

## 基于实例的附着式升降脚手架中桁架 结构优化布置的有限元分析

张晓通, 赵 涛

(甘肃第七建设集团股份有限公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**附着式升降脚手架已经成为了建筑脚手架的主流,桁架作为附着式升降脚手架的主要受力构件,对架体稳定性具有决定性的影响,因此研究桁架设置的位置、数量对架体结构体稳定性能的影响很重要。文章以三跨四机位的附着式升降脚手架结构为研究对象,利用 ANSYS 有限元软件,通过对不同桁架设置组合形式下形成的静态应力和静态应变云图分析对比,统计分析架体整体受力应力及挠度变化情况,判断架体的结构整体稳定性能。研究表明:基于实例的架体底层大桁架必须设置,再增设底层内部小桁架和上部一道桁架后,架体整体的应力和位移达到了最优值,可为今后同类架体合理设置桁架数量、位置提供一定参考。

**关键词:**附着式升降脚手架; 桁架; 三跨四机位; 组合形式; 有限元

**中图分类号:** TU731.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-8993(2024)06-0021-06

**doi:** 10.13402/j.gcjs.2024.06.072

## Finite element analysis of optimal arrangement of truss structure in attached lifting scaffolding based on example

ZHANG Xiaotong, ZHAO Tao

(Gansu No. 7 Construction Group Co., Ltd., Lanzhou 730000, Gansu, China)

**Abstract:** Suspended scaffolding has become the mainstream in construction scaffolding. The truss, as the main load-bearing component of the suspended scaffolding, has a decisive impact on the stability of the scaffolding structure, so it is important to study the influence of the truss setting position and number on the stability performance of the scaffolding structure. In this paper, the three-span four-machine-position suspended scaffolding structure is taken as the research object and the ANSYS finite element software is used to analyze and compare the static stress and strain cloud maps formed by different truss setting combination forms, the overall load-bearing stress and deflection changes of the structure are statistically, and the structural overall stability performance of the scaffolding is estimated. The final study shows that: based on the example, the lower large truss of the scaffolding structure must be set, and then additional lower internal small trusses and upper trusses are set. After that, the overall stress and displacement of the structure reach the optimal value, which can provide a certain basis for the rational setting of truss numbers and positions in similar structures in the future.

**Key words:** attached lifting scaffold; truss; three spans and four camerass; combined form; finite element

附着式升降脚手架是依附在建筑物主体结构上,依靠自身的升降设备,满足施工需求而自主升降的脚手架体系<sup>[1-4]</sup>。它的组成大致分为5个

部分:以桁架结构、立杆、导轨和脚手板等由螺栓固定成整体的架体系统;电脑控制模块和传感器组成的载荷控制系统;电动升降设备和固定吊

**收稿日期:** 2023-03-06

**作者简介:** 张晓通(1990—),男,工程师,从事施工管理、建筑机械、附着式升降脚手架方面的研究工作。

**通信作者:** 赵 涛(1989—),男,高级工程师,从事建筑机械、附着式升降脚手架方面的研究工作。

点组成的提升系统；外挂防护网和脚手踢板等组成的防护安全系统；由导向座、连墙件和防坠器等组成的附着支撑装置系统<sup>[5-7]</sup>。

桁架结构是附着式升降脚手架的加强结构。桁架结构的设置层数与设置的位置直接影响整体架体结构的稳定性与安全性。卢龙玉等<sup>[7]</sup>利用 SAP2000/ABAQUS 研究了附着式升降脚手架正常使用情况下的整体稳定性和构件内力情况，得出了架体底板和侧板连接处的应力较大，这在工程应用中要采取相应的加固措施。岳桂杰<sup>[8]</sup>研究了单个桁架、多个桁架和不添加桁架三种工况下架体的应力及变形情况，得出了在架体上设置一道底部大桁架附加一道小桁架是最为经济合理有效的设计方案。李明等<sup>[11]</sup>研究了附着式升降脚手架定型水平承载力框架结构，得出了在杆件用材相同的情况下，采用同向对称反斜结构可减小抖腹杆的最大轴压力，增大腹杆、节点及水平承力框架的承载能力。

