

北京市天然气供应链可靠性分析

□ 北京市燃气集团有限责任公司 (100035) 李持佳

□ 北京优奈特燃气工程技术有限公司 (100124) 邵敏 于玉良 张燕平

摘要: 采用FTA (故障树分析方法), 对从气源、长输管线到城市门站的城市燃气供应链进行了可靠性分析。本文中的故障树分析模型基于天然气供应系统的拓扑结构, 采用可靠的基础数据, 对北京市供气系统的可靠性进行了定性和定量分析, 可为提高北京市天然气供应的安全性提供指导意见。

关键词: 故障树分析 城市燃气 可靠性 定量分析 拓扑结构

Reliability Analysis of Beijing Natural Gas Supply Chain

Li Chijia, Shao Min, Yu Yuliang, Zhang Yanping

Abstract: The reliability of city supply chain, from the source, the pipeline to the city gate station, is analyzed by using the fault tree analysis method (FTA). The FTA model starts with reliable statistical data and relies on the topological structure of the actual supply of natural gas system. It can do qualitative and quantitative analysis of the reliability of the city gas supply system and provide guidance to improve the urban gas supply security.

Keywords: fault tree analysis city gas reliability quantitative analysis topology structure

1 前言

天然气作为绿色、低碳的清洁燃料, 被广泛应用于民用、商业、采暖、发电、工业、汽车、三联供等领域。随着在一次能源中比例的不断攀升, 天然气供应已关乎国计民生, 其供应安全越来越得到人们的关注。

天然气供应安全涉及到供应链上的各个环节, 包括气源、长输管线、分输站及门站等, 如何评估城市燃气供应链的可靠性, 如何确定影响供气可靠性的关键事件及其影响程度, 是合理解决供气安全问题的先

决条件^[1]。

2 北京市天然气供应链FTA分析

2.1 FTA (Fault Tree Analysis) 模型

故障树分析FTA (Fault Tree Analysis) 方法是一种早期的系统可靠性分析方法, 它将系统故障形成的原因由上至下, 按层次以树枝状逐级细化的分析方法^[2]。该方法通过对可能造成系统故障的各种因素 (包括硬件、软件、环境、人为因素等) 进行分析, 画出逻辑

框图（故障树），从而确定系统故障原因的各种可能组合方式及其发生概率，以计算系统故障概率，确定系统的薄弱环节，以便采取相应措施，提高系统的可靠性。

故障树分析模型从可靠的统计数据着手，根据城市天然气供应系统的拓扑结构进行定性和定量分析。

2.2 北京市天然气供应链

北京市“十三五”期间供气气源主要有陕甘宁气田、克旗煤制气田、唐山LNG接收站、大港油田储气库群及华北油田储气库群等，并通过6条长输管线将天然气供至市域的12座门站（M1~M12），从而形成了多气源、多方向的供气格局。

