

中缅油气管道(缅甸段)管道测径技术分析

刘 昊¹, 李荣梅², 谭应军¹

¹天津大港油田集团工程建设有限责任公司, 天津

²中国石油大港油田公司天津储气库分公司, 天津

收稿日期: 2026年5月27日; 录用日期: 2026年8月28日; 发布日期: 2026年9月9日

摘 要

管道测径是检测长输管道施工质量的重要工序, 直接关系到管道的安全运行。本文以中缅油气管道工程(缅甸段) PL06标段线路测径为例, 介绍了在测径板变形时, 所采取的寻找管线变形点的方法。采用这种方法, 成功解决了该标段管道变形点定位问题, 并提出了在测径过程中应注意的事项和在以后施工中管线变形预防控制措施。可为油气长输管道施工中的变形点的预防及控制提供理论依据, 具有工程实际意义。

关键词

测径, 管道变形, 方法, 控制措施

Analysis of Diameter Measurement Technology for Myanmar-China Oil and Gas Pipeline Project

Hao Liu¹, Rongmei Li², Yingjun Tan¹

¹Tianjin Dagang Oilfield Group Engineering Construction CO., LTD, Tianjin

²Tianjin Gas Storage Company of Petrochina Dagang Oilfield Company, Tianjin

Received: May 27, 2026; accepted: August 28, 2026; published: September 9, 2026

Abstract

Pipeline diameter measurement is a key procedure for quality control during the construction of long-distance transmission pipelines, which directly affects the safe operation of pipelines. Taking the pipeline diameter measurement of Section PL06 of the Myanmar-China oil and gas pipeline (Myanmar Section) as an example, this paper presents the methods adopted to locate pipeline deformation points when the gauging disc is deformed. This method successfully solved the problem of pinpointing deformation points in this section. Meanwhile, matters needing attention during diameter

measurement and preventive and control measures for pipeline deformation in subsequent construction are put forward. The research can provide a theoretical reference for the prevention and control of pipeline deformation in the construction of long-distance oil and gas pipelines, and possesses practical engineering significance.

Keywords

Diameter Measurement, Pipeline Deformation, Method, Control Measures

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来中国在国际社会的影响力越来越大,中国在油气田勘探开发、油气地面工程建设、油气管道建设等领域也与其它国家合作越来越多,国外建设项目要求精益求精,尤其工程安全、质量管控严格。本人曾参与了中缅油气管道工程(缅甸段)的建设,对管道测径中出现的问题进行了分析和研究,提出了解决和控制措施。

中缅油气管道工程(缅甸段) PL06 标段管道全长 46.6 km,天然气和原油管道双线敷设,天然气管道直径 $\Phi 1016$ mm,原油管道直径 $\Phi 813$ mm,钢管材质均为 X70 钢。全线基本位于丘陵地带,地形地貌极其复杂,石方段和沼泽段众多,部分地段上土下石。该项目属国际工程,测径质量要求提高,测径板直径由国家标准 GB50369 要求的最小内径的 90% [1] 提高到了 94% [2]。而施工方为了追求管线下沟回填速度,清沟时对管底孤石清理不彻底,下沟后管线重力直接作用在石头上,造成局部应力集中而引起管道较多变形,给后续的测径作业造成巨大困难。面对这种严峻情况,经过慢慢摸索和经验总结,先后采用了原油管线(无内防腐层)使用钢制测径板,天然气管线(有内防腐层)使用铝板和稍小钢制测径板并加装跟踪仪的方法,并结合控制进气量和末端建立背压来调节测径清管器运行速度,加装支撑球片等措施,成功解决了寻找管线变形点问题。

2. 施工问题描述

为了达到预期的测径效果和准确判断管道变形点位置,管道通常采用分段测径,分段长度一般小于试压段长度[3]。本工程天然气管道和原油管道均采用了分段测径的方式。其中从 YDA028 桩-YDA035-1 桩测径作业开始,发现测径板严重变形以来,连续测径 YDA035-1 桩-YDA037 桩、YDA018 桩-YDA028 桩和 QDA018 桩-QDA028 桩等几段,都发现了测径板变形情况。如图 1 所示。



Figure 1. Picture of the serious deformation of gauging disc

图 1. 测径板严重变形照片

出现以上 2 处变形的测径清管器运行压力很低(0.04 MPa~0.12 MPa), 没有发生常见的清管器卡堵情况, 从而不好判断管线变形点位置, 测径作业面临巨大困难。测径不合格, 后续上水试压作业不能进行, 试压作业陷入停滞状态。

