

# 基于功能角色模型的反馈系统故障模式影响分析\*

张 海,钱彦岭,邱 静

(国防科技大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

**摘 要** 从系统功能设计过程出发,在分析反馈系统工作原理及其功能角色模型构造特点的基础上,认为反馈信号在输入端可等效为正、负、零三种误差信号。以此为基础,提出了反馈系统基于该理论的故障传播分析方法和技术。最后以飞机发动机燃料计量系统为例,阐述该方法在反馈系统中应用的可行性。经案例分析表明,该方法可以比较有效地解决一类带反馈环的故障分析问题,大大提高了功能角色模型的应用范围。

**关键词** 故障模式影响分析(FMEA);功能角色模型;燃料计量系统(FMS)

中图分类号:TP206.3 文献标识码:A

## Analysis of the Failure Modes and Effects of the Feedback Systems Using Functional Role Models Theory

ZHANG Hai, QIAN Yan-ling, QIU Jing

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** Based on the related knowledge of the functional disassemble in the engineering design. The feedback signal is thought to be classed as positive, zero, negative signal at the port of input by analyzing the working principles and its functional role model construction of feedback system. Then, the technology of the fault transmit analysis about feedback is put forth. The process of the fault analysis is illustrated by the fuel-metering system of the jet plane engine. The research results show this method can resolve a type of fault analysis of the feedback system effectively, and the range of applications of the functional role model is extended along with it.

**Key words** Failure Modes and Effects Analysis(FMEA);functional role model;the Fuel-Metering System(FMS)

BIT 技术是进行复杂武器装备技术保障的重要技术之一<sup>[1]</sup>。为设计有效的 BIT,必须进行有效的故障模式影响分析(FMEA),FMEA 进行得越早就越有利<sup>[2]</sup>。但是传统的 FMEA 一般只能在系统设计完成或将要完成时才能进行<sup>[3]</sup>。为此,文献[4]从系统设计过程模型出发,以 C. Lucas 的层次性功能模型为基础,提出了一种基于功能角色模型的面向 BIT 设计的 FMEA 分析方法,但是,该方法未针对复杂系统(如反馈回路)展开探讨。

飞机发动机燃料计量系统(FMS)是飞机的重要组成部分<sup>[5]</sup>。其作用是根据飞行要求,改变燃料回路的流速,控制飞行速度。由于其在飞行控制中占有重要地位,故对其展开 FMEA,并进而设计出有效的 BIT 具有重要意义。由于 FMS 属于跟踪反馈系统,还不能直接利用文献[4]所提出的方法进行 FMEA 分析。因此本文首先对文献[4]的方法进行扩展,使其能对反馈系统进行 FMEA,然后在 FMS 中进行验证。

### 1 基于功能角色模型的 FMEA

对系统设计者来讲,系统设计过程是逐渐实现系统功能的过程;对系统故障来说,故障是系统功能的丧失,因此,功能是沟通系统设计过程和故障分析过程的桥梁。

功能是相当主观的一个概念,为描述系统的功能,必须在系统设计目标和实际系统行为之间建立有效的联系。C. Lucas 认为:系统的功能不能仅用单一的层次完全描述,为此,他提出了一种层次性的功能

\* 收稿日期:2003-06-18  
基金项目:国家部委基金资助项目  
作者简介:张海(1978-),男,硕士生。

模型<sup>[5]</sup>。他认为,系统的功能可定义为系统行为和系统设计目标之间的联系。为描述这种功能关系,下面几个模型是必需的:功能角色模型、功能过程模型、目标模型<sup>[5]</sup>。

功能角色模型是根据设计的功能信息,将系统用功能角色表示出来。根据相似性原理,物理系统中所有参量可归纳成四种状态变量,即广义势( $e$ )、广义流( $f$ )、广义位移( $q$ )、广义动量( $p$ )。考查这四种状态变量及其相互之间的联系,物理系统可归纳为九种基本功能单元,即管道功能构件: $ce$ (能量流动时广义势不损失)、 $cf$ (能量流动时广义流不损失)、 $cd$ (纯粹的流动管道, $e$ 和 $f$ 均保持不变);能栅功能构件: $be$ (阻止广义势流动)、 $bf$ (阻止广义流流动);储能构件: $rq$ (势能储存器)、 $rp$ (动能储存器);能生成器构件: $ge$ (势生成器)、 $gf$ (流生成器)。物理系统是这些功能单元按照某种关系构成的一个图模型,即功能角色图。过程模型描述了基本功能单元相互协作时的作用效果,体现功能角色如何表示并参与系统中的物理过程,这样,工程系统描述成一个因果相关的过程网络,而每个过程均由相关角色通过一定的关系连接起来而成,因此,它体现了功能角色和物理过程的关系。目标模型是通过特定的目标及其相互之间的连接关系描述系统的目的。层次性功能模型从不同侧面、不同抽象层次表达了系统的功能信息,能比较深刻地表达系统的本质。

