

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.079



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



装配式柱形构件垂直度智能调控系统的设计与实现

刘永波^{1,2}, 袁峰^{1,2}, 程国忠³, 田丰^{1,2}, 曾焱³, 李江洪^{1,2}, 王磊^{1,2}, 丁启阳^{1,2}

(1. 中电建铁路建设投资集团有限公司, 北京 100071; 2. 中电建铁路建设投资集团重庆有限公司
重庆 400061; 3. 重庆大学土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:在装配式施工过程中,大型柱形预制构件的垂直度精细调整直接关系到结构安装质量、施工效率与作业安全。针对人工配合吊装和全站仪测校方式存在效率低、对工人经验依赖性强、调整一致性不足等问题,提出一种面向装配式柱形构件安装的集成式垂直度智能调控系统。首先,利用高精度激光测距仪与倾角传感器,构建移动式垂直度测量单元,实现现场构件的姿态测量;其次,通过测量构件在不同仰角下的距离数据解算垂直度偏差,同时引入卡尔曼滤波算法对含有现场扰动和测量噪声的姿态数据进行动态最优估计,以获取平滑准确的构件倾斜状态;最后,基于小角度准静态假设,构建基于自抗扰控制原理的垂直度智能调节控制策略,并辅以拉力阈值保护和通信异常判别机制,实现预制构件姿态的全自动闭环调整;现场实验表明,设计的垂直度调整系统在提高作业效率和一致性的同时,能将构件垂直度偏差调整至小于 10 mm,能够满足装配式地铁站高效、高精度建造的实际工程需求。

关键词:装配式柱形构件;垂直度测量;自抗扰控制;扩展状态观测

中图分类号: TU758.15 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Design and implementation of an intelligent verticality control system for prefabricated column components

LIU Yongbo^{1,2}, YUAN Feng^{1,2}, CHENG Guozhong³, TIAN Feng^{1,2}, ZENG Yan³,
LI Jianghong^{1,2}, WANG Lei^{1,2}, DING Qiyang^{1,2}

(1. POWERCHINA Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing 100071, P. R. China;
2. POWERCHINA Railway Construction Investment Group Chongqing Co., Ltd, Chongqing 400061, P. R. China;
3. School of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

收稿日期: 2026-05-26

基金项目: 西藏自治区重点研发及转化重点专项(XZ202501ZY0121-5); 重庆市建设科技计划项目(城科字 2024 第 5-6 号, 城科字 2025 第 15 号); 新重庆引才计划优秀青年专项(CSTB2024YCJKYXM0079); 重庆市留学回国人员创新创业支持计划(cx2024010)

作者简介: 刘永波(1984-), 男, 主要从事装配式智能化施工, E-mail: 2081826613@qq.com。

曾焱(通信作者), 男, 博士, 助理研究员, E-mail: yanzg@stu.cqu.edu.cn。

Received: 2026-05-26

Foundation items: Xizang Autonomous Region Key Research, Development and Transformation Special Project (No. XZ202501ZY0121-5); the Chongqing Construction Science and Technology Plan Project (Nos. CKZ 2024 No. 5-6, CKZ 2025 No. 15); the New Chongqing Talent Introduction Program - Excellent Youth Special Project (No. CSTB2024YCJKYXM0079); the Chongqing Innovation and Entrepreneurship Support Program for Returned Overseas Scholars (No. cx2024010).

Author brief: LIU Yongbo (1984-), main research interest: intelligent prefabricated construction, E-mail: 2081826613@qq.com。

ZENGYan (corresponding author), PhD, assistant professor, E-mail: yanzg@stu.cqu.edu.cn。

Abstract: During prefabricated construction, the precise verticality adjustment of large prefabricated column components is critical to installation quality, construction efficiency, and operational safety. To address the limitations of conventional adjustment methods, which rely on manual crane operations and total station measurements and suffer from low efficiency, strong dependence on operator experience, and poor adjustment consistency, this paper proposes an integrated intelligent verticality control system for the installation of prefabricated column components. First, a mobile verticality measurement unit is developed using a high-precision laser rangefinder and an inclinometer to acquire the component's spatial attitude on site. Subsequently, the verticality deviation is calculated from distance measurements obtained at different elevation angles. A Kalman filtering algorithm is introduced to dynamically estimate the component attitude in the presence of environmental disturbances and measurement noise, thereby providing smooth and accurate inclination information. Finally, under the small-angle quasi-static assumption, an intelligent verticality adjustment strategy based on Active Disturbance Rejection Control (ADRC) is developed. A tension-threshold protection mechanism and a communication anomaly detection scheme are further incorporated to achieve fully automated closed-loop adjustment of the component posture. Field experiments demonstrate that the proposed system not only improves operational efficiency and adjustment consistency but also reduces the verticality deviation of prefabricated components to less than 10 mm, satisfying the practical requirements for efficient and high-precision construction of prefabricated metro stations.

Keywords: prefabricated cylindrical component; verticality measurement; active disturbance rejection controller; extended state observer

在装配式施工中,竖向预制构件的垂直度调整是保证结构安装质量、整体受力性能与施工安全的关键工序^[1]。垂直度精度直接影响主体结构的荷载传递路径、构件连接节点受力性能及整体稳定性,偏差会引入非设计预期的附加应力,进而削弱结构的抗震性能与服役可靠性^[2-3]。同时,柱形构件安装偏差在装配过程中具有明显的累积效应,不仅影响相邻构件拼装精度,还会制约后续机电安装、装修施工及整体建造效率,成为装配式建筑高质量建造的重要技术瓶颈^[4]。现有调整方法普遍依赖人工操作,通过手动调节斜向支撑杆或吊装的方式进行粗放式微调,其过程需工人依托经验使用靠尺、线坠或全站仪进行反复测校^[5]。这种人工调整方式存在效率低、经验依赖强和安全风险高等突出问题,不仅延长了单件构件的安装时间,增加了吊装设备的占用成本,还易导致安装质量一致性不足,进而制约竖向预制构件安装精度的稳定控制,成为施工效率提升的重要瓶颈^[6]。

现有研究主要围绕装配式建筑中的预制构件垂直度测量与装配式建筑施工精度控制展开。在预制构件垂直度测量方面,刘科等^[7]在对比中、美、欧相关标准的基础上,分析了吊线、经纬仪和激光仪等传统测量方法的不足,提出了基于倾角仪的预制混凝土构件垂直度与倾斜度自动化检测方法,并通过工程试用验证了其可行性。Yang等^[8]针对传统手动测量方法劳动密集、速度慢的局限,提出了一

