

WBS-RBS 法与故障树分析法结合的 加注系统危险识别技术

吕潇磊^a, 赵继广^b, 马昕晖^c, 陈景鹏^c, 姜 曙^a

(中国人民解放军装备学院 a. 研究生管理大队; b. 装备战略发展研究所; c. 航天装备系, 北京 101416)

摘要:针对航天发射加注系统工艺严谨、设备繁多和操作复杂的特点,传统 FMEA 危险识别方法只能考虑单一失效模式,具有危险辨识不完整的特点,特别是在高危险性的航天发射操作过程中,难以识别出完备的危险因子;采用 WBS-RBS 与故障树分析结合的方法对“液氢加注系统管路发生严重事故”进行危险识别,可见采用本方法能识别出更完备的危险源,这是由于本方法完善了人机交互、系统接口。所提方法可以应用到航天发射场的风险辨识,为航天发射风险管理提供了参考。

关键词:液氢加注系统;危险识别;故障树分析;WBS-RBS

本文引用格式:吕潇磊,赵继广,马昕晖,等. WBS-RBS 法与故障树分析法结合的加注系统危险识别技术[J]. 兵器装备工程学报,2016(11):114-118.

Citation format:LYU Xiao-lei, ZHAO Ji-guang, MA Xin-hui, et al. WBS-RBS Method and Fault Tree Analysis Method for Filling System Hazard Identification Technology[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(11):114-118.

中图分类号:TJ86

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2016)11-0114-05

WBS-RBS Method and Fault Tree Analysis Method for Filling System Hazard Identification Technology

LYU Xiao-lei^a, ZHAO Ji-guang^b, MA Xin-hui^c, CHEN Jing-peng^c, JIANG Shu^a

(a. Adiministrant Brigade of Postgraduate; b. Institute of Equipment Strategy Development;
c. Department of Spaceflight Equipment, Academy of Equipment of PLA, Beijing 101416, China)

Abstract: The traditional method of FMEA only considers a single failure mode, therefore the hazard identification is not complete and the hazard factors are difficult to identify, especially in the process of high risk space launch operation. The filling system of space launch has the characteristics of rigorous process, various equipment and complex operation. For the piping accident in liquid hydrogen filling system, WBS-RBS and fault tree analysis method were used to identify hazard. It can identify more hazard sources, which because this method supplements the hazard sources neglected in human computer interaction and system interfaces. WBS-RBS and fault tree analysis method can be applied to the hazard identification of the space launch and provide reference for the hazard management.

Key words: liquid hydrogen filling system; hazard identification; Fault Tree Analysis (FTA); WBS-RBS

我国航天事业发展迅速,航天发射场设备愈发多样、操作愈发复杂,发射安全越来越被重视。作为航天发射场最重要的系统之一的加注系统是集推进剂存贮、流量计校验、推进剂调温和实施向运载火箭加注推进剂等任务的多功能系

统。由于推进剂有易燃易爆的特性,加注系统的高危险性一直备受关注。为了保证加注系统的安全性,危险识别就显得尤为重要。

崔豹^[1]针对常规推进剂加注系统在设计、运行中可能出

现的失效和影响因素,利用失效模式及影响分析法(FMEA)进行了较为系统的辨识和分析。王亚琦^[2]针对液氢加注系统,基于FMECA方法进行危险识别,为液氢加注系统危险建模提供依据。不少论文所介绍的对加注系统的危险识别多是为了建模和故障模式仿真,为获取潜在危险源而进行的危险识别并没有多少研究。在航天发射场和之前的研究中,多采用FMEA方法直接进行危险识别。由于FMEA方法关注单个失效模式,无法识别与失效模式无关的危险,而且无法识别多个失效模式组合,识别结果不能反映实际情况。如若安全性分析的基础性工作存在缺陷,那么后面的工作无疑会漏洞百出,航天发射任务也就如临深渊。在综合考虑功能危险分析法、危险与可操作性分析法、因果分析法等多种方法后^[3-4],决定采用WBS-RBS法和故障树分析法结合的方法进行航天发射的危险识别。

故障树分析法^[5]是一个结构化、系统性的分析方法,可以识别出可能引起不希望事件发生的事件,以及表明它们之间的因果逻辑关系。这就完善了在人机交互以及系统接口等方面的不足,但故障树分析方法存在处理大系统时可能出现遗漏的缺陷。WBS-RBS方法通过耦合判断得到相应的危险因素和危险事件,并以此作为故障树分析的中间事件和基本事件,通过两种方法的结合,能较为全面地得到潜在危险源。

