶不属于以上场所，一般情况下未单独划分探测单元，故封闭式吊顶内一般未设置探测器，且吊顶内风管、水管、电缆桥架较多，存在较大的火灾隐患，一旦发生火灾后将无法及时探测，不易被人们发现，易导致火灾蔓延。

4.3 封闭式吊顶内未设置洒水喷头（除吊顶上方闷顶外）

《自动喷水灭火系统设计规范》GB50084-2017要求装设网格、栅板类通透性吊顶的场所，当通透面积占吊顶总面积的比例大于70%时，喷头应设置在吊顶上方，封闭式吊顶的洒水喷头一般设置在吊顶下方，封闭式吊顶内发生火灾时，起初大都为阴燃，即使发生火灾也很难被发现，且没有喷头

洒水，初起火灾难以得到控制，待非消防人员发现后，消火栓、灭火器等也不易将吊顶内火扑灭。近期山西吕梁永聚煤业联建楼二楼浴室发生火灾，网传视频中有人拿灭火器对着上部吊篮灭火时未能及时扑灭，导致烟气和火灾蔓延，造成重大人员伤亡。

5. 结语

综上所述，封闭式吊顶范围内（除吊顶上方闷顶外）应设置固定式挡烟垂壁，能有效防止烟气和火灾蔓延。

参考文献

- 《建筑防烟排烟系统技术标准》GB51251-2017
- 《自动喷水灭火系统设计规范》GB50084-2017
- 《火灾自动报警系统设计规范》GB50116-2013
- 《建筑防烟排烟系统技术标准》图示 15k606
- 《挡烟垂壁》XF533-2012

（上接第16页）

对策表

序号	主要原因	对策	目标	措施
1	混凝土浇筑过快	采用成品管盖密封套管	套管打通合格率为100%	1、管盖与套管的组装和固定 2、检查套管打通情况
2	定位方法不当	优化定位方法	已安装套管标高合格率≥99%	1、以梁对侧楼板面为基准确定套管顶标高 2、依据管盖尺寸确定管盖位置 3、检查套管位置

4.2 实施效果的跟踪及产生的效益

构建多层次、动态化的实施效果监控体系，通过BIM技术与物联网传感器实现实时数据采集。采用“三级联动”机制强化动态管理，通过月度、季度和项目周期评估工作，对实施效果进行量化评估。实施改进对策后，穿梁套管敷设一次验收合格率提升至96.4%，主要缺陷发生率显著下降，离散系数降低，表明施工质量波动性显著降低。卡方检验证实改进后合格率提升具有显著统计学意义，带来了显著的经济效益和社会效益。

5 结论与展望

本研究通过系统性分析穿梁套管敷设施工过程中的关键影响因素，形成了以工艺优化、过程控制、技术创新为核心的改进体系。研究证实，系统化的质量管理方法与技术创新相结合是提高套管敷设验收合格率的核心路径。未来研究可进一步拓展智能化技术应用，探索人工智能在套管缺陷自动识别中的潜力，并结合新型材料研发优化套管防腐性能，推动施工管理向智能化、数字化方向深化发展。

参考文献

- [1] 杨琰.关于自来水穿梁套管预埋新工艺的探讨[J].建筑工程技术与设计,2018,(29):3426.
- [2] 邹德林.连续多个大直径穿梁钢套管组合梁施工技术.施工技术 2017 CNKI:SUN:SGJS.0.2017-S2-037
- [3] 李亚亚.一种新型自动喷淋管道穿梁预埋套管方法[J].陕西建筑, 2024(10):23-27.

大型复杂钢结构施工过程中力学特性的理论研究

■ 湖北省建筑科学研究设计院股份有限公司 陈庆敏

摘要：大型复杂钢结构在大跨度公共建筑与工业建筑中应用广泛，其施工受力状态与设计成型状态存在显著差异，施工过程中易出现倾覆、失稳、构件破坏等风险。本文以大型复杂钢桁架为研究对象，采用理论分析、有限元仿真与工程算例相结合的方法，系统研究施工过程中力学特性。重点建立基于应变能准则的吊装吊点优化理论，提出以整体应变能最小为目标的优化方法；开展考虑初始几何缺陷的非线性屈曲分析，揭示两吊点与四吊点方案下结构平面外失稳规律。研究表明，应变能准则可将多目标优化简化为单目标优化，有效降低构件内力与结构变形；四吊点方案较两吊点显著提升结构稳定性，非线性屈曲分析更贴合工程实际。研究成果可为复杂钢结构施工方案优化、安全控制与稳定性评价提供理论依据与技术支持。

