

管道内、外腐蚀的直接评估在 输气管道完整性评价中的联合应用

王晋鲁（合肥合燃华润燃气有限公司，安徽 合肥 230075）

摘要：本文针对管道内、外腐蚀的直接评估在输气管道完整性评价中的优势展开详细分析，分别从直接评估预评估、直接评估两个层面入手，对评估流程进行系统化梳理，并根据管道中心线相对高度计算目标管线倾角、预测液体聚集临界角、腐蚀程度及速率预测等内容，对直接评估方式的联合应用展开深入解读，为充分发挥直接评估的功能作用以及输气管道评价结果完整性提供技术支持。

关键词：管道内；外腐蚀；直接评估；输气管道；完整性评价；联合应用

直接评估是指在管道完整性评价中直接对管道进行检测和评估，以获取管道内、外腐蚀情况的详细信息和准确数据的方法。传统的管道评估方法主要依赖于取样和实验室测试，但这种方法具有破坏性、耗时、成本高等缺点。相比之下，直接评估方法可以提供实时、准确的管道腐蚀信息，有助于及时发现潜在问题、评估风险，并采取相应的维护和保护措施，确保管道的安全运行和延长使用寿命。特别是在输气管道完整性评价中的联合应用，可以提高评估的准确性和可靠性，为管道运行和管理提供更科学、高效的依据。

1 直接评估技术的优势

目前常用的管道完整性评价方法主要包括内检测、水压试验和直接评估，这些方法基于不同的原理，用于获取管道系统的相关数据，对管道剩余强度或剩余寿命进行评估、预测，不同方法的原理存在差异，每种方法在使用中都有其优点和缺点。比如，内检测是一种直观发现管道缺陷的方法，主要基于漏磁（MFL）和超声（UT）技术，被认为是评估管道完整性的最佳手段。内检测要求管道系统具备完整的收发球装置，并且管道全段需要满足清管通球的要求。然而，内检测的结构要求最高，检测费用昂贵，并且存在卡球风险；水压试验主要用于管道的竣工验收和在役管道的完整性检测，在进行水压试验之前，管道需要停输。该方法仅能发现临界缺陷，并且对试验压力、增压程序、保护程序、应急程序等方面有较高的要求，漏点的查找难度较高；直接评估方法主要基于现场检验、模拟计算和开挖验证，不需要改变管道的工艺状态，在保证缺陷发现率的前提下，工作量少、风险低、费用较低。直接评估方法适用于气管线、低含水率油管

线或油水混输管线。然而，该方法对管道历史工艺参数、介质流动和腐蚀数据的完备性和准确性要求较高，适用于存在腐蚀风险但由于内部穿插、变径等因素无法进行清管或需要进行腐蚀缺陷根源分析的管道。

2 管道内、外腐蚀的直接评估在输气管道完整性评价中联合应用现状

管道内、外腐蚀的直接评估在输气管道完整性评价中的联合应用能够提供全面的管道腐蚀信息，帮助管道运营公司做出准确的维护决策，保障管道的安全和可靠运行，进一步提高评估的准确性和效率，为输气管道行业提供更可靠和可持续的管道运营。在管道内部腐蚀直接评估中，超声波检测、磁粉检测和涡流检测等技术已经得到了广泛应用，能够通过传感器和检测设备对管道内壁进行扫描和检测，精确地识别腐蚀缺陷的位置、尺寸和严重程度。在管道外部腐蚀直接评估中，外部腐蚀监测系统和电化学腐蚀测量技术等已经得到广泛应用，可以实时监测管道表面的腐蚀情况，并提供准确的腐蚀速率和腐蚀程度数据。

3 直接评估数据挖掘与对齐

管道内腐蚀直接评估通常是以管道工艺台账和历史腐蚀状态为基础，因此，在评估过程中，挖掘预评价和间接评估阶段的数据，对评价结果具有重要影响。为了得到准确的评估结果，评估时，工作人员要尽可能多的获取管道历史工艺参数。在进行管道内腐蚀直接评估时，需要获得与管道里程对应的管道高程、埋深以及防腐层状态数据。通过获得这些数据，可以计算出管道的基线高程，并进一步计算出管道的全线倾斜角度。管道的高程和埋深是评估中的重要参数，对于确定管道的倾斜程度和可能发生的腐蚀位置至关

