

基于 AHP-TOPSIS 算法的城市轨道交通停车线布设综合评价模型*

孟艳丽¹ 胡 华¹ 方 勇¹ 刘志钢¹ 汪 涛²

(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海;

2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 200240, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 目的: 目前对城市轨道交通停车线的研究内容及考虑因素较为单一, 需对停车线布设方案的评价指标体系及综合评价方法作更为深入的研究。方法: 从车站敷设方式和站台形式、车辆段与折返线的位置和形式、故障列车退出正线运营的时间要求、线路的运营灵活性等方面, 全面分析了这些因素对停车线布设的影响。从工程条件、工程经济性、故障救援效率及运营灵活性 4 个维度, 设定了停车线布设方案的 7 个综合评价指标, 阐述了各指标的定义及计算方法。在此基础上, 构建了基于 AHP(层次分析法)-TOPSIS(优劣解距离法)的城市轨道交通停车线布设方案综合评价模型。以上海轨道交通 6 号线和 7 号线为案例, 对该模型进行了实例分析与评价。结果及结论: 该城市轨道交通停车线布设方案综合评价模型具有一定的有效性与实用性。

关键词 城市轨道交通; 停车线; 评价指标体系; 层次分析法; 优劣解距离法

中图分类号 U239.5

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.11.002

Comprehensive Evaluation Model of Urban Rail Transit Parking Line Layout Plan Based on AHP-TOPSIS Algorithm

MENG Yanli, HU Hua, FANG Yong, LIU Zhigang, WANG Tao

Abstract Objective: At present, researches on urban rail transit parking lines focus on relatively narrow aspects and consider limited factors. There is a need for a more comprehensive evaluation index system and integrated evaluation method for parking line layout schemes. Method: The main factors that affect parking line layout are analyzed from the perspectives of station layout, vehicle depot and turning tracks, requirements for fault trains to exit the main line, and operational flexibility of the route. Based on four dimensions: engineering conditions, project economics, fault rescue efficiency, and opera-

tional flexibility, seven comprehensive evaluation indicators are established to define and compute each indicator. On this foundation, an AHP-TOPSIS based comprehensive evaluation model for urban rail transit is constructed to park line layout plans. Using Shanghai Metro Lines 6 and 7 as case studies, the model is analyzed and evaluated. Result & Conclusion: The research indicates that the comprehensive evaluation model for urban rail transit parking line layout plans is practical and effective.

Key words urban rail transit; parking line; evaluation index system; AHP (analytic hierarchy process); TOPSIS (Technique for order of preference by similarity to ideal solution)

First-author's address School of Urban Rail Transit, Shanghai University of Engineering Technology, 201620, Shanghai, China

城市轨道交通列车在正线运行过程中难免会发生故障。线路设计时应通过设置停车线、存车线及折返线等方式, 使故障列车能及时退出正线, 以降低对后续列车的影响。目前对停车线的已有研究相对较少, 主要集中在停车线的布设原则^[1]、位置选择^[2]、布置形式^[3], 以及停车线的密度、特点、使用性^[4]等方面。这些研究的内容和考虑因素较为单一, 需要对停车线布设方案的综合性评价指标及评价方法进行深入研究。本文综合考虑停车线布设的目标需求, 分析了停车线布设的影响因素, 定义并量化了评价指标, 构建了 AHP(层次分析法)及 TOPSIS(优劣解距离法)两种算法有机结合的停车线布设方案综合评价模型。

1 停车线布设影响因素分析

停车线布设内容包括布设位置、布设形式、设

* 国家自然科学基金面上项目(52072235); 上海市科委地方院校能力建设项目(19030501400)

置条数 and 设计长度等。本文对停车线布设的主要影响因素进行分析。

1.1 车站敷设方式和站台形式

为满足故障列车临时停放需求,停车线一般设置在车站附近,因此车站敷设方式是确定停车线布设方案的重要因素之一。此外,车站周边的环境、水文地质管线的既有情况等也会对停车线的布设位置、布设形式及布设长度等有一定的影响。与停车线设在地面车站或高架车站相比,停车线设于地下车站时,其施工难度和建设成本较高^[5],因此通常布设尽头式或三向贯通式的停车线(长度为一列位),以节约建设成本。