关键词：复杂钢结构；钢桁架；应变能准则；吊点优化；初始缺陷

引言

随着我国城乡建设与大型基础设施快速发展，大跨度空间结构、体育场馆、会展中心、机场航站楼、工业厂房等工程对大型复杂钢结构的需求持续增长。大跨度复杂钢桁架凭借受力明确、空间适应性强、工业化程度高等优势，成为主流结构形式。与传统钢结构及成型后结构受力状态不同，大型复杂钢结构施工是由散件、分段、准结构逐步拼装为整体结构的时变过程，结构刚度、边界约束、荷载工况随施工工序持续变化，其力学行为复杂且难以通过常规设计方法准确把控。

在吊装、滑移、顶升等关键施工环节，结构易面临三大安全风险：一是结构整体失去平衡导致倾覆；二是构件或结构体系失去稳定引发倒塌；三是局部杆件或节点强度不足发生破坏。上述风险均源于对施工全过程力学演化规律认识不足、吊点布置

不合理、稳定性验算缺失。因此，开展大型复杂钢结构施工力学特性理论研究，建立科学高效的优化方法与稳定评价体系，对保障施工安全、提升工程质量、降低施工风险具有重要理论价值与工程意义。

1 施工力学核心问题与研究方法

1.1 施工力学特性与主要风险

大型复杂钢结构施工具有显著的时变、非线性、非确定性特征，主要体现在三个方面：1) 结构状态时变：从零散构件逐步拼装为整体结构，刚度、质量、约束条件动态形成；2) 荷载工况复杂：自重、吊点力、临时支撑、风荷载、吊装动力效应等共同作用；3) 边界条件可变：吊点、胎架、滑移轨道、临时约束等随施工步骤调整。

在吊装施工中，结构最易出现三类失效模式：整体倾覆失稳、局部或整体屈曲失稳、杆件与节点强度破坏。上述问题均需通过施工全过程力学分析

予以识别与控制。

1.2 研究方法

本文采用理论解析—有限元仿真—算例验证一体化研究方法：理论层面构建应变能准则、最小势能原理、非线性屈曲分析理论体系；数值层面基于ANSYS建立钢桁架精细化模型，采用BEAM188单元模拟杆件、LINK8单元模拟吊索，通过APDL语言实现参数化建模与自动优化；验证层面以30m跨钢桁架为工程算例，完成吊点方案优化与不同吊点数量下的稳定性对比分析。

2 基于应变能准则的复杂钢桁架吊点优化

吊点位置与数量是钢桁架整体吊装的核心控制参数，直接影响结构受力、变形控制与施工经济性。传统方法以“最大正负弯矩相等”确定吊点，未考虑变截面与轴力影响，误差较大。本文引入应变能准则，以结构整体应变能最小为优化目标，实现吊点方案科学优选。

2.1 应变能准则与最小势能原理

弹性结构在受力过程中，外力所做的功在忽略能量损耗时全部转化为应变能储存在结构内部，即外力功 W 在数值上等于应变能 U 。

结构整体应变能表达式为：

$$U = \int_{\Omega} A(\varepsilon) d\Omega \quad (1)$$

式中： $A(\varepsilon)$ 为微元 $d\Omega$ 内由于变形而产生的应变能密度； Ω 为结构区域。

应变能密度可以表示为：

$$A(\varepsilon) = \frac{\sigma^T \varepsilon}{2} \quad (2)$$

式中， $\varepsilon = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}]^T$ ， $\sigma = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{zx}]^T$ 对结构系统进行离散，任意单元上的任一点的应力和应变为：

$$\varepsilon = B_e \delta_e, \quad \sigma = D \varepsilon \quad (3)$$

式中： D 为弹性矩阵， $D^T = D$ ； B_e 为单元节点位移列阵； δ_e 为单元应变矩阵。

单元的应变能可以表示为：

$$U_e = \int_{V_e} \frac{1}{2} \delta_e^T B_e^T D B_e \delta_e dv = \frac{1}{2} \delta_e^T k_e \delta_e \quad (4)$$

