



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2504851

引用格式:曾斌,刘超,张晓雨,等.大长径比绳驱动超冗余度机器人力回零控制[J].科学技术与工程,2026,26(20):8720-8727.

Zeng Bin, Liu Chao, Zhang Xiaoyu, et al. Force zeroing control for high-aspect-ratio cable-driven hyper-redundant robots[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(20): 8720-8727.

自动化技术、计算机技术

大长径比绳驱动超冗余度机器人力回零控制

曾斌¹, 刘超², 张晓雨¹, 田晓金¹, 张东旭¹, 周晓华^{1*}

(1. 西北核技术研究所强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室, 西安 710024; 2. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要 绳驱动超冗余度机器人凭借大长径比、轻量化及高自由度 (degree-of-freedom, DOF) 冗余特性, 在核电等复杂受限环境中优势显著, 可实现末端精确定位、避障及电气部件后置隔离, 适配核电环境需求。其控制面临多自由度、强耦合及绳索形变难题, 传统控制策略难以兼顾精度与响应性能, 限制了其核电应用。为此, 研究提出一种关节递进式绳索力回零控制策略, 融合比例积分微分控制与分阶段力调整, 在全松弛条件下验证性能。实验结果表明: 所提方法可将回零精度提升至 0.2% 以下, 提升运动稳定性, 为核电特种作业机器人精准控制提供可靠方案。

关键词 绳驱动; 超冗余度机器人; 大长径比; 力回零控制

中图分类号 TP242.3;

文献标志码 A

Force Zeroing Control for High-aspect-ratio Cable-driven Hyper-redundant Robots

ZENG Bin¹, LIU Chao², ZHANG Xiao-yu¹, TIAN Xiao-jin¹, ZHANG Dong-xu¹, ZHOU Xiao-hua^{1*}

(1. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[Abstract] Cable-driven hyper-redundant robots have significant advantages in complex confined environments such as nuclear power, due to their large aspect ratio, lightweight and high degree-of-freedom (DOF) redundancy. These robots can achieve accurate end-effector positioning, obstacle avoidance and rear-mounted isolation of electrical components, adapting to the requirements of nuclear power environments. However, their control is confronted with challenges including multi-DOF, strong coupling and cable deformation. Traditional control strategies fail to balance accuracy and response performance, thus limiting their application in the nuclear power field. To address these issues, a joint progressive cable force zero-return control strategy was proposed integrating proportional-integral-derivative control and phased force adjustment, and its performance was verified under full relaxation conditions. Experimental results show that the proposed method can improve the robot's zero-return precision to less than 0.2%, enhance motion stability, and provide a reliable solution for the precise control of special operation robots in nuclear power.

[Keywords] cable-driven; hyper-redundant robot; high aspect ratio; force zeroing control

核电作为国家长期重点投入的战略领域, 其装备常具有大尺寸、复杂结构的特点。核电工作环境通常面临空间狭窄、光照不足、操作条件恶劣等挑战, 部分场景甚至伴随高温高压、强辐射等不利因素, 严重限制人工介入^[1-3]。极端情况下, 某些环境完全禁止生物进入。为应对核电领域人工操作的诸多难题, 亟须研发一种适用于复杂受限空间的特

种作业机器人。

绳驱动超冗余度机器人作为一种驱动后置的超冗余度机器人, 具备大长径比、轻量化臂体和高自由度冗余等优势。其独特设计使其能够在末端达到特定位姿的同时, 通过臂体姿态调整实现避障、特种操作等功能。机器人通常采用多股缠绕钢丝绳作为后置电机控制臂体运动的媒介, 将主要电

收稿日期: 2025-06-29; 修订日期: 2026-02-03

基金项目: “十四五”专项工程建设项目 (Z011210302)

第一作者: 曾斌 (1981—), 男, 汉族, 重庆人, 博士, 高级工程师。研究方向: 强辐射等复杂条件下实验系统研制。E-mail: zengbin@nint.ac.cn。

* 通信作者: 周晓华 (1979—), 男, 汉族, 陕西岐山人, 硕士, 高级工程师。研究方向: 强辐射等复杂条件下实验系统研制。E-mail: zhouxiaohua@nint.ac.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

气控制部件与极端环境隔离,从而在核电等受限空间中高效完成探测、维护等任务^[4]。然而,绳驱动超冗余度机器人的控制面临绳索耦合及形变等难题,传统机器人控制方法难以满足其对响应速度和精度的要求。因此,开发适用于绳驱动超冗余度机器人的高精度运动控制方法具有重要的研究价值。

