

新型智能排缆控制系统研究

徐晓岭^{1,2}, 韩林青^{1,2}

1.上海振华重工（集团）股份有限公司，上海 200125

2.中交振华海上起重铺管核心装备工程技术（上海）有限公司，上海 200125

DOI:10.61369/WCEST.2026020023

摘 要： 由于传统钢丝绳卷绕作业中存在人工排缆强度大、精度低，排缆装置适应性差、缺乏动态控制诸种问题，因此本文设计了一种智能排缆控制系统，将摆轮、液压驱动系统、操作台及多种传感器合理集成，并具有手动模式、自动模式及应急释放等完备功能，更重要的是采用了位移、角度双传感器监测、PID闭环控制及奇偶层差异化控制策略，由此自然、妥帖地解决了钢丝绳卷绕的高精度排缆问题。实验及应用结果清楚地验证了所设计系统能将钢丝绳叠压率严格控制在3%以内，排缆位置偏移量控制在5mm以内，故而钢丝绳寿命延长，设备运行更安全，也极好地满足了海洋工程、起重机械诸种场景对钢丝绳卷绕的需求。

关 键 词： 钢丝绳卷绕；PID控制；奇偶层策略

Research on a New Type of Intelligent Wire Ropes Arranging Control System

Xu Xiaoling^{1,2}, Han Linqing^{1,2}

1.Shanghai Zhenhua Heavy Industry (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125

2.CCCC-Zhenhua Offshore Heavy-Lift & Pipe-Laying Core Equipment Engineering Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200125

Abstract： Aiming at the problems of high labor intensity and low precision in traditional manual wire ropes winding, as well as insufficient adaptability and lack of dynamic control wire ropes arranging devices, this paper designs an intelligent wire ropes arranging control system based on hydraulic drive. The system integrates swing wheel, hydraulic drive system, operation platform and various sensors, and has functions such as manual mode, automatic mode and emergency release. Through dual sensor monitoring of displacement and angle, PID closed-loop control and differentiated control strategies for odd and even layers, high-precision and highly adaptable wire ropes arranging. Experimental and application verification show that the system can control the wire ropes overlapping rate within 3% and the arranging position deviation within 5mm, effectively improving the service life of wire ropes and the safety of equipment operation, and adapting to the winding needs of marine engineering, hoisting machinery and other scenarios.

Keywords： wire rope winding; PID control; odd and even layer strategy

引言

钢丝绳卷绕作业是海洋工程、起重机械中极其重要的基础工序，排缆精度及效率直接关系设备运行安全及钢丝绳使用寿命，故而实际作业中人工排缆存在明显问题：劳动强度大、作业效率低，钢丝绳叠压率高达15%以上，长期如此极易导致钢丝绳磨损、断裂等重大安全隐患，进而造成设备停机。目前虽然已有若干排缆装置实现自动化，但是毋庸置疑，其机械结构仍有两大明显缺陷：第一，装置仅能适配固定直径钢丝绳（误差范围 $\pm 5\text{mm}$ ），不能自然兼容不同规格的钢丝绳，场景适应性极差。第二，系统按预设机械轨迹运行，对卷筒转速变化、钢丝绳张力波动等复杂工况不能及时、可靠地修正排缆位置偏差（常见偏移量 $> 10\text{mm}$ ），因此常需停机进行手动调整。更值得重视的是，近几年虽有技术尝试用光电传感器监测排缆层数，但尚未突破摆轮系统与电控算法协同优化的根本瓶颈，且传感器的加装也带来了系统维护成本的增加^[1]。因此，研发一款高精度、强适应性、低成本、运行稳定的智能电控排缆系统，是解决当前钢丝绳卷绕作业诸种痛点，推进行业技术升级的必然要求。本文以液压驱动技术及智能电控算法为基础，从系统软硬件一体化的角度出发，系统、严谨地设计了一种集多传感器监测、PID闭环控制、奇偶层差异化调控于一身的智能排缆系统，继而对其整体架构、核心部件、控制逻辑及异常校正策略予以详细阐述，最终给出切实可行的钢丝绳卷绕作业智能化升级方案^[2]。

一、系统总体设计

（一）设计目标

由于本系统是以解决传统排缆作业诸种痛点为出发点的，因此很自然、合理地提出了三大明确、层次分明的设计目标：第一是高精度排缆，把钢丝绳叠压率严格控制在5%以内，排缆位置偏移量 $\leq 8\text{mm}$ ，第二是强适应性，能处理直径5 - 50mm各种规格的钢丝绳，第三是高稳定性、高经济性，有手动/自动双模式及应急功能，故长期运行成本极低^[3]。

