◀石油管工程▶

某悬索跨越输油管道应力评估研究*

徐新凯[1] 陈文乐[2] 樊耀锦[3] 张鑫洋[1] 孙海军[2] 徐志朋[1] 许雷阁[1]
（1. 华北水利水电大学土木与交通学院 2. 国家管网集团西南管道有限责任公司
3. 国家石油天然气管网集团有限公司湖北分公司）

徐新凯，陈文乐，樊耀锦，等. 某悬索跨越输油管道应力评估研究［J］. 石油机械，2026，54（9）：135-144.

Xu Xinkai，Chen Wenle，Fan Yaojin，et al. Stress assessment of a suspension crossover oil pipeline［J］. China Petroleum Machinery，2026，54（9）：135-144.

摘要：悬索跨越管道易因内压、温度及外载荷复杂多变导致结构强度失效。为保障管道安全运行，对管道本体开展应力检测、有限元分析和敏感性分析，以此明确管道应力水平和分布特征，指导后续管理维护。采用无人机测绘数据重建管轴线，建立管道几何模型，引入向量式有限元和超声应力检测数据交叉验证方法，校核管道本体应力水平；模拟内外载荷下管道应力，开展敏感性分析，明确内外载荷变化对管道应力的影响。结合超声应力检测技术和数值仿真技术确定全管段应力处于安全范围内，通过敏感性分析获得了管道应力对不同载荷的敏感程度，即空悬段弯头当量对内压敏感程度最高，跨中最大当量应力对温升敏感程度最高。研究结果表明，超声应力检测结合向量式有限元可精准校核跨越段管道全管段应力，对安装检测设备困难的悬索跨越管道适用性强，应力敏感性分析可为后续管道安全运行提供数据支撑。研究结果可为管道跨越工程、隧道穿越工程等架空管道应力评估提供借鉴。

关键词：输油管道；悬索跨越；管道应力评估；向量式有限元；敏感性分析

中图分类号：TE973 **文献标识码：**A DOI：10. 12473/CPM. 202506084

Stress Assessment of a Suspension Crossover Oil Pipeline

Xu Xinkai[1] Chen Wenle[2] Fan Yaojin[3] Zhang Xinyang[1] Sun Haijun[2] Xu Zhipeng[1] Xu Leige[1]
（1. *School of Civil Engineering and Transportation*, *North China University of Water Resources and Electric Power*; 2. *PipeChina Southwest Pipeline Co.*, *Ltd.*; 3. *PipeChina Hubei Branch*）

Abstract: Suspension crossover pipelines are prone to structural strength failure due to complex and variable internal pressure, temperature and external loads. To ensure the safe operation of pipelines, stress detection, finite element analysis and sensitivity analysis were conducted on the pipeline body to clarify its stress level and distribution, providing guidance for subsequent management and maintenance. UAV surveying and mapping data were used to reconstruct the pipe axis and establish a geometric model of the pipeline, and a cross-validation method of vector-form intrinsic finite element (VFIFE) and ultrasonic stress detection data was introduced to check the stress level of the pipeline body. The pipeline stress under internal and external loads was simulated, and sensitivity analysis was performed to identify the influences of internal and external load changes on the pipeline stress. The joint analysis of the ultrasonic stress detection and numerical simulation reveals that the stress of the whole pipe section is within the safe range, and the sensitivity of the pipeline stress to different loads was

* 基金项目：河南省科技攻关计划项目“长输油气管道应变监测与预警关键技术研究”（192102310210）。

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

obtained through sensitivity analysis. The results show that ultrasonic stress detection combined with VFIFE can accurately check the stress of the whole pipe section of the pipeline and it highly applicable to suspension crossover pipelines where it is difficult to install detection equipment, and the stress sensitivity analysis can provide data support for subsequent safe operation of the pipeline. This research provides a reference for stress assessment of overhead pipelines such as pipeline crossing and tunnel crossing projects.

Keywords: oil pipeline; suspension crossover; pipeline stress assessment; vector form intrinsic finite element (VFIFE); sensitivity analysis

0　引　言

长输油气管道通过悬索跨越桥梁穿越河流湖泊时，受内压、温度、重力等内外因素作用，易产生局部应力超标、位移过大等问题，导致管道本体和附属设施受损破坏，甚至会造成重大经济损失与生态影响。为保障悬索跨越段管道安全运行，需明确管道的应力水平和受力状态，进而更好地指导工程实践[1-2]。

目前，在跨越段管道受力分析方面，多数采用有限元方法进行仿真计算。一部分学者利用ANSYS、MIDAS等商业软件对跨越结构整体进行建模，开展静力、动力计算，对管道施加不同的内外载荷，得到管道的应力和位移，针对理论解和模拟解的差异进行了分析[3-7]；另一些学者如朱国承等[7]采用CAESAR Ⅱ软件，分析了管道跨越段在不同受力情况下的位移，提出在设计中需要特别注意管卡的间隙和受力；王海兰等[8]采用ABAQUS对洪水冲刷输油悬空管道进行模拟，得到管道应力、应变、挠度和管道悬空长度与洪水流速的关系，指出管道失效的工况。在管道和跨越结构对不同载荷的响应研究方面，Yu等[9-11]对悬索管桥的积冰问题、悬索桥的气动响应、无风缆管道的抗风性能分别进行了风洞试验和有限元模拟，研究表明，主梁外载荷与桥梁响应之间存在相关性；雷震等[12]分析了地震载荷下悬空管道的应力和变形特征，系统提出4种参数对管道应力分布的影响；陶思宇[13]研究了悬索管道桥在动载荷作用下危险区域，得到多种参数对悬索管道桥动力学行为的影响；韩建红等[14]对横向滑坡作用下管道进行敏感性分析，研究了管径、壁厚等因素和埋地管道应力的相关性；张慧敏等[15]将管道悬空段简化为大挠度梁，通过理论分析了不同管道参数下载荷变化对管道挠度、弯矩、应力的影响；Feng等[16]研究了油气管道悬索桥在地震载荷激励下对结构内力和位移的影响，分析了频谱不同导致内力和位移不同的原因。在管道应力安全评价方面，冷建成等[17]对管道的不同沉降工况进行了试验，并基于监测数据和神经网络实现了应力预测；刘玉卿等[18]建立了基于管道轴向监测应力的预警方法数学模型。

