

# 基于数字孪生的发电机组装配精度控制与误差溯源技术

任佳毅

杭州萧山环宇冲件有限公司 311200

**【摘要】**面向能源装备智能制造转型背景下发电机组装配精度管控难度大、装配误差定位滞后、全流程质量追溯体系不完善等现实难题，本文依托数字孪生、三维激光扫描、机器视觉、工业物联网与大数据分析等前沿技术，构建全要素、全流程、全周期的发电机组装配数字孪生管控体系。体系以装配过程实时映射、精度动态调控、误差精准溯源、装配质量闭环优化为核心目标，完成孪生模型构建、数据采集传输、精度匹配调控、误差溯源分析与部署落地等关键环节，实现发电机组装配全生命周期精度管控与质量迭代提升。

**【关键词】**数字孪生；发电机组；装配精度；误差溯源

Digital Twin-Based Assembly Precision Control and Error Traceability Technology for Generator Sets

Ren Jiayi

Hangzhou Xiaoshan Huanyu Component Co., Ltd. 311200

**【Abstract】** Addressing practical challenges in generator set assembly—including high precision control difficulties, delayed error localization, and inadequate end-to-end quality traceability systems—during the intelligent manufacturing transformation of energy equipment, this paper leverages cutting-edge technologies such as digital twins, 3D laser scanning, machine vision, industrial IoT, and big data analytics to establish a comprehensive digital twin management system covering all assembly elements, processes, and lifecycle stages. The system focuses on real-time process mapping, dynamic precision adjustment, accurate error tracing, and closed-loop quality optimization. It accomplishes critical tasks including twin model construction, data acquisition and transmission, precision matching and regulation, error analysis, and implementation, enabling precise quality control and continuous improvement throughout the generator set assembly lifecycle.

**【Key words】** digital twin; generator set; assembly accuracy; error traceability;

高端能源装备智能制造是能源产业高质量发展的关键支撑，发电机组作为核心装备，其装配精度直接决定运行稳定性、转换效率与服役寿命。随着机组向大容量、高参数、紧凑型发展，传统依赖人工经验、离线检测与事后修正的装配模式，已难以满足高精度、一致性与全周期追溯要求<sup>[1]</sup>。数字孪生、三维激光扫描、工业物联网等技术的融合应用，为解决装配精度管控滞后、误差溯源困难等痛点提供可行路径。本文构建全要素数字孪生管控体系，实现精度动态调控与误差精准溯源，推动发电机组装配向智能化、闭环化升级。

## 一、技术应用背景与需求分析

### （一）行业发展现状与技术变革趋势

高端能源装备智能制造已成为我国能源产业高质量发展的核心支撑，发电机组作为能源装备体系的核心载体，其装配精度直接决定机组运行稳定性、能量转换效率与服役寿命。近年来，大容量、高参数、紧凑型发电机组的市场需求

持续扩张，机组零部件加工精度、装配配合公差、空间位姿要求不断提升，传统依赖人工经验、离线检测、事后修正的装配模式面临精度管控滞后、误差溯源困难、装配一致性差等多重压力。与此同时，能源装备数字化制造政策持续推进，零部件全生命周期数据互通、装配过程可视化、质量问题精准定位成为行业发展必然趋势，但受制于装配现场数据采集不全面、虚实映射脱节、误差分析模型不完善等问题，装配过程精准管控长期处于较低水平<sup>[2]</sup>。

数字孪生技术与高端装备制造工艺深度融合，正逐步重构发电机组装配的技术逻辑与运行模式。数字孪生通过物理实体与虚拟模型的实时双向映射，为装配过程提供全维度可视化支撑；三维激光扫描与机器视觉实现装配现场几何数据、位姿数据的高精度采集；工业物联网保障多源装配数据稳定传输与协同交互；大数据分析完成装配误差的特征提取、关联分析与精准定位。多项技术协同应用，为打造可视化、精准化、智能化、闭环化的发电机组装配精度控制与误差溯源体系奠定坚实技术基础。

## （二）技术核心需求梳理

本技术体系以解决发电机组装配现场实际痛点为核心导向，在保障技术先进性、系统稳定性的同时，兼顾工程实用性与可推广性。装配数据管理层面，需实现多源异构装配数据的统一采集、标准化解析、实时传输与高效存储，涵盖零部件三维几何数据、装配位姿数据、工装夹具状态数据、加工误差数据、环境扰动数据等，形成完整的装配数据链条。

