

LNG 接收站静设备可靠性评估和剩余寿命研究

盖小刚 杨亮 范嘉堃 (中海石油气电集团有限责任公司, 北京 100028)

摘要: 为实现对 LNG 接收站静设备可靠性的准确评估和对剩余寿命准确预测, 开展相关研究。明确 LNG 接收站静设备组成, 构建 LNG 接收站静设备可靠性模型。利用构建的静设备可靠性模型, 依据不同静设备对 LNG 接收站总体运行可靠性影响程度, 分配权重, 进行可靠性评估。结合非线性退化理论, 实现 LNG 接收站静设备剩余寿命预测。通过实例证明, 新的方法可以实现对静设备可靠性的准确评估, 且对其剩余寿命的预测与实际相符, 具备极高应用价值。

关键词: LNG; 静设备; 剩余寿命; 可靠性评估; 接收站

0 引言

液化天然气 (LNG) 作为一种高效、环保的能源形式, 其地位日益凸显。LNG 接收站作为连接 LNG 供应链的重要环节, 其安全、稳定、高效地运行对保障国家能源安全、促进经济发展具有重要意义。然而, LNG 接收站静设备在运行过程中, 受到环境、工艺、操作等多种因素的影响, 其可靠性会逐渐降低, 甚至可能引发安全事故。因此, 对 LNG 接收站静设备进行可靠性评估和剩余寿命研究, 对于确保接收站的安全运行、优化维护策略、延长设备使用寿命具有重要的理论价值和实践意义。目前, 关于 LNG 接收站静设备可靠性评估和剩余寿命的研究方法多种多样, 包括但不限于基于失效机理的分析方法、基于数据驱动的预测方法以及基于仿真模拟的评估方法等。这些方法在一定程度上能够评估设备的可靠性并预测其剩余寿命, 但都存在一些不足之处。例如, 基于失效机理的分析方法往往依赖于大量的实验数据和专家经验, 且难以准确描述设备的实际运行情况; 基于数据驱动的预测方法则受限于数据的质量和完整性, 对于数据缺失或异常的情况处理不够理想; 而基于仿真模拟的评估方法虽然能够模拟设备的运行过程, 但其模型的精度和复杂性之间往往难以平衡。本研究旨在通过对 LNG 接收站静设备的可靠性评估, 分析设备在运行过程中的性能变化规律, 预测其剩余寿命, 为接收站的维护管理提供科学依据。同时, 本研究还将结合国内外相关研究成果和实践经验, 探讨提高 LNG 接收站静设备可靠性的有效途径, 为推动我国 LNG 产业的健康发展贡献力量。

1 构建 LNG 接收站静设备可靠性模型

LNG 接收站静设备主要包括一系列用于接收、储存、输送和气化 LNG 的关键组件。这些设备在 LNG

接收站中发挥着至关重要的作用, 确保 LNG 能够安全、高效地进入储罐、被储存, 并在需要时通过输送和气化过程供给给终端用户。针对各静设备, 分别完成对其可靠性模型的构建。由于篇幅限制, 该步骤主要构建具有代表性的静设备压力容器和 LNG 储罐的可靠性模型, 以此作为代表。

压力容器: 压力容器是用于储存液化天然气, 同时, 压力容器能够根据实际需求, 通过内部机制或外部设备, 对压力进行调节, 确保整个系统的稳定运行。在最小维修的假设框架下, 构建压力容器的非齐次泊松过程可靠性模型。该模型能够有效地利用 LNG 接收站压力容器的故障数据, 从而得出相应的可靠性指标。对于压力容器的初次失效间隔时间可靠度函数 $R(t)$, 表达式为:

$$R(t) = \exp(-0.0305t^{0.9394}) \quad (1)$$

其中, t 表示压力容器可靠运行时间。在 LNG 压力容器的初始工作状态, 即工作时间为 0 小时时, 其可靠度自然为 1, 表示设备处于完全可靠的状态。而当 LNG 压力容器在无故障运行达到 200 小时时, 其可靠度降低至 0, 意味着设备面临失效的风险。在实际的生产操作中, 为确保设备运行的顺利进行, 维修工人会对 LNG 压力容器进行细致地检修和养护工作。经过这样的维护, LNG 压力容器的可靠度可视为重新恢复至 1, 即设备再次达到完全可靠的状态。

