

矿区油气管道滑坡的稳定性分析及危险性评价

Stability Analysis and Risk Assessment of Oil and Gas Pipeline Landslide

张宁晓, 张莹

(河南省第四地质勘查院有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要: 为有效掌握油气管道滑坡的稳定性及其危险性, 基于滑坡现场勘查成果及变形数据, 先采用传递系数法和尖点突变分析开展滑坡稳定性评价, 再利用 $P \times C$ 分级法评价不同评价指标对管道的危险性程度。结果表明: 通过传递系数法计算, 得出 3 个监测剖面在不同工况条件下的稳定性系数范围为 1.005 ~ 1.224, 属欠稳定 ~ 稳定状态; 通过尖点突变分析, 得到 5 个监测点的突变特征值范围为 $3.961 \times 10^9 \sim 5.331 \times 10^9$, 均大于 0, 说明各监测点对应位置均处于稳定状态; 对比传递系数法和尖点突变分析的稳定性评价结果, 综合得出滑坡目前处于稳定性状态; 在危险性评价结果中, 整体评价的危险性得分为 81.25, 总体得分偏高, 危险性等级属 III 级, 即滑坡灾害对管道威胁一般, 需尽快开展局部及整体的防治措施研究, 以保证管道安全。

关键词: 管道滑坡; 传递系数法; 尖点突变分析; 变形监测; 危险性评价

中图分类号: P642 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 04-0081-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.04.014

ZHANG Ningxiao, ZHANG Ying

(The Fourth Geological Exploration Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to effectively grasp the stability and danger of oil and gas pipeline landslides, based on the results of on-site landslide investigation and deformation data, the transfer coefficient method and sharp point mutation analysis are first used to evaluate the stability of landslides, and then the $P \times C$ classification method is used to evaluate the degree of danger of different evaluation indicators on the pipeline. The example analysis results show that through the transfer coefficient method calculation, the stability coefficient range of the three monitoring profiles under different operating conditions is 1.005 ~ 1.224, belonging to an unstable ~ stable state; Through sharp point mutation analysis, the range of mutation characteristic values for 5 monitoring points is $3.961 \times 10^9 \sim 5.331 \times 10^9$, all greater than 0, indicating that the corresponding positions of each monitoring point are in a stable state; By comparing the stability evaluation results of the transfer coefficient method and the sharp point mutation analysis, it is concluded that the landslide is currently in a stable state; In the risk assessment results, the overall risk score is 81.25, which is relatively high. The risk level belongs to level III, which means that landslide disasters pose a moderate threat to pipelines. Therefore, it is necessary to carry out local and overall prevention and control measures research as soon as possible to ensure pipeline safety.

Keywords: pipeline landslide; transfer coefficient method; cusp mutation analysis; deformation monitoring; risk assessment

0 引言

西气东输是重要的民生战略工程, 其分布具线性特征, 易在线路上碰见滑坡灾害, 因此, 开展管道滑坡研究是十分必要的, 尤其开展其稳定性分析及危险性评价具有重要现实意义^[1-2]。目前, 不少学

作者简介: 张宁晓 (1986—) 男, 本科, 工程师, 研究方向: 地质水工环、地质灾害防治、生态修复相关工作。

收稿日期: 收稿时间: 2023-03-07

岩土力学

者已开展了管道滑坡的相关研究,唐俊杰等^[3]开展了管道滑坡变形特征分析及其相应的防灾对策研究;韩俊杰等^[4]分析了管道滑坡的失效机制;刘鹏等^[5]研究了灾害条件下的管道应力;姜诗源等^[6]开展了海底滑坡发育条件下的管道结构安全分析。上述研究虽取得了相应成果,但对于工程实际,由于滑坡地理位置差异,仍有必要结合管道滑坡具体工况,开展针对性的稳定性分析及危险性评价研究。

结合李锐鹏等^[7]的研究成果,传递系数法能合理评价滑坡稳定性,且宁波等^[8]也证明了尖点突变分析在滑坡稳定性评价中的适用性,考虑到两者分析原理差异,具较好的互补特征,因此,提出以两者共同构建滑坡灾害的稳定性评价模型,薛晓辉等^[9]利用层次分析法和模糊理论构建了滑坡危险性评价模型,验证了两方法的有效性。

综上所述,以管道滑坡为工程背景,基于滑坡现场勘查成果及变形数据,先采用传递系数法和尖点突变分析开展滑坡稳定性评价,再利用层次分析法和模糊理论分析不同评价指标对管道的危险性程度,为滑坡灾害防治提供一定的理论依据。