绳驱动超冗余度机器人控制因其自由度高、系统耦合性强、运动学模型复杂而具有显著挑战,且不同机构原理、驱动方式及自由度数量会导致控制特性差异。中外学者已针对此类机器人控制开展了广泛研究。Jones 等^[5]提出了一种基于经典控制方法的绳驱动超冗余度机器人控制模型,通过引入重力补偿项提升控制精度。然而,该模型仅以电机编码器数据反映机械臂位置,难以准确捕捉关节角度信息,在高自由度场景下控制效果受限。Tang 等^[6]在其水下绳驱动超冗余度机器人中采用基于比例积分微分控制的绳长控制方案,但未能有效反映绳索内部的实际长度变化,导致控制精度不足。Zheng 等^[7]针对比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制无法反映绳索形变的问题,提出了一种基于绳索拉伸状态的变形补偿控制器,但因未结合绳索物理特性设计参数,其适用性受到限制。Xu 等^[8]在 PID 控制中引入基于扭矩的前馈补偿,并在三节简化臂体中验证了模型有效性,但未在更复杂结构中进一步验证。Gu 等^[9]通过在滑模控制中引入绳孔摩擦补偿,提升了绳驱动超冗余度机器人的控制精度。Liang 等^[10]设计了一套基于神经网络力位混合控制系统,用于处理绳索的过松和过紧问题。Zhu 等^[11]设计了一套基于阶梯力值的力位混合控制策略用于提高稳定性。

大长径比绳驱动超冗余度机器人,其绳索响应速度较慢,受外部干扰力影响显著,驱动端与关节端绳索特性差异较大^[12-13]。传统连续式控制方案在大长径比场景中易导致机器人状态大幅偏离稳态或绳索拉力超限。为满足大长径比绳驱动超冗余度机器人在实际场景中的稳定运行需求,提出一种基于关节递进的绳索力控制策略。该策略以 PID 控制为基础,结合力回零补偿,通过分阶段调控绳索力,确保机器人运动的稳定性。实验验证表明,该控制方案在大长径比绳驱动超冗余度机器人中具有良好的可行性和应用潜力。可实现关节角度精准控制与柔顺交互,显著提升作业安全性与适应性。

1 绳驱动超冗余度机器人结构

绳驱动超冗余度机器人是一种集高灵活性与复杂环境适应能力于一体的先进机器人系统。本

文提出了一种集成于运载平台的绳驱动超冗余度机器人设计方案,该系统主要由运载平台、后端驱动机构以及超冗余度机械臂结构三部分构成。以下对各部分的设计与功能进行详细阐述。

1.1 运载平台

为满足多样化的作业需求,运载平台需具备多自由度运动能力,包括直线进给、水平移动和垂直升降功能。设计一种多自由度移动平台,如图 1 所示。

该平台通过集成双电机差速驱动的履带底盘,构建了完整的运载系统。集成后的运载平台兼具运行稳定性与卓越的运动性能,能够灵活应对复杂地形和多样化的运动需求,如图 2 所示。

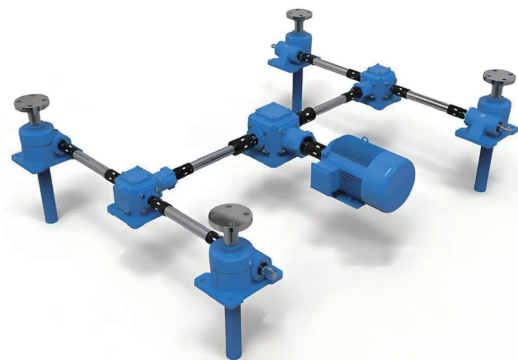


图 1 多自由度移动平台

Fig. 1 Multi-degree-of-freedom mobile platform

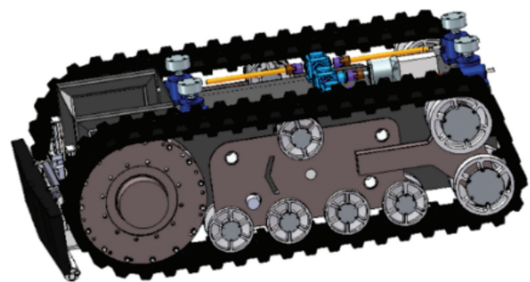


图 2 运载平台

Fig. 2 Transport platform

1.2 后端驱动结构

后端驱动机构是实现绳驱动超冗余度机器人精确运动控制的核心部件,其结构设计如图 3 所示。该机构采用长方体布局,各驱动单元结构一致且呈模块化排列,以提高系统的可维护性和扩展性。

每个驱动单元基于丝杆滑块机构设计,并通过力传感器与驱动绳相连,实现对每根驱动绳张力的实时监测,如图 4 所示。模块化设计不仅简化了装配与维护流程,还提升了系统的鲁棒性和控制精度。