种简化的激光扫描垂直度检查方法,用于预制墙板安装现场的垂直度检测,通过系统实验验证了点云数据在不同激光扫描仪和墙板形状下的适用性,并确定了适合实际应用的点云分割参数。Wang等^[9]提出了一种简化的激光扫描方法用于预制墙板安装现场的垂直度检测,通过实验利用不同类型激光扫描仪收集的点云数据验证了方法的有效性,并预先识别了激光扫描点云的最佳分割参数,为建筑专业人员直接采用或参考使用提供了依据,有效提升了预制结构安装质量检查的效率。Deng等^[10]提出了一种基于计算机视觉的预制混凝土构件对准偏差自动测量方法,针对预制柱与灌浆套筒连接场景开发了关键装配点自动提取模块,并通过灵敏度分析探究了影响测量精度的关键因素,为垂直度测量误差分析与优化提供了新思路。Li等^[11]提出了基于三维激光扫描的预制混凝土构件尺寸质量自动化检测系统,通过点云自动处理实现构件几何尺寸的高精度测量。杨勇等^[12]针对风电塔筒结构,提出了基于点云数据与空间圆拟合的垂直度检测方法,提高了整体偏移与局部变形的识别能力。在装配式建筑施工精度控制方面,Liu等^[13]提出了一种基于视觉引导机器人的预制构件自动装配方法,由起重机初步对位后,两台机器人协同调整构件的位置与姿态,从建筑信息模型中提取目标安装位姿作为机器人运动导引,利用光学标识实现机器人在现场坐标系中的定位及预留孔的位姿识别,并通过末端执行

器按规划路径推动构件精确就位,有效降低了构件安装误差。Ye等^[14]针对预制构件吊装过程中套筒-钢筋连接的对准问题,建立了钢筋垂直度智能检测算法和吊装操纵面自动生成算法,实现了对准信息的实时准确提取,为预制构件的自动化安装提供了关键技术支持。Hanafi等^[15]总结了现场预制混凝土构件的多种安装系统,并分析了构件可用性和起重机机动性对安装精度的影响。Huang等^[16]提出了基于BIM与地面三维激光扫描的装配式建筑施工精度预测框架,引入制造业公差分析方法,在设计阶段和施工早期阶段预测装配精度,为预制构件吊装精度控制体系的建立提供了理论基础。Liu等^[17]提出了面向模块化建筑预制构件安装的机器人辅助就位系统,利用吊车承受构件自重、机器人精准控制构件水平位置,通过运动仿真与试验验证了该方法的可行性和先进性。Liu等^[18]进一步提出了基于双目视觉引导的预制构件机器人装配方法,通过实时定位机器人末端工具的姿态并持续调整其与目标位置的偏差,提升了机器人在大型预制构件安装过程中的灵活性与实用性。

当前,装配式柱形构件安装的研究主要集中在垂直度测量与吊装阶段,对大型柱形构件安装过程中的精调环节关注相对不足。尽管已有学者提出了基于台车的大型柱形构件精调智能调整装置,但基于台车的装置存在成本高昂、系统结构复杂、对施工环境适应性较差等问题,限制了其在实际工程中的推广应用。因此,当前的工程实践仍主要依赖人工配合吊装及全站仪测校完成柱形构件的精调工作。然而,人工垂直度调整存在效率低、对工人经验依赖程度高、调整结果一致性不足等问题,难以满足装配式建筑高效、高精度施工的需求。因此,亟须面向大型柱形预制构件安装末端精调场景,开展兼顾测量便捷性、调整精度与作业效率的集成式垂直度智能调控系统研究。笔者对装配式柱形构件垂直度自动精调问题进行研究,以自主研发的移动式垂直度测量单元为实验平台,提出一种适用于大型柱形构件垂直度调控的测量及其自动控制方法,通过系统轻量化设计与模块化集成,降低了设备成本与部署复杂度,提升现场适用性与推广潜力。

1 垂直度智能调整系统

集成式垂直度调控系统由多种功能组件协同构成,其整体结构如图1所示。该系统主要包括4台电动调节拉杆以及2套移动式垂直度测量单元。4台电动调节拉杆分别布置并固定于预制构件的不

同方位,用于提供姿态调整所需的执行力;2套移动式垂直度测量单元作为核心感知模块,通过远程操控方式启动,对构件的空间姿态提供高精度实时垂直度数据。

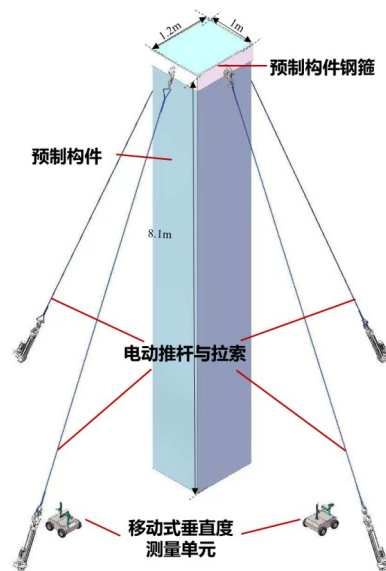


图1 硬件组成

Fig. 1 Hardware architecture

如图2所示,测量单元接受移动计算单元的指令,并将采集到的姿态信息作为闭环控制的输入,反馈至移动计算单元。移动计算单元得到反馈后,计算出不同电缸的控制指令,并接受电缸反馈的状态和拉力信息。为提高部署的便利性,系统选用无线传输串口和工业路由器进行通讯。各组件相互配合,共同实现对预制构件姿态的高精度检测与调控。



图2 系统数据流程

Fig. 2 System data workflow

在安装好电缸之后,系统的工作流程(图3)如下:首先,操作人员手动控制移动测量单元至构件的测量位置,然后等待移动测量单元完成自平衡调整;其次,基于测量单元反馈的垂直度信息和电动

推杆当前的拉力信息,移动计算单元根据控制算法协调4台电动推杆(计算得到每个电动推杆的控制量),从而对各电缸的伸缩量实现控制;最后,构件的姿态进行同步调整,逐步修正其倾斜状态并进行异常状态检测,直至构件的垂直度满足施工精度要求。

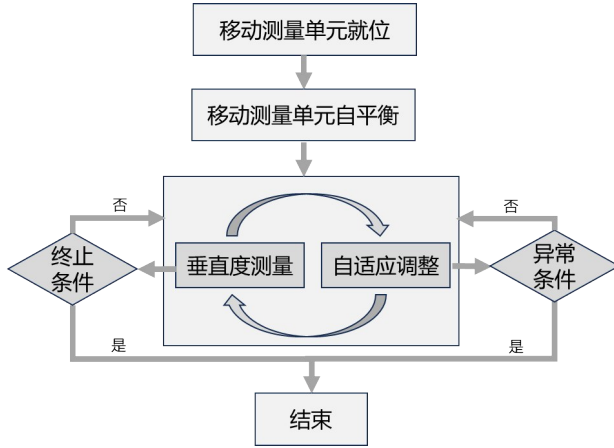


图3 调整流程

Fig. 3 Adjustment workflow

2 移动平台设计

如图4所示,移动平台主体为一个负重为15 kg的线控底盘,包括底盘运动控制器、工业电脑、大扭力编码器电机、电机驱动、锂电池和充气轮胎。底盘采用四轮差速模型,为实现对底盘的控制,需要建立四轮差速的运动学模型(图5),以便实现对轮速的解算和底盘的运动控制^[19]。图中COG表示底盘的几何中心,并以COG为原点,平行与长度方向为 x 轴,垂直于长度方向为 y 轴建立坐标系。以 y 轴方向的点ICR作为底盘进行圆周运动时的圆心,底盘宽度为 c ,底盘长度为 $a+b$ 。四轮差速模型假设前后轮轮速一致,通常采用质心COM处的线速度 v_c 和角速度 ω_c 代表整个底盘的运动速度,其线速度和角速度满足式(1)所示的约束关系。