上述研究表明，开展跨越管道力学分析须考虑管卡、桥梁结构等附属设施的约束作用。区别于传统有限元方法，向量式有限元方法将结构离散为一系列质点的集合，可便捷施加管卡、支座、锚固墩等硬性约束，并进行复杂的管-土非线性计算，克服传统计算在几何非线性、材料非线性、大位移等问题上的不足[19-22]。另外，考虑到真实工程案例中管道服役环境复杂、约束形式多变，有限元分析需进行对比验证，而管道超声应力检测技术具有无放射性、测量速度快等优势，被广泛应用于管道应力评估中。但超声应力检测截面单一，仅能获取检测点管道的应力水平，难以获取跨越管道整体的应力分布。

为此，笔者以某典型悬索跨越段管道工程为例，采用超声应力检测技术获取跨越管道关键位置的应力水平，应用向量式有限元方法结合勘测资料建立管道三维模型，明确服役状态下管道的应力分布，并与超声应力检测数据进行对比验证，进而对不同工况下管道进行应力校核；同时开展输送压力、温度和横向位移对管道应力的影响分析，明确管道应力对不同因素的敏感性。研究结果可为后续管道安全运行和管理维护提供参考。

1　跨越段管道基本情况

某悬索跨越管道工程中，桥梁结构上敷设一条直径为457 mm的成品油管道。管道水平长度130 m，壁厚7.1 mm，钢级X60，设计温度45 ℃，设计压力10 MPa。经现场勘察，跨越管道及附属设施变形特征（见图1）具体为：①跨越结构刚性桁架梁型钢构件变形，与塔架基础连接处出现拉断现象；②靠近上游和下游塔架基础处的吊索



a. 上游上部结构　　b. 下游上部结构　　c. 变形情况

图 1　跨越结构和结构变形示意图

Fig. 1　Crossover structure and structural deformation

与连接杆件弯曲；③下游桥面结构有偏离轴线的现象；④靠近上游和下游塔架基础处的斜腹杆弯曲变形。

依据 SY/T 6068—2024《油气管道架空部分及其附属设施维护规范》，按跨越状态指数 BCI 评分值判断结构完好状态等级为 C 级。管道相较于建成时存在安全隐患，须开展管道本体应力评估明确受力状态。

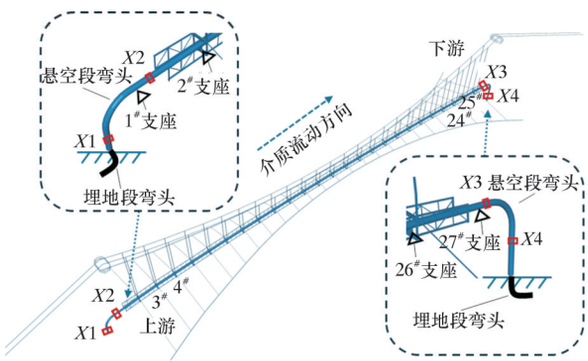


图 2　超声应力检测位置示意图

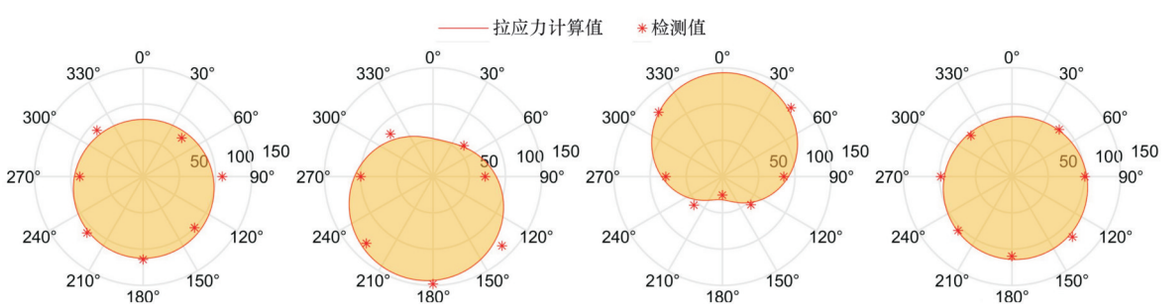
Fig. 2　Ultrasonic stress detection position

2　管道应力分析

2.1　管道超声应力检测

管道本体应力对管道服役状态判定具有重要意义，对管道关键截面开展超声应力检测可明确管道应力水平。依据 Q/GGW 2003001.2—2024《油气储运资产完整性管理规范　第 2 部分：管道线路》中跨越管道危险点位置，将检测点布置于跨越管道上下游埋地段弯头和悬空段弯头间、1#支座下游和 27#支座下游（见图 2）。

管道运行状态下输送压力为 7 MPa，温度为 30 ℃。$X1$~$X4$ 超声应力检测截面最大轴向拉应力分别为 112.5、144.3、143.1 和 115.0 MPa，分别位于管道截面 117.2°、193.0°、3.7°和 162.7°位置（见图 3）。$X2$ 和 $X3$ 检测截面分别位于 1#与 2#支座间、26#支座下游。由于管道受力特征与约束形式有关，支座对管道的支撑力使支座两侧受力相反，进而使 $X2$ 和 $X3$ 截面轴向最大拉应力位置相差 180°。超声应力检测为单一截面检测，可结合有限元方法进一步模拟跨越管道整体的应力水平。



平均拉应力：95.6 MPa
弯曲应力：16.9 MPa
最大拉应力：112.5 MPa(177.2°)
最小拉应力：78.7 MPa(357.2°)
a. $X1$截面

平均拉应力：97.7 MPa
弯曲应力：46.6 MPa
最大拉应力：144.3 MPa(193.0°)
最小拉应力：51.1 MPa(13.0°)
a. $X2$截面

