

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.05.003

用于航空发动机原位检测的连续体机器人运动研究*

向立清¹, 鞠 锋^{1,2}, 齐 飞¹, 王亚明¹, 华达人¹, 陈 柏^{1*}

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 浙江大学
流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对航空维修中传统检测手段难以在原位做发动机狭长内部的检测,及传统单芯柱骨架连续体机器人存在易扭曲、运动精度差及控制困难的问题,对连续体机器人的结构和其中各节对灵活性的差异要求进行了研究。利用有限元分析软件,选取了最优结构,设计了一种交错排列双芯柱结构的冗余自由度连续体机器人;基于几何分析方法,建立了单节、多节连续体机器人正逆运动学模型,分析了驱动空间与关节空间,关节空间与操作空间的相互映射关系,并进行了运动仿真和实验。研究表明:所设计连续体机器人的工作空间满足检测要求,其轨迹规划合理,能够准确地完成发动机的检测任务。

关键词:连续体机器人;发动机原位检测;双芯柱;运动学模型;工作空间仿真

中图分类号:TH113.2⁺2;TH122;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)05-0464-07

Kinematics research of continuum robot for in-situ detection of aero-engine

XIANG Li-qing¹, JU Feng^{1,2}, QI Fei¹, WANG Ya-ming¹, HUA Da-ren¹, CHEN Bai¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. The State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronics Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem that the interior space of aero-engine compressor is long and narrow, it was difficult for the traditional detection method to detect in situ, and the traditional single-core-column continuum body robot has its drawback, such as easy distortion, poor motion accuracy and difficulty in control, the structure of the continuum robot and the different requirements of flexibility of the continuum robot of each segment were studied. The optimal structure was selected by FEA, a kind of redundant DOFs (degrees of freedom) flexible continuum robot with a double-core-column and staggered body was proposed and designed. Based on the geometric analysis method, the forward and inverse kinematics models of single-joint and multi-joint continuum robots were established, and the motion simulation and detection experiments were carried out. The results indicate that the designed continuum robot can meet the detection requirements, and the trajectory planning is reasonable, and it can accurately complete the engine detection task.

Key words: continuum robot; engine in-situ detection; double-core-column; kinematic model; workspace simulation

0 引 言

航空发动机在工作过程中,处于高压振动状态,气体燃烧造成涡轮室内持续高温。除此之外,叶片

还要受到热腐蚀、高温氧化和机械摩擦等各种作用形式,其工作环境极其恶劣。与此同时,叶片还要在交变拉应力和扭转应力的频率和幅度变化非常大的情况下持续高速运转^[1-2]。另外,叶片工作时的频繁

收稿日期:2018-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575256);流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金资助项目(GZKF-201711);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金资助项目(kfj20170522)

作者简介:向立清(1981-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事连续体机器人方面的研究。E-mail:23886256@qq.com

通信联系人:陈柏,男,教授,博士生导师。E-mail:chenbye@nuaa.edu.cn

起停、长时间连续工作等不利因素,也使得叶片的寿命大大缩短。因此,有必要针对飞机发动机叶片进行故障检测。

传统航空维修作业时,在原位(发动机在飞机上)只能检修发动机内部可视及人手可达部位的故障,对于内部其他故障只在定期检修(或发现故障)时,拆下发动机返厂分解检测。尽管有的使用工业内窥镜进行辅助检查,但由于其自由度过少,在一些狭窄区域不能适应检测的全部要求。

近年来,国内外针对连续体机器人系统进行了广泛地研究^[3-5],特别是医疗导管机器人系统^[6]。在航空维修领域,针对连续体机器人的应用研究中,国内中国民航大学^[7-9]对飞机油箱检查机器人的仿生结构及运动学进行了研究,并进行了仿真和实验验证;国外,英国 University of Nottingham 和 Repair Technology, Rolls-Royce plc^[10]对发动机叶片检测的连续体机器人进行理论探索和样机的研制。

针对航空发动机压气机内部狭长的空间实际,本文将设计一种可用于发动机叶片的原位检测的柔性连续体机器人。

1 连续体机器人结构设计

1.1 传统连续体机器人结构

传统的连续体机器人大都是以单根弹性芯柱作为其中心骨架,结构简单。但对于多节细长结构连续体机器人来说,在驱动绳拉紧时,由于绳相对连接盘产生的侧向作用力,会引起连续体机器人相对中心芯柱的扭矩^[11],从而引起连续体机器人芯柱发生扭曲变形。

