

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2413250

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*

齐飞,葛奕玮,刘先军,孙露,郑宏儒
(常州大学机械与轨道交通学院 常州 213000)

摘要:针对现有航空发动机叶片原位检测机器人柔顺性差、负载能力低及结构刚度不足的问题,设计了一种绳驱动可吸附连续体机器人,以解决连续体结构高柔性与低刚度间的矛盾。该机器人基于叶片环境特征及章鱼触手吸附机理,由多节卯榫柔性关节与气压吸附单元串联构成,通过主动吸附增强结构刚度并防止变形失稳。基于改进的D-H法和欧拉变换原理建立运动学模型,分析其弯曲变形与结构参数间的映射关系,并通过有限元ANSYS对结构刚度和变形特性进行分析。实验平台验证了所建运动模型及控制性能,结果表明,机器人最大负载达4.42 N,且在相同负载下末端位置偏差较传统连续体结构分别降低78%和57.5%,由此验证了所提可吸附连续体结构及所建模型的正确性和有效性。

关键词:连续体机器人;航空发动机叶片检测;运动建模;吸附机构

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

Motion modeling and control study of an adsorbable continuum robot for in-situ inspection of aero-engine blades

Qi Fei, Ge Yiwei, Liu Xianjun, Sun Lu, Zheng Hongru

(School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213000, China)

Abstract: To address the problems of poor flexibility, low load capacity, and insufficient structural rigidity of the existing in-situ inspection robots for aero-engine blades, a rope-driven adsorbable continuum robot is designed to solve the contradiction between high flexibility and low rigidity of the continuum structure. Based on the characteristics of the leaf environment and the mechanism of octopus tentacle adsorption, the robot consists of multiple mortise-and-tenon flexible joints connected in series with pneumatic pressure adsorption units, which enhances the structural stiffness and prevents deformation and destabilization through active adsorption. The kinematic model is formulated based on the improved D-H method and the Euler transformation principle. The mapping relationship between its bending deformation and structural parameters is analyzed. The structural stiffness and deformation characteristics are analyzed by using finite element ANSYS. The experimental platform evaluates the proposed kinematic model and control performance. Compared with the traditional continuum structure, the results show that the maximum load of the robot reaches 4.42 N, and the end position deviation under the same load is reduced by 78% and 57.5%, respectively. Thus, the correctness and validity of the proposed adsorbable continuum structure and the proposed model are verified.

Keywords: continuum robot; aero-engine blade inspection; motion modeling; adsorption mechanism

0 引言

航空发动机在工作过程中处于高压振动和高温环境,同时叶片还需承受热腐蚀、高温氧化和机械摩擦等多

种作用,导致其工作环境极其恶劣,安全性和可靠性降低。叶片在交变、扭转应力频率及幅度变化剧烈的情况下持续高速运转,加之频繁地起停和长时间连续工作,严重缩短了叶片的使用寿命。因此,对航空发动机叶片的检测和维护尤为重要。但目前在狭小约束环境(如燃烧

收稿日期:2024-09-04 Received Date: 2024-09-04

* 基金项目:国家自然科学基金项目(52305092)、江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX24_3219)资助

室)中通过检查口并使用末端执行器进行多轴运动操作仍具有较大挑战性^[1]。

目前,国内外针对航空发动机叶片原位检测机器人已有一些研究。如 Wang 等^[2-3]设计了一种由接合单元组成的新型超细连续机器人,以在受限环境执行维修操作所需的配置形状等作业任务,但其刚度有限,难以满足不同任务对末端负载的差异化需求。Ma 等^[4-5]采用了一种新型的变刚度连续机器人结构方案,连续体采用具有可调刚度的模块部分,能够将其直径膨胀十倍,为机器人操作部分提供物理支持,提高结构刚度和负载能力,但其膨胀缓慢且体积过大,难以应付较为空旷或存在尖锐物品的环境。Xie 等^[6]设计了一种集成了液态金属电子电路的仿章鱼手臂,能够与被检测环境进行接触、感知、抓握和交互,但其末端章鱼抓手灵活性一般,难以胜任多角度、高负载的检测任务。Tang 等^[7]设计了一种智能材料驱动的手机管道检测机器人,但仅适用于直径较小和曲率较大的管道环境。Yang 等^[8-9]设计了一种细长且柔顺的超冗余连续体机器人结构,并开发了一种基于轴承的连续体机器人系统,以克服扭转和屈曲产生的摩擦,但其在轻量化设计上仍需完善。王尧尧等^[10-11]设计了一种仿生机械臂,采用弹性的柔性支柱作为支撑结构,具有保持机械臂整体形状和提供弯曲运动刚度的作用,但其刚度十分有限,不能够胜任末端需要较大负载能力的任务。此外,关于检测机器人的结构设计^[12-16]、运动学建模^[17-20]以及运动控制^[21-23]的研究已有所积累,但仍无法满足叶片原位检测的需求。

为此,本文设计了一种新型的航空发动机叶片原位检测连续体机器人,并对其进行运动建模和控制研究。设计了一种可吸附绳驱动连续体结构方案,并对其进行有限元分析,以验证结构的有效性和可行性。建立了可吸附连续体机器人的运动学模型,并对其工作空间及运动特性进行仿真分析。最后通过机器人运动控制实验对其结构方案、所建模型及负载能力等进行分析,所提出的可吸附连续体结构能够扩大其工作空间,增加其工作刚度,在保持连续体灵活度的同时提高其末端负载,能够有效弥补连续体轴向刚度需求与运动柔顺性之间的矛盾。

1 连续体机器人结构设计

1.1 可吸附连续体机器人结构

为实现对航空发动机内部叶片的原位检测,设计了一种可吸附绳驱动连续体检测机器人,其结构如图 1 所示。该机器人采用具有特定斜率的球铰关节组装而成,每个柔性关节具有 4 个斜面(见图 1(a)),其上侧斜面与上方柔性关节的下侧斜面形成夹角,使得连续体可以灵活弯曲变形。夹角的大小由燃烧室的间隔距离及其曲率

决定。可吸附单元与普通柔性关节类似,拥有 4 个斜面,以便与普通柔性关节无缝连接(见图 1(b)),从而使连续体的弯曲更加柔顺灵活。每个可吸附单元的四周放置 4 个硅胶吸盘,用于主动吸附周围环境,从而提高连续体的结构刚度和末端负载能力。模块化的可吸附单元嵌入到连续体主体的 2 个柔性关节之间(见图 1(c))。相邻 2 个柔性关节通过 NiTi 合金柱紧固连接,一段连续体的首末端通过快接柔性关节与另一段连接。每段连续体的有 4 根驱动绳索,间隔 90°分布,驱动线穿过连续体柔性关节和可吸附单元上的穿线孔,最终连接到驱动电机转轴上。可吸附单元下端的软管快速接头连接到气泵上,以实现连续体的刚度可控和末端负载的提升。

