

基于系统功能-结构-故障模型的 FMMEA 分析方法*

冯辅周¹, 罗建华¹, 刘远宏², 江鹏程¹

(1. 装甲兵工程学院机械工程系 北京, 100072)

(2. 武警工程大学装备工程学院 西安, 700086)

摘要 针对传统故障模式及影响分析(failure mode and effects analysis, 简称 FMEA)不能识别装备或零部件的故障机理,其故障原因分析、故障影响推理及潜在故障模式识别能力较弱,故障信息描述不规范等导致的分析效率低、可信度差、分析结果重复使用性差等问题,提出一种新的故障机理、模式及影响分析(failure mode, mechanism and effects analysis, 简称 FMMEA)方法。首先,根据系统结构、功能及其内部物质流、能量流、信号流、部件故障等信息建立系统的功能-结构-故障模型;其次,采用模糊认知图推理分析各故障模式的传播途径及影响,得到规范化的故障模式及影响分析表格,可为系统的可靠性、测试性设计与分析提供基础数据;最后,以某燃油供给系统为例进行了 FMMEA 分析,验证了该方法的可行性和有效性。

关键词 功能-结构-故障模型; 故障模式; 故障机理; 模糊认知图

中图分类号 TV698.2⁺1; TH165.3

引言

FMEA 是通过系统分析零件、元器件、设备可能的故障模式、故障原因及后果来发现设计、生产、使用等过程中的薄弱环节,进行针对性的改进以提高装备可靠性。FMEA 广泛应用于装备潜在设计缺陷识别、危害度评估和维修计划制定。对 FMEA 数据进行适当的保存和更新,还可被用作装备测试性和维修性设计的输入知识。传统的 FMEA 通常按照设备的研制生产流程划分为功能 FMEA、硬件 FMEA、过程 FMEA、工艺 FMEA 等,主要由专家依据相关标准、规范进行定性归纳,填写 FMEA 表格,包括系统的组成单元、功能、潜在故障模式、故障影响及故障原因等^[1]。传统 FMEA 分析以专家经验为主,不能识别装备或零部件故障机理,对故障原因分析、故障影响推理及潜在故障模式识别能力较弱,相关故障信息描述不规范,零部件故障模式与故障物理过程混淆,其结果是 FMEA 表格中可能采用同一方式描述不同故障,或采用不同方式描述同一故障,使得 FMEA 分析效率低、可信度差、分析结果重复使用性差^[2]。

FMMEA 最早由美国马里兰大学计算机辅助全寿命周期工程中心提出^[3],是研究产品的每个组

成部分可能存在的故障模式和故障机理,并确定各个故障模式对产品其他组成部分和功能影响的分析方法。FMMEA 更为注重故障机理的研究,是一种基于物理故障过程的故障原因及故障机理分析方法,可为装备测试性分析和故障预测与健康管理(prognosis and health management, 简称 PHM)提供依据。Ganesan^[4]归纳了 FMMEA 的步骤以及在 PHM 中的应用,对比了 FMMEA 与 FMEA 的区别,并给出了其实施方法。为了解决现有分析方法存在的故障描述不规范、专家经验依赖性强的问题,笔者提出一种基于功能-结构-故障模型的 FMMEA 分析方法,即根据系统结构、功能及其内部物质流、能量流、信号流等信息,采用功能基方法建立系统功能-结构模型,在此基础上添加部件故障信息,进而构建系统的功能-结构-故障模型,然后采用模糊认知图推理分析各故障模式的传播途径及影响。

1 功能-结构-故障模型

功能-结构-故障模型包含了系统结构、功能及故障信息,其建模流程如图 1 所示。

1) 依据系统结构,定义系统层次和组成列表,确定子系统、部件等。

2) 建立功能模型。功能基方法采用了“元功能

* 武器装备维修预研重点基金资助项目(9140A27020115JB35001)

