

文章编号: 1674—8247(2024)01—0087—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.01.017

黄百铁路紫云高低站位线路方案多方法优选

王彦虎

(中铁二院贵阳勘察设计研究院有限责任公司, 贵阳 550002)

摘 要:以黄百铁路镇宁至石屯段线路方案为例,采用传统设计方法从工程、经济条件等多方面对紫云高低站位两个方案进行比选,确定主控因素;建立地质选线分析模型,基于 ArcGIS 软件最优路径技术比选两个方案的工程地质条件;利用层次分析法(AHP)将定性和定量指标结合,构建层次分析模型,计算两个方案综合评价指标。结果表明:3 种方法确定的推荐方案一致,基于 ArcGIS 软件和层次分析法的选线方法能够客观、全面地综合考虑多因素对铁路走向的影响,对线路方案设计有一定的参考价值。

关键词:铁路选线;方案优选;最优路径;层次分析法

中图分类号:U212.32

文献标志码:A

Comparison between High and Low Station Positions for Ziyun Station of Huangtong-Baise Railway

WANG Yanhu

(Guiyang Branch of China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: With the route scheme for Zhenning-Shitun Section of Huangtong-Baise Railway as a case for study, three methodologies were used for selecting the optimal route in the paper. At first, the traditional design method was used to compare the high and low station positions for Ziyun Station from multiple aspects such as engineering and economic conditions, to determine the controlling factors. Then, the geological conditions of the two positions were compared by using optimal path technology in ArcGIS software with the established optimal route analysis model for geological conditions. Finally, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method was employed to integrate qualitative and quantitative indicators and build an AHP model for calculating a composite evaluation indicator of the two positions. The results show that the recommended schemes determined by the three methodologies are identical. The route selection methods based on ArcGIS software and AHP can objectively and comprehensively consider the impact of multiple factors on railway alignment, and have certain reference values for route scheme design.

Key words: route selection for railway; scheme optimization; optimal path; Analytic Hierarchy Process

铁路选线设计是根据设计项目的功能需求,结合所经地区的社会、自然和生态环境,以经济、安全、舒适、快捷、环保为目标,从大面积着手,由面到带、由带到线,逐步细化、逐步逼近,确定线路空间位置、协调

布设各种建筑物的决策过程。选线设计是在主客观约束下从设计空间可能方案中搜索出在评价指标集上最优的多目标决策过程,具有数据源广泛、整体性强、知识面广、度和量的统一、方案特征和实践性强等

收稿日期:2022-12-13

作者简介:王彦虎(1993-),男,工程师。

引文格式:王彦虎. 黄百铁路紫云高低站位线路方案多方法优选[J]. 高速铁路技术,2024,15(1):87-92.

WANG Yanhu. Comparison between High and Low Station Positions for Ziyun Station of Huangtong-Baise Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(1):87-92.

特点。

针对铁路选线方法,朱颖^[1]等通过大量工程实例总结了传统铁路选线理念;杨立国^[2]、郭海东^[3]等基于模糊数学、层次分析法、BP神经网络、GIS、灰色关联度等数理统计工具探究了铁路选线的新方法;随着BIM技术和智能系统的应用;易思蓉^[4]、刘威^[5]等在智能选线方面做了相关研究。本文以黄桶至百色铁路(以下简称“黄百铁路”)镇宁至石屯段线路方案为背景,采用传统设计方法、基于ArcGIS软件和层次分析法对该段线路方案进行综合比选,旨在探索铁路选线新方法。

1 概况

1.1 黄百铁路概况

黄百铁路位于贵州省西南部地区的安顺市、黔西南州和广西百色市境内,为国家规划西部陆海新通道的辅助通道,如图1所示。线路自既有沪昆铁路黄桶站引出,呈南北向经普定县、六枝特区、镇宁县、紫云县、望谟县、乐业县和凌云县后,接入南昆铁路永乐站,后通过永乐至百色增建南昆铁路二线引入南昆铁路百色站。正线建筑长度312.626 km,贵州省境内长173.847 km,广西壮族自治区境内长138.779 km。

