

# 地铁隧道管片错台风险评估体系的研究和探讨<sup>\*</sup>

冯天炜<sup>1,2</sup> 周佳媚<sup>2</sup> 张君<sup>3</sup> 赵林<sup>3</sup>

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142; 2. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031, 3. 中铁建大桥工程局集团有限公司, 武汉 430063)

**摘要:** 管片错台是盾构施工过程中的常见现象, 会引发管片局部破损(开裂)、盾尾漏浆、隧道漏水等风险, 而导致错台的主要因素有同步注浆控制、盾构姿态、总推力反力竖向分力、掘进速度、地层条件和拼装作业等。基于风险评估理论, 笔者采用广义函数法建立地铁隧道的风险评估体系。利用  $G_1$  法计算风险指标的权重; 由风险指标与错台量的关系, 将定性指标予以量化, 同时, 按照统一标准进行规范化, 得到其价值标准; 计算系统的总价值, 将系统的安全等级划分为优、良、中、差 4 级。采用此评价体系对地铁隧道进行管片错台风险评估, 得出量化的评估结果, 进而为选取掘进参数和提出施工对策提供依据。

**关键词:** 地铁隧道; 风险评估; 管片错台; 广义函数法

中图分类号: U458

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)04-1066-07

## Research on Risk Assessment System of Segments Dislocation in Metro Tunnel

Feng Tianwei<sup>1,2</sup>, Zhou Jiamei<sup>2</sup>, Zhang Jun<sup>3</sup>, Zhao Lin<sup>3</sup>

(1. China Railway Design Corporation, Tianjin 300412, P.R.China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R. China; 3. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co. Ltd., Wuhan 430063, P.R. China)

**Abstract:** Lots of risks exist in segments dislocation, such as segments local cracks (or breakage), plasma leakage of shield tail or tunnel leaks and so on. Those are mainly caused by synchronized grouting control, shield attitude, vertical component force, tunneling speeds, ground conditions and segments assembling. With the help of risk assessment method and generalized function method, a risk assessment system of the segments dislocation in metro tunnel was established. Weight of each risk index was calculated by  $G_1$  method; the value standards of each risk indexes were built, which was based on their influences on shield segments dislocation, as well as the various index must be normalized; at last, total value of the system was calculated and the security grade was put forward, including four grades: excellent, good, common, poor. As using the system to assess the segments dislocation of each metro tunnel, we can get the quantitative assessment results to provide basis for selecting tunneling parameters and putting forward construction countermeasures.

**Keywords:** subway tunnel; risk assessment; segments dislocation; generalized function method

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-10-19(修改稿)

作者简介: 冯天炜(1991-) 男, 山西运城人, 硕士生助理工程师, 主要从事地下工程领域的研究。

E-mail: fengtianw@sina.cn

通讯作者: 周佳媚(1973-) 女, 四川都江堰人, 博士, 教授, 主要从事地下工程领域的教学与科研工作。

E-mail: tmzjm@home.swjtu.edu.cn

## 0 引言

盾构管片错台是在地铁修建中经常遇到的问题,是指管片拼装后同一环相邻块管片或者不同环管片之间的尺寸偏差。由力学原理可知,衬砌环在注浆压力、水浮力、地层荷载等外荷载的作用下,处于不平衡状态时会有运动的趋势,当相邻环管片的位移不同时,就会导致环缝错台的发生。造成管片错台的原因<sup>[1-5]</sup>主要有:拼装作业不规范、注浆控制不当、盾构姿态控制不利、千斤顶的不均匀顶力、地层性质、掘进速度等。管片错台不仅影响隧道的外观,而且会导致隧道漏水、管片破损(开裂)、盾尾漏浆等病害,严重影响隧道的质量,同时增加巨额的修复费用。因此,为了更科学地评价管片错台的不利影响,建立管片错台的风险评估体系已成为迫切需求。