1 基本原理

1.1 稳定性评价方法的构建

一般来说,工程实际多依据 GB/T 32864—2016《滑坡防治工程勘查规范》中的传递系数法开展滑坡稳定性评价^[10],其适用性不言而喻,但也存在一定不足,即只能针对特定断面开展对应分析;由于尖点突变分析可结合变形数据开展稳定性评价,即可对滑坡某点的稳定性进行评价,因此,提出在传递系数法分析基础上,利用尖点突变分析开展滑坡稳定性的辅助评价,以保证稳定性评价结果的完整性。

1.1.1 传递系数法

依据 GB/T 32864—2016《滑坡防治工程勘查规范》,结合工程实际,将计算过程中的相关设定介绍如下:

(1) 计算工况 在滑坡稳定性计算过程中,常设置3种工况,即:

工况1:天然工况。该工况主要计算天然状态下的滑坡稳定性,计算参数采用天然状态参数;工况2:暴雨工况。该工况主要计算暴雨状态下的滑坡稳定

性,计算参数采用暴雨状态参数;工况3:地震工况。该工况主要计算地震状态下的滑坡稳定性,计算参数采用天然状态参数。

(2) 计算参数 综合室内试验成果及地区经验,将该滑坡稳定性计算参数统计见表1。

表1 计算参数
Table 1 Calculation parameters

| 土体类型 | 工况条件 | 重度/(kN/m ³) | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/° |
|------|------|-------------------------|---------|--------|
| 填土层 | 天然状态 | 16.3 | 11.3 | 15.0 |
| | 暴雨状态 | 17.6 | 7.1 | 8.3 |
| 粉质黏土 | 天然状态 | 16.7 | 15.0 | 20.0 |
| | 暴雨状态 | 18.4 | 8.5 | 9.5 |

(3) 稳定状态划分 通过计算可得对应剖面的稳定性系数 F_s , 并可通过其开展滑坡稳定性评价或稳定状态划分,具体标准为:

若 $F_s > 1$ 时,对应计算剖面属不稳定状态;若 $1 \leq F_s < 1.05$ 时,对应计算剖面属欠稳定状态;若 $1.05 \leq F_s < 1.15$ 时,对应计算剖面属基本稳定状态;若 $F_s \geq 1.15$ 时,对应计算剖面属稳定状态。

1.1.2 尖点突变分析

尖点突变分析是评价事物突变的新型数学模型,在岩土领域多被应用于稳定性评价,其流程大致为:基于某位置处的变形监测成果,通过拟合参数求解,计算得到稳定性评价指标,利用该指标即可判断其稳定状态。该方法在滑坡领域的应用也较为广泛^[11-12],适用性已被验证,因此,再利用其辅助评价滑坡稳定性。

尖点突变分析的标准函数 $V(t)$ 可构建为:

$$V(t) = t^4 + qt^2 + pt \quad (1)$$

式中: q 、 p 为突变特征参数; t 为时间变量。

利用参数 q 、 p 计算得到突变特征值 Δ :

$$\Delta = 8q^3 + 27p^2 \quad (2)$$

利用 Δ 值大小即可判断对应监测位置的稳定性,具体标准为:若 $\Delta > 0$,即属稳定状态;若 $\Delta = 0$,滑坡稳定性具波动特征,无法判断其稳定性;若 $\Delta < 0$,即属不稳定状态。

1.2 危险性评价方法的构建

管道滑坡的危险性影响因素相对较多,为保证危险性评价结果的准确性,提出利用 $P \times C$ 分级法构建危险性评价模型,其构建过程主要包含四个阶段:

(1) 评价体系的构建 管道滑坡的危险性影响

因素虽较多, 但通过层次分析法可有效构建出较为系统的评价体系; 同时, 结合文献 [9] 成果及管道滑坡固有特点, 将管道滑坡危险性评价体系构建为三层, 如图 1 所示。

