

# 微波无损检测技术在石油储运管道检测中的应用

冯 挺 刘 亮 (中海油(天津)管道工程技术有限公司, 天津市 300000)

**摘要:** 石油作为我国工业发展的“血液”, 各个产业对石油能源高效的利用, 离不开石油储运环节, 然而一旦石油储运管道因缺陷导致泄漏, 不仅会造成严重环境污染、经济损失, 且可能引发重大安全事故。因此, 掌握有效的检测技术, 是保障石油储运管道安全、稳定运行的基础要素。本文就微波无损检测技术在石油储运管道检测中的应用进行探讨, 旨在为我国石油工业企业提供有效的技术借鉴与参考价值, 在石油储运管道运维、检修中充分发挥微波无损检测技术优势, 形成科学、有效的缺陷评估体系。

**关键词:** 微波无损检测; 石油储运管道; 功能测试; 应用案例

面向石油储运管道的微波无损检测技术研究, 对于我国石油工业的发展、生产具有重要的意义。一方面, 无损检测技术能够在不破坏管道的情况下及时发现潜在缺陷, 全面提高管道运行安全性、稳定性, 这对于保障石油供应连续性极为重要。另一方面, 对比传统检测手段, 微波无损检测技术检测精度高、速度快、适应性强, 上述优点可有效降低检测和维护成本, 提高经济效益, 特别是近年来我国石油需求不断增长的发展趋势下, 有效利用微波无损检测技术保障管道高效、安全运行, 对于稳定能源供应、促进经济持续发展以及国家能源安全保障而言均具有重要的意义与价值。

## 1 石油储运管道缺陷带来的危害分析

石油储运管道作为石油工业生产、发展的重要基础设施, 一旦管道存在缺陷可能引发多种严重危害。

### 1.1 造成环境污染并威胁人类健康

石油储运管道破裂或泄漏, 会导致大量石油外泄, 造成严重环境污染。石油外溢, 将对周边土壤、水源产生长期的负面影响, 破坏生态系统, 威胁动植物生存。并且, 难以彻底清除的石油污染亦可能渗透至地下水, 影响人类饮用水源安全, 威胁人类健康。

### 1.2 引发安全事故

石油泄漏一定概率会引发火灾和爆炸等安全事故。石油作为高度易燃物质, 一旦与火源接触, 极易出现燃烧、爆炸安全事故, 造成生产单位人员、周边群众伤亡与财产损失。同时, 燃烧与安全事故一旦发生, 高温、高压条件下管道缺陷可能发生进一步恶化, 致使火势难以控制, 扩大事故影响范围。

### 1.3 影响供应量运转

石油储运管道缺陷可能导致石油供应链中断, 影响经济运行、社会稳定。石油作为重要能源、工业原料, 其供应链连续性、稳定性至关重要。石油储运管道一

旦出现问题, 往往需要较长时间修复, 继而导致输送中断。这一现象不仅会影响下游企业, 扰乱市场能源价格, 情况严重下可能间接引发社会恐慌, 影响市场信心以及经济稳定。

## 1.4 增加石油工业企业成本

石油储运管道的缺陷, 将增加石油工业企业运营、维护成本。管道一旦出现问题, 需要技术队伍对管道开展全面检测、修复、加强防护, 这将为企业带来大量人力、物力、财力投入。同时, 为避免发生更多的事故, 企业往往需要加强管道检测、监控频率, 增加维护成本。这些费用, 最终将体现在石油价格上, 在提升企业成本同时一并加重消费者负担。

## 2 面向石油储运管道的微波无损检测技术原理

面向石油储运管道实现微波无损检测, 其技术原理包括金属波导理论、均匀传输线理论。

### 2.1 金属波导理论

当下, 石油工业领域下储运管道制造所使用的材料, 以碳素钢材料为主, 在进行石油储运管道无损检测作业期间, 微波无损检测技术运用了“金属波导理论”。该理论下会将石油储运管道作为微波波导, 波导则包含矩形、脊形、圆形三类波导, 其中脊型波导隶属矩形波导演变发展而来的产物。

在开展石油储运管道微波无损检测期间, 管道作为天然金属波导, 可实现在内部表面进行电磁波传播, 通过对电磁波频率、模式的控制, 可以让电磁波沿着石油储运管道进行快速传播, 实现对管道壁的探测, 当电磁波遇到管道缺陷, 如变形、腐蚀、裂纹等情况, 电磁波会发生反射、散射, 反射与散射的电磁信号会携带管道缺陷信息, 技术单位基于特定设备接收、分析电磁波信息便可定位、评估石油储运管道缺陷的位置、性质、严重程度。