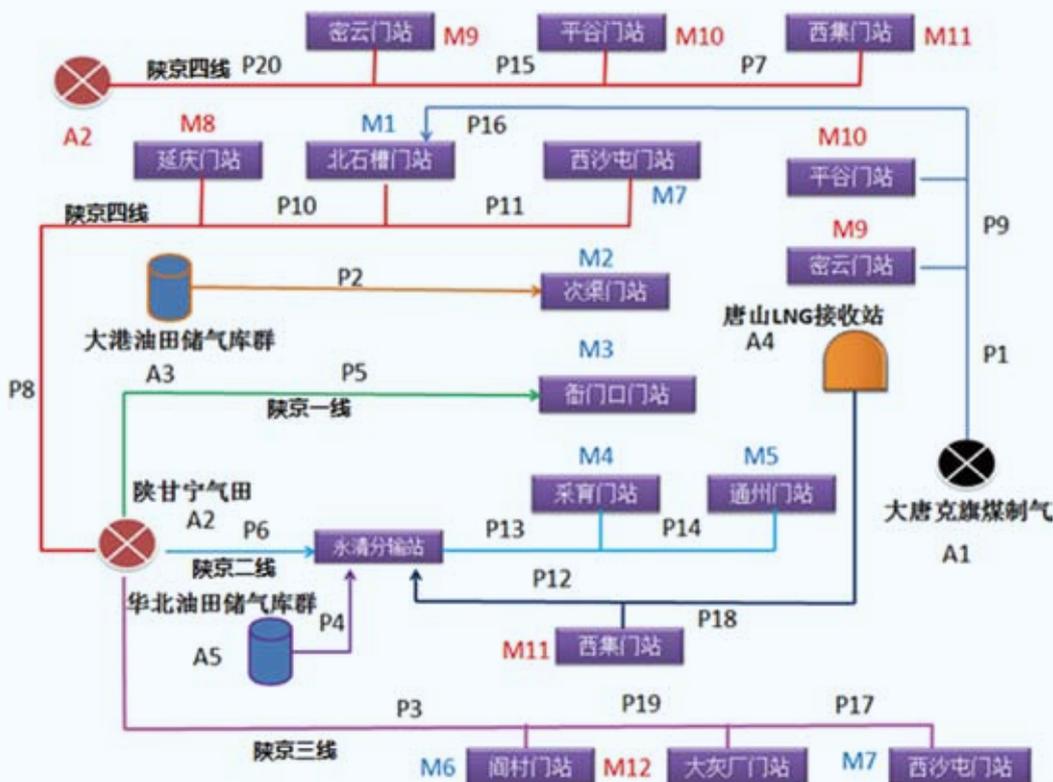


图1 北京市天然气“十三五”供应系统事故树拓扑结构图

表1 事故树基本事件列表

编号	事件名称	编号	事件名称	编号	事件名称	编号	事件名称
P1	P1管线故障	P11	P11管线故障	M1	北石槽门站故障	M11	西集门站故障
P2	P2管线故障	P12	P12管线故障	M2	次渠门站故障	M12	大灰厂门站故障
P3	P3管线故障	P13	P13管线故障	M3	衙门口门站故障	A1	大唐煤制气气田故障
P4	P4管线故障	P14	P14管线故障	M4	采育门站故障	A2	陕甘宁气田故障
P5	P5管线故障	P15	P15管线故障	M5	通州门站故障	A3	大港油田储气库群故障
P6	P6管线故障	P16	P16管线故障	M6	阎村门站故障	A4	唐山接收站故障
P7	P7管线故障	P17	P17管线故障	M7	西沙屯门站故障	A5	华北油田储气库群故障
P8	P8管线故障	P18	P18管线故障	M8	延庆门站故障	A6	俄罗斯气田故障
P9	P9管线故障	P19	P19管线故障	M9	密云门站故障		
P10	P10管线故障	P20	P20管线故障	M10	平谷门站故障		

2.3 基本事件概率分析

FTA模型的计算核心依附于基本事件概率，因此其准确性直接影响模型的可信度。从分类来看，该FTA模型涉及的基本事件有气田事故、储气库事故、LNG接收站事故、输气站事故、长输管线事故及门站事故。

2.3.1 气田事故

从陕甘宁气田运行数据的统计结果看，现役单井集气气井的平均无故障工作时间3 154.42h，集气井的平均无故障工作时间为130.75h。气田先导开发试验区运行中的采气管道和注醇管道总长27.558km，管道运行37.233km·a，故平均事故率为 26.858×10^{-4} 次/(km·a)。

根据现役集气站的运行数据，运行中的6座集气站内管道总长2.655km，管道运行3.744 km·a，共发生1次漏气事故，对应平均事故率为 267.094×10^{-3} 次/(km·a)。集气支线总长118.54km，管道运行176.810km·a，共发生1次漏气事故，计算得平均事故率为 5.656×10^{-3} 次/(km·a)。

依据安全评估部门综合评判分析，陕甘宁气田故障率为0.02次/a，故障停产时间7h。

2.3.2 储气库事故

根据英国HSE (Health and Safety Executive) 机构对全球地下储气库事故的统计分析，枯竭油气藏类储气库故障率在 5.8×10^{-6} 次/a ~ 8.3×10^{-6} 次/a，见表2。

