

基于 FBG 应变传感器的隧道安全实时监测算法研究*

马洒洒, 王彬, 李川, 熊新, 刘辉

(昆明理工大学信息工程与自动化学院 昆明 650500)

摘要:讨论了埋入式光纤 Bragg 光栅应变传感器在某隧道施工期间的实际安全监测原理、布局和数据采集,在此基础上对同一截面上所采集的同步多维应变数据流进行了数据分析,给出了一种基于双重滑动窗口模型技术的异常数据实时诊断算法,该方法通过第 1 个滑动窗口将当前光纤 Bragg 光栅传感器应力数据与历史数据合并形成当前观测窗口数据,对每个观测窗口内的数据进行主成分分析,并提取其对应的特征向量,得到当前时刻的动态特征;接着采用第 2 个滑动窗口技术,将得到的当前时刻第一主成分特征向量与历史动态特征合并成为动态特征矩阵并展开相关性分析,最后通过计算相关系数的方差变化来判断数据的稳定性。现场的实际观测结果和对比实验结果证明该方法达到了更好的实时监测效果,同时该方法也为光纤 Bragg 光栅应变传感器在工程安全实时监测中的应用提供了有力支持。

关键词: 光纤 Bragg 光栅;隧道安全监测;同步多维数据流;滑动窗口

中图分类号: TH741 TP277 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Research on real-time monitoring algorithm for tunnel safety status based on fiber Bragg grating strain sensors

Ma Sasa, Wang Bin, Li Chuan, Xiong Xin, Liu Hui

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science & Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In this paper we discuss the tunnel safety monitoring principle, the monitoring system layout and data acquisition method using embedded FBG strain sensors in a certain practical tunnel construction project. Based on above discussion, the synchronous multidimensional strain data streams collected from the same cross section are analyzed, an abnormal data real-time diagnosis algorithm is proposed based on double slide window model technology. With the first sliding window, the current stress data gathered by the FBG sensors are combined with the historical data to form the current observation window data; then, principal component analysis is conducted on the data in every observation window, corresponding eigenvectors are extracted to obtain the dynamic characteristics of the present observation window. Next, the second sliding window is used to merge current dynamical observation vector into historical ones to get the dynamical feature matrix, and correlation analysis is performed. Finally, the variance of the correlation coefficient is computed, which is used as the criterion to judge the stability of the supervised data streams. Field observation report and comparison experiment result show that the proposed method achieves better real time monitoring effects. This method also provides a strong support for the application of FBG strain sensor in real-time engineering safety monitoring.

Keywords: fiber Bragg grating; tunnel safety monitoring; synchronous multidimensional data stream; slide window

1 引言

由于隧道在施工阶段时间跨度大、影响因素复杂,在各种荷载和外部环境作用下极易发生不同程度的变形,

进而形成安全隐患,因此施工阶段的变形监测和隧道结构的健康监测一直是国内外工程领域关注和研究的重点^[1]。目前隧道在施工中的健康监测手段主要通过通过对围岩顶部位移的监测来间接判断围岩内部是否发生异常变化。朱迎宇^[2]就天摩岭公路隧道中的围岩位移监测技术

展开了研究,并对监测结果进行分析以指导隧道的设计与施工;刘洋^[3]针对隧道的沉降位移问题对隧道和土体的相互作用影响展开研究并建立了模型;吴秋军等人^[4]提出了一种围岩稳定性研究方法,以现场围岩位移监测数据作为统计分析数据,从而建立了围岩稳定性判别基准;赵明亮^[5]以围岩应力及位移变化作为主要的监测变量,针对三江至南川线扩能改造工程项目提出支护措施;牛浩君等人^[6]在吉布洛水电站运行安全监测分析中,研究并分析了围岩位移变形对隧洞薄壁的影响。

隧道本身属于线状工程,其施工规模庞大,可长达数公里,采用传统的电阻式应变计和振弦式应变计进行测量时存在监测布点多,检测工作量大而且易漏检;并且传统应变片常因环境潮湿等情况造成失效,也会影响监测数据的实时性和精度^[7]。而光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)应变传感器具有较高的测量准确度,可远程实时采集数据,具有较高的抗干扰性和耐腐蚀性,并且体积小、便于埋入材料内部,适用于分布式长距离的安装,这些特点可以弥补传统应力传感器和隧道检测技术的不足^[8-10]。