为了更准确地描述 LNG 压力容器的可靠性, 引入失效概率。失效概率可以大致表示为应力超过强度分布的概率, 其表达式为:

$$P_f = P(\sigma > S) \quad (2)$$

式中, P_f 表示压力容器的失效概率; $P(\sigma > S)$ 表示应力大于强度的概率; σ 表示应力; S 表示强度。

LNG 储罐: LNG 储罐是接收站的核心设备之一,

用于储存从运输船接收的 LNG。这些储罐通常是大型、低温、常压储罐，能够容纳大量的 LNG。储罐的结构形式多样，包括单包容罐、双包容罐、全包容罐和膜式罐等，以满足不同的安全和存储需求。对于储罐可靠性模型的建立需要考虑到混凝土预应力对其产生的影响，以此构建混凝土预应力损失引起混凝土外罐失效的极限状态方程 Z:

$$Z=0.2 \sigma(t_0)-[\sigma(t_0)-\sigma(t)] \quad (3)$$

其中， $\sigma(t_0)$ 表示起始时间为 t_0 时的张拉应力； $\sigma(t)$ 表示 t 时刻的张拉应力。当 $Z \leq 5$ 时，此时储罐失效。在此基础上，还需要考虑到氯离子侵蚀对外罐的影响。结合 Monte Carlo 法对特定分布的参数随机抽样，获得氯离子侵蚀对外罐可靠度影响的方程 $C(x, \tau)$:

$$C(x, \tau) = C_{sa} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot \tau}} \right) \right] \quad (4)$$

其中， C_{sa} 表示混凝土表面氯离子浓度； x 表示保护层厚度； D_a 表示氯离子渗透系数； τ 表示混凝土服役时间。联立公式 (3) 和公式 (4) 得到 LNG 储罐可靠性模型。

2 可靠性评估

根据上述构建的各个静设备可靠度模型，对 LNG 接收站的静设备可靠性进行全面而细致地评估。从 LNG 接收站的实际运行场景出发，构建不同的静设备可靠性拓扑结构。静设备处于运行状态时，其可靠性对接收站的运行安全和效率至关重要。然后，分析静设备能否正常使用对 LNG 接收站静设备可靠性的影响。基于此，在静设备正常运行和故障两种情况下，分别构建了不同的静设备可靠性拓扑结构，并为相关静设备分配了不同的权重指标。在确定了不同情况下的静设备权重指标后，综合建立了 LNG 接收站静设备可靠度评估模型 Q:

$$Q = \omega_1 Z_1 + \omega_2 Z_2 + \cdots + \omega_i Z_i + \cdots + \omega_n Z_n$$

$$Z_i(t) = e^{-\lambda t} \quad (5)$$

其中， ω_i 表示不同静设备对应的权重； Z_i 表示各静设备可靠度； λ 表示设备在单位时间内发生故障的概率； e 表示自然对数的底数。该模型能够综合考虑各个静设备的性能、运行状态以及它们之间的相互影响，从而得出更加准确、全面的可靠性评估结果。通过这一评估过程，不仅能够了解各个静设备在不同情况下的可靠性水平，还能够发现潜在的风险和薄弱环节，为接收站的运行和维护提供有力的决策支持。这