收稿日期:2016-01-15

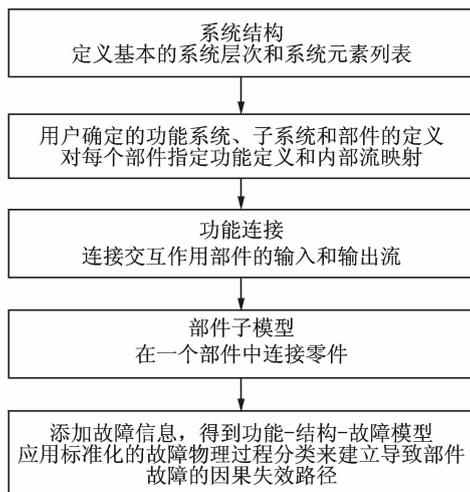


图1 功能-结构-故障模型构建流程

Fig.1 Flowchart of function-structure-fault model

“流”的表示形式,将部件或系统功能看作是输入与输出功能对象间的关系,当输入转换为输出时,显示出特定的功能。流描述了输入和输出功能对象,流属性描述了输入和输出功能对象的状态参数^[5-6]。Hirtz等^[7]扩展了对功能的基本理解,将功能和流的分类进行区别与比较后,将它们融合统一起来,建立了一个标准功能基词库,该功能基在很大程度上覆盖了工程设计活动。在该功能基中,流分为物质流、能量流和信号流等3类;功能则分为分支、导向、连接、控制大小、转换、供应、信号和支持等8类。系统、子系统和部件的功能模型如图2所示,采用功能基方法来定义系统或部件的功能时,需依据其实际功能确定其元功能及流形式。由于元功能只能表示类别,不能表示量化要求,而在具体操作过程中量化要求是通过流发生作用的。通过链接部件或系统内部输入输出流属性描述输出参数与输入参数间的因果关系,构建部件和系统的功能模型。这种因果关系主要包括正负极性关系,即输入参数增大导致输出参数变大、变小或不变的关系。

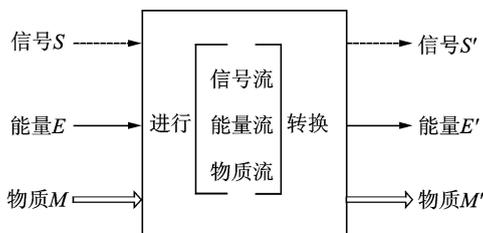


图2 系统、子系统、部件的功能模型

Fig.2 Function model of a system, subsystem and component

3) 建立部件间的功能链接。根据系统结构及内部物质、能量、信号流的传递途径链接交互作用的

部件或子系统,最终得到系统的功能-结构模型。在模型中只能链接部件或子系统间的同种流,系统功能确定后,整个系统的内部流及其属性依据子系统和部件间链接形成。

4) 确定故障模式及机理。依据 GJB451A-2005《可靠性维修性和保障性术语》,故障定义为产品不能执行规定功能的状态,通常指功能故障^[8]。依据美军标 MIL-STD-1629A,故障应描述构成件不能完成规定功能的方式,通常描述故障产生原因及其对设备运行的影响,研制方应以构成件性能参数和输出参数取值范围为指标说明构成件故障的判断标准^[9]。由此可见,故障描述时不仅要包含故障原因、故障机理及故障特征等故障物理过程,而且还要包含故障影响。其中故障影响不仅要说明故障影响哪些功能,且要求描述可通过哪些特定参数来测量。传统的故障描述,例如破损和泄露,并不能满足上述要求,因此笔者将故障分为功能故障和故障物理过程:功能故障主要指系统或部件的流属性值异常变化;故障物理过程主要是指系统的组成部件或零件物理故障,包括故障模式、故障机理和故障原因,并采用 Tumer等^[10]提出的标准故障术语描述。在功能-结构模型基础上,依据系统或部件中故障物理过程,在部件中依次添加故障原因、故障机理和故障物理状态,建立部件故障图表,并与故障影响的部件输出流属性(功能故障)建立因果关系,最终得到功能-结构-故障模型。

