

新型软管绞车控制系统研究

徐晓岭, 韩林青, 苏乐平

上海振华重工（集团）股份有限公司, 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.2025120013

摘 要： 软管绞车是风电安装船打桩锤系统的核心装备，是海洋工程、海洋风电领域稳定高效、可靠运行的有力保障。本研究聚焦于新型软管绞车控制系统，深入剖析其工作原理及控制策略。通过探究软管排布调节机制及自动化控制，揭示其提升作业安全与效率的关键作用。借助先进传感器技术，实现对软管绞车运行参数的实时监测与精确控制，有效降低系统运行误差与故障发生率。

关 键 词： 软管绞车；电动排管；转速控制；转向判定

Research on the Control System of New-Type Hose Winch

Xu Xiaoling, Han Linqing, Su Leping

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

Abstract： The hose winch is the core equipment of the pile hammer system on wind power installation vessels. It is a powerful guarantee for the stable, efficient and reliable operation in the fields of marine engineering and offshore wind power. This research focuses on the new control system of the hose winch, deeply analyzing its working principle and control strategy. By exploring the adjustment mechanism of hose and the automatic control, the key role in enhancing operation safety and efficiency is revealed. Utilizing advanced sensor technology, real-time monitoring and operating parameters of the hose winch are achieved, effectively reducing system operation errors and failure rates.

Keywords： hose winch; electric hose laying; speed control; direction determination

前言

风能作为可再生的清洁能源分布广泛且发电成本稳定。近年来，我国大规模推动海上风电开发，在海上风电开发技术集成及关键装备领域进步巨大，目标是成为海上风电强国。这些需求促进了风力开发装备智能化的发展，同时也提出了新挑战。目前海上风电机组单机容量已进入18 MW时代，大容量海上风机具有节约海洋资源，降低单位造价成本，提高单位面积海域装机规模等多个优势，这导致新一轮的深水风电桩的铺设，而新型打桩锤软管绞车的研究无疑提高了风电桩铺设的工作效率。同时，海上风电从近海向深远海全面转变，作业海况越来越恶劣，作业海深大幅度增加，打桩锤软管容量越来越大，依靠人力将很难解决软管的回收问题，所以对新型软管绞车的需求也日益增加。

一、软管绞车概述

软管绞车是风电安装船打桩锤系统的重要组成部分，主要用于卷绕、操纵和输送液压软管，是海洋工程、风电安装领域的核心关键装备^[1]。传统软管绞车的排管器采用的是机械结构，然而面对不同规格的软管和不同尺寸的卷筒，机械结构排管器需要更换对应的齿轮系列，通用性较差；且齿轮的设计计算误差、制造精度不足等问题，容易导致排管器失效，造成经济损失。同时，机械结构排管器的调试过程繁琐，耗费大量人力与时间成本。例如穿软管时排管器走过头，就需要拆掉链条，然后依靠人工把它再回转^[2]。

新型软管绞车的机、电、液系统高度集成化，将绞车本体、电动排管器、控制柜、管系转换系统、控制系统集成于类似集装箱的钢结构框架中，总体结构紧凑、布局合理，便于运输和吊装，具有一定的移动性，以便在不同的作业区域之间移动，为作业提供灵活性。主要特点包括：变频驱动、可移动性、承载能力大、操作控制灵活、安全性高等。安全性高体现在设备的结构强度、稳定性和电气安全保护措施。

电动排管器由变频电机、变频器、螺杆-滑套机构及配套编码器组成，是取代传统机械排管器的主动式执行机构^[3]。采用电动排管器给调试带来了极大的灵活性，同时也节约了可观的资

作者简介：徐晓岭 (1990.06-)，男，汉族，上海人，毕业于华东理工大学，本科学历，学士学位，工程师，研究方向：海工装备自动化和锚泊定位系统设计研究。

源。排除了软管尺寸差异,卷筒大小及排管器与卷筒间距离等因素,当软管由于要用于不同的功能而改变尺寸时,只需稍加修改程序参数,同时,绞车主体采用电动系统作为主动动力源,使其具有较大的承载能力和精确的控制^[4]。由于软管相对较重,绞车具备足够的承载能力,以确保安全运输和操纵,配备了多种操作控制源,操作人员可以通过本地操作盒或遥控器来控制绞车。软管绞车的功能设计符合作业环境、负载要求、安全标准等,以确保其能够安全有效地满足工况需求。

