

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.047

ROV 电缆自动收放优化技术研究

曾明, 邵明奇, 汪向前, 李硕

(中国船舶集团有限公司 第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要:水下遥控机器人作业时脐带电缆通过绞车频繁收放, 电缆在储缆盘上的排布整齐程度直接影响电缆的使用寿命。通过工程应用分析, 提出一种利用图像检测手段对电缆自动收放排布进行优化的方法, 并对该方法进行了验证。结果表明: 利用图像检测技术能够有效解决现有手段电缆收放排布不均匀的问题, 并改善电缆收放排布的齐整度。

关键词:水下遥控机器人; 脐带电缆; 图像检测

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)03-0246-04

Research of Optimization Technology of ROV Cable Automatic Retraction

ZENG Ming, SHAO Mingqi, WANG Xiangqian, LI Shuo

(No.710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China)

Abstract: In underwater ROV operation, the umbilical cable is frequently retracted and unwound through winch, and the neatness of its arrangement on storage tray directly affects the service life of the cable. On the basis of the analysis on engineering application, a method of optimizing the automatic retraction and unplacing arrangement of cables using image detection method is proposed, and verification of the method is conducted. The results show that the use of image detection technology can effectively solve the problem of uneven cable retraction and arrangement by existing methods, and greatly improve the uniformity of cable retraction and arrangement.

Keywords: ROV; umbilical cable; image detection

0 引言

水下遥控机器人(ROV)作为一种重要手段, 在人类探索、研究、开发海洋资源的过程中承担着重要任务, 目前已广泛运用于区域勘探、水下障碍物清除、定点搜救打捞作业等领域^[1]。ROV 利用脐带缆传输电力或信号^[2]。

ROV 的作业环境复杂多变, 为避免电缆在乱流作用下与水下障碍物发生缠绕, 甲板单元或者水下中继站配置电缆绞车用来同步收放、储存脐带缆, 并根据 ROV 工况实时动态收放调整^[3]。功能上为保证排缆的有序性, 会设计自动排缆机构^[4], 常见方案为主缆盘链传动以定速比驱动往复丝杠传动换向^[5]。此类设计未着重考虑排缆性能, 对于直径较细的复合缆在排缆过程中会出现错层、漏圈等现象^[6], 主要应用于对电缆保护要求不高的场合。对于部分精密型电缆, 有研究采用基于 PLC 伺服电机驱动的自动排缆装置, 利用力矩控制结合 PID 控制模型^[7], 可将排缆入绳角控制在 $\pm 1.5^\circ$ 以内, 能够实现较好的排缆效果^[8]。

实际运用中, 由于电缆柔性可变形, 加之每圈缆之间紧密程度有差异, 频繁收放运行时间久后会累积一定误差, 特别是收放速度及电缆上张力瞬时陡然变化时, 会出现漏排、错排或排缆不均等问题^[9], 导致出缆口电缆角度过大造成电缆拖拽、跳缆等现象^[10], 遇到此类状况往往需要人工干预, 手动校正排缆状态。

针对上述问题, 本文在一种张力控制型绞车的基础上引入了图像检测控制技术, 利用图像检测手段对排缆误差进行校正, 对自动排缆控制进行了优化设计, 对提高排缆的整齐程度、减小电缆的挤压磨损、提升电缆的耐用性等方面具有非常实际的意义。

1 系统方案

本文基于一种张力控制型绞车, 在恒张力检测控制的基础上增加图像识别检测控制系统, 主要组成包括: 牵引单元、张力检测单元、排缆单元、收缆单元、图像检测控制单元、制动单元、PLC 控制单元等^[11], 如图 1 所示。复合电缆整体分层排

第一作者简介: 曾明(1985—), 男, 湖北宜昌人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为水下机器人布放回收系统设计, zengming0504@126.com。

