

燃气管网事件的故障树比较与构建

□ 北京市燃气集团有限责任公司 (100035) 王伟 何少平

□ 北京建筑大学 (100044) 詹淑慧 崔金玉

摘 要: 对燃气事故原因进行分类, 科学、规范地统计和管理事件记录, 是探讨事故防范与应对措施的前提, 也是燃气行业管理和燃气供应企业共同关注的问题。在对燃气管网各类故障树比较分析后, 本文构建的“人-物-环”三因素故障树, 特别适用于燃气供应企业进行管网事故归因分析。

关 键 词: 故障树分析方法 燃气管网 事故因素

Comparison and Construction of Fault Trees for Gas Pipeline Events

Wang Wei, He Shaoping Beijing gas Group Co.,Ltd.

Zhan Shuhui, Cui Jinyu Beijing University of Civil Engineering and Architecture

Abstract: Classifying the causes of pipeline accidents, managing and analyzing accident records with theoretical basis and standard, is the premise of improving accident prevention and response, and so is a hot topic focused by gas supply enterprises and gas safety management organizations. After comparing a few fault tree models established by previous researchers and organizations, a new fault tree model based on 3 factor model: People-Equipment-Environment is introduced. The new model is especially suitable for gas supply enterprises to analyze the causes of pipeline network accidents.

Keywords: fault trees analysis(FTA) gas pipeline accident analysis

1 前言

中华人民共和国住房和城乡建设部在2016年发布了《城镇燃气设施运行、维护和抢修安全技术规程》(CJJ51-2016)^[1], 该技术规程规范了城镇燃气行业的运行、维护及抢修工作, 对燃气供应企业有重要的指导作用。在这部技术规程中, 对燃气事故的统计管理做出了具体规定。规程依据中国城市燃气协会安全

管理委员会2012年发布的《城镇燃气安全事故统计分析文件》, 在附录A中给出了“城镇燃气安全事故报告表”, 其中包括事故基本情况报告表、事故类别统计表和事故原因统计表共3类表格。

根据技术规程附表A, 燃气事故至少应该被统计、关注3次:

(1) 事故单位信息及事故基本情况等: 关注这些信息, 可以使行业主管部门、安全生产管理机构、

企业领导层了解行业安全状况及动态，便于有针对性地进行管控；

(2) 事故类别、事故等级的区分与统计：这些信息可以体现燃气事故后果的严重程度和行业或区域的安全水平，便于探讨各类事故的应急处置措施及其效果；

(3) 燃气事故原因：分析确认事故原因不但是界定事故责任的重要参考，更是有效防范类似事故再次发生的前提条件。

分析、确定事故的真实原因，是事故管理中的重中之重；只有科学地划分和界定事故的原因，才能探讨有效的防范措施，预防事故的发生、阻断事故链条。在国内外对燃气事故原因的分析论证中，故障树分析方法作为一种兼具系统性、准确性和预测性的方法被广泛应用。

2 故障树分析方法及应用

故障树分析方法 (Fault Tree Analysis, FTA) 是典型的演绎式分析方法，主要用于分析系统风险与失效的原因。1961年由美国贝尔电话公司研发、经由波音公司扩展修改的FTA，已经在各专业系统安全及可靠性分析中得到应用^[2]。

FTA采用“自上而下”的分析方式，对导致某一关键失效事件（即“顶事件”）的诸多影响因素及状态进行逐级推理，进而建立由逻辑门连接而成的树形图；树形结构可以形象而清晰地反映出事故发生路径和不同因素之间的影响与联系。

故障树的全面性、系统性及逻辑性直接决定了分析结果的辨识和适用程度。构建故障树是一项严谨、繁复的工作，需要对FTA理论及系统构成与状况有深入的理解。美国原子能委员会上世纪发表的、著名的

