

# 高层ICCP动态支撑系统荷载及行程自感知方法与试验

左自波<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海建工集团股份有限公司, 上海

<sup>2</sup>上海建工集团中央研究院, 上海

收稿日期: 2026年6月20日; 录用日期: 2026年7月11日; 发布日期: 2026年7月22日

## 摘要

针对整体爬升平台(ICCP)的传统动态支撑系统(ASS)无法感知伸缩行程和所承载巨型ICCP的荷载而存在较高施工风险的问题, 研究适用于超高层ICCP的ASS荷载及行程自感知方法。本文重点介绍荷载及行程一体化自感知的工具式ASS支撑单元硬件、ASS监测及控制系统架构和ASS状态评估与分析关键点。以高度为356 m的超高层施工为案例, 开展工具式ASS的监控试验和应用工艺研究。结果表明: 该方法可实现ASS承力销荷载的自感知和伸缩行程及支撑状态的识别和控制, 提高了ICCP施工的安全性, 为ICCP向自主智能化和安全高效施工转变提供基础技术支撑。该方法的研究和发展可推广应用于各类爬升模架装备、塔吊支撑结构和地下工程支撑等领域。

## 关键词

整体爬升平台(ICCP), 动态支撑系统(ASS), 荷载自感知, ASS行程自感知, 安全控制

# A Method and Experiment for Self-Sensing of Load and Travel in a High-Rise ICCP Active Support System

Zibo Zuo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Construction Group Co., Ltd., Shanghai

<sup>2</sup>Central Research Institute of Shanghai Construction Group, Shanghai

Received: June 20, 2026; accepted: July 11, 2026; published: July 22, 2026

## Abstract

To address the high construction risks associated with traditional active support systems (ASSs) for

文章引用: 左自波. 高层 ICCP 动态支撑系统荷载及行程自感知方法与试验[J]. 土木工程, 2026, 15(7): 84-94.

DOI: 10.12677/hjce.2026.157181

integral climbing construction platforms (ICCPs) due to their inability to detect extension/retraction travels and loads from the massive ICCP structure, this study investigates a self-sensing method for load and travel in ASSs suitable for high-rise ICCPs. Specifically, it focuses on the hardware of the tool-type ASS support component with integrated load and travel self-sensing capabilities, the framework of the ASS monitoring and control system, and key aspects of ASS status evaluation and analysis. Taking a 356-meter-tall super-high-rise construction project as a case study, monitoring tests and research on application procedures for tool-type ASS are conducted. The results indicate that this method enables self-sensing of the load on the ASS load-bearing pins, as well as the identification and control of extension/retraction travel and support status. It enhances the safety of ICCP construction and provides a foundational technological basis for transitioning ICCP toward autonomous, intelligent, and safe, efficient construction. The research and development of this method can be extended to various fields, including climbing formwork equipment, tower crane support structures, and underground engineering support systems.

## Keywords

Integral Climbing Construction Platform (ICCP), Active Support System (ASS), Load Self-Sensing, Self-Sensing of ASS Travel, Safety Control

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

整体爬升平台(Integral Climbing Construction Platform, ICCP), 也称为整体钢平台模架装备[1], 是超高层、高层建筑物或构筑物建造的最为核心装备之一, 可实现建筑核心筒、桥塔结构等高耸结构的施工环境从极端危险高空中施工作业向安全舒适的“类陆地”平台施工转变[2]。与传统独立的爬升模架相比, ICCP 具有施工便利、结构相对安全可靠、作业高效和绿色低碳等优势[3], 因而被得到广泛应用, 许多标志性工程也采用该装备施工, 如东方明珠(468 m)、广州塔(600 m)、上海中心大厦(632 m)等[1][2][4]。因此, ICCP 在我国超高层、高层结构施工发挥重要作用, 央视报道将其称之为造楼机, 被誉为大国重器之一。

ICCP 的工作原理是通过竖向液压油缸动力群系统和搭载油缸的水平活动支撑系统(Active Support System, ASS)推进 ICCP 本体施工平台在已施工的混凝土结构(或爬升导轨)上进行交替的动态爬升作业[3]。ICCP 动态爬升过程中对每一个功能部件的稳定性和安全性要求极高, 然而, 传统 ICCP 的 ASS 仍存在一些不足。具体表现为, ASS 油缸伸缩操作方式落后, 需通过人工手动操作按钮控制 ASS 的油缸驱动支撑单元伸出并进入已施工混凝土结构预留的孔洞(ICCP 搁置状态)或者驱动支撑单元缩回(ICCP 爬升状态), 这种人工操作的方式不能精确识别支撑单元的伸缩行程, 由于支撑单元数较多(通常 30~40 个), 若支撑单元未到达预留孔洞的安全位置, 存在极大安全隐患, 同时操作效率低, 需要多人协同操控[4]。此外, ASS 无法感知承受 ICCP 的荷载, ASS 的支撑单元承受了 ICCP 全部自重荷载(甚至达到 1000 t~2000 t)及施工活荷载(人员、机械、堆载材料和外界环境等), 由于 ICCP 多数作业期间处于搁置状态, 若施工过程堆载(材料集中)过大, 易引发部分支撑单元荷载超限或预留孔洞混凝土压碎破坏, 甚至造成事故发生[4][5]。总之, ASS 无法感知伸缩行程和所承载巨型 ICCP 的荷载, 存在较高施工风险, 不利于推进 ICCP 的完全自动化。因此, 为确保每一个 ASS 支撑单元可精确伸出至既定的安全位置并可实时反馈支撑单元的受荷载状况[4], 有必要开展 ASS 的荷载及行程监测方法研究。