前人在附着式升降脚手架构件内力结构、腹杆、水平承力框架的承载能力以及桁架的数量进行了研究，但未能够解决设置不同数量、不同位置的桁架对附着式升降脚手架稳定性及内力的影响。本文根据目前较为主流的脚手架结构，以三跨四机位的附着式升降脚手架结构为研究对象，通过设置不同层数、内外侧位置的桁架进行实体建模与有限元分析，得到桁架对架体结构影响的一些基本受力规律，并对数据进行整理分析，得出较为合理、经济的桁架设置规则。

1 架体模型建立与参数设置

1.1 架体模型参数

架体以三跨四机位的脚手架为例，进行有限元模型建立，架体主要参数：脚手架架体竖向高度为 13.5 m，架体导轨支承跨度分别为 3.6、4.8、4.8 m<sup>[9]</sup>。架体宽度为 0.6 m，立杆最大纵距为 2.4 m，步距为 2.9 m，内侧水平杆距操作层竖向距离为 2.0 m。架体主体结构模型如图 1 所示。

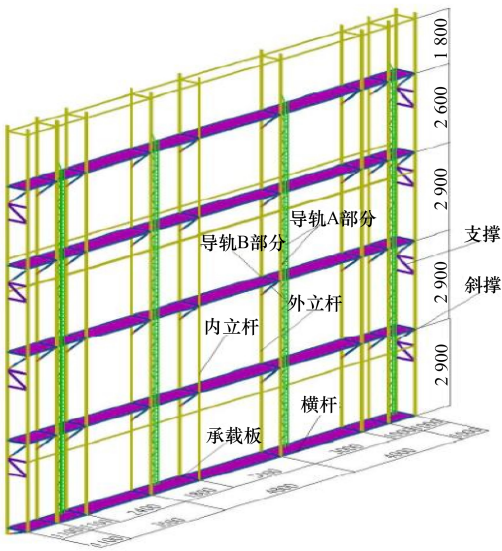


图 1 架体主体结构模型

1.2 有限元模型参数设置

1.2.1 单元划分及材料属性

附着式升降脚手架中的构件主要由方管、槽钢、圆钢等型钢和薄钢板构成，为了在得到足够精确结果的前提下尽量减小计算规模，采用 ANSYS 软件中的 SHELL63 单元模拟槽钢、薄钢板等，用 BEAM188 单元模拟圆钢。其中，SHELL63 单元为薄板/薄壳单元，满足弹性力学中的 Kirchhoff 薄板假设，建模时只需建立一个没有厚度的平面/曲面，代表其中性面，而其厚度参数由单元实常数来定义；BEAM188 单元为梁单元，采用弹性力学中的 Timoshenko 梁理论，建模时只需建立一条直线/曲线，代表其中性轴，而其截面形状另行指定。由于架体所有构件的材料均为 Q235，其材料属性如表 1 所示。

1.2.2 荷载及约束条件设置

架体在使用过程由两个阶段构成：1) 架体利用自身安装的电动提升装置进行升降工作实现平台升降工作的升降阶段；2) 架体升降完毕后为施工提供操作平台的使用阶段。第二阶段为满足实际工程施工需要而进行的正常使用阶段。对有限元模型施加边界条件，包括位移约束、耦合和载荷，每层、每个导轨与建筑物接触的位置施加两

表 1 材料属性设置

| 材料属性 | 密度/( $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$ ) | 弹性模量/( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ) | 泊松比 | 体积模量/Pa                 | 剪切模量/Pa                 |
|------|---------------------------------------|----------------------------------------|-----|-------------------------|-------------------------|
| 参数   | $7.85 \times 10^{-6}$                 | $2 \times 10^5$                        | 0.3 | $1.6667 \times 10^{11}$ | $7.6923 \times 10^{10}$ |

个固定约束, 如图 2 所示。

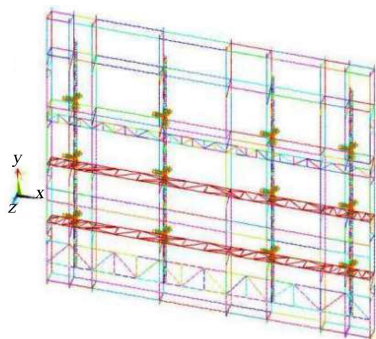


图 2 架体模型约束

根据脚手架架体实际工作中的情况和附着脚手架的技术规程, 在各工况下荷载情况如表 2 所示。

表 2 架体活荷载标准值

| 工况类别 | 施工类型 | 同时作业层数/层 | 每层活荷载标准值/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |
|------|------|----------|--------------------------------------------|
| 使用工况 | 结构施工 | 2        | 3.0                                        |
|      | 装修施工 | 3        | 3.0                                        |
|      | 结构施工 | 2        | 0.5                                        |
| 升降工况 | 装修施工 | 2        | 0.5                                        |