目前,实行风险管理在国内外已变得越来越普遍。在国外,工程风险管理与评估的起步较早,2004年国际隧道与地下空间协会发布了隧道风险管理指南<sup>[6]</sup>,对施工时的风险控制有重要的指导意义。国内学者在风险评估及其在隧道工程的应用方面也做了大量的研究,黄宏伟等<sup>[7-8]</sup>对有关隧道施工时的大量风险理论进行了研究并开发相关控制软件;闫玉茹等<sup>[9]</sup>将风险评估理论应用于海底隧道的钻爆法施工中;黄小城等<sup>[10]</sup>、吴治生等<sup>[11]</sup>对岩溶隧道的风险评估体系进行了研究。然而学者们针对管片错台的风险问题研究很少,而错台量与施工参数的选取密切相关,因此,本文以成都地铁某区间为依托,利用风险评估中的广义函数法来确立分析模型,引用 $G_1$ 法确定风险因素的权重,根据所测管片错台数据与风险因素之间的关系,建立管片错台的评估体系,为施工时的参数选取提供依据。

## 1 工程背景

本文以成都地铁某区间工程为研究背景。盾构区间线路(左右线)总长约3.5 km,为双孔圆形隧道,主要附属工程包括3个联络通道(含泵房)、4个洞门。隧道埋深约15 m,段内均为第四系(Q)地层覆盖,以粘性土和砂卵石层为主,地表以杂填土为主。盾构管片采用通用型衬砌管片,错缝拼装,外径为6.3 m,内径为5.7 m,厚度为0.3 m,幅宽为1.5 m。管片混凝土强度等级为C50,主筋采用HRB335钢,螺栓采用弯曲螺栓,强度等级为5.8

级,直径为30 mm。

## 2 评价方法

对管片错台评价分析时,采用广义函数法<sup>[12]</sup>。该方法是对系统目标和要求达到程度的衡量,被广泛应用于隧道运营安全评价中,本文首次采用该方法来分析衡量管片错台的质量控制水平。由于管片错台是一个多专项指标系统的评价,因此需要采用加权的方法进行综合分析,故建立如下广义价值函数:

$$V = \sum_i \omega_i U_i \quad (1)$$

式中: $V$ 为系统的总价值, $V$ 值越大,则系统越优; $\omega_i$ 为风险指标的权重; $U_i$ 为风险指标的价值(经过统一标准、规范化处理后的价值)。

运用广义函数法对盾构隧道管片错台的综合安全等级进行评价的步骤如下:

(1) 权重 $\omega_i$ 的确定。根据各风险指标对管片错台安全等级这个总目标的作用、影响及重要性,采用一定的权值分配法,确定各专项指标的权重,权重 $\omega_i$ 满足式(2)。

$$\sum_i \omega_i = 1 \quad (2)$$

(2) 价值 $U_i$ 的确定。由于各风险指标采用的评价方法不同,评价结果的标准、形式也不相同,而广义价值函数中 $U_i$ 的价值应该是在同一标准下的价值,因此,在综合评价前应将专项评价结果按照一定的标准进行规范化处理,即转化同一标准下的价值 $U_i$ 。

(3) 计算系统的总价值 $V$ 。按照式(1)进行计算,可得系统总价值。

(4) 综合安全等级的划分。按照系统价值与安全等级间的换算标准,将广义价值函数中计算得到的管片错台的安全总价值转化为评价对象的综合安全等级。

## 3 参数确定

### 3.1 风险指标的确定

管片错台风险评估是施工参数选取的重要依据,管片局部漏水、开裂、破损是可能发生的潜在风险事故。因此,结合现行规范规程,通过工程类比及文献查阅,根据已有的勘测、设计资料,分析确定出6个风险因素集,包括同步注浆控制、盾构姿态、掘进速度、总推力反力的竖向分力、拼装作业、地层条件。评价指标体系如图1所示。