车站的站台形式也是影响停车线布设形式的重要因素。对于岛式站台,可利用车站两端具有较大线间距的“喇叭口”设置内侧式停车线,如图 1 a) 所示;对于侧式站台,因车站线间距较小,可考虑在线路一侧设置外侧式停车线,并布置相应渡线,以便于另一个运行方向上故障列车的停放。此时若考虑高架线与城市景观的协调性,还可两侧对称布置停车线,如图 1 b) 所示。

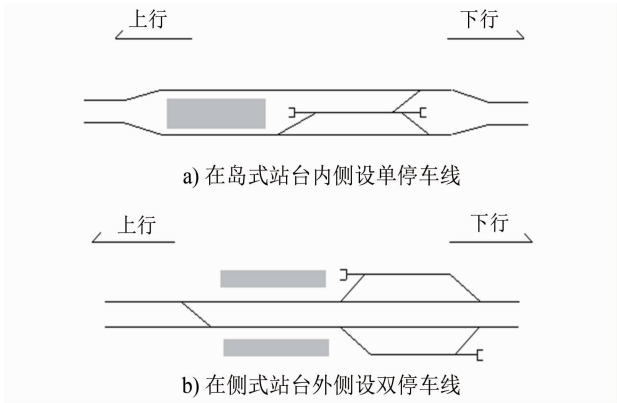


图 1 岛式站台和侧式站台的停车线布设示意图
Fig. 1 Schematic diagram of parking lines for island platform and side platform

1.2 车辆段与折返线的位置和形式

车辆段兼具故障列车的停放功能,部分折返线也具有临时停车功能,因此在考虑停车线位置与布设比例时,应同步考虑车辆段和具有停车功能的折返线的位置及数量,以避免相同功能配线的重复设置,在保障运营功能的前提下尽可能降低建设成本。如线路尽头的折返站没有连接车辆段,则需要结合折返线的设置布设停车线或存车线,此时不必再考虑单独设置停车线。

1.3 故障列车退出正线运营的时间要求

停车线的设置应保证列车在正线上发生故障时,能在规定的时间内完成故障处置并恢复线路正常的运营秩序。停车线布设间距越小、布设比例越高,停车线的设计长度越长,工程投资就越大,但列车故障后对正线运营的影响时间就越短。

GB 50157—2013《地铁设计规范》规定:正线应每隔 5~6 座车站或 8~10 km 设置停车线。该规定的控制目标是故障列车至前方停车线的走行时间不大于 20 min,且故障车的处理下线时间不大于 30 min。根据上海轨道交通 12 号线(该线采用 6 节编组 A 型车)的实际测算数据,对于一列位停车线,连挂车进入停车线后仍需占用正线,此时必须完成包括列车解钩、救援列车退回正线、重新建立运营模式等操作后,线路才能恢复正常运行。与两列位停车线下故障列车退出正线运营的平均耗时(21 min)相比,一列位停车线下故障列车退出正线运营的平均耗时约多 8 min,为 29 min。

1.4 线路的运营灵活性

线路的运营灵活性包括故障列车下线方式的选择便捷性、线路区间故障组织临时交路的可行性及突发不均匀客流时组织大小交路的方案多样性等方面,这些均与停车线及其辅助性渡线的布设形式关系密切。若采用尽头式停车线,则存放列车仅能从一端进出,反方向列车不便进入停车线且不能采取牵引式故障列车处理模式,此时线路的运营灵活性较差。若采用贯通式停车线,则能够增加故障列车下线处置及调整线路临时运营组织的灵活性。

