

绝缘绳高精度全自动检测装置的研制

(浙江嘉恒科创有限公司)

一、背景与挑战

1.1 行业发展刚需

随着新型电力系统建设全面提速，全网带电检修、常态化线路运维作业体量持续扩张，绝缘绳作为高压作业核心绝缘防护器具，整体保有量、年度使用频次逐年攀升。绝缘绳长期暴露在户外高温、雨水冲刷、粉尘附着、化学腐蚀等复杂工况下，极易产生表层磨损、细微裂纹、内部织带暗伤等肉眼难以分辨的隐性缺陷。若未完成合规检测即投入现场作业，极易诱发高压触电、高空坠落等恶性安全事故，直接威胁一线运维人员生命安全与电网持续稳定运行。

依据 DL/T 1476-2023《电力安全工器具预防性试验规程》强制要求，所有在用绝缘绳必须定期完成外观缺陷筛查、尺寸参数检测、绝缘力学试验，检测合格后方可投入现场使用。当前各市级供电单位、第三方专业检测机构绝缘绳年度送检总量持续走高，分批次集中送检成为行业常态，传统人工检测模式产能、精度均无法匹配当下大批量检测需求，行业亟需一套自动化、高精度、标准化成套智能检测装备。

1.2 传统检测模式现存核心问题

现阶段国内绝大多数检测机构仍沿用人工分段检测作业模式，整套检测流程高度依赖持证人员全程操作，在检测效率、检测质量、运营管理三个维度均存在系统性短板，难以适配电力行业数字化、规模化安全管控发展趋势。

在检测效率层面，绳体外观排查、尺寸手工测量、缺陷人工判定、数据录入、报告编制为全人工工序，依托嘉兴检测中心 2023—2024 年度绝缘绳检测台账数据，对累计 2000 根送检样本检测过程复盘分析：100 根绝缘绳全项检测平均耗时约为 120.6h，成为制约整体检测产能的核心瓶颈，在大批量集中送检的场景下极易出现检测积压、交付延期的现象。

绝缘绳检测每百根耗时 统计表

组别	总量（根）	总耗时	每百根耗时
1	162	195.7	120.8
2	121	144.5	119.4
3	152	183.8	120.9
4	185	224.0	121.1
5	170	205.5	120.9
平均值			120.6

在检测质量层面，传统卡尺接触式测量会挤压破坏绝缘绳编织结构，造成不可逆损伤；依靠人眼逐米排查缺陷的方式，受人员从业经验、连续作业疲劳、现场光照条件限制，一些微小隐性损伤可能出现漏判、误判现象。

