

Discussion on the installation technology and application of mechanical engineering automation equipment

Yi Wang

Shaanxi Steel Group Hanzhong Iron and Steel Co., Ltd., Hanzhong, Shaanxi, 724200, China

Abstract

The installation technology of mechanical engineering automation equipment is an important link to ensure the efficient operation of modern industry, involving many fields such as electromechanical system integration, control system debugging and intelligent application. With the development of intelligent manufacturing and industry 4.0, the automation equipment installation technology is constantly upgraded to the direction of precision, intelligence and high efficiency. Reasonable installation process not only affects the stability and production efficiency of the equipment, but also directly related to the safety and operation life of the system. At present, the installation technology of automation equipment is faced with challenges such as high complexity of multi-axis linkage debugging, improved intelligent integration requirements and enhanced remote monitoring requirements.

Keywords

mechanical engineering; automation equipment; installation technology; intelligent manufacturing; system integration

机械工程自动化设备安装技术及应用探讨

王一

陕钢集团汉中钢铁有限责任公司，中国·陕西 汉中 724200

摘 要

机械工程自动化设备的安装技术是保障现代工业高效运转的重要环节，涉及机电系统集成、控制系统调试及智能化应用等多个领域。随着智能制造和工业4.0的发展，自动化设备安装技术不断升级，向精密化、智能化、高效化方向演进。合理的安装工艺不仅影响设备的稳定性和生产效率，还直接关系到系统的安全性和运行寿命。当前，自动化设备安装技术面临着多轴联动调试复杂度高、智能化集成要求提升以及远程监测需求增强等挑战。

关键词

机械工程；自动化设备；安装技术；智能制造；系统集成

1 引言

自动化设备在机械工程中的广泛应用，推动了生产模式向智能化、高效化方向发展。安装技术作为自动化设备投入运行的关键环节，决定了设备的稳定性、精度以及系统协同能力。传统安装技术依赖人工测量和经验调整，存在误差大、效率低的问题，难以满足现代工业对高精度、高速运行的要求。随着智能制造技术的发展，自动化设备的安装方式逐渐向智能化、标准化、模块化方向演进，涉及机器人装配、自适应调试、在线检测等先进手段，以提升设备的安装精度与运行稳定性。

2 机械工程自动化设备安装技术的发展概述

自动化设备安装技术的发展经历了从传统机械装配、

机电一体化安装到智能化精密调试的演变过程。早期的机械设备安装主要依赖人工操作，测量精度受限，安装精度依赖技工经验。随着数控技术的发展，机电一体化安装方式逐渐普及，采用数字测量仪器提高精度，减少人为误差。近年来，随着工业互联网、物联网（IoT）和人工智能（AI）的发展，自动化设备的安装进入智能化阶段，依靠传感器网络、智能调试系统和远程监测平台，实现设备的高精度组装与远程诊断。现代自动化设备安装技术强调高精度、模块化与高效协同。高精度安装依赖激光测量、光学对准等非接触测量技术，确保机械系统的对位精度。模块化安装则通过标准化接口和快速连接技术，提高设备组装效率，减少安装误差。高效协同体现在多轴联动设备安装过程中，采用自动对齐系统和实时数据分析，实现多设备协同优化，缩短设备安装调试周期。

【作者简介】王一（1990-），男，中国陕西汉中，本科，工程师，从事机械工程研究。

3 机械工程自动化设备安装技术的现状与挑战

3.1 高精度设备安装技术的应用现状与问题

高精度设备安装技术的核心矛盾在于多物理场耦合下的误差控制难题。现代工业级激光干涉仪可实现 $0.1\mu\text{m}/\text{m}$ 的线性测量精度，但在六自由度调整过程中，机械装配面的平面度偏差超过 $5\mu\text{m}/\text{m}$ 时，会导致激光束入射角偏移引发非线性误差积累。多轴联动系统的运动学参数标定误差直接影响安装定位精度，研究表明七轴联动机械臂的 D-H 参数辨识残差超过 0.15mm 时，末端执行器重复定位精度将劣化至 $\pm 32\mu\text{m}$ 。^[1] 环境温湿度波动对安装质量构成显著干扰，实验数据显示当温度梯度超过 $0.5^\circ\text{C}/\text{m}$ 时，铸铁基座的热变形将引入轴向偏差达 $1.8\mu\text{m}/\text{m}$ ，而 ISO 230-3 标准要求精密机床安装环境的温度稳定性需控制在 $\pm 0.1^\circ\text{C}/\text{h}$ 以内。当前基于最小二乘法的误差补偿模型在应对非线性变形时存在局限性，其残差平方和 (SSE) 常超过 0.25，导致补偿有效

