光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023081101

面向过程控制的光纤传感网络多状态监测系统

秦 颖，李居尚*

（长春电子科技学院，长春 130114）

摘 要： 为了实现对工业过程控制的实时监测与在线控制，设计了基于光纤传感网络的多状态监测与反馈控制系统。系统由扫频激光器、光纤解调模块、PC处理模块、光纤传感网络及状态控制单元组成。提出了一种多状态监控算法，将温度与应变的各点位FBG波长响应值进行权重组合，然后与4种常见的状态异常情况进行映射建模，再通过状态分析，给出反馈调整参数。实验采用罐内温度场与罐外应力场采集的方式，对应变0～5 000 με与温度30～150 ℃的在线检测进行标定。结果显示，校正后的应变灵敏度为0.49 pm/με，温度灵敏度为7.46 pm/℃。反馈控制对状态波动具有在线调整能力，不同异常类型的反馈时间不同。4种情况校正后的温度与应变波长偏差均小于±1 ℃和±50 με，验证了系统的可行性。

关键词： 光纤传感网络；过程控制；多状态控制；权重分配

中图分类号： TN98；TM406 **文章编号：** 1001－5868(2023)06－0950－05

Multi-state Monitoring System of Optical Fiber Sensor Network for Process Control

QIN Ying, LI Jushang

(Changchun College Of Electronic Technology, Changchun 130114, CHN)

Abstract: In order to realize real-time monitoring and online control of industrial process control, a multi-state monitoring and feedback control system based on optical fiber sensor network was designed. The system was composed of frequency sweep laser, fiber demodulation module, PC processing module, fiber sensor network and state control unit. A multi-state monitoring algorithm was proposed, which combined the FBG wavelength response values at each point of temperature and strain with weights, and then mapped to model four common state anomalies, and then gave feedback adjustment parameters through state analysis. In the experiment, the temperature field inside the tank and the stress field outside the tank were collected, and the online detection of the strain 0～5 000 με and the temperature 30～150 ℃ was calibrated. The results show that the corrected strain sensitivity is 0.49 pm/με and the temperature sensitivity is 7.46 pm/℃. The feedback control has the ability to adjust the state fluctuation online, and the feedback time of different abnormal types is different. The deviations of temperature and strain wavelengths after correction in four cases are between ±1 ℃ and ±50 με, respectively. The feasibility of the system is verified.

Key words: optical fiber sensor network; process control; multi-state control; weight distribution

收稿日期：2023－08－11.

基金项目：国家自然科学基金项目(61703056).

* **通信作者：**李居尚 **E-mail：** qinying19780904@sina.com

0　引言

在工业中，过程控制是将压力、温度、流量、液位等工艺参数以被控变量的形式进行自动调节的控制过程[1]。在化工、冶金等领域，通常由多个环节共同组成，每个环节的状态参数都会对生产过程产生影响，对工业过程的在线监测与反馈控制是十分必要的，尤其是工业过程复杂、工艺环节精密等的生产装备。传统设备层的过程控制主要采用电控传感器实现，在简单工业生产或工艺过程中是可行且易实现的[2]。传统电控类传感器存在一定的安全隐患，并且金属导电结构易腐蚀、稳定性差。相比之下，光纤传感为无源传感，绝对安全，并且光纤材质耐腐蚀性强，具有更广泛的应用前景。

在工业过程温度检测中，铂热电阻、热释电类传感器具有稳定性好、精度高等优势，如 PT100[3] 等。但工业过程的部分环节中可能存在易腐蚀、易导电等问题，由此限制了很多传感器的应用。红外热成像设备可以非接触测量温度场分布，避免接触腐蚀及导电问题，但是对于需要获取锅炉、罐体内部温度场分布的需求无法满足。相比之下，光纤传感技术[4-7]采用光纤作为传输媒介，尺寸小、无源不导电、可分布式布设等，具有对工业过程监测的重要优势。Khan 等[8]提出了采用改进悬臂梁配合光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating，FBG[9]）的方式提高流体加速度测试精度，其在工业过程控制中流体流速测试方面具有很好的应用前景。Liu 等[10]采用神经网络优化算法对微波热过程进行建模，讨论了根据反馈参数控制热过程，其温度测试精度为 ±1.0 ℃。徐征宇等[11]将光纤传感网络布设于变压器罐体中，实现了变电过程在线状态的实时采集，目标位置温度测试精度优于 1.5 ℃。Kuang 等[12]采用应变 FBG 对罐体结构应力场进行监测，得到 1.26 μm/ε 的应变分辨率，可完成反应过程中罐体应力场的实时监测。刘智超等[13]将 FBG 网络应用于智能装配，实现了最小 20 με 的应变响应检测与反馈控制。

