

一种高空自动绑扎装置的研制与性能试验

朱志星, 叶先敏, 于海军, 郭永新, 朱 伟, 于雯昌

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518000)

摘要:针对电力、通信、油气及海上平台等领域高空电缆与管线长期受复杂环境影响易发生松动脱落,传统人工绑扎存在高空作业安全风险高、作业效率低、绑扎质量一致性差等问题,研制一种地面遥控式高空尼龙扎带自动绑扎装置。采用分体式架构与模块化设计,集成 2.4 GHz 无线遥控、自动送带、机械限力收紧、同步切断及故障应急处理功能,构建基于检测滚轮转角监测的闭环控制策略。对齿轮啮合式送带、双滚轮夹紧限力拉紧、高速磨片切削式切断三大关键机构进行多轮迭代设计与对比试验,优化结构刚性、传动精度与动作可靠性。样机性能试验表明,该装置适用扎带宽度 4~9 mm,遥控距离不小于 9 m,单次作业平均时间 14.6 s,连续绑扎成功率 99.5%,作业效率较人工提升 70% 以上,具备完善的故障识别与应急退出能力。

关键词:尼龙扎带;无线遥控;机械限力;齿轮啮合送带;高速磨片切削

中图分类号:TH122;TH-39;TP242

文章编号:1000-0682(2026)04-0071-09

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.04.012

Development and performance test of a high-altitude automatic binding device

ZHU Zhixing, YE Xianmin, YU Haijun, GUO Yongxin, ZHU Wei, YU Wenchang

(Shenzhen Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518000, China)

Abstract: A ground remote-controlled automatic nylon cable tie binding device was developed. It solved the problems of high-altitude cables and pipelines in electric power, communication, oil-gas and offshore platforms, which were prone to loosening and falling off under long-term complex environments. Traditional manual binding had high safety risks, low efficiency and poor binding quality consistency. A split architecture and modular design were adopted. The device integrated 2.4 GHz wireless remote control, automatic tape feeding, mechanical force-limited tightening, synchronous cutting and fault emergency handling. A closed-loop control strategy based on detection roller rotation angle monitoring was established. Three key mechanisms—gear-meshing tape feeding, double-roller clamping force-limited tightening and high-speed grinding disc cutting—were optimized via multiple iterative designs and comparative tests, improving structural rigidity, transmission accuracy and action reliability. Prototype performance tests show that the device is suitable for 4 mm to 9 mm wide cable ties. Its remote control distance is no less than 9 m, average single operation time is 14.6 s, and continuous binding success rate is 99.5%. Its efficiency is over 70% higher than manual binding, with complete fault identification and emergency exit capabilities.

Keywords: nylon cable tie; wireless remote control; mechanical force limitation; gear-meshing feeding; high-speed grinding disc cutting

0 引言

现代工业体系中,电力、通信、油气、化工及风电等关键基础设施的高空电缆与管线长期暴露于风摆、振动、盐雾、高温高湿等复杂环境,易出现固定松动、绑扎失效、管线磨损等问题,严重时引发设备停机、信号中断、油气泄漏等安全事故。尼龙扎带因成

收稿日期:2026-05-09

基金项目:中海石油(中国)有限公司深圳分公司深圳众创项目(SZZC-2022-03)

第一作者:朱志星(1983—),男,广东肇庆人,高级工程师,主要从事采油仪表维修、机电装备自动化技术研究。

E-mail:340025053@qq.com

本低、绝缘性好、使用便捷,已成为高空线缆固定的主流方式。但当前高空绑扎仍以人工登高操作为主,存在安全风险高、作业效率低、绑扎力不均、恶劣环境无法施工等突出问题,成为行业运维效率难以突破的瓶颈。

近年来,电动绑扎装置、工业机器人绑扎、爬缆机器人及远程运维装备快速发展^[1]。手持式电动扎带枪仍需近距离操作,未消除高空坠落风险;工业机器人与专用绑扎设备体积大、成本高、柔性差,难以适应高空狭小空间与悬臂工况;面向高空线缆的远程自动绑扎装置仍存在送带易打滑、拉紧力不可控、切断不可靠、故障无法应急退出等技术短板,相关设计理论与试验研究不够系统。

为此,该文研制一种地面遥控式高空尼龙扎带自动绑扎装置,以机电一体化、模块化、无线遥控为核心,实现自动穿带—限力收紧—同步切断—机构复位全流程自动化作业。该文开展总体方案设计、关键机构迭代、控制系统开发、原理样机研制与性能试验,形成一套完整的高空绑扎自动化装备设计方法。研究成果可用于电力、通信、海上平台等领域高空线缆运维,也可为特种作业机器人、智能运维装备提供技术参考。

1 装置总体方案设计

1.1 工程需求与技术指标

高空作业场景具有空间受限、环境恶劣、操作可视性差、安全性要求严苛等特点,工具设计必须兼顾功能性、可靠性、轻量化与环境适应性。结合现场调研、用户需求与行业规范,确定本工具功能需求与关键技术指标如下:

1.1.1 功能需求

(1)全自动绑扎:单次装载单根扎带,自动完成送带、环绕、收紧、切断、复位全流程。(2)远程遥控操作:地面无线遥控,消除登高风险。(3)机械限力收紧^[2]:双滚轮夹紧打滑实现恒力收紧,保证绑扎质量一致。(4)故障应急处理^[3]:具备穿带失败、打滑、切断异常等故障自动识别与应急退出能力。(5)模块化扩展:主体平台通用化,可适配尼龙扎带、钢制扎带及不同直径线束。(6)辅助扩展接口:预留视频监控、延长杆、万向节接口,支持盲区、远距离、多角度作业。

