

# 城镇老旧小区建筑结构检测及安全性评价分析

文 / 苗 灏 合肥工大共达工程检测试验有限公司

**摘要：**城镇老旧小区属于城市化改造建设的重点对象，它的建筑结构检测与安全性评价工作至关重要。究其原因，主要是城镇老旧小区多建造于数十年前，建造水平不高且年久失修，缺乏管理，是城市中风险管理的重大薄弱环节，亟待全面评估与改造。本文中主要介绍了目前比较主流的建筑钢结构检测技术——数字孪生技术，创建技术框架与模型，再配合结构失效的事故树分析与贝叶斯网络模型方法，形成安全性综合评价技术体系，顺利完成城镇老旧小区建筑结构安全性检测工作。

**关键词：**建筑结构检测；安全性评价；数字孪生；结构失效事故树；贝叶斯网络模型

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.14.007

## 引言

我国各城镇的老旧小区建筑结构检测经常受限于“前评估”技术以及成本局限，导致检测效果不佳。再加之建筑特点与现状复杂，损伤指标表现多样，因此相关检测工作相当棘手，开展推进比较困难。为解决这些问题，大胆使用创新的数字孪生技术、结构失效事故树、贝叶斯网络模型等更加有效。

### 一、基于数字孪生技术的城镇老旧小区建筑结构检测技术与安全评估技术应用

城镇老旧小区建筑结构检测作业采用数字孪生技术构建数据处理层与安全评估功能应用层。通过物理施工现场大量采集数据，虚拟处理施工模型中的仿真数据内容，就能形成结构检测的孪生数据，由机器学习算法处理数据建模，指导现场结构检测作业流程，最终实现安全评估的智能化闭环控制操作。一般情况下，面向小区建筑结构的安全检测、评估数字模型拥有智能闭环控制属性，它的结构检测技术流程参考图1<sup>[1]</sup>。

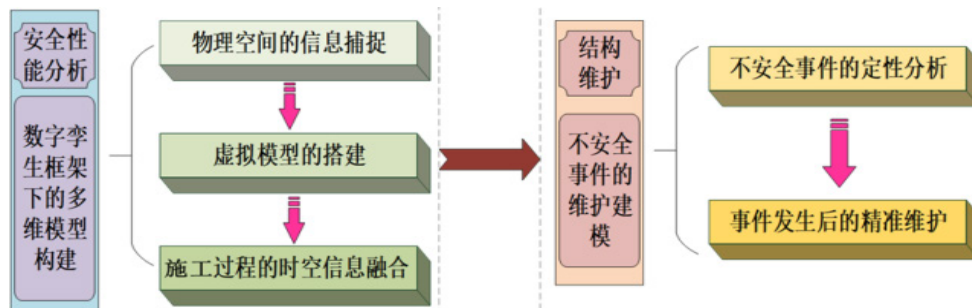


图1 数字孪生技术检测城镇老旧小区建筑结构流程图

#### (一) 建设多维度数字孪生模型

建设多维度数字孪生模型的关键在于打造结构检测性能表现强、安全评估水平高的数字孪生结构，大量截获有效的物理空间数据，搭建拥有时空信息交融的多维度模型。

数字孪生模型拥有多维度的物理空间信息捕捉能力，可以实现通过数字孪生框架有效驱动安全评估建模流程。结构检测工作中，主要采用RFID传感器提前感知施工现场动态信息，实现现实空间与虚拟模型的有效映射，安全检测、评估建筑结构的环境荷载条件。所筛选得出的物理空间信息包含两个方面，分别是构件信息CI以及环境信息EI。

结构检测中对CI构件信息的捕捉过程比较复杂，要遵循结构检测作业顺序标记构件标号，主动采用RFID标签填写构件标号，实现对小区建筑结构信息的动态、全过程感知。例如，采用RFID传感器对结构检测作业中的所有构件力学参数实施针对性采集，并通过移动终端设