平均拉应力：87.6 MPa
弯曲应力：55.6 MPa
最大拉应力：143.1 MPa(3.7°)
最小拉应力：32.0 MPa(183.7°)
a. $X3$截面

平均拉应力：98.3 MPa
弯曲应力：16.7 MPa
最大拉应力：115.0 MPa(162.7°)
最小拉应力：81.6 MPa(342.7°)
a. $X4$截面

图 3　管道超声应力检测结果雷达图

Fig. 3　Radar chart of pipeline ultrasonic stress detection

2.2　管道有限元分析

为贴合工程实际中管道系统的几何走向和服役环境，基于管道三维倾斜摄影数据并采用向量式有限元方法构建了管道三维有限元模型。有限

元模型考虑管卡、埋地等约束作用，并对模型进行离散型网格划分，网格尺寸满足 GB/T 50470—2017《油气输送管道线路工程抗震技术规范》不大于1倍管径要求。

向量式有限元计算过程包含三维模型构建、约束与载荷施加、迭代求解（见图4）。为验证采用三维倾斜摄影数据进行模型构建的可行性，将实测位置减去变形量推演得到了变形前管道的几何形状，并以此建立有限元模型。通过对比分析可得2种管道模型应力分布一致，最大应力分别为150.8、149.8 MPa，两者误差在1%以内，说明采用三维倾斜摄影数据建立管道模型并进行工况计算满足工程实践需求。

管道上下游两端采用固定约束，埋地段向外延伸以模拟远端土体对管段的约束作用，两端至出土位置采用三向非线性土弹簧模拟埋地管道和土体间的相互作用，土弹簧刚度参数依据 GB/T 50470—2017《油气输送管道线路工程抗震设计技术规范》和现场勘测资料进行计算（见表1）。在外载荷综合作用下，悬索跨越结构易发生横向位移[23-25]，结合现场勘测资料，最大横向位移位于管道中部，距离悬空段弯头 65 m。采用四次方程拟合位移分布特征（见图4）。有限元分析同时考虑了管道和介质的重力作用。

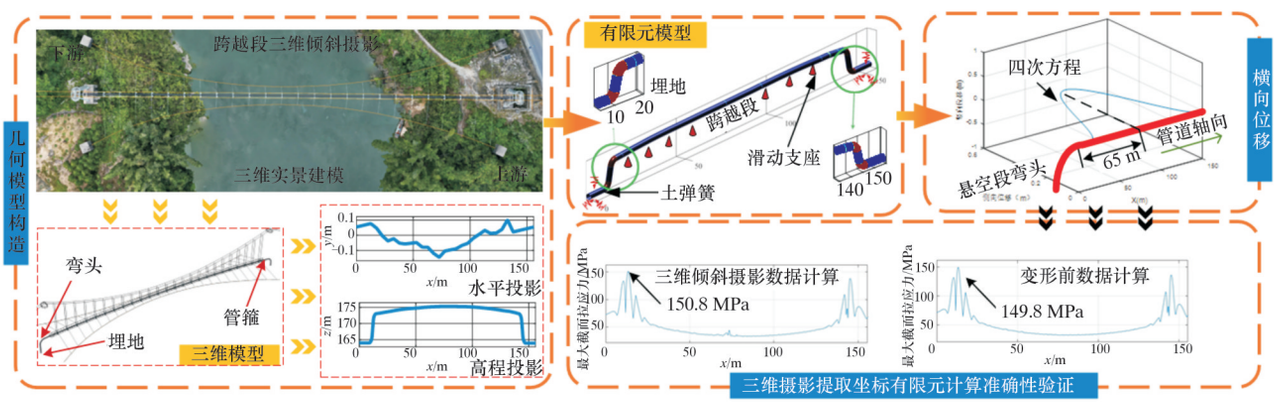


图4　向量式有限元计算过程图

Fig. 4　Calculation process of VFIFE

表1　埋地段土弹簧参数

Table 1　Soil spring parameters of the buried section

土弹簧方向	管道轴向	水平方向	竖直向上	竖直向下
极限力/N	1.89×10^4	1.17×10^5	7.82×10^4	2.43×10^5
极限位移/mm	9	89	360	91

管材塑性硬化阶段的应力-应变关系复杂，采用考虑管道塑性变形的 Ramberg-Osgood 模型，用单一方程描述应力-应变关系，即有：

$$\varepsilon=\frac{\sigma}{E}+\alpha\frac{\sigma}{E}\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{n_1-1} \tag{1}$$

式中：ε 为管道应变；σ 为管道应力，MPa；E 为管材弹性模量，MPa；α 为屈服偏移量，无量纲；σ_0 为管材的屈服应力，MPa；n_1 为强化指数。

采用 GB/T 50470—2017《油气输送管道线路工程抗震设计技术规范》中针对 X60 钢级的建议值，选取管材弹性模量为207 GPa，屈服偏移量为1.403，管材的屈服应力为437 MPa，强化指数为15.85。

运行工况下管道轴向应力云图（见图5）显示，管道轴向最大应力为150.8 MPa。管道悬空段上游弯头和下游弯头位置局部应力集中显著，悬空段中部管道应力分布均匀。$X1$~$X4$ 超声应力检测截面最大轴向拉应力分别为116.0、150.8、141.0和116.0 MPa，分别位于管道截面177.5°、180.0°、1.2°和177.5°位置（见图6）。管道 $X1$~$X4$ 截面有限元模拟受力特征与超声应力检测一致。

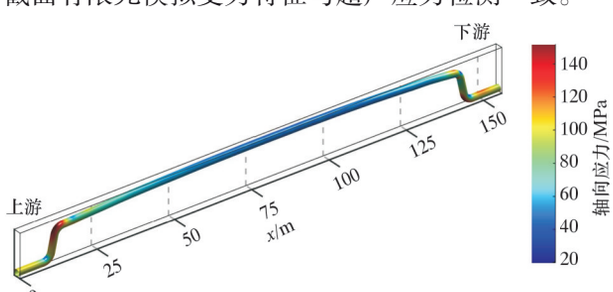


图5　管道轴向应力云图

Fig. 5　Axial stress cloud diagram of pipeline

有限元模拟结果和超声应力检测结果对比（见表2）显示，跨越管道 $X1$~$X4$ 截面最大拉应力误差分别为3.1%、4.5%、1.5%和0.9%，角度误差分别为0.2%、6.7%、1.4%和9.0%。对比结果表明，向量式有限元计算方法具有工程可接受误差，与超声应力检测结果相近。

