◀钻井技术与装备▶

# 钻井循环罐清洁机器人原位柔性臂设计与运动特性分析*

游炎平[1] 董钟骏[1] 肖朝艳[1] 陈 仁[2] 侯昭宏[1] 杨馥源[3]
（1. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司川西钻探公司 2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司新兴产业发展事业部 3. 长江大学石油工程学院）

游炎平，董钟骏，肖朝艳，等. 钻井循环罐清洁机器人原位柔性臂设计与运动特性分析［J］. 石油机械，2026，54（9）：54-62.

You Yanping，Dong Zhongjun，Xiao Chaoyan，et al. Design and motion characteristics of in-situ flexible manipulator robot for mud tank cleaning［J］. China Petroleum Machinery，2026，54（9）：54-62.

**摘要：**钻井循环罐长期运行后易产生沉积物堆积，而传统人工清理方式存在空间狭窄、劳动强度大及安全风险高等问题。柔性机械臂因具备良好的环境适应能力，被认为是受限空间自动化作业的重要方案。然而，现有柔性机械臂在弯曲构形下难以实现稳定扭转，导致装备末端难以在目标位置保持稳定姿态。针对上述问题，提出一种面向钻井循环罐作业的原位扭转柔性机器人结构方案，在不显著改变整体构形的前提下，实现柔性臂在弯曲状态下的稳定原位扭转能力。该机器人采用模块化设计，由腱驱动弯曲模块、独立扭转模块及长度为3 500 mm的蛇形模块组成，实现了弯曲与扭转运动的有效解耦。基于恒定曲率假设，建立了柔性臂运动学模型，分析了驱动参数与末端位姿之间的映射关系，并研究了纯弯曲、纯扭转和融合运动3种模式下的运动特性。结合数值仿真与室内试验，对样机在15°~120°不同弯曲角度下的原位扭转性能进行了定量分析。研究结果表明：所提出的驱动参数规划方法能够实现不同弯曲构形下的稳定原位扭转；在伸直状态与最大弯曲构形下，柔性臂最大扭转变形量分别为11.4和90.8 mm；系统平均位置误差、旋转误差和方向误差分别为153 mm、208.88°和2.70°。方差分析表明，尽管误差会随弯曲角度增大而增加，但系统整体运行稳定，未出现明显失稳现象，相关误差满足钻井循环罐受限空间作业需求。研究结果可为复杂受限空间柔性装备的结构设计与运动控制提供工程参考。

**关键词：**钻井循环罐清洁；原位扭转运动；柔性臂；腱驱动结构；运动特性
**中图分类号：**TE928 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202601095

# Design and Motion Characteristics of In-Situ Flexible Manipulator Robot for Mud Tank Cleaning

You Yanping[1] Dong Zhongjun[1] Xiao Chaoyan[1] Chen Ren[2] Hou Zhaohong[1] Yang Fuyuan[3]
（1. *CCDC Chuanxi Drilling Company*；2. *Emerging Industry Development Division*，*CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company*；3. *School of Petroleum Engineering*，*Yangtze University*）

**Abstract**：Sediments tend to accumulate in mud tanks after prolonged operation，and traditional manual cleaning faces problems such as narrow space，high labor intensity and high safety risks. Flexible manipulators with good environmental adaptability are considered as an important solution for automated operation in confined spaces. However，existing flexible manipulators can hardly perform stable torsional motion in a bent configuration，

* 基金项目：中国石油集团川庆钻探工程有限公司基金项目“钻井循环罐自动化清掏装备的研制与试验”（CQ2025B-13-Z9-7）。

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

making the equipment difficultly maintain a stable end-effector posture at target positions. This paper presents a structure of flexible robot with in-situ torsion for mud tank operations, which delivers stable in-situ torsion of the flexible manipulator in the bending state without significantly changing the overall configuration. The robot adopts a modular design, composed of a tendon-driven bending module, an independent torsion module, and a 3 500-mm-long serpentine module, enabling effective decoupling of bending and torsion motions. Based on the constant curvature assumption, a kinematic model of the flexible manipulator was established to analyze the mapping relationships between the driving parameters and the end-effector posture and to understand the motion characteristics under three modes (bending, torsion, and bending + torsion). Through numerical simulation and laboratory tests, the in-situ torsion performance of the prototype at bending angles of 15°-120° was quantitatively analyzed. The results show that the proposed driving parameter planning method can realize stable in-situ torsion under different bending configurations. In the straight and maximum bending configurations, the maximum torsional deformations of the flexible manipulator are 11.4 mm and 90.8 mm, respectively, and the average position error, rotation error and orientation error of the system are 153 mm, 208.88° and 2.70°, respectively. As revealed in variance analysis, although the errors increase with the bending angle, the overall system operates stably without obvious instability, and the errors meet the requirements of confined space operation in mud tanks. The research findings provide engineering reference for the structural design and motion control of flexible equipment in complex confined spaces.

**Keywords**: mud tank cleaning; in-situ torsion; flexible manipulator; tendon-driven structure; motion characteristics

## 0　引　言

钻井循环罐是钻井液循环、岩屑沉降与分离的重要设备，其运行状态直接影响钻井作业的安全性与连续性[1]。长期运行过程中，钻井循环罐内易产生岩屑与沉积物堆积，若清理不及时，将导致有效容积减小及钻井液循环效率下降[2-3]。目前，钻井循环罐清理仍主要依赖人工完成，存在作业空间狭窄、劳动强度大和安全风险大等问题。因此，开发适用于钻井循环罐内受限空间作业的自动化清洁装备具有重要工程意义。

