

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.04.018



# 基于 EFAST 的盾构隧道安全指标全局 敏感性分析

刘文黎, 吴贤国, 方伟立, 张立茂, 覃亚伟

(华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430074)

**摘要:**为了分析地铁隧道健康监测中各个指标之间的相互演化作用关系,提出了一种对监测数据进行分析的数据挖掘思路,将傅里叶幅值灵敏度检验扩展法(EFAST)应用于各项指标的全局敏感性分析中。依据现行隧道安全评价规范,建立反映隧道安全状态的指标体系;通过基于粒子群优化的最小二乘法支持向量机(PSO-LSSVM),模拟构建了各安全指标函数拟合模型,用以描述隧道各安全指标之间相互作用关系;在此基础上,采用 EFAST 对该模型的指标进行了全局敏感性分析。结果发现,对隧道安全性影响较大的敏感因素有管片接缝张开宽度、管片接缝接触应力和隧道沉降值;另外,还分析了不同的目标参数、不同的参数取值范围、不同的输入参数的分布形式对参数敏感度值的影响,从不同的角度揭示了盾构地铁隧道中参数的相互作用机理的演化规律。

**关键词:**结构健康监测;傅里叶幅值灵敏度检验扩展法(EFAST);敏感性分析;盾构隧道;安全指标  
**中图分类号:**U458.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)04-0124-08

## A global sensitivity analysis for tunnel structural health monitoring using extended Fourier amplitude sensitivity test

Liu Wenli, Wu Xianguo, Fang Weili, Zhang Limao, Qin Yawei

(School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

**Abstract:** A new index called global sensitivity index by global sensitivity analysis was proposed to evaluate the relationship between tunnel structure health monitoring data and tunnel health status. Global sensitivity analysis could quantitatively and systematically evaluate the parameter sensitivities and their variations under various conditions, resulting in an improved understanding of relationships between monitoring data and tunnel health status, and suggesting potential approaches to the improvement of tunnel health evaluation model. Moreover, a case study of global sensitivity analysis was presented to evaluate the monitoring data on Wuhan Yangtze River Tunnel. The achievement of this global sensitivity analysis leads to the parameter sensitivities had been quantified, and the sensitive and insensitive parameters were distinguished. The sensitive parameters could then be identified as major factors for monitoring or

收稿日期:2016-01-10

基金项目:国家自然科学基金(51378235,71571078);湖北省自然科学基金(2014CFA117)

作者简介:刘文黎(1989-),男,博士生,主要从事工程项目、工程安全管理研究,(E-mail)newheny2014@hotmail.com.

方伟立(通信作者),男,主要从事工程安全与风险管理研究,(E-mail)fwl0923@126.com.

Received:2016-01-10

Foundation item:Nation Natural Science Foundation of China (No. 51378235,71571078)

Author brief:Liu Wenli(1989-), PhD candidate, main research interests:engineering project management and engineering safety management,(E-mail) newheny2014@hotmail.com.

Fang Weili(corresponding author), main research interest:engineering safety management,(E-mail)fwl0923@126.com.

administrative maintenance. The variations in parameter sensitivity index associated with various target functions, parameter ranges and distribution were examined. The variations of parameter sensitivities were observed with various conditions, suggesting that sensitive and insensitive parameters maybe inversed under different conditions.

**Keywords:** structural health monitoring; extended Fourier amplitude sensitivity test (EFAST); global sensitivity analysis; shield tunnel, safety indexes

隧道建设及运营安全关系着人类生命安全和经济社会活动的正常进行,有必要采取一系列措施对隧道结构的健康及安全状态进行实时监测,确保隧道运营期安全。

结构健康监测就是利用现场无损传感技术,对结构危险部位的相应安全指标进行监测分析,检测结构受到损伤情况或结构安全状态的一项技术。隧道结构健康监测是结构健康监测在隧道工程中的应用<sup>[1-2]</sup>,通过结构健康监测,可以得到大量多源异构的监测数据,但由于数据获取误差、模型结构误差、参数权值的确定误差和模型评价标准的选择差别等多种因素的共同作用,使得通过一系列指标参数对一个目标参数进行模拟和评价成为一项非常复杂的问题<sup>[3-6]</sup>。因此,对目标参数模拟识别、确定对评价性能有重要影响的输入参数以及定量评价各个输入参数对目标函数的影响程度,显得尤为重要<sup>[7]</sup>。