$$\omega_c = \frac{v_c}{d_c} \quad (1)$$

通过将左右两侧车轮分别等效为左右驱动轮,通过左右轮速度差控制车辆转向,可建立各车轮转速与车体线速度、角速度之间的运动学关系:

$$v_{cx} = \frac{1}{2}(v_r + v_l), \omega_c = \frac{1}{c}(v_r - v_l) \quad (2)$$

式中: v_l 、 v_r 分别为左、右轮的线速度。在使用过程中,给定移动平台的速度后,可根据式(2)得到目标速度和角速度,最后由每个轮子上的PID算法可进一步实现轮速控制。

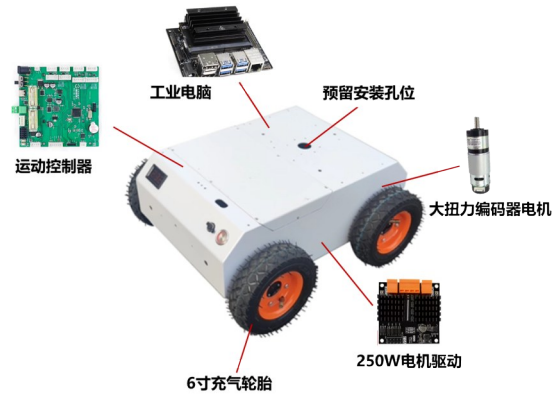


图4 移动平台构成

Fig. 4 Composition of the mobile platform

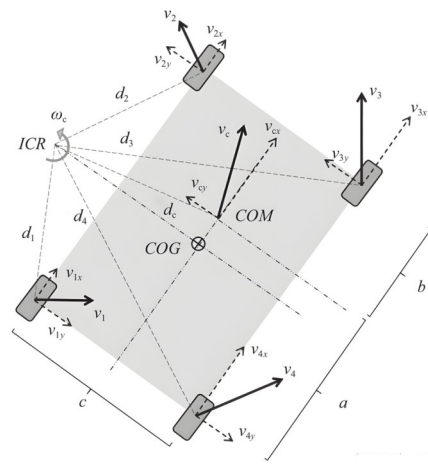


图5 移动平台运动学模型

Fig. 5 Kinematic model of the mobile platform

3 移动式垂直度测量单元

移动式垂直度测量单元由移动平台搭载一套自主设计的低成本测量系统,整体外形尺寸为400 mm×420 mm×460 mm(具体结构参见图6)。

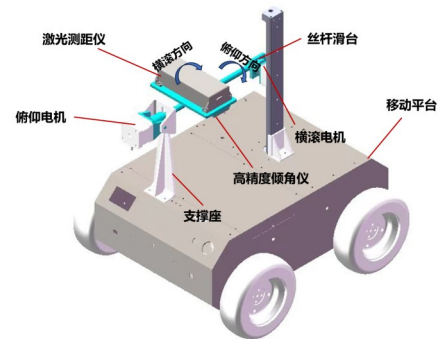


图6 垂直度测量单元构成

Fig. 6 Composition of the verticality measurement unit

支架一端设置有一套丝杆滑台机构,滑台与铝管之间通过3D打印的专用套筒及带轴承的螺栓实现铰接(图7)。为保证调平过程的精确性,选用五相步进电机(步距角为 0.72° ,细分数为2)和减速电

机(减速比为2)为丝杆滑台提供驱动力。为保证检测精度,实验中选用HWT9073高精度倾角仪,其横滚角与俯仰角精度为 0.001° ;激光测距仪选用LDS100B,其分辨率为1 mm,误差为 $\pm 2 \text{ mm} + l \times 10^{-6}$ (l 为被测距离)。工作流程如下:利用支撑座的高度信息,将丝杆滑台运动至近似于俯仰电机高度处,然后检查倾角仪的横滚角是否满足精度要求:如果不满足调平精度要求,采用PID算法进行调平,反之,则进入下一步。

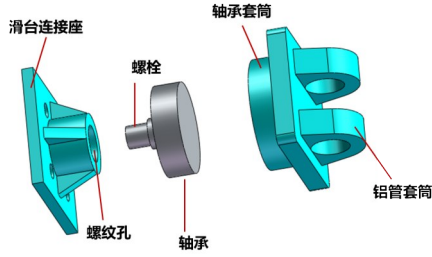


图7 铝杆滑台连接结构

Fig. 7 Connection structure between the aluminum rod and the linear slide

PID调平算法主要用于保证激光测距仪的横滚角满足精度要求。首先以丝杆滑台的支点为中心,建立调平机构的数学模型。假设丝杆的导程为 P ,减速比为 N ,步进电机的步距角为 δ_s ,细分数为 m 。因此,控制器每产生一个脉冲,丝杆产生的垂直位移 Δh 为

$$\Delta h = \frac{P \cdot \delta_s}{360 \cdot m \cdot N} \quad (3)$$

令调平机构的有效力臂长度为 L ,则此时产生的角度变化 $\Delta\alpha$ 与位移 Δh 的关系(小角度近似):

$$\Delta\alpha \approx \arctan\left(\frac{\Delta h}{L}\right) \approx \frac{\Delta h}{L} \quad (4)$$

即激光测距仪角度变化率 $\Delta\alpha$ 与步进电机输入频率为线性关系。

考虑到控制器的输出量为步进电机的脉冲频率 $v(t)$,其物理意义对应丝杆的进给速度。而被控变量为平台的倾斜角度 $\alpha(t)$,因此,从电机输入到平台角度满足关系

$$\alpha(t) = \int \Delta\alpha dt = \int \frac{\Delta h}{L} v(t) dt \quad (5)$$

取拉普拉斯变换后,可知从电机输入到平台角度的传递函数 $G_p(s)$ 表现为一个纯积分环节

$$G_p(s) = \frac{\alpha(s)}{V(s)} = \frac{\Delta\alpha}{s} \quad (6)$$

而在实际系统中,MEMS倾角传感器内部包含低通滤波算法以抑制高频噪声,其动态特性通常近似为一个一阶惯性环节

$$H(s) = \frac{1}{T_s s + 1} \quad (7)$$

式中: T_s 为传感器的时间常数,取决于传感器的响应时间,可由厂家的数据手册得到。

因此,调平子系统的开环传递函数可综合执行器和传感器的特性得到

$$G(s) = G_p(s)H(s) = \frac{\Delta\alpha}{s(T_s s + 1)} \quad (8)$$

考虑到上述开环函数的固有积分特性,采用传统PID控制容易导致积分饱和,无法满足调平系统的需求。这里采用积分分离的思想,引入积分项分段函数,从而在大误差阶段避免使用积分,在小误差阶段引入积分进行调整,保证调平系统的稳定性。