1.1.2 核心技术指标

适用绑扎宽度 4~9 mm;遥控距离 ≥ 9 m(可视环境);单次作业时间 ≤ 17 s;绑扎成功率 $\geq 99\%$;供

电方式为内置可充电锂电池;连续工作次数 ≥ 200 次。

1.2 系统组成与工作原理

装置采用“地面遥控终端+高空作业主机”的分体式架构,操作人员在地面通过延长杆将主机对准绑扎物,遥控完成高空绑扎,实现风险隔离。

1.2.1 系统组成

高空作业主机为核心执行机构,采用全模块化设计^[4],如图 1 所示,由 6 大单元构成:主控单元以 CH32V307VCT6 微控制器为核心,负责指令解析、时序控制、数据采集与故障保护;自动送带单元采用齿轮啮合驱动^[5-6],实现高精度、无打滑送带;机械限力拉紧单元为双滚轮夹紧结构,通过摩擦打滑实现恒定收紧力;自动切断单元为高速磨片切削机构,实现快速、可靠切断^[7];电源管理单元为锂电池组+保护电路,提供稳定动力供应;机械支架单元为主体支撑结构,可连接延长杆与万向节,适配多姿态作业。

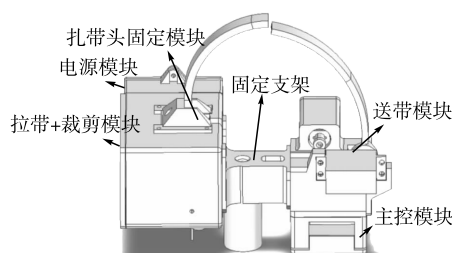


图 1 装置模块化结构图

地面遥控终端采用手持式结构,集成启动、停止、复位、档位切换、状态指示、应急切断等功能,采用 2.4 GHz 工业级无线通信,具备跳频抗干扰能力,保证复杂工业环境下指令可靠传输。

1.2.2 工作流程

装置工作流程采用状态机控制,全流程自动化执行,如图 2 所示。系统上电初始化后进入待机状态;操作人员发送启动指令,送带与拉带电机同步启动,驱动扎带沿导向槽环绕线缆;检测滚轮实时监测扎带运动,若有脉冲则判定穿带成功并停止送带电机,若无脉冲则判定失败并进入应急切断;穿带成功后,拉带电机继续运行,通过双滚轮夹紧扎带,利用摩擦打滑原理实现无传感器机械限力收紧,当检测滚轮停止转动(持续 2 s 无脉冲)时判定拉紧到位,停止拉带电机;随后剪带机构高速旋转切削,完成扎带同步切断;最后所有机构自动回位,系统返回待机状态。

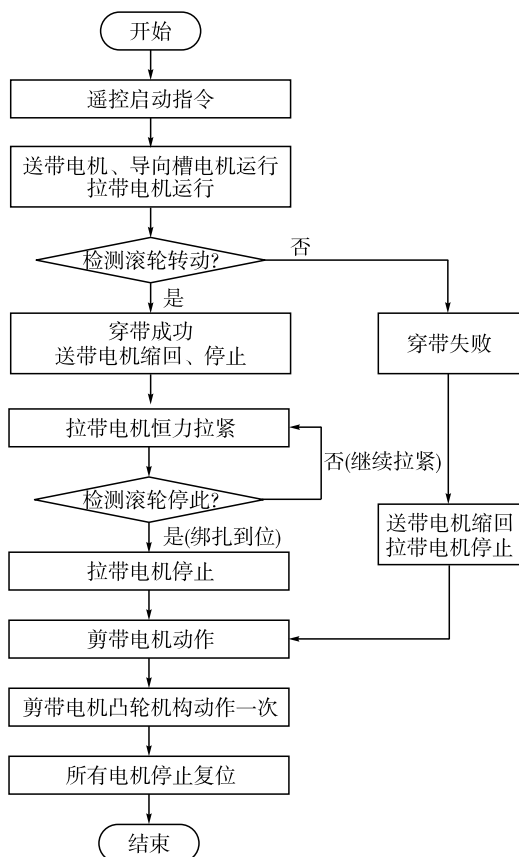


图2 工作流程图

1.3 模块化架构设计

装置采用高度模块化、接口标准化设计理念,将复杂系统拆分为独立可替换单元,显著提升可维护性、扩展性与系列化能力。整体划分为电源模块、剪带+拉带模块、扎带固定模块、固定支架、送带模块、主控制模块6大模块,如图3所示。各模块具备独立机械安装面与电气接插件,可快速拆卸、更换、升级。扎带机爆炸图与图4所示。