列储存在缆盘上,缆盘由伺服电机驱动,内置光电滑环。

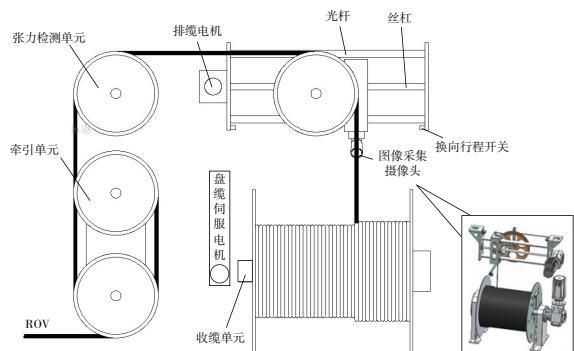


图1 系统结构组成示意图

排缆单元位于收缆单元正上方,由支架、排缆伺服电机、丝杠螺母+双光杠排线机构、换向行程开关、导向机构组成。排缆时,伺服系统通过跟踪缆盘的转动,控制导向机构的位置以保持排缆同步。

张力检测单元位于排缆单元前端,导向轮轴上安装的张力传感器可实时检测电缆上张力的大小,PLC通过检测到的张力动态控制牵引伺服电机的输出转矩。

牵引单元安装在张力检测单元下方,采用多槽双轮结构,脐带缆由出缆口进入,经双轮多圈绕制后进入到张力检测单元。双轮绕制可储存一定长度电缆,起到一定缓冲作用,避免外部干扰传递到张力检测单元。

图像检测及控制单元由图像采集摄像机和图像检测控制计算机组成。摄像机安装在排缆机构的出缆口位置,视场正对导轮的出缆口及主储缆盘并随出缆口导轮平移运动,可实时观察电缆相对缆盘的角度。为消除背景噪声,电缆排缆口后方增加白色背板进行遮挡,保证采集的图像质量。图像检测控制计算机接收到摄像机采集的图像信息,经运算处理后输出控制信号给PLC,控制排缆伺服电机动作。

2 控制系统及工作原理

控制系统的整体构架如图2所示。电缆绞车与用户操控台通过RS422通信,可设定收放缆的速度、张力大小等并显示绞车的实时工作状态。动作执行单元驱动机构均采用伺服电机加编码器,可实现速度、位置的闭环控制。电缆图像采集单元随排缆单元移动以固定视场采集电缆的图像

信息。图像检测处理控制计算机和PLC之间通过串口通信,二者整体集成在控制柜内部。

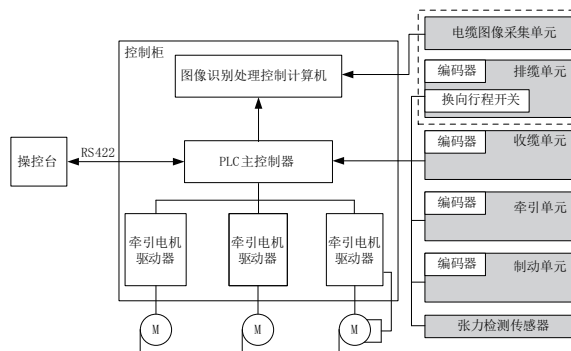


图2 电气控制系统构架

计算机在接收PLC下发的控制脉冲值同时接收采集的图像信息,在得到采集的视频图像后,先进行检测处理,识别出当前电缆的入缆角,然后经过运算后将排缆电机的控制脉冲数量、脉冲频率发送给PLC,PLC控制伺服电机动作,调整电缆的入缆角,以此构成对入缆角的闭环控制^[12](图3)。

