

DOI: 10.7672/sgjs2025020136

# 融合数据与模型的高大模板支撑结构监测预警 阈值确定及更新方法\*

李 强<sup>1,2</sup>, 王佩璇<sup>3</sup>, 马海鹏<sup>4</sup>, 张莹莹<sup>1</sup>, 卢 璐<sup>5</sup>

(1. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221018; 2. 浙大宁波理工学院土木建筑工程学院, 浙江 宁波 315100; 3. 河南工业大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 4. 同舟国际工程管理有限公司, 浙江 宁波 315000; 5. 宁波市凯弘工程咨询有限公司, 浙江 宁波 315500)

[摘要] 针对工程实践中高大模板支撑结构(高支模)安全监测缺少科学、合理预警阈值问题,提出一种融合数据与模型的监测预警阈值确定及更新方法。以某实际高支模工程为例,根据专项设计资料和施工现场边界设置条件建立有限元模型,进行屈曲破坏分析,确定初始预警阈值,用于指导现场监测。搭建视觉监测系统,实时监测高支模结构位移,感知数据并进行超限预警;反馈实测数据,更新有限元模型,将更新后的模型屈曲破坏位移和初始预警阈值进行对比,并分析阈值合理性。结果表明,随着时间积累,高支模结构水平偏移和竖向沉降均呈逐渐增大趋势。提出的监测预警阈值确定及更新方法可在工程实践中不断迭代改进,更新后的模型屈曲破坏位移大于初始报警阈值,说明初始预警阈值偏于安全,取值合理。

[关键词] 高支模;屈曲破坏;视觉监测系统;位移;有限元分析;监测;预警

[中图分类号] TU755 [文献标识码] A [文章编号] 2097-0897(2025)02-0136-08

## Determining and Updating Method of Monitoring and Warning Threshold for High Formwork Support Structure by Fusing Data and Model

LI Qiang<sup>1,2</sup>, WANG Peixuan<sup>3</sup>, MA Haipeng<sup>4</sup>, ZHANG Yingying<sup>1</sup>, LU Lu<sup>5</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221018, China; 2. School of Civil Engineering, NingboTech University, Ningbo, Zhejiang 315100, China; 3. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China; 4. Tongzhou International Engineering Management Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315000, China; 5. Ningbo Kaihong Engineering Consulting Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315500, China)

**Abstract:** In view of the lack of scientific and reasonable early warning value in the safety monitoring of high formwork support structure (high-support formwork) in engineering practice, a determining and updating method for monitoring warning value by fusing data and model is proposed. Taking an actual project as an example, the finite element model is established according to the special design data and the boundary setting conditions of the construction site, and the buckling failure analysis is carried out to determine the initial warning threshold, which is used to guide the on-site monitoring. A visual monitoring system is built to monitor the displacement of high-support formwork structure in real time, perceive data and carry out over-limit warning. The measured data is responded and the finite element model is updated, the updated model buckling failure displacement with the initial warning threshold are compared, and the rationality of the threshold is analyzed. The results show that with the accumulation of time, the horizontal displacement and vertical settlement of high-support formwork structure are gradually

\* 浙江省自然科学基金(LY24E080012); 宁波市重点研发计划项目(2023Z221,2024Z216); 宁波市公益性研究计划项目(2023S004); 浙江省尖兵领雁计划项目(2023C03183); 浙江省建设科研项目(2022K134,2023K226)

[作者简介] 李 强,副教授,E-mail: liqiang@nit.zju.edu.cn

[收稿日期] 2024-09-20

increasing. The method of determining and updating the monitoring warning value proposed can be iteratively improved in engineering practice. The updated model buckling failure displacement is greater than the initial alarm threshold, indicating that the initial warning threshold is safe and reasonable.

**Keywords:** high-support formwork; buckling failure; visual monitoring system; displacement; finite element analysis; monitoring; warning

近年来,我国建筑行业向大跨度、大空间趋势发展,高大模板支撑体系(高支模)被广泛应用,根据建办质[2018]31号文件《住房和城乡建设部办公厅关于实施〈危险性较大的分部分项工程安全管理规定〉有关问题的通知》规定,高支模系统是指建设工程施工现场混凝土构件模板支撑高度 $\geq 8\text{m}$ ,或搭设跨度 $> 18\text{m}$ ,或施工总荷载 $> 15\text{kN/m}^2$ ,或集中线荷载 $> 20\text{kN/m}$ 的模板支撑系统<sup>[1]</sup>。由于高支模结构高度较高、稳定性较差,其安全性难以保障,导致坍塌事故屡见不鲜。高支模设计不当和对混凝土浇筑时期模板支撑体系工作状态了解不足是造成坍塌的主要原因<sup>[2]</sup>。当下,许多城市已明确要求提高高支模结构安全监测覆盖率,但目前监测实践中对于预警阈值的确定仍无统一论,因此有必要深入开展科学合理的预警阈值确定及更新方法研究。