备实时查看结构构件的基本信息。同时，对构件的力学信息捕捉能力较强，主要通过获取环境信息收集构件信息，例如收集构件长度 $L_e$ 、温度 $T_e$ 以及风载 $W_1$ 相关误差数据信息。在具体施工过程中，对环境信息的捕捉主要采用以下表达式表达：

$$EI = (L_e, W_1, T_e)$$

在捕捉环境信息过程中，主要采用RFID技术分析计算构件尺寸，随时采集拉索长度误差。RFID读写器本身具有可编辑属性，主要利用移动终端设备识别构件标签，随时记录并更新构件状态。例如，针对风载以及温度作用所产生的影响较大，采用风速传感器以及温度传感器就能确保所有施工环节都能分析作用影响，将所有步骤的数据都实时采集记录，并构建形成一套完整的数字孪生模型。

环境信息EI的捕捉需要通过仿真模拟完成，模拟分析出结构安全性能，客观映射施工现场目标<sup>[2]</sup>。

(二) 建设虚拟结构检测模型

通过建设虚拟结构检测模型可以准确评估城镇老旧小区的结构安全性能，将分析数据全部纳入数字孪生结构中，形成几何、物理、行为与规则多层面的施工现场虚拟模型。该模型中会融入BIM系统的Revit软件模块，构建具有高保真度的几何模型，在传感器中获取相关数据以纠正几何模型中的某些误差。构件尺寸会客观真实影响到建筑结构的力学性能，获取材料信息以及力学性能系数，最终评估工程安全系数。针对数字孪生虚体建模的形式化数学语言表达应参考如下公式：

$$VM = (GM_{set} \infty PM_{set} \infty BM_{set} RM_{set})$$

在上述公式中，VM代表面向老旧小区建筑的钢结构施工安全评估，由此建立数字孪生虚拟模型，后续的GM<sub>set</sub>、PM<sub>set</sub>、BM<sub>set</sub>、RM<sub>set</sub>分别代表几何模型集、物理模型集、行为模型集以及规则模型集。不同模型集都通过∞相互连接，可以代表施工现场的所有要素，确保施工中各个环节步骤均处于安全稳定状态。

(三) 开展施工过程安全评估

要开展施工过程安全评估，建立有限元模拟机制，分析钢结构框架施工的实际受力性能，融合时空信息。在有限元计算获取前期施工阶段结构力学性能时，可以总结归纳施工过程的结构安全状态等级，参考表1<sup>[3]</sup>。

施工阶段	安全状态分析等级	安全状态实际等级
5	a	a
6	a	a
7	a	b
8	b	b
9	b	b
10	a	a

表1 城镇老旧小区的施工过程结构安全状态等级对比

二、基于结构失效事故树的城镇老旧小区建筑结构检测技术与安全评估技术应用

事故树模型属于事故中不同因素之间的因果逻辑关系，其中的各种事件都通过逻辑门连接，表达事件中的某些触发关系。在城镇老旧小区建筑结构检测作业中，通过结构失效事故树能够展开结构检测，分析不同事件之间的连接作用。例如如果存在结构检测事件1和2，其中只要有一个事件发生，顶上事件就会发生。

(一) 结构失效事故树的基本表现

结构失效事故树属于倒立的树，所有顶上事件按照因果逻辑逐渐从上下分解发生成因，推理出结构失效的最终路径。最后，向上推理计算出顶上事件的发生概率问题<sup>[4]</sup>。

(二) 对老旧小区建筑结构失效的事故树检测技术与安全评估技术分析

在老旧小区建筑结构中，基于三类风险源分析建筑结构的失效问题，其中包括出生缺陷、结构缺陷以及不当改造缺陷。三类风险源的划分依据也包含建筑的建设年代、建设资料、屋面加建、经营性变更等附加因素。这些严肃会延伸到老旧建筑结构的构件、子单元以及鉴定单元中，其中的构件包含地基基础，按照同类材料构件分析不同检查项目，客观评定单个基础等级情况。总体来讲，按照上部承重构件分析承载位移以及损伤非常必要，可以检查建筑项目结构内容，评定单个构件等级。围护系统称重部分则按照上部承重结构分析不同层次的安全性等级。

