

# 化工装置压力管道定期检验方法优化

陈泽雄（广东省特种设备检测研究院阳江检测院，广东 阳江 529500）

**摘要：**在化工设备里，压力管道是保障生产过程安全且高效运转的核心部分。不过，在管道使用年数逐渐增加的过程中，可能出现各种不同的磨损或退化。本研究的目的是深入探索目前的检测手段，识别出其中的短板，并提出针对性的优化建议，讨论基于风险的RBIM检验方式、NDT技术和智能检验在提升测试效率和准确度上的潜在应用。

**关键词：**化工装置；压力管道；定期检验方法

## 0 引言

化工行业的压力管道是输送介质的关键设施，随技术进步与行业规范逐步优化，传统压力管道的检测手段已无法满足现今加强的安全标准。鉴于现有的检验方法面临的新挑战和需求，有必要深入了解并优化它。

## 1 现有压力管道定期检验方法的分析

### 1.1 法规规范及标准的梳理

依据《压力管道安全技术监察规程》和《工业管道设计规范》，进行压力管道检测时必须严格遵守其定期检查和操作规范。通常，检验周期是依据管道的使用年限、物质的特质及过去的运行数据来决定的。所做的检测内容覆盖了材料的当前状况、其结构的完全性、是否有腐蚀现象以及潜在裂纹增长等多个维度。在该认证标准中，明确列出了多种检验方式，这些方式包括目视审查、超声波测验、射线探测等，每一种方法都具有特定的适用场景和检测能力。所有负责检验的工作者都必须拥有必要的资格和丰富的经验，这样可以确保得到的检验数据是精确和可信的。

### 1.2 现有检验方法的优缺点分析

某些检测技术如目视观察、超声波探测、磁性粉末探测、渗透检验和射线探测等，每一种都具备它的独到之处和存在的缺陷。虽然视觉检查简单直观，但它对于潜在的缺陷检测的能力仍然受限。超声波检测技术能够为准确地测定壁厚和检测其内部缺损，但这种技术对操作人员的专业技能有相对较高的要求。磁粉和透水的探测对表面和靠近表面的缺陷非常灵敏，但这可能会因材料的特性和表面的状况而受到制约。射线检测虽然能够生成清晰明了的缺陷图像，但因其涉及到辐射安全风险，其应用受到了一定的限制。有些技术手段可能会要求管道停产或减少其工作负荷，这种做法在持续的生产过程中会导致额外的操作成本增加。

### 1.3 检验过程中的问题与不足

确定检验周期通常更偏向于依赖实践经验来做决策，而不是基于数据的决定，这种方式可能导致检验太频繁或者不够，进而影响资源的有效使用。在测试方法的选择方面，可能会因应现有的技术和设备的局限性而受限，尤其是针对某些新颖或复杂结构的管道，现有的检测技术可能不能提供充分的深度和精确度。在检验流程当中，数据搜集与解析也显得不足，由于缺少有体系的数据库辅助，因此从过往数据中汲取和进行预估变得尤为艰难。检验工作人员的技术专长和经验之间可能会出现差距，这可能会导致检验结果的不一致性，从而影响检验结果的可信度。

## 2 基于风险的检验（RBI）方法研究

### 2.1 RBI 的基本原理与流程

基于风险的检验（Risk-Based Inspection RBI）方法是一套将风险管理作为核心考量的评估手段，其基础理念是系统性地识别、评定并管理压力管道可能潜藏的风险因素，目的是为了优化检验方案和资源配置机制。RBI 方法的基础要求是首先对管道系统的操作环境、所用材料特性和历史维护纪录进行深入且全面的数据收集，以便进行更为准确的风险评估。在风险评估的阶段，需要对可能引发管道故障的多个元素进行具体的量化研究，这包括但不限于腐蚀、疲惫和裂缝的扩张，从而决定各个管道部分的潜在风险级别。依据评估的成果，RBI 方法有能力为每一个管道段设计个性化的检查流程，包括检测的频次、采用的技巧以及重点关注的区域，从而确保对高风险地段有更为充分的关心和资源配置。RBI 流程一般涉及到风险的辨识、风险的量化、风险的评价、测试计划的制订及其后续的实施检查等环节。

### 2.2 风险因素识别与评估

风险因素的识别与评估涉及系统地识别和评价压

力管道可能遭遇的各类风险条件，其中包含但不限于管道材料腐蚀速度、机械应力、温度波动现象、介质特性以及外界环境因素的作用等。在识别完成后，可以利用定量分析方法来评估这些元素可能对管道的安全造成危害，并据此来确定这些因素对于管道总体风险的具体贡献程度。

在评估流程中，运用了概率学与统计学的技术，结合了实际的管道运作数据，为各种风险要素制定了概率分配模型。经过数值计算，能够得知管道在某一特定时段发生的故障可能性，以及此故障可能引发的严重后果。