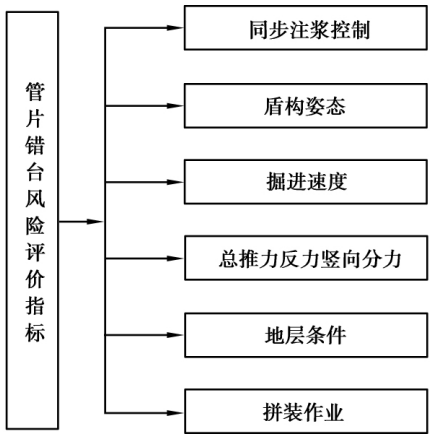


Fig.1 Evaluation index system of shield segments dislocation

3.2 风险指标权重  $\omega_i$  的确定

风险因素权重  $\omega_i$  的确定采用基于“功能驱动”原理的赋权法<sup>[12]</sup>，其中具有代表性的两种方法为特征值法和  $G_1$  法。相比于特征值法， $G_1$  法的优越性在于无须进行一致性检验，故采用  $G_1$  法进行权重  $\omega_i$  的确定。

$G_1$  法的计算步骤如下：

3.2.1 确定序关系

序关系的确定遵循下列规定：若评价指标  $x_m$  相对于某评价准则（或目标）的重要性程度大于（或不小于） $x_n$  时，则记为  $x_m > x_n$ 。则依照上述规定可以确定唯一的序关系：

$$x_1 > x_2 > \cdots > x_k \tag{4}$$

3.2.2 给出  $x_{m-1}$  与  $x_m$  间相对重要程度的比较判断

设专家（决策者）关于评价指标  $x_{m-1}$  与  $x_m$  的重要性程度之比  $\omega_{m-1}/\omega_m$  的理性判断定义为：

$$r_m = \omega_{m-1}/\omega_m \quad m = k(k-1, \cdots, 3, 2) \tag{5}$$

$r_m$  的赋值可参考表 1。

表 1  $r_m$  赋值参考表

Table 1 Value of  $r_m$  in different situations

$r_m$	说 明
1.0	指标 $x_{m-1}$ 与指标 $x_m$ 具有同样的重要性
1.2	指标 $x_{m-1}$ 比指标 $x_m$ 稍微重要
1.4	指标 $x_{m-1}$ 比指标 $x_m$ 明显重要
1.6	指标 $x_{m-1}$ 比指标 $x_m$ 强烈重要
1.8	指标 $x_{m-1}$ 比指标 $x_m$ 极端重要

3.2.3 权重系数的计算

若专家（或决策者）给出  $r_m$  的理性赋值满足表 1 的要求，则  $\omega_k$  为：

$$\omega_k = \left( 1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_i \right)^{-1} \tag{6}$$

则根据式（5）可得：

$$\omega_{m-1} = r_m \omega_m \quad m = k(k-1, \cdots, 3, 2) \tag{7}$$

决策者给出的风险指标的相对重要程度如表 2 所示。

表 2 各风险指标的相对重要程度

Table 2 Relative importance of each risk factors

项目	与后者的相对重要性程度	$r_m$
注浆控制	稍微重要	1.2
盾构姿态	同等重要	1.0
拼装作业	明显重要	1.4
总推力反力竖向分力	稍微重要	1.2
地层条件	稍微重要	1.2
掘进速度	—	—

根据表 2 中各风险指标的相对重要程度，按式（6）、式（7）计算各指标权重，如表 3 所示。

表 3 各风险指标的权重

Table 3 Weights of each risk index

项目	权重 $\omega_i$
注浆控制	0.24
盾构姿态	0.2
拼装作业	0.2
总推力反力竖向反力	0.14
地层条件	0.12
掘进速度	0.10

3.3 风险指标价值  $U_i$  的确定

根据成都地铁某区间各风险指标与错台量之间的关系，确定各风险指标的价值  $U_i$ ，并将其按统一标准进行转化，得到其价值标准，统一标准的定义如表 4 所示。

表 4 统一标准的定义

Table 4 Definition of uniform standard

控制指标对应的 错台量/mm	$\leq 5$	5~10	10~15	$\geq 15$
等级	优	良	中	差

3.3.1 同步注浆控制

区间同步注浆时，注浆压力差与浆液的配比是影响管片纵向位移的主要因素<sup>[13]</sup>。由于整个线路均采用双液浆，浆液的配比相同，故分析同步注浆控制与错台量的关系时，只考虑注浆压力的影响，不考虑浆液配比的影响。