2 停车线布设方案评价指标体系

综上所述,停车线的布设影响因素较多,其评价体系也具有多目标性,需要构建评价指标体系,对其布设方案进行综合评价。图 2 为城市轨道交通停车线布设评价指标体系,该体系由目标层 U 、准则层 P 及指标层 Q 三个层次构成,其中:准则层 P 包括工程条件 P_1 、工程经济性 P_2 等 4 项;指标层 Q 包含基坑安全性 Q_{11} 、道路交通运行状态 Q_{12} 等 7 项。

2.1 工程条件

停车线工程条件是对工程建筑有影响的各种因素的总称,主要包括工程地质条件、周边建筑物情况及地面交通分布情况等,本文用基坑安全性、道路交通运行状态两个指标进行衡量。

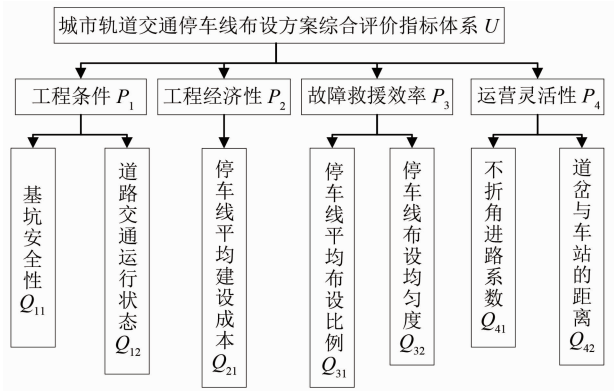


图 2 城市轨道交通停车线布设评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system for urban rail transit parking line layout

2.1.1 基坑安全性

基坑安全性用于描述停车线建设时期的施工难度。基坑安全性越低,则需要的安全措施越多,施工条件越复杂,可通过风险指数 R 划分等级进行定性评价。其等级划分一般受三类因素的影响:基坑开挖深度及支护性质、周边建筑环境问题、水文地质和工程地质环境问题。

本文结合上海轨道交通实际工程经验与已有研究成果^[6],将基坑安全性等级 R 分为三个等级:一级($R=[1,4]$)为复杂,二级($R=[5,9]$)为较复杂,三级($R=[10,25]$)为简单。

2.1.2 道路交通运行状态

道路交通运行状态用以描述车站停车线施工时对附近道路交通所造成的临时性影响程度的大小。停车线的设置形式越简单、数量越少,施工时对周围道路交通的干扰程度就越小。

由于道路交通干扰程度具有模糊性,结合上海轨道交通实际工程经验与已有研究成果^[7],本文提出了道路交通运行状态的定性分级标准,设 H 为道路交通运行状态,根据 H 的大小将道路交通运行状态分为六个等级,分别为:非常畅通($H=[0,1]$)、基本畅通($H=[1,2]$)、稳定通行($H=[2,4]$)、缓慢通行($H=[4,6]$)、一般拥堵($H=[6,8]$)、非常拥堵($H=[8,10]$)。

2.2 工程经济性

本文的停车线工程经济性主要考虑停车线平均建设成本。停车线的建设成本与停车线的工程量及单位公里造价相关,而单位公里造价与车站的敷设方式密切相关,而地下车站的单位公里造价与地面/高架车站的单位公里造价间差异很大,因此需要分别考虑。本文将全线所有高架车站、地面车

站及地下车站停车线的工程造价进行合计,将停车线的总造价平均到各个车站内。设行车线平均建设成本为 F ,其计算式为:

$$F = (f_1 l_1 + f_2 l_2 + \tau t) / b \quad (1)$$

式中:

f_1 ——高架/地面车站停车线的平均造价;

l_1 ——全线高架与地面车站内布设停车线的总长度;

f_2 ——地下车站停车线的平均造价;

l_2 ——全线地下车站内布设停车线的总长度;