（二）系统组成

系统整体采用“液压驱动+电控核心+多传感器监测”的一体化架构，由1个摆轮、1套液压驱动系统、1个操作台及若干传感器合理构成，因而能十分自然、可靠地实现钢丝绳卷绕的智能排缆控制。具体而言，摆轮是核心执行机构，用左右支撑运动油缸的伸缩来调节摆轮角度，从而直接控制钢丝绳的横向排缆运动，故其角度调整决定了排缆精度及稳定性。因此摆轮本体上安装有若干限位传感器，实时、准确地采集各油缸的运动位置及状态，作为系统控制最直接的基础数据支撑。液压驱动系统是系统动力源，由液压油箱、液压泵站、阀组及驱动摆轮的液压油缸诸部分组成，其液压驱动方式有扭矩大、响应快、运行平稳诸种突出优点，由此极好地适应卷筒转速变化、钢丝绳张力波动等复杂工况，切实保证摆轮运动的精度。操作台集成HMI（人机交互界面），既接收手动速度调节、模式切换、应急释放等运行指令，又实时显示液压温度、液压油位、系统压力、单个油缸压力诸种参数，同时自动记录运行数据，及时进行故障预警，真正把作业安全落到实处。传感器模块是系统高精度控制功能实现的关键，限位传感器安装于摆轮本体，用来采集各油缸运动位置及状态，实现油缸行程的严格限位保护，编码器安装于目标卷筒轴侧，直接、可靠地测量卷筒转速、旋转方向及钢丝绳位移，为排缆位置计算提供最关键的数据支持，而液压压力传感器、温度传感器等则对液压系统进行全面监控，防止液压系统异常带来的风险^[4]。

（三）核心功能设计

这套系统一共配备三项核心运行功能，可以适配不同作业场景的使用需求。

手动调速模式：作业人员利用操作台手动调整排缆的运行速度，适合用在对卷绕作业精度要求较高的场景中；

自动恒张力控制模式：系统利用重量传感器收集的张力反馈数据，自动调整液压输出参数和摆轮运行速率，全程让钢丝绳张力保持在恒定范围，避免钢丝绳出现过度松弛或者张拉过紧的问题，**手动应急解锁功能：**要是设备突发故障，作业人员可以借助操作台启动应急释放程序，快速完成钢丝绳卸载操作，以此保障设备本身和现场人员的安全。

二、关键硬件与传感器技术应用

（一）液压驱动系统优化

由于液压驱动的稳定性对排缆作业的可靠性有直接影响，因

此系统选用了高压重载型液压泵站，阀组采用电液比例阀来精确控制管路流量和压力，又在液压油箱中设置了过滤及温控装置，保证液压油清洁度及温度都处于理想状态^[5]。

（二）高精度传感器监测

由于要保证排缆精度的双重可靠性，因此本系统采用了“油缸位移传感器+角度传感器”的双监测方案。

由于油缸位移传感器能可靠、直接地测出左右油缸的实际伸缩位置，故其测量信号送入专用传感器仪表后转换成4 ~ 20mA标准模拟量信号输入PLC，而安装于摆轮旋转轴处的角度传感器实时采集摆轮角度信息，也以4 ~ 20mA模拟量信号形式反馈PLC，作为排缆位置的二次校验数据。因此双传感器联动监测可以自然、合理地消除单一传感器的测量误差，使系统对摆轮位置及卷筒运动状态的检测都十分准确，也由此为高精度排缆打下良好基础^[6]。

（三）软启动技术集成

在液压驱动设备启动阶段，电机启动冲击电流大，易对配电系统造成负荷冲击，同时加剧电机及传动部件的机械应力。本系统采用软启动，实现电机平稳启停；降低电机启动电流，减少配电系统增容投资，提升系统经济性；减小传动部件机械应力，延长使用寿命；避免直接启动引发的喘振等问题，保障液压系统运行平稳。

三、系统控制逻辑设计

（一）液压驱动系统的启动

系统启动时，首先需要进行重载问询状态的确认。只有当配电板允许重载运行后，各指示灯信号才会亮起，标志着液压泵站已开始按照预定的排量和压力要求进行运行。确保液压系统在工作中能够提供充足稳定的动力^[7]。