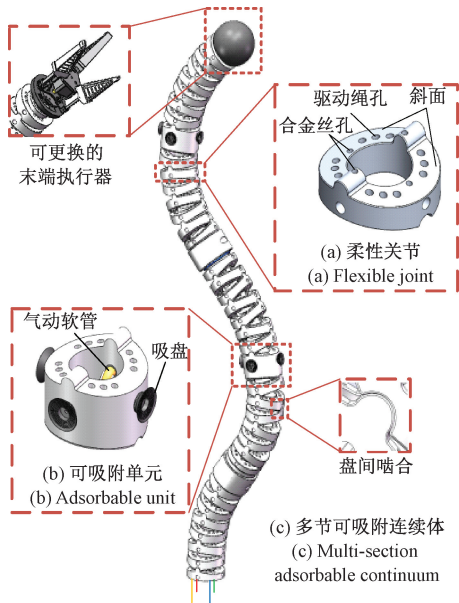


图 1 连续体机器人结构

Fig. 1 Structure of continuum robot

可吸附连续体检测机器人的主要技术指标如表 1 所示,柔性关节材料使用 SLA 光敏树脂,通用 3D 打印技术制作,气动吸盘为硅胶材质。

表 1 连续体机器人主要技术指标

Table 1 Main technical specifications of continuum robots

连续体机器人	普通柔性关节	可吸附单元
质量/g	0.87	3.05
长度/mm	8	16.5
外径/mm	22.5	22.5
内径/mm	12	12
弯曲性能/(°)	±22.5	±22.5
支撑骨架/mm	NiTi 合金丝/0.8	
驱动肌腱/mm	尼龙覆盖的不锈钢丝/0.4	

1.2 可吸附连续体有限元分析

所设计的连续体结构由绳索进行驱动,为直观展示无可吸附单元和有可吸附单元两种情况下的性能差异,通过有限元 ANSYS 软件进行对比分析,其结果如图 2 所示。首先将连续体机器人基座固定,其末端施加不同的负载力,然后通过应力有限元分析,得到了 2 种情况下柔性单元啮合处的应力和变形图(应力云图)。在比较两种情况的优劣时,保持连续体柔性单元的材料和尺寸参数一致。

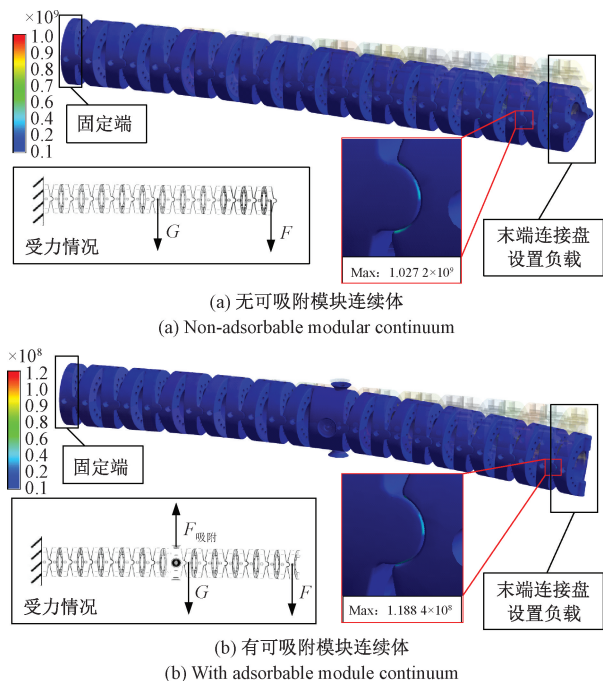


图 2 有无可吸附单元应力云图

Fig. 2 Stress cloud with and without adsorption unit

由图 2 结果可知,在相同条件下(柔性单元尺寸参数、末端施加的外力大小等),可吸附单元的弯曲角度(曲率和末端位移)与无可吸附弯曲单元基本一致。但具有可吸附单元的连续体段其各部位所受的应力值更小,内部最大应力值比无可吸附单元的小了一个数量级,能够有效降低连续体结构因应力集中而发生突然断裂的可能。

此外,对可吸附连续体结构和无吸附单元的连续体结构进行弯曲变形仿真分析。通过对比变形图(如图 3 所示)可知,无可吸附单元的连续体最大变形量为 4.262 3 mm,而有可吸附单元的连续体最大变形量为 2.789 1 mm,相比其变形量减少了近一半。实验表明带有吸附模型的连续体结构能够有效减少结构不同负载力下的变形量,进一步证明了可吸附连续体结构具有较高的结构刚度和负载能力。

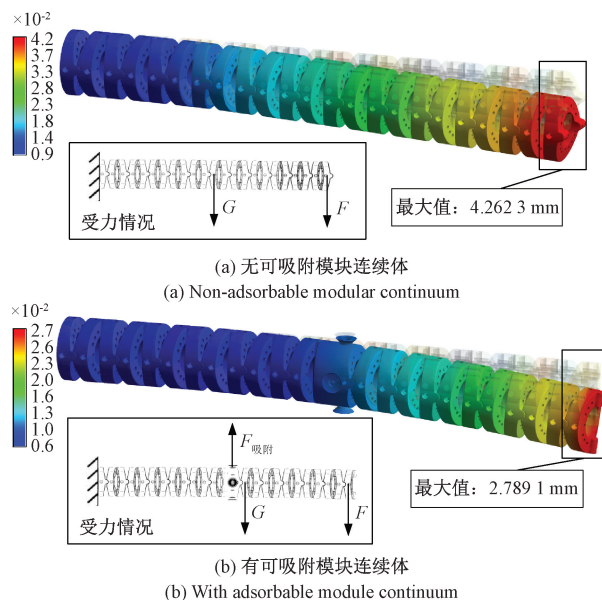


图 3 有无可吸附单元变形图

Fig. 3 Deformation diagram with and without adsorption unit

2 机器人运动学分析

为了便于描述连续体机器人的运动特性,本文将采用改进后的 D-H 法和欧拉变换原理对所提的可吸附连续体机器人进行运动学建模分析,以研究其操作空间、关节空间及驱动空间的映射关系,从而为实现对机器人的运动控制奠定理论基础。

2.1 关节空间与工作空间之间的映射关系

可吸附连续体机器人的连杆坐标系搭建如图 4 所示,坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 与底部柔性关节重合,坐标系 $O_i-X_iY_iZ_i$ 依次与各柔性关节重合,平面 $X_iO_iY_i$ 与柔性关节底面重合,其中 x_i 轴指向柔性关节第 1 个合金丝孔方向, y_i 轴垂直于 x_i 轴, z_i 轴垂直于平面 $X_iO_iY_i$ 指向下一个柔性关节。

机器人关节空间到操作空间的映射矩阵可通过欧拉变换求出从坐标系 $O_{i-1}-X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ 到坐标系 $O_i-X_iY_iZ_i$ 的齐次变换矩阵 ${}^{i-1}_iT$ 。推导涉及以下 4 个变换步骤:

