

# 基于层次分析法的 TBM 滚刀评价方式<sup>\*</sup>

李 雪<sup>1,2</sup> 陈 霖<sup>1</sup> 霍 鹏<sup>1,3</sup> 马文帅<sup>4</sup> 龚子邦<sup>1</sup> 吴九七<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 610500, 成都;

2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海;

3. 四川航天建筑工程有限公司, 610100, 成都;

4. 中铁十九局集团公司轨道交通工程有限公司, 101300, 北京)

**摘 要** [目的] 为了减少 TBM(硬岩隧道掘进机)在高磨蚀性岩层中掘进时的换刀次数,以及选出最适用于高磨蚀性岩层的滚刀,提出一种基于层次分析法的滚刀评价方法。

[方法] 建立了滚刀磨损失效危害评价模型;选取 7 个磨损失效类型因素,基于层次分析法建立了滚刀磨损失效危害评价模型和比较判断矩阵,计算出各失效类型危害的占比;以广佛东环城际铁路大源站至太和站区间线路为例,对 4 个常用品牌的滚刀进行定量分析;建立风险评价分值表,分析 4 个品牌的滚刀在使用过程中的失效影响评价价值。[结果及结论] 高磨蚀岩层中的滚刀非正常磨损占比为 23.29%,正常磨损占比为 76.71%。c 品牌和 d 品牌滚刀的失效影响评价价值分别为 7.141 和 4.816,远小于 a 品牌滚刀的失效影响评价价值 7.587 和 b 品牌滚刀的失效影响评价价值 9.058。d 品牌滚刀的相对磨损速率大于 c 品牌滚刀,因此 c 品牌滚刀最适用于高磨蚀性岩层。a 品牌滚刀适用于硬度极大的岩层, b 品牌滚刀不推荐使用, d 品牌滚刀适用于硬度较小的岩层。

**关键词** 硬岩隧道; 层次分析法; 滚刀评价方式

**中图分类号** U455.39

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.02.007

## TBM Roller Cutter Evaluation Method Based on Analytic Hierarchy Process

LI Xue<sup>1,2</sup>, CHEN Lin<sup>1</sup>, HUO Peng<sup>1,3</sup>, MA Wen-shuai<sup>4</sup>, GONG Zibang<sup>1</sup>, WU Jiuqi<sup>1</sup>

(1. School of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, 610500, Chengdu, China; 2. Shanghai Rail Transit Structure Durability and System Safety Key Laboratory, 201804, Shanghai, China; 3. Sichuan Aerospace Construction Engineering Co., Ltd., 610100, Chengdu, China; 4. China Railway 19th Bureau Group Rail Transit Engineering Co., Ltd., 101300, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] In order to reduce the number of cutter replacements during TBM (hard rock tunnel boring ma-

chine) excavation in highly abrasive rock strata and select the most suitable roller cutter for highly abrasive rock strata, a roller cutter evaluation method based on AHP (analytic hierarchy process) is proposed. [Method] An evaluation model for roller cutter wear failure and hazards is established. Seven factors related to wear failure are selected, and an evaluation model and comparative judgment matrix for roller cutter wear failure are developed based on AHP. The proportions of hazard for each failure type are calculated. Taking the interval between Dayuan Station-Taihe Station on Guangzhou-Foshan East Ring Intercity Railway as an example, a quantitative analysis is conducted on four commonly used brands of roller cutters. A risk assessment scoring table is established to analyze the failure impact evaluation values in the use of four roller cutter brands. [Result & Conclusion] The proportion of abnormal cutter wear in highly abrasive rock strata accounts for 23.29%, while normal wear accounts for 76.71%. The failure impact evaluation values for brand C and brand D roller cutters are 7.141 and 4.816 respectively, which are much lower than the failure impact evaluation value of brand A (7.587) and brand B (9.058) roller cutters. The relative wear rate of brand D roller cutters is higher than that of brand C cutters, indicating that brand C cutters are most suitable for highly abrasive rock strata. Brand A roller cutters are suitable for high hardness level rock strata, brand B cutters are not recommended for use, and brand D cutters are suitable for lower hardness level rock strata.