大港油田储气库群及华北油田储气库群属于枯竭油气藏类储气库，故障概率取 6×10^{-6} 次/a。

2.3.3 LNG接收站事故

国际LNG进口组织 (GIIGNL) 自1965年对世界范围内的LNG接收站事故进行了分类统计分析，如表3及图2。

表3 LNG接收站事故频率统计表

数据采集时间	事件数量	累计运行年	事故频率 (次/站·a)
1965 ~ 1974	15	44	0.34
1975 ~ 1984	52	179	0.29
1985 ~ 1994	94	327	0.29
1995 ~ 2000	85	191	0.45
2001 ~ 2007	82	579	0.14
合计1965 ~ 2007	328	1 320	0.24

表2 事故频率统计表

储气库类型	欧洲盐穴储气库	世界盐穴储气库	欧洲枯竭油气藏储气库	全球枯竭油气藏储气库
气井失效事件	1	10	1	5
操作经验 (井·a)	24 000 ~ 65 000	59 000 ~ 83 000	81 000 ~ 153 000	603 000 ~ 860 000
失效率 (次/井·a)	$1.5 \times 10^{-5} \sim 4.1 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-4} \sim 1.7 \times 10^{-4}$	$6.5 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-5}$	$5.8 \times 10^{-6} \sim 8.3 \times 10^{-6}$

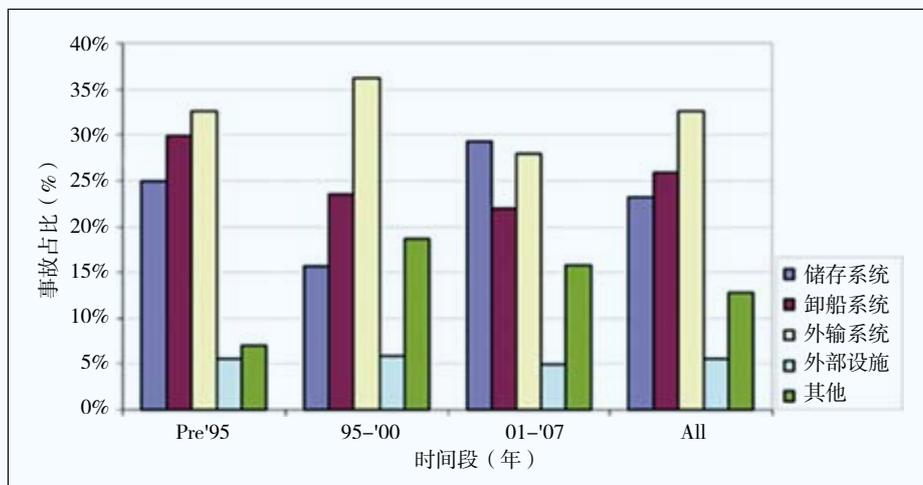


图2 LNG接收站事故发生部位分布图

LNG接收站事故统计表明，LNG接收站事故的发生频率约为0.24次/(站·a)，最易发生事故的部分在外输系统。唐山LNG接收站失效率按照GIIGNL的统计结果，取0.24次/a。

2.3.4 输气站事故

根据相关文献^[3]，输气站的故障树计算失效率引用美国API581标准提供的设备通用失效率值，即 1.2×10^{-4} 次/a^[4]。

2.3.5 长输管线事故

目前世界现有主要管道事故数据库有：天然气采集和输送系统（National Gas Gathering and Transmission System Incident Database）、有害液体管道系统事故数据库（Hazardous Liquid Accident Database）、管道事故的统计（Statistics about Pipeline Incident）、管道故障数据库（Pipeline Fault Database）、澳大利亚管道工业协会（the Australian Pipeline Industry Association Ltd, APIA），虽然上述统计机构的数据详尽全面，但大部分都是以事故类型为划分标准进行统计。事实上，根据欧洲天然气管道事故数据组织（European Gas Pipeline Incident Data Group, EGIG）的研究，管道失效率与管径和使用年限关系密切，不同管径的输气管道失效率甚至相差数百倍。见图3。