在分析子单元时，主要评估对象包括地基变形评级、边坡场地稳定性评级以及地基承载力评级。确保每种构件评级与结构侧向位移评级联合展开安全性评估鉴定，提高结构检测技术水平。按照城镇老旧小区的结构布置、支撑条件、结构连接项目，保证评定结构整体性等级水平有效上升。最终，就可以顺利形成鉴定单元，提高单元鉴定技术应用安全性<sup>[5]</sup>。

三、基于贝叶斯网络模型的城镇老旧小区建筑结构检测技术与安全评估技术应用

以某城镇老旧宿舍楼小区为例，它建设于1980年，建筑面积为3000 m<sup>2</sup>。对该小区建筑结构进行检测结果表明，建筑主体结构采用六层砌体结构，承重墙部分采用普通砖实心墙，首层六层层高为3.0m，建筑总高度为18.0m。

(一) 建立贝叶斯网络模型

采用贝叶斯网络模型建模软件分析建筑结构节点状态，分别设置为state0、state1、state2，统一编号后进行根节点分析与获取。贝叶斯模型中网络节点较多，需要进行统一验证后才能展开评价，例如分析概述分级描述内容，概率分级包含不可能、较小可能、中等可能、较大可能、很大可能以及肯定发生等等级档位。根据专家对贝叶斯网络根节点的验证概率展开评价，例如针对不同根节点的状态发生概率选取对应概率分档即可，可以通过IPCC分级对模糊语言转换过程展开研讨，得出概率数值。另外，就是分析专家权重中的加权求和情况，最终归一化处理即可。在获得不同节点的先验概率后，可以进一步分析计算过程，获取中间节点条件概率<sup>[6]</sup>。

(二) 优化贝叶斯网络模型建模结果

在获取某宿舍小区的概率参数导入过程中，分析贝叶斯网络模型了解模型参数，优化学习结果，对参数学习结果分析老旧宿舍小区砌体住宅，分析房屋安全状态

危险概率为 35.0% 左右, 处于较高的风险水平。如果房屋安全状态, 良好概率应该为 7%, 客观讲危险概率依然较高。某宿舍小区的地基基础危险概率可以最低控制在 4%, 老旧小区建筑沉降稳定, 其中的模型准确描述与风险因素之间的定量关系表现比较稳定。通过贝叶斯网络模型, 就能准确描述所有风险因素之间的相互定量关系<sup>[7]</sup>。

### (三) 提取根节点信息

要分析某宿舍小区的建筑结构损伤状况, 该建筑中首层外墙为 16 ~ 17x 阳台, 墙壁裂缝长度为 1.0m, 宽度为 2.0mm。在建筑多处板底以及外墙都存在明显的渗透现象问题, 例如该小区建筑阳台板普遍存在板底崩角、钢筋锈蚀的情况。但是, 该小区建筑物墙体未见明显倾斜和侧弯现象。地基基础信息内容残缺, 建筑结构邻近无边坡, 墙体未见沉降裂缝, 未见明显倾斜, 地基承载状态良好。

另一方面, 对建筑结构的侧向位移信息展开研究, 了解变形贯彻结果, 结果表明一点。建筑的抽检顶点存在侧向位移范围内大约 10 ~ 42mm。这一侧向位移距离并未超出民用建筑的可靠性鉴定标准范围, 对于多层砌体结构建筑规定并不适用于所承载定点侧向位移。另外, 结构拆改与荷载变更状况未能实现结构增层改建, 在某小区宿舍建筑结构中, 建筑结构功能表现并不明显<sup>[8]</sup>。