虽然层次性功能模型较好地描述了系统的功能,但还不能直接应用于FMEA,主要表现在(1)每一层次的模型仅描述了功能的一个侧面。单纯以某种模型为基础进行故障分析,结果的完备性和一致性不易保证;(2)若考虑采用所有的模型,则FMEA显得过于繁杂。为此,有必要建立一种能综合所有功能信息的模型。考查层次性功能模型可以发现,现象模型和过程模型实际上是沟通系统设计目标(系统的主观要求)和功能角色(实际系统)之间的桥梁,设计目标通过过程和现象模型在功能角色中得到体现,因此综合考虑现象模型、过程模型和目标模型提供的信息,可以通过扩展功能角色模型来实现。故根据能量和信息的流动方向,可以利用现象模型、过程模型和目标模型将功能角色图转化为一个有向图,称其为有向功能角色模型。在该模型中,系统的节点为九种基本功能单元,节点之间有三种连接关系:串联关系,表示串联的功能单元,用单实线表示;并联关系,表示并联的功能单元,用双实线表示;影响关系,表示两个功能角色的物理量通过某个参数发生联系,用带箭头的实线表示,箭头方向为能量流动的方向。同时,为进一步刻划各功能元件之间在数量上的关系,采用定性代数的方法,对功能角色单元的取值进行量化,其值域为 $\{-, 0, +\}$ , $-$ 、 $0$ 、 $+$ 分别对应 $(-\infty, 0)$ 、 $[0, 0]$ 、 $(0, +\infty)$ 。例如,用 $x$ 表示某一功能角色,其数值增加、不变或减小可分别用 $[x] \approx +$ 、 $[x] \approx 0$ 和 $[x] \approx -$ 表示,其中 $[ ]$ 表示量的抽象符号, $\approx$ 表示定性等于。另外,文献[4]还总结出故障传播关系可为正向传播和反向传播,总共有八条故障推理规则。

## 2 反馈系统基于该理论的FMEA方法

在工业与国防等要求较高的应用领域,绝大多数系统都是反馈系统,文献[4]没有考虑这种情况,因此不能直接用其进行FMEA。为扩大基于功能角色模型理论的应用范围,有必要对其进行扩展。

进行故障模式分析实际上是研究功能单元发生故障即功能角色发生变化对整个系统的影响,反馈系统也不例外。但是,由于反馈系统的某个功能单元发生故障时,整个反馈系统都发生变化,同时,由于反馈系统自身也在不断调整,因此,很难区分是故障还是正常调整所造成的变化。要解决上述问题,首先必须确定系统正常条件下系统的状态,以此作为系统分析的一个比对标准。其次,必须在合适的位置断开反馈环,确定故障传播分析的起点。最后,注入故障,并且用前述的推理规则进行故障分析。

由常见的反馈系统原理可知,系统的复杂性是由反馈信号的不断变化引起的。因此,为了分析某一时刻的故障影响,应从反馈信号处将反馈环断开,将反馈信号作为比对标准。当断开反馈后,系统相当于一个开环系统,因此可用文献[4]提供的方法进行分析。考虑到反馈信号可分为正、负、零误差三种情况,为了确定每种误差对系统的影响,首先应在系统无故障注入时,针对每种输入误差确定反馈环节的传播情况。例如正误差,从真正的源生成器开始正向推理,直到遍历每个功能单元,确定各单元可能的变化及最终的状态,修改功能角色图。反馈系统的主要工作模式有跟踪模式和限制模式,前者是指经过不断反馈,反馈信号与参考信号的差值最终趋于零,而后者是指经过不断反馈,反馈信号与参考信号的差

值在预先给定的范围内。对于跟踪模式,只需确定正误差和负误差条件下系统的响应及各单元的状态。当故障模式注入到角色模型后,仍采用反馈信号作比对,考虑功能单元状态的变化,根据故障传播规律推理,分析每种误差情况下注入的故障造成的系统响应。综合这些响应,就可以确定该故障模式对反馈系统的影响。

