

# 运载火箭姿态控制系统的一种故障分析法

姜杰 孙思礼

(北京自动化工程研究设计所)

**摘要** 本篇论文研究提出了一种运载火箭姿态控制系统的故障分析法,称为故障-功能分析法(简称为F-FAM)。F-FAM由故障-功能树分析和故障模式分析两部分内容组成,后者是前者的延伸,在故障模式分析中,着重讨论了姿态控制系统各个环节的故障模型参数估计问题。最后,用实例说明了该方法用于姿态控制系统故障分析的有效性和快速性。

**关键词:** 姿态控制系统, 故障诊断, 参数估计

## 1 引言

我们知道,运载火箭姿态控制系统的结构比较复杂,出现的故障会是各种各样的,这给故障分析带来了困难。以往常采用“故障复现”的办法来分析故障,一般来说此法比较繁琐,且有些类型(如多重故障)的故障分析还存在一定的困难。本文研究提出的一种运载火箭姿态控制系统的故障分析法——故障-功能分析法,其特点是:根据运载火箭飞行试验结果和遥测数据,从姿态控制系统的故障事件入手,逐步深入到系统内部分析各环节的故障,直至诊断出故障。保证了故障诊断的准确性,提高了快速性,它不仅能分析姿态控制系统的单一故障,而且可以分析诊断多重故障,并估计出系统故障后各环节的模型参数。

F-FAM由两部分组成:一是故障-功能树分析,二是故障模式分析。故障-功能树分析,是根据具体系统对故障诊断层次的要求,将系统分解到部件(或子系统),把每个部件(或子系统)当作具有特定功能的整体看待,以其功能失效作为基本故障事件,并以被考察的系统故障为顶事件建造故障-功能树(故障-功能树简称F-FT),进而对F-FT进行分析,找出系统发生故障的所有故障模式;故障模式分析是故障-功能树分析的继续和深入,它是对上述故障模式进行分析,确定哪些故障模式发生导致系统故障,完成故障诊断任务。其中,对部件(或子系统)的模型参数跳变性故障模式分析,本文又提出了故障模型参数估计法,它有效地解决了模型参数跳变性故障模式的分析。

为满足快速诊断技术的要求,本文把系统不需要再分解的子系统(环节)的功能故障作为F-FT的基本故障事件。这样大大减少了建树的工作量,提高了建树的快速性。之所以能够提出这样来确定基本故障事件,是基于本文提出的故障模式分析,它不仅能够确定哪些故障模式发生导致系统故障,而且能够诊断出故障发生的具体部位。

## 2 故障-功能树分析

### 2.1 F-FT的定义

F-FT是一种特殊的树状逻辑因果关系图。它应用人为规定的各种事件符号、逻辑门和转移符号来描述系统中各种事件之间的因果关系。逻辑门的输入事件是输出事件的“因”,逻辑门的输出事件是输入事件的“果”。

### 2.2 建造F-FT的一般方法

本文采用演绎法建树。首先写出被分析的系统故障事件作为第一阶(即第一行,称为顶事件),再将导致该事件发生的直接原因(包括硬件故障、软件故障、环境因素、人为因素等)并列地作为第二阶,用适当的事件符号表示之,并用适当的逻辑门把它们与顶事件连接起来。其次,将导致第二阶各故障事件发生的直接原因分别并列在第二阶各故障事件的下面,作为第三阶,用适当的事件符号表示之,并用适当的逻辑门把它们与第二阶相应的事件连接起来。如此进行下去,直到把所有基本原因(基本故障事件,又称为底事件)都分析出来为止。这样画出的——张逻辑图就叫F-FT。

①收到本文的时间是1988年8月15日,本文曾获中国自动化学会1988年学术年会青年优秀论文奖。

### 2.3 故障-功能树分析

故障-功能树分析就是:要对已建好的 F-FT 写出顶事件的结构函数,结构函数是顶事件状态的一种布尔函数,其自变量为基本故障事件的状态,它是 F-FT 的数学描述;找出 F-FT 的所有最小割集(最小割集是指能引起 F-FT 顶事件出现的基本故障事件的最小集合,它表示顶事件发生原因的一种组合方式),每一最小割集表示一种故障模式,这样就得到了顶事件发生(系统故障)的所有故障模式。