### (四) 分析安全评估结果

分析安全评估结果, 对某宿舍小区的根节点状态直接输入贝叶斯网络模型, 得出安全评估推理结果。某宿舍小区建筑的结构承载状态正常使用概率可以高达 95.0%, 存在 5.0% 的危险概率。所以, 该建筑的安全状态危险概率评估结果为 20.0%。为确保建筑正常使用, 概率可以控制为 73.0%, 良好概率为 6.0%。根据最大隶属原则分析得知, 房屋的安全状态等级为正常使用状态, 属于较安全水准。

根据上述分析安全评估结果, 可以了解到采用贝叶斯建筑安全评估模型, 可以客观映射老旧小区建筑的安全评估结果。所以, 需要开展的具体工作包括如下 5 点:

第一, 可以通过事故树以及贝叶斯网络形成有效模型映射关系, 将老旧小区的建筑结构树事故树有效转型, 转换为贝叶斯网络拓扑结构, 实现结构处理优化。

第二, 通过事故树模型分析二态节点, 拓展形成多态节点即可。根据参数学习成本以及结构鉴定规范结果, 针对结构性态的安全等级分析限值划分情况具有可行性, 了解多态节点状态。

第三, 可以尝试引入 Nosiy or gate 以及 Noisy MAX 算法来配合贝叶斯网络模型算法, 优化算法概率参数, 实施降维处理, 简化条件概率。主要通过模糊区域群体分析决策方法, 对贝叶斯网络参数学习了解学习成果。

第四, 围绕某老旧小区楼建筑结构展开安全性评估结果分析, 采用贝叶斯网络安全评估模型所展开的一系列实证研究效果突出, 评估结果显示采用最大隶属度原则可以确保房屋安全等级始终处于正常使用的合格范围之内, 安全水平表现十分理想<sup>[9]</sup>。

第五, 针对某小区建筑结构的建模改造局限性问题展开分析, 可以通过贝叶斯网络模型对相关网络概率参数进行更新分析。了解概率参数的先验概率, 有效新增鉴定样本, 实现专家知识层面的检测样本有效融合。

### 结语

在本文中深入分析目前城镇老旧小区的建筑结构检测技术问题, 并提出了多种安全性评估分析方法。采用数字孪生技术可以直接完成结构检测工作, 后续再采用结构失效事故树、贝叶斯网络模型形成施工安全评估流程。通过上述技术内容组合, 就能确保实践验证结果精准有效分析施工阶段的安全状态, 确保施工过程合理有效, 为施工安全管理提供重要保障, 满足施工过程中结构安全的科学合理预判要求。

### 参考文献

- [1] 秦志浩, 李志强, 李永辉. 城镇老旧小区建筑结构检测及安全性评价分析 [J]. 科技创新与生产力, 2024, 45 (3): 57-60.
- [2] 严凯. 民用建筑结构检测及安全性评价分析 [J]. 建筑与装饰, 2024 (4): 10-12.
- [3] 刘伟. 既有砌体结构建筑安全性检测及加固设计 [J]. 大众标准化, 2024 (6): 178-180.
- [4] 王大专. 某框架结构现浇柱梁板构件裂缝成因分析及安全性评价 [J]. 安徽建筑, 2022, 29 (7): 65-67.
- [5] 狄军杰. 既有建筑幕墙的现状研究及安全性检测与评价 [J]. 门窗, 2022 (7): 4-6.
- [6] 王大专. 相邻施工对某多层框架建筑的影响分析及安全性评价 [J]. 安徽建筑, 2022, 29 (3): 57-58.
- [7] 刘杭杭. 老旧砖混结构住宅楼的检测鉴定及修缮建议 [J]. 安徽建筑, 2024, 31 (4): 165-167.
- [8] 王晓奇, 郭小东, 王志涛. 基于模糊层次分析法的木结构古建筑安全评价 [J]. 安全, 2021, 42 (2): 31-37.
- [9] 林东明. 浅谈某框架-剪力墙结构综合楼安全性鉴定及抗震鉴定 [J]. 江西建材, 2023 (3): 71-73.