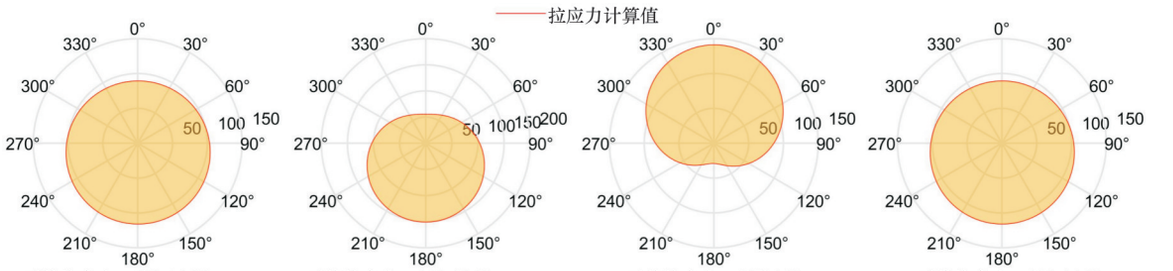


图 6　有限元模拟结果雷达图

Fig. 6　Radar chart of VFIFE simulation

表 2　超声应力检测与有限元模拟结果对比

Table 2　Comparison of ultrasonic stress detection and VFIFE simulation

部位	截面	超声应力检测结果		有限元模拟结果		应力误差/%	角度误差/%
		应力/MPa	方向(°)	应力/MPa	方向(°)		
上游	*X*1	112.5	177.2	116.0	177.5	3.1	0.2
	*X*2	144.3	193.0	150.8	180.0	4.5	6.7
下游	*X*3	143.1	3.7	141.0	1.2	1.5	1.4
	*X*4	115.0	162.7	116.0	177.5	0.9	9.0

2.3　管道应力校核

跨越段管道屈服强度为 415 MPa，依据 GB 50253—2014《输油管道工程设计规范》，管道轴向应力不得超过钢管最低屈服强度的 80%，当量应力不得超过钢管最低屈服强度的 90%，管道当量应力 σ_e 计算公式为：

$$\sigma_e = \sigma_h - \sigma_a \tag{2}$$

式中：σ_h 为由内压产生的环向应力，MPa；σ_a 为内压和温度变化产生的轴向应力，MPa。

运行工况下管道轴向最大拉应力和最大当量应力分别为 169.8、219.4 MPa（见表 3），占许用应力的比例分别为 51.1%、58.7%（轴向应力的许用应力为 332.0 MPa，当量应力的许用应力为 373.5 MPa）；设计工况下管道轴向最大拉应力和最大当量应力分别为 230.2、280.1 MPa，占许用应力的比例分别为 69.3%、75.0%，管道应力水平均满足规范要求。在工程实践中管道服役状态多变，悬索跨越管道应力与位移会发生频繁波动，须掌握管道应力对内外载荷的量化关系。

表 3　跨越管道应力校核

Table 3　Stress check of crossover pipeline

工况	内压/MPa	温升/℃	轴向最大拉应力/MPa	最大当量应力/MPa	占许用应力比例/%	
					轴向最大拉应力	当量应力
运行工况	7	15	150.8	200.0	45.4	53.6
		20	160.4	211.0	48.3	56.5
		25	169.8	219.4	51.1	58.7
设计工况	10	15	210.3	262.3	63.3	70.2
		20	219.9	271.1	66.2	72.6
		25	230.2	280.1	69.3	75.0

