

文章编号: 0253-2697(2014)03-570-07 DOI:10. 7623/syxb201403021

基于风险的长输油气管道选线优化方法

张圣柱 吴宗之

(中国安全生产科学研究院 北京 100012)

摘要:长输油气管道选线是复杂的多目标决策问题,控制事故风险、降低建设成本是选线的两个主要目标。应用多目标决策理论,以选择风险可接受且建设成本较低的路线为优化目标,提出了长输油气管道选线优化方法。通过研究优化目标的计算方法,分析选线的约束条件,确定网格划分的精度及范围,建立了选线优化模型,运用动态规划算法求解该模型并进行了实例应用。结果表明,基于风险的选线优化方法是可行的,长输油气管道个人风险标准和村庄或建(构)筑物的搬迁情况可作为选线的约束条件,定义特殊区域周边局部范围的地形地貌类型有助于控制个人风险,两个优化目标的权重分配需要根据实际情况进行调整。

关键词:长输油气管道;风险分析;安全规划;多目标优化;选线方法

中图分类号:TE88

文献标识码:A

Risk-based optimization method for long-distance oil and gas transmission pipeline route

Zhang Shengzhu Wu Zongzhi

(China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China)

Abstract: Selection of the route of long-distance oil and gas transmission pipeline is a complicated multi-target problem. Accident risk control and construction cost reduction are two major targets for such selection. By applying multi-target decision theoretical approach and with the route of acceptable risk and lower construction cost as optimization target, this paper puts forward an optimization method for selection of the route of long-distance oil and gas pipeline. By investigating the computation method for the optimized target, the paper analyzes the constraint conditions of such selection, determines the precision and range of grid division, and establishes the route selection optimization model. Subsequently, the model is solved by dynamic programming algorithm and a case study is demonstrated. The results show that, the risk-based route selection optimization method is feasible, individual risk criteria of long-distance oil and gas transmission pipeline and relocation of villages or buildings (structures) can serve as the constraint conditions for the selection. Defining the local topography and landform around special region helps to control individual risk. The weighting distribution of the two optimized targets needs adjustment according to actual conditions.

Key words: long-distance oil and gas transmission pipeline; risk analysis; safety planning; multi-objective optimization; route selection method

管道运输已成为油气运输的首选工具,近年来国内长输油气管道建设速度明显加快,预计到“十二五”(2011—2015年)规划末期全国长输油气管道总里程将超过 $10 \times 10^4 \text{ km}^{[1,2]}$ 。在长输油气管道高速建设、助力经济迅猛发展的背后,管道事故却层出不穷。这些管道事故也反映出了管道选线缺乏合理规划、风险未经充分评价与控制等共性问题。同时,随着城区的建设和发展,不少区域的管道布置数量和规模在急剧增加,一些原本处于偏僻地段的油气管道现已被大量公共或民用设施所包围,管道被违规占压现象也很普遍,严重威胁着油气管道的安全运行,也极易引发泄漏、火

灾、爆炸等事故。

长输油气管道不可能完全选线于没有人员活动、没有任何建(构)筑物的荒郊野外,管道敷设沿线势必会存在敏感区域、城市建设规划区域或中高密度人员场所,同时长输油气管道属于高危设施,一旦发生事故,容易导致严重后果。为了保证油气管道安全,目前国内普遍采用两种指导思想:①控制管道自身的安全性;②控制安全距离。中国的《输气管道工程设计规范》(GB 50251—2003)与《输油管道工程设计规范》(GB 50253—2003)分别采用上述2种思想^[3,4]。但在实际选线过程中,基本是先进行线路初选,然后分别考

基金项目:国家科技支撑计划项目“油罐区重大燃爆事故防范关键技术”(2012BAK03B03)资助。

第一作者:张圣柱,男,1983年8月生,2006年获山东科技大学学士学位,2012年获中国矿业大学(北京)博士学位,现为中国安全生产科学研究院工程师,主要从事油气管道及危险化学品安全技术研究。Email:zhangsz@chinasafety.ac.cn

通信作者:吴宗之,男,1963年3月生,1983年获华南理工大学学士学位,1989年获中国矿业大学(北京)博士学位,现任中国安全生产科学研究院院长、研究员,主要从事危险化学品安全技术、重大危险源辨识与控制、应急管理等方面的研究。Email:ncs@chinasafety.ac.cn