绕 Z_{i-1} 轴旋转 θ_i :

$$R_z(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

沿 Z_{i-1} 轴位移 d_i :

$$D_z(d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

沿 X_i 轴位移 a_i :

$$D_x(a_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

绕 X_i 轴旋转 α_i :

$$R_x(\alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

将以上4个基本变换矩阵按照顺序相乘,得到相邻坐标系间的齐次变换矩阵 ${}^{i-1}_i T$:

$$T_i = R_z(\theta_i) \cdot D_z(d_i) \cdot D_x(a_i) \cdot R_x(\alpha_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

普通柔性关节之间的坐标系转换关系如图4(a)所示,可吸附单元与普通柔性关节之间的坐标系建立如图4(b)所示,底座柔性关节的坐标系搭建如图4(c)所示。

根据建立的机器人连杆坐标系及各坐标系间的位置关系,得到了可吸附连续体机器人的D-H参数,如表2所示。其中: l_{connect} 表示普通柔性关节间的距离, l_{absorb} 表示可吸附单元与下一个柔性关节间的距离, s 和 c 分别为正弦函数 $\sin$ 和余弦函数 $\cos$ 的缩写。

表2 连续体机器人D-H参数表

Table 2 Parameters of continuum robot D-H

i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	l_{connect}	0	0	θ_1
2	l_{connect}	0	0	θ_2
3	l_{connect}	0	0	θ_3
4	l_{connect}	0	0	θ_4
5	l_{absorb}	$-\pi/2$	0	θ_5
6	l_{connect}	$\pi/2$	0	θ_6
7	l_{connect}	0	0	θ_7
8	l_{connect}	0	0	θ_8
9	l_{connect}	0	0	θ_9

将每一组D-H参数带入到相邻连杆坐标系间的齐次变换矩阵中(式(5)),即可得到相邻坐标系间的齐次变换矩阵。

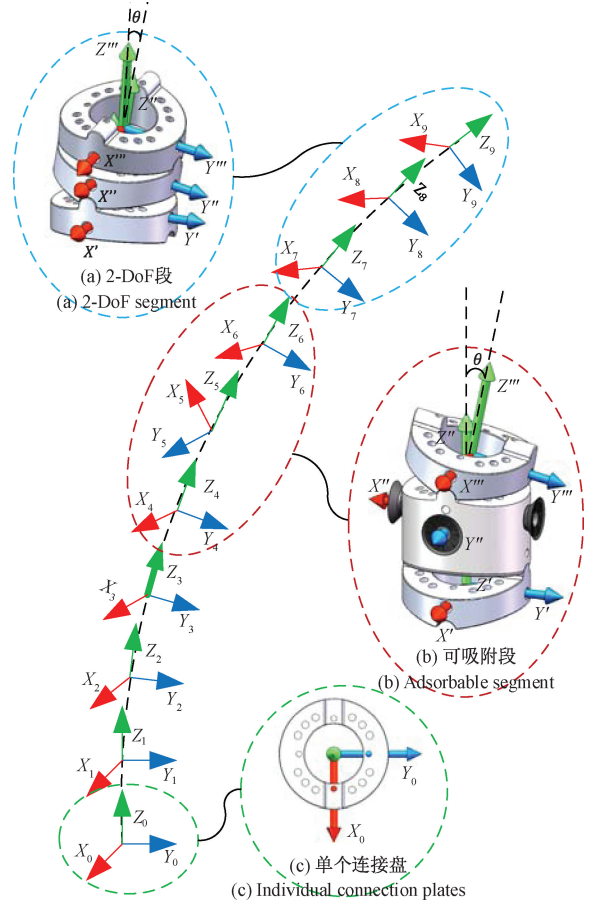


图4 可吸附连续体机器人连杆坐标系搭建

Fig. 4 Adsorbable continuum robot linkage coordinate system construction

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & l_{\text{connect}} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & l_{\text{connect}} \sin \theta_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^4_5 T = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & l_{\text{absorb}} \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & l_{\text{absorb}} \sin \theta_5 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^5_6 T = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & 0 & \sin \theta_6 & l_{\text{connect}} \cos \theta_6 \\ \sin \theta_6 & 0 & -\cos \theta_6 & l_{\text{connect}} \sin \theta_6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, T 表示相邻坐标系的齐次变换矩阵,如 ${}^4_5 T$ 表示坐标系 $O_4-X_4Y_4Z_4$ 到坐标系 $O_5-X_5Y_5Z_5$ 的变换矩阵, $i=1,2,3,4,7,8,9$ 为机器人各个连杆坐标系编号。

因此,单个可吸附单元的变换矩阵为:

$${}^3_6 T = {}^3_4 T {}^4_5 T {}^5_6 T \quad (9)$$

则由单个可吸附单元与 n 个弯曲单元构成的连续体检测机器人的齐次变换矩阵为:

$$\mathbf{T}_{\text{section}} = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{T}_2^1 & \mathbf{T}_3^2 & \mathbf{T}_4^3 & \mathbf{T}_5^4 & \mathbf{T}_6^5 & \mathbf{T}_7^6 & \mathbf{T}_8^7 & \mathbf{T}_9^8 & \mathbf{T}_{10}^9 \end{pmatrix}^{\frac{n}{3}-m} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{T}_{\text{section}}$ 表示单节可吸附连续体机器人的齐次变换矩阵。

则得到 3 节可吸附连续体机器人的变换矩阵,即为连续体机器人关节空间向操作空间间的映射模型。

$$\mathbf{T}_{\text{Total}} = \mathbf{T}_{\text{section1}} \mathbf{T}_{\text{section2}} \mathbf{T}_{\text{section3}} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{T}_{\text{Total}}$ 表示整个连续体机器人的变换矩阵; $\mathbf{T}_{\text{section}i}$ 表示第 i 节可吸附连续体机器人的齐次变换矩阵。

在连续体机器人中各柔性单元的弯曲角度往往呈现“先增大后减小”的非线性分布,中间部分的弯曲角度较大,首尾部分较小。这种布局主要由结构刚度分布、应力特性和控制策略所决定:中间部分的活动自由度较高且承受更大应力,因此弯曲角度更大;而两端因刚度较高,弯曲幅度受到限制。为了确保弯曲轨迹的平滑性和可控性,通常会通过控制策略优化弯曲角度的分布。

在机器人的运动学分析中,全局弯曲角度与各柔性单元间的弯曲角度呈非线性分布关系。具体而言,各柔性单元的弯曲角度在中间部分达到最大,而在首尾部分较小,整体呈现出类似正态分布的形态。

