

文章编号:1001-5078(2024)09-01485-06

· 光纤传感及光通讯技术 ·

基于多 FBG 组合传感的机械臂外部干扰 应力监测系统

王春霞¹, 刘云朋²

(1. 焦作大学 机电工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 焦作大学 人工智能学院, 河南 焦作 454000)

摘要:为了解决机械臂工作过程中外部应力干扰导致装配位置偏差的问题,设计了一种基于多光纤光栅传感器组合传感的监测系统。根据机械臂运动角度范围,仿真分析了在两个特征位置上不同方向外加应力后外机械臂与内机械臂的应力场分布特征。依据应力场分布特性,设计了多 FBG 的传感阵列,并计算了不同 FBG 响应与外部干扰应力的对应关系。实验采用 16 个 FBG 对 FS-MP1C 型小型机械的抓取过程进行在线监测,随机外部干扰应力设置为 2 ~ 20 N。16 个 FBG 的响应线性度均在 0.99 以上,正向和负向波长响应最大值分别为 1354 pm 和 -984 pm。在 100 次分层干扰测试中, X 与 Y 轴向干扰应力检出率优于 80.0%, Z 轴向干扰应力检出率优于 97.5%。系统平均误检率低于 4.0%。可见,本设计可以在线完成外部干扰应力的实时监测,具有一定的实用价值。

关键词: 光纤光栅; 干扰监测; 组合传感; 机械臂控制

中图分类号: TN911; TH74 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.09.021

Robotic arm external interference stress monitoring system based on multi-FBG combined sensing

WANG Chun-xia¹, LIU Yun-peng²

(1. Collage of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaozuo University, Jiaozuo 454000, China;

2. Collage of Artificial Intelligence, Jiaozuo University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to solve the problem of assembly position deviation caused by external stress interference during the working process of the robotic arm, a monitoring system based on a combination of multiple fiber optic grating sensors is designed in this paper. Based on the range of motion angles of the robotic arm, the stress field distribution characteristics of the outer and inner robotic arms are simulated and analyzed after applying stress in different directions at two characteristic positions. Based on the distribution characteristics of the stress field, a multi-FBG sensing array is designed, and the corresponding relationship between different FBG responses and external interference stresses is calculated. The experiment used 16 FBGs for online monitoring of the gripping process of the FS-MP1C small machinery, with a random external interference stress set to 2 ~ 20 N. The response linearity of 16 FBGs is above 0.99, with maximum positive and negative wavelength responses of 1354 pm and -984 pm, respectively. In 100 layered interference tests, the detection rate of X -axis and Y -axis interference stress is better than 80.0%, and the detection rate of Z -axis interference stress is better than 97.5%. The average false detection rate of the system is less than 4.0%. It can be seen that this

基金项目: 河南省科技计划项目 (No. 232400411191) 资助。

作者简介: 王春霞 (1980 -), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为检测技术与自动化、集成电路设计技术。E-mail: wangchunxianuc@sina.com

通讯作者: 刘云朋 (1983 -), 男, 硕士, 教授, 研究方向为计算机技术。E-mail: liuyunpengnuc@sina.com

收稿日期: 2023-11-28

design can achieve real-time monitoring of external interference stress online, which has certain practical value.

Keywords: fiber Bragg grating; interference monitoring; combination sensing; robot arm control

1 引言

机器人、机械臂被广泛应用于工业生产、医疗、制造等领域^[1]。当装配时机械臂上出现外部应力干扰时,装配就会受到影响,甚至外部干扰会造成装配轨迹偏移,导致后续装配过程均存在偏差。为了解决该问题,设计外部干扰应力在线监测系统成为了一个研究热点^[2]。光纤传感技术非常利于解决此问题。首先,光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG^[3-5])材质轻、体积小,便于安装于各种机械臂内外侧;其次,FBG传感器不受电磁干扰,适用于电气环境复杂的工作环境;再次,多FBG的组合可以实现外部应力方向与大小的同时解调。