2 模糊认知图

依据系统功能-结构-故障模型,采用模糊认知图(fuzzy cognitive map,简称 FCM)和模糊逻辑理论进行系统仿真,分析故障模式传播路径及影响,形成规范化的 FMMEA 分析报告。模糊认知图通常由节点集合 D 与节点箭头 A 组成,即 $DM = \{D, A\}$,其结构示意图如图3所示。节点表示一个概念,箭头方向表示概念间因果关系的方向。“+”和“-”分别表示概念之间的两种定性因果关系:“+”表示原因概念与结果概念是同方向;“-”表示反方向变化;“0”表示不具有因果关系。

将 FCM 视为动态系统,随时间推移最终得到特定的固定状态。根据图3可得到 FCM 的邻接矩阵 E ,矩阵中的每个元素 E_{ij} 表示节点对节点的影响关系。存在节点 i 到节点 j 的连接箭头且为“+”关系的取值 1;存在节点 i 到节点 j 的连接箭头且为“-”关系取值 -1;没有箭头连接的属于非因果关系,取值为“0”;节点自身对应的矩阵元素取值为 0。

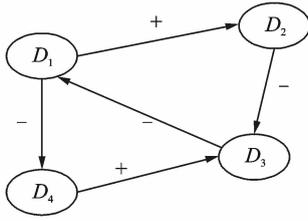


图 3 FCM 结构图

Fig. 3 FCM structure

$$E = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

由模糊认知图推理过程可知,图 2 中有 4 个概念节点 D_1, D_2, D_3, D_4 , 定义节点向量 $V_1 = (D_1, D_2, D_3, D_4)$, 每个节点的初始值均取为 0。基于邻接矩阵 E , 可以观察节点 D_1 的状态变化对 FCM 中其他节点的影响。假设节点 D_1 突然增大, 即 D_1 值由 0 变为 1, 则节点向量变为 $V_1 = (1, 0, 0, 0)$, 取节点的转换函数为

$$f(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 1) \\ x & (-1 < x < 1) \\ -1 & (x \leq -1) \end{cases} \quad (1)$$

$$V_1 * E = (0, 1, 0, -1) = (f(0), f(1), f(0), f(-1)) = (0, 1, 0, -1) = V_2$$

$$V_2 * E = (0, 0, -2, 0) = (f(0), f(0), f(-2), f(0)) = (0, 0, -1, 0) = V_3$$

$$V_3 * E = (f(1), f(0), f(0), f(0)) = (1, 0, 0, 0) = V_1$$

可见, V_1 为图 1 所示 FCM 动态系统中的固定点, 故给定概念节点向量 V_1 , FCM 可推出相关结论, 即 D_1 增大时, 其他节点的响应分别为 D_2 增大, D_3 和 D_4 减小。

3 实例分析

维护感知设计环境 (maintenance aware design environment, 简称 MADe) 是辅助复杂系统设计、可靠性、维修性及诊断开发的软件工具, 尤其适用于系统 FMMEA 分析、测试性评估与诊断分析等^[11-12]。以某燃油供给系统 (fuel distribution system, 简称 FDS) 为例, 采用 MADe 软件构建燃油供给系统的功能-结构-故障模型, 并采用模糊认知图理论进行 FMMEA 分析。假设系统运行在稳定状态下, 系统输入电压信号和控制信号符合燃油供给系统要求, 泵设定为中等转速, 控制阀打开。

3.1 燃油供给系统的功能-结构-故障模型

1) FDS 系统结构如图 4 所示, 主要包括油箱、远程控制单元、泵总成、控制阀总成、热交换器和燃油喷射歧管等部件。其中: 泵总成主要由泵控制器、油泵和电机组成; 控制阀总成主要由阀、阀控制器组成, 阀主要包括电磁线圈和阀体。