注浆压力差与错台量的关系(部分环管片拱顶位置) 如图 2 所示。

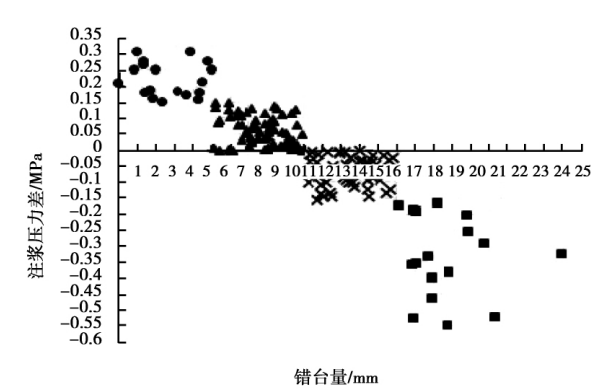


图 2 同步注浆压力差的变化对管片错台量的影响  
Fig.2 Influence of synchronized grouting pressure difference variation on shield segments dislocation

根据图 2 中注浆压力差与错台量的关系,可确定注浆控制的价值  $U_1$ ,并根据错台量的范围将其按表 4 中的统一标准进行转化,得到其价值标准,如表 5 所示。

表 5 同步注浆控制的价值标准

注浆压力差 /MPa	0.15~0.3	0~0.15	-0.15~0	≤-0.15
	(优)	(良)	(中)	(差)
$U_1$	85~100	65~85	50~65	≤50

注: 括号内为按统一标准进行转化后的指标

3.3.2 盾构姿态

盾构姿态是通过掘进千斤顶作用到管片上(油缸的分布如图 3 所示),当  $F_A \neq F_C$  时导致产生竖向偏差,当  $F_B \neq F_D$  时导致产生水平偏差,由于水平偏差与纵向错台呈正交关系,影响较小,故分析时忽略其影响。因此,假定  $F_B = F_D$  且  $F_A + F_B + F_C + F_D = \text{Con}$ ,分析  $F_A$  与  $F_C$  的偏差对纵向错台量的影响。将  $F_A$  与  $F_C$  构成的力系进行简化,结果为一个合力  $F_{he} = F_A + F_C$  及偏离  $x$  轴的附加偏心距  $e$ ,如图 3 所示。 $e$  的大小可以反映  $F_A$  与  $F_C$  的偏差程度,因此可将偏心距  $e$  作为盾构姿态的控制指标,其计算公式如式(8)所示。

$$e = \frac{2(F_C - F_A)R}{(F_A + F_C)} \tag{8}$$

式中:  $F_A$  为 A 组油缸的千斤顶推力;  $F_C$  为 C 组油缸的千斤顶推力;  $R$  为盾构隧道的外半径。

偏心距与错台量的关系(部分环管片拱顶位置) 如图 4 所示。

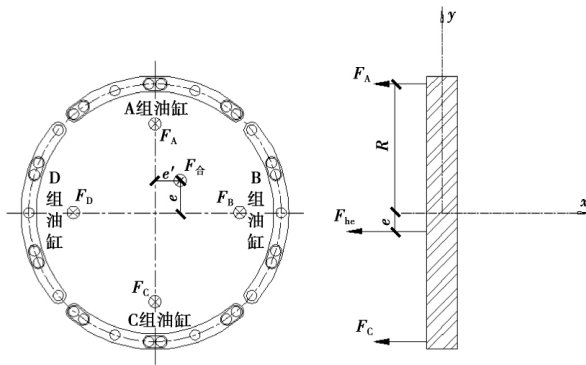


图 3 盾构千斤顶分布(左)及偏心距计算简图(右)  
Fig.3 Distribution of pushing jacks on a shield (left) and the calculation diagram of eccentricity (right)