将有助于优化设备管理策略，提高接收站的安全性和运行效率。

3 基于非线性退化的 LNG 接收站静设备剩余寿命预测

在实现对 LNG 接收站静设备可靠性的全面评估后，进一步开展基于非线性退化理论的静设备剩余寿命预测研究。这一研究旨在更准确地把握静设备在实际工作环境中的性能退化规律，从而为其剩余寿命的预测提供更加科学、合理的依据。在实际工作环境下，LNG 接收站的静设备退化过程往往呈现出动态化和随机化的特点。这意味着设备的性能退化并非简单的线性过程，而是受到多种因素的共同影响，呈现出复杂的非线性变化。因此，采用传统的线性退化模型进行剩余寿命预测往往难以得到准确的结果。基于非线性退化理论的预测方法能够更好地描述静设备在实际工作环境中的性能退化过程。它不仅能够考虑设备性能退化的非线性特点，还能够引入随机因素，更真实地反映设备性能退化的动态变化。通过运用这一理论，能够更加精确地预测静设备在特定时间内的剩余寿命，为接收站的运行和维护提供更加有力的支持。此外，非线性退化理论的应用还能够帮助更好地理解和分析静设备性能退化的原因和机制。通过对设备退化数据的深入分析和挖掘，能够发现设备性能退化的关键影响因素，为后续的设备维护和改进提供重要的参考依据。采用扩散过程对非线性退化过程 $\{X(t), t \geq 0\}$ 进行建模，具体可描述为:

$$dX(t) = \mu(t; \theta)dt + \sigma_B dB(t) \quad (6)$$

其中， $X(t)$ 表示退化过程； $\mu(t; \theta)$ 表示漂移系数，是时间 t 的非线性函数， θ 为未知参数； σ_B 表示扩散系数。若退化过程 $\{X(t), t \geq 0\}$ 为非线性连续随机退化，且其退化过程可用上述公式所示的非线性模型建模，对随机过程 $\{X(t), t \geq 0\}$ ，定义其寿命为随机退化过程首次达到或穿越失效阈值的时间，则其剩余寿命可表示为:

$$T = \inf\{t: X(t) \geq L | X(0) < L\} \quad (7)$$

其中， T 表示剩余寿命； L 表示失效阈值。通过上述公式，完成对 LNG 接收站静设备剩余寿命的预测。

4 实例应用分析

以某 LNG 接收站为例，利用本文上述提出的方法对其静设备可靠性进行评估，并预测其剩余寿命。该 LNG 接收站静设备包括再冷凝器、储罐、管道 A、管道 B、压力容器，对上述静设备分别编号为 I、II、III、IV、V、VI。利用本文上述提出的方法可以得到

该 LNG 接收站静设备可靠度柱形图, 如图 1 所示。

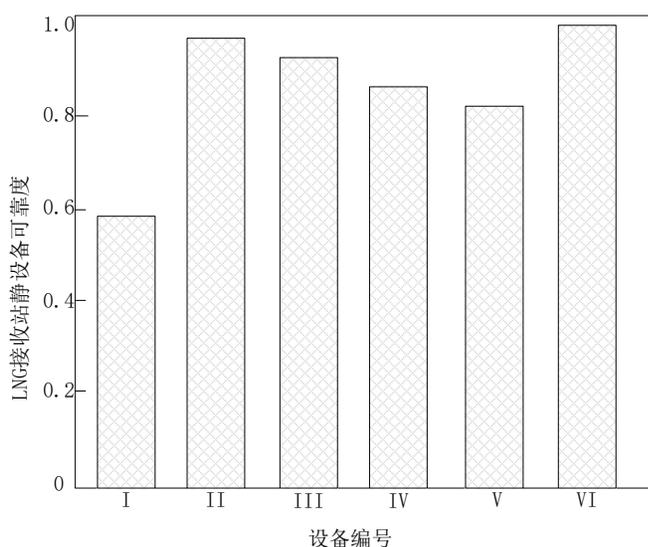


图 1 LNG 接收站静设备可靠度柱形图

从图 1 LNG 接收站静设备可靠度柱形图可以看出, 各静设备中, 只有设备 I 压力容器的可靠度为 0.568, 小于 0.6, 其余各个设备的可靠度均在 0.8 以上, 分别为 0.956、0.942、0.865、0.834、0.986。

上述设备中设备 I 压力容器已经出现了异常运行现象, 因此, 将设备 I 压力容器作为研究对象, 在不影响接收站在整体运行安全的情况下, 再对其剩余寿命进行预测, 通过将预测结果与该设备实际使用年限进行对比, 以此验证本文方法的应用性能。将本文得到的预测结果绘制成图 2 所示。