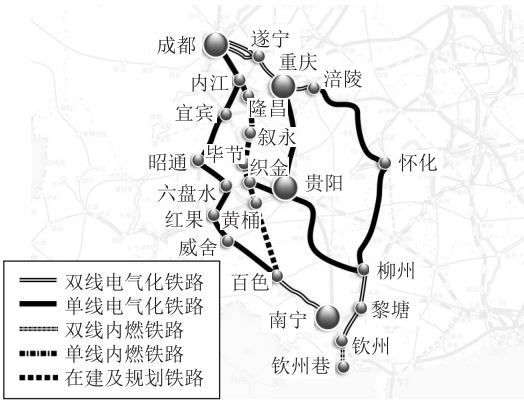


图1 西部陆海通道各线示意图

1.2 紫云高低站位方案介绍

黄百铁路镇宁至石屯段线路位于贵州省镇宁、紫云和望谟三县境内,紫云县城位于镇宁至望谟航空线东侧约20 km、海拔1 100~1 300 m的高原面上(以下简称“县城台地”)。县城南侧的火花镇一带分布有宽1 000~2 500 m,长25 km,海拔750~850 m的平缓低洼槽谷(以下简称“火花槽谷”)。县城台地与火花槽谷高差较大(平均高差约450 m),地势陡。

若在距离县城较近(约6 km)、海拔较高的县城台地设站(以下简称“紫云高站位方案”),则线路较长,

地形起伏较大;在海拔较低的火花槽谷内设紫云站(以下简称“紫云低站位方案”),线路较顺直,地势起伏较小,但距离县城较远(约25 km),故需对紫云高站位方案和低站位方案进行综合比选(以下简称“紫云高低站位比选”)。

1.3 主要控制因素

镇宁至石屯段线路主要控制因素如表1所示。

表1 线路主要控制因素表

经济据点	该段线路主要经济据点有镇宁县、紫云县及望谟县
地形条件	工程所在区域地处云贵高原与广西丘陵盆地的斜坡过渡地带,区内地形起伏较大,高程由800~2 400 m的云贵高原过渡到200~500 m的广西丘陵盆地地区,线路呈南北走向,地势总体上北高、南低
地质条件	该段线路廊道内主要地质问题有:岩溶、活动断裂、滑坡、危岩落石、岩堆、软岩大变形、顺层等
重大工程方案	该段线路所在区域坡陡谷深,且沿线河流分布广泛,线路跨越水利系统时会产生重大桥跨工程,桥跨工程选址是影响线路走向的重要因素
环境敏感点	该段线路廊道内有风景名胜区、自然保护区、水源保护区、地质公园及国家重点保护的野生动植物等分布,但线路方案均可绕避
军事敏感区、文物等	该段线路区域内无军事敏感区、文物等
重大工程设施	该段线路方案主要的重大工程设施有王二河水库等
其他交通设施	该段线路廊道内规划有贵兴铁路
沿线地方政府及相关部门意见	沿线地方政府根据城市规划、用地等因素,提出期望车站位置

2 传统设计方法比选

2.1 方案简介

紫云高站位方案:线路自镇宁站引出,向东南经江龙后沿槽谷向东行进,穿越五指山,跨越六志河,而后经白石岩乡南侧于彭家院设紫云站,出站后折向南,设白石岩隧道、羊架河特大桥,经交洞、边饶后至比较终点石屯。线路长96.79 km,桥隧比为78.4%。

紫云低站位方案:线路自镇宁站引出,向东南经募役、黄花哨后跨越红辣河于紫云县城南侧8 km的火花镇平寨村设紫云站,出站后折向南,经交平、边饶后至比较终点石屯。线路长90.90 km,桥隧比为83.5%。两方案比选示意如图2所示。

