

基于三阶段模糊层次比选方法的城市轨道交通线路敷设方式研究

韩 帅, 孙捷城, 路林海, 刘家海, 韩 林, 胡永利

(济南轨道交通集团有限公司, 济南交通发展投资有限公司, 济南 250101)

摘要:根据《城市轨道交通线网规划标准》基本原则,总结城市轨道交通线路敷设方式经验,提出三阶段线路敷设方式比选方法,即关键节点/区段敷设方式、敷设方式适应性评价、经济性比选。基于模糊层次分析法的基本原理,结合济南人文、地理、环境要素,提出基于改进的模糊层次分析方法的敷设方式适应性评价方法及算法,形成三阶段模糊层次线路敷设方式比选方法。应用该方法研究济南轨道交通 1 号线线路敷设方式。结果表明:经关键节点/区段分析,可判定方特站至京沪铁路水屯站区间,4 座车站均为地下站,区间采用地下敷设(盾构工法);经基于模糊层次分析的敷设方式适应性评价,在京沪铁路水屯站至工研院站区间,地下敷设、高架敷设隶属度分别为 0.499、0.501,两种敷设方式无显著差别;经经济性比选,在京沪铁路水屯站至工研院站区间,高架敷设比地下敷设静折现值节省 42.4%,建议选用高架敷设,这与实际结果一致。

关键词:城市轨道交通;线路敷设方式;模糊层次分析法;三阶段线路敷设方式比选方法

中图分类号:TU91 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)05-0332-09

城市轨道交通线路敷设方式与城市总体规划、城市资源集约利用密切相关,对工程造价、城市土地资源利用、城市景观、社会稳定性、建设工期及运营成本等关键指标起决定作用^[1-4],需要慎重选择城市轨道交通线路敷设方式。

目前,城市轨道交通线路敷设方式研究主要比选经济性、与城市规划符合度、水文地质条件、城市景观等方面评价指标,主观和定性评价指标占比极高,客观数据、定量指标不足^[5-7],不利于决策和选择。为保证有限的地区资源高效集约利用,亟待形成科学方法选择线路敷设方式。

《城市轨道交通线网规划标准》^[8]中提出敷设方式应结合城市总规、沿线用地条件、地理环境条件及城市轨道交通系统选型的技术特点因地制宜进行选择,并应满足沿线城市功能发展需要和土地使用条件,以及环境保护、历史文化遗产保护、水文地质、安全性和经济性等要素要求。虽可依据所列原则要素比选城市轨道交通敷设方式,但是济南富泉水甲天下,其独特的人文、地理环境与其他城市

差异较大,需要甄别筛选研究适用于济南的城市轨道交通线路敷设方式。

本文遵循线路敷设方式“因地制宜”基本原则,总结城市轨道交通线路敷设方式经验,提出三阶段线路敷设方式比选方法,即关键节点/区段敷设方式、敷设方式适应性评价、经济性比选。基于模糊层次分析法的基本原理,结合济南人文、地理、环境要素,提出基于模糊层次分析的敷设方式适应性评价方法及算法,形成三阶段模糊层次线路敷设方式比选方法(以下简称“三阶段模糊层次比选方法”)。

1 三阶段线路敷设比选方法

图 1 为线路敷设方式三阶段比选方法,主要包括关键节点/区段敷设方式、敷设方式适应性评价、经济性比选。

1) 关键节点/区段敷设方式。当地铁线路需穿越建筑物、河流湖泊、大断面管道、铁路公路或其他大型交通枢纽、线路换乘等关键节点/区段,这些关键节点/区段决定了线路在关键节点大小里程方向一定范围的敷设方式。通过调研沿线重要节

收稿日期:2021-11-11

基金项目:山东省重点研发计划(2021CXGC011203);山东省自然科学基金(ZR2017MEE065);山东省住建厅科学技术项目(2019-K7-12);济南市社会民生重大专项(201704140)。

作者简介:韩帅(1990—),男,山东禹城人,济南轨道交通集团有限公司,工程师,硕士,研究方向为城市轨道交通设计理论与技术。

点/区段,分析遴选制约线路敷设方式的关键节点/区段,结合制约因素,判定其敷设方式。本文建议先确定关键节点/区段的敷设方式,而后分段比选整条线路敷设方式。

2)敷设方式适应性评价。分段比选整条线路敷设方式,结合各地城市规划、人文、地理环境,遴选评价原则、评价项目及指标,建立敷设方式适应性评价体系。根据评价体系特点及目标需求,选取系统分析方法。目前对线网规划类问题较常用的分析方法包括专家调查法、蒙特卡洛法、层次分析法、模糊综合评价法、主成分分析法、灰色关联度法及数据包络分析法等,这些方法各自皆有一定的局限性和适用范围,建议从方法适用范围及以往成熟案例分析比对评价体系适用性。