本文以武汉市地铁二号线越江段盾构地铁运营期间的监控数据为基础,进行地铁各安全指标相互作用规律研究的数据挖掘,分析各安全指标之间的相互作用关系,通过敏感性分析,准确识别出隧道各安全指标的重要度,将不敏感指标进行略化或者降低其权重,从而更准确的对隧道的安全状态进行评价,对提升隧道安全监测、预警、运营管理水平以及降低运营成本有着重要意义。

### 1 研究方法

为了对隧道的监测数据进行敏感性分析,采用支持向量机对隧道安全的监测数据进行函数拟合,构建出反映本工程中监测指标之间相互作用关系的拟合模型。在监测指标拟合模型基础上,采用了 EFAST 方法对隧道安全性指标进行全局敏感性分析,得出各指标之间相互作用关系的大小,从而得出各指标对隧道安全性影响的敏感性。

#### 1.1 支持向量机的函数拟合

支持向量机(SVM)是一项存在广泛用途的通用模式识别方法<sup>[8]</sup>。笔者主要运用 SVM 进行监测

数据的函数拟合,基于支持向量机的基本分析流程,根据选取的 RBF(Radial Basis Function)核函数,采用 PSO 算法对 SVM 中的相关参数( $c, g$ )进行优化选取,得到改进 SVM 隧道监测指标间演化作用的拟合模型,其分析流程如图 1 所示。

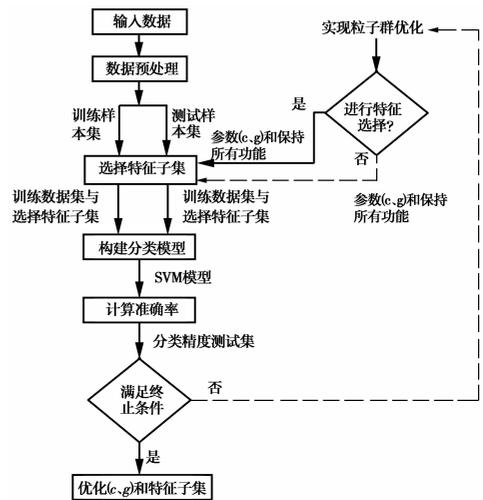


图 1 SVM 监测指标相互演化作用模型的建模流程  
Fig. 1 The architecture of the PSO-based parameters determination and feature selection approach for SVM

### 2.2 EFAST 全局敏感性算法

Saltelli 等<sup>[9]</sup>结合 Sobol'法和 FAST 的优点,提出了傅里叶幅度灵敏度检验扩展法(Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test, EFAST),分析的基本流程如图 2 所示。参数的  $X_i$  总灵敏度值如公式<sup>[10]</sup>。

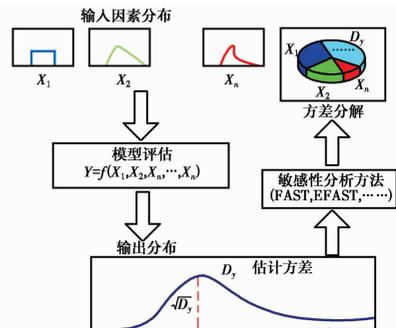


图 2 EFAST 分析的基本流程

Fig. 2 General scheme of a quantitative SA method

$$ST_i = \frac{\sum_{j=M \cdot \max(\{\omega_i\})+1}^{N_s-1} (A_j^2 + B_j^2)}{\sum_{j=1}^{N_s-1} (A_j^2 + B_j^2)} \quad (1)$$

$$A_j = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} [f(s_k) \cdot \cos(j \cdot s_k)] \quad (2)$$

$$B_j = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} [f(s_k) \cdot \sin(j \cdot s_k)] \quad (3)$$

式中： $j \in \mathbf{Z} = \left\{ -\frac{N_s-1}{2}, \dots, -1, 0, 1, \dots, \frac{N_s-1}{2} \right\}$ ； $s_k = \frac{\pi}{N_s}(2k - N_s - 1)$ ， $k = 1, 2, \dots, N_s$ ；

