

输电塔装配式钢结构分析

刘毅

青岛强力钢结构有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i7.8203

[摘要] 针对输电线路工程中装配式钢结构连接节点可靠性问题,以 66kV 东丰五道岗变电站 SZ-1 型铁塔为研究对象,分析其装配式十字交叉钢梁基础与塔身连接节点的受力特性。通过有限元建模分析节点性能,并对比规范计算方法,发现原节点存在螺栓抗剪能力不足、规范计算与实际受力差异等问题。据此提出采用高强螺栓替换、增加承剪面等加固方案。经有限元分析与真型试验验证,加固方案有效提升了节点安全性能,为输电塔装配式钢结构节点的设计、加固及工程应用提供了理论与技术支撑。

[关键词] 输电塔; 装配式钢结构; 有限元分析; 加固方案

Analysis of prefabricated steel structure of transmission tower

Liu Yi

Qingdao Strong Steel Structure Co., LTD.

[Abstract] To address the reliability issues of prefabricated steel structure connection nodes in transmission line projects, this study focuses on the SZ-1 type tower at the 66kV Dongfeng Wudaogang Substation. The study analyzes the force characteristics of the prefabricated cross-steel beam foundation and the tower body connection nodes. Through finite element modeling, the performance of these nodes is analyzed, and the results are compared with standard calculation methods. It is found that the original nodes have insufficient shear resistance of bolts and discrepancies between standard calculations and actual forces. Based on these findings, the study proposes reinforcement measures, including replacing bolts with high-strength bolts and increasing the shear capacity surface area. Finite element analysis and full-scale tests confirm that these reinforcement measures significantly enhance the safety performance of the nodes, providing theoretical and technical support for the design, reinforcement, and engineering application of prefabricated steel structure nodes in transmission towers.

[Key words] transmission tower; prefabricated steel structure; finite element analysis; reinforcement scheme

引言

在输电线路工程中,装配式钢结构因施工高效、工艺便捷等特性应用渐广,但其连接节点可靠性成为工程安全核心问题。本文以 66kV 东丰五道岗变电站 SZ-1 型铁塔为研究对象,针对其装配式十字交叉钢梁基础与塔身连接节点,通过有限元建模分析实际受力特性,并与规范计算方法对比。研究发现原节点存在螺栓抗剪能力不足等问题,据此提出高强螺栓替换、增设承剪面等加固方案。研究成果为输电塔装配式钢结构节点的设计、加固及工程应用提供了理论参考与技术支撑。

1. 工程概况

本工程研究对象为 66kV 东丰五道岗变电站输电线路,此线路沿线土质以硬质粘土为主^[1]。沿线输电铁塔为《国网输电工程典型设计》中角钢塔部分的 66B04 型号,塔型为 SZ-1 型。该铁塔呼称高度为 15m,正、侧面根开尺寸达 2944mm,对角线长度为 4163mm,结构设计符合输电工程规范要求。铁塔基础设计方面,依据相关规范,考虑装配式十字交叉钢梁基础受力特性,确定底板厚度为 200mm,十字交叉钢梁高度取 1m,梁长为 6600mm,钢梁翼缘宽度 0.4m,翼缘及腹板厚度均为 0.02m。在有限元模型建立过程中,铁塔角钢采用线弹性模型,密度 7850kg/m³,泊松比 0.31,弹性模量 7.8×10^3 Mpa;装配式十字交叉钢梁基础同样选用线弹性模型,密度 7850kg/m³,泊松

比 0.25, 弹性模量 $206 \times 10^9 \text{Pa}$; 岩土模型采用 Mohr-Coulomb 本构模型, 土体重度 1633kg/m^3 、弹性模量 $10 \times 10^6 \text{Pa}$ 、内摩擦角 12° , 粘聚力 35kPa , 土体计算域设定为 $30 \text{m} \times 30 \text{m} \times 5 \text{m}$ 。

2.输电塔特点及种类

2.1 输电塔特点

输电塔架作为高压送电线路的核心支撑结构，具有以下显著特点：

(1) 结构形式上, 国内外普遍采用热轧等肢角钢材料, 并通过螺栓组装成空间杆系结构, 属于高耸柔性构筑物, 其高度与横向尺寸比值较大, 受力以横向荷载为主导, 竖向荷载包含塔体、导线、覆冰等自重及相关附加荷载, 荷载组合复杂且工况多样。

