

模块化装配技术在配电网施工标准化建设中的应用

盛志鹏

(广东启明电力工程有限公司, 广东 茂名 525000)

摘要: 在配电网工程向高效化、标准化转型的背景下, 基于模块化装配技术的系统应用, 构建了涵盖“功能单元划分 - 参数约束体系 - 接口协同机制 - 数字化流程管控”的配电网施工标准化体系。通过“功能 - 层级”二维法完成模块划分, 统一机械、电气和信息三类接口标准, 建立多维度性能约束模型, 实现从工厂预制到现场装配的全过程精细化管理与全环节数据追溯。基于双环网结构配电网工程的实践应用表明, 该技术体系在施工效率、质量稳定性与标准化水平方面优势显著, 可为配电网施工提供可复制、可推广的技术路径与工程范式。

关键词: 模块化装配技术; 配电网施工; 标准化体系; 全流程管控

Application of modular assembly technology in the standardized construction of distribution network

SHENG Zhipeng

(Guangdong Qiming Electric Power Engineering Co., Ltd., Maoming 525000, China)

Abstract: In the context of the transformation of distribution network projects towards efficiency and standardization, this paper, based on the systematic application of modular assembly technology, constructs a standardized construction system for distribution networks encompassing “functional unit division - parameter constraint system - interface coordination mechanism - digital process management.” Through the “functional-level” two-dimensional method, the paper divides modules, unifies mechanical, electrical, and information interface standards, and establishes a multi-dimensional performance constraint model, realizing the refined management of the entire process from factory prefabrication to on-site assembly and full lifecycle data traceability. Practical application in a dual-ring distribution network project demonstrates that this technical system significantly outperforms in construction efficiency, quality stability, and standardization level, providing a replicable and scalable technical path and engineering model for distribution network construction.

Keywords: modular assembly technology; distribution network construction; standardized system; full-process management

0 引言

配电网作为电力系统服务用户的末端环节, 其施工标准化程度直接决定供电可靠性与运维

效率, 而模块化装配通过工厂预制与现场集成的协同模式, 为破解传统施工瓶颈提供了系统性方案^[1]。当前配电网施工面临双重挑战: 一是传统散装模式下, 设备安装工艺依赖人工技能, 同

批次工程的母线连接精度偏差可达±3 mm，电缆头制作合格率波动超10%，严重影响供电安全性^[2]；二是半模块化施工因缺乏统一标准，模块接口适配耗时占总工期的35%以上，显著增加工程成本^[3]。

近年来，相关研究为模块化标准化建设提供了技术支撑。文献[4]通过配电网设备模块化参数设计，验证了统一电气性能约束对提升兼容性的作用；文献[5]构建了接口协同模型，为减少现场适配工作量提供了理论支撑；文献[6]基于BIM技术的模块化施工模拟，将工序冲突率降低60%，其数字化管控思路具有重要借鉴意义；文献[7]通过模块化质量追溯系统，将关键节点数据完整性提升至95%，为全周期管控提供了可行路径。但现有研究多聚焦单一技术维度，尚未形成“模块划分-接口规范-流程管控”的全链条标准化体系，尤其缺乏对不同厂家模块互换性、施工流程刚性约束的系统性解决方案。

基于此，本文提出模块化装配技术驱动的配电网施工标准化体系。首先通过“功能-层级”二维法划分标准化模块，并建立多维度参数约束；其次设计“机械-电气-信息”三位一体接口架构；最后构建数字孪生驱动的全流程管控机制，并在实际工程中验证效果，旨在为配电网施工标准化提供可推广的技术范式。

1 模块化装配技术原理

模块化装配技术以标准化为核心，通过将配电网系统拆解为功能完整的独立模块，实现工厂预制与现场精准集成的协同模式，其原理如图1所示^[8]。模块具备明确功能边界，集成特定电气与结构组件，出厂前经全项检测确保参数一致性；接口遵循统一标准，机械定位、电气连接及信息交互均符合国标，保障不同模块互换性；施工流程依托数字孪生技术，全链条数据实时同步形成可追溯档案，三维建模预演装配过程以规避空间冲突；模块编码体系实现全生命周期标识，为运维监测奠定基础，整体构建“预制-集成-管控”的闭环体系，支撑配电网施工标准化转型。

