

引用本文:李美丽,崔卫星,牛亮,等.基于FBG的机器人腕部三维力感知传感器设计[J].光通信技术,2026,50(3):84-88.

基于FBG的机器人腕部三维力感知传感器设计

李美丽,崔卫星,牛亮,冯元

(重庆移通学院,重庆 401520)

摘要:针对协作机器人空间三维力感知决策难题,设计了一种基于光纤布喇格光栅(FBG)的机器人腕部三维力感知传感器。该传感器采用4根FBG环形布置与1根预应力FBG中心布置的结构,结合自微分补偿法建立感知模型及温度解耦算法,并通过有限元仿真验证了可行性;搭建了三维力标定平台进行实验测试。实验结果表明:传感器能有效捕捉三维力变化,径向感知灵敏度为43 pm/N,轴向力感知灵敏度为0.584 89 pm/N,且具备良好的抗蠕变性能。

关键词:光纤布喇格光栅;多维力测量方法;腕部力传感器;温度解耦

中图分类号:TN256;TP212 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)03-0084-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.03.014

Design of 3D force sensing sensor for robot wrist based on FBG

LI Meili, CUI Weixing, NIU Liang, FENG Yuan

(Chongqing College of Mobile Communication, Chongqing 401520, China)

Abstract: To address the challenge of three-dimensional (3D) force sensing and decision-making for collaborative robots, a 3D force sensor for robotic wrists based on fiber Bragg gratings (FBG) is designed. The sensor employs a configuration consisting of four FBGs arranged in a ring and one prestressed FBG positioned at the center. A sensing model and temperature decoupling algorithm are established using the self-differentiation compensation method, and the feasibility of the design is verified through finite element simulation. A 3D force calibration platform is constructed for experimental testing. The experimental results demonstrate that the sensor can effectively capture 3D force variations, with a radial sensitivity of 43 pm/N and an axial sensitivity of 0.584 89 pm/N, and exhibits excellent creep resistance.

Key words: fiber Bragg grating, multidimensional force measurement method, wrist force sensor, temperature decoupling

0 引言

随着控制科学与新型复合材料技术的飞速发展,协作机器人作为一种具备优异柔性与环境适应能力的新型仿生机器人,在工业制造与人机交互领域展现出广阔的应用前景。为了进一步提升协作机器人的环境感知精度与交互决策能力,开发能够协助机器人进行空间三维力感知的高性能传感设备已成为关键

需求^[1-2]。目前,协作机器人的力感知技术主要包括图像处理、传统力传感器、电磁技术以及基于力学模型的方法等^[3-4]。然而,现有技术方案仍存在显著局限:图像处理方法依赖视觉采集设备反演接触力,易受环境光照、接触区域遮挡与纹理特征影响,三维力解算精度受相机分辨率制约,且存在视觉传输与计算延迟,动态响应能力不足,难以适配高速作业的实时力感知需求;基于力学模型的方法通过关节力矩反推末端接触力,感知精度高度依赖机器人动力学模型的标定精度,易受关节摩擦、传动间隙与惯量耦合的干扰,负载动态变化时误差显著增大,长期作业下模型漂移会导致感知精度持续衰减;传统力传感器虽技术成熟,但因其体积庞大、成本高昂,难以满足协作机器人对轻量化与小型化的严苛要求^[5];电磁技术虽能提供力信息,但其粘接工艺复杂且分辨率较低,限制了其在高精度力感知场景下的应用效果。因此,亟需开发

收稿日期:2025-03-10。

基金项目:重庆教育委员会科学研究项目(KJZD-K202202401)资助;教育部供需对接就业育人项目(20230104156)资助。

作者简介:李美丽(1982—),女,重庆人,硕士,副教授,主要研究方向为光纤传感技术。主持和主研省部级教科研项目5项,编著通信类教材及专著5部,在核心期刊发表论文10余篇。