(2) 材料特性方面, 单角钢构件为单轴对称薄壁截面, 螺栓偏心连接易导致应力分布不均, 加之结构构造的多样性, 使精确分析受力性能难度较大。因此, 工程设计中需辅以真型试验验证其安全性, 凸显结构受力复杂性与分析难度。

(3) 设计方法上,我国现行规范已从容许应力设计法过渡到概率极限状态设计法,这种设计法的内力计算基于小变形和线弹性假定,采用空间桁架位移法。然而,对于新塔型及复杂工况,其计算结果与试验数据存在偏差,因此需通过真型试验来修正极限承载力^[2]。

2.2 输电塔种类

输电塔架按结构型式与受力特点可分为两类:

(1) 拉线式输电塔

该类型输电塔需依赖拉线维持受力平衡与稳定,一般应用于电压等级较低的输电线路,典型塔型包括上字型、猫头型等,其结构高度与刚度受拉线布置限制,对地形适应性较差。

(2) 自立式输电塔

该类型输电塔无需拉线即可保持稳定，具有占地少、地形适应性强、稳定性高等优势，广泛应用于高压及超高压线路。自立式输电塔按塔头构造与导线排列方式，可细分为门型（导线水平排列）、上字型（导线三角形排列）、干字型（导线三角形排列，带避雷线顶架）、猫头型（导线三角形排列，塔头呈猫头状）、酒杯型（导线水平排列，塔型似酒杯）等；按功能位置可分为直线塔（承受垂直荷载，导线拉力平衡）、转角塔（承受导线转角合力）、耐张塔（承受线路起止点不平衡拉力）；特殊场景下有大桥跨越塔（跨江跨海，高度达数百米，杆件采用钢管或双角钢十字形截面）和双回路塔（同时输送两路电力，导线呈鼓型或蝴蝶型排列）。其构件组成包括塔脚（固定支座，传递荷载至基础）、塔腿、塔身、横隔（间距为塔身平均宽度 2~2.5 倍，保证几何结构不变形）、横担、曲臂及顶架，杆件分为主材（主要受力，截面刚度大）、斜材（主腹杆，承受剪力）和辅助材（减少主材计算长度，桁架分析中常忽略受力）。

3.连接节点有限元分析

3.1 模型尺寸选取

装配式十字交叉钢梁基础系统的模型尺寸依据 SZ-1 型铁塔的根开及相关构件尺寸进行选取。根开对角线长度为 4613mm, 根据筏板构造要求, 肋梁高度应不小于 768.83mm, 设计时取保守值 1000mm, 即 $h=1\text{m}$ 。梁长依据规定的梁端伸出比例 (根开的 0.25~0.3 倍) 计算得出伸出长度为 1153.25mm 至 1248.9mm, 故梁总长度取为 6600mm。筏板板厚统一取值为 200mm。钢梁翼缘宽度取 $b=0.4\text{m}$, 翼缘及腹板厚度 $t=0.02\text{m}$ 。整个土体区域按 $30\text{m}\times 30\text{m}\times 5\text{m}$ 尺寸设定为有限元分析域, 并设置为单层均质土。该尺寸结合工程实际与地基承载力计算合理性得出, 兼顾了边界效应控制。模型中连接节点按 ZGU1 型输电塔实际图纸建模, 其中螺栓直径分别为 M42 (底板) 与 M16 (其余部分), 钢材材质为 Q235。节点结构模型参照图 2 中的节点立面图及节点平面图建立, 通过三维建模完整还原节点空间位置关系与连接构件几何特征。