虑初选线路的事故风险和建设成本,没有将两个目标进行有机统一,导致统筹性差,顾此失彼。

目前,国内外针对长输油气管道选线优化方法的研究并不多见,有限的研究主要集中在风险分析^[5-9]、风险评价^[10-12]、管道完整性^[13]以及可接受风险标准^[14]等方面。笔者以现有风险评价理论为基础,对长输油气管道选线过程进行实际调查,提出了基于风险的管道选线优化方法,以期对管道选线提供技术支持。

1 选线目标

事故风险和建设成本是长输油气管道选线的2个关键因素,将其作为管道选线的2个优化指标,目标是选择风险可接受且建设成本较低的路线。

1.1 事故风险目标

采用区域定量风险计算方法确定长输油气管道路线段的事故风险。个人风险和社会风险是表征区域风险水平的主要指标,通常采用个人风险等值线和社会风险曲线反映风险状况,个人风险和社会风险易于表征选定路线的风险水平,但并不利于选线过程中风险的计算与路线的优化^[15,16]。为了便于进行这两方面目标的优化计算,选择潜在死亡人数 P (Potential Loss of Life)来表示长输油气管道事故风险, P 为单一数值,便于计算过程中的比较。

1.2 建设成本目标

对于管道建设成本 C (Construction Costs),概算不同地形地貌地段中管道的单位造价,包括管材造价、管沟土石方工程、管沟敷设工程等全部费用;对于管道在建设过程中涉及的穿越、跨越工程,其造价也按照单位长度进行估算;同时考虑可能涉及的村庄和建(构)筑物搬迁费用。

2 选线约束条件

管道选线过程中会受到多种条件的限制。这些限制条件包括国家法律、法规及相关标准的规定,拟选管道周围的自然环境状况、社会条件的限制,管道经过地区的城乡规划方案,以及相关安全、职业卫生、环境保护、便于施工等方面的要求等。

根据长输油气管道总体建设目标,结合上述限制条件,可以大致确定管道的走向、不能经过的区域以及关键控制点,在一定程度上控制了风险。社会风险是以曲线的形式进行表示,不能以单一数值反映特定区域的风险水平,因此不宜将其作为约束条件,由个人风险和人员数量计算得到的 P ,将风险水平转变为一个区间,是笔者的2个优化目标之一,也不能作为约束

条件。

结合长输油气管道的特点,在选线过程中,需要实现在保证事故风险可接受情况下,最大限度降低建设成本,因此可将长输油气管道个人风险标准作为约束条件。对于优化方案中可能涉及村庄或建(构)筑物搬迁的情况,如果其所有者不同意进行搬迁,即使此方案最优也必须放弃,因此也将其作为约束条件。

3 优化模型建立

3.1 潜在死亡人数计算

根据风险影响因素尽可能接近这一原则对长输油气管道进行分段后,假设其中一段管道为 l ,其在管道一侧某点 (x, y) 处产生的个人风险为:

$$IR(x, y) = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I F_s \cdot F_E \cdot F_M \cdot V_{s,i}(x, y) \quad (1)$$

式中: $IR(x, y)$ 为长输油气管道在位置 (x, y) 处产生的个人风险; F_s 为管道第 s 个泄漏事件发生的频率; F_E 为设备修正系数; F_M 为安全管理、人员修正系数; $V_{s,i}(x, y)$ 为第 s 个泄漏事件的第 i 种事故情景在位置 (x, y) 处引起的个体死亡概率; S 为管道泄漏事件的个数; I 为事故情景的个数。其中,失效模式和泄漏频率采用DNV等机构给出的建议值^[17]。

在优化过程中,假设某长输油气管道 A 被划分为若干段,每段内又被划分成若干网格(假设有 n 个网格,由于每段管道长度不一,网格数量会存在差异),假设网格内的人员全部位于网格中心处,则每段长输油气管道的潜在死亡人数为:

$$P = \sum_{n=1}^N IR_n \cdot d_n \quad (2)$$

式中: P 为潜在死亡人数; IR_n 为第 n 个网格的个人风险; d_n 为第 n 个网格的人员总数; N 为网格数量。

3.2 建设成本计算

建设成本根据管道所经过不同地形地貌地段的长度进行概算,包括管材造价及相关工程造价,其中各单价可参照长输油气管道工程预算标准,对于管道建设过程中涉及的村庄和建(构)筑物搬迁费用,分别按照区域内的人数和建筑面积进行计算,并作为造价的组成部分。长输管道所经过的地形地貌类型如表1所示。

