

基于地质环境监测数据的轨道交通安全预警研究

陆 衍^{1,2,3}

(1. 国土资源部地面沉降监测与防治重点实验室, 上海 200072; 2. 上海地面沉降控制工程技术研究中心, 上海 200072;
3. 上海市地质调查研究院, 上海 200072)

摘 要: 针对复杂地质环境条件下的上海轨道交通结构安全问题, 建立健全的轨道交通安全监测机制, 包括基准网建设和监测、长期监测、监护监测和巡查等。在此基础上提出了改进的模糊层次分析法, 建立了轨道交通预警评估体系, 开发了上海轨道交通数字化监护管理系统, 并应用于轨道交通4号线海伦路站, 实现了基于地面沉降、地质环境、收敛等地质环境监测数据的轨道交通安全预警。

关键词: 地质环境; 轨道交通; 安全预警; 地面沉降

中图分类号: P271 文献标识码: A 文章编号: 1672-5867(2015)08-0044-03

The Research of Rail Transit Safety Early Warning Based on Geological Environmental Monitoring Data

LU Yan^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Land Subsidence Monitoring and Prevention, Ministry of Land and Resources of China, Shanghai 200072, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Land Subsidence, Shanghai 200072, China; 3. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China)

Abstract: According to structure safety of Shanghai rail transit in the complex geological environmental conditions, the monitoring mechanism of structure safety is set up, and it includes four aspects: the building and monitoring of datum net, long-term monitoring, guardianship monitoring and patrolling. On this basis, the paper proposes the improved fuzzy analytic hierarchy process methods, and develops Shanghai rail transit digitized care management system. Thus the system is used in line 4 Hailun station, rail transit safety early warning is realized based on geological environmental monitoring data that contain land subsidence, geological environment, convergence, etc.

Key words: geological environment; rail transit; safety early warning; land subsidence

0 引言

轨道交通是上海重要的公共交通工具之一,截至2014年,运营里程长达560 km。根据轨道交通建设远景规划,到2020年上海轨道交通运营线路将达到17条,运营总里程将超过800 km。不良的地质环境是影响轨道交通结构安全的主要因素之一,表现在累计沉降量大、局部差异沉降突出、隧道呈现“横鸭蛋”状、结构渗漏水等。轨道交通管理单位每年都会对地铁开展地质环境监测工作,根据地质环境监测数据判别隧道结构的安全状况。

1 轨道交通安全监测

1.1 沉降监测基准网

以上海区域地面沉降监测基准网为基础,设计了全国首条轨道交通沉降监测基准网,统一了轨道交通网络沉降监测高程基准,通过轨道交通网络沉降监测的整体平差计算,精确地反映了上海轨道交通实际沉降量。上海轨道交通沉降监测基准网建成于2011年,由41组基岩标组成,覆盖了目前所有的运营线路。基岩标深埋于基岩,稳定可靠,每10~15 km轨道交通线路布设有一组基岩标。轨道交通沉降监测基准网每年一等水准测量2次,上半年和下半年各测量1次。

收稿日期: 2015-03-24

基金项目: 2014 测绘地理信息公益性行业科研专项——特大城市公共设施安全监测技术体系与应急服务(HY14122136)资助

作者简介: 陆 衍(1966-),男,上海人,高级工程师,学士,主要从事重大基础设施安全监测技术管理和研究工作。

1.2 全线长期监测

为了解轨道交通运营线路的变形情况,每年开展全线定期沉降监测和隧道收敛监测。采用二等水准实施定期沉降监测,隧道段每年 2 次,高架段每年 1 次。采用全站仪监测隧道收敛,一般以测量隧道大直径为主。

1.3 监护监测

轨道交通沿线保护区范围内有工程施工时,对邻近轨道交通实施监测,监测内容包括沉降、收敛、位移等,对于特级项目和一级项目,还需实施自动化监测。监护监测的时间比较长,从工程项目进场施工开始,到竣工结束且轨道交通各项监测变形数据趋于稳定为止。