$ST_i$  为参数的  $X_i$  的总灵敏度值； $N_s = 2M\omega_{\max} + 1$  为样本数； $\omega_i$  为参数特征频率； $\omega_{\max}$  为  $\omega_i$  的最大值； $M$  为 4 或 6。

## 2 案例研究

### 2.1 工程概况

武汉地铁越江段盾构隧道工程两端车站分别为江汉路站与积玉桥站，工程盾构隧道为双洞双线隧道，盾构始发区间隧道左右线采用 16 m 的线间距，盾构机从江汉路站出站后，开始以 25.7‰ 的下坡、坡长 1 000 m，然后采用 4.09‰ 的下坡，坡长 700 m，到达武昌侧深槽最低点，线路转入江中的曲线半径采用 400 m，越江段地铁线路间距为 13 m，从江中进入和平大道曲线半径采用 350 m。之后线路沿和平大道行进，线间距为 12 m，最后线路以 25.9‰ 的上坡 1 380 m 到达积玉桥站，武汉地铁越江段盾构隧道纵断面详见图 3 所示。

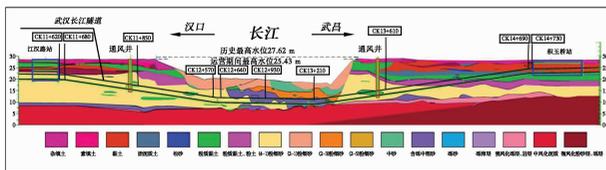


图 3 武汉越江地铁盾构隧道地质纵断面图

Fig. 3 Hydrogeological conditions and monitoring sections of WYRTM (left line)

盾构隧道采用管片拼装式单层衬砌，管片外径 6 200 mm，内径 5 500 mm，厚 350 mm，环宽 1.5 m。衬砌环由 1 个封顶块(K)、2 个邻接块( $B_1$ 、 $B_2$ )和 3 个标准块( $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ )组成，如图 4，管片为双面楔形通用管片，楔形量为 40 mm，管片混凝土等级为 C50，防水等级为 S12。管片错缝拼装，环纵缝均设

置凹凸榫槽，环缝和纵缝均采用弯螺栓连接，连接螺栓为 16 根 M30 的纵向螺栓和 12 根 M30 的环向螺栓。管片中心处设一个吊装孔，兼作二次注浆。

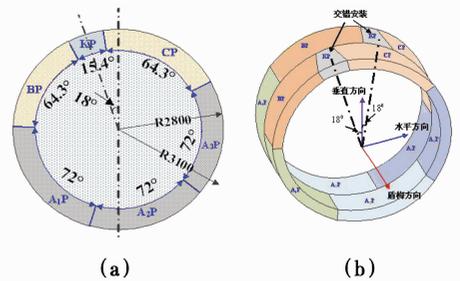


图 4 衬砌环拼接图

Fig. 4 Interior view of WYRTM

### 2.2 监测方案

由于武汉地铁越江段隧道线路长，地质条件复杂，地下水丰富，水压力大等特点，隧道施工期间将大部分仪器埋入结构及地层中，对隧道结构变形、地表沉降、水压等进行实时监测，保证隧道的运营安全。

武汉市轨道交通二号线的越江段盾构地铁隧道健康监测系统，利用光缆传输系统形成了传感测试网络，将所有的现场传感器信号汇集到监控中心，实现监测数据的采集和传输。本工程在左线隧道和右线隧道分别布置了以下 10 个监测断面：盾构始发位置布置 2 个断面、4 个变坡点、江中心和大堤处，盾构到达位置布置 2 个断面，如图 5 所示。

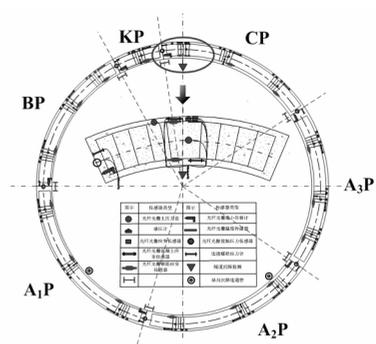


图 5 隧道 CK11+62.0 检测截面的测点布置

Fig. 5 Detailed layout of sensors of CK11+62.0

断面上的传感器布设应考虑各监测断面荷载特点和横向分布的最不利组合工况，对衬砌环片与周围岩土体环境的作用关系进行分析，特别是易出现结构内力重分布现象的连接螺栓周围以及截面收敛较大区域等。参考相关文献<sup>[1]</sup>，对进行健康监测所需监测的项目，以及监测仪器的布置如表 1 所示。