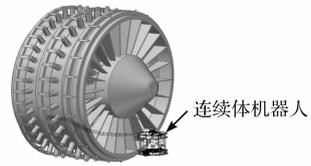
当连续体机器人芯柱发生扭曲变形后,使整个连续体机器人形状发生了改变,因此造成末端位置误差增大、控制精度差等问题。

1.2 新型连续体机器人结构

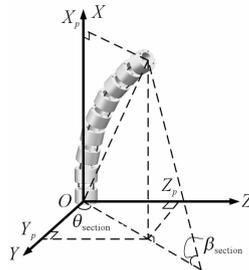
为了避免传统连续体机器人的单芯柱结构带来的连续体扭曲,本文设计了一种新型带有交错双芯柱结构的连续体机器人,如图1所示。

图1中,弯曲单元由两部分组成,每个部分的自由度为1,弯曲单元的芯柱以交错90°排列,每节连续体由若干个结构相同的弯曲单元组成。由于芯柱不在中心位置,连续体中心位置预留的通道用来穿越检测导线,同时也减轻了连续体自身的重量,增加了末端的负载能力。

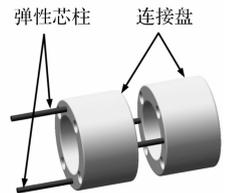
本文从两个方面对该结构进行了优化:



(a) 连续体机器人检测发动机示意图



(b) 单节连续体结构



(c) 双芯柱弯曲单元

图1 发动机检测连续体机器人

(1)从几何尺寸上采用连接盘变间距形式进行结构的优化。由于检测时对最后一节的弯曲单元具有更高灵活性的要求,故连续体芯柱采用变间距结构。检测用连续体机器人需保证在没有驱动绳拉力时,在自重作用下,结构不发生过大变形。因同样材料和相同直径的弹性芯柱,在受同样大小重力载荷时,长度大的弹性芯柱挠度增大,变形量变大。最大挠度如下式所示:

$$\omega_B = -\frac{ql^4}{8EI} \quad (1)$$

式中: ω_B —最大挠度; l —芯柱长度; q —均布载荷; E —弹性模量; I —惯性矩。

故靠近基座的弹性芯柱可弯曲部分应当短一些,第一、第二节连续体结构连接盘间距(可弯芯柱)为5 mm,每节分别由8个弯曲单元组成。由于机器人末端在狭小复杂的空间工作时,需要更高的灵活性,第三节连续体的连接盘间距(可弯芯柱)为10 mm,共有8节。根据实际需要,本文提出了可弯比参数 λ :

$$\lambda = \frac{l}{l_d} \quad (2)$$

式中: l —芯柱长度; l_d —连接盘厚度。

连接盘的厚度 l_d 是10 mm,第一、二节的可弯芯柱长度 l 是5 mm,第三节可弯芯柱长度 l 是10 mm。所以,第一、二节 $\lambda = 0.5$,第三节 $\lambda = 1$ 。传统恒定可弯比结构,没有考虑采用变可弯比的结构,来解决连续体机器人检测过程中对各节灵活性差异需求的实际要求。

(2)通过选用不同的弹性材料作为芯柱进行结构的优化。假设全部采用镍钛合金丝作为芯柱,其直径为1 mm,利用有限元软件进行仿真可知,在重力作用下其水平状态下的末端变形量为362 mm,造成连续体初

始变形量过大。但由于第一节连续体主要是辅助进给,对灵活性的要求相对于后两节要低很多,本文选用了 65 锰弹簧钢作为第一节芯柱。

本研究对其进行有限元软件仿真分析,末端变形量缩小到 229 mm。通过材料变换,初始变形量减小了 36.7%,这对于后续的运动学分析和运动控制奠定了基础。

2 连续体机器人运动分析

2.1 关节空间与驱动空间的映射关系

本文提出的连续体驱动形式上是并联冗余的,驱动绳索长度与关节角度之间是非线性关系,驱动空间与操作空间的直接映射关系是抽象复杂的^[12]。因此,笔者先建立连续体机器人驱动空间、关节空间及操作空间的映射关系,如图 2 所示。