针对工业过程控制的特性，本文搭建了基于光纤传感的温度场与应力场状态数据监测与反馈控制系统，提出了一种基于测试数据不同贡献而赋不同权值的补偿算法，由此算法完成工业过程的反馈控制优化。本算法相比传统控制算法而言，可以根据测试值权重量自适应调节控制程度，更具灵活性。

1　系统设计

工业过程控制的主要参数包括温度、应变、压强、流速等。在本系统中，重点对温度分布与应变分布进行研究分析，实验测试以 JZC800 型过程控制设备为原型。为了获取过程控制设备中主要罐体及输送管道的温度动态变化规律，采用 FBG 网络嵌入式布设实现。而对于重点连接位置等应力采样点，选择外部粘合布设方式实现，降低了应变定期标定校准的难度。总体系统如图 1 所示。

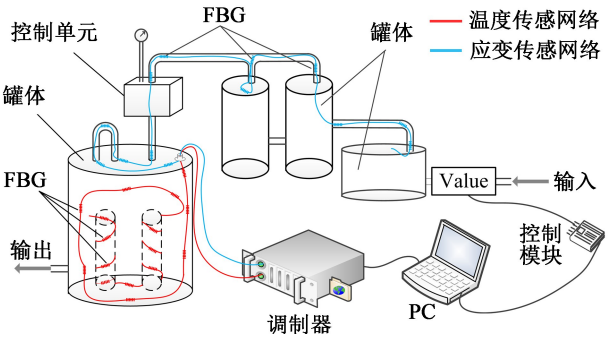


图 1　基于 FBG 传感网络的过程控制系统示意图

系统由传感模块、解调模块、处理模块及控制模块构成。传感模块由温度传感网络与应变传感网络构成，温度传感网络布设在测试罐体的内部，采用胶粘的形式固定于内壁及管道上。应变传感网络主要布设于罐体连接处和接口位置，从而可以更好地获取易受应力作用状态，该传感器采用外部粘合的方式固定。解调模块对 1 530～1 665 nm 范围的光信号进行解调，解调精度 ±1 pm，单点 FBG 带宽可调（由测试罐体温度与应力范围决定）。处理模块采用 PC 机完成，对解调数据进行分析，将状态反馈信息转化成过程控制指令发送给控制模块。控制模块包括输入端流速控制、反应罐体催化物料填量控制等，实现对工业过程的在线调控。

2　工作机理与算法设计

2.1　工作机理

光纤光栅结构在受到温度或应力作用时，结构形变导致波长偏移[14]。利用这种线性关系完成对结构状态的监测[15]。则波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 有：

$$\begin{cases}\Delta\lambda_B=[(\alpha_f+\xi)\Delta T+(1-p_e)\Delta\varepsilon]\lambda_B\\ \alpha_f=\dfrac{1}{\lambda}\dfrac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}T},\xi=\dfrac{1}{n}\dfrac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T},p_e=-\dfrac{1}{n}\dfrac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\varepsilon}\end{cases}\tag{1}$$