## 2.2 均匀传输线理论

对石油储运管道进行微波无损检测期间，微波传输线为传输系统的统称，这一传输线下包含了微波传输的能量与信息。均匀传输线理论源于电磁场的基本原理，主要研究电磁波在线路中的传播规律，如行波、阻抗、传输线路中驻波的规则等。均匀传输线理论，是电信号传输技术中一项非常重要的理论，在实践中，根据这一原理，可以把所有的信号传输线都视为“均匀传输”的线路，而对于均匀传输线理论的分析，可从  $Z_0$ -特性阻抗、 $\gamma$ -传播常数， $v_p$ -相速与  $\lambda$ -波长入手分析。其中，特性阻抗为传输线内上导行波内的电压、电流比例，传输常数为上导行波传播期间的相移、衰减系数，通常这些值为复数，相速为电压、电流入射波传播期间的速度，波长则主要取决于空间波长。在均匀的无耗传输线中，相移常数和传输常数都是线性的，而波导的速度和频率没有直接的关系，如果发生了损失，它们就不是线性的，而是和频率有关的。

## 3 石油储运管道检测中微波无损检测技术研究

### 3.1 微波无损检测系统概述

面向石油储运管道的微波无损检测系统，组成部分包括微波信号源、微波天线、隔离器、矢量分析仪、波导探头。

#### 3.1.1 微波信号源

基于微波无损检测技术开展石油储运管道检测期间，对于微波信号的发射与采集，微波发生器启动后将发射 2 类信号，1 类信号会基于定向耦合器发送至石油储运管道以实现管道无损检测，信号在管道上传输后会被检波器接收，用于检测阶段的信号对波。2 类信号，则是直接向微波信号对比器发射，用于信号的对比操作。微波信号源下技术关键参数包括输出功率、工作频率、调谐带宽。其中，输出功率主要负责决定微波信号强度，高功率工况下微波振荡器将产生高强度微波信号，同时一并降低晶体管噪声。工作频率的影响因素，包括机械振动、环境温度、元器件衰减等，若工作频率过高，则微波频率可能出现偏差。调谐带宽，负责对微波频率进行调节。

#### 3.1.2 微波天线

微波天线负责进行管道微波无损检测期间的信号发送、信号接收。目前，工业领域常见微波天线包括对数天线、单极天线、喇叭天线，石油工业领域较为常用设备集中于喇叭天线，由于其波导开口面大、故而可有效增加波导空间同时降低反射能良好。在微波天线发射微波探测石油储运管道的缺陷时，矩形波导

喇叭增益表达式如式 1:

$$\begin{cases} c = \sqrt{3\lambda_0 L_h} \\ k = \sqrt{3\lambda_0 L_e} \\ G = a + b \lg \frac{ck}{\lambda_0^2} \end{cases} \quad (1)$$

式 1 内  $c$  与  $k$  分别代表矩形波至天线口径的长度、宽度。 $\lambda_0$  用于表示天线传输微波器件微波的长度，博导天线至  $c$  口径有着  $L_h$  的垂直距离，而其至  $k$  口径有着  $L_e$  的垂直距离。

#### 3.1.3 隔离器

隔离器又可称为单向器，在对储运管道开展微波无损检测期间，隔离器作用旨在确保让电磁波实现单方向传输。当微波处于正向传递状态，仅有较少的衰减系数，反之，若微波处于反向传递状态，则有极强衰减系数，隔离器正是为解决这一问题而应用。目前，开展管线无损检测期间，对于隔离器的性能要求，在于设备需要能够将正向、反向衰减控制在  $\leq 0.5\text{dB}$ 、 $\leq 25\text{dB}$  范围内，同时需要将驻波损失控制在  $\leq 1.2\text{dB}$  范围，确保在无损检测期间能够提供有效电场，过滤掉方向相反的电磁波，实现电磁波单向传递目标。

#### 3.1.4 矢量分析仪

矢量分析仪，在系统中负责测量线性微波与非线性微波组件，基于精准测量反射系数，结合有效地计算获取穿透系数数值、阻抗系数数值以、相位数值、插入损失数值以及增益数值等。对储运管道进行微波无损检测期间，对其测量的参数主要为散射参数，具体可以式 2 矩阵体现：

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \cdots & S_{mm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

引用矢量分析仪期间，可采用散射参数，并配置双口网络，在工作过程中，对每一端口的输入和输出信号电压进行测试，以此比率为基础，最后得到散射参数。测试高频参数，则需要将其先转化成为低频信号随后再进行计算。

#### 3.1.5 波导探头

石油储运管道微波无损检测期间，作为检测系统关键组件，波导探头的主要结构参数有探针增益，方向系数等。其中，探针增益  $G$  是指在输入功率相同的情况下由实际波导生成的功率密度、理论值两项采纳数比值，同时用于计算方向技术。探头方向系数计算方式如式 3:

$$\begin{cases} \eta = G/F \\ F(\varphi, \theta) = S(\varphi, \theta) / S_u \end{cases} \quad (3)$$

式3内,  $F$ 代表波导方向系数为,  $\varphi, \theta$ 则表示波导不同的方向,  $S(\varphi, \theta)$ 与 $S_u$ 分别代表辐射功率密度以及平均功率密度,  $G$ 为探头增益。此外, 增益与方向系数二者之间的差异性, 利用 $\eta$ 表示。