3. 管道变形原因分析

1、含石方段管沟清理质量原因。施工人员结合地勘图纸和现场开挖验证的情况, 管道变形点主要在上部土方下部石方、土石混合和石方段管沟。因地质情况复杂, 石头坚硬, 挖掘机清理和爆破清理效率低下, 管沟成型质量不佳, 对管沟内的坚硬孤石清理不彻底, 细土回填太薄, 防护措施不到位。致使下沟后的管线重力直接作用在石头上, 造成局部应力集中而引起管道变形。

下面进行管底孤石处的应力分析。根据后来开挖出的变形点情况和数据: 管道规格: $\Phi 813 \times 9.5$ mm, 管道材质 X70 钢, 屈服强度 485 MPa, 管道埋深 1.2 m, 选取 50 米平缓地段管线, 孤石直径 200 mm, 孤石处管底标高比周围管线管底标高高出 5 mm (即管线受孤石作用产生 5 mm 的变形)。为方便分析, 对结构进行简化, 并建立了有限元数学模型, 通过数值模拟计算, 得到最大应力值达到 503 MPa, 已经超过管线的屈服强度(485 MPa)。如果管底石块更大, 将该处支撑更高的话, 则孤石处的应力值会更大, 发生的变形也会更大。该处管线变形及等效应力分布云图如图 2 所示, 红色区域应力值最大。

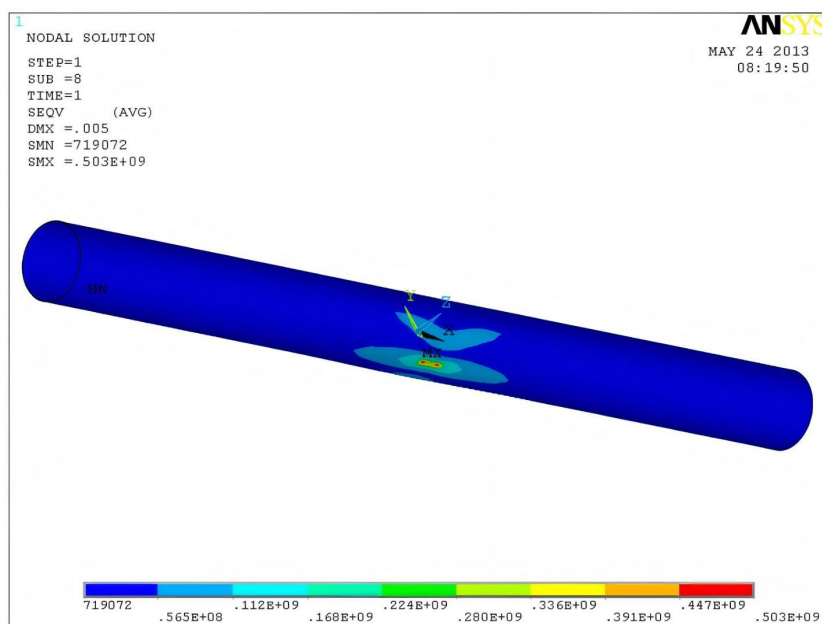


Figure 2. Contour of equivalent stress obtained by finite element numerical simulation
图 2. 有限元数值模拟计算分析出的等效应力分布云图

从后来开挖出的变形点情况来看, 绝大部分管道变形位置在地形平缓, 上土下石、土石混合和石方段, 管底 6 点位置存在未清理的孤石造成管线变形(如图 3、图 4、图 5 和图 6)。管底孤石未清理彻底, 细土回填厚度不够, 防护措施不到位, 下沟质量不佳是造成管线这么多变形的最主要原因。

2、焊接原因。部分管线没有按照国家标准规范、行业规范要求施工, 将一些原本应该沟下焊接的弯头弯管, 连续性地在地面上焊接完成, 给下沟作业带来困难, 致使下沟后某些地段管线弯头弯管处积存应力太大, 弯管椭圆度超标严重。例如后来开挖出来的 YDA027 桩和 YDA030 桩处, 椭圆度严重超标, 造成清管器停留次数较多, 标记点增多, 开挖点增多, 影响了施工进度, 增大了施工成本。



