

文章编号:1673-9469(2025)01-0075-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.01.010

融合 BIM 和物联网技术的附着式升降脚手架安全控制方法

石华旺,李目达,许文凯,王鸿源,李彦苍

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要: 针对附着式升降脚手架的使用安全问题,首先建立包括4个一级指标、18个二级指标的附着式升降脚手架使用阶段安全评价指标体系,采用AHP-熵值法赋权分析;并基于指标权重提出融合BIM技术和物联网技术的附着式升降脚手架安全控制框架,使用JavaScript开发可视化监测管理平台,实现施工过程信息化监测与管理;最后对架体安全状态进行评价,并基于BIM实现风险等级可视化,以期提高附着式升降脚手架施工安全管理水平。

关键词: 附着式升降脚手架;BIM技术;物联网技术;层次分析法-熵值法;安全控制

中图分类号: TU731.2; TU69

文献标识码: A

Attached Lifting Scaffold Safety Control Method Based on BIM and Internet of Things Technology

SHI Huawang, LI Muda, XU Wenkai, WANG Hongyuan, LI Yancang

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: To address the safety issues of the use of attached lifting scaffolding, a safety evaluation index system for the use stage of attached lifting scaffolding is first established, which includes 4 primary indicators and 18 secondary indicators. The AHP entropy method is used for weighting analysis; And based on the weight of indicators, propose a safety control framework for attached lifting scaffolding that integrates BIM technology and IoT technology. Develop a visual monitoring and management platform using JavaScript to achieve information-based monitoring and management of the construction process; Finally, evaluate the safety status of the scaffold and visualize the risk level based on BIM, in order to improve the safety management level of attached lifting scaffolding construction.

Key words: attached lifting scaffold; BIM Technology; Internet of things technology; AHP-Entropy method; safety control

附着式升降脚手架(简称“爬架”)因其施工效率高、绿色环保且劳动强度低等优势近些年在高层建筑中应用广泛,但爬架在便利建筑施工作业的同时,出现的安全问题也不容忽视。裴兴旺等^[1]基于灰色欧几里得加权关联度理论构建了爬架安全评价模型,为爬架安全管理工作提供了一定的理论参考;白凤美等^[2]基于集对分析法和层次分析法构建了爬架倾覆和坠落风险评价模型。但由于爬架结构的复杂性及升降、使用状态的循环交替,致使每次安全检查内容多,甚至存在一些涉及架体稳定性的非外观因素难以通过检查发

现,这种通过文字,依靠经验,缺少实时监控过程的管理并不能切实有效提高爬架在使用阶段的安全管理水平。新兴信息技术的发展给工程管理提供了技术支持,借助BIM平台辅助实现动态管理是未来发展方向之一^[3],最早Huang等^[4]就提出了采用监测装置判断脚手架安全状态, Kim等^[5]提出了基于BIM的脚手架安全评估系统。

目前学者对爬架研究还集中于架体性能^[6]和安全管理流程^[7-8]上,基于信息技术在爬架上的应用研究较少,仅有的研究也是单独地基于BIM技术^[9]或物联网技术^[10]。针对这一现状,本文首先

收稿日期:2022-05-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278171)

第一作者:石华旺(1979—),男,河北邯郸人,博士,副教授,从事BIM、结构工程、工程管理方向的研究。

建立了爬架使用阶段安全评价指标体系,使用AHP+熵值法赋权分析安全控制要点;在此基础上提出融合BIM技术和物联网技术的爬架控制框架,开发可视化监测平台进行爬架使用阶段风险因素管理,以期爬架施工安全控制提供一种有效途径。

1 安全控制要点

1.1 建立指标体系

借鉴轨迹交叉事故致因理论,结合文献分析、专家咨询及相关标准,建立包括目标层、准则层和指标层三个层次安全评价指标体系。确立4个准则层及18个指标层,见表1。

1.2 分层确定指标权重

为给后文融合BIM技术和物联网技术进行爬架安全管理提供更多可靠参考,使赋权结果更加客观,本文采用主客观结合分层赋权方式(AHP层次分析法+熵值法)确定权重。

1.2.1 层次分析法

由于实际项目管理水平的管理水平和经验能力各不相同,因此采用层次分析法通过专家经验判断两两因素的相对重要程度来确定准则层因素权重,计算步骤如下:

步骤1:选取标度准则和构造判断矩阵。本文采用五标度评分法,见表2,它一方面利于专家更容

易判断指标间的重要程度,另一方面也能降低人为主观因素的影响。

表2 五标度评分法

Tab. 2 Five-scale scoring method

标度值	重要性等级
1.00	同等重要
1.30	稍微重要
1.77	明显重要
2.40	强烈重要
3.63	绝对重要

对指标两两比较后形成D矩阵:

$$D = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

r_{ij} 位于矩阵D的第*i*行第*j*列,表示第*i*个指标相对于第*j*个指标的重要性等级, $r_{ji} = \frac{1}{r_{ij}}, i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

步骤2:以方根法求取权重向量、特征根。

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(DW)_i}{W_i} \quad (2)$$

其中 $W_i = \frac{\overline{W}_i}{\sum_{j=1}^n \overline{W}_j}, \overline{W}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n r_{ij}}$ 。

表1 附着式升降脚手架使用阶段安全评价指标体系

Tab. 1 Safety evaluation index system for the use stage of attached lifting scaffolding

目标层	准则层	权重 <i>W</i>	指标层	权重 <i>U</i>	综合权重 <i>V</i> /%
爬架使用阶段安全状态 <i>S</i>	架体性能 <i>S</i> ₁	0.125 5	初始及设计缺陷 <i>S</i> ₁₁	0.262 4	3.29
			防倾、防坠装置的可靠度 <i>S</i> ₁₂	0.237 3	2.98
			特殊部位的加固 <i>S</i> ₁₃	0.103 9	1.31
			螺栓组件等连接部位 <i>S</i> ₁₄	0.227 7	2.85
			防护程度(翻板,副板,防护网) <i>S</i> ₁₅	0.168 7	2.12
	人员行为 <i>S</i> ₂	0.199 5	交叉作业,违规作业 <i>S</i> ₂₁	0.442 1	8.83
			佩戴安全设备 <i>S</i> ₂₂	0.250 2	4.99
			无证上岗 <i>S</i> ₂₃	0.107 0	2.13
			抢工期(支座处砼强度不足) <i>S</i> ₂₄	0.200 7	4.01
			电动葫芦提升荷载 <i>S</i> ₃₁	0.263 9	10.29
	架体使用状态 <i>S</i> ₃	0.390 2	架体导轨垂直度 <i>S</i> ₃₂	0.168 7	6.59
			机位间高度差 <i>S</i> ₃₃	0.168 6	6.57
			附墙支座卸荷情况 <i>S</i> ₃₄	0.200 2	7.80
			风荷载(对整体变形影响显著) <i>S</i> ₃₅	0.198 6	7.75
	安全管理 <i>S</i> ₄	0.284 8	安全技术交底 <i>S</i> ₄₁	0.360 8	10.28
			安全教育培训 <i>S</i> ₄₂	0.360 8	10.28
			检查验收记录及维护保养情况 <i>S</i> ₄₃	0.149 6	4.26
			材料堆放管理(材料变形、生锈) <i>S</i> ₄₄	0.128 8	3.67

表 3 平均随机一致性指标 RI
Tab. 3 Average random consistency index RI

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

步骤 3:一致性检验。一致性检验 CR 值小于 0.1,说明无逻辑错误,反之则需重新构造判断矩阵。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

其中 *n* 为判断矩阵的阶数;RI 取值见表 3。

本文邀请 10 位专家根据自身经验,确定各因素所占权重,表 4 为准则层判断矩阵。

表 4 准则层判断矩阵

Tab. 4 Criterion layer judgment matrix

准则层	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	权重 W
S ₁	1.000	0.769	0.275	0.416	0.125 5
S ₂	1.300	1.000	0.565	0.769	0.199 5
S ₃	3.630	1.770	1.000	1.300	0.390 2
S ₄	2.400	1.300	0.769	1.000	0.284 8

CI=0.007 1, CR=0.007 89<0.1

1.2.2 熵值法

指标层使用熵值法确定权重。熵值法是一种客观赋权法,信息量越小熵越大,其权重也就越小,充分运用原始数据,相对客观。通过搜集近十年爬架事故案例,分析事故发生原因,确定指标权重 *U*。计算步骤如下:

步骤 1:数据标准化。为了便于比较指标和计算数据,对原始矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 标准化得到矩阵 $\bar{A} = (\bar{a}_{ij})_{m \times n}$ 。

步骤 2:计算指标熵 *E*,第 *j* 个指标的信息熵为

$$E_j = - \frac{\sum_{i=1}^n \bar{a}_{ij} \ln \bar{a}_{ij}}{\ln n} \quad (5)$$

其中 $i, j = 1, 2, \dots, n, n$ 为样本总数。

步骤 3:计算指标的熵权,确定指标权重

$$U_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (6)$$

其中指标偏差度 $d_j = 1 - E_j$ 。

1.3 综合权重

将基准层权重与相对应指标权重相乘,得综合权重 $V_{ij} = W_i \cdot U_j$ 。

$$V_{ij} = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} \cdot \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (7)$$

通过对 4 个准则层指标和 18 个二级指标的综合分析,依据权重值高低确定各要素重要程度。对于准则层,权重值最高的是架体使用状态 S₃ 为 0.390 2,其中电动葫芦提升荷载 S₃₁、附墙支座卸荷情况 S₃₄、风荷载 S₃₅ 在二级指标层中权重排名靠前、重要性高,在安全管理中要重点关注;各爬架型号在投放市场前都通过了国家标准,且厂商依据项目实际情况对架体进行详细设计,因而架体性能 S₁ 权重占比最小;由于人员的不安全行为及管理的缺失通常会加大事故发生概率,故而交叉作业,违规作业 S₂₁、安全技术交底 S₄₁ 和安全教育培训 S₄₂ 在安全管理中也是重中之重。

2 融合 BIM 与物联网技术的爬架安全控制框架

BIM 技术:即建筑信息模型,能够整合项目各方信息并提供信息交换和共享,具有可视化优势。但模型信息是静态的,不能够根据实际情况辅助管理。

物联网技术:通过信息传感设备,实时自动采集安全风险数据,可实现智能化识别和预警,自动化水平高,节省人力资源,但存在采集的数据不够直观问题。

融合 BIM 和物联网技术,可弥补两种技术的短板,更好发挥两种技术优势。基于上节指标权重分析的结果,本文构建的爬架安全控制框架如图 1 所示,该框架分为 4 个层级,分别为采集层、数据层、应用层、反馈层^[11]。

2.1 采集层

采集层由 Revit 软件及传感器等组成。Revit 软件负责爬架三维模型的建模。传感器主要分两类:一类针对架体使用状态 S₃ 进行信息采集,分别采用重力传感器、双轴倾角传感器、位移传感器、压力传感器监测电动葫芦提升荷载 S₃₁、架体导轨垂直度 S₃₂、机位间高度差 S₃₃、附墙支座卸荷情况 S₃₄;另一类采集施工环境信息,如温度、风压、

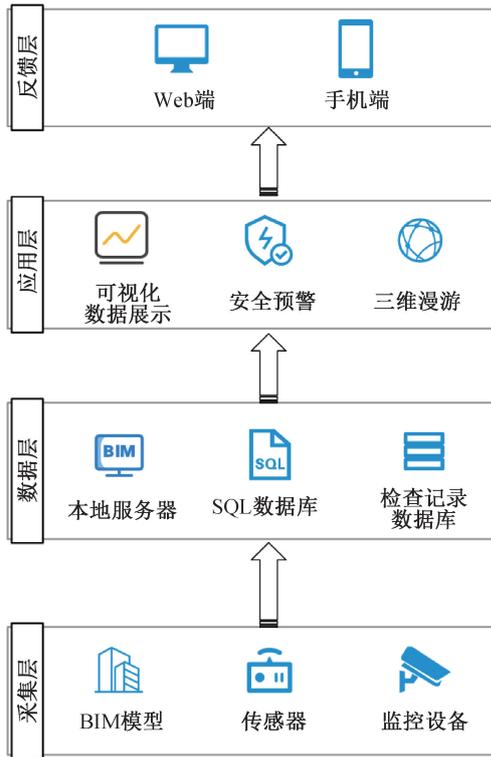


图1 爬架安全控制框架

Fig. 1 Attached lifting scaffold safety control framework

PM2.5,并辅助带有物体识别功能的监控设备,形成多元的信息采集体系。各机位传感器通过通讯线与最近机位分控箱相连,主控箱采集分控箱信息与状态后最终通过内置4G通讯模块将数据上传到数据层。