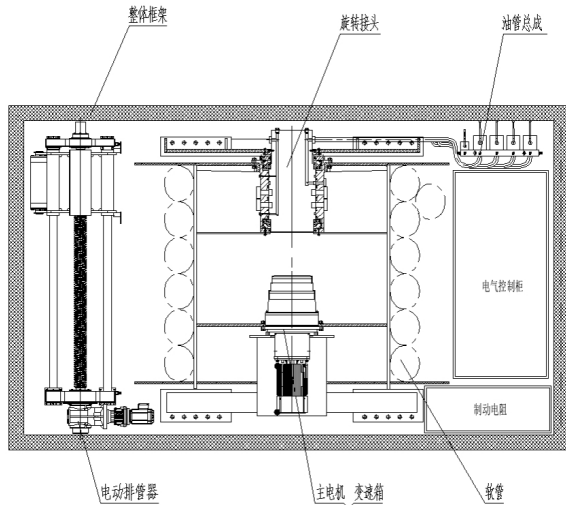


图1 新型软管绞车布置图

二、软管绞车控制系统

软管绞车控制系统集成了动力、控制、执行与监控功能。主要包括:主电机、制动电阻、电气控制柜(变频器、变压器、人机界面、操控面板)、无线遥控器、本地操作盒、电动排管器等。系统架构如下:

(一) 动力与驱动系统

主电机为绞车卷筒提供核心动力,考虑到300m软管的总重约30吨,新型软管绞车额定拉力设计为400kN,主电机具备一定的功率富余,集成电磁制动器和防潮加热器,以适应重载及恶劣工况^[5]。系统配置两台变频器。一台用于主电机的变频调速和制动控制;另一台专门用于驱动电动排管器电机,实现精确的速度控制。配置制动电阻与变频器制动单元配合,用于消耗制动过程中产生的回馈能量,实现快速、安全的制动。整体布置于控制柜顶部,采用自然风冷散热。

(二) 控制系统

控制系统采用一套独立的西门子1500系列PLC控制系统,负责所有逻辑运算、信号采集和控制输出。系统通过各类传感器(如绝对值编码器、限位开关)采集运行状态,并通过模拟量模块等控制变频器及执行元件^[6]。电气控制柜集成主配电、变压器、变频器、PLC、信号采集等元器件,满足户外IP56防护等级。内部配置照明、空调除湿和空间加热器,保证内部环境稳定。为应对主系统故障,设置了物理隔离的应急操作控制回路,并配置应急电源和应急控制箱。

(三) 人机交互与操作系统

系统提供两个功能相近的操作源,无线遥控器和本地操作盒(用于现场检修与调试,自带长电缆)。绞车运行时有声光报警,提醒非作业人员远离操作区域。无线遥控器是软管绞车日常作业的主操作源,正常操作时,操作员在甲板安全区域对软管绞车进行操作,可以直观的观察到软管绞车的实时状态,具备紧急停止、模式选择、正常启停,速度和力矩无级调速等功能,方便操作时及时发现问题,避免误操作^[7]。此外,无线遥控器具有软管绞车和电动排管器的单动和联动功能,具有实用、简洁美观、安装便捷、高灵活性、易扩展等优点。考虑环境恶劣、震动的实际工况,我们将软管绞车的状态显示和操作进行了物理分离。人机界面位于电气控制柜上,提供一个数字化的管理平台,用于实时显示参数(软管长度、线速度、电机转矩)、设置功能、监控状态、报警与故障诊断,并支持远程VPN维护。

(四) 关键传感器与执行机构

绝对值编码器是系统核心精密元件,共配置两个。出于美观简洁、安装维护方便,一个安装于卷筒,用于反馈卷筒位置与角速度;另一个安装于电动排管器,用于反馈其位置。两者是实现同步控制的关键。为了加强对其保护,编码器外部加装了半封闭式防护壳,罩壳外形尺寸小巧美观,上端封闭,下端开放以方便检修和接线,底部加装了漏水孔,满足工作环境防护要求。此外,在极限位置配置了传感器和机械停止撞块,确保系统运行安全。限位设计注重互换性和防护性(如不锈钢材质、PUR电缆)。

三、工作原理

该系统的工作原理核心在于“主从式”控制的主动跟随与同步控制,主电机和电动排管器电机变频驱动并利用电动排管器编码器和卷筒上的编码器保证电动排管器和卷筒的同步、自动跟随和精确度,使软管排列保证同步性和紧密,电动排管器也带有单动的应急操作控制回路。

(一) 主绞车

操作员通过无线遥控器或本地操作盒发出指令(如启动、速度给定),指令被PLC接收。

PLC根据指令控制主电机变频器,驱动主电机按设定速度或转矩运行,带动卷筒进行软管的收放作业。卷筒上的绝对值编码器实时将卷筒的旋转角度、角速度和圈数反馈给PLC,形成速度与位置的闭环控制^[8]。

