



# 液体散货码头管线跨距计算方法研究

吕朝旭, 白云香

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 液体散货码头装卸货种多为易燃、有毒、腐蚀性介质, 管线一般多达数十根, 通常利用管架布设于水工结构上, 管线跨距即管架间距取值, 直接影响管线敷设安全性和码头结构方案。目前码头管线跨距计算主要借鉴石化领域相关方法, 但因应用场景存在较大差异, 导致计算结果相较于码头实际工况偏差较大, 以致投资浪费或安全余量不足。针对上述问题, 基于三弯矩方程, 建立多种管道跨距基本模型, 通过对比、分析, 以五等跨管道模型为码头管线跨距计算基本模型, 同时结合码头管线特点对跨距关键计算参数进行适应性研究, 提出了适用于液体散货码头的管线跨距改进计算方法。通过与现有石化领域常见方法多工况计算结果进行比较, 得出改进计算方法在保证管线敷设安全性的同时, 提高了管线性能利用率, 可将管道允许最大跨距提升 6.22%~14.01%, 有效减少管架及水工排架个数, 节省码头工程投资, 特别是对水上长距离引桥管廊, 效果更加显著。

**关键词:** 液体散货码头; 管线跨距; 五等跨管道模型; 改进计算方法; 应力

中图分类号: U652.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)03-0057-08

## Research on pipe span calculation method for liquid bulk cargo terminal

LYU Zhaoxu, BAI Yunxiang

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** Cargoes loaded and unloaded at the liquid bulk terminal are mostly flammable, toxic and corrosive. Liquid bulk terminals are typically equipped with dozens of pipes, which are arranged on pipe racks above hydraulic structures. The pipe span, which refers to the spacing between pipe racks, is closely related to the safety of pipe laying and the structural of the scheme of the terminal structure. Currently, the terminal pipe span calculation mainly rely on methods related to the petrochemical industry. However, due to significant differences in application scenarios, the calculation results often deviate greatly from the actual operating conditions of the terminal, leading to investment waste or potential safety hazards. To solve above issues, various basic pipe span models are established based on the three-moment equation. Through comparison and analysis, the five-equal span pipe model is selected as the basic model for terminal pipe span calculation. Meanwhile, adaptive research is conducted on key calculation parameters of pipe spans in combination with characteristics of terminal pipes. Based on above research, this paper propose an improved calculation method for pipe spans which suitable for liquid bulk terminal. Compared with the calculation results under multiple conditions using common methods in the petrochemical industry, the improved calculation method can improve the performance utilization rate of pipe while ensuring the safety of pipe. It can increase the maximum allowable pipe span by 6.22%~14.01%, effectively reduce the number of pipe racks and bents, and save investment in terminal engineering, especially for long-distance pipe gallery on water.

**Keywords:** liquid bulk cargo terminal; pipe span; five-equal span pipe model; improved calculation method; stress

收稿日期: 2025-05-29 录用日期: 2025-06-26

作者简介: 吕朝旭(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事液体散货码头装卸工艺设计工作。

液体散货码头主要为后方石化企业提供原料及产成品的上下水服务,装卸货种多为高压、易燃、高毒、腐蚀性介质。码头管线作为连接船方和后方石化企业的重要运输通道和核心安全屏障,其设计及布置必须要保证各种工况下管道的安全运行<sup>[1-3]</sup>。同时,为充分利用岸线资源,码头通常布置多个装卸点,管线集中利用管架布设于水工排架上方,海上成桩的成本是陆域的数倍,因此,码头管线跨距的大小直接决定了管线敷设的安全性和经济性。

目前,国内常见管道跨距计算方法主要基于三等跨管道模型或无限跨管道模型,相关研究主要集中在石化领域<sup>[4-5]</sup>。岳凡等<sup>[6]</sup>对化工领域和核电领域管道跨距不同计算参数的影响进行了对比,研究发现使用同一计算方法时,管道挠度、管线荷载的不同选取对计算结果影响显著。郑彦渊<sup>[7]</sup>基于常见的石化管道跨距计算方法,对影响管道跨距的关键因素进行研究,提出加大管径及壁厚、增加加强板和采用拱形管等3种增加管道跨距的措施。魏红彤等<sup>[8]</sup>采用CAESARII软件对码头管线应力进行了研究,结果表明管道应力同管道布置方式和补偿方式密切相关。

液体散货码头受限于码头水工结构特点,单段管道多为连续5~15跨结构,同时码头管线设计特点及外部环境同石化企业差异明显,导致管线跨距关键计算参数选取时考虑因素不同,直接参照现有石化领域计算方法,跨距计算值相较码头实际工况可能偏离较多,导致安全风险考虑不足或工程投资过度。

