

500kV 输电线路四分裂导线间隔棒电动专用扳手 创新设计与技术原理

石荣辉¹, 宋慧娟²

1. 国网江西超高压公司, 江西 南昌 330001

2. 南昌通源实业有限公司, 江西 南昌 330001

DOI:10.61369/EPTSM.2026070021

摘 要 : 针对500kV输电线路四分裂导线间隔棒传统安装工具, 依赖人工经验、安装精度低、自动化程度不足等问题, 以“提高500kV输电线路间隔棒安装一次成功率”为目标, 设计了四分裂导线间隔棒电动专用扳手。该工具通过弹舌机构模块化创新、电动传动系统优化、通用性结构设计三大核心突破, 解决了传统工具角度难控、人工干预多、适配性差的痛点。本文系统阐述该电动专用扳手的设计原理、创新点及技术价值, 结合机械力学公式与设计参数, 揭示其如何通过机械结构与电子控制的融合, 实现间隔棒安装从“经验主导”向“技术主导”的转变。

关 键 词 : 500kV 输电线路; 四分裂导线间隔棒; 电动专用扳手; 弹舌机构

Innovative Design and Technical Principles of the Electric Special wrench for Space Bars on Four-Walled Split Conductors in 500 kV Transmission Lines

Shi Ronghui¹, Song Huijuan²

1.State Grid Jiangxi Ultra-High Voltage Company, Nanchang, Jiangxi 330001

2.Nanchang Tongyuan Industrial Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330001

Abstract : Addressing the limitations of traditional installation tools for four-split conductor spacer bars on 500 kV transmission lines—such as reliance on manual experience, low installation accuracy, and insufficient automation—the electric specialized wrench for these spacers was developed with the goal of improving the first-time installation success rate. Through three key innovations: a modular spring tongue mechanism, an optimized electric drive system, and a versatile structural design, this tool overcomes the drawbacks of conventional tools, including difficult angle control, excessive manual intervention, and poor adaptability. This paper systematically explains the design principles, innovative features, and technical value of this wrench, and using mechanical formulas and design parameters, demonstrates how its integration of mechanical structure and electronic control enables a shift in spacer bar installation from being experience-driven to technology-driven.

Keywords : 500kV transmission line; quad bundle spacer damper; special electric wrench; spring tongue mechanism

引言

500kV 输电线路作为区域电网骨干, 承担大容量远距离输电核心任务, 其安全稳定直接关乎工业民生与社会经济。间隔棒是关键防护金具, 核心功能为固定四分裂导线400–500mm标准间距、抑制 $\pm 50\text{mm}$ 内次档距振荡及鞭击, 避免导线晃动致绝缘损伤或线路故障。但传统手动棘轮扳手存在三大固有缺陷: 一是弹舌开合角度人工调节易偏差, 导致主力杆与弹舌受力失衡, 引发间隔棒卡顿或错位; 二是手动传动扭矩输出不连续, 夹紧力一致性差, 误差可达 $\pm 15\%$; 三是适配性单一, 0.8–1.5cm 不同孔径间隔棒需更换扳手, 增加运维成本与作业复杂度。

为解决上述问题, 研发团队结合间隔棒安装力学需求与场景特性, 重构设计逻辑, 研发四分裂导线间隔棒电动专用扳手。该工具并非传统工具简单升级, 而是从机械结构、传动原理、控制逻辑三维度系统性创新, 融合材料力学、机械传动、自动控制等理论, 实现安装精度与效率双重突破。

作者简介:

石荣辉 (1982.10–), 男, 汉族, 江西省萍乡市人, 本科, 职称: 高级工程师 (副高), 研究方向: 输电运检;

宋慧娟 (1978.10–), 女, 汉族, 吉林省珲春市人, 本科, 职称: 助理工程师, 研究方向: 变电运维。

一、传统工具的原理性缺陷与力学矛盾

（一）弹舌角度偏差的受力失衡问题

传统手动扳手弹舌为可调节式，与主力杆夹角 α 依赖手感，其力学矛盾可通过夹紧力公式量化：修正后夹紧力 $F=T/(L_e \cdot \mu)$ 成立的前提是 $\alpha=90^\circ$ ，此时力臂稳定。若 α 偏离 90° （如 80° 或 100° ），会产生侧向分力 $F_s \approx \pm 0.176F$ ： $\alpha=80^\circ$ 时，侧向分力导致接触点偏移、压强增大，易使棒爪失效； $\alpha=100^\circ$ 时，负向分力造成主力杆卡顿，需额外消耗 30%–50% 推力，增加劳动强度。高空作业中，操作人员受视线、空间限制， α 偏差概率超 45%，导致安装一次成功率低于 75%。