定义倾角误差为

$$e_h(t) = \alpha_{\text{ref}} - \alpha(t) \quad (9)$$

则积分分离的PID控制率定义为

$$v(t) = K_p e_h(t) + K_i \sigma(t) \int_0^t e_h(\tau) d\tau + K_d \dot{e}_h(t) \quad (10)$$

$\sigma(t)$ 满足

$$\sigma(t) = \begin{cases} 1, & |e_h(t)| \leq e_1 \\ 0, & |e_h(t)| > e_1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: e_1 为误差阈值。当 $|e(t)| > e_1$ 时,调平误差较大,积分项的滞后效应容易导致超调,因此关闭积分项。反之,当 $|e(t)| \leq e_1$ 时,此时,已接近平衡,因此采用积分项消除静态误差。

另一端通过一套3D打印的支撑座固定,该支撑座同时用于安装驱动铝管转动的步进电机(图8)。得益于高精度倾角传感器,俯仰电机无需特殊选型,仅使用保持力矩满足激光跟踪仪俯仰需求的步进电机即可。

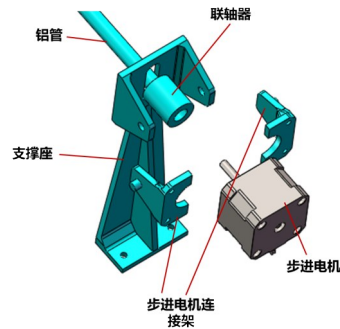


图8 支撑座端

Fig. 8 End of the support base

4 垂直度测量

由于混凝土构件底部可近似为固定支点,上部则仅由4根拉索通过4台电缸在各自方向上施加拉

力。以高度为 H 的构件底面中心为原点建立右手坐标系(如图9),构件底部中线的坐标分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1 &= (r_x, 0, 0), \mathbf{r}_2 = (0, r_y, 0) \\ \mathbf{r}_3 &= (-r_x, 0, 0), \mathbf{r}_4 = (0, -r_y, 0) \end{aligned} \quad (12)$$

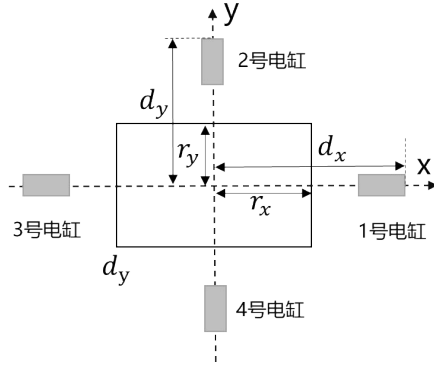


图9 垂直度调整坐标系

Fig. 9 Coordinate system for verticality adjustment

由于仅对构件进行 x 方向、 y 方向进行调整,因此假定构件姿态为

$$\theta = (\theta_x, \theta_y) \quad (13)$$

式中: θ_x 、 θ_y 分别为构件绕 x 轴、 y 轴旋转的角度。此时垂直度调整的控制目标为

$$\theta = 0 \quad (14)$$

如图10所示,假定预制构件在 XOY 平面上有小角度变化时,令 d_{2y} 、 d_{1y} 、 β_{2y} 、 β_{1y} 为 X 轴方向的测量量,通过步进电机控制激光测距仪分别为 β_{2x} 、 β_{1x} 时的距离数据 d_{2x} 、 d_{1x} ,并经系统对比分析,即可计算出预制构件的实时垂直度偏差。

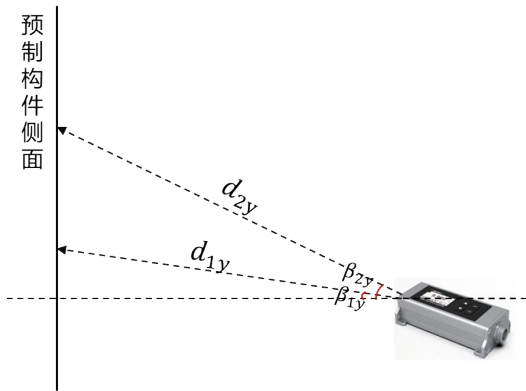


图10 XOY平面垂直度测量原理

Fig. 10 Principle of XOY verticality measurement

为方便推导,考虑预制构件绕 Y 轴的倾角 θ_y 。构件中心线满足方程

$$z = \frac{1}{\tan \theta_y} (x - r_x) \quad (15)$$

当移动垂直度测量单元于 $(x_0, 0)$ 为以不同仰角击中中心线时,命中点坐标为

$$x_1 = (x_0 - d_{1y} \cos \beta_{1y}, d_{1y} \sin \beta_{1y}),$$

$$x_2 = (x_0 - d_{2y} \cos \beta_{2y}, d_{2y} \sin \beta_{2y}) \quad (16)$$

x_1, x_2 均在同一直线上,代入中心线方程,有

$$\begin{aligned} \theta_y &= \arctan \frac{x_1 - x_2}{z_1 - z_2} = \\ \arctan \frac{d_{1y} \cos \beta_{1y} - d_{2y} \cos \beta_{2y}}{d_{1y} \sin \beta_{1y} - d_{2y} \sin \beta_{2y}} &\approx \\ \frac{d_{1y} \cos \beta_{1y} - d_{2y} \cos \beta_{2y}}{d_{1y} \sin \beta_{1y} - d_{2y} \sin \beta_{2y}} &\quad (17) \end{aligned}$$

值得注意的是,移动垂直度测量单元不强制位于中心线处测量,只需保证同一次测量时在同一竖向直线上即可。类似于此,令 d_{2x} 、 d_{1x} 、 β_{2x} 和 β_{1x} 为 y 轴方向的测量量,则预制构件绕 x 轴的倾角 θ_x 满足

$$\theta_x \approx \frac{d_{1y} \cos \beta_{1x} - d_{2x} \cos \beta_{2x}}{d_{1x} \sin \beta_{1x} - d_{2x} \sin \beta_{2x}} \quad (18)$$

