

文章编号: 1674—8247(2024)01—0083—04

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.01.016

# 盐宜铁路油气田区域选线方法研究

许朝帅 陈丽 袁宏亮

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:** 盐泰锡常宜铁路北起盐城, 经泰州、无锡、常州, 南止于宜兴。该线路是策应“交通强国”国家战略, 推进长三角城市群区域一体化发展的需要。本文以线路走向中油田为切入点, 利用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, 结果表明: (1) 研究区最大沉降量为 2.9 mm; 盐城 1 号井喷时发生爆炸的安全距离为 119 m; 发生火灾时安全距离为 141 m; (2) 结合相关规范, 综合得出拟建高速铁路与油气井最小安全距离不小于 150 m; (3) 对盐城至泰州段线路走向方案进行选线研究, 将整体线路走向及卤汀河局部方案进行比选, 综合确定了科学、经济、合理的线路方案, 满足了铁路设计的总体目标。

**关键词:** 盐泰锡常宜铁路; 油气井; 数值仿真; 方案比选

中图分类号: U212.3 文献标志码: A

## Research on Line Selection Methods for Oil and Gas Well Regions on Yancheng-Yixing High-speed Railway

XU Chaoshuai CHEN Li YUAN Hongliang

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Yancheng-Yixing High-speed Railway starts from Yancheng, passing through Taizhou, Wuxi and Changzhou, and ends at Yixing. This line is designed to meet the national strategy of a powerful transportation country to promote the regional integrated development of the Yangtze River Delta urban agglomeration. This paper focuses on oil field where the route passing through and uses numerical simulation methods to establish models for oil and gas extraction induced subsidence, explosion wave damage effect model, and explosion fireball damage effect model. The results show that: (1) The maximum subsidence in the study area is 2.9 mm. The safe distance for an explosion during the Yancheng No. 1 blowout is 119 m. The safe distance in case of fire is 141 m. (2) Combined with relevant regulations, it is concluded that the minimum safe distance between the proposed high-speed railway and oil and gas Wells is no less than 150 m. (3) Through studying route selection for the Yancheng-Taizhou section, comparing the overall route direction with the partial plan of Luting River, a scientific, economic, and reasonable route plan is finalized, which meets the overall goal of railway design.

**Key words:** Yancheng-Yixing High-speed Railway; oil and gas wells; numerical simulation; scheme comparison and selection

### 1 项目概况

盐泰锡常宜铁路(以下简称“盐宜铁路”)是江苏

省铁路网中南北向干线铁路,北起苏北盐城,经苏中泰州,过苏南无锡、常州,南止于无锡辖下的宜兴,是长三角地区北翼的纵向骨架之一,向北可沟通沿海通

收稿日期:2024-01-24

作者简介:许朝帅(1982-),男,高级工程师。

引文格式:许朝帅,陈丽,袁宏亮. 盐宜铁路油气田区域选线方法研究[J]. 高速铁路技术,2024,15(1):83-86.

XU Chaoshuai, CHEN Li, YUAN Hongliang. Research on Line Selection Methods for Oil and Gas Well Regions on Yancheng-Yixing High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(1):83-86.

道间接辐射苏北连云港及山东等北部沿海地区,向南可沟通杭州枢纽间接辐射东部沿海地区<sup>[1-2]</sup>。盐宜铁路是国家高速铁路网的重要组成部分,同时也是策应“交通强国”国家战略,推进长三角城市群区域一体化发展,提高经济聚集度、区域连接性的需要。

盐城至泰州段是盐宜铁路的重要组成部分,线路北承连盐铁路、徐宿淮盐铁路,中联北沿江高速铁路、苏南沿江城际铁路、沪宁城际铁路<sup>[3]</sup>。

铁路沿线油气资源丰富,盐城—泰州段沿线主要分布苏北盆地高邮凹陷瓦庄油田、周庄油田以及溱潼凹陷茅山、边城、北汉庄油田等。截至 2021 年,勘探开发 46 年的江苏油田累计生产油气当量已超过 5 000 万 t,其中原油 4 908 万 t、天然气 16.5 亿 m<sup>3</sup>。

根据现场调查,铁路沿线油气井众多。油气井可能通过井喷爆炸产生的爆炸波、爆炸火球以及油气开采引起的地面沉降,对铁路施工及运营安全造成影响<sup>[4-5]</sup>,因此本文主要从油气井角度综合研究选线设计。

## 2 线路与石油设施间安全距离分析

为分析总结铁路线路与石油设施间的安全距离,利用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,为后续线路走向提供数据样本参考。