τ ——全线布设停车线所需的道岔数量;

t ——道岔的平均单价;

b ——全线设有停车线的车站数。

2.3 故障救援效率

故障救援效率用停车线平均布设比例及停车线布设均匀度 2 个指标进行描述。

2.3.1 停车线平均布设比例

停车线平均布设比例 ρ 指全线具备停车线功能(如停车线、出入库线和布设停车线的折返线等)的车站数 b 与全线总车站 B 的比值,即平均每间隔多少个车站布设 1 条停车线。 ρ 的计算式为:

$$\rho = b / B \quad (2)$$

2.3.2 停车线布设均匀度

停车线布设均匀度 θ 指具备停车线功能的车站在全线空间上的分布均匀程度。本文用全线具有停车线功能的相邻 2 个车站站间距最大值 l_{\max} 与全线具有停车线功能的相邻 2 个车站站间距平均值 \bar{l} 的比值来表示,其计算式为:

$$\theta = l_{\max} / \bar{l} \quad (3)$$

2.4 运营灵活性

2.4.1 不折角进路系数 η

上行或下行的正线与逆向道岔构成的进入停车线的进路是不折角进路。不折角进路系数是指全线上下行方向连接停车线和正线之间的逆向道岔数量 τ_1 与顺向道岔数量 τ_2 的比例,其计算式为:

$$\eta = \tau_1 / \tau_2 \quad (4)$$

若停车线布设成尽头式或四向贯通式(见图 3),其布设的正向道岔和逆向道岔的数量相同, $\eta=1$;若停车线布设成三向贯通式(见图 4)等非对称形式时, $\eta=2$ 。

2.4.2 道岔与车站的距离

道岔与车站的距离 \bar{d} 是指全线具有停车线功

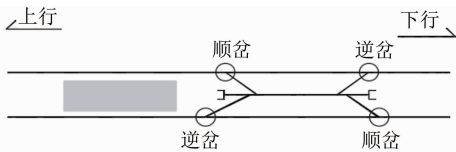


图3 四向贯通式停车线

Fig. 3 Four-way through parking line

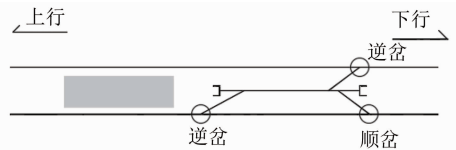


图4 三向贯通式停车线

Fig. 4 Three-way through parking line

能的车站,其站台端部与停车线最远处道岔中心的距离的平均值。 \bar{d} 主要与停车线的布设形式(横列式或纵列式)有关,其计算式为:

$$\bar{d} = \sum_{x=1}^b d_x / b \quad (5)$$

式中:

d_x ——第 x 个车站的停车线最远端道岔与车站端部的距离。

在道岔自动控制失效情况下,需执行人工扳动道岔等应急处置措施。该情况下若 \bar{d} 较大,将给车站运营管理及故障处置带来不便。

3 构建 AHP-TOPSIS 算法综合评价模型

构建 AHP-TOPSIS 算法综合评价模型的技术路线为:先采用 AHP 将多目标决策问题细化分解为若干层次的准则及指标,将定性指标模糊量化后求出各指标的权重值;再使用 TOPSIS 将 AHP 得出的权重值进行排序,使评估结果在最大程度上合理地反映专家的主观意向。本文基于 AHP 和 TOPSIS 的有机结合,构建城市轨道交通停车线布设方案的 AHP-TOPSIS 算法综合评价模型。

3.1 建立判断矩阵

采用 1-9 标度法构造判断矩阵。记 a_{ij} 为指标 ξ 与指标 j 的比值,设 n 为矩阵阶数,通过各级指标层因子之间的两两比较,得到判断矩阵 A ,其计算式为:

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (6)$$

3.2 判断矩阵一致性检验

设 A 的最大特征根为 λ_{\max} 。根据各平均一致性指标得到 A 的一致性指标指数 I_c ,其计算式为:

$$I_c = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

若 $\lambda_{\max} = n$,则 $I_c = 0$,此时 A 具有一致性。 I_c 越大, A 的不一致性越大。查找得到不同的阶数 n 对应的平均随机一致性指标 I_R 值,如表 1 所示。

