

# 非标准层铝合金模板可调适配评价方法与工程验证

张爱龙, 兰宏财, 关 健, 路 鑫, 尹亚宁

中交第一航务工程局有限公司, 天津

收稿日期: 2026年6月24日; 录用日期: 2026年7月16日; 发布日期: 2026年7月28日

## 摘 要

针对高层住宅非标准层铝合金模板存在标准构件复用困难、反坎吊模高度调节不稳定和局部施工效率降低等问题, 本文提出一种面向非标准层施工的铝合金模板可调适配评价方法。依托长春某高层住宅工程, 结合标准层层高2.95 m、非标准层层高3.15 m及楼板厚度100~160 mm等条件, 从几何适配、成型偏差、施工效率和安全边界4个方面建立评价指标, 并形成“BIM识别-局部可调构件-现场复核-数据反馈”的施工流程。结果表明: 可调支撑有效调节范围为0~200 mm, 对本工程0.20 m层高差的高度适配系数为1.00, 满足小幅非标准层高差的几何适配要求; 100~160 mm板厚条件下, 反坎模板标高偏差控制在 $\pm 1$  mm以内, 水平偏移量不大于0.5 mm, 调节件变形不大于0.2 mm, 综合偏差指数为0.269~0.416, 处于成型控制稳定区间; 单处反坎吊模安装时间由约15 min缩短至约3 min, 效率提升约80%; 非标准层墙体垂直度偏差由5 mm降低至2 mm, 平整度偏差由4 mm降低至1 mm。研究表明, 标准铝模局部可调化可减少非标准构件定制和现场临时补拼工作量, 对类似高层住宅非标准层模板施工有参考价值。需要指出的是, 本文结论主要基于单项高层住宅工程、0.20 m层高差和100~160 mm板厚范围获得, 相关指标和控制建议用于类似小幅非标准层适配工况时具有参考意义, 超出该范围的工程仍需结合支撑高度、施工荷载和可调构件类型进行专项复核。

## 关键词

铝合金模板, 非标准层, 可调适配, 反坎吊模, BIM深化, 工程验证

## Evaluation Method and Engineering Verification of Adjustable Adaptation for Aluminum Formwork in Non-Standard Floors

Ailong Zhang, Hongcai Lan, Jian Guan, Xin Lu, Yaning Yin

文章引用: 张爱龙, 兰宏财, 关健, 路鑫, 尹亚宁. 非标准层铝合金模板可调适配评价方法与工程验证[J]. 土木工程, 2026, 15(7): 123-136. DOI: 10.12677/hjce.2026.157185

## Abstract

To address the problems of limited reuse of standard aluminum formwork components, unstable height control of upstand formwork and reduced construction efficiency in aluminum formwork in non-standard floors of high-rise residential buildings, an adjustable adaptation evaluation method for aluminum formwork in non-standard floors was proposed. Based on a residential project in Changchun, where the standard floor height is 2.95 m, the non-standard floor height is 3.15 m and the slab thickness ranges from 100 mm to 160 mm, evaluation indices were established from four aspects: geometric adaptability, forming deviation, construction efficiency and safety boundary. A construction process of "BIM-based identification - local adjustable components - on-site verification - data feedback" was developed. The results show that the effective adjustment range of the support is 0~200 mm, and the height adaptation coefficient for the 0.20 m floor-height difference is 1.00, meeting the geometric adaptation requirements for small non-standard floor height differences. Under slab thicknesses of 100~160 mm, the elevation deviation of the upstand formwork was controlled within  $\pm 1$  mm, the horizontal offset was no more than 0.5 mm and the deformation of the positioning device was no more than 0.2 mm. The comprehensive deviation index ranged from 0.269 to 0.416, indicating a stable forming control level. The installation time of a single upstand position was reduced from about 15 min to about 3 min, with an efficiency improvement of about 80%. The non-standard floor wall verticality deviation decreased from 5 mm to 2 mm, and the flatness deviation decreased from 4 mm to 1 mm. The study indicates that local adjustable adaptation of standard aluminum formwork can reduce customized non-standard components and temporary on-site adjustment, providing a practical reference for the construction of non-standard floor formwork in similar high-rise residential projects. It should be noted that the conclusions of this article are mainly based on a single high-rise residential project, a 0.20 m floor height difference, and a 100~160 mm plate thickness range. The relevant indicators and control suggestions are of reference significance for similar small-scale non-standard floor adaptation scenarios. For projects beyond this range, a special review based on the supporting height, construction load, and adjustable component types is still required.

## Keywords

Aluminum Formwork, Non-Standard Floor, Adjustable Adaptation, Upstand Formwork, BIM-Based Detailing, Engineering Verification

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

铝合金模板具有标准化程度高、周转次数多、混凝土成型质量较好和现场拼装效率高等特点，在高层住宅主体结构施工中应用较为广泛。相较于传统木模板，铝合金模板可通过工厂化加工、构件编号、标准化拼装和早拆支撑组织形成较稳定的施工节奏，对提高结构成型质量、降低现场木材消耗和改善施工环境具有积极作用[1]-[5]。

但铝合金模板的高效率通常建立在构件尺寸固定、层高一致和平面布置重复的基础上。当工程进入首层、顶层、设备层等非标准层，或遇到卫生间反坎、厨房反坎、局部降板、墙体高度变化和水电预留洞口等构造变化部位时，标准层模板往往难以直接复用。传统处理方式主要有两类：一是单独加工非标准铝模板，二是在现场采用木模板、木方、垫块或钢管支撑进行局部补拼和临时调整。前者会增加非标准构件加工、运输、堆放和后期闲置成本，后者则易引起拼缝漏浆、模板错台、反坎偏位和成型质量波动。