2.2 数据层

数据层负责储存各种数据,BIM模型数据、传感器采集数据存于SQL Server等数据库软件中,这些数据经采集分类处理后通过接口完成对各数据的调用。

2.3 应用层

根据爬架的管理要点,划分3个应用模块,如图2。分别为安全预警模块、BIM模型模块和检查

作业模块,每个模块对应不同的指标管理要点,所有模块的集合基本能满足对爬架施工过程管理要点的把控。

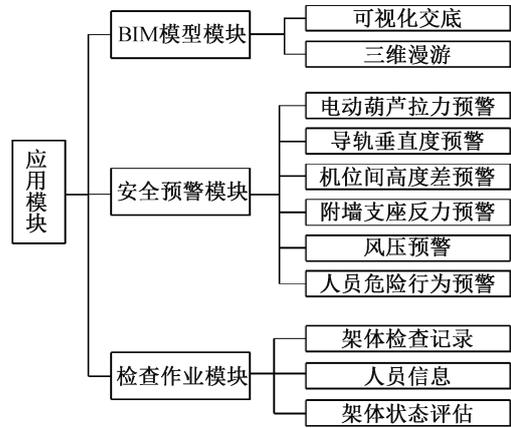


图2 应用层组织结构图

Fig. 2 Application layer organization chart

2.3.1 安全预警模块

安全预警模块主要功能是对采集层监测数据的分析处理,进行异常信息预警。

首先设置预警阈值,划分预警等级,见表5:如重力传感器监测机位电动葫芦负载状况,当负载值大于架体实际重量值的30%时或低于架体实际重量值的70%时为重警预警,解决因机位电动葫芦的承载状态而造成架体倾覆、坠落等相关危险;根据《建筑施工工具式脚手架安全技术规范》JGJ 202—2010规定,爬架各相邻机位的水平高差不得大于30mm,因此设置水平高差大于30mm时为重警预警;风速传感器监测爬架顶部实时风速,风速超过5级风时为重警预警,从而禁止升降作业。另外使用具有人脸识别功能的监控设备监测施工人员危险行为,如安全帽、安全带佩戴情况等。

预警方式:采用不同的监测数据分别预警方式,可以做到互不干扰。根据传感器预警等级,BIM模型中相对应传感器分别显示绿、黄、红三色。当出现重警时进行异常信息记录,并通知管理人员处理。

表5 预警等级划分

Tab. 5 Warning level division

监测数据 d	预警等级		
	无警(绿)	轻警(黄)	重警(红)
电动葫芦提升荷载 S_{31}	$0.9L \leq d < 1.1L$	$0.7L \leq d < 0.9L$ 或 $1.1L \leq d \leq 1.3L$	$d > 1.3L$ 或 $d < 0.7L$
架体导轨垂直度 S_{32}	$d < \pm 0.2\%$	$\pm 0.2\% \leq d < \pm 0.5\%$	$d \geq \pm 0.5\%$
机位间高度差 S_{33}	$d < 10 \text{ mm}$	$10 \text{ mm} \leq d < 30 \text{ mm}$	$d \geq 30 \text{ mm}$
附墙支座卸荷情况 S_{34}	$0.9L \leq d < 1.1L$	$0.7L \leq d < 0.9L$ 或 $1.1L \leq d \leq 1.3L$	$d > 1.3L$ 或 $d < 0.7L$
风荷载 S_{35}	$d < 4.5 \text{ m/s}$	$4.5 \text{ m/s} \leq d < 8 \text{ m/s}$	$d \geq 8 \text{ m/s}$

注: L 为预警值, \pm 代表往外倾斜或往内倾斜。

2.3.2 BIM 模型模块

依据 BIM 模型进行安全技术交底 S_{41} , 安全教育培训 S_{42} 。将架体构造, 安全注意事项以动画、模型等多种形式呈现于施工人员面前, 使安装工序、结构部件组成简洁直观, 增加现场作业人员对施工技术的认识, 提高沟通协调效果和对项目施工的掌控力。当异常发生时, 爬架管理人员可在 BIM 模型中找到传感器的所在位置, 查看实时监测到的运行数据, 并结合视频监控了解对应区域的现场情况, 实现三维数据漫游与视频监控的有效结合。