近年来,国内外学者对于高支模的研究多集中于极限承载力、节点半刚性、应力变形等<sup>[3-7]</sup>。Yu等<sup>[8]</sup>通过足尺支模架静力破坏试验,研究了结构失稳机理和破坏模式;谢楠等<sup>[9]</sup>研究了支模架稳定承载力并提出了简化计算方法;郭艳<sup>[10]</sup>通过扣件式支模架节点试验研究,可知立横杆连接节点属于半刚性连接。在整体结构安全方面,对高支模进行实时监测是保障施工安全的重要手段。现有物联感知预警系统大多以接触式传感器为主<sup>[11]</sup>,如Chen等<sup>[12]</sup>介绍了一种高支模自动化监测系统,该系统的设计和实施涉及多种传感器,具有自动化程度高、成本低的优点。但此类传感器在安装、检测、维修、拆卸等环节均需要人工攀爬操作,存在较大作业安全风险。因此,有必要开发一套适用于工地复杂环境的远程、非接触式监测预警系统。

计算机视觉技术作为典型的非接触式监测手段,在土木工程领域被广泛应用<sup>[13-16]</sup>,如周颖等<sup>[17]</sup>以消费级相机为采集设备,采用光流技术实现对目标的运动跟踪,精确识别结构动力特征,在频域中具有较高测量精度;Fang等<sup>[18]</sup>提出了一种结合计算机视觉和本体模型的新型工地危险源识别方法,在遵守安全法规的同时,自动、准确识别危险源。针对高支模结构,池昌政等<sup>[19]</sup>建立了一套基于计算机视觉和有限元的施工智能实时监测方法,实现了

对支撑结构的远程、实时、多点监测;李航宇等<sup>[20]</sup>提出了一种基于在线相机的高支模结构位移监测方法,解决了现场监测中复杂环境导致的光路遮挡问题,已成功应用于实际模板工程。还有一些学者在提高监测效率、准确性及自动化水平方面,提出了相应的解决方案和验证方法<sup>[21-24]</sup>。

综上所述,针对高支模结构,现有应用及研究存在以下不足:①目前尚无涉及预警阈值确定方法的研究;②现有物联感知预警系统大多采用接触式传感器,人员攀爬过程中存在较大安全风险。针对以上不足,本文提出了一种融合数据与模型的监测预警阈值确定及更新方法,以实际高支模结构为例,通过搭建视觉监测系统和有限元模型,建立了结构响应实时感知和反馈更新的闭合循环框架,实现报警阈值的确定及不断迭代更新。

## 1 有限元屈曲破坏分析及监测预警阈值确定

### 1.1 工程概况及分析框架

某公共建筑外挑屋面板需搭设超高模板支撑体系,其中屋面板从边梁外侧外挑 $2.25\text{m}$ ,从标高 $-1.950\text{m}$ 搭设至 $29.500\text{m}$ ,总高度 $31.45\text{m}$ ,该模板支撑体系平面及剖面如图1所示。

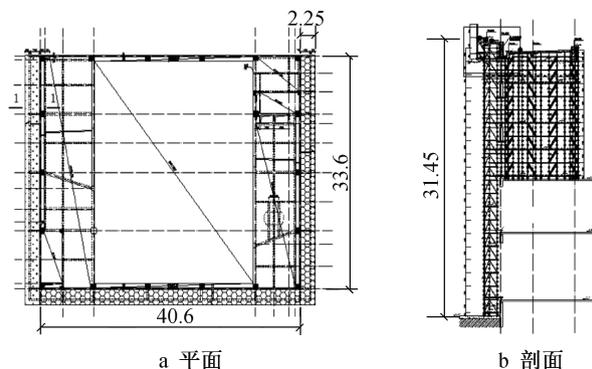


图1 模板支撑体系平面及剖面(单位:m)

Fig. 1 Plan and section of formwork support system (unit: m)

融合数据与模型的监测预警阈值确定及更新框架如图2所示。流程为:①结合高支模专项设计资料及施工现场边界条件建立有限元模型,然后添加施工阶段设计荷载,分析高支模受力及变形情况,开展结构屈曲破坏分析,确定初始预警阈值,用

于指导现场实测。②搭建一套适用于高支模结构的多点位移视觉监测系统,改进算法解决室外监测标志物不全、图像模糊等不利场景的精度问题。监测系统实时感知结构响应数据,并和设定的预警阈值进行比较。若测点实际位移大于预警阈值,系统便会立即发出超限预警信号,开展人工应急处置。③随着施工工序的不断推进,结构状态可能发生变化,利用积累的实测数据,对有限元模型进行定期更新,更新后的模型能更准确地反映高支模结构实际受力状态和变形情况,重新开展结构屈曲破坏分析,确定屈曲荷载和临界位移,更新预警阈值,继续指导现场监测。