随着建筑工业化、绿色施工和智能建造要求的提高，模板工程不再仅关注单次浇筑成型质量，也需要兼顾构件复用率、施工组织连续性和材料消耗控制。BIM 技术在模板深化、构件定位、碰撞检查和施工交底中的应用，为非标准部位提前识别和可调构件布置提供了条件[6]-[8]。然而，在实际工程中，非标准层铝模施工仍常停留在现场经验调整层面，缺少针对“小幅层高差-多板厚反坎-局部墙体高度变化”耦合场景的可调适配评价方法。

本文依托长春某高层住宅工程，围绕非标准层铝合金模板局部适配问题，建立高度适配系数、反坎成型综合偏差指数、施工效率提升率及支撑安全约束等评价指标，提出一种标准铝模局部可调化的施工方法，并通过现场检测和工程应用进行验证。

本文主要工作包括：1) 将非标准层铝模适配问题分解为几何适配、成型偏差、施工效率和安全边界 4 类评价问题；2) 建立反坎吊模成型综合偏差指数，用于不同板厚条件下反坎模板定位效果比较；3) 形成“BIM 识别-局部可调构件-现场复核-数据反馈”的施工流程，并结合工程实测数据分析其应用效果。

2. 工程概况与非标准适配问题

2.1. 工程概况

长春某高层住宅工程主体结构标准层采用铝合金模板施工。工程标准层层高为 2.95 m，部分非标准层层高为 3.15 m，二者高差为 0.20 m。楼板厚度包括 100、120、140、160 mm 等规格，卫生间和厨房等部位设置不同高度反坎。除层高与板厚变化外，工程还存在局部墙体高度变化、水电预留洞口变化和构造节点差异等情况。

本工程非标准适配需求见表 1。由表 1 可见，非标准层铝模施工并不是单一层高变化问题，而是由支撑高度、反坎吊模、墙体高度和洞口位置共同引起的局部适配问题。

Table 1. Non-standard adaptation requirements of the project

表 1. 工程非标准适配需求

| 序号 | 适配对象  | 工程参数或问题                          | 传统处理方式的不足       |
|----|-------|----------------------------------|-----------------|
| 1  | 层高    | 标准层 2.95 m，非标准层 3.15 m，高差 0.20 m | 需补拼或另行定制非标准模板   |
| 2  | 楼板厚度  | 100~160 mm，多种板厚并存                | 反坎吊模高度需随板厚变化    |
| 3  | 卫生间反坎 | 需与楼板一次浇筑成型                       | 垫块和木方支撑易受浇筑扰动   |
| 4  | 墙体高度  | 非标准层墙体高度局部变化                     | 铝木结合拼缝多，质量波动较大  |
| 5  | 预留洞口  | 水电洞口尺寸和位置局部变化                    | 现场开洞和补拼工作量较大    |
| 6  | 施工组织  | 标准层流水施工节奏快                       | 非标准构件易影响模板周转连续性 |

2.2. 非标准适配问题分析

高层住宅铝合金模板在标准层具有较高周转效率，但其构件尺寸相对固定，现场临时调整能力有限。

当局部构件尺寸发生变化时，若仍采用“缺什么补什么”的现场处理方式，容易造成施工组织碎片化。

首先，非标准层支撑高度与标准层支撑体系不匹配。对于 0.20 m 的小幅层高差，如果完全采用非标准模板和支撑体系，投入较大；如果采用局部加高或垫高方式处理，则支撑底座贴合、锁固可靠性和标高复核难度增加。

其次，不同板厚反坎吊模高度控制不稳定。卫生间反坎通常与楼板同步浇筑，模板标高、轴线位置和侧向稳定直接影响反坎成型质量。传统垫块、木方或钢管临时支撑方式调节不连续，且容易在混凝土布料和振捣扰动下发生轻微位移。

再次，非标准部位缺少量化评价指标。传统施工总结多强调“提高效率”和“改善质量”，但缺少可用于横向对比和工序复核的评价方法。对于可调铝模施工而言，仅说明调节范围或安装时间并不足以反映其适配能力，还需要将几何适配、成型偏差和效率变化转化为可计算指标。

2.3. 研究设计与技术路线

本文采用“问题识别 - 指标构建 - 构件适配 - 现场验证 - 边界归纳”的研究设计。首先识别非标准层层高差、多板厚反坎和局部墙体高度变化三类问题；其次构建高度适配、成型偏差、效率改善和安全约束指标；然后设置伸缩式可调支撑和螺纹式反坎定位调节件；最后通过现场检测数据验证可调适配效果。

可调适配评价与施工技术路线如图 1 所示。该路线以非标准层适配问题为输入，以评价指标为中间约束，以局部可调构件为技术措施，并通过现场检测结果进行反馈。其中，层高差问题对应高度适配系数与伸缩式可调支撑，多板厚反坎问题对应综合偏差指数与螺纹式定位调节件，反坎安装效率问题对应效率提升率与预调锁固流程，墙体高度变化问题对应垂直度、平整度指标与顶升支撑锁固工艺。

| 非标准层铝模可调适配评价与施工技术路线 |             |          |                                |
|---------------------|-------------|----------|--------------------------------|
| 非标准适配问题             | 评价指标        | 技术措施     | 验证结果                           |
| 层高差0.10m            | $\lambda_1$ | 种植式可调支撑  | $\lambda_1 = 1.00$             |
| 多板厚收次               | $\lambda_2$ | 微植式定位调节件 | $\lambda_2 = 0.269 \sim 0.416$ |
| 浇模密效率低              | $\eta_1$    | 预调+早紧+特拧 | $\eta_1 = 80\%$                |
| 墙体高度化               | 垂直度、平整度     | 顶片+支撑加固  | 5mm→2mm, 3mm→1mm               |