表 1 衬砌环片上的监测项目及仪器布置方案  
Table 1 The indicator system of global sensitivity analysis

监测项目	安全监测指标	缩写	监测仪器	重点监测部位
实时监测	隧道纵向沉降值	TLSV	连通管线形监测系统	进出洞段变坡段覆土变化段
	管片接缝张开宽度	TSSOW	光纤光栅微小位移计	变形缝附近
	结构温度	ECT	光纤光栅温度传感器	进出口段
	隧道外侧土压力	SEP	光纤光栅土压力盒	高覆土
	隧道外侧水压力	SPP	光纤光栅渗压计	高水压
	管片钢筋应力	TSCS	光纤光栅钢筋应变计	荷载大段
	管片混凝土应力	TSRS	光纤光栅混凝土应变计	荷载小段
	连接螺栓应力	TSBS	光纤光栅应变传感器	变坡段
定期检测	管片接缝接触应力	CSS	接触压力传感器	变坡段河底段
	长江水位	WLV	压力式水位计	隧道轴线上方
	混凝土检测	CCD	超声回弹综合法	进出口段

由于武汉轨道交通二号线越江段下穿长江,随着季节变化,隧道上部江水的水位存在波动,导致隧道受荷的变化,对隧道的各项监测指标都存在影响。这样引起的各项指标的有规律的微小变化,有助于反映本隧道中各项指标之间的相互作用关系。

### 2.3 隧道安全指标体系构建

根据《铁路隧道设计规范》<sup>[11]</sup>,运营隧道盾构结构的安全状态可以采用基于安全系数的容许应力法评价。容许应力法是根据衬砌截面上的最大压应力和最大拉应力确定截面安全系数。当衬砌截面强度由压应力控制时,其安全系数为

$$K = \frac{\sigma_w}{\sigma_c} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_w$  为衬砌混凝土的偏心受压容许应力实测值或预测值,MPa;  $\sigma_c$  为衬砌混凝土的最大偏心受压应力计算值,MPa。

当衬砌截面强度由拉应力控制时,其安全系数为

$$K = \frac{\sigma_{w1}}{\sigma_t} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_{w1}$  为衬砌混凝土的容许弯曲拉应力实测值或预测值,MPa;  $\sigma_t$  为衬砌混凝土的最大偏心受拉应力计算值,MPa。

同时,依据《隧道标准规范(盾构篇)及解说》<sup>[12]</sup>,反映隧道安全性的容许应力还包括钢筋的允许应力,螺栓的允许应力等。

因此,综合以上隧道安全性的评价方法,以及本工程的监测项目,用管片混凝土应力、钢筋应力和螺栓应力这 3 个指标来描述隧道的安全状态,并将这

3 个指标作为隧道安全性评价的输出函数。同时,将隧道纵向沉降值、管片接缝张开宽度、结构温度分布、隧道外侧土压力、隧道外侧水压力、管片接缝接触应力、水位变化值和混凝土碳化深度这 8 个因素作为安全性评价的输入函数。通过建立的输入和输出指标之间的 SVM 拟合函数,进行基于 EFAST 的各安全指标的全局敏感性分析,从而得到各个因素对隧道安全状态的影响规律。

## 3 监测数据分析

以武汉地铁 2 号线的监测数据作为原始数据,先将得到的监测数据进行 PSO-LSSVM 函数拟合,再在拟合函数的基础上,将监测数据按照高斯分布形式扩充成拥有 5 000 组数据的集。并利用该数据集进行 EFAST 全局敏感性分析,挖掘隧道安全指标之间的相互作用关系。

