

# 面向视力障碍乘客的地铁站内路径规划算法研究<sup>\*</sup>

李 胜<sup>1</sup> 郑成龙<sup>2</sup> 刘 源<sup>1</sup> 孙 强<sup>1</sup> 邢宗义<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学自动化学院, 210094, 南京;

2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛//第一作者, 副教授)

**摘 要** 在地铁站封闭复杂环境内, 常规的最短路径规划算法并不适用于视力障碍人群。提出一种面向视力障碍乘客的地铁站内路径规划算法, 在分析该类型乘客通行能力影响因素的基础上, 指出视障乘客的路径选择应综合步行距离与乘客安全性两个方面的需求。利用多目标决策问题中的层次分析法, 对各影响因子进行综合权值计算, 从而得到各路径的权重。最后利用 Dijkstra 算法进行最优路径仿真计算。仿真结果显示, 综合路线距离和乘客安全性所得到的路径更加符合视力障碍乘客的行走习惯。

**关键词** 地铁站; 视障乘客; 路径规划; 层次分析法; Dijkstra 算法

**中图分类号** U231.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.07.044

## Study on Path Planning Algorithm of Metro Station for Visually Impaired Passengers

LI Sheng, ZHENG Chenglong, LIU Yuan, SUN Qiang, XING Zongyi

**Abstract** In the closed complex environment of metro station, the conventional shortest path planning algorithm is not suitable for people with visual impairment. A path planning algorithm for visually impaired passengers in metro stations is proposed. Based on the analysis of influencing factors of visually impaired passengers passing capacity, it is pointed out that the path selection of visually impaired passengers should consider the needs of walking distance and passenger safety. Using AHP (analytic hierarchy process) in multi-objective decision-making problem, the weight of each influencing factor is calculated synthetically to get the weight of each path. Then Dijkstra algorithm is used to simulate the optimal path. Simulation results show that the integrated route distance and passenger safety can better meet the walking habits of visually impaired passengers.

**Key words** metro station; visually impaired passengers; path planning; AHP (analytic hierarchy process); Dijkstra algorithm

gorithm

**First-author's address** School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, 210094, Nanjing, China

路径规划指的是在有障碍物的环境下根据某种指标寻找一条从起点到目标点的无碰撞路径<sup>[1]</sup>。规划的目的是为了找到起点和目标点之间在时间上或距离上的最短路径, 目前主流的最短路径算法包括 Dijkstra 算法、Floyd 算法<sup>[2]</sup>、A\* 算法<sup>[3]</sup>等。

在地铁站封闭复杂环境内, 常规的最短路径规划算法并不适用于视力障碍(以下简称“视障”)人群。视障人士在室内环境下的移动不仅要考虑起点和目标点之间距离的远近, 循着路标的无障碍路径更为适用。因此, 应选取影响视障乘客通行能力的因素作为路径权值的定量。

## 1 视障乘客通行影响因素及当量表示

### 1.1 视障乘客通行影响因素

根据调查, 影响视障乘客在地铁站内通行的因素如下:

1) 路径的沿墙长度。在路径权值计算中, 路径长度占据了重要地位。而对于视障乘客而言, 沿墙行走是其倾向的行走方式, 因此引入沿墙长度因子  $k_1$ 。

2) 路径的非沿墙长度。非沿墙路径也是决定视障乘客室内路径权值的重要因素, 引入非沿墙长度因子  $k_2$ 。

3) 路径中的直角弯。视障人群对角度没有清晰的概念, 他们更加倾向直角弯, 故对其进行量化, 引入直角弯因子  $k_3$ 。

4) 路径的非直角弯。路径中的非直角弯对视障人群会产生负面的影响, 因此同时引入非直角弯

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201203)

因子  $k_4$ 。

5) 路径的楼扶梯。通过对盲校同学的调查,他们对楼扶梯的信任度很低,因而引入楼扶梯因子  $k_5$ ,使其区别于普通路径。

6) 路径的垂直电梯。无障碍电梯通常配有盲文提示,可认为是视障乘客出行的不二选择,因而在路径选择时将乘坐垂直电梯考虑在内,引入垂直电梯因子  $k_6$ 。

7) 路径的特殊地形和障碍物。地铁站内存在凸起、斜坡、凹陷等特殊地形,路径上存在垃圾桶等障碍物,这些对视障乘客的行走不利。因此,引入路径的障碍物和特殊地形因子  $k_7$ 。