图 4 燃油供给系统结构

Fig. 4 Structure of the FDS

系统的功能是在要求的温度和压力下向燃烧室提供一定的燃油喷雾。燃油通过离心泵从燃油箱内泵出, 其中离心泵由从远程接口单元 (remote unit interface, 简称 RUI) 注入的 PCmd 控制。流经该系统的燃油流速由控制阀控制, 该控制阀由一个电磁控制阀组成。较冷的燃油通过热的发动机油与燃油之间的热能交换得到加热, 通过壳管式热交换器来实现。燃油喷雾由燃油喷射歧管喷入燃烧室。

2) 部件功能描述。油箱的功能是提供燃油, 因此在 MADe 软件中, 其元功能选为“provide”(提供), 输入输出流为物质流中的液体, 其输入流属性为流速, 输出流属性为体积, 流属性间是一种正相关关系, 如图 5 所示。

远程接口单元接收来自发动机控制系统的信号, 然后给泵和控制阀总成发送相应控制信号, 因此其元功能选择“convert”(转换), 输入输出流为信号流, 依据其控制方式选择的流属性及其因果关系如图 6 所示。泵总成中泵控制单元控制油泵从燃油箱吸燃油, 电机控制泵提供给控制阀组一定流速的燃油。泵控制单元接收来自远程控制装置的两个离散信号 PCmdA 和 PCmdB, 并调整成泵转速控制信号, 转换方式见表 1。电机接收系统输入电流和泵控制器的转速控制信号并将其转换成转速信号驱动泵旋转; 控制阀总成中的阀控制器接收远程接口单元的控制信号 VCcmd 并转换成电磁线圈的控制信号; 电磁线圈接收电流和阀控制器的控制信号来控制阀体的开闭; 阀体打开时, 泵输出的燃油输送到热交换器; 热交换器通过热的发动机机油来加热输入燃油, 燃油喷射歧管将来自热交换器特定压力和温度的燃油喷射进燃烧室, 确保其充分燃烧。得到的

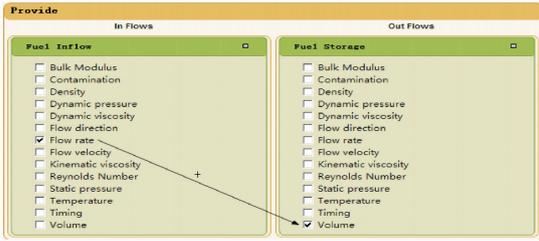


图 5 油箱的功能模型

Fig. 5 Functional model of the oil tank

3) 建立部件间的功能链接。依据燃油供给系统结构及内部物质、能量、信息流的传递途径链接交互作用的部件和子系统,最终得到的系统功能-结构模型如图 7 所示。

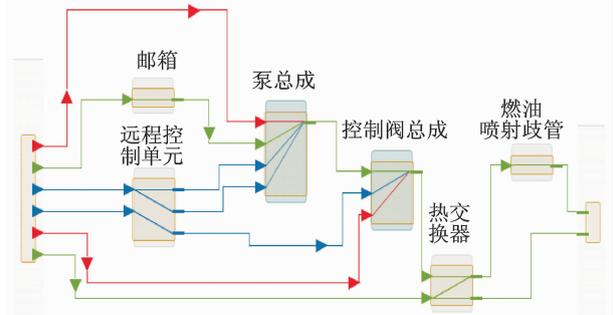


图 7 系统功能-结构模型

Fig. 7 Function-structure model of the system

4) 添加每个组成部件的故障机理。实际燃油供给系统使用过程中统计的故障模式及机理见表 3。以燃油供给系统电机和泵控制器故障为例,采用 MADe 建立其故障原因、机理、故障模式及其与输出流属性因果关系(功能故障)如图 8 所示。电机故障原因为润滑不足,故障机理为黏附磨损,故障模式为卡死,并导致电机转速下降(功能故障),故障模式与输出流属性因果关系为“一”,泵控制器故障模式分别为短路和断路,故障原因分别为高温和瞬时或随机机械载荷,故障机理为热降解和拉伸断裂,影响为泵控制器输出控制信号变化。同理可得其他部件的故障机理与输出流属性因果关系。