### 3.1 PSO-LSSVM 的函数拟合结果

为了从隧道的各安全指标监测值中得出表现隧道各安全指标之间相互作用关系的函数模型,从大量的监测数据中按照一定的时间间隔选取 100 组有一定差异的数据作为模型拟合数据,并随机将其中的 70 组数据作为训练数据,其他 30 组数据作为测试数据,分别得出了反映输入指标与 3 个输出指标相互关系的拟合函数,以管片混凝土应力为目标函数的模型辨识结果如图 6 所示。

为验证支持向量机预测的准确性,本文将对预测残差进行单位根检验和正态性检验。

预测误差  $e_t = |x_t - x_t^*|$ , 其中  $x_t, x_t^*$  分别为初

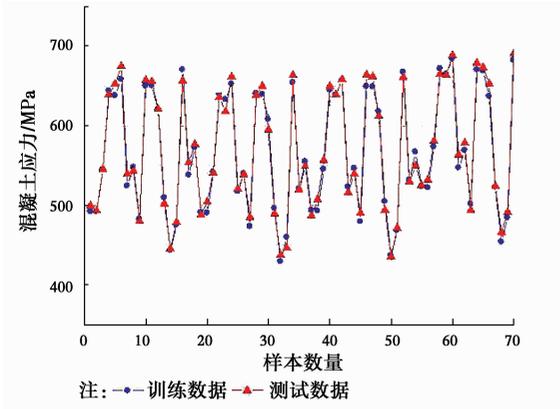


图 6 PSO-LSSVM 函数拟合与原始数据对比图  
 Fig. 6 Comparison of fitting data and original data by PSO-LSSVM method

始值和预测值; 预测结果的相对误差  $A(e_{(x_t)}) = \frac{e_{(x_t)}}{x_t}$ ; 误差有效度  $M = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t (1 - A(e_{(x_t)}))$ 。

分析发现隧道各安全指标关联模型的单位根检验和正态性检验均满足要求, 其有效度达到 0.961, 由此证明基于 PSO-LSSVM 的隧道各安全指标关联模型是准确有效的。

### 3.2 EFSAT 全局敏感性分析结果

将各安全指标监测值波动范围作为其 EFAST 全局性敏感性分析的参数取值范围, 在各参数取值范围中按照高斯分布随机生成 5 000 组数据, 得出对应的输出指标值, 然后, 再利用 EFAST 对各指标之间的全局敏感性进行分析, 进而得到敏感性较高的隧道安全影响指标。

3.2.1 不同的目标函数 分别以管片混凝土应力、管片钢筋应力以及连接螺栓应力值为目标函数, 基于实际数据分布规律, 令隧道安全指标隧道纵向沉降值、管片接缝张开宽度、结构温度分布、隧道外侧土压力、隧道外侧水压力、管片接缝接触应力、水位变化值和混凝土碳化深度指标服从高斯分布, 得到了关于目标函数的一阶敏感度(MSI)和全局总敏感度(TSI), 如图 7 所示。

图 7(a) 表明, 以管片混凝土应力为目标函数, MSI 和 TSI 最高的安全指标是管片接缝张开宽度, 分别为 0.41 和 0.54, 接缝张开宽度的敏感度明显高于其他参数。隧道纵向沉降值的 MSI 和 TSI 分别为 0.17 和 0.21 次之, 隧道外侧水压力、隧道外侧土压力、管片接缝接触应力的 MSI 和 TSI 分别为 0.12 和 0.16, 0.11 和 0.13, 0.10 和 0.13, 依次减小。而结构温度分布、水位变化值和混凝土碳化深