近年来,很多研究人员就光纤传感技术在工程监测领域的应用展开了研究。罗勇等人^[11]提出了基于光纤 Bragg 光栅的管道压力监测算法,以管道环向和轴向形变导致的光纤 Bragg 光栅的波长移位来实时监测管道压力;Shen W 等人^[12]将 FBG 应变传感器应用于船体结构安全监测,并与传统的电阻应变结果作比较,证实了 FBG 应变传感器的高灵敏度和长期监测的稳定性;Pei H. F. 等人^[13]对光纤传感器在岩土结构安全监测方面的应用进行了总结和对比;Roveri N 等人^[14]设计了地铁交通结构健康实时监测的传感器阵列系统,并已应用于米兰轨道交通的2号线健康状态监测;关袁玉等人^[15]对埋入式光纤 Bragg 光栅应变传感器用于监测隧道二次衬砌的安全监测进行了可行性分析。但是目前关于所采集的 FBG 监测数据的分析技术和健康评估技术的深入研究还很少见,杨彤瑶等人^[16]在2013年提出了一种改进的主元分析(principal component analysis, PCA)方法,用于实现光纤 Bragg 光栅应变传感器对隧道异常变化的实时在线监测。

针对上述研究现状,以基于 FBG 应变传感器的隧道施工安全监测系统为背景,以多个横截面上检测到的非周期同步多维应变数据流为对象,提出了一种基于双重滑动窗口技术的相关性分析算法,并在此基础上给出了隧道施工期内的安全状况诊断方法。实验结果显示,该方法能够通过对 FBG 传感器监测数据的分析实时监测隧道围岩应力的状态并能够及时准确地进行异常形变预测,从而为基于光纤 Bragg 光栅应变传感器的隧道安全实时监测提供了理论基础和数据分析方法。

2 基于 FBG 的隧道实时安全监测系统设计

光纤 Bragg 光栅应变传感器的检测原理如图1所示,光源发出的光波由传输通道经连接器进入传感光栅,固定在弹性元件上的传感光栅在外场(如应变场、温度场等)的作用(静态、准静态或时变)下,对光波进行调制;而带有外场信息的调制光波被传感光栅反射由连接器进入接收通道而被探测器接收。

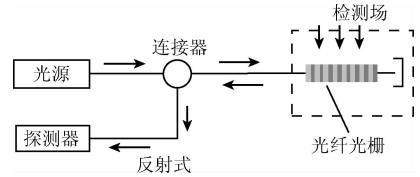


图1 光纤 Bragg 光栅应变传感器的检测原理

Fig. 1 Detection principle of FBG strain sensor

选用一种混凝土埋入式光纤 Bragg 光栅应变传感器^[17-19]对隧道的施工安全进行监测,该传感器是为测量各种混凝土的内部应变而设计的,具体参数设置如表1所示。

表1 参数设置

Table 1 Parameter setting

项目	参数
应变量	$\pm 1\ 000\ \mu\epsilon$
分辨率(应变)	$0.7\ \mu\epsilon$
温度范围	$-30\ ^\circ\text{C} \sim 80\ ^\circ\text{C}$
规格尺寸 L	标距 100 mm

该 FBG 应变传感器中心波长的偏移与应力和温度变化的关系为:

$$\Delta\lambda_B = \left[\frac{\partial\lambda_B}{\partial\sigma} \right]_T \Delta\sigma + \left[\frac{\partial\lambda_B}{\partial T} \right]_\sigma \Delta T \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为光栅 Bragg 波长的位移, $\Delta\sigma$ 和 ΔT 分别是应力和温度相对于参考状态 (σ_0, T_0) 的改变量,第1项代表光纤的应变效应,第2项表示温度对光纤的影响。若引入应变和温度敏感系数 (S_σ, S_T),式(1)可最终表示为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (S_\sigma \Delta\epsilon + S_T \Delta T) \quad (2)$$

本研究中所检测的施工隧道为双向分离式隧道,在左、右幅隧道分别选取10个监测断面,截面间距为20 m,据现场具体情况在每一断面布设7支埋入式光纤 Bragg 光栅应变传感器,进行同步的实时数据监测。这7个应变传感器在断面上的安装位置如图2所示。