为解决液体散货码头管线跨距计算缺乏针对性计算方法的问题,保证码头管线敷设的安全性和经济性,本文基于三弯矩基本力学方程,结合

液体散货码头管架典型布置特点,对多种管道跨距基本模型进行对比、分析,进而建立了液体散货码头五等跨管道基本模型,同时对管道跨距关键计算参数进行适应性改造,提出液体散货码头管线跨距计算方法,以期在保证管道敷设安全的同时,可以有效提高管道敷设经济性。

## 1 管道跨距基本模型

对液体散货码头管道强度及刚度校核,实际就是保证管道最大跨距符合强度和维持管道形态要求,即在管道系统自重和管道内压的作用下,管道的弯曲正应力和最大挠度满足限值要求。

### 1.1 液体化工码头管道跨距基本模型

液体化工码头装卸点多且靠泊船型组合复杂,为提高码头作业效率,码头平面形式多为连片布置。大型油码头、LNG(liquefied natural gas,液化天然气)码头靠泊船型较大、货种相对单一,码头平面形式多为蝶形布置,通过引桥连接码头平台及后方陆域。

无论是连片式码头还是蝶形码头,码头平台尺度及引桥长度均远超管道允许跨距。为满足管线热补偿要求,管线通常布置多个热补偿段,但同陆域石化企业不同,受限于水工结构段特点,码头管线单个热补偿段长度在70~120 m,多为连续5~15跨结构,一般包括多榀滑动管架、2~4榀导向管架和2榀固定管架。液体散货码头管架典型布置见图1。

为研究液体散货码头工艺管线跨距计算方法,本文基于材料力学基本原理和码头管架布置原则,结合液体散货码头管架布置特点,建立3种典型管道跨距基本模型:三等跨管道(模型1)、五等跨管道(模型2)和无限跨管道(模型3),见图2。

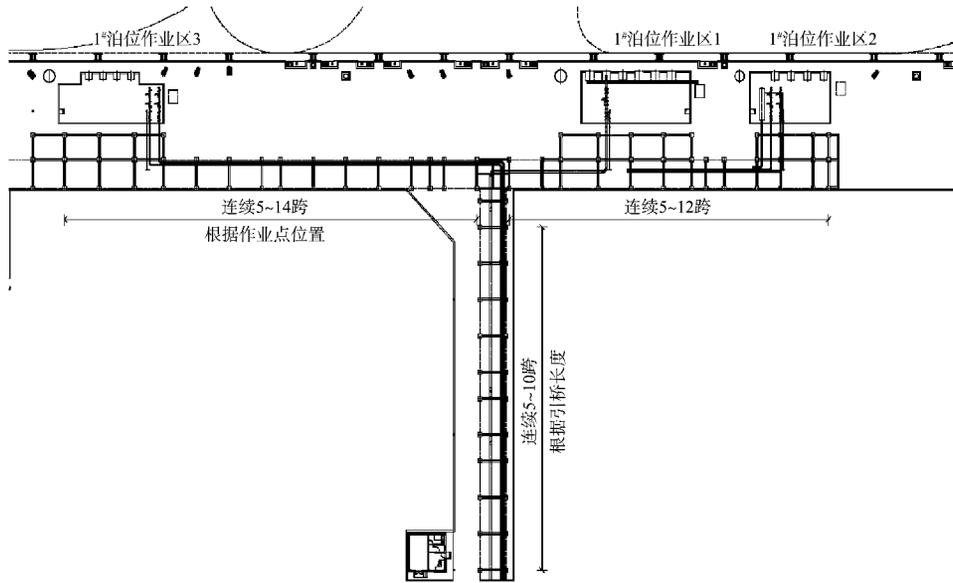
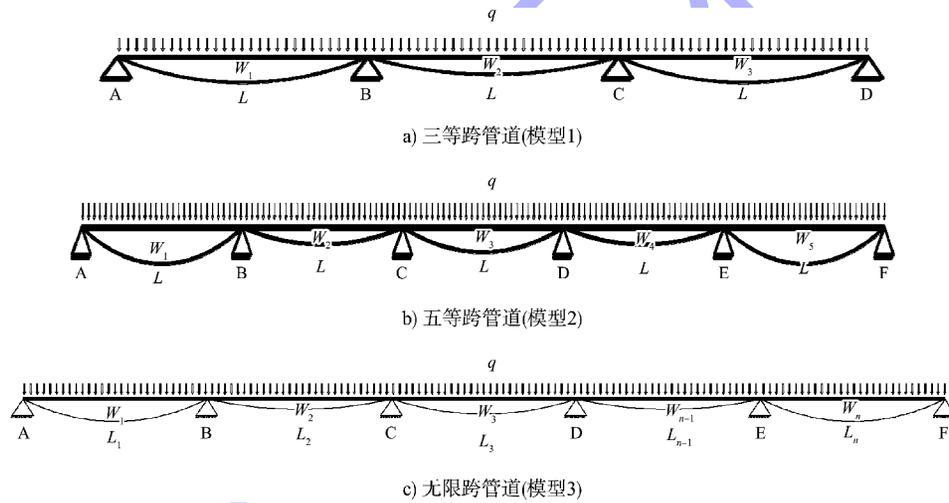