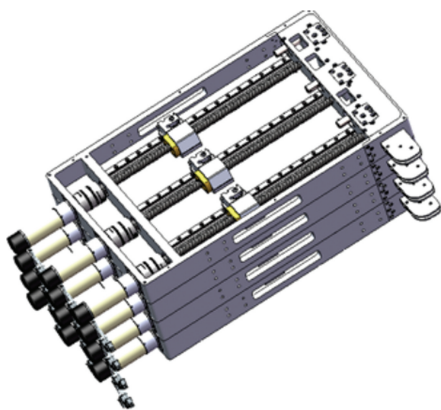


图3 后端驱动机构
Fig.3 Rear-end drive mechanism

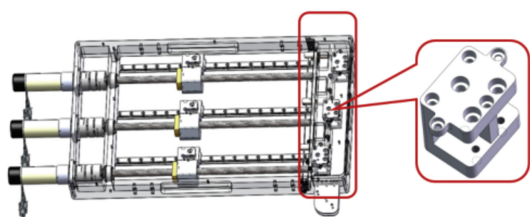


图4 驱动单元
Fig.4 Drive unit

1.3 超冗余度机器人臂体结构

超冗余度机器人臂体结构是机器人系统的核心执行部件,具备高度的姿态灵活性和多任务适应能力。其结构主要由关节模块和臂体本体组成。其中,关节模块是机械臂的基本组成单元,采用轻量化材料制造,以降低整体重量并提高能效。模块间通过串联方式连接,每个关节至少具备两个旋转自由度,并通过绳索驱动实现连续、平滑的运动。该设计赋予机械臂在狭窄或复杂环境中执行弯曲、缠绕等复杂动作的能力,适用于检测、避障等应用场景。臂体本体用于连接和固定相邻关节模块,采用模块化卡扣设计,便于快速组装与拆卸。本体内部设有中空通道,确保绳索在多关节运动中的顺畅传导和高效力传递。超冗余度机器人臂体结构如图5所示。

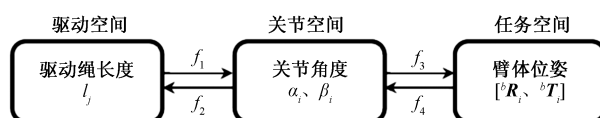


图5 超冗余度机器人臂体
Fig.5 Hyper redundant robot arm

2 绳驱动超冗余度机器人运动学模型

绳驱动超冗余度机器人的结构为其在复杂环境中实现灵活运动提供了硬件基础。然而,由于其

多自由度和绳索耦合特性,精确描述和分析其运动学行为成为实现高效控制的前提。进行绳驱动超冗余度机器人的运动学建模,探讨关节运动与绳索驱动之间的映射关系,为后续控制策略的设计提供理论支持。超冗余机器人的运动实现过程可以简化为:驱动绳的长度变化引起了关节角度的变化,进而引起各节臂体位姿的变化,故驱动绳长、关节角度和各节臂体位姿是运动学模型中的3组变量,分别对应模型中的驱动空间、关节空间和任务空间,如图6所示。



l_j 为 j 组驱动绳长度; α_i, β_i 为第 i 个关节的旋转角度;
 ${}^bR_i, {}^bT_i$ 为对应臂体在全局坐标下的姿态矩阵和变换
矩阵; f_1, f_2, f_3, f_4 为映射函数

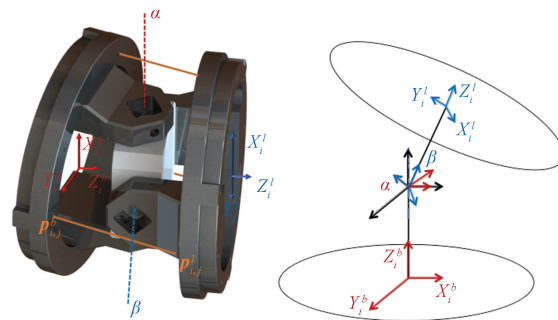
图6 运动学映射

Fig.6 Kinematic mapping

2.1 驱动空间-关节空间运动学

驱动空间到关节空间即分析关节内的运动学映射关系,关节内部为万向关节,存在两个旋转自由度,可以根据此运动关系建立坐标系,如图7所示。

在关节内部,坐标系原点依照如下顺序推进:近端导绳盘中心点,万向节中心点,远端导绳盘中心点。其中坐标系变换流程为:坐标系 o 沿当前坐标系 Z 轴平移距离 h 至万向节中心,再绕导绳盘与万向节连接中心(当前坐标系 X 轴)旋转角度 α_i ,绕当前坐标系 Y 轴旋转角度 β_i ,再沿着当前坐标系 Z



α, β 为关节旋转角度; X_i^b, Y_i^b, Z_i^b 为初始坐标系旋转轴; X_i^l, Y_i^l, Z_i^l 为终止坐标系旋转轴; $p_{i,j}^b$ 为第 i 个关节驱动绳在第 j 个关节处位于初始坐标系 b 下对应绳孔/穿绳点的位置向量; $p_{i,j}^l$ 为该驱动绳位于终止坐标系 l 下对应绳孔/穿绳点的位置向量,两者经坐标变换后用于计算该根绳索在关节内的长度变化