表 3 燃油供给系统故障模式及故障机理

Tab. 3 Fault mode and fault mechanism of the FDS

部件	故障模式	故障机理
油箱	裂纹	油箱局部腐蚀引起裂纹,最终导致燃油泄漏
电机	卡死	电机润滑不足引起黏性磨损导致输出轴不转
泵	磨损	润滑不足或是污染物引起
泵控制器	短路	高温引起导线绝缘性能下降,导致短路,控制信号由 1 变为 0
	开路	随机机械载荷引起断路,控制信号由 0 变为 1
远程控制单元	短路	高温引起导线绝缘性能下降,导致短路,信号值由 0 变为 1
	开路	随机机械载荷引起断路,信号值由 1 变为 0
控制阀	短路	高温引起导线绝缘性能下降,导致短路,信号值由 0 变为 1
	开路	随机机械载荷引起断路,信号值由 1 变为 0
阀	阻塞	固体颗粒污染物阻塞阀孔,限制燃油流过
	卡死	固体颗粒污染物卡死阀芯,限制燃油流过
电磁线圈	开路	随机载荷折断电磁线圈引起断路
燃油喷射歧管	变形	杂质积累导致喷射孔尺寸改变,限制燃油喷射速度,在喷射孔形成压差
	裂纹	歧管腐蚀裂纹导致燃油泄漏,喷射压力降低

图 6 远程接口单元的功能模型

Fig. 6 Functional model of the RUI

各部件的元功能及流属性等选择列表见表 2。

表 1 控制信号转换方式

Tab. 1 Convert mode of the control signal

PCmdA	PCmdB	泵控制信号
0	0	关闭
1	0	偏低
0	1	中等
1	1	偏高

表 2 部件功能描述

Tab. 2 Description of the component function

部件	功能	输入流形式	输入流属性	输出流属性	输出流属性
油箱	提供	物质流-液体	流速	物质流-液体	体积
电机	转换	能量流-功率 信号流-信号	电流 信号	能量流-功率	转速
泵	提高	物质流-液体 能量流-功率	体积 转速	物质流-液体	流速
泵控制器	控制	信号流-信号 信号流-信号	信号 信号	信号流-信号	信号
远程控制单元	转换	信号流-信号	幅值 频率	信号流-信号 信号流-信号	信号
阀控制器	转换	信号流-信号	信号	信号流-信号	信号
阀	调节	能量流-功率 物质流-液体	转速 流速	能量流-液体	流速
热交换器	提高	物质流-液体 物质流-液体	流速 流速 温度	物质流-液体 物质流-液体	流速 流速 温度
燃油喷射歧管	散布	物质流-液体 物质流-液体	流速 温度	物质流-液体 物质流-液体	压力 温度

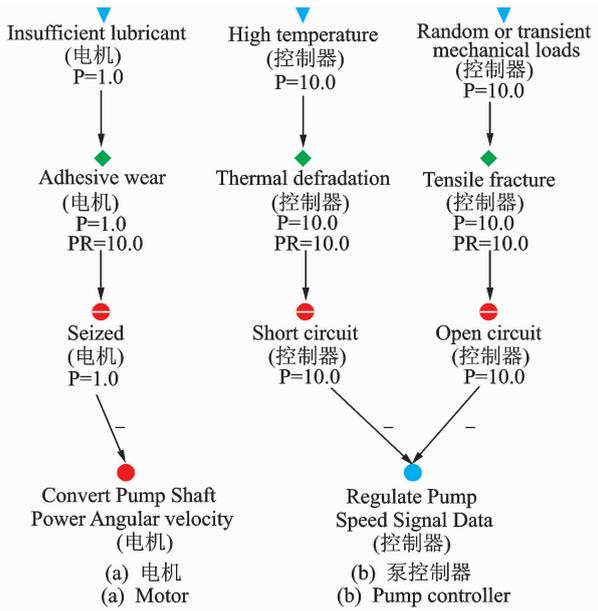


图 8 泵总成部件故障机理及其与输出流属性因果关系
Fig. 8 Fault mechanism and its relation to output flow property of the bump assembly