图 1 液体散货码头管架典型布置

Fig. 1 Typical layout of pipe racks at liquid bulk cargo terminals



注:  $L_i$  为每跨间管道长度, m;  $L_1=L_2=L_n$ ,  $n$  趋向于无穷;  $W_i$  为每跨间管道最大挠度, mm;  $q$  为管道及管内介质质量导致的均布荷载, N/m; A~F 为不同位置处管道支座编号。

图 2 典型管道跨距基本模型

Fig. 2 Typical basic models of pipe span

### 1.2 管道强度基本计算方程

根据结构静力学<sup>[9]</sup>, 管道若要抵抗外力作用下的破坏变形, 其最大弯矩处产生的管道轴向应力  $\sigma_{\max}$  必须小于管材的许用应力  $[\sigma]_t$ , 即:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \leq [\sigma]_t \quad (1)$$

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{d} \quad (2)$$

式中:  $M_{\max}$  为管道承受的最大弯矩, N·m;  $W$  为抗

弯截面系数,  $\text{mm}^3$ ;  $D$  为管道外径, mm;  $d$  为管道内径, mm。

图 2 中 3 种模型为结构自由度大于 3 的超静定结构, 为求解管道所受最大弯矩, 建立三弯矩方程:

$$M_{i-1} \frac{L_i}{I_i} + 2M_i \left( \frac{L_i}{I_i} + \frac{L_{i+1}}{I_{i+1}} \right) + M_{i+1} \frac{L_{i+1}}{I_{i+1}} = -6 \left( \frac{B_{\phi,i}}{I_i} + \frac{A_{\phi,i+1}}{I_{i+1}} \right) \quad (3)$$

假设各跨间管道惯性矩  $I$  和跨距  $L$  相同, 式(3)可

简化为:

$$M_{i-1} + 4M_i + M_{i+1} = -\frac{6}{L}(B_{\phi,i} + A_{\phi,i+1}) \quad (4)$$

式中:  $M_i$  为管道支架  $i$  处承受的弯矩;  $A_{\phi}/B_{\phi}$  表示支座虚反力,  $A_{\phi} = qL^3/24$ 、 $B_{\phi} = qL^3/24$ ,  $\text{N}\cdot\text{m}^2$ 。

为简化, 令  $K_{\phi} = A_{\phi} + B_{\phi} = qL^3/12$ , 并代入式(4), 可得管线各跨最大弯矩计算公式。

模型 1:

$$\begin{cases} M_B = -\frac{2}{5L}(4K_{\phi,B} - K_{\phi,C}) \\ M_C = \frac{2}{5L}(K_{\phi,B} - 4K_{\phi,C}) \end{cases} \quad (5)$$

模型 2:

$$\begin{cases} M_B = -\frac{6}{209L}(56K_{\phi,B} - 15K_{\phi,C} + 4K_{\phi,D} - K_{\phi,E}) \\ M_C = \frac{6}{209L}(15K_{\phi,B} - 60K_{\phi,C} + 16K_{\phi,D} - 4K_{\phi,E}) \\ M_D = -\frac{6}{209L}(4K_{\phi,B} - 16K_{\phi,C} + 60K_{\phi,D} - 15K_{\phi,E}) \\ M_E = \frac{6}{209L}(K_{\phi,B} - 4K_{\phi,C} + 15K_{\phi,D} - 56K_{\phi,E}) \end{cases} \quad (6)$$