针对液压油缸位移监测, Sumali 等[6]开发了一种基于感应棒在油缸内运动时线圈阻抗变化原理的液

压油缸位移传感器；郭猛[7]分析了磁致伸缩效应的原理及现状，并介绍了内置磁致伸缩位移传感器的油缸；Zhang 等[8]为解决嵌入液压缸内磁致伸缩位移传感器存在的局限，引入了惯性传感器测量推力位移的方法。针对重型荷载的监测，Oskoui 等[9]研究了基于桥梁端部旋转监测卡车行驶中重量的传感器和方法；Jadoon 等[10]开发了基于物联网的车载称重系统，用于实时监测和量化松散建筑材料。当前，针对承载巨型 ICCP 的 ASS 荷载及行程监测方法研究极其有限，尚缺乏有效的监测及控制技术手段。

本文系统研究适用于超高层 ICCP 的 ASS 荷载及行程自感知方法，重点介绍荷载及行程一体化自感知的工具式 ASS 支撑单元硬件、ASS 监测及控制系统架构和 ASS 状态评估与分析关键要点。以高度为 356 m 的超高层施工为案例，开展工具式 ASS 的监控试验和应用工艺研究，探索 ASS 荷载及行程自感知方法在 ICCP 应用中的适用性。

2. 基本原理

2.1. 传统 ASS 支撑单元

ICCP 应用最为广泛的为上部提升式和下部顶升式两种(图 1) [1]-[5] [11]。两者的区别为，上部提升式 ICCP 的爬升动力系统位于施工平台的上方(图 1 上图) [2] [3]，主要优势是安装及操作相对简单、结构适应性相对较强，而缺点则是对平台上方一定范围(爬升导轨柱高度范围内)塔吊的作业产生一定影响[2]；下部顶升式 ICCP 的爬升动力系统位于架体平台的下方(图 1 下图) [2] [4] [11]，主要优势是施工平台上表面的作业空间较大，而且不影响塔吊的作业，而缺点则是下部顶升式爬升动力系统的安装以及操控相对复杂[2]。

无论上部提升式 ICCP，还是下部顶升式 ICCP，均涉及 ASS 核心部件。图 1 (中图) [4]给出了传统 ASS 支撑单元的示意图，传统 ASS 支撑单元硬件主要由不带位移感知的油缸和不带荷载感知的承力销组成。

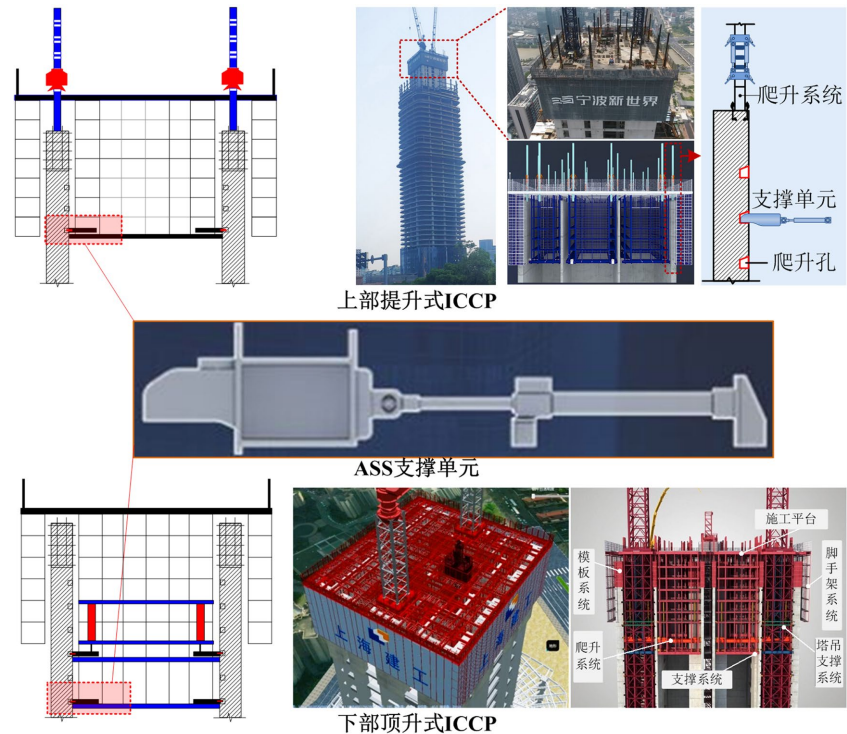
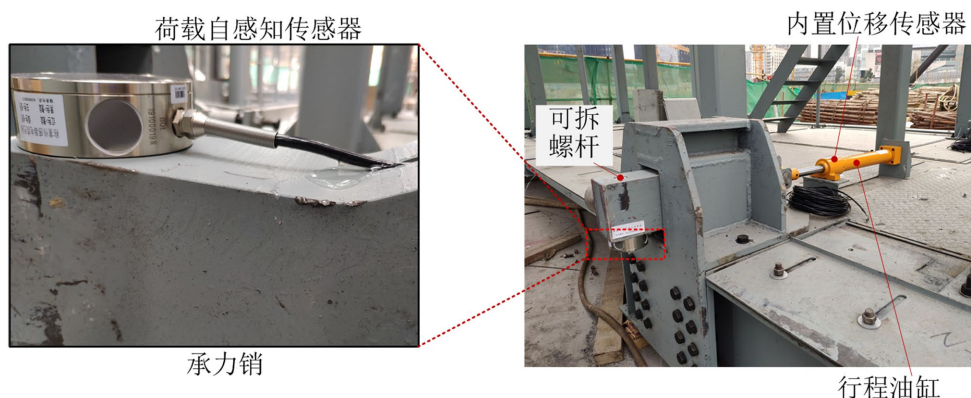