假设平均弯曲角度为 θ_{avg} ,中间部分的弯曲角度略大于 θ_{avg} ,达到 $\theta_{\text{max}} \approx 1.1\theta_{\text{avg}}$,而首尾部分的弯曲角度较小,约为 $\theta_{\text{min}} \approx 1.1\theta_{\text{avg}}$ 。这种分布确保了各柔性单元弯曲角度的累加精确等于全局弯曲角度 θ_{total} ,即:

$$\theta_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (12)$$

$$\theta_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n f(i) \cdot \theta_{\text{avg}} \quad (13)$$

其中, θ_i 是第 i 个柔性单元的弯曲角度,其分布形态可以通过一个标准化的高斯函数来描述:

$$\theta_i = \theta_{\text{avg}} \left(1 + \sigma \exp \left(-\frac{(i - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \right) \quad (14)$$

其中, μ 表示弯曲角度的峰值位置 (通常位于中间), σ 控制弯曲角度的分布宽度。通过归一化处理,确保所有柔性单元的弯曲角度总和等于 θ_{total} 。

2.2 驱动空间与关节空间之间的映射关系

为了精确描述这一过程,需要对机器人关节空间到驱动空间的映射关系进行建模。在绳牵引柔性机器人的建模中,弯曲关节是最基本的元素。机器人的总弯曲角度取决于关节的数量和每个关节的弯曲角度,假定每个关节的弯曲角度相同,则对于每个关节的弯曲,如图 5 所示,圆圈代表相邻两个柔性关节的旋转中心。

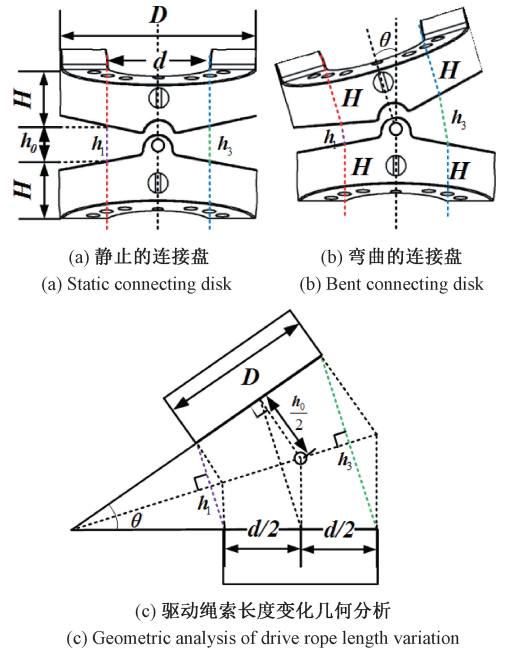


图 5 驱动绳索长度几何示意图

Fig. 5 Diagram of drive rope length geometry

驱动绳索长度的变化会影响机器人的弯曲形状。假设机器人有 N 个节点,在静止位置时,机器人内的驱动绳索长度如图 5(a) 所示,柔性关节内绳长设为 H ,相邻柔性关节之间的绳长设为 h ,当连续体机器人弯曲时,仅 h 发生变化, H 不变,如图 5(b) 所示。对于驱动绳长的变化,则可通过几何分析法计算得出,如图 5(c) 所示。对于 l_1 ,间隙距离减少到 h_1 ,而对于 l_3 ,间隙距离增加到 h_3 。设 l_{10} 和 l_{30} 分别为左右导线的初始长度。

当每个柔性单元弯曲时,弯曲单元间的间隙距离会发生变化 (如图 5(c)),而柔性单元内的驱动绳索长度保持不变。基于几何分析法,可以得出弯曲后的间隙距离如下:

$$\begin{cases} h_1 = h_0 + \left[d \cdot \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) - 2h_0 \cdot \sin^2 \left(\frac{\theta}{4} \right) \right] \\ h_3 = h_0 - \left[d \cdot \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) + 2h_0 \cdot \sin^2 \left(\frac{\theta}{4} \right) \right] \end{cases} \quad (15)$$

弯曲后的总线长度如下式所示:

$$\begin{cases} l_1 = l_0 + N \left[d \cdot \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) - 2h_0 \cdot \sin^2 \left(\frac{\theta}{4} \right) \right] \\ l_3 = l_0 - N \left[d \cdot \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) + 2h_0 \cdot \sin^2 \left(\frac{\theta}{4} \right) \right] \end{cases} \quad (16)$$

机器人的整体弯曲角度与驱动绳索长度有关,关系如下:

$$\theta_{\text{section}} = N \cdot \theta = 2N \cdot \arcsin \left[\frac{l_3 - l_1}{2N \cdot d} \right] \quad (17)$$

关节的最大弯曲角度受柔性关节参数 D 和 h_0 的约束。最大弯曲角度与柔性关节参数之间的关系如下:

$$\theta_{\max} = 2\arctan\left(\frac{h_0}{D}\right) \quad (18)$$

图6为机器人在任意方向上弯曲时的各驱动绳索投影的几何关系。 l_1 和 l_3 控制 Y 轴的弯曲,而 l_2 和 l_4 控制 X 轴的弯曲,通过控制驱动绳长变化实现机器人在任意方向上弯曲变形运动。

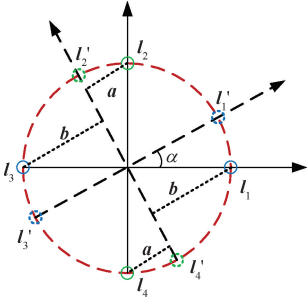


图6 机器人任意方向弯曲

Fig. 6 Robot bending in any direction

机器人弯曲后,其驱动绳索长度的变化与驱动绳孔到摆臂中轴面的距离成正比。当机器人弯曲角为 θ , 旋转角为 0 时,虽然机器人是通过 $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3, \Delta l_4$ 4 根驱动绳的变化而实现的弯曲变形,但实际上是由 $\Delta l_1, \Delta l_3$ 控制机器人的弯曲,而 $\Delta l_2, \Delta l_4$ 则位于中轴平面上,其长度不变,综合以上分析可得 4 根驱动绳索弯曲后的长度如下:

$$\Delta l_1 = l_0 + 2N \left[b \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - h_0 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{4}\right) \right] \quad (19)$$

$$\Delta l_2 = l_0 + 2N \left[a \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - h_0 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{4}\right) \right] \quad (20)$$

$$\Delta l_3 = l_0 - 2N \left[b \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + h_0 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{4}\right) \right] \quad (21)$$

$$\Delta l_4 = l_0 - 2N \left[a \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + h_0 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{4}\right) \right] \quad (22)$$

其中, $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3, \Delta l_4$ 分别表示各个驱动绳的变化量。假设驱动空间到关节空间映射的过程量设为 Δl , 即通过改变驱动绳索长度使 α_i 和 θ_i 产生变化,在已知各个弯曲单元驱动绳索长度的情况下,即可求出任意关节的 α_i 和 θ_i , 其中 i 表示第 i 关节。

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{l_2 - l_4}{l_1 - l_3}\right) \quad (23)$$

