doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2019.05.017

地铁盾构法隧道贯通测量风险分析与控制

毕继鑫[1]，田林亚[1]，张　洋[2]，徐东明[3]，赵　亮[4]

（1. 浙江华东测绘地理信息有限公司，杭州 310014；2. 苏州地质工程勘察院，苏州 215129；
3. 中交一航局第三工程有限公司，大连 116083；4. 苏州市测绘院有限责任公司，苏州 215000）

摘　要：为研究盾构隧道贯通测量的风险分析方法，以苏州轨道交通 4 号线盾构隧道贯通测量项目工程为依托，借助风险分析理论，应用专家调查法结合灾害风险评估矩阵法($R=P\times C$)对调研的地铁盾构隧道可能存在的贯通测量风险进行识别、估计与评价，发现苏州轨道交通 4 号线盾构贯通测量项目存在隧道空间基准不统一、隧道定向测量、盾构穿越文保建筑沉降监测和隧道洞门钢环检测 4 个测量风险因素，评定出整个盾构隧道贯通测量的风险等级为Ⅱ级，并根据评估结果提出相应的风险控制措施，以降低和控制盾构隧道贯通测量的施工风险。研究结果有效控制了苏州轨道交通 4 号线盾构隧道的测量风险，可为类似工程的测量风险分析和控制提供借鉴。

关键词：地铁；隧道工程；风险分析与控制；专家调查法；灾害风险评估法；贯通测量风险

中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2019)05-0102-07

Risk Analysis and Control of Shield Subway Tunnel Breakthrough

BI Jixin[1], TIAN Linya[1], ZHANG Yang[2], XU Dongming[3], ZHAO Liang[2]

(1. Zhejiang Huadong Surveying, Mapping and Geoinformation Co., Ltd., Hangzhou 310014; 2. Suzhou Geological Engineering Investigation Institute, Suzhou, Jiangsu 215129; 3. No.3 En. Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116083; 4. Suzhou Surveying Institute Company, Suzhou, Jiangsu 215000)

Abstract: To conduct risk analysis on shield tunnel breakthrough, based on the shield tunnel hole-through of the Suzhou rail transit line 4 project, the theory of risk analysis along with the specialist survey method and disaster risk assessment matrix method ($R=P\times C$) were used to identify and evaluate the potential risks of subway shield tunnel breakthrough measurement. Four levels of risk factors of the Suzhou rail transit line 4 were assessed, including the disunion of spatial reference, tunnel orientation survey, shield crossing through settlement monitoring of cultural buildings, and detection of tunnel portal steel ring. The assessment showed that the overall shield tunnel's risk level is 2. Risk control measures were proposed to reduce and control the construction risks of the shield tunnels. The research effectively controlled the measurement risks of the shield tunnel of the Suzhou rail transit line 4, and provides recommendations for the risk analysis of similar projects.

Keywords: subway; tunnel engineering; risk analysis and control; specialists'method; disaster risk assessment; breakthrough risk

近些年来，中国城市隧道工程发展极为迅速，截至 2018 年 3 月，全国共有 29 座城市已建或在建地铁隧道工程 110 余项。隧道贯通是隧道工程的关键，决定着工程的成败，贯通测量是保证隧道贯通的重要手段和技术保证，然而因测量误差或测量错误造成的隧道贯通工程事故频频发生，其后果是隧道无法按原设计线型继续推进或直接影响隧道正常贯通，由此对工程质量、工期、投资均会造成巨大损失[1]。

收稿日期：2018-06-24　　**修回日期：**2018-07-09

第一作者：毕继鑫，男，助理工程师，工程硕士，主要从事精密工程测量理论与技术等方面的研究，bijixin7317@163.com

基金项目：江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18)；江苏省地质矿产勘查局科研项目(2016-KY-03)