图7 绳驱动超冗余度机器人关节

Fig.7 Cable-driven hyper-redundant robot joint

轴移动同样的距离 h 至远端导绳盘中心,最终齐次变换矩阵可表示为 T_{i-1}^i ,而 $\mathbf{Trans}_z, \mathbf{Rot}_x, \mathbf{Rot}_y$ 分别

$$T_{i-1}^i = \mathbf{Trans}_z(h) \mathbf{Rot}_x(\alpha_i) \mathbf{Rot}_y(\beta_i) \mathbf{Trans}_z(h) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta_i & 0 & \sin\beta_i & h\sin\beta_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta_i & 0 & \cos\beta_i & h\cos\beta_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\beta_i & 0 & \sin\beta_i & h\sin\beta_i \\ \sin\alpha_i \sin\beta_i & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i \cos\beta_i & -h\sin\alpha_i \cos\beta_i \\ -\cos\alpha_i \sin\beta_i & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \cos\beta_i & h + h\cos\alpha_i \cos\beta_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

根据并联机构的逆运动学求取原理,固连在第 i 个关节驱动绳在第 j 个关节处的第 k 根绳索长度为 $r_{i,j,k}^{\text{do}}$ ($k=1,2,3$),可表示为

$$\left\{ \begin{aligned} r_{i,j,1}^{\text{do}} &= \left\| \mathbf{T}_{j-1}^j \begin{bmatrix} \cos\varphi_i \\ \sin\varphi_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos\varphi_i \\ \sin\varphi_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right\| \\ &= \left\{ 2 + h^2 - (\cos\alpha_j + \cos\beta_j) + \right. \\ &\quad \left. \cos 2\varphi_i (\cos\alpha_j - \cos\beta_j) - \sin 2\varphi_i \sin\alpha_j \sin\beta_j + \right. \\ &\quad \left. 2h^2 \cos\alpha_j \cos\beta_j + 2h [\sin\varphi_i \sin\alpha_j (1 + \cos\beta_j) - \right. \\ &\quad \left. \cos\varphi_i \sin\beta_j (1 + \cos\alpha_j)] \right\}^{1/2} \\ &= r(\alpha_j, \beta_j, \varphi_i) \\ r_{i,j,2}^{\text{do}} &= r\left(\alpha_j, \beta_j, \varphi_i + \frac{\pi}{3}\right) \\ r_{i,j,3}^{\text{do}} &= r\left(\alpha_j, \beta_j, \varphi_i + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式(2)中: φ_i 为第 i 个关节的相位角; α_j, β_j 为第 j 个关节的万向节旋转角度; r 为代指函数。

将驱动绳索在不同关节内的长度累加,并计入臂体内的绳索长度(此处假设臂体内的绳索长度不变),则可获得驱动绳索的总长度,也即机器人臂体实际关节角度对应的各驱动绳索长度。

2.2 关节空间-任务空间运动学

关节空间到任务空间的运动学则是关节的旋转角度与末端位姿之间的映射关系。关节空间内的坐标建立方式如图 8 所示。

考虑机械臂整体,依据齐次变换矩阵和串联机

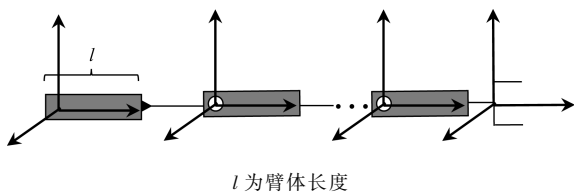


图 8 绳驱动超冗余度机器人关节坐标

Fig. 8 Cable-driven hyper-redundant robot joint coordinates

为沿 Z 轴平移、绕 X 轴旋转和绕 Y 轴旋转的齐次变换矩阵。

构原理即可获取末端位姿与各关节角度之间关系,对应的矩阵为

$$\mathbf{T}_0^{\text{end}} = \prod_{i=0}^n \mathbf{T}_i^{i+1} \mathbf{Trans}_z(l) \quad (3)$$

式(3)中: $\mathbf{T}_0^{\text{end}}$ 为整体的齐次变换矩阵。

通过关节空间内的运动学矩阵,即可以根据机器人在指定环境内的既定轨迹,计算机器人关节角度运动轨迹。基于关节角度运动轨迹,结合式(1)和式(2)可以计算目标驱动绳索长度,从而进行机器人控制。

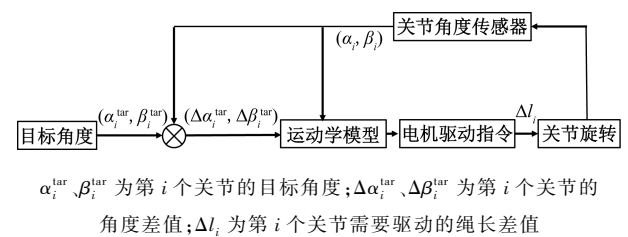
3 绳驱动超冗余度机器人力回零控制

通过对绳驱动超冗余度机器人运动学的分析,可了解其复杂运动行为的特性。然而,大长径比结构下绳索响应延迟和外部干扰导致的控制偏差,仍是实现稳定操作的重大挑战。为此,提出一种基于力回零的控制策略,旨在通过分阶段调控绳索力,解决绳索拉力超限和状态偏离问题,从而提升机器人在核电受限环境中的控制精度与稳定性。