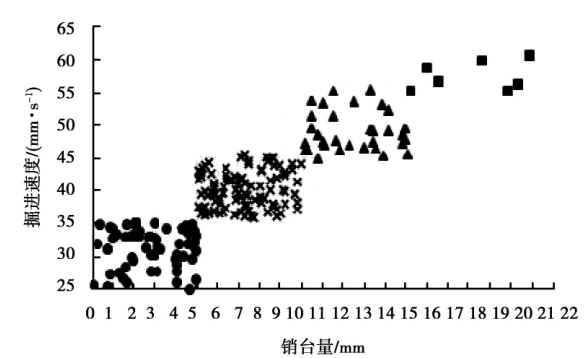


图 4 偏心距变化对管片错台量的影响  
Fig.4 Influence of eccentricity variation on shield segments dislocation

根据图 4 中偏心距与错台量的关系,可确定盾构姿态的价值  $U_2$ ,并根据错台量的范围将其按表 4 中的统一标准进行转化,得到其价值标准,如表 6 所示。

表 6 盾构姿态控制的价值标准

偏心距 /m	-0.4~0	0~0.4	0.4~0.6	>0.6
	(优)	(良)	(中)	(差)
$U_2$	90~100	80~90	50~80	≤50

注: 括号内为按统一标准进行转化后的指标

3.3.3 拼装作业

对于拼装作业完成的质量,文献[14]中规定,地铁隧道拼装验收应满足如下条件:衬砌成环后直径椭圆度允许偏差±6‰D(±6‰×6 300=37.8 mm,  $D$  为隧道的外直径),隧道轴线平面位置允许偏差±100 mm,隧道轴线高程允许偏差±100 mm。

根据如上规定,并结合管片实际发生的错台量对拼装作业等级进行如下分级,如表 7 所示。

表 7 拼装作业分级

Table 7 Classification of segments assembling control

拼装作业等级	成环后直径允许偏差/mm	轴线平面位置允许偏差/mm	轴线高程允许偏差/mm	错台量/mm
甲	≤10	<40	<30	≤5
乙	10~25	40~70	30~60	5~10
丙	25~37	70~100	60~100	10~15
丁	>37	>100	>100	>15

根据表 7 中定义分级标准,可确定拼装作业的价值  $U_3$ ,并根据错台量的范围将其按表 4 中的统一标准进行转化,得到其价值标准,如表 8 所示。

表 8 管片拼装控制的价值标准

Table 8 Value standard of segments assembling control

拼装作业标准等级	甲 (优)	乙 (良)	丙 (中)	丁 (差)
$U_3$	90~100	80~90	50~80	≤50

注:括号内为按统一标准进行转化后的指标

3.3.4 总推力反力的竖向分力

当盾构机掘进的实际轴线偏离设计轴线时,总推力就会在竖向产生分离,作用于管片之上,影响管片的位移,导致错台的发生。总推力反力的竖向分力计算公式如式(9)所示<sup>[13]</sup>。

$$F_y = F \sin(\theta_1 + \tan \theta_2) \tag{9}$$

式中:  $F_y$  为总推力反力的竖向分力,假定向上为正、向下为负;  $F$  为千斤顶总推力的反力;  $\theta_1$  为盾构俯仰角,假定盾构磕头掘进时俯仰角为正值,仰头掘进时为负值;  $\tan \theta_2$  为隧道设计坡度,假定下坡时为正、上坡时为负。

总推力反力的竖向分力与错台的关系(部分环管片拱顶位置)如图 5 所示。

根据图 5 总推力竖向分力与错台量的关系,可确定总推力反力的竖向分力的价值  $U_4$ ,并根据错台量的范围将其按表 4 中的统一标准进行转化,得到其价值标准,如表 9 所示。

