

文章编号: 1000-8055(2002) 02-0255-04

空间推进系统的故障推理研究

张纯良¹, 张振鹏¹, 袁军娅¹, 祝 刚²
(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083;
2. 空军第一航空学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 空间推进系统必须可靠地完成轨道保持、轨道修正、姿态控制的重要任务, 要求当其某一功能模块出现故障时、能及时发现并有效隔离。文中介绍了利用有向图方法分析此推进系统故障传播机理的方法, 并建立相应的故障推理模型。离线检测和理论分析表明, 此方法逻辑性强, 简单高效, 具有空间实时应用的可能性。

关键词: 故障有向图; 空间发动机; 故障推理

中图分类号: V434

文献标识码: A

Investigation on Fault Reasoning for Power System Used in Space Vehicles

ZHANG Chun-liang¹, ZHANG Zhen-peng¹, YUAN Jun-ya¹, ZHU Gang²
(1. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
2. The First Aeronautics Institute of PLA Air Force, XinYang 464000, China)

Abstract: The space propulsive system is a power system composed of various types of engines. It must be capable of working in space for a long time with very high reliability. When a fault appears, it needs to be detected in time and shut off effectively. In the paper, the authors have introduced a fault reasoning method (fault directional graph) used in space propulsive system, and a corresponding fault reasoning model has been set up. Numerical simulation and theoretical analysis show that the model is simple and effective, and it is possible to be used for space application in a real time way.

Key words: fault directional graph; space engine; fault reasoning

1 引 言

国外对于发动机故障监控技术方面的研究比较多^[1], 国内从 80 年代开始也有大量的研究成果, 但主要集中在大型的液体火箭推进系统的健康监控上^[2,3], 而对于小推力的姿态控制、轨道控制发动机推进系统的故障研究却很少。在现实应用中, 由小推力发动机组成的推进系统大量应用于各种空间飞行器中, 如卫星、飞船、空间站、深空探测器等。它对于飞行任务的完成是至关重要的,

特别是对于载人空间飞行器, 由小推力发动机组成的推进系统要完成轨道改变、姿态控制、紧急逃生、应急返回等功能。此推进系统工作性能的好坏是能否保证宇航员安全和飞行任务完成的关键, 所以必须对其进行有效的监控。但由于其运行时间长, 测试参数多, 依靠领域专家在地面长时间监视其运行状态是不太可能的。