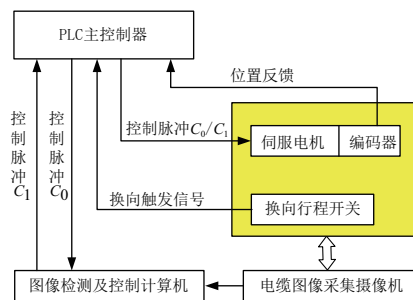


图3 排缆系统控制原理

3 图像检测处理

3.1 硬件及软件环境

图像采集摄像机选用兼容UVC协议的USB2.0普通工业相机,分辨率为480 Px,采样帧率30 帧/s,搭配2.15 mm短焦镜头。图像检测控制计算机采用JetsonNano人工智能嵌入式开发板^[13],搭载4核ARM A57CPU,4 G内存,包含了一块搭载英伟达研发的128核Maxwell架构的GPU,在兼具体积小、功耗低的同时还具有较强的计算能力,完全能够胜任此应用场景,满足图像检测实时性要求。

图像检测算法开发基于Ubuntu 18.04 LTS系统,采用OpenCV(open source computer vision library)开放源代码计算机视觉库,编程语言采用Python。

3.2 图像预处理

预处理包括图像采集、裁剪、灰度、二值化等。采集的原始图像分辨率为 (640×480) Px,采集到的视场所包含的图像信息较多,为减小识别处理运算量先要进行裁剪,重点关注出缆口电缆信息。

裁剪后的图像先进行灰度处理,目的是将图像的三通道数据转化为单通道,简化后续计算量,之后再进行二值化处理,将图像上的像素点的灰度值设置为 0 或 255,使整个图像呈现出明显的只有黑和白的视觉效果,以简化视觉处理复杂度,分割出指定物体的特征形状。

二值化分割核心在于提取出合适的阈值,按采取方法可以划分为全局阈值法和局部阈值法,在此分别选取了比较代表性的大津法(OTSU)和自适应阈值法^[14]。进行二值化分割的效果如图 4 所示。图像检测目标主要是电缆外轮廓区域,从减小后续运算量角度来说,采用大津法(OTSU)能够更好地分割出目标信息。

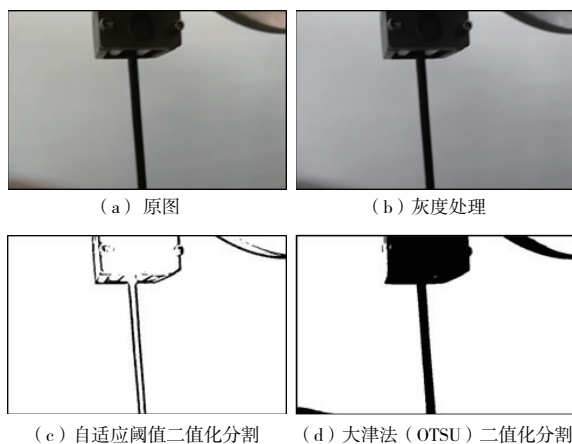


图 4 图像的预处理

3.3 图像检测

经预处理后得到比较明显的电缆轮廓信息,要进一步检测电缆的入缆角度还需要进行边缘检测^[15],将电缆的边缘轮廓提取出来。OpenCV 中自带的边缘检测的算子和滤波器包括 Canny 算子、Sobel 算子、Laplace 算子以及 Scharr 滤波器等,在此采用 Canny 算子,得到的边缘检测效果如图 5 所示。

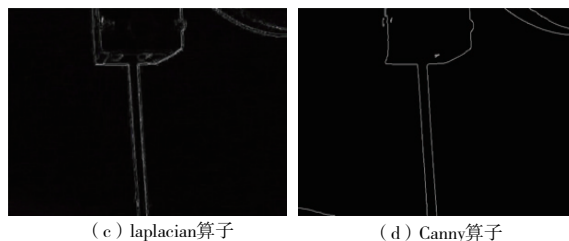
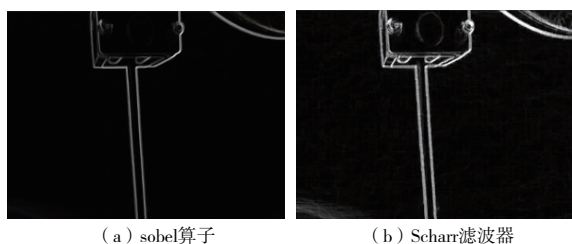