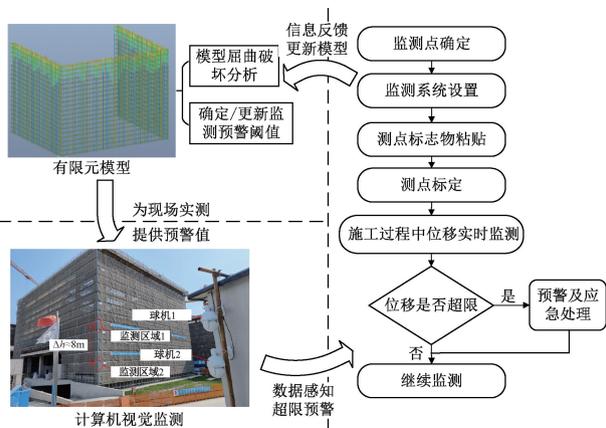


图 2 融合数据与模型的监测预警阈值确定及更新框架

Fig. 2 Framework for determining and updating of monitoring and warning values by fusing data and model

更新框架在工程实施过程中并非只更新 1 次,而是一个动态的、持续改进的过程。随着施工工序的不断推进,预警阈值可根据系统反馈的实测数据不断调整更新,以精准匹配实际结构特征。

### 1.2 模型建立

选用盘扣式钢管模板支架,其杆件材料与截面参数如表 1 所示。

表 1 杆件材料与截面信息

Table 1 Parameters of rod material and cross-section

杆件	屈服强度/MPa	外径/mm	壁厚/mm
立杆	355	48.3	3.2
水平杆	235	48.3	2.5
斜杆	235	33.7	2.3

根据设计资料和施工情况,建立高支模有限元模型。其中,上、下立杆间为刚性连接;立杆与水平杆、立杆与斜杆间为半刚性连接<sup>[25]</sup>;立杆与地面为刚性连接。边界条件如图 3 所示,立杆底端同时约束  $x, y, z$  向位移,释放各向转动;连墙件只约束  $x, y$

向位移,释放  $z$  向位移及各项转动。

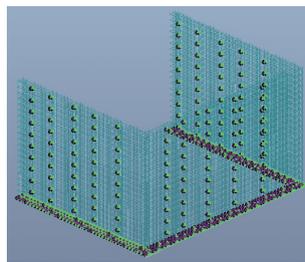


图 3 模型边界条件

Fig. 3 Model boundary condition

考虑混凝土、钢筋、模板等自重,施工人员和机具堆放荷载,泵送倾倒混凝土等因素产生的水平荷载,风荷载等,经计算,施工中支撑系统所承受竖向荷载为 4 267.68kN,水平荷载为 1 725.84kN。结构共 408 根立杆,假设每根立杆承受荷载相同,则单根立杆承受竖向荷载为 10.46kN、水平荷载为 4.23kN。

综合考虑有限元计算结果及现场监测条件,为方便阐述监测预警阈值更新框架,选取 2 个标高处进行位移监测,如图 4 所示。球机 1 监测点位为 15.400,16.900m,有限元计算结果显示转角处杆件竖向位移为 0.953~1.756mm;球机 2 监测点位约为 7.900m,有限元计算结果显示转角处杆件竖向位移约为 2.29mm,同理可得其他杆件在不同标高处的位移变形情况。

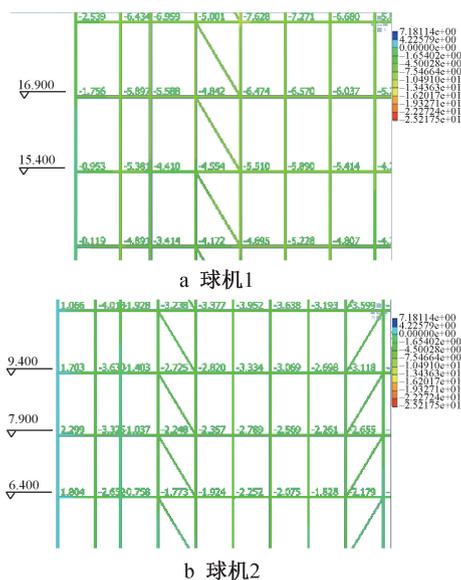


图 4 设计荷载下监测点位竖向位移(单位:mm)

Fig. 4 Vertical displacement of monitoring locations under design loads( unit : mm)

### 1.3 模型屈曲破坏分析

对于高支模结构,屈曲破坏是最常见的破坏方式之一,故在有限元分析时应考虑其屈曲破坏情

况。考虑斜杆是否工作、荷载是否均布,共分为4种工况。以竖向荷载 10.46kN、水平荷载 4.23kN 作为初始输入荷载,分别计算支模架屈曲破坏特征值和屈曲荷载,在模型中输入屈曲荷载,可得到发生屈曲破坏时监测点临界位移,如表 2 所示。结果表明:①在最不利工况下(斜杆不工作、荷载均布),结构竖向屈曲荷载为 18.20kN>10.46kN,水平屈曲荷载为 7.36kN>4.23kN,说明结构安全余度充足;②发生屈曲破坏时,荷载均布比荷载不均布工况位移更小,说明较大的位移导致斜杆开始工作;③根据最不利工况设定高支模结构监测预警阈值,球机 1 竖向位移预警阈值为 7.5mm、水平位移预警阈值为 9.91mm,球机 2 竖向位移预警阈值为 4.3mm、水平位移预警阈值为 3.9mm,均小于 DBJ33/T 1296—2023《建筑施工钢管支撑架自动化监测技术规程》规定的立杆沉降预警阈值上限为 8mm,水平位移预警阈值上限为 12mm,取值合理。