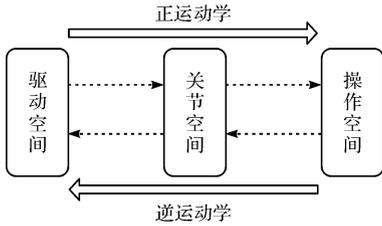


图 2 不同空间描述间的关系

连续体柔性机器人的运动规划必须从个各节的关节变量出发,建立对应的局部坐标系,通过齐次变换矩阵来完成^[13-14]。由于该连续体机器人每一节的结构相似和自由度相同,首先笔者以单节作为研究对象,建立统一的正向运动学模型,再根据连续体的节数,推广至多节。

2.2 正运动学

分析正运动学的目的就是已知驱动绳长,通过关节角度能够计算出连续体机器人的末端位置。

首先基于绳长 l_1, l_2, l_3 和 l_4 之间的几何关系,来求解弯曲角 β_1, β_2 。

弯曲单元几何关系如图 3 所示。

在图 3(a) 所示间隙 2 中,绳长关系为:

$$l'_1 + l'_3 = 2l_{\text{link}} \quad (3)$$

$$l'_2 + l'_4 = 2l_{\text{link}} \quad (4)$$

$$l'_3 - l'_1 = 2 \times L_{\text{proj}B_1B_3} \sin \frac{\beta_1}{2} \quad (5)$$

其中,由图 3(b) 可知:

$$B_1B_3 = 2r \quad (6)$$

$$L_{\text{proj}B_1B_3} = 2r \sin \theta_1 \quad (7)$$

则可以得到:

$$l'_3 - l'_1 = 2 \times 2r \sin \theta_1 \sin \frac{\beta_1}{2} \quad (8)$$

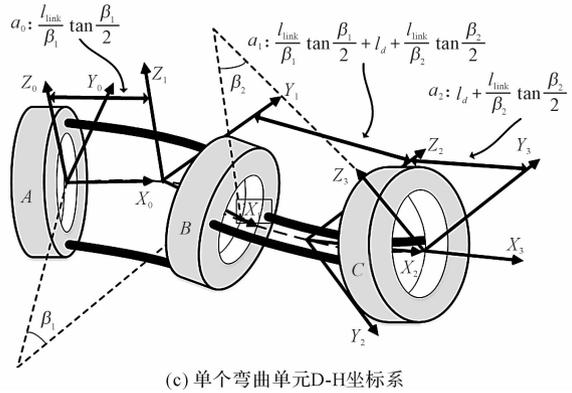
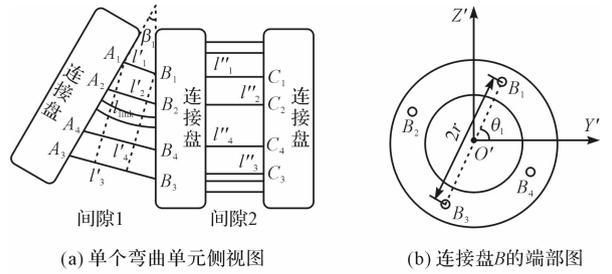


图 3 弯曲单元几何关系

同理,有:

$$l'_4 - l'_2 = 2 \times L_{\text{proj}B_2B_4} \sin \frac{\beta_1}{2} \quad (9)$$

$$B_2B_4 = 2r \quad (10)$$

$$L_{\text{proj}B_2B_4} = 2r \cos \theta_1 \quad (11)$$

$$l'_4 - l'_2 = 2 \times 2r \cos \theta_1 \sin \frac{\beta_1}{2} \quad (12)$$

相同地,在间隙 1 中,其关系为:

$$l''_3 - l''_1 = 2 \times 2r \cos \theta_1 \sin \frac{\beta_2}{2} \quad (13)$$

$$l''_4 - l''_2 = 2 \times 2r \sin \theta_1 \sin \frac{\beta_2}{2} \quad (14)$$

根据式(8,13),则有:

$$l_3 - l_1 = 2 \times 2r \sin \theta_1 \sin \frac{\beta_1}{2} + 2 \times 2r \cos \theta_1 \sin \frac{\beta_2}{2} \quad (15)$$

同理,根据式(12,14),则有:

$$l_4 - l_2 = 2 \times 2r \cos \theta_1 \sin \frac{\beta_1}{2} + 2 \times 2r \sin \theta_1 \sin \frac{\beta_2}{2} \quad (16)$$