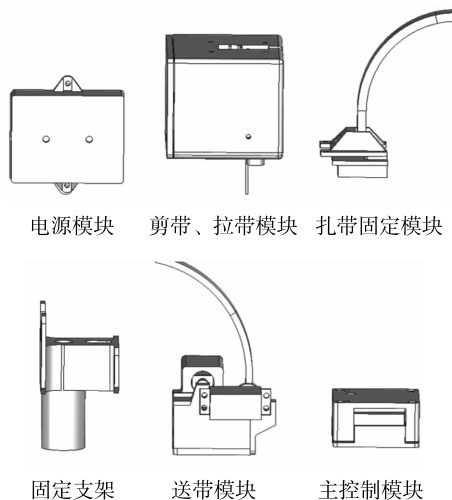


图3 各模块结构图

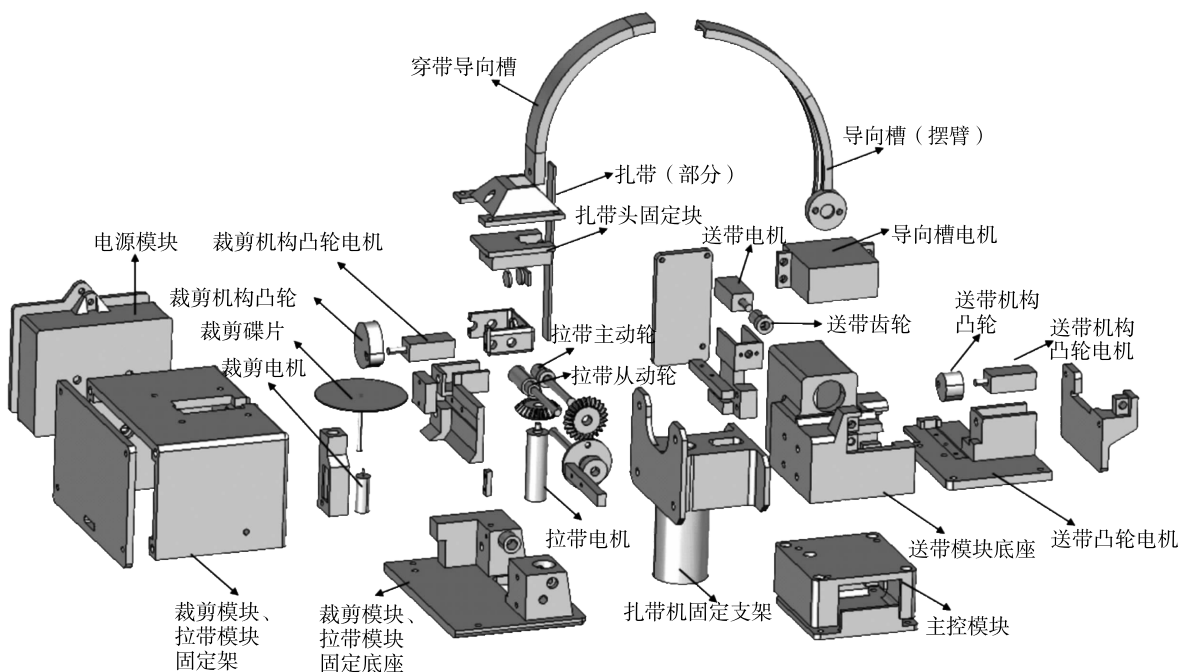


图4 扎带机爆炸图

2 关键模块设计与实现

2.1 主控系统与控制策略

主控系统是装置的“大脑”,决定动作时序、控

制精度与可靠性。设计以高性价比、高实时性、高抗干扰为目标,采用嵌入式系统架构。

2.1.1 硬件设计

主控芯片选用 CH32V307VCT6 32 为高性能微

控制器,具备高速运算能力、丰富外设接口与低功耗特性。无线通信采用 2.4 GHz 工业级射频模块,支持多信道跳频,有效抵抗工业现场电磁干扰。系统集成:编码器采集接口,实时获取检测滚轮转角,判断穿带与拉紧状态;多路电机驱动电路,驱动送带、

拉带、切断、回缩电机协同动作;电源管理电路,过充、过放、过流、短路 4 重保护;状态指示电路,三色 LED 分别指示待机、运行、故障状态。图 5 为主控电路系统架构框图。

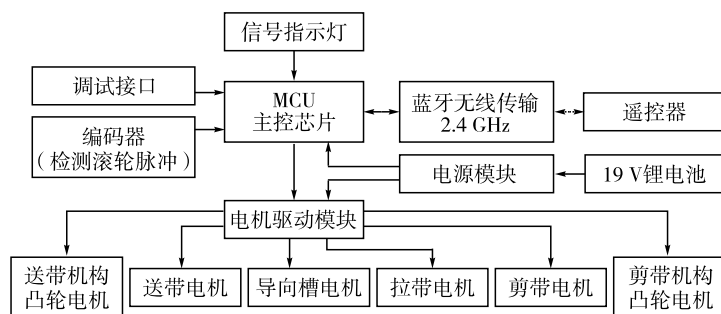


图 5 主控电路系统架构框图

2.1.2 软件控制逻辑

控制程序采用模块化、中断驱动架构,主要包括主循环程序和定时器中断服务程序。主循环程序完成系统初始化、指令解析、状态跳转、故障处理;定时器中断服务程序,100 ms 定时采样编码器脉冲,判