1 WBS-RBS法与故障树分析法

故障树分析法(Fault Trees Analysis, FTA)是一种演绎的分析方法,是分析系统事故和原因之间关系的因果逻辑模型,它是从某一特定的事故开始,运用逻辑推理的方法,找出各种可能引起事故的原因,也就是识别出各种潜在的危险因素。

WBS-RBS风险辨识方法,是指从横向和纵向两个角度对项目的风险进行辨识。一般而言,从纵向将项目进行工作分解结构分析(Work Breakdown Structure, WBS),从横向将项目进行风险分解结构分析(Risk Breakdown Structure, RBS)。根据系统的特性进行合理的系统层次分解,选取分解后恰当的系统层次通过判断二者的耦合矩阵进行风险辨识,从而得出整个系统的风险。

1.1 故障树顶事件

故障树的顶事件的选取通常遵循易于发生且后果严重的原则。故障树分析需要多棵故障树,因此需要选取多个顶事件进行分析。在大型复杂系统中,存在诸多的子系统或设施的灾难事件,过多的顶事件会造成分析过于复杂,而过少的顶事件就会造成辨识结果的不完全。选取主要灾难事件是确定故障树顶事件一种有效方法。

1.2 WBS-RBS分解结构

对于复杂系统,设备、操作流程、人员众多,结构复杂,FTA方法在处理此类系统会出现遗漏的缺点不被人们所接受,因此采用WBS-RBS方法将结构复杂的工艺工序和危险因素分解成结构简单、易于理解的基本单元,随后将其耦合

形成耦合矩阵,找出潜在的危险因素,以此作为故障树的中间事件和基本事件,保证辨识结果的有效性和全面性^[6]。

1.2.1 工作分解结构(WBS)

工作分解结构是将整个项目按照结构关系分解为多层工序,每一个工序都作为一个独立的目标。在实际应用过程中,工作分解结构通常分为2~3个层次,最底层通常是某一工艺工序或者某一工作单元。工作分解结构如图1所示。

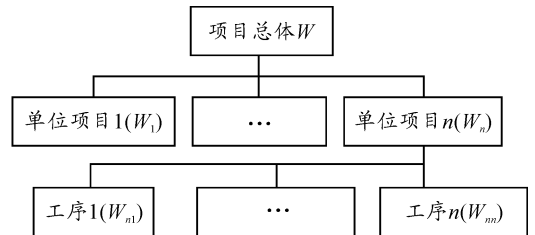


图1 工作分解结构

1.2.2 风险分解结构(RBS)

风险分解结构是按照风险类别,将风险因素进行分解。在实际应用的过程中,首先将风险源分为3~4类,然后罗列每一类风险源可能发生的风险。风险分解结构如图2所示。

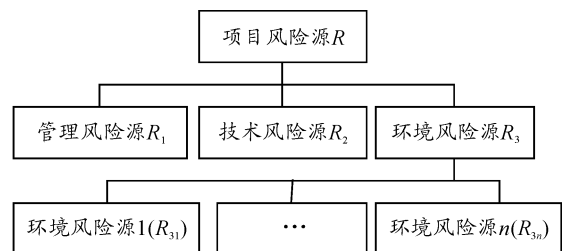


图2 风险分解结构

1.3 风险辨识耦合矩阵

以WBS的最底层“工序”层为行向量,RBS的最底层风险源为列向量形成耦合矩阵,见表1。耦合矩阵中的每一个元素作为一个独立的耦合事件,每一个耦合事件的0代表耦合不产生危险因素,1代表耦合会产生危险因素,且不同的1代表不同的危险因素^[7]。

1.4 故障树作图

故障树作图是将上述WBS-RBS研究中所得到的危险因素作为中间事件和基本事件,从顶事件开始,逐层往下分析直接原因事件,依据彼此之间的逻辑关系,用逻辑门连接上下层事件,直到分析出潜在的危险源,形成故障树^[8-9],如图3所示。