3.1 闭环 PID 控制

对于绳驱动超冗余机器人的各关节角度,核心在于控制关节处的绳索长度,使其满足对应的目标关节角度所需要的绳索长度。基于式(3)推导的运动轨迹,根据机器人臂体各关节的当前角度和目标角度可分别计算出两组驱动绳长,将两组驱动绳长的差值发送给电机,根据闭环 PID 控制理论则可建立闭环控制器如图 9 所示。

通过安装在关节处的转角传感器获得实际关



$\alpha_i^{\text{tar}}, \beta_i^{\text{tar}}$ 为第 i 个关节的目标角度; $\Delta\alpha_i^{\text{tar}}, \Delta\beta_i^{\text{tar}}$ 为第 i 个关节的角度差值; Δl_i 为第 i 个关节需要驱动的绳长差值

图 9 PID 闭环控制器

Fig. 9 PID closed-loop controller

节角度,根据式(3)获取当前驱动绳长。以目标值和当前值的差值作为PID控制器中的误差输入量,并进行PID控制的循环。其中比例控制器是PID控制的核心参数,用于提高响应速度,由于结构上可能存在外部稳态干扰,纯比例控制器容易出现稳态偏离的情况,因此还需要加入积分控制器和微分控制器用于调整系统的稳态误差和减小系统的超调。

3.2 力回零控制

对于纯PID控制,在控制过程中,绳索的拉力会有不断朝着一个方向变化的趋势,致使绳索过松或者过紧,从而导致机器人臂体性能随着控制过程不断变化,致使机器人偏离稳态。

提出一种基于阶段性力回零的控制策略,在机器人的运动过程中根据关节次序插入力回零部分。首先根据前置实验数据分别为机器人的各关节对应的驱动组绳索设定一组基础力参数值。在机器人控制过程中,对机器人的各驱动绳索力实时监控,同时依据关节数目划分运动阶段,在运动各阶段中插入力回零环节,将前置阶段中驱动绳索偏离预设力状态的绳索回调至预设力调整阈值附近。调整过程中设定调节参数,保证力回零过程不会大幅干扰到关节角度的实际状态。控制逻辑如图10所示。

预设力根据以下步骤设计。

步骤1 做一组超冗余度机器人回零状态的实验,读取过程中超冗余度机器人各驱动绳索的力数值和对应的关节角度。

步骤2 通过力曲线中变化的部分与对应的关节角度不变的部分估算该绳索运动过程中的阻力,计算力曲线的平均力。

步骤3 以计算出的曲线平均力作为预设基础

力,估算的阻力作为调整范围阈值进行关节角度、绳索力调整。

步骤4 如果调整过程中关节的角度变化较小,则取该组力作为实际力回零所用的参数。

步骤5 如果关节角度变化较大,则记录该次关节力调整过程中的力曲线和关节角度状态曲线,重新设定新的一组参数。

步骤6 重复步骤3直到满足条件。

预设力计算流程图如图11所示。

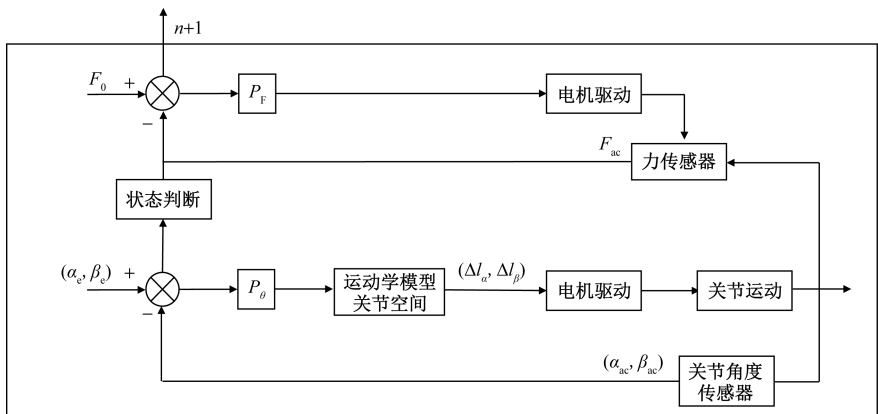
4 控制策略测试实验与结果

为验证力回零控制策略在绳驱动超冗余度机器人机械臂精度与稳定性提升中的有效性,本文设计并搭建了一套绳驱动超冗余度机器人测试实验平台,如图12所示。该平台采用圆柱状驱动设计,配备高精度拉力传感器和模块化机械臂结构,能够在全松弛状态下开展回零实验。引入了力回零控制策略,实验过程中,系统同步采集绳索驱动量、绳索拉力和机械臂关节角度数据,为控制策略的性能评估提供数据支持。

