

铺管船张紧器控制系统研究

苏乐平, 孟旭*, 韩林青

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.2025090014

摘 要 : 张紧器控制系统高效稳定是铺管设备作业稳定性与可靠性的保证, 是海洋工程、石油开采等领域高效运行的有力技术支撑。本研究聚焦于张紧器控制系统, 深入剖析其系统架构、工作原理与控制策略。通过探究两者的动态张力调节机制及自动化控制, 揭示其协同工作在管道铺设作业效率与安全性中的关键作用。

关 键 词 : 张紧器; 张力控制; 控制系统; 系统设计

Research on the Control System of Pipe Laying Vessel Tensioner

Su Leping, Meng Xu*, Han Linqing

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

Abstract : The efficient and stable operation of the tensioner control system is the guarantee of the stability and reliability of the pipe laying equipment operation, and it is a powerful technical support for the efficient operation in fields such as marine engineering and oil extraction. This research focuses on the tensioner control system, deeply analyzing its system architecture, working principle and control strategy. By exploring the dynamic tension adjustment mechanism and automatic control of the two, it reveals the key role of their collaborative work in the efficiency and safety of pipe-laying operations.

Keywords : tensioner; tension control; control system; system design

引言

在海洋工程、石油开采等复杂严苛的作业场景, 石油管道铺设作业中张力控制的可靠性直接关乎项目成败。张紧器是铺管设备中的关键设备, 它在铺管过程中通过气动或液压对管子施加持续的压力获得摩擦力, 用驱动电机对悬浮的管线进行收放操作, 从而起到拖拽管子的作用。张紧器作为保障石油管道铺设时张力恒定的核心装备, 其稳定运行可防止因张力失衡导致的设备故障, 有效规避作业安全风险。传统张紧器在动态载荷频繁变化时, 张力调节响应迟缓、精度不足对管线铺设产生不利影响。深入开展张紧器控制系统的优化研究是必要的。打造高智能、高效率、高稳定性的新型控制系统, 可为深水铺管的发展注入新动力。

一、铺管系统组成

一套典型的简约型铺管系统包括2台张紧器、1台 AR 绞车、1套变频驱动系统和1套集控操作台, 图1为铺管系统的主要设备。

二、张紧器结构和控制说明

(一) 张紧器结构

机械结构及传动系统: 上图的张紧器上下履带夹紧力由上下压载总成内的气囊产生; 履带驱动管线由带增量编码器的变频电

机、减速箱和驱动链轮组成, 变频电机提供收放的动力, 增量编码器检测电机的实际速度并反馈至变频器, 形成速度闭环控制; 张紧器立柱上的测力传感器用于检测管线的实际受力^[1]。上压载器上下运动由丝杠传动系统控制, 其由电机、减速器、丝杠等组成, 可适应不同管径管线。

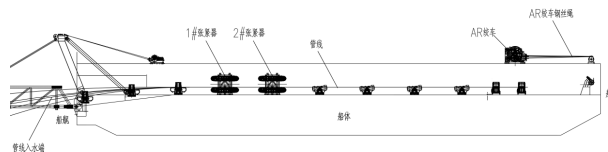


图1 铺管线主要设备

资助项目: 《深远海铺管铺缆核心装备及关键技术研究》(2024-ZJKJ-05)。

作者简介: 苏乐平(1980.05-), 男, 汉族, 上海人, 毕业于上海电机学院, 本科学历, 学士学位, 高级工程师, 研究方向: 海工装备自动化和起重铺管设计研究。

通讯作者: 孟旭, 男, 高级工程师, 博士研究生在读, 研究方向: 船舶与海洋工程。

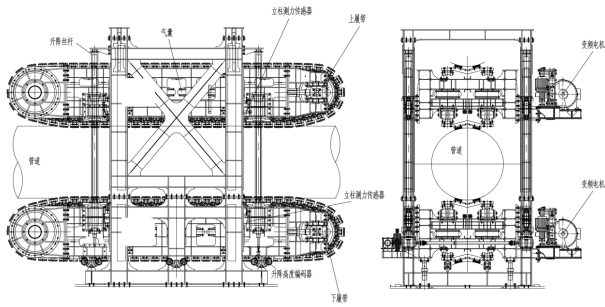


图2 张紧器结构

（二）控制核心

控制柜和变频驱动系统是控制系统硬件载体，包含可编程控制器（PLC）、人机界面（HMI）、变频模块等^[2]。PLC负责采集外部操作的指令和传感器信号、计算控制量、发送控制命令并接受反馈信号；变频器负责接收 PLC 指令并驱动变频电机。