目前，欧洲拥有天然气管道事故（Gas Pipeline Incidents）数据库，并由EGIG管理，欧洲的15个天然气输送公司每年收集130 000km长度的管道失效数

据。管道总暴露值（管道长度乘以管道运营时间）是3 150 000km·a。庞大的数据统计样本能保障统计概率几乎相当于样本失效概率。

EGIG组织对管线按管径进行了更加细致的统计分析，不同管径的失效率差距较大，北京市供气长输管线管径较大，按统一管径的统计方法误差较大。

输气管道试压投产运行后，其事故率会经历“浴盆曲线”的3个阶段，管道投产初期事故多发阶段、管道稳定工作期的事故率稳定阶段、后期因管道和设备老化而事故率上升阶段。见图4。

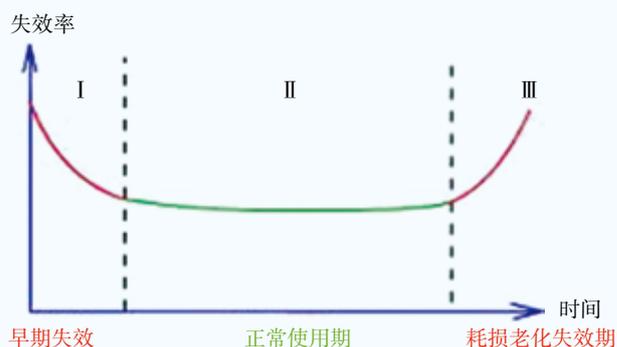


图4 管道失效浴盆曲线示意图

2.4 FTA模型求解

2.4.1 故障树分析图，见图5

2.4.2 求解顶上事件概率

顶上事件状态 $\phi(X)=1$ 的所有基本事件的状态

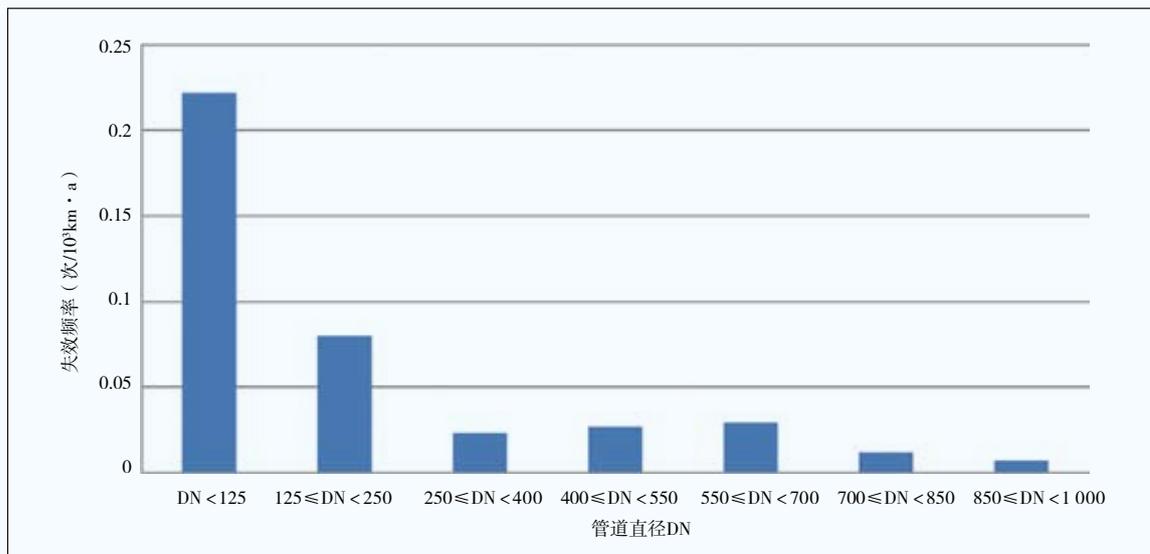
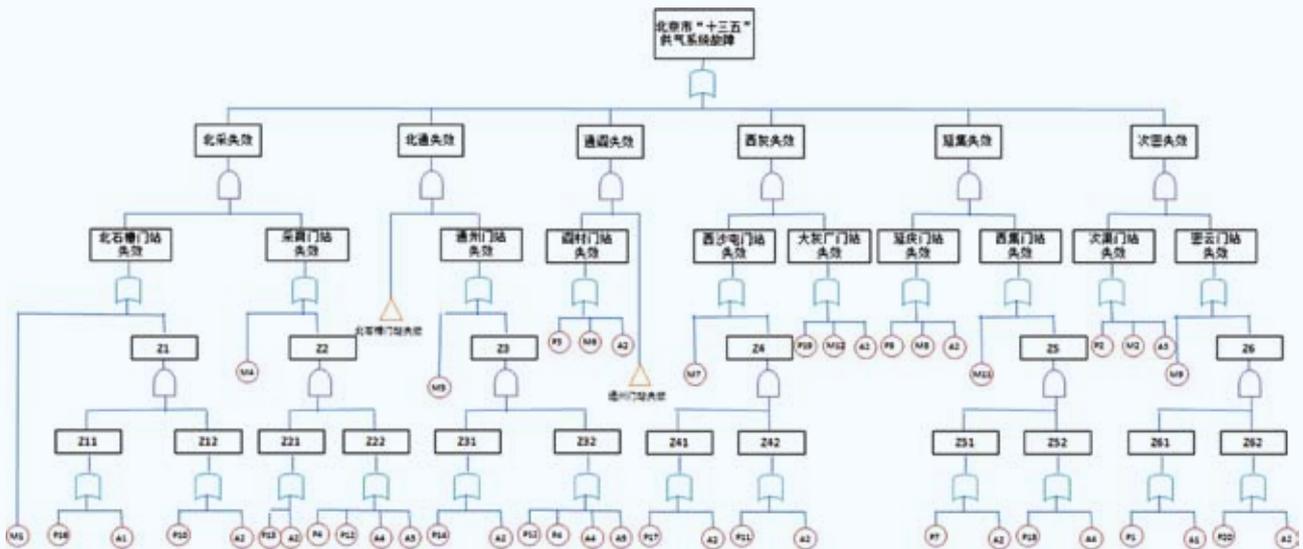