(二) 电动排管器

整个电动排管器大致原理就是用变频电机来驱动螺杆,螺杆带动滑套,使整个排管装置可以左右移动,然后通过程序来控制电机转速,让滑套和螺杆以一定的比例转动,从而达到排管的作用。其中的难点就是如何让排管器能自动的实现左右移动,并且能根据卷筒排管的圈数自动定位排管器的位置,达到合理排管的目的^[9]。排管器的主速度是通过卷筒的速度根据一定比例额转换的(通过绝对值编码器)。排管器电机由专用变频器驱动,电机通过带动螺杆旋转,进而推动滑套和整个排管装置左右直线移动,实现软管的整齐

排列。系统不再是传统的被动机械联动。PLC根据卷筒编码器反馈的实时速度，按预设的比例系数计算出排管器的基准移动速度。通过对比卷筒编码器和排管器编码器的反馈位置，PLC实时计算出一个补偿速度，叠加到基准速度上，确保排管器位置与卷筒上软管缠绕的圈数精确对应。当一层软管排满（例如6圈）后，PLC通过计算已排圈数的“层数”（商值上取整），并根据该层数的奇偶性（奇数层正转，偶数层反转）自动控制排管器的移动方向，实现层层交替紧密排列。由于采用绝对值编码器，其位置值在断电后不会丢失。系统重启后，PLC能立即读取当前准确位置，使排管器无需重新定位即可继续全自动运行。

1. 转速控制

卷筒转速是驱动电机转速确定的核心依据，通过安装在卷筒轴端的转速传感器，实时采集卷筒的旋转速度，得到卷筒转速信息。排管电机转速的确定分为理论转速计算与速度补偿两个步骤：

（1）理论转速计算：根据卷筒转速信息，结合软管直径、螺杆螺距等参数，计算排管电机的理论转速，确保排管装置的移动速度与卷筒的软管输送速度一致。

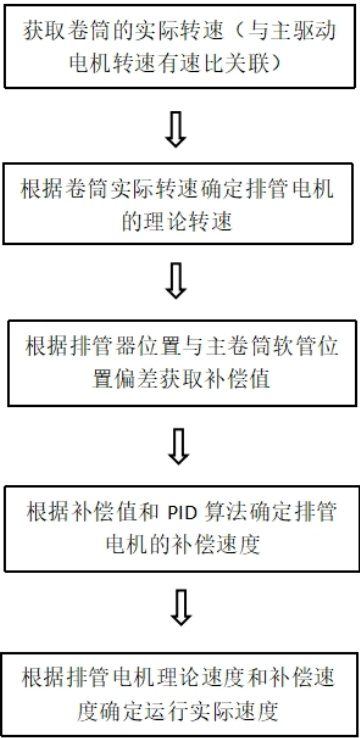


图2 排管器速度控制流程图

（2）PID速度补偿：由于机械间隙、负载变化等因素影响，理论转速无法满足排管精度要求。引入PID控制算法，实时采集电机的实际转速与理论转速的偏差，计算得到速度补偿值；基于速度补偿值对理论转速进行修正，得到驱动电机的最终转速^[10]。

进一步地，速度补偿过程需结合螺杆与卷筒的旋转圈数比值进行优化：获取螺杆旋转圈数与卷筒旋转圈数，计算二者的第一比值；获取软管直径与螺杆螺距，计算二者的第二比值；若第一比值 $\geq$ 第二比值，将理论转速与速度补偿值的差值作为电机转

速；若第一比值 $<$ 第二比值，将理论转速与速度补偿值的和值作为电机转速。

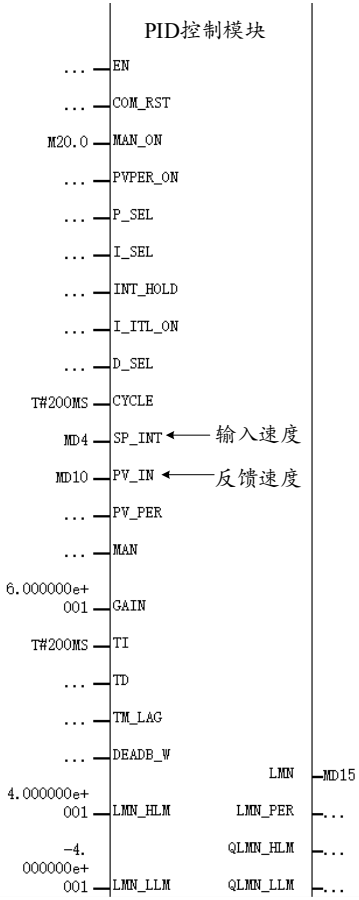


图3 PID控制模块的示意图

2. 转向判定

软管层数是排管电机转向判定的关键依据，通过卷筒编码器采集数据计算层数，步骤如下：

- （1）采集卷筒编码器存储的第一卷筒旋转圈数脉冲数，以及卷筒每旋转一圈编码器输出的第二卷筒旋转圈数脉冲数；
- （2）利用脉冲数比值计算得到卷筒的实际旋转圈数；
- （3）结合排满一层软管所需的卷筒目标旋转圈数，通过实际旋转圈数与目标旋转圈数的比值，计算得到卷筒上待排软管的层数信息。