针对风险评估、服务质量评价、绩效量化评价问题等,经过优化提升模糊层次分析方法,可得到

解答不同实际问题的方案^[9-11]。本文优先选用模糊层次法应用于泉域济南的敷设方式适应性评价体系。

3)经济性比选。在适应性评价的基础上,依据线路特点,遴选经济评价指标,并比选不同敷设方式。需注意,经敷设方式适应性评价确定在某一区段,一种敷设方式有显著优势时,则经济性比选作为辅助决策的参数考虑。

本文建议以正式运营时建设成本和运营成本的静折现值进行经济性评价。建设任务在运营前基本完成,按运营前各项投入计算;运营成本在每个运营年度末结算。

经上述3个阶段比选确定了线路敷设方式,各阶段彼此独立又内在联系,在关键节点/区段敷设方式必然包含经济性比选部分内容,应根据实际需求,择优选取评价办法。

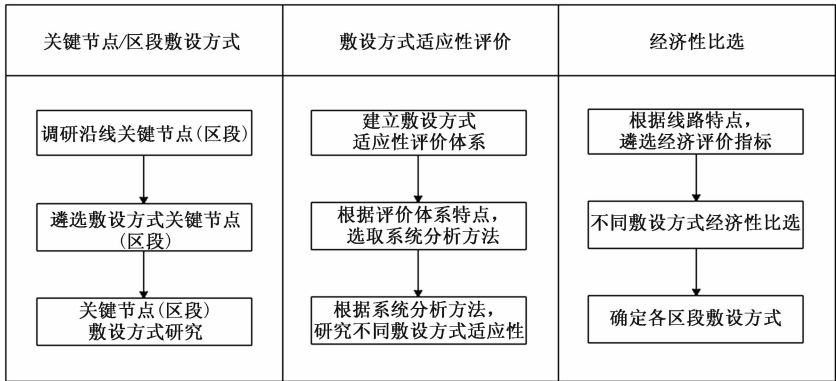


图1 三阶段线路敷设方式比选方法

2 基于模糊层次分析的敷设方式适应性评价

基于《城市轨道交通线网规划标准》,结合济南市的独特人文、地理特点,本文提出保泉、建设条件、环保性、景观效果、社会稳定性五大原则及三级评价项目,通过改进优化模糊层次分析法,形成基于模糊层次分析的敷设方式适应性评价方法,经应用反馈进行方法学验证。下面对基于模糊层次分析的敷设方式适应性评价方法、算法进行简要说明。

2.1 建立模糊互补判断矩阵

设敷设方式适应性评价体系中一级、二级、三级分别为:一级评价项目 $S=\{u_1,u_2,u_3,\cdots,u_i\}$;二级评价项目 $u_i=\{l_{i1},l_{i2},\cdots,l_{ij}\}$;三级评价项目 $l_{ij}=\{r_{ij1},r_{ij2},\cdots,r_{ijn}\}$ 。

例如,一级评价项目中工程地质条件 $u_2=\{l_{21},$

$l_{22}\}=\{\text{地势坡度,水文地质}\}$, $l_{22}=\{r_{221},r_{222}\}=\{\text{对特殊水文情况适宜性,对特殊地质地貌适宜性}\}$ 。图2所示为敷设方式适应性评价体系三级评价项目,一级、二级、三级评价项目分别为6个因素、22个因素、3个因素。

2.2 建立模糊互补判断矩阵及一致性检验

通过建立模糊一致判断矩阵求解各项目权重,极大地改善了层次分析法判断矩阵的一致性问题,并运用矩阵一致性检验方法检验各项目重要度的协调性,避免存在违反客观真理的数据^[11-13]。

2.2.1 模糊互补判断矩阵

模糊互补判断矩阵 S 表示同级别评价项目间两两比较重要性,则 S_{ij} 为两个项目间的相对重要程度的定量表述。表1列出了两个项目间的相对重要程度的定量值。因此,模糊互补判断矩阵 $P=(p_{ij})_{n\times n}$ 可表示为