图 5 边缘检测算法效果对比

电缆的边缘轮廓主要特征是竖直方向的近似直线段,所检测的电缆角度实际上就是外轮廓直线的竖直夹角,需要进一步将轮廓的直线特征提取出来。在这里采用 OpenCV 中的霍夫线变换,利用 `cv2.HoughLines` 函数遍历出所有直线,检测出所有的直线段信息,对应输出的直线段端点坐标 (x_1, y_1, x_2, y_2) ,利用反正切函数求解得到线段的的角度值。

3.4 滤波处理

在提取直线特征时,其他不相关图像信息如导缆头等也包含了进去,为了检测的准确性,这部分干扰特征需要滤除。在此采取的方法是利用角度值粗过滤,求解出所有直线段竖直方向的角度。由于排缆过程误差的积累是缓慢变化的,所以角度的变化也应该是连续的,夹角应处于连续的范围内,在这里限定在 $(-30^\circ, +30^\circ)$ 范围内,将所有超出这个范围的直线段滤除。

经过此步骤处理后,剩下的干扰如导缆口纵向轮廓边等可利用统计方法滤除。分析发现检测出的主要直线段都集中在电缆轮廓边缘附近,在此首先计算出所有直线角度平均值的大小,然后统计出所有大于平均值的直线中出现频次最多的值,以此可确定为电缆角度的真实值。

最后检测出的电缆实际入缆角如图 6 所示。经过此滤波算法处理后可滤除绝大部分干扰,在保证检测准确性的同时还可兼顾执行效率。从实际运行效率来看完成单次图像检测算法的执行时间为 8 ms 左右,具有较好的实时性。

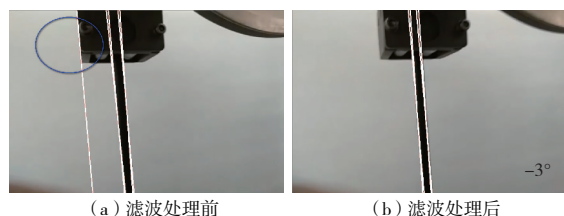


图 6 实时检测结果

4 控制模型

当图像检测及控制计算机检测到电缆的角度超出正常工作角度范围($\pm 1.5^\circ$ 以内)开始进行同步误差校正控制。计算机根据当前检测的角度值进行 PID 调节,输出给 PLC 控制伺服电机的排缆速度,通过设定 PLC 控制脉冲,始终保持收放缆过程中排缆速度和位置的同步。系统控制模型如图 7 所示。

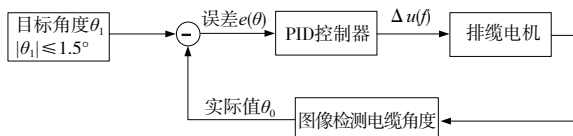


图 7 图像检测角度校正控制模型

PID 调节采用增量式 PID 控制模型为

$$\Delta u_f[n] = K_p \{e_\theta[n] - e_\theta[n-1]\} + K_i e_\theta[n] + K_d \{e_\theta[n] - 2e_\theta[n-1] + e_\theta[n-2]\} \quad (1)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数;输入量为检测到的角度值 θ_0 ;输出量为脉冲发送频率的增量 Δu_f 。

5 试验验证

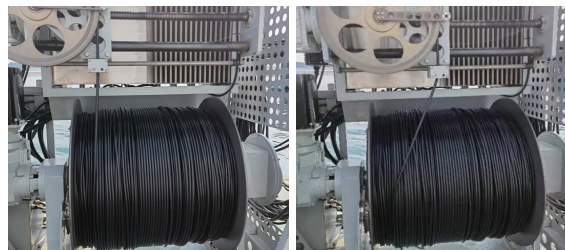
结合某项目科研验证试验,在湖北某水库进行了绞车自动排缆功能性能验证,共进行 4 个对比航次,每个航次约 30 min。试验记录了图像检测算法参与控制和不参与控制状态下实际排缆角度变化范围和人工介入手动矫正调节的次数,试验数据如表 1 所示。结果表明:在算法参与控制条件下角度值均能稳定控制在 $(-1.5^\circ, +1.5^\circ)$ 范围内,且全程无需手动介入调整;而在算法不参与控制状态下,角度范围变化较大,每个航次平均需要进行 2 次手动调节。