## 2 桁架不同设置下力学分析

桁架结构作为一种由多根小截面杆件组成的“空腹式大梁”结构, 可以通过改变其截面的高度来实现结构的抗弯能力, 而且挠度小。相比于实腹梁更加适合于大跨度结构, 且具有节省材料, 自重小的特点。

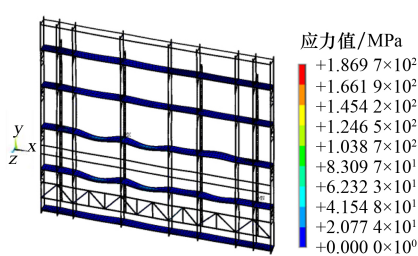
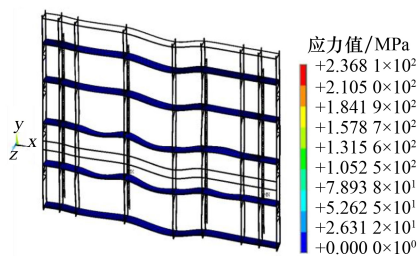


图 4 架体结构静态应力云图

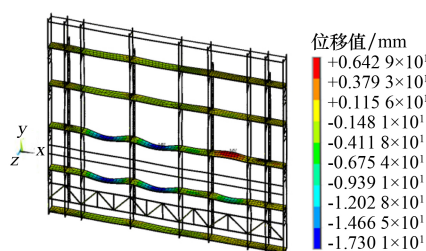
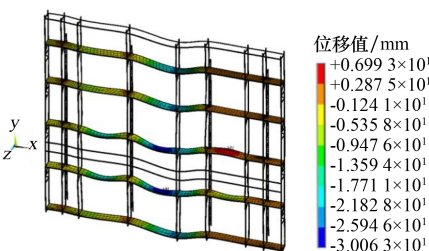


图 5 架体结构静态位移云图

### 2.1 底层大桁架设置及受力分析

脚手架底层主要作用为上层防护保障和施工人员通行。对底层单元结构添加桁架前后进行对比分析, 桁架宜设置在外侧与竖向主框架连接, 通过施加外防护面保证施工人员的安全, 内侧作为施工人员的进出通道, 即可增加架体整体的稳定性又可保证人员的通行便捷。底层大桁架高度为 1 200 mm, 其有限元模型如图 3 所示。

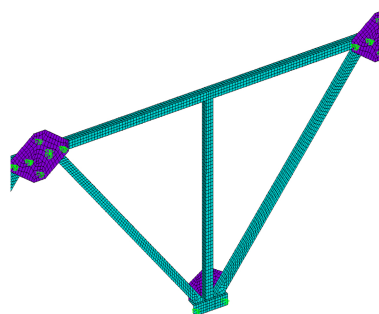


图 3 底层大桁架有限元模型

对底层不设置和设置桁架两种情况分别加载使用工况施工荷载, 通过有限元分析, 施加桁架前后单元的计算静态应力云图如图 4 所示, 静态位移应力云图如图 5 所示。

由图 4、5 可知: 当增加桁架结构后与无桁架结构进行对比, 架体结构静态应力最大值降低 21.1%, 静态位移最大值降低 42.5%。未增加底层大桁架结构前, 架体结构中跨位移值最大为 30.06 mm, 规范规定本结构的最大挠跨比限值为

1/250(19.2 mm)，其计算挠度值大于规范规定的限定值<sup>[9-12]</sup>。因此，没有增加底层大桁架的架体结构并不满足使用要求。增加底层大桁架后，架体结构中跨位移值最大为 17.3 mm，其计算挠度值小于规范规定的限定值 19.2 mm，符合安全使用条件。结构的最大位移变为原结构的 1/2，增加底层大桁架以后架体结构的内力变化效果是很明显的。因此，在架体结构底层必须增加大桁架，增强结构整体刚度，减小结构变化位移。