2.3.3 检查作业模块

对传感器不能监测的指标, 管理人员使用该模块进行爬架安全检查记录的登记、拍照上传、处理等功能。对记录的管理人员信息、专业资质、施工专项方案、材料进场验收等情况进行管理与检查, 做到管理数据的数字化归档、验收。

2.4 反馈层(可视化展示)

管理人员在反馈层通过 Web 端或其他智能设备浏览网页端平台信息, 从而实现对爬架使用过程中动态、直观地管理, 有效提升管理人员的管理水平和效率。

3 可视化平台开发

3.1 爬架 BIM 模型建立

爬架以电动环链葫芦为提升动力, 由架体系统、提升系统、附着支撑系统(含防坠、防倾装置)、控制系统和防护系统组成。BIM 模型由代表不同结构的族构件拼装而成, 族以独立的文件形式存在着, 可以随时修改参数。爬架 BIM 模型应根据构件加工图纸创建相应的爬架 BIM 族库, 包括走道板族、网板族、附墙支座族等, 见图 3, 再将各族通过搭积木形式组成爬架三维模型。

3.2 模型轻量化及二次开发

爬架三维模型需依赖专业软件, 并且形成的文件体积大, 应用具有局限性。要实现基于 Web 端的快捷显示应用, 模型轻量化是绕不开的关键技术, 所谓模型轻量化即在不损失模型真实性的前提下减小 BIM 模型体量, 让它体量更轻、显示更快。在这个过程中, BIM 模型经历了以下几步处理: (1) 数模分离; (2) 几何转换; (3) 渲染处理。数模分离将模型中的几何数据和非几何数据分离压缩, 其中模型几何数据通过三角化等方式转换为可被 Web 或移动端图形引擎识别和处理的数据格式, 处理后的数据通过 Web 端的图形引擎渲染处理变成体量更轻的三维模型。

利用 BIMFACE 平台, 将 BIM 模型轻量化处理, 同时 BIMFACE 提供丰富的 API 接口, 之后对轻量化的模型二次开发, 完成构件模型与传感器数据关联。构件高亮显示, 且具有动画模拟等功能, 实现在 Web 端进行读取 BIM 模型的相关操作。

3.3 可视化平台搭建

平台搭建采用的是 B/S 的网络结构, 即浏览器(Browser)-服务器(Server)的结构。可视化平台重要的功能就是对数据的可视化展示, 以 Visual Studio 2018 作为主要开发环境, 采用 HTML5 的 div 标签完成可视化平台前端页面区域的划分设计, 各区域分别实现不同数据展示。如人员信息区域: 展示爬架项目负责人员信息及联系方式, 明确责任划分。环境监测区域: PM2.5 传感器监测施工过程所造成的空气污染, PM2.5 超标则开启爬架顶部喷淋装置。之后使用 CSS+JavaScript 完成可视化前端搭建。

该平台通过将现实传感器与轻量化的爬架 BIM 模型中的构件 ID 一一绑定, 通过 WebGL 技术显示在网页端^[12]。采集层传感器监测的数据处理

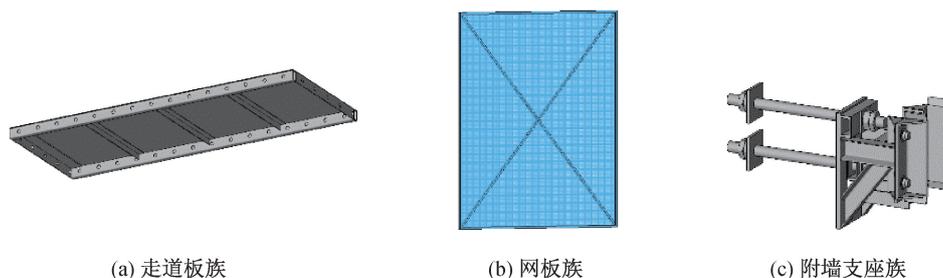


图 3 爬架族

Fig. 3 Climbing clan

分析后,结果以不同颜色显示于 BIM 模型中,管理人员通过 BIM 模型可直观了解当前架体运行情况,通过点击传感器模型可调出具体的监测数据并展示在可视化平台上,做到 BIM 技术和物联网技术的一定融合。最后将预警日记和管理人员联系方式集成在可视化平台中,可一定程度提高施工过程中风险因素的传递效率。