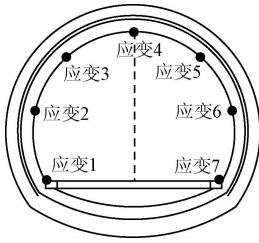


图2 应变计断面布局

Fig.2 Strain gauge layout in one section

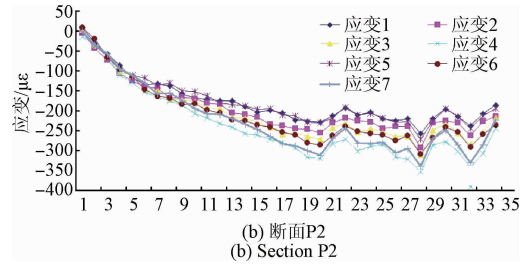


图3 断面 P1 和 P2 部分断面应变值

Fig.3 Partial strain data streams for sections P1 and P2

2.1 FBG 应变传感器数据分析方法

2.1.1 基于双重滑动窗口技术的异常数据诊断算法

由于隧道的实际施工情况所限,实验测得数据为非周期性采样数据。依据光纤 Bragg 光栅应变传感器的布局设置,原始采样数据为同步七维数据流,测得原始数据表示的是安装传感器的实时测量波长。以光纤 Bragg 光栅传感器采集到的同步七维数据流为基础,提出了一种基于双重滑动窗口的动态多维数据相关性算法对隧道应力进行异常监测。

该方法基本思想:通过第 1 个滑动窗口将实时监测到的多维光纤 Bragg 光栅传感器应力数据与历史数据合并形成当前观测窗口,对每个观测窗口内的数据进行主成分分析及对应的特征值和特征向量的提取,得到当前时刻的动态特征;采用第 2 个滑动窗口技术将得到的当前时刻第一主成分特征向量与历史动态特征合并成为动态特征矩阵并展开相关性分析,最后通过相关系数的方差变化来判断数据的稳定性,以特征向量序列之间的时间相关趋势变化及相关系数方差变化规律对同步多维数据流进行异常变化诊断。其主要步骤如下:

1) 获取当前时刻波长检测值并计算应变量 $\Delta\lambda_B = 2n_{eff}\Delta\Lambda + 2\Delta n_{eff}\Lambda$, 确定原始同步七维数据流 Y , 断面 P1 和断面 P2 的部分应变值如图 3 所示;

2) 采用第一重滑动窗口构建当前时刻观测窗口,据此构建观测窗口的数据矩阵 Q ;

3) 对矩阵 Q 进行主成分分析并求解特征向量 S , 定义该向量为当前时刻的动态特征向量 S ;

4) 采用第二重滑动窗口构建数据相关性分析窗口,构建动态特征矩阵 W ;

5) 分别按照相邻和对称两种监测设备布局模式下求解动态特征矩阵 W 对应的相关系数序列 M ;

6) 求解相关系数序列 M 的变化趋势即方差 S^2 , 并将其作为稳定性判据,将本次变化趋势与历史数据变化趋势相比较,判断是否出现异常。

每当得到一组新的实时采样数据时,重复上述步骤,以达到实时判断隧道安全状况的目的。整体的数据处理流程如图 4 所示。

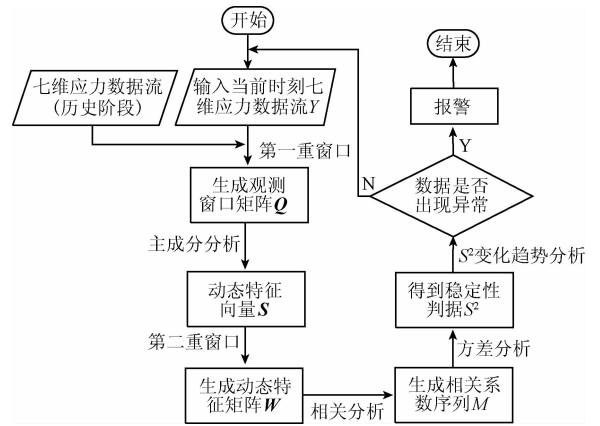


图4 整体处理流程

Fig.4 Overall processing flow chart

2.1.2 窗口参数分析及选取

首先采用自相关函数估计法^[20]确定第一重窗口的时滞长度 n_1 的取值范围为 2 ~ 4, 同时选取窗口移动步长为 1, 一般说来窗口移动步长越小则获取的动态特征越具体, 因此得到窗口宽度为 $L_1 = n_1 + 1$ 。分别取 $n_1 = 2, 3, 4$ 构建当前时刻的观测窗口, 并计算得到各个时刻第一主元累积贡献率如表 2 所示, 累计贡献率给出了某个主成分的方差占全部方差的比重, 贡献率越大, 说明该主成分所包含的原始变量的信息越强, 为了精确表示主成分的贡献程度, 本文对其保留小数点后两位数字。

