

# 基于TRIZ的复杂系统FMECA分析 流程和方法研究

□陈光宇 苏亮夫 祁凌云 [电子科技大学 成都 611731]

**[摘要]** 大型复杂系统具有结构复杂和功能多样化的特点,严重故障的发生将会造成巨大损失,而现有的故障分析方法和管理手段明显不足。基于传统FMECA方法,结合TRIZ理论和方法,以神光系列激光装置为研究对象,本文提出改进的FMECA分析流程和方法,目的是开展故障模式及影响的多样性分析以及寻找完善的问题纠正措施,从而提高故障归零率,降低系统运行风险。

**[关键词]** 复杂系统; TRIZ; FMECA; 分析流程

**[中图分类号]** F270

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1008-8105(2013)02-0037-05

## 引言

复杂系统通常由多个具有交联关系的功能模块组成,各个模块之间通过相互作用组织起来,使系统具备特定的整体属性<sup>[1]</sup>。例如近期发射成功的天宫一号大型飞行器,技术密集度高,结构复杂,主要用于空间交会对接试验;欧洲的大型强子对撞机,是世界上最大的粒子加速器,其精确周长是2.6659万米,内部总共有9300个磁体,用于研究地球起源和进行各种物理试验;神光系列装置,是当前我国规模最大、国际上为数不多的高性能高功率钕玻璃激光装置,用于惯性约束核聚变激光驱动研究,其规模庞大,包括机、电、液、气等多种设备,并且构成设备的各部分之间相互联系、相互作用,是一个典型的复杂系统。大多数的复杂系统在使用过程中一旦出现故障,由于故障模式的多样性,影响不确定性高,危害度往往超出人们的预期,例如2011年8月18日,长征二号丙运载火箭发射卫星失败,导致卫星未能进入预定轨道,而造成失败的原因是连接部位的可靠性存在薄弱环节。因此故障原因及影响分析显得尤其重要。同时,由于对大型复杂系统的故障认识存在不足,所以需要对其模式、影响及危害性分析管理流程和方法进行完善。

故障模式、影响及危害性分析(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, FMECA)是一种为

开展质量设计,生产及服务的最广泛使用的分析方法和有效工具。可以用于找出潜在的故障和可能的故障原因,识别故障的影响,达到减小影响和满足预定功能的目的<sup>[2]</sup>。它包括故障模式及影响分析(FMEA)和危害性分析(CA),可以对可能发生的故障模式进行描述和分析。对于大型复杂系统来说,不同阶段的FMECA分析方法有多种选择,要根据实际的需要来确定,如表1所示。本文主要侧重于工程的安装集成阶段对于故障问题的处理过程和管理。

表1 不同阶段FMECA分析过程

阶段	方法	目的
设计论证阶段	功能FMECA	分析系统设计的缺陷与薄弱环节,为系统功能设计的改进和方案权衡提供依据。
工程研制阶段	功能FMECA 硬件FMECA 软件FMECA	分析系统硬件、软件、生产工艺等方面的缺陷与薄弱环节,为系统的硬件、软件、生产工艺的改进提供依据。
安装集成阶段	过程FMECA	分析研究系统生产工艺的缺陷和薄弱环节,为系统生产工艺的改进提供依据。同时分析研究系统安装集成过程中可能或实际发生的故障、原因及其影响,为提高系统可靠性,进行改进、以及使用维修决策等提供依据。

**[收稿日期]** 2011-12-26

**[基金项目]** 技术创新方法应用与推广平台(M1101110108KJPT01);四川省创新方法应用与示范推广服务平台建设(M1101110107FY1404001)。

**[作者简介]** 陈光宇(1969-)男,博士,电子科技大学经济与管理学院副教授,硕士生导师;苏亮夫(1986-)男,电子科技大学经济与管理学院2009级硕士生。

国内很多的大型复杂系统对于故障问题的处理通常选择试错法进行,不断的验证改进的效果。这种做法不但影响了解决的效率,并且仅仅依靠经验难以获取完善的解决方案。本文针对FMECA方法中不同阶段的侧重方向,在危害性分析阶段通过使用模糊综合评价方法对故障模式进行危害度排序,在故障模式及影响分析阶段引入TRIZ理论,将FMECA中所提供的故障问题转化为TRIZ标准问题模型,然后利用TRIZ解决工具寻找应对措施,从而提出新的综合管理流程。最后,以神光装置中的氙灯为例进行实例分析。