《核电站风险报告》(WASH-1400)，总耗资300万美元，其中所建立的故障树由60名专家花费近3年时间才得以完成^[3]。

构建故障树的依据有很多，包括按系统部件、操作流程、责任归属、故障类别等各种分类形式。利用FTA进行燃气管网事件的原因分析已经有很多成果。

3 部分燃气管网事件的故障树分析

燃气管网是城镇燃气供应系统重要组成部分。

“燃气泄漏”是燃气管网事件（事故）中最值得分析的事件，因为着火、爆燃、用户停气等多种后果都可能是“燃气泄漏”引发的；分析该事件能覆盖较多类型的事件事件，并为有效预防、处置这些事件提供参考及指导。

3.1 CJJ51中关于燃气管网事故原因的分析

在《城镇燃气设施运行、维护和抢修安全技术规程》(CJJ51-2016)附录A.0.3中，燃气管网事故的原因分为管道断裂、管道腐蚀穿孔、管道外力破坏和其他共4项。

我们按照A.0.3绘制出燃气管网事故故障树模型，见图1。

CJJ51-2016中燃气管网事故的故障树结构清晰、明确，绝大部分管网事故可以找到对应的分类；“其他”类别还可以进一步扩展、分层；利用这一表格的统计结果能够满足燃气行业安全管理的基本要求。

3.2 某燃气公司燃气管网事件故障树

作为基层的燃气供应企业，为安全生产、科学管控，需要更为详细的事故原因分类。目前，燃气供应企业一般使用自己设计的事件统计、分析表格，有企业内部的事件情况汇总与交流形式。

某燃气公司在事件统计中使用了《突发事件情况

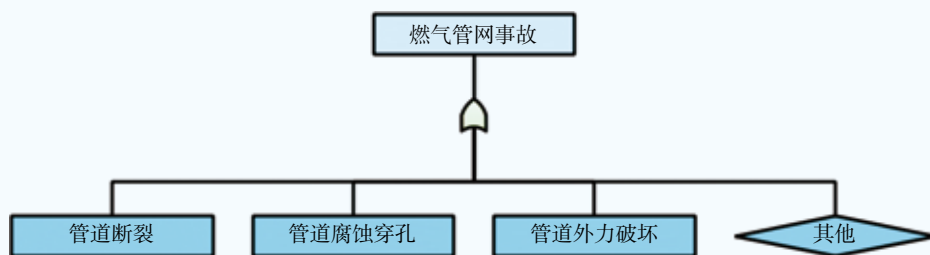


图1 CJJ51-2016中燃气管网事故故障树模型

表》和《自查事件情况表》，其中，燃气管网事件的原因被分为6大项：外力因素、腐蚀因素、材料建设因素、设备因素、使用操作因素及自然因素，而每一项之下又有若干分项。

我们将该燃气公司上述两表格绘制成以管网“燃气管网事件”为顶事件的故障树，见图2。

从图2的故障树，可以看出：

（1）该故障树分为3级，燃气管网事件的原因包含两个层级，逻辑结构清晰；统计分类时可以比较方便地将事件（事故）明确归类到底层子类别，可操作性较强；

（2）故障树底层各因素可以讨论事故拦截方法，探讨改进措施。比如，对于“用户使用不当”，可以采取宣传、教育、检查等手段，防止事件的发生；

（3）大部分子类别还可以进一步细分，例如“专业人员操作不当”的原因可能包括“技术培训不到位”、“身体原因”和“心理原因”等等，而对应的防范、改进措施是不同的；

（4）故障树第二层的某些因素，没用通用的管理手段来拦截事故。比如在“使用操作因素”中包含了“外部人员”和“内部人员”两类，而这两类人员引发的事故在燃气企业的安全管理中需要分别采取截然不同的管控方法。