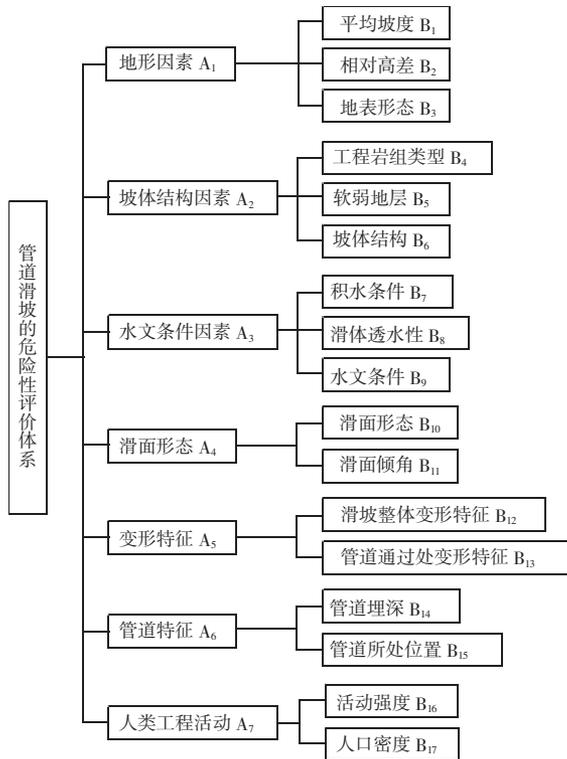


图 1 管道滑坡危险性评价体系

Fig. 1 Pipeline landslide risk assessment system

(2) 权值求解 利用 1~9 标度法求解各评价指标的权重, 求解过程如下: ①判断矩阵的构建。结合工程实际, 通过比较各评价指标间的重要性程度, 构建判断矩阵^[9], 判断矩阵具有互反矩阵特征, 即其具有相对独立的矩阵元素; ②一致性检验。先计算得到判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量, 并进一步计算 CR 值:

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{RI(n - 1)} \quad (3)$$

式中: λ_{\max} 为最大特征值; n 为判断矩阵构建的评价指标数; RI 为误差控制值。若 $CR < 0.1$, 那么判断矩阵通过了一致性检验; 反之, 需复核判断矩阵, 重新开展一致性检验, 直至通过。③计算权值。对最大特征值对应的特征向量进行归一化计算, 所得归一化值即为相应评价指标的权值。

(3) 隶属度求解 提出通过专业人员调查法来求解各评价指标的隶属度, 即挑选若干人员开展各

评价指标的隶属度打分, 并将打分结果综合即为各评价指标的最终隶属度值。在调查过程中, 一方面, 被调查人员需为本专业从业者; 二方面, 被调查人员的能力存在一定差异, 因此, 提出针对不同类型被调查人员的调查结果进行折减处理, 具体为: 专家级人员, 其隶属度评价结果不进行折减, 直接使用; 高级技术人员, 对其隶属度评价结果进行 0.9 的折减; 中级技术人员, 对其隶属度评价结果进行 0.8 的折减。

(4) 危险性等级评价 在各评价指标权值、隶属度求解基础上, 利用 $P \times C$ 分级法开展管道滑坡危险性等级评价; 结合工程实际, 管道滑坡的危险性等级共设计为四级, 见表 2。

表 2 管道滑坡危险性等级划分标准

Table 2 Equivalent classification criteria for pipeline landslide hazards

| 危险等级 | 危险分 | 危险等级评分 | 危险性对策 |
|-------|-----|-----------|---|
| I 级 | 45 | 0 ~ 60 | 滑坡对管道威胁程度一般, 正常实施即可。 |
| II 级 | 70 | ≤60 ~ 75 | 滑坡灾害对管道威胁较轻, 局部采取治理措施即可。 |
| III 级 | 85 | ≤75 ~ 90 | 滑坡灾害对管道威胁一般, 除采取局部治理措施外, 还应考虑滑坡灾害的整体防治。 |
| IV 级 | 95 | ≤90 ~ 100 | 滑坡灾害对管道威胁较大, 除采取治理措施外, 还可考虑管道改线。 |

2 实例分析

2.1 工程概况

沁阳市常平乡窑头村煤窑庄铝土矿区的西气东输一线 GX005 段管道, 局部地段存在较大的变形特征, 即存在滑坡灾害。结合现场调查, 滑坡区地质条件和特征如下。

2.1.1 滑坡地质条件

①地形地貌条件。滑坡区隶属太行山脉, 为侵蚀剥蚀低山地貌, 总体具西高东低特征, 高程范围为 231~419 m, 高差 188 m, 地形起伏相对较大; 地表形态陡缓差异明显, 较陡边坡的坡度约为 30°~45°。