随着现代化城市地铁建设的快速推进，无论是建设方还是承包方或施工方都对隧道贯通极为关注，为降低地铁隧道施工风险、保障人民生命财产安全，国内许多学者、专家已从盾构进出洞、盾构掘进施工、管片拼装、注浆、穿越建筑物和建造联络通道等方面对地铁盾构隧道施工风险进行了研究[2-3]，但不足之处在于均未对隧道贯通测量的风险源进行识别、评估、处置，更没有对地铁盾构隧道贯通测量各环节存在的技术风险进行研究，而隧道贯通测量的结果又受多种复杂因素的影响(包括各个环节的测量误差、测量的不确定性、施工误差和环境变化等)，不可避免地存在一定程度的贯通风险。如果能够做好风险管理工作，就可以在一定程度上减少施工过程中风险发生的概率，并及时采取措施以降低事故造成的损失。因此，贯通测量的风险分析和评价方法是一个有待研究的新课题。从测绘学科角度出发，结合风险分析与控制理论，提出适用于地铁盾构隧道贯通测量的风险分析与控制方法。

1 隧道工程测量风险

隧道工程隐藏着巨大的风险，对于隧道工程测量风险，将其定义为：在以隧道工程项目正常施工为目标的测量活动中，如果某项测量活动存在足以导致工程项目发生各类直接或间接损失的可能性，那么就称这项测量活动存在风险，而这项测量活动所引发的后果就称为风险事故。

隧道工程风险分析与控制的基本过程分为风险识别、风险估计、风险评价和风险控制 4 个阶段[4]：①风险识别阶段指组织专家评审团借助相关施工资料(包括水文地质、工程规划、周围建(构)筑物及类似工程风险设计等)和实际经验或采用一定手段辨识隧道工程潜在的风险；②风险估计阶段指运用一定的数学方法，分别从风险发生的可能性与风险发生后带来的损失两方面进行评估与分析，以获取对风险因素更为深刻的认识；③风险评价阶段指使用合适的方法对隧道工程中所存在的风险进行评价；④风险控制阶段是基于风险评价结果确定风险应对策略，并实时监控风险的发展。地铁盾构法隧道贯通测量风险分析及控制流程如图 1 所示。

