

# 高层建筑施工过程中的结构安全监测与预警系统研发

蓝飞

DOI: 10.12238/ems.v7i5.13125

**[摘要]** 为了确保高层建筑施工活动顺利进行,应着重处理好施工中的结构安全问题。本文设计研发出一套针对高层建筑施工的结构安全监测与预警系统,在多种传感器的协助下实时采集重要数据,基于先进的数据处理与分析算法精准评估结构的安全状态,当有安全隐患出现时第一时间传递出预警信号,辅助提升高层建筑施工中的结构安全管理水平,力争将安全事故发生率控制到最低。

**[关键词]** 高层建筑; 施工过程; 结构安全监测; 预警系统

## 引言

高层建筑评级自身节约土地资源、提升城市空间利用率等优势,在现代城市建设与发展中占据着重要地位,但其因有施工工期漫长、工艺技术复杂性高、施工环境复杂多变等特点,现场施工中可能存在诸多隐患因素,影响各类结构施工的安全性。欧美等很多发达国家早年间在建筑结构安全监测方面就进行了大量的研究,并创建了相配套的预警机制。我国很多建筑企业在实体工程建设中虽然投用了一些先进的检测设备与软件,辅助提升了施工过程中的结构安全管理效果,但监测与预警系统还存在一些不足,后续应加大研究与改进力度。

### 1 高层建筑施工中常见的结构风险因素

#### 1.1 材料质量问题

建筑材料是建设高层建筑结构的物质基础,材料自身质量对结构的安全性能起到决定性作用。若采用的钢材强度不达标、混凝土配比设计部合理等,均可能导致工程施工及投用期间出现局部裂缝、变形或坍塌等安全事故<sup>[1]</sup>。比如,在易发生震灾区域建设的高层建筑,若钢材的强度和韧性不够可能致部分结构分散和吸收能量的能力减弱,增加事故发生的风险。混凝土固结硬化过程中体积波动性较大,若此时配比未能得到有效控制,可能会出现结构裂缝,危及整个建筑物的安全状态。

#### 1.2 施工工艺与质量

在高层建筑施工建设过程中,施工工艺与质量是需要进行严格把控的关键要素。模板支撑是混凝土工程施工中的重要临时结构,对混凝土浇筑与硬化过程中的重量均提供支撑作用,若其现场搭建质量不合格,会对施工过程安全性与结构最终质量产生较大的影响。比如模板支撑时设置的立杆间距过大时,立杆实际承受的荷载可能会超过额定值,导致支撑系统的稳定性下滑;在没有设置足够多的横杆的工况中,若施加较大的侧向力或局部荷载,支撑系统易发生失稳情况,结构的最终成型质量很难得到保障。

#### 1.3 荷载变化

高层建筑施工过程中的荷载不单单来自结构自重与施工活荷载,还有环境荷载,包括风荷载、地震作用等,在施工

不同阶段内这些荷载呈现出的特征与造成的影响也有差异。当突然遇到强风、地震等极端天气时,结构承受的荷载很可能超过阈值,可能会造成施工中的部分结构出现不可逆的变形或破坏。除此之外,现场施工过程中建材集中堆放可能造成局部荷载明显变大,导致结构的稳定性下滑。

#### 1.4 基础沉降

如果高层建筑地基土自身的承载力达不到工程设计要求时,比如在软土地基上建设高层建筑时,在建筑物荷载的持续作用下地基会出现较明显的沉降,在这样的工况下,上部结构的荷载传递路径会出现变化,致使结构应力不均匀分布,引起墙体开裂、梁板结构变形等情况,若此时软土地基处理不当时,基础沉降还可能成为造成建筑物整体倾斜或局部位置坍塌。