## 1.2 视障乘客通行影响因子的当量表示

上文归纳出影响视障乘客站内通行的 7 个影响因子,但这些影响因子的单位不尽相同,因此要用当量对其进行表示,设矩阵  $\mathbf{P} = [k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7]$ ,  $n_i, n_j$  分别为拓扑模型中第  $i$  个、第  $j$  个顶点。 $a = (n_i, n_j)$ ,  $a$  表示连接这 2 个顶点的边。

### 1.2.1 沿墙长度和非沿墙长度的当量表示

设  $d(n_i, n_j)$  为 2 个顶点  $n_i, n_j$  之间的欧几里得距离。若边  $a$  沿墙,则  $k_1 = d(n_i, n_j)$ ;若边  $a$  不沿墙,则  $k_2 = d(n_i, n_j)$ 。

### 1.2.2 直角弯和非直角弯的当量表示

若边  $a$  连接的 2 个顶点方向与  $a$  的上一条路径呈直角,则  $k_3 = 2$ ;若呈非直角,则  $k_4 = 5$ 。

### 1.2.3 楼扶梯、垂直电梯的当量表示

若  $a$  的端点连接楼扶梯或垂直电梯,则给边  $a$  赋予楼扶梯或电梯当量。如果  $a$  边有一端为路径的终点,则  $k_5 = 10, k_6 = 4$ 。如果  $a$  边的端点均不是终点,则此楼扶梯或垂直电梯为站台层和站厅层的连接点,为了避免站台层和站厅层对楼扶梯和电梯的重复计算,此时的当量应减半,即  $k_5 = 5, k_6 = 2$ 。

### 1.2.4 不规则地形和障碍物的当量表示

给不规则地形的不规则程度赋值,如较平坦、较粗糙、上下坡分别赋予危险指数 2、4、6。典型障碍物柱子、垃圾桶、自动售货机、椅子的危险指数分别为 5、2、4、3。由此可得:

$$k_7 = \sum_{k=1}^m r_p \quad (1)$$

式中:

$m$ ——边  $a$  中不规则地形和障碍物的总个数;

$r_p$ ——第  $p$  个对象的危险指数。

## 2 多目标决策

计算最优路径,其本质属于多目标决策问题。解决此类问题的主要方法有:① 直接加权法;② 间接加权法,包括 VEGA 算法、有序比较与随机比较法、概率向量选择法<sup>[4]</sup>、层次分析法等;③ 基于 Pareto 最优解集的方法。

本文的最优路径计算是个典型的最优目标决策问题,所选用的层次分析法<sup>[5]</sup>是在对决策问题的本质、影响因子及其内在关系等进行深入分析的基础上,使决策的思维过程数学化,为难于完全定量的复杂决策问题提供了简便的决策方法。

### 2.1 层次分析法

采用层次分析法来解决视障乘客在地铁站内的路径规划计算,其具体步骤如下。

#### 2.1.1 确定指标

根据上文,确定视障乘客路径选择时的影响因子。

#### 2.1.2 建立层次结构模型

本文所建立的层次结构模型如图 1 所示,分为 4 个层次,其中:目标层为路径权值;指标层 Q 为路径长度和路径不安全性;指标层 K 为上述的 7 个影响因子;方案层则为具体的站内行走路径设计方案。

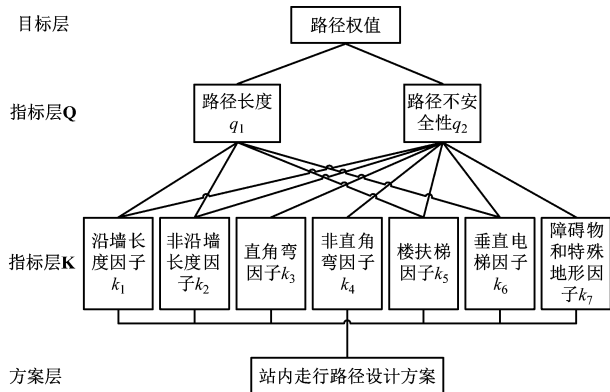


图1 层次结构模型

Fig. 1 Hierarchical structure model

#### 2.1.3 构造判断矩阵

根据层次结构模型,构建目标层、指标层 2 个层次的判断矩阵。判断矩阵的值通过两两互比来设置。针对路径的总加权目标  $W$ ,构造出目标层的判断矩阵  $W_Q$ :

$$W_Q = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{8} \\ 8 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