Figure 1. Evaluation and construction technical route of adjustable adaptation

图 1. 可调适配评价与施工技术路线

3. 可调适配评价方法

3.1. 高度适配系数

对于标准层与非标准层之间的小幅层高差，可调支撑首先应满足几何适配要求。本文定义高度适配系数  $\lambda_h$ ：

$$\lambda_h = \frac{L_a}{\Delta H} \tag{1}$$

式中： $\lambda_h$  为高度适配系数； $L_a$  为可调支撑有效调节范围，mm； $\Delta H$  为标准层与非标准层层高差，mm。

当  $\lambda_h \geq 1.0$  时,说明可调支撑在几何尺寸上能够覆盖该层高差;当  $\lambda_h < 1.0$  时,则需采取重新选型、增加连接构件或专项支撑设计等措施。

本工程中,可调支撑有效调节范围为 0~200 mm,标准层与非标准层层高差为 200 mm,因此:

$$\lambda_h = \frac{200}{200} = 1.00 \tag{2}$$

计算结果表明,该可调支撑在几何适配层面能够覆盖本工程 0.20 m 层高差。需要说明的是,高度适配系数仅反映几何调节能力,不能代替承载力和稳定性验算。支撑高度、支撑间距和局部荷载发生明显变化时,仍需按《建筑施工模板安全技术规范》JGJ 162 和相关支撑体系要求进行专项安全复核。

3.2. 反坎成型综合偏差指数

反坎吊模成型偏差主要受竖向标高控制、水平定位稳定和定位构件扰动变形影响。其中,标高偏差反映反坎上口成型精度,水平偏移量反映浇筑和振捣扰动下吊模定位稳定性,调节件变形反映连接件刚度和锁固效果。垂直度偏差虽可反映模板姿态,但与水平偏移和构件变形具有一定相关性,且现场检测离散性较大,因此本文将其作为辅助检测指标,不纳入综合偏差指数。

为避免单项指标评价不充分,本文提出反坎成型综合偏差指数  $I_q$ :

$$I_q = \sqrt{\left(\frac{e_z}{e_{z,a}}\right)^2 + \left(\frac{e_p}{e_{p,a}}\right)^2 + \left(\frac{e_d}{e_{d,a}}\right)^2} \tag{3}$$

式中:  $I_q$  为反坎成型综合偏差指数;  $e_z$  为反坎模板标高偏差实测值, mm;  $e_p$  为反坎模板水平偏移量, mm;  $e_d$  为调节件受扰动后的变形量, mm;  $e_{z,a}$ 、 $e_{p,a}$ 、 $e_{d,a}$  分别为标高偏差、水平偏移和调节件变形的控制限值。  $I_q$  越小,说明反坎吊模成型控制效果越好。

结合本工程过程控制目标、模板安装允许偏差控制要求及现场检测精度,本文取  $e_{z,a} = 3.0$  mm、 $e_{p,a} = 2.0$  mm、 $e_{d,a} = 1.0$  mm 作为内部评价限值。该指标不作为规范验收指标,仅用于同一工程内不同板厚条件下反坎吊模成型控制效果的相对比较。其评价分级见表 2,分级结果主要用于本文试验段内部评价,不作为工程验收判定依据。

Table 2. Evaluation grading of upstand formation comprehensive deviation index

表 2. 反坎成型综合偏差指数评价分级

| $I_q$ 范围               | 评价结果     | 工程含义               |
|------------------------|----------|--------------------|
| $I_q < 0.50$           | 成型控制稳定   | 调节件布置和锁固状态较好       |
| $0.50 \leq I_q < 1.00$ | 成型控制基本可控 | 需关注局部锁固和浇筑扰动       |
| $I_q \geq 1.00$        | 需复核      | 应复核调节件布置、标高控制或锁固状态 |

3.3. 施工效率与经济性评价

对于现场施工方法,效率改善是评价可调构件应用价值的重要指标。本文定义单处吊模安装效率提升率  $\eta_t$ :

$$\eta_t = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \times 100\% \tag{4}$$

式中： $\eta_t$  为单处吊模安装效率提升率； $t_0$  为传统工艺单处吊模安装时间，min； $t_1$  为可调节工艺单处吊模安装时间，min。

非标准模板定制成本降低率  $\eta_c$  可按式(5)表示：

$$\eta_c = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中： $\eta_c$  为非标准模板定制成本降低率； $C_0$  为传统方案非标准模板定制成本； $C_1$  为可调节铝模方案对应成本。由于不同项目非标准构件数量、模板周转组织、班组熟练程度和模板摊销口径差异较大，本文仅采用项目内部施工统计结果对成本变化进行说明。

3.4. 支撑安全约束条件

可调支撑在满足几何适配的同时，还应满足施工阶段承载安全要求。本文采用支撑安全约束条件表示为：

$$N_d \leq \phi N_u \quad (6)$$

式中： $N_d$  为施工阶段单根支撑设计轴力，kN； $N_u$  为可调支撑经复核后的控制承载力或允许承载力，kN； $\phi$  为安全折减系数。式(6)用于说明可调支撑不应仅以调节范围作为选型依据，还需结合支撑间距、板厚、施工荷载和支撑高度进行安全复核。

本文支撑试验主要用于验证小幅调节范围内的施工适配性、调节精度和残余变形控制效果，不展开支撑构型稳定性参数化分析。对于大层高、高支撑、大间距或局部荷载较大的工况，应另行开展承载力及稳定性专项分析。