2 建立隧道贯通测量风险评价标准

风险评价标准包括风险发生概率等级标准、风险损失等级标准和风险分级标准。地铁盾构隧道贯通测量的风险评价标准可参照国际隧道协会(ITA)制定的

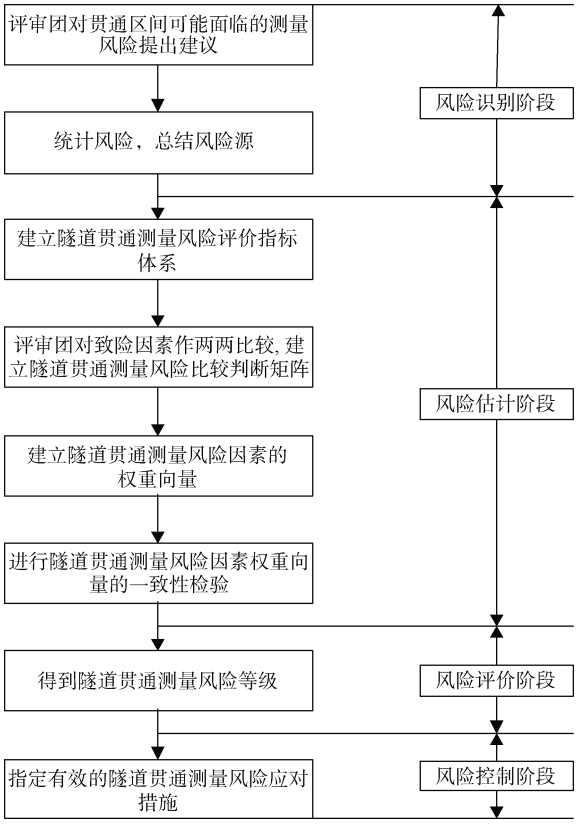

图 1 地铁盾构法隧道贯通测量风险分析及控制流程

Fig. 1 Risk analysis and control process for shield subway tunnel breakthrough

《隧道风险管理指南》[5]和建设部编制的《地铁及地下工程建设风险管理指南》[6]建立。根据风险发生概率的大小，将隧道贯通测量风险发生概率分为 5 级(见表 1)。隧道贯通中一旦发生测量风险事故就会对工程项目、第三方或周边环境等造成损失。风险损失包括人员伤亡、环境破坏、经济损失、工期延误和社会影响。综合以上损失的严重程度，建立地铁盾构法隧道贯通测量风险损失等级标准(见表 2)。根据风险发生概率和损失的等级，将风险等级分为 4 级，建立地铁盾构法隧道贯通测量风险等级打分表(见表 3)。不同等级的风险需要采用不同的风险管理和控制措施，不同等级风险的接受准则和相应处置对策及控制方案见表 4。

表 1 地铁盾构法隧道贯通测量风险发生概率等级标准

Tab.1 Risk probability rating criteria of shield subway tunnel breakthrough

等级	A	B	C	D	E
可能性	不可能	很少发生	偶尔发生	可能发生	频发
区间概率	$P<0.01\%$	$0.01\%\leqslant P<0.1\%$	$0.1\%\leqslant P<1\%$	$1\%\leqslant P<10\%$	$P\geqslant 10\%$
估值	1	2	3	4	5

表 2　地铁盾构法隧道贯通测量风险损失等级标准

Tab. 2　Risk loss rating standard of shield subway tunnel breakthrough

等级	风险损失严重程度	说明	估值
一级	可忽略	风险并不导致延误或明显损失	1
二级	需考虑	风险导致少量损失	2
三级	严重	风险导致可补偿的损失	3
四级	非常严重	风险导致相当大而可补偿损失	4
五级	灾难性	风险导致不可补偿的损失	5

表 3　地铁盾构法隧道贯通测量风险等级打分表

Tab. 3　Risk rating of shield subway tunnel breakthrough

等级	估值	说明
Ⅰ级	1～4	风险可以容忍，不需采取额外的措施
Ⅱ级	4～9	风险状态在可容忍边缘，可能需要准备预防措施
Ⅲ级	9～16	为减少风险，明确和执行既定的预防措施
Ⅳ级	16～25	为减少风险，除预防措施外，不惜代价采取防范措施

3　隧道贯通测量风险估计与评价方法

3.1　采用专家调查法建立隧道贯通测量风险评价指标体系

在总结以往盾构隧道贯通测量风险分析资料的基础上，利用德尔菲法[7]建立地铁盾构法隧道贯通测量风险评价指标体系。在建立风险评价指标体系之前，需要确定各专家的权重，然后对德尔菲法得到的数据采用加权平均法进行处理，即根据各个专家的资历、职称、影响力等因素对各个专家设定相应的权重，再对专家所作出的判断按其对应权重进行累加，得到目标最可能值。将专家分为 4 类(见表 5)，其中一类专家作出的判断最可靠，数据信息也最真实。地铁盾构隧道贯通测量风险评价指标体系以及后文的比较判断矩阵均应按照此方法实施。

表 4　地铁盾构法隧道贯通测量风险接受准则

Tab. 4　Risk acceptance criteria of shield subway tunnel breakthrough

等级	接受准则	处置对策	控制方案	应对部门
Ⅰ级	可忽略	无需采取风险处理措施，常规监测即可	日常管理和审视	参与建设各方
Ⅱ级	可接受	不需采取风险处理措施，需要注意监测	加强日常管理审视	参与建设各方
Ⅲ级	不愿接受	必须强化监测，采取处理措施降低风险等级，同时降低风险发生的成本不大于风险发生的损失	需防范、监控措施	政府部门、参与建设各方
Ⅳ级	拒绝接受	必须高度重视，并采取措施规避，否则必须将风险降低至可接受的水平	需制定控制、预警措施，或进行方案修正或调整等	