Yong-Lae^[6]采用5个FBG用于机器人手指结构的应力采集,指向应力分辨率可达0.01 N,用以补偿在执行繁重任务时出现的机器人关节变形的问題。Hoseok^[7]将FBG应用于微创机器人,其局部应力灵敏度可达0.5 N,可用于手术中的微应力差异监测。Pouya^[8]设计了一种双自由度的抓握和轴向监控系统,其应力响应精度为0.27 N,可实现横向力与轴向力的分解。刘智超等人^[9]提出了基于光纤光栅分布测试自由曲面的应力场变化,径向精度可达0.72 mm。次年将其应用于大型结构体的装配测试,校正后最大应变误差为0.24 mm,可通过多FBG传感数据重建装配耳片结构的应力场分布,结果与ANSYS仿真结果及Handscan扫描结果相似,并可通过其反馈径向装配位移偏差控制在0.17 mm以内^[10-11]。孟祥秋^[12]对插槽装配结构进行了分析,通过14个FBG完成了波长与位置偏差的标定测试,平均相对误差由于8.6%。于春荣^[13]针对锁孔结构装配进行了测试,获得了基于多FBG组合分析应力异常表达关系,与光学扫描测量相比的误差在10%以内。王景芝等人^[14]通过应力调节结构控制FBG形成梯度偏移谱,实现了拟合斜率0.98以上的应变响应反馈控制。本团队^[15-16]分别采用不同的光纤传感网络对螺钉和轮轴结构进行了应力场检测,解算精度可达0.0123 mm/N。

综上所述,本文旨在利用多FBG组合检测的方式对装配机械臂工作过程中可能发生的外部应力干扰进行在线监测。通过不同FBG测试值的组合实

现对外部干扰应力的方向与大小进行识别,从而为装配位姿与轨迹的修正补偿提供准确的数据支撑,提高系统稳定性。

2 光纤传感数学模型

由于机械臂在每个关节臂上可以分解为三个方向上的位移分量,所以在每个局部臂上设计了环形FBG阵列,并定位在机械臂连杆周围。每条光纤同时驱动多个FBG,采用波分复用方式工作。设光纤传感器的感知长度为 L ,接触位置的作用力是 F ,接触的机械臂可以认为是静态刚体。当机械臂受到外部干扰时,光纤的弯曲导致轴向应变,从而使FBG中心波长发生偏移,形变过程如图1所示。

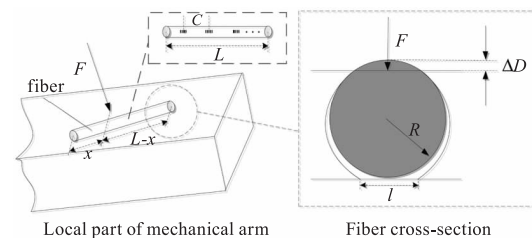


图1 局部装配位置上光纤传感器形变示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber optic sensor deformation at local assembly position

设应力 F 与FBG两端的距离分别是 x 和 $L-x$,半径为 R 的光纤在受到 F 作用后,垂向变形程度为 ΔD ,变形后实际接触面宽度为 l 。当设置FBG阵列中FBG的距离相等,均为 c 时,则外部干扰应力作用点两侧最近的FBG的力矩有:

$$\begin{cases} M_{\text{left}} = F(1 - \frac{x}{L})(x - \frac{c}{2}) \\ M_{\text{right}} = Fx(1 - \frac{x}{L} - \frac{c}{2L}) \end{cases} \quad (1)$$

为了避免光纤传感器产生非弹性形变,传感器连接位置采用金属基板封装结构,使其最大偏转范围较小,从而保证测试过程是弹性过程。根据胡克定律,光纤上的弯曲应力与弯曲应变有关。已知感知光纤横截面是圆形的,以应力作用于左侧时为例(右侧同理),故光纤弯曲的纵向应变可表示为:

$$\varepsilon = \frac{32M_{\text{left}}}{\pi ED^3} \quad (2)$$

其中, E 是杨氏模量; D 是光纤芯径的直径。由于纵向应变方程是抛物型的,因此最小应变在光纤末端的

FBG上。根据首个FBG位置为 $c/2$ 可知其应力为:

$$\epsilon_{\min} = \frac{8FLc - 6Fc^2}{\pi ED^3 L} \quad (3)$$

由此可以计算距离 x 处的等效应力值为:

$$F_{\max} = \frac{\pi e_{\max} ED^4 L}{8(Lc - 0.5c^2)(L^2 - 0.5c^2 - (L - 0.5c)^2)} \quad (4)$$

其中, e_{\max} 为光纤的最大挠度。该值可用于光纤传感单元最大偏转量的设定。当外部干扰达到该力值时, 光纤发生横向变形(如图1“虚线”内所示), 该变形通过泊松效应影响光纤的纵向变形。由此可计算测试位置的横向变形量有:

$$\Delta D = \frac{4F}{\pi c} \left(\frac{1}{E_i} - \frac{x^2}{E} \right) \ln \left(\frac{D}{l} \right)$$