4.1 实验设计

实验选用一台配备6个模块化关节的超冗余度机械臂,总长0.9 m,采用高强度钢丝绳驱动。关节角度传感器精度为 $\pm 0.1^\circ$,绳索力传感器精度为 ± 5 N。实验在常温(25℃)环境下进行。

首先,将机械臂放松至全松弛状态,关闭驱动电机,使绳索无张力,通过外部随机扰动或手动调整各关节至随机角度($\pm 30^\circ$),记录初始角度值作为基准。接着,启动回零程序,插入力回零控制器,控制器根据实时反馈的关节角度和绳索张力动态



(α_e, β_e) 为目标角度; P_θ 为运动学关系;(α_{ac}, β_{ac}) 为当前角度; F_0 为初始预估力; F_{ac} 为当前力; P_F 为力学关系; $\Delta l_\alpha, \Delta l_\beta$ 分别为由 α, β 两个旋转自由度的角度偏差经运动学模型换算得到的驱动绳长度调整量; n 为力回零控制参数的迭代/调整序号,
 $n+1$ 为下一次更新后的参数组或控制步

图10 力回零控制器

Fig. 10 Force zeroing controller

调整各绳索驱动力,引导机械臂回到零位(所有关节角度为 0°),确保绳索张力平衡和运动平滑性以避免过冲或振荡。在回零过程中,实时记录各绳索的驱动量(长度变化)、驱动力(张力值)和各关节的角度值。数据分析阶段,处理采集数据,评估回零精度(最终关节角度与零位的偏差)、稳定性(角度和张力的波动情况)以及效率,量化控制策略的优化效果。

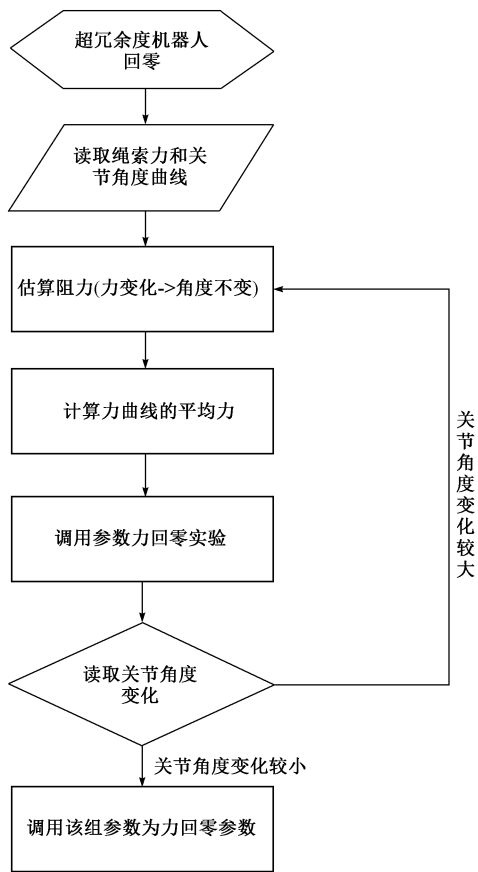


图 11 预设力计算流程图
Fig. 11 Flowchart of preset force calculation



图 12 测试实验平台
Fig. 12 Test experimental platform

4.2 实验结果分析

机械臂全松状态回零过程中的机械臂绳索驱动量曲线如图 13 所示,机械臂运动过程中绳索驱动力的过程曲线如图 14 所示,机械臂运动过程中的关节角度变化曲线如图 15 所示。

根据图 13 ~ 图 15 的数据可知,在添加力回零控制器后,机器人的回零角度误差可以控制在 0.2% 以下,角度回零绝对误差控制在 0.5° 以内。同时在机械臂进行力回零的过程中,机器人关节的角度偏差在 0.5% 以下,力值波动范围在 100 N 以内,满足设计的需求。也能表明该力回零算法在提高机器人控制稳定性上的有效性。

与传统 PID 控制相比,力回零控制策略通过分阶段力调整,显著降低了绳索张力波动(100 N 以内),提高了回零精度(0.2% 以下)。然而,实验中仍观察到微小角度偏差,可能源于绳索形变和传感器噪声。未来可通过引入自适应滤波或高精度绳索材料进一步优化性能。此外,本实验在常温条件下进行,未考虑核电高温环境的影响,也还需要后续验证。