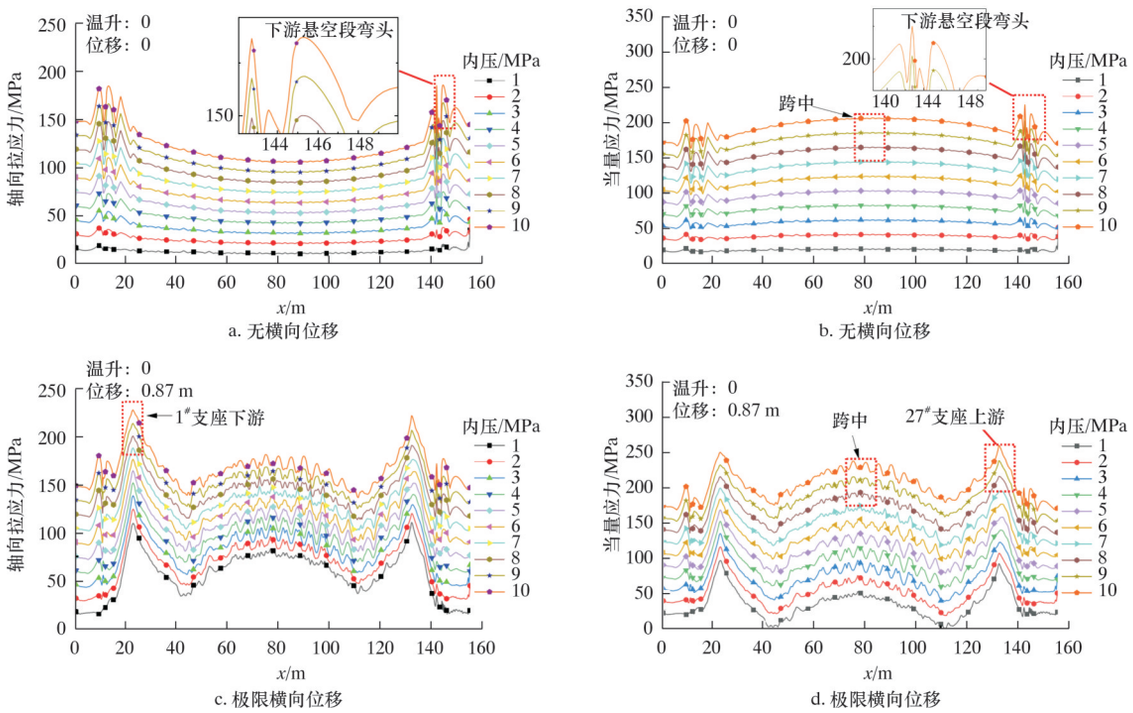
3　内外载荷对管道应力影响分析

为明确内外载荷对管道应力的影响，量化不同工况下管道应力的变化规律，开展了内外载荷对管道应力的敏感性分析。结合当地气候条件和管道生产需求，取温升范围为 0~20 ℃，输送压力为 0~10 MPa。考虑到悬索跨越结构的桁架梁与管道易发生横向位移，参照 GB/T 50459—2017《油气输送管道跨越工程设计标准》中对跨越结构最

大横向位移的规定，确定管道最大横向位移范围为0~0. 87 m。

3.1　内压对应力影响分析

图7为跨越管道应力随内压变化曲线图。由图7a和图7b可见，轴向最大拉应力和最大当量应力位置均位于悬空段弯头；由图7c和图7d可见，极限横向位移时管道轴向最大拉应力和最大当量应力均位于27#支座上游。



a. 无横向位移　b. 无横向位移　c. 极限横向位移　d. 极限横向位移

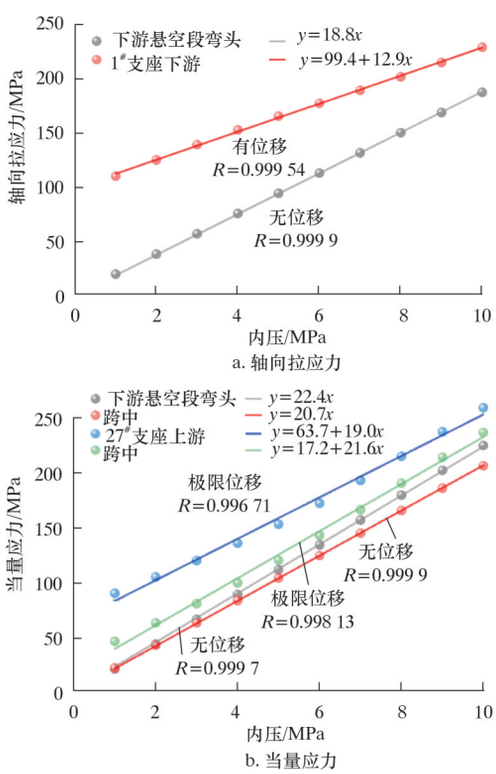
图7　跨越管道应力随内压变化曲线图

Fig. 7　Crossover pipeline stress changing with internal pressure

各分析位置轴向最大拉应力、最大当量应力与内压为正相关，相关性系数均大于0. 99，相关性显著（见图8）。无横向位移时下游悬空段弯头轴向最大拉应力对内压敏感性为18. 8 MPa/MPa，最大当量应力对内压的敏感性为22. 4 MPa/MPa；极限横向位移时，1#支座下游轴向最大拉应力对内压敏感性为12. 9 MPa/MPa，27#支座上游和跨中最大当量应力对内压的敏感性分别为19. 0、21. 6 MPa/MPa；无横向位移和极限横向位移时内压对管道应力的影响规律一致。

3.2　温升对应力影响分析

考虑温升对管道应力的影响分析时，无横向位移下管道轴向最大拉应力和最大当量应力分别位于上游悬空段弯头、下游悬空段弯头（见图9a、图9b）；极限横向位移时管道轴向最大拉应力和最大当量应力分别位于1#支座下游、27#支座上游（见图9c、图9d）。主跨范围内的管道轴向拉应力随温度升高而降低，当量应力随温度升高而升高。这是因为管道两端约束了温度升高而发生的热膨胀，等效于在管道轴向产生压应力，减小了管道因内压产生的轴向拉应力。



