

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614992

柔性检测连续体机器人刚度建模及性能分析*

齐 飞^{1,2}, 郑宏儒¹, 孙 露¹, 赵婉冰¹, 束学道²

(1. 常州大学机械与轨道交通学院 常州 213000; 2. 宁波大学机械工程与力学学院 宁波 315211)

摘 要:针对现有连续体机器人在航空发动机原位检测中存在驱动能力差、控制精度低、负载能力弱及结构刚度不足等问题,提出了一种变刚度连续体机器人,以协同解决高柔性 with 低刚度之间的矛盾,提高机器人控制精度。基于叶片环境特征参数及章鱼触手吸附机理,设计了一种由多节卯榫柔性关节与气压吸附单元串联而成的可吸附连续体机器人,通过主动吸附到接触环境,实现自身结构锁定从而增强整体刚度。首先,在常曲率圆弧假设下基于几何分析法建立连续体机器人运动学模型,分析其弯曲形变与结构参数间的映射关系。然后,以机器人末端挠度为评价标准,基于欧拉-伯努利梁理论和连续性原理构建连续体机器人等效刚度模型,并采用有限元法对连续体结构刚度进行仿真分析,研究吸附单元位置、数量及吸附强度等几何参数对刚度特性的影响规律,对连续体结构布局参数进行优化。最后,搭建了柔性检测连续体机器人实验平台,并通过多种实验对所提结构和所建模型进行实验分析与验证。结果表明:连续体机器人等效抗弯刚度可由初始柔性状态下的 31.1 N/m 分级调节至完全吸附状态下的 93.3 N/m,在相同负载下,机器人末端变形量减小了 61.3%,实现了约 3 倍的刚度增益,由此验证了所提变刚度结构方案和所建刚度模型的正确性与有效性。

关键词: 连续体机器人; 变刚度; 刚度建模; 吸附单元; 性能分析

中图分类号: TP242 TH712 TH165 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

Stiffness modeling and performance analysis of flexible inspection continuum robots

Qi Fei^{1,2}, Zheng Hongru¹, Sun Lu¹, Zhao Wanbing¹, Shu Xuedao²

(1. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213000, China;

2. Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To address the limitations of existing continuum robots in the in-situ inspection of aero-engines, specifically their poor driving capability, low control accuracy, weak load capacity, and insufficient structural stiffness, this article proposes a variable stiffness continuum robot. This design aims to resolve the trade-off between high flexibility and low stiffness, thereby improving control accuracy. Inspired by the environmental characteristics of engine blades and the adsorption mechanism of octopus tentacles, an adsorbable continuum robot composed of multi-segment mortise-and-tenon flexible joints and pneumatic adsorption units connected in series is designed. By actively adhering to the contact environment, the robot achieves structural locking, enhancing its overall stiffness. First, assuming constant curvature, a geometric kinematic model is established to analyze the mapping between bending deformation and structural parameters. Then, with tip deflection as the evaluation criterion, an equivalent stiffness model is formulated based on the Euler-Bernoulli beam theory and the continuity principle. Furthermore, finite element analysis is utilized to simulate the continuum stiffness, investigating the influence of geometric parameters (e.g., the position, quantity, and strength of the adsorption units) to optimize the structural layout. Finally, an experimental platform is established to experimentally analyze and evaluate the proposed structure and the established model. Results show that the equivalent bending stiffness can be regulated from 31.1 N/m in the initial flexible state to 93.3 N/m in the fully adsorbed state. Under the same load, the tip deformation is reduced by 61.3%, achieving an

收稿日期: 2026-03-06 Received Date: 2026-03-06

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(52305092)、中国博士后科学基金资助项目(2025M781301)、江苏省“青蓝工程”项目(苏教师函[2025]4号)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX25_1754)资助

approximate threefold stiffness gain. It verifies the validity of the proposed variable stiffness scheme and the established model.

Keywords: continuum robot; variable stiffness; stiffness modeling; adsorption unit; performance analysis

0 引言

连续体机器人是一种仿生无离散关节的柔性机器人,其设计灵感源于象鼻、章鱼触手等生物器官的运动机制^[1-3]。与传统刚性机器人相比,连续体机器人具有灵活性好、柔顺性强等特点,可通过改变自身形状以适应复杂非结构化环境,在医疗手术、灾后救援、勘探勘测等领域^[4-7]得到广泛研究。但这种高柔顺性特点也使得机器人在工作过程中结构刚度差,负载能力不足^[8-10],从而严重影响连续体机器人的控制精度与操作稳定性。因此,亟需研究一种可变刚度的柔性检测连续体机器人,以解决柔顺性和高负载能力之间的矛盾,从而改善连续体机器人控制精度问题。

目前,国内外针对连续体机器人的变刚度方法主要有基于智能材料和基于结构原理两类。其中基于材料的变刚度方法^[11-13]主要利用材料固有特性实现变刚度,通过外部激励诱导机器人弯曲段中的变刚度材料发生物理或化学变化,进而实现变刚度。Xing等^[14]提出一种层状结构连续体机器人,通过低熔点合金实现总体刚度变化,但刚度切换响应速度慢且无法实时调节刚度。Mattmann等^[15]设计了一种新型变刚度磁性导管机器人,通过引入主动冷却通道,实现快速的刚度切换,但在刚性配置下存在较大的误差。Ye等^[16]提出了一种多级变刚度软体机器人,通过结合两种不同熔点的合金实现了结构刚度的分级调节^[17-18],但该方法刚度切换速度慢且缺乏精确的运动反馈控制。Liang等^[19]研发了一款基于形状记忆聚合物的变刚度折纸驱动器,解决了连续体机器人负载能力不足的问题,但刚度调节范围小且速度较慢。综上所述,以上方法均通过改变材料本身内在属性以实现整体结构刚度变化,但该方法存在能量效率低、响应速度较慢等问题^[20-22]。

相较于利用材料相变特性实现变刚度,基于结构的变刚度方法^[23-24]通常利用自身结构特性,通过改变气压或驱动力实现结构内部摩擦力或者结构形式的改变从而实现变刚度。如Shen等^[25]提出了一种具有快速切换刚度功能的连续体机器人,通过利用气囊挤压球关节产生摩擦力,从而实现在柔性和刚性状态之间快速切换,但其径向尺寸较大,难以满足狭小环境下的检测需求。Fan等^[26]设计了一种新型变刚度连续体机器人,将多层PVC薄膜编织成可抽真空的鞘套结构,通过调节内部气压实现机器人在横向和轴向两个方向上的刚度调节,但刚度调节速度慢且范围小。Luo等^[27]设计了一种新型末端混

合气压-线缆驱动的变刚度连续体关节,通过调节输入气压来控制内部扁平气管的膨胀程度实现关节刚度的调节,但同样刚度调节速度慢且体积较大。Ma等^[28]研发了一种面向受限工业环境的可调刚度连续体机器人,通过充气膨胀从而利用环境内壁的支撑力提高末端操作的刚度,但其系统可靠性较低,存在隐藏的安全风险^[29-31]。上述方法主要通过改变结构内部摩擦力或耦合形式以实现刚度调节,虽在一定程度上提升了刚度响应速度,但仍面临连续体结构设计复杂、非线性滞后严重,导致运动学建模困难,控制精度和可靠性差等不足。

为此,针对不同操作环境及检测任务对机器人结构刚度的差异化需求,本文设计了一种可吸附变刚度柔性检测连续体机器人,通过主动吸附环境特征而改变自身的结构刚度,从而适应复杂的非结构环境与检测任务。首先设计了绳驱动可吸附连续体机器人结构方案,建立连续体机器人的运动学模型。而后基于欧拉-伯努利梁理论并结合连续性原理推导连续体机器人等效刚度模型,并采用有限元仿真研究吸附单元关键结构参数对结构刚度影响作用规律。最后搭建了柔性检测连续体机器人的样机平台并以末端挠度为刚度评价标准,通过实验对所提的变刚度方案和所建模型的正确性进行验证。

1 连续体机器人结构设计

考虑到现有连续体机器人结构的高柔顺性与低刚度之间的矛盾问题,本文设计了一种绳驱动可吸附柔性检测连续体机器人,如图1所示,能够通过主动吸附在外界环境实现结构锁定以提升自身刚度与末端稳定性。

其中连续体机器人本体由多个十字交错榫卯连接盘与可吸附单元串联组成,如图1(b)所示,相邻两个连接盘的榫卯关节间采用镍钛合金丝作为支撑,减少了结构扭转变形和轴向压缩对弯曲精度的影响。连接盘的上下两侧各具有两个斜面,其上侧斜面与上方连接盘的下侧斜面形成夹角,使得连续体机器人可以自由弯曲。每个弯曲模块由3个十字交错榫卯连接的连接盘构成,具备两个自由度可以实现空间方向的自由弯曲。吸附单元结构与榫卯连接盘相似,可以根据实际需要自由嵌入到任意相邻两个连接盘之间,其四周各分布一个吸盘,用来主动吸附周围环境,通过实现自身结构锁定以提升负载能力。榫卯连接盘和吸附单元的内外径均为12和22 mm。榫卯连接盘高度为8 mm,吸附单元高度为16.5 mm,支撑骨架采用直径为0.8 mm的镍钛合金丝制造。考虑到