由式(15,16)可得:

$$\beta_1 = 2 \arcsin \frac{(l_3 - l_1) \sin \theta_1 - (l_4 - l_2) \cos \theta_1}{4r(\sin^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_1)} \quad (17)$$

$$\beta_2 = 2 \arcsin \frac{(l_4 - l_2) \sin \theta_1 - (l_3 - l_1) \cos \theta_1}{4r(\sin^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_1)} \quad (18)$$

当绳长已知时,即可得出关节角。然后采用 D-H 参数法对连续体机器人每一节的运动学进行分析,得到每一节的运动情况,进而求解出连续体机器人的末端位置。

本研究选取如图 3(c) 中的一节内的弯曲单元作为研究对象,建立类似连杆结构的坐标系。其中,坐标系 0 和 3 的原点建立在连接盘 A 和 C 的靠近末端一面的中心点,坐标系 1 的原点建立在连接盘 A 和 B 中心轴线的交点处,坐标系 2 的原点建立在连接盘 B 和 C 中心轴线的交点处。

连接盘 B 相对于 A 弯曲了 β_1 , 连接盘 C 相对于 B 弯曲了 β_2 , 且它们的弯曲运动所在平面相互垂直, 即图 3(c) 中两个角 β_1, β_2 所在平面相互垂直。

根据建立的坐标系和参数选取的规则^[15-16], 由图 3(c) 中的几何关系, 建立的连续体机器人 D-H 参数。单个弯曲单元 D-H 参数如表 1 所示。

表 1 单个弯曲单元 D-H 参数

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	$\frac{l_{\text{link}}}{\beta_1} \tan \frac{\beta_1}{2}$	0	$-\beta_1$
2	$-\frac{\pi}{2}$	$\frac{l_{\text{link}}}{\beta_1} \tan \frac{\beta_1}{2} + l_d + \frac{l_{\text{link}}}{\beta_2} \tan \frac{\beta_2}{2}$	0	$-\beta_2$
3	$\frac{\pi}{2}$	$l_d + \frac{l_{\text{link}}}{\beta_2} \tan \frac{\beta_2}{2}$	0	0

由此, 可以得到相邻坐标系间的齐次变换矩阵, 即:

$${}^0_1\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c(\beta_1) & s(\beta_1) & 0 & \frac{l}{\beta_1} \tan \frac{\beta_1}{2} \\ -s(\beta_1) & c(\beta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$${}^1_2\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c(\beta_2) & s(\beta_2) & 0 & \frac{l}{\beta_1} \tan \frac{\beta_1}{2} + l_d + \frac{l}{\beta_2} \tan \frac{\beta_2}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ s(\beta_2) & -c(\beta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$${}^2_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_d + \frac{l}{\beta_2} \tan \frac{\beta_2}{2} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

因此, 单个弯曲单元的变换矩阵为:

$${}^0_3\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \mathbf{T} \quad (22)$$

n 个弯曲单元构成的单节连续体机器人变换矩阵为:

$$\mathbf{T}_{\text{section}} = ({}^0_3\mathbf{T})^n = ({}^0_1\mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \mathbf{T})^n \quad (23)$$

3 节连续体机器人总变换矩阵为:

$$\mathbf{T}_{\text{Total}} = \mathbf{T}_{\text{section}1} \mathbf{T}_{\text{section}2} \mathbf{T}_{\text{section}3} \quad (24)$$

建模分析过程中用到的一些符号变量, 其说明如表 2 所示。

表 2 符号变量说明

符号	含义
$l_{\text{link}}/\text{mm}$	单节连续体中心线长度
l_d/mm	连接盘厚度
n	每一节包含弯曲单元数
$l'_i, l''_i/\text{mm}$	驱动绳在弯曲单元内分别在连接盘间隙 1 和间隙 2 的长度
L_i/mm	第 i 根绳的总长 ($i = 1, 2, 3, 4$)
$\beta_1, \beta_2/\text{deg}$	在间隙 1 和间隙 2 的弯曲角
r/mm	连接盘驱动绳索孔中心到盘中心距离
θ/deg	B_1B_3 与 Y' 轴的夹角
$L_{\text{proj}B_1B_3}/\text{mm}$	B_1B_3 在图 3(a) 平面的投影长度
$L_{\text{proj}B_2B_4}/\text{mm}$	B_2B_4 在图 3(a) 平面的投影长度