这样,可以得出用功能角色模型理论分析反馈系统的基本步骤(1)将反馈信号断开(2)分三种误差分析系统状态的变化(3)注入故障(4)分正、负、零误差三种情况用该理论进行故障推理(5)和正常情况比较有无区别,有,则判断为故障,无,则属正常变化或对反馈系统无影响。

基于上述思路,总结出稳定状态下跟踪模式的故障影响,见表1。对于限制模式,故障影响略有不同,主要表现在广义势(流)的变化有五个状态:  $-\infty$ 、偏小、0、偏大、 $+\infty$ 。由于FMS是典型的跟踪反馈,故本文只考虑跟踪模式。

表1 稳定状态下跟踪模式的故障影响

Tab.1 Fault effect of the tracking mode in the stable state

故障模式	误差影响			输出端的故障影响
	正误差(+)	零误差(0)	负误差(-)	
1	max	$d = 0$	0	正常状态
2	0	0	0	广义势增大,广义流减为零
3	max	max	max	广义势增大,广义流减为零
4	$d = 0$	$d = 0$	0	广义势增大,广义流减为零
5	max	$d = 0$	$d = 0$	广义势增大,广义流减为零
6	$d = 0$	$d = 0$	$d = 0$	广义势(流)处在最大值一半处,相当于输出口信号处于中间状态
7	max	0	0	故障补偿(需减小输入)
8	max	max	0	故障补偿(需增大输入)

注:  $d$  表示系统状态的变化,  $0$  表示系统状态变化至最小;  $d = 0$  表示系统状态不变,  $max$  表示系统状态变至最大。

### 3 飞机发动机燃料计量系统的 FMEA

基于上述扩展,就可以对反馈系统进行分析。下面以FMS系统为例,对以上方法进行具体说明。FMS的基本构成如图1所示,可分成六个子系统:(1)转矩电机的电力部分(左右线圈)(2)转矩电机的机械部分(液压挡板)(3)液压部分(主要是伺服调节压力源(SVP)和低压源(LP))(4)给飞机发动机供油的阀的出口部分(液压阀门执行机构)(5)活塞和齿轮齿条副(6)给控制器传送信号的电传感器。

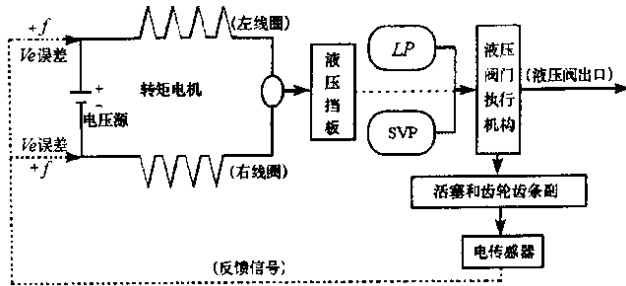


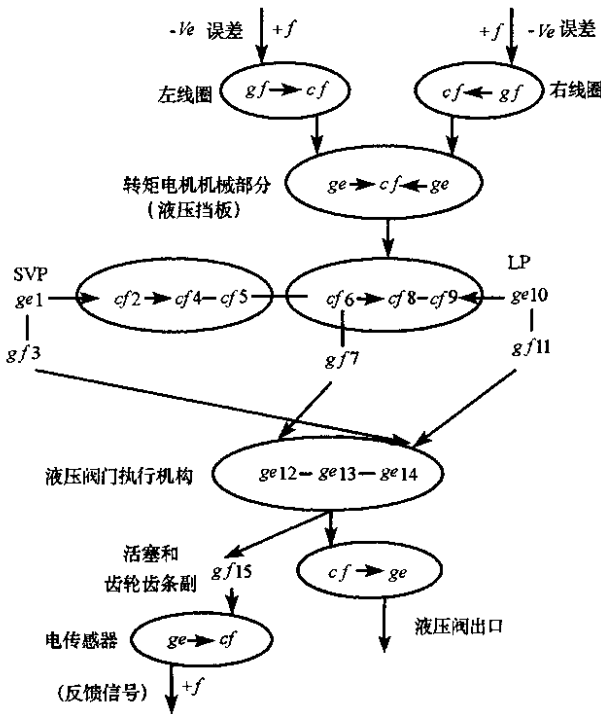
图1 FMS原理示意图

Fig.1 Theory of the fuel-metering System

由图1,整个系统的工作过程为:转矩电机将电能转换成液压挡板的机械位移,SVP和LP用于提供系统不同压力的燃料,燃料分别从挡板的左右流入,经液压阀门执行机构从液压阀流出。在液压阀门执行机构处安装活塞和齿轮齿条副,并布置电传感器,可以获得压力反馈信号。通过电传感器将液压阀出口的流量信号反馈到转矩电机,从而可以控制挡板出口的尺寸大小,使燃料在SVP和LP之间流动。