柔性机械臂因具备良好的构形适应能力和空间通过性，在管道检测、储罐清洗及核设施维护等领域受到广泛关注[4]。相比传统刚性机械臂，柔性机械臂能够通过连续弯曲适应复杂空间环境，在狭窄区域具有更高可达性[5]。围绕柔性机械臂运动能力提升的问题，国内外学者从结构设计、驱动方式及建模方法等方面开展了大量研究。在结构设计方面，通过多段串联、模块化构形或材料优化等手段提升柔性臂的空间运动能力[6-7]；在驱动方式方面，腱驱动、气动驱动和柔性轴驱动等方案被广泛采用，以实现连续弯曲和柔顺运动[8-9]；在建模方法方面，基于恒定曲率假设的运动学模型被广泛用于描述柔性机械臂的整体姿态变化特性[10-11]。现有柔性机械臂的运动形式多以弯曲、伸展为主，侧重于柔性机械臂的弯曲与定位性能，对于在弯曲构形下实现稳定、可控的原位扭转操作关注较少，在弯曲构形下实施扭转操作的能力仍然有限[12-13]，制约了其在实际清罐作业中的应用[14]。

针对上述问题，笔者提出一种面向钻井循环罐受限空间作业的原位扭转柔性臂结构方案。该柔性臂采用腱驱动弯曲模块与独立扭转模块协同的设计，实现弯曲与扭转运动的有效解耦，从而在整体构形基本保持稳定的前提下实现原位扭转能力[15]。基于恒定曲率假设，建立了柔性臂运动学模型，分析了纯弯曲、纯扭转及弯曲-扭转融合模式下的运动特性。在此基础上，通过有限元分析与样机试验，对不同弯曲构形下的扭转变形特性及原位扭转性能进行了验证。研究结果可为复杂受限空间柔性装备的结构设计与运动控制提供工程参考。

## 1　工程需求分析与总体方案设计

### 1.1　钻井循环罐清洁作业的工程需求分析

钻井循环罐是钻井液循环系统的重要组成部分，主要用于钻井液储存、循环、岩屑沉降和固液分离。现场循环罐通常采用长方体分仓结构，单仓长度为6~10 m，宽度为2~3 m，高度为2.5~3.5 m，内部由挡板、加强筋和隔仓通道连接形成

复杂受限空间环境。隔仓之间通常仅通过宽度300~500 mm的连通区域连接，局部还存在转角、支撑结构及底部沉积死角等区域。长期运行过程中，钻井液中的岩屑与固相颗粒会在罐底及挡板附近形成厚度50~200 mm的不规则沉积层，影响循环效率及设备运行安全。由于内部空间狭窄、环境潮湿且存在有害气体聚集风险，罐内作业人员面临较高安全隐患。此外，传统刚性设备受限于结构尺寸与转弯半径，难以完成隔仓穿越及局部区域作业。因此，面向钻井循环罐内部环境，需要设计兼具空间通过能力与稳定操作能力的柔性清洁装备。

结合现场工况，柔性清洁装备需满足以下工程需求：

（1）整体外径需小于隔仓连通区域尺寸，以满足宽度300~500 mm通道的穿行需求；

（2）柔性主体长度需覆盖单仓典型作业距离，满足不少于3 m的远距离进入能力；

（3）能够在弯曲半径1.0~1.5 m的条件下稳定通过挡板及转角区域；

（4）末端执行器在弯曲状态下仍具备稳定扭转能力，以实现局部区域定向作业；

（5）具备一定扭矩传递能力与环境适应能力，可在潮湿、多沉积物环境下长期运行。

### 1.2　现有清罐与柔性作业装备的局限性分析

现有钻井循环罐自动化清洁装备主要有履带式装置、刚性机械臂及柔性清洁机构等。履带式装置具有一定移动能力，但难以适应隔仓转角与狭窄通道环境；刚性机械臂虽具有较高控制精度，但其结构尺寸较大、转弯半径受限，在复杂受限空间中的通过性不足。

柔性清洁机构由于具备连续变形能力，在受限空间环境中表现出较好的空间适应性。目前常见柔性清洁机构多采用腱驱动、气动驱动或柔性轴驱动方式，其研究重点主要集中于弯曲运动与空间到达能力[16-17]。然而，当其柔性臂处于较大弯曲构形时，末端执行器的旋转操作通常会引起整体构形变化，难以在固定位置实现稳定原位扭转。此外，部分方案通过增加多自由度耦合结构实现扭转功能，导致驱动系统复杂、控制难度增加，不利于工程应用。因此，在保持整体构形基本稳定的前提下，实现弯曲状态下的稳定原位扭转能力，是柔性清洁装备在钻井循环罐场景中的关键技术问题。

### 1.3　原位扭转柔性臂的设计思路

针对钻井循环罐内部受限空间环境及作业需求，提出一种原位扭转柔性臂结构方案。该方案采用弯曲运动与扭转运动解耦设计，以实现复杂弯曲构形下的稳定原位扭转能力。

原位扭转柔性臂如图1所示。该柔性臂由腱传动模块、扭转模块、直线运动模块、蛇形模块及控制系统组成。其中，蛇形模块为主体柔性结构，采用铆接式连续结构设计，整体长度为3 500 mm，外径为318 mm，可满足循环罐内部300~500 mm连通通道的通过需求，同时保证结构刚度与扭矩传递能力。蛇形模块最小弯曲半径为1 m，可适应隔仓转角及挡板区域环境。

