

文章编号 :1000-8241(2016)02-0208-07

# 基于向量式有限元方法的长输海底管道不平整度分析

许雷阁 林緬

中国科学院力学研究所

**摘要** :海管不平整度分析是悬跨海管设计、施工和运行维护过程中的重要环节。基于向量式有限元方法,提出了一种海管不平整度分析新方法。该方法采用 UWAPIPE 模型模拟管土耦合作用,采用基于区域分解的 MPI 并行技术以提高计算效率。对我国南海一段经过沙波区的海管进行不平整度分析,得到了海管位形、悬跨状态以及管道内弯矩分布。模拟结果与水下机器人(ROV)调查结果吻合良好。在此基础上,基于大量悬跨数据的统计分析,给出了不同工况对悬跨长度和高度的影响。模拟了危险悬跨海管开挖治理后的状态,结果表明开挖治理不仅能够有效消除悬跨,同时能够大大减小管道内弯矩分布。相关方法可用于海底长输管道的安全预警。(图 12,参 24)

**关键词** :长输管道;不平整度分析;悬跨;开挖治理

中图分类号 :TE54

文献标识码 :A

doi :10.6047/j.issn.1000-8241.2016.02.018

## Bottom roughness analysis of long-distance subsea pipeline using the VFIFE method

XU Leige, LIN Mian

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

**Abstract** : Bottom roughness analysis is a key process in design, construction and operation maintenance of subsea free-spanning pipeline. In this paper, a new analysis procedure is proposed using the vector form intrinsic finite element(VFIFE) method. In this procedure, the UWAPIPE model is used to simulate the pipe-soil interaction, and the domain decomposition MPI parallel computing technique is adopted to increase efficiency. A pipeline through sandwave region in South China Sea is simulated to identify the pipeline configuration, the status of free spanning and the distribution of bending moment. Comparison shows that the simulated results agree with the survey results by remote operated vehicle(ROV). In this regard, based on the statistical analysis of the free-spanning data, the spanning heights and lengths in different work conditions are determined. Moreover, since free-spanning pipeline is dangerous, pipeline lowering is simulated. Results show that the pipeline lowering method can effectively avoid free-spanning and reduce distribution of bending moment in pipeline. This method may be applied in safety warning for long-distance subsea pipeline. (12 Figures, 24 References)

**Key words** : long-distance pipeline, bottom roughness analysis, free-spanning, pipeline lowering method

海底管道是用于海洋油气开发及运输的重要设施,随着中国南海深水开发战略的深入实施,中国将逐渐形成类似巴西或者西非海域的开发模式——水下设备+海底管道<sup>[1]</sup>。在经过崎岖底床时,海管往往形成复杂的悬跨状态,此时海管的残余张力分布、弯矩分布、海管位形以及与底床的接触情况非常复杂。因此,在海管路由设计之初,往往需要进行底床不平整度分析,得到海管位形、内力分布及悬跨状态,并以此为依

据判断海管安全状态是否满足要求。若不满足要求,则需要重新进行路由设计或管道设计,也可在铺设前对底床进行人为干预或在铺设后进行悬跨治理。另外,在海管建设阶段和运行阶段,也需要进行底床不平整度分析,为海管安全施工和运行提供依据<sup>[2-5]</sup>。

工程中一般借助商业软件如 SAGE Profile<sup>[6]</sup>、Simla<sup>[7]</sup>或基于 Ansys 二次开发形成的 SPAN-CALC<sup>[8]</sup>等软件进行海管不平整度分析,但这些商业软件在计

算长输管道的管土耦合问题时,存在计算量大、操作复杂等不足。为此,采用向量式有限元和管土耦合模型相结合的方法,基于区域分解的MPI并行方案,计算分析长输海管的不平整度。该方法考虑了长输海管的几何非线性、材料非线性和管土耦合作用,简化了力学建模过程并提高了计算效率。首先简单介绍了本文计算方法的主要特点,而后以我国南海北部沙波区的一段实际海底管道为例进行不平整度分析,以及危险悬跨段的判断,最后模拟了开挖治理后的海管悬跨状态,并提出了治理方案。

### 1 计算方法

结构力学中常见的3类非线性问题<sup>[9]</sup>(几何非线性、材料非线性和接触非线性(或称边界非线性))在长输管道的不平整度分析中都会有不同程度的体现。因此,必须采用并行计算技术或GPU加速技术才能使计算效率满足工程要求。丁承先<sup>[10-12]</sup>最先提出了向量式有限元方法,该方法在模拟接触问题、几何非线性问题、大位移问题及刚体运动方面具有极大优势。向量式有限元方法在计算过程中并不用到整体矩阵,只分别对每个结点和每个单元进行计算,因此在嵌入管土耦合模型和并行计算或GPU编程上都有其特别方便、独到之处。在此,通过引入管土耦合模型和MPI并行算法,开发了海管不平整度并行分析软件,其主要特点如下。