式中，λ_B 表示光纤光栅的初始中心波长，α_f 表示热

膨胀系数，表征温度对光纤光栅栅距变化的作用程度，ξ 表示热光系数，表征温度对光纤折射率的作用程度，p_e 表示弹光系数，表征应力对光纤折射率的作用程度。λ 表示波长，n 表示折射率，T 表示温度，ε 表示应变量。ΔT 和 $\Delta\varepsilon$ 表示温度与应变的变化量。当光纤材料选定时，式(1)中的变量仅剩 ΔT 和 $\Delta\varepsilon$，再通过温度补偿与应力补偿的方式，可以分别是温度 FBG 与应变 FBG 获取温度测试值与应力测试值，即：

$$\begin{cases}\Delta T=\dfrac{1}{(\alpha_f+\xi)}\cdot\dfrac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}+\Delta T_{补偿}\\ \Delta\varepsilon=\dfrac{1}{(1-p_e)}\dfrac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}+\Delta\varepsilon_{补偿}\end{cases}\tag{2}$$

其中，$\Delta T_{补偿}$ 和 $\Delta\varepsilon_{补偿}$ 可以通过测试前实验标定的方式获得。

2.2 多状态监控算法设计

在工业过程中，当目标区域的温度或应变超过或小于一定的阈值范围，就表明其反应过程或控制过程需要被调节，所以设置温度稳定范围(T_{min}，T_{max})和应变稳定范围(E_{min}，E_{max})，其中，T_{min} 和 E_{min} 表示正常状态的最小值，T_{max} 和 E_{max} 表示正常状态的最大值。当监测数据低于最小值时，驱动控制系统加速反应进程或补充催化剂等，使系统升温升压，反之，采用降温或限制流速等手段使过程参数回归正常范围。当两个参数中仅有一个参数变化时，根据具体的变化情况给出控制单元的相应指令，从而保证工业生产过程平稳。除此之外，还存在单一参数偏高或偏低的情况，此时需要根据 FBG 位置与状态参数偏差情况给出控制方式，故算法中将对两条 FBG 测试串的响应变化进行编码分析，即 $\Delta\lambda_{T1},\Delta\lambda_{T2},\cdots,\Delta\lambda_{Tm}$ 和 $\Delta\lambda_{E1},\Delta\lambda_{E2},\cdots,\Delta\lambda_{Em}$。由此可以建立多状态监控算法，以常见的四个工业过程状态量：液位(L)、催化配比(C)、流速(S)和搅拌速率(V)为例，控制过程如图 2 所示。

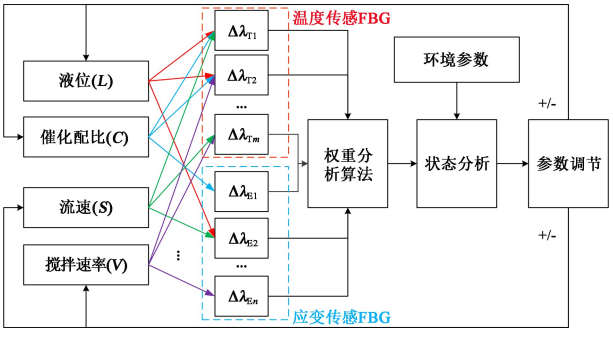


图 2 多状态监控算法

2.3 算法实现

四个状态量的监测结果可以通过各个 FBG 布设位置及方向反演得到，故四个状态量的映射是对应多个参数(如图 2 中测试量不同颜色箭头指向多个 FBG 测试波长变化值所示)。将测试数据导入权重分析算法中可以对不同 FBG 位置的测试结果进行综合分析，从而给出当前状态下的分析结果。算法实现步骤如下：

(1)设置参数初始化，将 L，C，S，V 的初值作为初始位置，设置迭代次数 l，令每个 t 时间采集 FBG 每个测试点位的波长变化量 $\Delta\lambda_{T1},\Delta\lambda_{T2},\cdots,\Delta\lambda_{Tm}$ 和 $\Delta\lambda_{E1},\Delta\lambda_{E2},\cdots,\Delta\lambda_{Em}$；

(2)每次采集标记对状态参数影响权重最大的三个子节点 $\Delta\lambda_1,\Delta\lambda_2,\Delta\lambda_3$，并更新该时刻对状态影响的权重值 $\rho_L,\rho_C,\rho_S,\rho_V$；