在运营管控层面，批量检测需持续增配专业检测人员，人工薪酬、技能培训、现场管理综合成本较高；且检测质量随人员轮岗、作业状态易产生波动，难以形成统一标准化作业流程。

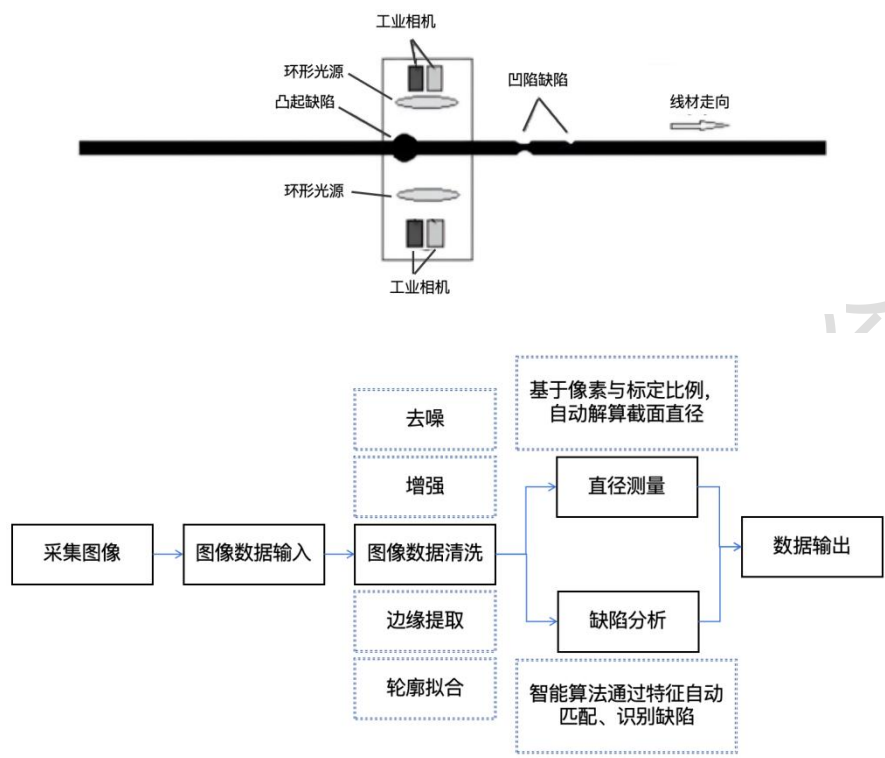
二、解决方案与核心创新点

2.1 总体研发思路与技术借鉴路径

本项目以电力行业大批量绝缘绳高精度、短周期检测刚性需求为研发出发点，确立了“先进技术适配行业场景、模块化集成落地应用”的总体研发思路，围绕柔性长绝缘人工检测效率低、测量易损伤、微小缺陷漏判三大核心行业瓶颈开展成套智能检测装备自主研发。

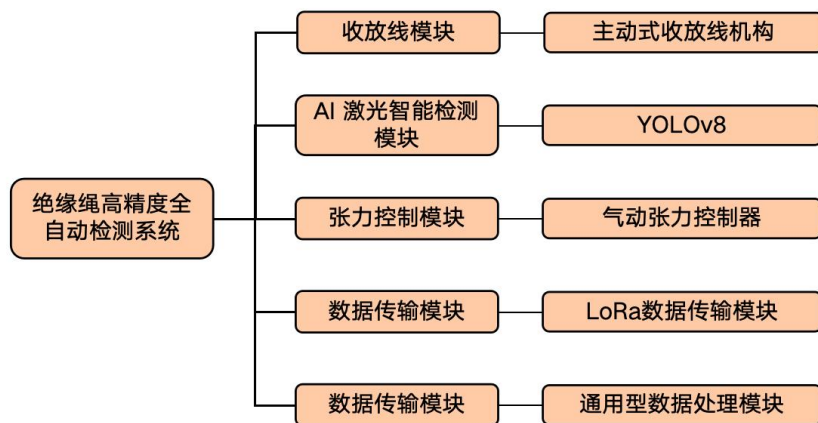
在前期技术调研阶段，团队全面检索智能检测领域现有成熟设备与相关技术方案，调研发现英国 Meggitt PLC 电缆绝缘层自动化检测装置搭载的全域视觉采集、像素轮廓尺寸解算、特征匹配缺陷识别技术具备较高参考价值。该设备依托高分辨率工业相机搭配环形光源完成线缆表面连续成像，通过后端智能算法同步实现绝缘层直径测算与划痕、破损等缺陷分类定位，

具备无接触、连续在线检测的技术优势，为本项目视觉检测单元的基础架构设计提供可靠技术借鉴。



借鉴装置技术原理

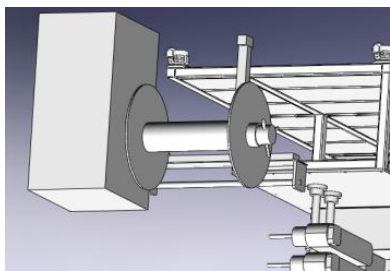
基于技术借鉴与绝缘绳检测的实际需求，团队完成研发构想迭代升级，确立分层模块化自主研发路线：在借鉴电缆设备无接触视觉智检底层技术基础上，针对柔性长绝缘绳专属工况开展多项原创技术改造与功能拓展。全新搭建主动式收放线、AI 激光智能检测、气动自适应张力控制、LoRa 远距离数据传输、通用型数据处理五大独立协同硬件模块；同步引入 YOLOv8 深度学习算法完成绝缘专属缺陷模型训练，创新设计气动闭环动态张力调控机制，打通“自动送绳-视觉高精度检测-实时张力适配-数据交互-智能报告自动生成”全链路自动化流程。