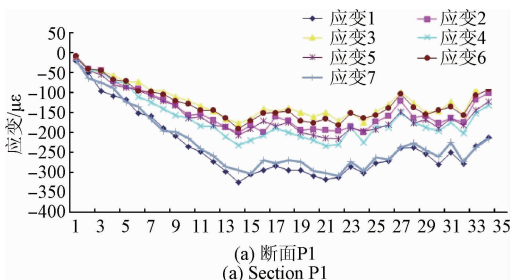


表2 $n_1 = 2, 3, 4$ 时的第一主元累积贡献率

Table 2 First principal component cumulative contribution rates when $n_1 = 2, 3$ and 4

断面 P1	1	2	3	4	5	6	7
$n_1 = 2$	91.82	84.93	73.65	65.69	65.19	73.88	90.77
$n_1 = 3$	92.14	92.98	91.78	94.56	95.33	93.32	92.57
$n_1 = 4$	94.96	95.08	95.11	95.60	95.72	95.18	95.83
断面 P2	1	2	3	4	5	6	7
$n_1 = 2$	78.90	65.10	68.71	79.64	89.70	88.50	89.59
$n_1 = 3$	82.30	76.79	83.20	86.67	85.04	93.58	90.26
$n_1 = 4$	93.00	90.49	95.03	85.51	95.31	94.64	92.57

取第一主元的特征向量为当前时刻的动态特征,在此基础上采用第二重滑动窗口构建数据相关性分析窗口,这里同样首先将第二重窗口的时滞长度 n_2 的取值范围也设定为 2~4,但是第一重窗口参数的设置会影响所得到的特征向量,因此基于该特征向量的第二重窗口的相关分析时滞长度大小的设置也会受到影响,根据第一重窗口和第二重窗口的时滞参数选择范围分别进行了实验,结果表明当两次窗口时滞参数分别为 3 和 4 时,取得的效果最佳。在经过上述双重窗口的处理后,可得到相关系数序列 M ,断面 P1 的部分相关系数值如表 3 所示。

表3 断面 P1 的部分相关系数序列 M

Table 3 Partial correlation coefficient sequence M for section P1

断面 P1	1	2	3	4	5
$m_{1,2}$	0.999 7	0.999 7	0.999 9	1	1
$m_{2,3}$	0.999 7	0.999 6	0.999 8	1	0.999 9
$m_{3,4}$	1	1	1	1	0.999 9
$m_{4,5}$	1	0.999 9	0.999 8	1	1
$m_{5,6}$	1	0.999 9	0.999 9	1	1
$m_{6,7}$	1	1	1	1	1
$m_{1,7}$	1	1	1	1	1
$m_{2,6}$	0.999 7	0.999 5	0.999 9	1	1
$m_{3,5}$	0.999 9	0.999 9	0.999 8	1	0.999 9

2.2 特征向量相关分析

由图 2 可知,对数据进行分析的方式可以有两种:对称和相邻。下文讨论并给出了这两种情况下算法对 7 个应变对应特征向量流序列进行分析的结果。

2.2.1 对称应变数据流相关性分析

考虑应变设置对称的情况下,认为应变计 1 与 7、2 与 6、3 与 5 之间存在一定的相关性。对稳定断面所测数

据进行分析,得到稳定特征向量流的时间相关系数变化。给出断面 P1 和 P2 对称应变计数数据流之间的相关性变化趋势如图 5 所示。

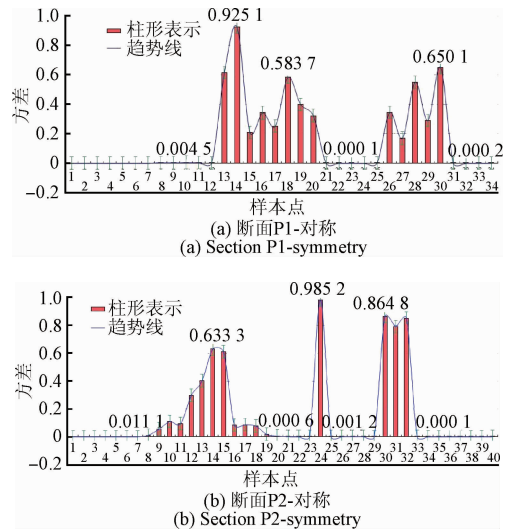


图5 断面 P1 和 P2 对称应变计数数据流相关性变化趋势图

Fig. 5 The variation trend diagram of the correlation coefficients of symmetric strain gauge data for sections P1 and P2