3.3 加拿大某研究小组的故障树分析

在加拿大某研究组的论文中，Shahriar等人的研

究组对管网“燃气泄漏”事件提出的故障树模型见图3^[4]。

我们认为：

（1）这一故障树模型层级数多，划分细致，部分因素还可以继续分解为多级故障树（△、△部分）；

（2）首先按燃气泄漏事故的后果类型分为“穿孔”和“破裂”两类进行分析，对实际工作有一定指导意义，方便进行事故防范措施的探讨。通常情况下，“穿孔”引起的泄漏量比较小，而“破裂”往往造成短时间、大量的泄漏。这两类泄漏事故的防范及处置措施是截然不同的。但“第三方破坏”也可能造成管道“穿孔”，如果只在管道“破裂”中考虑“第三方破坏”显然不够；

（3）故障树逻辑性较强，事故因素多而全；但其中有些子类别的划分过于细致，在实际应用中，事故归因的可操作性会受到限制；“土壤pH值低”、“土壤细菌”、“土壤高含盐量”和“材料微结构缺陷”等，难以量化判断。

4 依据事故致因因素理论的管网“燃气泄漏”故障树构建

根据事故致因因素理论（见图4），导致事故的直接原因包括人的不安全行为、物的不安全状态和环境不良等因素，管理欠缺不能切断事故链条，而有效

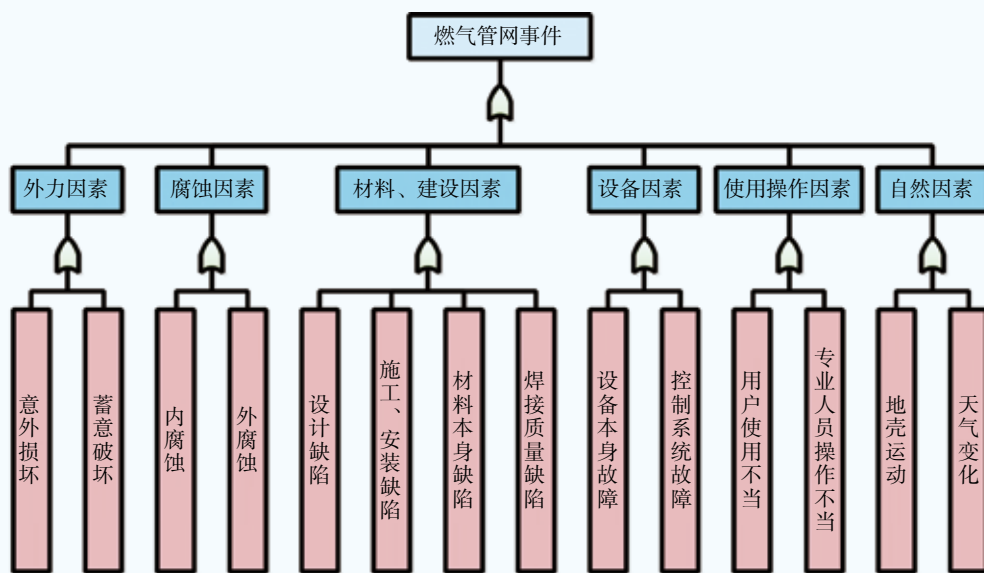


图2 某燃气公司燃气管网事件故障树

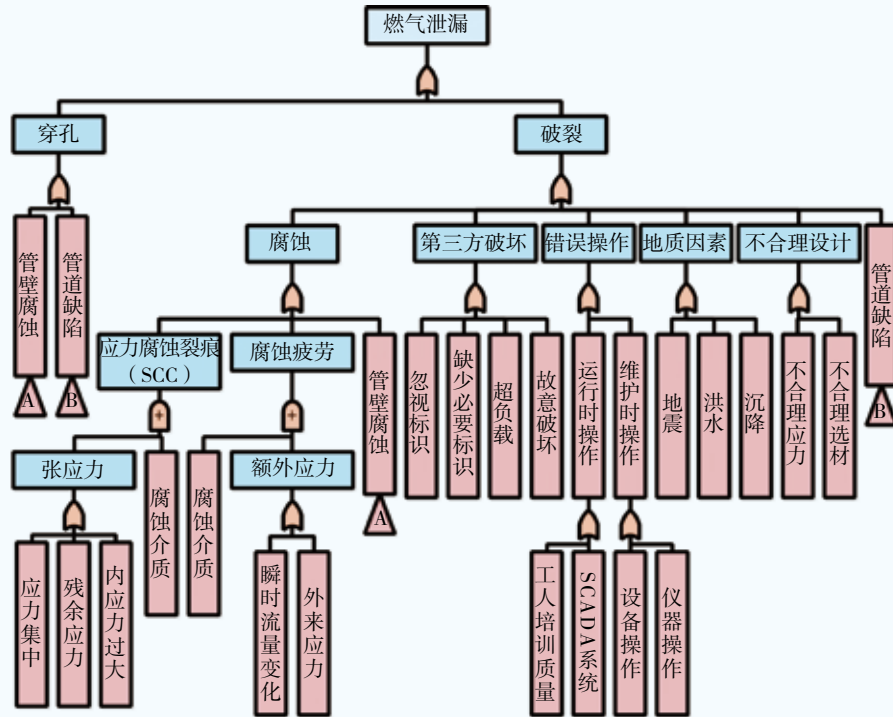


图3 Shahriar研究组提出的管线“燃气泄漏”事故故障树模型

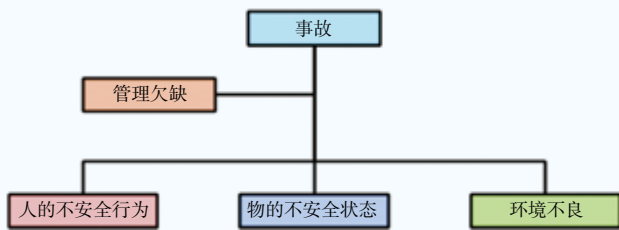


图4 事故致因因素理论

的管理措施则是防止事故发生的拦截器^[5]。

结合目前燃气企业安全管理实际操作的需要，我们构建了基于“人-物-环”三因素的管网“燃气泄漏”事件故障树，见图5。

这一故障树的特点是：

(1) 以“燃气泄漏”为顶事件的分析模型，也可以用于由“燃气泄漏”引起的其他类型事件的统计分析；

(2) 将“人-物-环”三类因素作为故障树的第一层分类，可以避免事件因素的重复和遗漏；方便在燃气企业的安全管理中“人、物、环境”分类实施管理；