某一管段 l 的建设成本为:

$$C_l = \sum_{m=1}^M C_m \cdot L_m \quad (3)$$

式中: C_l 为管段 l 的建设成本,10⁴元/m; C_m 为管段 l 中第 m 种地形地貌条件类型的建设成本,10⁴元/m; L_m 为管段 l 中经过第 m 种地形地貌条件类型的管道长度,m; M 为地形地貌条件类型的个数。

表 1 长输油气管道经过的地形地貌类型

Table 1 Types of terrain that long-distance oil and gas transmission pipeline go through

管道类型	地形地貌条件类型
油管道/气管道	平原(谷地)
	丘陵(深、浅丘、低山)
	山区(中高山)
	荒漠(戈壁)
	沙漠
	沼泽 其他

3.3 网格划分

个人风险计算以及潜在死亡人数计算是在对周边区域进行网格划分的基础上进行的。网格的大小决定了计算的精度和所耗费的时间,网格越小计算精度越高,但计算耗时较长。对多次计算结果对比分析后,笔者将网格划分为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 。考虑到油管道和天然气管道可能存在近距离平行敷设的情况,将各种事故情景中最大的死亡半径作为油管道和天然气管道两侧区域的计算范围。

3.4 模型建立

在确定了事故潜在死亡人数和管道建设成本计算方法后,建立长输油气管道选线的双目标优化模型,两个优化目标分别是 P 最小化和 C 最小化。假设管道共被划分成 T 个管段,可建立如下模型:

$$\min P = \sum_{i=1}^T P_i \quad (4)$$

$$\min C = \sum_{i=1}^T C_i \quad (5)$$

$$R \leq R'_s \quad (6)$$

式中: P_i 为一种管道路由的第 t 个管段的潜在死亡人数; C_i 为一种管道路由的第 t 个管段的建设成本, 10^4 元/m; T 为一种管道路由所包含的管段数量; R 为个人风险的计算值; R'_s 为长输油气管道个人风险容许标准。

式(4)表示一种管道路线潜在死亡人数最小化,式(5)表示一种管道路线建设成本最小化,式(6)表示约束条件,要求个人风险必须满足长输油气管道风险容许标准,同时也将优化方案中可能涉及的村庄或建(构)筑物搬迁情况作为约束条件。

4 优化模型求解

4.1 求解算法的选择

选线过程中,有多种可行的路线,即有许多可行解,而优化的目的是找到具有最优值解。动态规划算法适用于求解具有某种最优性质的问题,可运用其进

行长输油气管道选线优化^[18,19]。其将待求解问题分解成若干个子问题,先求解子问题,然后通过这些子问题的解得到原问题的解。由于经分解得到的子问题往往不是相互独立的,为了避免大量的重复计算,动态规划算法用表格记录所有已解的子问题答案,需要时只需找出即可。不论该子问题在以后的计算过程中是否被用到,只要其被计算过,就将其结果填入表中,从而为以后的计算提供基础。优化计算过程中,长输油气管道可能经过的区域被划分成大量网格,可行路线数量巨大,通过动态规划算法进行求解能够提高计算效率并得到最优路线。

4.2 地形地貌矩阵的建立

选定要进行优化的管段,以管道的起点 (i_s, j_s) 和终点 (i_e, j_e) 做矩形,短边的长度应大于管道事故最大死亡半径,长边的长度为管道起点与终点间的距离,并使起点和终点分别位于所做矩形两条较短边的中点,对此矩形进行网格划分,网格大小为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 。

长输管道所经过的不同地形地貌土地类型的代码及建设成本如表 2 所示。

表 2 不同地形地貌类型代码及建设成本

Table 2 Code and construction costs of different terrain types

管道类型	地形地貌	代码	建设成本/ (10^4 元·m ⁻¹)
油管道/气管道	平原(谷地)	1	C_1
	丘陵(深、浅丘、低山)	2	C_2
	山区(中高山)	3	C_3
	荒漠(戈壁)	4	C_4
	沙漠	5	C_5
	沼泽	6	C_6
	不能经过区域	7	∞
	高敏感区域	8	∞
	其他	9	C_9

通过单价向量 V_p 表示管道所经过区域不同地形地貌土地类型的单位建设成本,对于不能经过区域、无法搬迁区域和管道附近高敏感区域采用建设成本无穷大的方式进行约束,在计算过程中将这些区域排除。

$$V_p = \begin{bmatrix} 1 & C_1 \\ 2 & C_2 \\ 3 & C_3 \\ 4 & C_4 \\ 5 & C_5 \\ 6 & C_6 \\ 7 & \infty \\ 8 & \infty \\ 9 & C_9 \end{bmatrix} \quad (7)$$