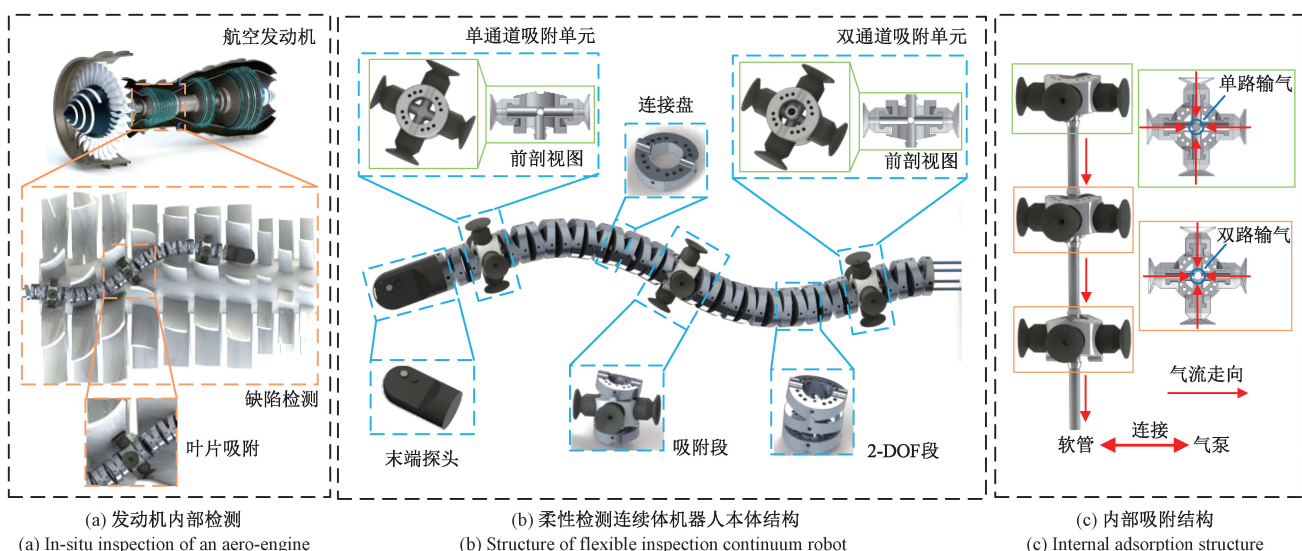


图1 可吸附连续体机器人结构设计

Fig. 1 Structural design diagram of an adsorbable continuum robot

连续体内部空间有限,该连续体的内部吸附系统采用分段串联式设计,如图1(c)所示,即通过多段通气软管将各吸附单元内部上下通气孔串联,以同时实现对多个吸附单元的吸附控制。吸附单元主要分为单双道两种吸附结构,单元内部采取立体空心十字管道设计,十字管道四周连接吸附单元四周的吸盘抽气口,轴向端口用于抽气软管的连接。为保证吸附系统的有效性,连续体末端吸附单元采用单通道吸附结构,其下通道口连接软管以实现吸盘内部气体的抽取,中部及底端吸附单元则采用双通道吸附结构,其上下通道口分别为上方吸附单元与自身提供气体输送,该气动回路通过抽吸负压改变自身的结构刚度以提升负载能力。连续体机器人由4根呈90°间隔均布的驱动绳索操控。绳索依次穿过连接盘与吸附单元上的线孔与丝杠上的滑块相连,伺服电机旋转带动丝杠滑块移动,从而改变驱动绳长的变化实现连续体的弯曲运动。

为研究所提的可吸附连续体机器人的弯曲性能和变刚度的有效性,下面通过 ANSYS 有限元对其进行仿真分析,其结果如图2所示。首先将连续体机器人底座固定,在其末端施加相同的负载,观察有无吸附单元的连续体变形情况,通过两者的末端挠度来评价其刚度能力的大小。

由图2可知,有无吸附单元的连续体在相同负载下时仍旧可以保持灵活的弯曲特性,但两者末端挠度有所不同,普通连续体的末端挠度为4.08 cm,可吸附连续体的末端挠度仅为2.9 cm,与之相比末端形变量明显减少。由此验证了所提的可吸附结构在不影响连续体弯曲性能的同时具有刚度调节能力,证明了所提可吸附连续体结构的正确性和有效性。

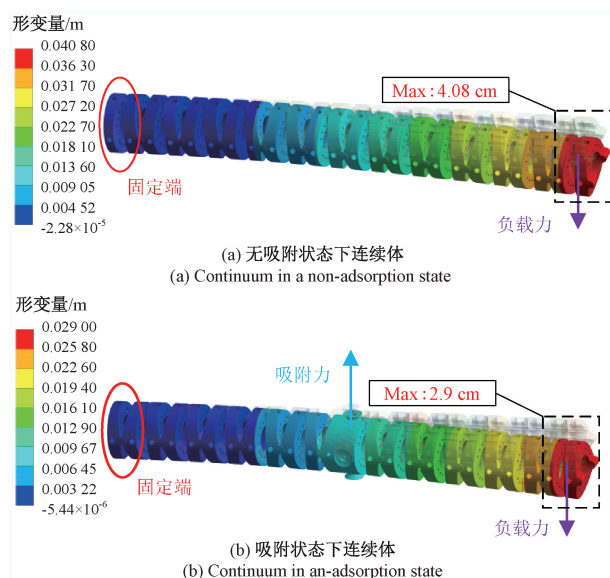


图2 有无吸附单元连续体机器人变形图

Fig. 2 Deformation diagram of continuum robot with and without adsorption unit

2 连续体机器人运动学分析

为便于描述连续体机器人的运动特性,本文在常曲率圆弧假设下基于几何分析法建立连续体机器人的运动学模型,研究其操作空间、关节空间及驱动空间的映射关系,如图3所示。

其中,驱动空间指机器人在运动过程中驱动绳长的变化量,关节空间指机器人运动时弯曲平面与XOZ平面

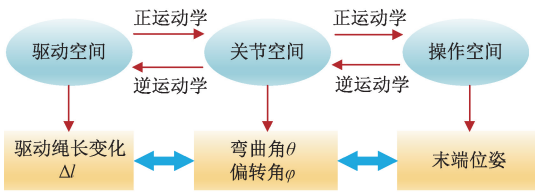


图3 连续体机器人运动学描述

Fig. 3 Kinematic description of continuum robots

之间的夹角 φ 与连续体中心线圆弧对应的角度 θ , 操作空间则指机器人的末端位姿。

2.1 关节空间与工作空间之间的映射关系

建立如图4所示的单节连续体几何模型, 坐标系 $\{O_0\}$ 的原点与基座圆盘中心重合, 坐标系 $\{O_1\}$ 的原点与末端连接盘中心重合, 其中, Z_0 和 Z_1 方向为连续体中心线的切线方向, X_0 和 X_1 指向导线圆盘第一个驱动丝通孔的方向, Y_0 和 Y_1 由右手定则确定。

假设连续体弯曲半径为 R , 绳孔到连续体中心的距离为 r , 根据弧长定理和余弦定理计算出柔性机械臂末端中心点 $S(x_1, y_1, z_1)$ 基于坐标系 $\{O_0\}$ 的坐标为:

$$S = \frac{L}{\theta} \begin{bmatrix} \cos \varphi (1 - \cos \theta) \\ \sin \varphi (1 - \cos \theta) \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T = \text{trans} \left(\frac{L}{\theta} \cos \varphi (1 - \cos \theta), \frac{L}{\theta} \sin \varphi (1 - \cos \theta), \frac{L}{\theta} \sin \theta \right) \text{rot}(z, \varphi) \text{rot}(y, \theta) \text{rot}(z, -\varphi) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos^2 \varphi \cos \theta + \sin^2 \varphi & \cos \varphi \sin \varphi \cos \theta - \cos \varphi \sin \varphi & \cos \varphi \sin \theta & (L/\theta) \cos \varphi (1 - \cos \theta) \\ \cos \varphi \sin \varphi \cos \theta - \cos \varphi \sin \varphi & \sin^2 \varphi \cos \theta + \cos^2 \varphi & \sin \varphi \sin \theta & (L/\theta) \sin \varphi (1 - \cos \theta) \\ -\cos \varphi \sin \theta & -\sin \varphi \sin \theta & \cos \theta & (L/\theta) \sin \varphi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: rot 为旋转函数。

2.2 关节空间与驱动空间之间的映射关系

连续体机器人与传统机器人不同, 它通过驱动绳长的变化实现自身的弯曲运动。在正运动学模型的基础之上, 对机器人关节空间到驱动空间的映射关系进行建模, 可通过已知的偏转角度和弯曲角度求解出各关节的驱动绳长度的变化量。

基于常曲率模型的假设: 驱动绳始终垂直于连接盘且具有恒等曲率, 驱动绳长度几何示意图如图5所示。

根据前面建立的正运动学模型, 如式(1)所示, 连续体末端位姿可表示为:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{L}{\theta} \cos \varphi (1 - \cos \theta) \\ y_1 = \frac{L}{\theta} \sin \varphi (1 - \cos \theta) \\ z_1 = \frac{L}{\theta} \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