式中， $k_e = \int_{V_e} B_e^T D B_e dv$ 为单元的刚度矩阵。

将各单元的应变能累加，则得到整个结构的应变能：

$$U = \sum_e U_e \quad (5)$$

应变能指标具有三大优势：综合性强，统一反映应力、应变、变形、内力等多方面性能；计算简便，能量为标量，无方向分量，便于计算与方案对比；物理意义明确，应变能越小，结构受力越均匀、变形越小、安全性越高。

根据最小势能原理，弹性结构处于稳定平衡的充要条件是结构总势能最小。线弹性条件下，势能绝对值与应变能相等。因此，可通过调整吊点约束布局，使结构应变能最小，从而确定最优吊点方案。

2.2 基于应变能准则的吊点优化方法

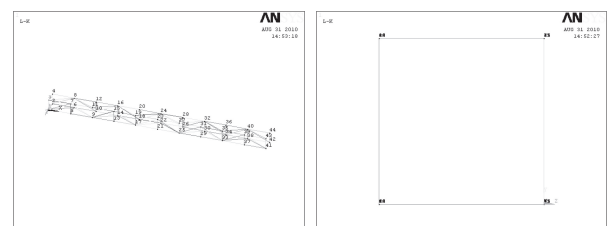
优化思路：以桁架节点为候选吊点空间，以吊点数量为约束条件，对不同吊点组合进行有限元计算，提取各工况整体应变能，取整体应变能最小的方案为最优吊点方案。

优化流程：

- 1)建立钢桁架ANSYS有限元模型，施加自重荷载与吊点约束；
- 2)结合对称性与工程经验生成候选吊点组合；
- 3)计算各工况整体应变能、最大轴力、节点位移、杆件弯矩；
- 4)按整体应变能从小到大排序，确定最优方案；
- 5)采用APDL语言实现建模、加载、计算、对比、输出全流程自动化。

2.3 算例验证

以某30m跨空间钢桁架为研究对象：桁架总长30m，10个节间，节间距3m，高1m、宽1m；上下弦杆为 $\Phi 200 \times 40$ 钢管，水平支撑为 $\Phi 180 \times 20$ 钢管，斜撑为 $\Phi 160 \times 20$ 钢管，材料采用Q345；采用四吊点一次吊装，吊索与水平线夹角 60° ；利用对称性选取5对节点，共25种组合方案，选取5种典型工况进行对比。



(a) 桁架空间形式 (b) 桁架截面形式

图1 某大型复杂体系钢结构的计算模型

表1 五种工况下的钢桁架整体应变能、最大节点位移、最大轴力和弯矩最值对比

工况	整体应变能 (J)	最大轴力 (kN)	最大节点位移 (mm)	最大弯矩 (KN·m)		最小弯矩 (KN·m)	
				Y	Z	y	z
1	12870.52	6.117	19.673	27.54	39.902	-28.893	-45.229
2	3810.73	2.979	16.104	11.737	29.116	-11.994	-30.503
3	1945.22	2.414	16.997	10.59	26.396	-9.413	-26.396
4	15500.27	6.641	32.356	30.494	41.75	-30.902	-41.751
5	51505.06	10.874	56.884	50.403	51.09	-52.326	-51.09

计算结果表明：结构整体应变能越小，杆件内力、节点位移、弯矩绝对值越小，受力状态越优；工况3整体应变能最小（1945.22J），为最优四吊点方案；应变能准则可将多目标优化简化为单目标优化，决策高效、结果可靠，适用于复杂钢桁架吊装方案设计。

最优方案下，结构轴力分布均匀，位移控制良好，无明显应力集中，满足吊装安全与变形控制要求。

3 考虑初始几何缺陷的钢桁架非线性屈曲分析

大跨度钢桁架吊装时平面外约束薄弱，易发生平面外失稳。特征值屈曲未考虑几何缺陷与材料非线性，结果偏保守；非线性屈曲+初始几何缺陷更符合工程实际，可更准确预测失稳临界荷载与失稳模式。

3.1 分析模型与参数

研究对象为30m变高平面钢桁架：共7跨，两端节间距2.5m，中间跨距5m，左端高1m、右端高3m；弦杆采用TM型钢，支撑采用等边角钢，Q345钢材；吊索直径38mm；对比两吊点、四吊点两种吊装方案。

有限元模型参数：弦杆、腹杆采用BEAM188单元，吊索采用LINK8单元；荷载为自重荷载，考虑吊装动力效应，取1.2倍动力系数（1.2g）；平面外约束采用弱刚度弹簧单元模拟，避免机构位移；初始几何缺陷以第一阶屈曲模态变形的1/1000施加^[1]。