2.2 方案比选

(1)从线路长度及工程投资分析

紫云高低站位两方案主要技术经济指标如表2所示。

由表2可知,从本线工程分析,紫云低站位方案线路长度较紫云高站位方案短5.935 km,且特殊高桥少、隧道及辅助坑道短,工程投资省8.85亿元;从贵

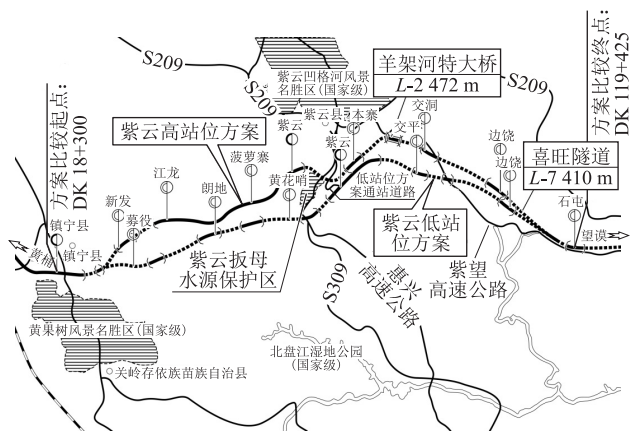


图 2 紫云高低站位方案比选示意图

表 2 主要技术经济对照表

序号	项目	紫云高站位方案	紫云低站位方案
1	长度/km	96.79	90.90
2	桥隧比/%	78.40	83.50
3	房屋拆迁/m ²	76 800	45 630
4	土石方/(10 ⁴ m ³)	628.0	449.2
5	桥梁工程/(km/座)	12.55/37	11.42/48
6	隧道工程/(km/座)	63.3/32	64.5/25
7	站后及其他/万元	193.4	180.8
8	工程投资		
	本项目工程/万元	852 682	764 203
	紫云站通站道路/万元	0	73 000
	贵兴铁路引入工程/万元	750 082.5	948 854
	合计	1 602 764.5	1 786 057

兴铁路引入工程分析,紫云高站位方案贵兴铁路较紫云低站位方案双线短 5.028 km,单线短 15.70 km,工程投资省 19.877 亿元;从紫云站通站道路分析,紫云低站位距离县城较远,交通不便,需修建长约 14.5 km 通站道路,投资约 7.3 亿元,而紫云高站位方案车站距离县城近,且有规划白云大道连接。综合分析,紫云高站位方案较低站位方案总投资省 18.25 亿元,紫云高站位方案稍优。

(2)从工程地质条件分析

该段线路沿线以灰岩、白云质灰岩等可溶岩为主,部分为砂岩、泥岩等,两方案主要工程地质情况对照表如表 3 所示。由表 3 可知,紫云低站位方案较高站位方案:岩溶水隧道长 3.3 km、低瓦斯隧道长 1.3 km、不良工程地质多 3 处,且线路经过可溶岩段标高较低,位于地下水季节变动带以下隧道较长,施工和运营风险较高,故从工程地质条件分析,紫云高站位方案更优。

(3)从带动地方经济发展分析

表 3 主要工程地质情况对照表

序号	项目	紫云高站位方案	紫云低站位方案
1	主要地质工程问题	危岩落石、岩堆、滑坡、顺层、岩溶、特殊岩土(人工弃土)	
2	岩溶	可溶岩隧道长 24.718 km 岩溶水隧道长 6.8 km	可溶岩隧道长 23.625 km 岩溶水隧道长 10 km
3	瓦斯	低瓦斯隧道 8.4 km	低瓦斯隧道 9.73 km
4	其他不良地质	危岩落石 15 处,岩堆 5 处,滑坡 1 处,顺层 3 处,岩溶强烈发育 3 段,特殊岩土(人工弃土)2 处	危岩落石 8 处,岩堆 6 处,滑坡 3 处,顺层 4 处,岩溶强烈发育 4 段,特殊岩土(人工弃土)2 处
5	围岩比例	Ⅲ 级 26 %、Ⅳ 级 39 %、Ⅴ 级 35 %	Ⅲ 级 21 %、Ⅳ 级 47 %、Ⅴ 级 32 %
6	地质条件	稍好	稍差