一种兼具小型化、高精度与强抗干扰能力的新型力感知技术。

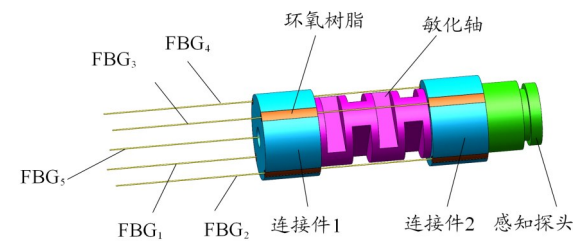
光纤布喇格光栅(FBG)传感器凭借其对温度和应变具有较高的敏感性,为解决上述问题提供了理想方案。其基本原理是当传感器受到外力作用时,FBG发生形变导致中心波长漂移,从而实现对外力的精确感知。FBG传感器具有轻量、小体积、快速响应及高灵敏度等显著优势,且能够有效抵御电磁干扰,非常契合协作机器人在复杂电磁环境下进行实时力感知的需求^[6-8]。尽管已有学者开展了相关研究,但在三维力解耦精度、温度交叉敏感消除以及传感器结构的紧凑性方面仍有提升空间^[9-11]。

鉴于此,本文提出一种基于飞秒FBG(下文简称FBG)技术的机器人腕部三维力感知传感器,旨在有效解决协作机器人的三维力感知难题。

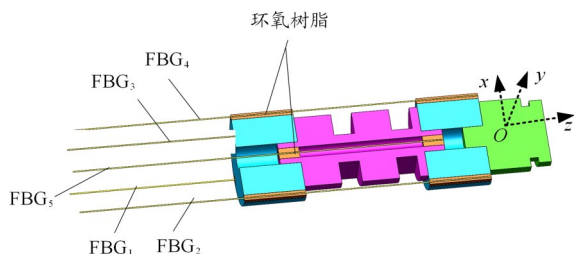
1 三维力感知传感器结构及原理

1.1 结构设计

本文设计的三维力传感器结构如图1所示。该传感器主要由以下几部分组成:2个圆柱形金属连接件、1个敏化轴、1个感知探头以及5根FBG。其中,敏化轴用于感知空间三维力,其增敏结构采用镂空轴设计;感知探头通过螺纹与连接件1固定,敏化轴尾端则与连接件2固定连接。传感器最大外径为25 mm,整体长度为75 mm,FBG直径为0.24 mm。4根预应力FBG布置在连接件的凹槽内,两端采用环氧树脂粘接固定。为简化制作工艺,测量轴向力的FBG悬空布置



(a) 传感器详细配置图



(b) 传感器剖视图

图1 传感器结构

于2个金属圆柱体的轴心位置,两端通过热固性环氧树脂固定,尾部光纤从孔中引出并连接至FBG解调设备。

1.2 三维力感知原理

基于本文所设计的传感器结构,空间力被分解为径向力(F_x, F_y)和轴向力 F_z 。首先,利用伯努利-欧拉梁理论,推导各方向受力与FBG变形之间的关系;其次,根据变形量计算FBG应变;最后,结合应变数据与温度解耦算法,建立力感知模型。

1.2.1 FBG纤维变形

在本文所提传感器中, F_x, F_y 和 F_z 各分力作用机制不同: F_x 和 F_y 使FBG发生弯曲变形,而 F_z 导致FBG发生轴向压缩或拉伸。通过叠加上述变形,可获得FBG在空间力作用下的总变形量。

在外力作用下,传感器敏化轴发生变形,引起预应力FBG的拉伸或压缩,从而导致其预应变增大或减小。鉴于FBG布置的对称性, F_x 和 F_y 作用下的光栅变形特征相似,因此本文仅以径向力 F_x 为例建立力学模型。将敏化轴简化为悬臂梁,假设其与左端圆柱形金属件的端面固定,则敏化轴中性面的转角 $\Delta\theta$ 的计算公式为