4 架体安全评价

根据爬架安全管理相关规定,爬架每一次提升,或特殊天气、长时间未使用时,需进行架体安全检查。由于存在一些涉及架体稳定性的非外观因素难以通过检查发现,造成检查过程形式化,因此本文依据监测数据+检查打分方式,对爬架安全性进行综合评价,并将评价结果集成入 BIM 模型,达到风险评估结果可视化。

4.1 评价等级

根据相关脚手架研究成果以及咨询专家结果,按照脚手架安全分类等级,确定各安全等级的标准。定性评级集为:安全状态评分值 $F = \{A, B, C, D\}$ 。 $F < 60$ 为 A,表示严重危险,停止使用; $60 \leq F < 80$ 为 B,表示一般危险,需要整改; $80 \leq F < 90$ 为 C,表示轻微危险,需要注意; $90 \leq F < 100$ 为 D,表示安全状态,风险可忽略。

4.2 评价量值

依据表 6 的指标量化途径将各指标得分情况(百分制)录入安全管理平台,其中传感器监测数据按预警等级线性插值方式转换为指标得分,无警与轻警分界点为 85 分,轻警与重警分界点为 60 分。最终将各指标综合权重 V 与指标得分加权处理求得脚手架的整体安全状态评分值 F 。

4.3 基于 BIM 的评价可视化

将评价分析结果信息集成进 BIM 模型中,为了更为直观地辅助决策,以不同颜色表示不同风险等级,达到风险等级可视化效果,核心代码如下:

如安全状态为 A(严重危险)时,整体模型显示红色。

```
1. function StateSafetyAssess() {
2.     // 新建颜色对象,设置颜色为红色及透明度为 0.8
3.     let Redcolor = new Glodon. Web. Graphics. Color( "# FF0000", 0.8 );
4.     //进行模型颜色着色
5.     switch ( safetyStatus ) {
```

```
case A:         model3D. overrideAllComponentsColor
( Redcolor );
break; }
6. // 模型重新渲染,显示等级颜色效果
7. viewer3D. render(); }
```

表 6 指标评分来源

Tab. 6 Index rating source

指标层	量化途径
初始及设计缺陷 S_{11}	进场验收打分
防倾、防坠装置的可靠度 S_{12}	验收+检查打分
特殊部位的加固 S_{13}	现场检查打分
螺栓组件等连接部位 S_{14}	现场检查打分
防护程度(翻板,副板,防护网) S_{15}	现场检查打分
交叉作业,违规作业 S_{21}	依据管理水平量化
佩戴安全设备 S_{22}	现场检查打分
无证上岗 S_{23}	现场检查打分
抢工期(支座处砼强度不足) S_{24}	现场检查打分
电动葫芦提升荷载 S_{31}	传感器监测
架体导轨垂直度 S_{32}	传感器监测
机位间高度差 S_{33}	传感器监测
附墙支座卸荷情况 S_{34}	传感器监测
风荷载(对整体变形影响显著) S_{35}	传感器监测
安全技术交底 S_{41}	依据管理水平量化
安全教育培训 S_{42}	依据管理水平量化
检查验收记录及维护保养情况 S_{43}	现场检查打分
材料堆放管理(材料变形、生锈) S_{44}	现场检查打分

5 结论

1)通过对附着式升降脚手架施工安全危险因素的归纳总结,基于事故致因理论,建立了更加全面的附着式升降脚手架安全评价模型,确立了 4 个准则层及 18 个指标层。并采用五标度的 AHP 法和熵值法分层赋权分析,结果表明:施工过程中架体使用状态权重值最高,在安全管理中要重点关注,同时,由于人员的不安全行为及管理的缺失通常会加大事故发生概率及后果程度,故而交叉作业、违规作业、前期技术交底和安全教育培训在安全管理中也是重中之重。