根据式(5)、(6), 模型 1 管道弯矩最大处位于支座 B 和 C 处,  $M_{\max}$  为  $qL^2/10$ ; 模型 2 管道弯矩最大处位于支座 B 和 E 处,  $M_{\max}$  为  $0.105qL^2$ ; 根据式(4), 模型 3 管道最大弯矩  $M_{\max}$  为  $0.083qL^2$ ; 将相关值代入式(1)可得:

$$\begin{cases} L_{1,a,\max} = \sqrt{\frac{10[\sigma]_t W}{q}} \\ L_{2,a,\max} = \sqrt{\frac{[\sigma]_t W}{0.105q}} \\ L_{3,a,\max} = \sqrt{\frac{[\sigma]_t W}{0.083q}} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $I$  为管道惯性矩,  $I = \pi(D^4 - d^4)/64$ ,  $\text{mm}^4$ ;  $L_{1,a,\max} \sim L_{3,a,\max}$  分别表示模型 1~3 强度条件允许的管线理论最大跨距,  $\text{m}$ 。

### 1.3 管道刚度分析

结构刚度即在荷载作用下结构有足够的抵抗变形、保持原有平衡形态的能力。对于管道而言, 主要是保证其弯曲变形抵抗能力, 控制管道最大挠度  $f_{\max}$  小于结构允许挠度  $[f]$ 。

刚度条件允许的管道理论最大跨距可由下式计算:

$$L_{b,\max} = \sqrt[4]{\frac{100EI[f]}{kq}} \quad (8)$$

式中:  $k$  为挠度系数, 同管道跨距基本模型有关, 模型 1 中  $k_{\max}$  取 0.677, 模型 2 中  $k_{\max}$  取 0.644, 模型 3 中  $k_{\max}$  取 0.260;  $E$  为管材弹性模量,  $\text{MPa}$ ;  $[f]$  为管道最大允许挠度,  $\text{mm}$ ;  $L_{b,\max}$  为刚度条件下管线最大允许跨距,  $\text{m}$ 。

### 1.4 管道基本跨距计算模型选取

为保证管线运行的安全性, 管道最大跨距需同时满足强度、刚度要求, 即管线跨距  $\leq \min(L_{a,\max}, L_{b,\max})$ 。为便于比较不同模型计算差值, 令  $X = \sqrt{[\sigma]_t W/q}$ 、 $Y = \sqrt[4]{100EI[f]/q}$ , 并代入式(7)、(8)中, 得到模型 1~3 的理论最大允许跨距, 见表 1。由表可知, 模型 3 计算值相较其他模型高出较多(10.0%~25.4%), 模型 1、2 计算值较为接近, 但强度条件下, 模型 1 计算值高于模型 2。

表 1 不同管道跨距基本模型最大允许跨距对比  
Tab.1 Comparison of maximum allowable span for different basic models of pipe span

模型	$L_{a,\max}$	较模型 2/%	$L_{b,\max}$	较模型 2/%
1	3.162X	2.5	1.102Y	-1.3
2	3.086X	-	1.116Y	-
3	3.471X	12.5	1.400Y	25.4

同一般结构件仅作为支承件不同, 液体散货码头管线主要用于危险介质管输作业, 除满足重力荷载外, 还需承受管道内部压力, 故对于强度要求更高。同时考虑到码头管架典型布置特点, 本文选择模型 2 作为液体散货码头管道跨距的基本计算模型。

## 2 石化行业管道跨距计算方法分析

目前石化行业管道跨距计算方法主要基于模型1或模型3,再结合应用场景考虑壁厚附加量 $C$ 、管材许用应力 $[\sigma]_t$ 、允许挠度 $[f]$ 等取值后进行管道强度及刚度计算。

### 2.1 方法1

该方法基于模型1,主要应用于石油化工钢制管道支吊架的设计,偏重于管架设计。

#### 2.1.1 强度计算

关键参数选取。1)管道壁厚附加量 $C$ :考虑管道的厚度负偏差 $C_1$ 及壁厚腐蚀余量 $C_2$ , $C=C_1+C_2$ ,管道壁厚计算时应扣除壁厚附加量,即计算壁厚取 $\delta-C$ , $\delta$ 为名义壁厚;2) $[\sigma]_t$ :工艺管道运行还需考虑内压产生的轴向应力 $\sigma_z=Pd/(4\delta)$ ,该方法直接规定由管道垂直持续荷载在管壁中引起的一次轴向应力不超过额定许用应力的一半,即 $[\sigma]_t$ 计算值取规范值的0.5倍。

将上述参数代入式(7),可得:

$$L_{a,\max} = \sqrt{\frac{10 \times 0.5 [\sigma]_t \cdot \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - (D - 2\delta + 2C)^4}{(D - 2\delta + 2C)}}{q}} \\ = 0.022 \sqrt{\frac{[\sigma]_t \cdot \frac{D^4 - (D - 2\delta + 2C)^4}{D - 2\delta + 2C}}{q}} \quad (9)$$