## 一、基于TRIZ理论的FMECA管理过程分析

### (一) TRIZ理论简介

TRIZ(theory of inventive problem solving)是发明解决问题理论的俄文首字母的缩写,由前苏联天才发明家G.S.Altshuller教授及其团队在研究了世界上各个国家近250万件专利的基础上提出并形成的一套解决复杂技术的系统化方法,包括有技术系统、矛盾矩阵、物场分析模型等工具,主要目的是帮助研究人员进行发明创造、解决技术中遇到的难题<sup>[3]</sup>。

该理论主要针对待解决的问题,分析问题、形成新设想、产生新方案、解决问题<sup>[4]</sup>。矛盾矩阵是TRIZ理论中重要的解决问题的工具,在大型复杂系统的分析过程中,一旦出现技术问题的冲突时,为便于对这些冲突进行理论分析,TRIZ理论提出用39个通用工程参数描述冲突问题,并建立对应关系以构建冲突解决矩阵,确定改善的工程参数和随之恶化的工程参数,将实际工程设计中的矛盾问题转化为一般的或标准的技术矛盾,再通过查询获得推荐的解决问题的40个发明原理,逐个应用到具体问题,获得每个原理的解决方案。

### (二) 模糊综合评价方法

针对FMECA风险评价和排序方法的研究主要集中在模糊数学方法的处理上,Bowles将模糊数学引入到危害性分析中,提出了基于模糊理论的FMECA评价方法<sup>[5]</sup>。鞠鲁粤针对传统FMECA工作繁杂、工作量大的缺点,在同一级故障模式中采用了框图分析法,同时在FMECA中采用模糊致命度分析,节省了人力、物力和时间,提高了分析的准确性<sup>[6]</sup>。崔文彬等利用模糊理论对影响故障模式危害性的各因素进行了模糊处理,建立了故障模式危害性评定的模糊评判模型,阐述了模糊评判方法的基本步骤<sup>[7]</sup>。刘娜等提出了基于故障发生频率、严重

程度以及检测难度三因素的模糊危害度评价模型,以评分方式解决实际工作中精确值难以获取的困难<sup>[8]</sup>。

### (三) FMECA管理流程构建

FMECA方法是可以推动设计和制造过程进行深层次质量改进的分析方法,用于明确各种潜在的故障模式及影响,它按照一定的格式与步骤对每一个部件进行定性和定量分析。因其易于掌握,使用价值高,在国内大型工程领域得到广泛的推广及应用<sup>[11]</sup>。其基本步骤如下:

1. 确定子系统的最终分析层次;
2. 在各分析层次中,分析功能与故障的对应关系,建立故障与系统构成元素之间的关联索引;
3. 以系统构成元素与故障的一个关联为分析单元,分析系统构成元素的主要故障模式和故障直接原因及故障后果;
4. 将具有安全性后果、隐蔽性后果和对整个系统有使用性后果的故障分析结果列入重要故障模式汇总表。

由此可以看出,FMECA是一种系统性、持续性和预防性的活动,其系统化的思想实质上是包含着持续质量改进的管理流程思想,传统的FMECA方法仅仅是作为一种工程分析的工具在使用,忽略了其管理流程控制的本质,基本流程见图1所示。