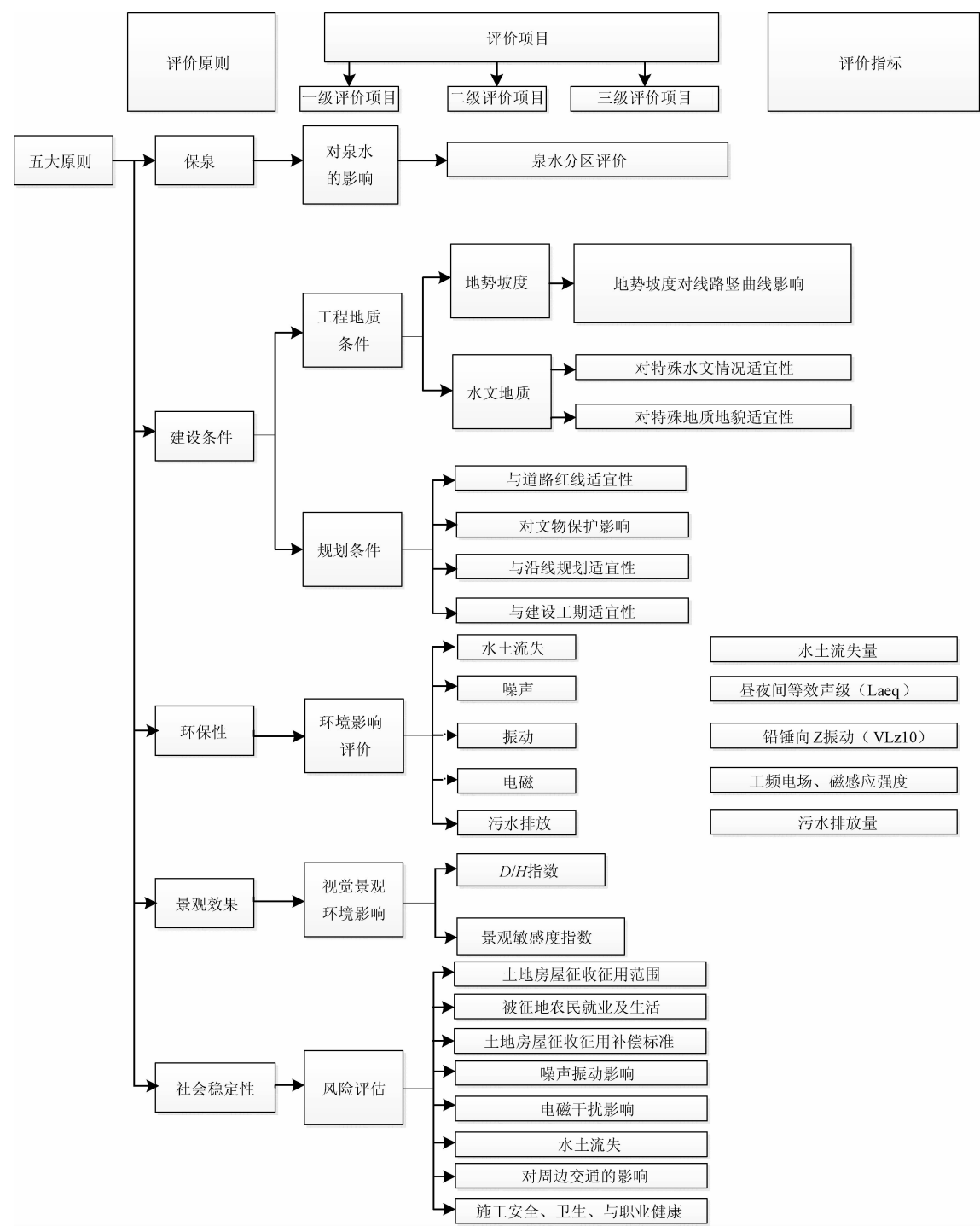


图 2 敷设方式适应性评价体系

S	u ₁	u ₂	...	u ₆
u ₁	S ₁₁	S ₁₂	...	S ₁₆
u ₂	S ₂₁	S ₂₂	...	S ₂₆
...	...	...	...	...
u ₆	S ₆₁	S ₇₆₂	...	S ₆₆

表 1 重要性标定

重要性比较	同等重要	稍微重要	明显重要	重要得多	极端重要
定量值	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

2.2.2 模糊互补判断矩阵一致性检验

模糊互补判断矩阵一致性检验目的是检验同级别评价项目间重要性标定的协调性,遵从加法一致性和乘法一致性。基于加法一致性准则提出的一致性检验指标 ρ ,充分考虑了因素重要性和重要性的一致性,本文优先选用^[15],计算公式为

$$\rho = \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \times$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \sum_{k=1, k \neq i, j}^n \left| p_{ij} - \left(p_{ik} + p_{kj} - \frac{1}{2} \right) \right| \quad (1)$$

仅当 $\rho < 0.2$, 模糊互补判断矩阵通过一致性检验, 无须进行调整。若一致性指标 $\rho \geq 0.2$, 需对模糊互补判断矩阵 S 进行调整, 调整方法: ①选取一行符合基本事实逻辑的数据, 称为标准行; ②用标准行与其余行对应数据分别相减, 若均为常数, 无须调整; 否则, 调整待定行直至两行之差为常数。

2.3 一级评价项目权重求解

表 2 为一级评价项目权重求解方法, 统计分析模糊一致判断矩阵的权重求解办法均是最大特征根及特征向量的改进算法。为减少采用单一计算方法可能的误差, 建议采用多种方法分别计算一级评价项目权重, 剔除离散较大的方法, 求解平均值。

表 2 一级评价项目权重求解方法

方法 (贡献者)	理论依据	公式
Geometric Average	近似求解 特征向量	$u_i = \frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n}}$
Arithmetic Average	近似求解 特征向量	$u_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}$
徐泽水 ^[12]	利用 $S_{ij} = 0.5 + a(r_i - r_j)$ 转为一致判断矩阵	$u_i = \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)}$
蓝继斌等 ^[13]	利用 $S_{ij} = \log^j - \log^j + 0.5$ 转为一致判断矩阵	$u_i = \beta_n^{\frac{1}{n}} \sum_{j=1}^n p_{ij} / \sum_{k=1}^n \beta_n^{\frac{1}{n}} \sum_{j=1}^n p_{kj}$