2.2 五大模块专项攻关研发

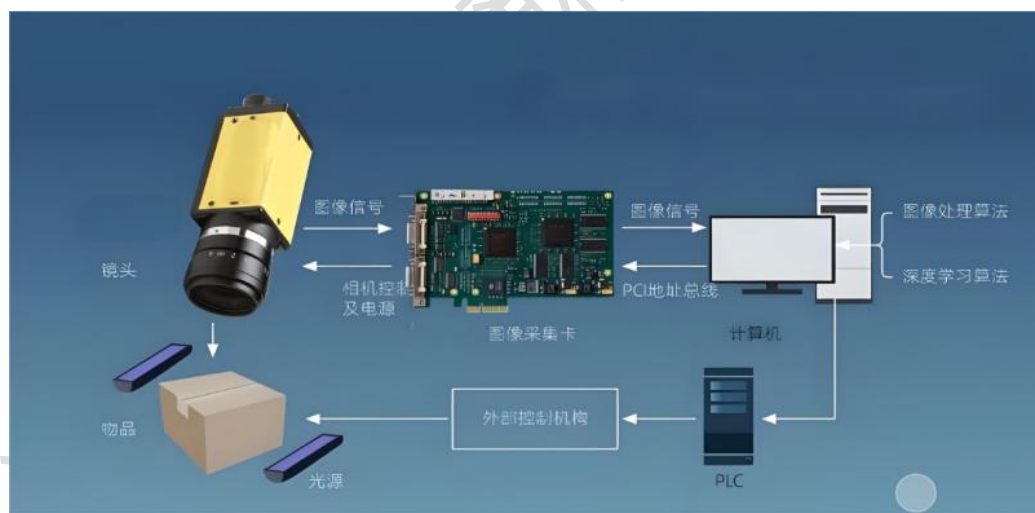
2.2.1 主动式收放线模块

针对 50m-200m 超长柔性绝缘平稳输送需求开展专项结构与控制程序研发。选用 1.5kW 伺服电机搭配 1000 线高精度编码器作为驱动核心，基于 PID 算法设计闭环速度控制程序；结合 4mm-24mm 全规格绝缘绳尺寸定制辊体结构，增设多层限位导向机构抑制绳体横向偏移。完成机械零部件加工、电气接线、控制程序编写后开展长时连续试运行验证，设备可持续不间断作业 8 小时以上，速度波动控制在 $\pm 0.1\text{m/s}$ 内，可实现不同长度、粗细绝缘绳全自动平稳收放，解决长绳输送偏移、抖动造成测量失真问题。



2.2.2 AI 激光智能检测模块

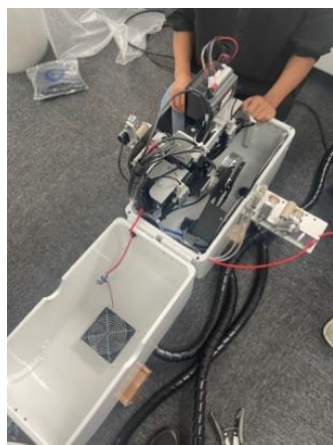
以无接触无损尺寸测量、微小隐性缺陷精准识别为开发目标。硬件层面配置 2000 万 Basler 工业相机搭配 CCS 环形均匀 LED 光源搭建全域图像采集工位；软件层面基于 YOLOv8 深度学习算法搭建绝缘绳专属识别模型，现场采集、标注 5000 余份包含划痕、裂纹、污渍等多工况绝缘绳样本完成多轮迭代训练。配套开发图像降噪、边缘提取、轮廓拟合、缺陷分类定位算法程序，经单帧图像处理性能测试，平均处理时长仅 0.028s，缺陷识别分辨率低至 0.2mm，实现尺寸测算、缺陷识别同步实时完成。



2.2.3 气动张力控制模块

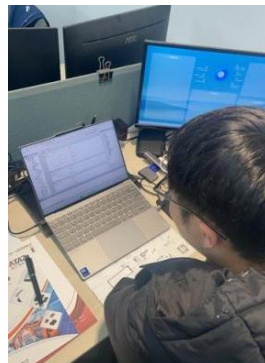
面向锦纶、涤纶、丙纶多材质绝缘绳差异化形变特性，搭建气动传感闭环张力调控硬件体系。选用 Montalvo 气动张力

控制器搭配高精度 SMC 压力传感器，依据各类绳材力学参数标定标准张力区间；完成气动管路布局、电气接线与 PLC 闭环控制程序开发，传感器实时采集运行张力数值并反馈至控制系统，动态调节输出气压匹配标准值。经多材质样品反复测试，张力控制精度可稳定控制在 $\pm 0.2\text{N}$ ，实时消除绳体拉伸、松弛褶皱带来的尺寸测量偏差，满足国标规定张力检测工况要求。