柔性臂弯曲运动由腱驱动模块实现。腱驱动

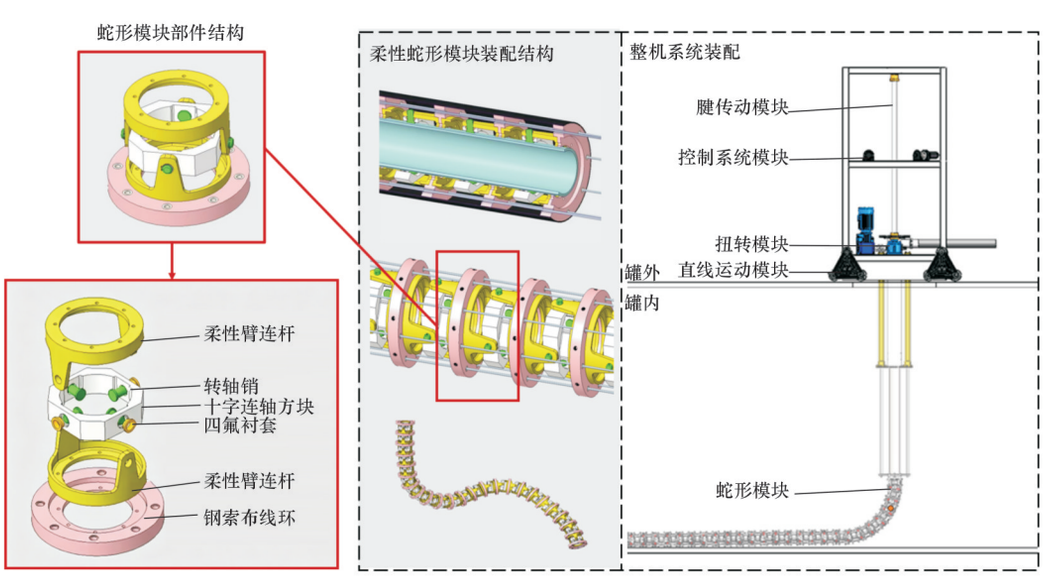



图1　原位扭转柔性臂

Fig. 1　In-situ torsion flexible manipulator

模块由4组周向均布的驱动腱、导向结构、驱动卷筒和伺服电机组成，各驱动腱沿蛇形模块轴向分布，并通过末端固定结构与柔性臂连接。驱动腱采用镍钛合金材料，以兼顾柔顺性、抗疲劳性能和扭矩传递能力。系统通过控制各组驱动腱的收放长度差，实现柔性臂在不同方向上的连续弯曲运动。其中，对向2组驱动腱构成1组差动驱动单元，通过协调控制可实现二维平面弯曲及空间姿态调整。

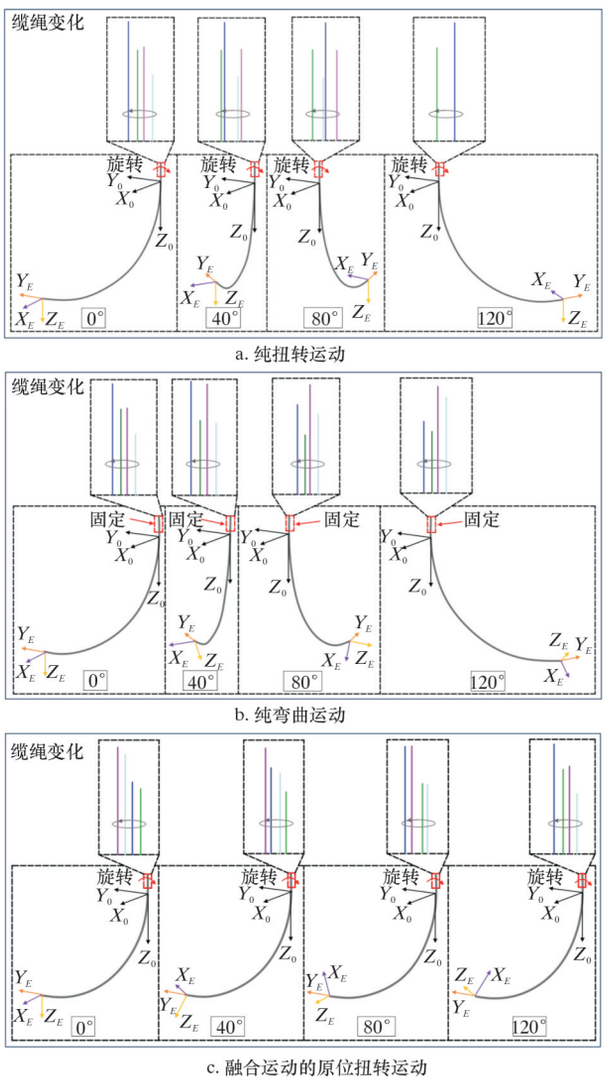
扭转运动由独立扭转模块实现。该模块采用中空旋转结构，由伺服电机、减速机构及旋转支撑组成，通过驱动蛇形模块近端旋转，实现末端执行器原位扭转。由于扭转自由度独立于弯曲驱动系统，可有效避免驱动腱缠绕问题，并降低弯曲与扭转运动之间的耦合影响。直线运动模块采用丝杠滑台驱动方式，为柔性臂提供轴向进给能力，以满足循环罐内部长距离作业需求。

在控制方式方面，系统采用“运动模式分层控制”策略。底层以伺服电机位置闭环控制为基础，实现驱动腱长度调节、扭转角度控制和轴向位移控制；上层则基于柔性臂运动学模型完成弯曲角度、扭转角度和末端姿态的协同规划。弯曲运动主要通过驱动腱长度变化控制柔性臂曲率与弯曲方向，扭转运动则通过独立旋转模块控制末端姿态变化。在弯曲–扭转融合模式下，通过协调腱长度变化与扭转模块转角，实现末端接近方向基本保持稳定条件下的原位扭转运动。

基于上述结构，系统最终实现轴向进给、二维弯曲和原位扭转共4自由度运动能力。其中，弯曲–扭转融合模式能够在保持末端接近方向基本稳定的条件下完成原位扭转，是满足循环罐局部区域定向清洁需求的关键运动形式。

柔性机械臂的常见运动模式根据腱的长度和位置可分为3类：纯扭转运动、纯弯曲运动和扭转与弯曲的融合运动。纯扭转运动由如图2a所示的扭转模块实现，其原理与连续管机器人的内管运动类似。在此模式下，腱的长度保持不变，而腱的位置与直管基座发生旋转。机器人末端执行器的位姿仅通过近端平移或旋转改变，曲率半径保持恒定。纯弯曲运动如图2b所示，其机制与传统腱驱动机器人[18–19]相似。该模式下，直管基座与腱的位置固定，仅腱的长度发生变化。