#### 1.1 管土耦合模型

模拟管土耦合过程是进行海管不平整度分析的最大难点之一。建立海管不平整度分析模型时需要合理考虑管土耦合作用。常用的管土耦合模型有绞/固支约束、弹性约束<sup>[13]</sup>、非线性弹簧模型<sup>[14-17]</sup>和管土耦合宏单元<sup>[18-20]</sup>。其中,管土耦合宏单元与其他方法相比可以同时兼顾计算精度和效率,与向量式有限元方法相结合,能够模拟复杂管土耦合过程<sup>[21]</sup>。这里采用的UWAPIPE模型为宏单元的一种,可以反映土体的弹性、塑性、应力流动及强化等复杂本构现象,其本构关系为<sup>[19]</sup>:

$$dR = \begin{Bmatrix} dV \\ dH \end{Bmatrix} = D^p \cdot dU = \left( D - \frac{D \frac{\partial g}{\partial R} \frac{\partial F}{\partial R} D}{K + \frac{\partial F}{\partial R} D \frac{\partial g}{\partial R}} \right) \begin{Bmatrix} du \\ dv \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: $R$ 为土体反力向量, $dR$ 为时间步 $\Delta t$ 内的反力增量, $dV$ 和 $dH$ 分别为竖直和水平横向的分量; $U$ 为管土相对位移向量, $dU$ 为时间步 $\Delta t$ 内的管土相对位移增量, $du$ 和 $dv$ 分别为其竖直和水平横向的分量; $D^p$ 为模型弹塑性矩阵; $D$ 为模型弹性矩阵; $g$ 和 $f$ 分别为弹性区域轮廓线(bubble surface)和土体强化轮廓线(bounding surface)的表达式; $K$ 为塑性模量。

在UWAPIPE模型本构关系(图1)中, $N$ 为弹性区域的中心点; $M$ 为土体强化轮廓线的中心点; $V_0$ 反映土体强化程度; $b$ 为土体强化轮廓线的形状常数<sup>[18-20]</sup>。

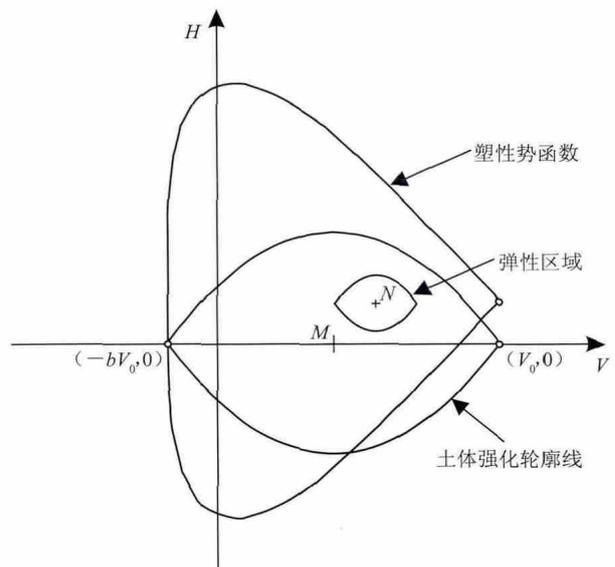


图1 UWAPIPE模型本构关系示意图

随着外力的变化,管道位置不断变化,因此在计算过程中必须考虑管土接触及分离过程。每一时间步更新结点位移,判断管土是否发生接触,判别准则为:

$$y_{node} \leq y_{touch} \quad (2)$$

式中: $y_{node}$ 为更新前土体表面结点位置; $y_{touch}$ 为更新后土体表面结点位置。

当土体对管道的竖向反力小于等于0时,土体不再对管道有作用力,表明管土已经或即将分离,即有管土分离判别准则:

$$V_n \leq 0 \quad (3)$$

式中: $V_n$ 为结点 $n$ 处土体对管道的竖向反力。

#### 1.2 向量式有限元方法

向量式有限元方法与传统有限元方法相比有诸多不同,其最大特点是计算时不用整体矩阵,只分别对每个结点和每个单元进行计算。近期有些学者将向量式有限元方法用于研究海底管道问题。Xu等<sup>[21]</sup>证明了向量式有限元与管土耦合模型结合算法的精度与传统

有限元方法相当 Yuan 等<sup>[22]</sup>利用向量式有限元方法模拟了海底管道滑坡灾害,研究了轴力对海管安全的影响,并讨论了不同滑坡长度及滑坡位移作用下管道的应力状态。

向量式有限元方法的主要计算步骤:中央差分法计算质点位移;求解单元节点纯变形位移;求解单元内力;质点内力和外力集成。每时间步内都要完成以上4个步骤的一次循环。在相关专著或论文中已有详细论述<sup>[21,23]</sup>,不再赘述。