紫云低站位方案车站位于县城南侧火花镇槽谷,海拔较低,距县城航空距离约 8 km,交通不便,需新建通站道路 14.5 km,投资约 7.3 亿元,且车站与城区发展方向不符,对地方经济的带动作用较小。紫云高站位方案车站位于县城西北侧,距县城航空距离约 7 km,与紫云县城规划及发展方向相符,且车站同县城同处于紫云高原面上,通站道路有规划的白云大道,交通方便,有利于居民出行,可较好地带动沿线经济发展。

(4)从重大工程条件分析

站位工程条件:紫云低站位方案车站位置虽地势开阔,但局部地形起伏较大,土石方量较大;紫云高站位方案车站位置地势平坦,土石方量小,工程较简单。从站位条件分析,紫云高站位方案较优。

隧道工程条件:紫云低站位方案 6 km 以上的长大隧道 2 座,分别为紫云隧道(7.695 km)、喜王隧道(7.680 km),隧道辅助坑道总长 3.2 km,条件较好;紫云高站位方案 6 km 以上的长大隧道 2 座,分别为白石岩隧道(6.8 km)、喜旺隧道(7.45 km),辅助坑道总长 8.38 km,条件稍差。

桥梁工程条件:紫云低站位方案大于 50 m 特殊桥 4 座,长 2.24 km,最大桥高 102 m。紫云高站位方案大于 50 m 特殊桥 8 座,长 6.28 km,最大桥高 133 m。

(5)从环境保护方面分析

本段线路与镇宁白马湖县级森林公园、紫云板母地下水饮用水源保护区有干扰,但两方案均予以绕避,对环境保护区均无影响。

(6)从其他方面分析

线路廊道内王二河水库等重大工程设施不控制方案,两方案沿线文物保护单位、军事保护区等均按绕避原则进行绕避。

2.3 比选结论

紫云高低站位方案对廊道内风景名胜区、自然保护区、水源保护区、文物古迹及重大工程设施等均距离较远或予以绕避,两方案相当。紫云低站位方案线路短 5.935 km,工程投资略省 8.85 亿元,重难点工程较少,但贵兴铁路引入段投资较紫云高站位方案增加 19.8 亿元,且站位距离县城较远,对地方经济发展推动作用较小,社会经济效益较差,新设通站道路需增加 7.3 亿元投资。紫云高站位方案线路略长,投资略高,重难点工程稍多,但贵兴铁路引入投资省,车站距离县城较近,与县城规划发展方向相吻合,有利于城市综合开发和产业布局,社会经济效益较好。综上所述,推荐采用紫云高站位方案。

3 基于 ArcGIS 软件的地质专项比选

在复杂的地质情况下铁路线路应尽量选择在线工程地质条件较好的区域通过,既要保证工程安全可靠、经济合理,又要尽量减少工程对环境的影响。该段线路方案地质条件较为复杂,存在危岩落石、岩堆、岩溶、瓦斯等众多突出工程地质问题,工程地质条件成为方案比选的难点和主控因素,而其余因素如环境敏感点、文物、军事设施、重大工程等均为次要因素,故本节采用 ArcGIS 软件对两方案工程的地质条件进行专项比选。

3.1 方案地质比选模型的建立

铁路工程地质资料具有多源、多类、多量、多维等特点,各种地质数据在精确度、分辨率、数量、质量等方面也存在很大的差异。为了保证信息的有效性和准确性,本节借助 ArcGIS 软件的最优路径分析和费用选择技术,建立方案地质比选模型对紫云高、低站位两方案进行综合地质评价。基于 ArcGIS 最优路径分析技术的选线方法流程如图 3 所示。