三、张紧器系统设计

（一）控制系统硬件设计

1. PLC

本方案选用西门子 SIMATIC S7-300 系列 PLC，CPU 型号为 319-2PN/DP，具备 2 个通讯口（DP 口用于 CPU 与变频器高速通讯，PN 口用于 CPU 与人机界面 HMI 通讯），满足了复杂控制逻辑运算能力与多设备通讯的需求。

2. HMI

本方案采用施耐德 15 英寸触摸屏，集成于操作台，用于设备状态的监控、参数设定与操作指令发送。

3. 变频器

本方案采用 ABB ACS880 系列变频器，由电源模块、整流模块、逆变模块、制动模块、控制模块和接口扩展模块组成，通过调节电机速度和力矩限幅实现张力的精准控制^[3]。

（二）张紧器控制方法

张紧器控制基于反馈原理。在控制系统中，张力传感器实时监测张力并反馈至 PLC；当张力偏离预设值时，PLC 依据内置算法驱动执行机构调整张紧力^[4]。在铺管作业中，海浪、洋流、潮汐等环境因素导致管线的张力不断波动，张紧器需要能够快速响应、精准调节，以保持管线的张力处于可控范围内。

控制算法方面，常用比例 - 积分 - 微分（PID）控制算法，其根据张力偏差及变化率综合调节控制量，使张力快速稳定趋近目标值^[5]。

张紧器的核心控制目标是通过动态调节确保石油管道张力恒定，防止因张力失衡导致管道损坏或其他安全风险。张紧器的收放张力直接影响管线铺设深度，通过驱动电机控制可实现管线恒张力自动控制^[6]。在铺设过程中，管线受自重、海浪、海流等因素影响，弯曲应力不断变化，通过张紧器张力精准调节，使管线受力始终处于允许范围。

从软硬件综合考虑，本控制系统具备手动速度模式、待机模

式、自动恒张力模式，可在管线外载变化时实现自动收放管的作业。

（三）张紧器的操作流程设计

1. 上管操作

制动器打开，启动丝杠传动系统，顶升上压载器至足够高度，以便容纳管线进入。顶升到位后，停止丝杠电机，关闭制动器。利用外力拖动管线搁置在张紧器下压载器上，注意避免结构干涉。此时，上、下压载器的空气弹簧内部气压为 0，压载轮与其联系梁搁置在结构上，管线则搁置在链轨上，管线的重力最终传递到下压载结构。启动下压载器的驱动装置，以额定转速的 1/4 运转链轨，利用摩擦力拖动管线进入张紧器合适的位置。停止电机运转。

2. 夹管操作

根据管径实际的大小，重新调整上感应传感器的高度。打开制动器，启动丝杠传动系统，下降上压载器直至感应到上感应传感器后自动停止，关闭制动器。此时上压载器处在正确的工作高度^[7]。根据铺管前的管径及张紧力需求，设定气动系统的平衡气压值。启动空压机进行缓慢充压，直到特定压力后停止；管线在上、下压载器的空气弹簧作用下，到达某一高度处受力平衡后并停止。评估管线平衡后的管线高度、上下压载器空气弹簧行程的差距、气压值大小等，若与预先设定值有较大差距，则应调整或重新加载。启动张紧器 2 个驱动电机，以 1/4 额定速度移动管线，调整到合适的工作位置。

3. 初始放管

一步张紧器等待；二步待其余工作完成后（比如焊接管线），手动控制张紧器主动反转，以额定转速放出管线一段距离后停止。操作一步和操作二部循环。初始放管时，管线入海端并没有张紧力或张紧力很小，而这时候管子还没有放足^[8]。此时若采取正常工作模式的静带控制，可能导致张紧器一直收管，就放不了管，故需采取手动控制模式。直至释放了一定长度的管线，管线在受到拉应力或弯曲应力两方面时，才可进入正常工作模式。若检测到张紧力已经达到了静带以内，就可以开启正常工作模式。

4. 正常工作模式

切换张紧器为正常工作模式。所谓张紧器正常工作模式：当检测到张紧力小于静带下限时，为了避免管线有可能弯曲应力过大损坏，故需电机主动以额定速度反转（速度可设置），收拉管线，直到管线张紧力到达静带范围内；当检测到张紧力在静带范围以内变化时，张紧器应牢牢的抱住管线保持静止；当检测到张紧力大于静带下限时，为了避免管线拉应力损坏，故需电机能够被张紧力拉动反转，以额定转速（速度可设置），匀速放出管线，直到管线张紧力回到静带范围内^[9]。