其中:

$$l = \sqrt{\frac{2FD}{\pi} \left(\frac{1}{E_i} - \frac{x^2}{E} \right)} \quad (5)$$

其中, E_i 是光纤的横向模量。由此可见, 采用固定

材料的FBG传感器后, 纵向形变最终等效成外部应力 F 和测试位置 x 的二元函数。再通过预先设置的FBG分布位置计算 x 后, 就能得到关于应力 F 的唯一应变响应值。由此实现对外界干扰的精确反演, 并给出响应的修正, 从而提高系统抗干扰能力。

3 仿真分析与FBG分布设计

为了使机械臂在各个位置上受到外力时都能检测到相应的信号, 实现有针对性地对机械臂进行修正, 需要对机械臂不同位置状态时不同轴向的应用响应分布进行仿真分析。本文以小型机械臂的精密抓取装配过程为研究对象, 故仿真时选取机械臂外臂尺寸为 $6.0 \text{ cm} \times 6.0 \text{ cm}$, 内臂尺寸为 $4.5 \text{ cm} \times 4.5 \text{ cm}$, 悬臂范围 $60^\circ \sim 150^\circ$ 。外部干扰应力大小 100 N , 施加角度分别选用 x 、 y 和 z 轴三个方向。由于仿真图角度, 这里仅以 60° 与 120° 夹角为例, 给出对应三个轴向上应力场分布的结果, 如图2所示。其他角度测试结果分布趋势相近不再赘述。