### 2 建筑结构的安全风险评估方法

#### 2.1 层次分析法(AHP)

AHP是一种把和决策始终有关的元素分解成目标、准则、方案等不同层次,从而做出定性分析与定量分析的决策方法。在评估高层建筑的结构安全风险时,可将风险因素细分成不同层次,基于两两对比的形式合理确定各个因素的相对重要性权重,从而对结构的安全风险水平做出综合评定。具体实践中可以把,将建筑材料质量、施工工艺、荷载变化等因素作为准则层,选定具体的风险指标作指标层,以搭建判断矩阵的方式运算出各个因素的权重。采用特征值法计算权重向量可以分两步骤进行:一是运算判断出矩阵A的最大特征值 $\lambda_{max}$ 以及对应的特征向量W;二是对特征向量做出归一化处理,这样就能顺利地获得个因素的权重向量,计算公式如下<sup>[2]</sup>:

$$W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

式中: n 表示判断矩阵的阶数;  $a_{ij}$  表示的是第 i 个因素相对于第 j 个因素的重要性。

#### 2.2 模糊综合评价法

模糊综合评价是一种基于模糊数学的综合评价方式,其最大的特点是将模糊信息进行定量化处理,进而更为全面、客观地评价受多种因素影响的事物价。在建筑结构安全风险评估领域内,因为很多风险因素有模糊性和不确定性的双重

特征，基于模糊综合评价法能更进更精准地阐述结构的安全状态。构建模糊评价集和隶属度函数，对各个风险因素进行模糊量化，比如对于建筑材料质量因素，可以设置“良好”“中等”“较差”等评价等级的隶属度。鉴定因素集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ，专家评语集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ ，

然后利用模糊合成算子进行综合评价，得到结构的风险等级。则可以采用下式表示模糊关系矩阵 R:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1m} \\ r_{21}, r_{22}, \dots, r_{2m} \\ \dots \\ r_{n1}, r_{n2}, \dots, r_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， $r_{ij}$  表示的是第  $i$  个因素对第  $j$  个评价等级的隶属度。

权重向量  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  代表的是各个评价因素的重要程度，一般可以基于 AHP 等方法确定，权重向量契合归一化条件<sup>[3]</sup>:

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1, a_i \geq 0 \quad (3)$$

利用模糊合成算子把权重向量和模糊关系矩阵 R 进行合成处理，获得综合评价结果 B，常用的合成算子为:

$$B = A \cdot R = \left( \sum_{i=1}^n a_i \cdot r_{i1}, \sum_{i=1}^n a_i \cdot r_{i2}, \dots, \sum_{i=1}^n a_i \cdot r_{im} \right) \quad (4)$$

### 2.3 有限元分析法 (FEA)

FEA 是一种采用数学近似的方法去模拟分析真实物理系统的一种技术。将该项技术用于高层建筑结构安全测评领域中，可以搭建相应结构的有限元模型，仿真模拟施工过程中结构的受力与变形状况，更为系统地评估结构的薄弱处与潜在风险。

有限元分析的基本公式较多，包括:

#### 1) 单元刚度矩阵 ( $[K^e]$ ):

$$[K^e] = \int_{V^e} B^T D B dV \quad (5)$$

式中，D、B、 $V^e$  分别表示的是应变-位移矩阵、材料本构矩阵、单元体积。

#### 2) 全局刚度矩阵组装:

$$[K] = \sum_{e=1}^n [K^e] \quad (6)$$

式中， $[K]$  表示的是全局刚度矩阵， $n$  为单元数量。

#### 3) 求解方程

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (7)$$

式中， $\{u\}$ 、 $\{F\}$  分别表示节点位移向量、荷载向量。

### 3 高层建筑施工的结构安全监测与预警系统设计

#### 3.1 预警系统的概述

建筑施工安全监测与预警系统通过分析论证现有建筑安全生产模式，开发出的一种能监测、诊断及预控安全事故的安全生产预警系统，宗旨在于创建一种全新的建筑安全管理模式。对于建筑企业来说，该系统的本质在于预控、事前管理，将传统的跟踪调整转变成预期调控，真正扭转管理思想与管理方式。安全监测与预警工作中将事故危险源作为始发点，注重监控预警危险源与隐患因素，在高新技术的协助下落实各种监控预警办法，将转筒的事故处理转变成事故预警，随时发现和排解隐患，将事故扼杀到萌芽状态，牢牢把控好工程安全管理的主动权，将安全管理工作提升至新的高度。