(3)计算该时刻权重值与标准过程中最优权重值的比率 k：

$$k=a_1\frac{\rho_L}{\rho_{Lbest}}+a_2\frac{\rho_C}{\rho_{Cbest}}+a_3\frac{\rho_S}{\rho_{Sbest}}+a_4\frac{\rho_V}{\rho_{Vbest}}\quad(a_1+a_2+a_3+a_4=1)\tag{3}$$

(4)以(T_{min}，T_{max})和(E_{min}，E_{max})作为边界条件，建立拟合模型，循环直至 $k=1$；

(5)将此时的状态调整控制参数发送给控制模块，实现对控制单元的在线控制。控制变化过程时，FBG 传感单元实时采集更新后的数据，保证整个过程是实时自适应的。程序流程图如图 3 所示。

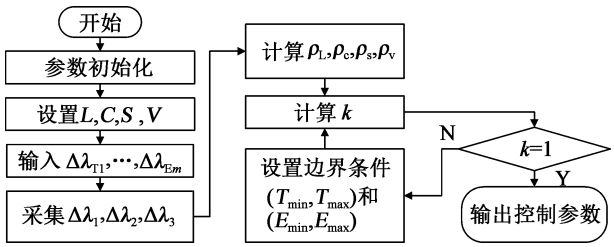


图 3 多状态监控算法流程图

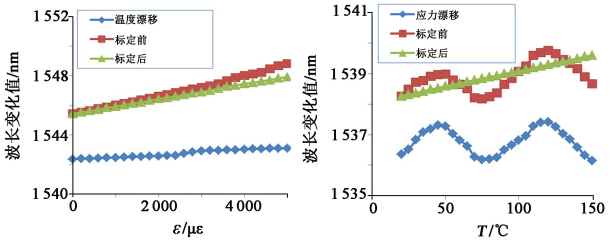
3 实验

实验针对 JZC800 型过程控制设备的状态变化进行监测与反馈控制。实验主要内容有两项：(1)完成系统中温度传感 FBG 网络的应变标定和应变传感 FBG 网络的温度标定，从而在解决交叉敏感问题的基础上实现对过程设备状态参数的实时获取，验证系统的实时监测性能；(2)通过人为加载额外热源与应力源的方式，测试系统对过程设备状态变化的自适应调节能力，验证系统基于测试数据的在线控

制性能。

3.1　温度与应变的标定

为了使应变 FBG 传感网络消除温漂的波长偏移干扰，采用温度标定的方式对应变 FBG 进行补偿。方法是在应变 FBG 位置放置温度传感器（实验中采用 TMP1826 型数字温度传感器，精度为±0.3 ℃），由于温敏元件不响应应变作用，故其可以为应变 FBG 提供稳定的温度监测对标数据，再根据式(1)的函数关系计算应变值。标定前后的 FBG 波长变化如图 4(a)所示。为了消除温度传感 FBG 中应变的交叉干扰，采用相同热敏材料但应变系数不同的 FBG 作为标定传感器（材料一致时，仅需改变 FBG 衬底厚度，即可实现应变系数的调整），对两组 FBG 进行波长变化差分计算获得应变偏移值，从而实现对温度测试的补偿。标定前后的 FBG 波长变化如图 4(b)所示。



(a) 温度补偿前后　　(b) 应变补偿前后

图 4　FBG 温度补偿与应变补偿曲线

如图 4(a)所示，数字温度传感器的测试曲线可以看出在整个应变加载过程中呈正向偏移，总波长变动幅度 891 pm。应变校正前的波长变化总量为 3 598 pm，校正后的波长变化总量为 2 599 pm，则通过温漂补偿后可以大幅降低温度偏移对温度监测精度的影响。标定后，应变传感单元灵敏度均值为 0.49 pm/με。如图 4(b)所示，加载的应变波动噪声振幅波动显著大于温度变化，在未校正前，温度响应曲线被应变响应曲线淹没。在通过校正 FBG 的数据差分后才能得到温度变化曲线，为一条斜率 10.23 pm/℃的直线。标定后，温度传感单元灵敏度均值为 7.46 pm/℃。说明加载峰值为 2 000 με 以内的应变波动就已经可以完全淹没温度传感信号，故采用差分补偿解算温度响应变化值是十分必要的。同时，也验证了标定后温度与应变的线性变化规律。