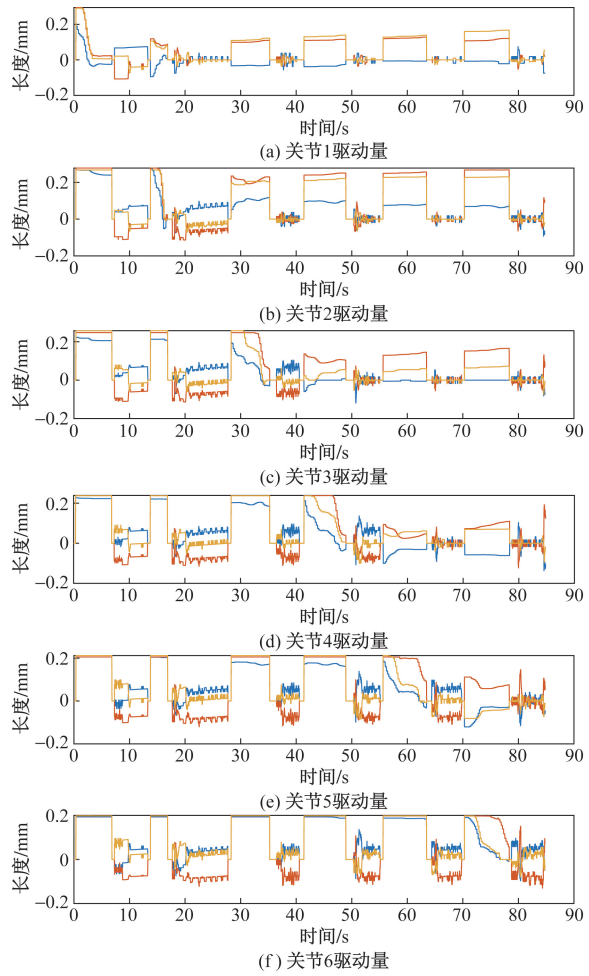


图 13 绳索驱动量曲线
Fig. 13 Curves of cable-driven quantity

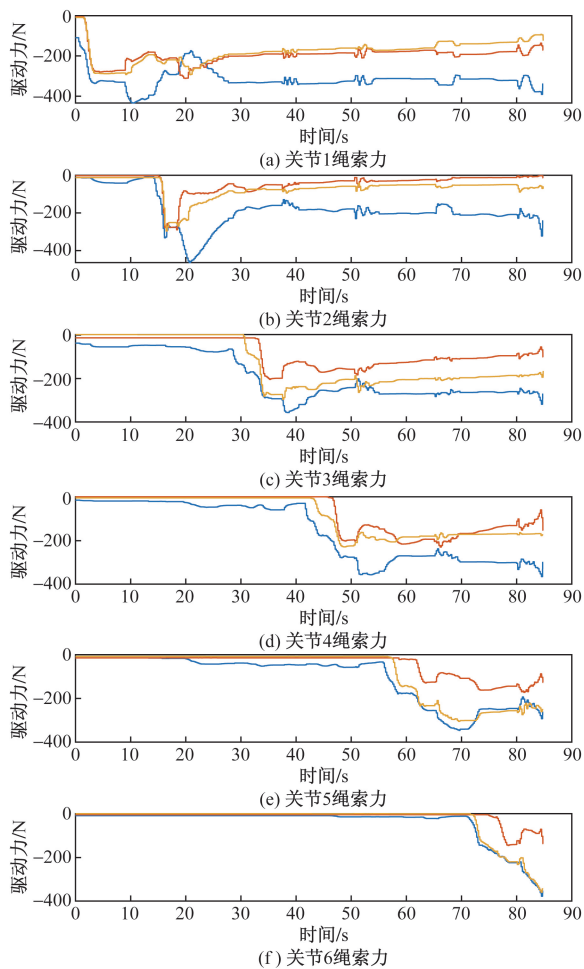


图 14 绳索驱动力曲线
Fig. 14 Curves of cable driving force

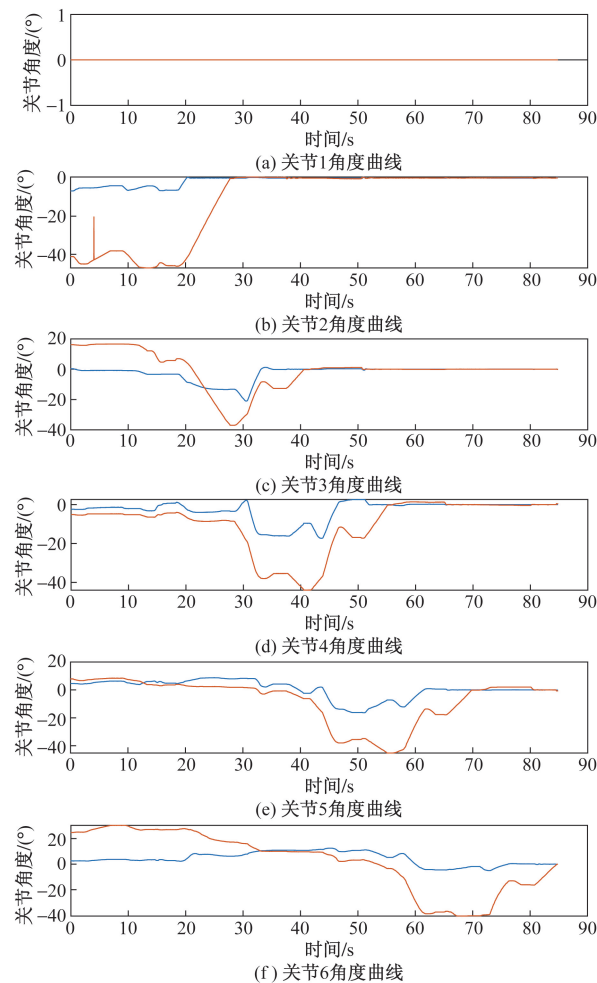


图 15 关节角度曲线
Fig. 15 Curves of joint angle

5 结论

通过对绳驱动超冗余度机器人的结构设计、运动学建模、力回零控制策略开发及实验验证的系统研究,验证了基于关节递进的绳索阶梯力回零控制策略在大长径比绳驱动超冗余度机器人中的可行性和应用潜力。实验结果表明,该控制策略通过分阶段调控绳索张力并结合 PID 控制,能够有效提升机械臂在全松弛状态下的回零精度和稳定性,显著降低关节角度偏差和张力波动,优化了机器人在复杂受限环境中的控制性能。同时,力回零补偿机制有效缓解了绳索过松或过紧的问题,改善了系统的稳态性能,为核电等特种作业场景中的高精度操作提供了可靠的技术支持。

未来研究可从以下方向进一步深化:①控制算法优化:针对大长径比绳驱动机器人的非线性绳索形变和动态耦合特性,探索自适应控制或机器学习方法(如强化学习)以提升控制器对复杂环境的适应性;②多场景实验验证:扩展实验条件,模拟核电

场景中的高温、高压或强辐射环境,验证控制策略在极端条件下的鲁棒性;③系统集成与应用:将力回零控制策略与其他功能模块(如路径规划、实时避障)集成,开发适用于实际核电维护任务的完整机器人系统;④绳索材料与驱动优化:研究高强度、低形变绳索材料及新型驱动机构,降低绳索响应延迟,提升系统整体性能。这些方向将进一步推动绳驱动超冗余度机器人在特种作业领域的广泛应用。

参 考 文 献

- [1] Liljeback P, Stavdahl O, Beitnes A. SnakeFighter-development of a water hydraulic fire fighting snake robot[C]//9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Singapore: IEEE, 2006: 1-6.
- [2] Buckingham R, Chitrakaran V, Conkie R, et al. Snake-arm robots: a new approach to aircraft assembly[R]. Warrendale: SAE, 2007.
- [3] Buckingham R, Graham A. Nuclear snake-arm robots[J]. Industrial Robot: an International Journal, 2012, 39(1): 6-11.
- [4] Bogue R. Robots in the nuclear industry: a review of technologies

- and applications[J]. *Industrial Robot: an International Journal*, 2011, 38(2): 113-118.
- [5] Jones B A, Walker I D. Practical kinematics for real-time implementation of continuum robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(6): 1087-1099.
- [6] Tang J, Zhang Y, Huang F, et al. Design and kinematic control of the cable-driven hyper-redundant manipulator for potential underwater applications[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(6): 1142.