推进系统健康监控至少包括以下内容: 故障检测、故障诊断、故障源定位和隔离、系统有效控制等。研究空间发动机故障推理技术, 就是希望当

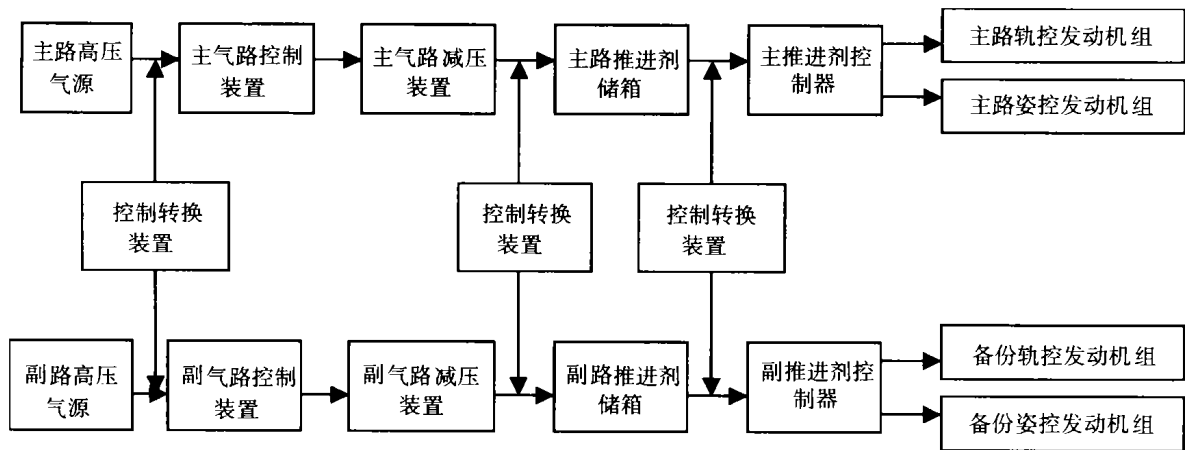


图 1 空间发动机推进系统结构简图

推进系统某一功能区出现故障时,能及时发现,便于对故障的有效隔离,为利用计算机和自动化技术来代替领域专家对空间发动机运行状态进行长期有效的监控打下基础。同时,空间发动机故障推理技术还可以成为一种常规的地面试验故障诊断手段,以保证地面试验的安全性和提高试验数据处理的自动化程度,这具有重要的现实意义和工程应用价值。

2 推进系统的工作原理

空间飞行器的推进系统是一个复杂的推进系统,它由高压供气部分、推进剂储箱、大量的发动机和各控制装置等组成^[4],原理如图 1 所示。

空间发动机推进系统的工作原理:首先打开主副路液气各控制器,完成系统的推进剂填充过程。然后再进行系统自检,当系统各部分的压力在规定时间内保持在规定值时,表明系统各部分工作正常,否则某一部分压力不足或过高就表明此部分有故障,此时程序需永久关闭上游对应的系统控制装置,相应将该路的全部发动机切换至另一路。在推进系统均正常的条件下,为了安全的需要,一路系统工作的同时,另一路系统处于热备份状态,只有在空间飞行器运行的后期,为了保证两路气源、贮箱的尽量均衡消耗,两路装置均相互连通。另外适当的温度范围也是推进系统可靠工作的条件之一。

可见要比较全面的反映推进系统的工作情况,对系统至少要监测压力和温度两种参数,系统中压力参数 26 个,温度参数 12 个(地面实验时压力参数 66 个,温度参数 12 个,辅助参数 4 个)。

3 推进系统故障分析推理机制

3.1 利用有向图研究推进系统故障传播的规律

在空间发动机推进系统中,各功能区之间存在着串联关系,存在着故障源定位过程中的故障推理问题。譬如,假若高压气源供气压力不足,则有可能表现为全系统压力不足,显然不是全系统都有泄漏。状态监控的任务是知道系统中故障的确切位置,因此必须研究故障的推理机制,为此建立空间推进系统的故障逻辑图,图中“→”方向为故障传递方向,如图 2 所示。

故障传递有向图模型是一种图论模型^[5],它通过点和线组成的图来描述实际系统的一种数学方法,并可根据图的性质对系统进行各种分析。图 2 的故障传播有向图如图 3 所示,图中“→”为故障推理方向。

利用有向图可以建立故障传递矩阵,方法如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1: a_i \text{ 和 } a_j \text{ 之间有关系} \\ 0: a_i \text{ 和 } a_j \text{ 之间无关系} \end{cases}$$

a_i 和 a_j 之间有关系表示: a_i to a_j 有直接通路(长度为 1),即 a_i 发生时 a_j 必发生, a_i 是原因 a_j 是结果; a_i 和 a_j 之间无关系表示: a_i 和 a_j 之间无直接