表 5　地铁盾构法隧道贯通测量评审专家分类

Tab. 5　Classification review experts of shield subway tunnel breakthrough

级别	一类	二类	三类	四类
专家分级说明	元老级专家(隧道工程领域) 项目经理(施工单位) 施工单位技术人员(高级职称以上)	施工单位技术人员(中级职称) 科研人员(高级职称以上) 设计人员(高级职称以上)	工程技术人员(初级职称) 科研人员(中级职称) 设计人员(中级职称)	设计人员(初级职称) 科研人员(初级职称)
专家权重 r	1.0	0.9	0.8	0.7

3.2　构建隧道贯通测量风险比较判断矩阵

比较判断矩阵可以对定性问题进行定量分析，采用 1～9 标度法建立比较判断矩阵，1～9 标度法的具体含义见文献[8]。

当地铁盾构隧道贯通测量含有 n 个致险因素时，对盾构隧道贯通测量指标体系中的 n 个致险因素进行两两比较，判断其相对重要性，即可获得比较判断矩阵

$$A=\begin{bmatrix}\frac{W_1}{W_1} & \frac{W_1}{W_2} & \cdots & \frac{W_1}{W_n}\\ \frac{W_2}{W_1} & \frac{W_2}{W_2} & \cdots & \frac{W_2}{W_n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \frac{W_n}{W_1} & \frac{W_n}{W_2} & \cdots & \frac{W_n}{W_n}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n}\\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn}\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中，W 代表每个致险因子的重要程度。

3.3　计算地铁盾构法隧道贯通测量风险因素的权重向量

根据矩阵论，比较判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 满足正互反矩阵[9]条件，其最大正特征根对应的特征向量体现多步累积效应，可作为各因素的权重向量。比较判断矩阵的最大特征根及其对应的特征向量可由下式计算：

$$\boldsymbol{A}\cdot\xi=\lambda\cdot\xi \tag{2}$$

式中：λ 为正互反矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的特征值；ξ 为正互反矩阵 $\boldsymbol{A}$ 对应于特征值 λ 的非零特征向量。

最后，通过式(3)对正互反矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的最大正特征根对应的特征向量进行归一化处理，即可得到隧道贯通测量风险因素的权重向量。

$$w_i = \frac{\overline{w}_i}{\sum_{i}^{n} \overline{w}_i} \tag{3}$$

3.4 隧道贯通测量风险因素权重向量的一致性检验

由于比较判断矩阵是人们根据一定的准则，对两两风险因素相对重要程度作出的判断，而作出的判断可能会隐含逻辑上的矛盾，存在判断上的偏差，为了确保求得指标权重的准确性，通常要在计算判断矩阵最大特征值后进行一致性检验，以确保逻辑上的一致。其检验步骤如下：

1) 计算一致性检验指标 CI

$$\mathrm{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \tag{4}$$

式中：n 为判断矩阵的维数；$\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值。

2) 确定平均随机一致性指标 RI。对随机判断矩阵的特征值进行多次重复计算，再取相应算术平均数即可得到平均随机一致性指标 RI。重复计算 1 000 次得到了 1～12 阶判断矩阵的平均随机一致性指标，见表 6。

表 6 1～12 阶判断矩阵的平均随机一致性指标

Tab.6 Average random consistency index of 1~12 order judgment matrix

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54

3) 计算一致性比例 CR。

一致性比例 CR 可通过下式计算：

$$\mathrm{CR} = \frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}} \tag{5}$$

当 CR<0.1 时，就可认为判断矩阵的一致性是可以接受的，此时就可用其归一化的特征向量作为权重向量。反之，计算的权重向量视为无效，应重新组织评审专家对构造的判断矩阵进行适当的修正。