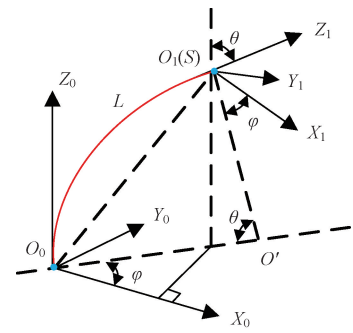


图4 连续体机器人几何模型

Fig. 4 Geometric model of continuum robots

其中, L 为单节连续体机器人长度, φ 为连续体偏转角度, θ 为连续体弯曲角度。

下面通过欧拉变换原理推导机器人关节空间到工作空间的映射矩阵, 首先将坐标系 $\{O_0\}$ 沿 O_0O_1 平移, 即:

$$\text{trans} \left(\frac{L}{\theta} \cos \varphi (1 - \cos \theta), \frac{L}{\theta} \sin \varphi (1 - \cos \theta), \frac{L}{\theta} \sin \theta \right) \quad (2)$$

式中: trans 为平移函数; $\theta \in [0, \pi/2]$; $\varphi \in [0, 2\pi]$ 。

绕 Z_0 轴旋转角度 φ , 再绕轴 Y_0 旋转角度 θ , 然后绕 Z_0 轴旋转角度 $-\varphi$ 。将上述变换连乘即可得到单节连续体弯曲单元末端坐标系与初始坐标系间的齐次变换矩阵, 即:

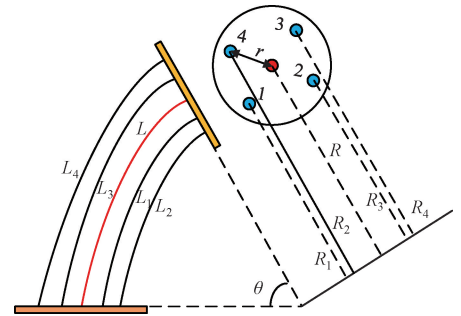


图5 驱动绳长几何示意图

Fig. 5 Geometric diagram of driving cable length

结合式(3)和(4)可得:

$$\begin{cases} \varphi = \arctan \left(\frac{y_1}{x_1} \right) \\ \theta = 2 \arctan \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{z_1} \end{cases} \quad (5)$$

根据几何关系可以求出各绳长变化量为:

$$\begin{cases} \Delta l_1 = L - l_1 = r\theta \cos \varphi \\ \Delta l_2 = L - l_2 = r\theta \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) \\ \Delta l_3 = L - l_3 = r\theta \cos (\varphi - \pi) \\ \Delta l_4 = L - l_4 = r\theta \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (6)$$

其中, Δl 为连续体弯曲关节各驱动绳变化量。

3 连续体机器人刚度模型构建

为分析连续体机器人的刚度性能,下面采用经典

Euler-Bernoulli 梁理论来构建连续体机器人的刚度模型,分析不同吸附参数(数量、位置、吸附强度)下连续体在横向负载作用下的挠度变化表达式。首先定义连续体机器人刚度为 K , 末端挠度 y_{tip} , 末端负载为 F , 其刚度可表示为:

$$K = \frac{F}{y_{\text{tip}}} \quad (7)$$

连续体机器人结构力学分析示意图如图6所示,连续体初始长度为 L , 但是由于吸附单元高度与普通连接盘存在高度差 ΔL , 将普通连接盘替换成吸附单元时存在初始长度的变化从而影响整体刚度变化。

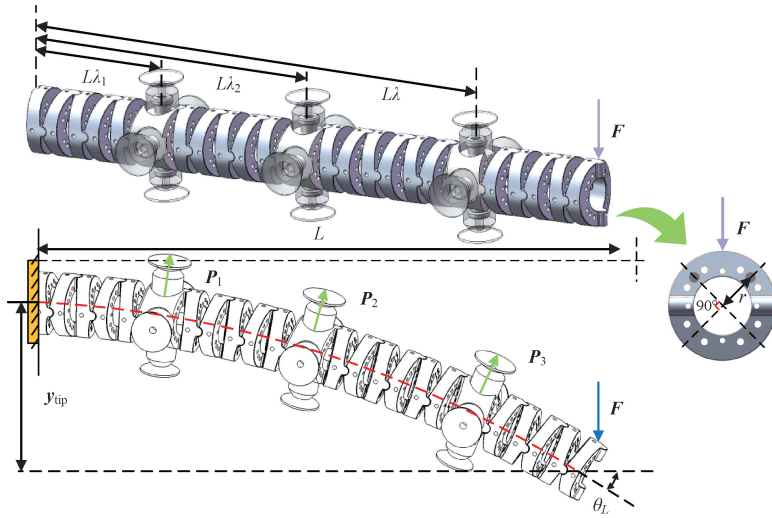


图6 连续体机器人结构力学分析示意图

Fig. 6 Diagram of structural mechanics analysis of the continuum robot

为了减小误差,嵌入 n 个吸附单元时,连续体长度表示为 $L_n = L + n \cdot \Delta L$. 设 $s = a$ 处为靠近自由端的吸附点位置。在该点处,吸附作用会为连续体提供一个与负载反向的反作用力 R , 从而阻碍连续体机器人的弯曲变形。此外,定义 F 为方向垂直向下的末端横向负载, P 为吸盘的吸附力, y_{tip} 为结构末端位移, λ 为末端吸附位置比 $\lambda = a/L_n$, θ_L 为连续体弯曲角。考虑到吸盘主要由超弹性橡胶材料制成,具有非线性弹性特征。在气压吸附作用下,随着真空度的增加,吸盘压缩量增大,其等效接触刚度 k_p 随之提升。为了便于建模,采用线性化公式近似描述吸附刚度与吸附力之间的正相关关系:

$$k_p(P) = k_0 + \gamma P \quad (8)$$

其中, k_0 为吸盘初始接触刚度(未抽气状态下接触刚度近似为0), γ 为基于实验标定的刚度增强系数(由吸盘材料和摩擦系数决定)。吸附点处反作用力与吸附刚度之间的关系可表示为:

$$k_p = \frac{R}{y(a)} \quad (9)$$

其中, $R \leq P$, $y(a)$ 为吸附点位移,即吸盘形变量,此处所受负载力越大则吸盘形变量越大,反作用力越大(力相互作用原理)。

首先,先构建单吸附状态下连续体的刚度模型,仅在 $s=a$ 处有1个吸附单元,为了求得挠度曲线,分段建立静态力矩平衡方程,即:

$$M(s) = \begin{cases} F(L_1 - s) - R(a - s), & 0 \leq s < a \\ F(L_1 - s), & a \leq s \leq L_1 \end{cases} \quad (10)$$

基于欧拉-伯努利方程,连续体机器人内部力矩可表示为:

$$EI \frac{d^2 y}{ds^2} = M(s) \quad (11)$$

式中: E 为连续体弹性模量; I 为截面惯性矩; y 为连续体横向位移量。

考虑到边界条件 $y_1(0)=0, \theta_1(0)=0, y_1(s), \theta_1(s)$ 在 $s=a$ 处连续性, 对 $M(s)$ 进行两次积分可得:

$$EIy(s) = \begin{cases} F\left(\frac{1}{2}L_1s^2 - \frac{1}{6}s^3\right) - R\left(\frac{1}{2}as^2 - \frac{1}{6}s^3\right), & 0 \leq s < a \\ F\left(\frac{1}{2}L_1s^2 - \frac{1}{6}s^3\right) - \frac{1}{2}Ra^2s + \frac{1}{6}Ra^3, & a \leq s \leq L_1 \end{cases} \quad (12)$$

根据式(12)可得, $s=L_1$ 时末端挠度 y_{tip} 可表示为:

$$y_{tip} = \frac{FL_1^3}{3EI} - \frac{Ra^2(3L_1 - a)}{6EI} \quad (13)$$

当 $s=a$ 时, 吸附点处挠度可表示为 $y(a)$, 即:

$$y(a) = \frac{Fa^2(3L_1 - a)}{6EI} - \frac{Ra^3}{3EI} \quad (14)$$

结合式(9)与(14)解得吸附点反作用力 R , 即:

$$R = F \cdot \frac{\frac{a^2(3L_1 - a)}{6EI}}{\frac{1}{k_p} + \frac{a^3}{3EI}} \quad (15)$$

定义无量参数 $K_0 = 3EI/L^3$ 为初始悬臂梁刚度, $\lambda = a/L_1$ 为吸附位置比, $\beta = 3EI/k_p L_1^3$ 为梁的抗弯刚度与吸附弹簧刚度的比值, K_n 与 $\xi_n = K_n/K_0$ 分别为 n 处吸附状态下的等效刚度与刚度增强比。

根据式(13)和(15), 末端挠度公式可表示为 y_{tip} :

$$y_{tip} = \frac{FL_1^3}{3EI} - F \cdot \frac{3\lambda^2 - \lambda^3}{2(\beta + \lambda^3)} \cdot \frac{\lambda^2 L_1^2 (3L - \lambda L_1)}{6EI} = \frac{FL_1^3}{3EI} \left[1 - \frac{(3\lambda^2 - \lambda^3)^2}{4(\beta + \lambda^3)} \right] \quad (16)$$