#### 3.2 系统功能模块划分

系统预警是一个系统过程，由监测、辨识、诊断、报告、评价五个环节构成，结合高层施工现场安全管理工作的特点与规范要求，对系统功能模块做出图 1 所示的设计<sup>[4]</sup>。

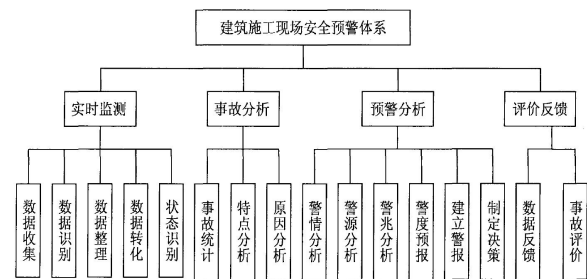


图 1 高层建筑安全预警系统模块划分

#### 1) 实时监测

搭建实时监测系统平台是安全预警系统运行及发挥自身功能的重要基础，其能监视与预测施工现场可能引发事故的重大危险源，动态监测实干安全生产的有关指标值。该模块内需采集、辨识、整理与转化状态参数数据，构建预警信息数据库，参照监测结果合理地判断高层建筑施工现场的安全状态、隐患状态及数据状态等。

#### 2) 事故分析

一旦发生安全生产事故时，要客观地分析事故及其原因，并落实好相应的统计、预测工作。

#### 3) 预警分析

预警分析的重点是明确实际警情、寻觅警源、解读警兆及预报警度。警情有三个等级，包括无警、轻警、重警；警源有自然、内生机外生警源。分析警兆的宗旨主要是圈定出警区，在此基础上结合实际经验和专家论证法等对警度做出合理预报。联合使用智能检测、传感器、计算机通信等先进技术，实时监测、呈现及分析参数，和正常状态数据之间做比较分析，反馈有关信号并创建数学模型，指导有关人员快速执行有效的应急控制办法。与此同时，搭建专家知识库，进而为分析事故与预警、制定方案等提供更多可靠依据。

#### 4) 评价

在数据库内实时更新施工安全监测及预警中生成的新数据及事故现场的反馈数据，也要合理评估施工事故带来的损失。启用系统内的事故分析及评价功能，勾画出高层建筑施

工的事故模型,采用事故树分析法进行层层分析,寻觅到引起事故的根本原因。

### 3.3 安全监测与预警系统的结构设计模型

充分考虑高层建筑施工的安全预警系统的特殊功能,对系统的体系结构做出如下设计:

1) 数据存储层:大量的安全生产指标参数信息、工程事故及预警信息等均被存储在本层,用于辅助及时更新数据库。

2) 功能层:该层具备安全监测、事故分析、预警评价等诸多功能

3) 展现层:该层和 Web 浏览器之间创建了可靠的连接关系,能够帮助有关人员能随时阅览和操作信息。

图2是系统的体系结构设计模型<sup>[5]</sup>。

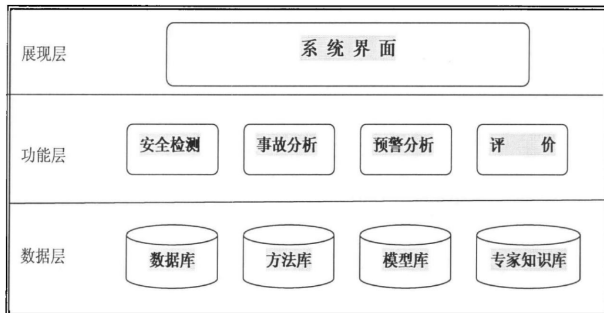


图2 高层建筑施工中的安全检测与预警系统结构模型

### 3.4 高层建筑施工中的安全监测与预警过程模型

#### 1) 施工中的危险源监测平台

该平台采用先进的信息技术构建出建筑工地视频监控系統,实现了对施工现场安全生产状态的实施监测,比如外脚手架、基坑及边坡防护等,也能分析现场施工过程中的各个危险源的变化发展情况。