（二）手动传动的扭矩输出缺陷

传统工具为手动棘轮传动，扭矩依赖人力，力学缺陷显著：棘轮齿距 5° 导致扭矩间歇输出形成脉冲，操作人员发力 300N、力臂 40cm 时，传动效率 η 随操作频率波动 0.4–0.8（体力下降时偏低），实际扭矩波动 $48\text{--}96\text{N}\cdot\text{m}$ ，远超 $30\text{--}50\text{N}\cdot\text{m}$ 安装标准。四分裂间隔棒需分 4 次操作，扭矩偏差 $\pm 15\%$ ，夹紧力最大差值 20N，劳动强度高、效率低。

二、结构适配性的通用性局限

传统扳手主力杆与螺旋杆一体化，直径固定仅适配单一棒爪孔径。500kV 线路需储备 4 种规格扳手，存在两大问题：一是备件成本高，单套采购价 200 元，且规格磨损率差异大，产生年均更换成本；二是作业效率低，更换需拆卸传动组件，单次耗时 20 分钟，单日安装 20 个间隔棒（含 3 种规格）累计更换耗时 400 分钟。

（一）弹舌机构的模块化创新（ 90° 固定角 + 自动触发）

弹舌作为安装精度的核心执行部件，设计围绕“角度固定化”“动作自动化”展开，结合材料力学与机械控制原理，解决传统工具的角度偏差问题。

1. 90° 固定角的力学设计与参数计算

基于间隔棒安装的受力需求，弹舌与主力杆夹角被设计为 $90^\circ \pm 2^\circ$ 固定值，通过“定位销 + 预紧弹簧”结构实现角度锁定，其关键参数计算如下：

定位销强度校核：冲击载荷由动量定理算出，选用 45 号钢（ $\sigma_s=345\text{MPa}$ ）、直径 5mm，应力远小于 σ_s ，满足强度要求。预紧弹簧设计：需提供足够预紧力抵抗振动，取弹振相关参数，选用 60Si2Mn 圆柱螺旋弹簧，钢丝直径 2mm、中径 12mm，满足刚度要求。 90° 固定角设计使夹紧力公式 $F=T/(L_e \cdot \mu)$ 完全成立： $L_e=8\text{mm}$ 、 $\mu=0.3$ ， $T=30\text{N}\cdot\text{m}$ 时 $F \approx 12500\text{N}$ ，远超夹紧需求，确保安装牢固。

2. 自动触发收缩的控制原理与参数

创新设计“机械触发 + 电磁控制”的自动收缩装置，实现弹舌“弹出 – 收缩”无需人工干预，其工作原理与关键参数如下：

触发顶针力学设计：顶针直径 $d_t=3\text{mm}$ ，触发压力触（需小于棒爪孔壁抗压强度压，避免损伤棒爪）。顶针行程 $s_t=5\text{mm}$ ，

触发后推动微动开关（型号 SS-5GL2，动作力开），确保开关可靠闭合。电磁收缩系统计算：收缩时需电磁力克服弹簧预紧力弹，电磁力公式为 $F=B^2 A / (2\mu_0)$ （ $B=0.5\text{T}$ 为磁感应强度， $A=15\text{mm}^2$ 为铁芯截面积， $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$ 为真空磁导率），代入得电，大于弹，确保定位销可靠拔出。控制时序设计：触发信号延迟时间延（避免瞬时碰触误触发），电磁装置通电时间通（确保弹舌完全收缩），复位弹簧刚度 $k_r=1\text{N/mm}$ ，收缩行程 $s_r=10\text{mm}$ ，复位力 $F_r=k_r \cdot s_r=10\text{N}$ ，保证弹舌快速折叠入主力杆。

3. 高强度耐磨材料的选型与性能参数

弹舌材料选用“Cr–Mo–V 合金结构钢”（成分：C0.38%–0.45%，Cr0.9%–1.2%，Mo0.15%–0.25%，V0.15%–0.25%），其力学性能参数如下：屈服强度 $\sigma_s \geq 800\text{MPa}$ ，抗拉强度 $\sigma_b \geq 1000\text{MPa}$ ，可承受安装时的瞬时冲击载荷。