3.5. 综合适配评价框架

为体现非标准层铝模可调适配效果，本文从几何适配、成型质量、施工效率和成本控制 4 个维度建立综合评价框架，如表 3 所示。鉴于本文依托单项工程开展应用验证，暂不对各指标赋权计算综合得分，仅将其作为非标准层铝模适配效果分析框架。后续若用于跨工程比较，可结合更多项目样本对各指标权重和评价限值进行修正。

Table 3. Adaptation problems, control methods and evaluation indices of non-standard floor aluminum formwork  
表 3. 非标准层铝模适配问题、控制方法与评价指标

| 适配问题       | 传统处理缺陷      | 本文方法          | 评价指标        | 实测或统计结果                       |
|------------|-------------|---------------|-------------|-------------------------------|
| 层高差 0.20 m | 支撑补拼、标高复核困难 | 伸缩式可调支撑       | $\lambda_h$ | 1.00                          |
| 多板厚反坎      | 垫块高度离散、易移位  | 螺纹式定位调节件      | $I_q$       | 0.269~0.416                   |
| 反坎安装效率低    | 反复垫高、校正     | 预调 + 半紧固 + 终拧 | $\eta_t$    | 约 80%                         |
| 非标准层墙体     | 铝木结合拼缝多     | 顶升 + 支撑锁固     | 垂直度、平整度     | 5 mm 降至 2 mm;<br>4 mm 降至 1 mm |
| 成本与周转      | 非标准件闲置      | 标准铝模局部可调化     | $\eta_c$    | 约 15%~20%                     |

4. 可调节铝合金模板施工方法

4.1. BIM 深化与非标准部位识别

施工前以标准层铝模深化图为基础，对非标准层墙体高度、顶板标高、反坎高度、洞口尺寸和楼板

厚度变化进行复核。对反坎部位，重点标注定位调节件数量、孔位、安装方向和调节高度；对支撑部位，重点复核支撑初始长度、可调余量、底座位置和早拆节点关系。

BIM 深化阶段主要解决三类问题：一是反坎调节件孔位与板筋、预埋管线之间的冲突；二是墙体高度调整过程中顶板、梁底模板与墙体模板之间的连接关系；三是可调支撑底座与预留洞口、管线集中区之间的空间关系。深化完成后，将非标准部位构件清单、调节高度和现场复核点同步交底至模板班组、钢筋班组和混凝土浇筑班组。

该环节的作用不在于单纯绘制模型，而是将非标准部位从“现场临时发现”转化为“施工前识别和清单化控制”，减少现场返工和构件混用风险。

#### 4.2. 伸缩式可调支撑及适用边界

伸缩式可调支撑主要用于解决标准层与非标准层之间的小幅层高差。其构造包括可调立杆、锁紧装置、底座调平部件和板底支承节点。施工时，先按非标准层层高进行初调，再进行标高复核和锁固检查。

本工程中，标准层与非标准层层高差为 200 mm，可调支撑有效调节范围为 0~200 mm，高度适配系数为 1.00，能够满足几何适配要求。现场应用时，应注意以下几点：第一，支撑调节完成后必须复核底座贴合和立杆垂直度；第二，调节段不得处于滑丝、松动或未完全锁紧状态；第三，支撑高度变化后不得随意扩大支撑间距；第四，对于超出本工程层高差范围的工况，应按式(6)进行安全复核。

本文将伸缩式支撑作为施工适配构件处理，不将其作为无限增高构件使用。这样既可提高标准层铝模复用率，又可避免因过度简化支撑安全问题造成施工风险。

#### 4.3. 螺纹式反坎定位调节件

螺纹式反坎定位调节件用于控制不同板厚条件下反坎吊模的标高和侧向位置。该调节件由上部承压连接部、中部螺纹调节杆、止水限位部、锁紧螺母和下部支承底座组成。上部通过螺栓与反坎铝模连接，下部与铝模或基层形成支承，中部螺纹段用于高度微调。调节完成后，通过锁紧螺母限制螺纹段继续转动。

反坎模板在浇筑过程中主要受到模板自重、混凝土侧向扰动、振捣附加扰动和人员操作扰动影响。螺纹式定位调节件通过“上部连接-中部传力-下部支承-螺母锁固”形成稳定的竖向传力路径，同时依靠螺栓连接和接触面摩擦提高抗偏移能力。其抗滑移约束可简化表示为：

$$F_s \leq \mu P \quad (7)$$

式中： $F_s$  为混凝土浇筑和振捣引起的水平扰动力； $\mu$  为接触面等效摩擦系数； $P$  为螺栓预紧和模板夹持形成的法向约束力。式(7)用于说明提高连接预紧、增加接触约束和减少浇筑扰动均有助于控制吊模水平偏移。由于现场扰动力和摩擦系数具有离散性，本文不对式(7)展开定量计算，而将其作为调节件构造和施工控制的机理解释。