图3 管道失效频率与管径的关系图

表4 基本事件概率一览表

编号	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
管长 (km)	280	162.72	955	12	745	803	1 300	1 070	320	1 120	1 155	294	850
管径 (mm)	914	711	1 016	559	660	1 016	1 219	1 219	914	1 219	1 016	1 016	1 016
服役起始年	2011	2000	2011	2010	1997	2005	2017	2017	2011	2017	2017	2009	2005
失效概率 × 10 ⁻³ 次/a	2.8	4.8816	9.55	0.36	44.7	8.03	39	21.4	3.2	22.4	23.1	2.94	8.5
编号	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	M1	M2	M3	M4	M5	M6
管长 (km)	892	1 220	359	1 015	290	975	1 180	-	-	-	-	-	-
管径 (mm)	1 016	1 219	914	1 016	1 016	1 016	1 219	-	-	-	-	-	-
服役起始年	2005	2017	2011	2011	2009	2011	2017	-	-	-	-	-	-
失效概率 × 10 ⁻³ 次/a	8.92	36.6	3.59	10.15	2.90	9.75	35.4	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
编号	M7	M8	M9	M10	M11	M12	A1	A2	A3	A4	A5	A6	
管长 (km)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
管径 (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
服役起始年	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
失效概率 × 10 ⁻³ 次/a	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.02	0.02	0.006	240	0.006	0.02	



图例

序号	名称	符号	含义
1	与门		所有输入事件发生时, 输出事件才发生
2	或门		任一输入事件发生时, 输出事件都发生
3	基本事件		发生原因的最底层事件
4	中间事件		顶事件与底事件中间的事件
5	转移事件		用于不同故障树间的转移