然而，上述2种模式均无法在固定平面下实现ISTS（原位扭转式转向）运动。图2c展示了扭转与弯曲的融合运动。在此模式下，肌腱的长度和位置满足在直管基座旋转的同时，两者的位置均发生变化。作为该模式的特例，当接近矢量的位置和方向固定时，可执行原位扭转运动。




a. 纯扭转运动

b. 纯弯曲运动

c. 融合运动的原位扭转运动

图2　3种不同运动模式

Fig. 2　Three motion modes

## 2　原位扭转柔性臂的运动描述与特性分析

### 2.1　运动描述的坐标系与参数定义

为分析原位扭转柔性臂在不同运动模式下的姿态变化规律，基于恒定曲率假设建立柔性臂几何模型，并对蛇形模块进行简化描述。该模型主要用于分析驱动参数与末端姿态之间的名义映射关系。

原位扭转柔性臂运动学坐标定义如图3所示。柔性臂中心线弧长定义为$L$，末端执行器长度定义为$h$，驱动腱分布半径定义为$r$。其中，蛇形模块总长度为3 500 mm，外径为318 mm，4组驱动腱沿周向均匀分布。柔性臂姿态由弯曲角$\theta$、偏转角

$\varphi$ 和旋转角 $\alpha$ 描述。其中：$\theta$ 表示柔性臂弯曲程度，$\varphi$ 表示弯曲平面方向，$\alpha$ 表示蛇形模块绕中心轴的旋转角度。图 3 中：世界坐标系 $\{W\}=\{X_W,\ Y_W,\ Z_W\}$ 位于机器人的底部；基架 $\{B\}=\{X_B,\ Y_B,\ Z_B\}$ 连接到蛇形模块的基端，并围绕 $Z_W$ 旋转角度 $\alpha$。$X_B$ 指向致动腱 1 的方向；末端执行器坐标系 $\{E\}=\{X_E,\ Y_E,\ Z_E\}$ 固定于柔性机械臂的最远端；末端工具坐标系 $\{F\}=\{X_F,\ Y_F,\ Z_F\}$ 固定于清罐工具上。

通过协调控制上述参数，可实现弯曲状态下的原位扭转运动。为描述柔性臂整体运动关系，分别建立世界坐标系、基坐标系和末端执行器坐标系，用于描述末端位置与姿态变化。

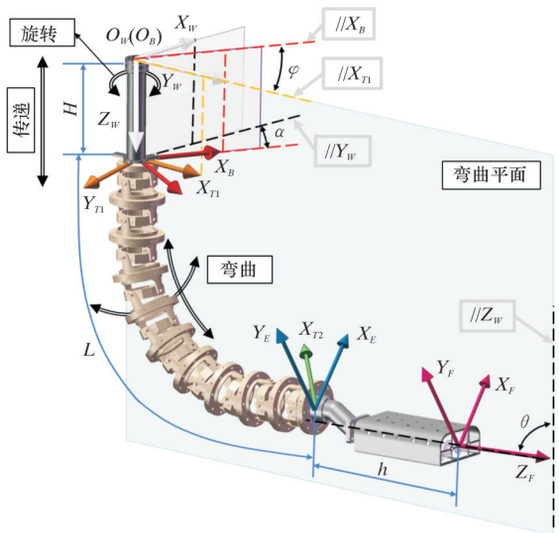



图 3　原位扭转柔性臂运动学坐标系定义

Fig. 3　Definition of the kinematic coordinate system for the in-situ torsion flexible manipulator

## 2.2　驱动空间与末端姿态的名义映射关系

在恒定曲率条件下，柔性臂中心线可视为圆弧，其末端位姿由弯曲角 $\theta$、偏转角 $\varphi$ 和旋转角 $\alpha$ 共同决定。基于齐次变换方法，可建立从基坐标系到末端执行器坐标系的运动映射关系，从而得到柔性臂末端位置与姿态的表达形式[20]。从世界坐标系 $\{W\}$ 到末端工具坐标系 $\{F\}$ 的变换矩阵 ${}^W_F T$ 可通过如下方式求得：

$$ {}^W_F T = {}^W_B T\,{}^B_E T\,{}^E_F T = \begin{bmatrix} {}^W_F R & {}^W P_{O_F} \\ 0_{1\times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1} $$

其中：

$$ \begin{cases} n_x = \cos\alpha(\sin^2\varphi + \cos^2\varphi\cos\theta) - \sin\alpha\cos\varphi\sin\varphi(\cos\theta - 1) \\ n_y = \sin\alpha(\sin^2\varphi + \cos^2\varphi\cos\theta) + \cos\alpha\cos\varphi\sin\varphi(\cos\theta - 1) \\ n_z = -\cos\varphi\sin\theta \end{cases} \tag{2} $$

$$ \begin{cases} o_x = -\sin\alpha(\cos^2\varphi + \sin^2\varphi\cos\theta) + \cos\alpha\cos\varphi\sin\varphi(\cos\theta - 1) \\ o_y = \cos\alpha(\cos^2\varphi + \sin^2\varphi\cos\theta) + \sin\alpha\cos\varphi\sin\varphi(\cos\theta - 1) \\ o_z = -\sin\varphi\sin\theta \end{cases} \tag{3} $$

$$ \begin{cases} a_x = \sin\theta(\cos\alpha\cos\varphi - \sin\alpha\sin\varphi) \\ a_y = \sin\theta(\cos\alpha\sin\varphi + \cos\varphi\sin\alpha) \\ a_z = \cos\theta \end{cases} \tag{4} $$

$$ \begin{cases} p_x = \dfrac{L}{\theta}(\cos\theta - 1)(\sin\varphi\sin\alpha - \cos\alpha\cos\varphi) - h\sin\theta(\sin\alpha\sin\varphi - \cos\alpha\cos\varphi) \\ p_y = -\dfrac{L}{\theta}(\cos\theta - 1)(\cos\varphi\sin\alpha + \sin\varphi\cos\alpha) + h\sin\theta(\cos\alpha\sin\varphi + \cos\varphi\sin\alpha) \\ p_z = H + \dfrac{L}{\theta}\sin\theta + h\cos\theta \end{cases} \tag{5} $$