表 1 随机一致性指标值

Tab. 1 Stochastic consistency indicator value

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

进一步计算一致性比率 R_C ,其计算式为:

$$R_C = I_c / I_R \quad (8)$$

若 $R_C < 0.1$,则认为 A 通过一致性检验;若 $R_C \geq 0.1$,则需要对 A 进行修正。

3.3 确定指标权重

采用几何平均法求权重的步骤如下:①将 A 的元素按行相乘,得到 1 个新的列向量;②将新的列向量的每个分量开 n 次方,设 k 为比例向量的第 k 行;③对该列向量进行量纲一化,得到第 ξ 个指标的权重 φ_ξ ;④按照此种方法分别计算出准则层与指标层的相对权重,最后得到总权重。

假设判断矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

用算术平均法求权重向量 φ ,可得 $\varphi = [\varphi_1 \varphi_2 \cdots \varphi_\xi \cdots \varphi_n]$,其中 φ_ξ 的计算式为:

$$\varphi_\xi = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{\xi j} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{kj} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (10)$$

3.4 采用 TOPSIS 方法计算贴近度

3.4.1 数据指标的标准化

首先将极大型、极小型、中间型及区间型 4 类指标进行正向化处理。由 p 个评价方案、 q 个评价指标(已经正向化)构成了正向化矩阵 Z ,其中 Z_{ij} 为第 i 个评价方案的第 j 个指标值。 Z 的计算式为:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1q} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{p1} & z_{p2} & \cdots & z_{pq} \end{bmatrix} \quad (11)$$

\mathbf{Z} 经标准化后的矩阵记为 \mathbf{Y} , \mathbf{Y} 中每个元素 y_{ij} 的计算式为:

$$y_{ij} = z_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^p z_{ij}^2} \quad (12)$$

$i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, q$

进而得到 \mathbf{Y} 的计算式为:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1q} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{p1} & y_{p2} & \cdots & y_{pq} \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.4.2 计算正负理想解与贴近度

3.4.2.1 定义正负理想解最值

设 \mathbf{Y} 中第 j 个指标的正理想解 $Y_{j,+}$ 为第 j 个指标所对应 p 个方案值的最大值, 负理想解 $Y_{j,-}$ 为第 j 个指标所对应 p 个方案值的最小值, 则二者的计算式分别为:

$$Y_{j,+} = [Y_{1,+} \ Y_{2,+} \ \cdots \ Y_{q,+}] = [\max(y_{11}, y_{21}, \dots, y_{p1}) \ \max(y_{12}, y_{22}, \dots, y_{p2}) \ \cdots \ \max(y_{1q}, y_{2q}, \dots, y_{pq})] \quad (14)$$

$$Y_{j,-} = [Y_{1,-} \ Y_{2,-} \ \cdots \ Y_{q,-}] = [\min(y_{11}, y_{21}, \dots, y_{p1}) \ \min(y_{12}, y_{22}, \dots, y_{p2}) \ \cdots \ \min(y_{1q}, y_{2q}, \dots, y_{pq})] \quad (15)$$

3.4.2.2 计算综合评价向量

设 \mathbf{F}_i 为第 i 个评价方案与正向最优解的贴近度值构成的评价向量, 其计算式为:

$$\mathbf{F}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^q (Y_{j,-} - y_{ij})^2} / \left(\sqrt{\sum_{j=1}^q (Y_{j,+} - y_{ij})^2} + \sqrt{\sum_{j=1}^q (Y_{j,-} - y_{ij})^2} \right) \quad (16)$$

\mathbf{F}_i 越大, 表示对应的评价方案越接近最优解。通过对评价方案的贴近度值与层次分析法所得权重结合并进行排序, 可实现对多个方案的综合评价。设模型最终的综合评价向量为 \mathbf{S} , 其计算式为:

$$\mathbf{S} = \varphi \mathbf{F} \quad (17)$$

式中:

\mathbf{F} ——由评价方案贴近度值构成的评价矩阵。

4 实例分析

4.1 数据搜集

选取上海轨道交通 6 号线 (以下简称“6 号线”) 及上海轨道交通 7 号线 (以下简称“7 号线”) 的相关数据进行实例验证。6 号线除港城车辆段及三林停车场外, 还设有 6 个具有停车线功能的车站。7 号线除设有陈太路车辆段及龙阳路停车场外, 还设有 8 个具有停车线功能的车站, 如图 5 所示。

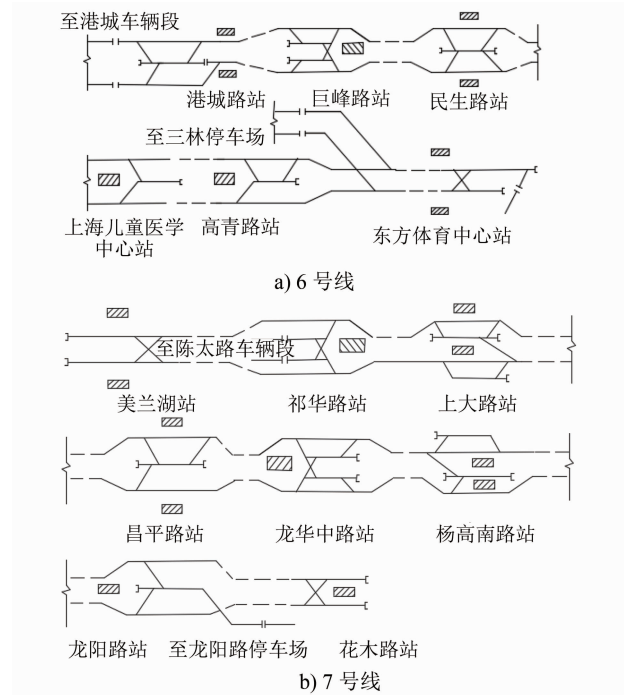


图 5 上海轨道交通 6 号线及 7 号线停车线布设图

Fig. 5 Layout of parking lines of Shanghai Metro Line 6 and Line 7

根据图 2 的停车线布设评价指标体系, 基于上海轨道交通 6 号线及 7 号线的原始统计数据, 计算得到这 2 条线停车线指标层的 7 个评价指标值, 其结果如表 2 所示。

4.2 方案评价

4.2.1 确定权重

基于表 2, 采用专家打分法, 建立了准则层的判断矩阵 \mathbf{O} :

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/4 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/5 & 1/4 \\ 4 & 5 & 1 & 2 \\ 3 & 4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

表 2 上海轨道交通 6 号线及 7 号线停车线布设的准则层评价指标计算结果

Tab. 2 Calculation results of the evaluation index of parking lines of Shanghai Metro Line 6 and Line 7

线路	基坑安 全性等 级	道路交 通运行 状态	停车线 建设成 本/(亿 元/个)	停车 线布 设比 例	停车 线布 设均 匀度	不折 角进 路数	道岔 与车 站距 离/m
6 号线	7	5	1.697	0.286	1.311	3.588	453
7 号线	4	7	1.850	0.242	1.552	2.643	328

通过计算得 $I_c=0.046\ 3$, $R_c=0.052$, 因为 $R_c<0.10$, 因此 O 满足一致性要求。根据式 (10) 求得准则层 P 各大类指标的权重值分别为: $\varphi_1=0.089$, $\varphi_2=0.110$, $\varphi_3=0.494$, $\varphi_4=0.307$ 。则 p 层权重排序为: 故障救援效率>运营灵活性>工程经济性>工程条件。

在此基础上, 进一步计算得到指标层 Q 各小类指标的权重值及排序, 综合得到最后权重, 如表 3 所示。由表 3 可知: 停车线布设合理性权重排序前三位的评价指标为: 停车线布设均匀度 Q_{32} 、不折角进路数 Q_{41} 及停车线平均建设成本 Q_{21} 。