5. 正常放管与收管

控制电机反转，释放一定长度的管线后停止。初始放管也可看成是正常放管的第一种模式。

注意正常放管和初始放管有不同之处，初始放管可能需要电机主动带动管线下放；正常放管则是电机被动控制管线下放；这两种情况电机出轴扭矩的方向可能是相反的。操作 a 和操作 b 循环

轮替，管线源源不断地被放下。正常收管切换成手动控制模式。控制电机主动转动，以额定速度（速度应可调）收进管线。

（四）控制模式设计

1.手动模式

仅用于维护和预操作，具体功能支持张紧器的压载器高度调节、夹紧、收管/放管操作。

2.自动张力模式

张紧器和 AR 绞车均以恒定管张力为目标，操作员设定张力点。张紧器张力数据来自结构集成的测量单元，AR 绞车数据来自测量滑轮。PLC 软件集成数字控制环，允许调节增益、死区等参数优化铺管条件。张力在设定点周围死区内时保持静止；低于死区下限自动收管；高于死区上限自动放管，减少管线不必要移动。

3.自动扭力模式

自动扭力模式作为自动张力模式的备份，用于张力传感器失效的工况。张紧器以恒定电机扭力（电流）工作，电机扭力保持在设定张力值（%），操作员可调节扭力设定点，适用于浅水铺管作业时特殊操作。

（五）人机界面与控制流程

1.人机界面功能

操作台布置于船舶驾驶室，人机界面（HMI）内嵌于操作台，下图为核心功能自动恒张力控制操作界面，具体有以下基本功能：

- （1）设备状态实时监控（张力值、电机转速、传感器状态等）。
- （2）控制参数设定（设定张力、张力上/下静带、动态补偿、静态补偿等）。
- （3）操作模式切换与手动指令发送。