究竟哪些故障模式发生,引起系统故障,要经过故障模式分析才能确定。

### 3 故障模式分析

#### 3.1 故障模型参数估计法

故障模型参数估计法解决了运载火箭姿态控制系统连续或离散环节的故障模型参数估计问题,该算法在 VAX-11/780 计算机上实现。

故障模型参数估计法由两部分组成:①离散模型参数估计。针对运载火箭姿态控制系统各环节故障模型参数估计的特点和要求,本文引入了离散模型参数估计法中适应范围较广的极大似然法,并加以改进(称为改进的极大似然法),根据运载火箭飞行故障后各环节的输入、输出观测数据,利用改进的极大似然法辨识得到该环节的离散时间故障模型参数。②离散模型参数转换为等价的连续模型参数。若被分析的环节是连续环节,则要进行这种转换。

##### 3.1.1 改进的极大似然法

考虑多输入单输出系统模型

$$y(k) = \sum_{j=1}^m \frac{B_j(z^{-1})}{A(z^{-1})} u_j(k) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} e(k) \quad (3-1)$$

其中

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \\ B_j(z^{-1}) &= b_{j1} z^{-1} + b_{j2} z^{-2} + \dots + b_{jn} z^{-n} \\ & \quad j = 1, 2, \dots, m \\ C(z^{-1}) &= 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_n z^{-n} \end{aligned}$$

$\{u_j(k)\}, j=1, 2, \dots, m, \{y(k)\}, \{e(k)\}$  分别是输入、输出和新息序列。参数向量  $\theta^T = \{a_1, \dots, a_n, b_{11}, \dots, b_{1n}, \dots, b_{m1}, \dots, b_{mn}, c_1, \dots, c_n\}$ , 假定噪声服从高斯分布,参数  $\theta$  的改进极大似然法可通过求损耗函数  $J_N(\theta)$  的极小值得到

$$\begin{aligned} J_N(\theta) &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N e_k^2(\theta) \\ e_k(\theta) &= \frac{A(z^{-1})y(k) - \sum_{j=1}^m B_j(z^{-1})u_j(k)}{C(z^{-1})} \end{aligned} \quad (3-2)$$

这里,本文用 Newton-Raphson 二阶寻优算法并加以改进来求参数  $\theta$  的估值,改进后算法形式为

$$\hat{\theta}(j+1) = \hat{\theta}(j) - \alpha(j)R(j) \frac{\partial J_N(\hat{\theta}(j))}{\partial \hat{\theta}} \quad (3-3)$$

式中,  $j$  表示第  $j$  次迭代,  $\hat{\theta}$  表示估值,  $R$  为方阵。

(3-3)式中,  $R(j) = H^{-1}[\hat{\theta}(j)]$ ,  $H$ (方阵)为 Hessian 矩阵,且

$$H = \sum_{k=1}^N f(y^F, u^F, e^F, k) \cdot f^T(y^F, u^F, e^F, k)$$

这里,  $f(y^F, u^F, e^F, k)$  中  $f, y, u, e$  为向量。而

$$\begin{aligned} f(y^F, u^F, e^F, k) &= [-y^F(k-1), \dots, -y^F(k-n); u_1^F(k-1), \dots, u_1^F(k-n) \\ & \quad ; \dots; u_m^F(k-1), \dots, u_m^F(k-n)e^F(k-1), \dots, e^F(k-n)] \end{aligned}$$

这里,

$$y^F(k-i) = \frac{y(k-i)}{C(z^{-1})} \left( = -\frac{\partial e_k}{\partial a_i} \right);$$

$$u_j^r(k-i) = \frac{u_j(k-i)}{C(z^{-1})} \left( = -\frac{\partial e_k}{\partial b_{ji}} \right);$$

$$e^F(k-i) = \frac{e(k-i)}{C(z^{-1})} \left( = -\frac{\partial e_k}{\partial c_i} \right);$$

$$i=1, 2, \dots, n; \quad j=1, 2, \dots, m$$

$$\frac{\partial J_N[\hat{\theta}(j)]}{\partial \hat{\theta}(j)} = -\sum_{k=1}^N f(y^F, u^F, e^F, k)e(k)$$