1.3 并行方案

采用基于区域分解的MPI并行方案(图2),首先生成向量式有限元计算模型,此过程涉及网格划分等与传统有限元方法相同,之后对计算模型进行区域分解,再将分解后的各子区域映射至各进程,各进程独立求解,并与相邻区域产生通信,将各区域计算结果汇总后,即可得到整体的解。特别是,为了避免发生通信阻塞,各进程间进行通信时需要保持步调一致(图3)。很显然,通信过程主要有结点质量、结点惯性矩以及结点力的通信,不同变量的通信方案是相同的。

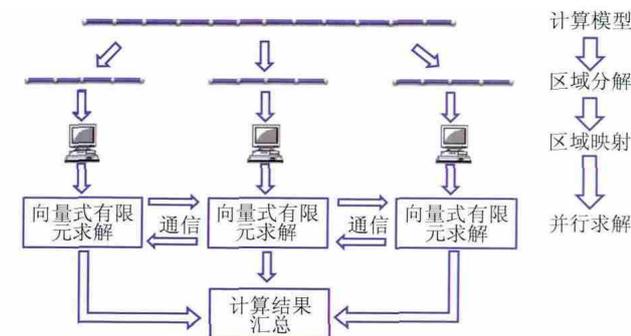


图2 基于区域分解的MPI并行方案

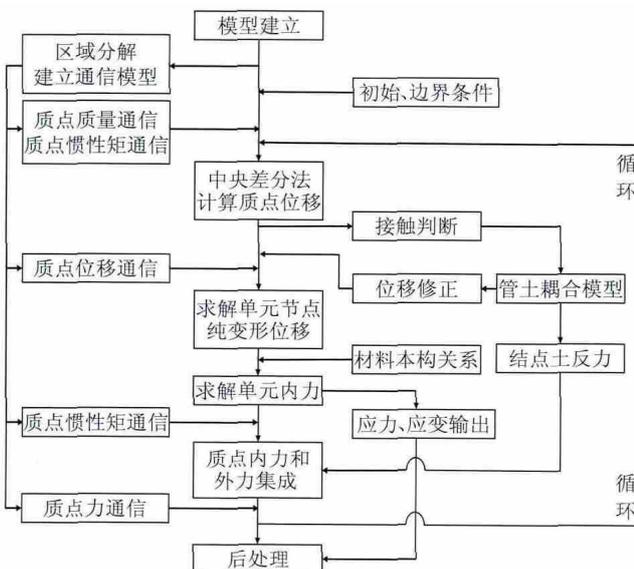


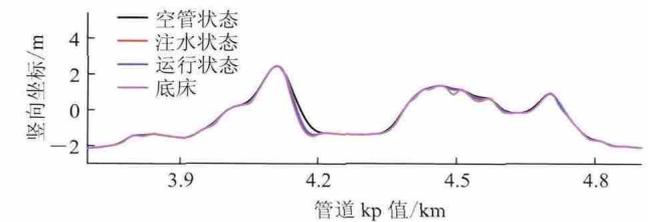
图3 海管不平整度分析并行计算流程图

2 工程实例

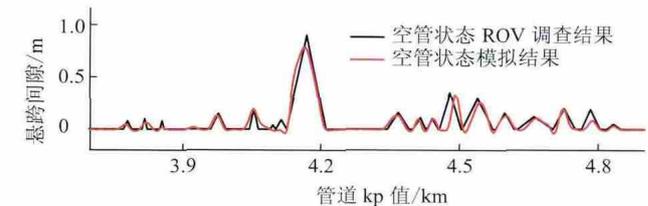
我国南海某段海管经过沙波区,地形条件复杂。调查资料显示该区域底床主要由硬质沙组成,底床表面有大的沙纹(megaripple)和大量贝壳类残渣。计算过程考虑了3种不同工况:空管(as-laid),内压为0;注水(water-filled),内压为0;运行(operational),内压为10 MPa。虽然管道起输温度为50,但由于其为不保温单层管,温降很快,研究区域海管内流温度接近环境温度,因此认为管道内流温度与外部环境温度相同,均设为5。需要特别说明的是,采用的ROV调查数据取自空管工况。

2.1 计算结果

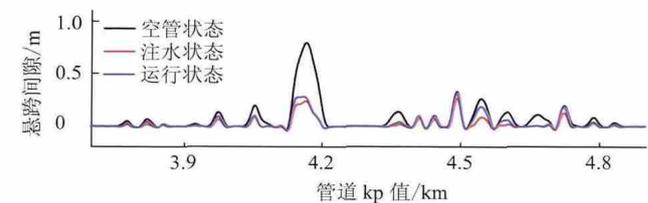
针对以上3种工况进行不平整度分析(图4)。为了验证模拟结果,对比了空管工况下计算的间隙比与ROV调查结果(图4b),图中正的间隙比表示海管与底床分离,可见悬跨两端和悬跨高度等数据的吻合度相当好。依据不同工况下内压、温度以及内流密度造