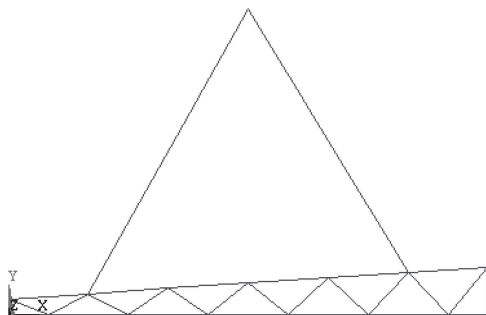


图2 某大跨度平面钢桁架示意图

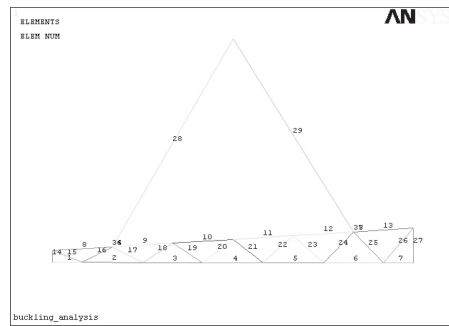
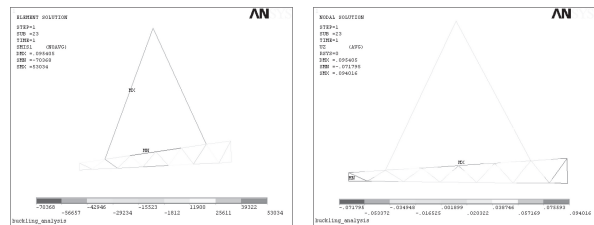


图3 钢桁架屈曲分析有限元示意图

3.2 两吊点方案屈曲分析

特征值屈曲：第一阶屈曲因子为2.78，失稳模式为跨中上弦杆平面外弯曲，10#杆件受力最不利。非线性屈曲：1.2g荷载下内力一位移曲线呈线性，结构安全稳定；施加3.3g（2.78 × 1.2g）荷载时，位移急剧增长，结构发生平面外屈曲。

结果表明：常规吊装荷载下两吊点方案具备一定安全储备，但临界荷载较低，平面外稳定性较差。



(a) 平面外位移 (b) 轴力

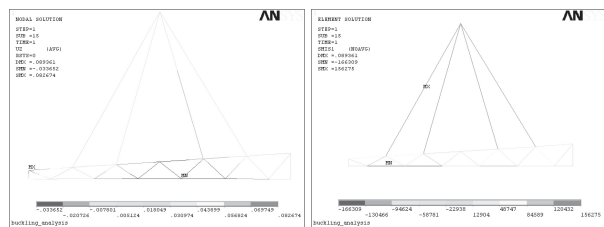
图4 两吊点方案的静力分析计算结果

3.3 四吊点方案屈曲分析

特征值屈曲：第一阶屈曲因子为15.727，远高于两吊点方案，失稳位置为跨中下弦杆。非线性屈曲：施加18.88g（15.73 × 1.2g）荷载时才发生失稳，稳定性大幅提升。