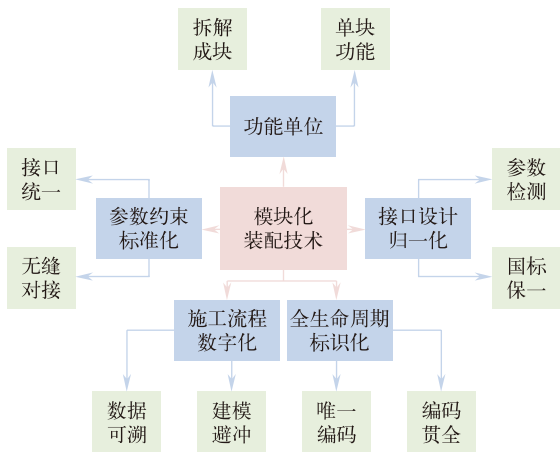


图 1 模块化装配技术原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of modular assembly technology principle

2 配电网施工标准化模型构建

2.1 模块化功能单元划分

基于配电网拓扑结构与设备功能特性，采用“功能维度-电压等级”二维分类法划分标准化模块，各类模块的技术参数见表1。

表 1 模块化功能单元分类及参数

Tab. 1 Modular functional unit classification and parameters

模块类型	子类别	电压等级/kV	核心参数范围
核心设备模块	环网柜模块	10	额定电流 630 ~ 1 250 A
	配电箱模块	0.4	防护等级 IP44
	变压器模块	10/0.4	容量 50 ~ 630 kV·A
结构支撑模块	混凝土基础模块	-	强度等级 C30 ~ C40
	金属支架模块	-	材质 Q235B
连接过渡模块	电缆分支模块	10	适配截面积 16 ~ 400 mm²
	母线桥模块	10	载流量 250 ~ 1 000 A

所有模块采用12位编码进行唯一标识，编码规则为：前3位表示模块类型，中间5位记录关键参数，后4位标注生产批次，确保全生命周期可追溯。

2.2 模块化参数约束体系

针对模块化装配的核心要求，建立多维度参数约束模型，以确保模块在配电网施工下的可靠性^[9]。

(1) 电气性能约束

额定值偏差需满足

$$\Delta = \frac{I_m - I_n}{I_n} \times 100\% \leq 5\% \quad (1)$$

式中， I_m 为模块实测电流（A）； I_n 为额定电流（A）。

(2) 机械精度约束

对接定位误差需满足

$$\delta = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2)} \leq 1 \text{ mm} \quad (2)$$

式中， Δx 、 Δy 分别为 x 、 y 方向的定位偏差（mm）。

(3) 结构强度约束

承重安全系数需满足

$$K = \frac{F_m}{F_n} \geq 1.5 \quad (3)$$

式中， F_m 为极限承载能力（N）； F_n 为设计载荷（N）。

(4) 环境适应约束

性能衰减率需满足

$$\eta = \frac{P_o - P_t}{P_o} \times 100\% \leq 10\% \quad (4)$$

式中， P_o 为初始性能参数； P_t 为环境试验后性能参数。

2.3 接口协同机制设计

接口系统采用“机械-电气-信息”三位一体架构，通过标准化接口设计，实现不同模块的快速对接与协同工作，以减少现场适配工作量^[10]。各接口的技术参数与性能指标见表2。

3 模块化装配技术在配电网施工标准化建设流程设计

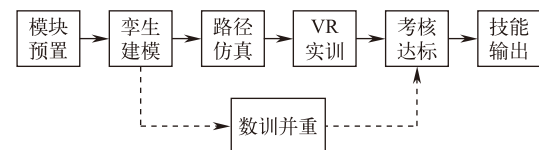
模块化装配技术在配电网施工标准化建设中的落地，需通过“前期准备-现场装配”的全流程标准化管控实现，其流程如图2所示。将上述