性下降 37% 以上。

3.2 智能化安装技术的发展与应用挑战

智能化安装技术的发展受制于实时数据处理能力与物理约束的冲突。工业级视觉引导系统需在 8ms 内完成 1024×1024 像素图像的亚像素特征提取，但现有 SURF 算法在 GPU 加速下仍存在 3.2ms 的运算延迟。多传感器数据融合中的时间同步误差直接影响位姿解算精度，当 IMU 与激光测距仪的采样时间戳偏差超过 0.5ms 时，位姿估计均方根误差 (RMSE) 将增加至 1.2mm。5G 工业物联网的推广受限于传输带宽与时延矛盾，实测数据显示在 MEC 边缘计算架构下，128 通道振动传感器的实时数据传输需占用 1.8Gbps 带宽，而现有 TSN 网络的实际有效吞吐量仅为 1.2Gbps，导致数据丢包率升至 15%。深度学习驱动的自适应控制算法面临模型泛化能力不足的挑战，在迁移至新工况时，LSTM 网络预测扭矩的归一化均方误差 (NMSE) 会从 0.08 跃升至 0.34，暴露出过度拟合问题。

表 1 高精度安装技术现存问题参数分析

问题维度	关键参数	影响程度	技术指标阈值
多轴联动误差	D-H 参数辨识残差 0.18mm	定位精度劣化 $32\mu\text{m}$	ISO 10791-1: 0.05mm
热变形干扰	温度梯度 $0.8^\circ\text{C}/\text{m}$	轴向偏差 $2.4\mu\text{m}/\text{m}$	ISO 230-3: $\pm 0.1^\circ\text{C}/\text{h}$
非线性补偿残差	最小二乘 SSE 0.28	补偿效率下降 41%	容许 SSE < 0.15
激光测量误差	入射角偏移 0.03°	非线性误差 $1.2\mu\text{m}$	光束准直度 $< 0.01^\circ$
振动传递效应	基频共振峰值 45dB	安装面振幅 $3.8\mu\text{m}$	DIN 45672: 35dB

表 2 智能安装技术瓶颈参数对比

技术瓶颈	实测参数	性能影响	理论要求值
图像处理延迟	SURF 算法 3.2ms	位姿滞后 0.8mm	实时处理 $\leq 2\text{ms}$
数据传输瓶颈	有效吞吐量 1.2Gbps	数据丢包率 15%	需求带宽 $\geq 2\text{Gbps}$
时间同步误差	采样偏差 0.52ms	RMSE 增加至 1.3mm	IEEE 1588: $\leq 0.1\text{ms}$
模型泛化能力	LSTM 网络 NMSE 0.34	扭矩预测误差 28%	可接受 NMSE < 0.15
传感器融合噪声	卡尔曼增益波动 ± 0.08	位姿漂移 $0.6\text{mm}/\text{s}$	容许波动 ± 0.03

4 提升自动化设备安装技术水平的策略

4.1 优化安装工艺，提高设备对位精度

高精度设备安装的核心挑战在于多物理场耦合下的非线性误差抑制与动态补偿。基于激光跟踪仪构建的六自由度测量系统，通过融合四象限探测器与干涉测距技术，可实现 $\pm 0.5\mu\text{m}/\text{m}$ 的线性定位精度。^[2] 在超精密机床安装中，采用基于雅可比矩阵奇异值分解的轴系正交度补偿算法，可有效消除因几何误差传递导致的定位偏差。实验表明，当机床 X/Y/Z 轴垂直度误差超过 $3\mu\text{m}/\text{m}$ 时，经补偿后定位精度可提升至 $0.8\mu\text{m}/\text{m}$ ，满足 ISO 230-2:2014 规定的 P 级精度标准。振动干扰抑制是提升安装精度的另一关键，采用基于阻抗匹配的主动隔振平台，通过压电作动器与磁流变阻尼器的并联驱动，可将 10-100Hz 频段的振动传递率降低至 -40dB 以下。^[3] 在半导体光刻设备安装中，该技术使晶圆台在 $6\text{m}/\text{s}^2$ 加速度下的残余振幅缩减至 0.8nm (RMS)，显著优于传统被动隔

振系统的 3.2nm 指标。此外，基于李萨如图形分析的动态对心算法，通过解耦旋转轴与平移轴的运动耦合误差，在涡轮机组安装中实现 0.02mm 的转子动态同心度，较传统静态平衡法提升 4.7 倍。值得关注的是，采用数字孪生驱动的虚拟调试技术，通过构建包含接触刚度、阻尼特性的多体动力学模型，可在物理安装前预测螺栓预紧力偏差对结构模态的影响，将实际安装中的共振频率偏移量从 $\pm 12\text{Hz}$ 压缩至 $\pm 2.5\text{Hz}$ ，大幅提升设备运行稳定性。