刚度公式 K_1 表示为:

$$K_1 = \frac{F}{y_{tip}} = \frac{3EI}{L_1^3(1 - \eta(\lambda, k_p))} = \left(\frac{L}{L + \Delta L} \right)^3 \cdot \frac{K_0}{1 - \eta(\lambda, k_p)} \quad (17)$$

其中, 吸附刚度增强系数项为 $\eta(\lambda, k_p)$:

$$\eta(\lambda, k_p) = \frac{(3\lambda^2 - \lambda^3)^2}{4(\beta + \lambda^3)} \quad (18)$$

刚度增强比可表示为:

$$\xi_1 = \left(\frac{L}{L + \Delta L} \right)^3 \cdot \frac{1}{1 - \eta(\lambda, k_p)} \quad (19)$$

同理当吸附数量 $n=2$ 时, 定义末端吸附位置比(靠近自由端)为 $\lambda_2 = \lambda$, 为了方便研究, 其余吸附位置采用均匀分布形式, 即 $\lambda_1 = 0.5\lambda$, 对应的反作用力分别为 R_1 、 R_2 。力矩方程 $M_2(s)$ 可表示为:

$$M_2(s) = \begin{cases} F(L_2 - s) - R_1(a_1 - s) - R_2(a_2 - s), & 0 \leq s < a_1 \\ F(L_2 - s) - R_2(a_2 - s), & a_1 \leq s < a_2 \\ F(L_2 - s), & a_2 \leq s \leq L_2 \end{cases} \quad (20)$$

基于欧拉-伯努利梁理论, 结合边界条件以及各分段点的连续性, 求得各吸附点的位移 $y(a_i)$ ($i=1, 2$) 与末端挠度 y_{tip} 。

$$y_{tip} = \frac{FL_2^3}{3EI} - \frac{R_1 a_1^2 (3L_2 - a_1)}{6EI} - \frac{R_2 a_2^2 (3L_2 - a_2)}{6EI} \quad (21)$$

基于经典梁理论, 联立式(9)进行推导, 可得出式(22), 为简化计算, 令 c_{ij} 表示在位置 a_j 施加单位力时在 a_i 处产生的柔度 $\delta_{Ri}(a_j)/R_i$, 并利用矩阵形式表达。

$$\begin{bmatrix} c_{11} + \frac{1}{k_p} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} + \frac{1}{k_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_{F_1} \\ \Delta_{F_2} \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中, Δ_{F_i} 是负载 F 在 a_i 处产生的挠度, 其中 δ 表示该点的受力位移量, 求解该线性方程组得 $R = [R_1, R_2]^T$, 将 R_1, R_2 求解结果代入式(21)中, 令 $s=L_2$ 即可求得末端挠度 y_{tip} 。

根据刚度与刚度增强比定义, 双吸附状态下连续体机器人的刚度增强比可表示为:

$$K_2 = \frac{F}{y_{tip}} = \frac{1}{\frac{L_2^3}{3EI} - \sum_{i=1}^2 \left(\frac{R_i}{F} \cdot \frac{a_i^2 (3L_2 - a_i)}{6EI} \right)} \quad (23)$$

由于模型基于线性弹性假设, 与式(15)所示相同, 各吸附点的反作用力 R_i 与末端外载荷 F 呈线性正相关。因此, 在刚度 K_2 的求解过程中, 载荷项 F 可被约去。这表明推导所得的等效刚度 K_2 是系统的固有属性, 仅取决于连续体的本体结构参数与吸附配置参数, 而与外载荷的大小无关。

基于上述推导思路, 当吸附数量为 n 时, 即建立 $n+1$ 段力矩方程并结合连续原理以及边界条件求解。刚度通式 K_n 与刚度增强比 ξ_n 可表示为:

$$K_n = \frac{F}{y_{tip}} = \frac{F}{\delta_{F, tip} - A^T (C_{beam} + K_{suc}^{-1})^{-1} \Delta_F} \quad (24)$$

$$\xi_n = \frac{K_n}{K_0} = \left(\frac{L}{L + n \cdot \Delta L} \right)^3 \cdot \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{F} \cdot \frac{a_i^2 (3L_n - a_i)}{2L_n^3}} \quad (25)$$

其中, $\delta_{F, tip} = FL^3/3EI$, $K_{suc} = \text{diag}(k_{p_1}, k_{p_2}, \dots, k_{p_n})$, C_{beam} 为梁各吸附点处的柔度矩阵, Δ_F 为外载荷 F 在各吸附点处产生的自由挠度量, A 为单位反力对末端位移

影响的系数向量,即:

$$\mathbf{A} = [a_1^2(3L_n - a_1), a_2^2(3L_n - a_2), \dots, a_n^2(3L_n - a_n)]^T \quad (26)$$

由于理论模型基于理想化假设构建,难以精确描述实际吸附接触界面的非线性力学行为及加工装配带来的不确定性。为获取准确的刚度增强系数 γ (表征吸附接触力学特性的关键参数),采用基于逆向问题的参数辨识策略,通过搭建连续体机器人变刚度实验平台,采集不同

吸附强度 $\mathbf{P}$ 及不同负载工况下的末端位移数据。将实验测得的平均等效刚度代入推导出的刚度理论模型,利用最小二乘法对参数 γ 进行拟合与标定,从而实现理论模型与物理样机的数值映射,然后根据计算得出的刚度增强系数 $\gamma=116.3$,令 $n=1,2,3$ 代入对应的刚度增强比表达式中即可得出吸附参数(数量,位置,吸附强度)与连续体结构刚度增强比之间的关系,其图形化表达如图7所示。

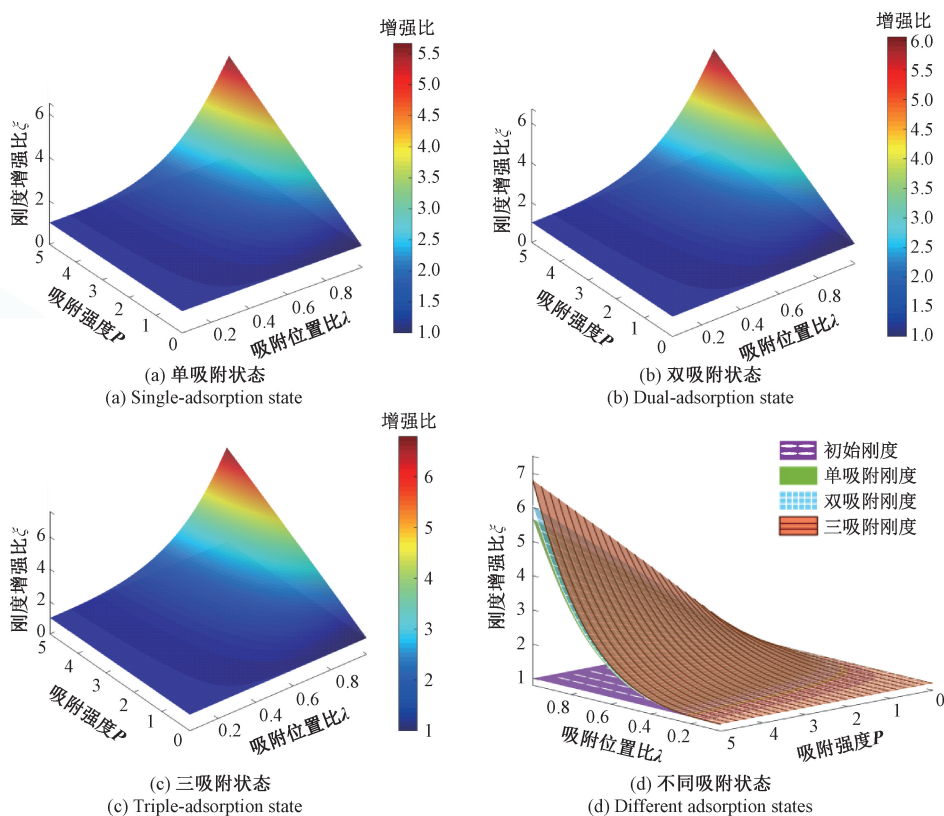


图7 刚度增强比随无量纲变量的变化规律示意图

Fig. 7 Diagram of the stiffness enhancement ratio versus the dimensionless variable

通过图7仿真结果可知,连续体机器人结构刚度主要由吸附数量、位置以及吸附强度决定,不同的吸附参数下,连续体刚度增强比也随之变化。其中,图7(a)~(c)分别描述了吸附数量为1~3个时连续体刚度变化情况。在空间分布上,随着无量纲位置参数 λ 趋近于1,吸附点趋近于连续体末端,刚度增强比呈现非线性增长趋势。这是由于越靠近末端,吸附反作用力产生的力臂效应越显著,对末端变形的抑制能力越强。在数量与强度方面,刚度增强比随着吸附强度 $\mathbf{P}$ 的增加呈单调递增。图7(d)的多组对比表明,随着吸附单元数量从 $n=1$ 增加至 $n=3$,刚度增强比的峰值显著提升。这验证了通过增加吸附单元数量并优化其末端布局,是提升连续体机器人变刚度性能的有效策略。

4 连续体结构有限元仿真及参数优化

为优化连续体机器人的结构布局参数,并进一步提升其变刚度性能,本节利用ANSYS有限元仿真软件对连续体机器人进行静力学分析,以末端挠度为评价标准,分别研究不同吸附位置、强度及数量3个关键参数对结构刚度的影响规律,并结合前面所建刚度模型对连续体机器人结构布局参数进行优化,确定最佳结构参数,以实现变刚度效率的最大化。