因此，机械臂的姿态角可表示为：

$$ \begin{cases} \theta = \arccos a_z \\ \varphi = \arctan\dfrac{o_z}{n_z} \\ \alpha = \arcsin\dfrac{n_y + o_x}{1 + a_z} \end{cases} \tag{6} $$

## 2.3　腱驱动参数与柔性臂姿态关系描述

蛇形模块几何模型如图 4 所示。柔性臂采用四腱驱动结构，各驱动腱沿周向均匀分布。驱动腱长度变化量 $\Delta L_i$ 与柔性臂弯曲角及弯曲方向存在对应关系：①对向驱动腱长度差决定弯曲方向；②驱动腱整体长度变化决定弯曲程度；③基座旋转角变化决定扭转姿态。

基于驱动参数变化形式，柔性臂运动可分为 3 种模式：①纯弯曲运动，即基座旋转角保持不变，仅通过驱动腱长度变化实现柔性臂弯曲；②纯扭转运动，即驱动腱长度保持不变，通过基座旋转实现末端扭转；③弯曲-扭转融合运动，即同步调

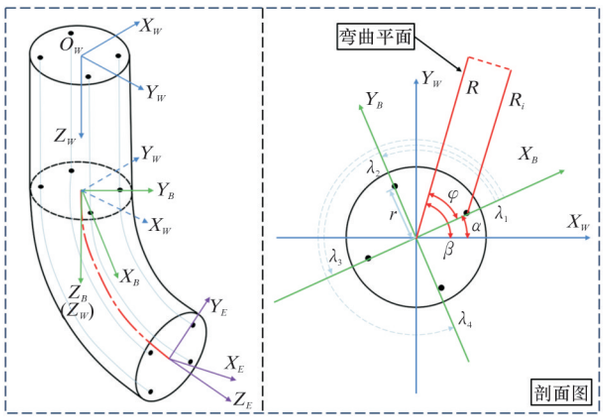



图 4　蛇形模块几何模型

Fig. 4　Geometric model of the serpentine module

节驱动腱长度与基座旋转角，实现弯曲状态下的原位扭转。其中，原位扭转是重点研究的运动模式，其特点是在保持整体构形基本稳定的前提下，实现末端执行器定向旋转。

### 2.4　原位扭转运动的速度特性分析

为进一步描述驱动参数变化对柔性臂末端运动趋势的影响，建立驱动空间、关节空间与任务空间之间的速度映射关系。定义关节变量为：

$$\boldsymbol{x} = [\theta \quad \varphi \quad \alpha \quad H]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

定义驱动变量为：

$$\boldsymbol{l} = [\Delta L_1 \quad \Delta L_2]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

式中：$\Delta L_1$ 和 $\Delta L_2$ 分别为 2 组正交方向驱动腱的等效长度变化量。

任务空间变量定义为：

$$\boldsymbol{p} = [p_x \quad p_y \quad p_z \quad n_x \quad n_y \quad n_z]^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

其中：$(p_x|p_y|p_z)$ 表示末端位置，$(n_x|n_y|n_z)$ 表示末端接近方向矢量。则速度映射关系可表示为：

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}_1 \dot{\boldsymbol{l}} \\ \dot{\boldsymbol{p}} = \boldsymbol{J}_2 \dot{\boldsymbol{x}} \end{cases} \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{J}_1$ 为驱动空间到关节空间的雅可比矩阵，$\boldsymbol{J}_2$ 为关节空间到任务空间的雅可比矩阵。

由于扭转角 $\alpha$ 由独立扭转模块驱动，轴向位移 $H$ 由直线运动模块驱动，二者并非由驱动腱长度直接决定，所以，驱动腱长度变化主要影响柔性臂的弯曲角 $\theta$ 与弯曲平面方向角 $\varphi$。根据前述驱动参数关系，即有：

$$\begin{cases} \theta = \dfrac{\sqrt{\Delta L_1^2 + \Delta L_2^2}}{r} \\ \varphi = \arctan \dfrac{\Delta L_2}{\Delta L_1} \end{cases} \tag{11}$$

由式（11）可得驱动空间到弯曲参数空间的速度映射关系：

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\Delta L_1}{r\sqrt{\Delta L_1^2 + \Delta L_2^2}} & \dfrac{\Delta L_2}{r\sqrt{\Delta L_1^2 + \Delta L_2^2}} \\ -\dfrac{\Delta L_2}{\Delta L_1^2 + \Delta L_2^2} & \dfrac{\Delta L_1}{\Delta L_1^2 + \Delta L_2^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{L}_1 \\ \Delta \dot{L}_2 \end{bmatrix} \tag{12}$$

由式（12）可知，驱动腱长度变化量的幅值主要决定柔性臂弯曲角速度，而 2 组正交驱动腱长度变化的比例关系决定弯曲平面方向角速度。因此，在纯弯曲运动中，保持扭转角 $\alpha$ 不变，仅通过调节驱动腱长度即可改变柔性臂的弯曲程度和弯曲方向；在纯扭转运动中，驱动腱长度保持不变，仅通过独立扭转模块改变旋转角 $\alpha$，此时柔性臂的名义弯曲构形保持不变。

对于原位扭转运动，其目标是在柔性臂整体构形基本稳定的条件下实现末端执行器绕自身方向的旋转。原位扭转运动并非单纯依靠扭转模块旋转实现，而是需要在扭转模块旋转的同时同步调节驱动腱长度，使弯曲平面方向角产生相反变化，从而抵消基座旋转对整体构形的影响。原位扭转运动的核心控制约束可表示为：

$$\begin{cases} \dot{\theta} = 0 \\ \dot{\alpha} = -\dot{\varphi} \end{cases} \tag{13}$$