（二）电动传动系统的优化（定扭矩 + 高效传递）

电动传动系统是实现扭矩精准输出的核心，设计围绕“定扭矩控制”“高效传递”展开，结合电机学与机械传动原理，解决传统手动传动的扭矩波动问题。

1. 定扭矩电机的选型与参数计算

选用“无刷直流定扭矩电机”，核心参数基于间隔棒安装需求推导：额定扭矩计算：间隔棒安装所需最大扭矩 $T_{\max}=50\text{N}\cdot\text{m}$ ，电机通过减速齿轮传递扭矩，减速比电机（电机为电机额定扭矩）。取电机额定扭矩电机，则 $i=1.550 \approx 33.3$ ，选用行星齿轮减速器（传动效率减），实际输出扭矩实电机减，满足 $T_{\max}=50\text{N}\cdot\text{m}$ 需求（预留 7% 余量）。

电机功率计算：电机额定转速 $n=3000\text{r/min}$ ，功率电机，选用 0.5kW 电机，额定电压 $U=18\text{V}$ ，额定电流 $I=UP \approx 27.8\text{A}$ ，配备 8.0Ah 锂电池（放电倍率 1C，持续放电电流 8A，需并联 3 组电池，总容量 24Ah，单次充电可支持分钟作业，满足单日 120 个间隔棒安装需求）。

扭矩精度控制：电机内置扭矩传感器（精度 $\pm 0.5\%$ ）与 PID 控制系统，PID 参数通过试凑法确定：比例系数 $K_p=2.5$ ，积分时间 $T_i=0.5\text{s}$ ，微分时间 $T_d=0.1\text{s}$ ，确保扭矩偏差控制在 $\pm 1\%$ 以内（如设定扭矩 $30\text{N}\cdot\text{m}$ ，实际输出范围 $29.7\text{--}30.3\text{N}\cdot\text{m}$ ）。

2. 传动系统的效率与强度校核

传动路径为“电机 → 行星减速器 → 主力杆 → 弹舌”，关键部件强度与效率计算如下：

行星齿轮强度校核：太阳轮齿数 $Z_1=18$ ，模数 $m=2\text{mm}$ ，分度圆直径 $D_1=mz_1=36\text{mm}$ ，齿宽 $B=15\text{mm}$ 。传递扭矩齿电机（3 个行星轮均布受力），齿面接触应力齿（ $ZE=189.8\text{MPa}^{1/2}$ 为弹性系数， $ZH=2.5$ 为接触系数， $u=5$ 为传动比），代入得 $\sigma_H \approx 350\text{MPa}$ ，小于 20CrMnTi 钢的接触疲劳极限 $\sigma_{Hlim}=580\text{MPa}$ ，安全系数 $SH=\sigma_H/\sigma_{Hlim} \approx 1.66$ 。主力杆强度校核：主力杆直径 $d_m=20\text{mm}$ ，材料为 40Cr（ $\sigma_s=785\text{MPa}$ ），传递扭矩 $T_m=46.5\text{N}\cdot\text{m}$ ，扭转切应力 $\tau=\pi dm^3/16 T_m \approx \pi \times 20^3/16 \times 46.5 \times 10^3 \approx 29.5\text{MPa}$ ，小于许用切应力 $[\tau]=2.5\sigma_s \approx 314\text{MPa}$ ，满足强度要求。传动效率计算：总传动效率总电机减键轴承（电机为电机效率，键为键连接效率，轴承为滚动轴承效率），代入得总，即扭矩传递损耗仅

17%，远低于传统手动传动的40%–60%损耗。

3. 双模式兼容的切换原理

设计“电动–手动”双模式切换机构，通过离合器实现动力切换，关键参数如下：

离合器类型：牙嵌式离合器，齿数 $z=12$ ，齿形为梯形（齿高 $H=3\text{mm}$ ，齿顶宽 $B=2\text{mm}$ ）；切换力切（操作人员手动按压即可实现），离合器结合时接触应力接切，小于材料许用应力；手动传动效率手，当电机故障时，操作人员发力手，扳手力臂手，手动扭矩，满足应急安装需求。