同理,针对指标层  $Q$  的  $q_1, q_2$  指标,分别构建出指标层指标  $Q$  的 2 个判断矩阵  $Q_{1,K}$  和  $Q_{2,K}$ :

$$Q_{1,K} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{9} & \frac{1}{2} \\ 3 & 1 & \frac{1}{4} & 1 \\ 9 & 4 & 1 & 5 \\ 2 & 1 & \frac{1}{5} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Q_{2,K} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \frac{1}{9} & \frac{1}{3} & \frac{1}{9} \\ 4 & 1 & 2 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 2 & \frac{1}{4} \\ 2 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} \\ 6 & 2 & 3 & 1 & \frac{1}{3} & 2 & \frac{1}{3} \\ 9 & 4 & 6 & 3 & 1 & 4 & 1 \\ 3 & \frac{1}{2} & 2 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{4} \\ 9 & 4 & 6 & 3 & 1 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

#### 2.1.4 计算单排序权向量并做一致性检验

根据正互反矩阵和一致性矩阵定义,  $W_Q, Q_{1,K}$  和  $Q_{2,K}$  均为正互反矩阵,但  $W_Q$  是一致性矩阵,  $Q_{1,K}$  和  $Q_{2,K}$  不是一致性矩阵,故需对这 3 个矩阵的不一致程度进行衡量,定义一致性指标  $I_C$  的计算式为:

$$I_C = \frac{\lambda_{\max}}{n-1} \quad (5)$$

式中:

$\lambda_{\max}$ ——对应于判断矩阵的最大特征根;

$n$ ——判断矩阵的阶数。

如果  $I_C = 0$ ,则说明该判断矩阵完全一致;  $I_C$  越接近 0,则该判断矩阵的一致性越高;  $I_C$  的值越大,则该判断矩阵的一致性越低。

引入随机一致性指标  $I_R$ ,用以衡量  $I_C$  的大小。  $I_R$  由随机构造的 500 个成对比较矩阵所得,其值可查表获得,表 1 给出了判断矩阵不同阶数下所对应的  $I_R$  值。

表 1 不同阶数对应的  $I_R$  值

Tab.1  $I_R$  values corresponding to different orders

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_R$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

定义一致性比率  $R_C$  为:

$$R_C = I_C / I_R \quad (6)$$

一般地,当  $R_C \leq 0.1$  时,认为矩阵的不一致程度在合理范围之内,可用归一化特征向量作为权向量;如果  $R_C > 0.1$ ,则认为矩阵的不一致程度过高,需要重新构造对比较矩阵。

#### 2.1.4.1 $W_Q$ 单排序权向量与一致性检验

$W_Q$  是一致性矩阵,设  $n_Q$  为  $W_Q$  的特征值,  $\omega_Q$  为  $W_Q$  的单排序权向量,根据一致性和正互反矩阵性质可得:

$$W_Q \omega_Q = n_Q \omega_Q \quad (7)$$

则有  $\omega_Q = [0.111 \quad 0.889]^T$ 。

#### 2.1.4.2 $Q_{1,K}$ 单排序权向量与一致性检验

矩阵  $Q_{1,K}$  不是一致性矩阵,需将  $Q_{1,K}$  的列向量进行量纲一化,由此可得:

$$Q_{1,K} = \begin{bmatrix} 0.0667 & 0.0526 & 0.0714 & 0.0667 \\ 0.2000 & 0.1579 & 0.1601 & 0.1333 \\ 0.6000 & 0.6326 & 0.6406 & 0.6667 \\ 0.1333 & 0.1579 & 0.1281 & 0.1333 \end{bmatrix} \quad (8)$$