1.4 轨道交通巡查

1) 保护区地面线路巡查

对保护区范围内的违章施工项目进行巡查,一般每半个月巡查一次。

2) 地铁结构隐患巡查

对地下结构的渗漏水、管片脱落等结构病害进行巡查。

2 安全预警系统建设

建设安全预警体系,最终目的是对轨道交通开展数字化工作,将长期监测、监护监测、定期巡查等业务数据结合地质环境等基础数据,进行交互分析,建设轨道交通数字化监护管理平台,及时掌握地铁结构安全状况,对安全隐患及时提出预警。

2.1 数据集成

数据是预警的基础,分为基础数据和核心业务数据,如图 1 所示。



图 1 轨道交通预警系统数据管理图

Fig.1 Data management of rail transit early warning system

2.2 预警体系结构

预警体系由基础数据获取与管理、数据分析评价和预警决策三部分组成。预警体系结构如图 2 所示。

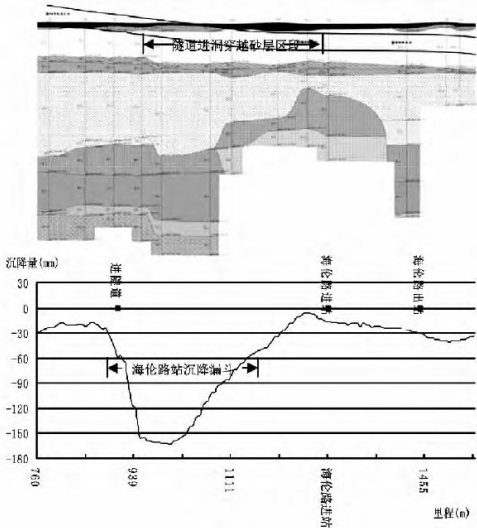


图 2 轨道交通预警体系结构图

Fig.2 Structure of rail transit early warning system

2.3 预警评价指标确定

在充分调查轨道交通地质环境特征及风险内涵的基础上,结合轨道交通结构本身特点,遴选出适宜并可量化统计的轨道交通安全预警评价指标(见表 1)。

表 1 轨道交通安全预警评价指标

Tab.1 Evaluation indexes of rail transit early warning system

一级	二级
沉降	累计沉降量
	沉降速率
	曲率半径
收敛	变化速率
	累计收敛变量
地质环境	穿越沙层
	穿越黏土层
	水中泥砂率
结构渗漏水	渗漏速度
	渗漏面积

2.4 数据交互分析

根据上海现有监测数据,采用改进的模糊层次分析法,建立模糊综合评估模型。以基础数据和核心业务数据作为评价指标,将互反型判断矩阵改为模糊一致性判断矩阵,并把和行归一法或方根法与特征向量法结合使用,与传统层次分析法相比,既解决了判断矩阵的一致性问题,又克服了因素的模糊性和权重难以恰当分配的困难。

1) 将因素集按属性分为每个子集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$, 设每个子集的因素为 u_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$), u_{ij} 表示第 i 个子集的第 j 个因素, $U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in}\}$ 。

2) 建立评价集合。设地铁地质环境安全评价集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$, 依次代表安全、较安全、较不安全、不安全。

3) 确定单因素评价矩阵 $R_i = (r_{ij})_{n \times k} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, 4)$ 。 r_{ij} 表示指标 r_{ij} 被评为 V_k 的隶属度, 例如对沉降变化速率可能 20% 的专家认为属于“安全”, 80% 的专家认为属于“较安全”, “20%” “80%” 就是隶属于“安全” “较安全” 的程度, 确定隶属度是模糊集合应用于实际问题的基础。

4) 采用改进的层次分析法确定 U_i 上的各因素权重分配向量 $W_i = \{w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}\}$ 。