3.5 隧道贯通测量风险评价

风险是事故发生的概率与损失的集合，其定义一般为

$$R = f(P, C) \tag{6}$$

式中：R 为事故风险；P 为事故风险发生的概率；C 为事故风险发生后对工程项目可能造成的损失估值。

实际工程中，最简单且应用最广的函数关系是 $R = P \times C$[10]。可根据 $R=P\times C$ 求得地铁盾构隧道贯通测量各致险因素所对应的风险值，并结合致险因素的权重向量计算考虑权重后的致险因素风险值，然后将考虑权重后的致险因素风险值相加，得到地铁盾构隧道贯通测量的风险值。最后，根据隧道贯通测量风险等级打分表(见表 3)确定盾构隧道贯通测量的风险等级。

4 实例应用分析

4.1 苏州轨道交通 4 号线盾构隧道工程概况

苏州轨道交通 4 号线主线全长 42.02 km，北起龙道浜，南至同里，共设车站 31 座，均为地下站。整条线要下穿 1 次沪宁铁路、8 次国省干道线、16 座桥梁、18 条河流和湖泊，沿线文化景观资源丰富(北寺塔、文庙、沧浪亭，人民路沿线的法桐、香樟等大树、古树)，地下管道错综复杂，增大了苏州轨道交通 4 号线隧道盾构的施工难度。为防范盾构风险事故的发生，相关单位组织 20 余位经验丰富的专家形成评审团(成员包括地质、工测、设计、业主等方面的专家和学者)，对整条线路实施了风险分析及管理研究，着重研究如何进行整条线路贯通测量环节的风险分析及管理方法。

4.2 盾构隧道贯通测量风险估计与评价

盾构隧道贯通测量工程项目控制因素较多，在综合参考近些年国内外盾构隧道风险研究成果和上文建立的隧道贯通测量风险评价标准的基础上，评审团对苏州轨道交通 4 号线盾构隧道贯通测量的致险因素进行识别，并根据以往盾构隧道贯通的施工经验给出隧道贯通测量各个致险因素发生的概率 P 和损失值 C，进而建立了相应的风险评价指标体系，见表 7。

表 7 苏州轨道交通 4 号线隧道贯通测量风险评价指标体系

Tab. 7 Risk evaluation index system of Suzhou rail transit line 4 shield subway tunnel breakthrough

风险项	主要风险因素	P	C
苏州轨道交通 4 号线盾构隧道贯通测量风险 U	隧道空间基准不统一 u_1	3	4
	隧道定向测量风险 u_2	3	4
	盾构穿越文保建筑沉降监测风险 u_3	2	3
	隧道洞门钢环检测风险 u_4	2	3

对指标体系中的 4 个致险因素进行两两比较(判断其相对重要性)，采用 1～9 标度法构建 4 号线隧道贯通测量风险比较判断矩阵，见表 8。

表 8　隧道贯通测量风险比较判断矩阵

Tab. 8　Risk comparison matrix of shield subway tunnel breakthrough

评判因素	u_1	u_2	u_3	u_4
u_1	1	1/7	1/3	1/5
u_2	7	1	7/5	1
u_3	3	5/7	1	3/5
u_4	5	1	5/3	1

建立的特征方程为

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/7 & 1/3 & 1/5 \\ 7 & 1 & 7/5 & 1 \\ 3 & 5/7 & 1 & 3/5 \\ 5 & 1 & 5/3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \lambda_{\max} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \tag{7}$$

解算求得判断矩阵的特征值 $\lambda_{\max}$=4.025 4，特征向量 U^{T}=(0.116 3　0.659 8　0.395 7　0.628 2)，特征向量归一化结果 $\bar{U}^{\mathrm{T}}$=(0.064 6　0.366 6　0.219 8　0.349 0)。

通过式(4)和式(5)，得到实例的一致性检验指标 CI=0.018 8，其一致性比例为 CR=0.002<0.1。因此，4 号线隧道贯通测量风险的权重向量为(0.064 6　0.366 6　0.219 8　0.349 0)。