**Key words** hard rock tunnel; analytic hierarchy process; roller cutter evaluation method

在高磨蚀性岩层中,TBM(硬岩隧道掘进机)采用的主要刀具为滚刀,但掘进过程中刀具磨损问题较为突出。刀具磨损后的频繁换刀不仅影响施工工期,还增加了施工成本,刀具的检测与更换在实

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51808469);上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室开放基金项目(R201902);四川省应用基础研究计划项目(22YYJC3133)

际施工过程中所用时间占比高达 20% ~ 40%,换刀成本占到了总施工成本的 1/3<sup>[1]</sup>。

刀具在高磨蚀性岩层中的磨损问题一直是该领域的研究难点,针对这一问题,国内外学者大多通过建立刀具磨损预测模型来进行研究。文献[2]提出刀具磨损的主要原因是磨粒磨损和黏着磨损,并建立了滚刀磨损预测通用计算模型。文献[3]研究了滚刀的运动轨迹和磨粒分布对刀具磨损的影响,建立了砂卵石地层 TBM 刀具的磨损预测模型。文献[4-5]针对高磨蚀性岩层中的刀具磨损严重问题,利用缩尺滚刀进行了室内试验,并基于现场试验验证建立了高磨蚀性岩层中的滚刀磨损预测模型。文献[6]以成都地铁 1 号线和 7 号线为例,总结了砂卵石岩层中影响滚刀磨损量的各种因素。文献[7]研究了滚刀张拉破岩模式和 CSM(科罗拉多力学模型),对高磨蚀性岩层中滚刀的非正常磨损进行了监测和实例分析。文献[8]对复合地层中的滚刀磨损风险等级进行了过模糊评判,针对不同岩性中的刀具选择问题进行了研究分析。

目前,对于硬岩岩层中滚刀的寿命预测及磨损规律的研究较多,但鲜少有文献针对不同的滚刀评

价体系进行研究。基于此,本文通过选取不同品牌的滚刀,以控制变量法设计了现场试验,统计分析了不同刀具在粉砂岩地层中的磨损特征。采用层次分析法,选取正常磨损和非正常磨损的 7 个影响因素,建立滚刀磨损失效危害评价模型。通过滚刀失效影响评价值对不同品牌的滚刀直接进行评分,选出最优滚刀品牌。本文研究可为高磨蚀性岩层中滚刀的比选提供基础。

## 1 工程背景介绍

### 1.1 工程概况

广佛东环城际铁路大源站至太和站区间线路长约 6.80 km,采用两台土压平衡和 TBM 双模式盾构进行掘进施工。地铁隧道穿越的地层主要为中风化片麻岩(占 32%)和强风化粉砂岩(占 25%)。盾构隧道穿越的地层主要为中风化粉砂岩和强风化粉砂岩。岩样天然抗压强度为 2.75 ~ 139.50 MPa,抗压强度变化大,岩层软硬不均,刀具磨损严重。隧址区属预丘陵地貌,地势起伏大,隧道埋深为 14.5 ~ 15.8 m。掘进地层纵断面示意图如图 1 所示。