首先, 建立优先关系矩阵 $f_{ij} = \begin{cases} 0.5, s(i) = s(j) \\ 1.0, s(i) > s(j) \\ 0, s(i) < s(j) \end{cases}$, 式

中, $S(i)$ 和 $S(j)$ 分别表示因素 a_i 和 a_j 的相对重要性程度, 根据上海市轨道交通实测数据及影响因素的分析, 得到模糊互补矩阵 $F = (f_{ij})_{n \times n}$ 。对矩阵 F 按行求和, 得到 $e_j = \sum_{i=1}^n f_{ij}$, 并实施如下数学变换, $e_{ij} = \frac{(e_i - e_j)}{2(n-1)} + 0.5$, 得到模糊

一致性判断矩阵 $E = \{e_{ij}\}_{n \times n}$; 利用转化公式 $d_{ij} = \frac{e_{ij}}{e_{ji}}$, 将互

补型判断矩阵 $E_{ij} = (e_{ij})_{n \times n}$ 变为互反型矩阵 $D = (d_{ij})_{n \times n}$ 。利用和行归一法求得排序向量 $W^{(0)} = (w^1, w^2, \dots, w^n)^T =$

$\left(\frac{\sum_{j=1}^n d_{1j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n d_{2j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^n d_{nj}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}} \right)^T$ 。以排序向量 $W^{(0)}$ 作为特

征值法的迭代初值进一步求解精度较高的排序向量 $W^{(k)}$, 输入特征向量初值 $\alpha^0 = W^{(0)} = (\alpha_{01}, \alpha_{02}, \dots, \alpha_{0n})^T$, 利用迭代公式 $\alpha^{k+1} = E\alpha^k$, 求得特征向量 α^{k+1} , 并求 α^{k+1} 的无穷范数 $\|\alpha^{k+1}\|_\infty$; 若 $\|\alpha^{k+1}\|_\infty - \|\alpha^k\|_\infty < \varepsilon$, 则 $\|\alpha^{k+1}\|_\infty$ 即为最大特征值 λ_{\max} , 将 α^{k+1} 归一化处理,

$\alpha^{k+1} = \left(\frac{\alpha_{k+1,1}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{k+1,i}}, \frac{\alpha_{k+1,2}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{k+1,i}}, \dots, \frac{\alpha_{k+1,n}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{k+1,i}} \right)$, 所得向量 $W^{(k)} =$

α^{k+1} 即为排序向量, 迭代结束。否则, 将 $\alpha^k = \frac{\alpha^{k+1}}{\|\alpha^{k+1}\|_\infty}$ 作为新初值, 再次迭代, 最后求得 $W^{(k)}$ 。

5) 进行一级综合评判。 $B_i = W_i \times R_i$

6) 将每一个 U_i 作为一个元素, 用 B_i 作为单因素评判, 又可构成评判矩阵为:

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{24} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{m4} \end{bmatrix}$$

7) 同样采用改进的层次分析法确定 U 上 m 个子集的权重分配向量 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$

8) 进行二级模糊综合评判, $A = T \times B$

9) 模糊向量单值化

分别给评价集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ 赋值 1, 2, 3, 4, 则安全系数 $F = \frac{4 \times A_1 + 3 \times A_2 + 2 \times A_3 + 1 \times A_4}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}$ 。轨道交通地质环境安全等级量化为见表 2。

表 2 轨道交通地质环境安全评价等级表

Tab. 2 Evaluation grade of rail transit geological environmental safety

等级	安全状态	安全系数 F
1	安全(地质环境风险小)	$3.5 < F \leq 4.0$
2	较安全(地质环境风险较小)	$2.5 < F \leq 3.5$
3	较不安全(地质环境风险较大)	$1.5 < F \leq 2.5$
4	不安全(地质环境风险大)	$1.0 < F \leq 1.5$