表 3 准则层及指标层各指标的权重及排序
Tab. 3 The weight and ranking of each indicator of the indicator layer and the indicator layer

准则层 P		指标层 Q			
指标名称	指标权重	指标名称	AHP 下的指标权重		指标值排序
			层次单排序 (P-Q)	层次总排序 (A-Q)	
工程条件 P_1	0.089	基坑安全性 Q_{11}	0.750	0.067	6
		道路交通运行状态 Q_{12}	0.250	0.022	7
工程经济性 P_2	0.110	停车线平均建设成本 Q_{21}	1.000	0.110	3
故障救援效率 P_3	0.494	停车线平均布设比例 Q_{31}	0.167	0.082	5
		停车线布设均匀度 Q_{32}	0.833	0.411	1
运营灵活性 P_4	0.307	不折角进路数 Q_{41}	0.667	0.206	2
		道岔与车站的距离 Q_{42}	0.333	0.102	4

4.2.2 计算正负理想解及贴近度

根据式 (10), 将表 2 进行正向化和标准化处理。计算标准化矩阵 Y 中每个指标的正理想解 $Y_{j,+}$ 与负理想解 $Y_{j,-}$, 其结果如表 4 所示。

基于表 4 的计算结果, 结合式 (15) 及式 (16),

表 4 评价指标对应评价方案的正理想解及负理想解
Tab. 4 The evaluation index corresponds to the positive and negative ideal solution table of the evaluation scheme

指标	$Y_{i,+}$	$Y_{i,-}$
基坑安全等级	0.868	0.496
道路交通运行状态	1.000	0
停车线平均建设成本/(亿元/个)	1.000	0
停车线平均布设比例	0.719	0.696
停车线布设均匀度	0.729	0.684
不折角进路数	0.777	0.629
道岔与车站的距离/m	1.000	0

对 6 号线和 7 号线准则层 P 的工程条件、工程经济性、故障救援效率及运营灵活性 4 个维度进一步求解, 得到对应正理想解贴近度值构成的评价矩阵, 即:

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.730 & 0 \\ 0 & 0 & 0.290 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中:

F_1 ——由 6 号线正理想解的贴近度值构成的评价向量;

F_2 ——由 7 号线正理想解的贴近度值构成的评价向量。

根据表 3 中准则层 P 各指标权重的计算结果, 以及式 (19) 中准则层 P 各指标对应正理想解贴近度值构成的评价矩阵, 由式 (17) 可计算得到综合评价向量 $S=[0.560\ 0.440]$ 。由此可知: 6 号线、7 号线停车线的综合评价结果分别为 0.560、0.440; 6 号线的停车线布设方案优于 7 号线。

5 结语

本文综合考虑停车线布设的位置、条数、形式及长度等相关影响因素, 从工程条件、工程经济性、故障救援效率和运营灵活性 4 个维度提出了 7 个评价指标, 构建了基于 AHP-TOPSIS 算法的停车线布设方案综合评价模型, 并通过上海轨道交通 6 号线及 7 号线实例验证了该模型的有效性与实用性。

在未来研究中, 可针对更多线路或不同城市的轨道交通停车线设计情况, 进一步完善该评估模型。也可引入离差最大化、熵权法等客观赋权法, 以圈定指标权重, 进一步降低主观因素对模型的影响。

参考文献

[1] 沈海宏. 浅谈城市轨道交通配线设置设计要点[J]. 铁道勘察, 2016, 42(6): 76. (下转第 19 页)