以 θ_y 为例,进一步对测量的误差传播规律进行分析。假定在两次独立测量中,移动垂直测量单元的距离、角度均存在误差,则误差的方差 $\delta_{\theta_y}^2$ 为

$$\begin{aligned} \delta_{\theta_y}^2 &= \left(\frac{\partial \theta_y}{\partial d_{1y}} \right)^2 \delta_{d_{1y}}^2 + \left(\frac{\partial \theta_y}{\partial d_{2y}} \right)^2 \delta_{d_{2y}}^2 + \\ &\quad \left(\frac{\partial \theta_y}{\partial \beta_{1y}} \right)^2 \delta_{\beta_{1y}}^2 + \left(\frac{\partial \theta_y}{\partial \beta_{2y}} \right)^2 \delta_{\beta_{2y}}^2 \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $\delta_{d_{1y}}$ 、 $\delta_{d_{2y}}$ 、 $\delta_{\beta_{1y}}$ 和 $\delta_{\beta_{2y}}$ 分别为 d_{2y} 、 d_{1y} 、 β_{2y} 、 β_{1y} 的误差量, $\frac{\partial \theta_y}{\partial d_{1y}}$ 、 $\frac{\partial \theta_y}{\partial d_{2y}}$ 、 $\frac{\partial \theta_y}{\partial \beta_{1y}}$ 和 $\frac{\partial \theta_y}{\partial \beta_{2y}}$ 分别为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_y}{\partial d_{1y}} &= \frac{-d_{2y} \sin(\beta_{2y} - \beta_{1y})}{d_{1y}^2 + d_{2y}^2 - 2d_{1y}d_{2y} \cos(\beta_{2y} - \beta_{1y})} \\ \frac{\partial \theta_y}{\partial d_{2y}} &= \frac{d_{1y} \sin(\beta_{2y} - \beta_{1y})}{d_{1y}^2 + d_{2y}^2 - 2d_{1y}d_{2y} \cos(\beta_{2y} - \beta_{1y})} \\ \frac{\partial \theta_y}{\partial \beta_{1y}} &= \frac{-d_{1y}(d_{1y} - d_{2y} \cos(\beta_{2y} - \beta_{1y}))}{d_{1y}^2 + d_{2y}^2 - 2d_{1y}d_{2y} \cos(\beta_{2y} - \beta_{1y})} \\ \frac{\partial \theta_y}{\partial \beta_{2y}} &= \frac{d_{2y}(d_{1y} \cos(\beta_{2y} - \beta_{1y}) - d_{2y})}{d_{1y}^2 + d_{2y}^2 - 2d_{1y}d_{2y} \cos(\beta_{2y} - \beta_{1y})} \end{aligned} \quad (20)$$

由式(20)可见,测量精度由角度误差主导,受距离误差的影响较小。得益于高精度步进电机与传感器,角度误差得到充分优化,从而保证了系统的精度。

引入卡尔曼滤波对构件姿态进行准确估计,相应的卡尔曼滤波预测方程为

$$\begin{cases} \hat{\theta}_{t+1,t} = F \hat{\theta}_{t,t} \\ P_{t+1,t} = F P_{t,t} F^T + Q \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\theta_{t,t}$ 为 t 时刻的姿态估计量; $\theta_{t+1,t}$ 为 t 时刻对 $t+1$ 时刻的姿态估计量;由于未引入显式的控制输入项,且系统处于低速准静态调整中,两次采样间的构件位姿变化极小。因此,状态转移矩阵 $F = I$

可简化为单位矩阵; $P_{t,t} = E\left((\theta - \hat{\theta})(\theta - \hat{\theta})^T\right)$ 为 t 时刻姿态估计量的协方差矩阵; $P_{t+1,t}$ 为 $t+1$ 时刻状态估计量的协方差矩阵; $Q = E(w_t w_t^T)$ 为过程噪声协方差, w_t 为符合标准正态分布的随机变量, 表示过程噪声向量。

在更新阶段, 对应的方程为

$$\begin{cases} \hat{\theta}_{t,t} = \hat{\theta}_{t,t-1} + K_t(r_t - \hat{\theta}_{t,t-1}) \\ P_{t,t} = (I - K_t)P_{t,t-1}(I - K_t)^T + K_t R_t K_t^T \\ K_t = P_{t,t-1}(P_{t,t-1} + R_t)^{-1} \end{cases} \quad (22)$$

式中: K_t 为 t 时刻的卡尔曼增益; r_t 为 t 时刻的测量量; $R_t = E(v_t v_t^T)$ 为测量协方差矩阵; v_t 为符合标准正态分布的随机变量, 表示测量噪声。

值得注意的是, 由于在强光下, 激光的接收信号强度和测点识别稳定性受到影响, 此时需要配合目标反光板使用。

5 垂直度调整

为满足大型预制构件垂直度调整过程中的驱动力需求, 选定额定工况下拉力为 5 t 的电缸 (图 11) 作为垂直度调控系统中的关键执行单元。

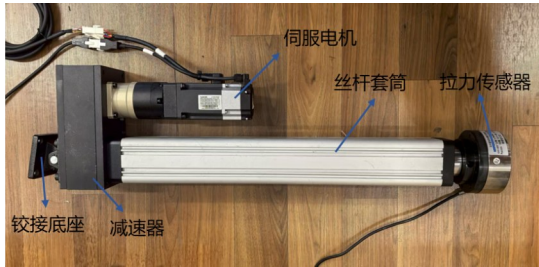


图 11 直线电缸

Fig. 11 Electric linear actuator

单台电缸的整体外形尺寸约为 100 mm × 200 mm × 700 mm, 其具体机械结构如图 11 所示。电缸顶部通过高强度拉索与预制构件连接。借助于伺服电机, 电缸的位移控制精度可达到 ±0.1 mm。在系统完成安装与参数标定后, 可基于垂直度测量单元反馈的实时数据实现构件垂直度的闭环调控。

为实现垂直度的调整, 采用自抗扰方法^[20]对倾角进行控制。在 XOZ 平面内, 构件绕底部铰支点 O 的转动方程为

$$J\ddot{\theta}_x = M \quad (23)$$

式中: J 为构件绕 O 点的转动惯量, M 为所有力矩之和。

$$M = M_{c1} + M_{c2} + M_g + M_i \quad (24)$$

式中: M_{c1} 和 M_{c2} 分别为电缸在 XOZ 平面内产生的控制力矩; M_g 为构件偏转后产生的倾覆力矩; M_i 为

由接触、铰支、连接件等带来的阻尼力矩。

假设电缸在 XOZ 平面内通过拉索对构件施加拉力分别为 F_1 和 F_2 , 拉索相对底部铰点 O 的等效力臂分别为 r_1 和 r_2 , 则控制力矩 M_{c1} 和 M_{c2} 为

$$M_{c1} + M_{c2} = r_1 F_1 - r_2 F_2 \quad (25)$$

由于仅对构件进行精细调整, 在拉索和连接结构的静态预紧力平衡点使用线性近似, 则控制力矩增量 ΔM 与拉索变化量 Δl 成正比。

$$\Delta M \approx K_c \Delta l = K_c u \quad (26)$$

式中: K_c 为比例系数。因此, 式 (24) 可写为在静态预紧力平衡点处以电缸位移差 u 为输入的控制方程

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_y &\approx \frac{K_c}{J} u + \frac{M_g + M_i}{J} = b_0 u + (b - b_0) u + \\ &\frac{M_g + M_i}{J} = b_0 u + f(\dot{\theta}_y, \theta_y, t) \end{aligned} \quad (27)$$