3 应用实例

3.1 结构概况

以上海轨道交通 4 号线海伦路站为例, 包括地铁盾构隧道进站引导段和出入库地上地下过渡段, 轨道高程在 $0 \sim -14.74$ m 之间, 全长 1 189.46 m。沿线地质条件复杂, ②₃ 层浅部沙层比较发育, 地铁隧道位于该层中, 且隧道处于古河道切割区, 下伏地层变化较剧烈, 大部分地区发育有较厚的⑤₂ 层沙、粉性土层, 局部地区发育有较厚的⑤₃ 层软黏土层。引导段及出入库段最大累计沉降量 (2006 ~ 2010) 为 -170.1 mm, 2010 年沉降量为 22 mm, 100 m 范围内的最大差异沉降达 120 mm, 沉降漏斗中心最小曲率半径达 1.2 m。地下巡查时发现管片有诸多裂缝, 局部有渗漏水。

3.2 地质环境安全评价

为全面了解该地铁结构的实际安全情况, 应用轨道交通安全预警系统进行地质环境安全评价。以该隧道中沉降评价指标为例, 请 20 位专家打分, 其中 15 位专家认为累计沉降量不安全, 5 位专家认为累计沉降量较不安全, 没有专家认为累计沉降量安全或较安全, 因此, 可得沉降指标中沉降速率指标 r_{11} 被评为 V 的隶属向量 $R_{11} = (0 \ 0 \ 0.25 \ 0.75)$ 。同理可得到其他指标对评语集合 V 的隶属向量, 组成沉降单因素评判矩阵:

$$R_1 = (R_{11} \ R_{12} \ R_{13})^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.25 & 0.75 \\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.6 \end{pmatrix}$$

采用改进的层次分析法确定权重 $W_1 = (0.4 \ 0.32 \ 0.28)$

一级综合评判结果:

$$B_1 = W_1 \times R_1$$

$$= (0.4 \ 0.32 \ 0.28) \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.25 & 0.75 \\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.6 \end{pmatrix} \\ = (0 \ 0.03 \ 0.34 \ 0.63)。$$

同理可得:

$$B_2 = (0 \ 0.03 \ 0.47 \ 0.50)$$

$$B_3 = (0 \ 0 \ 0.17 \ 0.83)$$

$$B_4 = (0.09 \ 0.24 \ 0.29 \ 0.38)$$

同样采用改进的层次分析法确定权重 $T = (0.21 \ 0.13 \ 0.29 \ 0.38)$

二级综合评判结果

(下转第 49 页)

放实验室基金”项目科技活动,鼓励学生通过申报开发实验室基金项目培养学生专业应用能力,以及科研意识和科研兴趣。同时,贵州省还设有“大学生创新创业项目”,还有全国的“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品赛等一系列大学生课外科技活动,通过引导学生积极申报各级各类大学生课外科技活动,培养学生 GIS 应用能力和科研意识。

依托地理信息系统开放实验室,2011 年至今所取得的成果主要有:在参加 GIS 竞赛方面共有 22 名学生获得“MapGIS 制图工程师”证书,获得操作技能组三维数据建模二等奖 1 个、矢量数据处理三等奖 2 个、操作技能组遥感数据处理类优秀奖 2 个。在积极引导申报各级各类大学生科研项目方面,获得立项项目有贵州省大学生创新创业项目 2 项,其中,重点项目 1 项;贵州工程应用技术学院开放实验室基金项目 8 项。

3.4 组织学生参与相关教师科研课题或者与地方相关部门建立相关联系

为与社会需求接轨,使学生学有所用、学以致用,同时,提高学生 GIS 应用能力,组织学生参与相关教师科研活动,或者参与地方相关部门项目等方面活动。目前,共有 16 人次参加教师各类科研课题 5 项,20 多人到区国土局等部门参与相关项目,主要负责基础数据处理、系统开发与服务器管理等工作。由于学生实际参与相关工作,在掌握基础理论知识的同时,进行相关应用能力的培养,升华了学生对于理论知识的理解。自 2011 年至今,共有 7 名学生考入地理信息系统专业方向的研究生。