对单价向量 V_p 进行归一化得到 V'_p 。

$$V'_p = \begin{matrix} 1 & C_1/\max C_i \\ 2 & C_2/\max C_i \\ 3 & C_3/\max C_i \\ 4 & C_4/\max C_i \\ 5 & C_5/\max C_i \\ 6 & C_6/\max C_i \\ 7 & \infty \\ 8 & \infty \\ 9 & C_9/\max C_i \end{matrix} \quad (8)$$

其中, $C_i \neq \infty (i=1,2,3,4,5,6,9)$, 通过 V'_p 向地形地貌矩阵 M_L 进行赋值, 上文所述的矩形内所有土地的地形地貌类型和不能经过的区域便具有了相应属性(图1)。

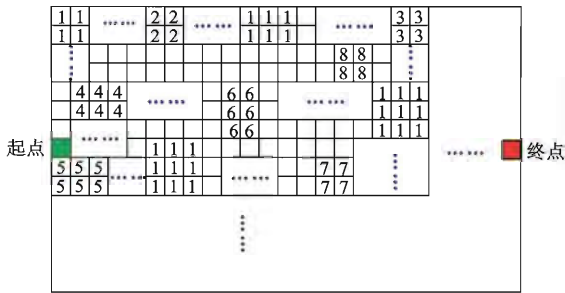


图1 地形地貌矩阵 M_L

Fig. 1 Terrain matrix M_L

计算过程中某一点 (i,j) 与其上一步计算点的空间位置关系如图2所示。

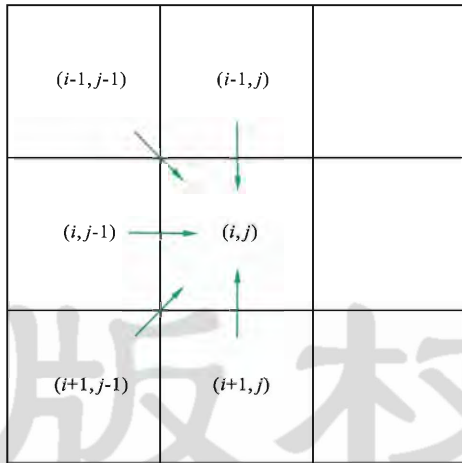


图2 点 (i,j) 的空间位置关系

Fig. 2 Spatial relationships of point (i,j)

定义造价函数并从起点开始计算:

$$Cost(0,j) = \begin{cases} 0 & j = j_s \\ \infty & j \neq j_s \end{cases} \quad (9)$$

定义造价增量函数计算每走一步的造价增量, 并控制最后进行计算的点为管段终点。

$$Price(i,j) = getprice(i,j) \quad (10)$$

$getPrice(i,j)$ 通过从 M_L 中查找点 (i,j) 的地形地貌

情况, 采用 V'_p 查找单价, 计算总价增量。

由此可得到当计算到达点 (i,j) 时建设成本的最小值。

$$Cost(i,j) = Price(i,j) + \min \begin{cases} Cost(i-1,j-1), Cost(i-1,j), Cost(i,j-1), \\ Cost(i+1,j-1), Cost(i+1,j) \end{cases} \quad (11)$$

4.3 潜在死亡人数矩阵的建立

根据矩形区域内的人员分布情况, 按照笔者所述的潜在死亡人数计算方法, 计算每个网格的 P , 并进行归一化, 从而对潜在死亡人数矩阵 M_P 进行赋值。

定义风险函数并从起点开始计算。

$$Risk(0,j) = \begin{cases} 0 & j = j_s \\ \infty & j \neq j_s \end{cases} \quad (12)$$

定义风险增量函数并计算每走一步的风险增量, 控制最后进行计算的点为管段终点。

$$Rv(i,j) = M_P(i,j) \quad (13)$$

由此可得到当计算到达点 (i,j) 时潜在死亡人数的最小值。

$$Risk(i,j) = Rv(i,j) + \min \begin{cases} Risk(i-1,j-1), Risk(i-1,j), Risk(i,j-1), \\ Risk(i+1,j-1), Risk(i+1,j) \end{cases} \quad (14)$$

4.4 和函数矩阵的建立与编程求解

通过对潜在死亡人数和建设成本分配权重, 将2个计算指标统一成1个计算指标, 从而进行计算。设潜在死亡人数的权重为 q_P , 则建设成本的权重 q_C 为 $1 - q_P$, 计算后赋值即可建立和函数 M_S 。