断扎带送带到位与拉带完成状态。主程序流程如图 6 所示,中断程序流程图如图 7 所示。

关键控制逻辑为:穿带成功判定,检测滚轮转动(编码器读数 ≥ 5);拉带到位判定,2 s 内无脉冲;应急切断判定,20 s 内无编码器信号,直接执行切断并复位。

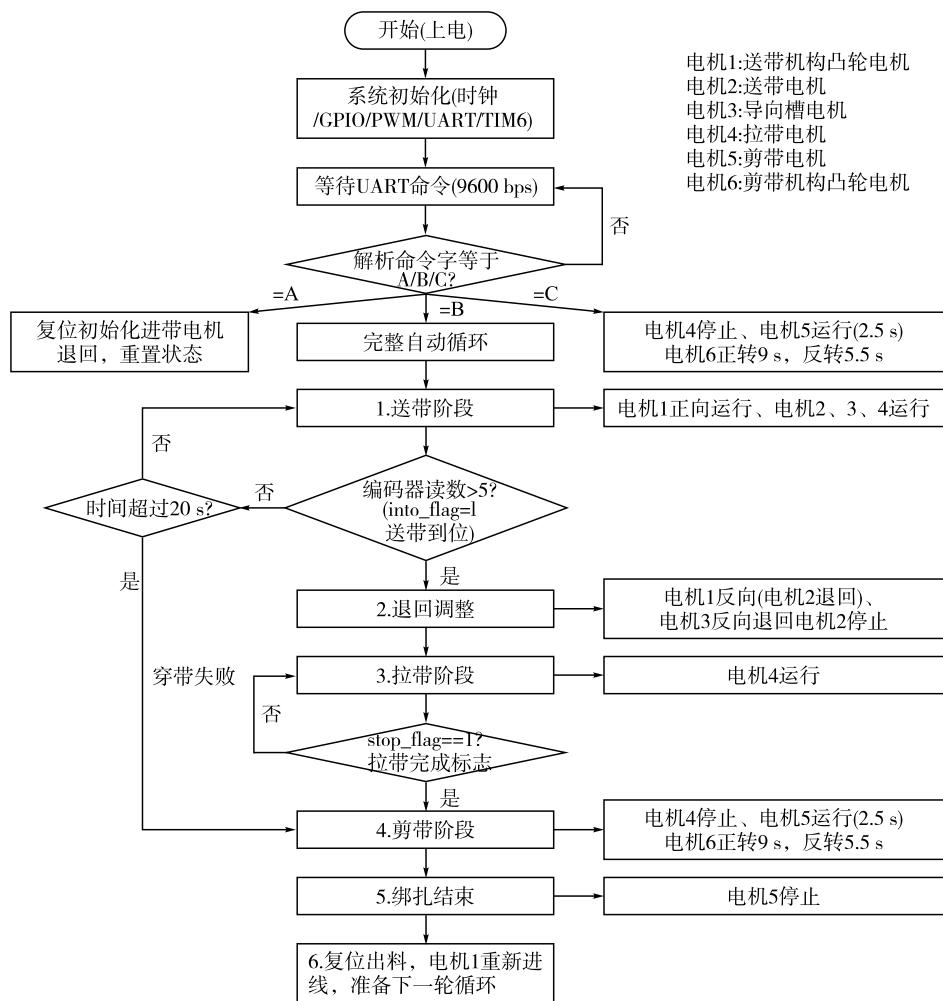


图 6 主程序流程图

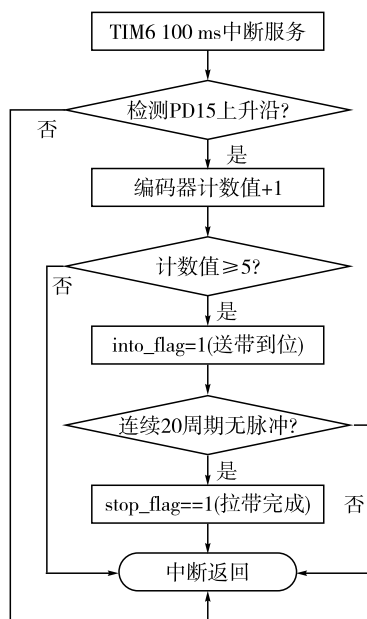


图7 中断服务程序流程图

2.2 自动送带机构设计

送带机构的核心目标是稳定推送、精准环绕、不打滑、不卡滞。对比摩擦轮驱动与齿轮啮合驱动,最终选用齿轮啮合式送带方案。送带模块详细结构如图8所示,主要包括送带凸轮电机、送带电机齿轮、送带电机、导向槽(摆臂)、导向槽电机。

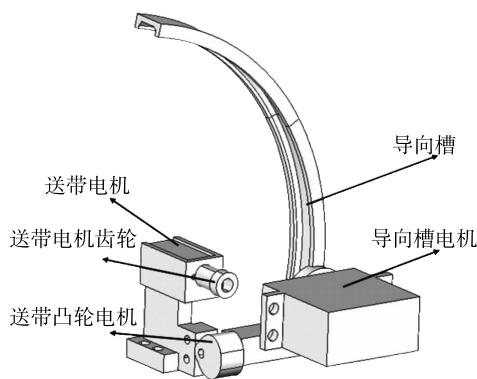


图8 送带模块

2.2.1 齿轮啮合驱动原理

尼龙扎带带身具有连续均匀齿形,齿距约1.2 mm。选用模数0.5微型直齿轮与扎带齿槽精确啮合,电机通过减速器驱动齿轮旋转,实现强制传动。相比摩擦轮,其优势为:无打滑、精度高、油污环境适应性强、可双向进退。

2.2.2 导向摆臂迭代优化

导向摆臂机构是确保扎带沿正确路径环绕线缆的关键,其设计经历了V1~V4的迭代演进(如图9所示)。V1~V3阶段先后解决了基本动作验证、导轨优化与主动联动问题,但分别存在人工依赖、惯性不稳定、摆臂刚性不足等瓶颈,成功率在75%以下。最终V4版本实现了从“理想设计”向“现实鲁棒性”的关键跨越,迭代对比如表1所示。