式中: $P$ 为设计压力,MPa。

#### 2.1.2 刚度计算

关键参数选取:管道挠度系数 $k$ 按模型1取最大值0.677;管道挠度 $[f]$ 最大值取38 mm。

将上述参数代入式(7),可得:

$$L_{b,\max} = 0.023 \sqrt[4]{\frac{E}{q} \cdot [D^4 - (D - 2\delta + 2C)^4]} \quad (10)$$

### 2.2 方法2

该方法基于模型3,主要适用于石油化工、煤化工企业全厂性工艺及热力管道设计。全厂性管廊是厂区管线的主通道,一般由数百个以上管架组成,管道跨距对于管廊造价影响较大,故该方法更偏重于管线设计。

#### 2.2.1 强度计算

关键参数选取。1) $C$ :根据管道材质和制造方

式进行细分,无缝钢管 $C=(C_1+C_2)/2$ ,螺旋焊缝钢管 $C=C_1/2+C_2$ ;2) $[\sigma]_t$ :管壁除了承受自重导致的弯曲应力之外还要承受内压产生的轴向应力 $\sigma_z=Pd/(4\delta)$ ,另外考虑到大口径管道多为焊接成型,管线许用应力需额外考虑环向缝隙数 $\phi$ (取0.8), $[\sigma]_t$ 计算值取 $0.8\{[\sigma]_t - P[D-2(\delta-C)]/[4(\delta-C)]\}$ 。

将上述参数代入式(7),可得:

$$L_{a,\max} = 0.058 \sqrt{[\sigma]_t - \frac{P[D-2(\delta-C)]}{4(\delta-C)} \cdot \frac{D^4 - (D - 2\delta + 2C)^4}{(D - 2\delta + 2C)q}} \quad (11)$$

#### 2.2.2 刚度计算

关键参数选取:管道挠度系数 $k$ 按模型3取最大值0.260;管道最大跨距控制挠度 $[f]$ 取 $0.002L$ 。

将上述参数代入式(7),可得:

$$L_{b,\max} = 0.0043 \sqrt[3]{\frac{E[D^4 - (D - 2\delta + 2C)^4]}{q}} \quad (12)$$

## 3 液体散货码头管道跨距计算方法

本文基于模型2,结合码头特点确定关键计算参数取值,提出了针对于液体散货码头管道跨距计算方法(简称改进方法)。

### 3.1 强度计算

关键参数选取。1) $C$ :码头工艺管线所处自然环境恶劣,加之海上管道检维修成本远高于陆上,对管线运行稳定要求更高,需考虑足够的管道附加余量,故取 $C=C_1+C_2$ 。2) $[\sigma]_t$ :同方法1和2,管线除承受重力外,还应能承受管道内压作用,但 $[\sigma]_t$ 计算值的选取同两者存在差异。码头管线口径多在DN200~400 mm,管材多为无缝钢管,仅少量大口径管线为焊接钢管。在充分利用管线承压能力和壁厚富余值的同时,兼顾管材制造工艺影响,确定 $[\sigma]_t$ 计算值为 $\phi[\sigma]_t - P[D-2(\delta-C)]/[4(\delta-C)]$ 。其中无缝钢管 $\phi$ 取1.0,焊接钢管 $\phi$ 根据焊接方式确定<sup>[10-11]</sup>。

将上述参数代入式(7),可得:

$$L_{a,max} = 0.031 \cdot$$

$$\sqrt{\frac{\phi[\sigma]_t - \frac{P[D - 2(\delta - C)]}{4(\delta - C)}}{q} \cdot \frac{D^4 - (D - 2\delta + 2C)^4}{D - 2\delta + 2C}} \quad (13)$$

### 3.2 刚度计算

关键参数选取。1)  $k$ : 模型 2 各跨间挠度系数分别为 0.644(边跨)、0.151、0.315(中心跨)、0.151、0.644(边跨), 若同模型 1 类似采用边跨挠度值, 则刚度条件下管线允许跨距仅为采用中心跨挠度计算值的 0.837 倍, 限制了管道材料性能的发挥。基于此, 挠度系数  $k$  取中心跨挠度系数 0.315, 管道边跨的刚度通过长度折减系数  $s$  保证,  $s$  为边跨长度取值与计算跨度之比; 2)  $[f]$ : 考虑到海边自然条件恶劣, 为避免无脉动管道在风荷载等轻微外界扰动下发生明显振动, 加快管道的疲劳破坏, 需控制管道固有振动频率最低限