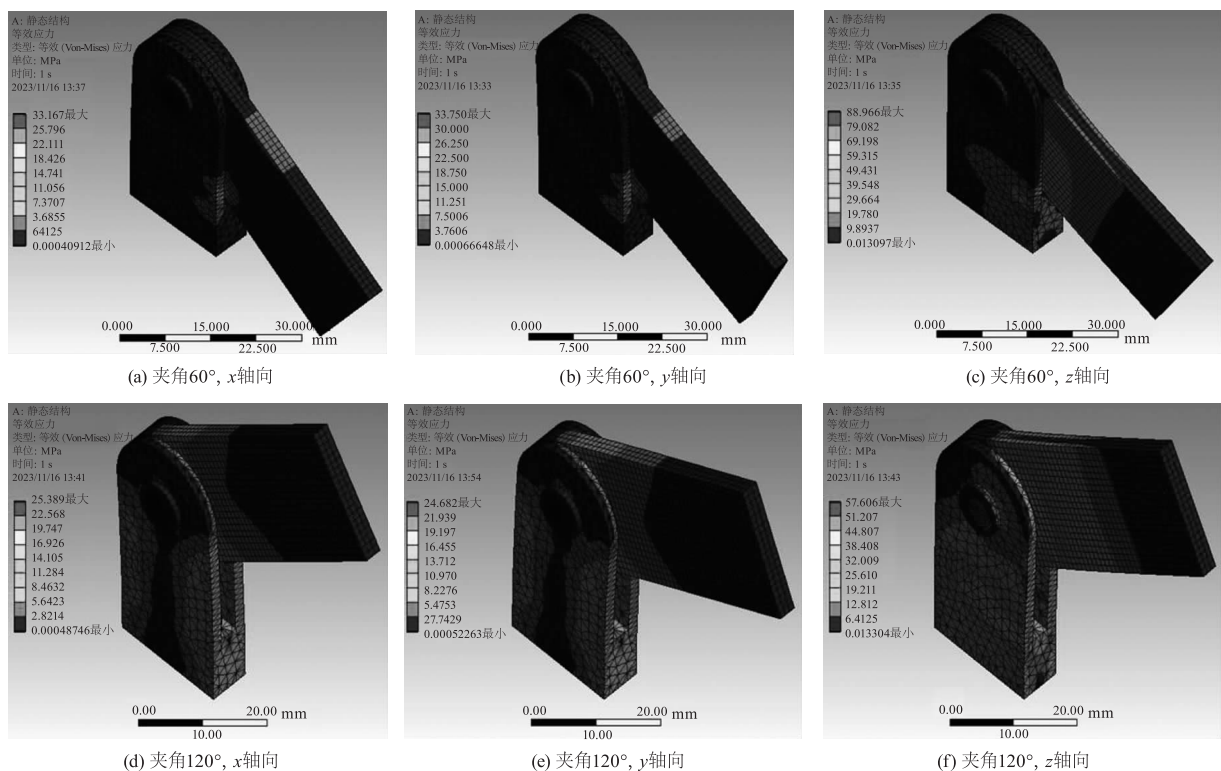


图2 不同角度在不同轴向上的应力响应分布

Fig. 2 Stress response distribution of different angles in different axes

测试过程中, x 轴和 y 轴方向分别是外臂与内臂交汇平面的正交的两个分量, 而 z 轴表示垂直于 xoy 平面的分量。故对三个不同方向的分析可以表征任意不同方向的外部应力干扰效果。对比图2(a)、图2(b)和图2(c)可知, 相同 100 N 的应力施加位置不

同, 其应力场分布区域不同, 最大应变值也不同。在 xoy 平面上, x 轴和 y 轴的应力响应相近, 而 z 轴方向的应力响应大约是它们的 $2 \sim 3$ 倍, 这一现象在两臂夹角 120° 时也可以看到, 故以不同状态中产生最大应力变化值的位置作为FBG应力场测试的上限标定依

据。对比图 2(a)和图 2(d)、图 2(b)和图 2(e)、图 2(c)和图 2(f)可知,不同夹角时应力分布区域差异明显,该分布可以指导 FBG 传感器的布设位置。外机械臂从左到右布置 3 层 FBG,从对应位置上 FBG 的响应强度就能分析得到应力场的区域与强度,从而反演外部干扰应力的施加方向与强度,从而为机械臂装配校正轨迹提供补偿。相比之下,内机械臂采用 2 层 FBG 分布就能够完成外应力位置与强度的反演。基于此的分布设计如图 3 所示。

$O_{11} \sim O_{33}$ 和 $I_{11} \sim I_{32}$ 分别表示外机械臂 (Out robotic arm) 和内机械臂 (Inner robotic arm) 上的 FBG 分布位置与序号,通过内外臂上 FBG 响应反演应力方向与强度。

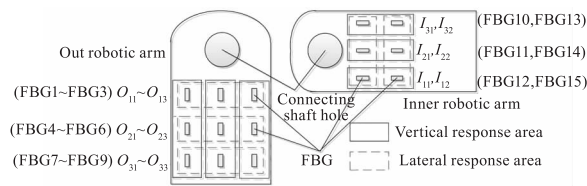


图 3 FBG 分布设计

Fig. 3 FBG distribution design

4 实验

4.1 实验条件

机械臂选用 FS-MP1C 型小型机械抓取目标,测试目标为方形标定块。光纤传感系统采用 ASE-1550 型扫频激光器,波长调制范围 30 nm,有效精度 0.01 nm;采用光开关分时驱动 2 路光纤,第 1 路光纤带 9 个 FBG 传感器,采用应力贴片结构固定于外机械臂。第 2 路光纤带 6 个 FBG 传感器,采用应力贴片结构固定于内机械臂。采用 FT-210 型解调模块完成回波信号提取,调制频率 100 Hz,分辨率 1.0 pm。搭建系统如图 4 所示。

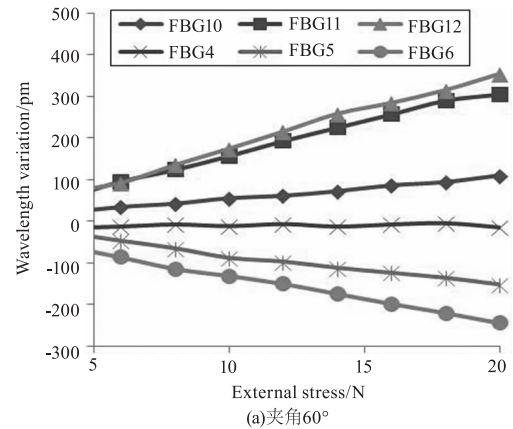


图 4 基于光纤传感的机械臂控制系统

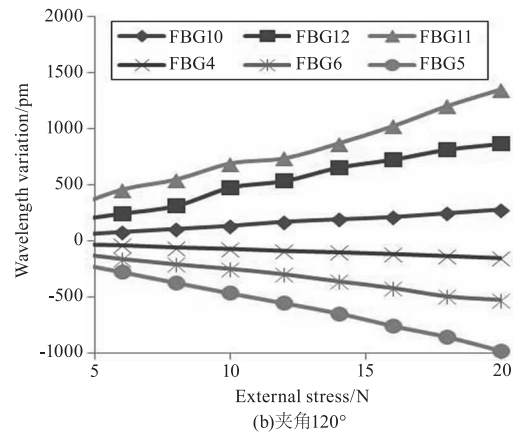
Fig. 4 Control system of robot arm based on fiber optic sensing