4.1 关键吸附参数对刚度性能的影响

为研究各关键吸附参数对刚度性能的影响,基于单一变量原则对连续体机器人进行静力学仿真,在保

证单一吸附参数变量的情况下,各组仿真设定统一的边界条件:将连续体底座单元设为固定约束;在自由端施加沿 Z 轴正向的负载力(范围 2~6 N,步长 1 N),同时在吸附单元处施加与负载方向相反的吸附力,为了直观评估各参数对结构变形的抑制效果,选取末端负载为 5 N 的工况,分别对 3 种单一变量条件下的连续体进行仿真分析。

1) 吸附位置对刚度性能的影响

首先,研究吸附单元分布位置对刚度的调节作用。以嵌入单个吸附单元的连续体为例,定义“吸附位置比”为吸附点距固定端的距离与总长的比值。在保持吸附强度和负载不变的前提下,分别选取 0、1/4、1/2、3/4、1 这 5 个位置比进行仿真分析(靠近基座的第一个连接盘记作 0),其变形云图如图 8 所示。

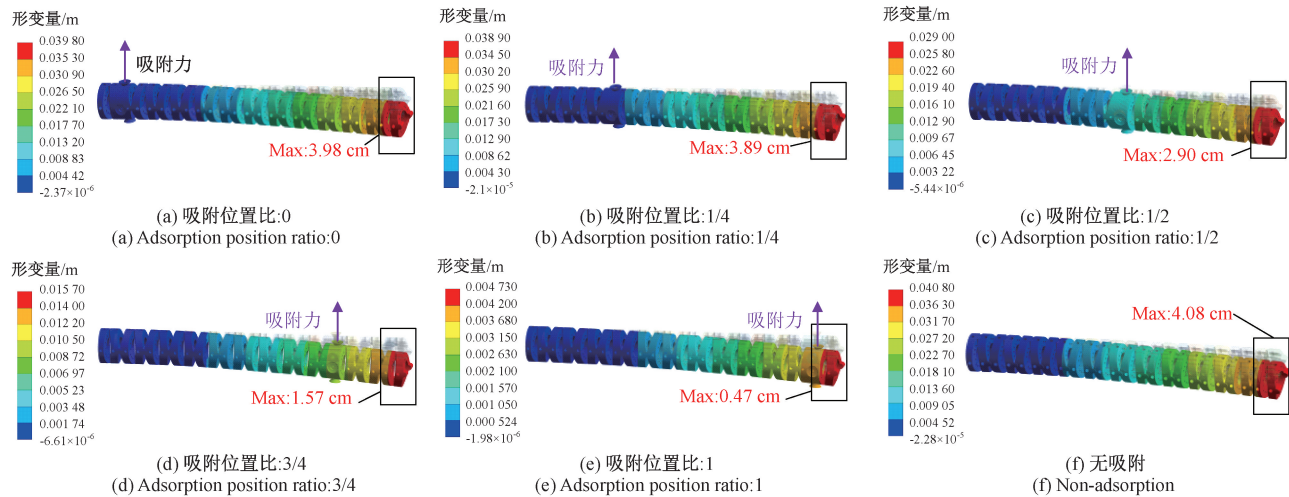


图 8 不同吸附位置比下的连续体机器人静力学分析

Fig. 8 Static analysis of the continuum robot under different adsorption positions

由图 8 可知,随着吸附单元向自由端移动(位置比增大),连续体末端位移显著减小。数据显示,位移量由无吸附时的 4.08 cm 降至末端吸附时的 0.47 cm。这直观表明,吸附单元越靠近自由端,力臂越长,对弯曲变形的抑制作用越明显,连续体刚度性能更佳。

2) 吸附强度对刚度性能的影响

其次,探究吸附强度对刚度性能的影响规律,保持吸附位置与数量不变,仍以中间嵌入一个吸附单元为例,将吸附力从 1 N 逐渐增至 5 N。仿真结果如图 9 所示。

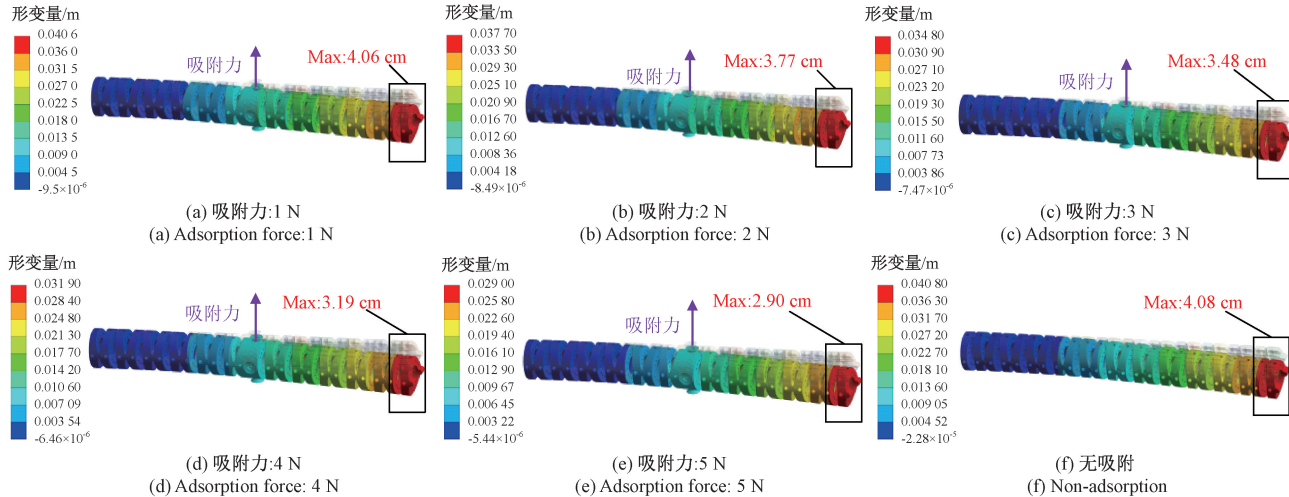


图 9 不同吸附强度下连续体机器人静力学分析

Fig. 9 Static analysis of the continuum robot under different adsorption strengths

由图 9 可知,吸附强度的提升直接增强了结构的抗弯能力。在 5 N 负载下,随着吸附力增大,末端位移从 4.08 cm 逐渐收敛至 2.9 cm。云图显示,增强吸附力可以有效减小整体变形范围,但其对刚度的提升呈现非线性特征。

3) 吸附数量对刚度性能的影响

最后,研究吸附单元数量对整体结构刚度的影响,为避免因受力不对称产生的附加力矩,采用均匀分布方式依次配置 1~4 个吸附单元。设定单个吸附力为 1 N,在 5 N 末端负载下进行对比仿真,仿真结果如图 10 所示。

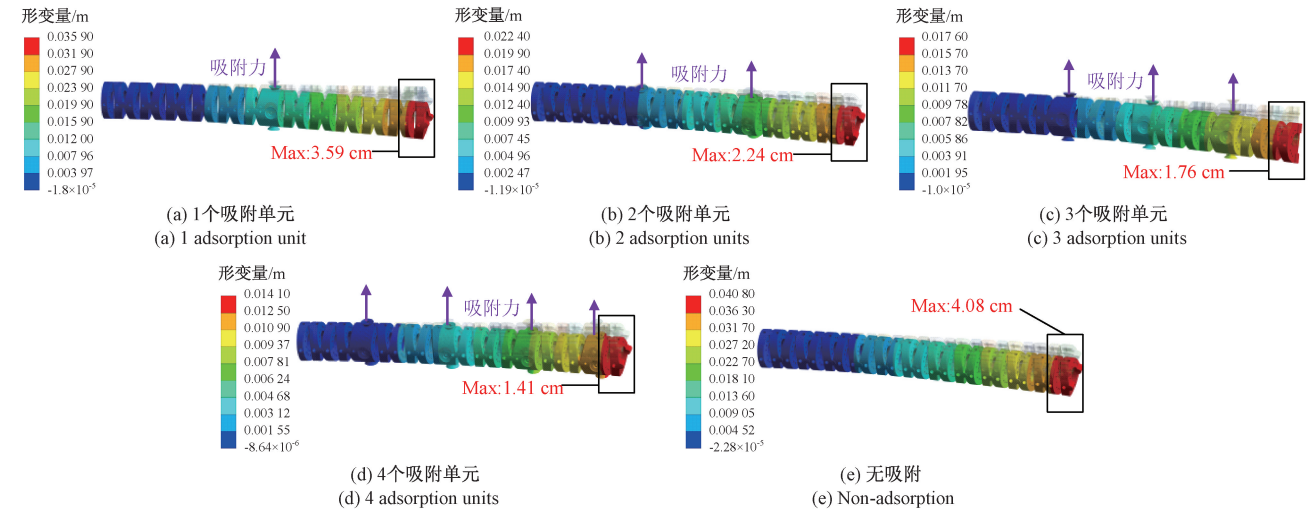


图 10 不同吸附数量下连续体机器人静力学分析

Fig. 10 Static analysis of the continuum robot under different numbers of active adsorption cups