3.2　反馈控制测试

在系统测试模块能够准确地完成状态参数监测的基础上，为了验证基于测试数据的反馈控制性能，采用人为给定异常状态参数后，观察系统反馈控制效果的方式，对系统控制模块进行测试分析。共模拟测试了四种典型的状态异常情况：A、液位过高（位于主罐体中）；B、催化剂量偏大（位于催化配料箱）；C、流速过快（位于传输管）；D、搅拌不充分（位于反应罐）。四种异常参数均采用正常标准值的±30%作为初始状态参数值。每种状态条件下的取响应最敏感的 3 个 FBG 传感器求均值，则测试结果如表 1 所示。

在 A 情况下，主罐体内材料过多可能导致超出额定反应量，故模拟时采用比标准温度高 30%的初始温度设置（0 min 时的值，下文同理）。当温度传感 FBG 将罐体内部温度采集并传输给控制单元后，系统控制输入端降低输入量，在主罐体内材料消耗约 25 min 时，温度基本恢复正常。控制对输入量复原后，温度波动保持在±0.5 ℃以内。应变波动趋势与温度变化基本一致，误差在±30 με 以内。在 B 情况下，以 30%放热增量模拟由于催化效率提升导致的催化配料箱升温现象，由于反馈控制可以在测试温度超过阈值后及时降低配比，故仅在 10 min 左右即可达到箱体温度恢复正常。应变波动误差在±20 με 以内。在 C 情况下，以温度降低模拟流速过快造成的不充分反应，则管道位置上的温度传感 FBG 测试数据量会控制流速阀门降速，此过程基本在控速 5 min 时就能使过程温度达到正常值并趋于稳定，温度与应变误差在±0.5 ℃与±10 με 以内。在 D 情况下，以温度降低模拟搅拌不充分造成的反应物混合不均匀，从此反馈控制会使搅拌提速，约在 15 min 时温度与应变误差被反馈量消除，误差在±0.8 ℃与±35 με 以内。综合对比四种情况的测试与反馈控制结果可知，不同过程异常的反馈时间具有明显区别，也验证了采用不同 FBG 位置测试数据对状态异常编码控制是可行的。

表 1　不同情况下温度与应变状态参数反馈控制结果

Situation		Standard value	Real-time test temperature/℃							
			0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min
A	T/℃	58.5	76.1	75.3	69.2	65.5	62.4	56.4	58.8	58.1
	ε/με	1 500	1 950	1 883	1 624	1 589	1 537	1 471	1 517	1 523
B	T/℃	86.5	112.7	92.3	85.7	86.9	86.5	86.1	86.2	86.4
	ε/με	3 450	4 482	3 952	3 397	3 489	3 467	3 461	3 451	3 439
C	T/℃	48.5	34.1	47.8	48.3	48.5	48.1	48.3	48.0	48.1
	ε/με	950	671	942	953	956	948	951	953	952
D	T/℃	75.5	52.8	58.3	68.7	75.2	76.2	75.3	75.8	76.3
	ε/με	2 550	1 786	1 954	2 374	2 512	2 578	2 542	2 531	2 545

4 结论

本文提出了一种面向工业过程控制的光纤传感网络系统，其通过组合测量与差分标定等方式同时获取罐体温度与应变场，实现对状态参数的实时监测与反馈控制。实验分别完成了温度测试标定与应变测试标定，测试精度得到了很好的校正。同时，又对4种常见的状态异常进行了模拟测试，结果显示不同状态导致的温度与应变异常具有不同的调整时间，具有很好区分性。而无论哪种情况，在经过反馈控制以后都能使其恢复至标准值附近，温度与应变的误差符合设计需求。

参考文献：

[1] Skvortsov M I, Wolf A A, Dostovalov A V, et al. Distributed feedback fiber laser based on a fiber Bragg grating inscribed using the femtosecond point-by-point technique[J]. Laser Phys. Lett., 2018, 15(3): 35-103.