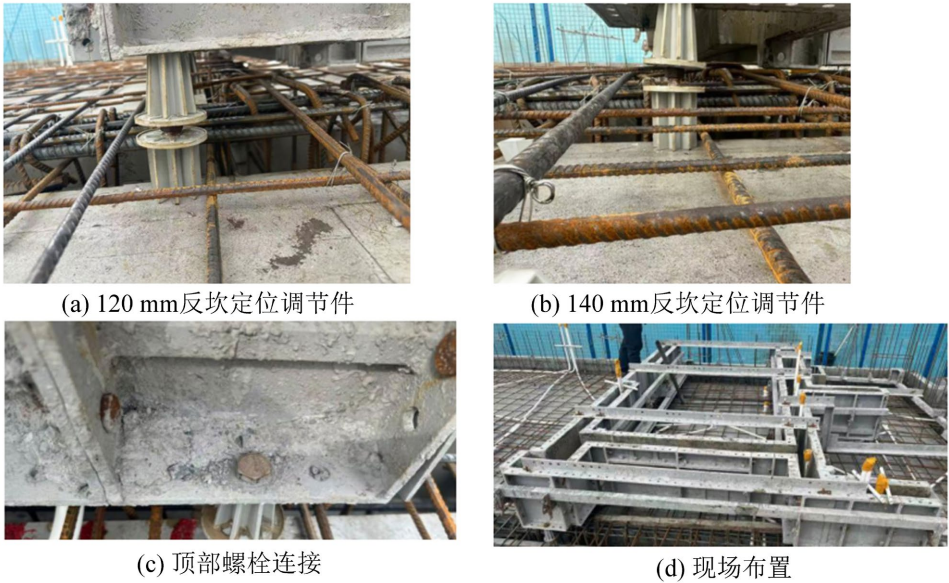
安装流程为：深化定位→孔位复核→调节件预调→吊模就位→半紧固→标高和轴线复核→终拧锁固→浇筑过程观察→浇后复查。与传统垫块方式相比，该方法将反坎模板高度控制由“离散垫高”转为“螺纹连续调节”，有利于不同板厚区域采用统一施工流程(图 2)。

#### 4.4. 非标准层墙体高度调整工艺

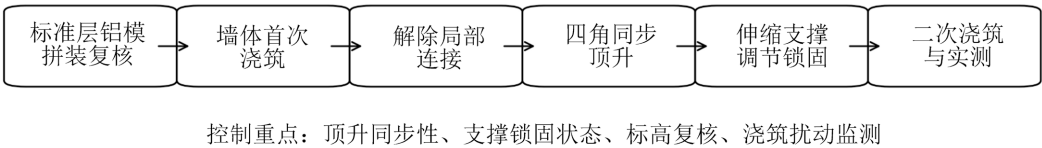
非标准层墙体高度调整采用“标准层铝模复用 + 局部顶升 + 伸缩式支撑调节 + 二次浇筑”的施工思路(图 3)。施工时，先按标准层尺寸完成墙体、梁板及支撑体系拼装，并复核模板轴线、垂直度和板底标高。墙体混凝土首次浇筑至标准层控制高度后，待混凝土达到拆模或支撑转换条件，解除顶板与墙

体连接部位局部约束。

随后，在房间四角同步布置千斤顶，分级顶升顶板和梁底模板至非标准层设计标高。顶升过程中由专人观测四角标高变化，控制各点顶升差。顶升到位后，将伸缩式支撑调整至设计长度并锁紧，复核底座贴合、支撑垂直度、锁紧装置和早拆节点状态。确认模板体系稳定后撤除千斤顶，并进行顶板和梁体二次浇筑。



**Figure 2.** Structure and field application of threaded positioning device for upstand formwork  
**图 2.** 螺纹式反坎定位调节件构造及现场应用



**Figure 3.** Construction process of wall-height adjustment in non-standard floors  
**图 3.** 非标准层墙体高度调整施工流程

## 5. 工程验证与结果分析

### 5.1. 现场检测内容与数据口径

为验证可调适配方法在实体工程中的适用性，现场选取支撑调节、反坎吊模和非标准层墙体高度调整三个方面进行检测。检测内容包括高度调节范围、单次调节精度、安装时间、反坎标高偏差、水平偏移量、调节件变形、墙体垂直度、平整度、胀模率和施工效率等。

检测过程中，反坎模板标高偏差采用水准仪结合钢尺复核；水平偏移量采用钢尺结合模板边线控制点复核；调节件变形采用游标卡尺或钢尺对关键外露部位进行复测；墙体垂直度和平整度按施工现场质量控制方法采用靠尺、线坠和钢尺进行检测。

受现场试验段范围和施工进度限制，各板厚选取代表性测点进行检测，表中数据为试验段实测代表值，主要用于施工适配效果验证。为减少偶然误差，检测过程中尽量保持同一施工班组、相近施工条件

和一致的检测工具。后续工程应用中仍需扩大测点数量，对不同楼层、不同班组和不同浇筑条件下的数据进行统计分析。

5.2. 高度适配效果

可调支撑现场试验以传统固定式钢支撑为对照，检测其调节范围、调节精度、拼装时间和受荷后残余变形。结果见表 4。

Table 4. Comparison of construction adaptability between adjustable support and traditional support  
表 4. 可调支撑与传统支撑施工适配性对比

| 指标                 | 传统钢支撑 | 可调支撑  | 改善情况         |
|--------------------|-------|-------|--------------|
| 高度调节范围/mm          | 0~50  | 0~200 | 调节范围扩大       |
| 单次调节精度/mm          | ±5    | ±1    | 精度提高         |
| 单根拼装时间/min         | 8     | 5     | 缩短 37.5%     |
| 10 kN 荷载后残余变形/mm   | 3.2   | 1.1   | 降低 65.6%     |
| 高度适配系数 $\lambda_h$ | 0.25  | 1.00  | 覆盖 0.20 m 高差 |

由表 4 可知，传统钢支撑对于 0.20 m 层高差的高度适配系数仅为 0.25，不能独立覆盖本工程非标准层高差；可调支撑的高度适配系数为 1.00，具备几何适配能力。同时，可调支撑单次调节精度和残余变形控制效果均优于传统支撑。该结果说明，可调支撑可作为小幅非标准层高差条件下的施工适配构件，但其应用仍需满足支撑安全约束条件。