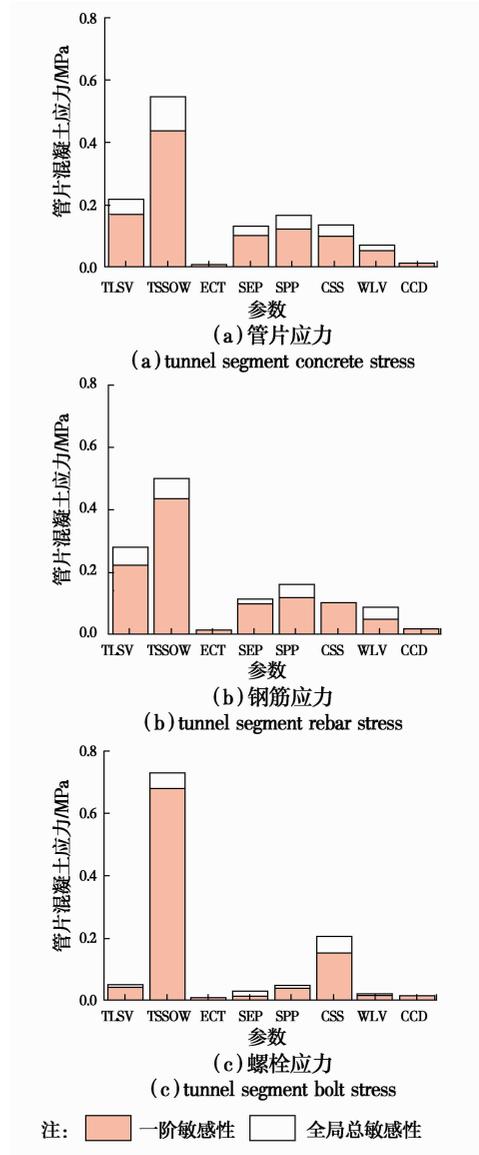


图 7 管片应力、钢筋应力和螺栓应力全局敏感性图  
 Fig. 7 Parameters MSIs and TSI-MSI with different the target functions

度的 TSI 和 MSI 都较小, 说明这 3 个参数对管片混凝土应力的应力影响比较小。

图 7(b) 是以钢筋应力为目标函数, 各安全指标的 MSI 和 TSI 大小与目标函数为管片混凝土应力的情况比较接近, 且各安全指标的 MSI 和 TSI 大小排序一样。这说明各安全指标对管片混凝土应力和钢筋应力的影响规律比较相似。

图 7(c) 以螺栓应力为目标函数, 参数 MSI 和 TSI 最高的安全指标是管片接缝张开宽度, 分别为 0.69 和 0.73, 接缝张开宽度的 SA 远远大于其他输入参数, 这说明接缝张开宽度的变化对螺栓的应力状态的影响很大。MSI 和 TSI 值第二大的参数是

管片接缝接触应力,分别为 0.16 和 0.20,而其他参数对螺栓应力的作用很小。

图 7 结果表明,分别以管片混凝土应力、钢筋应力以及螺栓应力为目标函数作为隧道安全指标相关性模型的输出时,得到的各参数的敏感度值并不相同,但参数的总敏感度大小排序大致类似。在各安全指标中,敏感度最大的是接缝张开,大大地超过了其他参数的敏感性,这一结论与封坤<sup>[13]</sup>和王慧等<sup>[14]</sup>对隧道安全运营的相关关键指标的研究一致。而接缝张开宽度对螺栓应力的影响最大,对管片混凝土应力的影响次之,对管片钢筋应力的影响最小。某一参数的 TSI-MSI 愈大,则说明该参数与其他参数之间的交互作用愈强烈。图 7 中 8 个参数各自的 TSI 相较于其 MSI 均有所增大,但 TSI 大小排序依

然不变,说明各安全指标之间交互作用并不是十分强烈。

3.2.2 不同的参数取值范围 在进行安全指标参数敏感性分析时,参数取值范围的变化会造成参数敏感性分析结果的差异<sup>[14]</sup>。为了研究安全指标参数范围变化对参数敏感性分析结果的影响,本文以管片混凝土应力作为目标函数,分析对混凝土应力影响最大的指标接缝张开宽度的取值采样区间,得到将该区间分成 3 个等值的小采样空间时,对各参数敏感性的影响。