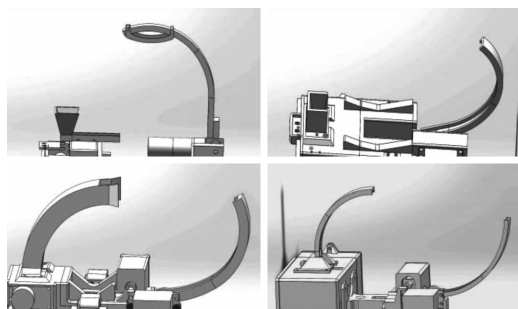


图9 V1~V4 导向摆臂结构示意图

V4版本的核心创新在于构建“检测—返回—多送—下压”容错机制,通过循环补偿实现对不规则扎带的适应能力。具体体现在三方面:一是采用双侧CNC金属摆臂替代塑料/铝材结构,并采用非完全闭合式设计,显著提升刚性并避免卡滞^[8];二是在进料口集成编码器,实现扎带到位检测,使系统从开环升级为闭环反馈;三是建立容错循环逻辑,未检测到扎带时自动返回、增加送带长度后重新下压,通过“失败即重试”机制将成功率从V3的75%提升至约99%,实现了从功能实现到可靠性优化的跨越。

表1 导向摆臂迭代对比

版本	摆臂结构	送带方式	成功率	主要问题
V1	单侧可调臂,直线/简单弧形导轨	重力+摆臂惯性	<60%	依赖人工精度、易卡滞
V2	单侧可调臂,优化导轨曲率	重力+摆臂惯性	≈70%	惯性不稳定
V3	环抱式双臂结构(一动一定)	摆臂联动送带	≈75%	摆臂刚性不足、易变形
V4	双侧CNC金属摆臂,非完全闭合	可控循环送带+编码器检测	≈99%	多次尝试消耗时间

2.3 机械限力拉带机构设计

拉带机构是保证绑扎质量的核心,要求收紧稳定、不伤扎带、力控精准、适应性强。对多种驱动方案进行对比试验,最终确定基于打滑原理的机械限力方案。

2.3.1 方案对比试验

聚焦于V1~V4版本中进料机构的设计演进(如图10),从传动方式、摩擦材料、电机选型到夹紧逻辑进行系统性分析,拉带机构迭代对比如表2所示。

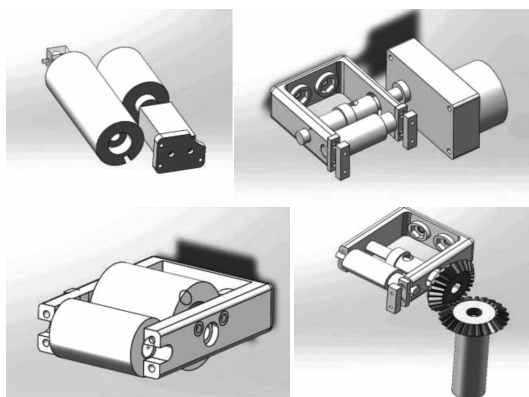


图 10 V1 ~ V4 拉带结构示意图

V4 采用空心杯电机驱动的“硅胶轮 + 金属轮”

表 2 拉带机构迭代对比

版本	核心结构	驱动方式	拉力表现	成功率	主要问题
V1	双摩擦轮(砂纸)	微型电机 + 摩擦	弱,易打滑	<70%	砂纸磨损快、传动不稳定
V2	主动齿轮 + 从动摩擦轮	大电机 + 啮合 + 摩擦	强,稳定	≈85%	电机过大,结构不稳打滑
V3	双摩擦轮(硅胶)	微型电机 + 摩擦	中等,打滑严重	≈80%	硅胶过硬/过软导致打滑
V4	双摩擦轮(硅胶轮 + 金属轮)	空心杯电机 + 摩擦 + 夹紧力调节	强,响应快	≈99%	夹紧过紧导致拉力过大

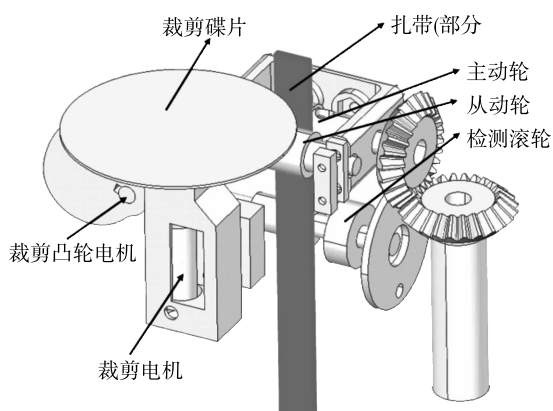


图 11 机械限力拉带机构图

(2) 关键参数分析

夹紧力由弹簧预紧力提供,设定为 30 N,保证正常收紧时不打滑、达到目标张力时恰好打滑。主动轮选用邵氏硬度 85A 的聚氨酯,兼顾弹性与耐磨性;从动轮为镀铬金属光面轮,聚氨酯与尼龙扎带的干摩擦系数约 0.8,湿摩擦系数约 0.6^[9]。两滚轮中心距可调,初始间隙 0.1 mm(略小于扎带厚度),依靠弹性变形实现自适应夹紧。