2.3 逆运动学

由图 1(b) 可知, 每一弯曲单元的偏转角 θ_{segment} 和该节的偏转角 θ_{section} 一致, 每一弯曲单元的弯曲角 β_{segment} 平分该节的弯曲角 β_{section} , 即:

$$\theta_{\text{segment}} = \theta_{\text{section}} = \arctan \frac{Z_p}{Y_p} \quad (25)$$

$$\beta_{\text{segment}} = \frac{\beta_{\text{section}}}{n} = \frac{2}{n} \cdot \arctan \frac{\sqrt{Y_p^2 + Z_p^2}}{X_p} \quad (26)$$

式中, (X_p, Y_p, Z_p) — 该节连续体末端位置向量。

由此, 可以推导出在该节内每个弯曲单元内的 β_1, β_2 :

$$\beta_1 = \arctan(\cos(\theta_{\text{segment}}) \cdot \tan(\beta_{\text{segment}})) \quad (27)$$

$$\beta_2 = \arcsin(-\sin(\theta_{\text{segment}}) \cdot \sin(\beta_{\text{segment}})) \quad (28)$$

由图 3(a, b) 可知, 间隙 1 和间隙 2 中的各节驱动绳长为:

$$l'_1 = 2 \left(\frac{l_{\text{link}}}{\beta_1} - r \sin \theta \right) \sin \left(\frac{\beta_1}{2} \right) \quad (29)$$

$$l'_3 = 2 \left(\frac{l_{\text{link}}}{\beta_1} + r \sin \theta \right) \sin \left(\frac{\beta_1}{2} \right) \quad (30)$$

$$l'_2 = 2 \left(\frac{l_{\text{link}}}{\beta_1} + r \cos \theta \right) \sin \left(\frac{\beta_1}{2} \right) \quad (31)$$

$$l'_4 = 2 \left(\frac{l_{\text{link}}}{\beta_1} - r \cos \theta \right) \sin \left(\frac{\beta_1}{2} \right) \quad (32)$$

$$l''_1 = 2 \left(\frac{l_{\text{link}}}{\beta_2} + r \cos \theta \right) \sin \left(\frac{\beta_2}{2} \right) \quad (33)$$

$$l''_3 = 2 \left(\frac{l_{\text{link}}}{\beta_2} - r \cos \theta \right) \sin \left(\frac{\beta_2}{2} \right) \quad (34)$$

$$l''_2 = 2 \left(\frac{l_{\text{link}}}{\beta_2} + r \sin \theta \right) \sin \left(\frac{\beta_2}{2} \right) \quad (35)$$

$$l''_4 = 2 \left(\frac{l_{\text{link}}}{\beta_2} - r \sin \theta \right) \sin \left(\frac{\beta_2}{2} \right) \quad (36)$$

第 i 根绳子在该节的总长为:

$$L_i = n l'_i + n l''_i + 2n l_d \quad (37)$$

由此可以得出每根绳长的变化量, 已知绕线轴周

长,也就得到了电机需要转动的角度。

本研究通过正反运动学的分析,明确了连续体机器人的运动过程。为了防止绳长变化量超过规定值,造成机构的损伤,需要判断绳长变化不能超过最大值。

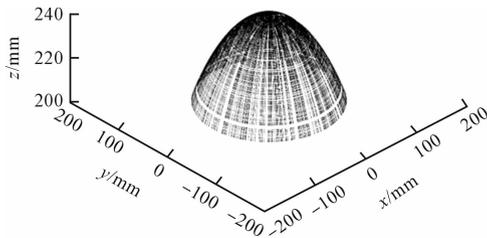
检测前,需要判断末端位置是否到达了检测位置。为了实现系统的闭环控制,引入连续体形状检测技术,基于检测出的实际末端位置与理论末端位置误差,进行误差的补偿。