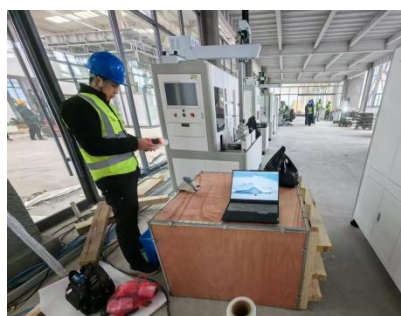
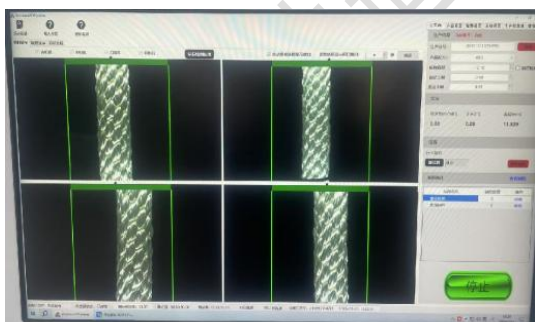
2.2.4 LoRa 数据传输模块

适配检测区域多工位分散、电机与耐压设备强电磁干扰工况，搭建 LoRa 无线局域传输网络，配套西门子 Profinet 通信模块、工业交换机构建传输硬件。完成网络拓扑规划、设备 IP 参数配置，分别基于 PLC、C#语言编写开发双向数据收发程序，打通五大模块控制指令、高清图像、检测数据传输通道。开展 10m 至 70m 多距离梯度稳定性测试，50m 标准检测距离下传输速率均值 1.25Mbps，远距离传输无丢包、无数据衰减，满足多工位设备实时数据交互需求。



2.2.5 通用型数据处理模块

采用高性能工业计算机作为运算载体，搭载大容量内存与高速固态硬盘承载海量图像与检测数据。基于 C#语言搭配 MySQL 数据库自主开发绝缘绳专用检测管理软件，划分数据接收、存储统计、缺陷归档、自动报告、多条件查询五大功能单元。完成软硬件联调与批量数据运算优化，多维度条件查询平均响应时间 0.23s，可自动导出标准化 Excel 检测报告，实现全量检测数据长期存储、快速检索。



2.3 三大核心技术创新亮点

2.3.1 AI 视觉缺陷识别技术

本技术基于 YOLOv8 网络构建电力绝缘绳定制化识别模型，采集覆盖多材质、多光照、多种破损形态的 5000 份样本完成迭代训练，可稳定识别 0.2mm 细微划痕、织带内部裂纹等隐性损伤，整体缺陷识别准确率达 99.2%。整套视觉采集系统全程无接触，不会挤压损伤绳体；算法支持持续扩充新型绝缘绳缺陷样本库，可随工器具迭代同步优化识别能力，从底层攻克人工肉眼检测精度不足、隐性缺陷难以排查的行业共性难题。

2.3.2 多材质绝缘绳自适应张力调控技术

本技术搭建气动传感闭环调控架构，依靠高精度压力传感器实时采集绳体张力数值，控制系统根据预设标准张力动态调节气压输出，张力调节响应快、控制精度高。设备可根据不同绳材自动匹配适配张力区间，有效避免绳体拉伸变形或松弛褶皱，保障直径测量数据真实可靠，一套设备兼容全品类柔性绝缘绳检测，填补了长距离柔性绳动态张力智能调控的技术空白。

2.3.3 多模块一体化全自动协同检测技术

传统绝缘绳检测工序割裂，需人工分段转运、分段操作，作业效率低下。本技术构建五大硬件模块一体化联动控制架构，依托统一总控程序实现收放线、张力校准、视觉检测、数据传输、报告生成全流程无人协同作业。整套装置配套端到端数字化传输链路，检测尺寸、缺陷、张力等数据自动实时归档，全程可追溯、可统计；无接触式检测方案同步保护绝缘绳样品，大幅