设  $\omega_{Q_{1,K}}$  为  $Q_{1,K}$  的单排序权向量,按行量纲一化后可得  $\omega_{Q_{1,K}} = [0.064 \quad 0.163 \quad 0.635 \quad 0.138]^T$

设  $\lambda_{Q_{1,K}}$  为  $Q_{1,K}$  对应的最大特征值,对  $Q_{1,K}$  进行一致性检验,则有:

$$Q_{1,K} \omega_{Q_{1,K}} = \begin{bmatrix} 0.258 \\ 0.652 \\ 2.553 \\ 0.556 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Q_{1,K} \omega_{Q_{1,K}} = \lambda_{Q_{1,K}} \omega_{Q_{1,K}} \quad (10)$$

$$I_C = \frac{\lambda_{Q_{1,K}} - n}{n-1} \quad (11)$$

计算可得  $I_C = 0.0067$ 。查表 1 可得,  $n = 4$  时,  $I_R = 0.90$ 。将  $I_C, I_R$  代入式(6),可得  $R_C = 0.0074$ 。由于计算所得  $R_C$  小于 0.1,矩阵  $Q_{1,K}$  通过一致性检验。

#### 2.1.4.3 $Q_{2,K}$ 单排序权向量与一致性检验

同理,设  $\omega_{Q_{2,K}}$  为  $Q_{2,K}$  对应的最大特征值,将矩阵  $Q_{2,K}$  列向量量纲一化,按行进行量纲一化后,可得  $\omega_{Q_{2,K}} = [0.027 \quad 0.095 \quad 0.047 \quad 0.0137 \quad 0.310 \quad 0.074 \quad 0.310]^T$ 。

对  $Q_{2,K}$  做一致性检验,可得  $R_C = 0.015 < 0.100$ ,矩阵  $Q_{2,K}$  通过一致性检验。

#### 2.1.5 层次总排序权重及其一致性检验

层次总排序权重是指计算某一层次所有因素

对于总目标相对重要性的权值。设指标层 K 的第  $x$  个因子  $k_x$  对于总目标的权值为  $w_{kx,Q}$ ,其计算式为:

$$w_{kx,Q} = \sum_{l=1}^m w_{Q,l} w_{kp,Ql}$$

(12)

式中:

$w_{Q,l}$ ——指标层 Q 中第  $l$  个元素对总目标的单排序权值;

$w_{kp,Ql}$ ——指标层 K 层中第  $p$  个元素对指标层 Q 中第  $l$  个元素的单排序权值;

$m$ ——自然数序列。

由式(12)可得层次总排序权重如表 2 所示。

表 2 层次总排序权重

Tab. 2 Calculation result of the total ranking weight  $w_{kp,Ql}$  of hierarchy

指标层 K 因子 $k_x$	指标层 K 因子对于 $q_1$ 的权值	指标层 K 因子对于 $q_2$ 的权值	指标层 K 因子对于总目标的权值 $w_{kp,Ql}$
$k_1$	0.064	0.027	0.031
$k_2$	0.163	0.095	0.102
$k_3$	0	0.047	0.041
$k_4$	0	0.137	0.122
$k_5$	0.635	0.310	0.346
$k_6$	0.138	0.074	0.081
$k_7$	0	0.310	0.276

层次总排序权重的一致性检验方法为:设  $w_a$  为指标层 Q 第  $y$  个元素  $q_y$  对总目标的单排序权值,设指标层 K 第  $i$  个因子  $k_x$  对  $q_y$  的层次一致性指标为  $I_{Cq}$ ,随机一致性为  $I_{Rq}$ ,则层次总排序的一致性比率  $R_{C,z}$ 为:

$$R_{C,z} = \frac{w_1 I_{C1} + w_2 I_{C2} + \cdots w_a I_{Cy}}{w_1 I_{R1} + w_2 I_{R2} + \cdots w_a I_{Ry}}$$

(13)

当  $R_{C,z} < 0.1$  时,认为层次总排序通过一致性检验。根据式(13),可得  $R_{C,z} = 0.023\ 6$ ,由此可认为层次总排序通过一致性检验。