由图 5 可以看出,稳定状态下相关系数序列的方差都在 0.1 以下,方差小说明断面状态越稳定。随着新采样数据的进入,第一主成分特征向量间的相关系数发生变化,随之方差发生变化。当隧道受到不同的外界压力或者施工不当情况下,就会导致隧道本身受力不平衡,光纤 Bragg 光栅应变系统相应地产生不同的应变效应,从而检测到不同的应变数据。可以看出图 5 中的方差变化也呈现一定的规律,反映了隧道内部的实时受力变化。隧道内部异常变化或受力不均将导致原始同步多维数据流的变化,相应地 7 个应变之间受压产生的应力效应不同,主成分对应特征向量之间的相关系数出现异常,导致相关系数序列的方差突增,但经过一定时间便恢复稳定状态,即隧道受到异常的外部压力或受力不均后会进行自我平衡,进而恢复正常的受压状态。对非周期性同步数据流之间的相关性分析不仅可以揭示被监测对象之间存在的内在联系,而且依据 7 个传感器的分布特点、整个隧道的受压情形,可发现各数据流之间存在潜在的时间相关性。

2.2.2 相邻应变数据流相关性分析

对比求取相邻应变之间对应特征向量流序列的相关程度,得到特征向量流的相关性时间序列,即相邻特征向量流序列之间相关程度随时间变化的趋势,间接反映了

原始同步多维数据流序列的变化趋势,如图6所示。

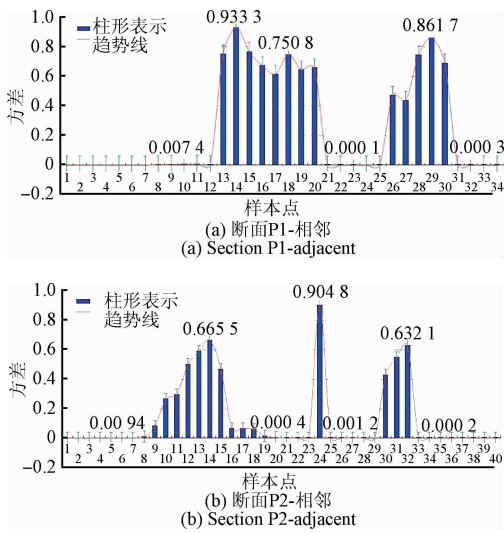


图6 断面 P1 和 P2 相邻应变计数据流相关性变化趋势图

Fig. 6 The variation trend diagram of the correlation coefficients of adjacent strain gauge data for sections P1 and P2

比较图5和6,可以看出对称应变和相邻应变之间的相关系数变化趋势基本一致:1)当断面处于稳定状态,相关系数方差均接近0;2)当断面受到外界压力时,相关系数的方差呈现有规律的变化,最终仍会恢复到稳定状态即相关系数方差接近0;3)当断面受到压力之后一直处于不稳定状态,相关系数方差出现异常值,数值大大增加且没有恢复至0的趋势,这说明断面内部可能出现问题。

3 隧道安全监测算法异常数据结果分析

3.1 应变数据流相关性分析

在隧道安全监测过程中,非稳定断面 P3 的实际观测同步7维数据流如图7所示。

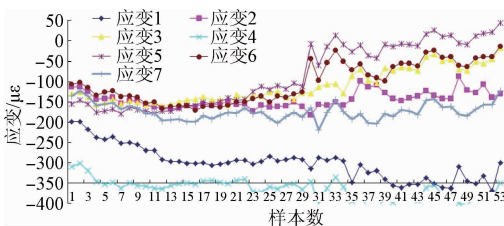


图7 断面 P3 部分断面应变值

Fig. 7 Partial strain data flow for section P3

采用上文所提算法对非稳定断面 P3 的原始数据流进行分析,得到非稳定断面特征向量序列在采样点时间轴上相互的变化趋势及程度,断面 P3 的应变相关系数趋势变化如图8所示。

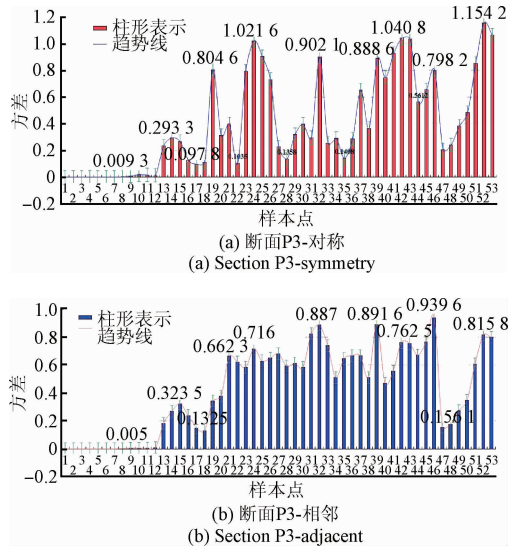


图8 断面 P3 应变计数据流相关性变化

Fig. 8 The variation trend diagram of the correlation coefficients of strain gauge data for section P3