当计算到达点 (i,j) 时, 和函数的最小值为:

$$S(i,j) = q_P \cdot Risk(i,j) + (1 - q_P) \cdot Cost(i,j) = q_P \cdot Rv(i,j) + q_P \cdot \min \begin{cases} Risk(i-1,j-1), Risk(i-1,j), Risk(i,j-1), \\ Risk(i+1,j-1), Risk(i+1,j) \end{cases} + (1 - q_P) \cdot Price(i,j) + (1 - q_P) \cdot \min \begin{cases} Cost(i-1,j-1), Cost(i-1,j), Cost(i,j-1), \\ Cost(i+1,j-1), Cost(i+1,j) \end{cases} \quad (15)$$

在优化模型求解过程中, 基于Java语言开发程序, 使用 commons-math 工具包进行运算, 在 Windows 环境下运行。

5 应用实例

5.1 实例概况

以长输油管道为例, 选择起点与终点间长度为1 km的管段进行优化。根据典型事故后果的计算结果, 管道两侧所考虑的影响范围为250 m, 由此便确定

了大小为 1 000 m×500 m 的矩形区域,网格数量为 200×100 个。设定起点网格的坐标为(0,49),终点网格的坐标为(199,49),网格的横坐标由左向右依次增大,纵坐标由上向下依次增大。将平原、丘陵、山区、荒

漠、沙漠、沼泽、不能经过区域、敏感区域等地形地貌情况标注到图中。在实际环境中,地形地貌情况不会在如此小的区域内出现较大变化,笔者在考察管道可能经过区域的基础上,结合实际情况做了简化(图 3)。

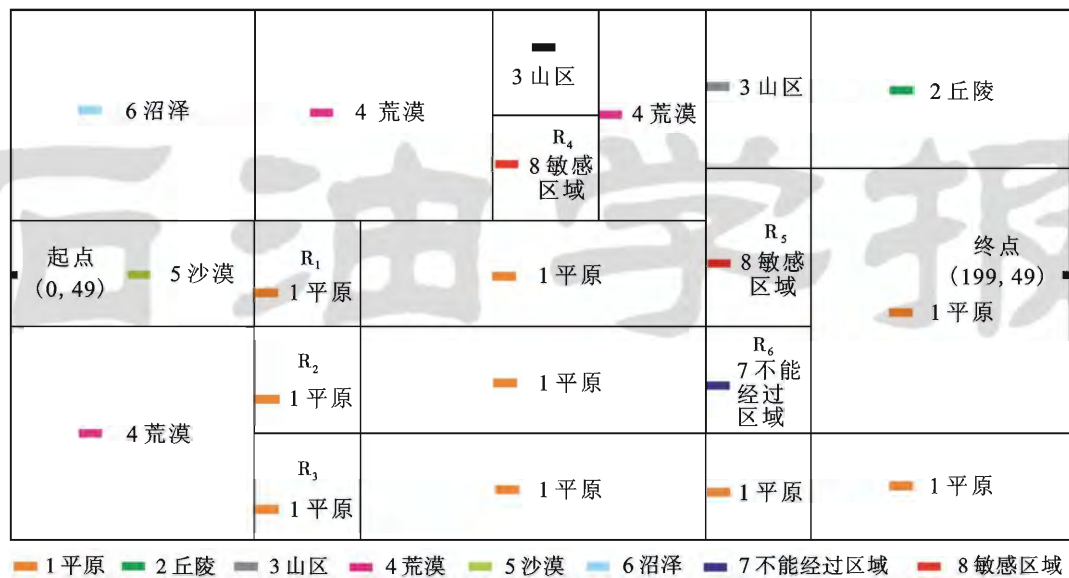


图 3 地形地貌情况示意
Fig.3 Schematic of terrain conditions

图 3 中分布有 6 个特殊区域,包括居住类高密度人员场所、不能经过区域和敏感区域,居住类高密度人员场所的人口分布情况采用平均人口密度进行表示,各区域的具体信息如表 3 所示。

表 3 6 个特殊区域概况				
Table 3 Information of 6 special zones				
区域名称	临界网格(左下)	临界网格(右上)	人口密度/(人·m ⁻²)	区域面积/m ²
R ₁	(46,59)	(65,40)	0.03	10 000
R ₂	(46,79)	(65,60)	0.06	10 000
R ₃	(46,99)	(65,80)	0.1	10 000
R ₄	(91,39)	(110,20)	—	—
R ₅	(131,59)	(150,30)	—	—
R ₆	(131,79)	(150,60)	—	—