2.2 小桁架设置及受力分析

2.2.1 小桁架设置模拟与组合形式分类

小桁架结构主要分布在架体上部结构，由于上部结构在增加底部大桁架后总体变形量较小，同时便于施工作业，进而减小桁架尺寸。小桁架其高度为 400 mm，其有限元模型如图 6 所示。

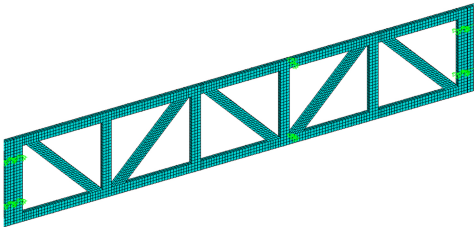


图 6 小桁架有限元模型

由于架体主体结构由五层施工脚手板组成，在计算中根据小桁架分布的位置和数量的不同以及结合施工现场较为常规的设置方式，共计模拟 20 种不同的设置方案，在进行荷载加载后形成 20 种不同的组合形式，进而分析小桁架在不同位置及数量下对架体整体结构的影响。组合形式分类如表 3 所示。

2.2.2 荷载施加

在架体设置小桁架的研究中，为尽可能得到与实际工况相近的分析结构，在结构分析中对风荷载和施工荷载一起考虑，施工荷载按正常使用阶段的结构施工荷载进行施加，风荷载在不考虑结构在随高度变化的荷载作用下的响应，以本地区 50 m 高空的风荷载值作为计算依据。通过计算求出本地区 50 m 高空风荷载标准值为 0.46 kN/m<sup>2</sup>，通过外封闭网施加，考虑到架体外封闭网并不是一个全封闭面，对其荷载按照 90% 进行折减施加<sup>[13-16]</sup>。

2.2.3 计算结果分析

通过对不同设置情况下，施加相同的荷载值，

通过有限元结构分析，统计了不同组合形式下静态位移变化值和静态应力变化值如表 4 所示。

表 3 组合形式分类

| 组合形式类别 | 大桁架<br>(架体外侧) | 小桁架      |       |
|--------|---------------|----------|-------|
|        |               | 架体外侧     | 架体内侧  |
| 形式一    | 一层            | 二层       | —     |
| 形式二    | 一层            | 三层       | —     |
| 形式三    | 一层            | 四层       | —     |
| 形式四    | 一层            | 二层;三层    | —     |
| 形式五    | 一层            | 三层;四层    | —     |
| 形式六    | 一层            | 二层;三层;四层 | —     |
| 形式七    | 一层            | —        | 一层    |
| 形式八    | 一层            | —        | 三层    |
| 形式九    | 一层            | —        | 四层    |
| 形式十    | 一层            | —        | 一层;二层 |
| 形式十一   | 一层            | —        | 一层;二层 |
| 形式十二   | 一层            | —        | 一层;四层 |
| 形式十三   | 一层            | —        | 二层;四层 |
| 形式十四   | 一层            | 三层       | 一层    |
| 形式十五   | 一层            | 四层       | 一层    |
| 形式十六   | 一层            | 二层       | 二层    |
| 形式十七   | 一层            | 四层       | 二层    |
| 形式十八   | 一层            | 三层       | 三层    |
| 形式十九   | 一层            | 四层       | 三层    |
| 形式二十   | 一层            | 四层       | 四层    |

表 4 不同组合形式下静态位移变化值和应静态力变化值统计

| 组合形式类别 | 静态位移<br>变化值/mm | 静态应力<br>变化值/MPa |
|--------|----------------|-----------------|
| 一      | 17.08          | 186.27          |
| 二      | 17.08          | 185.90          |
| 三      | 16.47          | 182.80          |
| 四      | 16.98          | 185.63          |
| 五      | 16.43          | 182.79          |
| 六      | 16.42          | 182.28          |
| 七      | 17.24          | 186.43          |
| 八      | 17.64          | 187.69          |
| 九      | 18.78          | 192.55          |
| 十      | 17.02          | 184.38          |
| 十一     | 16.98          | 183.41          |
| 十二     | 16.76          | 182.63          |
| 十三     | 16.42          | 182.68          |
| 十四     | 16.42          | 182.55          |
| 十五     | 16.40          | 182.27          |



表 4(续)

| 组合形式类别 | 静态位移<br>变化值/mm | 静态应力<br>变化值/MPa |
|--------|----------------|-----------------|
| 十六     | 16.74          | 182.90          |
| 十七     | 16.73          | 183.89          |
| 十八     | 16.80          | 182.76          |
| 十九     | 17.06          | 184.18          |
| 二十     | 17.08          | 184.09          |