考虑接缝张开宽度的采样区间分别为 0~2.67, 2.67~5.33, 5.33~8 时,对其他 7 个参数敏感性的影响,得到各参数敏感度见表 2。

表 2 不同参数取值范围下各参数指标的敏感度值

Table 2 Parameter TSIs associated with various TLSV ranges

参数	单位	范围 1	MSI	TSI	范围 2	MSI	TSI	范围 3	MSI	TSI
TLSV	mm	0~10	0.194	0.242	0~10	0.178	0.223	0~10	0.126	0.158
TSSOW	mm	0~2.67	0.148	0.164	2.67~5.33	0.341	0.420	5.33~8	0.608	0.857
ECT	°C	5~30	0.004	0.004	5~30	0.005	0.005	5~30	0.003	0.003
SEP	MPa	0.15~0.35	0.170	0.205	0.15~0.35	0.127	0.154	0.15~0.35	0.049	0.059
SPP	MPa	0.08~0.22	0.244	0.329	0.08~0.22	0.158	0.214	0.08~0.22	0.067	0.091
CSS	MPa	0~18	0.089	0.115	0~18	0.106	0.137	0~18	0.092	0.119
WLV	m	0~5	0.129	0.143	0~5	0.062	0.069	0~5	0.037	0.041
CCD	m	0~6	0.011	0.012	0~6	0.009	0.010	0~6	0.006	0.006

从表 2 中可以看出,当选用不同的参数取值范围时,各个参数的敏感度值和大小排序均发生了显著变化。当接缝张开宽度的采样区间分别为 0~2.67、2.67~5.33、5.33~8 时,其 TSI 分别为 0.164、0.420、0.857,说明随着接缝张开宽度参数取值的增加,其敏感度值显著增加。这与 Ma 等<sup>[15]</sup>的结论一致。当管片接缝张开值较小时,管片接缝指标对隧道安全的影响较小;随着管片接缝的变大,其对隧道安全性的影响越来越大。由此可知,合适的参数采样范围对隧道安全指标参数敏感性的分析结果具有重要的影响。

3.2.3 不同的分布函数 若选择不同的输入安全指标参数的分布函数,发现各安全指标的敏感性略有变化,但各指标的敏感性大小排序大致相同。以管片混凝土应力为目标函数,分别将输入的安全指标的参数分布函数选择为高斯分布、均匀分布和指数分布 3 种形式,各参数的 MSI 和 TSI 如图 8

所示。

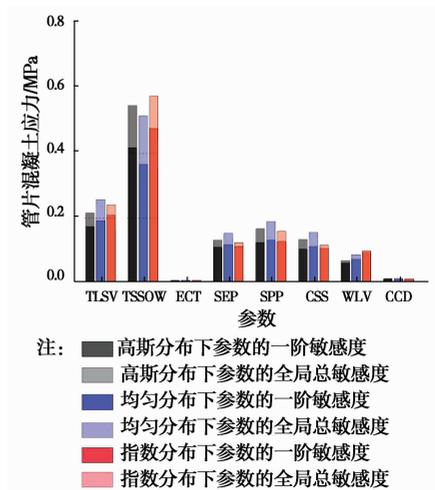


图 8 高斯,均匀,指数分布时参数敏感度

Fig. 8 SIs variation with various distribution

由图 8 可知,各安全指标的 MSI 和 TSI 值略有不同,但是各安全指标敏感性由大到小的排序大致

相同。当输入参数的分布函数是指数分布时,管片接缝张开值的 MSI 和 TSI 分别为 0.47 和 0.57 最大,采取高斯分布时接缝张开值的 MSI 和 TSI 要小一些,分别为 0.41 和 0.54,采取均匀分布时接缝张开值的 MSI 和 TSI 最小为 0.36 和 0.51。这个规律与 Ma 等<sup>[15]</sup>的结论一致。由于通过对监测数据的分析发现,现场实测数据更加符合高斯分布,因此,本文应该更注重采用高斯分布的各安全指标的敏感性分析结果。

## 4 结 论

从武汉轨道交通二号线越江段运营隧道的实际监测数据出发,基于 PSO-LSSVM 和 EFAST,定量分析评估了各个安全指标的全局敏感性,得出如下结论:

1) 通过敏感性分析,将参数的敏感性,特别是参数之间的敏感性进行了定量和排序。得出了敏感指标主要是管片接缝张开宽度、管片接缝接触应力和隧道沉降值;不敏感性指标主要是结构温度分布和混凝土碳化深度。

2) 目标函数(管片混凝土应力、钢筋应力和螺栓应力)发生变化时,各参数的敏感性变化较大。目标函数不同,接缝张开宽度的一阶敏感性和总敏感性均是最大的。而当目标函数为管片混凝土应力和管片钢筋应力时,各参数的一阶敏感性和总敏感性比较接近,说明各安全指标对管片混凝土应力和管片钢筋应力的影响规律比较相似。3 种不同的目标函数下,结构温度分布和混凝土碳化深度的一阶敏感性和总敏感性均很小,说明这两个参数对隧道安全状态来说是不敏感参数。