根据目前执行的用于预算长输管道建设成本的规定,参照管材及相关工程造价,得到不同地形地貌土地类型情况下管道的单位建设成本,归一化后的单价向量 V'_p 为:

$$V'_p = \begin{bmatrix} 1 & 0.9650 \\ 2 & 0.9755 \\ 3 & 0.9965 \\ 4 & 0.9895 \\ 5 & 1.0000 \\ 6 & 0.9860 \\ 7 & \infty \\ 8 & \infty \end{bmatrix} \quad (16)$$

5.2 权重的分配

通过对 2 个优化目标分别赋予不同的权重将其统一为 1 个优化目标,然后进行计算。权重的分配反映 2 个优化目标的重要度,不同的权重分配会产生不同的选线方案。在考虑侧重潜在死亡人数、平均分配权重、侧重建设成本等多种权重分配,并对所选方案的个人风险和建设成本进行综合分析比较的基础上,确定方案 1 ($q_p=0.6$ 、 $q_c=0.4$)为较优方案。方案 1 所选路线和路线的个人风险计算结果如图 4 所示。

由图 4 可知,R₂ 和 R₃ 两个居住类高密度人员场所的个人风险处于可接受范围,但 1×10^{-6} 的个人风险等值线进入到 R₁ 内, 3×10^{-7} 的个人风险等值线进入到 R₄ 和 R₅ 两个敏感区域内,局部区域内存在不可接受风险。该方案与其他更加侧重潜在死亡人数的方案相比,建设成本较低;与其他更加侧重建设成本的方案相比,存在不可接受风险的区域较小。

5.3 敏感区域周边的限定

对于敏感区域,由于不便于通过人口分布的形式对其进行定义,所以程序求解得到的方案不能满足选线的要求,于是根据中国相关法规标准关于长输管道与周围设施安全距离的规定,将敏感区域周边局部范围定义为“7—不能经过区域”,以限定管线的走向。不改变权重分配并对敏感区域周边进行限定后(方案 2)所选路线和路线的个人风险计算结果如图 5 所示。两