(3) 状态判断与验证

通过检测滚轮实现状态识别:检测到脉冲信号判定穿带成功;连续 2 秒无脉冲判定拉紧到位。

双摩擦结构,并引入夹紧力调节,在保持强拉力与快速响应的同时将成功率提升至约 99%。综合对比,选定双滚轮夹紧 + 机械打滑限力方案,其结构如图 11 所示。

2.3.2 限力收紧机理与参数设计

(1) 限力原理

该方案不依赖传感器实现力控制,而是利用摩擦打滑的物理特性实现自适应限力。当扎带收紧至设定张力后,滚轮与扎带之间的摩擦力不足以继续拉动扎带,产生可控打滑,拉力不再增加,从而实现

对扎带的过载保护。

经 200 次试验验证:穿带识别准确率 100%,拉紧到位判断准确率 99.5%,平均单次作业时间 14.6 s。该方案利用纯机械打滑实现限力,避免了传感器依赖,降低了系统复杂性与故障率,同时保证了收紧质量的一致性。

2.4 自动切断机构设计

切断机构是决定绑扎“最终完成度”的核心模块,直接影响切断效率、可靠性与材料兼容性。在裁切机构设计中经历了 V1 ~ V4 的迭代演进(如图 12 所示),实现了从“机械剪切”向“高速切削”的范式转变,各版本切断机构的主要技术特征对比如表 3 所示^[10]。

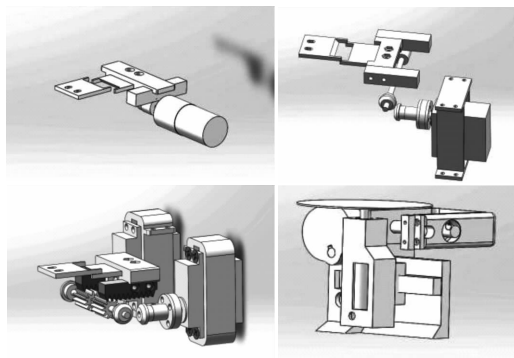


图 12 V1 ~ V4 版本切断机构结构示意图

表 3 切断机构迭代对比

版本	刀具形式	驱动方式	动力源	传动结构	适用扎带	成功率	主要问题
V1	直刀闸刀(单侧)	单电机 + 齿轮齿条	直流电机	单侧齿轮齿条	普通塑料扎带	<60%	力矩不足、受力不均、易堵转
V2	直刀闸刀(双侧)	双舵机 + 齿轮齿条	舵机 × 2	双侧齿轮齿条	普通塑料扎带	≈75%	同步性要求高、响应速度受限
V3	直刀闸刀(双侧)	双舵机 + 齿轮齿条	舵机 × 2	尼龙碳素齿轮齿条	普通塑料扎带	≈80%	材料强度不足、长期使用变形
V4	高速磨片切割	空心杯电机 + 凸轮	高速空心杯电机	凸轮 + 偏心轴推动	塑料 + 钢制扎带	≈99%	产生废屑、存在粉尘污染风险

V4 版本完全放弃闸刀剪切,采用高速空心杯电机驱动金刚石涂层磨片,通过凸轮进给,切割后弹簧复位,体积小、响应快,可兼容塑料及钢制扎带。实测成功率约 99%,切割稳定,不受厚度影响,解决了剪切式方案固有瓶颈。高速切削产生粉尘废屑,后续可增加集尘罩解决。该机构体现了高速切削技术在微型自动化装备中的典型应用,与组合机床加工技术具有同源性。

2.5 故障诊断与应急处理机制

高空装置必须具备故障可识别、可退出、可复位能力,避免设备滞留高空形成安全隐患。该文设计覆盖全流程的故障诊断与应急处理系统^[11-12]。

2.5.1 典型故障模式

穿带失败:扎带未环绕到位,检测滚轮无信号。

拉紧打滑:滚轮转动但扎带未被有效拉紧。

2.5.2 应急处理流程

穿带失败:20 s 无脉冲→停机→送带齿轮回缩→应急切断→复位报警。

拉紧打滑:执行应急切断。

模拟试验结果:穿带失败应急成功率 100%,平均处理时间 4.2 s;拉紧打滑处理成功率 100%。

3 力学建模与仿真分析

针对装置核心执行机构开展力学建模与理论分析,分别建立齿轮啮合送带机构受力模型、双滚轮限力拉紧机构摩擦力矩模型及高速磨片切削机构切削力模型,从理论层面验证关键结构参数与工作原理的合理性,为装置设计提供力学依据。

3.1 齿轮啮合送带机构受力计算

齿轮啮合送带依靠齿轮齿形与扎带齿槽强制啮合实现无打滑输送,其输送稳定性由齿轮驱动力与扎带运动阻力共同决定^[7]。

3.1.1 输送力计算模型

电机经减速器输出转矩驱动齿轮旋转,对扎带产生的理论输送力为:

$$F_t = rT \quad (1)$$

式中: F_t 为齿轮对扎带的输送力,N; T 为减速电机输出转矩,N·mm; r 为送带齿轮分度圆半径,mm。

扎带正常送带需克服导向槽摩擦阻力、环绕弯曲阻力及自身运动阻力,满足:

$$F_t \geq \mu \cdot m + F_f + F_b \quad (2)$$

式中: μ 为扎带与导向槽摩擦系数,取 0.25; m 为扎带等效运动质量,kg; F_f 为导向槽滑动摩擦阻力,N; F_b 为扎带环绕线缆弯曲阻力,N。

3.1.2 参数匹配分析

装置选用模数 0.5 微型直齿轮,配合 N20 减速电机(75 r/min,12 V),可提供充足输送力,保证扎带在环绕、转向、卡滞预判等工况下不打滑、不断带、不顶齿。理论计算表明,该参数组合可使送带机构输出力满足 4~9 mm 全规格扎带的稳定输送需求,与 V4 版送带机构迭代结果一致。