表 9 竖向分力控制的价值标准

Table 9 Value standard of vertical component force control

总推力竖向反力/kN	≤200 (优)	200~300 (良)	300~400 (中)	≥400 (差)
$U_4$	85~100	70~85	45~70	≤45

注:括号内为按统一标准进行转化后的指标

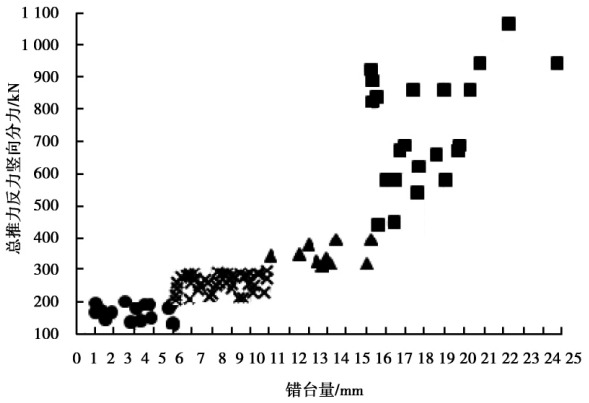


图 5 总推力竖向分力变化对管片错台量的影响

Fig.5 Influence of vertical component force variation on the shield segments dislocation

3.3.5 地层条件

地铁隧道中,地层的类型以及地下水的发育情况均会影响管片的位移,导致错台的发生。根据文献[15],地铁隧道中几种典型的地层按其对于隧道位移的影响程度由高到低依次为砂土、粉土、黏土、软黏土。根据文献[16],地下水状态的分级如表 10 所示。故将考虑地下水状态的地层条件作如下分级,如表 11 所示。

表 10 地下水状态的分级

Table 10 Classification of groundwater conditions

级 别	状 态	渗水量 $L/(\text{min} \cdot 10 \text{ m})$
I	干燥或湿润	<10
II	偶有渗水	10~25
III	经常渗水	25~125

表 11 考虑地下水修正后的地层条件分级

Table 11 Classification of foundation soil considering groundwater conditions

地下水状态分级	地层类型			
	砂土	粉土	黏土	软黏土
I	I	II	III	IV
II	I	III	IV	VI
III	II	IV	V	VI

根据表 11 中修正后的地层条件分级,确定地层条件的价值  $U_5$ ,并根据工程实际经验,将 I、II 级划分为等级优,III 级划分为等级良,IV 级划分为等级中,V、VI 级划分为等级差,则得到其统一转化后的价值标准如表 12 所示。

表 12 地层条件的价值标准

Table 12 Value standard of ground conditions

地层条件	I、II ( 优)	III ( 良)	IV ( 中)	V、VI ( 差)
$U_5$	95~100	75~95	40~75	$\leq 40$

注: 括号内为按统一标准进行转化后的指标。

3.3.6 掘进速度

盾构附加荷载在其下卧层的作用时间取决于盾构掘进速度和停机时间。掘进速度越快,正常停机时间或非正常停机时间越短,盾构附加应力作用下其下卧土层固结沉降越小。管片安装完毕后,荷载作用在下卧层上,此时下卧土层固结沉降就会越大,因此,管片发生的位移就会越大,产生较大错台的可能性就会越大。

掘进速度与错台的关系(部分环管片拱顶位置)如图 6 所示。

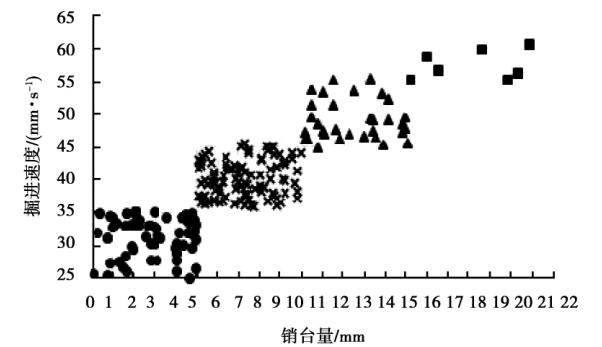


图 6 掘进速度的变化对管片错台量的影响  
Fig.6 Influence curve of different tunneling speeds on the shield segments dislocation