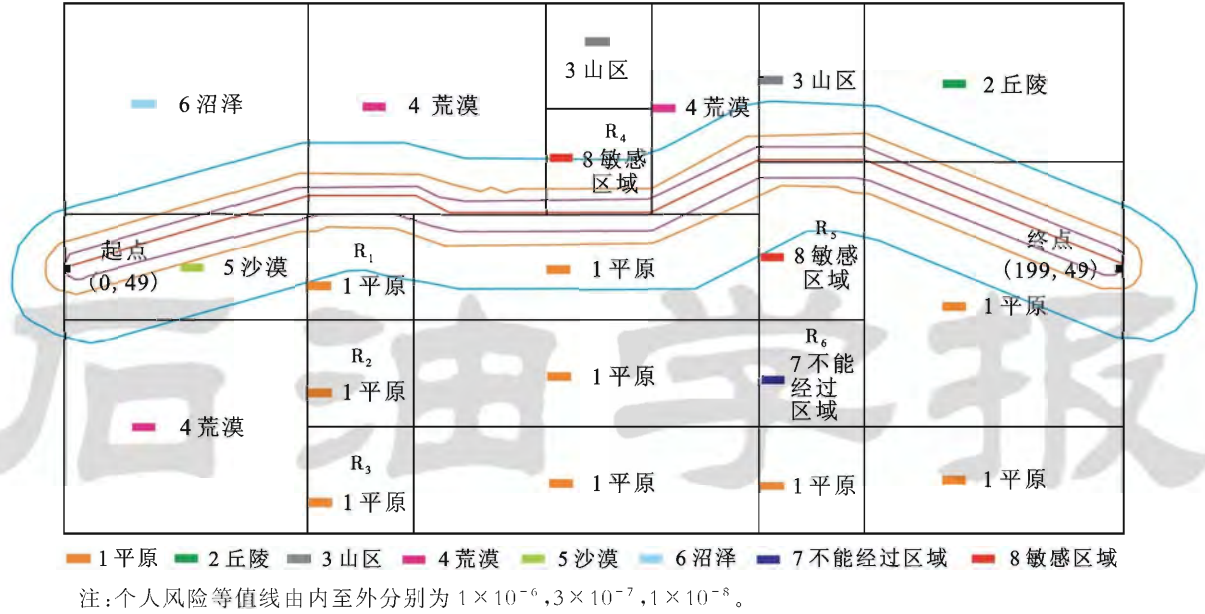


图 4 方案 1 所选路线及风险计算结果
Fig. 4 Selected route of Plan 1 and risk calculations

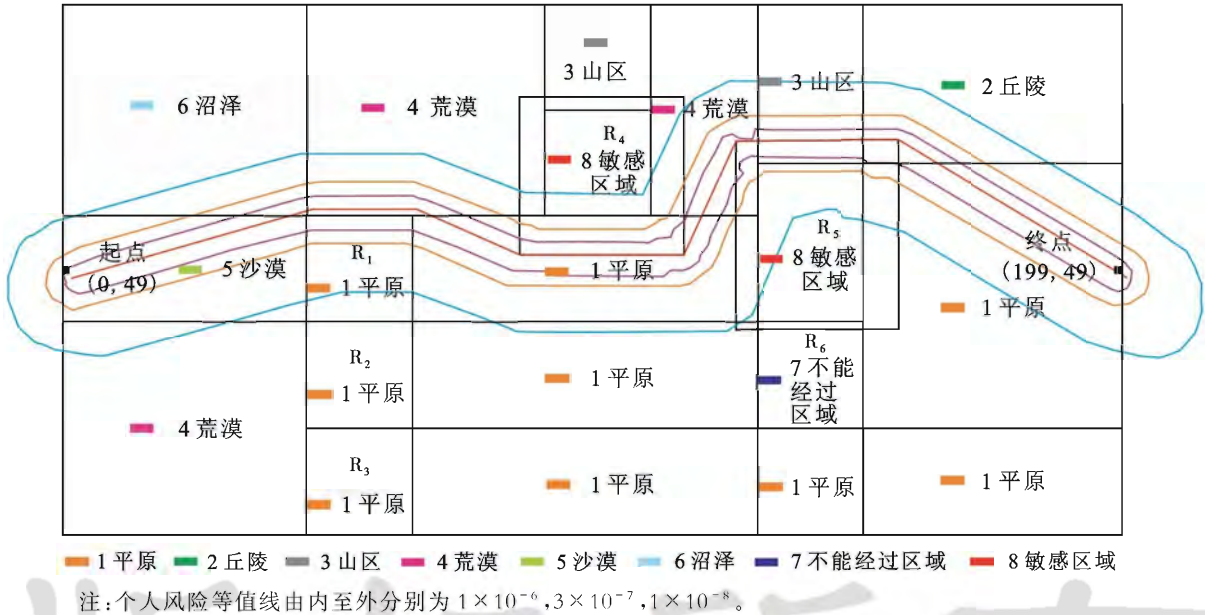


图 5 方案 2 所选路线的风险计算结果
Fig. 5 Selected route of Plan 2 and risk calculations

种方案的 P 和建设成本比较结果如表 4 所示。

由图 5 可知,方案 2 中高密度人员场所和敏感区域的个人风险处于可接受范围内,由表 4 可知,方案 2 的建设成本较方案 1 有所增加,但 P 大幅降低,是本实例的优选方案。

5.4 影响因素分析

长输管道选线涉及距离长,地形地貌在沿线会出现较大差异,人口分布情况和敏感区域的存在位置存在不确定性,优化过程中事故风险目标和建设成本目标对最优路线的影响程度会有所差异,因此两个优化目标的权重分配需要根据实际情况进行调整。在对人口分布区域预留安全距离并对敏感区域周边局部范围进行限定之后,管道的最优路线会因实际情况发生改变;同时不同地区人员的搬迁意愿和搬迁成本会存在较大差异,一旦涉及高密度人员场所,其成本往往较高,会直接影响管道路线方案的选择。对于不同实例求解所得解集的合理性,可通过计算各解集的个人风险水平进行验证。

表 4 方案比较

Table 4 Comparison of the two plans

序号	$P/$ (人·a ⁻¹)	$C/$ 10 ⁴ 元
方案 1	2.72×10^{-6}	571.5
方案 2	3.65×10^{-7}	628.6

6 结 论

(1) 以事故风险和建设成本作为两个优化目标,通过利用潜在死亡人数来表示事故风险,按照单位长度概算建设成本,并合理分配事故风险目标和建设成本目标所占比重,将 2 个优化目标统一为 1 个优化目标,建立了长输油气管道选线优化方法,该方法可以选得风险可接受且建设成本较低的路线。

(2) 长输油气管道个人风险标准和村庄或建(构)筑物的搬迁情况可作为选线的约束条件。根据中国对管道安全距离的规定,通过重新定义居住类高密度人员场所和敏感区域周边局部范围的地形地貌类型,可以限定管线的走向并有效控制选线方案中特殊区域的个人风险。

