

智能式自动盘绕镀锌铁线装置的研制与应用

罗良根，饶 剑，方渝渝，王小明，毛岿炜，饶 琦

(国网江西省电力有限公司德兴市供电公司，江西 德兴 334200)

摘要 传统手工盘绕镀锌铁线存在效率低、线圈不标准等问题。本文提出一种基于智能控制的自动快速盘镀锌铁线装置，通过机械自动化与计算机数控（CNC）系统相结合，实现铁线的自动校直、定长盘绕、智能截断等功能。该系统具备过载保护、缺料报警、异常停机等安全功能，可显著提高铁线圈的制作效率与标准化程度，适用于电力施工中铁线预处理环节的集中化、自动化生产。本文详细介绍了该装置的机械结构设计、控制系统架构、关键技术难点及解决方案，并对其应用前景进行了展望，以期为相关人员提供借鉴。

关键词 配电网施工；镀锌铁线；智能盘线；多轴控制；自动化装置

基金项目：国网江西省电力有限公司科技项目资助《一种智能控制自动快速盘镀锌铁线的装置》项目编号：ERP: 5218C3250001。

中图分类号：TM75；TM76

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.001

0 引言

随着新型电力系统建设的深入推进，配电网规模持续扩大，2023年全国配电网投资规模已超过3 000亿元^[1]。在电力架空线路中，凡承受固定性不平衡荷载比较显著的电杆，都需要安装相应的拉线增加稳定性，其中如终端杆、转角杆以及跨越杆等，都需要进行拉线的安装^[2]。根据《架空配电线路设计规范》（DL/T 601-2021）要求，拉线通常采用镀锌铁线绑扎制作，施工前需要将铁线预先盘绕成圈状^[3]。

现人工盘镀锌铁线的盘绕存在问题：一是效率低，无法满足大规模化施工的需求，成为施工进度的瓶颈。二是质量不均，盘出的线圈形状不规则，直接影响后续绑扎的紧密性和受力均匀性。三是标准化困难，难以精确控制线圈的圈数，工艺一致性差。因此，开发自动化、智能化的盘线装置具有重要的现实意义和应用价值。本文旨在研究智能控制自动快速盘镀锌铁线的装置，通过机械自动化与智能控制系统的结合，实现铁线盘绕的标准化、高效化和集中化管理。

1 研究现状

目前，国内外在金属线材自动化处理方面已有相关研究。如钢丝绳制造、电缆编织等领域，已广泛应用自动化设备进行线材的放线、校直、缠绕等作业。但对电力施工中镀锌铁线盘绕的专用设备尚未见报道。近年来，智能制造技术不断发展，PLC技术在电动机控制中能够实现电动机的启停、速度控制和位置控制。通过PLC与电动机之间的连接，PLC可以发送控制信号

来控制电动机的运行状态^[4]，实现线材的精确控制。为开发智能盘线装置提供了技术支撑，因此本研究具有可行性且应用前景广阔。

2 智能式自动盘绕镀锌铁线装置设计与工作原理

2.1 总体结构设计

装置由机械系统与智能控制系统两大部分组成。机械系统主要包括线架、送线箱、机架、滑块、刀具等部件；智能控制系统采用CNC工控电脑，实现对机械动作的精确控制与状态监测。系统工作流程如下：将镀锌铁线置于线架上，经送线箱引入校直机构；校直后的铁线经送线轴输送至成型区域；滑块带动曲线规进行旋绕成型；最后由刀具进行截断，完成整个盘线过程。

2.2 系统架构设计

装置由五大系统构成：一是放线系统，采用磁粉制动器控制张力的主动放线机构。二是校直系统，为八辊轮渐进式校直机构，设有V型槽。三是送线系统，伺服电机驱动的精密送线机构。四是盘绕系统，三轴联动的曲线规盘绕机构。五是控制系统，基于PLC和触摸屏的智能控制系统。

2.3 工作原理

将镀锌铁线放置在线架上，通过导向装置引入送线箱；铁线经过校直机构校直后的铁线通过Y轴（送线轴）输送至机器前部；X轴（滑块轴）上的曲线规将铁线盘为圆形；通过CNC系统控制成型圈数和直径，达到设定值后停止盘绕；刀具机构进行截断操作，完成一个线圈的制作；系统自动复位，准备下一个工作

循环。在整个过程中，CNC系统实时监控各执行机构的运行状态，实现无料、断料自动停机和故障报警功能。

3 智能式自动盘绕镀锌铁线装置项目研究的关键技术难点

3.1 镀锌层保护性校直技术

实现校直力的精准控制，镀锌铁线 $2.0 \sim 3.5 \text{ mm}^2$ 具有一定刚性，若校直轮的压力过小或过大，就会发生回弹或塑性变形，还会刮擦镀锌层，降低铁线的耐腐蚀性能。校直机构需要具备自适应调节能力，这对压力调节系统的响应速度与控制精度提出了较高要求。提升校直轮的结构设计，易造成局部应力集中；若采用V型槽结构，无法适配不同线径的铁线。因此，需要设计一种可调节槽型角度、表面耐磨且具有一定弹性的校直轮结构，实现校直力的实时优化。