4.2 响应测试分析

在仿真实验中可以看出,同等外部干扰时对机械臂应力作用最明显的是沿 z 轴施加的侧向应力,故实验重点分析了侧向应力时各 FBG 的响应分布,并讨论了不同分布与在线修正之间的关系。实验中施加 2 ~ 20 N 的外部应力,统计各 FBG 的波长偏移程度并完成响应曲线拟合,测试结果如图 5 所示。



(a) 夹角 60°



(b) 夹角 120°

图 5 不同夹角下 FBG 响应强度测试曲线

Fig. 5 FBG response strength test curve at different angles

由于测试点 FBG 的数据量大,为了避免赘述,故以两臂上最具代表性的横向响应区内 FBG 测试值为例。如图 5(a)所示,当两个机械臂夹角 60°时,外臂上 FBG4、FBG5、FBG6 的响应呈递增趋势。FBG6 和 FBG12 分别为外臂与内臂的最敏感位置,其最大波长偏移分别是 -245 pm 和 354 pm。符号的不同表示了 FBG 在外臂与内臂上分别是挤压和拉伸的状态。FBG 4 ~ 6 和 FBG 10 ~ 12 的应力与波长响应曲线线性度分别是 0.9974、0.9961、0.9984、0.9982、0.9925、0.9909,可以看出在内臂上的 FBG 波长响应度的线性度更高,分析认为这是因为其应力信号更强,使其噪声干扰相对变弱。如图 5(b)所示,当两个机械臂夹角 120°时,外臂上 FBG4、FBG5、

FBG6 的响应呈递增趋势。FBG5 和 FBG11 分别为外臂与内臂的最敏感位置,其最大波长偏移分别是 -984 pm 和 1354 pm ,可以看出机械臂角度会对不同 FBG 的最大响应程度造成影响。符号的不同表示了 FBG 在外臂与内臂上分别是挤压和拉伸的状态,其 FBG 的线性度也符合内臂优于外臂的测试规律。而相比图 5(a) 和图 5(b) 时,相同外部应力作用时,夹角的大小对响应同样具有影响,这也是在已知夹角时可以反演外应力大小的计算依据。

4.3 检出率与误检率分析

为了验证系统对外界干扰应力的响应效率,对 100 次不同方向与强度的外力干扰进行分层测试,测试结果统计如表 1 所示。

表 1 外部干扰应力分层测试检出结果

Tab. 1 Detection results of external interference stress stratification test

方向	检出/次	检出率/%	误检/次	误检率/%
X 轴(30 次)	26	86.7	1	3.3
Y 轴(30 次)	24	80.0	1	3.3
Z 轴(40 次)	39	97.5	2	5.0
共计(100 次)	89	89.0	4	4.0

如表 1 所示,对 100 次测试采用分类分层的形式,X 轴和 Y 轴各占 30 次,Z 轴占 40 次。在相同测试时段检测出受到外界应力的次数为检出次数,其与真实发生次数的比值为检出率。X 和 Y 轴方向的检出率在 80.0% 以上,Z 轴检出率可达 97.5%,这是由于该轴向上外应力的响应最敏感造成的。相比之下,三个方向的误检率均值为 4.0%。由此,系统可以根据外力作用方向与大小作为对机械臂抓取路径得不偿失依据,修正机械臂的控制参数,从而保障抓取目标放置位置的准确度。本系统可以实现机械臂对随机外力干扰的修正补偿,从而提高智能装配过程的鲁棒性。

5 结论

本文设计了一种用于机械臂的外部干扰应力在线监测系统。通过在外机械臂与内机械臂上设置 3×3 , 和 3×2 的 FBG 阵列实时获取机械臂主体部分的应力场分布,并完成对外部干扰应力方向及大小的反演,从而提高装配精度与装配稳定性。实验测试了外部干扰应力在不同方向、不同大小情况下光纤传感网络的响应值,整个系统的应力与波长响