3) 选用不同的参数取值范围,各个参数的敏感度值和大小排序均发生了显著变化。当管片接缝张开值较小时,管片接缝指标对隧道安全的影响较小;随着管片接缝的变大,其对隧道安全性的影响越来越大。

(4) 选择不同的输入安全指标参数的分布函数,各安全指标的敏感性略有变化,但各指标的敏感性大小排序大致相同。当输入参数的分布函数是指数分布时,管片接缝张开值的 MSI 和 TSI 最大,采取高斯分布时接缝张开值的 MSI 和 TSI 较大,采取均匀分布时接缝张开值的 MSI 和 TSI 最小。现场实测数据更加符合高斯分布,因此,实际工程中应该采用高斯分布的各安全指标的敏感性分析结果。

## 参考文献:

- [1] 黄俊. 水底大直径盾构隧道健康监测系统研究与应用[D]. 北京:北京交通大学,2013.  
HUANG J. Research and application on health monitoring system for underwater large-diameter shield tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [2] ZHANG W, SUN K, LEI C, et al. Fuzzy analytic hierarchy process synthetic evaluation models for the health monitoring of shield tunnels [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2014, 29(9):676-688.
- [3] CRUZ P J S, SALGADO R. Performance of vibration based damage detection methods in bridges [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2009, 24(1):62-79.
- [4] ADEWUYI A P. Vibration-based damage localization in flexural structures using normalized modal macrostrain techniques from limited measurements [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2011, 26(3):154-172.
- [5] CUSSON D, LOUNIS Z, DAIGLE L. Durability monitoring for improved service life predictions of concrete bridge decks in corrosive environments [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2011, 26(7):524-541.
- [6] RAICH A. M, LISZKAI T R. Multi-objective optimization of sensor and excitation layouts for frequency response function based structural damage identification [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2012, 27(2):95-117.
- [7] 甘衍军. 复杂地球物理过程模型的敏感性分析方法与应用研究[D]. 北京:北京师范大学,2014.  
GAN Y J. Sensitivity analysis methods and applications of complex geophysical models [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2014. (in Chinese)
- [8] LIN S. Particle swarm optimization for parameter determination and feature selection of support vector machines [J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35(4):1817-1824.
- [9] SALTELLI A, TARANTOLA S, CHAN K. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output [J]. Technometrics, 1999, 41(1):39-56.
- [10] LAURET P, FOCK E, MARA T A. A node pruning algorithm fulased on a Fourier amplitude sensitivity test method [J]. Ieee Transactions on Neural Networks,

- 2006,17(2):273-293.
- [11] 中华人民共和国铁道部. 铁路隧道设计规范:TB 10003—2005,J 449—2005. 北京:中国铁道出版社, 2005:10-80.  
Code for design of railway tunnel:TB 10003—2005, J 449—2005. Beijing:China Railway Press, 2005: 10-80. (in Chinese)
- [12] 日本土木工程协会. 隧道标准规范(盾构篇)及解说 [M]. 2001:58-62.  
Japan Society of Civil Engineers. Japanese standard for shield tunneling [M]. 2001:58-62. (in Chinese)
- [13] 封坤. 大断面水下盾构隧道管片衬砌结构的力学行为研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.  
FENG K. Research on mechanical behavior of segmental lining structure for underwater shield tunnel with large cross-section [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2011. (in Chinese)
- [14] 王慧,黄宏伟. 软土地铁盾构隧道环缝张开可靠度分析 [J]. 土木建筑与环境工程,2013,35(6):1-6.  
WANG H, HUANG H W. Reliability analysis on metro shield tunnel segment joint in soft soil [J]. Journal of Civil Architectural and Environmental Engineering, 2013,35(6):12-18. (in Chinese)
- [15] MA C, LI X, WANG S. A global sensitivity analysis of soil parameters associated with backscattering using the advanced integral equation model [J]. Ieee Transactions on Geoscience And Remote Sensing, 2015, 53(10): 5613-5623.

(编辑 王秀玲)