[2] Mulle M, Yudhanto A, Lubineau G, et al. Internal strain assessment using FBGs in a thermoplastic composite subjected to quasi-static indentation and low-velocity impact[J]. Composite Structures, 2019, 215(32): 305-316.

[3] 刘云鹏，田 源，姜 烁，等. 光纤护套材料在变压器油中的电老化特性研究[J]. 绝缘材料，2017，50(12)：54-59.
Liu Yunpeng, Tian Yuan, Jiang Shuo, et al. Study on electrical ageing characteristics of optical fiber sheath material in transformer oil[J]. Insulating Materials, 2017, 50(12): 54-59.

[4] 王景芝，刘智超. 一种可重构型相移光纤光栅传感系统[J]. 激光与红外，2019，49(6)：742-746.
Wang Jingzhi, Liu Zhichao. A reconfigurable phase-shifted fiber grating sensor system[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(6): 742-746.

[5] 董富宁，杨 庆，罗曼丹，等. 一种基于磁致伸缩效应和光纤光栅的电流传感器[J]. 光学学报，2022，42(8)：43-52.
Dong Funing, Yang Qing, Luo Mandan, et al. Current sensor based on magnetostriction and fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 43-52.

[6] 孙玲玉，刘长超，姜明顺，等. 基于光纤布拉格光栅阵列的铝合金疲劳裂纹预测方法[J]. 中国激光，2021，48(13)：155-165.
Sun Lingyu, Liu Changchao, Jiang Mingshun, et al. Fatigue crack prediction method for aluminum alloy based on fiber Bragg grating array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 155-165.

[7] 于璐瑶，赵 强，杜大伟，等. 膜片式带温补结构的光纤光栅压力传感器[J]. 光子学报，2022，51(3)：237-245.
Yu Luyao, Zhao Qiang, Du Dawei, et al. Diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with a temperature compensation structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3): 237-245.

[8] Khan M M, Panwar N, Dhawan R. Modified cantilever beam shaped FBG based accelerometer with self-temperature compensation[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2014, 205(1): 79-85.

[9] Leal-Junior A, Díaz C A R, Frizera A, et al. Simultaneous measurement of pressure and temperature with a single FBG embedded in a polymer diaphragm[J]. Optics & Laser Technol., 2019, 112(93): 77-84.

[10] Liu T, Liang S, Xiong Q, et al. Integrated CS optimization and OLS for recurrent neural network in modeling microwave thermal process[J]. Neural Comput. & Appl., 2020, 32(12): 12267-12280.

[11] 徐征宇，张书琦，廖和安，等. 传感光纤与变压器电磁线一体化技术[J]. 中国电机工程学报，2021，41(19)：6816-6826.
Xu Zhengyu, Zhang Shuqi, Liao Hean, et al. Integrated technology of distributed optical fiber and transformer electromagnetic wire[J]. Proc. of the CSEE, 2021, 41(19): 6816-6826.

[12] Kuang Y, Guo Y, Xiong L, et al. Packaging and temperature compensation of fiber Bragg grating for strain sensing: A survey[J]. Photonic Sensors, 2018, 8(4): 320-331.

[13] Liu Z C, Yang J H, Wang J, et al. Design of modified model of intelligent assembly digital twins based on optical fiber sensor network[J]. Digital Communications and Networks, 2022, 8648(22): 00135.

[14] 王英永. 一种用于电气设备状态监测的新式FBG传感器[J]. 激光与红外，2022，52(1)：51-56.
Wang Y Y. A new type of FBG sensor for condition monitoring of electrical equipment[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(1): 51-56.

[15] 周振宇，张钰民，孟凡勇，等. 面向电机测温的嵌套结构管式光纤光栅传感器[J]. 半导体光电，2021，42(2)：201-206.
Zhou Z Y, Zhang Y M, Meng F Y, et al. A nested structure tubular fiber Bragg grating sensor for motor temperature measurement[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(2): 201-206.

作者简介：

秦 颖(1978—)，女，硕士，副教授，主要研究方向：电子信息、无线通信等；

李居尚(1984—)，女，硕士，副教授，研究方向为电子信息工程、电子科学与技术。