综上,指标层 Q 的层次总排序权重  $w_Q = [0.031\ 1\ 0.102\ 5\ 0.041\ 8\ 0.121\ 8\ 0.346\ 1\ 0.081\ 1\ 0.275\ 6]^T$ 。

2.2 综合权值计算

设边  $a$  的权值为  $w(n_i, n_j)$ , $P$  为影响因子的当量矩阵,则其计算式为:

$$w(n_i, n_j) = P\omega$$

(14)

3 Dijkstra 算法的计算步骤

大部分的位置服务系统都采用 Dijkstra 算法作

为路径规划算法的基础。该算法分为以下 7 个步骤。

步骤一:初始化。为顶点集  $N$  中的所有顶点  $g$  生成两个属性: $d(g)$ 和 $p(g)$ 。其中: $d(g)$ 表示为从起点到  $g$  点的最短距离值; $p(g)$ 表示  $g$  点的父节点。若该顶点为起点,则此时的  $d(g) = 0, p(g)$  等于起点本身。

步骤二:生成 1 个空集  $S$ ,用于存放所有已求出的到起点最短距离的节点。

步骤三:生成 1 个集合  $T$ ,将顶点集中的所有节点都放到  $T$  集合中。

步骤四:从  $T$  集合中找出  $d(g)$ 最小值对应的节点  $U$ ,将  $U$  作为当前的选中节点,将其从  $T$  中移出后,移入到  $S$  集合中。

步骤五:判断  $U$  是不是目的地。如果  $U$  是目的地,则算法结束;如果不是,则继续进行步骤六。

步骤六:令  $d(V)$ 表示从起点到  $V$  点的最短距离值, $d(U)$ 表示从起点到  $U$  点的最短距离值, $p(V)$ 表示  $V$  点的父节点, $w(U, V)$ 表示连接  $U, V$  两个节点之间的权值。计算所有节点  $U$  指向的节点  $V$  的最短距离值。若  $d(V) > d(U) + w(U, V)$ ,则  $d(V) = d(U) + w(U, V), p(V) = U$ 。

步骤七:本轮计算结束。返回步骤四,开始下一轮的计算。

4 仿真分析

本文对视障乘客在地铁站内的通行能力影响因素进行分析,得到各边的权值后,基于 Dijkstra 算法,将各边的权值由距离变为本文所求得的综合权值,进而得到相应的最优路径。在地铁站模型基础上得到的站台层部分路径规划结果如图 2 所示。从图 2 可看出,相对于最短路算法,综合了路线距离和乘客安全性所得到的通行路径更加符合视障乘客的行走习惯。

5 结语

本文首先分析了在地铁站内影响视障乘客通行能力的因素,并给出各因素的当量表达。在分析视障乘客通行影响因素的基础上,提出了一种基于层次分析法的多目标决策方法,该方法综合了路径距离和乘客安全性两个指标,得到了拓扑模型各个边的权值。利用基于综合权值的 Dijkstra 算法对最优路径进行了验算,结果证明,该方法更适用于视力障碍人群。