- LUO Lin, ZHANG Geming, WU Wangqing, et al. Control of track smoothness of wheel-rail system [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006; 1.
- [3] 高建敏, 翟婉明, 王开云. 高速行车条件下轨道几何不平顺敏感波长研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 83.
- GAO Jianmin, ZHAI Wanming, WANG Kaiyun. Study on sensitive wavelengths of track irregularities in high-speed operation [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7): 83.
- [4] 杨飞. 高速铁路长波不平顺敏感波长及管理值研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2011.
- YANG Fei. A study of sensitive wavelength and the management value of long-wave irregularity for high-speed railway [D]. Beijing: China Institute of Railway Science, 2011.
- [5] 胡晓依, 侯茂锐, 常崇义, 等. 基于稳态、非稳态振动信号分析的轨道不平顺敏感波长及其与车辆响应间关系的研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(增刊 1): 46.
- HU Xiaoyi, HOU Maorui, CHANG Chongyi, et al. Research on the sensitive wavelength of track irregularity and its relationship with vehicle response based on the stationary-state and non-stationary-state vibration signal analysis[J]. China Railway Science, 2012, 33(S1): 46.
- [6] 牛留斌, 刘金朝. 基于高频轮轨接触模型的轨道短波不平顺敏感波长特性分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 173.
- NIU Liubin, LIU Jinzhao. Study on sensitive wavelength characteristics of track short wave irregularity based on high frequency wheel/rail contact model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 173.
- [7] 秦晓光, 黄爱军. 现代有轨电车轨道不平顺敏感波长研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(增刊 1): 56.
- QIN Xiaoguang, HUANG Aijun. Research on sensitive wavelength of track irregularity for modern tram[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(S1): 56.
- [8] 徐金辉, 王平, 汪力, 等. 基于频域分析方法的轨道高低不平顺敏感波长的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(2): 683.
- XU Jinhui, WANG Ping, WANG Li, et al. Sensitive wavelengths of vertical track irregularities by frequency-domain method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(2): 683.
- [9] 徐金辉, 王平, 汪力, 等. 轨道高低不平顺敏感波长的分布特征及其影响因素的研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(7): 72.
- XU Jinhui, WANG Ping, WANG Li, et al. Research on the distribution characteristics and influence factors of sensitive wavelength of track vertical profile irregularity[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(7): 72.
- [10] 徐金辉. 高速车辆-轨道耦合系统随机振动分析及轨道不平顺评价方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- XU Jinhui. Study on random vibration analysis of high speed vehicle track coupling system and evaluation method of track irregularity [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

(收稿日期:2021-04-25)

(上接第 12 页)

- SHEN Haihong. Brief talk of the design points of rail transit sidings [J]. Railway Investigation and Surveying, 2016, 42(6): 76.
- [2] 张增勇, 毛保华, 杜鹏, 等. 我国城市轨道交通故障车停车线布局设置的模型与算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(5): 79.
- ZHANG Zengyong, MAO Baohua, DU Peng, et al. Modeling the distribution setting of parking tracks for disabled trains in urban rail transit system of China[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(5): 79.
- [3] 毛洁. 城市轨道交通停车线设计浅析[J]. 铁道勘测与设计, 2019(1): 32.
- MAO Jie. On UMT rolling stock stop line[J]. Railway Survey and Design, 2019(1): 32.
- [4] 付意庄. 城市轨道交通停车线设计探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2016(7): 346.
- FU Yizhuang. Discussion on design of stop mark for urban rail transit [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2016(7): 346.
- [5] 何再瑜. 关于上海轨道交通 12 号线停车线长度的探讨[J]. 地下工程与隧道, 2012(1): 41.
- HE Zaiyu. Discussion of length of station's stabling track of Shanghai rail transit line 12[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2012(1): 41.
- [6] 潘忠华. 基坑工程安全等级和勘探评价[J]. 建筑知识: 学术刊, 2014(12): 257.
- PAN Zhonghua. Safety level and exploration evaluation of foundation pit engineering [J]. Architectural Knowledge: Academic Journal, 2014(12): 257.
- [7] 苏飞. 城市道路路网交通运行状态分析方法及应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- SU Fei. Study on analysis of urban road network traffic with applications[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.

(收稿日期:2021-06-26)