②地层岩性条件。区内第四系地层主要为耕土、填土及粉质黏土, 前两者主要是局部分布, 且多分布于地表浅层范围内, 岩性差异较大, 具有较强的透水性和较低的力学强度, 工程性质较差; 后者具黄土特征, 棕黄色, 稍湿, 土质较为均匀, 含有一定孔隙, 孔径多 0.1~0.3 mm, 在区内广泛分布。

岩土力学

下覆基岩主要为二叠系砂岩,灰黄色,中粗粒结构,中厚层状,力学强度较高,其饱和单轴抗压强度可达 28.9 MPa,产状为 $189^{\circ} \angle 10^{\circ}$;基岩裂隙较为发育,且随深度增加而减小,地下水富水性存在较大差异。

③地质构造条件。滑坡区附近具有断裂构造发育,即甘泉断裂从其北侧通过,该断裂近似沿东西延伸,长度约 5 km;由于区内断裂发育,且断裂形成过程会引发一定的次生构造,也进一步降低了区内岩土的结构完整性。

④水文地质条件。由于地形起伏较大,区内地表水不发育,主要表现为季节性的冲沟流水,其对区内地表形态具有一定影响。

区内地下水主要为孔隙水和裂隙水,前者赋存于第四系地层孔隙中,无明显统一水面,且相对较为贫乏;后者赋存于基岩裂隙中,富水性受节理裂隙的发育程度控制,分布也相对较少。

⑤人类工程活动。区内人类工程活动较为强烈,主要体现在三方面,即采矿、道路建设及房屋建设。

a. 采矿活动。滑坡区属煤窑庄铝土矿区范围,已在上世纪 80~90 年代进行了大量无规律开采,形成了规模不一的边坡,如滑坡前缘即是一个采矿边坡。

b. 道路修建及房屋建设。为满足区内采矿需求,区内修建了大量道路及一定量的房屋,其较大程度上改变了原始地表形态,为雨水入渗等创造了有利条件。

2.1.2 滑坡基本特征

①滑坡基本信息。滑坡主滑方向为 73° ,前后缘高程范围为 345~385 m,高差约 40 m,纵向长度约 140 m,横向宽度约 130 m,平均厚度约 5 m,体积约 $9.45 \times 10^4 \text{ m}^3$,属小型土质滑坡(滑坡平面形态见图 2)。

②滑坡结构特征。据现场钻孔、探槽等揭露情况,滑坡结构特征如下:

a. 滑体特征。滑体主要为填土和粉质黏土,平均厚度为 5 m,填土主要也是粉质黏土回填,分布于滑坡中后部,含有一定量的植物根系及碎石;粉质黏土主要为棕黄色,分布于滑坡中下部,结构松散,利于降雨入渗。

b. 滑带特征。滑带位于基覆界面,岩性主要为粉质黏土,厚度约 0.2 m,遇水易软化,力学强度较低,多呈可塑状态。

c. 滑床特征。滑床主要为二叠系下石盒子组砂岩,灰黄色,强风化~中风化,整体完整性相对较差,属较破碎~破碎状态,透水性较好,在区内局部存在露头。

③滑坡变形特征。共 5 处裂缝及若干落水洞,裂缝发育特征如下:裂缝 1 位于后缘县道路面上,2018 年 1 月初次发现并及时进行回填封堵,7 月份路面回填封堵裂缝再次张开,其最大长度约为 52 m,宽度约 2~13 cm,错台高度约 10~14 cm,裂缝可见深度约 16~40 cm。裂缝 2 及裂缝 3 位于滑坡体南侧坡体边界上,均为纵向裂缝,其中,裂缝 2 长约 10 m,宽度约 10 cm,可见深度约 150 cm;裂缝 3 长约 30 m,宽度约 15~30 cm,可见深度约 20~90 cm,裂缝形成错台高度约 35 cm。裂缝 4 位于滑坡中下部平缓处,长约 30 m,宽度约 10~30 cm 不等,可见深度约 10~30 cm。裂缝 5 位于坡体下部采坑人工堆渣边坡顶部及道路上,长约 104 m,宽度 2~4 cm 不等,深度约 20 cm。

2.2 滑坡现有稳定评价

先通过传递系数法开展特定剖面的稳定性分析,再利用尖点突变分析,对相应监测点进行对应稳定性评价,两者综合保证滑坡现有稳定性评价的全面性。

2.2.1 传递系数法的稳定评价结果分析

在传递系数法的稳定性评价过程中,共分析了 3 个剖面的稳定性(剖面位置见图 2),稳定性评价结果见表 3。3 个剖面在工况 2 的稳定性均相对最差,均属欠稳定;工况 3 和工况 1 分别属基本稳定状态和稳定状态。3 个剖面稳定程度相当,在不利工况条件下均存在较大失稳风险。

