

长距离输油管道大落差段工艺优化设计研究

陆 宽 杨轩昊 刘健侠（中国石油工程建设有限公司北京设计分公司，北京 100085）

摘 要：长距离输油管道经过翻越点时，由于系统存在多余的能量，翻越点后大落差段，管内油品的流动状态将发生改变，可能引发水击、振动、气蚀、气液两相流等问题，给管道的安全运行带来一系列的技术和管理难题，因此，需对翻越点后大落差段管道的压力实施有效控制。在对国内外典型大落差输油管道进行调研的基础上，梳理了大落差段工艺措施，提出了长距离、大落差段管道的有效工艺措施，并给出了输油工艺优化方法、具体步骤和优化案例，同时，对减压站工艺设计中过滤系统、安全泄压系统、压力保护系统的设计及减压阀选型提出了建议。

关键词：输油管道；翻越点；大落差；工艺优化；减压站；压力保护

输油管道经过翻越点时，系统中存在着残余的能量，由于大落差的存在，会对管线内部的流体状态造成较大影响，从而引起水击、振动等问题，由于气液两相流等问题的存在，使得管线的安全使用面临着技术与管理上的困难，必须对穿越后大跨度管线的压力进行有效的控制。

1 输油管道大落差段工艺措施

输油管道大落差段的技术措施主要有：设减压站、缩径和增加壁厚、不满流运行和上述方法的组合应用。表1列出了不同的技术措施的优点和缺陷。

表1 输油管道大落差段不同工艺措施优缺点对比

工艺措施	优点	缺点	适应性
不满流运行	不满流运行可降低管道的水击压力；投资低	不利于管道运行调控：局部管段流速高，可能产生冲蚀	不满流长度较短的管道
减压站	消除不满流：降低动压，隔断静压；投资较低	管道运行管理难度大	所有管道
缩径	降低动压	静压问题需增加壁厚来解决：管道设计压力高；清管站多；不能完全消除不满流；投资较高	高程差较小的管道
增加壁厚	操作运行方便	不能完全消除不满流；管道设计压力高，壁厚大；投资最高	高程差不大且长度较短的管道
减压站+缩径等组合	消除不满流；降低动压，隔断静压；投资最低	管道运行管理难度大	所有管道

从表格1可见，不满流运行、缩径和增大壁厚处理的方法，其使用范围是高程差小、不满流小的大型管线，也就是采用以上方法，并不会造成建设成本的大量增加。通过减压站的设置能够有效降低静压和动压，提高管道运行的安全性。通过减压站+缩径的联合使用，则性能会更加优异，不仅能够显著降低压力，又能够降低建设投入，具有较强的

适应性。表2列出了国内外具有代表性的大落差段的技术措施。从表2可知，由于大落差段具有较长的长度和较大的落差，通常采取的工艺措施是设置减压站+缩径组合。

表2 国内外常见管道大落差段设计方案

管道名称	大落差段 高程变化 /m	大落差 段长度 /m	设计方案
加拿大贯山原油管道	1608	48	减小介质流量
库都原油管道	1665	206	增设减压站
刘姚原油管道	650	90	缩小管道管径
石兰原油管道	632	82	增大管道壁厚
三塘湖原油管道	2061	87	增设减压站+缩小管道管径
秘鲁 TgP 管道	4800	120	增设减压站+缩小管道管径
乌都兰原油管道	2478	138	增设减压站+缩小管道管径

2 输油管道大落差段工艺设计优化

2.1 确定管径的边界条件

计算了管径的边界条件，并以最大容许流量和最大流量为依据，分别计算了最小直径和最大直径。

2.1.1 管道最大允许流速的确定

在管道流速超过一定阈值时，就可能造成管道的振动。参考 API RP14E-2007《海上生产平台管道系统的设计和安装》，根据下式进行流速的计算：

$$v_e = \frac{C}{\rho_m} \tag{1}$$

式(1)中： v_e —冲蚀流速，m/s。 C —无量纲常数，在无固体杂质的液体中，在连续运行时，按100计算，在间断运行时，按125计算；在无固相杂质的液体中加入抑制剂或采用防腐的管道时，宜

选用 150~200; 在液体中存在固体物质时, C 的取值应该偏低; 在液体中存在固体杂质和腐蚀性物质时, 如果 C 值为 100, 则应该经常对管线进行检测, 以判断其厚度是否达到了强度指标。 ρ_m —特定操作温度和操作压力下的密度, kg/m^3 。

2.1.2 管道最小允许流速的确定

一是为了保证智能清管机能够边界执行清洁操作, 同时也是为了防止石油中的含水量在管线的低位置堆积。依据《输油管道工程设计规范》的要求, 最小流速不得低于 1.0m/s。