值, 管线挠度最大值取 38 mm<sup>[12]</sup>。

将上述参数代入式(8)可得:

$$L_{b,max} = \sqrt[4]{\frac{100EIW_{max}}{kq}} = 0.027 \sqrt[4]{\frac{E}{q} \cdot [D^4 - (D - 2\delta + 2C)^4]} \quad (14)$$

### 4 改进方法计算结果验证

基于液体散货码头常见管线配置, 对上述 3 种方法计算结果进行对比分析, 同时利用应力分析模拟软件 CAESARII 对改进方法计算结果进行验证。

#### 4.1 码头管线计算典型工况

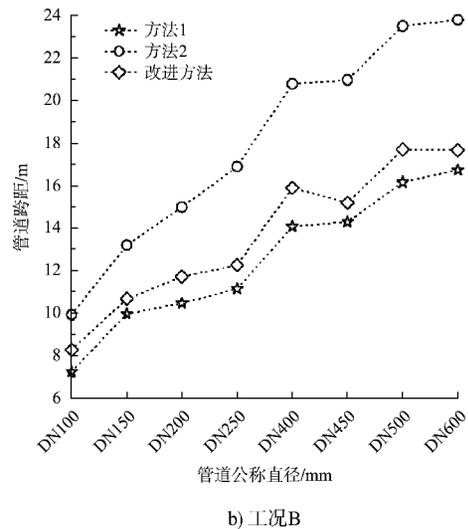
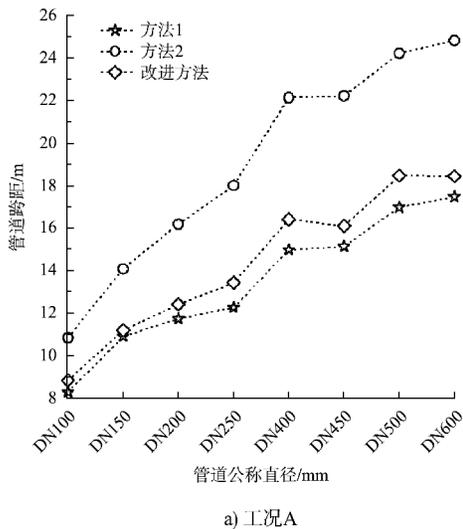
液体散货码头管线典型工况见表 2。

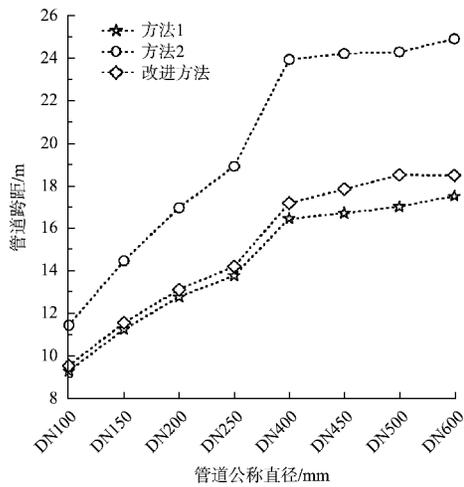
分别使用方法 1、2 及改进方法对上述工况下管道允许最大跨距进行计算, 不同口径管线工况 A~D 下, 各方法管道跨距计算结果见图 3, 各方法管道计算跨距差值结果见图 4。

表 2 码头管线典型工况

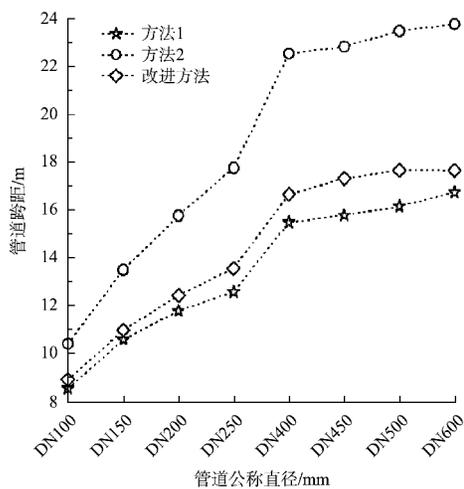
Tab. 2 Typical conditions of terminal pipe