表 2 高支模结构屈曲破坏分析

Table 2 Buckling damage analysis of high-support formwork structure

工况	特征值	屈曲荷载/kN					
		球机 1 位移/mm		球机 2 位移/mm			
		竖向	水平	竖向	水平	竖向	水平
斜杆工作、荷载均布	2.03	21.23	8.58	8.60	11.79	4.9	5.24
斜杆不工作、荷载均布	1.74	18.20	7.36	7.50	9.91	4.3	3.90
斜杆工作、荷载不均布	5.72	59.83	24.20	15.88	13.83	7.8	7.10
斜杆不工作、荷载不均布	5.40	56.48	22.84	15.18	12.90	7.5	6.50

## 2 基于计算机视觉的多点位移实时监测

### 2.1 监测原理

采用自主研发的位移测量算法完成目标追踪与位移监测,该方法的理论实现包括 3 个主要步骤:相机标定、目标追踪和三维重建。

#### 2.1.1 相机标定

采用相机标定获得图像和真实世界坐标间的映射关系。采用比例系数法进行标定,目标点比例系数  $s$  计算如式(1)所示。

$$s = \frac{D}{d} \quad (1)$$

式中:  $D$  为实际距离;  $d$  为像素距离。

#### 2.1.2 目标追踪

目标追踪是位移测量的关键步骤,首先通过 1 个矩形框在参考图像中定义追踪目标,称为预定义模板,然后采用 1 个大小相同的矩形搜索框在后续

图像的感兴趣区域(ROI)逐像素移动,计算每个位置相关度,期望找到 1 个最佳匹配位置。搜索框与预定义模板间的匹配程度通过归一化相关系数描述,如式(2)所示。

$$c(i, j) = \frac{\sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} [f(x, y) - \bar{f}][g_t(x+i, y+j) - \bar{g}_t]}{\sqrt{\left\{ \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} [f(x, y) - \bar{f}]^2 \right\} \left\{ \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} [g_t(x+i, y+j) - \bar{g}_t]^2 \right\}}} \quad (2)$$

式中:  $c$  为某时刻相关系数( $-1 < c < 1$ );  $m, n$  分别为搜索框和预定义模板长和宽;  $f(x, y)$  为预定义模板上一点的像素信息;  $\bar{f}$  为预定义模板平均灰度;  $g_t(x, y)$  为时刻  $t$  搜索框上一点的像素信息;  $\bar{g}_t$  为时刻  $t$  搜索框平均灰度。 $c$  值越接近 1,说明该位置越有可能是目标运动后的位置。

选取开始监测前某时刻特征区域作为预定义模板,后续监测过程中利用式(2)进行计算,图像中  $c$  最接近 1 的区域即为目标在此刻图像中的位置。由于模板匹配法只能获取整像素坐标,测量精度受限制,有必要利用亚像素技术进一步提高测量精度。本文采用双抛物线拟合法使位移测量达到亚像素精度<sup>[26]</sup>。

#### 2.1.3 三维重建

当确定监测点不同时刻在图像中的位置后,利用系统标定的信息对图像坐标进行逆变换,即可得到真实世界下监测点位置信息。

此外,针对室外监测标志物不全、图像模糊等不利场景及识别精度不足、鲁棒性不高的问题,通过使用 YOLOX 算法识别遮挡标志物,采用 SRGAN 网络提高图像分辨率<sup>[26-27]</sup>,同时,在结构附近选取参考点(位移为 0),并将该点与结构的相对位移作为测量位移,减小识别算法中的误差。

### 2.2 施工过程中位移实时监测与预警

将特定图案识别标志物利用透明胶带粘贴在立杆表面,并处于监控球机可监测到的视野范围内。采用比例系数法对视野范围内所有测点进行标定,获取标定参数。通过监测软件可实时获取杆件位移情况。现场视觉监控如图 5 所示(图中①为高支模结构,②为粘贴在立杆上的标志物,③为监控相机视野范围,④为监控相机,⑤为结构响应分析中心)。

现场布置监测系统时,视野范围和监测距离必须满足精度要求。相机投影变换中测距、焦距、视野范围及传感器尺寸间的关系可由式(3),(4)表示。

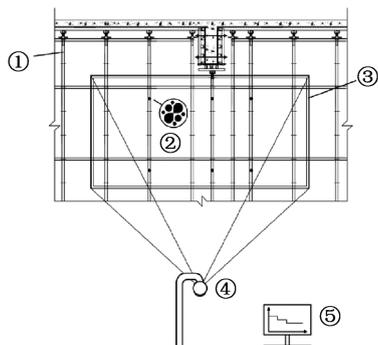


图5 现场视觉监控

Fig. 5 The on-site visual monitoring

$$\frac{D}{FOV} = \frac{f}{S} \quad (3)$$

$$FOV = \frac{Rn_r}{n_p} \quad (4)$$

式中:  $D$  为实际监测距离;  $FOV$  为相机视野范围;  $f$  为相机焦距;  $S$  为相机传感器尺寸;  $R$  为图像分辨率;  $n_r$  为真实世界需达到的测量精度;  $n_p$  为识别算法可达到的测量精度。