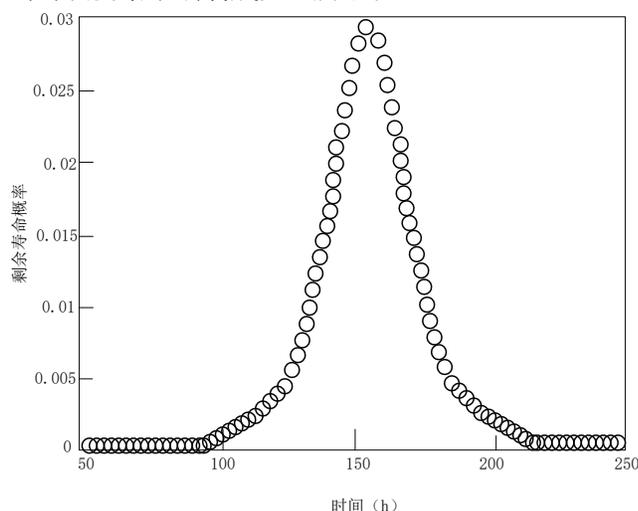


图 2 本文方法对设备 I 压力容器剩余寿命预测结果图

从提供的图 2 中可以清晰地观察到, 当采用本文所提出的方法对设备 I 压力容器进行剩余寿命预测时, 经过一系列复杂的计算和分析, 我们发现在运行至 153 小时时, 压力容器剩余寿命的概率达到了最大值。基于这一结果, 将 153h 作为压力容器剩余寿命的最

终预测值。在整个测试期间, 压力容器始终在常规条件下运行, 且所处的环境条件也保持在正常范围内, 没有出现任何异常或突变。在这样的运行环境下, 压力容器的实际运行时间总和为 152.8h。将这一实际运行时间与本文方法预测的结果进行对比, 发现两者之间的差值仅为 0.2h。这一微小的差值不仅体现了本文方法预测的准确性, 更凸显了其在实际应用中的价值。考虑到压力容器的运行条件和环境的复杂性, 以及诸多可能影响其剩余寿命的因素, 能够实现如此高精度的预测, 无疑是对本文方法有效性的有力证明。

5 结束语

本研究通过对 LNG 接收站静设备的可靠性评估和剩余寿命研究, 为接收站的维护管理和安全运行提供了重要的理论支持和实践指导。研究结果不仅有助于接收站优化维护策略、降低运营成本, 还能为相关决策提供科学依据, 促进 LNG 产业的可持续发展。然而, LNG 接收站静设备的可靠性评估和剩余寿命研究是一个复杂而系统的工程, 涉及多个学科领域的交叉融合。未来, 还需要进一步深入研究 LNG 接收站静设备的失效机理、监测诊断技术、维护管理策略等方面, 不断完善和丰富研究成果, 为推动我国 LNG 产业的健康、安全、高效发展作出更大的贡献。

参考文献:

- [1] 李俊儒, 庄培鸿. 某石化 EPC 项目静设备设计工作的几点经验 [J]. 石油化工设计, 2024, 41(01): 41-44+75.
- [2] 吴剑. 以乙烯装置为例实证分析静设备投资与工艺参数的相关性 [J]. 石化技术, 2023, 30(08): 234-235.
- [3] 何文萱, 唐海亮. 天然气站场关键静设备失效规律分析 [J]. 管道技术与设备, 2023(03): 14-18+41.
- [4] 王波, 张文泽, 解志刚. 基于风险的静设备分级与检维修管理方法 [J]. 新技术新工艺, 2022(09): 75-80.
- [5] 张春雨, 单树振, 裴永吉, 等. 化工静设备常用传感器故障检测与隔离方法 [J]. 化学工程与装备, 2022(08): 200-201+214.
- [6] 戴婧. 石油化工静设备应力腐蚀开裂成因与防护措施 [J]. 石化技术, 2022, 29(03): 197-198.
- [7] 肇启友. 浮式液化天然气项目上部模块静设备外部载荷特点及考虑方法 [J]. 山西化工, 2022, 42(01): 77-78+83.

作者简介:

盖小刚 (1984-) 男, 汉族, 山东东营人, 研究生, 工程师, 研究方向: LNG、低温、压力容器。