公称直径/ mm	外径/ mm	壁厚 a/mm	壁厚 b/mm	保温厚度/ mm	其他	工况设置
DN100	114.3	4.78	6.02	40	介质密度 1 000 m <sup>3</sup> /h, 设计压力 1.0 MPa, 设计温度 50 °C, 保温材料密度 180 kg/m <sup>3</sup> , C <sub>2</sub> = 1.5 mm, 管径 ≤ DN400 mm、20 <sup>#</sup> 无缝钢管、C <sub>1</sub> = 10%δ, 其余管径为 L245 焊接钢管、φ 取 0.85、C <sub>1</sub> = 12.5%δ	工况 A: 小壁厚(壁厚 a 系列), 不保温; 工况 B: 小壁厚(壁厚 a 系列), 保温; 工况 C: 大壁厚(壁厚 b 系列), 不保温; 工况 D: 大壁厚(壁厚 b 系列), 保温
DN150	168.3	6.35	7.11	40		
DN200	219.1	6.35	7.92	60		
DN250	273.1	6.35	7.80	60		
DN400	406.4	7.92	9.53	60		
DN450	457	7.92	9.53	60		
DN500	508	9.53	9.53	60		
DN600	610	9.53	9.53	60		





c) 工况C



d) 工况D

图 3 3 种方法各工况下计算结果  
Fig. 3 Calculation results of three methods under various working conditions

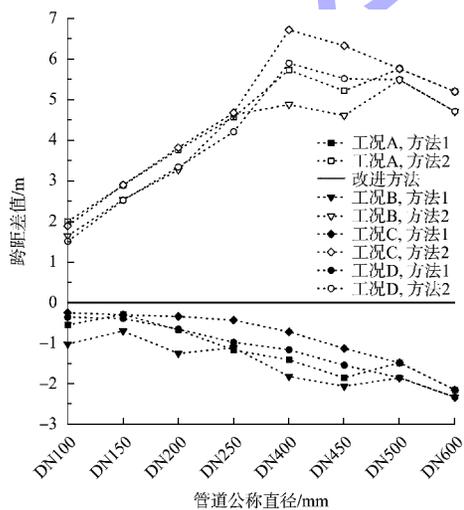


图 4 方法 1、2 较改进方法各工况下计算结果差值  
Fig. 4 Differences in calculation results between method 1, method 2 and improved method under various working conditions

根据图 3、4, 随着管道口径的增加, 3 种方法跨距计算值均随之增加, 由最小值 7.28 m 增加至最大值 24.84 m。方法 2 计算结果明显高于其他方法(1.87 ~ 7.46 m), 结合码头管线布置特点, 风险相对较高, 不建议选用。

改进方法和方法 1 计算结果相对接近, 随着管道口径的增加, 改进计算方法对于管材性能的发挥更充分, 两种方法跨距计算差值由 1.02 增加至 2.33 m, 改进计算方法将计算跨距提升了 6.22% ~ 14.01%, 可以有效优化管架及水工排架数量。

#### 4.2 改进计算方法边跨控制要求

为充分发挥管材性能, 采用改进计算方法进行刚度计算时, 挠度系数取中心跨数值, 对边跨挠度采用折减系数  $s$  来保证管道边跨的结构安全性, 即  $L_{bk} = s \cdot \min(L_{a,max}, L_{b,max})$ 。采用国际通用的管道应力计算软件 CAESARII 对边跨长度的控制要求进行建模分析, 管道模型界面见图 5, 不同折减系数下管道挠度及应力比见图 6。

根据图 6, 当  $s$  在 20% ~ 100% 时, 管道应力比  $\leq 80\%$ , 可以满足管道应力要求, 但当  $s$  取值偏小(20%)或偏大(100%)时, 管道最大挠度会出现大于 38 mm 情况。考虑连续多跨结构每跨均受到相邻跨的牵制作用, 当  $s$  取 100% 时, 由于边跨仅受到单侧相邻跨的牵制作用不足以致最大挠度出现在边跨中心处(42.45 mm), 同理当  $s$  取 20% 时, 边跨较短对其相邻跨的牵制作用不足, 最大挠度出现在其相邻跨中心处(38.04 mm)。