### 2.3 检验频次与检验项目的优化

对于那些高危区域，每隔6个月可能要对其进行深入的超声波探测，以监控可能存在的腐蚀或者裂纹的扩张状况。与此相对，在低风险地区，检验周期有可能每隔两年增加一次，目的是为了降低不必要的检测费用和缩短停机周期。在进行检验项目的优化时，必须将管道的实际操作、过去的维护记录以及风险评估的结果进行全面综合。

譬如说，假如过往的数据指出在高温运行期间某一特定管道段的腐蚀发展速度有所上升，那么应在这—管道段的检查方案里，加强对腐蚀速度变动的频繁监控。另外，针对某些特定的管道材质，例如高强度合金钢，可能要引入硬度检测及微观结构的分析，以了解材料性能的转变。

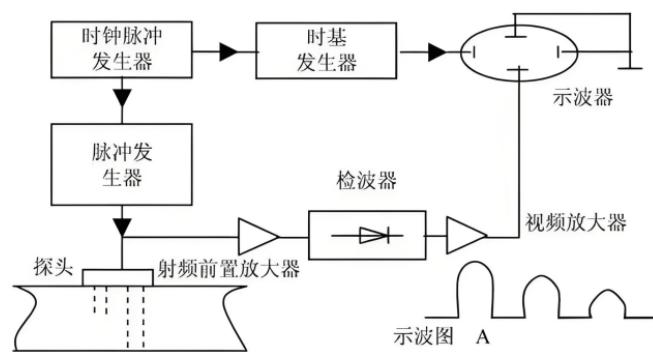
## 3 非破坏性检测(NDT)技术的应用与优化

### 3.1 常用NDT方法的原理

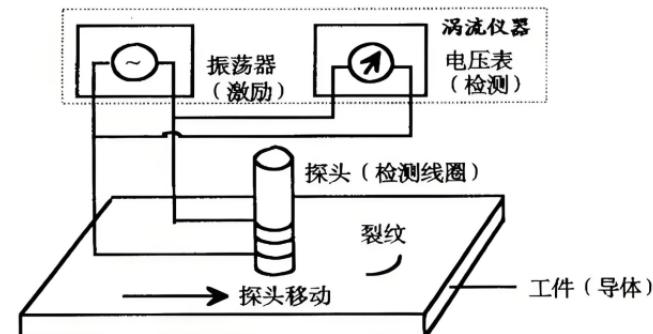
常用NDT检测技术有许多，例如超声波检测(UT)、射线测试(RT)、磁性粉末测试(MT)、渗透测试(PT)以及涡流分析(ET)。超声检查是基于高频率声波在材料之间的传播属性，它通过观察声波在材料内的反射、吸收以及散播行为，从而鉴定内部的缺陷，其工作原理如图1a所示。射线的探测过程是利用X射线或伽马射线来检测材料，进而通过观察不同密度材料对射入的射线吸收差异来识别缺陷。当涉及到铁磁性的材料检测，磁粉检测是有效的。

这一方法通过向材料表面施加磁场并撒上磁粉，进而探测出其表层可能存在的裂缝或其他断裂。渗透检测方法包括在物料上覆盖含有荧光标记或染色的渗透剂，然后利用液态物质的毛细特性来填补表面的裂缝，之后使用清洁剂去除多余的渗透成分，并使用显影剂使这些缺陷更加明显。涡流检测技术是通过感

知导电材料的表面产生的涡流，以及观察涡流产生时产生的磁场改变，进而确定材料的电导率波动及表面和近表面的缺陷，详见图1b)。



a) 超声波技术原理



b) 涡流检测原理图

图 1

### 3.2 NDT技术优化策略

技术的选择应基于管道材料的特性和预期检测的缺陷类型，对于深度的缺陷检测，超声波检测(UT)似乎更具适应性；而对于表面缺陷、渗透性检测(PT)或磁粉检测(MT)，它可能显示出更高的灵敏度。如果能够加强检测技术的自动化，将有助于减少由于人为操作引起的各种干扰，从而提高检测过程的连贯性和准确性。以自动超声扫描技术为例，它可以提供更平均的覆盖以及更高精度的数据处理能力。整合了尖端的数据处理技术，如机械学习和AI技术，能够更准确地识别缺陷，特别在复杂或嘈杂的环境中。为了确保NDT设备的运行在最优状况下，还需定期地进行设备校正与维护的优化策略。