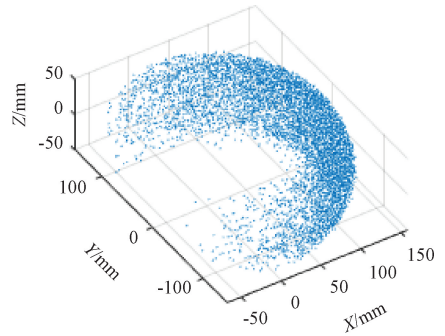
$$\alpha_i = N \cdot \theta =$$

$$2N \cdot \arcsin\left[\frac{\sqrt{(l_1 - l_3)^2 + (l_2 - l_4)^2}}{2N \cdot d}\right] \quad (24)$$

3 机器人运动仿真分析

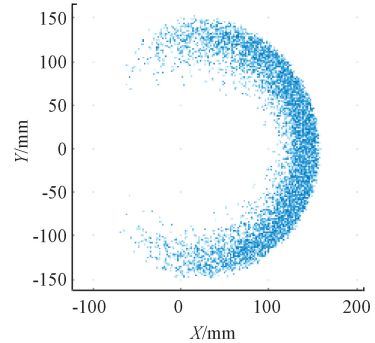
3.1 工作空间仿真

假设连续体机器人关节扭转角度 $\alpha = [0, 2\pi]$, 弯曲角度 $\theta = [0, \pi/2]$, 结合设计的柔性机械臂长度 200.5 mm, 外径 22.5 mm 等参数, 采用蒙特卡罗法求解连续体机器人的工作空间, 其求解的机器人工作空间点云图如图 7 所示。由图 7 可知, 连续体机器人的工作空间为一个中空半球型, 且随着弯曲单元节数的增加, 其工作空间球体的点云厚度不断提高。



(a) 工作空间三维图

(a) Three-dimensional view of the workspace



(b) 工作空间 XOY 截面视图

(b) XOY cross-section view of the workspace

图7 连续体机器人的工作空间

Fig. 7 Workspace of continuum robot

3.2 运动学仿真

为验证所建连续体机器人运动学建模的正确性, 下面对机器人运动学模型进行仿真分析。假设所设计的连续体检测机器人分别在不同弯曲角度下 ($0, \pi/6, \pi/3, 2\pi/3$) 进行弯曲变形运动, 然后通过正运动学公式计算连续体末端位置和弯曲形状, 并与仿真结果进行对比分析。

仿真结果如图 8 所示, 由仿真结果可知, 所建的连续体机器人运动学模型能够较为准确的描述机器人的弯曲形态, 且在不同角度下连续体机器人的弯曲形态与理论

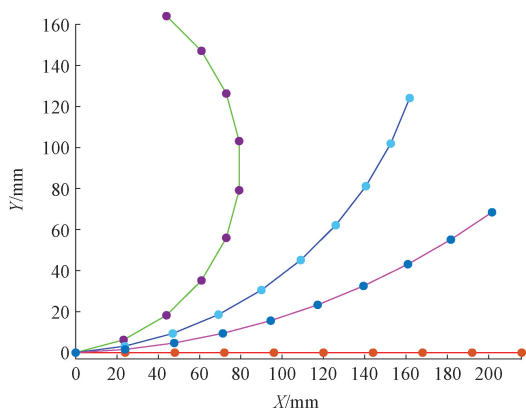


图 8 连续体机器人不同关节角下弯曲形态

Fig. 8 Shape of continuum robot with different joint angles

模型高度一致,由此验证了运动学建模的准确性。

3.3 驱动空间仿真

假设 3 节连续体机器人的初始状态为竖直形态,此时机器人的初始端坐标为 $\{0, 0, 0\}$,末端坐标为 $\{0, 0, 600\}$ 。对 3 节连续体机器人进行运动学仿真分析,假设每节连续体弯曲角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 均为 90° 。在 α_i 从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的变化过程中,分析 3 节连续体中 4 条驱动绳索的长度变化。

在仿真过程中,3 节连续体的绳长变化如图 9 所示。图中由下至上的 3 组曲线分别代表第 1 节、前 2 节和 3 节整体的绳长变化示意曲线。其中,绳索 1 和绳索 3,

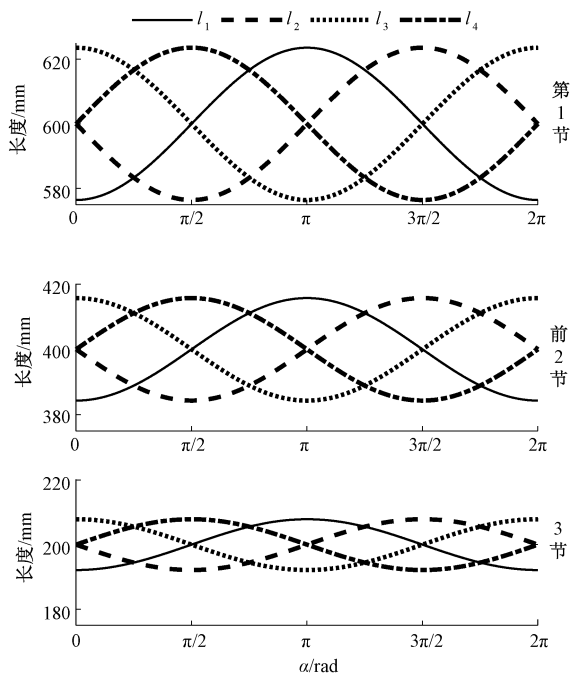


图 9 3 节弯曲单元偏转绳长变化

Fig. 9 Variation of deflected rope length in three-section bending unit

以及绳索 2 和绳索 4 的曲线变化量相互耦合,变化量相同。随着弯曲单元数量的增加,绳索总长度的变化量也随之增大,其变化特性与绳长公式相符,从而验证了所建模型的正确性。

假设 3 个弯曲单元的角度 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 均为 60° ,在 θ_i 从 0° 到 90° 的变化过程中,对 3 个弯曲单元中 4 条绳索的长度变化进行仿真分析,如图 10 所示。3 个弯曲单元在不同 θ_i 值下的绳长变化曲线。可以观察到,在相同 θ_i 角度下,弯曲单元中绳索的长度变化量与 α_i 角度相关。