根据图1,按照文献[5]中功能角色模型的构造原则,可以建立FMS的有向功能角色模型,如图2所示。根据以上分析反馈系统的基本步骤,分析过程如下:

正常状态下,零误差使左右线圈产生相同的电流,表现为电动力平衡,此时对整个系统不产生任何影响;正误差使电机右线圈电流增加( $df = +$ ),负误差使电机左线圈电流增加( $df = +$ ),分别对正、负误差从线圈绕组开始正向推理,直到电传感器的读数结束。为了简化,推理过程省略,仅给出结论:对于正误差,产生最大的传感器读数;对于负误差,传感器读数为零。



- ge 1 —— 伺服调节压力 (SVP) 源;
- cf 2 —— 出口阻力 cf4 和 cf5 的合成阻力;
- gf 3 —— 执行机构环带一侧产生的流速;
- cf 4 —— 固定出口阻力;
- cf 5 —— 执行机构活塞一侧阻力和 cf6 的合成阻力;
- cf 6 —— 挡板出口阻力 cf8 和 cf9 的合成;
- gf 7 —— 进入活塞的流速;
- cf 8 —— 挡板出口阻力;
- cf 9 —— 环带和 LP 的合成阻力;
- ge 10 —— LP, 低压源;
- gf 11 —— 执行机构环带另一侧的流速;
- ge 12 —— 作用在执行机构活塞一侧的力;
- ge 13 —— 液压阀门执行机构上的负载;
- ge 14 —— 作用在执行机构环带侧的力;
- ge 15 —— 齿轮的角速度。

图2 FMS的有向功能角色模型

Fig.2 The directed functional role model of FMS

在分析故障时,考虑一种故障模式:转矩电机中节流阀旁通引起液体局部泄漏,通过添加一路径注入故障,在此添加流路  $cf4.1$  与  $cf4$  并联。由于推理过程较长,本文只给出推理示例。零误差情况:从故障注入点开始反向推理,如  $cf4.1$  与  $cf4$  并联,据文献[4]规则1,  $cf4.1$  电流增大,  $df = +$ ,依次推理,到系统真正的源生成器  $ge1$  结束,  $ge1$  的反向影响为:  $ge1$  流速增大,  $df = +$ 。然后从  $ge1$  正向推理,如  $ge1$  流速增大,  $df = +$ ,据规则5,  $ge1$  压力不变,  $de = 0$ 。依次按能量流动的方向,便可确定每个功能构件的故障影响。可以得出,零误差使传感器电流为零,即读数为零,注入故障后,系统输出流量增大。正、负误差情况:按前述方法进行推理,可以得出,正误差使传感器电流最大,注入故障后,系统输出流量减小。负误差使传感器电流最小,注入故障后,系统输出流量增加。

最后,综合注入故障后三种误差的分析,从表1可知故障影响为:故障模式7,即整个系统仍可处于运行当中,但需要减少输入(功率),以补偿故障的影响。

### 4 结论

面向BIT设计进行FMEA是一项富有挑战性的工作,而基于功能模型进行FMEA是面向BIT设计进行FMEA的一个新颖思路。利用功能角色模型理论对反馈系统进行FMEA,关键是分别对正、负误差进行两次正向推理,然后注入故障,针对三种误差进行三次反向和三次正向推理,最后将推理结果综合,得出故障影响。从FMS的分析过程看,本文提出的方法模型简单,推理简便,对于在设计初期,实现功能级的FMEA具有重要意义。将功能角色模型与人工智能和专家系统相结合,则更易于实现FMEA的自动化。

### 参考文献:

- [1] 温熙森,徐永成,易晓山,陈循. 智能机内测试理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [2] 钱彦岭. 测试性建模技术及其应用研究[D]. 长沙:国防科技大学,2002.
- [3] 陆廷孝,郑鹏洲. 可靠性分析与设计[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [4] 王明凯. 基于功能角色模型的自动故障模式影响分析及其实现[D]. 长沙:国防科技大学,2002.
- [5] Hawkins P G, Woolons D J. Failure Modes and Effects Analysis of Complex Engineering Systems Using Functional Model[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 1998, 12(4): 375 - 397.