由图 10 可知,增加吸附点数量能显著提升结构的整体刚度。随着数量增加,末端位移从柔性状态下的 4.08 cm 逐渐降低至 1.41 cm。多点吸附有效地分割了连续体的变形区间,限制了累积形变,显著提高了连续体的刚度与末端稳定性。

4.2 连续体机器人刚度特性规律及结构参数优化

在上述 3 个吸附参数分析的结果中,理论模型与有

限元分析结果变化趋势基本一致,理论模型能较好地预测连续体的结构刚度变化。为进一步量化吸附参数对刚度的具体影响规律,并在刚度收益与结构安全性之间寻找平衡点,对上述 3 组模型进行多负载(2~6 N)位移测试,得到各参数下的负载-位移特性曲线,如图 11 所示。

基于图 11 中 3 组数据曲线,对结构参数进行综合优化分析,在吸附位置参数方面,由图 11(a)可知,当吸附

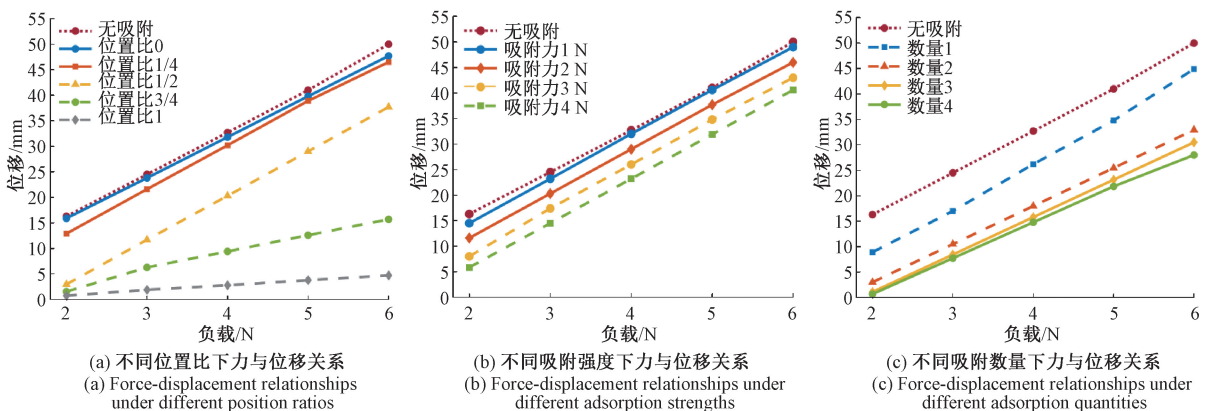


图 11 不同吸附参数下的连续体位移量与负载关系仿真曲线

Fig. 11 Simulated load-displacement curves under different adsorption parameters

位置比小于 1/4 时,末端位移曲线与无吸附状态重合度较高,即靠近固定端的吸附对刚度增强影响较小。随着位置比向 1 靠近,曲线斜率显著降低,刚度增大。因此,

应优先将吸附单元布置于靠近自由端区域。在吸附强度参数方面,由图 11(b)可知,吸附力增强确实能减小末端位移,但存在阈值。过低的吸附力无法提供足够的抗弯

刚度,而过高的吸附力不仅会导致连续体本体受压过度变形,还会降低系统的能耗效率。基于此标准,选取外载荷大小的 60% 作为最佳吸附强度标准,以在保证变刚度性能的同时避免结构损伤。在吸附数量参数方面,由图 11(c)可知,过多的吸附单元导致刚度收益递减。虽然吸附数量越多时,刚度越大,但当数量超过 3 个后,刚度提升幅度逐渐变缓。同时,过多的吸附点也会导致连续体内部出现过约束,在固定端及吸附点处产生较大的剪切力和弯矩,以致局部应力集中导致结构损坏。

综合考虑变刚度效率、结构内部应力安全以及系统复杂度,本研究最终采用 3 个吸附单元均匀分布,并设定吸附强度为负载力的 60%。该方案在最大化刚度调节范围的同时,有效缓解了局部应力过大带来的连续体结构损坏的问题,为后续的样机研制与实验验证提供了可靠的参数依据。

5 连续体机器人刚度性能的实验验证

5.1 样机及实验平台搭建

为验证所提连续体变刚度方法的正确性与有效性,搭建了如图 12 所示的连续体刚度性能测试平台。

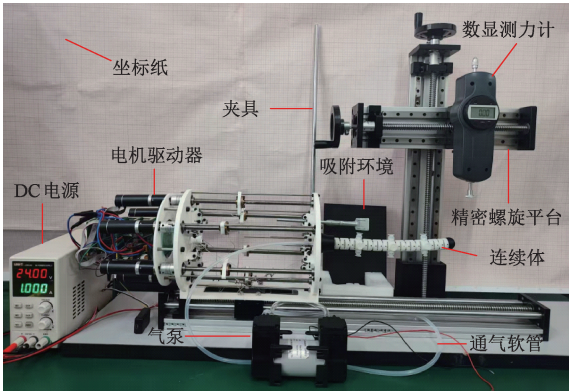


图 12 连续体机器人刚度性能测试实验平台
Fig. 12 Experimental platform for continuum robot stiffness performance testing

柔性检测机器人本体为 3D 打印技术制作的单节绳驱动连续体结构,主体材料为 PLA。连续体总长度为 200 mm,外径和内径分别为 22 和 12 mm。机器人采用两组对拉绳索驱动以实现弯曲变形,通过电机驱动装置配合丝杠传动系统实现绳索的收放控制。实验平台选用 24 V 的直流稳压电源为电机驱动模块与气压吸附系统供电。为实现连续体刚度调节,利用多节硅胶软管串联各吸附单元的气路接口并布置于连续体内部空腔内,末端软管连接至气泵以实现多个吸附单元对

周围环境的主动吸附,从而提高自身结构刚度与负载能力。此外,为了测试连续体刚度性能与负载能力,采用线性位移加载装置对连续体机器人末端施加外载荷,该装置主要由精密螺旋滑台、数显测力计及夹具组成。通过调节螺旋滑台驱动测力计产生精确的直线位移,对连续体末端施加负载,并利用坐标纸与测力计同步记录末端位移与负载数据,夹具则用于吸附环境的搭建。最终,以末端挠度为评价标准,对连续体刚度性能进行定量评估。

5.2 初始构型下末端负载与变形特性分析

为直观验证吸附机制对连续体刚度的增强效果,本实验采用对比测试法。在初始构型下,分别对有、无吸附单元的连续体进行刚度性能测试,如图 13 所示,通过末端挠度变化对连续体刚度性能与抗弯能力进行评估。

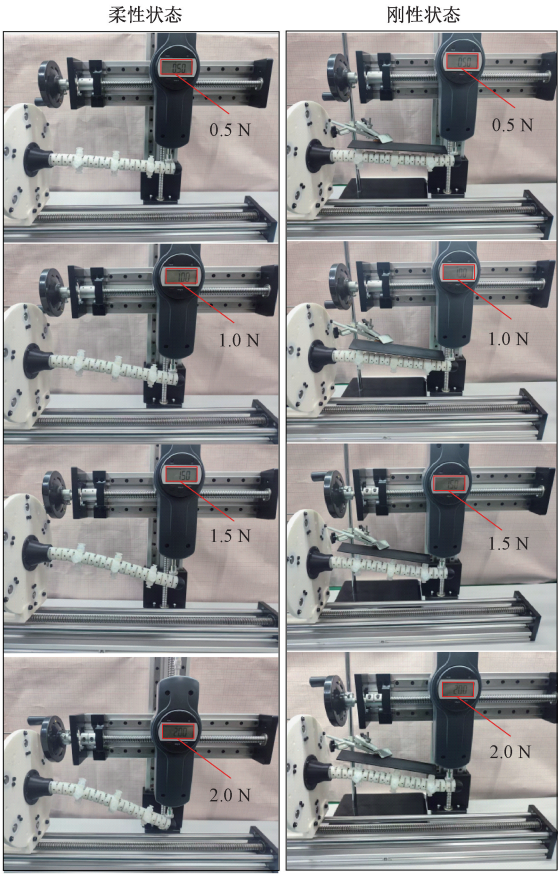


图 13 初始构型下连续体末端负载测试
Fig. 13 Tip load testing of the continuum robot in the initial configuration

首先,在机器人初始直线构型下进行负载-位移实验,将连续体机器人水平悬臂固定,分别在未吸附(柔性态)和完全吸附(刚性态)两种模式下,利用推拉力计

对末端施加 0.5、1.0、1.5 和 2.0 N 的横向载荷,并记录不同载荷下机器人的末端挠度值。通过对比两种状态下的力-位移曲线斜率,分析吸附机制对结构刚度的贡献。

通过对实验数据进行线性拟合,如图 14 所示,总体趋势表明,在相同载荷作用下,吸附状态下的末端挠度显著小于未吸附状态,当横向负载从 0.5 N 增至 2 N 时,柔性态机器人的末端挠度从 18.2 mm 增加至 60.5 mm,而开启吸附后,末端挠度变化范围仅为 7.5~23.4 mm,变形量减小了约 61.3%。