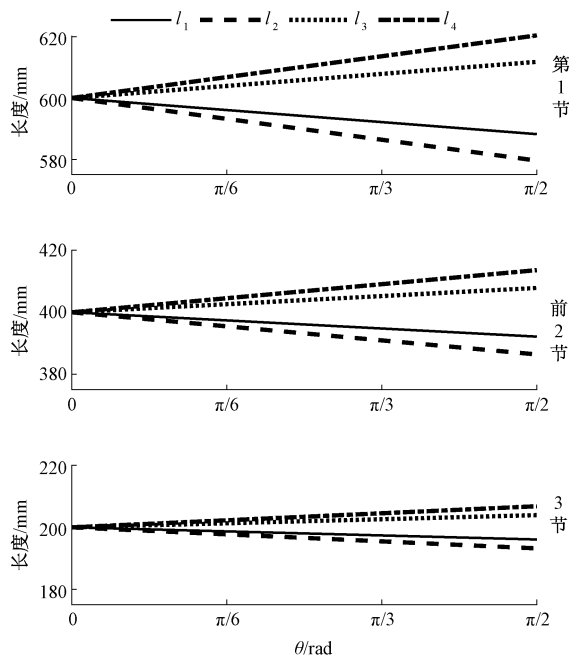


图 10 3 节弯曲单元弯曲绳长变化

Fig. 10 Variation of bending rope length in three-section bending unit

4 连续体机器人运动控制

4.1 控制策略

为实现对连续体机器人的运动控制,搭建了如图 11 所示的控制系统,该系统主要包括上位机、单片机、吸盘、气泵和步进电机等组件,以及压力传感器、微型编码器和惯性传感器等测量元件。首先,通过上位机将控制指令发送至单片机,单片机进行数据处理后驱动相应的电机运转,从而带动摆臂牵引绳索,实现连续体机器人的运动控制。

为满足航空发动机叶片检测的需求,在连续体机器人运动的过程中对所进给的叶片环境进行分析,操控安装于连续体可吸附单元四周的吸盘可对叶片环境进行

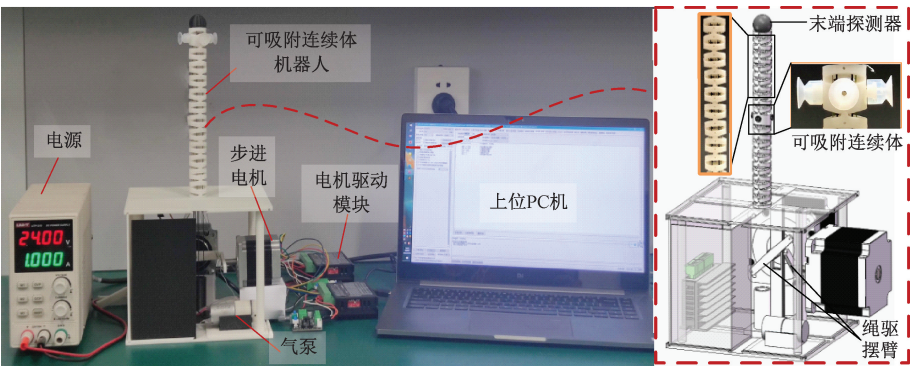


图 12 可吸附连续体机器人实验平台

Fig. 12 Experimental platform for adsorbable continuum robots

间旋转运动实验,实验过程如图 13 所示。实验目的是检验机器人在复杂环境中的运动精度和稳定性。

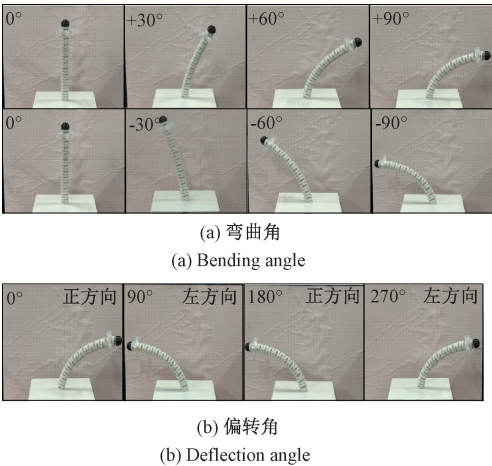


图 13 连续体机器人动作验证

Fig. 13 Motion verification of the continuum robot

实验中控制连续体机器人按照预设的关节角度和驱动绳索长度执行动作。通过坐标值记录末端位置和运动轨迹,并与理论模型进行对比分析。实验结果表明,机器人能够在狭窄空间内完成预定的变形动作,其末端位置偏移量保持在预期范围内,运动轨迹与理论模型基本一致,验证了控制算法和运动学模型的准确性。

5.3 有无可吸附单元连续体弯曲实验

为更有效地对比优化前后连续体机构的性能差异,本实验采用了控制变量法,分别对无吸附单元和有吸附单元的连续体进行了弯曲测试。

实验在标准环境条件下进行,以减少温度、湿度等外界因素对测试结果的影响。连续体的材料、尺寸以及驱动方式保持一致,唯一的变量是吸附单元的有无。测试设备包括高精度的位移传感器和力传感器,用于记录连续体在不同负载下的弯曲角度和末端位移。

首先,将无吸附单元的连续体固定在实验台上,逐步施加外力并记录每个施力点的弯曲角度和末端位移。随后,以相同的测试步骤对有吸附单元的连续体进行测试。通过两组数据的对比,以分析吸附单元对连续体刚度和抗弯性能的影响。

由图 14 的实验结果显示,有吸附单元的连续体在相同负载下的末端位移明显小于无吸附单元的连续体,表明吸附单元显著提高了连续体的刚度和稳定性。

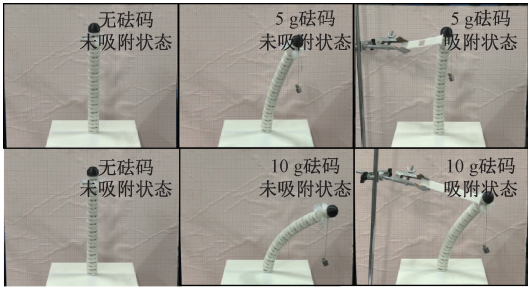


图 14 有无可吸附单元连续体在不同弯曲角下受载 0.05 N/0.1 N 末端偏移

Fig. 14 Continuum with no adsorption unit loaded with 0.05 N/0.1 N end deflections at different bending angles

由图 15 结果可知,与无吸附单元的连续体相比,带有吸附单元的连续体在外力作用下的末端偏移量显著减少。在 0.5、10 g 的末端负载下,无吸附单元的连续体末端位移分别为 0、0.042 和 0.1 m,而带有吸附单元的连续体末端位移则分别为 0、0.019 和 0.047 m。特别是在较大末端负载下(如 10 g),带有吸附单元的连续体偏移量减少了约一半。这表明,带有吸附单元的连续体设计在弯曲过程中表现出更高的刚度和更小的偏移量,能够更好地适应负载条件,显著提高了结构的稳定性和可靠性。