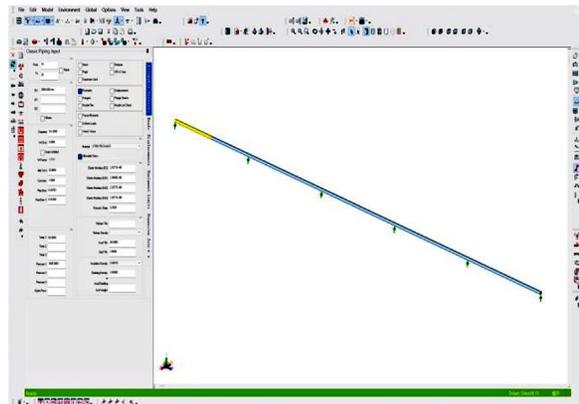
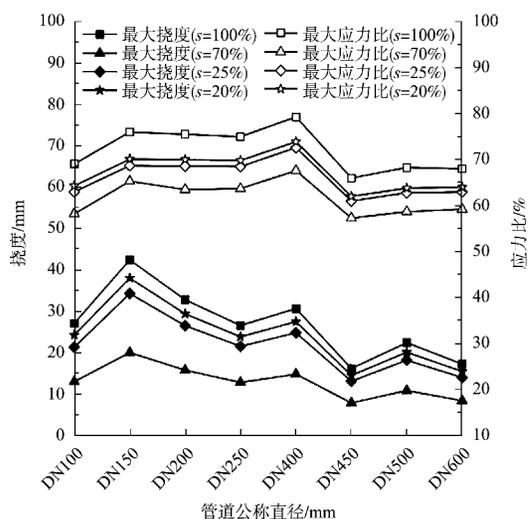


图 5 CAESARII 模型界面  
Fig. 5 Interface of CAESARII model



注：最大应力比为管道模型实际最大计算应力与管道许用应力的比值。

图 6 不同折减系数下管线挠度及应力比  
Fig. 6 Pipe deflection and stress ratio under different reduction coefficients

根据上述结果，当  $s$  取值在 25%~70% 时，即边跨长度  $L_{bk}$  取  $(0.25 \sim 0.70) \min(L_{a,max}, L_{b,max})$  时，可以有效控制管线边跨符合刚度要求。

## 5 结语

1) 相较现有管道计算方法(方法 1 和方法 2)以三等跨和无限跨管道模型为基本模型，改进方法采用五等跨管道模型，可以有效适应液体散货码头管线布置特点。通过多种工况下对比分析，改进方法相较方法 2 可以有效提高管线敷设的安全性；相较方法 1，管材性能发挥更加充分，管线计算跨距提升 6.22%~14.01%，可以有效减少管架及水工排架个数，对水上长距离引桥管廊，造价节约效果尤其明显。

2) 采用改进方法进行跨距计算时，需对管道边跨长度进行控制，边跨长度控制在跨距计算值的 25%~70% 时，可以保证边跨管道符合强度及刚度要求。

## 参考文献:

- [1] 魏红彤, 潘海涛. 大型综合液体散货港口建设特点分析[J]. 水运工程, 2016(S1): 45-49.  
WEI H T, PAN H T. Comparative analysis of comprehensive liquid bulk cargo port construction [J].

Port & waterway engineering, 2016(S1): 45-49.

- [2] 压力管道规范 工业管道 第 3 部分: 设计和计算: GB/T 20801.3—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.  
Pressure piping code: industrial piping: part 3: design and calculation: GB/T 20801.3-2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [3] 工业金属管道设计规范: GB 50316—2000(2008 年版)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.  
Design code for industrial metallic piping (2008): GB 50316-2000[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [4] 石油化工全厂性工艺及热力管道设计规范: SH/T 3108—2017[S]. 北京: 中国石化出版社, 2017.  
Specification for design of interconnecting process and thermal piping in petrochemical industry: SH/T 3108-2017[S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2017.
- [5] 石油化工管道支吊架设计规范: SH/T 3073—2016[S]. 北京: 中国石化出版社, 2016.  
Specification for design of piping support in petrochemical industry: SH/T 3073-2016 [S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2016.
- [6] 岳凡, 何孟夫. 支架跨距在化工和核电项目中的对比分析[J]. 化工设备与管道, 2017, 54(5): 78-82.  
YUE F, HE M F. Comparison and analysis of support spans for chemical and nuclear power engineering projects [J]. Process equipment & piping, 2017, 54(5): 78-82.
- [7] 郑彦渊. 增大管道跨度方法的研究[J]. 管道技术与设备, 2016(2): 8-10.  
ZHE Y Y. Method research of increasing pipe span [J]. Pipeline technique and equipment, 2016(2): 8-10.
- [8] 魏红彤, 白云香, 潘海涛. 液体散货码头大直径工艺管道应力分析[J]. 水运工程, 2011(S1): 96-100.  
WEI H T, BAI Y X, PAN H T. Stress analysis of large-diameter pipelines in liquid bulk cargo dock [J]. Port & waterway engineering, 2011(S1): 96-100.
- [9] 《建筑结构静力计算手册》编写组. 建筑结构静力计算手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.  
Compilation team of *Static Calculation Handbook for Structure*. Static calculation handbook for structure [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998.