根据图 6 中掘进速度与错台量之间的关系,可确定掘进速度的价值  $U_6$ ,并根据错台量的范围将其按表 4 中的统一标准进行转化,得到其价值标准,如表 13 所示。

表 13 掘进速度控制的价值标准

Table 13 The value standard of tunneling speeds control

掘进速度 $/(mm \cdot s^{-1})$	25~35 ( 优)	36~45 ( 良)	46~55 ( 中)	$>55$ ( 差)
$U_6$	90~100	70~90	40~70	$\leq 40$

注: 括号内为按统一标准进行转化后的指标。

3.4 管片错台评估等级

根据上述各风险因素的评估权重与评估价值,按照式(1)计算将盾构错台控制的质量等级分为

四级,如表 14 所示。

表 14 管片错台安全分级表

Table 14 The security grade of the shield segments dislocation

安全等级	优	良	中	差
安全得分	88.7~100	72.2~88.7	47.1~72.2	$\leq 47.1$

对于任一地铁隧道,采用该评价体系进行管片错台风险评估时,可以根据系统的安全等级为掘进过程中施工参数的选取提供依据。当安全等级为优时,应采用现有参数继续掘进;当安全等级为良时,施工情况与最优等级相差较小,需要对参数进行小幅调整,则可按照权重由小到大的顺序检查并调整参数;当安全等级为中时,施工质量与最优等级相差较大,需要对参数进行较大幅度的调整,则可按照权重由大到小的顺序调整参数;当安全等级为差时,应立即停止施工,检查参数选取是否正确,对已经完成的工程采取必要的修复措施。

4 结论

(1) 以成都地铁某区间管片错台的现场实测为背景,采用广义函数法,建立了管片错台的六指标风险评估体系,将定性的评价指标作定量化处理,并按照统一标准进行规范化,从而使得评价指标之间具有可比性。

(2) 根据决策者的评价,采用  $G_1$ 法确定的风险因素的权重由高到低依次为:注浆控制、盾构姿态、拼装作业、总推力反力竖向分力、地层条件、掘进速度。

(3) 对于任一地铁隧道,采用该评价体系进行管片错台风险评估时,当安全得分在 88.7~100 之间时,系统的安全等级为优,此时应采用现有参数继续掘进;当得分在 72.2~88.7 时,系统的安全等级为良,此时按照权重由小到大的顺序对参数进行微调,保证较高的安全得分;当得分在 47.1~72.2 时,系统的安全等级为中,此时按照权重由大到小的顺序较大幅度调整参数;当得分低于 47.1 时,系统的安全等级为差,此时应立即停止施工,检查参数选取是否正确,对已经完成的工程采取必要的修复措施。