(3) 在“人”的因素分类中，首先将“外部人员”和“内部人员”进行区分，方便燃气企业在事件

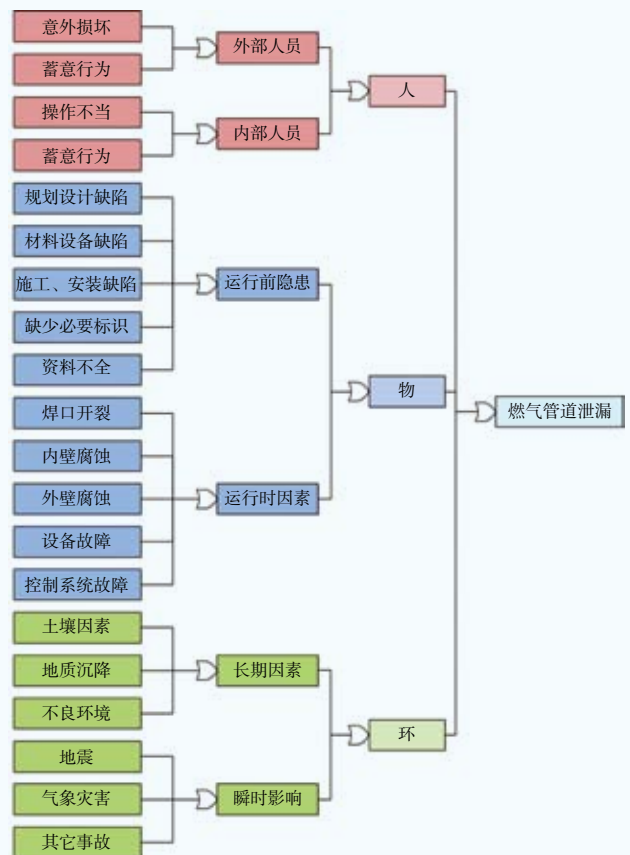


图5 依据事故致因因素理论建立的管网“燃气泄漏”故障树模型

归因中快速地分清责任；在事故预防时对“第三方人员”和“企业员工”分别探讨、实施不同的安全管理措施；

(4) 在“物”的因素分类中，按照燃气系统的生命周期和燃气供应企业的职责范围，分为“运行前隐患”和“运行中因素”。对“运行前隐患”，需要通过对规划、设计、施工及验收阶段的管控，防止隐患留到运行中；而燃气供应企业则应将“运行中因素”作为关注的重点问题，按照国家和行业相关要求，比如《城镇燃气设施运行、维护和抢修安全技术规程》(CJJ51-2016)的规定，加强安全管理，防止事故的发生；

(5) 对“环境”因素，按照对燃气管网造成危害的形式分为“长期因素”和“瞬时影响”两类。

“长期因素”，比如土壤腐蚀性、“不良环境”中的杂散电流或管道占压等，会对埋地燃气管道造成缓慢、持久的影响，虽然不会立即引发事故，但这些影响仍然是不可忽视的；“瞬时影响”，包括地震、其它事故灾害等，则可能在没有预兆的情况下突然造成燃气管网破坏，需要燃气供应企业重点防范，随时做好应急、抢修的准备；

(6) 故障树第三层中的每一个底层因素，在燃气企业的实际操作中都是可以考量、界定和区分的；方便基层单位和操作人员对事件原因进行归类与分析；

(7) 故障树的每一个分支都可以讨论事故拦截措施：从故障树第三层中的每一个底层因素到“燃气泄漏”顶事件之间至少对应两级防范措施，易于实现分层安全管理、分级管控，以切断事故致因因素到事故之间的链条，提高安全管理的有效性；

(8) 根据需要，故障树可以继续扩展：燃气企业在做具体、典型事件的剖析时，可以将故障树中第三层各因素进一步细化，以寻找事故的深层原因。比如“内部人员”表现出来的行为是“操作不当”，深层的原因可能包括“教育培训不够导致的错误操作”、心理或身体原因造成的“操作失误”等。

5 结语

运用FTA做事件原因分析，构建的故障树具有清