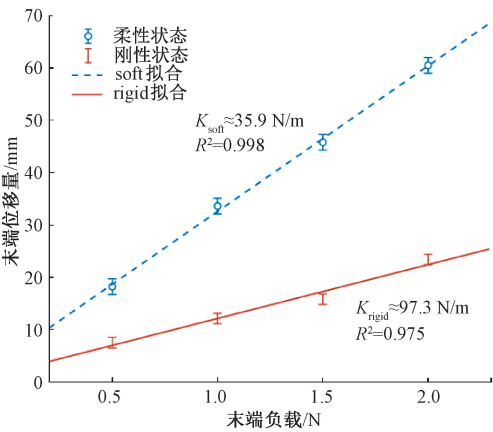


图 14 不同负载下末端位移线性拟合

Fig. 14 Linear fitting of tip displacement under different loads

实验结果表明,吸附机制使系统的抗弯能力显著增强,带有吸附单元的连续体在受力形变过程中可以保持更高的刚度,显著提高了结构的稳定性与可靠性。

5.3 多弯曲构型下负载能力对比测试

由于连续体机器人在实际作业中常处于弯曲姿态,为进一步探究其不同构型下的负载能力,本实验控制机器人依次达到 0°、30°、60° 和 90° 的预设弯曲角度,如图 15 所示。在保持弯曲构型不变的前提下,利用精密螺旋滑台驱动测力计推动机器人末端,设定目标位移量为 20 mm。分别记录有无吸附两种状态下,使末端产生该位移所需的外部负载力大小,由于连续体处于弯曲状态,结合实际作业情况,吸附方式采用侧面吸附。

由图 16 的实验结果可知,在吸附作用下,机器人即便处于大角度弯曲状态,仍能通过吸附周围环境提供显著的支撑力,从而在产生相同形变时表现出更高的负载能力与结构刚度。随着预设弯曲角度由 0° 增加至 90°,未吸附状态(柔性态)下的末端负载力从 0.61 N 增加至 1.09 N,而吸附状态(刚性态)下的负载力则始终保持显著优势,从 1.56 N 提升至 2.27 N。在初始直线构型下,

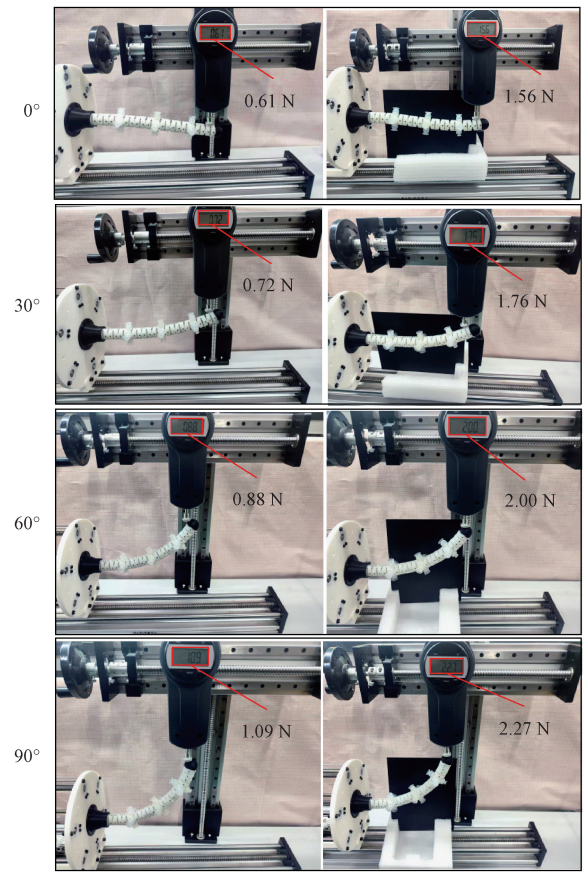


图 15 多弯曲构型下连续体负载能力测试

Fig. 15 Load capacity test under multi-bending configurations

刚性态负载能力约为柔性态的 2.6 倍;即使在 90° 的大变形工况下,吸附机制仍能将负载能力提升至柔性态的 2 倍左右。实验结果验证了该变刚度连续体机器人在多弯曲构型下仍具备优异的刚度增强性能,可以适应不同的操作环境与检测任务。

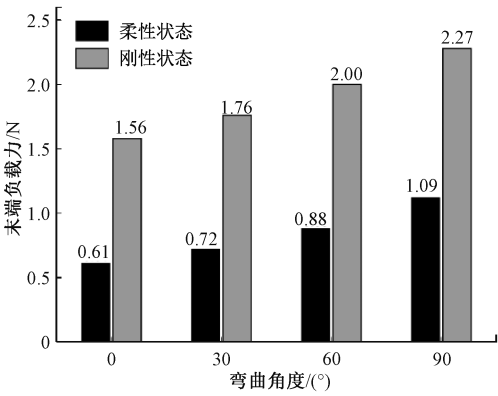


图 16 多弯曲构型下连续体负载能力变化

Fig. 16 Variation of load capacity under multi-bending configurations

5.4 连续体机器人刚度调节能力测试

连续体检测机器人在针对不同检测任务时需根据检测需求实时调节自身的结构刚度,为评估该连续体机器人的刚度调节的可控性,设计了基于吸附点数量的刚度分级调节测试,如图 17 所示。在基于初始直线构型的基础上,实验设置了吸附数量为 0、1、2、3 的 4 组吸附状态,在每种状态下,分别对末端施加 0.5、1.0、1.5 和 2.0 N 的恒定载荷,并记录对应的末端挠度变化。

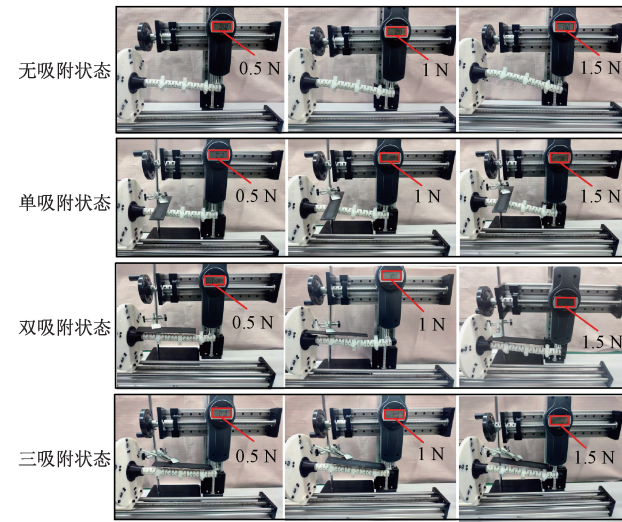


图 17 不同刚性状态下连续体末端负载测试

Fig. 17 Tip load testing of the continuum robot under different stiffness states

实验结果如图 18 所示,根据实验数据利用最小二乘法对不同载荷下连续体的力与位移数据进行线性拟合,如图 18(a) 所示,并结合刚度定义公式计算出不同吸附数量下连续体的等效平均刚度值。随后,绘制了吸附数量-刚度值关系曲线,如图 18(b) 所示,以定量分析吸附单元数量与整体结构刚度之间的映射关系。

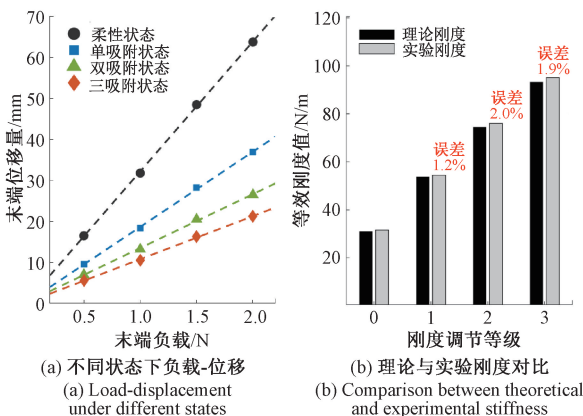


图 18 连续体机器人刚度调节能力

Fig. 18 Stiffness adjustment capability of continuum robots

由图 18 可知,随着吸附单元数量逐级增加,连续体机器人的等效刚度呈现出显著的线性增长趋势。结构刚度从初始柔性状态下的 31.1 N/m 逐步提升至完全吸附状态下的 93.3 N/m,实现了约 3 倍的刚度增益,且刚度变化呈现良好的线性度。在刚度调节过程中,不同刚性阶段下的平均相对刚度误差约为 1.6%。实验结果验证了可吸附连续体机器人在有较大刚度调节范围的同时,具备多级刚度调节能力,能够根据不同检测环境及任务需求实时调节自身结构刚度。

6 结 论

本文设计了一种可吸附变刚度柔性检测连续体机器人,对其进行了刚度模型的构建与有限元分析及结构布局参数的优化。与传统的连续体结构相比,本研究设计的可吸附连续体机器人针对不同操作环境及检测任务对结构刚度差异化的要求,能够通过主动吸附环境特征而改变自身结构刚度,从而适应复杂的非结构化环境与检测任务。本文的主要工作总结为:

- 1) 设计了一种绳驱动可吸附连续体机器人结构方案,在常曲率模型假设下基于几何分析法建立了运动学模型,分析其弯曲变形与结构参数之间的映射关系。
- 2) 以末端挠度作为连续体刚度的评价标准,基于欧拉-伯努利梁理论和连续性原理推导了连续体机器人等效刚度模型,分析不同吸附参数对末端挠度的影响作用规律,建立起吸附参数与刚度之间的数学模型。
- 3) 基于所建刚度模型,采用有限元对连续体结构刚度进行分析,进一步研究吸附参数对结构刚度的影响作用规律,得出了一种三点均匀吸附式的最佳结构布局参数,仿真结果验证了刚度模型的准确性以及所设计的变刚度结构方案的可行性和有效性,连续体机器人在保持高柔顺性的同时可以实现自身结构刚度的调节,大大提升了末端负载能力与稳定性。

4) 搭建了变刚度柔性检测连续体机器人实验平台,并通过多组实验对连续体刚度性能进行测试,结果表明:连续体机器人的等效抗弯刚度可由初始柔性状态下的 31.1 N/m 分级调节至完全吸附状态下的 93.3 N/m,在相同负载下,机器人末端变形量减小了 61.3%,实现了约 3 倍的刚度增益,由此验证了所提变刚度结构方案的正确性与有效性。

参考文献

[1] GAUTREAV E, BONNET X, LARIBI M A. Instrumented bio-inspired cable-driven compliant continuum robot: Static modeling and experimental evaluation [J]. Robotica, 2024, 42(9): 2924-2948.