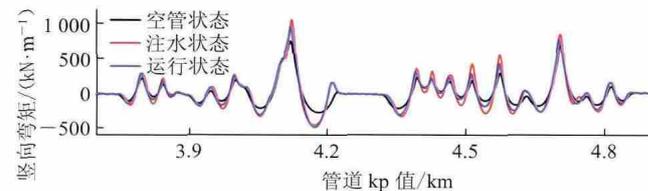
(a)不同工况下海管波形及底床形态



(b)空管工况下海管悬跨间隙模拟结果与ROV调查结果对比



(c)不同工况下悬跨间隙



(d)不同工况下海管弯矩分布

图4 南海某段海管不平整度分析结果

成的悬跨形态变化(图 4c、图 4d),可知空管工况下悬跨高度最大,悬跨长度也相应最大。在注水工况下,悬跨高度最小,对应的悬跨长度也减小。运行工况居于注水工况与空管工况之间。相应地,空管工况下管道弯矩最小,注水工况下弯矩最大。管道变形越剧烈,与底床贴合度越好,间隙比越小,对应的悬跨长高越小,弯矩也越大,因此图 4c 中管道间隙比与图 4d 中弯矩分布是吻合的。

进一步对比模拟结果和 ROV 调查数据。统计出 10 km 的计算结果发现,模拟结果中长度大于 10 m 的悬跨个数为 107,而 ROV 调查结果筛选得到的对应个数为 103。根据悬跨长度与高度的统计结果(图 5),模拟得到的悬跨长度和高度分布与 ROV 调查数据很接近,但仍然存在一些误差,其可能原因有以下几点:

数值模拟时采用的底床高程分布取自 ROV 调查资料,此分布为海管铺设后的高程,与铺设前存在一定差异;模拟时采用的底床波纹信息取自多波束扫描结果,数据本身误差较大,也可能带来一些误差;实际铺设过程中的铺设角度、海况、铺管船速度等参数均将影响铺设后海管状态,模拟时很难把握;ROV 调查精度为 10 cm 所致。尽管如此,模拟结果中捕捉到的

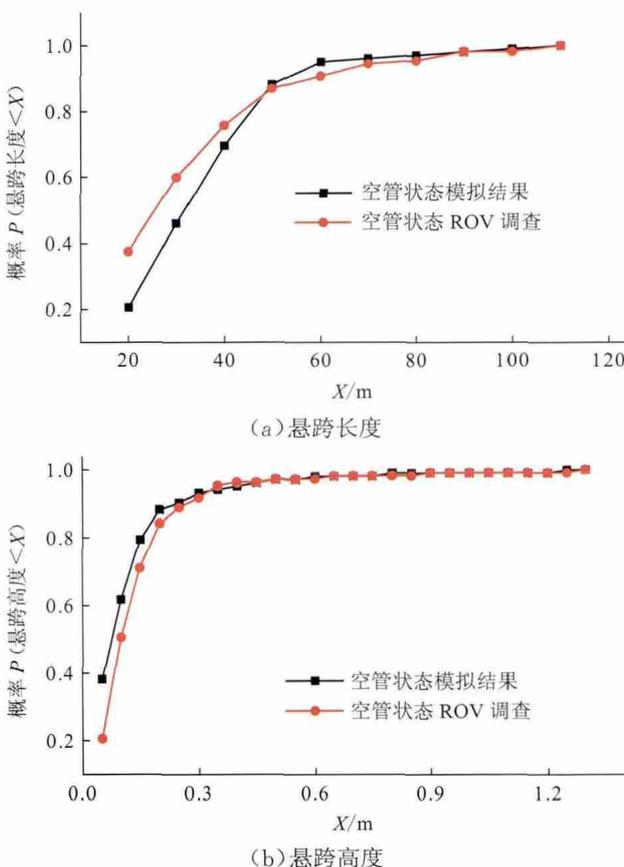


图 5 悬跨长高分布计算结果与 ROV 调查结果对比

海管悬跨起点、终点,海管悬跨高度以及悬跨海管形态等主要特征与 ROV 调查结果基本一致,在工程上是完全可以接受的。

此外,统计了不同 kp 值区间内悬跨长度与悬跨面积(图 6),结果显示不同工况下悬跨长度和悬跨面积变化很大。以 kp2~kp4 的 2 km 管道为例,空管工况下悬跨段总长度为 0.98 km,悬跨面积约为 113 m<sup>2</sup>。在注水工况下,随着管道浮重增加,悬跨管道变形加剧,对应值分别降至 0.59 km 和 43 m<sup>2</sup>。在运行工况下,随着浮重减小,内压升高,悬跨管道变形有一些回覆,对应的悬跨长度与面积分别又增至 0.75 km 和 56 m<sup>2</sup>。