$$\Delta\theta = \frac{FL + M}{K} = \frac{F_x d}{K} \quad (1)$$

式中: L 为施力点与固定端面之间的距离, F 为施加力, d 为敏化轴的直径, M 为作用于敏化轴的等效力和力矩, K 为敏化轴抗弯刚度。

由于FBG₁和FBG₃位于中性表面,因此FBG的应变很小。FBG₂与FBG₄同时距离中性面 $d/2$ 。其在径向力作用下弯曲变形的计算公式为

$$\Delta x_{r_FBG_2} = \frac{F_x ld}{2K} \quad (2)$$

$$\Delta x_{r_FBG_4} = -\frac{F_x ld}{2K} \quad (3)$$

对轴向力作用下FBG压缩变形计算:力传感器的组件相当于弹簧。压缩FBG的轴向刚度和感知区对FBG的变形有影响,FBG₅压缩变形定义的计算公式为

$$\Delta x_{a_FBG_5} = \frac{F_z}{K} \quad (4)$$

1.2.2 FBG应变

在三维力作用下,FBG的应变 $\Delta\epsilon_{FBG_i}$ 计算公式为

$$\Delta\epsilon_{FBG_i} = \frac{(\Delta x_{r_FBG_i} + \Delta x_{a_FBG_i})}{L} \quad (5)$$

式中: $i=1,2,3,4$ 。

基于中心波长漂移与环境温度及FBG轴向应变

李美丽,崔卫星,牛亮,等:基于FBG的机器人腕部三维力感知传感器设计

之间的耦合关系^[12],并结合式(5),可建立温度、应变与中心波长漂移量之间的映射模型。其中,第*i*根FBG的中心波长漂移量 $\Delta\lambda_{\text{FBG}_i}$ 计算公式为

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{FBG}_i}}{\lambda_{\text{FBG}_i}} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\varepsilon_{\text{FBG}_i} \quad (6)$$

式中: α_f 为光纤基材的热膨胀系数, ξ 为光纤的热光系数, ΔT 为传感器所处环境的温度变化量, P_e 为光纤的有效弹光系数。

基于自微分补偿法,得到径向力感知温度解耦算法如下:

$$\Delta S_x = \frac{1}{2}(\Delta\lambda_{\text{FBG}_1} - \Delta\lambda_{\text{FBG}_3}) \quad (7)$$

$$\Delta S_y = \frac{1}{2}(\Delta\lambda_{\text{FBG}_2} - \Delta\lambda_{\text{FBG}_4}) \quad (8)$$

式中: ΔS_x 、 ΔS_y 分别为*x*、*y*方向温度解耦后的等效中心波长位移。

为了得到轴向波长位移,消除径向力 F_x 和 F_y 对 FBG_5 中心波长位移的影响,波长变化的修正值公式如下:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_x = \Delta\lambda_{\text{FBG}_5} - K\Delta S_x \\ \Delta\lambda_y = \Delta\lambda_{\text{FBG}_5} - K\Delta S_y \end{cases} \quad (9)$$

2 仿真分析

本文采用ANSYS对所设计的传感器进行三维力有限元仿真。传感器详细参数如表1所示。

表1 材料详细参数

部件	材料	杨氏模量	泊松比	密度/(kg/m ³)
光纤	硅	80	0.3	2 500
胶	环氧树脂	10	0.35	1 200
金属件	304不锈钢	193	0.3	7 930

仿真中固定传感器一端,并在感知区域分别施加径向与轴向载荷。载荷模拟范围均为-100~100 N,步长为20 N,旨在对比不同受力方向下的应变响应特性,结果如图2和图3所示。

从图2(a)、图3(a)可以看出,在径向力 F_x 作用下得益于结构的对称性,应变主要集中于中间敏化轴区域,具体表现为 FBG_2 和 FBG_4 产生显著应变,而位于中性层的 FBG_1 和 FBG_3 应变极微。理论上中性层应变应为零,但由于FBG并非理想的一维线状结构,实际存在可忽略不计的微小应变。线性拟合结果表明,该方向上FBG应变与外力呈良好的线性关系,径向感知灵敏度高达35.926 $\mu\text{e}/\text{N}$ 。