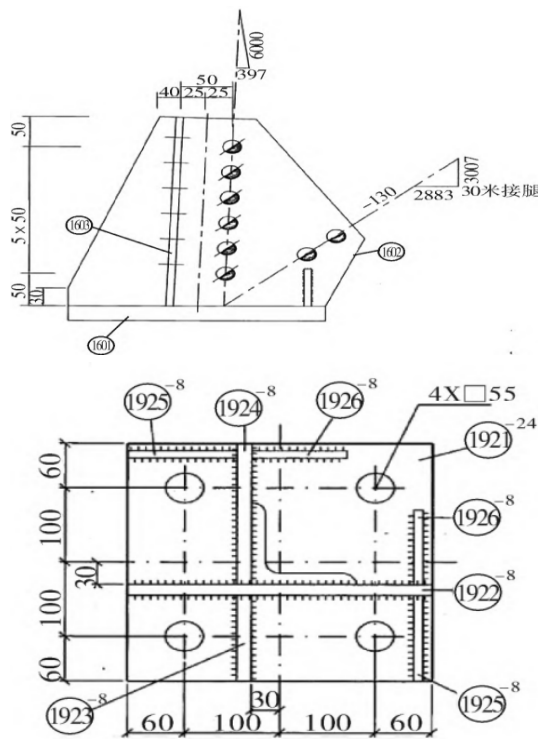


图 2 连接节点尺寸图

3.2 单元类型

有限元分析使用 ABAQUS 软件, 建模中选择适合各类构件的单元类型。由于主角钢与靴板构件为三维结构, 整体采用实体单元进行模拟。壳单元虽然适用于板件结构, 计算效率较高, 但对宽厚比要求较高, 实际构件中多存在宽厚比小于 10 的情况, 故不适用。所有螺栓、钢梁、加劲板、节点底板等结构部分均统一采用实体单元 (C3D8R) 进行建模, 使实验具备良好的力学行为模拟能力与计算稳定性。实体单元在处理节点几何复杂、力传导路径多样的模型中具有适应性强、结构连续性好等优点, 尤其适用于节点间存在多点接触与材料非线性情

况。实体单元支持多种接触定义及载荷组合设置，便于后续模拟中的接触非线性分析。此外，网格划分时对关键受力区域如连接螺栓处、角钢根部、梁翼缘与腹板交界区域进行局部加密处理，确保应力集中区域计算精度。整个模型网格控制在合理规模内，既保证了分析结果精度，也能兼顾计算效率。

3.3 材料属性与模型装配

本模型所用的材料主要包括钢材与土体两类。钢结构部分采用线弹性本构模型，其中角钢及钢梁等构件设定密度 $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ，泊松比 $\mu = 0.31$ ，弹性模量 $E = 7.8 \times 10^5 \text{ MPa}$ ；十字交叉钢梁采用 Q235 钢，设定泊松比 $\mu = 0.25$ ，弹性模量 $E = 206 \times 10^9 \text{ Pa}$ ，密度仍为 7850 kg/m^3 。地基土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型进行建模，其重度 $\rho = 1633 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量 $E = 10 \times 10^9 \text{ Pa}$ ，内摩擦角 $\phi = 12^\circ$ ，粘聚力 $c = 35 \text{ kPa}$ 。土层参数根据岩土勘察报告中各层参数，按厚度加权平均确定，并简化为均质单层以控制计算模型复杂度。装配过程中，各连接构件依照实际安装顺序组合，在螺栓、加劲板、底板、靴板和主角钢之间设定适当接触定义，确保各构件之间力传导关系准确。模型中对钢材构件进行合理组装定位，以确保构件间几何关系与力学边界关系准确一致。本研究结合各构件的结构特性和连接方式，整体装配过程中对局部构件设置基于节点编号的配对关系，便于后续接触定义与边界条件施加。

4. 规范计算对比

4.1 区格法计算底板厚度

依据原设计规范 SDGJ94—1990《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》，采用区格法计算节点底板厚度 t 。该方法将底板按靴板与加劲板划分区域，以区格为单元进行受力分析。计算公式为 $t \geq 11.13 \sqrt{\frac{T \times y_{\max}}{4b_{\min} \times f}}$ ，其中 T 为底板所受拉力， $y_{\max}$ 为底脚螺栓中心至主角钢的最大距离， $b_{\min}$ 为底板各区段最小宽度， f 为钢材抗拉强度设计值。此方法通过简化力学模型，将底板视为受弯薄板，以弯曲应力校核厚度，适用于常规受力工况下的初步设计计算。