## 4 基于模型的剩余寿命预测

### 4.1 剩余寿命预测模型的建立

剩余寿命预测模型是一个基于数据驱动的方法，旨在通过分析历史和实时监测数据来预测管道的使用寿命。

模型的构建首先需要获取管道的所有细节数据，其中包括了材料的种类、壁厚、工作时的压力、温度、流经介质的化学属性，还有任何已知的损坏状态。依据现有数据，创建一个包含统计模型、机器学习方法以及物理退化模型的综合预测网络。例如，可以利用线性回归技术来研究管道壁厚随时间逐渐减小的模式，或者采用神经网络方法来辨识裂缝扩散的各种复杂情况。物理的模型，例如 Paris 定律，能够描绘疲劳裂纹的扩展速度与其所承受的应力强度因子的互相关联。为评估预测结果的可信度，模型需要集成多种不确定性量化方法。为确保模型预测中输入参数的准确性，通常需要确定概率分布并进行敏感性的分析。

#### 4.2 模型参数的确定与验证

参数制定是基于历史上的数据错误、实验的成果以及理论探讨的全面评估。当管道壁厚因为腐蚀而变薄时，Arrhenius 模型是描述腐蚀速率与温度关系的一个有效方法，其中，活化能与频率因子成为了影响这一过程的关键因素。参数的精确设定需依赖于对实际监控数据的模拟拟合，这种过程或许包括非线性回归的研究。

通过对压力管道在过去十年中的腐蚀速率数据进行搜集，能在 Arrhenius 模型中计算出活化能达到  $40\text{kJ/mol}$  的数值，并确定相关频率因子为  $10^{12}\text{s}^{-1}$ 。这些参数的精准设定为未来模型提供了关键的输入依据。为了证实模型的参数是否有用，这需要对独立数据集进行处理，并与真实失效场景进行对比。例如，当利用上述参数的 Arrhenius 模型来预测腐蚀速率时，它所预测的腐蚀速率与实地测量的数据相差不超过 5%，这证明了该模型的预测能力相当出色。

### 5 智能化检验技术的应用

#### 5.1 无人机、机器人等智能设备的应用

无人机、机器人这类智能设备具备进入困难或危险的场所的能力，以完成高度精确的检测工作。无人机科技在管线检测场景中的运用使得可以从空中对管线进行迅速的宏观审查，以便确定其外观的腐蚀、裂痕或其他潜在的损害。这些设备能够装载高分辨率的摄像头和红外热成像设备，以捕获管线表面的热量图像，进而揭示存在的热点问题，这些热点可能是内外腐蚀问题的指标。

机器人技术能够在管道内进行检测操作，这些机器人可以携带超声波探头或者其他类型的传感器，以便对管道内壁进行全面的检查，包括发现管道壁厚的

减小或是否有内部裂痕。这群机器人具有在管道内移动的能力，甚至在狭窄或曲线的管道里也能保持灵活的位置。智能设备的独特导航能力与数据分析功能使得整个检测流程更为自动化和智慧化。

#### 5.2 大数据与人工智能在检验中的应用

大数据的应用通过汇集并对管道监控系统中的大量数据进行解析，为检验流程创造了深入的洞察。这批数据可能涵盖了关于管道的操作细节、所处的环境情况、之前的维护记录以及实时观测中得到的腐蚀及应力信息。引入了人工智能技术，特别是机器学习与深度学习的算法，从而进一步提高了分析数据的效率。借助于模型培训来识别数据里的模式与不正常情况，AI 可以有效地预测管道的退化趋势以及潜在的故障状况。比如说，深度学习网络有能力解析来自传感器的各种信号，并且能够智能地在管道内捕捉到不正常的噪音或振动现象，这些可能是裂缝扩张或腐蚀加速的初期标志。

AI 技术除了可以进行图像辨识外，还能够解析无人机或机器人记录的高清晰度图像，从而自动地识别如裂缝、腐蚀坑或焊接上的问题。此类自动化鉴别功能不只提升了检测的处理效率，同时也减轻了由人为因素造成的误差，使得检验的结果更为准确。

### 6 结语

本文深度分析了化工装置压力管道的定期检查方式，并突出了法律条文、风险估算、非破坏性检测方法以及智能化检验系统的关键性。随技术日益向前，期望这些创新能增强检验的效率和安全系数，为化工行业的长期稳健发展奠定坚实基石。

#### 参考文献：

- [1] 何仁洋, 吉建立, 刘畅. 浅析新版长输管道定期检验规则的修订理念及意义 [J]. 中国特种设备安全, 2024, 40(05):6-11+18.
- [2] 国宾. 压力容器压力管道检验的要点思考 [J]. 中国质量监管, 2024, (03):92-93.
- [3] 董樑. 人工智能在压力管道定期检验中的应用探讨 [J]. 化工装备技术, 2024, 45(01):1-4.
- [4] 严伟. 小型氯制冷压力容器与压力管道的检验 [J]. 黑龙江科学, 2023, 14(24):150-152.

#### 作者简介：

陈泽雄（1989.10-）男，汉族，广东阳江，本科，机械工程师。主要研究方向：特种设备检验、检测。