式中: b 为真实控制增益, b_0 为 b 的估计值, $f(\cdot)$ 为包含增益估计误差在内的总扰动。

进一步定义状态变量

$$s_1 = \theta_y, s_2 = \dot{\theta}_y, s_3 = f(\dot{\theta}_y, \theta_y, t) \quad (28)$$

并假设 $f(\dot{\theta}_y, \theta_y, t)$ 关于 t 的导数 $h(t)$ 可微且其导数有界, 则扩张状态空间方程为

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} s + \begin{pmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{pmatrix} u + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} h(t) \\ &= As + Bu + Eh(t) \end{aligned} \quad (29)$$

平衡点出对应的系统输出方程为

$$o = s_1 = \theta_y \quad (30)$$

设计 Luenberger 观测器对状态量进行估计, 并展开为标量形式

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1(o - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_2(o - z_1) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = \beta_3(o - z_1) \end{cases} \quad (31)$$

式中: $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为观测器增益向量, z_1, z_2, z_3 分别为 $\theta_y, \dot{\theta}_y, f(\dot{\theta}_y, \theta_y, t)$ 的估计量。为简化调参, 记 $L = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)$, 将观测器特征多项式配置为三重实极点 $\eta = -\omega_0$ 。

$$\det(\eta I - (A - LC)) = (\eta + \omega_0)^3 \quad (32)$$

因此, 可得到: $\beta_1 = 3\omega_0, \beta_2 = 3\omega_0^2, \beta_3 = \omega_0^3$ 。

进一步可设计比例积分形式的虚拟控制量

$$u_0 = k_p(\theta_{\text{ref}} - z_1) + k_d(\dot{\theta}_{\text{ref}} - z_2) \quad (33)$$

式中: $\theta_{\text{ref}} = \dot{\theta}_{\text{ref}} = 0$ 为垂直度的调整目标。控制输入 u 可通过减去 ESO 估计的总扰动来实现补偿

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b_0} \quad (34)$$

当 ESO 收敛时, z_3 趋近于系统扰动。此时, 被控对象的方程为

$$\ddot{\theta} \approx u_0 = -k_p \theta_y - k_d \dot{\theta}_y \quad (35)$$

即闭环系统被化简为标准二阶线性系统。为平稳构件倾角,将闭环特征方程配置为双重实极点 $\eta = -\omega_c$ (此时为临界阻尼响应), 因此有

$$k_p = \omega_c^2, k_d = 2\omega_c \quad (36)$$

在执行机构安全方面,考虑到构件安装过程中连接误差、局部卡滞及姿态回弹等因素可能导致个别电缸受力突增,因此引入了拉力阈值保护机制。为保证安全性,将构件可承受的安全水平力设置为构件倾覆时水平作用力的 0.7 倍,而水平力 F_c 与电缸拉力 T_c 满足

$$\cos \theta_c = \frac{F_c}{T_c} \quad (37)$$

式中: θ_c 为拉索与地面的角度。在实际应用时,常将 θ_c 设置为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 。进一步考虑装置的适用范围,取 0.5 倍拉缸拉力 (25 kN) 对构件高度、重量条件进行折算,当 θ_c 为 30° 时,此时水平拉力约为 21.6 kN。结合构件的倾覆条件,可得到构件高度、重量需满足如下条件,即可保证安全性

$$\frac{GB}{2H} < F_{\max} = 21.6 \text{ kN} \quad (38)$$

式中: G 为构件重量, B 为垂直于倾覆方向的底边, H 为构件高度。

当任一电缸拉力达到预设安全阈值时,系统立即停止当前调节动作并触发报警,此时系统自动停机,由工人切换手动模式对每个电缸进行控制。在

无线通信与闭环控制方面,通讯异常判定周期主要依据通信刷新周期设置,为避免瞬时丢包导致误判,通常将超时时间设置为正常通信周期的 3~5 倍。当装置判断为异常状态后,由工人重启通讯或者通过电缸自带的有线控制模块对每个电缸继续进行控制。

6 实验与讨论

为验证柱形构件垂直度智能调整系统的可行性与有效性,选取重庆市金凤北装配式地铁站 (图 12) 作为验证环境。地铁站底部采用现浇工艺,实验区域为 E2 装配段,包含 17 根预制立柱。按照排列顺序采用等距抽样法对施工现场的 E2 装配段进行覆盖 (图 13), 使用编号为 E2-03、E2-04、E2-08、E2-09、E2-12、E2-13、E2-16 与 E2-17 的立柱作为实验对象。

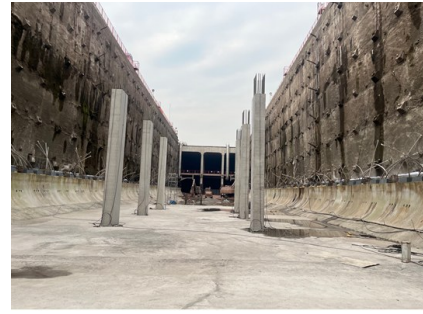


图 12 金凤北站现场

Fig. 12 Jinfeng North Station site

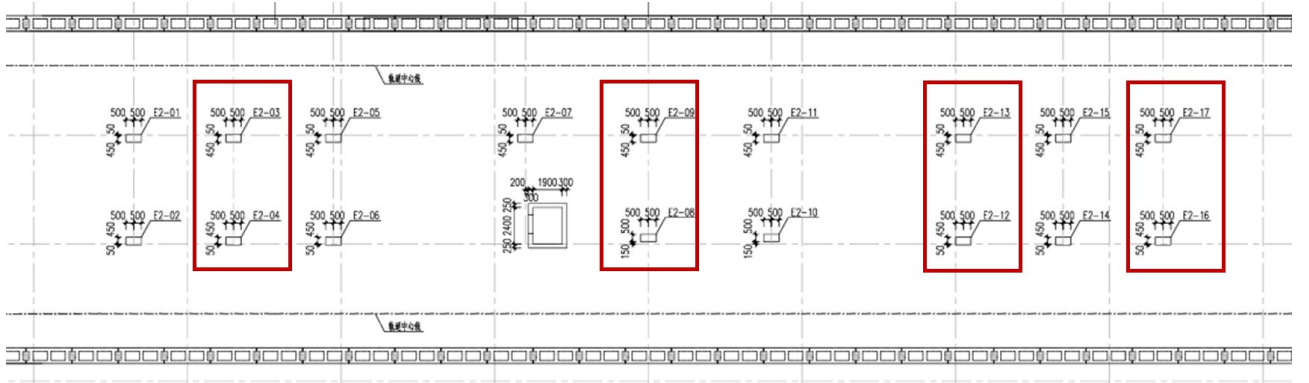


图 13 实验立柱分布

Fig. 13 Distribution of Experimental Columns

如图 14, 在实验开始前, 首先通过手动遥控方式依次将测量平台移动至构件相邻的两个侧面, 并确保平台能完整测量构件姿态。随后, 启动所开发的自垂直控制系统上位机软件 (如图 15), 根据当前现场工况和电机分布, 在上位机界面中分别指定参与调整的电机编号。完成参数与执行对象的配置后, 操作者仅需触发自动模式按钮, 系统即可按照预设控制逻辑自动进入检测与调整流程, 实现对立