### 2.1 油气开采沉降模型

#### 2.1.1 数值建模

采用 Plaxis 对石油开采引起的地面沉降进行数值分析。开采井穿越覆盖层以及储层上覆岩层进入到储层中,由于模型具有对称性,以开采井为对称轴进行数值模型的建立。数值模拟共分为 4 种工况,分别对应不同的抽采深度,根据现场调查及资料收集,研究区内最浅的开采井深约 800 m,区内储层深度普遍在 1 000~2 000 m 范围内,故建立 4 种模型分别对应开采深度 800 m、1 200 m、1 500 m 以及 2 000 m。对应的模型尺寸如表 1 所示,计算参数如表 2 所示。模型地层设置从上至下分别为覆盖层、储层上覆岩层、储层、储层下伏岩层发,其中覆盖层厚度为 150 m、储层厚度为 25 m。

表 1 模型尺寸表(m)

抽采深度	模型宽度	模型高度
800	2 000	1 500
1 200	2 000	1 900
1 500	2 000	2 000
2 000	2 000	2 500

表 2 计算参数表

类组	覆盖层	非储层岩体	储层岩体
本构模型	摩尔-库伦	摩尔-库伦	摩尔-库伦
排水类型	不排水	不排水	排水
干重度/(kN/m <sup>3</sup> )	19.7	25	25
饱和重度/(kN/m <sup>3</sup> )	20.2	25.8	25.8
孔隙比	0.5	0.17	0.37
弹性模量/MPa	10	5 000	5 000
泊松比	0.33	0.22	0.22
粘聚力/kPa	15	100	100
内摩擦角/(°)	16	37	37
渗透系数/(m/d)	0.047 52	0.165 3 × 10 <sup>-3</sup>	7.587 × 10 <sup>-3</sup>

#### 2.1.2 模拟结果及分析

本文主要研究油气开采对土地沉降的影响,因此,仅分析开采过程中土体竖向位移的变化。通过 4 种工况下土体的竖向位移云图分析可知,采井底部沉降量较大,开采井井口地表沉降量较小,距离开采井最远的模型右边界处地表几乎无沉降。井口地表和远离井口地表的沉降量如表 3 所示。由表 3 可知,沉降量均为毫米级沉降;随着开采深度的增加,井口沉降量几乎无变化;距离井口越远,地表沉降量越小;研究区由油气开采所引发的地面累计沉降量最大值为 2.9 mm。

表 3 沉降量表

开采深度/m	井口地表沉降量/mm	远离井口的地表沉降量/mm
800	2.6	0.6
1 200	2.8	1.2
1 500	2.9	1.6
2 000	2.6	2.0

#### 2.2 爆炸波伤害效应模型

盐城 1 号井位于研究线路起点盐城市北东向约 21 km,属盐城凹陷朱家墩背斜,线路所涉及的盐城凹陷、高邮凹陷与溱潼凹陷同属苏北盆地,油气地质条件基本相同。因此采用盐城 1 号井进行井喷事故影响范围计算,其结果具有代表性,可说明研究区内油气井井喷事故最不利的影响范围。

为了得到井喷时发生爆炸的安全距离,采用蒸汽云爆炸波伤害效应模型模拟爆炸波伤害效应。对于多数烃-空气混合物,蒸气云的初始半径与爆炸长度之比近似为 0.18。采用最小二乘法对蒸气云爆轰特性曲线进行拟合<sup>[5-6]</sup>,可得到爆炸波正相参数的如式 1 所示。

$$\ln(P_s/P_a) = -0.9126 - 1.5058 \ln \frac{R}{L_0} + 0.16751n^2 \frac{R}{L_0} - 0.0321n^3 \frac{R}{L_0} \quad (1)$$

$$0.3 \leq R/L_0 \leq 12$$

式中:  $P_s$ ——冲击波正相最大超压(Pa);  
 $P_a$ ——大气压力,  $1.013\ 25 \times 10^5$  Pa;  
 $R$ ——目标到蒸气云中心的距离(m);  
 $L_0$ ——爆炸长度,  $L_0 = (E_0/P_a)^{1/3}$  (m);  
 $E_0$ ——爆源总能量,  $E_0 = \alpha W_c Q_c$  (J);  
 $\alpha$ ——参与蒸气云爆炸的有实际贡献的燃料占  
 泄漏燃料的百分比,平均值为 4%;  
 $W_c$ ——蒸气云对爆炸冲击波有实际贡献的燃料  
 质量(kg);  
 $Q_c$ ——燃料的燃烧热(J/kg)。