(3) 路线优化因受到长输油气管道沿线地形地貌、人口分布和敏感区域存在位置等因素的影响,会导致事故风险目标和建设成本目标在最优路线方案中的重要度发生变化,需要根据实际情况对两个优化目标的权重分配进行调整。

参 考 文 献

- [1] 康勇. 油气管道工程[M]. 北京:中国石化出版社,2008.
Kang Yong. Oil and gas pipeline project[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2008.
- [2] 石油商报. 中国石油“十二五”油气管道建设里程将翻番[EB/OL]. [2011-11-25]. <http://www.phnews.com.cn/system/2011/11/25/001357033.shtml>.
Oil Daily. The oil and gas pipeline construction mileage of China National Petroleum Corporation will be doubled by the end of the Twelfth Five-Year[EB/OL]. [2011-11-25]. <http://www.phnews.com.cn/system/2011/11/25/001357033.shtml>.
- [3] 张圣柱. 油气长输管道事故风险分析与选线方法研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2012.
Zhang Shengzhu. Accident risk analysis and route selection method of long-distance oil and gas transportation pipeline[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2012.
- [4] 张圣柱, 吴宗之, 张健, 等. 油气管道选线和风险评价相关法规与方法[J]. 油气储运, 2012, 31(9): 663-669.
Zhang Shengzhu, Wu Zongzhi, Zhang Jian, et al. Relevant regulations and methods for route selection of oil and gas pipeline and risk assessment[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(9): 663-669.
- [5] ASME B31.8 S 2001. Supplement to B31.8 on management system of gas pipeline[S]. ASME B31.8-2001. New York, 2001.
- [6] Muhlbauser W K. Pipeline risk management manual[M]. 3rd ed. New York: Gulf Publishing Company, 2004.
- [7] 杨筱蓓. 油气管道安全工程[M]. 北京:中国石化出版社,2010.
Yang Xiaoheng. Oil and gas pipeline safety engineering[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2010.
- [8] European Gas Pipeline Incident Data Group. 7th EGIG-report 1970-2007; Gas Pipeline Incidents[R/OL]. [2013-01-08]. <http://www.egig.eu/uploads/bestanden/d1244d38-8194-46e8-89f4-6b6258d05f3a>.
- [9] Davis P M, Dubois J, Gambardella F, et al. Performance of european cross-country oil pipelines: statistical summary of reported spillages in 2009 and since 1971[R]. Brussels. Conservation of Clean Air and Water in Europe, 2011.
- [10] Jo Y D, Ahn B J. Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2002, 15(3): 179-188.
- [11] 翁永基. 油气管道泄漏事故的定量风险评价[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 108-112.
Weng Yongji. Quantitative risk assessment for failure of oil and gas pipelines[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(5): 108-112.
- [12] 徐涛龙, 姚安林, 蒋宏业, 等. 油气管道第三方破坏风险评估关键性技术研究[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(2): 150-154.
Xu Taolong, Yao Anlin, Jiang Hongye, et al. Key techniques of risk assessment of oil and gas pipelines damaged by third party[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(2): 150-154.
- [13] Dziubinski M, Frateczak M, Markowski A S. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(5): 399-408.
- [14] Wu Zongzhi, Zhang Shengzhu. Research progress on risk acceptance criteria of Long-distance oil and gas transportation pipeline[J]. Journal of Risk Analysis and Crisis Response, 2012, 2(3): 188-194.
- [15] Chen Yuhwen, Wang Chihwang, Lin Sainju. A multi-objective geographic information system for route selection of nuclear waste transport[J]. The International Journal of Management Science, 2008, 36(3): 363-372.
- [16] Zhu G Y, Henson M A, Megan L. Dynamic modeling and linear model predictive control of gas pipeline networks[J]. Journal of Process Control, 2001, 11(2): 129-148.
- [17] 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院. 石化装置定量风险评估指南[M]. 北京:中国石化出版社,2007.
SINOPEC Safety Engineering Institute. A guide for quantitative risk assessment of petrochemical plant[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007.
- [18] Sitarz S. Dynamic programming with ordered structures: Theory, examples and applications[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2010, 161(20): 2623-2641.
- [19] Abo-Sinna M A, Amer A H, El Sayed H H. An interactive algorithm for decomposing the parametric space in fuzzy multiobjective dynamic programming problem[J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 174(1): 684-699.