关节空间到任务空间的速度映射可统一表示为：

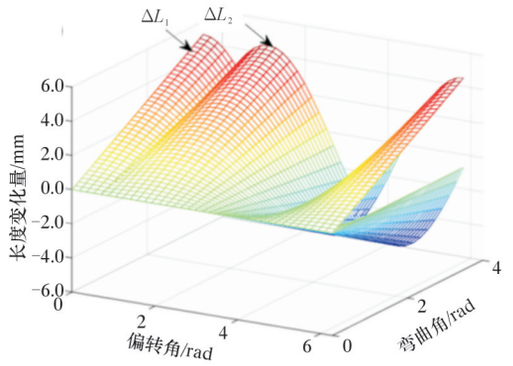
$$\dot{\boldsymbol{p}} = \boldsymbol{J}_2 \dot{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{J}_2 = \frac{\partial \boldsymbol{p}}{\partial \boldsymbol{x}} \tag{14}$$

其中：$\boldsymbol{J}_2$ 可由式（7）中的末端位姿表达式对关节变量 $\boldsymbol{x}$ 求偏导得到。由于其元素表达较长，不再逐项展开。该雅可比矩阵主要用于描述弯曲角、弯曲平面方向角、扭转角及轴向位移变化对末端位置与方向矢量的影响。

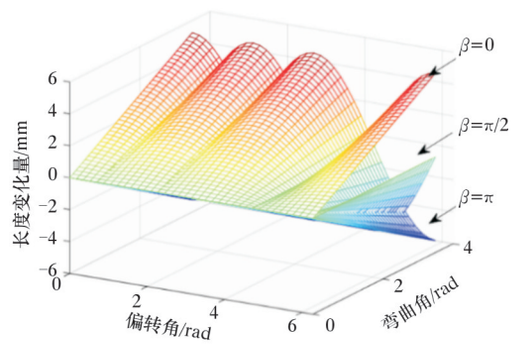
## 3　驱动肌腱变位特性仿真分析

通过数值仿真分析不同运动模式下驱动腱长度变化的规律性特征，重点关注驱动参数随弯曲角与扭转角变化的相对趋势，以验证所提出驱动协调策略在工程实现层面的合理性。其长度变化结果如图 5 所示。由图 5a 可见，在纯弯曲运动模式下，各驱动腱长度随偏转角变化呈现周期性分布特征，且相邻腱之间存在固定相位差，该结果与几何结构对称性相一致。图 5b 表明，在原位扭转运动过程中，驱动腱长度随旋转角变化呈现规律性变化，且变化幅度受弯曲角影响明显。该结果说明，通过协调调节驱动腱长度与基座旋转角度，可在保持整体构形基本稳定的情况下实现扭转操

作，为后续样机运行提供了驱动参数规划依据。




a. 纯弯曲运动中的长度变化




b. 原位扭转运动中的长度变化

图 5　肌腱长度变化图

Fig. 5　Change in the tendon length

由图 5a 可见，驱动腱长度随偏转角呈正弦规律变化。在特定偏转角下，腱长度随弯曲角增大而增加。各腱长度变化规律相同，且相邻曲面间存在$\frac{\pi}{2}$相位差。图 5b 表明，腱 1 的长度变化量随旋转角呈正弦分布，且随弯曲角增大而增大。

## 4　原位扭转操作性能试验分析

通过样机试验对所提出柔性清罐机器人在弯曲构形下实施原位扭转操作的性能进行评估。试验关注的重点并非末端位姿的绝对精度，而是原位扭转过程中运动误差的稳定性及其与弯曲构形和扭转角度之间的关系，以验证该运动方式在清罐作业中的工程可行性。

图 6 展示了所设计的 ISTS 机器人样机。为评估原位扭转运动的性能，在固定轨迹下进行了定量试验（见图 7）。试验采用光学跟踪系统获取机械臂位置与姿态。根据清罐所需角度范围，首先将机械臂弯曲至预设位置，随后在目标位置进行 180°的原位扭转运动并与目标方向对齐。为测量不同弯曲角度 $\theta \in (15°, 120°)$ 下的位置、旋转和方向误差，每间隔 15°扭转角记录坐标系 $\{F\}$ 的位置 $p_t$ 与姿态 $a_t$。8 次试验的平均结果如表 1 和图 8 所示。其中位置误差定义为 $e_p = \|p_{O_F} - p_t\|$，方向误差表示为 $Z_F$ 轴的偏差并通过 $e_a = \arccos(a^T a_t)$ 计算，旋转误差则通过 $X_F$ 轴的扭转误差计算得出。