重要。通过准确获取管道高程和埋深数据，可以确定管道在不同位置的倾斜角度，进而推测出可能发生腐蚀的位置。了解管道的防腐蚀层状态也是评估中的重要步骤，防腐蚀层的状况直接影响管道的腐蚀程度和速率，因此，在评估过程中需要了解防腐蚀层的存在与否、厚度以及质量状况。比如，当具体项目为操作历史；面径和壁厚；水的存在 H_2S 、 CO_2 和 O_2 的存在；最大和最小的流速；高程剖面图；温度；输入/输出；清管操作；在线监测或人为观察内腐蚀；其他的有据可考的内腐蚀；内腐蚀漏点/失效处；腐蚀监测；内侧涂层时对应的数据手机细节分别为流向、输送物质类型、安装年份的变化等名义管径和壁厚；已经证明存在水的任一位置，频率、种类、体积典型的 H_2S 、 CO_2 和 O_2 ；所有的人口和出口处最大最小流速，流速降低和没有流动的重要时期；地形学数据，包括考虑管道的覆盖深度；典型的操作温度，可由特跳的环境温度代替；确认所有的现在的和历史的输入/输出的位置；清管类型、清管频率、清管操作取到的固体和水的体积；通过在线监测或人为观察确认的内腐蚀的位置和严重性；已知的其他已经发生的内腐蚀位置、严重性和潜在原因；与腐蚀有关的漏点/失效的位置；腐蚀监测数据，包括监测类型（如取样，电阻，线性极化探针调查）；内涂层是否存在和具体位置。

4 实施流程

通过参考 NACE SP0206 和 NACE SP0110 等标准，并按照预评估、直接评估的步骤进行管道内腐蚀直接评估，可以提高对管道腐蚀状况的准确性和可靠性，从而为管道的维护和保护提供有效的参考依据^[1]。

4.1 预评估

在输气管道完整性评价的预评价阶段，收集管线历史和当前数据发挥了重要作用，通常用于确定评估区域，并评估直接评估（DA）方法的可靠性。这些数据的来源包括施工记录、操作和维护历史、校正表、具有覆层厚度的高程图、检测记录、以前的完整性评估或维护操作检测报告等。首先，施工记录提供了管道建设的关键信息，包括管道的设计参数、材料规格、焊接和连接方式等，对于评估管道的结构特征和可能存在的缺陷至关重要。其次，操作和维护历史记录记录了管道的运行情况、维护措施和维修历史，可以揭示管道受到的外部环境的影响、操作异常、维护频率以及之前的腐蚀修复情况等重要信息，有助于评估管道的腐蚀风险和完整性状况。其中，校正表是对测量设备和工具进行定期校准的记录，确保评估过程中使用的仪

器精确可靠，而具有覆层厚度的高程图提供了管道外壁覆层的信息，对于评估管道的外腐蚀情况至关重要。此外，检测记录和以前的完整性评估或维护操作的检测报告也是重要的数据来源。检测记录包括对管道进行的各种检测技术的结果，如超声波检测、磁粉检测、涡流检测等，可以提供对管道内部腐蚀、缺陷和壁厚变化的信息。而以前的完整性评估或维护操作的检测报告包含了以往评估和维护过程中所获得的数据和结论，对于了解管道历史完整性状况和之前采取的修复措施具有重要价值^[2]。

4.2 直接评估

4.2.1 根据管道中心线相对高度计算目标管线倾角

利用高程图计算目标管道的倾角是直接评估（DA）数据中的一个重要步骤，通过在高程图上标记管道的起始点和终点，并获取沿线的高程数据，可以计算出管道在单位里程上的倾角，进一步分析确定置信区间。此过程可以借助管道里程、高程和路由数据进行计算，其中，管道倾角 θ 的正弦值表示管道高程变化 Δh 相对管道长度 Δl 的变化。具体计算方法如公式（1）所示：

$$\theta = \arcsin \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (1)$$

其中， Δh 表示两个高程点之间的高程差， Δl 表示两个点之间的管道里程差。通过计算得到的 $\sin \theta$ 值，可以得知管道在单位里程上的高程变化情况，即管道的倾角^[3]。

在分析确定置信区间时，可以结合统计方法和一定的置信水平，对直接评估数据中单元点的最小里程单位进行统计分析，对多个单元点的倾角进行统计，可以得到均值、标准差等统计量，并建立置信区间，以评估管道倾角的可靠性和可信度。通过利用高程图计算目标管道的倾角，可以更准确地了解管道的地形特征和变化趋势，为后续的管道完整性评价提供重要依据。这种分析方法不仅可以定量描述管道的倾斜情况，还可以识别潜在的问题区域，为管道的设计、运行和维护提供有力支持^[4]。

4.2.2 预测液体聚集临界角

内腐蚀直接评估结果的可靠性主要取决于利用流动模拟来识别最有可能发生电解液聚集的位置的能力。在倾斜的管道中，管道内的液相受到剪切应力和重力的共同作用，在倾斜管道处聚集的可能性最大。因此，通过比较管道倾角和流态模拟所预测的水聚集临界角，可以确定水首先聚集的位置，而这个位置最

有可能先遭受腐蚀^[5]。

为了计算输气管道中电解质聚集的临界角，应根据流体单位面积上的重力与惯性应力平衡方程进行推导，具体计算方法如公式(2)所示。该方程考虑了液相在倾斜管道中的受力平衡情况。通过解析和数值方法，可以得到管道内电解质聚集的临界角，这个临界角表示了水聚集的最小倾角。比较实际的管道倾角和计算得到的聚集临界角，可以确定水聚集的位置^[6]。

$$\alpha = \arcsin \left(0.675 \times \frac{\rho_l g}{\rho_l - \rho_g} \times \frac{V_g^2}{g \times d_{id}} \right)^{1.091} \quad (2)$$