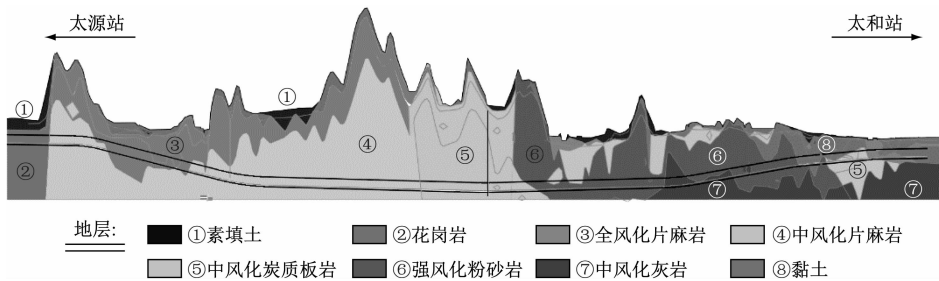


图 1 掘进地层纵断面示意图

Fig. 1 Diagram of tunneling strata longitudinal profile

### 1.2 现场试验方案

在大源站至太和站区间掘进过程中,4 家滚刀品牌可供选择,为选择相同条件下掘进距离长、刀具磨损小、高磨蚀性岩层适应性好的刀具方案,设计了控制变量试验,即控制刀间距、掘进地层、滚动半径等参数保持不变,对掘进的滚刀进行现场对比试验分析,现场试验信息如表 1 所示。

TBM 刀盘按照 1 + 2 分块形式设计,滚刀共 59 把,S1—S12 滚刀为中心滚刀,S13—S49 为正面滚刀,S50—S58B 为边缘滚刀,刀盘布局示意图如图 2 所示。中心刀具采用双刃滚刀,其余采用单刃滚刀,滚刀规格均为 17 寸(56.61 cm)。选取右线管

表 1 现场试验信息

Tab. 1 Field test information

试验里程	地层分布	刀具品牌	刀具编号
DSK41 + 589.4— DSK41 + 468.7	40% 中风化粉砂岩, 40% 强风化粉砂岩, 20% 全风化粉砂岩	a	S51、S56
		b	S54、S52
		c	S50、S57
		d	S55、S53

片 179 环—245 环为试验区段,掘进距离为 120.6 m,穿越地层包括中风化及强风化粉砂岩地层。以边缘滚刀 S50—S57 作为试验用刀,即图 2 所示边缘区域刀具。

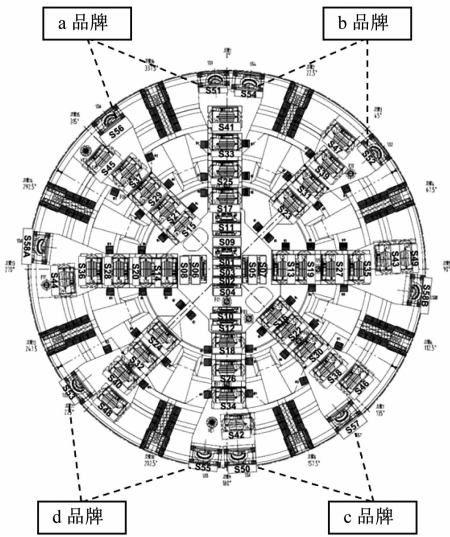


图2 刀盘布局示意图

Fig. 2 Diagram of cutterhead arrangement

为研究高磨蚀性地层下滚刀的磨损规律及类型,统计了179环—245环所有刀具的磨损数据,经分析发现,在掘进过程中,滚刀磨损分为正常磨损和非正常磨损。滚刀的正常磨损失效比例达到了

76.71%,究其原因主要为,在刀具破岩过程中,刀具与岩石发生相互摩擦切削,造成刀具相对均匀的磨蚀损耗。滚刀的非正常磨损失效比例达到了23.29%,其中偏磨占比为14.20%,占比较高。刀具非正常磨损情况统计如表2所示。

2 基于层次分析法的滚刀评价方法

2.1 滚刀磨损失效危害评价模型

采用层次分析法确定盾构刀具磨损中各失效类型因素所造成风险的相对权重,权重越高则危害性越大,权重越低则危害性越小。基于前文所述的磨损类型,建立磨损因素集  $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7\}^{[9]}$ ,根据层次分析法建立评价指标体系,所建立的滚刀磨损失效危害评价模型如图3所示。将滚刀磨损失效划分为正常磨损失效与非正常磨损失效两大类,非正常磨损失效下属各类型(包括单边或多边弦偏磨、刃偏磨或刀刃磨尖、轴承磨损、刀圈脱出或断裂、卷刃、挡圈脱落、正常磨损)作为基础评价因子,对滚刀失效危害进行综合评价。