3.2 燃油供给系统 FMMEA 分析

分析层次为整个燃油供给系统,系统输出流属性为输出油压,选定最低层次为系统部件。假设系统输入流正常,依据功能-结构-故障模型,以各部件输出流属性为节点,系统中各部件分别采用节点 $n_1 \sim n_{12}$ 表示,相应的输出流属性如下: C_1 为油箱输出油量; C_2 为远程控制单元输出控制信号 PCmdA; C_3 为控制信号 PCmdB; C_4 为控制信号 VCmd; C_5 为油泵流速; C_6 为泵总成控制器输出信号; C_7 为电机转速; C_8 为控制阀输出控制信号; C_9 为电磁线圈输出转速信号; C_{10} 为阀体输出流速; C_{11} 为热交换器输出流速; C_{12} 为燃油喷射歧管输出压力。得到的模

糊认知图邻接矩阵 E 如表 4 所示。

假设电机卡死时,依据电机故障机理图可得电机转速下降,初始节点向量为 $C_{10} = (0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 0)$, 计算 $C_{10}E$ 并采用式(1)的转化函数 (x) 得到

$$C_{11} = (0, 0, 0, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$$

$$C_{11}E = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0) = C_{12}$$

$$C_{12}E = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0) = C_{13}$$

$$C_{13}E = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1) = C_{14}$$

$$C_{14}E = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) = C_{15}$$

$$C_{15}E = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) = C_{15}$$

表 4 邻接矩阵 E

Tab. 4 Adjacency matrix E

C	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}
C_1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
C_2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
C_3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
C_4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
C_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
C_6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
C_7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
C_8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
C_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
C_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
C_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
C_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

由此可得, C_{15} 为燃油供给系统的 FCM 动态系统中的固定点。因此电机卡死时,故障原因是缺少润滑,故障机理为黏附磨损,局部影响为电机转速下降,下一影响为油泵流速下降,最终影响为燃油供给系统动态压力降低。其他故障依次类推,可得燃油供给系统的 FMMEA 分析结果如表 5 所示。该表由系

表 5 FMMEA 分析结果
Tab. 5 FMMEA analysis result

部件名称	故障模式	故障原因	故障机理	故障影响		
				局部影响	高一层次影响	最终影响
油箱	裂纹	腐蚀性污染物	侵蚀腐蚀	输出油量减少	油泵流速下降	FDS 系统输出压力降低
电机	卡死	缺少润滑油	黏附磨损	电机转速下降	油泵流速下降	FDS 系统输出压力降低
泵	磨损	润滑不足或油液污染	黏附磨损	油泵流速下降	阀体流速下降	FDS 系统输出压力降低
泵控制器	短路	高温	热降解	数字变化	电机转速下降	FDS 系统输出压力降低
	开路	随机或瞬时机械载荷	拉伸断裂			
远程控制单元	短路	高温	热降解	信号值由 0 变 1	泵控制信号增大	FDS 系统输出压力增大
	开路	随机或瞬时机械载荷	拉伸断裂	信号值由 1 变 0	泵控制信号减小	FDS 系统输出压力降低
阀控制器	短路	高温	热降解	控制信号由 0 变 1	电磁线圈转速增加	FDS 系统输出压力增大
阀体	阻塞 卡死	固体颗粒污染物	污染物积累	阀体流速下降	热交换器流速下降	FDS 系统输出压力降低
电磁线圈	开路	随机或瞬时机械载荷	拉伸断裂	电磁线圈转速信号下降	阀体流速下降	FDS 系统输出压力降低
燃油喷射歧管	变形 裂纹	固体颗粒污染物 腐蚀性污染物	侵蚀腐蚀 污染物积累	FDS 系统输出压力降低 FDS 系统输出压力降低	无 无	FDS 系统输出压力降低 FDS 系统输出压力降低