Figure 1. Principles of the ICCP and ASS support component [2]-[4] [11]  
图 1. ICCP 及 ASS 支撑单元的原理[2]-[4] [11]

## 2.2. 工具式 ASS 支撑单元硬件

基于传统 ASS 支撑单元的改造,研发出荷载及行程一体化自感知的工具式 ASS 支撑单元硬件,实物图如图 2 所示(本图基于[4] [12] [13]改绘)。工具式 ASS 支撑单元主要由升级后的支撑单元本体、荷载自感知传感器和位移自感知传感器组成。



**Figure 2.** Hardware of the integrated load-and-travel self-sensing tool-type ASS support component  
**图 2.** 荷载及行程一体化自感知的工具式 ASS 支撑单元硬件

荷载自感知传感器通过螺杆与升级后的 ASS 支撑单元本体的承力销相连,且荷载自感知传感器表面凸起部分内嵌于承力销的底部环槽内(深度为 3 mm)。荷载自感知传感器的外直径为 100 mm,高度约 50 mm,最大测量重量为 80 t(信号输出:电压信号;激励电压:5~12 V(DC);输出灵敏度:1.2 MV/V),传感器设置 4 组电阻式应变计(R1~R4),其利用压阻效应原理,即当 ICCP 自重传递给 ASS 支撑单元承力销,承力销将荷载传递给荷载自感知传感器上,内部电阻式应变计的弹性体会发生变形导致电阻值发生变化,通过测得输出的电压进行换算来测得荷载的大小,该传感器测试试验表明其可测量重型荷载并且误差可接受(控制在 4%以内),详细原理和试验过程见[13]。

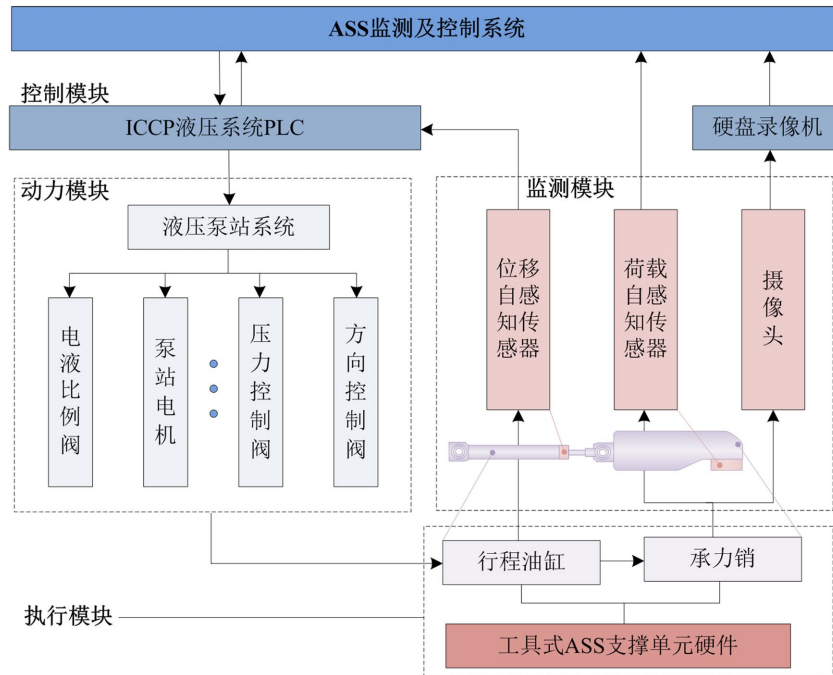
位移自感知传感器内置于 ASS 支撑单元本体油缸内部,其原理是采用基于非接触测量技术的磁致式缩位移传感器识别支撑单元油缸的水平行程。具体通过位置磁铁和磁力环两个磁场的相互感应得到的反馈信号,从而转换成油缸往复伸缩位移大小,其位移精度小于 1%,详细原理见[4],该传感器可适用于复杂的 ICCP 施工现场工况环境(环境不稳定、外部易受混凝土污染等)下位移的监测。