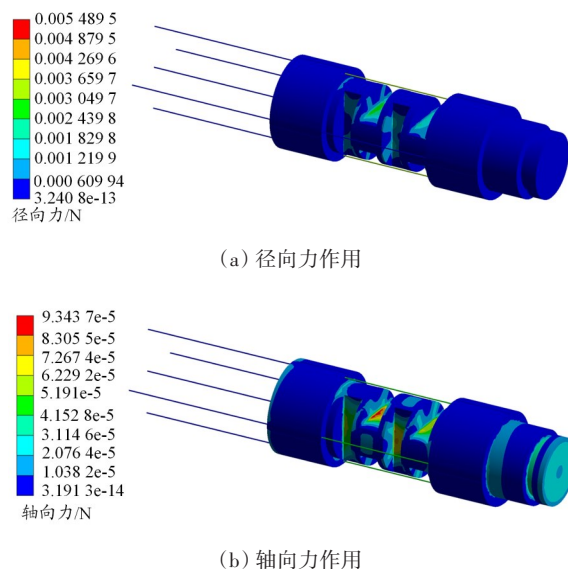
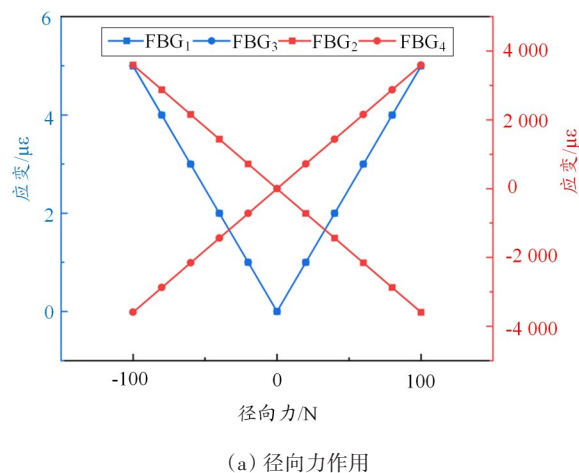
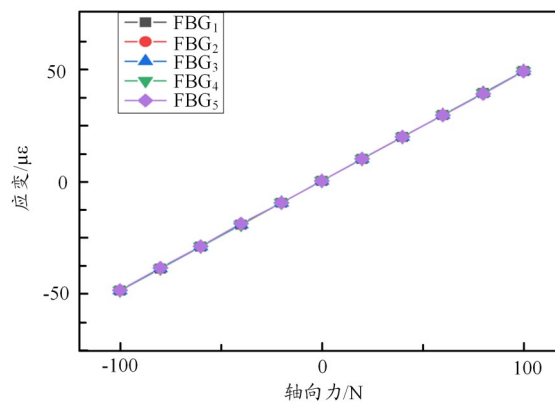


图2 100 N径向力、轴向力作用下的传感器应变云图



(a) 径向力作用



(b) 轴向力作用

图3 径向力、轴向力作用下FBG应变与力关系图

从图2(b)、图3(b)可以看出,在轴向力 F_z 作用下,传感器整体发生均匀形变,5根FBG呈现出一致的应变响应状态。

3 实验验证

3.1 应变灵敏度标定平台搭建

为对传感器三维力感知灵敏度进行详细标定,本文搭建了三维力加载平台,如图4所示。该平台主要由固定台、加载架、含5根FBG的传感器、解调器、钢丝绳及砝码组成。

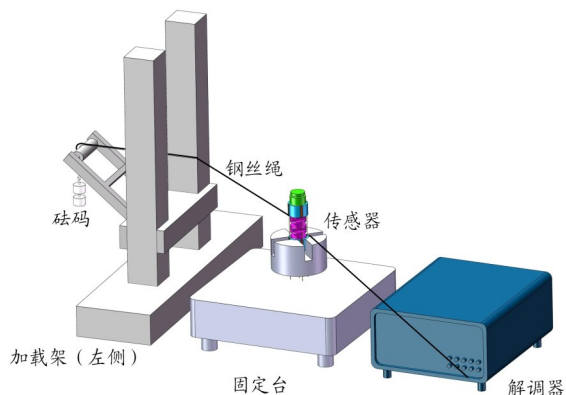


图4 三维力感知传感器标定实验平台

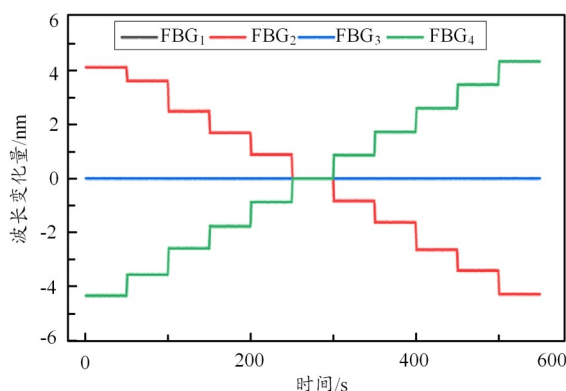
实验过程如下:首先,调整加载架(左侧)的高度使其与传感器持平,通过细钢丝绳一端连接感知探头,另一端悬挂砝码进行加载。为进一步测量传感器对三维力的响应灵敏度,调整加载架定滑轮高度,使钢丝绳与水平面呈 30° 。在此配置下,垂直悬挂砝码时,传感器探头同时受到切向力和轴向力作用,其中轴向力分量为砝码重力的 $1/2$ 。