本文旨在提出采用广义函数法进行管片错台风险评估这一思想,评价体系中尚未考虑到全部的风险影响因素,还需作进一步研究与完善。

## 参考文献(References)

- [1] 陈俊生,莫海鸿.盾构隧道管片施工阶段力学行为的三维有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增2):3482-3489.(Chen Junsheng, Mo Haihong. Three-dimensional finite element analysis of mechanical behaviors of shield tunnel segment during construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (Supp.2): 3482-3489. (in Chinese))
- [2] 钟志全.盾构管片错台分析及措施[J].建筑机械化,2006,27(9):43-45.(Zhong Zhiquan. Analysis and measures about slab staggering of duct piece on shield machine [J]. Construction Mechanization, 2006, 27 (9): 43-45. (in Chinese))
- [3] 周明军.盾构隧道管片结构纵向错台研究[J].铁道建筑技术,2008(5):80-83.(Zhou Mingjun. Study on longitudinal dislocation of the shield tunnel segment [J]. Railway Construction Technology, 2008 (5): 80-83. (in Chinese))
- [4] 李宇杰,何平,秦东平.盾构隧道管片错台的影响分析[J].工程力学,2012,29(11):277-282.(Li Yujie, He Ping, Qin Dongping. Influence analysis on longitudinal dislocation for shield tunnel segment [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(11): 277-282. (in Chinese))
- [5] 秦建设,朱伟.盾构姿态控制引起管片错台及开裂问题研究[J].施工技术,2004,33(10):25-27.(Qin Jianshe, Zhu Wei. Study of dislocation of duct pieces and crack problems caused by shield attitude control [J]. Construction Technology, 2004, 33(10): 25-27. (in Chinese))
- [6] Eskesen S, Tengborg P, Kampmann J, et al. Guidelines for tunneling risk management: Inter-national tunneling association, working group No. 2 [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19 (3): 217-237.
- [7] 黄宏伟.隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J].地下空间与工程学报,2006,2(1):13-20.(Huang Hongwei. State-of-the-art of the research on risk management in construction of tunnel and underground works [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 13-20. (in Chinese))
- [8] 黄宏伟,曾明,陈亮,等.基于风险数据库的盾构隧道施工风险管理软件(TRM1.0)开发[J].地下空间与工程学报,2006,2(1):36-41.(Huang Hongwei, Zeng Ming, Chen Liang, et al. Risk management software (TRM1.0) based on risk database for shield tunneling [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 36-41. (in Chinese))
- [9] 闫玉茹,黄宏伟,胡群芳,等.大连湾海底隧道钻爆法施工风险评估研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增2):3616-3624.(Yan Yuru, Huang Hongwei, Hu Qunfang, et al. Risk assessment on drill and blasting method of DaLian bay subsea tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26( Supp.2), 3616-3624. (in Chinese))
- [10] 黄小城,陈秋南,阳跃朋,等.可拓理论对复杂条件下岩溶隧道的风险评估[J].地下空间与工程学报,2013,9(5):1179-1185.(Huang Xiaocheng, Chen Qiunan, Yang Yuepeng, et al. Risk evaluation of karst tunnel under complex geological condition with extension theory [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 1179-1185. (in Chinese))
- [11] 吴治生,张杰.岩溶隧道风险影响因素及评估[J].铁道工程学报,2011,28(10):90-95.(Wu Zhisheng, Zhang Jie. Influence factors of karst tunnel risk and risk assessmeng [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(10): 90-95. (in Chinese))
- [12] 韩直,杨荣尚,易富军,等.公路隧道运营安全技术[M].北京:人民交通出版社,2012.(Han Zhi, Yang Rongshang, Yi Fujun, et al. Operation safety technology of highway tunnel [M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese))
- [13] 季昌,周顺华,许恺,等.盾构隧道管片施工期上浮影响因素的现场试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增2):3019-3026.(Ji Chang, Zhou Shunhua, Xu Kai, et al. Field test research on influence factor of upward moving of shield tunnel segments during construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 ( Supp. 2): 3019-3026. (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.盾构法隧道施工与验收规范(GB50446—2008)[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for construction and acceptance of shield tunnelling method (GB50446—2008) [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))
- [15] 肖明清,孙文昊,韩向阳.盾构隧道管片上浮问题研究[J].岩土力学,2009,30(4):1041-1045.(Xiao Mingqing, Sun Wenhao, Han Xiangyang. Research on upward moving of segments of shield tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1041-1045. (in Chinese))
- [16] 中华人民共和国铁道部.铁路隧道设计规范(TB10003—2005)[S].北京:中国铁道出版社,2005.(Ministry of railways of the People's Republic of China. Code for design on tunnel of railway(TB10003—2005) [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005. (in Chinese))