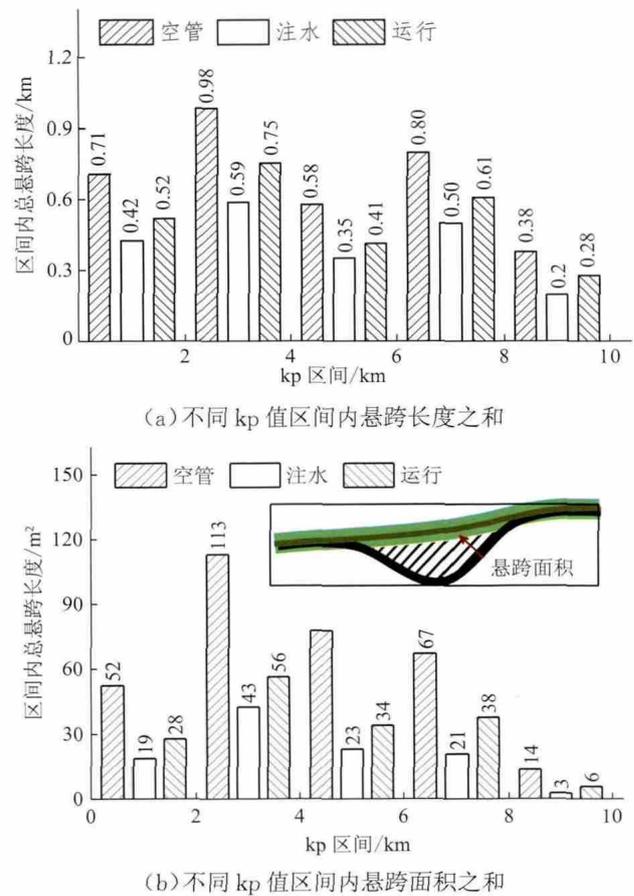


图 6 不同工况下悬跨长度与悬跨面积分区统计结果

实际工程中,ROV 调查只能得到某种工况下的悬跨状态,如本文采用的 ROV 调查数据是在铺设后立即进行的第一次调查,工况为空管(as-laid)。3 种不同工况下海管的悬跨长度、高度以及管道弯矩分布等均有很大变化,对悬跨疲劳寿命及可靠度有很大影响,正如图 7 所示的 kp4.4 至 kp4.8 管段地形与 3 种工况下管道弯矩分布的对应关系。

将崎岖度定义为底床特征高度与特征长度之比。考虑 10 km 内 34 处崎岖点,计算崎岖度与弯矩的统计

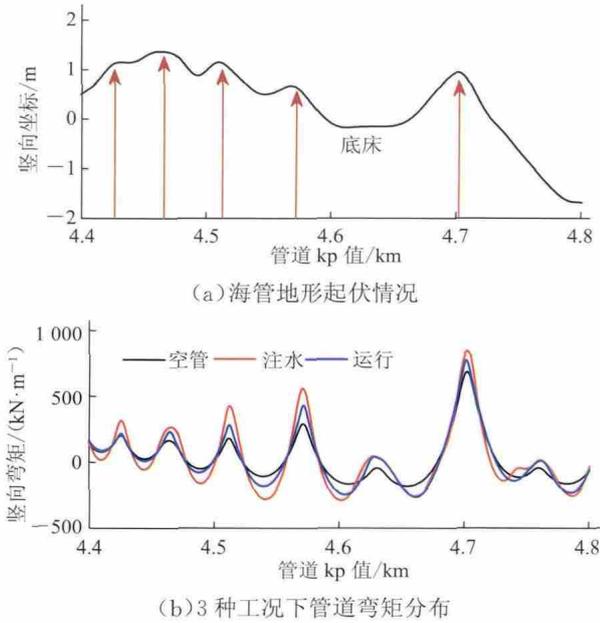
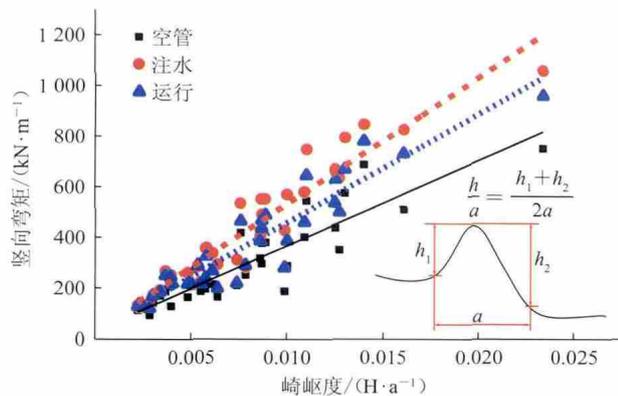