建筑工地视频监控系統以 Internet 作媒介,将现场监控精通、无线网桥等采集的图像实时传输进远端连接的安全監管系統平台内,帮助安全监管人员远程了解工地现场的真实状况,随时做出远程指挥调度。

#### 2) BP 神经网络安全综合评价

BP 网络是基于误差反传算法运行的前向式多层网络,其利用 AHP-Fuzzy 综合评价法取训练 ANN 样本,自动生成网络学习样本集,成功搭建神经网络模型,能更好地监测系统安全生产指标。且通过创建施工现场安全信息系统,能使安全信息库更为完善,辅助提高 BP 网络训练学习的精准度,进而使高层建筑施工中安全综合评估结果的精准度有更大的保障。

#### 3) 预警系統

因为各种单因素安全生产指标之间存在着复杂的关系,在完成单指标预警工作的基础上,也要整合诸多预警指标作出综合预警,这样才能使预警效率与精准度有所保障。本文基于 BP 网络对高层建筑施工的综合安全状况作出预警,且和安全管理新系統交织建成人机交互平台,计算机平台将最终的分析结果传出并生成相应报告,给安全监管员作出预警决策提供依据<sup>[6]</sup>。

已知某站房总建筑面积达到 10215 m<sup>2</sup>,其中站房 8599

m<sup>2</sup>,利用架空层面

积 1617 m<sup>2</sup>,总用地面积 60447 m<sup>2</sup>,其中广场、站房用地分别是 47337 m<sup>2</sup>、13110 m<sup>2</sup>。施工设计图内存在 3 条后浇带,员设计要 2 个月后才可组织后浇带的浇筑作业。为了达到建设工程的工期要求,施工方经商议后决定使用超长结构无缝施工技术。为了满足委托方的需求,对本工程 7.9m 标高范围内混凝土超长结果做出监测和预警,传感器布置方位及编号情况见表 1。

表 1 传感器位置及编号

构件名称	具体位置	编号
⑨-10/⑩梁	梁端上层	A2
⑨-10/⑩梁	梁中中层	B1
⑨-10/⑩梁	梁中上层	B2
⑨-10/⑩梁	梁中上层	B3
大气温度	—	B4
⑩-11/⑪梁	梁端上层	C2
⑩-11/⑪梁	梁端中层	C3
⑨-10/⑩梁	梁端上层	D2
⑨-10/⑩梁	梁端下层	D4

在给梁体施加预应力的各个阶段重,测得的应力值都在 -49.75~30.56 MPa 范围内。多数施加预应力的过程中,钢筋构件处于受压状态,且施以预应力后这种受压状态基本未见改变。监测结果表明,钢筋应力的绝对值在钢筋强度设计值之下,这提示监测的施工阶段内,被测钢筋的工作状态无异常。

#### 结束语:

综合全文论述的内容,可见高层建筑施工中的结构安全面临很多风险因素,材料质量问题、施工工艺与质量缺陷、荷载变化及基础沉降等,这些因素交互作用可能引发严重的安全事故。结合安全监测与预警系统的设计与应用,能够有效识别风险、评估安全状况并提供预警信息,为高层建筑施工安全管理提供了科学依据,促进高层建筑现场施工活动的安全、可靠进行。

#### [参考文献]

- [1] 盛建明. 高层建筑深基坑支护结构施工质量安全管控分析[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24 (02): 171-173.
- [2] 纪文博, 胡存美. 高层建筑大跨度预应力混凝土楼板施工技术研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2025, 29 (02): 141-143.
- [3] 刘文坤. 某高层建筑工程主体模板施工管理研究[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23 (12): 125-127.
- [4] 郑宏志. 型钢悬挑式钢管外脚手架在高层建筑中的应用研究[J]. 科技创新与应用, 2024, 14 (36): 177-180+186.
- [5] 孙玉峰, 王乃正, 高敏, 等. 基于系统动力学的高层建筑安全风险研究[J]. 山东工商学院学报, 2024, 38 (06): 94-104+123.
- [6] 张彦. 超高层住宅建筑施工中的安全管理与监控系统研究[J]. 居舍, 2024, 37 (35): 162-165.