## 2.3. ASS 监测及控制系统

以支撑单元(单个工具式 ASS)为例,荷载及行程一体化自感知的工具式 ASS 监测及控制系统架构如图 3 所示。ASS 监测及控制系统主要包括 ASS 控制模块、动力模块、执行模块和监测模块[4]。

ASS 控制模块为 ICCP 液压系统 PLC(Programmable Logic Controller, 可编程控制器),可实现液压泵站系统泵站电机及电液比例阀等动作的控制;ASS 动力模块为液压泵站系统,可为 ASS 的行程油缸的伸缩运动提供动力;ASS 执行模块为内置位移自感知传感器的行程油缸,行程油缸伸出时,带有荷载自感知传感器的承力销跟随移动伸入至已施工墙体预留孔洞,实现 ICCP 的搁置功能,行程油缸缩回时,为 ICCP 爬升作业提供基础条件;ASS 监测模块主要监测荷载(承载力)和位移数据,接收传感器信号、转换数据格式,并在 ASS 监测及控制系统界面进行展示。此外,该模块通过摄像头图像数据辅助判断承力销的安全状态。





**Figure 3.** Monitoring and control system for an integrated load-and-travel self-sensing tool-type ASS  
**图 3.** 荷载及行程一体化自感知的工具式 ASS 监测及控制系统

## 2.4. ASS 状态评估与分析

ICCP 搁置状态下, 任一个工具式 ASS 支撑单元的荷载  $p_n$  (单位 t) 需满足式(1) [4]:

$$p_n \leq k \cdot \frac{m_A}{n} \quad (1)$$

式中:  $k$  为工具式 ASS 支撑单元荷载的安全系数;  $m_A$  为 ICCP 的总荷载, 含人员、机械、材料堆载和外界环境等活荷载, 单位为 t;  $n$  为 ASS 支撑单元的总数量[4]。

ASS 的总荷载  $P$  需满足式(2):

$$P = p_1 + p_2 + \cdots + p_n \leq k_A \cdot m_A \quad (2)$$

式中:  $k_A$  为 ASS 总荷载的安全系数。

ICCP 爬升和搁置状态下工具式 ASS 支撑单元行程是变化的, 图 4 给出 ASS 支撑单元行程计算分析原理(本图基于[4]改绘)。ICCP 爬升状态时(图 4 左图), ASS 的行程油缸缩回, 承力销回缩(油缸初始行程的数值为  $L_a$ ), 相对于初始状态进一步伸出的位移为  $L_{b1}$ , 则 ASS 行程油缸相对于初始状态伸出的总位移  $L_1$  可按式(3)计算[4]:

$$L_1 = L_a + L_{b1} \quad (3)$$

ICCP 搁置状态时(图 4 右图), ASS 的行程油缸伸出, 承力销处于搁置状态, 行程油缸相对于初始状态进一步伸出位移为  $L_{b2}$ , 则 ASS 行程油缸相对于初始状态伸出的总位移可按式(4)计算[4]:

$$L_2 = L_a + L_{b2} = L_1 + L_d + L_e \quad (4)$$

式中:  $L_d$  为 ICCP 平台与已施工混凝土结构的距离,  $L_e$  为承力销伸入已施工混凝土结构预留孔洞的位移。

为确保 ICCP 施工过程中的安全, ICCP 再一次爬升时(图 4 左图), ASS 的行程油缸再一次缩回, 缩回的位移  $L_R$  应满足式(5) [4], 即使得 ICCP 爬升前所有的承力销从已施工混凝土结构预留孔洞缩回至安

全距离:

$$L_r \geq L_d + L_e = L_2 - L_1 = L_{b2} - L_{b1} \quad (5)$$

ICCP 再一次搁置时(图 4 右图), ASS 的行程油缸再一次伸出, 伸出的位移  $L_s$  应满足式(6)和式(7), 即需要使得 ICCP 搁置前所有的承力销伸入已施工混凝土结构预留孔洞内, 并保证伸入的安全距离:

$$L_{b2} - L_{b1} = L_d + L_e \leq L_s \leq L_d + L_e + L_c = L_{b2} - L_{b1} + L_c \quad (6)$$

和

$$L_e \geq R \quad (7)$$

式中:  $L_c$  为承力销伸入已施工混凝土结构预留孔洞内的安全余量;  $R$  为荷载自感知传感器的直径。式(3)至(7)中的位移单位通常取 mm。

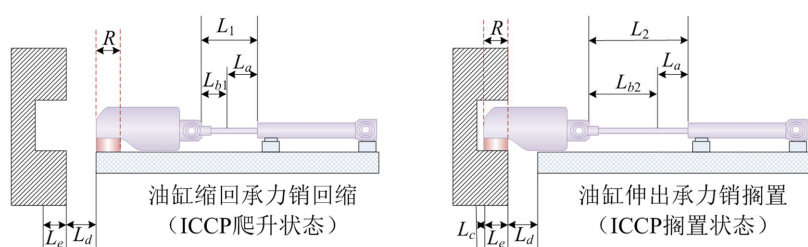


Figure 4. Principle of travel calculation and analysis for the tool-type ASS support component [4]