5.4 水平/竖直吸附下末端负载实验

为深入探究吸附位置对末端负载性能的影响,本实

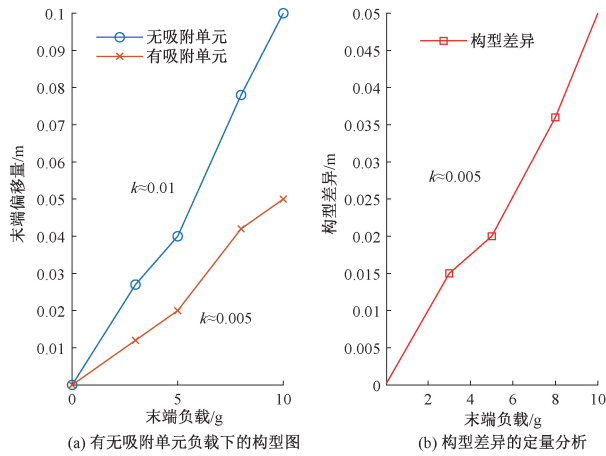
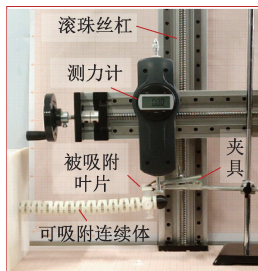


图 15 不同负载下末端偏移折线

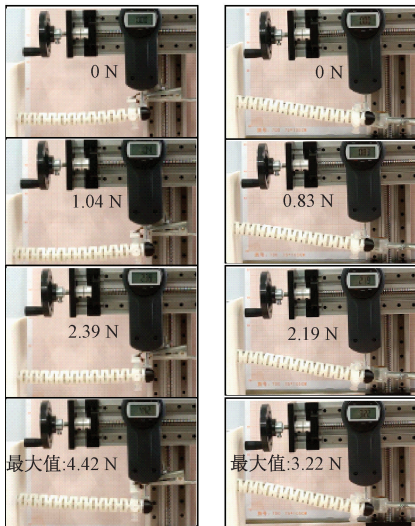
Fig. 15 Line graph of end deflection under different loads

验采用控制变量的方法,对无吸附、竖直吸附和水平吸附 3 种情况下的末端负载进行了对比测试,如图 16 所示。实验过程中,逐步增加连续体机器人末端负载,并记录其在不同吸附条件下的偏移量变化。



(a) 负载测试实验平台

(a) Load test experimental platform



(b) 竖直方向吸附

(c) 水平方向吸附

(b) Vertical adsorption

(c) Horizontal adsorption

图 16 水平/竖直吸附下末端负载测试

Fig. 16 End load test under horizontal/vertical adsorption

由实验结果可知,连续体机器人在不同吸附方式下的负载能力和末端偏移量存在明显差异。将无吸附单元、竖直吸附和水平吸附的末端偏移量数据进行对比分析,其结果如图 17 所示。

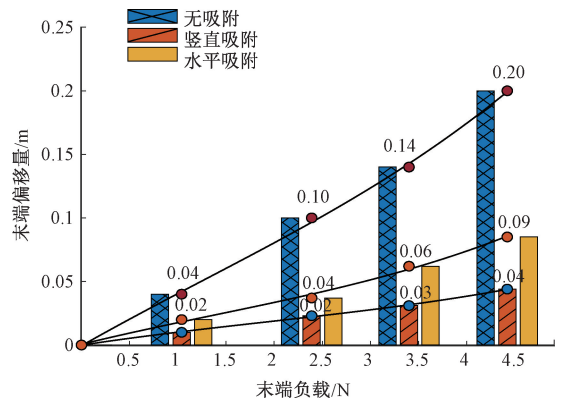


图 17 不同末端负载下末端偏移量

Fig. 17 Histogram of end offsets with different end loads

竖直吸附情况下,负载从 0 增加至 4.42 N 时,末端偏移量从 0 增加至 0.044 m。相较于无吸附的情况下(负载 4.42 N 时,末端偏移量达到 0.19 m),竖直吸附的末端偏移量显著减少。这表明竖直吸附能够有效提升连续体的刚度,使其在高负载下仍能保持较小的偏移量。

水平吸附情况下,负载从 0 增加至 3.4 N 时,末端偏移量从 0 增加至 0.085 m。虽然水平吸附的最大负载能力略低于竖直吸附,但在相同负载下的其末端偏移量也显著小于无吸附的情况。如在 3.4 N 负载下,水平吸附的末端偏移量仅为 0.085 m,而无吸附情况下则为 0.14 m。

综上所述,将吸附单元引入连续体结构中能够有效提高连续体机器人的负载能力和结构刚度,克服连续体结构高柔性和低刚度间的矛盾问题。在高负载条件下,无吸附的连续体表现出较大的末端偏移量,而竖直吸附和水平吸附则有效减小了这一偏移量。同时与无吸附状态相比,竖直吸附和水平吸附的设计展现出显著优越的力学性能,负载能力最高提升近 9 倍,充分证明了吸附单元在增强连续体结构刚度和稳定性方面的有效性。

5.5 航空发动机叶片原位检测模拟实验

本实验旨在验证可吸附连续体机器人在航空发动机叶片原位检测中的应用潜力。通过模拟实际工作环境,系统评估了机器人在狭小空间内的运动控制、吸附能力以及对叶片检测的有效性。如图 18 所示,模拟航空发动机内部叶片环境由 3 组直径为 200 mm 的风叶组成,每组风叶由 6 扇叶片构成,每片间隔 60° 呈圆周分布,每扇风叶宽 25 mm,2 片扇叶间的最小与最大间距分别为 8.21 和 66.13 mm。控制连续体机器人逐级通过发动机叶片

环境,并在达到指定区域后进行对叶片的主动吸附,从而提升机器人主体刚度和负载能力,为后续实现对航空发动机内部叶片的原位检测奠定平台基础。模拟介入航空发动机多级叶片的过程如图 18 所示。

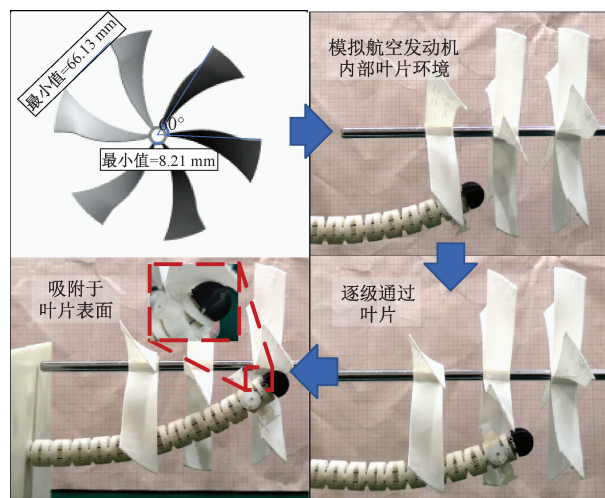


图 18 航空发动机叶片原位检测模拟实验

Fig. 18 Simulation experiment of in-situ inspection of aero-engine blade

由图 18 实验结果可知,所设计的连续体机器人能够有效通过航空发动机的多级叶片环境,有效保证了对发动机后级叶片的原位检测,验证了可吸附连续体机器人结构的可行性和有效性。实验结果显示,所设计的可吸附连续体机器人在叶片检测过程中表现出更高的刚度和稳定性,能够有效降低其末端偏移量,在一定程度上保证了航空发动机叶片原位检测的可行性。这一研究为后续可吸附连续体机器人在航空发动机维护中的应用提供了理论和实验支持,具有广泛的工程应用前景。