对在小桁架在不同设置情况下,对架体结构进行施工作业荷载作用下的结构分析,由以上表格数据可知,在不同位置增加小桁架以及小桁架的数量的不同对架体结构影响总体较大。各种不同组合形式下架体结构静态应力变化曲线如图 7 所示;架体结构在各种组合形式下结构静态位移变化曲线如图 8 所示。

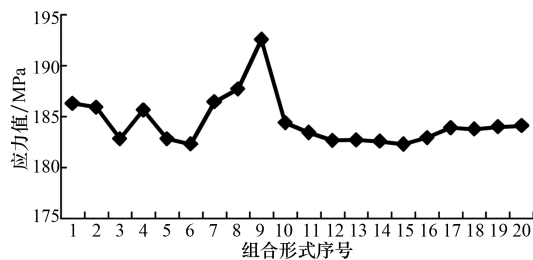


图 7 架体结构静态应力

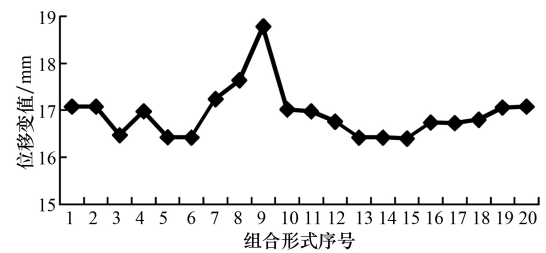
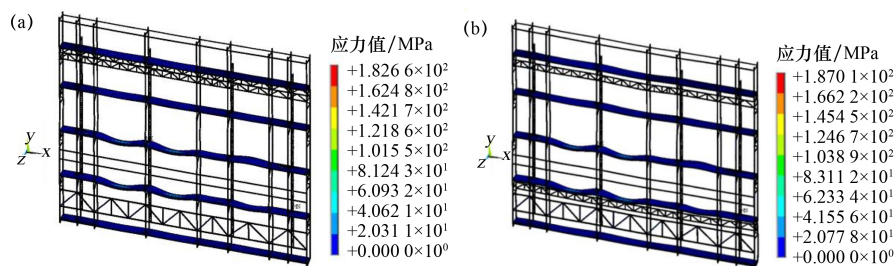


图 8 架体结构静态位移

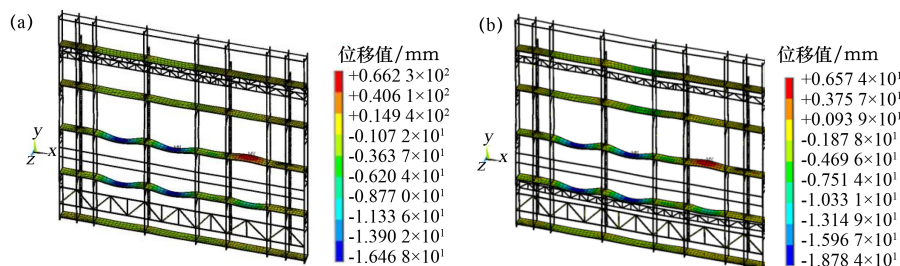
经过分析可知,在设置最底部桁架的前提下,仅在四、五层间两侧(形式 20)设置桁架其位移变化量和应力变化值与其他各类形式下的最小数值变化不大。当仅设置一道内、外小桁架作为安全保证是可行的,且目前从位移或应力的角度看增加设置四、五层间两侧(形式 20)的小桁架效果优于仅设置最底部大桁架的情况。但是四、五层间桁架(形式 20)为前后双层的小桁架,从安装工艺、人员操作空间的角度来看并不经济、不合理。

通过数据的对比,一、二层间(内侧);四、五层间(外侧);既形式 15 相较于形式 20 从位移或应力的角度分析更加具有优势,同时更便于现场施工与操作。形式 15 和形式 20 的架体结构静态应力对比云图如图 9 所示,架体结构静态位移对比云图如图 10 所示。