图 4. 工具式 ASS 支撑单元行程计算分析原理[4]

式(1)至(7)推导过程假定 ICCP 为正常使用阶段, 并且作业环境需要满足相应的要求, 例如, 式(1)、(2)、(4)、(6)和(7)作业环境风速小于等于 8 级[2] [5], 式(3)和(5)作业环境风速小于等于 6 级[2] [5]。

### 3. ASS 案例研究

#### 3.1. 工程案例概况

项目为深圳市的一座超高层综合体, 总建筑面积约 32.5 万  $\text{m}^2$ , 其中超高层建筑高度为 356 m, 74 层, 采用钢框架和核心筒结构, 核心筒为钢筋混凝土结构。采用上部顶提升式 ICCP 对该超高层建筑的核心筒进行施工, 如图 5 所示(该图为[4]中不同视图), ICCP 自身重量约为 500 t, 其爬升动力系统包括液压泵站(4 台)、液压爬升油缸(26 套, 40 t/套)和水平伸缩油缸(46 个, 行程为 430 mm), 爬升油缸速度设定为 2 mm/s, 详细见[4] [14] [15]。



Figure 5. ICCP used in the construction of a 356-meter core wall structure

图 5. 356 m 核心筒结构施工 ICCP

3.2. ASS 监控试验

监控试验中共采用了 46 个 ASS 支撑单元，其在 ICCP 的平面位置分布如图 6 所示。46 个 ASS 支撑单元水平伸缩油缸均布设了位移自感知传感器(NX01~NX46)，其中 16 个设置了荷载自感知传感器(NY01~NY16)，并在其上方设置了监控摄像头(SX01~SX16)以辅助监控 ASS 支撑单元的安全状态，详细信息见[4]。

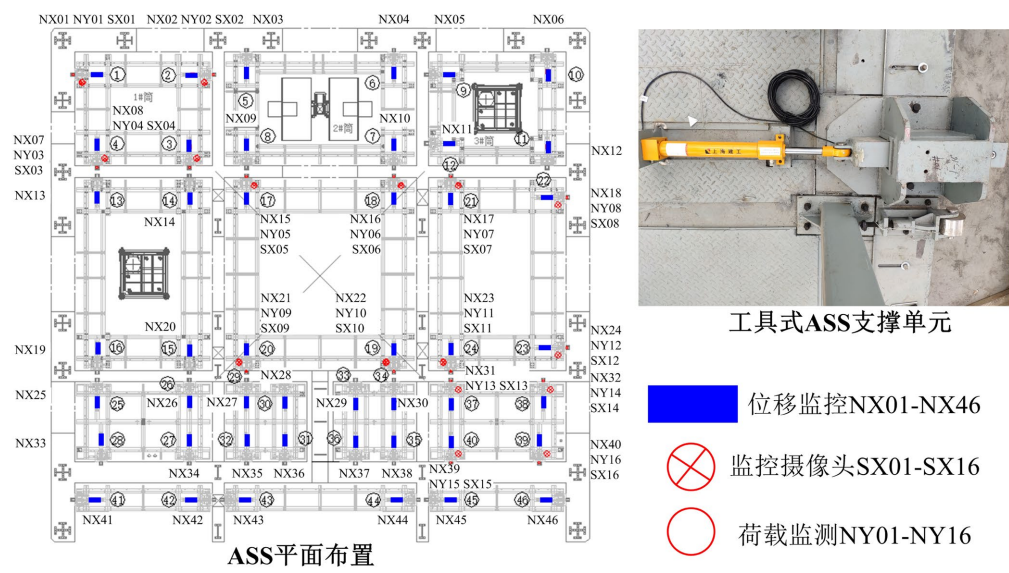


Figure 6. Distribution of ASS support components in the ICCP  
图 6. ASS 支撑单元在 ICCP 的分布



Figure 7. ASS status monitoring and control system  
图 7. ASS 状态监测及控制系统

ASS 状态监测及控制系统监控界面如图 7(本图基于[4][13]改绘)所示，该系统可根据 ICCP 爬升或搁置作业状态需要控制行程油缸及承力销的伸出和回缩，并可实时监测各个 ASS 支撑单元的位移和荷载变化。

实际应用中 ASS 状态监测及控制系统，嵌入 ICCP 智能监控平台[4][13][14]进行使用。ICCP 监控平台(基于 Force Control V7.1 组态软件开发[4])的使用步骤包括[4][16][17]：1) 爬升准备阶段通过平台监测风速和混凝土结构强度，判断是否具备爬升条件；2) 预爬升测试阶段通过预爬升(设定压力约 10 t)测试，