(上接第 46 页)

$$A = T \times B = (0.21 \quad 0.13 \quad 0.29 \quad 0.38)$$

$$\times \begin{pmatrix} 0 & 0.03 & 0.34 & 0.63 \\ 0 & 0.03 & 0.47 & 0.50 \\ 0 & 0 & 0.17 & 0.83 \\ 0.09 & 0.24 & 0.29 & 0.38 \end{pmatrix}$$

$$= (0.03 \quad 0.10 \quad 0.29 \quad 0.58)$$

最终可得地铁结构地质环境安全的综合评价分值为 1.59。

根据以上评价结果可知,该地铁结构处于较不安全状态。

3.3 地质环境安全预警

依据预警系统中地铁地质环境安全评价结论,该段地铁的不均匀沉降较严重,对地铁安全造成较大危害,建议对该段地铁需要加强监测并进行维护,必要时可进行大范围维修。上述结论为 2012 年 1 月 22 日除夕夜该段地铁停运大修提供了技术支撑。

4 结束语

通过建立上海轨道交通地质环境安全预警系统,并将之应用于轨道交通地质环境安全评价中,得到以下结论:

1) 构建了安全预警评估体系,开发了上海轨道交通数字化监护管理系统,实现了基于地面沉降、地质环境、收敛等基础数据的地质安全预警。

4 结束语

通过开放实验室,我校地理科学专业学生的 GIS 应用技能得到了进一步的提高,培养了学生学习的兴趣,提高了学生的动手能力,升华了学生对于理论知识的理解。通过开放实验室为西部欠发达地区的师范类地理科学专业转型发展,以及高级地理科学专业应用型、技能型人才培养提供了参考与思路。

参考文献:

- [1] 汤国安,周卫. “地理信息系统”课程的设计与实践[J]. 地球信息科学,2005,7(2): 65-69.
- [2] 杨武年,简季,何政伟,等. “大地学”背景下的 GIS 本科专业课改思路[J]. 测绘信息工程,2010,35(4): 49-50.
- [3] 盛业华,郭达志,杜培军,等. “地理信息系统”课程教育的实践与思考[J]. 测绘通报,2000(6): 40-42.
- [4] 陈建. 非 GIS 专业地理信息系统课程实验教学研究初探[J]. 南京晓庄学院学报,2005,21(6): 99-102.
- [5] 陈正江,汤国安. 关于“地理信息系统”课的实践教学[J]. 高等理科教育,2002(2): 69-71.
- [6] 孙秋花,王辉. 基于开放实验室的应用型人才培养模式探索与实践[J]. 吉林省教育学院学报,2012,28(303): 103-104.
- [7] 张华,隋遂,何红. 基于地理学学科特点的实验室开放教学模式[J]. 地理教学,2013(7): 20-22.

[编辑: 栾丽杰]

2) 采用改进的模糊层次分析法,较好地解决了传统的层次分析法因素的模糊性以及权重难以恰当分配的问题,避免了人为因素造成的评价结果差异。

3) 将应用于上海轨道交通 4 号线海伦路站,进行地质环境安全评价,并进行了地质环境安全预警,为后期停运大修决策提供技术支撑。

参考文献:

- [1] Andrew Crowley. Construction as a manufacturing process: Lessons from the automotive industry [J]. Computer and Structure, 1998(67): 389-400.
- [2] 詹龙喜. 上海轨道交通数字化监护管理系统开发与应用[J]. 测绘通报,2013(S1): 236-239.
- [3] 刘智超. 广州市轨道交通五号线竣工验收控制测量技术探讨[J]. 测绘与空间地理信息,2014,37(7): 172-173.
- [4] 詹龙喜. 基于自动化监测技术的地铁沉降数据一致性分析[J]. 上海国土资源,2013(4): 84-86.
- [5] 王如路,贾坚,廖少明. 上海地铁监护实践[M]. 上海: 同济大学出版社,2013.

[编辑: 张 曦]