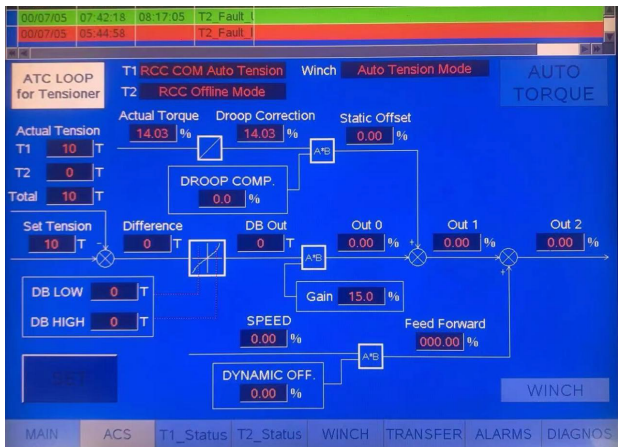


图3 自动张力控制控制流程 HMI 画面

张紧器的自动恒张力控制最终式通过变频器控制电机的速度与转矩限幅，这个也就是张紧器张力控制环的控制方法，下图为控制流程图和程序控制流程说明。

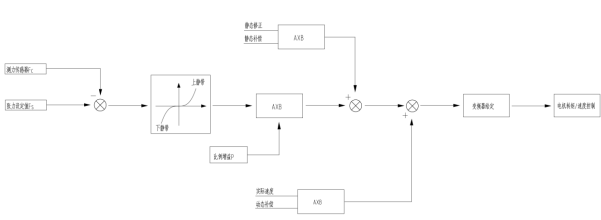


图4 控制流程图

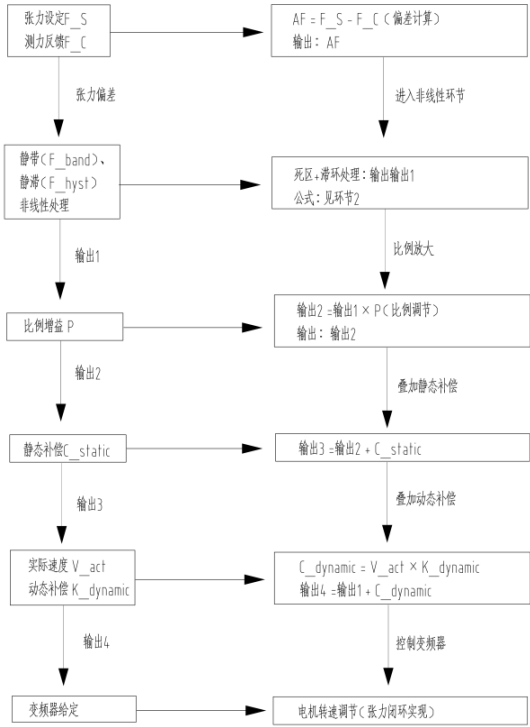


图5 程序控制流程说明

2.张力控制环设计说明

控制系统构建了力-速度双闭环控制体系，详细见控制流程图说明。包括内环与外环：

（1）内环（力闭环）：张力传感器实时监测实际的张力并反馈至 PLC；PLC 对比实际张力与设定张力值，通过 PID 算法调节变频器输出，控制电机的扭矩和转速，使张力快速趋近设定的目标值。

（2）外环（速度闭环）：编码器检测到电机实际转速，反馈至变频器形成速度的闭环，确保电机转速稳定，为张力调节提供精准的执行基础。

3.参数调节

（1）增益：为调节系统对张力偏差的响应灵敏度。增益过高易导致张力波动过大，过低则系统响应迟缓；需根据海况、管径等工况灵活调整。

（2）动态补偿：应对船体因海浪、洋流导致的张力波动，当张力因船体运动快速变化时，动态补偿增加额外速度斜坡，使系统响应超前于波动，减少张力超调的情况^[10]。

（3）静态补偿：主要解决管线静止时钢丝绳的微小蠕动问

题。当蠕动导致张力下降时，系统自动产生向上补偿动作，维持张力稳定。

四、结论

张紧器恒张力控制技术是保障铺管船高效安全作业的核心。该控制系统依托 HMI、PLC、变频器、张力传感器、电机及编码器等组件，通过 PLC 与变频器的高速通讯构建力-速度的双闭环控制体系并实时调控。该控制系统创新点在于灵活的参数调节与

多模式协同：增益与动态偏差的精准干预使系统快速切换响应特性，适应海浪、潮汐、铺设速度变更等复杂工况；手动/自动模式、张力/扭力模式及张力转移模式的无缝切换，确保从管线装载到铺设完成的全流程稳定可靠。静态补偿解决了管线静止时的蠕动问题，动态补偿则提升了系统对环境扰动的抗干扰能力。该控制系统的应用大幅提升了铺管作业的效率与安全性，为海洋工程、石油开采等领域的设备高效运行提供了有力技术支撑，具有广阔的推广价值与应用前景。

参考文献

[1] 张俊亮, 王晓波, 林立, 赵冬岩, 钟朝廷, . 电驱式张紧器恒张力控制系统研究与开发 [J]. 石油机械, 2008 年第 36 卷第 9 期: 167-178.

[2] 万剑波, 王福山, 雷江河, 周军峰, 赵冬岩, 钟朝廷, . 电驱式张紧器恒张力控制系统研究与开发 [J]. 石油机械, 2010 年第 38 卷第 12 期: 17-20.

[3] 李琳杰, S 形铺管船张紧器仿真平台构建及恒张力数学模型研究 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工程大学, 2015. DOI:10.7666/d.D751213.

[4] 张俊亮, 王晓波, 林立, 等. 铺管船用张紧器张紧系统分析 [J]. 石油机械, 2008, 36(9): 167-169, 178.

[5] 李广鑫, 曹为, 钟朝廷, 等. 深水铺管船 A&R 绞车控制系统概念设计 [J]. 海洋工程, 2011, 29(3): 122-127. DOI:10.3969/j.issn.1005-9865.2011.03.018.

[6] 马晓林. 带式输送机张紧装置的研究 [J]. 机电工程技术, 2019, 48(5): 169-171.

[7] 王硕锋. 大型双滚筒摩擦绞车的设计要点 [J]. 船舶工程, 2023(S01): 216-219+233.

[8] 付万里, 白韬光, 刘贺. 深水起重铺管船 A&R 绞车系统设计研究 [J]. 船舶工程, 2015, 37(7): 50-53.

[9] 袁境声, 翁涛, 倪计民. 摩擦式自动张紧器的设计与优化 [J]. 柴油机设计与制造, 2022, 28(4): 14-19.

[10] 郭三本, 李广龙, 李利平, 等. 自动张紧器迟滞特性计算与试验分析 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(24): 278-286.