5.3. 反坎成型精度及综合偏差分析

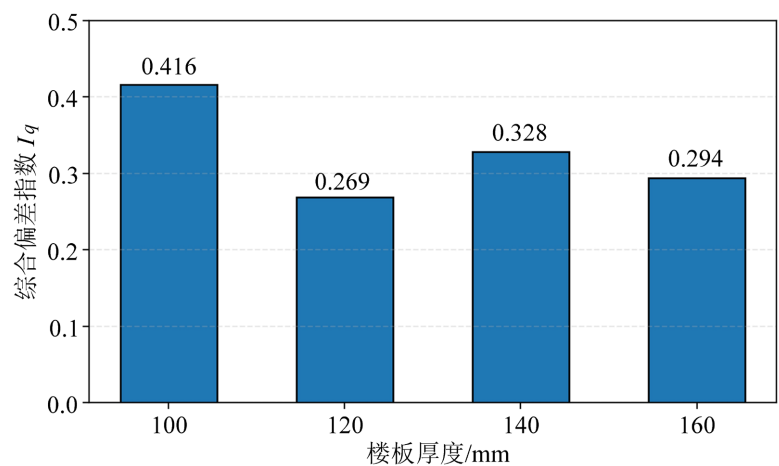
针对 100、120、140、160 mm 四种楼板厚度，采用螺纹式反坎定位调节件进行吊模施工。调节高度分别为 120、140、160、180 mm，施工完成后检测标高偏差、垂直度偏差、水平偏移量和调节件变形。根据式(3)计算反坎成型综合偏差指数，结果见表 5。

Table 5. Test results of forming quality of upstand formwork under different slab thicknesses  
表 5. 不同板厚条件下反坎吊模成型质量检测结果

| 板厚/mm | 调节高度/mm | 标高偏差/mm | 垂直度偏差/° | 偏移量/mm | 调节件变形/mm | 综合偏差指数 $I_q$ |
|-------|---------|---------|---------|--------|----------|--------------|
| 100   | 120     | +0.8    | 0.3     | 0.5    | 0.2      | 0.416        |
| 120   | 140     | +0.6    | 0.2     | 0.3    | 0.1      | 0.269        |
| 140   | 160     | -0.5    | 0.3     | 0.4    | 0.2      | 0.328        |
| 160   | 180     | -0.7    | 0.2     | 0.3    | 0.1      | 0.294        |

由表 5 可知，不同板厚条件下，反坎模板标高偏差均控制在±1 mm 以内，水平偏移量不大于 0.5 mm，调节件变形不大于 0.2 mm。综合偏差指数  $I_q$  介于 0.269~0.416 之间，均小于 0.50，处于“成型控制稳定”区间，说明螺纹式定位调节件在多板厚条件下具有较稳定的标高控制和抗偏移能力。

从各项偏差构成看(图 4)，100 mm 板厚对应的综合偏差指数最大，主要原因是板厚较小时反坎模板支承高度较低，现场安装空间相对受限，调节件与钢筋、管线之间的避让要求更高；120 mm 和 160 mm 板厚对应的综合偏差指数较小，说明在常规板厚范围内，该调节件的施工适配性较好。



**Figure 4.** Comprehensive deviation index of upstand formwork under different slab thicknesses  
**图 4.** 不同板厚条件下反坎成型综合偏差指数

5.4. 施工效率与经济性分析

传统反坎吊模施工中，单处安装通常需要反复垫高、复核、加固和调整，平均用时约 15 min。采用螺纹式定位调节件后，安装流程转化为预调、半紧固、复核和终拧，单处安装时间约 3 min。根据式(4)计算：

$$\eta_t = \frac{15-3}{15} \times 100\% = 80\% \tag{8}$$

计算结果表明，单处反坎吊模安装效率提升约 80%。在项目应用中，吊模高度偏差控制在-5~5 mm 以内，减少了木方支撑、垫块找平和二次校正工作量。根据项目内部施工统计，单个项目木材损耗减少约 4.2 万元。

结合非标准层墙体高度调整和可调支撑应用，项目非标准模板定制成本降低约 15%~20%，整体施工效率提高约 10%~15%。上述经济性结果主要基于项目内部材料消耗和施工组织统计，受工程规模、非标准层数量、模板周转方式和班组熟练程度影响，后续仍需在更多项目中验证。工程应用效果及统计口径见表 6。

**Table 6.** Comprehensive effects and statistical basis of engineering application  
**表 6.** 工程应用效果及统计口径

| 项目     | 传统处理方式     | 可调适配方法    | 应用效果            | 统计口径或数据来源      |
|--------|------------|-----------|-----------------|----------------|
| 非标准模板  | 单独加工或木模补拼  | 标准铝模局部可调化 | 定制成本降低约 15%~20% | 项目成本台账及周转摊销估算  |
| 反坎吊模   | 垫块、木方临时支撑  | 螺纹调节与锁固   | 高度偏差控制在-5~5 mm  | 现场标高复核记录       |
| 单处反坎安装 | 约 15 min/处 | 约 3 min/处 | 效率提升约 80%       | 同类反坎位置现场计时     |
| 木材损耗   | 木方、垫块消耗较多  | 减少临时木方使用  | 单项目减少约 4.2 万元   | 项目材料消耗统计       |
| 墙体成型   | 铝木结合、补拼较多  | 顶升调节与支撑锁固 | 垂直度和平整度改善       | 现场质量检测记录       |
| 整体施工效率 | 非标准层影响流水节奏 | 可调构件清单化布置 | 提高约 10%~15%     | 模板安装、调节、复核工序对比 |