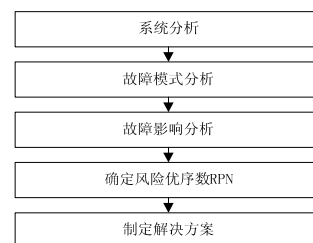


图1 FMECA流程控制图

## 二、基于TRIZ理论的FMECA管理流程

大型复杂系统的FMECA控制流程就是要对出现过的问题进行评估与量化,将这些结果反馈给设计人员用于指导改进过程。在系统的设计研发过程中,故障的识别和评价常常是相互重叠的,需要反复交替进行<sup>[12]</sup>。国内外学者通常在FMECA分析方法或者风险评价和排序方法两个方面上进行研究,很少同时将两者进行结合分析,对故障模式最终方案的解决方案也没有明确的指出思路,导致效率低下。

为了完善FMECA方法在工程安装集成阶段中的使用,本文重点讨论了如何根据大型复杂系统的特点去构建基于TRIZ理论的FMECA分析管理的完整流程。如图2所示,在工程安装集成阶段,故障模

式存在多样性, FMECA方法首先根据各种数据表格提取主要的故障模式, 再通过进行模糊综合评价进行危害度排序, 集成TRIZ解决问题的矛盾矩阵或效应库等方法寻找标准解, 然后再根据设计人员的判断做出决定, 最后通过方案验证寻找最终问题的理想解, 实现故障的有效改进。

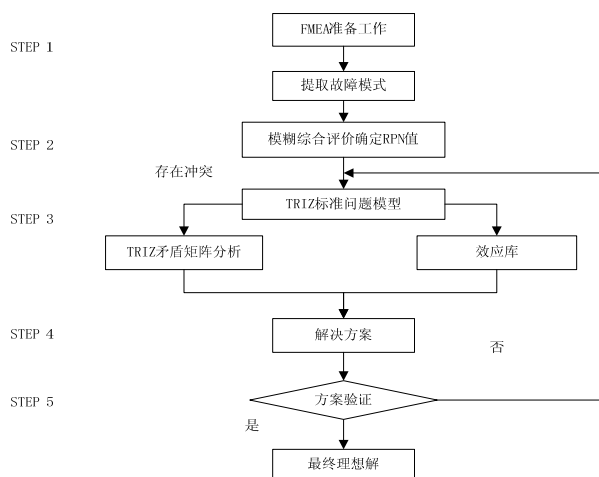


图2 基于TRIZ理论的FMECA管理流程

基于TRIZ的FMECA管理流程如下:

1. 制定FMECA计划, 制定各种表格, 安排相关的工作人员进行数据收集与整理;
2. 对于故障模式进行有效的识别和归类分析, 提取适当的故障模式;
3. 采用模糊综合评价方法与专家一起开展故障模式RPN评价, 确定因素集包括故障发生率、严酷度、探测度和维修难度四个指标, 并且确定因素水平等级(见表2所示), 计算出综合危害度, 以此类推获取主要故障模式;

表2 因素水平等级表

影响因素	等级			
	1	2	3	4
故障发生率	极少发生	很少发生	偶然发生	经常发生
严酷度	轻微的	轻度的	中等的	致命的
探测度	能准确探测	不易检测	很难检测	无法检验
维修难度	简单调试	重新安装	更换零件	更换整件

4. 针对主要故障模式, 构建TRIZ标准问题模型, 运用矛盾矩阵表或效应库寻找较完整的标准解;
5. 依据标准解, 协同工程师寻找完善的纠正措施方案。

### 三、实例分析

神光III激光装置(以下简称神光装置)是根据我国惯性约束聚变研究(ICF)的总体规划在建的国家大型光学工程装置, 其作用是为物理相关实验提供强度足够高、均匀、干净、可调控的辐照场, 建成之后将是世界上第三大的巨型高功率激光驱动器。

#### (一) 改进FMECA方法分析

脉冲氙灯属于神光装置的关键器件之一, 数量众多, 有很好的研究价值。根据现场运行和维护的记录来看, 氙灯发生过多次运行故障, 根据系统特点对其进行FMECA分析, 并归纳出了主要的三种故障类型: 1) 触发故障; 2) 引线或基座的电绝缘故障; 3) 氙灯爆炸<sup>[13]</sup>。如表3所示。