精度动态控制层面，支持装配过程虚拟模型与物理现场的实时同步、位姿偏差实时修正、配合精度动态匹配，打通零部件加工、工位装配、整体调试的技术壁垒，实现高精度装配指令的实时下达与执行。误差智能溯源层面，需构建多维度误差分析模型，实现装配误差来源快速定位、误差传递路径清晰追溯、误差影响程度定量评估，降低高端发电机组装配对人工经验的过度依赖。系统安全与运维层面，技术体系需符合工业数据安全规范，建立数据加密、权限管控、日志审计、容灾备份等安全保障机制，具备低运维成本、高并发处理、动态扩展适配的特性，可满足不同规格、不同产能发电机组制造场景的应用需求。

## 二、相关技术基础与融合逻辑

### （一）核心支撑技术概述

数字孪生技术通过物理实体数字化建模、虚实数据实时交互、模型动态迭代更新，将发电机组装配物理空间与虚拟空间深度融合，为装配过程提供全要素可视化、全流程可调控、全周期可追溯的支撑，有效解决传统装配过程虚实脱节、管控滞后的问题。该技术可根据装配现场工况、零部件状态、工艺要求实现模型自适应优化，适配复杂多变的装配场景。

三维高精度测量技术以三维激光扫描、高精度机器视觉为核心，实现发电机组零部件几何尺寸、装配间隙、同轴度、平行度等关键参数的非接触式快速采集，保障数据采集精度与效率，为孪生模型构建与误差分析提供可靠数据来源。

工业互联网技术通过现场传感器、数据采集终端、工业网关的协同部署，实现装配现场多源数据的稳定传输、协议适配与边缘预处理，保障数据传输的实时性与完整性，为数字孪生虚实交互提供通信支撑。

大数据与误差分析技术针对海量、多维度装配数据进行清洗、归一化、特征提取与传递路径分析，构建误差溯源算法模型，实现装配误差的精准定位、定量分析与趋势预测，为装配工艺优化与精度提升提供数据支撑。

### （二）多技术融合路径与协同机制

各项前沿技术并非简单叠加，而是遵循发电机组装配数据流动规律与工艺执行逻辑形成深度融合体系。数据采集阶

段，三维测量设备与物联网终端完成装配现场几何数据、位姿数据、环境数据的高精度采集与初步预处理，保障数据有效性；传输阶段，依托工业互联网与边缘计算技术，实现数据低时延、高可靠传输，同步完成数据脱敏与加密处理；模型构建阶段，结合数字孪生建模技术与三维点云数据处理算法，创建与物理装配场景完全匹配的虚拟孪生体，实现装配过程全要素映射。

精度调控阶段，虚拟模型实时比对设计公差与实际装配偏差，生成动态修正指令并下发至装配执行端，实现精度闭环控制；误差溯源阶段，依托大数据分析 with 误差传递模型，快速定位误差产生环节、追溯误差传递路径、评估误差影响等级，形成装配质量优化方案。技术融合过程中，以统一工业数据标准与接口规范为纽带，实现不同技术模块之间无缝对接，确保整个精度管控与误差溯源体系稳定、高效、精准运行<sup>[9]</sup>。

## 三、基于数字孪生的装配精度控制体系总体设计

### （一）设计原则

技术体系设计遵循工程实用性、精度可靠性、系统安全性、功能扩展性、标准统一性与易运维性原则。以发电机组实际装配工艺需求为核心，优先保障关键环节精度控制稳定运行，兼顾操作便捷性与现场适配性；严格遵循工业数据安全与装备制造质量规范，构建全流程数据安全与精度保障体系；采用模块化设计思路，支持功能模块按需扩展与技术迭代升级；统一数据接口、建模标准与交互规范，保障跨设备、跨系统、跨工位的数据互通与协同作业；降低现场运维复杂度，提供可视化监控与智能管理工具。

### （二）分层架构体系

技术体系从下至上分为物理感知层、数据传输层、孪生模型层、算法分析层、应用执行层，各层级相互独立又深度联动，形成完整的数字孪生装配管控闭环。

1.物理感知层以三维激光扫描仪、机器视觉系统、工业传感器、工装执行机构为核心，完成装配现场零部件状态、装配位姿、环境参数、设备运行状态的全面感知与数据采集，为整个体系提供物理层数据支撑。

2.数据传输层依托工业网关、物联网通信网络、边缘计算节点，实现多源异构数据的协议转换、边缘预处理、加密传输与存储管理，保障数据高效、安全、稳定流转。

3.孪生模型层是发电机组装配虚拟映射的核心载体，包含零部件三维模型、装配工艺模型、工位场景模型、误差演化模型，实现物理装配现场与虚拟空间的实时同步、动态映射与可视化呈现。