模块划分、参数约束与接口规范转化为可执行的施工标准，形成工厂预制精度向现场装配质量的有效传递。

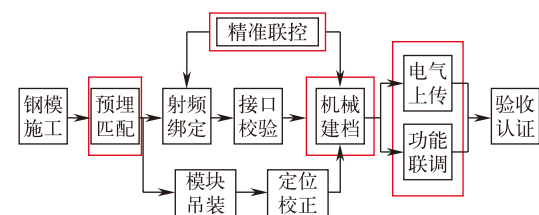
表2 接口协同机制参数指标

Tab. 2 Interface coordination mechanism parameter indicators

接口类型	核心组成	关键参数	性能要求
机械接口	定位销 + 导向槽	定位销直径 $\phi 8 \text{ mm}$ (45# 钢镀铬)	重复定位精度 $\leq \pm 0.5 \text{ mm}$
	密封胶条 + 锁紧卡扣	锁紧力矩 $30 \sim 50 \text{ N}\cdot\text{m}$	防护等级达 IP66
电气接口	高压肘型插拔头	材质 EPDM 绝缘	插入力 $30 \sim 50 \text{ N}$
	低压预制电缆终端	绝缘厚度 $\geq 10 \text{ mm}$	接触电阻 $\leq 10 \mu\Omega$
	整体电气性能	10 kV 等级	雷电冲击耐 $\geq 75 \text{ kV}$ (峰值)
信息接口	RFID 芯片 + LoRa 模块	传输速率 9.6 Kbit/s	响应时间 $\leq 100 \text{ ms}$
	数据加密模块	加密算法 SM4	通信距离 $\geq 500 \text{ m}$



(a) 前期准备阶段



(b) 现场装配阶段

图2 模块化装配技术施工流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of modular assembly technology construction process

3.1 前期准备阶段

1) 模块预制严格遵循表1的功能单元分类规则，核心参数对标前述约束体系完成全项验证，第三方检测通过率需达100%，生成包含唯一编码的数字孪生体，实现物理模块与数字档案的实时关联。

2) 数字孪生建模基于BIM平台构建高精度资产模型,融合GIS地理空间数据完成装配路径仿真,碰撞检测精度达0.1 mm,使工序冲突率降低65%以上,确保施工方案的标准化推演。

3) 技术赋能采用VR沉浸式实训,通过动作捕捉技术校验操作精度,考核达标率需100%,实训后施工人员接口对接效率提升至40%,以实现作业技能的标准化输出。

3.2 现场装配阶段

1) 基础施工采用标准化钢模体系,通过激光定位系统控制平面度偏差不大于±3 mm,预埋件坐标与数字模型匹配误差不大于±2 mm,表面植入射频标识实现空间坐标绑定,确立标准化基准。

2) 模块吊装执行“编码溯源-智能就位”流程,通过北斗定位与姿态传感器实时校正,水平偏差控制在±1.5 mm/m以内,实现吊装环节的标准化管控。

3) 接口对接实施三位一体协同校验:机械接口生成完整扭矩曲线档案,电气接口测试数据实时上传,信息接口参数同步延迟不大于50 ms,形成标准化过程数据库。

4) 功能联调与验收依托智能测试终端开展全工况核验,测试项次覆盖率100%,数据与预制阶段数字孪生体的偏差率不大于2%,最终形成包含28项标准化指标的验收报告,实现施工质量的全维度认证。

4 模块化装配技术工程应用测试

4.1 对比方法与测试设置

为验证模块化装配技术在配电网施工标准化建设中的优势,选取三类代表性施工模式作为对比:对比模式1全现场散装施工,设备零部件现场组装,无统一标准;对比模式2半模块化施工,核心设备预制,且接口参数不统一;对比模式3简易模块化施工,仅机械接口标准化,电气与信息接口无规范。

测试以采用双环网结构的10 kV配电网工程

为对象,其配电网拓扑结构如图3所示。该工程具有负荷密度高、拓扑结构复杂、设备类型多样的特点,能够充分模拟实际配电网施工中的各类场景。工程涵盖表1划分的核心设备模块、结构支撑模块及连接过渡模块,包含环网柜、配电箱、变压器等关键设备,可全面检验模块化技术在不同功能单元中的适配性。为确保测试结果的可靠性与普适性,共模拟12组场景(每5个台区为一组,共60个台区),其中前4组为常规台区装配(地势平坦、周边环境简单),中间4组为复杂地形台区(含丘陵、多障碍物场景),后4组为高密度台区(设备布置密集、空间约束严格)。评价指标包括施工效率(总耗时)、质量稳定性(参数偏差率,与理论约束值对比)及标准化水平(针对本文模式的综合评分)。