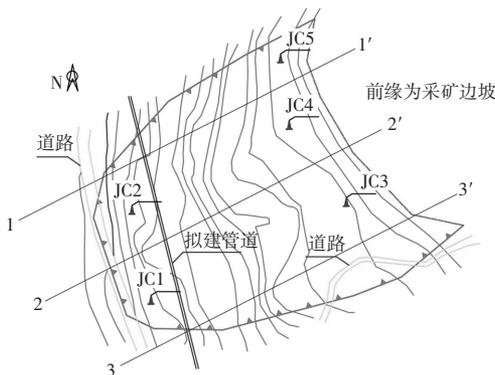


图 2 滑坡平面形态示意图

Fig. 2 Schematic diagram of planar form of landslide

表 3 传递系数法的稳定性评价结果

Table 3 Stability evaluation results of transfer coefficient method

| 位置 | 工况 | 稳定系数 F_s | 稳定状态 |
|--------|------|------------|------|
| 1-1 剖面 | 工况 1 | 1.190 | 稳定 |
| | 工况 2 | 1.005 | 欠稳定 |
| | 工况 3 | 1.071 | 基本稳定 |
| 2-2 剖面 | 工况 1 | 1.224 | 稳定 |
| | 工况 2 | 1.042 | 欠稳定 |
| | 工况 3 | 1.065 | 基本稳定 |
| 3-3 剖面 | 工况 1 | 1.211 | 稳定 |
| | 工况 2 | 1.039 | 欠稳定 |
| | 工况 3 | 1.061 | 基本稳定 |

2.2.2 尖点突变分析的稳定评价结果分析

结合滑坡平面形态及变形特征, 在滑坡范围内

表 4 尖点突变分析的稳定性评价结果

Table 4 Stability evaluation results of cusp catastrophe analysis

| 监测点编号 | 拟合结果 | | q 值 | 突变特征参数 | | | 稳定性评价 | |
|-------|-----------------------------|-------|-------|--------|---------------------|------|--------|--|
| | 拟合方程 | 拟合度 | | p 值 | Δ 值 | 状态类型 | 稳定程度排序 | |
| JC1 | $y = t^4 - 315t^2 + 12489t$ | 0.957 | -315 | 12 489 | 3.961×10^9 | 稳定 | 5 | |
| JC2 | $y = t^4 - 347t^2 + 13580t$ | 0.948 | -347 | 13 580 | 4.645×10^9 | 稳定 | 3 | |
| JC3 | $y = t^4 - 394t^2 + 14682t$ | 0.962 | -394 | 14 682 | 5.331×10^9 | 稳定 | 1 | |
| JC4 | $y = t^4 - 364t^2 + 14058t$ | 0.951 | -364 | 14 058 | 4.950×10^9 | 稳定 | 2 | |
| JC5 | $y = t^4 - 358t^2 + 13054t$ | 0.968 | -358 | 13 054 | 4.234×10^9 | 稳定 | 4 | |

表 5 为不同阶段的 Δ 值。由阶段 1 至阶段 3, 5 个监测点的 Δ 值总体呈减小趋势, 但减小程度存在一定差异, 说明随时间持续, 各监测点位置处的稳定性始终呈减小趋势, 只是减小程度不同。

表 5 不同阶段的 Δ 值对比Table 5 Comparison of Δ values at different stages

| 阶段 | 监测点 | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | JC1 | JC2 | JC3 | JC4 | JC5 |
| 阶段 1 | 8.593 | 9.148 | 9.584 | 9.358 | 8.697 |
| 阶段 2 | 6.054 | 6.587 | 6.258 | 7.105 | 6.894 |
| 阶段 3 | 3.961 | 4.645 | 5.331 | 4.95 | 4.234 |

综上所述, 滑坡目前整体或局部均处于稳定状态。只是在本次监测时段内, 随时间持续, 滑坡稳定程度呈持续减弱趋势。

2.3 滑坡危险性评价

(1) 评价指标的权值求解 利用 1~9 标度法开展各评价指标的权值求解, 限于篇幅, 仅以地形因素的二级指标为例进行权值求解。即先求得 $B_1 \sim B_3$ 指标的判断矩阵为 K :