根据 $R=P\times C$，结合致险因素权重向量，计算得到苏州轨道交通 4 号线盾构隧道贯通测量的致险因素风险值见表 9。

由表 9 计算得出 4 号线隧道贯通测量风险值，R=0.775 2+4.399 2+1.318 8+2.094 0=8.587 2，该风险值介于 4～9 之间，根据隧道贯通测量风险等级打分表(见表 3)，可知苏州轨道交通 4 号线盾构隧道贯通测量的风险等级为Ⅱ级，需要准备一定的预防措施。

表 9　苏州轨道 4 号线盾构隧道贯通测量的致险因素风险值

Tab. 9　Risk value to risk factor of Suzhou rail transit line 4 shield subway tunnel breakthrough

风险因素	u_1	u_2	u_3	u_4
$R=P\times C$	12	12	6	6
相对权重	0.064 6	0.366 6	0.219 8	0.349 0
风险值	0.775 2	4.399 2	1.318 8	2.094 0

4.3　盾构隧道贯通测量风险控制

4.3.1　隧道空间基准不统一控制措施

苏州地铁规划及建设需要不定期地完善和改建已有的苏州城市 GPS 控制网，导致苏州各条地铁隧道线路的起算基准无法统一，特别是不同线路交叉部位，其空间基准的内符合性较低。考虑到 SZCORS 系统与 IGS 跟踪站和苏州的城市高等级控制点均进行了统一联测，各点兼容性良好，因此应以 SZCORS 作为苏州轨道交通 4 号线隧道建设的空间基准，并对苏州轨道交通 4 号线隧道控制网质量成果进行分析。

4.3.2　隧道定向测量风险控制措施

隧道定向测量是由地面控制测量、联系测量、隧道导线测量和盾构位姿检测 4 个部分组成。为保证苏州轨道交通 4 号线顺利贯通，评审团制定了以下措施：

1) 地面控制测量需使用 GPS 测量后始发井和接受井井口位置，并保证其相对点位误差在 5 mm 之内。

2) 联系测量作业中，应严格按照规范作业，适当增加投点次数，减少重锤摆动，达到减小投点误差的目的。

3) 隧道导线测量时，应对地下导线的布设形式进行改善(可将地下导线布设成直伸导线、菱形导线、环形导线、矩形导线等)，在适当位置加测陀螺方位角控制地下导线边的方位，增加测量检核条件，减小地下导线方位误差的累积。

4) 定期对盾构的位置和姿态进行测量和检查，采用人工测量和盾构姿态自动测量系统相结合的方法对盾构的位姿进行检测；严格控制盾首中心、盾尾中心的横向坐标偏差和水平偏转角的大小；盾构位姿检测成果的精度与盾构参考点的标定测量、地下测量及采用的坐标转换方法密切相关，因此要求检测人员在以上 3 个环节重复检测。

4.3.3　盾构穿越文保建筑沉降监测风险控制措施

在苏州轨道交通 4 号线盾构隧道施工时，要采取有效措施减小施工引起的变形，以保护有历史意义和经济、社会意义的文保建筑。因此，应在隧道内及隧道施工影响范围内的文保建筑附近布设监测点，建立苏州轨道交通 4 号线隧道沉降测量控制网，定期进行监测，掌握隧道施工时和建成后对隧道及其周围文保建筑的影响。此外，分析盾构前方监测点的变形，如果变形量在–5～5 mm，则盾构通过时该监测点的变形量应控制在–30～10 mm，否则应调整出土量以控制地面沉降；如果盾构前方监测点变形量达到–20～5 mm 边界时，则应分析原因并制定相应整改措施。

4.3.4　隧道洞门钢环检测风险控制措施

苏州轨道交通 4 号线盾构隧道施工前，已在盾构机进出隧道洞口处安置了洞门钢环，洞门钢环的中心坐标确定了盾构机挖掘的起始方位和终止方位，也是确保盾构机安装无误的重要参考依据，为确保盾构机

能够顺利进出洞，需组织测量人员对施工完成后的洞门钢环的圆心坐标、半径、平整度以及圆度等空间形态指标进行准确测定和计算，分析和评价洞门钢环的空间形态，防止因洞门钢环变形引起盾构无法正确始发以及顺利出洞，避免盾构进出洞时出现零部件破损或洞口处基坑塌方事故。