由图8可以看出,从第8~18次数据断面 P3 应变之间发生一次波动现象,此时断面处于稳定状态;在第19次新进数据之后,对称方差暂时呈现有规律的变化,到第24次新进数据对称方差增至1.0216,之后方差虽然处于波动状态,但是一直保持在0.1以上,未达到稳定状态的正常方差范围;与此同时,第21次新进数据之后,相邻方差的大小一直在0.6上下波动,而且没有变小即恢复稳定的趋势;至第32次新进数据之后,相邻方差增至历史最大,此刻对称方差也达到了0.9021,虽然第35次新进数据之后对称方差降至0.1408,但是之后对称方差和相邻方差都持续呈现上升趋势,说明该断面的实际受力状态可能出现异常且无修复能力。在第42次采样数据进来之后对称方差再次增至历史最大1.0408,相邻方差也增至该波动阶段最大,说明该断面的不稳定状态可能进一步加深。结合第44次应变5的原始应变数据出现正值,说明该应变计可能已经损坏无法正常监测数据,预测该断面内部可能已经出现裂缝。根据现场实际观测隧道断面的报告显示,该断面确实出现裂缝,隧道的平面展开图如图9所示,图中标出了实际观测到的裂缝所在的位置和宽度。

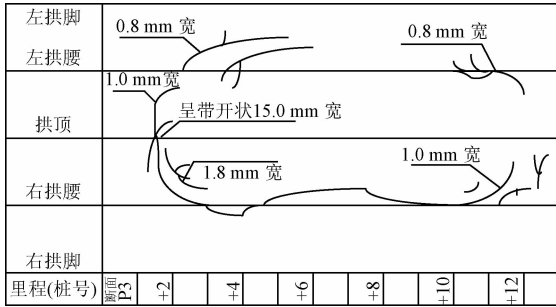


图 9 断面 P3 的实际裂缝观测图

Fig. 9 Actual crack observation diagram of tunnel section P3

3.2 不同算法预测效果对比

采用文献[16]所提出的改进主元分析方法对原始应变数据进行处理得到实验数据如表 4 所示,该算法通过计算特征向量并与稳态向量相比较的方法判断数据监测中的异常数据流,表中 $W(w1, \dots, w7)$ 为主成分特征向量矩阵,与稳态矩阵 W^* 进行差值计算得到 S^2 ,至第 48 次时判断内部可能出现裂缝,表 4 中的加粗数据所表示的就是异常判据。

表 5 给出了文献[16]提出的监测算法效果、本文方法的监测算法效果和实际现场的人眼观测监测效果的对比,相比之下,本文提出的算法能够更快地预测异常情况,具有更优越的实时性。

表 4 部分特征向量

Table 4 Partial feature vectors

样本点	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	S^2
44	-0.328 5	-0.337 4	-0.391 0	-0.405 0	-0.363 1	-0.404 2	-0.407 6	0.082 3
45	0.334 3	0.343 4	-0.398 1	-0.387 6	-0.394 1	-0.395 1	-0.387 4	0.065 1
46	0.336 6	0.350 5	-0.393 5	-0.390 8	-0.389 9	-0.390 5	-0.389 4	0.057 4
47	0.331 1	0.341 2	-0.398 5	-0.389 5	-0.390 7	-0.394 7	-0.393 7	0.069 2
48	-0.205 6	-0.188 3	0.431 1	0.431 1	0.434 0	0.434 0	0.417 0	0.281 3
49	-0.187 6	-0.149 4	0.439 3	0.434 4	0.438 9	0.432 2	0.425 9	0.323 0
50	0.359 9	-0.085 8	0.406 3	0.418 8	0.416 3	0.419 3	0.416 6	0.304 6

表 5 算法效果对比

Table 5 Algorithms effect comparison

方法选择	异常察觉	预测报警
改进的主元分析法 ^[16]	样本点 39	样本点 48
本文所提方法	样本点 35	样本点 44
现场观测	样本点 36	样本点 50

从算法原理和实验对比结果可以看出来,本文提出的算法,将原始同步多维数据流经由特征向量空间映射至相关系数求解,考虑了数据流的时间相关性,数据分析也更加客观;在滑动窗口的参数选择范围内,进行多次实验以得出最佳效果;避免了文献[16]算法中稳定特征向量的确定中所存在的主观性,兼顾了观测截面上左右应变之间的对称特性,对同步多维数据流的异常分析和隧道工程的安全监测具有更好的效果。