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

共布设 5 个监测点 (监测位置如图 2 所示), 监测周期为 2 d/期, 共计 48 期数据, 得到 5 个监测点的尖点突变分析结果, 见表 4。由表 4 可知, 各监测点的拟合度均趋近于 1, 拟合较好; 5 个监测点的 Δ 值均大于 0, 说明各监测点对应位置均处于稳定状态; 按照 Δ 值大小 (稳定性程度由好至坏) 的顺序为: $JC3 > JC4 > JC2 > JC5 > JC1$ 。

为进一步掌握滑坡稳定性的发展趋势, 监测数据划分为三期, 并对每期都进行相应的尖点突变分析, 以其值开展滑坡稳定性发展趋势分析。具体划分标准为: 阶段 1: 1~16 期变形监测数据; 阶段 2: 1~32 期变形监测数据; 阶段 3: 1~48 期变形监测数据。

通过计算, 得到 K 矩阵的最大特征值为 3.009 2, CR 值为 0.008 7, 小于 0.1, 说明该矩阵满足一致性检验; 再进一步得到最大特征值对应的特征向量为 $[0.256 \ 5 \ 0.466 \ 0 \ 0.846 \ 8]$, 对其进行归一化处理, 得到 $B_1 \sim B_3$ 指标的权重向量为 $[0.163 \ 0.297 \ 0.540]$ 。评价指标权重结果见表 6。

表 6 各评价指标的权重结果

Table 6 Weighting results of each evaluation index

| 一级指标 A | 一级指标权值 | 二级指标 B | 二级指标权值 |
|--------------|--------|--------------------|--------|
| 地形因素 A_1 | 0.147 | 平均坡度 B_1 | 0.163 |
| | | 相对高差 B_2 | 0.297 |
| | | 地表形态 B_3 | 0.540 |
| 坡体结构因素 A_2 | 0.126 | 工程岩组类型 B_4 | 0.337 |
| | | 软弱地层 B_5 | 0.376 |
| | | 坡体结构 B_6 | 0.287 |
| | | 积水条件 B_7 | 0.251 |
| 水文条件因素 A_3 | 0.102 | 滑体透水性 B_8 | 0.362 |
| | | 水文条件 B_9 | 0.387 |
| | | 滑面形态 B_{10} | 0.478 |
| 滑面形态 A_4 | 0.122 | 滑面倾角 B_{11} | 0.522 |
| | | 滑坡整体变形特征 B_{12} | 0.464 |
| 变形特征 A_5 | 0.201 | 管道通过处变形特征 B_{13} | 0.536 |
| | | 管道埋深 B_{14} | 0.483 |
| 管道特征 A_6 | 0.233 | 管道所处位置 B_{15} | 0.517 |
| | | 活动强度 B_{16} | 0.693 |
| 人类工程活动 A_7 | 0.069 | 人口密度 B_{17} | 0.307 |

岩土力学

(2) 评价指标的隶属度求解 在隶属度求解过程中, 共统计 23 位专业人员的隶属度评价结果, 按照 1.2 节中不同级别人员的折减处理流程, 统计得到各评价指标的隶属度值见表 7。

表 7 各评价指标的隶属度结果

Table 7 Membership results of all evaluation indicators

| 二级指标 | 风险等级 | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| | I 级 | II 级 | III 级 | IV 级 |
| B ₁ | 0.425 | 0.172 | 0.251 | 0.152 |
| B ₂ | 0.227 | 0.195 | 0.294 | 0.284 |
| B ₃ | 0.082 | 0.129 | 0.317 | 0.472 |
| B ₄ | 0.305 | 0.181 | 0.263 | 0.251 |
| B ₅ | 0.212 | 0.201 | 0.291 | 0.296 |
| B ₆ | 0.523 | 0.154 | 0.201 | 0.122 |
| B ₇ | 0.193 | 0.204 | 0.302 | 0.301 |
| B ₈ | 0.112 | 0.134 | 0.362 | 0.392 |
| B ₉ | 0.094 | 0.142 | 0.357 | 0.407 |
| B ₁₀ | 0.132 | 0.230 | 0.327 | 0.311 |
| B ₁₁ | 0.108 | 0.195 | 0.374 | 0.323 |
| B ₁₂ | 0.098 | 0.106 | 0.322 | 0.474 |
| B ₁₃ | 0.053 | 0.196 | 0.269 | 0.482 |
| B ₁₄ | 0.019 | 0.211 | 0.276 | 0.494 |
| B ₁₅ | 0.028 | 0.102 | 0.343 | 0.527 |
| B ₁₆ | 0.069 | 0.102 | 0.347 | 0.482 |
| B ₁₇ | 0.633 | 0.127 | 0.153 | 0.087 |