图5 北京市天然气“十三五”供应系统故障树分析图

组合,求各个基本事件状态($X_i=1$ 或 0)的概率,所使用的公式是:

$$Q = \sum \phi(X) \prod_{i=1}^n q_i^{X_i} (1-q_i)^{1-X_i}$$

式中:

Q ——顶上事件发生概率函数

$\phi(X)$ ——顶上事件状态值, $\phi(X)=0$ 或

$\phi(X)=1$;

\sum ——求 n 个事件的概率积之和;

X_i ——第 i 个基本事件的状态值, $X_i=0$ 或 $X_i=1$;

q_i ——第 i 个基本事件的发生概率。

经计算,顶上事件概率为 $Q=0.000003$ 次/a。

2.4.3 临界重要度分析

临界重要度系数 C_i 是从敏感度和概率双重角度衡量各基本事件的重要度标准,经计算,临界重要度大小如下:

$Ic[A2]>Ic[P19]>Ic[P10]>Ic[P16]>Ic[A4]>Ic[P17]=Ic[P11]>Ic[P3]>Ic[P7]>Ic[M1]>Ic[M7]>Ic[P14]>Ic[P13]>Ic[M12]>Ic[M4]=Ic[M5]=Ic[M6]=Ic[M11]>Ic[P18]>Ic[A1]>Ic[P12]>Ic[P4]>Ic[A3]>Ic[A5]$

总体来看,天然气供应链中各环节都会对供应可靠性产生影响,其中陕甘宁气田故障、陕京三线故障、陕京四线故障、大唐管线故障、唐山LNG接收站故障是影响北京市供气可靠性的关键事件。可见,主导气源对供气可靠性影响最大,其次是长输管线,唐山LNG接收站也是影响北京市的供气可靠性的重要环节。

2.4.4 关键事件对供气量的影响

由于陕甘宁气田故障将导致整个北京供气系统的“坍塌”,计算其对供气量的影响没有意义,仅对陕京三线故障、陕京四线故障、大唐管线故障、唐山LNG接收站故障等关键事件影响进行分析。根据经验,长输管线事故维修时间3d,场站事故维修时间取10h。

上述关键事件对北京市供气量的影响在 $153 \times 10^4 \text{m}^3 \sim 19\,800 \times 10^4 \text{m}^3$ 之间,其中陕京三线故障、陕京四线故障最易导致北京市供气系统故障,且影响较大,影响供气量高达 $19\,800 \times 10^4 \text{m}^3$,该气量应由应急气源储备解决。根据对供气系统分析,北京市应控制敏感度较大的管线故障,加强气源建设以强化“多气

表5 关键事件影响气量表

事件编号	事件描述	概率(次/a)	持续时间(h)	事故影响	影响供气量($\times 10^4 \text{m}^3$)
P19	陕京三线故障	0.00975	72	阎村门站、大灰厂门站、西沙屯门站	13 200
P10	陕京四线故障	0.0224	72	延庆门站、北石槽门站、密云门站、平谷门站、西集门站	19 800
P16	大唐管线故障	0.00359	72	北石槽门站、密云门站、平谷门站	6 912
A4	唐山LNG接收站故障	0.24	10	陕京二线支线	153

源”,同时应加快应急储气设施的建设。

3 结论

FTA故障树分析方法综合考虑了气源至门站各个环节对供气安全的影响,可以清晰、直观地展现城市燃气供应系统故障失效的模式及内在逻辑关系。可以定性区分各基本事件的重要性排序,辨识系统安全的关键环节;可以定量计算系统失效概率,并可结合事故影响,对城市燃气供气系统进行整体风险评估;可为城市气源、管线布局、应急储备量等的规划提供科学依据。

参考文献

- 1 单卫国. 全球天然气市场发展及趋势[J]. 中国能源, 2011; 33(1): 13-16
- 2 李明菲, 周利剑, 郑洪龙等. 我国天然气管网系统可靠性评价技术现状[J]. 油气储运, 2015; 34(5): 466-468
- 3 王勇, 李长俊. 普光输气站场定量风险评估技术研究[D]. 西南石油大学, 2012
- 4 American Petroleum Institute. Risk based resource document API 581[S]. 2000