6 结 论

1) 本文设计了一种面向航空发动机叶片原位检测的可吸附连续体机器人,对其进行了运动学建模和静力学分析。与传统的连续体结构相比,本研究设计的连续体机器人针对航空发动机叶片原位检测领域对复杂空间的作业需求,能够大幅提升其末端负载能力,有效克服了连续体机器人结构高柔性和低刚度间的矛盾问题。

2) 建立了可吸附连续体机器人的运动学模型,并通过有限元仿真进行静力学分析,以实现可对可吸附连续体的模型构造、尺寸参数及吸附单元进行优化改进,仿真结果验证了所设计的可吸附连续体结构的可行性和有效性,机器人能够在保持结构柔顺的同时大大提升了其自

身刚度,分散了连续体末端应力集中部位的负载,为后续实现航空发动机叶片的原位检测奠定基础。

3) 可吸附连续体机器人运动实验结果表明,所设计的可吸附连续体机器人能够实现在弯曲角 90° 的范围内,竖直吸附和水平吸附的最大负载可达 4.42 和 3.4 N。同一负载下相较于无吸附单元的连续体,其末端偏移分别降低了 78% 和 57.5%,与其他现有研究连续体相比末端负载能力提高了 75% 以上,由此验证了所设计的连续体机器人能够更好地满足航空发动机叶片原位检测所需的高柔顺性和高负载需求。

4) 所设计的可吸附连续体机器人具有良好的控制效果,但尚未考虑机器人绳索传动系统传递误差、运动建模误差等对机器人控制精度的影响,后续将进一步围绕可吸附连续体机器人动力学建模及主动吸附控制策略等方面开展研究。

参考文献

- [1] SHANG H B, SUN CH, LIU J X, et al. Deep learning-based borescope image processing for aero-engine blade in-situ damage detection [J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 123: 107473.
- [2] WANG M F, DONG X, BA W M, et al. Design, modelling and validation of a novel extra slender continuum robot for in-situ inspection and repair in aeroengine [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2021, 67: 102054.
- [3] BA W M, DONG X, MOHAMMAD A, et al. Design and validation of a novel fuzzy-logic-based static feedback controller for tendon-driven continuum robots [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26 (6): 3010-3021.
- [4] MA N. Design and modelling of a continuum robot with soft stiffness-adjustable elements for confined environments [J]. Authorea Preprints, 2023.
- [5] DONG X, AXINTE D, PALMER D, et al. Development of a slender continuum robotic system for on-wing inspection/repair of gas turbine engines [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2017, 44: 218-229.
- [6] XIE ZH X, YUAN F Y, LIU J Q, et al. Soft robots: Octopus-inspired sensorized soft arm for environmental interaction [J]. Science Robotics, 2023, 8 (84): eadh7852.
- [7] TANG CH, DU B Y, JIANG S W, et al. A pipeline inspection robot for navigating tubular environments in the

- sub-centimeter scale [J]. *Science Robotics*, 2022, 7(66): eabm8597.
- [8] YANG ZH SH, YANG L H, SUN Y, et al. A novel contact-aided continuum robotic system: Design, modeling, and validation [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2024, 40: 3024-3043.
- [9] YANG ZH SH, YANG L H, SUN Y, et al. Comprehensive kinetostatic modeling and morphology characterization of cable-driven continuum robots for in-situ aero-engine maintenance[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2023, 18(3): 40.
- [10] 王尧尧, 刘卢芳, 鞠锋, 等. 面向旋翼飞行器的仿生机械臂终端滑模控制[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(2): 471-481.
- WANG Y Y, LIU L F, JU F, et al. Sliding mode control of bionic manipulator for rotorcraft[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(2): 471-481.
- [11] WANG Y Y, YAN F, CHEN J W, et al. A new adaptive time-delay control scheme for cable-driven manipulators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(6): 3469-3481.
- [12] 李特, 葛宇航, 艾靖超, 等. 锥形薄壁筒内轮式加工机器人自适应运动控制[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(5): 90-99.
- LI T, GE Y H, AI J CH, et al. Adaptive motion control of wheeled machining robot in conical thin-walled cylinder[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(5): 90-99.
- [13] 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.
- [14] 郭万金, 李锦辉, 郝钦磊, 等. 基于病态参数分离的机器人运动学标定测量构型优化[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(2): 299-314.
- GUO W J, LI J H, HAO Q L, et al. Ill-conditioned parameter separation based optimization of measurement configuration for robot kinematic calibration[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(2): 299-314.
- [15] 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.
- [16] 周正东, 贾峻山, 魏士松, 等. 连续型经狭窄腔检测机器人结构设计及运动学分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(6): 1030-1037.
- ZHOU ZH D, JIA J SH, WEI SH S, et al. Structure design and kinematics analysis of continuum detection robot through narrow cavity [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(6): 1030-1037.
- [17] 齐飞, 张恒, 孙杰, 等. 考虑驱动耦合的绳驱动外肢体机器人运动建模及控制研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(6): 21-34.
- QI F, ZHANG H, SUN J, et al. Modeling and control of cable-driven supernumerary robotic limbs motion considering drive coupling [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(6): 21-34.
- [18] PEYRON Q, BURGNER-KAHRIS J. Stability analysis of tendon driven continuum robots and application to active softening [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2024, 40: 85-100.
- [19] 齐飞, 余世刚, 高书苑, 等. 考虑非线性摩擦的绳驱动连续体机器人动力学研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4): 375-383, 401.
- QI F, SHE SH G, GAO SH Y, et al. Dynamic of cable-driven continuum robot with nonlinear friction model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 375-383, 401.
- [20] 齐飞, 张恒, 裴海珊, 等. 基于力传递模型的连续体机器人驱动误差补偿研究[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(1): 402-411.
- QI F, ZHANG H, PEI H SH, et al. Drive error compensation of continuum manipulator based on force transfer model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2023, 54(1): 402-411.
- [21] 王学军, 张帆. 含柔性吸附材料的攀爬机器人振动特性与稳定性分析研究[J]. *仪器仪表学报*, 2022,

43(8):271-279.

WANG X J, ZHANG F. Research on vibration characteristics and stability of climbing robot with flexible adsorption material [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 271-279.

[22] 谢赛宝,刘春阳,陈帆,等. 基于视觉的自主机器人障碍识别与路径规划[J]. 电子测量与仪器学报,2022, 36(12):185-192.

XIE S B, LIU CH Y, CHEN F, et al. Obstacle recognition and path planning for autonomous robots based on vision[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2022, 36(12): 185-192.

[23] 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 for multi-segment continuum robots based on reinforcement learning [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(5): 61-69.

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,现为常州大学讲师,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, M. Sc. degree from Jiangnan University in 2016, and 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 rope-driven continuum robots and flexible external limb robots.