4 结 论

以基于埋入式光纤 Bragg 光栅应变传感器的隧道安全监测系统为背景,以所检测到的非周期同步多维数据流为对象展开了研究,提出了一种基于双重窗口技术的

数据异常状况诊断算法,该算法通过第 1 个滑动窗口将实时监测数据与历史数据合并形成当前观测窗口并求取其动态特征;接着采用第 2 个滑动窗口技术将当前时刻的第一主成分特征向量与历史动态特征合并成为动态特征矩阵并展开相关性分析,最后通过特征向量序列之间的时间相关趋势变化及相关系数方差变化规律对同步多维数据流进行异常变化诊断。实验结果表明该算法能够有效实现对安全监测过程中同步多维数据流异常信息的实时动态检测,从而为实际工业过程中数据的安全预警和故障检测提供了一种新的方法和技术。

参考文献

[1] 凌骥,王军涛,邓检华. 光纤光栅传感器在公路隧道衬砌结构安全监测中的应用[J]. 测控技术, 2015, 34(11): 5-8.
LING Q, WANG J T, DENG J H. Application of fiber Bragg grating sensor in structure safety monitoring of highway tunnel[J]. Measurement & Control Technology, 2015, 34(11): 5-8.

[2] 朱迎宇. 天摩岭公路隧道施工围岩位移监测技术[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2007, 34(5): 55-57.
ZHU Y Y. Monitoring technology for displacement of

- surrounding rock in Tianmoling tunnel [J]. *Exploration Engineering ;Rock & Soil Drilling and Tunneling*, 2007, 34(5): 55-57.
- [3] 刘洋. 不均匀沉降下隧道与土体相互作用模型位移分析[J]. *科技创新导报*, 2012(22): 141-141.
LIU Y. Displacement analysis for interaction model between tunnel and soil under uneven settlement [J]. *Science and Technology Consulting Herald*, 2012(22): 141-141.
- [4] 吴秋军, 王明年, 刘大刚. 基于现场位移监测数据统计分析的隧道围岩稳定性研究 [J]. *岩土力学*, 2012(增刊2): 359-364.
WU Q J, WANG M N, LIU D G. Research on stability of tunnel surrounding rocks based on statistical analysis of on-site displacement monitoring data [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012(Suppl. 2): 359-364.
- [5] 赵明亮. 围岩应力及位移监测在隧道施工中的应用[J]. *中小企业管理与科技旬刊*, 2015(2): 169-175.
ZHAO M L. Application of surrounding rock stress and displacement monitoring in tunnel construction [J]. *Management & Technology of SME*, 2015(2): 169-175.
- [6] 牛浩君, 管祖金, 赵均法. 吉布洛水电站引水隧洞充水、放空运行期间安全监测数据分析[J]. *城市建设理论研究*, 2013(13).
NIU H J, GUAN Z J, ZHAO J F. Safety monitoring data analysis of the tunnel station for Djiploho hydropower station in water filling and emptying [J]. *Urban Construction Theory Research*, 2013(13).
- [7] 王军, 夏才初, 朱合华, 等. 不对称连拱隧道现场监测与分析研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(2): 267-271.
WANG J, XIA C CH, ZHU H H, et al. Site monitoring and analysis of non-symmetrical multi-arch highway tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(2): 267-271.
- [8] 施斌, 徐学军, 王辆, 等. 隧道健康诊断 BOTDR 分布式光纤应变监测技术研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(15): 2622-2628.
SHI B, XUE X J, WANG D, et al. Study on BOTDR-based distributed optical fiber strain measurement for tunnel health diagnosis [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15): 2622-2628.
- [9] 刘水文. 光纤 Bragg 光栅在煤矿安全中的应用探讨[J]. *工矿自动化*, 2011, 37(2): 30-32.
LIU SH W. Discussion on application of FBG in coal mine safety [J]. *Industry & Mine Automation*, 2011, 37(2): 30-32.
- [10] 高垠, 马玉华, 李克绵. 光纤传感技术在岩土工程安全监测中的应用[J]. *水利水电技术*, 2013, 44(2): 117-121.
GAO Y, MA Y H, LI K J. Application of optical fiber sensing technology to safety monitoring of geotechnical engineering [J]. *Water Resources & Hydropower Engineering*, 2013, 44(2): 117-121.
- [11] 罗勇, 李川, 杨华, 等. 基于光纤 Bragg 光栅的管道压力在线监测[J]. *化工自动化及仪表*, 2011, 38(5): 533-535.
LUO Y, LI CH, YANG H, et al. Online monitoring of pipeline pressure based on fiber Bragg gratings [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2011, 38(5): 533-535.
- [12] SHEN W, YAN R, XU L, et al. Application study on FBG sensor applied to hull structural health monitoring [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 126(17): 1499-1504.
- [13] PEI H F, TENG J, YIN J H, et al. A review of previous studies on the applications of optical fiber sensors in geotechnical health monitoring [J]. *Measurement*, 2014, 58(3): 207-214.
- [14] ROVERI N, CARCATERA A, SESTIERI A. Real-time monitoring of railway infrastructures using fiber Bragg grating sensors [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2015, 60-61(8): 14-28.
- [15] 关袁玉, 李川, 蔡周春, 等. 埋入式光纤 Bragg 光栅应变传感器在隧道二次衬砌中的监测研究[J]. *光学技术*, 2014(6): 547-550.
GUAN Y Y, LI CH, CAI ZH CH, et al. Monitoring research of fiber Bragg grating strain sensors embedded in tunnel secondary lining [J]. *Optical Technique*, 2014(6): 547-550.
- [16] 杨彤瑶, 王彬, 李川, 等. 基于改进主元分析方法的隧道应变实时监测预警系统[J]. *计算机应用*, 2013, 33(11): 3284-3287.
YANG T Y, WANG B, LI CH, et al. Real-time monitoring and warning system of tunnel strain based on improved principal component analysis method [J]. *Journal of Computer Applications*, [1] 2013, 33(11): 3284-3287.
- [17] 杨吉祥, 陈东, 余尚江, 等. 埋入式 FBG 应变传感器的设计及其传感特性研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2010(11): 3-6.
YANG J X, CHEN D, YU SH J, et al. Design and sensing characteristics of embedded fiber Bragg grating strain sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2010(11): 3-6.