表2 刀具非正常磨损情况统计

Tab. 2 Statistics of cutter abnormal wear conditions

磨损表现	占比/%	产生原因	磨损影响
单边或多边弦偏磨	14.20	在进行掘进时受到风化粉砂岩的摩擦力,妨碍其自转的正常进行,从而一直保持刀具某侧切割岩层,产生单边或多边弦偏磨	掘进效率低下,破岩不均,严重时导致轴承破坏,甚至损坏刀盘
挡圈脱落	2.15	安装过程中,盘形滚刀挡圈焊接加固不牢或者韧性不足	刀圈稳定性下降,挡圈与正常工作刀具进行反复碰撞磨损,增大刀具磨损
刀圈脱出或断裂	4.07	刀圈刚度不足而引起的冲击疲劳断裂或温度骤变引起的内应力增加破坏	脱落的刀圈位于刀盘前部、与正常工作刀具进行反复碰撞切割,易造成刀具或刀盘损坏
卷刃	1.47	刀圈刚度不足导致受高强度冲击后产生应变	掘进效率下降,增大相邻滚刀负担
刃偏磨或刀刃磨尖	0.30	刀圈两侧受磨损严重,造成刀尖变薄	掘进效率下降,增大相邻滚刀负担
轴承磨损	1.10	滚刀发生弦偏磨后未及时更换滚刀,导致偏磨越来越严重,直至磨到滚刀的轴承位置	整个刀具损坏,严重时损坏刀盘

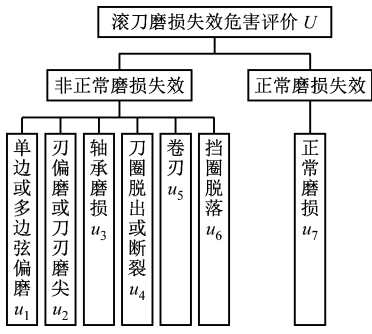


图3 滚刀磨损失效危害评价模型

Fig. 3 Damage evaluation model of roller cutter wear failures

2.2 建立比较判断矩阵与一致性检验

基于1到9的比例标度进行危害调查与专家咨询调查,按照危害越大,评价分数越高的评价机制进行排名,风险评价分值表如表3所示。针对影响滚刀失效危害性评价的7个因素,分别根据表3中的风险评价分值进行两两比较,可以得到比较判断矩阵A,其示意图如图4所示。

用方根法对比较判断矩阵A进行特征值及特征向量求解,计算7种失效类型危害的权重( $w_{1q}, \dots, w_{7q}$ ):

表 3 风险评价分值表  
Tab.3 Project risk evaluation scores

风险评价分值/分	定义
1	因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 同样重要
2	1 分和 3 分判断结果的中间值
3	因素 <i>i</i> 比因素 <i>j</i> 略重要
4	3 分和 5 分判断结果的中间值
5	因素 <i>i</i> 比因素 <i>j</i> 稍重要
6	5 分和 7 分判断结果的中间值
7	因素 <i>i</i> 比因素 <i>j</i> 重要得多
8	7 分和 9 分判断结果的中间值
9	因素 <i>i</i> 比因素 <i>j</i> 重要得很多