2 实例应用

航天发射场液氢加注系统的设备繁多、加注系统复杂,加上液氢易燃、易爆的特性决定了液氢加注系统存在极高的风险,一旦出现故障就可能出现灾难性后果。因此,航天发

射场液氢加注系统的危险识别受到广泛关注。本文针对加注系统进行实例研究,验证该方法在大型复杂系统中的识别效果。

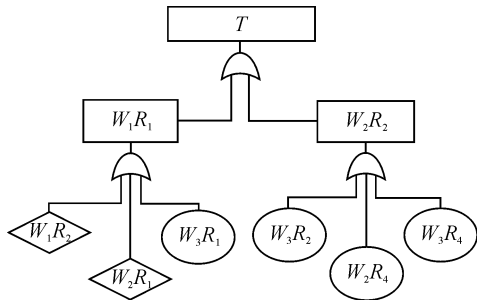


图3 故障树图

2.1 确定顶事件

液氢加注系统由测控微机、加注管路、控制阀门、液氢车(贮罐)、贮箱等组成,主要分为测控子系统、液路子系统、氢排子系统、氢燃子系统和配气子系统。通过头脑风暴法筛选出液氢加注系统的主要灾难事件有液氢加注微机及备份机故障、液氢氢气配气台或氮气配气台故障、加泄连接器或排气连接器锁紧失效、贮罐或管路发生严重事故等。本文选取液氢加注系统的“管路发生严重事故”为故障树顶事件进行分析。

2.2 构造工作分解结构 WBS

按照工作分解结构的分层原则,将加注系统管路涉及到的工作单元分为部件、温度传感器、氢报警器、压力传感器和过滤器,而部件作为主要的工作单元,进而将其分解为管道本身、管件连接器和阀门。加注系统管路工作分解结构如图4所示。

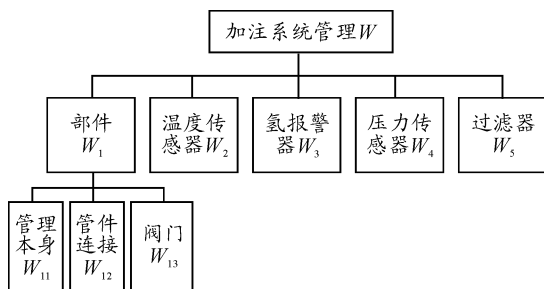


图4 加注系统管路工作分解结构

2.3 构造风险分解结构 RBS

加注系统管路的危险源包括技术危险源、环境危险源和管理危险源等多个方面,技术危险源主要从设备自身失灵、设备参数选择不当和设备材料选择不当3个方面考虑,环境危险源主要从推进剂腐蚀、外界环境潮湿和杂质过多进行分析,管理风险源则考虑违章作业和人员疏忽的情况。加注系统管路的风险分解结构如图5所示。

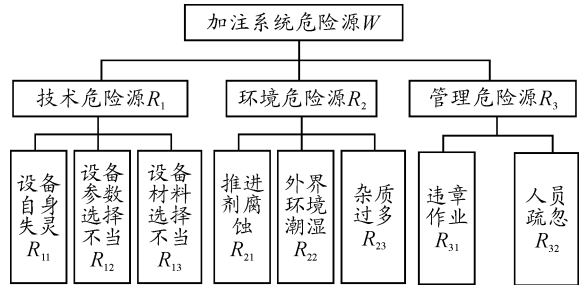


图5 加注系统管路的风险分解结构

2.4 建立 WBS-RBS 耦合矩阵

将工作分解结构WBS和风险分解结构RBS的最底层单元逐一两两耦合,判断耦合之后是否存在危险单元,并通过理论分析确定该危险单元所代表的危险事件,加注系统管路的WBS-RBS耦合矩阵如表1所示。

表1 加注系统管路的WBS-RBS耦合矩阵

		W ₁			W ₂	W ₃	W ₄	W ₅
		W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃				
R ₁	R ₁₁	0	0	1	1	1	1	0
	R ₁₂	1	1	0	0	0	0	0
	R ₁₃	1	0	0	0	0	0	0
R ₂	R ₂₁	1	1	0	0	0	0	0
	R ₂₂	0	0	1	0	0	0	0
	R ₂₃	0	0	0	0	0	0	1
R ₃	R ₃₁	0	0	1	0	1	0	0
	R ₃₂	1	0	0	0	0	0	0

通过耦合作用,得到表1中每个1代表的危险事件,即W₁₁R₁₂为管材品质缺陷;W₁₁R₁₃为材料选取不当;W₁₁R₂₁为管道腐蚀泄漏;W₁₁R₃₂为人员失职未发现阻塞;W₁₂R₁₂/W₁₂R₂₁为管件连接处泄漏;W₁₃R₁₁为阀门操作失灵;W₁₃R₂₂为阀门腐蚀泄漏;W₁₃R₃₁为阀门人为或意外损坏;W₂R₁₁为温度传感器共因失效;W₃R₁₁为氢报警器失灵;W₃R₃₁为氢报警器人为或意外损坏;W₄R₁₁为压力传感器共因失效;W₅R₂₃为过滤器阻塞。