4.算法分析层集成精度匹配算法、误差溯源算法、传递路径分析算法、智能优化算法等核心模块,完成装配偏差计算、误差定位分析、工艺优化决策,为上层应用提供精准算法支撑。

5.应用执行层针对装配现场操作人员、工艺工程师、质量管理人员、设备运维人员,提供精度监控、偏差修正、误差溯源、工艺优化、质量报表等功能应用,支持PC端、工业平板、现场大屏等多终端访问,实现分权化管理与便捷化操作。

### (三) 技术体系核心功能框架

体系功能围绕数据感知、虚实映射、精度控制、误差溯源、质量优化五大维度展开。数据感知功能涵盖多源数据采集、格式标准化、实时传输、存储管理;虚实映射功能实现装配场景三维建模、模型动态迭代、虚实同步交互、全流程可视化;精度控制功能提供位姿偏差检测、配合精度匹配、实时修正指令生成、装配过程闭环调控;误差溯源功能支持误差快速定位、传递路径追溯、影响程度评估、异常预警提示;系统管理功能包含用户权限、日志审计、设备监控、接口管理、参数配置,保障整个技术体系规范化、稳定化运行。

## 四、关键模块构建与实现策略

### (一) 多源装配数据采集与标准化模块

发电机组装配现场涉及零部件几何数据、位姿数据、工艺数据、环境数据等多类型数据,存在采集设备异构、数据格式不统一、时空不同步等问题。本模块采用兼容多类型测量设备通信协议与工业数据标准的设计方案,实现装配数据自动采集、同步上传。对非标准化数据采用格式解析、时空校准、数据重构工具完成标准化转换,统一数据命名规则、编码方式与存储结构,保障数据在体系内部高效流转。数据接入过程同步完成完整性校验、异常值剔除与隐私信息处理,符合工业数据安全与装备制造管理合规要求。

### (二) 数字孪生装配模型构建与映射模块

依托三维建模与点云数据处理技术,创建发电机组零部件高精度几何模型,结合装配工艺逻辑搭建装配过程虚拟场

景,形成与物理装配现场完全匹配的数字孪生体。采用实时数据驱动方式,实现虚拟模型与物理实体的位姿同步、状态同步、工艺同步,支持装配过程全维度可视化查看。模型具备自适应迭代能力,可根据装配现场零部件更换、工艺调整、工况变化自动更新,始终保持虚拟空间与物理空间的一致性,为精度控制与误差溯源提供精准虚拟载体。

### (三) 装配精度动态控制模块

精度动态控制模块以数字孪生虚实映射为核心,集成高精度偏差检测算法与动态修正策略。体系实时比对虚拟模型设计公差与物理现场实际装配数据,快速计算间隙偏差、角度偏差、位置偏差等关键指标,当偏差值超出阈值时自动生成修正指令。模块支持同轴度、平行度、垂直度、端面跳动等关键精度指标的动态调控,可适配定子、转子、机座、端盖等核心部件的高精度装配需求。建立人机协同装配机制,智能修正指令仅作为辅助依据,最终装配操作由专业人员确认执行,保障装配过程安全可靠。

### (四) 装配误差智能溯源模块

误差智能溯源模块以大数据分析 with 误差传递理论为基础,构建多维度误差溯源模型。模块采集装配全流程数据,通过特征提取、关联分析、路径反演,快速定位误差产生环节,清晰追溯误差从零部件加工、工位装配到整体调试的传递路径,定量评估误差对装配精度与机组性能的影响程度。支持历史误差数据查询、趋势分析、规律总结,为装配工艺优化、零部件质量提升、工装夹具改进提供数据支撑,从源头降低装配误差发生率,实现装配质量闭环优化。

## 五、结论

面向发电机组装配精度管控难题,融合数字孪生、三维激光扫描、工业物联网等技术,构建全流程装配精度控制与误差溯源体系。该体系实现物理与虚拟空间实时映射、精度动态调控及误差精准溯源,有效解决传统装配管控滞后、误差定位难等问题,提升装配质量与一致性,为能源装备智能制造转型提供技术支撑。

## 参考文献

[1]秦磊.灯泡贯流式水轮发电机组转子机械部分装配方法综述[J].机电信息,2020,(09):21-22.

[2]刘赛.风力发电机组叶片装配吊具的研制[J].金属制品,2018,44(05):56-58.

[3]孙振军,吴勇.工业机器人和机器视觉在风力发电机组变桨轴承装配中的应用[J].上海电气技术,2018,11(03):1-4+10.

作者简介:任佳毅,出生年月:1987年7月,男,汉族,籍贯:浙江省杭州市萧山区,学历:本科,职称:高级经济师,研究方向:机械。