Figure 3. Boulder at the 6 o'clock position under pipeline
图 3. 管底 6 点位置孤石



Figure 4. Serious deformation at 6 o'clock of pipeline bottom
图 4. 管道 6 点位置严重变形



Figure 5. Dent on pipeline outer surface
图 5. 管道外表凹陷



Figure 6. Internal protrusion of pipeline
图 6. 管道内部凸出

4. 寻找变形点的方法和措施

面对管道存在较多变形点这一严峻情况，施工项目部和机组认真组织技术大讨论，认真分析原因，结合本工程测径过程的压力数值、地形地貌等情况，并参照以往工程的经验和解决方法，提出了以下三个方面的解决方法和措施，成功解决了寻找管线变形点问题。

4.1. 测径清管器改装

原先的铝制测径板厚度为 8 mm，强度不够，碰到变形点后，立即变形并在很短时间内通过变形处，即便使用跟踪仪跟踪，也不易查找精确位置。摸索后原油管线使用 94% 最小内径的钢制测径板，为了防止天然气管线内防腐层被钢板划伤，故在 94% 的铝板后加装 92.5% 的钢制测径板，以加强测径板强度，在遇到变形时可以停留时间更长和压力升高，便于跟踪仪精确定位。

原先在测径板后面有 1 片支撑球片，为了加强对测径板支撑强度，增加 1 片支撑球片。而且测径清管器所有球片均使用全新球片，过盈量在 5%~8% 之间，以保证清管器支撑强度和严密性。如图 7 所示。



Figure 7. Two-gauging disc pig with additional steel gauging disc
图 7. 加装钢质测径板后的双测径板清管器

4.2. 测径清管器运行速度控制调节

由于管道沿线起伏较大，弯头弯管较多。测径清管器在管道内受弯管阻力，运行过程并不是匀速进行，通球压力值将不断起伏，在压力升高后释放的过程中，测径清管器运行速度加快[4]。在通过弯头和

大角度弯管时,清管器运行速度越大,经过弯头时产生的离心力越大,当离心力超过清管器支撑片的支撑强度时,支撑片发生变形,测径板就会与弯头外侧内壁撞击变形,造成误判。所以控制测径清管器运行速度是非常必要的,依据多次测径实际操作情况,为便于跟踪,清管器运行速度宜小于步行速度,保持在 2 km/h 左右比较合适。

首先是降低发球端进气量。在清管时一般使用 2 台英格索兰 1170 型空压机,进气量为 66 m³/min,而在测径时仅使用 1 台,而且在需要时关小空压机供气阀门,增加空压机损耗,以减少进气量。再者是控制末端收球筒上的阀门来建立适当的背压,尽量避免在通过弯头弯管时的瞬间高速运行,降低瞬间冲度,减少测径板和管壁的剧烈摩擦和撞击。

背压的建立方式有 2 种:一种是在发球前将末端出气阀门关闭,然后将测径清管器发出,随着清管器的运行,球前会慢慢自动建立起背压,待压力达到一定大小时(0.03 MPa~0.1 MPa),再通过控制末端排气阀门的开关程度来控制背压大小,具体背压大小由计算出的运行速度和清管器大体位置来确定,这种背压方式较多采用。另外一种是在首端清管器发出后,停机关闭进气阀门,记录压力值。然后在末端利用空压机给管内注气,达到合适的压力值后(必须小于首端压力值),停机关闭末端阀门,然后开启首端空压机给清管器后注气,推动清管器运行,运行过程中通过控制末端排气阀门的开关程度来控制背压大小,具体背压大小由计算出的运行速度和清管器大体位置来确定,这种背压方式一般用在线路距离短、高差大和深 V 字形等特殊地形。

清管器运行距离估算。近似的经验公式如下:

$$L = Q_{\text{总}} / (1000F \times e)$$

式中: L——清管器运行距离,单位 km; Q_总——发清管器后的累积进气量,单位 m³;

e——无量纲系数,清管器后的压力对大气压倍数; F——管道内径横截面积,单位 m²。

清管器平均运行速度估算。近似公式如下:

$$V = L/T$$

式中: V——清管器平均运行速度,单位 km/h; L——清管器运行距离,单位 km;

T——清管器运行时间,单位 h。

利用以上公式计算出运行距离后,可以利用分段高差里程信息图(如图 8 中缅天然气管道工程(缅甸段)原油管道 YDA018-YDA028 段信息图所示)上的数据计算出清管器的位置区间,查看清管器是处于平缓地段,爬坡地段还是下坡地段,再比对当前的运行速度,来控制末端背压大小,调节清管器运行速度。