统模型自动生成,具有直观、规范、可重复使用和易于修改更新等特点。

4 结 论

1) 功能-结构-故障模型采用了标准化输出流属性的变化来定义功能故障,采用标准化的故障物理过程描述故障原因、机理和故障模式,有效地解决了传统 FMEA 分析时故障模式、故障机理、故障原因、故障影响等相关故障信息描述不规范及零部件故障模式与故障物理过程混淆等问题,有效地提高了 FMMEA 分析结果重复使用性。

2) 采用模糊认知图进行了故障路径传播及影响分析,解决了传统 FMEA 装备或零部件故障机理识别、故障原因分析、故障影响推理及潜在故障模式识别能力较弱等问题,有效地提高了 FMMEA 的分析效率和可信度。

3) 在功能-结构-故障模型的基础上,可以适当添加故障率、检测难易程度、影响严重程度等信息,从而进行故障危害度计算;也可适当添加测试,构建功能-结构-故障-测试分析模型,为进一步测点优化选择和诊断策略研究奠定基础。

参 考 文 献

- [1] GJB1391—1993 故障模式影响及危害分析程序[S]. 北京:国防科工委军标出版社,1993.
- [2] Rudov-Clark S D, Stecki J. The language of FMEA: on the effective use and reuse of FMEA data[C]// AIAC-13 Thirteenth Australian International Aerospace Congress. Australia: Australia Defence Science and Technology Organisation, 2009.
- [3] Pecht M, Dasgupta A. Physics-of-failure: an approach to reliable product development[C]// Integrated Reliability Workshop. USA:[s. n.], 1995:1-4.
- [4] Ganesan S. System level approach for life consumption monitoring of electronics [D]. USA: University of Maryland, 2004.
- [5] Stone R, Wood K. Development of a functional basis for design [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2000, 122(4):359-370.

- [6] 邹光明,胡于进,肖文生. 基于功能基的产品概念设计模型研究[J]. 中国机械工程,2004,15(3):206-210. Zou Guangming, Hu Yujin, Xiao Wensheng. Functional group based research on product concept design model[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2004, 15(3):206-210. (in Chinese)
- [7] Hirtz J, Stone R, Mcadams D, et al. A Functional basis for engineering design: reconciling and evolving previous efforts[J]. Research in Engineering Design, 2003, 13(2): 65-82.
- [8] GJB451—2005 可靠性维修性保障性术语[S].
- [9] MIL-STD-1629A Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis[S]. Washington DC, USA: US Department of Defense, 1980.
- [10] Tumer I Y, Stone R B, Bell D G. Requirements for a failure mode taxonomy for use in conceptual design[C] // International Conference on Engineering Design. Stockholm City, Sweden: Australia Defence Science and Technology Organisation,2003.
- [11] Sandeep M, Chris S, Song Jiaqi, et al. Optimization of PHM system for electronic assemblies using maintenance aware design environment software[C]// AIAC 14 Fourteenth Australian International Aerospace Congress. Australia: Australia Defence Science and Technology Organisation,2011:1-14.
- [12] Andrew H, Jacek S S, Shoshama D R C. The maintenance aware design environment: development of an aerospace PHM software tool[C]// IEEE PHM 2008 Conference. [S. l.]:IEEE,2008:1-9.



第一作者简介:冯辅周,男,1971年3月生,教授。主要研究方向为装备机电液系统的测试性设计与分析、参数测试与状态评估、故障预测与健康管理等。2000年毕业于清华大学精密仪器系,获机械设计及理论专业博士学位;2002年于清华大学精密仪器系仪器科学与技术博士后流动站出站;2002年入选“中韩青年科学家交流计划”;2003—2004年在韩国做访问学者。曾发表《基于小波相关排列熵的轴承早期故障诊断技术》(《机械工程学报》2012年第13期)等论文。
E-mail:fengfuzhou@tsinghua.org.cn