2.5 加注系统管路故障树

在前文分析基础上,以WBS-RBS耦合矩阵所确定的风险因素和风险事件为基础,对“管道发生严重事故”的顶事件进行故障树分析,使故障树的中间事件或基本事件与耦合矩阵形成一一映射的关系,如图6、图7所示,整理其基本事件有X₁ 管材质量缺陷,X₂ 材料选取不当,X₃ 过滤器阻塞,X₄ 人员未发现阻塞,X₅ 压力传感器1共因失效,X₆ 压力传感器2共因失效,X₇ 管件连接处泄露,X₈ 管道腐蚀泄露,X₉ 温度传感器1共因失效,X₁₀ 温度传感器2共因失效,X₁₁ 氢报警器失灵,X₁₂ 氢报警器人为或意外损坏,X₁₃ 阀门人为或意外损坏,X₁₄ 阀门操作失灵,X₁₅ 阀门腐蚀泄露。

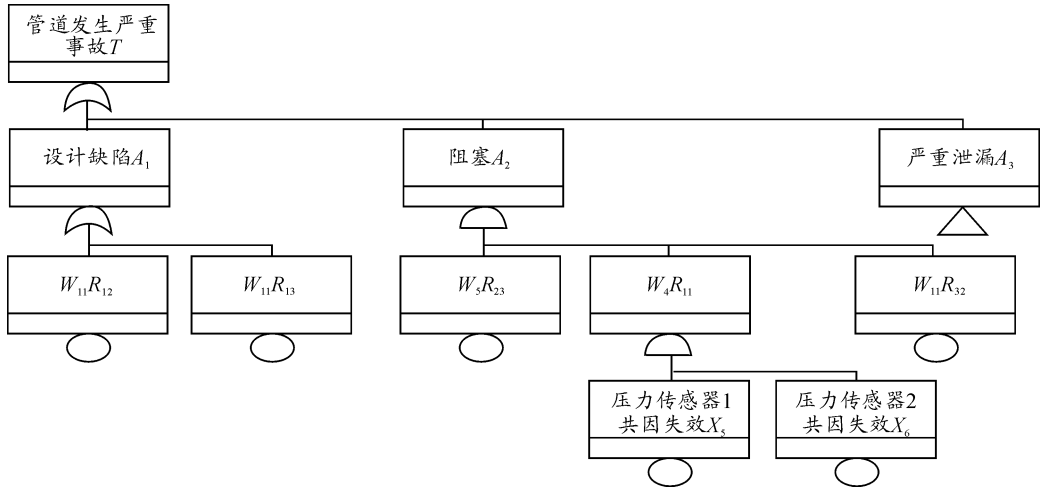


图6 管道发生严重事故故障树

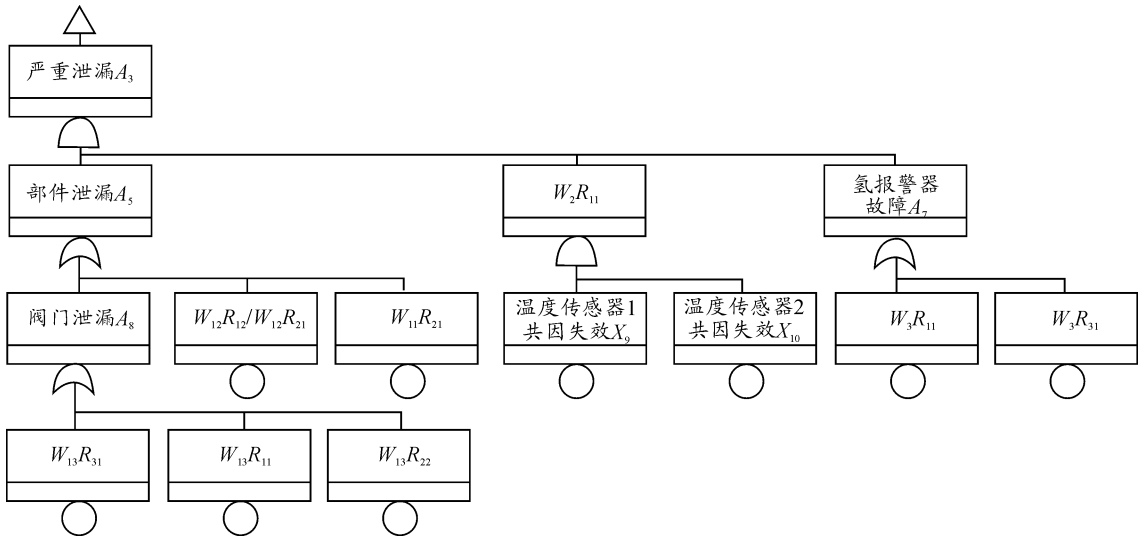


图7 管道发生严重事故故障树

WBS-RBS 与故障树分析法所辨识出的危险源如表 2 所示。

表2 管道发生严重事故的危险源(1)