图7 地形起伏与管道弯矩分布的对应关系

关系(图8)。3种工况下崎岖度与弯矩基本上满足线性关系,这一线性关系可以用于评估管道的弯矩分布。对于不同管道参数、底床性质和工况参数,斜率虽然不同,但规律一致。在进行管道路由设计和管道安全评估时,可以使用该方法进行模拟,得到管道弯矩与崎岖度的关系,从而为路由选择或管道评估提供依据。



2.2 危险悬跨

计算3种工况下悬跨海管的跨长分布(图9a),以DNV规范<sup>[2]</sup>计算最大允许悬跨长度作为临界值判断悬跨海管的安全状态。可见,从kp3.7至kp4.9,共有两处危险悬跨,分别为悬跨8和悬跨13。在3种工况下,悬跨8的跨长均大于对应工况下的最大允许跨长,而悬跨13只有在运行工况下跨长大于最大允许跨长,在其他两种工况下则是安全的,说明根据某一工况下的ROV调查资料难以判断管道在所有工况下的安全状态。

根据对应于悬跨长度的各悬跨高度分布(图9b),悬跨高度的变化规律与图6中悬跨长度及悬跨面积的变化规律是一致的。除了悬跨8在空管工况下外,所有悬跨高度均小于0.5m,说明这段管道虽然悬跨密集,但管道走向与地形走向贴合较好,若采用适当的开挖治理方案,可达到较好的治理效果。

参照海管所处海区海况参数,根据DNV-RP-F105计算得到悬跨疲劳寿命随悬跨长度和悬跨间隙比的变化情况(图10),据此插值计算得到所有悬跨疲劳寿命,并标注于图9c中,疲劳寿命大于100年的以100年计。可见,悬跨8最危险,疲劳寿命为0,悬跨13的疲劳寿命为49.5年,说明悬跨8的危险等级最高,需要马上治理,而悬跨13的危险等级较低,虽然运行工况下悬跨长度大于最大允许跨长,需要治理但并不急迫。

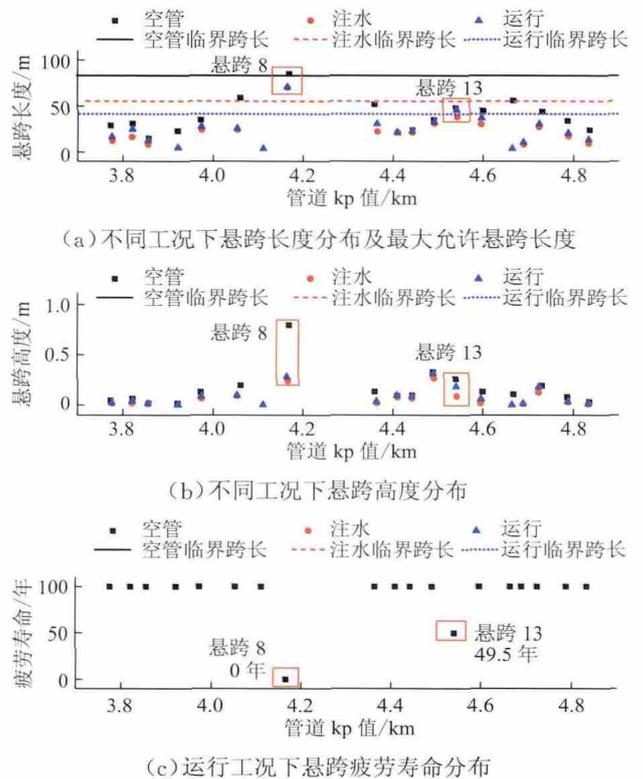
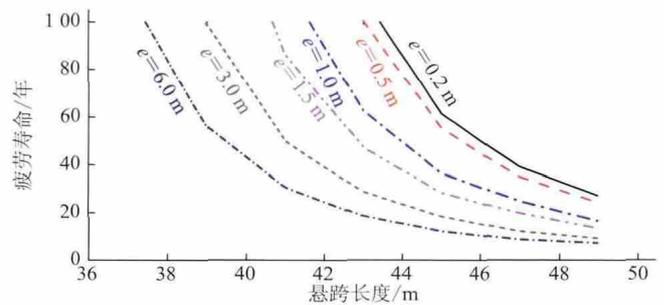


图9 悬跨长度、高度及疲劳寿命分布情况



### 2.3 悬跨治理

最常用的治理危险悬跨处理方式有抛物法、机械支撑法、加装 VIV 抑制装置和开挖治理法等<sup>[1]</sup>。其中开挖治理法(图 11)比较方便适用。开挖治理法用高压水流冲开悬跨跨肩的突起,使海管在重力作用下自然下垂与底床接触从而消除悬跨。这种方法若使用得当可以明显减小悬跨段海管弯矩分布,并有效阻止二次冲刷的发生。同时该方法无需从陆地运送施工材料,施工速度很快<sup>[24]</sup>。