$\alpha(j)$ 为搜索常数, 是标量。上述算法的改进之处在于增加了 $\alpha(j)$ 作线性搜索, 即在求出校正量

$$\Delta \hat{\theta}(j) = -R(j) \frac{\partial J_N[\hat{\theta}(j)]}{\partial \hat{\theta}(j)}$$

后, 不把 $\hat{\theta}(j) + \Delta \hat{\theta}(j)$ 作为第 $j+1$ 次近似, 而将 $\Delta \hat{\theta}(j)$ 作为下一步搜索方向, 这时求 $\alpha^*(j)$ , 使 $J_N[\hat{\theta}(j) + \alpha(j)\Delta \hat{\theta}(j)]_{\alpha=\alpha^*(j)}$  = 极小值

然后令

$$\hat{\theta}(j+1) = \hat{\theta}(j) + \alpha^*(j) \cdot \Delta \hat{\theta}(j)$$

即

$$\hat{\theta}(j+1) = \hat{\theta}(j) - \alpha^*(j) R(j) \frac{\partial J_N[\hat{\theta}(j)]}{\partial \hat{\theta}(j)}$$

改进算法的优越之处在于: ① 参数的初值 $\theta(0)$ 选取方便, 原算法要求参数初值要接近于拟耗函数极值点处的参数值, 这种限制对故障模型参数估计是很难做到的; ② 参数的寻优速度加快, 精度增高。

### 3.1.2 离散系统传递函数到等价的连续系统传递函数之间的转换

经辨识得到的离散系统模型为

$$G(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (3-4)$$

要求转换后的 $S$ -传递函数形式为

$$H(s) = \frac{\beta(s)}{\alpha(s)} = \frac{\beta_0 s^n + \beta_1 s^{n-1} + \dots + \beta_n}{s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_n} \quad (3-5)$$

转换算法简述如下:

① 根据式(3-4)的系数, 可得到状态方程(3-6)的系数矩阵 $F$ (方阵),  $g$ (向量),  $h$ (向量):

$$\begin{cases} x[(k+1)T_0] = Fx(kT_0) + gu(kT_0) \\ y(kT_0) = h^T x(kT_0) + b_0 u(kT_0) \end{cases} \quad (3-6)$$

式中 $T_0$ 为采样周期。

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

$$g = [0 \quad 0 \quad 0 \dots 1] \quad (3-8)$$

$$h = [b_n - b_0 a_n, \dots, b_1 - b_0 a_1] \quad (3-9)$$

② 根据关系式

$$\begin{cases} A = \frac{1}{T_0} \ln F \\ b = \frac{1}{T_0} \ln F (F - I)^{-1} g \end{cases}$$

( $A, F, I$  为方阵,  $b$  为向量) 计算, 得到连续状态方程(3-10)的系数矩阵  $A, b$ ,

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t) \\ y(t) = h^T x(t) + b_0 u(t) \end{cases} \quad (3-10)$$

③ 把上述连续状态方程经满秩线性变换矩阵  $T$  (系统可观性矩阵, 方阵), 变换得到规范型状态方程, 由此可求得(3-5)式  $H(s)$  的分子、分母系数  $\beta_0, \dots, \beta_n, \alpha_1, \dots, \alpha_n$ .