球机实时抓图的图像分辨率为  $1920 \times 1088$ , 视觉测量系统需达到  $1\text{mm}$  测量精度, 保守估计算法的像素识别精度为  $0.5\text{pixel}$  (像素), 代入式(4)计算可得球机拍摄的最大视野范围为  $3.84\text{m} \times 2.18\text{m}$ 。球机传感器尺寸为  $5.0\text{mm} \times 2.8\text{mm}$ , 焦距为  $4.8 \sim 110\text{mm}$ , 将这些参数代入式(3)计算可得球机合适的工作距离为  $3.7 \sim 84.0\text{m}$ 。

公共建筑待测立面与项目部正对且直线距离为  $40\text{m}$ , 处在球机合理工作范围内, 故将球机安装在项目部开展监测, 如图6所示。选择转角处及其左右相邻立杆(杆件1~3)作为监测对象, 使用2台球机分别对沿高度方向间隔  $8\text{m}$  的区域实施监测。根据监测区域1, 2中同一杆件测点水平位移和高差, 可计算出对应杆件倾斜率。

监控软件以  $30\text{s}$  监测频率实时捕捉目标点位, 同时, 画面上会显示多个测点位置、编号及当前时刻位移(见图7)。

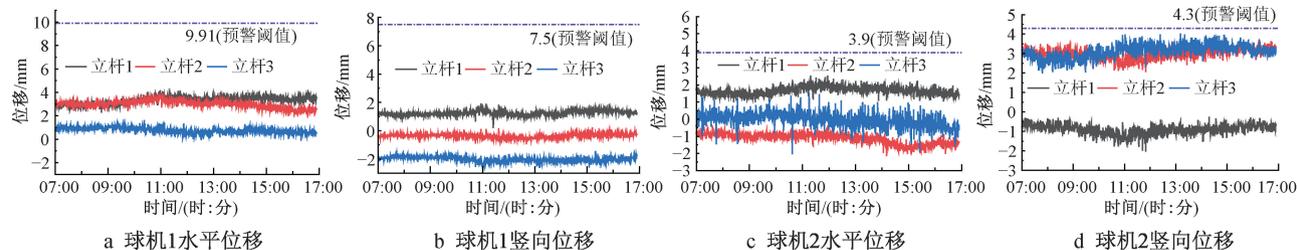


图8 高支模位移监测结果

Fig. 8 Displacement monitoring results of high-support formwork structure



图6 现场监测系统布置

Fig. 6 Layout of on-site monitoring

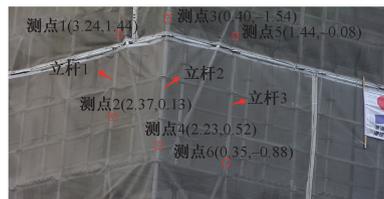


图7 位移实时监测画面

Fig. 7 Screen of displacement real-time monitoring

选取某工作日(2023年5月27日, 混凝土浇筑环节)监测数据进行分析, 绘制立杆07:00—17:00位移时程曲线, 如图8所示。可以发现: ①立杆位移在全天范围内变化不大, 基本维持在一个均值附近微小波动; ②经过长时间工作积累, 各立杆产生不同长期变形, 导致在不同区域、不同方向位移均值各不相同; ③在上部混凝土浇筑期间, 球机1水平位移在  $4\text{mm}$  以内 ( $<9.91\text{mm}$ ), 竖向位移在  $3\text{mm}$  以内 ( $<7.5\text{mm}$ ), 球机2水平位移在  $2.5\text{mm}$  以内 ( $<3.9\text{mm}$ ), 竖向位移在  $4\text{mm}$  以内 ( $<4.3\text{mm}$ )。各项指标均未超过预警阈值, 说明在混凝土浇筑环节, 高支模结构始终处于安全工作状态。

### 3 有限元模型更新及预警阈值合理性分析

#### 3.1 更新前实测与有限元分析位移对比

为演示预警阈值更新过程, 从混凝土浇筑时期的6个监测点中选取了12组竖向和水平最大位移数据, 与有限元计算结果进行对比, 如表3所示。其中, 7组数据有限元计算结果与实测位移相对误差控制在  $20\%$  以内, 另外5组误差较大, 包括测点1~3

竖向位移及测点 3,4 水平位移。这 5 组数据误差较大的原因可能为:①施工过程中这些测点的节点连接质量可能较差;②盘扣架支撑系统具有较高强度和刚度,导致实际位移较小,相对误差较大;③立杆在多次重复使用后可能产生局部损伤,导致初始有限元模型不能很好地反映实际结构。

表 3 更新前有限元计算位移与实测位移对比

Table 3 Comparison of finite element calculated displacement and measured displacement before updating