3.2 双滚轮限力拉紧机构摩擦力矩模型

限力拉紧机构采用双滚轮夹紧 + 摩擦打滑实现恒力收紧,不依赖力传感器即可实现稳定张力控制,其核心为摩擦力矩与拉紧转矩的匹配关系。

3.2.1 限力打滑力学模型

双滚轮限力拉紧机构依靠夹紧力 + 滚轮间隙 + 摩擦系数共同实现机械限力,其核心是滚轮对扎带的弹性压缩与摩擦打滑特性。

滚轮与扎带之间的最大静摩擦力矩为:

$$M_f = F_n \cdot \mu_c \cdot R \quad (3)$$

式中: M_f 为滚轮摩擦限力矩,N·mm; F_n 为弹簧提供的滚轮夹紧力,N; μ_c 为滚轮与扎带间摩擦系数; R 为拉紧滚轮半径,mm。

滚轮间隙设计:两滚轮初始安装间隙 $\delta = 0.1$ mm,略小于标准尼龙扎带厚度,使扎带进入滚轮后产生弹性压缩变形,从而获得稳定夹持力。间隙过大会导致夹持不足、提前打滑;间隙过小则易造成扎带挤压损伤、拉力过载。

当扎带收紧至目标张力,线缆阻力矩大于滚轮摩擦力矩时,滚轮与扎带之间产生可控打滑,拉紧力不再增大,实现无传感器机械限力: $T_{\text{motor}} \leq M_f$ 。

3.2.2 关键参数理论验证

装置夹紧力设定为 30 N,滚轮初始间隙 $\delta = 0.1$ mm,主动轮采用邵氏硬度 85A 聚氨酯轮,从动轮为镀铬金属光面轮。在该结构下,干摩擦系数约

0.8,湿摩擦系数约 0.6。

理论计算表明:在 30 N 夹紧力 + 0.1 mm 间隙组合下,滚轮对扎带的夹持力与摩擦力矩匹配最优,既能保证收紧过程不打滑,又能在达到目标张力时稳定打滑限力,使绑扎力保持在设计区间,既牢固又不会过载拉断扎带。

该力学模型与 V4 版拉紧机构试验结果高度吻合,证明间隙设计 + 夹紧力 + 摩擦材料的组合方案具备充分的理论合理性与工程可靠性。

3.3 高速磨片切削切断机构切削力分析

切断机构采用高速旋转金刚石磨片实现切削式切断,区别于传统闸刀剪切,其切削可靠性由切削力与材料抗力匹配决定。

3.3.1 切削力模型

高速磨片对尼龙扎带的切削力满足:

$$F_c = K_s \cdot A_c \cdot v_t \quad (4)$$

式中: F_c 为磨片切削力,N; K_s 为尼龙材料切削抗力系数; A_c 为扎带切削截面积, mm^2 ; v_t 为磨片切削线速度, m/s 。

该切削模型适用于高速旋转磨削类非金属材料切断过程,能够较好反映切削速度、截面面积与材料抗力对切断效果的影响规律。

3.3.2 切削参数理论分析

装置采用 49 000 r/min 高速空心杯电机驱动金刚石涂层磨片,线速度高、切削抗力小,可在 0.5 s 内完成切断,切口平整无毛刺、无拉伸变形。理论分析表明,该切削方式受力均匀、无侧向顶推,可避免闸刀剪切易出现的卡滞、堵转、扎带挤压变形等问题,与 V4 版切断机构迭代优化结论一致。

3.4 力学参数与试验结果对比分析

为直观体现理论计算与工程试验的一致性,将三大机构关键力学参数与试验效果对比如表 4 所示。

表 4 核心机构力学计算与试验结果对比

机构	关键力学参数	理论计算结果	样机试验效果
送带机构	输送力	满足 4 ~ 9 mm 扎带输送	无打滑、不卡带
拉紧机构	限力矩	30 N 夹紧力可稳定打滑	收紧均匀、不断带
切断机构	切削力	高速切削、受力均匀	切断快、无变形

通过对送带、拉紧、切断 3 大核心机构开展力学建模与理论计算,验证了关键参数与结构方案的合理性:齿轮啮合送带输出力充足,可实现无打滑稳定

输送;双滚轮摩擦限力矩匹配合理,可实现恒力收紧与过载保护;高速磨片切削受力均衡,切断可靠且不损伤扎带。力学分析结果与样机迭代试验、整机性能试验一致,证明装置设计具备充分的理论支撑。

4 样机研制与性能试验

4.1 原理样机研制

依据上述设计方案,完成高空尼龙扎带自动绑扎装置原理样机加工、装配与调试。样机特点:结构紧凑、重量轻,可手持或搭载延长杆使用;模块化程度高,拆装维护便捷;动作流畅,控制逻辑稳定;遥控响应迅速,状态指示清晰。