[2] JOHNSTON G L H, SHIHORA N, SIMAAN N. A

- modal-space formulation for momentum observer contact estimation and effects of uncertainty for continuum robots[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2025, 44(14): 2265-2289.
- [3] 周盼,姚建涛,朱坤明,等. 基于 Cosserat 理论的仿生鱼骨连续型机器人静力学分析[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(10): 432-440.
- ZHOU P, YAO J T, ZHU K M, et al. Statics analysis of bioinspired fishbone continuum robot based on Cosserat theory [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(10): 432-440.
- [4] 齐飞,刘先军,葛奕玮,等. 基于 IMU 与分段多项式曲率模型的连续体机器人形状感知研究[J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(12): 204-214.
- QI F, LIU X J, GE Y W, et al. Research on shape perception for continuum robots based on IMU and piecewise polynomial curvature [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(12): 204-214.
- [5] 齐飞,葛奕玮,刘先军,等. 航空发动机叶片原位检测的可吸附连续体机器人运动建模及控制研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(10): 97-109.
- QI F, GE Y W, LIU X J, et al. Motion modeling and control study of an adsorbable continuum robot for in-situ inspection of aero-engine blades [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(10): 97-109.
- [6] HONG D, HUANG Y C, SHAO N F, et al. An ultra-high-aspect-ratio telescopic continuum robot design for aero-engine borescope inspection [J]. *Aerospace*, 2026, 13(3): 291.
- [7] 刘宜成,杨迦凌,梁斌,等. 基于强化学习的多段连续体机器人轨迹规划 [J]. *电子测量技术*, 2024, 47(5): 61-69.
- LIU Y CH, YANG J L, LIANG B, et al. Trajectory planning of multi-stage continuum robot based on reinforcement learning [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(5): 61-69.
- [8] ALANDOLI E A, FAN Y M, LIU D K. A review of extensible continuum robots: Mechanical structure, actuation methods, stiffness variability, and control methods [J]. *Robotica*, 2024, 43(2): 764-791.
- [9] CHEN G, WU Y T, ZHANG ZH X, et al. Design characteristics of continuum robots based on TSA variable stiffness method [J]. *Actuators*, 2026, 15(3): 154.
- [10] WENG ZH X, SHA L S, CHEN Y F, et al. Design and implementation of a three-segment tendon-driven continuum robot with variable stiffness for manipulation in confined spaces [J]. *Biomimetics*, 2026, 11(2): 113.
- [11] CHEN G, WU Y T, ZHENG J X, et al. Research on the method of force-locking and variable stiffness for continuum robot with the spinal-like configuration [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2024, 46(10): 627.
- [12] LIN B T, SONG SH, WANG J L. Variable stiffness methods of flexible robots for minimally invasive surgery: A review [J]. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2024, 4(3): 100168.
- [13] 李军强,朱文正,姜与,等. 基于磁流变原理的变刚度驱动方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(3): 97-104.
- LI J Q, ZHU W ZH, JIANG Y, et al. Research on variable stiffness drive method based on magnetorheological principle [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(3): 97-104.
- [14] XING ZH G, WANG F X, JI Y M, et al. A structure for fast stiffness-variation and omnidirectional-steering continuum manipulator [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 6(2): 755-762.
- [15] MATTMANN M, BOEHLER Q, CHEN X ZH, et al. Shape memory polymer variable stiffness magnetic catheters with hybrid stiffness control [C]. 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2022: 6288-6294.
- [16] YE M F, GUO L, WANG AN, et al. Structural design of a multi-stage variable stiffness manipulator based on low-melting-point alloys [J]. *Technologies*, 2025, 13(8): 338.
- [17] XING ZH G, ZHANG Z Y, HUANG B, et al. A programmable anisotropic variable stiffness extensible continuum manipulator segment via friction clamping [J]. *Mechatronics*, 2026, 117:103511.
- [18] HARSONO E, YANG J, BHATTACHARYA S, et al. Design and analysis of a novel hybrid-driven continuum robot with variable stiffness [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 177:105067.
- [19] LIANG CH W, LIU J Y, LIN SH K, et al. 3D-Printed shape-memory polymer-based variable-stiffness origami actuator for multimodal soft continuum robots [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(29): 42233-42244.
- [20] WANG W, SHI J, WU K, et al. A motion-decoupled pneumatic rigid-flexible hybrid joint with independently-controlled variable stiffness for continuum robot [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2025, 38(1): 125.
- [21] 曹晟阁,于靖军,潘杰,等. 滚动接触柔性连续体机器人的设计与运动能力分析 [J]. *机械工程学报*,

- 2021, 57(19): 21-29.
- CAO SH G, YU J J, PAN J, et al. Design and moving capability analysis of a flexible continuum robot with rolling contact[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(19): 21-29.
- [22] CHOI J, AHN S H, KIM C, et al. Design of continuum robot with variable stiffness for gastrointestinal stenting using conformability factor[J]. IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics, 2020, 2(4): 529-532.
- [23] 陈国斌. 变刚度柔性关节机构的驱动调节控制优化[J]. 电子测量技术, 2019, 42(7): 144-148.
- CHEN G B. Optimization of driving and regulating control for flexible joint mechanism with variable stiffness[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(7): 144-148.
- [24] 周杰, 吴小勇, 汪从哲, 等. 面向畸形矫治的可重构线位移变刚度关节设计与特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12): 187-198.
- ZHOU J, WU X Y, WANG C ZH, et al. Design and characteristic research of a reconfigurable variable stiffness joint with linear displacement for deformity correction[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 187-198.
- [25] SHEN D H, ZHANG Q, HAN Y L, et al. Design and development of a continuum robot with switching-stiffness[J]. Soft Robotics, 2023, 10(5): 1015-1027.
- [26] FAN Y M, LIU D K, YE L. A novel continuum robot with stiffness variation capability using layer jamming: Design, modeling, and validation[J]. IEEE Access, 2022, 10: 130253-130263.
- [27] LUO X Y, SONG D ZH, ZHANG ZH Q, et al. A novel distal hybrid pneumatic/cable-driven continuum joint with variable stiffness capacity for flexible gastrointestinal endoscopy[J]. Advanced Intelligent Systems, 2023, 5(6): 202200403.
- [28] MA N. Design and modelling of a continuum robot with soft stiffness-adjustable elements for confined environments[J]. Authorea Preprints, 2022.
- [29] LI F, YANG H, YANG C, et al. A novel approach for tip tracking control of a horizontal tensegrity continuum robot with slack cables[J]. Nonlinear Dynamics, 2024, 112(22): 19999-20018.
- [30] 潘琪琪, 罗静静, 王富豪, 等. 切口式单孔腹腔镜连续体手术机器人构型设计和优化[J]. 机械工程学报, 2023, 59(23): 55-67.
- PAN Q Q, LUO J J, WANG F H, et al. Design and optimization of continuum robot configuration for single-port laparoscopic surgery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(23): 55-67.
- [31] KOLAH P M, KORAYEM M H. Dynamic modeling and guidance analysis of a ferromagnetic continuum robot with geometric discretization and base linear motion[J]. Engineering Research Express, 2025, 7(1): adaa51.

作者简介



齐飞(通信作者), 2013年于新乡学院获得学士学位, 2016年于江南大学获得硕士学位, 2019年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为常州大学副教授, 主要研究方向为绳驱动连续体机器人及柔性外肢体机器人。

E-mail: qifei224@cczu.edu.cn

Qi Fei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xinxiang College in 2013, his M. Sc. degree from Jiangnan University in 2016, his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2019. He is currently a lecturer at Changzhou University. His main research interests include continuum robots and flexible external limb robots.



束学道, 1991年于燕山大学获得学士学位, 2000年于燕山大学获得博士学位(硕博连读), 现为宁波大学教授, 主要研究方向为先进成形与制造技术。

E-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn

Shu Xuedao received his B. Sc. degree from Yanshan University in 1991, and his Ph. D. degree from Yanshan University in 2000. He is currently a professor at Ningbo University. His main research interests include advanced forming and manufacturing technology.