测点编号	竖向			水平向		
	有限元计算位移/mm	实测位移/mm	相对误差/%	有限元计算位移/mm	实测位移/mm	相对误差/%
1	1.651	0.852	83.93	3.930	4.326	94.17
2	1.398	1.873	08.25	3.930	3.648	99.70
3	5.494	3.610	30.52	5.521	4.216	17.30.95
4	3.324	3.596	04.75	4.242	3.148	86.34.72
5	2.260	1.935	55.16	4.247	3.829	83.10.89
6	3.506	3.809	08.79	2.178	2.481	76.12.24

### 3.2 有限元模型更新

为更真实地反映实际结构受力及变形情况,对模型进行定期更新。首先需对结构进行敏感性分析,评估不同参数对模型的影响程度,确定合适的更新参数。参数包括节点刚度、杆件密度、弹性模量、杆件壁厚等。敏感度按式(5)计算<sup>[28]</sup>。

$$\phi_i = \frac{\Delta Y/Y}{\Delta \theta_i/\theta_i} \quad (5)$$

式中:  $\phi_i$  为参数敏感度;  $Y$  为有限元计算结果即高支模位移响应;  $\theta_i$  为备选参数。

参数敏感性分析结果如表 4 所示,立杆弹性模量和壁厚对高支模结构位移影响最大,确定为更新参数。

表 4 参数敏感性分析结果

Table 4 Parameter sensitivity analysis results

参数	位移变化率/%	敏感度
节点刚度	-16.80	1.68
杆件密度	-17.20	1.72
立杆弹性模量	-29.50	2.95
水平杆弹性模量	-10.70	1.07
立杆壁厚	-27.10	2.71
水平杆壁厚	-15.50	1.55

更新前、后有限元计算位移与实测位移误差对比如图 9 所示。更新后 12 组数据中有 11 组数据有限元计算位移与实测位移相对误差均控制在 20% 以内,均方根误差由 0.784mm 降为 0.132mm,表明更新后的模型更能真实地反映实际结构受力和变形。

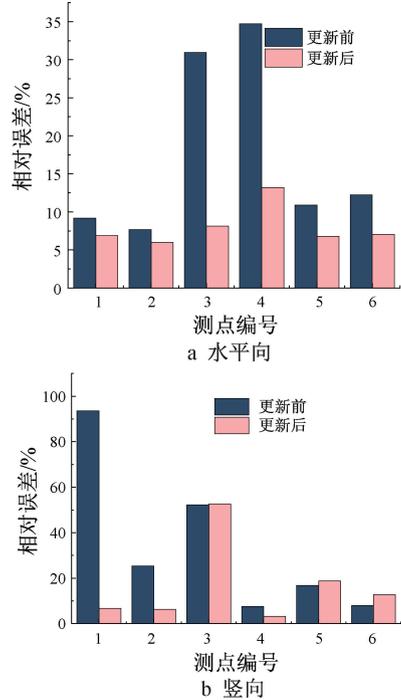


图 9 更新前后有限元计算位移与实测位移误差对比

Fig. 9 Comparison of error between finite element calculated displacement and measured displacement before and after updating

### 3.3 预警阈值合理性分析

对更新后的有限元模型重新进行屈曲破坏分析,确定临界位移,分析初始预警阈值合理性。若设定的预警阈值过大,结构失效不发生预警,施工安全无法保障。若设定的预警阈值过小,会出现频繁误报情况,影响施工进度,故更新前预警阈值略小于更新后屈曲破坏位移更合理。

长期位移监测结果及更新前、后预警阈值对比如图 10 所示。可以发现,随着时间积累,高支模结构水平、竖向位移均呈逐渐增大趋势。同时,更新后球机 1 水平临界位移为 11.2mm > 9.91mm,球机 2

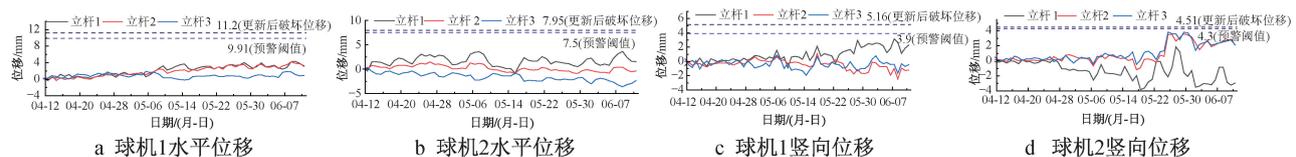


图 10 更新前后预警阈值对比

Fig. 10 Comparison of warning thresholds before and after updating

水平临界位移为  $7.95\text{mm} > 7.5\text{mm}$ , 球机 1 竖向临界位移为  $5.16\text{mm} > 3.9\text{mm}$ , 球机 2 竖向临界位移为  $4.51\text{mm} > 4.3\text{mm}$ , 更新后的屈曲破坏位移均超过更新前预警阈值, 说明初始预警阈值设置偏于安全, 能有效避免高支模结构在未达到设定的预警阈值时发生破坏。

#### 4 结语

针对高支模结构, 本文提出了一种融合数据与模型的监测预警阈值确定及更新方法。以实际工程为例, 建立有限元模型并确定初始预警阈值。搭建视觉位移监测系统, 实现了响应实时感知及数据及时反馈, 为预警阈值的不断更新奠定了基础。得出的结论如下。