核心结论：四吊点可显著改善结构受力，降低

压杆内力，提高屈曲临界荷载；两吊点易在上弦跨中区域失稳，四吊点易在下弦局部杆件失稳；非线性屈曲考虑缺陷与非线性效应，计算结果更贴近工程实际^{[1][2]}。



(a) 平面外位移

(b) 轴力

图5 四吊点方案的静力分析计算结果

3.4 屈曲分析主要结论

1) 常规吊装工况下，结构安全储备充足，一般不会发生失稳破坏；

2) 吊点数量越多，结构受力越均匀，平面外稳定性越高^{[3][4]}；

3) 非线性屈曲临界荷载低于特征值屈曲，工程设计应优先采用非线性方法^{[1][5]}；

4) 局部构件屈曲不代表整体结构倒塌，结构仍可继续承载，需继续加载至极限荷载判定整体失稳^[2]。

4 大型复杂钢结构施工控制要点

基于本文研究成果，提出大型复杂钢结构施工力学控制关键措施：

1) 吊点方案优化：优先采用应变能准则，以整体应变能最小确定吊点位置与数量，采用对称布置，减小弯矩与变形；

2) 稳定性控制：吊装阶段加强平面外约束，大跨度桁架优先采用四吊点及以上方案；

3) 稳定验算：关键构件必须进行考虑初始缺陷

的非线性屈曲分析，确定临界荷载与安全系数^{[1][5]}；

4) 全过程仿真：采用有限元软件建立时变结构模型，模拟拼装、吊装、卸载全过程，识别最不利工况^{[4][6]}；

5) 实时监测：对结构应力、位移、支座反力进行实时监测，与理论计算值对比，动态调整施工参数^{[3][4]}。

5 结论

本文以大型复杂钢桁架为研究对象，系统开展施工过程力学特性理论研究，建立吊点优化方法与稳定性评价体系，得到主要结论如下：

1) 应变能准则可综合反映结构受力状态，将吊点多目标优化简化为单目标优化，计算简便、结果可靠，能有效降低构件内力与结构变形，适用于复杂钢桁架吊装方案优化设计；

2) 基于ANSYS与APDL语言开发的吊点优化流程，可实现建模、计算、排序、选优自动化，提升工程应用效率；

3) 考虑初始几何缺陷的非线性屈曲分析更符合工程实际，四吊点方案屈曲因子远高于两吊点，稳定性显著提升；两吊点易在上弦跨中失稳，四吊点易在下弦局部失稳^{[1][2]}；

4) 大型复杂钢结构施工必须开展全过程力学分析，通过吊点优化、约束加强、非线性稳定验算、实时监测，实现施工安全、质量、风险全过程可控^{[3][4][6]}。

本文研究成果可为大跨度复杂钢结构施工方案优化、规范编制与工程实践提供理论参考与技术支撑。



节前安全“不松弦”，我县质安站开展建筑领域安全专项检查

■ 贺保国 喻越 宋焱兵

春节来临之际，为切实筑牢建筑施工安全防线，守护群众生命财产安全，2月5日，竹山县建设工程质量安全监督管理站，陪同十堰市建管中心相关领导，深入竹山客厅9#、10#楼、宏发大厦等项目施工现场，开展春节节前安全生产专项检查。

检查组坚持问题导向，聚焦建筑施工关键环节，重点排查施工现场临边防护、临时用电、消防设施配备等安全隐患，核查危大工程管控、值班值守制度落实情况，详细询问项目节前停工安排、留守人员管理及应急处置准备工作。检查组强调，各项目施工单位要提高安全意识，压实安全生产主体责任，对排查发现的隐患立行立改、闭环管理。同时，要严格落实节日值守和应急处置措施，做好施

工现场封闭管控，严防各类安全事故发生。

此次检查有效排查了一批建筑施工安全隐患，进一步压实了各方安全责任，规范了施工现场安全管理，为全县群众度过一个平安祥和的春节筑牢了建筑领域安全屏障。



检查组检查现场情况

深化监管创新 筑牢安全防线

■ 王道明 黄光煜

今年以来，襄阳市立足建筑行业发展实际，聚焦危大工程、建筑起重机械、安全监督、绿色施工、智慧住建五大核心领域，以问题为导向破解监管难题，以创新为抓手构建长效机制，在实践中探索形成“精准化管控、体系化赋能、协同化共治”的监管路径，既筑牢安全生产底线，又为行业高质量发展注入动能。

一、从“全链条管控”到“全周期风险预判”，筑牢本质安全防线

针对危大工程风险隐蔽性强、管控难度大的特点，襄阳市在严格落实省厅全链条管控要求基础上，

延伸监管触角、强化风险预判，构建“事前预判-事中管控-事后复盘”的全周期管理体系，从源头降低安全风险。

事前精准预判风险，建立“地质勘察+气候适配+工艺评估”三维预判机制。结合襄阳汉江沿线软土分布、山区边坡较多、襄城地下溶洞暗河等地质特点，针对项目实际，要求深基坑、高边坡项目在方案编制前开展专项地质补勘，优化施工时序与防护方案。同时，引入第三方风险评估机构，对危大工程施工工艺进行安全性评估，杜绝不成熟工艺、高风险方

案落地实施。

事中动态管控升级，推行“智能监测+旁站监督+分级预警”模式。在深基坑、高支模等关键部位安装多维度智能传感器，不仅实时监测位移、沉降数据，更联动BIM模型实现风险可视化预警，数据异常时同步推送至项目管理人员、监理单位，形成“现场处置-复核上报-跟踪整改”的快速响应链条。优化旁站监督机制，强化危大工程旁站力度，全程监督关键工序施工，确保方案落地不走样。针对汛期、冬季施工等特殊时段，制定危大工程专项防护指南，明确不同风险等级的管控措施，实现“一险一策、精准防控”。