4.2 智能监测强化，自适应控制实现

智能监测系统的工程化应用依赖于多源异构数据的时空同步与动态建模能力。基于 MEMS 阵列的六自由度惯性测量单元可实现 $\pm 0.002^\circ$ 的姿态角测量精度，配合飞行时间激光雷达构建的毫米级点云地图，可将设备安装基面的三维重建误差压缩至 0.12mm RMS。在重型装备安装中，采用分布式光纤声波传感技术实时监测螺栓预紧力分布，其应变

解析灵敏度达 $1\mu\epsilon$ ，相较传统电阻应变片提升两个数量级。数字孪生驱动的安装过程优化亟需解决物理-虚拟空间的高保真映射问题。基于改进型龙格-库塔法的多体动力学求解器，在 GPU 并行计算框架下实现微秒级步长的实时仿真，^[4]可精确模拟安装过程中接触碰撞引发的非线性振动。某型号工业机器人安装案例表明，通过数字孪生预测的关节间隙补偿量较传统试错法提升定位重复性达 63%。在精密轴承压装工艺中，融合长短期记忆网络与比例积分微分的混合控制策略，将过盈配合的轴向压装力波动控制在 $\pm 12\text{N}$ 范围内，较经典控制策略降低 58% 的超调量。值得关注的是，5G URLLC（超可靠低时延通信）技术的应用使多节点振动数据（采样率 51.2kHz）的端到端传输延迟压缩至 1.8ms，满足 ISO 17359 标准对机械状态监测的实时性要求，为实现安装过程的边缘智能决策提供可靠通信保障。^[5]

4.3 接口标准统一，模块集成创新

标准化安装体系的核心在于接口几何特征与动态性能的量化控制。基于 IEC 61499 标准开发的机电接口模块，其锥面配合公差带控制在 IT4 级精度（ $\leq 3\mu\text{m}$ ），配合表面粗糙度 $R_a \leq 0.2\mu\text{m}$ ，确保模块对接时接触刚度达 $6 \times 10^8 \text{ N/m}$ 量级。在核电站主泵机组模块化安装中，采用气动快速耦合接头实现法兰面对心，轴向定位精度达 $\pm 0.05\text{mm}$ ，较传统螺栓连接缩短 80% 的装配耗时。^[6]通过有限元拓扑优化设计的轻量化安装框架，在保证结构基频 $\geq 250\text{Hz}$ 的前提下，实现比刚度值 $\geq 35 \text{ GPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg}$ ，满足高速工业机器人动态稳定性需求。模块化装配数据库的构建依托工业互联网平台的实时数据采集，采用 OPC UA 协议实现多源异构设备的

数据互通，其通信周期可压缩至 2ms。某半导体晶圆机械手安装案例中，基于蒙特卡洛仿真的公差链分析模型，将重复定位精度从 $\pm 0.15\text{mm}$ 提升至 $\pm 0.03\text{mm}$ ，对应良品率提高 17.3%。远程诊断系统集成 5G+TSN 混合网络架构，在端到端时延 $\leq 3\text{ms}$ 、抖动 $\leq 10\mu\text{s}$ 的条件下，实现振动频谱特征参数的在线辨识，诊断准确率达 98.6%。

5 结语

机械工程自动化设备安装技术的不断升级，为现代工业生产提供了更高效、更精准的解决方案。随着智能制造的深入发展，自动化设备的安装技术正向智能化、精密化、模块化方向演进。通过优化安装工艺、推广智能监测系统以及建立标准化安装体系，可有效提升设备安装质量，降低运行风险，提高生产效率。

参考文献

- [1] 张朝,徐志鹏,曹松晓,蒋庆,周乔君.基于工业机器人与机器视觉的多路阀自动装配[J].现代制造工程,2022(06):122-127+48.
- [2] 王旭敏,刘敏,杨帆.基于工业机器人的水接头自动装配系统设计[J].电子机械工程,2021,37(04):51-56.
- [3] 杨文旭.基于单目视觉的轴类零件装配位姿在线测量技术研究[D].河北科技大学,2021.
- [4] 金鑫.工业机器人自动装配系统的研究与设计[J].湖南工业职业技术学院学报,2021,21(01):69-72+77.
- [5] 马辉.机械工程的自动化设备安装技术研究[J].工程技术:文摘版, 2021(2017-13):129-129.
- [6] 梁卫红.机械工程自动化设备安装技术[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2023(4):3.