2.4 三级评价项目权重求解

2.4.1 一级评价项目权重求解

按照重要性标定办法, 建立模糊互补判断矩阵 S , 对“对泉水的影响、工程地质条件、规划条件、环境影响评价、视觉景观环境影响、风险评估”6 个因素两两比较其重要性。本文调研了参与济南轨道交通线网规划设计专家的意见, 模糊互补判断矩阵 S 为

$$S = \begin{matrix} & \begin{matrix} u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 & u_6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.7 & 0.7 & 0.6 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.5 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.5 \\ 0.3 & 0.4 & 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.6 \\ 0.3 & 0.4 & 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.6 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.4 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

经模糊互补判断矩阵一致性检验, $\rho < 0.2$, 可判定 S 满足一致性要求, 利用表 2 中一级评价项目权重求解方法计算一级评价项目权重, 见表 3。

表 3 一级评价项目权重

项目	方法(贡献者)			
	Geometric Average	Arithmetic Average	徐泽水	蓝继斌
u_1	0.206 8	0.206 2	0.190 0	0.205 6
u_2	0.172 8	0.172 3	0.170 0	0.172 2
u_3	0.172 8	0.172 3	0.170 0	0.172 2
u_4	0.148 3	0.148 5	0.156 7	0.150 0
u_5	0.148 3	0.148 5	0.156 7	0.150 0
u_6	0.151 0	0.152 1	0.156 7	0.150 0

由表 3 可知, 一级评价项目权重排序完全一致, 其中, 利用 Geometric Average、Arithmetic Average 和蓝继斌的权重误差 $\leq 1.1\%$, 取此 3 种方法平均值作为一级评价项目权重。因此, 一级评价项目权重为 $r = \{0.206, 0.172, 0.172, 0.149, 0.149, 0.151\}$ 。

2.4.2 二级、三级评价项目权重求解

根据敷设方式适应性评价方法, 遵循一级评价项目权重求解方法, 可得二级、三级评价项目权重, 表 4、表 5 列出了二级、三级评价项目权重。

综上所述, 基于模糊层次分析的敷设方式适应性评价基本步骤为: ①建立敷设方式适应性评价体系; ②建立模糊互补判断矩阵; ③模糊互补判断矩阵一致性检验及调整; ④权重求解; ⑤层次总排序。

3 济南轨道交通 1 号线敷设方式

为了验证三阶段模糊层次敷设方式比选方法的适用性, 基于三阶段模糊层次敷设方式比选方法, 分析济南轨道交通 1 号线工程的线路敷设方式。

3.1 济南轨道交通 1 号线概况

图 3 为济南轨道交通 1 号线示意图。济南轨道交通 1 号线工程(以下简称 1 号线)位于济南市西部新城区, 线路全长 26.1 km, 设车站 11 座, 支撑城市总体规划中“一城两区”西部城区发展。途经长清区、市中区、槐荫区, 沿线串联了创新谷、园博园、大学城、玉符河绿色生态区、腊山河片区、济南西站片区等重点区域, 重点解决了济南市西部地区南北向的交通供需的矛盾, 有效加强了西部新城区与主城区之间的联系。

3.2 关键节点/区段分析

3.2.1 济南西站、济方区间及大济区间敷设方式

济南西站为与高铁济南西站、地铁 M1 线、地铁 1 号线换乘站, 与建设济南西站同期预留了城市轨道交通后期建设条件。高铁济南西站轨道预留工程为地下三层结构, 决定了此车站采用地下敷设方式。济南西站预留了盾构接收、始发条件, 限制了济方区间、大济区间均将采用盾构工法。

表 4 二级评价项目权重

二级评价项目	模糊一致判断矩阵	权重
对泉水的影响={泉水分区评价}	$S_1=[1]$	$r_1=[1]$
工程地质条件={地势坡度,水文地质}	$S_2=\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$	$r_2=[0.5,0.5]$
规划条件={与道路红线适宜性,对文物保护影响,与沿线规划适宜性,与建设工期适宜性}	$S_3=\begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.4 & 0.5 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 & 0.6 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 & 0.6 \\ 0.5 & 0.4 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix}$	$r_3=[0.23,0.27,0.27,0.23]$
环境影响评价={水土流失,噪声,振动,电磁,污水排放}	$S_4=\begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.5 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.4 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.4 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.4 \\ 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix}$	$r_4=[0.22,0.18,0.18,0.18,0.22]$
视觉景观环境影响={D/H 指数,景观敏感度指数}	$S_5=\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$	$r_5=[0.5,0.5]$
风险评估=土地房屋征收征用范围,被征地农民就业及生活,土地房屋征收征用补偿标准,噪声振动影响,电磁干扰影响,水土流失,对周边交通的影响,施工安全、卫生、与职业健康}	遴选出的 8 个风险因素权重相同	
		$r_8=[0.125,0.125,0.125,0.125,0.125,0.125,0.125,0.125]$