事后复盘形成闭环，建立危大工程案例复盘与经验推广机制。定期组织辖区项目开展危大工程施工案例复盘会，选取典型案例深入剖析风险点、管控难点及改进措施，对优秀管控经验编制成册并在全市推广。同时，将危大工程施工质量安全情况纳入项目信用评价，与企业招投标、资质升级挂钩，倒逼企业强化风险意识，形成“预判-管控-复盘-提升”的良性循环。

二、从“智能化监控”到“全生命周期溯源管控”，破解设备管理痛点

围绕建筑起重机械“安装、使用、维保、拆卸”全流程管理痛点，襄阳市突破传统监管模式，以数字化溯源为核心，构建“设备溯源+人员管控+责任追溯”三位一体的全生命周期管控体系，实现设备安全可管、可控、可追溯。

建立设备数字化溯源档案，打通“生产-安装-使用-报废”全链条信息。依托省级“楚智建”平台，为每台起重机械赋予唯一电子身份编码，详细记录设备生产厂家、出厂检测报告、安装验收资料、日常维保记录、拆卸备案信息等内容，实现设备信息“一人一档、一机一码”。监督部门通过平台可全程追溯设备运行轨迹，对未按规定开展维保、超期未检测的设备自动预警，强制暂停使用并督促整改，从根本上杜绝带病作业、无资质使用等问题。

强化人员全流程管控，构建“资质核查+技能考核+动态监管”机制。严格核查起重机械操作人员、安拆人员特种作业资质，实行“一人一证一备案”，资质信息同步至智慧监管平台，杜绝无证上岗、证件

过期等行为。创新技能考核模式，组织开展“理论+实操”常态化考核，实操考核模拟复杂工况下的设备操作的应急处置，考核合格后方可上岗作业。

健全责任追溯机制，明确各方主体设备管理责任。明确建设单位设备选型把关责任、施工单位设备使用维保主体责任、监理单位设备验收监督责任、安拆单位作业安全责任，将设备安全管理纳入各方责任清单。一旦发生设备安全隐患或事故，通过数字化档案快速追溯责任主体、责任环节及责任人，实行“一案四查”，严肃追究相关单位及人员责任。

三、从“制度化构建”到“差异化精准监督”，压实多方主体责任

针对不同项目规模、企业资质、风险等级的差异化特点，襄阳市打破“一刀切”监管模式，创新差异化监督机制，优化监管资源配置，实现“重点突出、精准发力、高效监管”，全面压实各方主体责任。

实行分级分类监管，精准匹配监管资源。根据项目风险等级、企业信用评价、过往安全业绩等指标，将辖区在建项目划分安全等级，实行“差别化”监管。对高风险、信用差的项目，增加日常巡查频次，实行重点盯防；对中等风险、信用良好的项目，按常规频次开展巡查；对低风险、信用优秀的项目，减少不必要的现场检查，为企业减负增效。

创新协同监督机制，构建“纵向联动+横向协同”监管格局。纵向打通监督链条，建立“市级统筹、监督室落实、项目自查”的联动机制，实现监管信息实时共享、问题线索快速移交、整改情况跟踪督办。横向加强与应急、消防、市场监管等部门的协同配合，建立联合执法、信息互通、成果共享机制，在起重机械检测、特种作业人员管理、应急处置等方面形成监管合力。同时，深化“业主承诺+监理履职+监督核查”模式，督促建设单位履行首要责任，倒逼监理单位强化旁站监督，形成多方共治的良好局面。

强化信用约束赋能，构建“信用评价+联合惩戒”机制。将企业安全履职情况、隐患整改成效、投诉处理结果等纳入建筑市场信用评价体系，建立信用积分台账，实行“加分激励、扣分惩戒”。对信用优秀的企业，在招投标、评优评先中予以优先；对信用不良的企业，采取限制市场准入、加大检查频次、约谈警示等惩戒措施，让“守信者受益、失信者受