分析爬升油缸位移及压力；3) 预爬升阶段通过 5 cm 的同步爬升测试和监测数据(钢平台水平度、爬升油缸位移及压力、称重数据等)分析, 判断是否具备正式爬升条件；4) ASS 承力销缩回阶段通过 ASS 状态监测及控制系统控制行程油缸使承力销缩回, 通过分析所有 ASS 支撑单元的位移和荷载数据以及结合视频数据判断是否可以正式爬升；5) ICCP 正式爬升阶段通过监控平台控制爬升油缸系统(设定速度和位移)进行正式爬升, 爬升过程通过监测数据(钢平台水平度、爬升油缸压力及位移、钢柱及筒架垂直度、钢平台主梁及筒架应力等)评估 ICCP 安全状态, 若数据超过预警值停止自动爬升, 直至完成爬升；6) ASS 承力销伸出阶段通过 ASS 状态监测及控制系统控制行程油缸使承力销伸出并进入已施工混凝土结构预留孔洞, 通过分析所有 ASS 支撑单元的位移和荷载数据以及结合视频数据判断 ICCP 是否进入搁置状态；7) ICCP 搁置状态通过监测数据(风速、钢平台水平度、钢柱及筒架垂直度、钢平台主梁及筒架应力等)评估 ICCP 搁置安全状态。

#### 4. 结果与分析

图 8 为不同工况下 ASS 支撑单元荷载计算结果示例, 详细见[16]。可见, 不同工况(大风、暴雨、大雪等极端天气以及堆载情况[17])对 ASS 支撑单元的荷载产生有一定的影响, 总体影响不大, 引起的最大差值约为 6 t。相同工况下不同位置的 ASS 支撑单元荷载不同, 且差异较大, 最大荷载约为 56 t, 最小荷载约为 9 t。产生差异的潜在原因包括, ICCP 本身结构荷载分布的影响、施工平台上方建筑材料集中堆载的影响、已施工混凝土结构预留孔洞标高不一致的影响、ASS 支撑单元承力销伸入孔洞的距离以及荷载自感知传感器与预留孔洞接触面积等影响。由此可见, 研发荷载自感知的工具式 ASS 支撑单元硬件具有重要性。

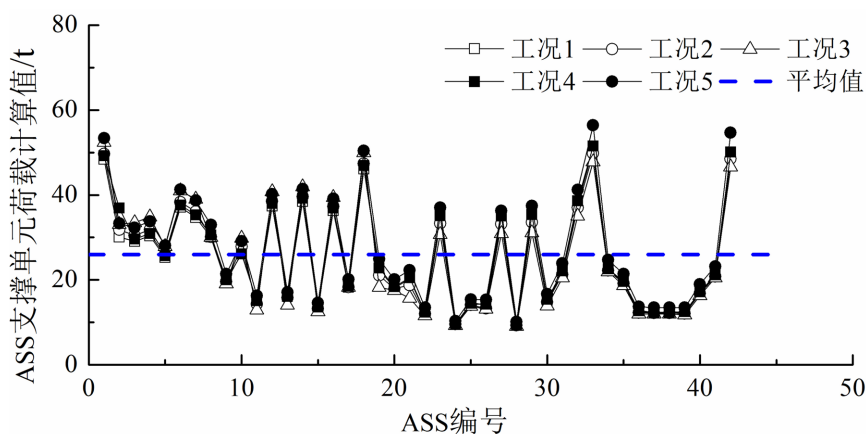


Figure 8. Example of load calculation results for ASS support components

图 8. ASS 支撑单元荷载计算结果示例

图 9 为 ICCP 不同施工状态 ASS 支撑单元荷载变化(图中数据采集的间隔时间为 5 s) [4] [17], ICCP 搁置状态下, 相同时刻不同位置 ASS 支撑单元荷载大小存在差异, 且差值相差较大, 但对于同一个 ASS 支撑单元而言, 荷载大小变化随着时间的推移并不显著。ICCP 爬升状态, 所有 ASS 支撑单元荷载趋于 0。爬升完成后, ICCP 再次进入搁置状态, 相同时刻不同位置 ASS 支撑单元的荷载大小仍存在差异且差异较大, 随着时间的推移, 同一个 ASS 支撑单元荷载大小的变化也不显著。两次搁置状态相同位置支撑单元荷载的变化较大, 荷载最大和最小值的位置不同。变化较大的潜在原因与前述分析一致, 包括已施工混凝土结构预留孔洞标高不一致的影响、ASS 支撑单元承力销伸入孔洞的距离、荷载自感知传感器与



预留孔洞接触面积不同以及施工平台上方建筑材料集中堆载等影响。ASS 支撑单元荷载监测结果表明，部分位置 ASS 支撑单元荷载较大，最大值超过 50 t，存在潜在风险，实际应用中，可结合 ASS 支撑单元荷载监测结果，调整已施工混凝土结构预留孔洞标高(荷载自感知传感器底部增加垫片等措施)[13]，来调节 ASS 支撑单元荷载。

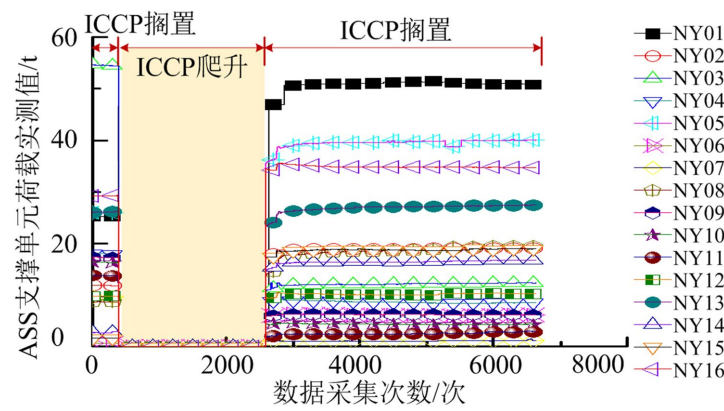


Figure 9. Load variations in ASS support components under different construction conditions of the ICCP  
图 9. ICCP 不同施工状态 ASS 支撑单元荷载变化