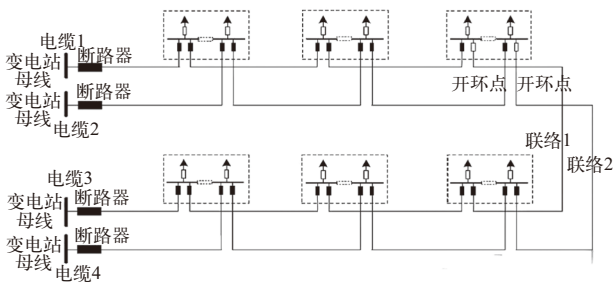


图3 双环网拓扑结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of dual-ring network topology

4.2 对比结果与分析

不同测试样本数量下,4种模式的施工效率对比如图4所示。随着台区数量增加,4种模式耗时均呈上升趋势,但本文模块化装配技术始终保持最优表现:60个台区时总耗时210 h,较对比模式1缩短56%,较对比模式2缩短40%,较对比模式3缩短28%。这种效率优势源于“机械-电气-信息”三位一体接口架构,减少了现场适配时间,标准化流程设计避免了工序冲突与返工,尤其在复杂地形与高密度台区中,因模块布局规范、对接精准,效率提升更为显著。模块化预制使核心组件提前完成检测,现场仅需完成集成对接,大幅压缩了传统施工中零部件调试、适配的冗余时间,规模化施工时优势更为突出。

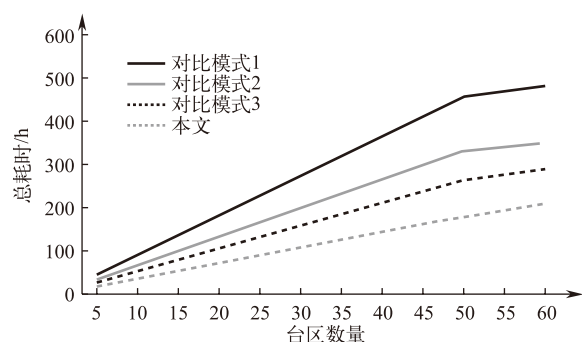


图4 不同施工模式下配电网工程施工效率对比

Fig. 4 Construction efficiency comparison of distribution network projects under different construction modes

质量稳定性与样本数量的关系如图5所示。本文模块化装配技术的参数偏差率始终不高于1.5%，且远低于5%的理论阈值，复杂地形台区偏差率甚至不高于0.8%；对比模式3，因仅机械接口标准化，偏差率达3.2%，且已接近阈值；对比模式1和对比模式2，因缺乏全维度约束，偏差率最高达9.2%，远超阈值。这一结果印证了多维度参数约束体系的有效性。模块出厂前的全项检测确保参数一致性，接口的统一标准减少了现场连接误差，数字孪生预演规避了空间冲突导致的装配偏差，使不同场景下的质量稳定性得到有效保障。

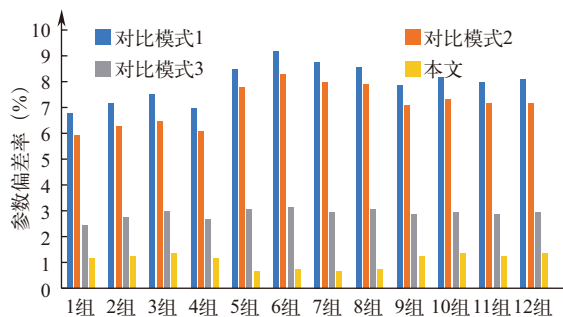


图5 不同施工模式下配电网工程质量稳定性对比

Fig. 5 Comparison of quality stability in distribution network projects under different construction modes

本文模式的标准化水平对比散点如图6所示，数据点密集分布于85~100分区间，具有较高的工序一致性与参数统一性。对比模式3的点分布在70~85分区间，因接口规范不全导致参数统一性不足；对比模式1和对比模式2的点分别集中在50~70分和45~65分，缺乏系统标准，