2.2 建立大落差段工艺优化数学模型

该方法目标是使管线工程的总投资达到最少, 其数学模型如下:

$$S_{\min} = \sum_{j=1}^n k_j x_j \quad (2)$$

式(2)中: $S_{\min}$ —总投资, 万美元; x_j —第 j 种管径管道的长度, km; k_j —第 j 种管径单位造价, 万美元/km; n—管径种类。

2.3 约束条件

针对大落差段长度、高程、终点进水压力等指标, 确定了目标函数的限制条件, 并给出了相应的约束条件。

2.3.1 长度约束

各管径管子的长度总和与大落差段的管子全长相等, 也就是:

$$\sum_{j=1}^n x_j = L \quad (3)$$

式(3)中: L—大落差段管道总长度, km。

2.3.2 能量约束

从跨越点到结束的各种管径的管线, 所损失的能量不大于从越过点到终端的最大容许压力水头损耗。

$$\sum_{j=1}^n i_j x_j \leq \Delta H \quad (4)$$

式(4)中: i_j —第 j 种管径管道的水力坡降, m/km; ΔH —最大容许水头损耗, m。

2.3.3 非负约束

由于管道的直径不可能为负数, 则限定条件为:

$$x_j \geq 0 \quad j=1,2,\dots,n \quad (5)$$

依据上述的约束条件, 利用计算机编程, 采用单纯形法进行计算, 最终得到最优的结果。

2.4 确定减压站数量及位置

通过以上三个阶段的优化, 得出了最优管径组合方案, 并从静水压力、站址建设、运营管理等方

面对大落差管线进行了比较, 得出了最优管线的设计压力, 并据此确定了减压站的数目和站址位置。减压站的动水压是设计安全阀的重要依据。

2.5 水击动态模拟分析

通过对管径、设计压力、减压站数目和位置的确定, 对管段的水击动力学进行了分析, 并对管段的管段厚度进行了调整。当管道调整长度过大时, 必须回到第二步, 对最佳管径进行优化计算。

3 典型案例分析

以一个石油运输管线为实例。这条管线的设计输送能力为 $6630\text{m}^3/\text{h}$, 石油密度 958.24kg/m^3 , 管径 1067mm, 最大承载能力 8.0MPa, 高程 3297m, 末站处为 0, 大落差段总长 163km。

首先, 确定管道中最小流速和最大流速的区间, 采用单独的缩径工艺, 从而可以得到管道的最低和最高直径, 即为 813mm 和 1067mm, 在翻越点后可采用的铺设直径有: 813mm、864mm、914mm、965mm、1016mm 和 1067mm。然后, 假设不同管径的铺设长度为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 和 x_6 , 且不同管道对应的单公里铺设成本为 20 万美元、219 万美元、231 万美元、244 万美元、257 万美元和 270 万美元。同时, 还需要对末站进站压力进行限定, 保证不低于 0.70MPa, 则有:

$$S_{\min}=205x_1+219x_2+231x_3+244x_4+257x_5+270x_6$$

$$\begin{cases} x_1+x_2+x_3+x_4+x_5+x_6=163 \\ 25.5x_1+18.9x_2+14.6x_3+11.2x_4+8.7x_5+6.8x_6 \leq 3200 \\ x_j \geq 0 \quad j=1,2,3,4,5,6 \end{cases}$$

对上述的方程进行联立求解, 则计算得到: $x_1=18$, $x_2=145$ 。所以, 可以得到最佳的理论管径组合为 813mm 和 864mm, 相应管径对应的长度分别是 18km 和 145km。

假设大落差段管道设计压力 P 为 8.0MPa, 则可以计算得到最大高程差 $\Delta h_1=P/(\rho_m \times g)=8.0 \times 10^6/(958.24 \times 9.81)=851\text{m}$ 。根据管道高程、里程变化及最大容许高程差等因素, 计算得到建设 4 座中间减压站能够满足需求, 具体设置情况如表 3 所示。

表 3 某输油管道大落差段优化后减压站设置情况

站场名称	里程 /km	间距 /km	高程 /m	高程差 /m
高点	0		3297	
1 [#] 减压站	10.2	10.2	2508	789
2 [#] 减压站	31.8	21.6	1672	836
3 [#] 减压站	67.6	35.8	845	827
末站(减压站)	163.0	95.4	5	840