3 仿真与实验

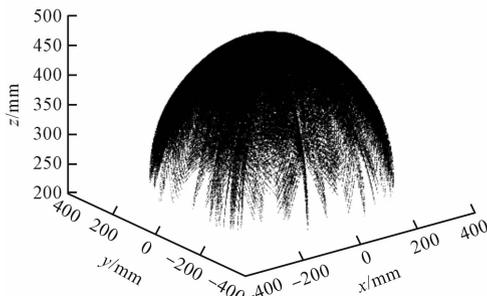
3.1 工作空间仿真

针对该连续体机器人,本研究要确保其顺利避障,携带检测装置的末端能够到达检测位置。

单节连续体机器人具有 2 个自由度,三节具有 6 个自由度。根据运动学建模分析,对其运动进行仿真。其中,三节长度分别为 240 mm、240 mm 和 160 mm,单关节弯曲角度和偏转角度取值范围分别为 $(0, \frac{\pi}{2})$ 和 $(0, 2\pi)$ 。所设计的连续体机器人工作空间能够根据压气机复杂型腔的实际情况,通过调整各节的偏转角度和弯曲角度,以保证末端检测装置工作时能够到达叶片任何部位。通过 Matlab 仿真得到单节和两节连续体机器人的工作空间。连续体机器人工作空间仿真如图 4 所示。



(a) 单节连续体机器人工作空间仿真



(b) 两节连续体机器人工作空间仿真

图 4 连续体机器人工作空间仿真

当弯曲 $\pi/2$ 后,连续体机器人末端一节弯曲形成 $1/4$ 圆弧的半径是 101.9 mm,最后一节末端轨迹可以覆盖整个工作空间。

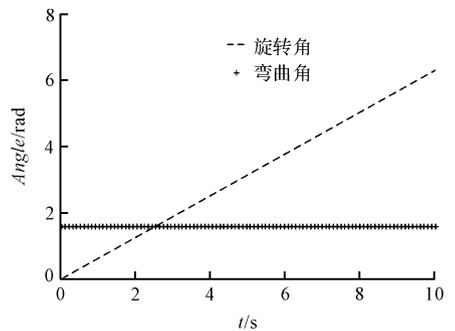
由图 4 可知:只要前两节连续体机器人通过适当弯曲避障,使最后一节到达叶片的部位,再通过控制绳

长变化调整末端一节的形态,则机器人末端搭载的检测装置可以到达叶片的任何位置。

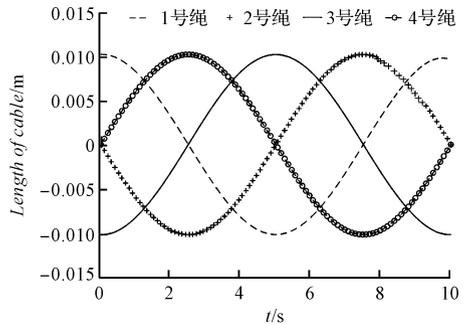
3.2 连续体运动学仿真

由于发动机压气机内部是一个静止叶片和旋转叶片依次交错排列的复杂构型,为了研究连续体机器人在检测过程中的运动特性,笔者以某型号发动机为例,假定压气机叶片在某一圆周区域内有裂纹,利用以上分析的运动学模型,对其进行运动学仿真分析。

在 Matlab 中,给定目标轨迹的方程,根据逆运动学模型,可以仿真得到连续体机器人末端的弯曲角和旋转角;同时,可以得到每根驱动绳长的变化。连续体机器人运动仿真如图 5 所示。



(a) 弯曲角和旋转角变化图



(b) 绳长变化图

图 5 连续体机器人运动仿真

类似地,可以按照任意需要的扫描轨迹,进行运动的仿真分析。

3.3 叶片检测实验及结果分析

本研究利用运动学分析和仿真结果,在连续体末端搭载视频采集和无损检测装置,用来验证该连续体机器人检测的可行性,搭建了发动机叶片检测的实验平台。

本文选用涡流探测方法。检测时,将检测中采集的疑似故障叶片的图像,提取故障特征,通过天津算法,选取适当的阈值,得到故障信息图;再把该图像与涡流检测装置采集的信息进行对比分析,确定叶片的故障、缺陷,给出报警信号,完成发动机原位检测。

实验中,记录下进给到检测位置时连续体的实际

构型,实际构型与理论构型吻合度较高。连续体沿轴向上两构型间存在偏差,偏差较大处位于各节的中间部分,在第一节的中间位置 120 mm 处偏差最大为 5.6 mm,第二节的中间位置 360 mm 处偏差最大为 6.2 mm。但在各节的首尾即前后节连接处误差很小,特别在末端位置两个构型间的误差仅为 0.8 mm,能够保证末端对目标检测位置的准确定位和扫查。