(3) 评价指标的危险性分析 在各评价指标权重及隶属度求解基础上, 进一步开展危险性分级评价, 且分析顺序为二级指标至一级指标, 再至目标层。

①二级指标的危险性分析 通过二级指标的隶属度值和表 2 中的等级危险分计算得到各二级指标的危险性得分, 见表 8。由表 8 可知, 二级指标的危险性得分范围为: 58.65~87.62, 二级指标存在一定差异, 其中, 危险性等级 I 级的仅 1 个, 所占比例为 5.88%, 即 B₁₇ 指标, 其危险性相对最低; II 级的有 3 个, 所占比例为 17.65%; III 级的有 13 个, 所占比例为 76.47%。

②一级指标的危险性分析 通过二级指标的隶属度及其权值, 可计算得到一级指标的隶属度值, 并结合表 2 中的等级危险分计算得到各一级指标危险性得分, 见表 9。由表 9 可知, 各一级指标的危险性得分也存在一定差异, 其范围为: 71.29~86.84, 仅 A₂ 指标的危险性等级为 II 级, 其所占比例为 14.29%; 其余均为 III 级指标, 共计为 6 个, 所占比例为 85.71%。

表 8 二级指标的危险性得分

Table 8 Risk score of secondary indicators

| 二级指标 | 危险性得分 | 危险性等级 | 排序 |
|-----------------|-------|-------|----|
| B ₁ | 66.94 | II 级 | 15 |
| B ₂ | 75.84 | III 级 | 13 |
| B ₃ | 84.51 | III 级 | 5 |
| B ₄ | 72.60 | II 级 | 14 |
| B ₅ | 76.47 | III 级 | 12 |
| B ₆ | 62.99 | II 级 | 16 |
| B ₇ | 77.23 | III 级 | 11 |
| B ₈ | 82.43 | III 级 | 8 |
| B ₉ | 83.18 | III 级 | 7 |
| B ₁₀ | 79.38 | III 级 | 10 |
| B ₁₁ | 80.99 | III 级 | 9 |
| B ₁₂ | 84.23 | III 级 | 6 |
| B ₁₃ | 84.76 | III 级 | 4 |
| B ₁₄ | 86.02 | III 级 | 2 |
| B ₁₅ | 87.62 | III 级 | 1 |
| B ₁₆ | 85.53 | III 级 | 3 |
| B ₁₇ | 58.65 | I 级 | 17 |

表 9 一级指标的危险性得分

Table 9 Risk score of first level indicators

| 一级指标 | 危险性得分 | 危险性等级 | 排序 |
|----------------|-------|-------|----|
| A ₁ | 79.07 | III 级 | 5 |
| A ₂ | 71.29 | II 级 | 7 |
| A ₃ | 81.42 | III 级 | 3 |
| A ₄ | 80.22 | III 级 | 4 |
| A ₅ | 84.51 | III 级 | 2 |
| A ₆ | 86.84 | III 级 | 1 |
| A ₇ | 77.28 | III 级 | 6 |

③目标层的危险性分析 在二级指标、一级指标危险性评价基础上, 再进一步开展管道滑坡的整体危险性评价, 计算如下:

$$F = [0.133 \quad 0.162 \quad 0.306 \quad 0.400] \begin{bmatrix} 45 \\ 70 \\ 85 \\ 95 \end{bmatrix} = 81.25$$

经计算, 管道滑坡的整体危险性得分为 81.25, 危险性等级属 III 级, 即滑坡灾害对管道威胁一般, 除采取局部治理措施外, 还应考虑滑坡灾害的整体防治。

3 结论与认识

通过油气管道滑坡的稳定性分析及危险性评价, 主要得出如下结论与认识:

(1) 传递系数法及尖点突变分 (下转第 105 页)

流向基本一致,无明显变化。

表 2 测井流向对比
Table 2 Flow direction comparison

| 测次 | CK01 | CK02 | CK03 | CK05 | CK06 | CK07 |
|----|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 初测 | 210-239 | 218-245 | 273-306 | 340-12 | 351-24 | 343-14 |
| 复测 | 205-236 | 220-249 | 268-299 | 338-5 | 353-22 | 349-18 |