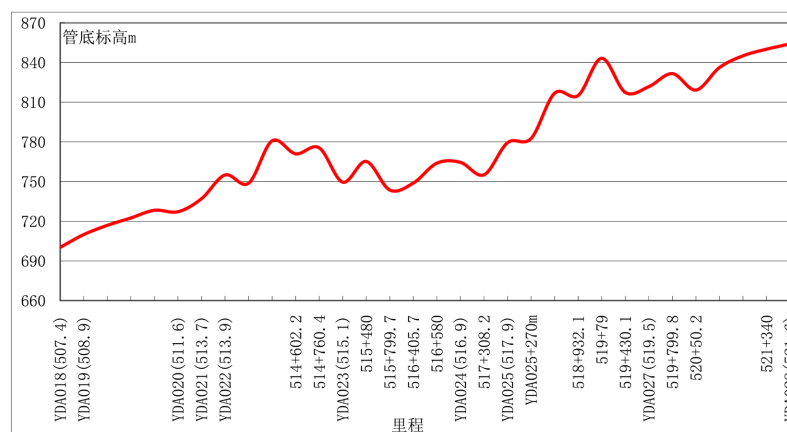


Figure 8. Pipeline elevation profile

图 8. 管道高程信息图

4.3. 跟踪仪跟踪测径清管器，寻找变形点

在测径清管器加装跟踪仪，安排专人在首端每 2~3 分钟记录 1 次压力值，随时给清管器跟踪人员和末端值班人员报告压力值变化情况，计算清管器运行速度和运行位置，指导跟踪人员和末端值班人员行动；末端值班人员随时记录末端出气情况，随时汇报出气情况，调节背压大小等；清管器跟踪人员随时与首末端联系，利用跟踪仪信号接收机，精确定位测径清管器在运行中的停球位置(精确度 2 m)，再根据运行压力值大小和清管器所运行的地形情况，来判断该点是否标记出来。例如在平缓地段和下坡地段，停球点压力突然升到较高的点；爬坡地段停球点压力值和正常通球压力相比压差太大的点都应该标记出来，进行开挖查找。

清管器跟踪人员一般安排 6~8 人，3~4 人操作跟踪仪，其余人员提前布置到前方各监测点，清管器到达后立即向跟踪人员报告。另外测径清管器运行速度较慢，步行能够跟上；首端技术员通过计算提供清管器大体的运行位置，这样就可以最大限度地确保清管器在跟踪范围内，不容易丢失跟踪目标。标记时先确定信号最强点为中心点标记出来，再确定信号减弱的 2 个端点，共做出 3 个标记，开挖时先从中心点开始，向两端点延伸。图 9、图 10 分别为利用跟踪仪跟踪清管器和开挖寻找变形点。表 1 和表 2 分别为找出变形点后原油管道和天然气管道换管明细。

Table 1. Statistics of crude oil pipeline deformation
表 1. 原油管道变形统计表

序号	测径段落	换管数量	换管位置	变形地形、原因	备注
1	YDA018-YDA020 桩	1	YDA019 + 200 m 1 处	平缓地段，上土下石，土包石。石头硌扁管道，6 点位置严重变形。	
			YDA023 桩 2 处	下坡段，石方段，土包石。石头硌扁管道，6 点位置严重变形，80 m 内严重变形 2 点。	
			YDA028 桩 - 800 m 1 处	平缓地段，石方段。管道 12 点位置变形。	
2	YDA020-YDA028 桩	9	YDA024 1 处	平缓地段，上土下石，土包石。石头硌扁管道，6 点位置 200 m 范围内 3 点严重变形。	
			YDA022 2 处	下坡段，石方段，土包石。石头硌扁管道，6 点位置重变形，200 m 内变形 3 点。	
			YDA020 + 700 m 3 处	平缓地段，土包石，石头硌扁管道，6 点位置重严重变形。	
3	YDA031-YDA035-1 桩	1	YDA035-1 - 500 m 1 处	平缓地段，石方段。石头硌扁管道，6 点位置严重变形。100 m 范围内 5 点较大变形。	
4	YDA035-1-YDA037 桩	1	YDA036 1 处	大坡下面的弯管。管道 5 点位置重变形。	
	合计	12			