5.5. 非标准层墙体成型质量

以 6#楼首层为试验段，采用标准层铝模与伸缩式支撑组合工艺进行非标准层墙体高度调整，并与传统铝木结合工艺进行对比。检测结果见表 7。

Table 7. Comparison of wall construction effects in non-standard floors  
表 7. 非标准层墙体施工效果对比

| 指标         | 传统铝木结合工艺 | 可调适配铝模工艺 | 改善情况     |
|------------|----------|----------|----------|
| 层高适配高差/m   | 0.20     | 0.20     | 均可适配     |
| 顶升时间       | —        | 45 min/层 | 增加可控调节环节 |
| 墙体垂直度偏差/mm | 5        | 2        | 降低 60%   |
| 平整度偏差/mm   | 4        | 1        | 降低 75%   |
| 胀模率/%      | 1.2      | 0        | 胀模得到控制   |
| 施工效率       | 基准值      | +12%     | 提高约 12%  |

由表 7 可知，可调适配铝模工艺能够在 0.20 m 层高差条件下实现标准层模板复用。与传统铝木结合工艺相比，该工艺减少了木模板补拼和局部拼缝，墙体垂直度偏差由 5 mm 降低至 2 mm，平整度偏差由 4 mm 降低至 1 mm，胀模率由 1.2%降至 0。虽然顶升和支撑调节增加了专门操作环节，但由于减少了现场补拼、拆改和修补工作，整体施工效率仍提高约 12%。

5.6. 可调适配效果形成机制

从工程实测结果看，可调适配方法的效果并非来自单一构件改进，而是由几何适配、约束方式和施工组织三个层面共同形成。

在几何适配层面，伸缩式可调支撑将标准层与非标准层之间的 0.20 m 高差转化为可调构件的有效行程，使标准层铝模主体具备继续复用条件。该过程的关键不是简单“加高支撑”，而是在满足高度适配的同时保留支撑底座贴合、调节段锁固和标高复核等控制环节。

在约束方式层面，螺纹式反坎定位调节件将传统垫块或木方形成的点式临时支承，转化为螺纹连续调节、螺栓连接和上下传力组合约束。该变化使反坎模板在浇筑扰动下的标高漂移和水平偏移得到控制，也使不同板厚条件下的调节流程趋于统一。

在施工组织层面，BIM 深化和可调构件清单将非标准部位处理前置到施工准备阶段，减少了现场临时开孔、补拼和返工。模板班组可按统一流程进行预调、复核和锁固，混凝土浇筑班组也能根据固定器布置调整布料和振捣方式。因此，施工效率提升不仅来自单处安装时间缩短，也来自非标准层整体流水组织的稳定。

从指标作用机制看，高度适配系数主要反映标准层模板在非标准层中的几何复用能力；综合偏差指数主要反映多板厚反坎模板在浇筑扰动下的定位稳定性；效率提升率主要反映可调构件对现场作业流程的简化程度。三类指标分别对应尺寸适配、成型控制和施工组织三个层面，其改善结果共同表现为非标准构件定制减少、反坎成型偏差降低和现场作业效率提高。

6. 质量控制与适用边界

6.1. 关键质量控制要点

可调适配构件能否发挥作用，关键在于深化定位、现场调节、锁固复核和浇筑扰动控制。结合本工

程施工过程，关键工序质量控制要点见表 8。

**Table 8.** Quality control points of key construction procedures  
**表 8.** 关键工序质量控制要点

| 工序     | 控制内容                | 建议控制要求                       |
|--------|---------------------|------------------------------|
| BIM 深化 | 识别非标准层、反坎、洞口和支撑变化部位 | 形成可调构件清单                     |
| 孔位定位   | 复核固定点与钢筋、管线、预埋件关系   | 定位偏差 $\leq 2\text{ mm}$      |
| 高度调节   | 以楼板标高和反坎设计高度为依据     | 与设计高度偏差 $\leq 3\text{ mm}$   |
| 螺栓锁固   | 检查连接螺栓和锁紧螺母         | 不得松动或滑丝                      |
| 反坎浇筑   | 控制布料和振捣扰动           | 振捣棒距模板宜 $\geq 300\text{ mm}$ |
| 支撑调节   | 检查立杆垂直度和底座贴合        | 不得悬空、偏压                      |
| 四角顶升   | 同步调整顶升高度            | 过程监测标高差                      |
| 浇后复核   | 检查偏移、漏浆、松动和成型质量     | 形成实测记录                       |

反坎调节件安装前，应复核孔位与钢筋、管线、预埋件之间的关系，避免后期开孔或强行安装。调节件安装后，应先进行预调和半紧固，待反坎模板标高、轴线和水平度复核无误后再终拧锁固。

非标准层墙体顶升前，应检查模板连接、支撑底座、千斤顶布置和墙体混凝土强度条件。顶升过程中分级进行，并由专人观测四角标高差。支撑锁固完成前，不宜撤除千斤顶。二次浇筑前应复核模板拼缝、连接螺栓、洞口加固和支撑体系状态。

6.2. 适用边界

本文方法主要适用于高层住宅标准层与小幅非标准层高差转换、不同板厚卫生间反坎施工及局部墙体高度调整等场景。对本工程而言，标准层层高为 2.95 m，非标准层层高为 3.15 m，层高差为 0.20 m；楼板厚度为 100~160 mm，均处于本文可调支撑和反坎定位调节件的适配范围内。因此，本文所得结论首先应理解为针对“小幅层高差 - 多板厚反坎 - 局部墙体高度变化”耦合场景的工程验证结果。

受现场试验段、工程工期和检测条件限制，本文尚未进一步开展不同层高差、不同支撑高度、不同施工荷载、不同支撑间距及不同可调构件形式下的参数化数值模拟。因此，本文提出的高度适配系数、综合偏差指数和效率提升率，主要用于本工程及类似高层住宅工程中局部可调适配效果的评价，不宜直接外推为各类非标准层铝合金模板工程的通用设计限值。