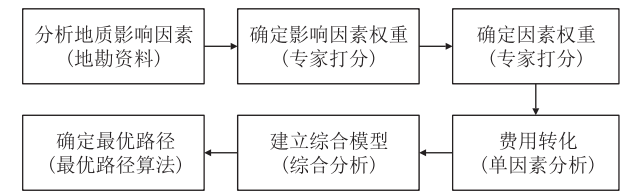


图 3 ArcGIS 最优路径分析流程图

通过调查、勘探、物探及钻探等手段,对区域内影响线路方案的工程地质因素进行分析,确定主要影响因素,各影响因素的权重通过专家打分的形式确定,过程中需保证专家群体思维收敛,专家意见不一致时,进一步分析确定,如表 4 所示。

表 4 影响因素及权重表

主要影响因素	紫云高站位方案	紫云低站位方案	权重/%
危岩落石/处	15	8	14
岩堆/处	5	6	10
滑坡/处	1	3	12
顺层/处	3	4	8
岩溶强烈发育/段	3	2	15
岩溶水隧道/km	6.8	10.0	21
低瓦斯隧道/km	8.4	9.73	18

基于铁路选线费用分析模型,利用 ArcGIS 软件的最优路径算法和费用选择技术,计算紫云高低站位两个方案行经不同地区的累计费用成本,筛选出费用成本最小方案,即是单因素影响下的最优线路方案,将各个因素按照一定的权重值叠加,生成综合因素成本图层,建立地质比选模型,如图 4 所示。

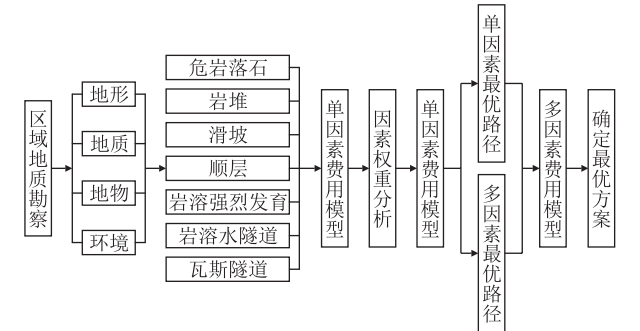


图 4 方案地质比选模型图

3.2 高低站位地质专项比选及结论

通过以上基于 ArcGIS 软件建立的方案地质比选模型,输入影响因素及权重,模型比选紫云高低站位两个方案的最优费用。计算可得,紫云高站位方案费用较紫云低站位方案低,单从地质条件分析,紫云高站位方案为较优方案。

4 基于 AHPF 法的方案比选

4.1 层次分析法(AHP)简介

层次分析法是指将与决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础之上进行定性和定量分析的决策方法。层次分析法是将决策问题按总目标、各层子目标、评价准则直至具体方案的顺序分解为不同的层次结构,然后用求解判断矩阵特征向量的办法,求得每一层次的各元素对上一层次某元素的优先权重,最后再用加权和方法归并各方案对总目标的综合评判值,评判值最大者即为最优方案,本节利用层次分析法对紫云高低站位方案进一步分析比选^[6]。

4.2 构建层析结构模型

(1) 构建指标体系

线路方案进行多目标指标比选时,首先需要构建评价指标体系,指标体系的结构分为目标层、准则层和子准则层。本段线路方案以技术条件和经济条件为准则层,以技术条件和经济条件的子准则层构建模型,如表 5 所示。

表 5 分析指标体系表

准则层	子准则层	目标层
技术条件(X1)	线路长度(X11)	本段最优方案 (X)
	主要工程地质问题(X12)	
	特殊桥梁(X13)	
	重点隧道(X14)	
	距离县城的距离(X15)	
	带动地方经济(X16)	
经济条件(X2)	建安工程费用(X21)	
	通所道路费用(X22)	
	贵兴铁路引入费用(X23)	