应曲线线性度优于 0.99,不同 FBG 序号及其响应值可以有效反演外部干扰应力的状态参数。由此可见,本系统可以很好地解决机械臂装配过程中随机外部干扰造成的装配偏差问题,具有一定的实际应用价值。

参考文献:

- [1] L Romeo, et al. Internet of robotic things in smart domains: applications and challenges [J]. *Sensors*, 2020, 20(12): 3355.
- [2] A Leal-Junior, et al. Smart textiles for multimodal wearable sensing using highly stretchable multiplexed optical fiber system [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 13867.
- [3] Singh, Puneet Kumar, Krishna, C. Murali, Continuum arm robotic manipulator: a review [J]. *Univers. J. Mech. Eng.*, 2014, 2(6): 193 - 198.
- [4] Berk Gonenc, et al. 3-DOF force-sensing motorized micro-forceps for robot-assisted vitreoretinal surgery [J]. *IEEE Sens. J.*, 2017, 17(11): 3526 - 3541.
- [5] Arnaldo Gomes Leal-Junior, et al. Hysteresis compensation technique applied to polymer optical fiber curvature sensor for lower limb exoskeletons [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2017, 28(12): 125103.
- [6] Yong-Lae Park, et al. Force sensing robot fingers using embedded fiber Bragg grating sensors and shape deposition manufacturing [C] // *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2007: 1510 - 1516.
- [7] Hoseok Song, Kiyoun Kim, Jungju Lee. Development of optical fiber Bragg grating force-reflection sensor system of medical application for safe minimally invasive robotic surgery [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2011, 82(7): 074301.
- [8] Pouya Soltani Zarrin, et al. Development of a 2-DOF sensorized surgical grasper for grasping and axial force measurements [J]. *IEEE Sens. J.*, 2018, 18(7): 2816 - 2826.
- [9] Wang Jianying, Liu Zhichao, Lin Xuezhu, et al. Fiber Bragg grating strain detection system for digital calibration [J]. *Laser Technology*, 2020, 44(5): 570 - 574. (in Chinese)
- [10] 王建颖, 刘智超, 林雪竹, 等. 用于数字化标定的光纤光栅应变检测系统 [J]. *激光技术*, 2020, 44(5): 570 - 574.
- [10] Yin Lixin, Liu Zhichao, Liu Chunhui. Surface structure state perception system based on FBG array [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2021, 48(24): 2406001. (in Chinese)

- 殷礼鑫,刘智超,刘春辉. 基于 FBG 阵列的曲面结构状态感知系统[J]. 中国激光,2021,48(24):2406001.
- [11] Chunhui Liu, Zhichao Liu, Lixin Yin. Fiber optic sensor array fork-lug flexible monitoring of large components [J]. Applied Optics,2021,60(30):9467.
- [12] Meng Xiangqiu, Yu Jinzhao, Wang Jie. Optical fiber sensor adjustment system for automated assembly process [J]. Semiconductor Optoelectronics,2020,41(4):578-581,586.
- 孟祥秋,于金召,王杰. 面向自动化装配过程的光纤传感调校系统[J]. 半导体光电,2020,41(4):578-581,586.
- [13] Yu Chunrong, Chen Hanmei, Chang Zhansheng, et al. Research on intelligent assembly correction system based on multi-FBG network[J]. Laser Technology,2022,46(3):374-378.
- 于春荣,陈寒梅,常占胜,等. 基于多 FBG 组网的智能装配修正系统研究[J]. 激光技术,2022,46(3):374-378.
- [14] Wang Jingzhi. Design of sliding detection system based on FBG array [J]. Laser & Infrared, 2020, 50(4):481-485.
- 王景芝. 基于 FBG 阵列的滑动探测系统设计[J]. 激光与红外,2020,50(4):481-485.
- [15] Wang Chunxia, LIU Yunpeng, Zhang Li. Design of an automatic assembly trajectory correction system based on optical fiber sensing [J]. Laser & Infrared,2022,52(12):1858-1862.
- 王春霞,刘云朋,张利. 基于光纤传感的自动化装配轨迹校正系统设计[J]. 激光与红外,2022,52(12):1858-1862.
- [16] Wang Chunxia, Liu Yunpeng. Intelligent assembly system of industrial production line based on optical fiber sensing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(10):214-219.
- 王春霞,刘云朋. 基于光纤传感的工业生产线智能装配系统[J]. 红外与激光工程,2022,51(10):214-219.