a. 轴向拉应力　b. 当量应力

图8　跨越管道应力对内压敏感性

Fig. 8　Sensitivity of crossover pipeline stress to internal pressure

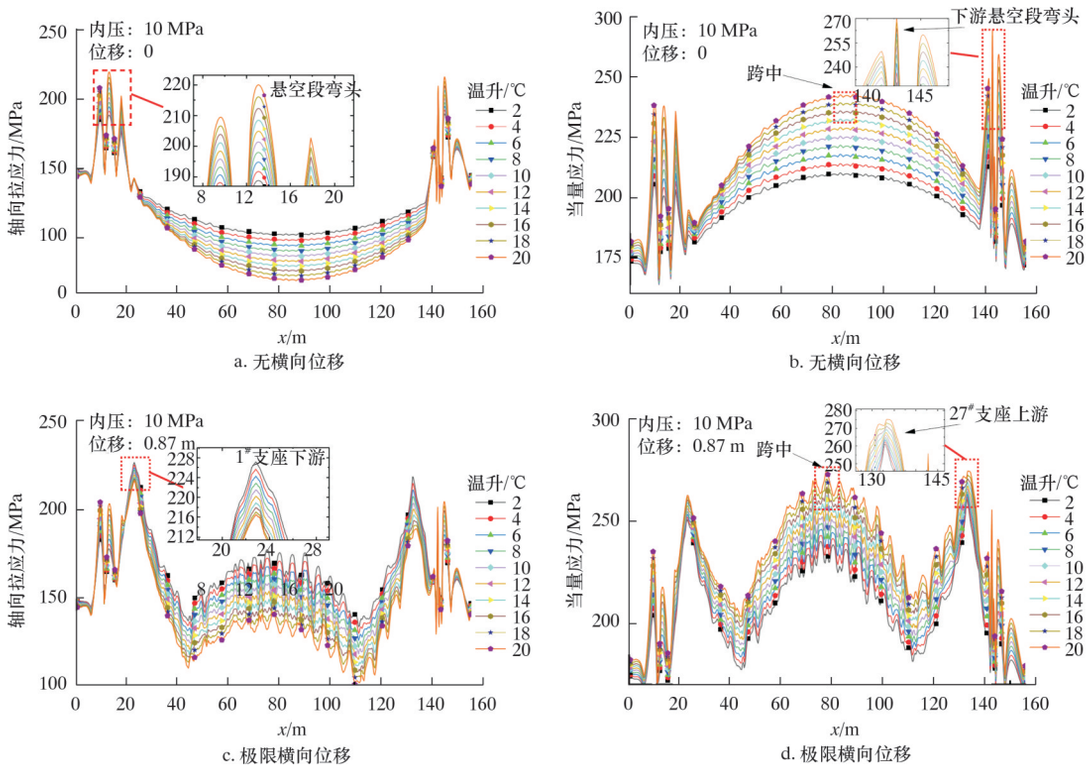


图 9　跨越管道应力随温度变化曲线图

Fig. 9　Crossover pipeline stress changing with temperature

温升与应力的敏感性关系如图 10 所示。由图 10 可知：无横向位移时，上游悬空段弯头轴向最大拉应力对温升的敏感性为 1. 7 MPa/℃，下游悬空段弯头与跨中最大当量应力对温升敏感性分别为 2. 2、1. 8 MPa/℃；极限横向位移时 1#支座下游轴向最大拉应力对温升的敏感性为−0. 6 MPa/℃，27#支座上游、跨中最大当量应力对温升的敏感性分别为 1. 0、2. 4 MPa/℃。

3. 3　横向位移对应力影响分析

对不同横向位移下管道应力进行分析，无内压下，横向位移 0~0. 3 m 时管道轴向最大拉应力位于埋地段弯头，横向位移 0. 4~0. 8 m 管道轴向最大拉应力位于 27#支座上游（见图 11a、图 11b）。设计内压下横向位移 0~0. 3 m 时管道最大当量应力位于埋地段弯头，横向位移 0. 4~0. 8 m 时管道最大当量应力位于 27#支座上游（见图 11c、图 11d）。

不考虑内压时，27#支座上游轴向最大拉应力、最大当量应力对横向位移敏感性分别为 113. 9、85. 9 MPa/m（见图 12），跨中最大当量应力对横向位移敏感性为 20. 7 MPa/m。设计内压下 1#支座下游轴向最大拉应力对横向位移的敏感性为 139. 8 MPa/m，跨中、27#支座上游最大当量应力对横向位移敏感性分别为 38. 0、81. 6 MPa/m。