柱姿态的在线检测与控制。

为保证移动垂直度测量单元的准确性, 有必要对测量单元中所配置倾角仪的水平度调整性能进行系统评估。如图 16 所示, 在验证实验中, 通过人为设置底盘在多种倾斜程度下的初始姿态, 由算法对水平度进行自动调整。表 1 分别记录多种倾斜角下高精度倾角仪的横滚角度, 验证了所提出积分分离 PID 控制方法在不同倾斜条件下的稳定性。

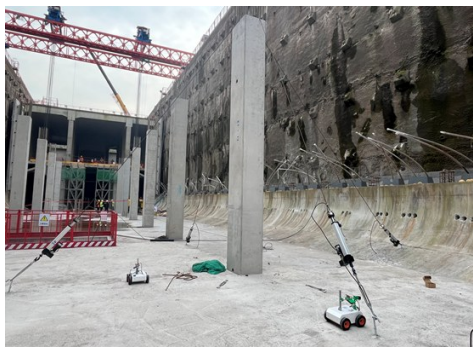


图 14 构件垂直度智能调整

Fig. 14 Intelligent adjustment of component verticality



图 15 构件垂直度智能调整界面

Fig. 15 Intelligent component verticality adjustment interface



图 16 水平度调整鲁棒性测试

Fig. 16 Robustness evaluation of levelness adjustment

表 1 不同倾斜角度下的倾角仪横滚角

Table 1 Inclinator roll angle under different inclination angles

平台倾斜角/(°)	横滚角/(°)
0	0.004
5	0.003
10	0.004
15	0.002

构件垂直度的调整效果高度依赖于垂直度检测结果的准确性与可靠性。为验证垂直度检测方法的测量精度与一致性,在垂直度检测验证实验中,分别采用全站仪(棱镜测量,精度 $\pm 1\text{mm} + V \times 10^{-6}$, V 为垂直度)与所研制的移动垂直度测量单元

(包括未使用卡尔曼滤波与使用卡尔曼滤波的情况)对多个构件进行重复测量。在实验前,为对协方差矩阵 R 进行估计,在构件吊装就位但尚未开始精调前,利用移动测量单元对构件连续进行 50 次测量,记录数据并计算方差,以此作为矩阵的对角线元素,以反映系统中传感器噪声、混凝土表面反射率等误差。同时,引入 Sage-Husa 自适应算法^[21]对过程噪声协方差矩阵 Q 进行估计,通过分析每次更新时的测量值与预测值的差值,对 Q 实时在线估计并动态调整。图 17 和图 18 分别记录了对 8 个构件进行 20 次重复测量的平均角度和标准差。从图中可以看出,相较于全站仪,使用卡尔曼滤波的垂直度检测装置,能达到同量级的测量精度。与未使用卡尔曼滤波的情况相比,使用滤波的垂直度测量鲁棒性更高,误差更小。卡尔曼滤波算法在保持动态响应速度的同时,算法降低了测量不确定度,为后续的精密控制提供了可靠的数据支撑。

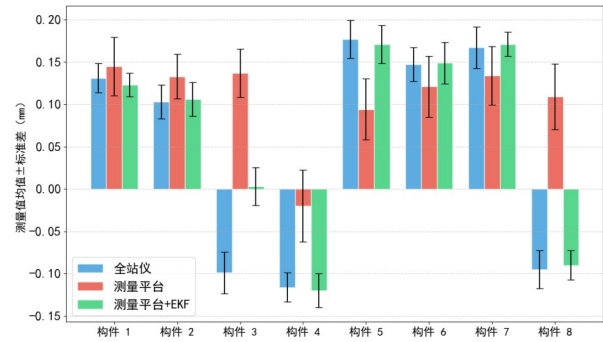


图 17 不同测量方法下 θ_x 的测量结果

Fig. 17 Measurement results of θ_x under different measurement methods

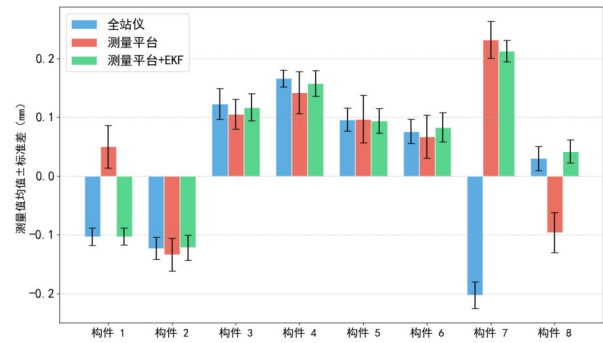


图 18 不同测量方法下 θ_y 的测量结果

Fig. 18 Measurement results of θ_y under different measurement methods

为系统评估所提出垂直度自动调整方法的性能,分别从垂直度调整精度与调整效率两个方面开展验证实验。实验中,先采用全站仪测量竖向构件的初始倾斜角,然后使用传统吊装调整至满足倾斜角小于 0.07° 。采用垂直度调整装置进行试验,利用

全站仪观测角度,手动控制电缸使构件达到初始倾斜角,然后使用PID和采用所提方法进行调整,停止标准设置为倾斜角小于 0.07° 。在自动调整过程中,基于移动垂直度测量单元提供的实时姿态信息,以1s为周期的控制节拍分别采用PID算法和所设计的自适应调整算法对构件进行闭环自动调整。在实验前,使用预紧力保证竖直构件处于静止状态后,进行垂直度调整。当检测到构件倾斜角小于 0.07° 时(此时构件垂直度小于10 mm)^[22],认为构件已经满足装配式构件的安装要求。图19为构件编号1的姿态调整曲线。从图中可以看出,相比PID算法,所设计的自适应调整算法具有更快的响应与更强的抗扰性。

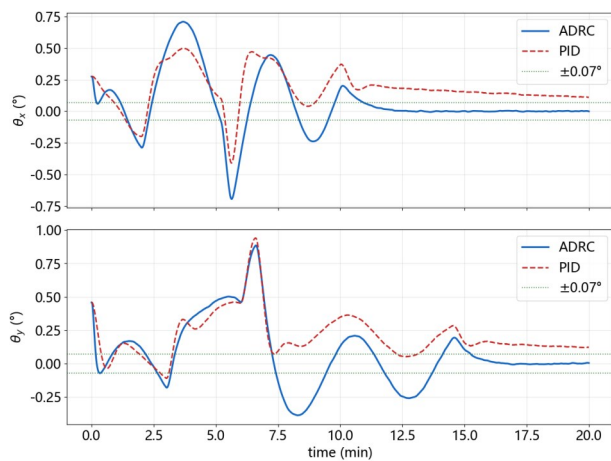


图19 构件1的姿态调整曲线

Fig 19 Attitude adjustment curve of component 1

进一步采用吊装和全站仪进行配合的方式作为调整效率的对比实验。表2记录了从调整准备到调整结束时所需的时间。吊装调整时间为吊车与全站仪就位后的时间,智能调整时间分为移动测量单元布置和自动调整两部分。智能调整的平均时间为14.25 min,传统吊装平均需要19.5 min。实验中准备阶段平均耗时为5.63 min,约占智能调整总时间(14.25 min)的39.5%,而实际调整过程平均仅