表 5 三级评价项目权重

三级评价项目	模糊一致判断矩阵	权重
地势坡度={地势坡度对线路竖曲线影响}	$S_{21}=[1]$	$r_{21}=[1]$
水文地质={对水文情况适应性,对地质地貌适应性}	$S_{22}=\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$	$r_{22}=[0.5,0.5]$



图 3 济南轨道交通 1 号线示意图

3.2.2 大杨站及大济区间敷设方式

大杨站为与 M3 线换乘车站。M3 线沿济南东西向交通大动脉经十路走行,采用地下方式敷设。考虑到大杨站近期最高峰断面客流上车 2 593 人次、下车 7 316 人次,全日客流断面上车 35 681 人次、下车 5 465 人次,乘客换乘量仅次于济南西站,为提高乘客换乘效率,大杨站应采用十字换乘。济南西站至大杨站区间共 1.6 km,高架区间方案无法满足竖曲线坡度 30‰的要求,建议济大区间采用地下敷设方式。

3.2.3 王大区间及王府庄站敷设方式

线路出大杨站向王府庄站走行需先后穿越京沪高铁、京福高速公路,过王府庄站后穿越京沪铁路水电站。此段京沪高铁为正线、京济南上下行联络线。京沪高铁正线运行速度为 160 km/h,通过列车速度为 310 km/h,列车每天开行对数为上行 82 列,下行 81 列。京济上、下行联络线运行速度约为 130 km/h,通过列车速度为 160 km/h,列车每天开行对数为上行 26 列,下行 25 列。根据《济南铁路局城市轨道交通涉及铁路工程建设管理办法(试行)》,并与济南铁路局磋商及技术论证,结合以往工程成功案例,建议以盾构下穿京沪高铁、京沪铁路水电站。

因京沪铁路水电站、京福高速公路距王府庄站仅 500 m,地面站方案、高架站方案均无法满足竖曲线坡度 30‰的要求。同时,王府庄站为与 R2 线换乘站,采用平行换乘方式,道路宽度 60 m 无法满足建设地下一层站要求。因此,建议选用地下两层站方案。

图 4 为 1 号线王府庄站敷设方式制约因素,此区段线路走行方案为首先下穿京沪铁路水电站框

架箱涵,出王府庄站后沿刘长山路向东走行,左、右线分别以 2 000、700 m 曲线半径转至刘长山路南侧,然后右线以 300 m 半径曲线回收,穿京福高速公路桥桩后,左右线分别以 300、310 m 半径曲线上、下叠落斜穿京沪高铁桥,转弯向北至党杨路。区间隧道左、右线均斜穿京沪高铁 64 m 桥跨,可避开党杨路东侧的西客站回迁安置房、绿地泉景嘉园小区桩基。

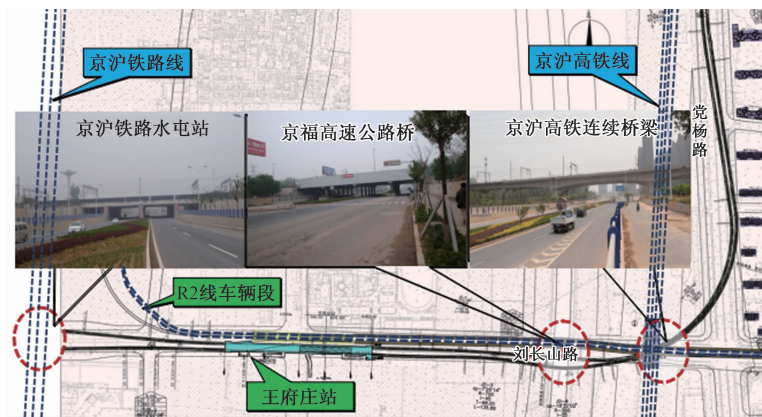


图 4 1 号线王府庄站敷设方式制约因素

经对 1 号线关键节点/区段分析,可判定方特站至京沪铁路水电站区间,四座车站均为地下站,区间采用地下敷设(盾构工法)。下面基于模糊层次分析的敷设方式适应性评价方法探讨王府庄站西侧京沪铁路水电站至工研院站采用高架站与地下站敷设方式的适应性。

3.3 京沪铁路水电站至工研院站区段敷设方式适应性评价

敷设方式适应性评价体系共计 22 个评价指标,限于篇幅,本文重点介绍视觉景观环境影响、风险评估 2 个指标的评价原则。

3.3.1 视觉景观环境影响

视觉景观是人们观察周围环境的视觉总体,城市视觉景观是城市自然景观、建筑景观及文化景观的综合体。景观效果以景观生态学方法,通过“D/H 指数”和“景观敏感度指数”评价线路敷设方式对人的主观感受影响。

1) D/H 指数。人们常用视线距离 D 与建筑物的视平线以上的高度 H 之比 D/H 来描述道路与建筑的空间比例。

高架桥梁地段主要涉及的城市主干道有丹桂路、海棠路和刘长山路。根据现场调查与地形图对比分析,行人行走于城市主干道上的视觉景观分析结果见表 6。

表 6 高架视觉景观分析结果

敷设路径	敷设方式	红线宽度/m	D/H	
			左侧	右侧
丹桂路	路中高架	60	1.66	1.66
海棠路		60	1.66	1.66
刘长山路		50	1.38	1.38