图 10 为不同施工期 ASS 支撑单元荷载实测结果，相同施工期，不同位置 ASS 支撑单元的荷载不同。并且，不同施工期(超高层核心筒结构不同施工阶段 ICCP 搁置状态)情况下，同一个 ASS 支撑单元的荷载也不同。由此可见，本文所提出的研发具有荷载自感知功能的 ASS 支撑单元具有重要意义[4] [13]。需要说明的是，图 10 荷载最大值小于图 9 中荷载最大值，潜在原因是图 10 是采用 ICCP 施工超高层的早期，施工平台的材料堆载较小，以及试验中并非所有 ASS 支撑单元都设置了荷载自感知传感器而无法对所有 ASS 支撑单元进行感知。

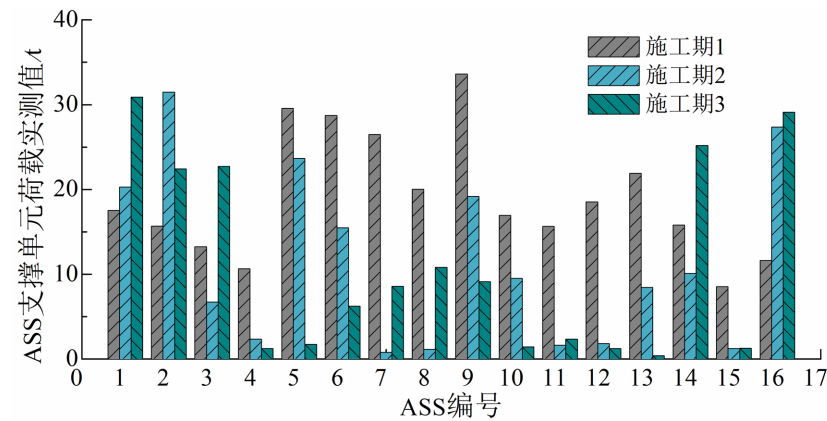
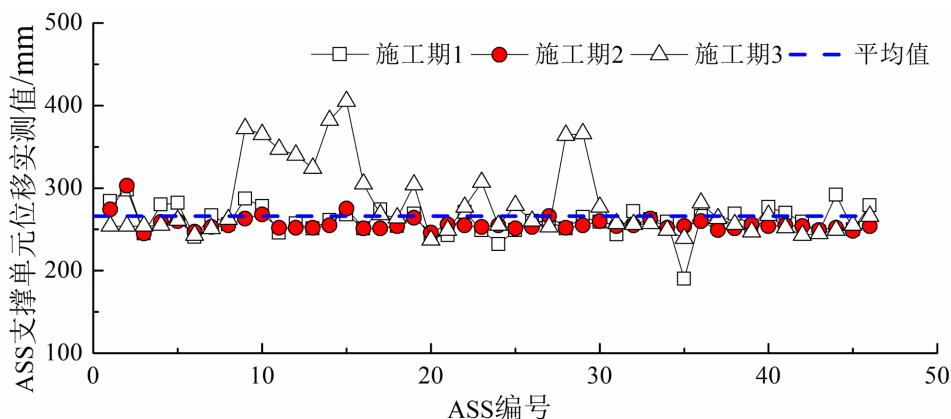


Figure 10. Measured load results for ASS support components at different construction stages  
图 10. 不同施工期 ASS 支撑单元荷载实测结果

图 11 为不同施工期 ASS 支撑单元位移实测结果，施工期 1 和施工期 2 (施工时间间隔较小)，不同位置 ASS 支撑单元的位移存在一定差异，但总体相差不大，前两个施工期位移平均值约为 260 mm；施工期 3 (与施工期 1 和 2 的时间间隔相差较大)，局部位置 ASS 支撑单元的位移较大，潜在的原因为，核心

筒结构墙体收分导致 ASS 支撑单元距离已施工混凝土结构的位置不同、ASS 支撑单元初始位置发生变化等。不同施工期情况下(图 11 中的施工期 1 至 3 与图 10 中施工期 1 至 3 所选取的监测时间点不同), 同一个 ASS 支撑单元的位移存在一定差异, 施工期 1 与施工期 2 的相差不大, 但施工期 3 与施工期 1 及 2 局部位置 ASS 支撑单元位移相差较大。由此可见, 本文所提出的工具式 ASS 支撑单元可感知行程, 且对 ICCP 的状态管控极其重要。



**Figure 11.** Measured displacement results for ASS support components at different construction stages  
**图 11.** 不同施工期 ASS 支撑单元位移实测结果

需要说明的是, ASS 荷载及行程自感知方法在实际工程应用中结合式(1)、(2)和(5)~(7)以及荷载和行程预警值(可根据试验或者大量工程经验数据进行取值), 可根据实时监测数据进行预警和管控。