根据计算得到的结果, 当单独采用缩径工艺时,

在 0~18km 处, 管径的最佳直径为 813mm, 在 18~163km 处, 管径的最佳直径为 864mm。但是, 测量发现 1[#] 减压站和翻越点之间的间隔为 10.2km, 在管径选取为 813mm 的情况下, 需要额外添加清管站。所以, 该段的管径选择和上一段管径相同, 即确定管径为 1067mm; 同时, 测量到 1[#] 减压站和 2[#] 减压站间距为 21.6km, 其中 7.8km 的区间采用 813mm 管径, 13.8km 的区间采用 864mm 的管径。为了避免设置过多的清管站, 降低采购的复杂度, 提升维护的便捷性, 故该段管径统一采用 864mm。

在完成最终的方案优化后, 需要在输送线上累计设置 4 座减压站。在管径的选择上, 高点和 1[#] 减压站区间确定管径为 1067mm, 1[#] 减压站和末站区间确定管径为 864mm。

经过最优设计后, 这种大落差断面的管线压降得到了有效的控制。这时, 各个减压末站的入口和出口的压力都在设定的范围之内。

4 工艺设计中应注意的问题

4.1 减压阀选型

减压阀降压组件有多种形式, 根据结构的不同, 主要可以分为三种: 多层套筒式减压阀、串级式(糖葫芦式)减压阀和迷宫盘片式减压阀三种类型。

多层套管减压阀的使用过程存在的主要不足是堵塞频繁, 在流体清洁度较高时使用效果较好。通常情况下, 串联式泄压阀不会发生阀阻塞, 但是该类减压阀存在公称直径过小的问题, 仅为 200mm, 并且质量较大, 由于气门的有效流量系数很小, 如果采用串联式减压阀, 则需要大量的配置, 从而大大提高了减压站的建设投入。迷宫盘片式泄压阀采用多层或多片式阀芯, 可延长阀体之间的距离, 并可在大流量情况下仍然能够保持较大的压力差, 并能有效地适应压力差, 同时还可以有效的防治堵塞。这种阀门不但具有较高的有效流量系数、较轻的阀杆, 而且具有很好的抗堵性。所以, 在大输量、长距离原油管线中, 通常建议使用迷宫盘片减压阀。

4.2 过滤系统设计

在减压泵站的结构中, 应在设置进站过滤器基础上, 在每个出口的减压阀之前安装过滤器, 避免由于在运输过程中的鼓励颗粒物对减压阀造成的物理损。该故障是国内石油运输管道常见故障之一。

4.3 安全泄压系统设计

当管线停止运行后, 减压工位的入口和出口阀

门应该是封闭的, 这时降压区会有一个不流动的区域。因日光直接照射、白天和夜间温度变化较大, 导致管线压力过大。故在结构上, 应适当地设置热安全阀。

4.4 压力保护系统设计

我国减压泵站的安全防护体系由进口和出口两部分组成。进水口的安全防护装置设定为三个级别; 一是高压报警, 提醒调节人员在卸压站出站后的管线的工作状况; 第二个阶段是高高电压报警, 报警装置和减压阀装置并联连接; 第三阶段是进站高压泄放, 它的设置值通常比管道的设计压力要小一些。出口压力防护分为两个等级: 一是高压警报, 提醒调节员在出站后要密切关注管线的工作状况; 第二阶段是高高压报警和减压站并联, 报警装置处罚减压站停运。

通过对国内外大落差管线的工艺运行原理的分析, 认为为防止减压装置因操作不当造成的超压, 造成不必要的漏油事故, 还可以作为输油压力防护装置的一个多余装置, 提出了一种新的压力防护体系, 即在国产模式下增加减压阀后压力防护体系, 从而将其与出口压力防护体系独立开来。阀门后的压力防护系统可以特别设置三个级别的压力防护: 一是高压报警, 提醒调节人员在卸压站出站后的管线的工作状况; 第二个阶段是高高电压报警, 报警装置和减压阀装置并联连接。第三个阶段是高压和泄压, 当压力超过保护阈值 0.2~0.3MPa 时, 会自动开启泄压装置。

5 结论及建议

一是, 对于大跨度管线翻越点后大落差地段, 建议采取减少压力和减小直径的技术手段, 对优化后的方案进行重新审核; 二是, 选择合适的减压阀, 迷宫盘片式减压阀的效果最佳; 三是, 在每个泄压阀前面加一个永久的圆锥滤芯。并根据现场的气象情况等情况, 确定是否有必要安装热安全阀。另外, 在降压站的安全防护体系的设计中, 提出了增加安全阀后的压力防护体系, 并将其与出口的保护体系独立设计。

参考文献:

[1] 李勇. 大落差成品油管道顺序输送中的压力变化分析和控制措施[J]. 石化技术, 2020, 27(07): 23-25.

作者简介:

陆宽(1995-), 男, 汉族, 江苏宜兴人, 硕士, 现从事油气田地地面工程设计研究工作。