本项目建成后,高架段总体来说 D/H 基本位于 1~2,视觉景观具有封闭能力,而且没有建筑压迫感,视觉景观总体较好。

风亭可以和地下车站的地铁进、出口相结合,这样,不但可以节约占地面积,而且可以使不良影响相对集中,减小影响范围。

2) 景观敏感度指数。景观敏感度评价方法为

$$S_d = \begin{cases} 1, & d \leq D \\ D/d, & d > D \end{cases} \quad (3)$$

式中: S_d 为景观敏感指标; d 为观景者与被观景的距离。1/4 < S_d ≤ 1/2 表示低度的景观敏感度; 1/2 < S_d < 1 表示中度景观敏感度; S_d = 1 表示高度景观敏感度。景观敏感度越大的区域,轻微的干扰对景观冲击很大。

工程沿线有公共绿地、大学城、园博园、居民区等,本次选取 5 处典型敏感区进行景观敏感性分析。道路内视觉景观以 D/H 指数评价,景观敏感指标针对远景视觉景观,即在道路范围外的视觉景观,

本文 D 值取 50 m,表 7 列出了景观敏感分析结果。

表 7 高架景观敏感度

地点	水平距离/m	观敏感度指数	敏感程度
交通学院	231	0.22	不敏感
园博园	158	0.32	低度敏感
长清湖	150	0.33	低度敏感
中医药大学	153	0.33	低度敏感
省劳技	98	0.51	中度敏感

由表 7 可知,沿线高架敷设对人的视觉景观效果影响较小,但地下敷设的景观敏感度远低于高架敷设。

3.3.2 风险评估

社会稳定风险影响因素包括群众支持问题、工程建设与当地基础设施建设协调问题、利益诉求问题和社会治安问题以及其他不可预见性问题等。根据当地以往征地经验和民意调研结果确定各类影响线路敷设的风险因素,并进行项目风险评估。

根据当地以往征地经验和民意调研结果确定每类风险因素风险概率和影响程度,然后将每类风险因素的概率与影响程度相乘,求出该类风险因素的得分(即为风险程度),表 8、表 9 列出了高架、地下敷设风险评价结果。风险程度的分值越高,说明项目的风险越大。

表 8 高架敷设风险评价

风险因素	风险概率/%	影响程度/%	风险程度
土地房屋征收征用范围	60	40	0.24
被征地农民就业及生活	80	80	0.64
土地房屋征收征用补偿标准	80	80	0.64
噪声振动影响	60	60	0.36
电磁干扰影响	20	40	0.08
水土流失	40	45	0.18
对周边交通的影响	40	40	0.16
施工安全、卫生、与职业健康	20	40	0.08

表 9 地下敷设风险评价

风险因素	风险概率/%	影响程度/%	风险程度
土地房屋征收征用范围	70	40	0.28
被征地农民就业及生活	80	80	0.64
土地房屋征收征用补偿标准	80	80	0.64
噪声振动影响	60	60	0.36
电磁干扰影响	15	40	0.06
水土流失	60	60	0.36
对周边交通的影响	60	50	0.30
施工安全、卫生、与职业健康	20	40	0.08

3.3.3 评判指标无量纲化

工程地质条件、噪声、振动、高架景观敏感度、

各类风险等评价指标量纲不一致,无法直接应用,本文推荐采用如下方法将指标无量纲化,表 10 列出了评判指标无量纲化处理结果。

如泉水分区评价,高架敷设、地下敷设均对泉水无影响,将高架敷设、地下敷设均赋值为 5;水土流失,以水土流失量为评价指标,将最优的指标:高架敷设赋值 5,地下敷设无量纲值为 $5 \times (49\ 882 / 127\ 176) = 1.96$ 。

3.4 线路敷设方式评判

3.4.1 评判矩阵计算

设无量纲化评判指标矩阵为 R_i, R_{ij} 。一级、二级、三级评判矩阵分别为 C_t, C_s, C_i 。采用模糊数学的加权平均值(+,·)运算法则,可得一级、二级、三级评判矩阵为

$C_t = R_{ij} \times r_{ij}$ (4)

$C_s = R_t \times r_i$ (5)

$C_i = R_s \times r$ (6)

式中: r_{ij} 为三级评价项目权重; r_i 为二级评价项目权重; r 为一级评价项目权重。

3.4.2 三级评判

根据表 10,可得三级评价指标对应的无量纲化评判指标矩阵为

$R_{21} = [5\ 5], R_{22} = \begin{bmatrix} 5 & 5 \\ 5 & 5 \end{bmatrix}$ 。

由表 5 可得三级评价项目的权重分别为

$r_{21} = [1], r_{22} = [0.5, 0.5]$ 。

三级评判矩阵 C_t 为

$C_t = \begin{bmatrix} r_{21} & R_{21} \\ r_{21} & R_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.00 & 5.00 \\ 5.00 & 5.00 \end{bmatrix}$ 。