1) 随着时间积累, 高支模结构水平、竖向位移均呈逐渐增大趋势, 在施工过程中需重点关注发展趋势。

2) 更新后的模型屈曲破坏位移均大于初始预警阈值, 说明预警阈值设置偏安全, 取值合理。

3) 本文提出的监测预警阈值确定及更新方法是一个动态的、持续改进的过程, 随着施工工序的不断推进及实测数据的大量积累, 预警阈值需不断迭代改进才能精准匹配实际结构特征。

#### 参考文献:

[1] 住房和城乡建设部办公厅关于实施《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》有关问题的通知[EB/OL]. [https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/201805/20180522\\_236168.html](https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/201805/20180522_236168.html).  
Notice from the General Office of the Ministry of Housing and Urban Rural Development on the implementation of the safety management regulations for sub projects with high risks[EB/OL]. [https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/201805/20180522\\_236168.html](https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/201805/20180522_236168.html).

[2] 谢楠, 郝鹏, 尹智宏, 等. 混凝土浇筑期高大模板支撑体系的受力性能研究[J]. 工程力学, 2012, 29(S2): 164-169.  
XIE N, HAO P, YIN Z H, et al. Research on performance of high formwork support system during concrete placement[J]. Engineering mechanics, 2012, 29(S2): 164-169.

[3] WANG C, ZHANG H, RASMUSSEN J K, et al. System reliability-based limit state design of support scaffolding systems[J]. Engineering structures, 2020, 216:110677.

[4] 谢楠, 赵凯, 胡杭, 等. 高大模板支架的容错优化设计研究[J]. 工程力学, 2018, 35(S1): 101-106.  
XIE N, ZHAO K, HU H, et al. Research on fault-tolerant optimization design of high formwork support[J]. Engineering mechanics, 2018, 35(S1):101-106.

[5] 董金凤. 考虑节点半刚性盘扣式支架稳定承载力理论与试验研究[D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2022.  
DONG J F. Theoretical and experimental study on stable bearing capacity of semi-rigid disk lock formwork support considering

joints[D]. Liaoning: Liaoning Technical University, 2022.

[6] 罗尧治, 郑延丰, 谢俊乔, 等. 建筑施工临时支撑结构分类及稳定性分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(4): 143-150.  
LUO Y Z, ZHENG Y F, XIE J Q, et al. Classification and stability analysis on temporary support structures in construction[J]. Journal of building structures, 2016, 37(4): 143-150.

[7] 刘慧娟, 罗永峰, 杨绿峰. 临时支撑卸载冲击对施工中弦支穹顶结构性能的影响研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 171-176.  
LIU H J, LUO Y F, YANG L F. Analysis on the effect of unloading impact of supporting system on suspen-dome behavior during construction process[J]. Journal of vibration and shock, 2011, 30(3):171-176.

[8] YU H F, GUO S D, LIU W R, et al. Experimental study on stable bearing capacity of wheel-buckle formwork support frames[J]. Structures, 2023, 48:1175-1189.

[9] 谢楠, 付小辉, 王立峰, 等. 扣件式高大模板支架的概率极限状态设计法研究[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 68-75, 104.  
XIE N, FU X H, WANG L F, et al. Design method of load and resistance factor for high falsework with couplers [J]. Engineering mechanics, 2016, 33(10): 68-75, 104.

[10] 郭艳. 模板支架承载特性及其节点半刚性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.  
GUO Y. Research on the bearing characteristics of formwork support and the semi-rigidity of its joints [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.

[11] YUAN X, ANUMBA J C, PARFITT K M. Cyber-physical systems for temporary structure monitoring[J]. Automation in construction, 2016, 66: 1-14.

[12] CHEN S J, JIAN L P, LIN J N, et al. An intelligent high-formwork support monitoring system[J]. Artificial intelligence evolution, 2022:160-169.

[13] CHENG Y Y, LIN F Z, WANG W G, et al. Vision-based trajectory monitoring for assembly alignment of precast concrete bridge components [J]. Automation in construction, 2022, 140: 104350.

[14] 鲍跃全, 李惠. 人工智能时代的土木工程[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 1-11.  
BAO Y Q, LI H. Artificial intelligence for civil engineering[J]. China civil engineering journal, 2019, 52(5): 1-11.

[15] LI Y, CHEN J. Computer vision - based counting model for dense steel pipe on construction sites[J]. Journal of construction engineering and management, 2022, 148(1): 04021178.

[16] 刘济舟, 孟上九, 袁晓铭, 等. 基于图像动态识别技术的地震动参数快速判别方法[J]. 振动与冲击, 2022, 41(5): 189-196, 207.  
LIU J Z, MENG S J, YUAN X M, et al. Fast recognition method of ground motion parameters based on image dynamic recognition technique[J]. Journal of vibration and shock, 2022, 41(5): 189-196, 207.

[17] 周颖, 张立迅, 刘彤, 等. 基于计算机视觉的结构系统识别[J]. 土木工程学报, 2018, 51(11): 17-23.