4 结论

(1) 三维声纳渗流检测技术是完全适用于上海地区饱和和软土深基坑的,对于水流的流量、流速、方位测试效果较好。

(2) 测试前需降水,坑内外有水头差方可测试。

(3) 通过对两次降水深度的测量数据进行对比分析,基坑内降水水位高低,一定程度上影响检测井测量范围内地下水的渗流速度。基坑内水位越低,内外水头差越大,声纳渗流测量效果越好。

参 考 文 献

- [1] 何铁炎,王安源. 声纳渗流探测技术在大库斯台水库大坝渗流检测中的应用 [J]. 湖南水利水电, 2020 (1): 26-30.
- [2] 谭界雄,杜国平,高大水,等. 声纳探测白云水电站大坝渗流点的应用研究 [J]. 人民长江, 2012, 43 (1): 36-37, 54.
- [3] 杜家佳,杜国平,曹建辉,等. 高坝大库声纳渗流检测可视化成像研究 [J]. 大坝与安全, 2016 (2): 37-40.
- [4] 刘迪,李雪娇,于艳秋. 声纳渗流检测于桥水库大坝渗流点的应用研究 [J]. 海河水利, 2013 (3): 46-47.
- [5] 杜家佳,陆建锋,王震,等. 武汉绿地中心深基坑声纳渗流控制技术 [J]. 施工技术, 2018, 47 (1): 6-10.
- [6] 江杰,魏丽,钟有信,等. 基坑降水对声纳渗流检测精度的影响分析 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47 (5): 73-80.
- [7] 郑伟强,戴阿福,杜国平. 三维流速矢量声纳技术在地铁工程中的应用及分析 [J]. 山西建筑, 2018, 44 (22): 68-69.
- [8] 建筑基坑止水帷幕声纳渗流检测技术规程: DBJ/T 45-117-2021 [S]. 广西, 2021.

(上接第 86 页)

析均能有效评价滑坡稳定性,且评价方法及效果存在显著的互补特征,得出滑坡目前整体或局部均处于稳定性状态,只是在本次监测时段内,随时间持续,滑坡稳定程度呈持续减弱趋势。

(2) 通过危险性评价,得出不同指标对管道的危险程度存在一定差异,且整体评价的危险性得分为 81.25,总体得分偏高,属Ⅲ级危险性等级,即滑坡灾害对管道威胁一般,需开展整治处理才能保证管道运营安全。

参 考 文 献

- [1] 刘鹏,李玉星,张宇,等. 典型地质灾害下埋地管道的应力计算 [J]. 油气储运, 2021, 40 (2): 157-165.
- [2] 席莎,文宝萍. 滑坡作用下横向折线形埋地输气管道的力学响应 [J]. 油气储运, 2019, 38 (12): 1350-1358.
- [3] 唐俊杰,樊晓一,姜元俊. 滑坡对纵向埋地管道的变形特征与减灾对策 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (11): 4307-4312.

- [4] 韩俊杰,黄迪文,汪海超,等. 横穿滑坡天然气管道失效机制研究 [J]. 人民长江, 2022, 53 (1): 209-215.
- [5] 刘鹏,李玉星,张宇,等. 典型地质灾害下埋地管道的应力计算 [J]. 油气储运, 2021, 40 (2): 157-165.
- [6] 姜诗源,盛积良,陈国明,等. 海底滑坡作用下埋地管道结构安全分析 [J]. 海洋工程, 2020, 38 (2): 128-134.
- [7] 李锐鹏,张宁晓,魏中凯. 顾及混沌特征识别的黄土滑坡变形预测与稳定性评价 [J]. 河南科学, 2022, 40 (11): 1802-1810.
- [8] 宁波,刘玉健,王安东. 巨型古滑坡的稳定性评价及发展趋势分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42 (5): 515-519.
- [9] 薛晓辉,周玲,秦爱红. 库岸涉水滑坡危险性现状分析与预测评价 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17 (5): 169-175.
- [10] 王占巍,赵发睿,谢文萃,等. 青海省高家湾滑坡的形成条件分析及稳定性评价 [J]. 水土保持通报, 2020, 40 (3): 81-87.
- [11] 邓小鹏. 基于信息分解的滑坡变形稳定性评价及预警分析 [J]. 人民长江, 2021, 52 (5): 101-107.
- [12] 田成成,张盛生,张磊,等. 基于尖点突变理论及非趋势波动分析的滑坡稳定性及变形特征研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38 (8): 806-810.