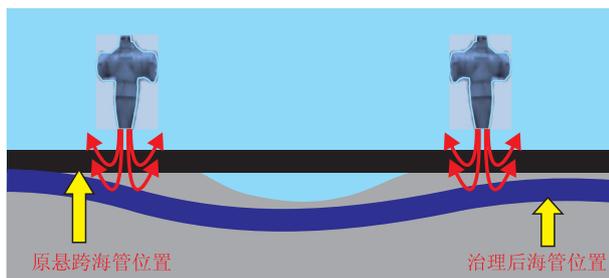


图 11 悬跨海管开挖治理示意图<sup>[24]</sup>

针对图 9 中出现的两处危险悬跨(悬跨 8 和悬跨 13)模拟悬跨开挖治理后的悬跨状态。根据图 12a 中原始底床与治理后底床的高程差,可知治理所需的施工点位置及冲沟深度等信息,悬跨 8 开挖起始点  $k_p$  值和高程为(4.043 km 和 0.29 m),结束点  $k_p$  值和高程为(4.214 km 和 -1.32 m),悬跨 13 起始点和结束点  $k_p$  值、高程分别为(4.430 km, 1.16 m)和(4.580 km, 0.44 m),在开挖起始点与结束点之间,开挖后底床预期保持为直线。悬跨 8 开挖点在开挖前的弯矩最大值为 945  $kN \cdot m$ ,开挖后减小为 202  $kN \cdot m$ ,悬跨 13 开挖点在开挖前的弯矩最大值为 429  $kN \cdot m$ ,开挖后减小为 290  $kN \cdot m$ ,说明开挖治理方法能有效消除危险悬跨,同时显著减小悬跨管道弯矩分布(图 12b)。

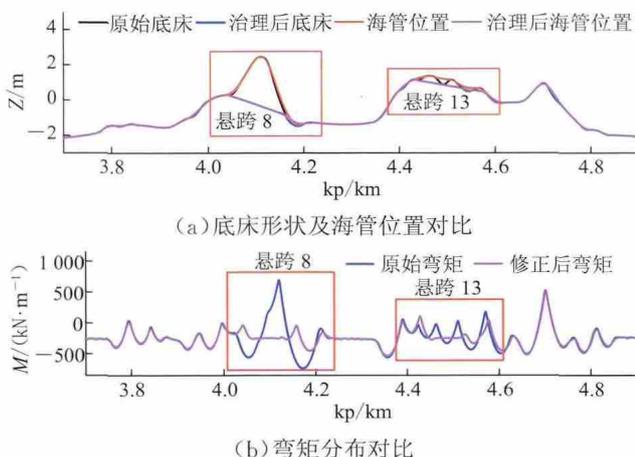


图 12 Operational 工况下治理前后悬跨对比

### 3 结论

介绍了一种基于向量式有限元方法的海管不平整度分析新方法。该方法求解结构响应过程中不生成总体矩阵,直接用牛顿第二定律控制结点运动,因此具有拉格朗日体系的优点,很容易与管土耦合宏单元结合,并且利于并行计算。基于该方法,开发了并行管土耦合海管不平整度分析软件,并模拟了我国南海北部海域某段管道,计算结果与 ROV 调查结果吻合度良好,并且通过统计分析,讨论了 3 种工况对悬跨特征及管道弯矩的影响,进而提出了治理危险悬跨的方案。

#### 参考文献：

- [1] 赵党,李秀锋,冯现洪,等.海底管道不平整度分析[J].舰船科学技术,2014,36(2):112-116.  
ZHAO D,LI X F,FENG X H,et al. Research on calculation for bottom roughness of subsea pipeline[J]. Ship Science and Technology,2014,36(2):112-116.
- [2] VERITAS D N. Free spanning pipelines :DNV-RP-F105-2006[S]. Oslo :DNV,2006 :14-15.
- [3] LARSEN C M,KOUSHAN K,PASSANO E. Frequency and time domain analysis of vortex induced vibrations for free span pipelines[C]. Oslo :ASME 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering,2002 :103-111.
- [4] KRISTOFFERSEN A S,ASKLUND P O,NYSTRØM P R. Pipe-in-pipe global buckling and trawl design on uneven seabed[C]. Rhodes :The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference,2012 :166-172.
- [5] SOREIDE T,KVARME S O,PAULSEN G. Pipeline Expansion on Uneven Seabed[C]. Seoul :The Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference,2005 :38-43.
- [6] 熊海荣. SAGE PROFILE 软件在海底管道跨越分析中的应用[J].中国造船,2009,50(A11):319-324.  
XIONG H R. Application of SAGE PROFILE software to submarine pipeline's crossing analysis[J]. Shipbuilding of China,2009,50(A11):319-324.
- [7] SÆVIK S. SIMLA-Theory manual[M]. Trondheim :Norwegian Marine Technology Research Centre(MARINTEK),2008 :1-14.
- [8] PEREIRA A,BOMFIMSILVA C,FRANCO L,et al. In-place free span assessment using finite element analysis[C]. Estoril :

- ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering 2008 :191-196.
- [9] 王勖成. 有限单元法 [M]. 北京 :清华大学出版社 2003 545-546.  
WANG X C. Finite element method[M]. Beijing :Tsinghua University Press 2003 545-546.
- [10] TING E C ,SHIH C ,WANG Y K. Fundamentals of a vector form intrinsic finite element :Part II. Plane solid elements[J]. Journal of Mechanics 2004 20( 2 ):123-132.
- [11] TING E C ,SHIH C ,WANG Y K. Fundamentals of a vector form intrinsic finite element :Part I. Basic procedure and a plane frame element[J]. Journal of Mechanics 2004 20( 2 ):113-122.
- [12] SHIH C ,WANG Y K ,TING E C. Fundamentals of a vector form intrinsic finite element :Part III. Convected material frame and examples[J]. Journal of Mechanics 2004 20( 2 ):133-143.
- [13] NIELSEN F G ,KVARME S ,SØREIDE T. VIV response of long free spanning pipelines[C]. Oslo 21th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering ( OMAE ) 2002 :121-129.
- [14] HONG Z S ,LIU S Y ,LIU Z F. A note on soil structure resistance of natural marine deposits[J]. China Ocean Engineering 2004 ,18( 2 ) 321-326.
- [15] LAMBRAKOS K. Marine pipeline soil friction coefficients from in-situ testing[J]. Ocean engineering ,1985 ,12( 2 ):131-150.
- [16] LYONS C. Soil resistance to lateral sliding of marine pipelines[C]. Dallas :Offshore Technology Conference ,1973 :479-484.
- [17] WANTLAND G ,O'NEILL M ,REESE L ,et al. Lateral stability of pipelines in clay[C]. Houston :Offshore Technology Conference ,1979 :1025-1034.
- [18] YOUSSEF B S ,CASSIDY M J ,TIAN Y. Application of statistical analysis techniques to pipeline on-bottom stability analysis[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 2013 ,135( 3 ):75-88.
- [19] TIAN Y ,CASSIDY M J. The challenge of numerically implementing numerous force-resultant models in the stability analysis of long on-bottom pipelines[J]. Computers and Geotechnics 2010 37( 1 ) 216-232.
- [20] TIAN Y ,CASSIDY M J. Pipe-soil interaction analysis with a three-dimensional macroelement model[C]. Osaka :The Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference 2009 :461-468.
- [21] XU L ,LIN M. Integrate pipe-soil interaction model with the vector form intrinsic finite element method-nonlinear analysis of free-span[C]. Busan :The Twenty-fourth International Offshore and Polar Engineering Conference 2014 :72-79.
- [22] YUAN F ,LI L ,GUO Z ,et al. Landslide impact on submarine pipelines :analytical and numerical analysis[J]. Journal of Engineering Mechanics 2014 ,141( 2 ):109-119.
- [23] 丁承先 ,段元锋 ,吴东岳 . 向量式结构力学[M]. 北京 :科学出版社 2012 34-75.  
DING C X ,DUAN Y F ,WU D Y. Vector mechanics of structures[M]. Beijing :Science Press 2012 34-75.
- [24] SIVANESAN K ,MURPHY G ,THUSYANTHAN N I. Free span rectification by pipeline lowering( PL )method[C]. Klumpur :Offshore Technology Conference-Asia 2014 :1-9.
- (收稿日期 2015-07-23 ;修回日期 2015-12-25 ;编辑 关中原)

基金项目 :国家高技术研究发展计划( 863 计划)资助项目“ 复杂环境下海底管线悬跨及其安全技术研究 ” 2006AA09Z301。

作者简介 :许雷阁 ,男 ,硕博连读在读研究生 ,1989 年生 ,2010 年毕业于华北水利水电大学工程力学专业 ,现主要从事长输油气管道力学分析及安全预警技术的研究工作。地址 :北京市海淀区北四环西路 15 号 ,100190。电话 :15110173161 Email :xuleige@yeah.net

通讯作者 :林緬 ,女 ,研究员 ,博导 ,1960 年生 ,2000 年博士毕业于中国科学院力学研究所流体力学专业 ,现主要从事长输油气管道安全预警、非常规油气开采、海底沙波运移和近岸水环境污染等方面的研究工作。地址 :北京市海淀区北四环西路 15 号 邮编 100190。电话 :010-82544206 Email :linmian@imech.ac.cn