编号	危险源	编号	危险源
1	材料选取不当	9	过滤器阻塞
2	管材质量缺陷	10	人员失职未发现阻塞
3	温度传感器 1 共因失效	11	氢报警器失灵
4	温度传感器 2 共因失效	12	氢报警器人为或意外损坏
5	压力传感 1 共因失效	13	阀门人为或意外损坏
6	压力传感器 2 共因失效	14	阀门操作失灵
7	管件连接处泄漏	15	阀门腐蚀泄露
8	管道腐蚀泄漏		

3 WBS-RBS 与故障树分析法和 FMEA 方法的比较

应用 FMEA 方法对“液氢加注系统管路发生严重事故”进行分析,识别出的危险源如表 3 所示。两种方法识别出的危险源进行对比后,WBS-RBS 与故障树分析法额外识别出的危险源如表 4 所示。

经过对比,WBS-RBS 与故障树分析法能识别出额外的 9 种危险源,而这 9 种危险源是从人机交互和系统接口层面被识别的,证明了该方法可以在发射场实现,并达到了预期效果。

表3 管道发生严重事故的危險源(2)

编号	部件	失效模式	失效原因
1	管路	泄露	管材品质缺陷
2			材料选取不当
3			管件连接处泄露
4	阀门	失效	管道腐蚀泄露
5			阀门操作失灵
6			阀门腐蚀泄露

表4 额外危險源

编号	危險源	额外识别类型
1	温度传感器1 共因失效	系统接口
2	温度传感器2 共因失效	系统接口
3	压力传感器1 共因失效	系统接口
4	压力传感器2 共因失效	系统接口
5	过滤器阻塞	系统接口
6	人员失职未发现阻塞	人机交互
7	氢报警器失灵	系统接口
8	氢报警器人为或意外损坏	人机交互
9	阀门人为或意外损坏	人机交互

4 结论

本文采用 WBS-RBS 与故障树分析方法对液氢加注系统“管路发生严重故障”进行危险识别,辨识出系统存在的潜在

(责任编辑 唐定国)

危险因素。结果表明:与发射场一直采用的 FMEA 方法比较,辨识出了更多的危险源,克服了在人机交互和系统接口等方面的缺陷,该方法有助于解决航天发射场环境复杂、不确定性因素多而导致危险分析不完全的问题,可以为航天发射场提供辅助决策的作用。

参考文献:

- [1] 崔豹,赵继广,陈景鹏,等. 航天发射场风险分析系统研究[J]. 安全与环境工程,2014,21(4):152-158.
- [2] 王亚琦,赵继广,段永胜,等. 发射场非标备失效概率获取方法研究[J]. 四川兵工学报,2015,36(9):73-78.
- [3] 王若青,彭卓飞. 危险识别方法在工程上的应用[J]. 石油化工设计,2004,21(1):51-55.
- [4] 樊运晓,罗云. 系统安全工程[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [5] 谭显坤. 基于网络环境的设备动态故障诊断与预测维修[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2014(3):98-102.
- [6] CLIFTON A. ERICSON II. Hazard Analysis Techniques for System Safety[M]. John Wiley & Sons, Inc. 2005.
- [7] 王堯,刘保国,元轶. 基于 WBS-RBS 与故障树耦合的地铁施工风险与评价[J]. 地下空间与工程学报,2015(S2):147-149.
- [8] 黄艳敏,郝建新. WBS-RBS 法在城市轨道交通工程风险辨识中的应用[J]. 都市快轨交通,2004,17(4):9-12.
- [9] 史定华,王松瑞. 故障树分析技术方法和理论[M]. 北京:北京师范大学出版社,1993:43-44.

(上接第 113 页)

- [4] 刘光军,柯宏发,刘嘉文. 基于灰色 Verhulst 优化模型的装备研制费用高精度预测[J]. 军事运筹与系统工程,2011(12):52-54.
- [5] 童新安,魏巍. 灰色 Verhulst-BP 网络组合模型在预测中的应用研究[J]. 计算工程与应用,2011(12):245-258.
- [6] 周庆忠,军队油料勤务[M]. 北京:国防工业出版社,2008:15-19.
- [7] 耿军生,阮拥军,刘忠鹏. 基于可靠性和兰彻斯特方程的装备损坏率预计方法[J]. 军械工程学院学报,2011(10):6-9.
- [8] 魏小林,周庆忠. 基于突变级数的油库反恐油料保障能力评价研究[J]. 兵器装备工程学报,2016(2):84-88.

(责任编辑 唐定国)