3.2 铁线圈成型标准自动化及规格参数控制难点

铁线圈成型的标准化难点有两个方面：一是线圈成型的轨迹控制难度大。铁线圈的成型质量取决于曲线规的运动轨迹精度，若轨迹控制不准确，易出现线圈直径忽大忽小、圈与圈之间间距不均等问题。特别是对于截面较大的 3.5 mm^2 铁线，其扭矩更大，需要控制系统具备较强的抗干扰能力，实时补偿扭矩产生的轨迹偏差。二是多轴联动的协调性要求高。装置的送线(Y轴)、滑块运动(X轴)、刀具切断等动作需要严格协调：送线速度需与滑块的旋转速度匹配，避免出现铁线堆积或拉伸；切断动作需在线圈成型完成的瞬间执行，且切断位置需精准控制，确保线圈的末端平整。

3.3 智能控制与机械联动能力难点

智能控制与机械联动难点包括三个方面：一是参数智能设定的实现。建立基于大量实验数据的参数数据库，并开发智能推荐算法，实现参数的自动匹配与优化，能根据铁线截面规格与施工需求，自动推荐最优参数；同时，具备参数记忆功能，减少重复设置。二是机械动作的协同性控制。要求控制系统具备高精度的时序控制能力，确保各机械部件的动作衔接无缝，不能出现铁线卡滞、线圈变形等问题。三是大截面铁线扭矩的克服。 $2.0 \sim 3.5 \text{ mm}^2$ 的镀锌铁线在盘绕过程中会产生较大扭矩，若机械结构的刚性不足或驱动力不够，易导致线圈成型不标准。因此，选用高扭矩的伺服电机，并通过控制系统的扭矩补偿算法，实时调整驱动力，克服铁线扭矩带来的不利影响。

4 智能式自动盘绕镀锌铁线装置主要研究内容

4.1 镀锌铁线进料校直机构的研制

针对进料校直机构的技术难点，将从三个方面开展：一是校直轮组的结构设计。采用多组可调节V型

校直轮，通过精密丝杠调节V型槽的角度，实现 $2.0 \sim 3.5 \text{ mm}^2$ 不同线径铁线的适配；校直轮表面采用聚氨酯材料，其硬度设定为邵氏A85-90，既具备足够的耐磨性，又能避免刮伤镀锌层。二是压力自适应调节系统的开发。在每组校直轮上安装微型压力传感器，实时采集校直压力数据；当检测到铁线弯曲程度增大时，系统自动增大校直压力；当检测到压力超过设定阈值（根据镀锌层附着力实验确定为50 N）时，立即降低压力，避免镀锌层损坏。三是校直机构的动态仿真与优化。利用ANSYS软件建立校直机构的有限元模型，分析校直轮压力、转速等参数对校直效果与镀锌层完整性的影响；通过仿真优化校直轮的排列间距、压力调节范围等参数，确保校直机构在满足校直精度（直线度误差 $\leq 0.5 \text{ mm/m}$ ）的同时，镀锌层的损坏率控制在1%以内。

4.2 盘铁线装置各机械自动化联动的研制

机械自动化联动系统的研制的内容包括：一是机械部件的结构优化。滑块组件采用滚珠丝杠传动结构，传动精度控制在 0.01 mm 以内，确保曲线规的运动轨迹精准；送线箱采用双轮驱动结构，送线轮表面设置防滑纹路，避免出现打滑现象；刀具组件选用高速钢材质的切断刀，采用斜切结构，减少切断时的冲击力，确保铁线切口平整。二是多轴联动控制系统的开发。多轴联动控制可实现亚微米级的定位精准^[5]，构建X轴、Y轴及刀具轴的多轴联动控制平台；开发基于脉冲控制的运动控制算法，实现各轴之间的位置同步与速度匹配；通过触摸屏设计人机交互界面，可实时显示参数，支持手动运动参数。三是联动时序的优化与调试。通过搭建实验平台，测试不同参数下各机械动作的响应时间与协同效果；优化送线速度、滑块旋转速度、切断延迟时间等时序参数，确保各动作的衔接时间误差控制在0.05秒以内；开发异常处理程序，自动调整动作的时序，避免出现卡料等故障。

4.3 一体化工控电脑系统研究

一体化工控电脑系统研究内容包括：一是CNC控制软件的开发。基于Windows CE操作系统，采用C#语言开发控制软件，具备参数设置模块，支持圈数、圈径、线径等参数的输入与保存，可存储100组以上常用参数；运动控制模块，通过G代码指令控制各轴的运动轨迹，实现精准定位；状态监测模块，实时采集电机电流、编码器位置、压力传感器等数据，通过图表形式直观显示。二是安全保护系统的设计。在硬件层面，在电机回路中安装过载保护器，当电流超过额定值1.2倍时自动切断电源；在软件层面，操作信号和保护信号均引入PLC控制系统^[6]，可识别断料、