晰、简明的优势。我们依据事故致因因素理论，针对城镇燃气管网构建的“人-物-环”三因素故障树，可以使燃气供应企业科学、方便、快捷地进行管网事故原因的确定；根据故障树探讨分级、分类的企业安全管理措施；在不良事件发生之前做好防范，在事故发生以后科学应对。

参考文献

- 1 城镇燃气设施运行、维护和抢修安全技术规程 CJJ51-2016
- 2 Ericson, Clifton. Fault Tree Analysis - A History. Proceedings of the 17th International Systems Safety Conference, 1999
- 3 Center for Chemical Process Safety. Guidelines for Hazard Evaluation Procedures (3rd ed.), 2008
- 4 Anjuman Shahriar, Rehan Sadiq, Solomon Tesfamariam. Risk analysis for oil & gas pipelines: A sustainability assessment approach using fuzzy based bow-tie analysis. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012; 25: 505
- 5 罗云等. 现代安全管理. 化学工业出版社, 2013: 8

工程信息

中缅天然气管道 楚雄-攀枝花段开工建设

2017年6月13日获悉，经国家发展改革委批准，中缅天然气管道工程楚雄-攀枝花段于近日在四川攀枝花市正式开工建设。

中缅天然气管道是保障我国能源安全的重大战略通道，楚雄-攀枝花段是四川省融入“一带一路”的又一重大项目，管道起于云南省楚雄州分输站，止于四川攀枝花市末站，长度190.1km、管径610mm、设计压力6.3MPa、设计输气能力20亿m³/a，项目总投资10.41亿元，计划于2018年底建成投产。

(本刊通讯员供稿)