本文用故障模型参数估计法对某运载火箭姿态控制系统各环节的故障模型参数进行估计, 得到准确结果。

### 3.2 故障模式分析

经故障—功能树分析后, 得到了故障—功能树的所有故障模式(最小割集), 故障模式分析是在故障—功能树分析的基础上, 对每一故障模式进行分析, 确定哪一故障模式出现导致系统故障的发生, 完成了故障诊断任务。为便于讨论, 这里从姿态控制系统的分析设计出发, 把故障模式分为两大类进行分析: 一类是硬损坏性故障模式, 一类是模型参数跳变性故障模式。

硬损坏性故障模式是指部件(或子系统)的输出断线、机械卡死、电源故障诸如此类的硬破坏性故障模式。这些故障模式的分析可根据部件(或子系统)两端的遥测信号, 凭分析者的经验可作出判断。模型参数跳变性故障模式的分析, 是利用被分析部件(或子系统)两端的观测数据, 通过故障模型参数估计法来辨识其模型参数, 并与设计(正常)时的模型参数进行比较, 来确定该部件(或子系统)是否发生故障, 解决了故障检测问题, 根据系统模型参数与具体物理系数之间的关系来分离故障。

### 4 F-FAM 应用实例

作为 F-FAM 应用的实例, 作者用该法分析了某运载火箭“姿态控制系统发散导致运载火箭飞行失稳”三种模拟故障事件: ① 该运载火箭姿态控制系统俯仰波道的速率陀螺通道断线故障事件; ② 该运载火箭姿态控制系统发生二重故障事件——俯仰波道的舵反馈断开和校正网络模型参数变化; ③ 该运载火箭控制系统发生三重故障事件——俯仰波道舵反馈断开, 校正网络和速率陀螺模型参数变化。快速诊断出故障的原因和部位, 并辨识出系统故障后各环节的模型参数, 说明 F-FAM 是可行的, 而且是一种快速故障诊断法。

### 5 结论

本文研究提出的 F-FAM, 是在故障树分析法和系统辨识法诊断故障的基础上, 针对运载火箭姿态控制系统故障分析的特点和实际情况所提出的一种有效、可行的故障分析法, 它提高了故障诊断的准确性和快速性, 解决了诊断多重故障和系统故障后各环节的模型参数估计问题。F-FAM 是故障分析的一般性方法, 也可适用于其它领域内的自动控制系统的故障分析。

### 参考文献

- 1 Willsky A S. A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic System. Automatica, 1976; 12: 601-611
- 2 Isermann R. Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation—a Survey. Automatica, 1984; 20:387-404
- 3 Geiger G. Fault Identification of a Motor-pump System Using Parameter Estimation and Pattern Classification. In: Gertler J and Keviczky L eds., Preprints of the 9th IFAC Congress, Budapest Hungary, 1984: 184-189
- 4 姜杰. 运载火箭姿态控制系统的一种故障分析法. 研究生论文, 1988

## A FAILURE ANALYSIS METHOD FOR ATTITUDE CONTROL SYSTEM IN CARRIER ROCKET

JIANG Jie SUN Sili

(Beijing Automatic control Engineering Institute)

### Abstract

This paper proposes a failure diagnosis method, called failure-function analysis method (F-FAM), for an attitude control system in a carrier rocket. It consists of two parts: failure function tree analysis and failure mode analysis. The latter is an extension to the former. In failure mode analysis, the discussion centres on estimation of failure model parameters of every link in the attitude control system. Finally, some examples are given to verify the feasibility and rapidity of this method.

keywords: attitude control system, failure diagnosis, parameter estimation

### 征 文 通 知

中国计算机学会、中国自动化学会计算机应用委员会、中国电子学会计算机工程与应用学会、机电部微机情报网及四通网络公司等，拟定于1989年三或四季度联合召开“全国第五次计算机网络技术应用会议”。现补充征集内容如下：

1. 网络技术在企业管理中的应用；
2. 远程网及其应用；
3. 局部网在办公自动化管理中的应用；
4. 国内外网络产品、通讯规程综合分析。

希望有关领导部门、企事业单位、科研院(所)、高等院校等广大科技人员积极投稿。请作者在4月30日前提供论文题目及摘要，5月31日前提供全文，自留底稿。来稿寄北京市927信箱兰云吉收。

邮政编码：100083。希作者将工作单位、详细通信地址、邮政编码等写清楚，以便联系。

中国计算机学会计算机应用专业委员会  
中国自动化学会计算机应用专业委员会