卡料、线架异常等 10 余种故障类型，并通过声光报警与界面提示反馈；同时，设置急停按钮，在紧急情况下可强制停机。

4.4 智能盘线装置的试制与试点应用

在完成上述研究内容的基础上，开展装置的试制与试点应用，具体工作包括：一是装置的试制与组装。根据设计方案，加工制作校直轮、滑块组件、机架等机械部件，采购伺服电机、CNC 控制器、传感器等核心元器件；按照模块化原则进行装置组装，总装完成后进行机械精度调试，确保各轴的定位精度、重复定位精度符合设计要求。二是性能测试与优化。从效率、精度、稳定性三个维度开展测试：在效率测试方面，连续生产 100 组 $\Phi 100$ mm、10 圈的铁线圈，统计单组平均生产时间，验证是否达到 30 秒以内的设计目标；在精度测试方面，随机抽取 50 组生产完成的铁线圈，使用游标卡尺测量圈径误差，确保圈径误差 ≤ 1 mm、圈数误差为 0；在稳定性测试方面，记录故障发生次数与类型，确保故障发生率 $\leq 0.5\%$ 。根据测试结果，对存在的问题进行针对性优化。三是试点应用与效果评估。选择 2~3 个配电网改造施工现场作为试点，记录装置的运行数据；通过问卷调查、现场访谈等方式收集施工人员的使用反馈，了解装置的操作便捷性等问题，进一步完善装置的结构设计与控制软件，形成最终的产品定型方案。

5 智能式自动盘绕镀锌铁线装置创新点与技术优势

5.1 技术创新

首次将多轴联动控制技术应用于镀锌铁线盘绕加工，实现了加工过程的数字化和智能化；开发了镀锌层保护性校直机构，在保证校直效果的同时最大限度保护铁线表面质量；提出了基于电子凸轮的多轴同步控制策略，解决了送线与盘绕的精确同步问题；设计了模块化系统架构，使装置具有良好的可扩展性和维护性。

5.2 技术优势

与传统手工方式相比，该装置具有以下优势：生产效率提高 5~8 倍，单班产能可达 400 圈；产品合格率达到 99.5% 以上，质量一致性显著提升；完全杜绝人工操作的安全隐患；降低对操作人员的技能要求。

6 智能式自动盘绕镀锌铁线装置应用效益分析

6.1 经济效益

以某地市供电公司为例，年需拉线铁线圈约 10 万只。采用人工盘绕，需要 6 名熟练工人，年人工成本约 72 万元。采用智能盘线装置后，仅需 2 名普通工人

操作，年人工成本降至 24 万元，设备投资回收期不到 1 年。此外，标准化产品减少材料浪费，年可节约铁线材料约 15%。

6.2 社会效益

(1) 提升施工质量：标准化产品保证拉线绑扎质量，提高线路运行可靠性；(2) 提高应急响应速度：预制件模式缩短故障修复时间；(3) 促进产业升级：推动电力施工行业向机械化、自动化方向发展；(4) 改善工作环境：降低劳动强度，提升职业健康水平。

6.3 推广应用前景

本项目研制的智能盘线装置主要应用于以下场景：一是架空电力线路施工场景。针对终端杆、转角杆、跨越杆等电杆的拉线绑扎需求，装置可批量制作标准统一的镀锌铁线圈，直接供应给施工现场，解决手工盘线效率低、质量差的问题。二是电力运维检修场景。在电力线路运维检修过程中，经常需要更换拉线，智能盘线装置制作的标准铁线圈可提前仓储，运维检修班组可按需领用，缩短现场作业时间，提高检修效率。

7 结束语

本文提出的智能式自动盘绕镀锌铁线装置，有效解决了传统人工盘线存在的各种问题，实现了镀锌铁线圈加工的自动化、标准化。装置采用先进的控制技术和精密的机械结构，能够适应不同规格铁线的加工需求，产出高质量的标准线圈。实际应用表明，该装置具有操作简便、生产效率高、产品质量好等优点，显著提升了配电网施工的技术水平和工程质量。该装置的成功研制和应用，为配电网施工提供了一种先进的工器具解决方案，对推动电力行业的技术进步和产业升级具有积极意义。

参考文献：

- [1] 国家能源局. 新型电力系统发展蓝皮书 (2023)[R]. 北京：国家能源局, 2023.
- [2] 周云林. 电力线路拉线的设计及安装研究 [J]. 风景名胜, 2021(01):42.
- [3] 国家能源局. 架空配电线设计规范 (DL/T 601-2021)[S]. 北京：中国电力出版社, 2021.
- [4] 张俊青. PLC 技术在机械电气自动化控制中的应用探索 [J]. 中国机械, 2023(21):74-77.
- [5] 翟跃林. 面向智能制造的复杂机械系统多轴联动控制技术 [J]. 南方农机, 2025(07):122-125.
- [6] 尚玉廷. 基于 PLC 和触摸屏的长 U 弯管机控制系统设计及实现 [J]. 机电信息, 2023(20):31-37.