

天然气加气站系统及管道多级优化维护

梁艳华（新疆新捷燃气有限责任公司石河子分公司，新疆 石河子 832000）

摘要：在能源输送中，天然气管道是连接气源与用户的关键纽带，保障能源顺畅传输。但天然气加气站系统及管道存在诸多维护难题，为此，本研究基于资产完整性评估框架，创新开发出考量过程变量（PVs）的多级优化维护计划方法，对保障管道稳定运行意义重大。实施时，融合动态贝叶斯网络、损伤建模与敏感性分析技术，解读外部扰动下管道系统失效概率动态变化。凭借测量、观测过程变量应对离散时间场景，像压力、温度变化能反映管道工况。构建模型网络，定义决策、效用节点展现维护活动与成本，引入回归分析为后续维护打基础。将该方法用于天然气调压计量站（管道沿线关键设施）案例。实践表明，此方法既能依据前兆数据预判管道失效风险，又能依实时状况制定最优维护计划，为加气站系统及管道的可靠运行提供支撑。

关键词：基于风险的维护；天然气加气站；动态贝叶斯网络；管道

1 引言

在全球能源体系中，能源输送领域对社会运行与经济发展起着基础性支撑作用。其中，管道运输因其独特优势，在能源输送方式里占据核心地位，石油、天然气的长输管道更是重中之重^[1]。

天然气管道作为能源传输的关键设施，深埋地下，构建起能源源头与终端用户间的直接联系。在工业领域，它为各类工厂稳定输送天然气，保障生产活动所需能源的持续供应。从大型炼化厂到精细化工车间，天然气驱动设备运转，维持工业生产流程不间断运行，是工业体系正常运作的关键依赖。对于居民生活，天然气通过管道入户，为日常生活提供清洁能源，满足烹饪、取暖等基本需求，提升生活便利性与质量。凭借稳定的能源传输，天然气管道有力确保能源供应平稳，对维护国家能源安全意义重大^[2]。

伴随天然气应用日益广泛，其配送网络的覆盖范围持续拓展，运营规模不断扩大。在此过程中，安全问题涉及资产保护、人员生命安全保障以及环境保护等多方面，引发研究人员高度关注，促使天然气管道安全与风险评估成为重要研究方向^[3]。

扎雷伊等人通过严谨的科研攻关，开发出定量动态风险评估框架。该框架运用先进的数学模型与实时监测数据，精确量化风险因素，动态跟踪风险变化，有效助力降低天然气管道故障风险^[4]。

蒂克西埃等人基于对工业工厂复杂环境的深入调研，识别出 62 种全面风险分析方法，系统涵盖风险识别、精准评估、合理分级三个关键阶段，为工业场景下的天然气管道风险管理提供系统方案。

在资产完整性管理与维护计划优化研究方面，成

果颇为显著，催生一系列创新方法。维护策略通常分为纠正性、预防性、预测性、主动性四类。纠正性维护侧重于故障发生后修复；预防性维护提前采取措施预防故障；预测性维护借助数据分析预测故障发生概率与时间；主动性维护则综合多方信息主动优化维护方案。后两类因能显著提升管理效能，在当下能源输送管理实践中备受关注^[5]。

贝叶斯网络（BN）作为复杂工程系统风险评估的有效工具，在能源输送领域得到应用。哈克扎德对比领结模型与 BN 模型，经大量实证研究凸显 BN 在处理不确定性、复杂关联风险因素时的优势。面对能源输送系统动态变化现象，动态贝叶斯网络（DBN）应运而生，它能够实时捕捉系统动态行为，依据系统实时状态更新风险评估结果。

影响图作为 BN 的扩展形式，引入决策节点，在辅助决策制定方面弥补传统决策方法的不足，为维护决策提供更科学依据。然而，当前既有概率模型在应对长期外部扰动方面存在短板，精准捕捉参数波动对构建可靠故障模型至关重要，且 BN 在处理强外部扰动时存在局限性。

本文聚焦能源输送过程中的关键变量，将扰动因素作为核心研究点，深入探究其在确定最优维护计划中的作用。首先构建 DBN 模型，依据过程变量（PVs）变化趋势进行建模，精确估算系统失效概率；进而将 DBN 扩展为影响图（IDs），利用影响图辅助决策维护间隔与维护类型选择。以天然气减压站为实例，充分运用基于风险的方法，结合实际运行数据与风险评估结果，开发适配的维护策略，旨在提升能源输送管道运行可靠性，推动能源输送行业稳健发展。

2 方法

2.1 贝叶斯网络

贝叶斯网络是一种有向无环图 (DAG), 其中节点 (随机变量) 通过弧线相互连接, 这些弧线代表变量之间的概率依赖关系。

例如, 图 1 展示了一个示意性的贝叶斯网络, 其中节点 X_3 是 X_1 和 X_2 的子节点; 节点 X_1 和 X_2 被视为 X_3 的父节点。每个节点都包含一个条件概率表 (CPT)。基于条件独立性和链式法则, 贝叶斯网络按照公式 $P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Pa(X_i))$ (1) 估算一组随机变量的联合概率分布。例如, 对于图 1 中所示的随机变量 X_1 、 X_2 和 X_3 , 其联合概率分布可通过 $P(X_1, X_2, X_3) = P(X_1)P(X_2)P(X_3|X_1, X_2)$ 来估算。倘若有关于一个或多个机会节点的新信息可用, 贝叶斯网络能够基于公式 $P(X|E) = \frac{P(X, E)}{\sum_x P(X, E)}$ 所示的贝叶斯定理更新联合概率分布:

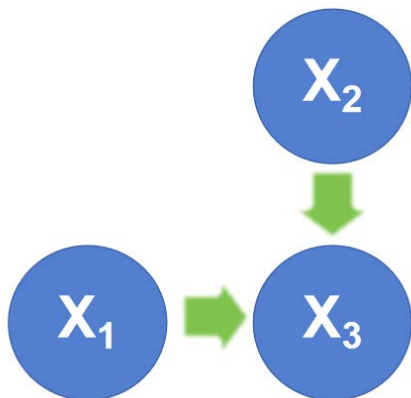


图 1 贝叶斯网络示意图

2.2 故障分析

考虑一个动态贝叶斯网络 (DBN) 模型, 该模型描述了在施加一系列扰动前后过程变量 (PVs) 的状况。现已开展故障分析来评估相关故障。出于本部分内容的需要, 将详细介绍两个小节。

2.3 过程变量监测机制建模

用于过程变量 (PVs) 随机建模的通用动态贝叶斯网络被用作马尔可夫过程模型的一种推广形式。在马尔可夫过程中, 如公式 $P(X_{(t+1)}|X_t, \dots, X_0) = P(X_{(t+1)}|X_t)$ 所示, 在给定当前状态的情况下, 未来状态与过去状态相互独立。在此, 马尔可夫过程被建模为一系列代表过程变量 (PV) 的节点链。

为确保动态贝叶斯网络 (DBN) 在各个时间片上是同质的, 考虑了连接节点 $[E_1, \dots, E_t]$ 的弧线。这些节点之间的转移通过对角矩阵进行建模, 从而得到 $E_t = E_{t-1}$, $t = \{2, \dots, T\}$ (对 Ω 也采用类似假设)。这样做是为了便于模型构建过程, 并使模型能有更好的

图形展示效果, 这些弧线对模型的计算效率并无影响。尽管此处提出的模型是一般性的, 但过程变量 (PVs) 的数量可根据应用需求随时间而变化, 具体如下: $K^j(t) \in K^j = \{K_1^j, K_2^j, \dots, K_n^j\}; j = 1, \dots, n$ 。

例如, 温度或振动可以作为采用这种方法进行建模的过程变量。由于依据新证据进行更新被视为当前模型的一个特点, 因此可以从每个 $K_{(t)}^j$ 中获取观测值, 如公式 $O^j(t) \in O^j = \{O_1^j, O_2^j, \dots, O_t^j\}; j = 1, \dots, n$ 所示。

其中, j 为观测次数, i 表示正在被监测的过程变量。对于扰动变量 (如系统扰动和外部扰动) 的范围及类型, 假定同样的条件, 见公式 $\mathcal{E}_q; q = 1, 2, \dots, x$ 。

该模型具有 n 个时间片, 它们将整个过程时间划分为离散的时间步长。所有具有连续解析表达式的变量分布都被离散化为若干个互斥的状态。提出单变量离散化方法是为了能够精确地实现概率分布的连续性。

3 应用研究

3.1 天然气加气站系统及道监测模型设计

为了演示天然气加气站系统及管道 PV (压力) 随时间变化的随机模型, 建立了一个 DBN 模型。该模型通过分析四个季节 (每个季节代表一个时间切片的压力行为来简化; $(P_0, P_1, \dots, P_4)$), 外源扰动对其的影响。

参数 P_0 代表初始压力 (压力的历史数据), 其服从威布尔分布, 尺度参数和形状参数分别为和。假定这两个参数的偏差可忽略不计, 且取值恒定 $A=4.445$, $B=10.244$ 。相反, 模型中应用的其他参数呈正态分布。