径向力标定范围为 $-100\sim 100\text{ N}$,步长为 20 N ,每次加载后的稳定挂载时间约为 50 s 。加载顺序为:先在传感器左侧悬挂砝码进行正向加载,满量程后依次递减卸载;待左侧卸载完毕后,将加载架调整至传感器右侧悬挂砝码进行反向加载。加载过程中,由解调器记录FBG的波长漂移值,并取每次加载后 1 min 内稳定波长值的平均值,作为对应载荷下的波长漂移量,以确保标定数据的准确性与可靠性,为后续数据分析及模型建立提供依据。

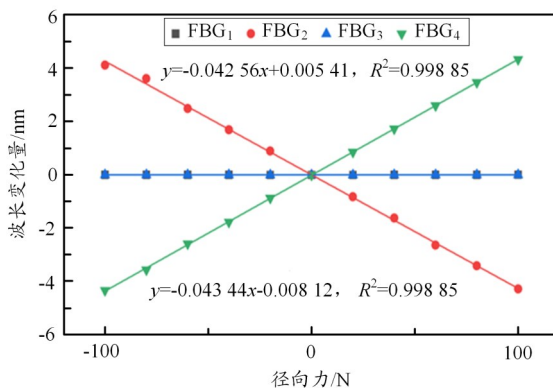
在轴向力标定实验中,拉伸测试通过每次增加 40 N 砝码进行;压缩测试则直接在探头处放置不同质量的砝码完成标定。

3.2 径向力标定结果

径向力加载下用于径向力感知的4根FBG的波长变化量随时间变化的情况如图5(a)所示。可以看出,波长变化量呈现阶梯式变化趋势,表明传感器具有良好的力感知稳定性。波长变化量与径向力的关系曲线如图5(b)所示。可以看出,实验结果与理论分析一



(a) 波长变化量与时间的关系



(b) 波长变化量与径向力的关系

图5 径向力标定图

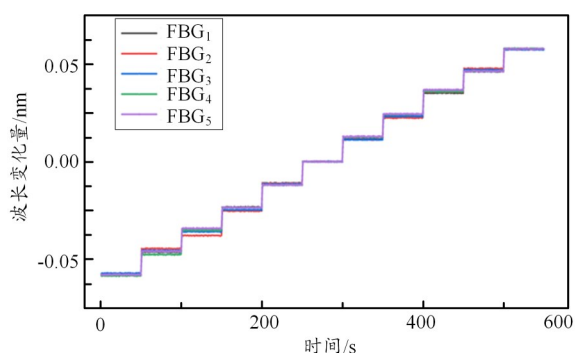
致:FBG₁和FBG₃的波长基本无波动,而FBG₂和FBG₄的波长呈反向变化。其中,FBG₂的线性拟合方程为 $y = -0.04256x + 0.00541, R^2 = 0.99885$;FBG₄的拟合方程为 $y = 0.04344x - 0.00812, R^2 = 0.99980$ 。基于拟合结果,传感器对径向力的感知灵敏度约为 43 pm/N 。该指标在同尺寸、同量程($\pm 100\text{ N}$)的小型化FBG腕部三维力传感器中处于优良偏上水平,径向增敏效果突出。