限”，推动企业从“被动整改”向“主动防控”转变。

四、以“绿色工地”豁免破解秋冬季工地施工难题，打造绿色建造样板

秉持绿色发展理念，依托智慧工地建设，坚持正向激励与负面警示相结合，动态实施差异化管理，多管齐下狠抓建筑工地扬尘防治，为经济社会发展绿色转型注入新动能。

思想破冰破认知，凝聚绿色发展共识。针对部分企业“扬尘治理影响施工效率”的固有认知，以“思想破冰”为首要抓手，将环保宣贯融入日常巡查全流程，深入在建项目一线，向企业精准解读大气污染防治严峻形势、政策要求及长远效益，打破“环保与生产对立”的认知误区，引导企业从“要我治尘”向“我要治尘”转变，为建筑工地绿色转型筑牢思想根基。

协同攻坚推替代，破解绿色转型难题。由市住建局牵头，建立生态环境、城管、公安等多部门协同联动机制，遵循“调研论证、试点突破、全面推行”原则，通过大数据分析、实地踏勘等方式，从新能源车购置标准、充电配套设施建设、运输路线规划等维度细化实施方案，靶向推进渣土车等工程运输车辆新能源化替代。选取国投·滨江湾项目作为试点，总结可复制的经验做法，逐步在中心城区房屋市政工程全面推广，以示范引领带动行业绿色升级。

政策创新强激励，激发主动创绿动能。借鉴先进地区实践经验，联合生态环境、公安、城管等四部门印发《襄阳市中心城区房屋市政工程“绿色工地”重污染天气应急管控豁免机制（试行）》，构建“刚性门槛+柔性引导”的激励体系。将严格落实扬尘防治“八个100%”措施作为硬性准入条件，对主动采用新能源装载机械、扬尘净化设备等新技术、新设备、新材料的项目，优先纳入“绿色工地”培育名单，经严格审核后，允许在重污染天气预警期间正常施工，有效破解“重污染天气停工影响进度”的行业痛点，推动施工企业从“被动治尘”向“自发添绿”跨越。

五、从“数字化赋能”到“智能化治理”，构建现代监管体系

以湖北省“智慧住建”建设要求为指引，襄阳市推动数字技术与建筑监管深度融合，从“数据采

集”向“智能分析、精准研判”升级，构建“感知、分析、服务、指挥、监管”五位一体的智能化治理体系，全面提升监管现代化水平。

数据互联破壁垒，夯实协同管理基础。聚焦智慧监管数据割裂痛点，升级市级智慧住建监管平台，整合人员、设备、隐患、信用等多源数据，打破部门间、项目间信息孤岛，为项目参建各方及政府监管部门搭建统一数字化工作界面。通过优化数据共享接口、规范数据标准，推动管理流程线上化、标准化，实现“数据多跑路、人员少跑腿”，为协同管理、精准决策提供坚实数据支撑。

深化数据强应用，筑牢现场监管防线。将智慧工地建设纳入安全监管核心环节，建立全周期管控机制：项目开工前开展智慧平台应用专项交底，明确数据接入、设备安装等要求；日常巡查中强化督办检查，确保全市在建项目智慧系统“应接尽接、应通尽通”。重点依托劳务实名制管理子系统，加大项目经理、总监理工程师等关键岗位人员到岗督办力度，建立“每日一通报、每周一汇总”工作机制，倒逼责任落实，全市关键人员到岗率稳定在全省前列，有效保障施工现场安全管控效能。

健全体系提效能，实现智能精准监管。积极推广AI视频监控系统应用，构建“线上智能巡查+线下精准核查”监管模式。通过AI技术自动识别未戴安全帽、违规动火、高处作业不规范等违规行为，辅助安全质量监督人员快速锁定安全隐患，同步建立“线上发现-下发整改-现场处置-结果反馈”全闭环监督流程，大幅提升监管效率与精准度，推动监管从“人海战术”向“科技赋能”转型。

襄阳市始终锚定湖北省住建厅对安全生产方面的工作要求，立足本土实际深化建筑安全监督管理创新，通过危大工程全周期风险预判、起重机械全生命周期溯源管控、差异化精准监督、生态化绿色施工、智能化智慧治理，持续提升安全监管水平，实现建筑施工安全形势稳定向好。下一步，襄阳市将继续以问题为导向、以创新为动力，不断完善监管机制、强化技术赋能、凝聚共治合力，进一步提炼可复制、可推广的经验做法，为全省建筑工程安全监督管理工作贡献更多襄阳智慧与襄阳方案，推动建筑行业高质量发展迈向新台阶。