- [18] 程淑红,李志全. 埋入式光纤光栅应变测量系统的设计[J]. 应用光学, 2007, 28(5): 619-622.
CHENG SH H, LI ZH Q. Design of strain measurement system with embedded fiber Bragg grating [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(5): 619-622.
- [19] 李乐,侯正信. 光纤应变传感器的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2004, 18(4):70-76.
LI Y, HOU ZH X. Design on optical fiber strain sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2004, 18(4):70-76.
- [20] GUHA S, GUNOPULOS D, KOUDAS N. Correlating synchronous and asynchronous data streams [C]. Proceedings of the Ninth ACM SIGKDD International Conferences on Knowledge Discovery and Data Mining, 2003: 529-534.
- [21] 邵建新,袁慎芳,张华,等. 基于高斯过程的疲劳裂纹长度评定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3):580-585.
SHAO J X, YUAN SH F, ZHANG H, et al. Research on fatigue crack length evaluating method based on Gaussian process [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3):580-585.
- [22] KINCADE K. Fiber sensors lay groundwork for structural health monitoring [J]. Laser Focus World, 2006, 42(2): 63-67.
- [23] MUFTI A A, BAKHT B, TADROS G, et al. Sensing issues in civil structural health monitoring [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2005.
- [24] SANTE R D, BASTIANINI F. Temperature-compensated fiber Bragg grating-based sensor with variable sensitivity [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2015, 75(12):5-9.
- [25] 赵振刚,高立慧,李川,等. 基于FBG测温与热路模型的绕组热点温度研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2):294-300.
ZHAO ZH G, GAO L H, LI CH, et al. Study on the

winding hot-point temperature measurement based on FBG and thermal model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2):294-300.

- [26] 贾丹平,武威. 基于超磁致伸缩材料的光纤光栅电流传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1806-1812.

JIA D P, WU W. Fiber Bragg grating current sensor based on giant magnetostrictive material [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12): 1806-1812.

作者简介



马洒洒,2010年于周口师范学院获得学士学位,现为昆明理工大学硕士研究生,主要研究方向为实时数据分析和图像处理与模式识别。

E-mail:1442136802@qq.com

Ma Sasa received her B. Sc. degree from Zhoukou Normal University in 2010. Now, she is a master student in Kunming University of Science and Technology. Her main research interest is real-time data analysis, image processing and pattern recognition.



王彬(通讯作者),分别在1999年、2002年和2011年于昆明理工大学获得学士、硕士和博士学位,现为昆明理工大学副教授,主要研究方向为工业实时控制方法、复杂系统动态特性和实时数据分析。

E-mail:wangbin1@vip.sina.com

Wang Bin (Corresponding author) received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Kunming University of Science and Technology in 1999, 2002 and 2011, respectively. Now, she is an associate professor in Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology. Her main research interest is industrial real-time control method, dynamic properties of complex system, and real-time data analysis.