压缩批量检测耗时，为电力安全工器具规模化、标准化、数字化检测提供成套可复制的技术方案。



装置展示图

三、成果与综合效益

3.1 质量安全效益

本项目装置投运后，全面解决了绝缘绳批量检测精度不足、漏检率高、样品损伤等工程质量问题，整体检测效率提升了88%，单批次100根绝缘绳检测时长由120.6h压缩至62.3h，全方位提升电网工器具安全管控水平。依托专属AI视觉检测技术，实现0.2mm级微小隐性缺陷全覆盖筛查，缺陷识别准确率99.2%，避免了缺陷绝缘绳投入线路检修、带电作业工程，从源头规避高空坠落、高压触电等安全事故。无接触式检测架构替代传统接触式测量，全面保障工器具完好复用率。设备全自动化运行大幅减少人员近距离接触高压、力学检测工位频次，人工操作安全风险降低90%以上。同时标准化、可溯源的数字化检测台账，实现绝缘绳检测、投运、报废全生命周期闭环管控，全面筑牢电网工程运维安全防线。

3.2 经济效益

装置在检测中心常态化投运后，工程检测质效实现跨越式提升，核心降本增效数据量化显著。一是检测产能大幅提升，整体检测效率提升88%，完全满足电网集中检修工程刚性工期要求，彻底解决批量检测积压、工期滞后问题。二是人工成本大幅节约，截至2026年2月，设备累计完成2100根绝缘绳自动化检测，节约人工工时3889小时，按照电力检测岗位薪酬标准核算，累计节约人工成本21.1万元；同时替代卡尺、标

尺等手动耗材，节约设备损耗成本 5 万元。三是规避隐性经济损失，高精度零漏检检测彻底杜绝缺陷工器具投运引发的线路故障、停电抢修、人身事故赔偿等隐性损失，保障电网工程平稳高效推进。设备采用通用模块化硬件设计，运维便捷、备件成本低，规模化推广后可进一步摊薄研发运维成本，长期经济效益突出。

3.3 社会效益

本项目依托区域电网实际工程痛点攻关落地，社会效益显著。一是夯实电网安全供电基础，通过精准筛查绝缘绳安全隐患，杜绝作业安全事故与线路非计划停运问题，保障区域内千万级民生用电、工商业用电持续稳定。二是打造电力工程智能化检测示范样板，项目形成的“AI 视觉+自动控制+模块化集成”技术体系，为电网安全工器具批量智能化检测提供可复制、可推广的工程实践路径，已在省内多地供电单位工程检测场景推广借鉴。三是赋能行业技术升级，项目沉淀的标准化研发体系、作业规范、检测标准，可为轨道交通、油气化工等行业柔性缆绳检测提供技术参考，同时依托一线工程攻关培育复合型创新技术人才，助力电力行业安全检测领域数字化、智能化迭代升级。

四、可复制性与未来展望

该项目技术体系成熟、落地成本低、工况验证充分，具备良好的行业通用性与异地推广复制价值。一是模块化适配能力强，装置采用标准化拆分式结构，五大功能单元独立可控，仅需参数微调即可适配 $\Phi 4\text{mm}-\Phi 24\text{mm}$ 、50 - 200m 全规格、多材质绝缘绳检测，可广泛应用于地市供电检测中心、第三方检测机构、绝缘绳生产厂家出厂质检等场景，落地门槛低、适用范围广。二是核心技术可移植性高，项目形成的 AI 视觉缺陷识别、闭环自适应张力调控、多模块协同控制、远距离抗干扰传输等成套技术，已形成标准化技术路径，可快速拓展至轨道交通、油气化工等行业的柔性缆线检测场景，跨领域应用空间广阔。三是落地成果完备可靠，装置已在区域电网常态化投运，经多批次集中检修工程实测，运行稳定、检测指标达标；同时配套完整的设备图纸、操作规范、维保规程及数字化管理制度，形成可快速落地、直接复用的成套技术成果，可为行业规模化推广提供有力支撑。

立足现有装置的应用基础与电力智能检测发展趋势，本项目将从工况迭代、功能补齐、技术拓展三方面持续优化升级，进一步提升装备核心竞争力与行业适配性。针对高温高湿、强电磁干扰等极端复杂工况，后续将优化图像增强算法与张力闭环控制参数，提升设备复杂环境下的运行稳定性与检测精度，拓宽装置工况适配范围。同时，依托现有成熟硬件架构，新增力学拉伸、耐老化性能检测模块，补齐单一检测短板，实现绝

缘绳全维度一站式自动化检测，全面贴合国标预防性试验全项要求。

五、项目团队信息

单位：浙江嘉恒科创有限公司

项目组成员：孙伟、魏信伍、邹荣、夏宁、俞铭阳、潘恽斌、周雪颖、赵玉林、汪佳乐、顾跃峰