注:风险评价分值的倒数表示因素*j*与因素*i*的比较结果是因素*i*与因素*j*重要性比较结果的倒数。

A	<i>u</i> <sub>1</sub>	<i>u</i> <sub>2</sub>	<i>u</i> <sub>3</sub>	<i>u</i> <sub>4</sub>	<i>u</i> <sub>5</sub>	<i>u</i> <sub>6</sub>	<i>u</i> <sub>7</sub>
<i>u</i> <sub>1</sub>	1	2	1/2	1/4	2	1/3	4
<i>u</i> <sub>2</sub>	1/2	1	1/3	1/5	1	1/4	2
<i>u</i> <sub>3</sub>	2	3	1	1/3	3	1/2	4
<i>u</i> <sub>4</sub>	4	5	3	1	5	2	6
<i>u</i> <sub>5</sub>	1/2	1	1/3	1/5	1	1/4	2
<i>u</i> <sub>6</sub>	3	4	2	1/2	4	1	5
<i>u</i> <sub>7</sub>	1/4	1/2	1/4	1/6	1/2	1/5	1

图 4 比较判断矩阵示意图

Fig.4 Diagram of comparative judgment matrix

$$w_{1q} = \sqrt[7]{1 \times 2 \times 1/2 \times 1/4 \times 2 \times 1/3 \times 4} = 0.944$$
$$w_{2q} = \sqrt[7]{1/2 \times 1 \times 1/3 \times 1/5 \times 1 \times 1/4 \times 2} = 0.557$$
$$w_{3q} = \sqrt[7]{2 \times 3 \times 1 \times 1/3 \times 3 \times 1/2 \times 4} = 1.426$$
$$w_{4q} = \sqrt[7]{4 \times 5 \times 3 \times 1 \times 5 \times 2 \times 6} = 3.221$$
$$w_{5q} = \sqrt[7]{1/2 \times 1 \times 1/3 \times 1/5 \times 1 \times 1/4 \times 2} = 0.557$$
$$w_{6q} = \sqrt[7]{3 \times 4 \times 2 \times 1/2 \times 4 \times 1 \times 5} = 2.188$$
$$w_{7q} = \sqrt[7]{1/4 \times 1/2 \times 1/4 \times 1/6 \times 1/2 \times 1/5 \times 1} = 0.340$$

经过方根量纲一化处理后,可以得到失效类型危害的相对权重  $w_1 = 0.102, w_2 = 0.06, w_3 = 0.154, w_4 = 0.349, w_5 = 0.06, w_6 = 0.237, w_7 = 0.037$ 。相对权重矩阵  $w = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5 \ w_6 \ w_7]^T$ 。

比较判断矩阵的最大特征值  $\lambda_{\max}$  可以表示为:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{nw_i} = 7.15$$

式中:

$B_i$ ——比较判断矩阵  $A$  与相对权重矩阵  $w$  相乘后所得矩阵中的第  $i$  个元素;

$n$ ——比较判断矩阵阶数,本文取  $n = 7$ 。  
最后进行一致性检验,一致性指标  $\gamma_{CI}$  为:

$$\gamma_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.025$$

7 阶矩阵随机一致性指标  $\gamma_{RI} = 1.36$ ,则一致性比率  $\gamma_{CR}$  为:

$$\gamma_{CR} = \frac{\gamma_{CI}}{\gamma_{RI}} = \frac{0.025}{1.36} = 0.0184 < 0.1$$

由此可知,滚刀磨损失效危害评价模型通过一致性检验。

2.3 滚刀失效影响评价

由前文的计算结果可知,刀圈脱出或断裂、挡圈脱落和轴承磨损三者的相对危害权重排在前 3 位,说明这三者的危害等级相对较高。其中,刀圈脱出或断裂易对刀具造成二次伤害,进而造成更为严重的刀具刀盘磨损,对施工项目的经济性影响较大,需要重点关注和控制。