4.4 风险控制措施的应用效果

苏州轨道交通 4 号线盾构隧道贯通测量项目工程在实际施工中的风险与预测吻合，全线路所有的隧道工程均在预期内贯通，并有所提前。通过采用上述措施进行应对和控制，取得了很好的施工效果：以 SZCORS 作为苏州轨道交通 4 号线的起算数据，为后期苏州地铁规划及建设统一了空间基准；隧道地上地下联系测量和地下定向测量结果准确，通过对盾构姿态的检测与调整，盾构机未偏离隧道设计轴线；97.5%的文保建筑物沉降点沉降值均控制在–2.5 mm 内，隆起均未超过 4 mm；对苏州轨道交通 4 号线所有洞门进行检测，发现顾家荡站南左洞门实际位置与设计位置存在 53.6 mm 偏差，施工人员及时进行了调整，确保了盾构机顺利进出洞。

5 结语

将风险分析与管理理论应用于隧道贯通测量，借助《隧道风险管理指南》和《地铁及地下工程建设风险管理指南》建立地铁盾构法隧道贯通测量风险评价标准，采用专家调查法对苏州轨道交通 4 号线隧道贯通测量存在的风险因素进行识别，采用灾害风险评估矩阵法评估风险因素的风险等级，对地铁盾构隧道贯通测量共有的隧道空间基准不统一、隧道定向测量、盾构穿越文保建筑沉降监测和隧道洞门检测等风险因素提出了相应的控制措施，研究成果为风险分析理论在测绘领域的实际应用提供了参考，研究的盾构隧道贯通测量风险分析及控制方法可以融入整个隧道工程的风险研究中，使隧道风险分析理论更加完备，具有重要的理论和工程应用价值，为盾构隧道施工灾害预防提供技术支撑。

参考文献

[1] 李希元，闫静雅，孙艳萍. 盾构隧道施工工程事故的原因与对策[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 968-971.
LI Xiyuan, YAN Jingya, SUN Yanping. Reasons and countermeasures of accidents happened during the shield tunnel construction[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2005, 1(6): 968-971.

[2] 王飞. 深圳地铁某项目盾构隧道施工安全风险管理研究[D]. 北京：北京交通大学, 2018.
WANG Fei. Study on safety risk management of a project in Shenzhen metro shield tunnel construction[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[3] EINSTEIN H.H, et al. Risk and Risk Analysis in Rock Engineering[J]. Tunneling and underground space technology, 1996, 11(2): 141-155.

[4] 周红波，何锡兴，蒋建军，等. 地铁盾构法隧道工程建设风险识别与应对[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 475-479.
ZHOU Hongbo, HE Xixing, JIANG Jianjun, et al. Risk identification and handling in construction of metro shield tunnel project[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2006, 2(3): 475-479.

[5] ESKESEN S D, TENGBORG P, KAMPMANN J, et al. Guidelines for tunnelling risk management: international tunnelling association, working group No.2[J]. Tunnelling and underground space technology, 2004(19): 217-237.

[6] 中国土木工程学会，同济大学. 地铁及地下工程建设风险管理指南[M]. 北京：中国建筑工业出版社, 2007.
China Civil Engineering Society, Tongji University. Guideline of risk management for construction of subway and underground works[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.

[7] 刘伟涛，顾鸿，李春洪. 基于德尔菲法的专家评估方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(S1): 189-191.
LIU Weitao, GU Hong, LI Chunhong. Expert evaluation method based on Delphi method[J]. Computer engineering, 2011, 37(S1): 189-191.

[8] 王海龙，戎密仁，戎虎仁，等. 铁路隧道震害评估中标度法及权重值的确定研究[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(6): 75-79.
WANG Hailong, RONG Miren, RONG Huren, et al. Reseearch on scale method and weighted value for railway tunnel earthquake disaster assessment[J]. Railway standard design, 2016, 60(6): 75-79.