2)在安全评价研究的基础上,融合 BIM 技术和物联网技术,形成了附着式升降脚手架动态施工可视化平台框架。构建的系统框架分为采集层、数据层、应用层、反馈层 4 个层级,通过将传感器监测数据与 BIM 模型关联,可实现脚手架模型传感器监测数据可视化展示功能,项目人员可以高效、直观地获取相应测点的数据,可适用于任何需要在网页端通过 BIM 模型展示监测数据的施工业务。

3)最后利用 Revit 建立了附着式升降脚手架模型族库,运用 HTML5、CSS+JavaScript 等编程语言,选取 BIMFACE 轻量化引擎,实现 BIM 模型在 Web 端的显示与交互,实现附着式升降脚手架运行状态的可视化管理。

参考文献:

- [1] 裴兴旺,赵向东,周崇刚,等. 基于灰色欧几里得的全钢型附着升降脚手架安全性评价[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 405-415.
- [2] 白凤美,李佳洋. 附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险评价模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(S2): 35-39.
- [3] 金占勇,夏爽,黄春雷,等. 基于 CiteSpace 的国内 BIM 研究热点与趋向分析[J]. 建筑经济, 2021, 42(6): 103-107.
- [4] HUANG Y L, CHEN W F, CHEN H J, et al. A monitoring method for scaffold-frame shoring systems for elevated concrete formwork[J]. Computers & Structures, 2000, 78(5): 681-690.
- [5] KIM H, AHN H. Computing in civil engineering[M]. The United States of America: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2011.
- [6] 刘 垚. 附着式升降脚手架力学特性分析及其设计[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2021.
- [7] 周 磊. 倾斜附着式升降脚手架静力稳定及防坠动力特性研究[D]. 济南:山东大学, 2020.
- [8] 解金箭. 附着式升降脚手架安全管理研究[D]. 北京:首都经济贸易大学, 2017.
- [9] 方 兴. 基于 BIM 技术的附着升降脚手架信息化管理应用研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2018.
- [10] 刘剑锋. 基于物联网的附着式升降脚手架安全监控系统研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
- [11] 莫言迟,刘占省,张安山,等. 融合 BIM 技术和物联网的消防安全数据管理方法[J]. 建筑技术, 2021, 52(6): 710-713.
- [12] DONG Y, XU Y, LI H, et al. A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 186(1): 229-242.
- (责任编辑 王利君)
-
- (上接第 74 页)
- [2] CHEN Y, LIN H, CAO R, et al. Slope stability analysis considering different contributions of shear strength parameters[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(3): 04020265.
- [3] 任 洋,李天斌,杨 玲,等. 基于离心模型试验与数值计算的超高陡加筋土填方边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 836-844.
- [4] 牛笑笛,杨广庆,周诗广,等. 铁路新型整体刚性面板加筋土挡墙现场试验研究[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(5): 1-10.
- [5] CHEN J, ZHANG W, XUE J. Zoning of reinforcement forces in geosynthetic reinforced cohesionless soil slopes[J]. Geosynthetics International, 2017, 24(6): 565-574.
- [6] 杨广庆,刘华北,吴连海,等. 台阶宽度对加筋土挡墙垂直应力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 209-216.
- [7] 介玉新,周诗博,郭政豪,等. 平台分级对加筋土边坡稳定性的影响研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1178-1187.
- [8] TIWARI G, SAMADHIYA N K. Factors influencing the distribution of peak tension in geosynthetic reinforced soil slopes[J]. Indian Geotechnical Journal, 2016, 46(1): 235-244.
- [9] 杨校辉,陆 发,郭 楠,等. 多级黄土高边坡稳定性计算及数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(S1): 172-177.
- [10] 杨果林,李琪焕,段君义,等. 膨胀土高边坡多级组合式支挡结构力学特性现场试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 171-180.
- [11] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2000.
- [12] 山西省交通厅. 公路加筋土工程设计规范:JTJ 015—91[S]. 北京:人民交通出版社, 2003.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构通用规范:GB 55008—2021[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2021.
- [14] 靳 静,杨广庆,王志杰,等. 多级加筋土高挡墙的工程特性及影响因素[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(1): 8-16.
- (责任编辑 王利君)