表 1 中提及的每个参数的分布都被划分成特定数量的区间。

除这些参数外, 观测节点同样被离散化为 10 个区间, 同时利用 MATLAB 软件避免舍入误差 (见图 2)。

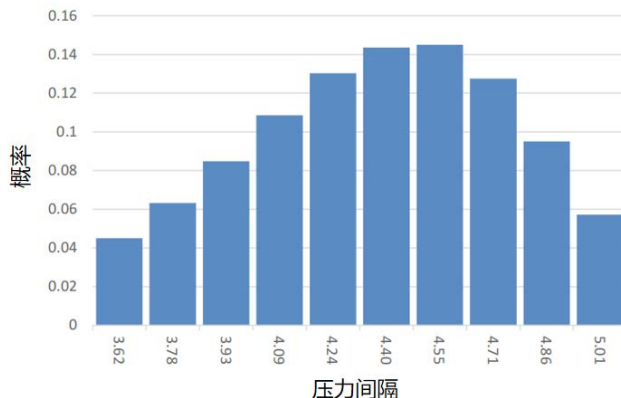


图 2 初始压力尺寸的离散威布尔分布

表 1 具有单变量扰动变量的压力随机建模的参数

变量	种类	分布（离散化的时间间隔）	平均值	标准差
α_0	第 1 次扰动参数	正常 (5)	4.8862	3.1191
β_1	第 2 次扰动参数	正常 (5)	-0.6154	3.0978
α_1	第 3 次扰动参数	正常 (5)	-0.6734	2.9834
β_2	第 4 次扰动参数	正常 (5)	-0.1425	0.3821
α_2	第 5 次扰动参数	正常 (5)	-0.6356	5.6245
β_3	第 6 次扰动参数	正常 (5)	-0.2342	1.7345
α_3	第 7 次扰动参数	正常 (5)	-0.2132	2.5634
β_4	第 8 次扰动参数	正常 (5)	-0.0453	3.5234
α_4	第 9 次扰动参数	正常 (5)	-0.0012	0.9144
β_5	第 10 次扰动参数	正常 (5)	0.1673	1.1237
α_5	第 11 次扰动参数	正常 (5)	0.0523	0.6387
β_6	第 12 次扰动参数	正常 (5)	0.1987	0.562
α_6	第 13 次扰动参数	正常 (5)	-0.0987	2.4912
Ω	设备不确定性	正常 (3)	0.0002	0.05

3.2 模型应用结果

为了评估所开发的方法的优势，我们考虑了三个不同的季节性检查案例。为了明确表 2 中的报告数据，在案例 B 中，在第三个季节使用状态 2 的压力和状态 7 的压力间隔进行观测。在第二季和最后一季中，该系统的健康状况不受监控。

表 2 NGRM 站内压力尺寸的观察结果（破折号的单元格表示不执行监视的时间）

月份	3	6	9	12
A	状态 1	状态 6	状态 8	-
B	状态 2	-	状态 7	-
C	状态 8	-	-	-

在天然气加气站系统及管道多级优化维护研究中，涉及不同案例情境。案例 A 里，压力从初始第 1 状态升至第 6 状态再到第 8 状态，反映系统劣化。起初继续运行期望效用高，为最优选择，但第二季其效用陡降，表明半年后该策略不再适用。经剖析，确定第一季继续、第二季维修的最优策略，预测最后一种方案效用趋同。依模型推演，第三、四季分别采用更换、继续运行方案，期望效用可达 120,000 元与 10,000 元峰值，效益最大。

案例 B 中，前两季实时监测评估显示继续运行是

最优配置，能保系统稳定。然而到第 9 个月末，压力升至第 7 区间，逼近故障风险，需维修干预。第三季维修，经模型与实际验证，在天然气调压计量站场景下，该操作助系统获约 150,000 元最大期望效用，后续依劣化节点实施匹配维护策略，可优化期望效用、保障长效稳定。

案例 C 设定时间段内，继续运行方案期望效用偏离大、波动强，维修与更换方案则变化极小、稳定性高。回溯第一季，依精准模型量化评估，更换方案期望效用占优，峰值约 40,000 元。执行更换决策后，后续研究时段其他方案期望效用激增，可为维护决策提供重要参考，助力加气站系统及管道维护规划。

4 结论

在天然气加气站系统及管道多级优化维护背景下，开发了基于马尔可夫退化模型的新方法，用于估算最优维护时间规划。运用 DBN 与 ID 分析加气站过程变量变化机制，挖掘相关不确定性阐释故障模式。模型可依新数据实时更新概率，量化检测可靠性并估算成本。以天然气调压计量站为例验证，选压力作过程变量，用傅里叶级数结合扰动参数预测趋势，通过三季检案例确定最优维护时间与策略，如案例 A 第二季维修部件最经济等。总体而言，此多级优化维护框架能为工业流程做风险精细化维护规划，控制成本保障运行。但鉴于监测数据非线性，建议开发非平稳模型预测变量趋势，利用降噪手段提升决策数据质量，以更好地服务于加气站维护工作。

参考文献：

[1] 李娟. 天然气加气站安全设计要点分析 [J]. 节能与环保, 2019(03):66-67.

[2] 尤晓军. 刍议压缩天然气加气站的安全技术运用模式 [J]. 科技创新与应用, 2023(09):98-101.

[3] 华长春, 马立强, 薛春燕. 中国天然气加气站发展和加气机检定现状分析 [J]. 现代测量与实验室管理, 2022(04):22-23+29.

[4] 刘海燕. 天然气加气站安全评价 [D]. 成都: 西南石油大学, 2007.

[5] 胡艳娇, 陈保东. 压缩天然气加气站与加油站的比较 [J]. 石油库与加油站, 2023(05):31-33+5.

作者简介：

梁艳华（1976-），男，汉族，河南驻马店人，本科，助理工程师，职务：站长，单位：新疆新捷燃气有限责任公司石河子分公司。