显然, 氙灯故障模式存在多样性, 同时, 其影响也存在多样性的特点。例如触发故障可能导致漏气或者爆炸两种结果。首先通过现场专家根据相应的运行记录对这些故障模式进行模糊综合评价, 作为危害性分析的判据。其步骤如下:

#### 1. 确定因素集

对氙灯进行的危害性评价时根据专家经验采用因素集  $U = \{\text{故障发生率, 严酷度, 探测度, 维修难度}\}$ ;

#### 2. 确定评价集

分为4个等级, 即  $V = \{1, 2, 3, 4\}$ , 具体标准见表3所示。

#### 3. 建立触发故障的模糊评价矩阵

经过专家小组的评定, 触发故障的故障发生率模糊集  $R_1^1 = \{0.15, 0.7, 0.1, 0.05\}$ , 严酷度模糊集  $R_2^1 = \{0.4, 0.1, 0.4, 0.1\}$ , 探测度模糊集  $R_3^1 = \{0.7, 0.2, 0.1, 0\}$ , 维修难度模糊集  $R_4^1 = \{0, 0.1, 0.7, 0.2\}$ 。

因此模糊评价矩阵  $R^1 = \{R_1^1, R_2^1, R_3^1, R_4^1\}^T =$

$$\begin{bmatrix} 0.15 & 0.7 & 0.1 & 0.05 \\ 0.4 & 0.1 & 0.4 & 0.1 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.7 & 0.2 \end{bmatrix}$$

#### 4. 触发故障的因素权重集

由专家小组经过讨论给出的四因素权重集  $W = \{0.25, 0.4, 0.2, 0.15\}$ 。

#### 5. 对触发故障的综合模糊评价

$$B^1 = W^1 \cdot R^1 = [0.3375, 0.36, 0.235, 0.0675],$$

说明触发故障的危害度等级为1,2,3,4的隶属度分别

为0.3375,0.36,0.235和0.0675。

#### 6. 综合危害度计算

触发故障的综合危害度  $C^1 = B^1 \cdot V^T = 2.0325$ 。

由于各个故障模式具有相同的权重集,则运用同样的办法可以各故障模式综合危害度集合  $C = \{C^1, C^2, C^3\} = \{2.0325, 2.21, 2.745\}$ 。根据危害度大小进行排序,数值越大则危害度越高。氙灯爆炸 > 电绝缘故障 > 触发故障。

表3 氙灯模块FMECA分析表的部分内容

序号	故障模式	故障原因	故障影响	检查方法	维修措施
1	触发故障	器件可靠性	时间延迟	目测	更换氙灯
2	引线或基座的电绝缘故障	器件可靠性	一般	拆开检查	更换引线或重新连接
3	氙灯爆炸	器件可靠性	发射失败	目测	更换氙灯

然后再通过TRIZ理论检视氙灯发生故障的形成原因,用可能涉及到的39个工程参数进行重新描述,并制作了对应的矛盾矩阵列表,如表4所示。提取各个故障模式所对应的改进工程参数和恶化工程参数,将发明原理进行组合集成(发明原理使用较多的放在前面),有利于尽快找到完整的纠正措施。

表4 氙灯模块矛盾矩阵表

故障模式	改进参数	恶化参数	发明原理
触发故障	结构稳定性	静止物体的能量	10, 13,40,3,39
引线或基座的电绝缘故障	应力/压强	静止物体的质量,能量的损失	3,10,25,34,17
氙灯爆炸	可靠性,应力/压强	温度,能量的损失	3,40,15,10,30

#### (二) 解决方案

对于同一种故障模式,存在多个工程参数的矛盾,通过表格可以将其表现出来,例如针对氙灯的电绝缘故障和氙灯爆炸,可以选取3号发明原理:部分改变原理;40号发明原理:复合材料原理进行分析。具体措施如下:

##### 1. 部分改变原理的实现

导线的工艺和材料进行相应的改进,采用改进的新型导线,其绝缘层包含两层,内部为绝缘保护

层,外层则增强其耐磨能力,使得导线的耐压性和耐磨性得到提高。

##### 2. 复合材料原理的实现

灯管的结构和材料的缺陷会影响氙灯的光效和抗爆性。以前国内氙灯采用掺铈石英管(壁厚 2.5 mm),抗爆性能差,极易爆炸。目前改成复合掺铈管(壁厚3.0mm),内部为石英管,外部为掺铈管,在不影响光效的条件下抗爆性能明显加强。

除上述纠正措施外,也可以按照表4中的发明原理寻找其他纠正措施。

上述方法有效地提高纠正措施的寻找效率,在应用中显示出较好的实用性,实现了故障归零率的提高,从而降低系统运行风险。案例分析结果验证了本文提出的改进方法的有效性。我们将在工程中进一步研究和实践。

#### 四、结语

大型复杂系统故障数据的研究和使用越来越受到重视,那么如何对其进行有效的管理成为亟需解决的重要问题。FMECA方法作为一种系统化的可靠性分析技术,可以在系统的各个阶段对故障问题的发生进行有效的管理。而TRIZ理论是一套普适性的发明理论,能帮助设计人员尽快地获得解决问题的方案。本文针对复杂系统中FMECA方法的应用情况,通过引入模糊综合评价法和TRIZ理论,提出了新的FMECA管理流程规范,并给出了神光装置的实例。基于TRIZ理论的改进管理流程有助于系统工程师解决复杂系统的故障模式及影响的多样性问题,有效提升系统的可靠性水平。

#### 参考文献

- [1]解向军,潘全文,等.复杂系统体系结构设计方法研究[J].飞机设计,2011(3):71-74.
- [2]EBRAHIMPOUR, REZAIE K, SHOKRAVI S. Enhances FMECA by Multi-agent Engineering FIPA Based System to Analyze Failures[C].IEEE, 2010.
- [3]SAVRANSKY S D. Engineering of Creativity-Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving[M]. New York: CRC Press, 2000.
- [4]邵云飞,谢健明,等. TRIZ与六西格玛集成的创新方法框架与模式研究[J].电子科技大学学报(社科版),2010,12(6):1-6.
- [5]BOWLES J B, PELAEZ C E. Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode effects and criticality

analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1995, 50(2): 203-213.

[6]鞠鲁粤. 模糊致命度分析及其在矩阵FMECA中的应用[J]. 上海大学学报(自然科学版), 1999, 5(5): 463-466.

[7]崔文彬, 吴桂涛, 孙培廷. 基于FMECA和模糊综合判断的船舶安全评估[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(3): 263-267.

[8]刘娜, 梁国栋, 等. 电力变压器故障模式的分析及危害评估[J]. 高压电技术, 2003, 29(2): 3-8.

[9]李鸿吉. 模糊数学基础及实用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 167-178.

版社, 2005: 167-178.

[10]朱宗乾, 罗阿维, 等. 采用FMECA的ERP项目实施风险分析方法[J]. 工业工程, 2010, 13(6): 12-15.

[11]郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 56-89.

[12]雷星晖, 莫凡. 基于FMECA方法的知识产权流程管理模式构建[J]. 科技管理研究, 2010(4): 202-205.

[13]陈光宇, 杨东, 等. 激光装置片状放大器组件的氙灯可靠性分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(7): 1125-1128.

## TRIZ-Based FMECA Analysis Process and Methods of Complex Systems

CHEN Guang-yu SU Liang-fu QI Ling-yun

(University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054 China)

**Abstract** Large and complex systems have complex structures and diverse functions, thus the occurrence of a serious fault will cause huge losses. However, the existing methods of fault analysis and management tools are insufficient. Based on traditional FMECA methods, combining the TRIZ theory and methods, and taking the SG series of laser device as research objectives, this paper presents an improved FMECA management processes and methods of analysis, aiming to carry out diversity analysis of failure mode and effect, find complete corrective action to enhance the failure rate of zero, and reduce the risk of system operation.

**Key words** complex systems; TRIZ; FMECA; analysis process

编辑 何婧