驱动电机的转向决定排管装置的移动方向，基于层数信息的奇偶性判定转向：至于方向问题，可以根据实际软管排的层数取奇偶来判断。例如排满一层软管是6圈，则可以根据实际圈数除以6的商（上取整）的奇偶来判断，若层数信息为奇数层，驱动电机正转；若层数信息为偶数层，驱动电机反转。通过电机转向的交替变换，实现软管在卷筒上的往复有序排布。整个电动排管器的精确控制在千分之一圈（1圈软管的长度），足以应付排软管的精度要求。根据上述步骤得到的电机转速信息与电机转向信息，向驱动电机发送控制指令，驱动电机带动螺杆按照设定的转速和转向转动，

进而控制排管装置移动，实现对卷筒上待排软管的精准排管。

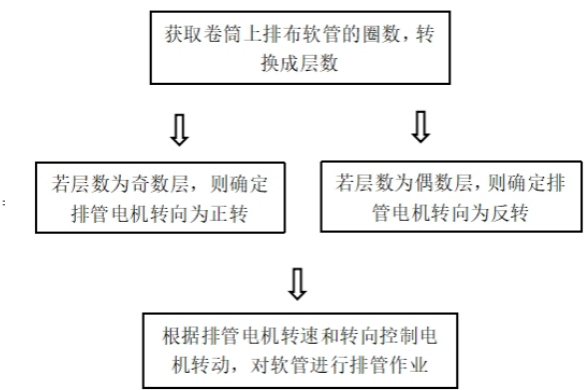


图4 排管器方向控制流程图

四、结论

针对传统软管绞车机械排管器通用性差、调试难度大、排管精度不足的问题，本文研究了排管器的自动控制方法，并设计了

对应的控制装置。通过采集卷筒转速信息，确定排管装置驱动电机的转速参数；结合卷筒上待排软管的层数信息，判定驱动电机的转向参数；最终依据转速与转向参数协同控制驱动电机运转，实现排管装置的精准动作。研究引入PID控制算法进行速度补偿，通过卷筒编码器采集旋转圈数来计算软管层数，进一步提升了排管的自动化程度与精度。本方法突破了传统机械排管器的速比限制，无需针对不同规格软管和卷筒匹配专用齿轮，显著增强了排管器的通用性与实用性。为排管设备的智能化发展提供了可行的技术方案。后续研究可进一步实现速度补偿参数的自适应优化，进一步提升排管器在复杂工况下的适应性。

参考文献：

[1]张博文. 电器自动化 PLC 调试系统的应用与控制 [J]. 电子技术与软件工程, 2019 (02) : 106.

[2]聂丹阳. 地面自动排管 PLC 控制系统的研究 [J]. 机械研究与应用, 2021, 34(1): 125-127.

[3]周天明, 彭勇, 贾秉彦, 等. JC-90DB 两挡齿轮传动单轴绞车设计分析 [J]. 石油机械, 2008, 36(12): 35-37.

[4]田道云, 陈思桥. 3000 米石油钻机绞车计算分析 [J]. 机械, 2013, 40(4): 37-43.

[5]张晓军, 戴克文, 徐鹏. 海洋平台 9000m 钻井模块绞车的研制 [J]. 石油矿场机械, 2009, 38(3): 77-79.

[6]崔学政, 刘文庆, 张富强. 海洋钻井平台立柱式排管机设计 [J]. 石油矿场机械, 2010, 39(1): 45-49.

[7]鲍泽富, 胡广珊. 基于 PLC 的二层台自动排管机械手控制系统设计 [J]. 制造业自动化, 2019, 41(12): 86-89.

[8]周英辉. 软管绞车结构有限元分析 [J]. 船舶工程, 2019(S1): 84-87+127.

[9]林建伟. “海洋石油 162” 软管绞车排管技术应用 [J]. 航海工程, 2017, 46(5): 57-60.

[10]赵伟, 吕英民. 海上漂浮输油软管收放绞车的液压系统设计 [J]. 液压与气动, 2003(1): 5-6.