3.3 轴向力标定结果

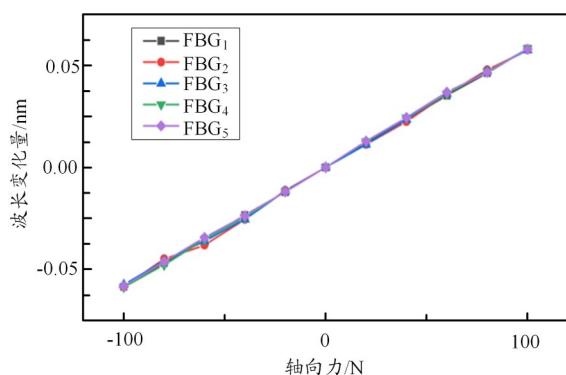
轴向力加载下5根FBG波长随时间的变化情况如图6(a)所示。可以看出,在轴向力作用下,5根FBG同时受拉伸,波长变化基本一致,表面传感器在监测轴向力时具备良好的鲁棒性。波长变化量与轴向力的关系曲线如图6(b),根据径向力消除和温度解耦公式可以得出传感器轴向力感知灵敏度为 0.58489 pm/N 。

3.4 抗蠕变测试

由于三维力感知传感器集成于连续作业机器人腕部,需执行长期监测任务,因此要求其具备良好的抗蠕变性能。鉴于FBG布置的对称性,本实验主要针对轴向力 F_z 进行抗蠕变测试。实验中,首先将传感器



(a) 波长变化量与时间的关系



(b) 波长变化量与轴向力的关系

图6 轴向力标定

固定于静止状态约3 min;随后调整加载台,使钢丝绳与水平面夹角为 30° ,施加100 N载荷并保持100 min;最后卸载至初始状态。FBG解调器以5 Hz的频率采集波长数据。抗蠕变测试结果表明,波长在加载初始阶段略有波动;放大加载稳定后的波形可见,各FBG波长波动范围为 ± 3 pm,处于解调器的误差允许范围内。实验结果证明,该传感器具有良好的抗蠕变性能。

4 结束语

本文提出了一种基于FBG的机器人腕部三维力感知传感器,通过在敏化轴环向布置4根预应力FBG实现径向力感知,并在中心悬空布置1根预应力FBG用于轴向力感知。针对环境温度干扰,采用自微分补偿法建立径向力感知模型与温度解耦方法,构建了完整的三维力感知体系,确保传感器在保持高分辨率的

同时具备优异的温度鲁棒性。ANSYS仿真验证了理论模型的正确性;标定实验结果表明,传感器径向力与轴向力感知灵敏度分别为43、0.584 89 pm/N,具有优异的线性度与增敏效果。该设计结构紧凑、便于集成于连续作业的协作机器人,能实现高精度三维力解算,具备良好的灵活性与适应性,为协作机器人的智能化感知提供了可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] Goyzueta D V, Mamani J G, Espinoza E S, et al. Evaluation of a NUI interface for an explosives deactivator robotic arm to improve the user experience[C/OL]//HCI International 2021-Late Breaking Posters, 2021:293-298. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-90176-9_37.
- [2] 顾一丁. 智能感知机械手柔性触觉传感器的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2023.
- [3] 王飞文, 冯艳, 张华, 等. 光纤 Bragg 光栅触觉传感器研究进展[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(9): 1-4, 8.
- [4] Khatib O, Yeh X, Brantner G, et al. Ocean one: a robotic avatar for oceanic discovery[J]. IEEE Robotics Automation Magazine, 2017, 23(4): 20-29.
- [5] 张军, 王郁赫, 任宗金, 等. 考虑角度偏差的压电三维力传感器标定[J]. 光学精密工程, 2023, 31(17): 2546-2554.
- [6] 褚文敏, 周崩, 滕利臣. 基于分布式三维力传感器的装配接触力测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 30-41.
- [7] 王永洪, 张明义, 张春巍, 等. 增敏微型FBG应变传感器设计[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(12): 78-79, 83.
- [8] Ding Hao, Bjoern M. Safe human-robot collaboration combines expertise and precision in manufacturing: a paradigm for industrial assembly in mixed environments[J]. Automatisierungstechnische Praxis, 2013, 55(10): 22-25.
- [9] 曾剑涛, 王勇, 江国权, 等. 柔性三维力传感器的研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(15): 268-278.
- [10] 周山, 刘利平, 高建宇, 等. 三维力传感器静态解耦方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 181-187.
- [11] 王文冉. 机器人灵巧手指指尖高重复性三维力触觉感知系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- [12] Othonos A, Kalli K, Kohnke G E. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing[J]. Physics Today, 2000, 53(5): 61-62.