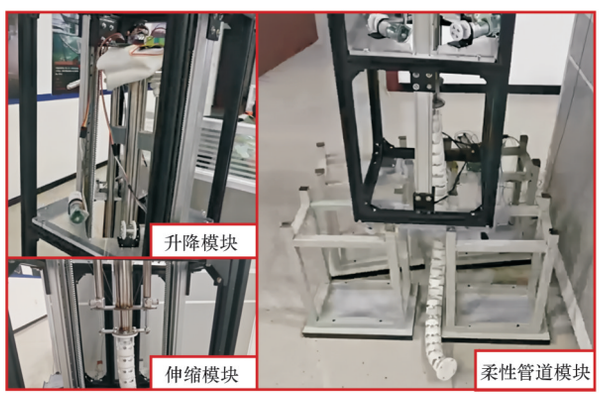



图 6　用于钻井循环罐清洁的原位扭转可操控机器人原型机

Fig. 6　Prototype of the in-situ torsion controllable robot for mud tank cleaning

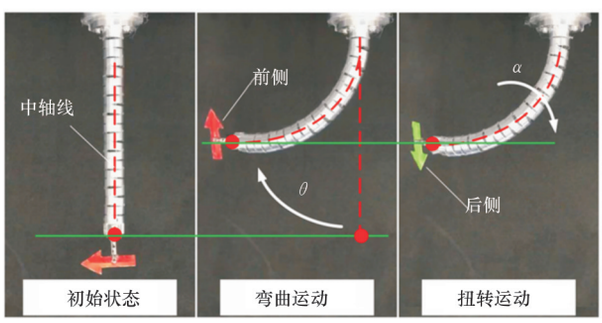



图 7　所提机器人的运动演示

Fig. 7　Motion demonstration of the proposed robot

**表 1　不同弯曲角度下的扭转范围误差**

Table 1　Torsion errors under different bending angles

| 弯曲角度/(°) | 位置误差/mm | | 旋转误差/(°) | | 方向误差/(°) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 平均值 | 标准差 | 平均值 | 标准差 | 平均值 | 标准差 |
| 15 | 78 | 37 | 87 | 55 | 1.13 | 0.84 |
| 30 | 88 | 25 | 105 | 73 | 1.90 | 0.79 |
| 45 | 94 | 35 | 108 | 109 | 2.50 | 1.13 |
| 60 | 96 | 44 | 139 | 84 | 2.33 | 1.07 |
| 75 | 133 | 55 | 218 | 141 | 2.69 | 1.43 |
| 90 | 179 | 131 | 287 | 203 | 2.94 | 1.34 |
| 105 | 253 | 153 | 368 | 204 | 3.16 | 1.39 |
| 120 | 303 | 133 | 359 | 256 | 4.97 | 1.94 |

由图 8 可知，在各弯曲构形下，3 类误差随扭转角变化均在有限范围内波动，未呈现随扭转角递增的明显趋势。为量化评估扭转角对误差的影响，针对每一弯曲角度分别进行单因素方差分析（ANOVA）。结果表明，扭转角对位置误差（$p$=0.19>0.05）、旋转误差（$p$=0.93>0.05）及方向误

差（$p$=0.26>0.05）的影响均不显著，说明扭转角并非3类误差的显著性影响因子。由此可见，在给定弯曲构形下，原位扭转操作具有较好的运动稳定性，观察到的误差波动主要源于结构柔性与驱动非理想因素。

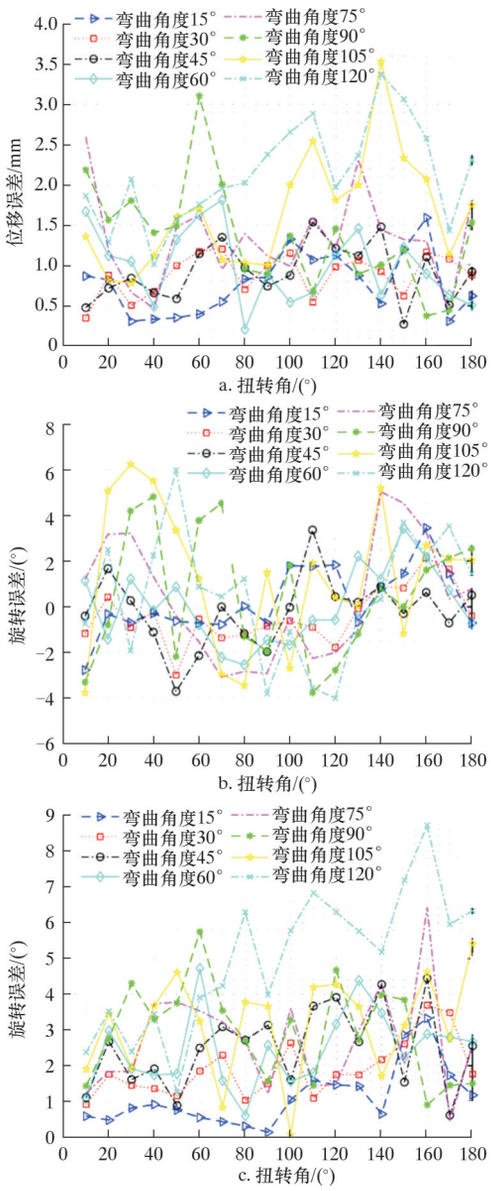



图8　不同弯曲角度和不同扭转角度下原位扭转运动的误差

Fig. 8　Errors of in-situ torsional motion under different bending and torsional angles

由表1可知：随着弯曲角度增大，位置误差、旋转误差及方向误差整体均呈上升趋势；平均位置误差、旋转误差和方向误差分别为153 mm、208.88°和2.70°，但在同一弯曲构形下，各误差在不同扭转角范围内波动平稳，未出现明显突变；最大位置误差为303 mm（对应120°弯曲角度），在总长3 500 mm的柔性臂上占比约8.7%，鉴于清罐作业中末端执行器主要通过接触与刮削完成沉积物清理，该量级位姿偏移对作业效果无实质性影响，处于工程可接受范围。

## 5　结论及认识

（1）针对钻井循环罐清洁作业中作业空间受限、作业环境复杂及柔性机械臂在弯曲构形下难以实施扭转操作的问题，提出了一种集成腱驱动弯曲模块与独立扭转模块的原位扭转柔性机械臂结构方案，并对其运动特性与操作性能进行了系统分析与试验验证。

（2）研究结果表明，通过驱动参数的协调控制，所提出的柔性机械臂能够在较大弯曲构形下实现稳定的扭转操作。在机械臂长度约为3 500 mm的条件下，原位扭转过程中末端位姿误差保持在工程可接受范围内，且误差随扭转过程变化平稳，未出现明显失稳现象，验证了该结构方案在实际清罐作业中的可操作性。

（3）与传统柔性机械臂相比，所提出的结构设计能够在不显著改变整体构形的前提下传递扭转载荷，提升了柔性清洁装备在复杂受限空间中的作业能力，对钻井循环罐等工业场景下的自动化清洁作业具有一定的工程参考价值。

（4）采用的运动学描述模型基于恒定曲率假设，在大变形工况下仍存在一定简化误差。后续研究将结合结构优化、驱动腱预紧力调整及闭环控制策略，进一步提升末端操作精度，并在实际清罐工况中开展更深入的应用验证。

### 参　考　文　献

[1] 何正杰，何成松，裴志明. 钻井液循环罐优化设计浅述［J］. 石油矿场机械，2002，31（2）：44-45.
He Zhengjie，He Chengsong，Pei Zhiming. Brief introduction to optimal design of drilling fluid circulation tank［J］. Oil Field Equipment，2002，31（2）：44-45.