4.2 屈服线法计算底板厚度

现行规范采用屈服线法计算底板厚度，该方法基于塑性力学理论，考虑底板屈服时的内力重分布特性。计算公式为

$$t = \max(t_1, t_2), \text{ 其中 } t_1 = 1.21 \sqrt{\frac{T f_y}{r_R L} \left(\frac{b_1}{y_1} - \frac{y_1}{b_1} + 2 \right)}, t_2 = 0.48 \sqrt{\frac{T f_y}{r_R y_2 b_2}}.$$

式中 T 为底板拉力， L 为区隔 I 加劲板长度， b_1 、 b_2 分别为区隔 I、II 宽度， y_1 、 y_2 为地脚螺栓中心至靴板距离， f_y 为钢材屈服强度， r_R 为抗力分项系数。

5. 加固方案设计优化及验证

5.1 加固方案结构设计

在加固方案结构设计方面，针对原 6.8 级螺栓抗剪不足问题，采用 10.9 级高强螺栓替换，单侧螺栓布置改为双侧，在原靴板对应位置开孔，新增螺栓与加固后十字角钢相连，靴板

单侧开设 2 个 M20 螺栓孔孔径 21mm，孔中心距边缘 42mm，孔间距 63mm。在原肢宽 110mm 主角钢内侧增设 $L100 \times 10 \times 350 \text{ mm}$ 角钢，与主角钢形成双承剪面，其底部与底板满焊焊缝高 8mm，E43 焊条，中部开 4 个 M16 螺栓孔 17mm 与原靴板连接，新增角钢表面喷砂除锈至 Sa2.5 级。

5.2 加固后有限元分析

加固后模型沿用双线性等向强化本构，10.9 级高强螺栓材料参数设置为抗拉强度 1000MPa，屈服强度 900MPa。新增加劲板与底板采用绑定约束，螺栓与孔壁接触设置为 0.02mm 过盈配合。网格划分在螺栓连接处加密，最小单元尺寸 6mm，整体模型单元总数增至 12.3 万个。施加与加固前相同荷载工况，最不利工况下主角钢上拔力逐步加载至 1045kN 时，连接螺栓出现剪切破坏，最大等效应力 985MPa，相较加固前承载力提升 35%，验证方案有效性。

5.3 真型试验设计与结果对比

试验按 1:1 比例制作未加固与加固后连接节点试件，试件主材采用 Q235B 钢材，螺栓规格与设计一致。在底板和靴板关键部位布置应变片与位移计：底板跨中及边缘布置 8 个应变片，靴板与主角钢连接处布置 4 个应变片监测应力；在主角钢顶端、底板四角设置位移计测量竖向位移，精度 0.01mm。试验采用单调静力加载，按预估极限荷载分级加载，每级荷载增量为预估极限值的 10%，当底板最大竖向位移达 1.5mm 或螺栓出现明显破坏时停止加载。试验结果显示，加固前后试件均在螺栓处发生剪切破坏，破坏形态与有限元模拟吻合，承载力实测值与有限元计算误差控制在 5% 以内，验证加固方案可靠性。

结语：

针对 66kV 东丰五道岗变电站 SZ-1 型铁塔装配式十字交叉钢梁基础与塔身连接节点可靠性问题，通过有限元建模分析其受力特性，对比规范计算发现原节点存在螺栓抗剪能力不足、规范计算与实际受力差异等问题。据此提出高强螺栓替换、增加承剪面等加固方案，经有限元分析与真型试验验证，方案有效提升节点安全性能。研究成果为输电塔装配式钢结构节点的设计、加固及工程应用提供了理论依据与技术支持，对保障输电线路安全运行具有重要工程实践价值。

【参考文献】

- [1]李牧.输电塔装配式钢结构基础数值模拟研究[J].科学技术创新, 2024, (16): 9-12.
- [2]刘强, 徐冰, 卢本初.输电线路塔架结构连接节点加固研究[J].粘接, 2024, 51(03): 136-140.
- [3]赵滇生.输电塔架结构的理论分析与受力性能研究[D].浙江大学, 2003.

作者信息：刘毅，青岛强力钢结构有限公司，1988.1，男，青岛市胶州，硕士，高级工程师，研究方向：（钢结构）工程管理。