（三）通用性结构设计（可套装+标准化接口）

通用性结构是降低运维成本、提升作业效率的关键，设计围绕“螺旋杆可套装”“接口标准化”展开，结合机械设计基础与公差配合原理，解决传统工具的适配性问题。

1. 可套装螺旋杆的尺寸与公差设计

主螺旋杆与适配套管采用“键槽配合”，确保扭矩传递无相对滑动，关键尺寸与公差计算如下：

主螺旋杆设计：直径 $d_0=8\text{mm}$ （适配最小棒爪孔径 0.8cm ），材料为35CrMo（ $\sigma_s=930\text{MPa}$ ），螺纹规格为 $M8\times 1.25$ （粗牙螺纹，螺距 $p=1.25\text{mm}$ ），螺纹强度校核：拉伸应力 $\sigma=\pi d_1 24F$ （ $d_1=7.188\text{mm}$ 为螺纹小径， $F=12500\text{N}$ 为夹紧力），代入得 $\sigma\approx 308\text{MPa}$ ，小于 σ_s ，安全系数 $S=3$ 。适配套管设计：配备3种规格套管（直径 $d_1=10\text{mm}$ 、 $d_2=12\text{mm}$ 、 $d_3=15\text{mm}$ ），材料为6061铝合金（密度 $\rho=2.7\text{g/cm}^3$ ，重量仅为钢套管的 $1/3$ ），壁厚 t 根据强度要求计算：套管承受扭矩套，切应力套（ r 为套管外半径，外内为极惯性矩，内为套管内径）。以 $d_1=10\text{mm}$ 套管为例， $r=5\text{mm}$ ， $I_p\approx 32\pi(10^4-8.14)\approx 780\text{mm}^4$ ， $\tau=78046.5\times 103\times 5\approx 298\text{MPa}$ ，小于6061合金的许用切应力 $[\tau]=300\text{MPa}$ ，壁厚外内，满足要求。

键槽配合公差：主螺旋杆与套管的键槽采用“过渡配合”（公差等级 H9/f8），键规格为 $6\times 6\times 20$ （GB/T1096），键槽宽度公差：主螺旋杆键槽（H9）为 $60+0.036\text{mm}$ ，套管键槽（f8）为 $6-0.036-0.015\text{mm}$ ，配合间隙 $0-0.072\text{mm}$ ，确保扭矩传递无滑动，同时便于套装与拆卸。

三、技术优势与应用价值（基于原理推导）

（一）技术优势：从原理层面提升安装精度与效率

角度精度： 90° 弹舌定位销+弹簧预紧，偏差 $\pm 2^\circ$ （较传

统 $\pm 10^\circ$ 提升80%）；自动收缩使人工干预减60%，失误率从45%降至5%以下。扭矩精度：定扭矩电机+PID控制，偏差 $\pm 1\%$ （较传统 $\pm 15\%$ 提升93%）；四分裂同步安装夹紧力差值 $\leq 2\text{N}$ ，满足 $\leq 5\%$ 一致性要求。作业效率：电动效率为手动3倍（手动8–10个/时，电动25–30个/时）；通用结构减更换时间，单日作业从8小时缩至5小时，提升37.5%。

四、推广应用前景与技术迭代

（一）跨电压等级推广的原理适配性

该工具核心创新（ 90° 弹舌、定扭矩传动、可套装结构）具备跨电压等级适配能力：220kV 线路更换减速比 $i=22$ 的电机，即可满足 $20-30\text{N}\cdot\text{m}$ 扭矩需求；500kV 线路更换额定扭矩电机 $i=35$ 减速比，适配 $60-80\text{N}\cdot\text{m}$ 扭矩要求。

技术迭代方向如下：智能化升级搭载 LoRa 模块（5km 传输）采集安装数据，轻量化升级采用碳纤维材料、扁平电机，工具重从 2.5kg 降至 1.5kg ，体积缩小30%；远程控制升级配备2.4GHz 无线遥控（100m 距离），地面操控消除高空作业风险。

五、结论

本工具融合机械力学、电机控制、材料科学多学科理论，创新点突出： 90° 固定角弹舌根治角度偏差，定扭矩电动传动优化实现扭矩精准输出，套装螺旋杆公差配合提升通用性。创新依托明确机械公式与设计参数，推动安装技术从“经验主导”转向“技术主导”。

工具提升500kV 线路间隔棒安装精度与效率，为超高压运维工具自动化升级提供可复制范式。未来经智能化、轻量化、远程控制迭代，将进一步拓展技术价值与应用范围，为电力行业“降本增效、安全生产”提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 董吉涛. 电力金具手册 [M]. 北京：中国电力出版社，2018.
- [2] 耿景都. GB50233-2014 110 ~ 750KV 架空输电线路施工及验收规范 [M]. 北京：中国计划出版社，2015.
- [3] 张金龙、李建波. 一种输电分裂导线间隔棒拆装工具的设计与应用 [J]. 设备管理与维修，2024（22）：67–69.