基于上述分析得到了管道应力对内压、温升和横向位移的敏感性，其中悬空段弯头处应力对内压和温度敏感，管道 1#支座下游、27#支座上游

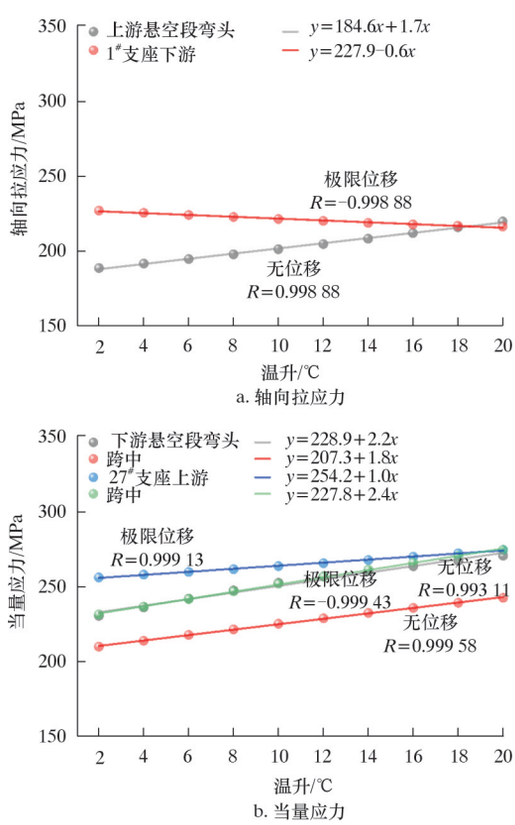


图 10　跨越管道应力对温升敏感性

Fig. 10　Sensitivity of crossover pipeline stress to temperature rise

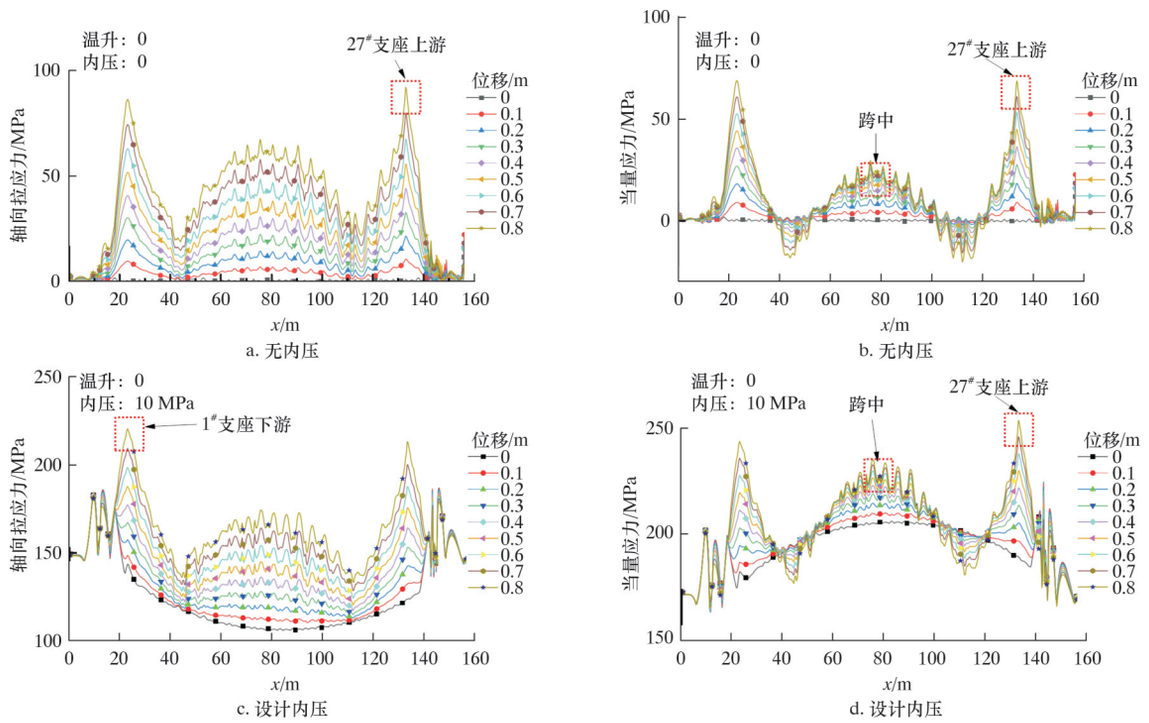


图 11　应力随横向位移变化曲线

Fig. 11　Stress changing with lateral displacement

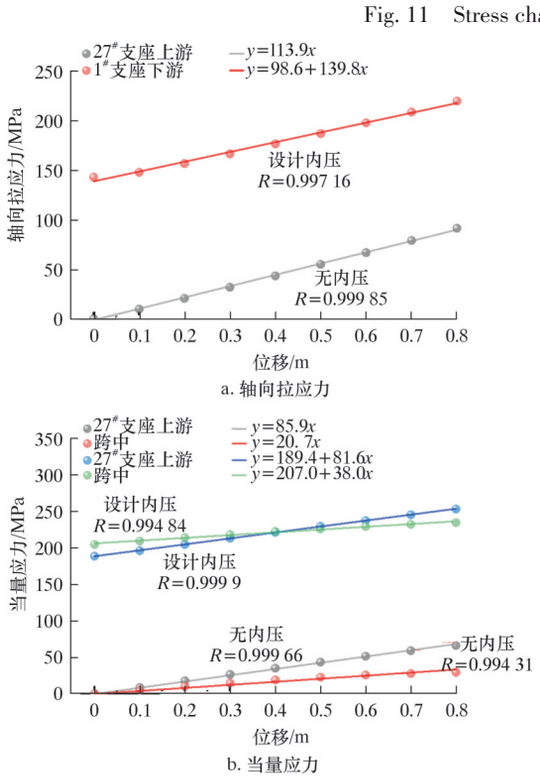


图 12　应力对横向位移敏感性

Fig. 12　Sensitivity of stress to lateral displacement

应力对横向位移敏感。通过分析得到的量化关系可以为管道生产调度提供参考。

4　结论及认识

针对跨越结构油气管道本体应力评估体系尚不完整问题，研究采用超声应力检测结合向量式有限元的方法，进行了悬索跨越结构输油管道应力全方面评估。为明确管道应力对内外载荷的敏感程度，开展了内压、温升和横向位移对跨越管道应力的影响分析。主要结论如下：

（1）从工程实践出发，采用超声应力检测技术明确管道危险截面应力，$X1$~$X4$ 危险截面轴向最大拉应力分别为 112. 5、144. 3、143. 1 和 115. 0 MPa。

（2）开展了跨越管道整体有限元分析，获取了当前运行状态下跨越段管道应力水平，并与超声应力检测结果进行对比验证；进一步计算了设计工况下管道应力，管道轴向最大拉应力和最大当量应力分别为 230. 2、280. 1 MPa，占许用应力的比例分别为 69. 3%、75. 0%，管道应力水平均满足规范要求。

（3）跨越管道应力的影响分析表明：悬空段弯头当量应力对内压敏感程度最高，敏感性为 22. 4 MPa/MPa；跨中最大当量应力对温升敏感程度最高，敏感性为 2. 4 MPa/℃；管道 1#支座下游轴向最大应力对横向位移敏感程度最高，敏感性为 139. 8 MPa/m。

（4）研究明确了管道应力集中位置和应力水平，同时获得了对内压、温升和横向位移敏感的重点区域，后期运行维护中需对相应位置重点关注，当出现异常情况时及时进行应力复测，同时

关注相关位置环焊缝风险。研究结果可为管道跨越工程、隧道穿越工程等架空管道应力评估提供借鉴。

参 考 文 献

[1] 段宇航，董绍华，魏昊天，等. 穿越河流管道环焊缝裂纹缺陷安全性研究［J］. 石油机械，2023，51（6）：143-150.
Duan Yuhang，Dong Shaohua，Wei Haotian，et al. Safety analysis on girth weld crack defect of river-crossing pipeline［J］. China Petroleum Machinery，2023，51（6）：143-150.

[2] 王宇新. 运营状态下特大悬索桥无损检测及承载能力评估［J］. 交通科技，2021（3）：16-20.
Wang Yuxin. Nondestructive testing and carrying capacity assessment of oversize suspension bridge in operation condition［J］. Transportation Science & Technology，2021（3）：16-20.

[3] 张亮超，郭恩栋，杨斐，等. 典型架空输油管道地震破坏特征数值模拟分析［J］. 震灾防御技术，2025，20（2）：409-416.
Zhang Liangchao，Guo Endong，Yang Fei，et al. Numerical simulation analysis of seismic damage characteristics of typical overhead oil pipeline［J］. Technology for Earthquake Disaster Prevention，2025，20（2）：409-416.

[4] 吴长青，张志田，王林凯，等. 大跨悬索桥时域颤振有限元精细化分析［J］. 振动与冲击，2023，42（24）：1-7.
Wu Changqing，Zhang Zhitian，Wang Linkai，et al. Refined finite element analysis of time-domain flutter for long-span suspension bridges［J］. Journal of Vibration and Shock，2023，42（24）：1-7.

[5] 彭阳，安建川，李明，等. 勐岗河大型悬索跨越管道成桥状态下非线性静力有限元分析［J］. 天然气工业，2020，40（1）：125-131.
Peng Yang，An Jianchuan，Li Ming，et al. Finite element analysis on the nonlinear static force of Menggang river large suspension cable crossing pipeline under the finished state of bridge［J］. Natural Gas Industry，2020，40（1）：125-131.