表2 构件调整时间

Table 2 Component adjustment time

构件编号	吊装调整/min	智能调整/min		
		准备	调整	总时间
1	21	6	10	16
2	18	5	7	12
3	19	5	8	13
4	25	6	12	18
5	19	6	8	14
6	16	5	8	13
7	17	7	7	14
8	21	5	9	14

需8.63 min。值得注意的是,随着智能调整系统的工程化应用,准备阶段仍具有较大的优化空间。相较于传统调整方法,该方法的作业时间更短。同时,通过对8组构件的对比测试可知,智能调整模式在提升作业效率的同时,时间波动率降低了50%,展现了更高的作业一致性。

7 结论

针对现有装配式柱形构件垂直度调整技术耗时费力的不足,设计了一种移动垂直度测量平台,通过卡尔曼滤波,实现了对构件姿态的准确测量;同时,搭建了竖直构件的智能调整系统,根据测量得到的构件姿态,设计对应的控制调整算法,实现对构件姿态的精确调整。在装配式地铁站中的实验结果表明,所提出的垂直度自动调整方法能够在装配式竖向构件安装过程中实现稳定、可靠的闭环控制。所提出方法能在保证较高垂直度调整精度的同时,作业效率更高,满足实际工程应用对精度和效率的要求。

值得注意的是,受限于每次作业前需要人为指定电机编号以及调整机器人姿态,目前系统无法进一步提高作业效率,因此需要考虑合理的人机交互。进一步地,目前系统仅在装配式地铁站进行应用,在装配式建筑中不同尺寸、不同现场条件的适用性值得进一步研究。

参考文献

- [1] Liu P, Chen Y, Luo X Y, et al. Dimensional tolerance control for prefabricated building components[J]. ACI Structural Journal, 2019, 116(4): 101-114.
- [2] 孟姣,周仲煜,聂鑫,等. 电子芯片厂房装配式钢-混凝土组合结构方案设计与受力性能分析[J]. 工业建筑, 2023, 53(9): 62-68.
Meng J, Zhou Z Y, Nie X, et al. Design and mechanical property analysis of prefabricated steel-concrete composite structure for electronic chip plants[J]. Industrial Construction, 2023, 53(9): 62-68. (in Chinese)
- [3] 高向玲,徐龙标,李杰,等. 装配式混凝土梁柱节点试验及受力性能分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 47-52.
Gao X L, Xu L B, Li J, et al. Experiments and mechanical behavior analysis on precast concrete beam-column joints[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(10): 47-52. (in Chinese)
- [4] Long H, Luo X Y, Liu J H, et al. The analysis and application of installation tolerances in prefabricated construction based on the dimensional chain theory[J].

- Buildings, 2023, 13(7): 1799.
- [5] Guo J J, Wang Q, Park J H. Geometric quality inspection of prefabricated MEP modules with 3D laser scanning[J]. Automation in Construction, 2020, 111: 103053.
- [6] Ma Z L, Liu Y, Li J Y. Review on automated quality inspection of precast concrete components[J]. Automation in Construction, 2023, 150: 104828.
- [7] 刘科,程志军,余少乐,等. 预制混凝土竖向构件垂直度和水平构件倾斜度检测技术研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊1): 2193-2198.
- Liu K, Cheng Z J, Yu S L, et al. Research on the detection technology of plumb and inclination of vertical components of precast concrete members[J]. Building Structure, 2022, 52(Sup 1): 2193-2198. (in Chinese)
- [8] Yang Z T, Tang D B, Li D S, et al. Automatic dimensional quality inspection system for regular precast concrete elements based on 3D structure lighting scan technology[J]. Expert Systems with Applications, 2026, 296: 129149.
- [9] Wang M D, Wang C C, Zlatanova S, et al. A streamlined laser scanning verticality check method for installation of prefabricated wall panels[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2024, 150 (11): 04024159.
- [10] Deng L, Long L Z, Guo J J, et al. A computer vision-based method for automatically measuring alignment deviation of precast concrete components[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 116: 114562.
- [11] Li S P, Zhang B, Zheng J X, et al. Development of automated 3D LiDAR system for dimensional quality inspection of prefabricated concrete elements[J]. Sensors, 2024, 24(23): 7486.
- [12] 杨勇,丁乐乐,李宁,等. 风电塔筒垂直度测量方法研究与应用[J]. 测绘通报, 2025(增刊1): 87-92.
- Yang Y, Ding L L, Li N, et al. Research and application of measurement method for verticality of wind turbine towers[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2025(Sup 1): 87-92. (in Chinese)
- [13] Liu C Y, Wu J, Jiang X L, et al. Automatic assembly of prefabricated components based on vision-guided robot [J]. Automation in Construction, 2024, 162: 105385.
- [14] Ye X T, Zhou Y, Guo H L, et al. A computer vision-based approach to automatically extracting the aligning information of precast structural components[J]. Automation in Construction, 2024, 164: 105478.
- [15] Hanafi M H, Farrell P, Yusoff M N, et al. Installation systems of on-site prefabricated concrete components: a qualitative approach[J]. International Journal of Construction Management, 2018, 18(5): 343-350.
- [16] Huang J, Han D C, Zhang H, et al. Framework and case study for the assembly accuracy prediction of prefabricated buildings using BIM and TLS[J]. Architectural Engineering and Design Management, 2024, 20(6): 1427-1453.
- [17] Liu C Y, Wu J, Gu Y F, et al. Automatic installation method for prefabricated components in modular buildings[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2025, 65(7): 1209-1220.
- [18] Liu C Y, Wu J, Gu Y F, et al. Binocular vision-based guidance for robotic assembly of prefabricated components[J]. Automation in Construction, 2025, 172: 106065.
- [19] Siegwart R, Nourbakhsh I R, Scaramuzza D. Introduction to autonomous mobile robots[M]. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2011.
- [20] 陈增强,程贇,孙明玮,等. 线性自抗扰控制理论及工程应用的若干进展[J]. 信息与控制, 2017, 46(3): 257-266.
- Chen Z Q, Cheng Y, Sun M W, et al. Surveys on theory and engineering applications for linear active disturbance rejection control[J]. Information and Control, 2017, 46(3): 257-266. (in Chinese)
- [21] Humpherys J, Redd P, West J. A fresh look at the Kalman filter[J]. SIAM Review, 2012, 54(4): 801-823.
- [22] GB 50204—2015 混凝土结构工程施工质量验收规范[S].
- GB 50204—2015 Code for quality acceptance of concrete structure construction[S]. (in Chinese)

(编辑 XXX)