(2) 构造判断矩阵

首先对同一层次的指标两两比较其相对重要性,得出相对权值的比值 $\frac{t_i}{t_j}$,以此构造判断矩阵为 $n \times n$ 的方阵,其中主对角线均为 1,判断矩阵如式(1)所示。

$$X = \begin{bmatrix} 1 & \frac{t_1}{t_2} & \dots & \frac{t_1}{t_n} \\ \frac{t_2}{t_1} & 1 & \dots & \frac{t_2}{t_n} \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ \frac{t_n}{t_1} & \frac{t_n}{t_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{n1} & t_{n2} & \dots & t_{nn} \end{bmatrix}$$

(1)

上式满足 $i, j = 1, 2, 3, \dots, i$ 和 j 两因素相对权值的比值,可按照相关要求,采用 1~9 比例标度法对其重要性赋值。

(3) 权值计算及一致性检验

各影响因素的权重需要以专家打分的形式确定,利用确定的权重构建特征向量。当用分散化思维处理这类问题时,会导致问题求解的失败。因此完成权重计算后,需要对一致性进行检验,一致性检验可通过式(2)确定。当 $CI < 0.1$ 时,认为判断矩阵的一致性可以接受。

$$CI = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\{AY\}_i}{Y_i} - n}{n - 1}$$

(2)

式中:CI——一致性指标;

A——比较矩阵;

Y——特征向量;

n——因素个数。

4.3 方案比选及结论

通过建立的多目标比选模型及理论,利用 Matlab 软件编制程序进行层次分析计算,降低手动计算误差,提高比选准确度。根据以上分析指标体系构建判断矩阵,经过多次循环求解,并经一致性检验,得紫云高低站位方案综合评价价值如表 6 所示。

表 6 综合评价值表

项目	紫云高站位方案	紫云低站位方案
一致性检验CI	0.086 7	0.073 6
综合评价值ZP	6.534	5.622
可行性分析	可行	可行
综合评价	较好	好

由表 6 可知,黄百铁路镇宁至石屯段紫云高、低站位方案均有一定的可行性,但紫云高站位方案综合评价值 ZP 大于紫云低站位方案,综合评价较优,可作为推荐方案,这与前述两种方法分析结论一致。

5 结束语

本文采用传统设计比选、基于 ArcGIS 软件建立模型地质专项比选和层次分析法综合评价 3 种方法,对黄百铁路镇宁至石屯段紫云高低站位方案进行了综合比选,结果表明:3 种方法确定的最优方案均为紫云高站位方案,论证了传统方法的准确性;基于 ArcGIS 软件和层次分析法的选线方法能够客观、全面地综合考虑多因素对铁路走向的影响,对线路方案设计有一定的参考价值,提高选线效率。

参考文献:

[1] 朱颖,罗圆. 基于知识工程的铁路智能选线设计理论、方法及应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(7): 1671-1678.
ZHU Ying, LUO Yuan. Theory, Method and Application of Intelligent Railway Alignment Design Based on Knowledge Engineering [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(7): 1671-1678.

[2] 杨立国,吴小萍,刘铮,等. 基于层次分析法及模糊综合评价法的铁路“绿色”选线方案比选[J]. 铁道标准设计, 2007, 51(12): 20-22.
YANG Ligu, WU Xiaoping, LIU Zheng, et al. Comparison and Selection of Railway “Green” Route Selection Schemes Based on Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method [J]. Railway Standard Design, 2007, 51(12): 20-22.

[3] 郭海东,韩峰. 基于 GIS 的不良地质区域线路方案优选方法研究[J]. 铁路计算机应用, 2017, 26(11): 1-4.
GUO Haidong, HAN Feng. Bad Geological Area Railway Line

Scheme Optimization Method Based on GIS [J]. Railway Computer Application, 2017, 26(11): 1-4.

[4] 易思蓉, 聂良涛. 基于虚拟地理环境的铁路数字化选线设计系统 [J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 373-380.

YI Sirong, NIE Liangtao. Digital Railway Location System Based on Virtual Geographic Environment [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 373-380.