其中， ρ_l 和 ρ_g 分别表示液体和气体密度； g 为重力； d_{id} 为管道内径； V_g 为表观气体速度； α 为水聚集临界角。此外，根据理想气体方程 $PV=nRT$ ，可以推导出在管道内的气体的密度，具体计算方法如公式(3)所示。考虑到气体在流动中的行为，包括压力、温度和流速等因素，可以计算得到在管道内气体的密度分布。这对于进一步分析管道内的流动模式和电解质聚集位置具有重要意义^[7]。

$$\rho_g = \frac{MP}{RT} \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中： M 为气体分子量； P 为管道内压力； R 为理想气体常数， $8.314 \text{ J} \cdot \text{K} \cdot \text{mol}$ ； T 为管道内介质温度。实际气体密度的计算需引入一个修正系数，即压缩因子 z （表示实际气体与理想气体的偏离程度），该值可通过查询获得。评估采用最极端条件（最低运行压力、最大输气量），计算获得管道的最大理论临界倾角^[8]。

4.2.3 腐蚀程度及速率预测

以国际上通用的管道直接评估方法为指导原则，在管道腐蚀预测中，可以采用Inte-Tech Electronic Corrosion Engineer (ECE)或Pre Dict Pipe腐蚀评估软件作为工具。这些软件基于力学—化学因素考虑了流体状态和流速、温度、 CO_2 和/或 H_2S 分压、溶液pH、介质成分等参数，对管道的腐蚀程度和腐蚀速率进行评估。这些软件利用了一系列腐蚀模型和算法，结合输入的参数和管道的特性，进行腐蚀评价^[9]。

基于流体力学和化学反应的原理，软件可以预测管道中可能发生的腐蚀类型和程度，并提供关于腐蚀速率的定量分析。在评价过程中，软件会考虑液相中的化学成分、流速对腐蚀的影响、环境条件对腐蚀的加速或减缓作用。例如， CO_2 和 H_2S 的分压、溶液的pH值等因素会对腐蚀速率产生重要影响。软件还可以模拟不同介质成分对腐蚀的影响，以更准确地评估

腐蚀的程度。在腐蚀评估过程中，相关软件能够提供具体的腐蚀程度和腐蚀速率数据，帮助工程师评估管道的完整性和安全性。根据软件的输出结果，制定相应的维护策略和保护措施，延长管道的使用寿命并减少腐蚀造成的潜在风险。

5 结束语

管道内、外腐蚀的直接评估在输气管道完整性评价中的联合应用，对于保障管道的安全运行具有重要意义。通过采用高效准确的技术手段，如无损检测、腐蚀监测、材料评估等，可以及时发现管道内外腐蚀问题，评估其严重程度，并采取相应的修复和预防措施，从而降低管道事故的风险。随着科学技术的不断进步，我们对管道腐蚀行为的认识将进一步深化，相关评估方法和工具也将不断完善。相信通过持续的研究和实践，联合应用管道内外腐蚀的直接评估技术将为输气管道的安全运行提供更可靠的保障，为能源运输领域的可持续发展贡献力量。

参考文献：

- [1] 宫彦双,唐德志,艾国生,等.油气田集输管道多相流腐蚀直接评估方法与应用[J].石油规划设计,2021(1)12-14.
- [2] 张少洋,郝林,王健,等.内腐蚀直接评价技术在长距离干气海底管道完整性评估中的应用[J].全面腐蚀控制,2022,36(12):49-51.
- [3] 李先明,许道振,孟波,等.山地地区集输管道内腐蚀直接评价技术[J].石油规划设计,2021,33(6):63-67.
- [4] 陈妍君,舒洁,罗倩云.长输天然气管道内腐蚀直接评价应用研究[J].管道技术与设备,2023(2):44-46.
- [5] 邹慧慧.基于内腐蚀直接评价的管道内腐蚀风险评估技术方法研究[J].全面腐蚀控制,2022,36(1):3-65.
- [6] 孔令捷,王朝阳,陈卓.外腐蚀直接评价法在埋地管道保护中的应用[J].山东化工,2022,51(22):37-39.
- [7] 谢飞,李佳航,王国付,等.天然气管道内腐蚀直接评价方法的改进[J].油气储运,2022(2):41-43.
- [8] 宋明焱.集输管道内腐蚀直接评价技术的改进与应用[J].石油工程建设,2022,48(4):39-45.
- [9] 张卫朋,梅海粟,喻友均,等.油气田集输管道完整性管理效能评价指标体系建立与应用[J].油气与新能源,2021,33(6):75-77.

作者简介：

王晋鲁(1986-),男,汉族,山东泰安人,大学本科学历,中级工程师,合肥合燃华润燃气有限公司,研究方向城镇燃气。