使工序与参数均处于较低水平。本文模式通过功能单元的清晰划分、接口的统一规范及全流程的刚性管控，实现了模块从预制到集成的标准化衔接，各环节操作有明确依据，数据可追溯，形成了闭环的标准化体系。

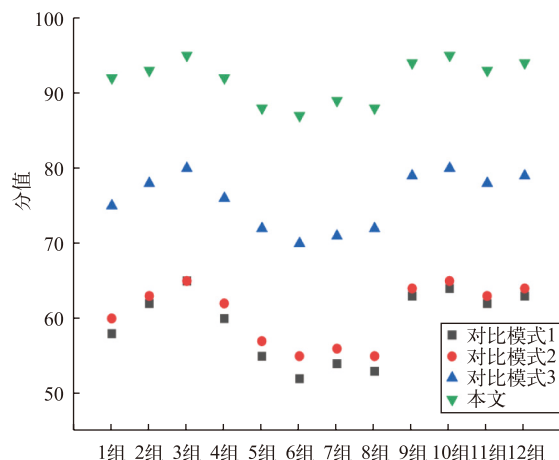


图6 不同施工模式下配电网工程标准化水平对比

Fig. 6 Comparison of standardization levels in distribution network projects under different construction modes

综上所述，本文所提出的基于模块化装配技术驱动的配电网施工标准化体系，在60个台区的测试中充分得到验证。其通过功能单元标准化划分、多维度参数约束及全流程管控，实现了施工效率的显著提升，有效保障了质量稳定性以及标准化水平。该体系解决了传统施工中效率低、质量波动大、标准不统一的问题，为配电网施工标准化提供了可推广的技术范式。

5 结束语

本文围绕模块化装配技术在配电网施工标准化建设中的应用展开系统探索，通过“功能单元划分-接口协同设计-全流程数字化管控”的技术路径，构建了可落地、可复制和可推广的标准化体系。该技术既实现了施工效率的显著提升，又保障了施工质量的高度稳定性，在复杂地形和高密度场景下优势尤为突出。其核心在于，将预制精度有效传导至现场装配质量，推动施工由“经验主导”向“数据驱动、流程刚性约束”转型。未来，应进一步推动模块标准统一与跨厂家互换

性研究，并强化其与BIM、数字孪生与智能运维的深度融合，以此构建模块协同共享平台，持续拓展模块化装配在配电网全生命周期管理中的应用深度与广度。

参考文献

[1] 权刚伟. 集成混合储能系统的新能源电网最佳配置与调度优化方法[J]. 电气应用, 2025, 44(5): 117-122.

[2] 汤哲. 城市配网中光储与柔直混联系统开发技术应用[J]. 电力设备管理, 2025(8): 101-103.

[3] 张益博. 考虑交通网和配电网耦合的灾后一体化抢修策略[J]. 电气应用, 2025, 44(4): 58-67.

[4] 袁简, 陈红平, 姜华, 等. 低压配网用级联型电池储能系统[J]. 电气自动化, 2025, 47(2): 8-10.

[5] 邓晖. 基于NSGAⅢ与TOPSIS的微电网冷热电联供系统最优经济调度[J]. 电气应用, 2025, 44(3): 33-40.

[6] 杨安琪. 分布式电源接入对配网继电保护的影响及改进技术研究[J]. 电力设备管理, 2025(5):

64-66.

[7] 舒海莲, 于哲, 李明翰. 配网保护控制装置调测平台的研究与应用[J]. 电工技术, 2025(4): 169-171.

[8] 刘岭, 隗笑, 张奇. 基于智能监测技术的低压配网不停电作业电弧检测系统设计[J]. 电气技术与经济, 2025(2): 391-394.

[9] 马雷, 双中豪, 常远, 等. 一种基于嵌入式的配网FTU单插件自动测试系统[J]. 电工技术, 2025(2): 128-130.

[10] 刘一涵, 王筱赞, 顾士刚, 等. 一种基于视觉引导的配网机器人自主搭线方法[J]. 电工技术, 2025(1): 85-88.

作者简介

盛志鹏（1993—），男，工程师，研究方向为电力工程电气。

（收稿日期：2025-06-01）