[9] 刘坦，李继乾. 基于模糊一致矩阵性质的正互反矩阵一致性调整方法[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2008, 22(2): 200-202.
LIU Tan, LI Jiqian. A method of improving the consistence of the judgment matrix based on the property of the

fuzzy consistent judgment matrix[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2008, 22(2): 200-202.

[10] 陈自海，陈建军，杨建辉. 基于模糊层次分析法的盾构隧道施工风险分析[J]. 地下空间与工程学报，2013, 9(6): 1427-1432.
CHEN Zihai, CHEN Jianjun, YANG Jianhui. Risk analysis of tunnel shield machine driving in construction process based on fuzzy AHP[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2013, 9(6): 1427-1432.

（编辑：郝京红）

（上接第 95 页）

3) 通过对钢混结合轨道梁静动力特性的有限元计算分析，可以看出，钢混结合轨道梁具备良好的受力性能，拥有非常好的应用前景，是未来单轨交通发展的较优方案。

参考文献

[1] 陈文艳. 创新驱动重庆跨座式单轨交通的发展[J]. 隧道与轨道交通, 2017(2): 1-5.
CHEN Wenyan. Innovation driven development of straddle-type monorail transportation in Chongqing[J]. Underground enfineering and tunnels, 2017(2): 1-5.

[2] 谢向阳，朱尔玉，赵祎. 跨座式单轨交通预应力钢混组合轨道梁设计[J]. 铁道建筑技术, 2017(2): 50-53.
XIE Xiangyang, ZHU Eryu, ZHAO Yi. Design of prestressed steel-concrete composite track beam for straddle type monorail transit[J]. Railway construction technology, 2017(2): 50-53.

[3] 跨座式单轨交通设计规范: GB 50458—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Code for design of straddle monorail transit: GB 50458—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

[4] 李晓斌，蒲黔辉，杨永清.跨座式轻轨钢轨道梁静动力分析[J]. 世界桥梁, 2007(3): 48-50.

[5] 铁路桥涵设计规范: TB 10002—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
Code for design on railway bridge and culvert: TB 10002—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

[6] 铁路桥梁钢结构设计规范: TB 10091—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
Code for design on steel structure of railway bridge: TB 10091—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

[7] 张洪伟. 钢-混简支组合轨道梁动力特性研究[C]//2006 钢桥科技论坛全国学术会议论文集. 北京交通大学学报, 2006(4).

[8] 王立福，杨佑发. 跨座式单轨交通箱形钢轨道梁动力特性研究[J]. 钢结构, 2004, 19(2): 51-53.
WANG Lifu, YANG Youfa. Study of dynamic behavior of steel box rail beam for straddle single[J]. Steet construction, 2004, 19(2): 51-53.

（编辑：郝京红）

重庆轨道交通所有线路都可扫码购票

8 月 14 日上午 10 时，重庆市民不到一分钟就完成了自助扫码购票。从重庆轨道集团获悉，今年来，重庆市加快推进轨道交通移动支付扫码购票工作，上半年移动支付扫码购票实现全线网覆盖。据介绍，目前重庆市已运营的轨道交通线路有 8 条，即 1、2、3、4、5、6、10 号线和环线，全线网日客运量约 300 万乘次。从目前轨道交通购票支付种类来看，市民更偏爱移动扫码购票。数据显示，移动扫码购票量约占总购票量的 60%，远远大于现金支付和刷卡支付购票量。

为方便市民快捷乘坐轨道交通，目前重庆轨道集团正在对全线网 160 多个车站的所有闸机进行改造，将安装扫码设备。预计 2019 年底，重庆市所有轨道交通线路，将实现移动支付过闸全线网覆盖，即乘客乘坐轨道交通，无需再购票。即只需在轨道闸机前，用手机一扫就可进站乘车。

摘编自 http://www.camet.org.cn/2019-08-19