具体而言，本文结论可能不适用于以下情况：第一，层高差显著大于 0.20 m，且需要通过较长可调段或附加支撑构件实现高度适配的工程；第二，支撑高度明显增加、支撑间距扩大、楼板厚度增大或施工荷载显著提高的工况；第三，大跨度公建、地下室顶板、转换层、设备层、商业综合体等梁板构造复杂、局部荷载集中或模板支撑路径变化明显的结构；第四，采用不同厂家、不同构造形式或不同锁固方式的可调支撑、反坎固定器和洞口调节构件系统；第五，存在复杂洞口、大面积变截面梁板、管线高度集中、支撑底部不平整或浇筑扰动较强的局部区域。对于上述工况，仅依据本文工程实测结果进行判断可能低估支撑稳定、连接锁固和局部变形风险。

此外，本文现场检测数据来源于单项工程试验段，虽然检测过程中尽量保持施工班组、施工条件和检测工具一致，但样本数量、工程类型和施工环境仍较有限。综合偏差指数和评价分级主要用于同一工程内不同板厚反坎吊模成型控制效果的相对比较，尚不能完全反映跨地区、跨项目、跨班组和不同模板

体系条件下的统计离散性。因此,在后续工程推广中,仍应结合更多实测样本对指标限值、评价分级和施工控制参数进行修正。

后续研究可从以下方面展开:一是建立不同层高差、不同支撑高度、不同施工荷载和不同支撑间距下的数值模拟模型,开展参数敏感性分析,明确可调构件适配能力与支撑安全边界之间的关系;二是对不同类型可调支撑、螺纹式反坎定位件、插接式固定器和模块化洞口调节构件开展对比试验,分析不同构造系统的调节精度、锁固性能和施工效率差异;三是将研究对象由高层住宅扩展至公建、商业综合体、地下空间和转换层等复杂结构,考察大跨度梁板、复杂洞口和集中荷载条件下的适用性;四是结合 BIM 深化、现场实测和多项目数据积累,建立可调适配评价指标数据库,进一步修正高度适配系数、综合偏差指数和施工效率评价方法。

## 7. 结论

1) 针对高层住宅非标准层铝合金模板适配性不足的问题,提出了基于可调适配评价的施工技术体系。该体系通过高度适配系数、反坎成型综合偏差指数、效率提升率和支撑安全约束条件,将非标准层模板施工由经验化调整转化为可量化评价和流程化控制。

2) 可调支撑有效调节范围为 0~200 mm,对本工程 0.20 m 层高差的高度适配系数为 1.00,能够满足小幅非标准层高差的几何适配要求。与传统支撑相比,可调支撑单次调节精度由 $\pm 5$  mm 提高至 $\pm 1$  mm,单根拼装时间由 8 min 缩短至 5 min,10 kN 荷载后残余变形由 3.2 mm 降低至 1.1 mm。

3) 螺纹式反坎定位调节件能够适配 100~160 mm 板厚条件下的反坎吊模施工。现场检测结果表明,不同板厚反坎模板标高偏差均控制在 $\pm 1$  mm 以内,水平偏移量不大于 0.5 mm,调节件变形不大于 0.2 mm,综合偏差指数  $I_q$  介于 0.269~0.416 之间,均小于 0.50,处于成型控制稳定区间。

4) 可调适配方法能够改善非标准层墙体成型质量和施工效率。与传统铝木结合工艺相比,墙体垂直度偏差由 5 mm 降低至 2 mm,平整度偏差由 4 mm 降低至 1 mm,施工效率提高约 12%;单处反坎吊模安装时间由约 15 min 缩短至约 3 min,效率提升约 80%;项目非标准模板定制成本降低约 15%~20%。

5) 本文结论基于单项高层住宅工程获得,适用条件主要为 0.20 m 小幅层高差、100~160 mm 板厚、多板厚反坎吊模和局部墙体高度调整场景。对于层高差明显增大、支撑高度或施工荷载显著提高、大跨度公建、转换层、设备层、复杂洞口和不同类型可调构件系统,本文指标和结论不宜直接套用,应结合支撑稳定性验算、构件锁固性能试验和必要的数值模拟进行专项复核。后续研究应进一步开展不同层高差、不同荷载水平、不同可调构件系统和不同结构类型下的对比分析,以验证并修正本文评价方法的适用范围。

## 基金项目

中交一航局青年创新项目(2025-QNCX-15)。

## 参考文献

- [1] 刘波,赵会娟.建筑铝合金模板型材模具设计与制造[J].建筑科学,2025,41(3):185.
- [2] 朱伟光.铝合金模板施工技术应用研究[J].陕西建筑,2026(2):73-77.
- [3] 牟杨,田北平,赵学磊.建筑铝合金模板的表面改性与耐蚀耐磨性能研究[J].电镀与精饰,2024,46(10):21-27.
- [4] 陈朋,李丹.快拆铝合金模板体系在综合管廊中的设计与应用[J].中国建筑金属结构,2026,25(1):13-15.
- [5] 杨东,张慧杰,陈雅,等.超高楼层铝合金模板满堂架支撑体系施工技术[J].施工技术(中英文),2025,54(2):131-135.

- [6] 刘赛德, 郭长春, 谭坚钊, 等. 基于 BIM 技术的建筑铝合金模板安装施工技术研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2026(4): 140-143.
- [7] 陈新贵, 白宗财, 潘霞, 等. 基于 BIM 技术的铝合金模板在超高层建筑中的精益建造应用研究[J]. 科技视界, 2026, 16(3): 52-54.
- [8] 卢晨煜. 基于 BIM 技术的铝合金模板配模设计与施工研究[J]. 江西建材, 2025(4): 185-187.