在实际施工项目中,不同种类滚刀的各失效类型及磨损情况各不相同。为了更好地应用于实际案例,引入滚刀失效影响评价值  $N$  和失效类型发生频率占比  $b_i$ ,以综合评价滚刀的失效影响。滚刀失效影响评价值越高,表示滚刀在使用过程中失效带来的负面影响越严重。滚刀失效影响评价值  $N$  可以表示为:

$$N = 100 \sum_{i=1}^7 w_i b_i \tag{1}$$

3 实际案例分析

根据上述评价方式,统计 4 个品牌的滚刀在试验区段的磨损速率,为了更加直观地对比各品牌滚刀的磨损速率,将 a 品牌滚刀磨损速率设为对照参数 1,计算出各品牌刀具的相对磨损速率。结合试验时发生的 3 种非正常磨损和正常磨损失效类型危害的相对权重,根据式(1)计算 4 个品牌滚刀的失效影响评价值,如表 4 所示。各刀具品牌的相对磨损速率和失效影响评价值对比,如图 5 所示。

c 品牌与 d 品牌滚刀的失效影响评价值较低,表明该滚刀在工作过程中发生非正常失效时,对项目工程的危害性更小。值得注意的是,d 品牌滚刀未曾发生刀圈掉落或断裂等高危害特殊刀具失效的情况。d 品牌滚刀的耐磨性能相较 c 品牌滚刀而言表现较差,可能是由于刀具硬度较低的缘故。d 品牌滚刀的非正常磨损风险控制较好,但在正常切



屑破岩方面的耐磨性表现相对较差。c 品牌滚刀在正常切削时的耐磨蚀性能更好,表现较为均衡。综上所述:建议在磨蚀性较强、硬度较大的地层采用表现均衡的 c 品牌滚刀;而在硬度相对较低、刀具非正常失效频发的岩层采用非正常失效控制良好的 d 品牌滚刀。各品牌对比结果及选用建议如表 5 所示。

表 4 滚刀失效影响评价计算表

Tab.4 Roller cutter failure impact evaluation calculation list

刀具品牌	$u_1/\%$	$u_4/\%$	$u_5/\%$	$u_7/\%$	失效影响评价价值
a	21.50	7.50	6.50	64.50	7.587
b	10.50	14.50	6.60	68.40	9.058
c	16.40	7.50	1.50	74.60	7.141
d	16.10	0	3.20	80.70	4.816

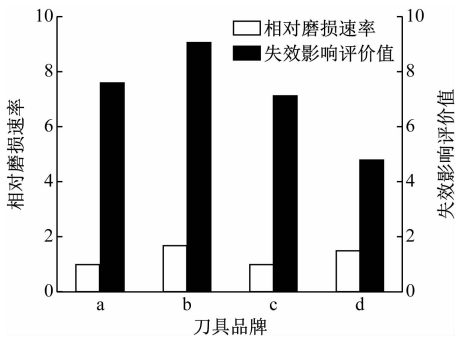


图 5 各刀具品牌相对磨损速率和失效影响评价价值对比  
Fig. 5 Comparison of relative wear rates and failure impact e-valuation values of each cutter brand

表 5 滚刀品牌对比及选用建议

Tab.5 Roller brand comparison and selection suggestions

刀具品牌	耐磨性	刚度	正常工作性能	选用建议
a	强	高	较差	在硬度极大的岩层中可以选用,在硬度较小的岩层可考虑减少使用
b	较差	一般	较强	不推荐选用
c	较强	较高	一般	适合用于高磨蚀性岩层
d	较差	较低	强	适合用于硬度较小的岩层

4 结论

1) 将刀盘分区进行编号,并统计了高磨蚀岩层中的滚刀失效类型与占比,非正常磨损占比为 23.29%,正常磨损占比为 76.71%,选取 7 种磨损类型作为影响因子,建立滚刀失效影响评价模型。

2) 采用层次分析法建立了各级指标评价矩阵,

并进行了一致性检验,引入失效类型占比作为另一因变量,求出滚刀失效影响评价值,失效影响评价值越高,滚刀在使用过程中失效带来的负面影响越严重。

3) 用所提评价方式求出 4 个品牌滚刀的失效影响评价值,c 品牌和 d 品牌滚刀的失效影响评价值分别为 7.141 和 4.816,远小于 a 品牌的 7.587 和 b 品牌的 9.058,但 d 品牌的相对磨损速率大于 c 品牌,由此得出 c 品牌滚刀最适合在高磨蚀性岩层中使用,a 品牌滚刀适用于硬度极大的岩层,b 品牌滚刀不推荐使用,d 品牌滚刀适用于硬度较小的岩层。