[2] 韩成福，张建卿，胡祖彪，等. CQKJ-1循环系统在清洁化生产中的研究与应用［J］. 石化技术，2021，28（7）：29-30.
Han Chengfu，Zhang Jianqing，Hu Zubiao，et al. Research and application of CQKJ-1 circulation system in cleaner production［J］. Petrochemical Industry Technology，2021，28（7）：29-30.

[3] 庞雷，王永强，鲁飞，等. 钻井泥浆罐自动化清洗与回收成套设备研制［J］. 流体机械，2020，48（7）：12-15.
Pang Lei，Wang Yongqiang，Lu Fei，et al. Develop-

ment of complete equipment for automatic cleaning and recovery of drilling mud tank [J]. Fluid Machinery, 2020, 48 (7): 12-15.

[4] Weng Zhixuan, Sha Liansen, Chen Yufei, et al. Design and implementation of a three-segment tendon-driven continuum robot with variable stiffness for manipulation in confined spaces [J]. Biomimetics (Basel, Switzerland), 2026, 11 (2): 113.

[5] 万淑敏，孙长超，袁培康，等. 中空连续体机械臂的设计与主从任务转换避障控制 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版)，2025，58 (1)：24-35.
Wan Shumin, Sun Changchao, Yuan Peikang, et al. Design and master-slave task switching obstacle avoidance control of a hollow continuum manipulator [J]. Journal of Tianjin University, 2025, 58 (1): 24-35.

[6] 于仕泽. 用于航天狭小空间作业的仿生柔性机械臂：设计与实验 [D]. 南京：南京航空航天大学，2019.
Yu Shize. Design and experiment of bionic flexible manipulator for aerospace demand [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[7] 曹燕飞. 变刚度微创介入手术连续体机器人研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2019.
Cao Yanfei. Research on a variable-stiffness continuum manipulator for minimally invasive surgery [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[8] 谢俊男，钱彧哲. 柔性连续体机器人建模与控制综述 [J]. 河北工业大学学报，2024，53 (3)：8-18.
Xie Junnan, Qian Yuzhe. A review for modeling and control of flexible continuum robots [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2024, 53 (3): 8-18.

[9] Zhu Yinlong, Wang Tian, Gong Weizhuang, et al. Design and motion analysis of soft robotic arm with pneumatic-network structure [J]. Smart Materials & Structures, 2024, 33 (9): 095038.

[10] Rolf M, Steil J J. Constant curvature continuum kinematics as fast approximate model for the bionic handling assistant [C]//2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012: 3440-3446.

[11] 牛国臣，张云霄. 连续型机器人运动学仿真和操控系统设计 [J]. 智能系统学报，2020，15 (6)：1058-1067.
Niu Guochen, Zhang Yunxiao. Kinematics simulation and control system design of continuous robot [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2020, 15 (6): 1058-1067.

[12] 隋东宝. 柔性连续体操作臂-手系统设计与控制方法研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2022.
Sui Dongbao. Research on the design and control of a flexible continuum manipulator with gripper [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.

[13] 董佳祥，刘铨权，胡希平，等. 新型刚柔混联连续体机器人运动建模 [J]. 中国机械工程，2025，36 (11)：2678-2684.
Dong Jiaxiang, Liu Quanquan, Hu Xiping, et al. Kinematic modeling of a novel rigid-flexible hybrid continuum robots [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36 (11): 2678-2684.

[14] Niño P M H, Boutayeb M, Martinez D. A hybrid tendon-driven continuum robot that avoids torsion under external load [J]. Frontiers in Robotics and AI, 2025, 12: 1576209.

[15] 谭晨羽，许朋，李平，等. 绳驱柔性机械臂建模与控制方法研究现状 [J]. 信息与控制，2023，52 (3)：277-291.
Tan Chenyu, Xu Peng, Li Ping, et al. Current research on modeling and control methods for cable-driven flexible manipulator [J]. Information and Control, 2023, 52 (3): 277-291.

[16] 程基彬，戴宁，郭培，等. 基于力学超材料的柔性机械臂设计技术 [J]. 中国机械工程，2023，34 (16)：1900-1906.
Cheng Jibin, Dai Ning, Guo Pei, et al. Design techniques of soft robot arms based on mechanics metamaterials [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34 (16): 1900-1906.

[17] 高国华，郑玉航，王皓. 双臂三自由度柔性连续体机器人的运动分析及实验研究 [J]. 北京工业大学学报，2020，46 (5)：448-455.
Gao Guohua, Zheng Yuhang, Wang Hao. Kinematic analysis and experimental study for dual-arm continuum robots with three-degree freedom [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46 (5): 448-455.

[18] 陈翔. 基于腱驱动的人形机器人模块化关节及控制系统研究 [D]. 杭州：浙江大学，2018.
Chen Xiang. Research on modular joint of humanoid robot and the control system based on tendon drive [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

[19] 卢继龙. 基于腱驱动的柔性针穿刺机器人及其运动控制研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2024.
Lu Jilong. Research on flexible needle insertion robot based on tendon driving and its motion control [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2024.

[20] Priyanka R, Quentin P, Sven L, et al. How to model tendon-driven continuum robots and benchmark modelling performance [J]. Frontiers in Robotics and AI, 2021, 7: 630245.

**第一作者简介：**游炎平，工程师，生于 1985 年，2014 年毕业于长江大学油气工程专业，获硕士学位，现从事钻井技术研发工作。地址：(610051) 四川省成都市。电话：(028) 86012848。email：yyp. gwdc@ cnpc. com. cn。

**修改回稿日期：**2026-05-15
(本文编辑　刘　锋)