连续体机器人检测实验与分析如图 6 所示。

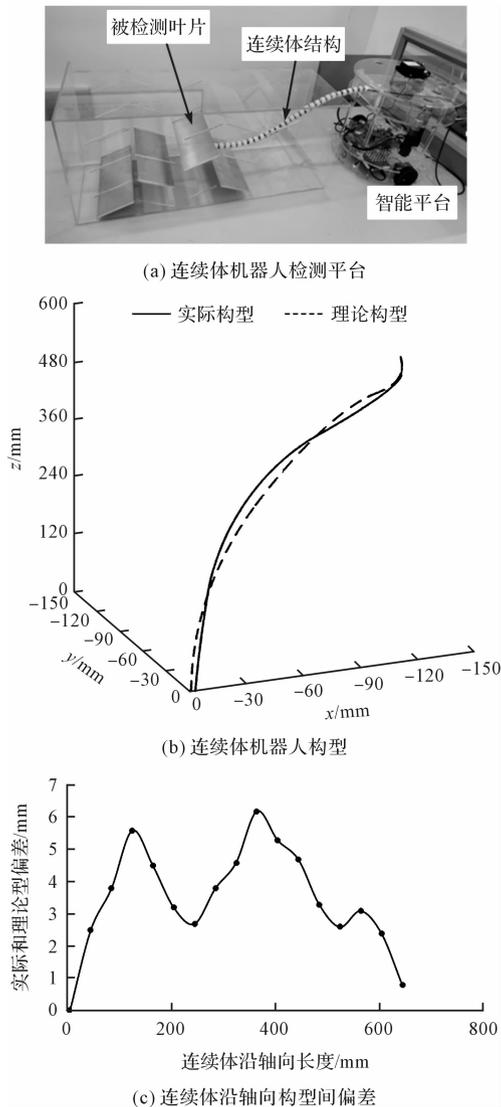


图 6 连续体机器人检测实验与分析

从图 6 可以看出:连续体机器人运动学建模方法正确,仿真结果符合实际工况,保证了末端执行器较高的定位精度。

4 结束语

针对航空发动机压气机内部空间封闭、狭长的特点,本文设计了一种用于航空发动机原位检测的冗余自由度柔性连续体机器人。

该连续体机器人采用交错双芯柱结构,有效克服了容易扭曲的问题;采用了不同弹性材料作为芯柱,使初始变形量减小了 36.7%;采用变芯柱长度结构,满足了连续体机器人各节灵活性的差异需求;对机器人正反运动学进行了分析,进行了工作空间和运动的仿真分析,进行了发动机检测实验。

仿真和实验结果表明:所设计的连续体机器人轨迹精度高,能够准确进给并扫描检查出发动机叶片缺陷,实现航空发动机原位检测。

参考文献(References):

- [1] 郑连兴,任仁良. 涡轮发动机飞机结构与系统(AV)[M]. 北京:兵器工业出版社,2006.
- [2] 章文治,王进明. 某系列发动机高压压气机第2、3级静转子相磨的内窥检查技术[C]. 陕西省第十二届无损检测年会,延安:中国机械工程学会陕西省无损检测学会,2010.
- [3] 孙立宁,胡海燕,李满天. 连续型机器人研究综述[J]. 机器人,2010,32(5):688-694.
- [4] 刘浩. 导管机器人系统的建立及其关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2010.
- [5] ZHAO J, FENG B, ZHENG M H, et al. Surgical robots for SPL and NOTES: a review. [J]. **Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies Mitat Official Journal of the Society for Minimally Invasive Therapy**, 2015, 24(1):8-17.
- [6] XU K, ZHAO J, FU M. Development of the SJTU unfoldable robotic system (SURS) for single port laparoscopy[J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 2014, 20(5):2133-2145.
- [7] NIU G, LI Tai wen, WANG Li. Design and realization of the inspection robot for aircraft fuel tank[J]. **Hydromechanics Engineering**, 2012,40(12):37-42.
- [8] 王维娟. 飞机油箱检查机器人结构及运动学研究[D]. 天津:中国民航大学电子信息与自动化学院,2013.

(下转第 528 页)

本文引用格式:

向立清,鞠锋,齐飞,等. 用于航空发动机原位检测的连续体机器人运动研究[J]. 机电工程,2019,36(5):464-469,528.

XIANG Li qing, JU Feng, QI Fei, et al. Kinematics research of continuum robot for in-situ detection of aero-engine[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(5):464-469,528.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>