样机满足高空作业轻量化、可靠性、易用性要求,可进入性能验证阶段。样机实物图如图 13、图 14、图 15 所示。

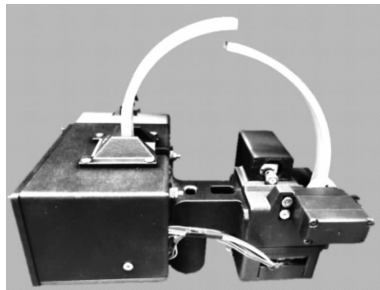


图 13 样机 - 主机整体



图 14 样机 - 剪带与拉带模块



图 15 样机 - 送带模块

4.2 试验方案与结果分析

试验项目包括功能流程、作业效率、绑扎成功率、遥控距离、应急处理及人工对比 6 项, 试验仪器包括高精度计时器、示波器、遥控距离测试仪、工装夹具等。试验结果如表 5 所示。

试验表明, 装置全部指标达到或超过设计要求, 工程应用价值突出。

表 5 主要性能试验结果

试验项目	指标/方法	测试结果	达标情况
功能完整性	全流程自动执行	100%	达标
作业时间	单次平均/最快	14.6 s / 11 s	达标
绑扎成功率	连续 200 次测试	99.5% (失效 1 次)	达标
遥控距离	可视距离实测	≥ 9 m	达标
应急处理	穿带失败、打滑、 切断异常	均能安全退出	达标
人工对比	效率提升	$\geq 70\%$	达标

4.3 试验讨论

样机整体性能优异, 但仍存在优化空间:

(1) 高速切削产生少量碎屑, 可增加封闭式集尘结构;

(2) 送带循环可进一步提速, 将作业时间压缩至 12 s 以内;

(3) 增加防水、防盐雾、抗振动结构, 提升海上与风电场景适应性;

(4) 结合视觉识别与 AI 定位, 可实现全自动目标识别与绑扎, 向智能化升级。

未来可将装置与移动机器人、升降平台、无人机结合, 构建全自动高空线缆智能运维系统, 进一步拓展组合机床与自动化加工技术的应用边界。

5 结论

针对高空线缆绑扎作业风险高、效率低等问题, 研制一种地面遥控式高空尼龙扎带自动绑扎装置。提出高空非结构化场景自动绑扎技术路线, 集成自动送带、机械限力收紧、同步切断、无线遥控及故障应急功能, 实现高空绑扎作业地面化、远程化、自动化。完成送带、拉带、切断三大核心机构迭代优化, 确定齿轮啮合送带、双滚轮夹紧限力拉紧、高速磨片切削切断的最优方案, 解决了打滑、卡滞、伤带、切断不可靠等关键问题。构建基于检测滚轮转角监测的控制策略, 配合故障诊断与应急退出机制, 保证装置在复杂工况下稳定作业。样机测试表明: 装置适用绑扎宽度 4 ~ 9 mm, 遥控距离 ≥ 9 m, 单次作业约

14.6 s, 绑扎成功率 $> 99.5\%$, 效率较人工提升 70% 以上, 满足工程应用需求。

该装置模块化程度高、扩展能力强, 可广泛应用于电力、通信、海上平台及大型化工装置等领域高空线缆绑扎与维护, 为特种作业装备创新应用提供参考^[13-14]。

参考文献:

- [1] 董林杰, 张任飞, 李杰, 等. 钢筋绑扎机器人研究进展及关键技术分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(05): 15-31.
- [2] 乔一军, 崔红伟, 廉自生, 等. 矿用液压安全联轴器的接触及转矩特性[J]. 液压与气动, 2020(01): 142-147.
- [3] 唐道龙, 李宏坤, 王朝阁, 等. 基于参数优化 MCKD 的行星齿轮箱微弱故障诊断研究[J]. 机电工程, 2018, 35(08): 779-785.
- [4] 陈周娟, 陈俊杰. 考虑耦合件的耦合模块化设计方法及应用研究[J]. 机电工程, 2020, 37(06): 653-658.
- [5] 张兴祥, 王成福, 周康凤, 等. 基于参数化建模的弧齿锥齿轮接触动态特性研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2026(03): 120-126.
- [6] 陈颖, 姚立纲, 王兴盛, 等. 双圆弧弧齿锥齿轮章动传动啮合齿轮本体温度的相关影响因素分析[J]. 机械传动, 2024, 48(02): 10-16.
- [7] 胡彦军, 张继林, 程仲文, 等. 尼龙棒的切削性能试验研究[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(10): 55-57+61.
- [8] 徐齐平, 张柯航, 张宏伟, 等. 真空驱动软体可折叠致动器驱动特性研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(02): 220-227+237.
- [9] 刁子宇, 袁野, 李超, 等. 电磁离合器用增摩材料的摩擦磨损性能研究[J]. 机电工程, 2023, 40(10): 1591-1598.
- [10] 徐平凡, 肖文勋, 王哲. 车圈圆形焊缝全自动焊接设备的设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(06): 138-139+148.
- [11] 梁芬, 王改云, 朱名日. 远程故障诊断技术的发展及应用研究综述[J]. 机电工程, 2007(08): 1-4.
- [12] 闫志钢, 李世超, 胡瀚. 基于人工智能算法的分布式光伏发电设备故障自动化诊断系统[J]. 电子设计工程, 2026, 34(3): 59-63.
- [13] 中海石油(中国)有限公司深圳分公司. 扎带绑扎装置及扎带绑扎方法: CN202310895571. 5[P]. 2023-10-13.
- [14] 中海石油(中国)有限公司深圳分公司. 一种扎带绑扎工具: CN202221537505. 8[P]. 2023-03-03.