### 3.2 微波无损检测功能测试

面向石油储运管道的微波无损检测过程如下。首先, 准备、调试微波无损检测系统后, 通过将波导探针和反射电桥进行信号的输出和输入, 然后将探针置于待测试样品(油气储运管线管试样)上, 调节向量网络分析器, 使其扫描频率从1GHz到20GHz, 扫描点300~500个。其次, 将贮输管线管试样置于检测平台上, 然后将波导管探针分别对有缺陷和无缺陷的部分, 测量其对数幅值, 并将所获得的数据存储到数据库中, 并绘制出相应的图形。最后, 对计量资料进行分析, 也就是对数最小振幅, 最大值, 平均值的分析, 最终进行管道缺陷评估。本次微波无损检测功能测试, 针对广泛应用于石油储运管道的碳素钢材进行检测, 分别开展平板钢材、圆形钢管试件检测, 经检测, 微波无损检测功能应用于石油储运管道碳素钢材上, 能够有效探测出碳素平板钢材试件的缺陷深度、缺陷宽度, 对于碳素圆形钢管检测后, 可准确确认管材缺陷深度以及缺陷所处的位置。

## 4 实际应用案例

将微波无损检测技术应用至我国大庆油田某采油厂石油储运管道无损检测, 以验证该方法的有效性。本次测试场地石油储运管道为600MPa屈服强度, X80钢材级别, 14MPa运行压力, 管道壁厚22.6mm, 设计系数为0.75, 壁厚为1422mm。对测试管段开展微波无损检测, 采取如下技术策略:

### 4.1 前期准备

首先进行微波信号源准备, 选择合适的微波信号源, 保证其具备足够的输出功率和频率稳定性。同时, 对信号源进行校准, 以确保信号纯净度、稳定性, 避免噪声干扰。其次, 根据管道材质和检测要求, 将喇叭天线安装在波导探头上, 安装期间确保连接牢固、正确对准, 如抛物面天线或喇叭天线, 并在微波信号源、波导探头之间安装隔离器, 确保信号传输路径有效隔离, 减少回波干扰, 对隔离器进行校准, 确保其在工作频率范围内有较高的隔离度。最后, 进行矢量分析仪调试, 将矢量分析仪连接至波导探头, 进行相关参数的初步设置, 调整增益和频率范围, 确保波导

探头可准确地捕捉反射信号。完成上述设备挑时候, 开展最终全系统联调, 确保各组件协同工作无误。

### 4.2 检测作业

开展储运管道微波无损检测。首先, 设定电磁波频率为1GHz~20GHz, 开展频率扫描, 确认最佳频率设置, 以获得最佳检测灵敏度以及分辨率。完成电磁波频率设定后启动微波信号源, 发射设定好的电磁波信号, 操作阶段, 确保波导探头按照设定路径对管道进行扫描检测, 利用矢量分析仪实时接收从波导探头的反射信号, 并记录数据。其次, 根据管道长度与检测要求, 设计详细的检测路线, 这一过程下, 使用自动化移动装置, 按设定路线移动波导探头, 操作期间要求技术人员确保波导探头在移动过程中覆盖整个检测区域, 满足无漏检要求。最后, 完成检测操作后, 利用矢量分析仪数据导出功能, 将所有检测数据传输至计算机, 导出数据时, 要求确保数据的完整性、格式统一, 并使用专业的分析软件对导出的数据进行处理, 开展反射信号的时域、频域分析, 最终通过数据分析, 识别, 定位石油储运管道中的缺陷, 同时在计算机上详细标注缺陷位置, 并安排技术人员与管道实际位置进行对照, 确保定位精准性。经检测, 本次检测段储运管道存在多处裂纹缺陷, 缺陷深度在8mm~12mm范围内, 缺陷长度在100mm~300mm之间不等。

### 4.3 撰写缺陷检测报告

完成数据分析、缺陷评估后, 汇总所有检测数据与分析结果, 撰写详细的缺陷检测报告, 报告内容包括具体检测方法、设备参数设定、检测过程、缺陷定位结果、对应采纳数图表。报告完成撰写后进行审核, 确保无误后提交生产单位石油管道检修部门。

## 5 结语

综上, 微波无损检测技术, 基于金属波导理论与均匀传输线理论, 可实现石油储运管道的高效率无损检测, 在管道缺陷评估阶段快速实现缺陷定位、缺陷长度与缺陷深度数值分析, 可在有效降低石油储运管道检测、运维成本同时提升管道检测效率。本文针对微波无损检测技术原理以及其在石油储运管道中的应用进行研究, 相关企业可借鉴本文, 在石油储运管道运维、检修中充分发挥微波无损检测技术的优势, 为石油储运管道安全、稳定运行提供坚实技术保障。

### 参考文献:

- [1] 王兴国, 常宇, 彭贤民, 等. 基于石油化工压力管道射线无损检测质量控制研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(11): 48-50.