[6] 都成军. 长输管道跨越工程复杂工况下数值模拟［J］. 管道技术与设备，2022（4）：12-16.
Du Chengjun. Numerical simulation of long distance pipelines in crossing engineering under complicated working conditions［J］. Pipeline Technology and Equipment，2022（4）：12-16.

[7] 朱国承，薛辉，高红. 基于CAESAR Ⅱ的集油管道跨越段应力分析［J］. 管道技术与设备，2017（2）：58-60.
Zhu Guocheng，Xue Hui，Gao Hong. Stress analysis of oil gathering pipeline span section based on CAESAR Ⅱ［J］. Pipeline Technique and Equipment，2017（2）：58-60.

[8] 王海兰，马廷霞，徐洪敏，等. 输油悬空管道洪水冲刷作用下的安全评价［J］. 石油机械，2015，43（1）：112-118.
Wang Hailan，Ma Tingxia，Xu Hongmin，et al. Safety evaluation for suspended oil pipelines under flood scouring［J］. China Petroleum Machinery，2015，43（1）：112-118.

[9] Yu Haiyan，Xu Fuyou，Ma Cunming，et al. Experimental research on the aerodynamic responses of a long-span pipeline suspension bridge［J］. Engineering Structures，2021，245：112856.

[10] Yu Haiyan，Zhang Mingjie，Xu Fuyou. Effect of ice accretion on aerodynamic characteristics of pipeline suspension bridges［J］. Structures，2022，46：1851-1862.

[11] Yu Haiyan，Zhang Mingjie，Chen Tengda，et al. Research on wind resistance performance of a pipeline suspension bridge without wind cable in natural wind［J］. Engineering Structures，2025，335：120320.

[12] 雷震，廖恒，董飞飞，等. 悬空长输管道地震反应模拟分析［J］. 石油机械，2017，45（10）：116-120.
Lei Zhen，Liao Heng，Dong Feifei，et al. Simulation analysis of seismic response of long-distance suspended pipeline［J］. China Petroleum Machinery，2017，45（10）：116-120.

[13] 陶思宇. 管道悬索跨越系统在多因素耦合作用下的动力学行为研究［D］. 成都：西南石油大学，2016.
Tao Siyu. Study of the dynamic properties for suspension pipe bridge under the coupling of multiple factors［D］. Chengdu：Southwest Petroleum University，2016.

[14] 韩建红，何鹏，孙明源，等. 横向滑坡作用下埋地管道参数敏感性研究［J］. 石油机械，2024，52（11）：130-139.
Han Jianhong，He Peng，Sun Mingyuan，et al. Sensitivity study on parameters of buried steel pipe under lateral landslide actions［J］. China Petroleum Machinery，2024，52（11）：130-139.

[15] 张慧敏，潘家祯. 长输管线中直管跨越管道的力学分析［J］. 华东理工大学学报（自然科学版），2007，33（4）：577-583.
Zhang Huimin，Pan Jiazhen. Mechanical analysis for stride across section of long distance transport pipeline

[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 33(4): 577-583.

[16] Feng Ruiwei, Hen Jinjing, Huang Kun. Influence of traveling wave effect on seismic dynamic response of pipeline suspension bridge [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2016, 35(11): 1255-1259.

[17] 冷建成，钱万东，周临风. 基于应力监测的油气管道安全预警试验研究 [J]. 石油机械，2021，49(6)：139-144.
Leng Jiancheng, Qian Wandong, Zhou Linfeng. Experimental study on safety warning of oil and gas pipeline based on stress monitoring [J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(6): 139-144.

[18] 刘玉卿，余志峰，佟雷，等. 基于轴向应力监测数据的管道应力状态预警模型 [J]. 石油机械，2018，46(6)：105-109.
Liu Yuqing, Yu Zhifeng, Tong Lei, et al. Early warning model of pipeline stress state based on axial stress monitoring data [J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(6): 105-109.

[19] Shi Yanke, Zhang Xinyang, Xu Leige, et al. Whole-local mechanical analysis and application of long-distance oil and gas pipelines considering dents caused by loading [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 4700.

[20] 田博文. 基于向量式有限元方法的深水管道屈曲机理及止屈研究 [D]. 天津：天津大学，2022.
Tian Bowen. Research on buckling mechanism and buckling arrest of submarine pipeline based on vector finite element method [D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.

[21] 孙子涵. 基于多线性材料硬化向量式有限元的薄壳结构屈曲研究 [D]. 郑州：华北水利水电大学，2024.
Sun Zihan. Buckling analysis of thin-walled structures based on material multilinear hardening using vector form intrinsic finite element method [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2024.

[22] 王舰. 基于向量式有限元的隔水幕墙结构力学性能研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2022.
Wang Jian. Study on mechanical properties of temperature control curtain based on the vector form intrinsic finite element method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.

[23] 王明波，侯浩，朱建平，等. 油气管道悬索式跨越工程结构安全性检测与评价体系研究 [J]. 公路交通技术，2020，36(1)：84-89.
Wang Mingbo, Hou Hao, Zhu Jianping, et al. Study on structural safety testing and evaluation system of suspended spanning oil & gas pipe bridge [J]. Technology of Highway and Transport, 2020, 36(1): 84-89.

[24] Brodniansky J, Magura M, Slivanský M. Increasing the durability and safety of pipeline bridges [J]. Procedia Engineering, 2016, 156: 69-74.

[25] 侯越. 中缅澜沧江桥隧段管道安全性分析 [D]. 北京：中国石油大学（北京），2017.
Hou Yue. Risk assessment of pipeline in Lancang river [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.

第一作者简介：徐新凯，生于2001年，现为在读硕士研究生，研究方向为管道检测与修复。地址：(450045)河南省郑州市。email：xuxinkai@stu. ncwu. edu. cn。

通信作者：许雷阁，副教授。email：xuleige@yeah. net。

修改回稿日期：2026-03-19

（本文编辑　刘　锋）