[5] 刘威, 胡光常, 唐文建, 等. 铁路智能选线系统开发与应用 [J]. 高速铁路技术, 2016, 7(2): 54-57.

LIU Wei, HU Guangchang, TANG Wenjian, et al. Development and Application of Intelligent Railway Route Selection System [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(2): 54-57.

[6] 郭强. 重庆至贵阳铁路选线中主要控制因素的应用 [J]. 高速铁路技术, 2022, 13(2): 71-75.

GUO Qiang. Application of Major Control Factors of the Route Selection for Chongqing-Guiyang Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2): 71-75.

(上接第 86 页)

综上所述,两方案对沿线采油井均无影响,经华庄村方案虽然线路长度略长,但其桥梁工程简单、工程投资较省、施工工期较短,故本次研究兴化至泰州段推荐采用经华庄村方案。

5 结论

为分析油田对铁路线路施工及运维的影响,本文通过数值仿真方法建立了油气开采沉降模型、爆炸波伤害效应模型和爆炸火球伤害效应模型,得到主要结论如下:

- (1)研究区最大沉降量为 2.9 mm,油气开采所引发的地面沉降危害程度较小;盐城 1 号井井喷时发生爆炸时的安全距离为 119 m;发生火灾时安全距离为 141 m。
- (2)结合相关规范,综合提出拟建高速铁路与油气井间的最小距离应不小于 150 m。
- (3)对盐城至泰州段内线路走向进行了方案优化,并结合投资规模、桥梁方案等分析了线路的优缺点,最终确定了兴化至泰州段采用经华庄村方案。

参考文献:

[1] 郑毛祥,李鹏. 江苏省中长期铁路网规划研究 [J]. 铁道标准设计, 2017, 61(6): 68-72.

ZHENG Maoxiang, LI Peng. Research on Medium and Long Term Railway Network Planning of Jiangsu Province [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(6): 68-72.

[2] 胥晓璠. 盐泰锡常宜铁路引入盐城地区方案研究 [J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6): 90-94.

XU Xiaofan. Research on the Scheme of Introducing the Yancheng-Taizhou-Wuxi-Changzhou-Yixing Railway into Yancheng [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 90-94.

[3] 姚海波,高峰,张文选,等. 特长油气田区高瓦斯隧道地质构造与瓦斯精准探测方法研究 [J]. 高速铁路技术, 2020, 11(3): 1-6.

YAO Haibo, GAO Feng, ZHANG Wenxuan, et al. Research on Geological Structure and Exact Gas Exploring Method of High Gas Tunnel in Extra-long Oil and Gas Field [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 1-6.

[4] 陈明浩,李东,张广泽,等. 西南山区高速铁路主要工程地质问题研究 [J]. 高速铁路技术, 2023, 14(2): 1-5, 12.

CHEN Minghao, LI Dong, ZHANG Guangze, et al. A Study on Main Geological Problems of High-speed Railway in the Mountainous Area in Southwest China [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 1-5, 12.

[5] 彭金华,汤明钧. TVD 格式在燃料蒸气云爆炸场数值模拟中的应用 [J]. 计算物理, 1991, 8(4): 407-412.

PENG Jinhua, TANG Mingjun. Numerical Simulation of Explosions of Fuel Vapour Cloud Using TVD Scheme [J]. Chinese Journal of Computation Physics, 1991, 8(4): 407-412.

[6] 王艳平,曾丹,张同来,等. 发射药燃烧热辐射传播规律 [J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(1): 212-216.

WANG Yanping, ZENG Dan, ZHANG Tonglai, et al. Heat Radiation Propagation Law of Propellant Combustion [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(1): 212-216.

[7] 安文书,卢薇,李红欣,等. 基于 Q 准则的燃烧弹热辐射效果评估研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(4): 95-97, 136.

AN Wenshu, LU Wei, LI Hongxin, et al. Assessment of Damage in Heat Radiation of Incendiary Bomb on Q Criterion [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(4): 95-97, 136.