表 1 试验对比数据

航次	算法参与控制		算法不参与控制	
	角度范围/ $^\circ$	手动矫正调节/次	角度范围/ $^\circ$	手动矫正调节/次
1	$(-1.5, +1.0)$	0	$(-17, +22)$	2
2	$(-1.0, +1.0)$	0	$(-15, +30)$	3
3	$(-0.5, +1.5)$	0	$(-12, +10)$	1
4	$(-1.5, +1.5)$	0	$(-18, +20)$	2

排缆效果对比如图 8 所示。采用图像检测算法参与控制,缆盘中间主体部分整体的排缆效果

要优于无算法控制效果。综合分析表明,采用图像检测控制手段能够有效实现自动排缆优化,满足预期设计要求。



(a) 算法参与控制 (b) 无算法及人工参与控制

图 8 排缆效果验证对比

6 结语

针对现有电缆绞车自动排缆机构工程应用出现的问题,提出了利用图像检测手段进行排缆误差校正优化的方法,并开展了控制系统、硬件组成、实现算法等设计及验证工作。工程应用结果表明:利用图像检测手段结合 PID 控制,能够消除动态排缆过程中的相对误差,明显改善排缆质量。本文的研究对其他 ROV 脐带缆收放系统的优化设计具有一定指导意义。

参考文献:

- [1] 蒋新松,封锡盛,王棣棠. 水下机器人[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,2000.
- [2] 施兴华,曹奔,钱估麒,等. ROV 脐带缆水动力分析[J]. 舰船科学技术,2022,44(18):86-93.
- [3] 吴杰,王志东,凌宏杰,等. 深海作业型带缆水下机器人关键技术综述[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2020,34(4):1-12.
- [4] 聂时振,李卓,程泽平. 浅析电缆绞车排缆机构的发展与应用[J]. 机械研究与应用,2016,29(5):161-163.
- [5] 周迪锋. 一种与 ROV 协同工作的电缆绞车设计[J]. 机电工程技术,2017,46(10):81-82,140.
- [6] 万步炎,彭奋飞,金永平,等. 海洋探测装备收放缆力学性能研究综述[J]. 中国机械工程,2024,35(9):1521-1533.
- [7] 蒋恒深,吴朋朋,朱小东. 基于 S120 的光电复合缆绞车驱动控制系统设计[J]. 机电设备,2017,34(6):14-18.
- [8] 蒋恒深,吴朋朋,朱小东. 基于 PLC 的深海 ROV 光电复合缆绞车控制系统设计研究[J]. 船舶,2018,29(1):68-73.
- [9] 康守权,张奇峰. 遥控水下机器人脐带缆收放绞车设计及牵引力分析[J]. 海洋工程,2010,28(1):117-120.

(下转第 271 页)

广泛的应用前景。除了可以应用于电梯故障检测中之外,还可以应用于其他设备的故障检测中。例如,可对机械设备、电气设备、控制系统等进行故障检测和诊断,提高设备的可靠性和安全性。综上所述,本文研究的基于支持向量机和频域信号熵的电梯急停故障检测方法具有一定的理论意义和应用价值,可以为电梯和其他设备的故障检测研究提供新的思路和方法。

参考文献:

- [1] 杜立强. 向家坝水电站电梯故障及解决措施[J]. 人民长江, 2022, 53(增刊2): 155-156, 160.
- [2] 侯靖琳, 仇润鹤, 薛季爱, 等. 基于知识图谱嵌入和补全的电梯故障预测[J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(1): 224-230.
- [3] 孙庆港, 王呈. 改进 LSTM-AE 算法的电梯知识库故障征兆预测[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(7): 311-318.
- [4] 林宁. 基于机器视觉技术的电梯曳引轮磨损检测研究[J]. 微特电机, 2022, 50(3): 26-30.
- [5] 王硕禾, 巩方超, 古晓东, 等. 基于特征融合的变电设备类型及故障识别算法研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(4): 95-100.
- [6] 李泽华, 柴铮, 赵春晖. 基于多通道卷积的电梯异常振动故障诊断[J]. 控制工程, 2023, 30(3): 427-433.
- [7] 李森娟, 张萍, 岳大为, 等. 基于支持向量机的风电机组故障预测[J]. 计算机仿真, 2022, 39(5): 84-88, 180.
- [8] 沙济通, 邢龙, 胡占飞, 等. 基于小波变换的风力发电机组故障检测方法[J]. 水力发电, 2023, 49(6): 99-104.
- [9] 孙康, 金江涛, 李春, 等. 基于优化经验小波变换与改进支持向量机的齿轮箱故障检测策略[J]. 热能动力工程, 2022, 37(8): 186-196.
- [10] 陶然, 许有才, 和杰, 等. 基于 SSWD 优化 LMD 的高速电梯滚动导靴振动信号特征提取[J]. 振动与冲击, 2021, 40(10): 196-203.
- [11] 曲洪权, 魏冰冰, 张正, 等. 基于 FDM 能量熵的特征提取方法及其在光纤振动识别中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0706006.
- [12] 王振亚, 姚立纲, 蔡永武, 等. 基于熵-流特征和樽海鞘群优化支持向量机的故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(6): 107-114.
- [13] 高伟, 陈渊隆, 黄天富. 一种基于小波包分解和特征分量动态优选的剩余电流动作保护方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(1): 311-323.
- [14] 王宇, 肖岚中, 冯诗宇, 等. 基于小波包变换和自适应 MCKD 的故障特征提取研究[J]. 电子制作, 2025, 33(5): 77-80.
- [15] 曹源, 宋迪, 胡小溪, 等. 基于改进时域多尺度散布熵与支持向量机的转辙机故障诊断[J]. 电子学报, 2023, 51(1): 117-127.
- [16] 王贡献, 张森, 胡志辉, 等. 基于多尺度均值排列熵和参数优化支持向量机的轴承故障诊断[J]. 振动与冲击, 2022, 41(1): 221-228.
- [17] 杨阳, 章治, 吴雪钰, 等. 采用改进遗传算法的无线电能传输系统参数优化设计[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(4): 93-104.
- [18] 蔡一杰, 陈俊杰, 王君, 等. 基于遗传算法优化支持向量机的船用柴油机气门漏气故障智能诊断方法[J]. 内燃机工程, 2022, 43(2): 71-76, 84.

收稿日期: 2024-07-28

(上接第 249 页)

- [10] 陈育喜, 张竺英. 深海 ROV 脐带缆绞车设计研究[J]. 机械设计与制造, 2010(4): 39-41.
- [11] 楼宁. 机械自动化控制中 PLC 技术的应用研究[J]. 中国机械, 2024(34): 92-95.
- [12] 刘晓进, 赵延明, 敬明洋. 电驱动海洋绞车自动排缆控制系统建模与仿真[J]. 机械工程师, 2024(2): 74-78.
- [13] 刘建文, 沈瑞琳, 马世登, 等. 基于嵌入式机器视觉的流水线分拣机器人设计[J]. 计算技术与自动化, 2024, 43(2): 17-23.
- [14] Joe Minichino. OpenCV 3 计算机视觉: Python 语言实现[M]. 2 版. 苗贝贝, 史斌, 刘波, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016: 50.
- [15] 吴宇翔, 郑兆启, 石朴, 等. 基于机器视觉的 PET 瓶坯缺陷检测系统设计[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(5): 255-258.

收稿日期: 2024-08-28