## 5. 结论

1) 介绍了适用于超高层 ICCP 的 ASS 荷载及行程自感知方法, 解决传统 ASS 支撑单元需人工通过单个控制器操控油缸行程、自动化程度不高且支撑单元荷载大小和位移无法感知而存在施工风险的技术难题, 为 ICCP 向自主智能化和高效施工转变提供基础技术支撑。

2) 针对荷载及行程自感知方法, 介绍了荷载及行程一体化自感知的工具式 ASS 支撑单元硬件、ASS 监测及控制系统架构和 ASS 状态评估与分析关键点, 可实现 ASS 承载力荷载的自感知和伸缩行程及支撑状态的识别和控制。

3) 以基于 ICCP 的高度为 356 m 的超高层施工为案例, 开展了工具式 ASS 的监控试验和应用工艺研究。试验结果表明: ICCP 搁置状态, 同一施工期, 不同位置 ASS 支撑单元的荷载大小存在差异且差异较大, 不同位置 ASS 支撑单元的位移也存在一定差异; 不同施工期, 同一个 ASS 支撑单元的荷载和位移均有所变化; 结果进一步证明 ASS 的荷载及行程自感知极其重要; 随着 ASS 支撑单元及技术的研究和发展的, 其可推广应用于各类爬升模架装备、塔吊水平支撑结构和地下工程支撑等领域。

## 致 谢

本文感谢黄玉林、张龙龙、陈东等在 ICCP 动态支撑系统荷载及行程自感知装置设计、研发和试验过程中的帮助。

## 基金项目

国家重点研发计划课题(2017YFC0805503); 上海建工集团重点科研项目(26JCYJ-04)。

## 参考文献

- [1] 龚剑. 超高结构建造整体钢平台模架装备技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [2] 左自波, 潘曦, 黄玉林, 等. 超高层 ICCP 安全监测与控制的预警指标研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(1): 53-60.
- [3] Zuo, Z.B., Huang, Y.L., Pan, X., *et al.* (2021) Experimental Research on Remote Real-Time Monitoring of Concrete Strength for Highrise Building Machine during Construction. *Measurement*, **178**, Article 109430. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109430>
- [4] 龚剑. 超高工程施工风险数智控制技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
- [5] 住房和城乡建设部. JGJ 459-2019 整体爬升钢平台模架技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [6] Sumali, H., Bystrom, E.P. and Krutz, G.W. (2003) A Displacement Sensor for Nonmetallic Hydraulic Cylinders. *IEEE Sensors Journal*, **3**, 818-826. <https://doi.org/10.1109/jsen.2003.820333>
- [7] 郭猛. 内置磁致伸缩位移传感器的推移油缸设计[J]. 煤矿机械, 2014, 35(4): 30-31.
- [8] Zhang, L., Feng, S., Luo, M. and Ji, A. (2019) A Cascaded Pushing Displacement Estimation Approach for Hydraulic Powered Roof Support Based on Multi-Segmental Kalman Filter. *Current Science*, **117**, 1585-1597. <https://doi.org/10.18520/cs/v117/i10/1585-1597>
- [9] Oskoui, E.A., Taylor, T. and Ansari, F. (2020) Method and Sensor for Monitoring Weight of Trucks in Motion Based on Bridge Girder End Rotations. *Structure and Infrastructure Engineering*, **16**, 481-494. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1668436>
- [10] Jadoon, A.A., Aslam, M., Malik, M.S.A. and Alam, H. (2026) Smart IoT-Enabled Vehicle-Mounted Weighing System for Real-Time Monitoring and Quantification of Loose Construction Materials. *Engineering, Construction and Architectural Management*, **33**, 3403-3423. <https://doi.org/10.1108/ecam-10-2024-1407>
- [11] 潘曦, 赵挺生, 黄玉林, 等. 面向超高层建筑建造的新型集成平台装备安全监控技术研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(24): 107-116+98.
- [12] 黄玉林, 张龙龙, 左自波, 等. 基于实时监测的整体钢平台模架控制技术[J]. 空间结构, 2021, 27(2): 83-89.
- [13] 张龙龙, 黄玉林, 左自波, 等. 超高层巨型整体钢平台模架称重监测单元开发与试验[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 2258-2264.
- [14] 张龙龙. 电液比例同步系统在整体钢平台爬升中的应用[J]. 建筑施工, 2021, 43(5): 863-866.
- [15] 张龙龙, 黄玉林, 左自波, 等. 超高层 ICCP 动态爬升变形控制试验研究[J]. 机床与液压, 2025, 53(1): 65-72.
- [16] 龚剑, 黄玉林, 周红波, 等. 建筑工程施工风险监控技术研究 631189305-2017YFC0805500/01 [R]. 北京: 中华人民共和国科学技术部, 2021.
- [17] 黄玉林, 左自波, 张龙龙, 等. 建筑工程施工爬升模架设备安全状态监测预警及控制技术研究工程示范 631189305-2017YFC0805503/03 [R]. 北京: 中华人民共和国科学技术部, 2021.