参考文献

[1] 谭青, 谢吕坚, 夏毅敏, 等. TBM 盘形滚刀磨损速率研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(3): 843.  
TAN Qing, XIE Lyujian, XIA Yimin, et al. Analysis of wear rate of TBM disc cutter[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(3): 843.

[2] 吴俊, 袁大军, 李兴高, 等. 盾构刀具磨损机理及预测分析 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 109.  
WU Jun, YUAN Dajun, LI Xinggao, et al. Analysis on wear mechanism and prediction of shield cutter[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 109.

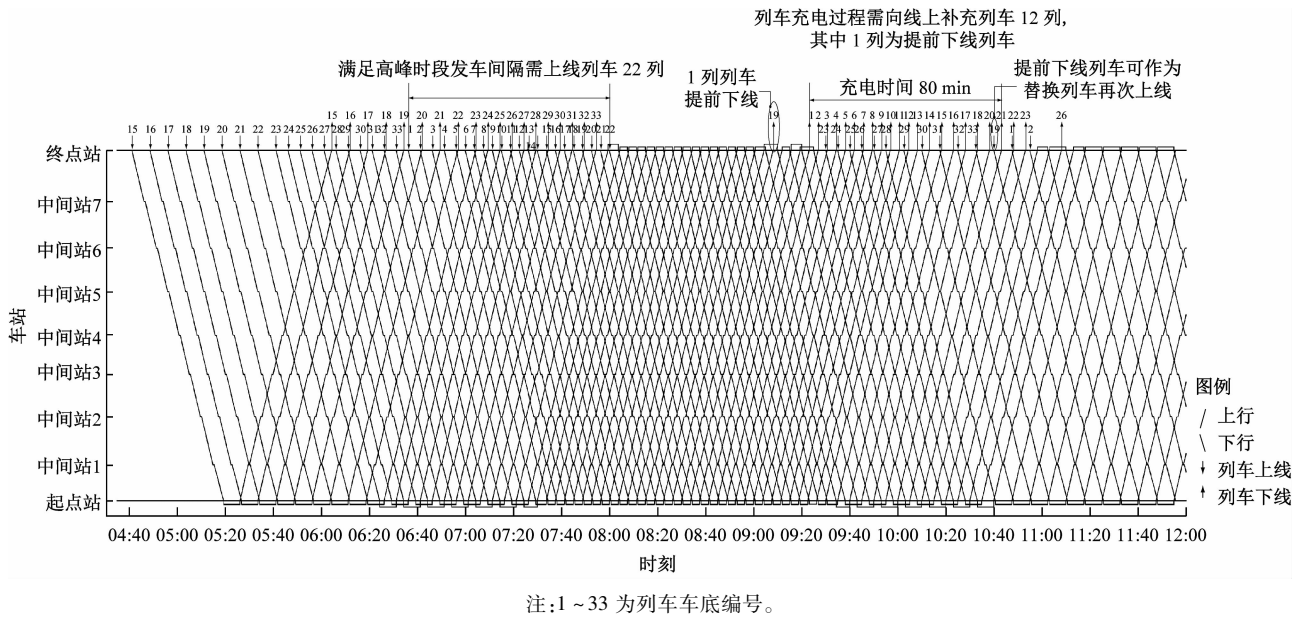
[3] LI Y, DI H, YAO Q, et al. Prediction model for disc cutter wear of tunnel boring machines in sandy cobble strata[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(3): 1010.

[4] SUN Z, ZHAO H, HONG K, et al. A practical TBM cutter wear prediction model for disc cutter life and rock wear ability [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 85: 92.