- ZHOU Y, ZHANG L X, LIU T, et al. Structural system identification based on computer vision [J]. China civil engineering journal, 2018, 51(11): 17-23.
- [18] FANG W L, MA L, LOVE P E D, et al. Knowledge graph for identifying hazards on construction sites: Integrating computer vision with ontology[J]. Automation in construction, 2020,119: 103310.
- [19] 池昌政,庞博,任江涛,等. 基于视觉识别的高大模板支撑结构安全监控方法[J]. 工业建筑, 2024, 54(2): 65-72.
- CHI C Z, PANG B, REN J T, et al. A safety monitoring method for high-formwork support structures based on computer vision recognition[J]. Industrial construction,2024, 54(2): 65-72.
- [20] 李航宇,龚杰,陶玉菲,等. 基于轻量化多目标视觉感知的高大模板系统位移监控[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(7): 69-79.
- LI H Y, GONG J, TAO Y F, et al. Research on displacement monitoring of high formwork system based on lightweight multi-target visual perception[J]. Journal of building structures, 2024, 45(7): 69-79.
- [21] XIONG R X, SONG Y B, LI H, et al. Onsite video mining for construction hazards identification with visual relationships[J]. Advanced engineering informatics, 2019,42: 100966.
- [22] 杨斌,张卫冬,伍章明,等. 基于 SOA 的设备远程监测与故障诊断系统体系结构研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 85-90,108.
- YANG B, ZHANG W D, WU Z M, et al. Architecture of remote monitoring and diagnosis system based on service-oriented architecture(SOA)[J]. Journal of vibration and shock, 2011, 30(3):85-90,108.
- [23] FANG W L, DING L Y, ZHONG B T, et al. Automated detection of workers and heavy equipment on construction sites; a convolutional neural network approach[J]. Advanced engineering informatics, 2018,37:139-149.
- [24] SUN L M, SUN H B, ZHANG W, et al. Hybrid monitoring methodology: a model-data integrated digital twin framework for structural health monitoring and full-field virtual sensing[J]. Advanced engineering informatics,2024,60: 102386.
- [25] 刘卫然,于海丰,黄俊,等. 轮扣式模板支撑架稳定承载力试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(1): 219-227.
- LIU W R, YU H F, HUANG J, et al. Experimental study and finite element analysis of stable bearing capacity of wheel-buckled formwork supporting frame [J]. Journal of building structures, 2022, 43(1):219-227.
- [26] HUANG M F, ZHANG B Y, LOU W J, et al. A deep learning augmented vision-based method for measuring dynamic displacements of structures in harsh environments[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2021, 217: 104758.
- [27] HUANG M F, ZHANG B Y, LOU W J. A computer vision-based vibration measurement method for wind tunnel tests of high-rise buildings [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2018, 182: 222-234.
- [28] 蒋明华,张宗富. 盘扣式支撑架有限元模型的修正方法 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2021, 31(6): 753-758.
- JIANG M H, ZHANG Z F. Model updating method of finite element model of disk lock steel tubular scaffold. [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2021, 31(6):753-758.

## (上接第 130 页)

- [5] 李洋. 地面找平建筑机器人的设计与实验研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2022.
- LI Y. Design and experimental research of ground screeding construction robot [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2022.
- [6] 肖维思,庄然,唐务生. 抹灰机器人施工研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(11): 22-26.
- XIAO W S, ZHUANG R, TANG W S. Construction research of plastering robots[J]. Construction technology, 2023, 52(11): 22-26.
- [7] ZHAO S, WANG Q, FANG X, et al. Application and development of autonomous robots in concrete construction; challenges and opportunities[J]. Drones, 2022, 6(12): 424.
- [8] 俞洁,俞选明,刘一帆,等. 混凝土地面施工机器人在施工中的应用分析[J]. 城市建筑,2024,21(10):229-232.
- YU J, YU X M, LIU Y F, et al. Analysis on the application of concrete floor construction robot in construction [J]. Urbansim and architecture, 2024,21(10):229-232.
- [9] 邱远光. 混凝土施工机器人组合应用研究[J]. 铁道建筑技术,2024(5):196-200.
- QIU Y G. Research on the combination application of concrete construction robots [J]. Railway construction technology, 2024(5):196-200.
- [10] 张小刚,杜思成. 钢筋混凝土结构耐久性的多因素 FUZZY-AHP 评估[J]. 混凝土, 2009(5): 39-42.
- ZHANG X G, DU S C. Multi-influencing factors FUZZY-AHP assessment for the durability of reinforced concrete[J]. Concrete, 2009(5): 39-42.
- [11] 涂胜金,杨华山,刘冬梅. 粉煤灰效应模糊综合评价中权重确定的层次分析法[J]. 混凝土, 2009(2): 45-46.
- TU S J, YANG H S, LIU D M. AHP method to the determination of weight in fuzzy comprehensive evaluation of fly ash effect[J]. Concrete,2009(2): 45-46.
- [12] LU C, LIU J, LIU Y, et al. Intelligent construction technology of railway engineering in China [J]. Frontiers of engineering management, 2019, 6(2): 503-516.