- [7] Zheng Y, Wu B, Chen Y, et al. Design and validation of cable-driven hyper-redundant manipulator with a closed-loop puller-follower controller[J]. *Mechatronics*, 2021, 78: 102605.
- [8] Xu W, Liu T, Li Y. Kinematics, dynamics, and control of a cable-driven hyper-redundant manipulator[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(4): 1693-1704.
- [9] Gu H, Gao H, Zhao Y, et al. Dexterous obstacle-avoidance motion control of rope driven snake manipulator based on the bionic path following[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, 189: 105406.
- [10] Liang B, Li W, Lin B, et al. Hybrid tension-position control of cable-driven serial manipulator to improve accuracy and avoid cable slack and breakage[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024, 30(2): 1072-1083.
- [11] Zhu Z, Li Z, Peng Z, et al. Hybrid tension and configuration control of cable-driven hyper-redundant robots for high accuracy and stability[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2025, 10(6): 5601-5608.
- [12] 薛雷, 邓江沁, 李子清, 等. 面向复杂狭窄结构检测清除的超冗余度机器人研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(30): 12786-12795.
- Xue Lei, Deng Jiangqin, Li Ziqing, et al. Review of hyper redundant robots for detection and clearing of complex narrow spaces[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(30): 12786-12795.
- [13] 刘天亮. 狭小空间作业绳驱分段联动机械臂运动规划与控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- Liu Tianliang. Research on motion planning and control of rope-driven segmented linkage manipulator for operations in confined spaces[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.