3.4.3 二级评判及一级评判

同三级评判,可得二级评判矩阵 C_s 为

$C_s = \begin{bmatrix} 5.00 & 5.00 \\ 5.00 & 5.00 \\ 5.00 & 5.00 \\ 4.90 & 2.74 \\ 2.50 & 5.00 \\ 4.84 & 4.31 \end{bmatrix}$ 。

同二级评判,可得一级评判矩阵 C_i 为

$C_i = \begin{bmatrix} 1.034 & 1.034 \\ 0.864 & 0.864 \\ 0.864 & 0.864 \\ 0.727 & 0.406 \\ 0.371 & 0.742 \\ 0.731 & 0.650 \end{bmatrix}$ 。

表 10 评判指标无量纲化

三级评价项目	评价指标	不同敷设方式		无量纲化评判指标	
		高架敷设	地下敷设	高架敷设	地下敷设
泉水分区评价	分区评价	5	5	5	5
地势坡度对线路竖曲线的影响	地势坡度	5	5	5	5
对特殊水文情况适宜性	定性评价	5	5	5	5
对特殊地质地貌适宜性	定性评价	5	5	5	5
与道路红线适宜性	道路红线	5	5	5	5
对文物保护影响	文保安全评估	5	5	5	5
与沿线规划适宜性	宜居宜业范围/m²	1 991 937	1 995 504	4.99	5
与建设工期适宜性	工期	5	5	5	5
水土流失	水土流失量/t	49 882	127 176	5	1.96
噪声	噪声限值达标距离/m	25	45	5	2.78
振动	列车振动源强均值/dB	57.0	65.1	5	4.38
电磁辐射	电视信号影响	5	5	5	5
污水排放	日最高用水量/m³	191.26	1 740.40	5	0.55
D/H 指数	D/H 指数	1.66	—	3	5
景观敏感度指数	景观敏感度指数	中度敏感	—	2	5
土地房屋征收征用范围	风险程度	0.24	0.28	5	4.29
被征地农民就业及生活	风险程度	0.64	0.64	5	5
土地房屋征收征用补偿标准	风险程度	0.64	0.64	5	5
噪声振动影响	风险程度	0.36	0.36	5	5
电磁干扰影响	风险程度	0.08	0.06	3.75	5
水土流失	风险程度	0.18	0.36	5	2.50
对周边交通的影响	风险程度	0.16	0.30	5	2.67
施工安全、卫生、与职业健康	风险程度	0.08	0.08	5	5

3.4.4 评判结论

评判矩阵 C_i 各元素为所对应一级评价项目的
评价得分,按五大原则分别累加,不同敷设方式适
宜性评判结果见表 11。

为了直观反映不同敷设方式的优劣,本文以雷
达图表示,将五大原则中每项得分较高者记为 5,对
应得分按比例分配分数。图 5 为不同敷设方式适
宜性对比,在保泉、建设条件、环保性、景观效果、社会
稳定性 5 个原则上,地下敷设、高架敷设各有优劣,
隶属度接近说明两者均适宜王府庄站西侧京沪铁
路水电站至工研院站。

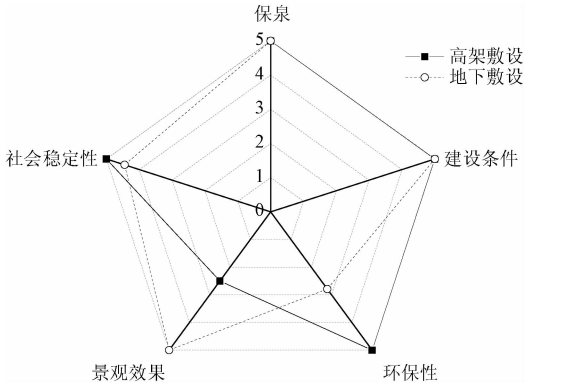


图 5 不同敷设方式适宜性对比

表 11 不同敷设方式适宜性评判

评价原则	高架敷设	地下敷设
保泉	1.034	1.034
建设条件	1.727	1.728
环保性	0.727	0.406
景观效果	0.371	0.742
社会稳定性	0.731	0.650
总分	4.590	4.560
隶属度	0.501	0.499

注:隶属度=总分高架/地下/∑总分。

3.5 不同敷设方式经济性比选

通过关键节点/区段分析和敷设方式适应性分
析,方特站至京沪铁路水电站确定采用地下敷设,

京沪铁路水电站至工研院站敷设方式适应性评价
表明高架敷设、地下敷设均适宜本区段。本节对京
沪铁路水电站至工研院站不同敷设方式经济性比
选,以确定最适宜敷设方式。

建设任务在运营前基本完成,建设成本按运营
前各项投入计算,包含不限于土建,设备安装、调
试,动迁等;运营成本在每个运营年度末结算,包
含运营期能耗费、维护费等,设运营成本以每年计
算。正式运营时建设成本和运营成本的静折现值
(按 40 年计算)为

$$PVC = TC_{\text{建设成本}} + \sum_1^n C_{\text{运营}} (1 + r)^{-n} \quad (7)$$

式中： $TC_{建设成本}$ 为建设期总成本； $C_{运营}$ 为每年运营成本； r 为折现率； n 为运营年限。

表 12 列出了不同敷设方式经济性对比，高架敷设比地下敷设节约建设成本和运营成本，静折现值节省 42.4%，综合关键节点/区段分析、敷设方式适应性分析、经济性比选，建议在方特站至京沪铁路水电站确定采用地下敷设，京沪铁路水电站至工研院站采用高架敷设，入地点根据工程情况择优选择。