(a) 形式 20 架体结构静态应力云图; (b) 形式 15 架体结构静态应力云图

图 9 两种组合形式架体结构静态应力云图



(a) 形式 20 架体结构静态位移云图 (b) 形式 15 架体结构静态位移云图

图 10 两种组合形式架体结构静态位移云图

### 3 结 论

(1) 桁架对整体结构的位移具有控制作用, 架体不设置桁架时板的挠度超过了限值, 最大应力也超过了材料的极限值, 故实际工程中架体必须设置桁架。

(2) 底层大桁架直接影响结构的安全性。在架体结构分析中, 架体最大位移出现在架体中跨的脚手板上, 根据规范规定结构的最大挠跨比限值为 $1/250$ , 模型中最大挠度值应为 19.2 mm。架体结构设置底层大桁架后, 架体结构中跨位移值最大由初始的 30.06 mm 减少为 17.3 mm, 结构的最大位移变为原结构的  $1/2$ , 满足了结构设计的和规范要求。增加底层大桁架以后架体结构的内力变化效果是很明显的。因此, 在架体结构底层必须增加大桁架, 增强结构整体刚度, 减小结构变化位移。

(3) 架体在设置底层大桁架和顶层(四层)内、外层小桁架后, 架体结构的最大位移和最大应力与其他在此基础上增加小桁架的数量的组合形式所引起的变化基本相同。结合其他桁架设置组合形式的分析结果, 架体结构在设置底层大桁架和顶层(四层)内、外层小桁架后, 完全满足施工的各项需求, 其他位置可不设小桁架。但是顶层由于施工操作的需要, 可将顶层(四层)内侧小桁架安装在底层(一层), 可与大桁架、架体结构形成空间桁架结构, 架体结构位移和应力在原有基础上可进一步微缩。

(4) “三跨四机位”是附着式升降脚手架的典型模型结构, 此研究结果对各类型结构桁架的数量、位置的设置具有一定的指导意义。考虑到工程的现场不确定性以及机位跨度的不同, 施工单位可根据现场实际在不同位置增设桁架数量提高实用的安全性。

### 参考文献:

[1] 谢永超. 附着式升降脚手架在超高层建筑施工中的

应用[J]. 施工技术, 2006, 35(8): 77-80.

- [2] 汤吉善. 脚手架技术在建筑施工中的应用[J]. 科技与企业, 2015(20): 119.
- [3] 糜嘉平. 我国新型脚手架的发展动向[J]. 施工技术, 1999, 28(3): 1-3.
- [4] 王峰, 温雪兵, 郭玉增, 等. 常用附着式升降脚手架的类型和特点[J]. 建筑机械化, 2016, 37(6): 28-30.
- [5] 张健, 刘燕, 韦蓼英. 附着式升降脚手架的应用效果分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2003, 19(1): 19-21.
- [6] 余宗明. 高层建筑脚手架及其优化选择[J]. 建筑技术, 1999(8): 7-9.
- [7] 卢龙玉, 曲彦铭, 曲淑英, 等. 基于 SAP2000/ABAQUS 的新型铝合金附着式升降脚手架的力学模型及分析[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(19): 3-5.
- [8] 岳桂杰, 保承军. 基于 ANSYS 的附着式升降脚手架桁架结构优化设计[J]. 兰州工业学院学报, 2022, 29(4): 7-9.
- [9] 刘垚, 蔡安江. 附着式升降脚手架不同工况下的预应力模态分析[J]. 建筑机械化, 2021(1): 59-62.
- [10] 建筑施工工具式脚手架安全技术规程: JGJ 202—2010 [S].
- [11] 李明, 严明泽. 附着式升降脚手架定型水平承载力框架结构方案分析与优化[J]. 建筑施工, 2001(2): 114-115.
- [12] 王宇飞, 谷立臣. 基于 MSC. Patran/Nastran 的超高附着式脚手架有限元分析[J]. 建筑机械, 2010(7): 84-86, 89.
- [13] LIANG H, YANGGX, XU Y, et al. Wake-up timer and binary exponential backoff for ZigBee-based wireless sensor network for flexible movement control system of a self-lifting scaffold[J]. SAGE Publications, 2016, 12(9): 336-369.
- [14] 张毅, 袁勇. 超高层建筑附着式升降脚手架的计算分析[J]. 建筑施工, 2000(6): 36-37.
- [15] 王帆, 郭正兴, 李维滨. 附着升降脚手架受升降不同步影响的试验研究[J]. 施工技术, 2000, 29(3): 11-13.
- [16] 王喜国. 附着升降脚手架安全构造设计及工程应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.