（二）摆轮运动控制与油缸动态调节

在整个作业过程中，摆轮系统的核心作用在于根据钢丝绳的状态和卷筒运行数据实现精确的角度控制。具体过程如下：

1. 数据采集与位置计算

系统通过编码器实时监控卷筒的转速、旋转方向以及钢丝绳的实际位移。PLC通过预设的算法及计算块，将钢丝绳当前所在理想位置与实际位置进行比对，并通过数学模型转换为对应的摆轮角度。

2. 运动指令下达

根据计算结果，PLC将期望摆轮所需的角速度与左右油缸的伸缩行程进行匹配。通过将所得到的角度数据转换为具体的油缸行程指令，系统对左右油缸分别进行控制，使其达到预期的伸缩状态^[8]。

3. PID 闭环调控

由于要对油缸运动加以精确控制，故PLC对油缸动态位置采用了PID算法进行实时调节，即先由PID控制模块求取修正信号，再把该信号转换成相应的模拟量，直接输给油缸液压比例阀，因此油缸能按设定轨迹十分平稳地运动。

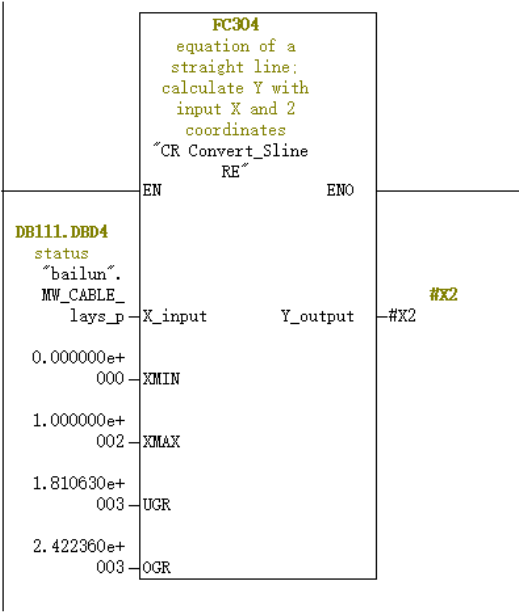


图1 摆轮位置计算块

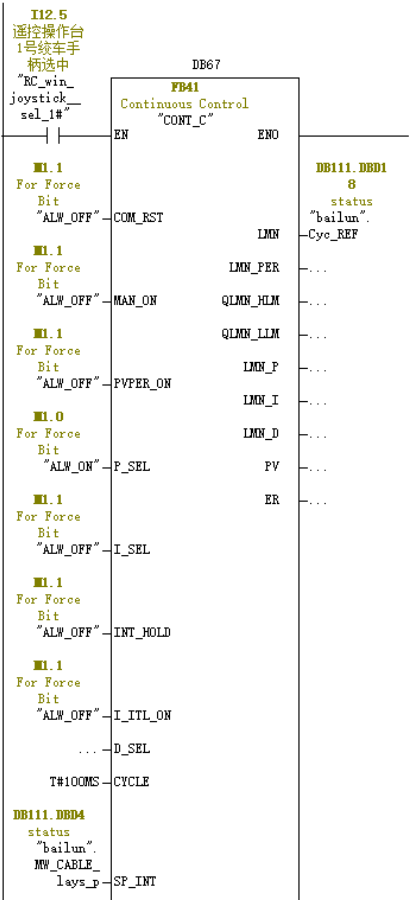


图2 PID控制模块

（三）奇偶层操作策略

针对钢丝绳在卷筒不同层次的收放过程，系统设计了如下操作策略以适应不同的运动方向需求：

1. 奇数层作业

由于奇数层收缆时卷筒排缆方向自左向右，故奇数层收缆时油缸的动作与卷筒运动一致：左侧油缸伸长，右侧油缸回缩。相应地，放缆时控制逻辑把方向反过来，即右侧油缸伸长，左侧油缸回缩，由此自然、合理地实现钢丝绳的调整。

2. 偶数层作业

由于卷筒处在偶数层收缆状态时排缆方向是从右向左，所以此时右侧油缸伸长、左侧油缸回缩，放缆时控制逻辑把动作方向恰如其分地反转，即左侧油缸伸长、右侧油缸回缩。而卷筒奇偶层状态又是由编码器采集的数据准确、可靠地计算得出的，故整个过程自动化水平很高^[9]。

3. 构建卷筒运动学模型：

$$v = \omega \times R(n)$$

式中：n为缆层数， $R(n)=R_0+(n-1)d$

通过增量式编码器(分辨率 0.1°)实时采集 ω 和转向，经PLC解算得出理论摆角 $\theta=\arctan(v/\omega L)$ 。执行机构根据层数奇偶性执行差异化控制策略：