[5] 蔡昱, 祝和意, 杨小玉, 等. 引汉济渭秦岭隧洞高磨蚀性硬岩 TBM 滚刀磨损试验研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(9): 1579.  
CAI Yu, ZHU Heyi, YANG Xiaoyu, et al. Experimental study of disc cutter abrasion of TBM used in Qinling tunnel of Hanjiang River-Weihe River water conveyance project with high abrasive hard rock[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(9): 1579.

[6] 周建军, 宋佳鹏, 谭忠盛. 砂卵石地层地铁盾构盘形滚刀磨蚀性研究 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 1): 31.  
ZHOU Jianjun, SONG Jiapeng, TAN Zhongsheng. Study on abrasive properties of shielded hob in subway shield of sandy gravel formation[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S1): 31.

[7] 闵凡路, 柏煜新, 刘来仓, 等. 盾构刀具切削研究进展及非正常磨损实例分析 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 47.  
MIN Fanlu, BAI Yuxin, LIU Laicang, et al. Research progress of shield cutter cutting and analysis of abnormal wear cases[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 47.



注:1~33 为列车车底编号。

图 2 列车运行图验证结果

Fig. 2 Verification results of train operation diagram

能式有轨电车的运用车数计算方法,解决了铺画列车运行图过于繁琐的问题。实际案例验证结果表明,计算所得运用车数与列车运行图铺画结果误差约为 5%,能够满足运营要求并保有一定余量,验证了所提计算方法的可靠性。

参考文献

[1] 牛悦丞,李芾,杨阳,等. 国外新一代 100% 低地板有轨电车技术特征及发展趋势[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(11): 144.  
NIU Yuecheng, LI Fu, YANG Yang, et al. Technical characteristics and development tendency of new generation foreign 100% low floor tram[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(11): 144.

[2] 苏国强,郑磊,黄坤林. 新型有轨电车供电方式分析[J]. 铁路技术创新, 2013(6): 46.  
SU Guoqiang, ZHENG Lei, HUANG Kunlin. Analysis of power supply mode of new tram[J]. Railway Technical Innovation, 2013

(6): 46.

[3] 刘羽,李凯龙. 现代有轨电车运用车配属数量需求分析[J]. 天津建设科技, 2021, 31(2): 10.  
LIU Yu, LI Kailong. Analysis on demand for number of modern tram service vehicles[J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2021, 31(2): 10.

[4] 姚幸. 有轨电车与地铁的车辆段比较[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(7): 133.  
YAO Xing. Comparative study of tram and subway vehicle depots [J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(7): 133.

· 收稿日期:2021-07-19 修回日期:2021-11-15 出版日期:2024-02-10  
Received:2021-07-19 Revised:2021-11-15 Published:2024-02-10

· 通信作者:张梦然,工程师,1063726803@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 42 页)

[8] 张孟喜,杨芝璐,张靖,等. 复合地层盾构滚刀磨损风险等级模糊评判[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(1): 78.  
ZHANG Mengxi, YANG Zhilu, ZHANG Jing, et al. On the fuzzy assessment of the wear risk grade of the shield disc cutter in the complex strata[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(1): 78.

[9] 左翠凤,唐德高,戎晓力,等. 基于刀盘摩擦扭矩参数的刀具磨损状态识别[J]. 隧道建设, 2016, 36(3): 344.  
ZUO Cuifeng, TANG Degao, RONG Xiaoli, et al. State recogni-

tion of cutter wear based on frictional torque parameters of cutter-head[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(3): 344.

· 收稿日期:2022-01-28 修回日期:2022-05-01 出版日期:2024-02-10  
Received:2022-01-28 Revised:2022-05-01 Published:2024-02-10

· 第一作者:李雪,副教授,jialixue521@163.com

通信作者:陈霖,硕士研究生,cl13558831074@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license