表 12 不同敷设方式经济性对比

成本项目	高架敷设	地下敷设	差值/万元
建设成本/万元	421 729	758 271	-336 542
运营成本静折现值	275 113	451 853	-176 740
静折现值 PVC	696 842	1 210 124	-513 282

4 结论

1)三阶段模糊层次线路敷设比选方法，即关键节点/区段敷设方式、敷设方式适应性评价、经济性比选，与经验做法、实际情况符合较好。

2)应根据所在城市人文、地理环境甄别筛选敷设方式适应性评价指标，通过改进优化模糊层次分析法，形成基于模糊层次分析的敷设方式适应性评价方法。

3)济南轨道交通 1 号线敷设方式经关键节点/区段分析，可判定方特站至京沪铁路水电站区间、四座车站均为地下站，区间采用地下敷设(盾构工法)。经基于模糊层次分析的敷设方式适应性评价，在京沪铁路水电站至工研院站区间，地下敷设、高架敷设隶属度分别为 0.499、0.501，两种敷设方式无显著差别；经经济性比选，在京沪铁路水电站至工研院站区间，高架敷设比地下敷设静折现值节

省 42.4%，建议选用高架敷设，这与实际结果一致。

参考文献

[1] 刘建红. 城市快速轨道交通敷设方式经济性与适应性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(7): 5-8.

[2] 赵强. 城市轨道交通线路敷设方式研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(2): 102-105.

[3] 贺腊妮, 叶霞飞. 基国内外城市轨道交通线路敷设方式的对比分析[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 24(1): 81-85.

[4] 陈剑伟. 城市轨道交通线路设计方法[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(10): 96-99.

[5] 李团社. 城市轨道交通高架敷设方式与城市发展[J]. 都市快轨交通, 2010, 23(3): 53-55.

[6] 马振海. 城市轨道交通线路的敷设形式[J]. 城市轨道交通研究, 2005, 18(3): 27-30.

[7] 杨志团. 城市轨道交通线网规划中线路敷设方式的探讨与研究[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(11): 65-68.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通线网规划标准: GB/T 50546—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

[9] 宋高峰, 潘卫东, 杨敬虎, 等. 基于模糊层次分析法的厚煤层采煤方法选择研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 34-41.

[10] 刘健锋, 韦勇克, 刘远锋, 等. 基于安全设防等级划分与模糊层次分析的桥梁运营安全评价[J]. 公路交通科技, 2020, 37(10): 107-117.

[11] 姬东朝, 宋笔锋, 喻天翔. 模糊层次分析法及其在设计方案选优中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(11): 1692-1695.

[12] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种方法[J]. 系统工程学报, 2001, 16(4): 311-314.

[13] 蓝继斌, 徐扬, 霍良安, 等. 模糊层次分析法权重研究[J]. 系统工程理论与研究, 2006, 26(9): 107-112.

Research on the Laying Mode of Urban Rail Transit Line Based on Three-stage Fuzzy Hierarchical Line Laying Mode

HAN Shuai, SUN Jiecheng, LU Linhai, LIU Jiahai, HAN Lin, HU Yongli

(Ji'nan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan Transportation Development Investment Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: Based on the basic principles of *Standard for urban rail transit network planning*, a three-stage line laying mode by means of the experience in laying urban rail transit lines is put forward, that namely key node/section laying mode, adaptability evaluation of laying mode and economic comparison. Based on the basic principle of fuzzy analytic hierarchy process, combining with the characteristics of Jinan cultural and geographical environment, the adaptability evaluation laying method and algorithm is put forward and three-stage fuzzy hierarchical line laying mode is formed. The study on the laying mode of Jinan rail transit line 1 shows that: through the analysis of key nodes/sections, it can be determined that the four stations between Fangte station and Shuitun station of Beijing-Shanghai railway are underground stations, and the underground laying (shield construction method) is adopted in the interval. According to the adaptability evaluation of the laying method based on fuzzy hierarchical analysis, the membership of underground laying and elevated laying between Shuitun station of Beijing-Shanghai railway and Gongyanyuan station is 0.499 and 0.501 respectively, and there is no significant difference between the two laying methods. According to the economic comparison, the overhead laying can save 42.4% compared with the static discounted present value of underground laying between the Shuitun station of the Beijing-Shanghai railway and Gongyanyuan station, so it is suggested to choose the overhead laying, which is consistent with the actual result.

Keywords: urban rail transit; line laying mode; fuzzy analytic hierarchy process; three-stage fuzzy hierarchical line laying mode