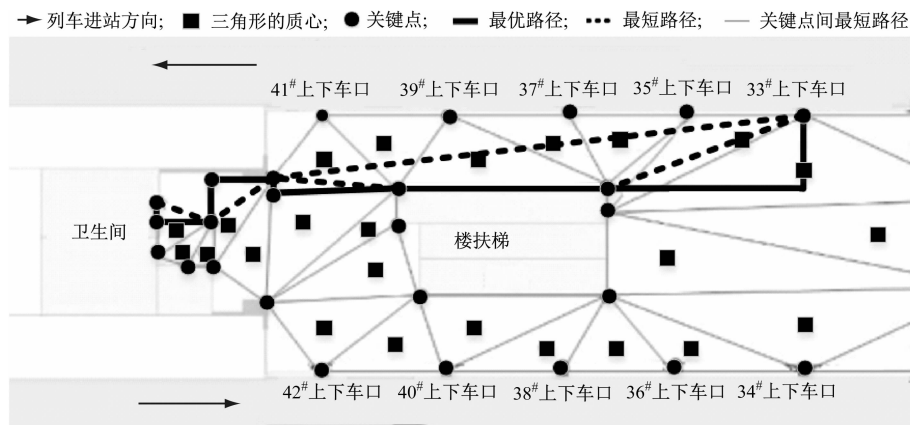


图2 路径规划仿真结果

Fig.2 Simulation results of path planning

## 参考文献

- [1] 张广林,胡小梅,柴剑飞,等. 路径规划算法及其应用综述[J]. 现代机械,2011(5):85.  
ZHANG Guanglin, HU Xiaomei, CHAI Jianfei, et al. Summary of path planning algorithm and its application[J]. Modern Machinery, 2011(5):85.
- [2] 李洪波,王茂波. Floyd 最短路径算法的动态优化[J]. 计算机工程与应用,2006(34):60.  
LI Hongbo, WANG Maobo. Dynamic optimum of shortest path's algorithm devised by Floyd[J]. Computer Engineering and Applications, 2006(34):60.
- [3] 张雷. 基于启发式搜索的最优规划算法研究[D]. 南京:南京大学,2014.

- ZHANG Lei. Research on heuristic search based algorithms for optimal planning[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [4] 李昌. 概率特征选择分类向量机[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016.  
LI Chang. Probabilistic feature selection and classification vector machine[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [5] 裴胜玉,周永权. 基于 Pareto 最优解集的多目标粒子群优化算法[J]. 计算机工程与科学, 2010(11):85.  
PEI Shengyu, ZHOU Yongquan. A multi-objective particle swarm algorithm based on the Pareto optimization solution set[J]. Computer Engineering and Science, 2010(11):85.

(收稿日期:2020-05-21)

(上接第 216 页)

## 6 结语

轨道梁桥施工过程中,必须精确控制盖梁支座锚箱的施工误差,误差过大将影响结构的安全性及列车运行的平稳性、舒适性。本文结合工程实践,找出了影响跨坐式单轨线路平曲线大横坡区段精度控制的关键因素,通过用加厚梯形调整活动板替换原有较薄的平面调整板、改制楔紧块及第二次线形调整等措施,有效解决了盖梁支座锚箱横坡超差问题,确保了锚固螺栓的有效使用寿命及结构安全。本文的技术改进措施可为类似线路问题提供技术思路,对跨坐式单轨制式关键受力部件后续在设计上的改进与创新具有一定的借鉴作用。

## 参考文献

- [1] 牛铁忠,杜珏. 重庆轨道交通三号线一期盖梁支座锚箱施工技术[J]. 城市道桥与防洪,2010(7):121.  
NIU Tiezhong, DU Jue. Chongqing Rail Transit No.3 Line phase I capping beam support anchor box construction technique[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2010(7):121.
- [2] 谢耀春. 研究跨坐式单轨交通轨道梁定位测量及线形检测方

- 法[J]. 低碳世界,2021(1):175.
- XIE Yaochun. Research on methods of track beam positioning measurement and alignment detection of straddle monorail transit[J]. Low Carbon World, 2021(1):175.
- [3] 柯斌,易思蓉,余浩伟. 悬挂式单轨系统线路平面曲线参数研究[J]. 铁道标准设计,2021(5):851.  
KE Bin, YI Sirong, YU Haowei. Research on line plane curve parameters of suspension monorail system[J]. Railway Standard Design, 2021(5):851.
- [4] 王忠义. 双龙站—碧津站区间锚箱成品测量数据统计[R]. 重庆:重庆单轨交通工程有限责任公司,2011.  
WANG Zhongyi. Measurement data statistics of finished anchor box in Shuanglong Bijin Station section [R]. Chongqing: Chongqing Monorail Transit Engineering Co. Ltd., 2011.
- [5] ZHAO X, WANG G, WU X, et al. Parameter deduction and accuracy analysis of track beam curves in straddle-type monorail systems[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2015,8(5):34.
- [6] 钟明琳,朱尔玉,周勇政. 单轨交通轨道梁快速替换中的目标线形[J]. 北京交通大学学报,2013(1):90.  
ZHONG Minglin, ZHU Eryu, ZHOU Yongzheng. Objective alignment for rapid track beam replacement of straddle monorail transit [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013(1):90.

(收稿日期:2021-06-22)