表1 奇偶性控制工况简介

工况	排缆方向	执行机构动作	油缸状态矩阵
奇层收	左→右	相位角 + $\Delta\theta$	[L+, R-]
奇层放	右←左	相位角 - $\Delta\theta$	[L-, R+]
偶层收	右←左	镜像相位角 + $\Delta\theta$	[R+, L-]
偶层放	左→右	镜像相位角 - $\Delta\theta$	[R-, L+]

四、钢丝绳置位与异常校正策略

（一）钢丝绳置位功能设计

为确保卷绕作业初始状态精准，系统预留钢丝绳置位功能，应用场景包括：

卷绕作业前：通过手动或自动方式，将钢丝绳实际位置与摆轮当前角度精确匹配，完成初始定位，避免初始位置偏差引发的后续排缆误差；

作业中断后：系统恢复运行前，通过置位功能重新校准钢丝绳位置，确保后续排缆连续性。

置位功能支持手动干预与自动校正两种模式，操作人员可根据现场工况灵活选择，提升系统适配性。

（二）异常校正机制

由于作业过程中传感器能可靠、及时地检测钢丝绳位置异常（即偏移量超阈值、钢丝绳松弛等），因此系统对此类情况有十分明确、合理的自动校正措施：首先由操作台向操作人员发出故障预警提示，继而系统自动启动校正程序，以PID调控方式控制摆轮运动来纠正常规位置，若异常不能自动消除，就自动停机，等待人工检查处理后再恢复运行，由此自然地避免钢丝绳磨损。

五、系统性能验证与分析

为验证系统性能，选取海洋工程钢丝绳（直径20mm）、起

重机械钢丝绳（直径8mm）、船舶重工钢丝绳（直径40mm）三类典型规格进行测试，记录系统排缆精度、叠压率、维护成本等指标，并与传统人工排缆、机械式排缆装置进行对比^[10]。

验证结果表明：由于钢丝绳叠压率控制在3% 以内，排缆位置偏移量控制得十分稳定，即5mm,因此比传统方案中15% 的叠压率及 > 10mm的偏移量有极大改进，又因能兼容直径5 – 50mm 各种钢丝绳而毋需更换机械部件，故维护成本比现有光电传感器方案低25%，且不需要频繁停机调整，故作业效率提高了40% 以上。更难得的是连续运行72小时无任何故障，液压系统与电控算法相得益彰，摆轮运动极其平稳。

六、应用价值

由于本系统很好地解决了传统钢丝绳卷绕作业中精度低、适应性差、维护困难诸种问题，因此能切实提高设备运行的安全性，延长钢丝绳使用寿命，又有利于降低劳动强度、降低经济成本，故而很自然地适用于海洋工程、起重机械、船舶重工各领域，市场前景十分广阔。

参考文献

[1] 徐纪中. 桥式起重机筒卷筒多层缠绕工艺的质量控制研究 [J]. 工程技术 (全文版), 2025(4): 187–190.

[2] 陈明. 数字化智能排缆器的设计 [J]. 工矿自动化, 2014(5): 78–81.

[3] 中船重工集团公司第七一一研究所. 一种平行折线式卷筒及其制作方法 :CN106081967A[P]. 2016–11–09.

[4] 上海振华重工集团股份有限公司. 一种高效稳定卷筒排缆装置 :CN202511928708.0[P]. 2025–06–12.

[5] 鞍钢钢丝绳有限责任公司. 一种粗直径耐磨损多层缠绕钢丝绳 :CN202021765432.9[P]. 2020–09–11.

[6] 戴小琴, 施湧, 孙远韬, 等. 一种双折线卷筒爬台结构的设计方法 :CN112374403B[P]. 2022–06–03.

[7] 周大乔, 丛海军, 王亚斌, 等. 一种机械式排缆器 :CN107458977A[P]. 2017–12–12.

[8] 丛海军, 王亚斌, 王晓帅, 等. 一种摩擦双卷筒的钢丝绳保护系统 :CN107445087A[P]. 2017–12–08.

[9] 丛海军, 王亚斌, 钟明, 等. 一种用于疏浚船的横移绞车 :CN107458974B[P]. 2023–11–21.

[10] 上海振华重工 (集团) 股份有限公司. 一种多层缠绕式卷筒排缆装置 :CN222684143U[P]. 2025–03–28.