根据人员因爆炸而死亡概率的不同,将爆炸危险源周围由里向外依次划分为以下 4 个区域:死亡区、重伤区、轻伤区和安全区。安全区表示该区内的人员即使无防护,绝大多数人也不会受伤,死亡的概率则几乎为零。该区内径为  $R_{e0.01}$ ,外径为无穷大。内径  $R_{e0.01}$  表示外边界处耳膜因冲击波作用而破裂的概率为 1%,要求的冲击波峰值超压为 17 000 Pa。根据现场调查,安全距离计算参数如表 4 所示。由蒸气云爆炸波伤害效应模型计算可以得出盐城 1 号井喷时发生爆炸的安全距离为 119 m。

表 4 盐城 1 号井爆炸波模型安全距离表

井号	无阻流量/( $10^4$ m <sup>3</sup> /d)	$W_c$ /kg	$E_0$ /J	$R_{e0.01}$ /m
盐城 1 号井	132.5	11 869.79	$2.619\ 1 \times 10^{10}$	119

### 2.3 爆炸火球伤害效应模型

根据安文书<sup>[7]</sup>等推导的热辐射传播公式,如式(2)所示,进行安全距离的求解。通过 High 推出的火球模型,推导出普适火球模型,如式(3)、式(4)所示,并将式(3)带入式(2)中,得到式(5)。

$$Q/(BW^{1/3}\theta^{2/3}) = 1/(1 + FR^2/D^2) \quad (2)$$

$$D = 59.0W^{0.32}/\theta^{1/3} \quad (3)$$

$$t = 2.13 \times 10^{11}W^{0.32}/\theta^{10/3} \quad (4)$$

$$Q/(BW^{1/3}\theta^{2/3}) = 1/[1 + FR^2/(59^2W^{0.64})] \quad (5)$$

$$R = 4.64W^{0.32}(BW^{1/3}\theta^{2/3}/Q - 1)^{1/2}/\theta^{1/3} \quad (6)$$

式中:  $Q$ ——热剂量(J/m<sup>2</sup>);  
 $R$ ——到火球中心的距离(m);  
 $B$ ——常量( $2.04 \times 10^4$ );  
 $F$ ——常量(161.7);  
 $D$ ——火球直径(m);  
 $t$ ——火球持续时间(s);  
 $W$ ——火球中消耗的燃料质量(kg);  
 $\theta$ ——火球温度(K)。

根据热剂量伤害准则,在瞬间火灾条件下,伤害程度只取决于接受到的热剂量,各伤害效应的热剂量临界值如表 5 所示。

表 5 瞬间火灾作用下热剂量伤害准则表

伤害效应	死亡	重伤	轻伤
热剂量临界值/(kJ/m <sup>2</sup> )	592	392	172

蒸气云爆炸的火球温度在 2 200 K 左右,因此取  $\theta = 2\ 200$  K,将热剂量  $Q = 172$  kJ/m<sup>2</sup> 代入式(5)中得出爆炸火球的轻伤距离公式,如式(7)所示。通过式(7)可计算出安全距离,根据现场资料计算得出的  $W = 9\ 896.094$  kg 带入式(7),最后得出安全距离  $R = 141$  m。

$$R = 0.357W^{0.32}(20.1W^{1/3} - 1)^{1/2} \quad (7)$$

式中:  $W$ ——蒸气云爆炸火球中消耗的燃料质量(kg)。

### 2.4 安全距离综合分析

开采深度从 800 m 到 2 000 m 时,均为毫米级沉降,且随着开采深度的增加,井口沉降量几乎无变化;距离井口越远,地表沉降量越小;随着开采深度的增加,沉降漏斗直径有增加的趋势。根据相关规定,研究区由油气开采所引发的地面沉降发育程度为弱,地质灾害危害程度小,综合评价地面沉降的地质灾害危险性等级为危险性小。基于研究区内盐城凹陷朱家墩背斜盐城 1 号井,利用蒸气云爆炸波伤害效应模型和爆炸火球伤害效应模型分别计算钻井发生爆炸和火灾的安全距离,结果显示盐城 1 号井发生爆炸时安全距离为 119 m,发生火灾时安全距离为 141 m。结合仿真计算结果及相关规范,综合推荐拟建高速铁路与油气井最小安全距离不小于 150 m。

## 3 兴化至泰州段线路走向介绍

工程选线主要受沿线地形地貌、不良地质条件、经济据点和环境敏感点分布的影响。在兴化至泰州段,沿线分布众多采油井和油气管线,以采油井为线路走向的主要控制物,根据上文结论对线路走向进行科学比选。

### 3.1 沿线油田现场调研

在收集拟建铁路沿线油田的基础上,对拟建高速铁路沿线的地质情况,油气田生成情况进行了现场调查,得出主要结论如下:

(1) 线路位于苏北盆地内,盆地内有多个石油矿区。线路穿越的高邮凹陷主要目标储层为古近系三垛组至阜宁组地层,埋深普遍大于 800 m,含硫量低。

(2) 由于地表土层厚度大,区内的断层未连通地

表,储层内的天然气没有良好的向上部地层运移的通道。

(3)线路穿越的油气田气体主要成分为甲烷( $\text{CH}_4$ ),硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ )含量低。

### 3.2 线路方案说明

充分考虑区域内油气井分布情况,利用上述研究结论,结合工程设置条件,在尽可能绕避油气井并保证线路顺直的基础上详细比选了经华庄村方案和经刘庄村方案。

#### (1)经华庄村方案

线路自兴化车站出站后取直朝陈堡镇前行,上跨规划宁盐高速公路后走行于蚌蜒河东侧、绕避采油井,继续向南经陈堡镇东侧后先后上跨省道S352、阜溧高速公路,之后走行于高速公路与省道S231之间,于姜堰区淤溪镇新桥村上跨省道S231,之后折向西南于港口村上跨卤汀河,继续前行上跨启扬高速公路后至宁启铁路前方案比选终点。比选范围内线路长度41.771 km,全部为桥梁工程。

#### (2)经刘庄村方案

该方案兴化至陈堡镇段线路走向与上述方案相同,经陈堡镇东侧后取直向南,先后上跨省道S352、阜溧高速公路,之后走行于高速公路与省道S231之间,于姜堰区淤溪镇西薛村上跨省道S231,继续朝西南前行,于北桥村上跨卤汀河,继续前行上跨启扬高速公路后至方案比选终点。比选范围内线路长度41.055 km,全部为桥梁工程。

## 4 兴化至泰州段线路方案比选

### 4.1 从采油井影响方面分析

从采油井影响方面分析,两种方案情况如表6、表7所示。

表6 华庄村方案沿线采油井情况表

采油井	与铁路距离/m
北陈村附近采油井	460
仓场村十组附近采油井	395
仓场村十六组附近采油井	238
华2采油井	183.45
华庄村附近采油井群	360、404、210

表7 刘庄村方案沿线采油井情况表

采油井	与铁路距离/m
三里港附近抽采油井群	660、430
公家沟附近采油井	410
张林村附近采油井	560
桥西村附近采油井	297
刘庄村附近采油井群	833、321

由表6、表7可知,华庄村方案与华2采油井距离183.45 m,其余均大于200 m;刘庄村方案与沿线采油井距离均大于200 m。

从采油井影响方面分析,铁路沿线油田油压极低,不会产生井喷,目前该区域尚未发生由于石油开采引起的沉降。华2采油井位于华庄村方案线路左183.45 m,与线路之间的距离大于150 m。另外,两方案与陈3-34注水井距离110 m,注水井不会发生井喷爆炸和燃烧,该注水井无需迁改。

### 4.2 主要工程数量及投资比较

两方案主要工程数量及投资比较如表8所示。从线路长度及工程投资角度分析,经华庄村方案线路长度增加716 m,投资节约2.79亿元。

表8 主要工程数量及投资比较表

项目	经华庄村方案	经刘庄村方案
线路长度/km	41.771	41.055
征地	新增/亩	1 524.64
	临时/亩	227.65
拆迁/( $10^4 \text{ m}^2$ )	7.34	7.20
双线桥梁(座/m)	1/41 771	1/41 055
正线铺轨/km	83.542	82.11
站后及其他/km	41.771	41.055
概算总额/万元	802 165.13	830 051.61
差额/万元	0	+27 886.48

### 4.3 从卤汀河桥跨局部线路方案分析

经华庄村方案选择卤汀河最窄处,在港口村以大角度上跨,采用128 m连续梁一跨通过;经刘庄村方案与卤汀河交叉角度较小,为避免设置水中墩,需采用主跨320 m斜拉桥,约需4.5亿元,投资增加较多,工期较长。

从上跨高等级道路桥梁工程方面分析,两方案与沿线高等级道路交叉处桥梁设置情况如表9所示。

表9 桥梁设置情况表

序号	交叉道路/河流	经华庄村方案	经刘庄村方案
1	阜溧高速公路	220 m斜拉桥	168 m连续梁
2	省道S231	112 m连续梁	112 m连续梁
3	启扬高速公路	112 m连续梁	112 m连续梁

由表9可知,与沿线高等级道路交叉,经华庄村方案最大跨度为上跨阜溧高速公路处,为了预留高速公路扩建条件,采用220 m斜拉桥。故从桥梁工程方面分析,跨越卤汀河采用投资、工期及技术难度均较小的128 m连续梁方案,其余跨越重要节点差异不大,故推荐采用经华庄村方案。

(下转第92页)

- 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.