Table 2. Statistics of natural gas pipeline deformation
表 2. 天然气管道变形明细表

序号	测径段落	换管数量	换管位置	变形地形、原因	备注
1	GDA020-QDA024 班	4	QDA020 + 700 m 1 处	平缓地段，土包石。大石头硌扁管道，6 点位面严重变形。	
2			QDA023 + 500 m 1 处	下坡地段，石方段。石头硌扁管道，六点位重严重变形。	
3			QDA024 - 200 m 1 处	平缓地段，土包石。石头硌扁管道，六点位置严重变形。	
4			QDA024 1 处	平缓地段，土包石。石头硌扁管道，六点位置严重变形。	
合计		4			

实际上标记出来的点比较多，造成开挖点较多，没有找出明显变形点是因为下沟时管线应力太大，再加回填压实，管线发生变形，一般都是弯管处椭圆度超标较多，测径清管器在这些地方停球时间长，压力较高。而在将该处管线开挖出较长距离，将积存的应力释放掉后，超标的椭圆度又恢复到正常范围内(YDA027 桩)；或者在应力释放不了的地方，切割一小段管线下来(YDA030 桩)，重新焊接，下沟和回填，以释放应力。

若某一测径段距离较长，人员徒步行走作业带，爬山涉水，体力不支，就将某些距离长的段落，根据已找出的变形点，切割后划分成小的测径段，这样距离稍短，便于跟踪人员跟踪清管器。

在找出明显变形点后，切割该段管线，往往能够在切割管线附近找出好几处大小变形点。在将某测径段第一次发现的变形点都换管处理后，还需再次进行跟踪仪测径，以检测测径板在已经变形之后，运行到了管线后面还存在变形点处时，直接顺利通过，这样会遗留下一些未处理的变形点。依据现场实际操作情况，每测径段大概测径在 3 次以上才会处理完所有变形点。这样依次处理完成后，进行测径自检，合格后，报监理分部、总部和业主进行正式测径，正式测径合格后，最终通过验收。



Figure 9. Picture of tracking the diameter gauging pig with a pipeline tracker
图 9. 利用跟踪仪跟踪测径清管器照片



Figure 10. Picture of locate deformation points

图 10. 寻找变形点照片

5. 结论

在中缅管道工程(缅甸段)PL06 标段测径作业中,使用常规测径方法,历时一个多月,对 3 个试压段进行 6 次测径,由于清管器运行压力非常低(0.04~0.12 MPa),无卡球现象,无法找到管线变形点。当时天然气管道和原油管道剩余 6 个分段未找到管道变形点,若使用智能测径仪费用非常昂贵,每个试压段测径费用约 100 万人民币,进行 6 段智能测径总费用约 600 万人民币。而采用原油管线(无内防腐层)使用钢制测径板,天然气管线(有内防腐层)使用铝板和稍小钢制测径板并加装跟踪仪的方法,并结合控制进气量和末端建立背压来调节测径清管器运行速度,加装支撑球片等措施,成功地解决了寻找管线变形点问题。采用此种方法寻找管线变形点,共标记并开挖 43 处,累计寻找出管线变形点 30 余个,准确率达到 75%以上,更换管线 16 处,效果显著。6 个分段消耗成本(包括人工、设备、材料)为 400 万元人民币,与智能测径相比较,此方法节省了施工成本 200 万元,很好地保证了施工质量,产生了良好的经济效益和社会效益。这种方法非常适用于目前的测径作业现状,给我们提供了一个新的思路和方法,具有较好的现场实际应用价值。

管线存在这么多的变形点给测径作业带来了巨大困难,给项目施工质量,进度和成本控制造成了严重影响,损害了项目形象。在以后的施工中,我们应从管线开始焊接,到管沟开挖,清沟,下沟和回填,各工序都应该严格按照规范,按要求施工,确保每道工序的施工质量,只有这样才能给后续各项作业创造便利条件。尤其是在特殊地形下,如上土下石、土包石和石方段等,应在清沟和下沟时特别注意管沟成型质量,严格要求作业人员,严把质量关,确保不出质量问题。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50369-2014 油气长输管道工程施工及验收规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [2] 东南亚原油管道有限公司, 东南亚天然气管道有限公司. CMOG-PJ-TE-RP-09 中缅油气管道工程(缅甸段)清管试压施工技术规范[S]. 2010-09-29.
- [3] 陈连山, 尹辉庆, 赵杰. 长输油气管道施工技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 108.
- [4] 温涛. 提高长输管道测径检验准确性的探讨[J]. 石油工程建设, 2011, 37(5): 75-76+10.