$$A_{9 \times 9} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

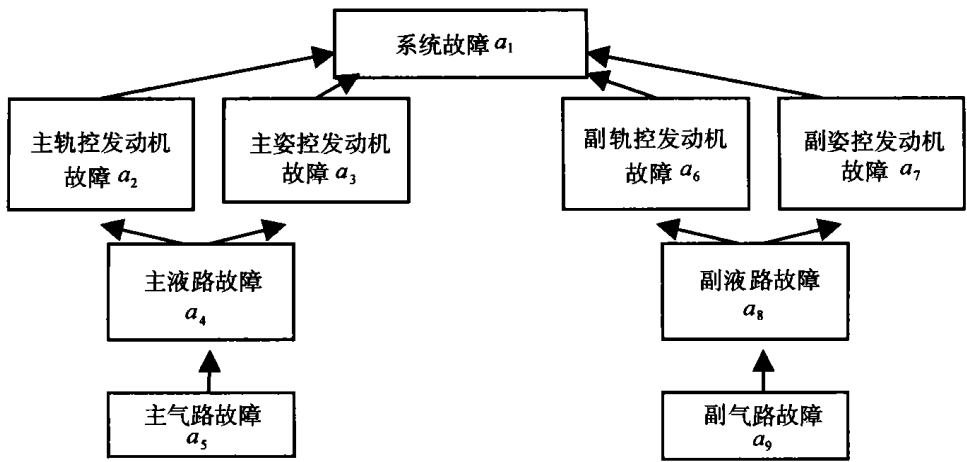


图 2 推进系统故障逻辑图

通路,即 a_i 和 a_j 无故障传递关系。建立上图的故障传递矩阵为:

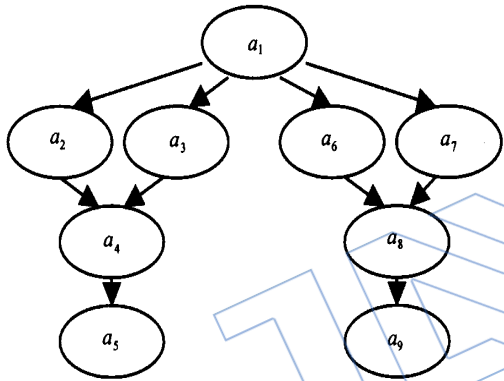


图 3 推进系统故障推理示意图

具有一般性的故障传递过程,如图 4 所示。

建立相应的故障传递矩阵 $B_{4 \times 4}$, 并进行简单的矩阵运算如下:

$$B_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{4 \times 4}^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{4 \times 4}^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

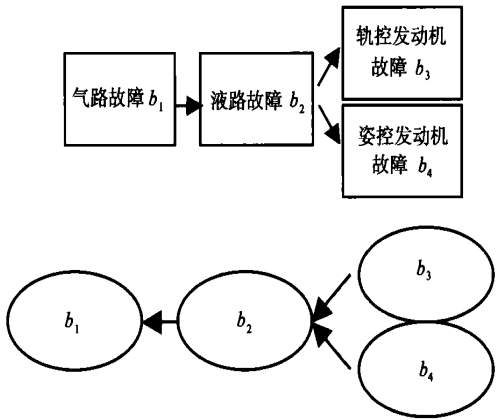
从故障传递矩阵可以看出, 有直接关系(步长为 1)的点是 b_{12} , b_{23} 和 b_{24} , 即 b_1 到 b_2 , b_2 到 b_3 , b_2 到 b_4 可以传递故障; 有间接关系(步长为 2)的点是 b_{13}^2 和 b_{14}^2 , 即 b_1^2 到 b_3^2 , b_1^2 到 b_4^2 可以传递故障; 没有步长为 3 的关系存在, 这也证明了故障矩阵与有向图关系的一致性。

3. 2 推进系统故障推理过程

此推进系统结构上是冗余的。正常情况下, 应该是主路各功能模块参与工作, 但此前若已出现过故障现象, 并采取了相应的措施, 既是功能模块重组, 就会出现主路、副路各功能模块混杂工作的情况。这是我们必须也只能用图 4 的推理模型进行故障定位, 过程如图 5 所示。

图 4 推进系统抽象故障逻辑图

此矩阵为 9 阶方阵, 对高阶矩阵的求解是一件比较麻烦的事情。为此对图 3 进行分析发现, 在故障传递过程中无论主路、副路都是从气路、液路到发动机组的过程, 不考虑具体的管路, 可以提出



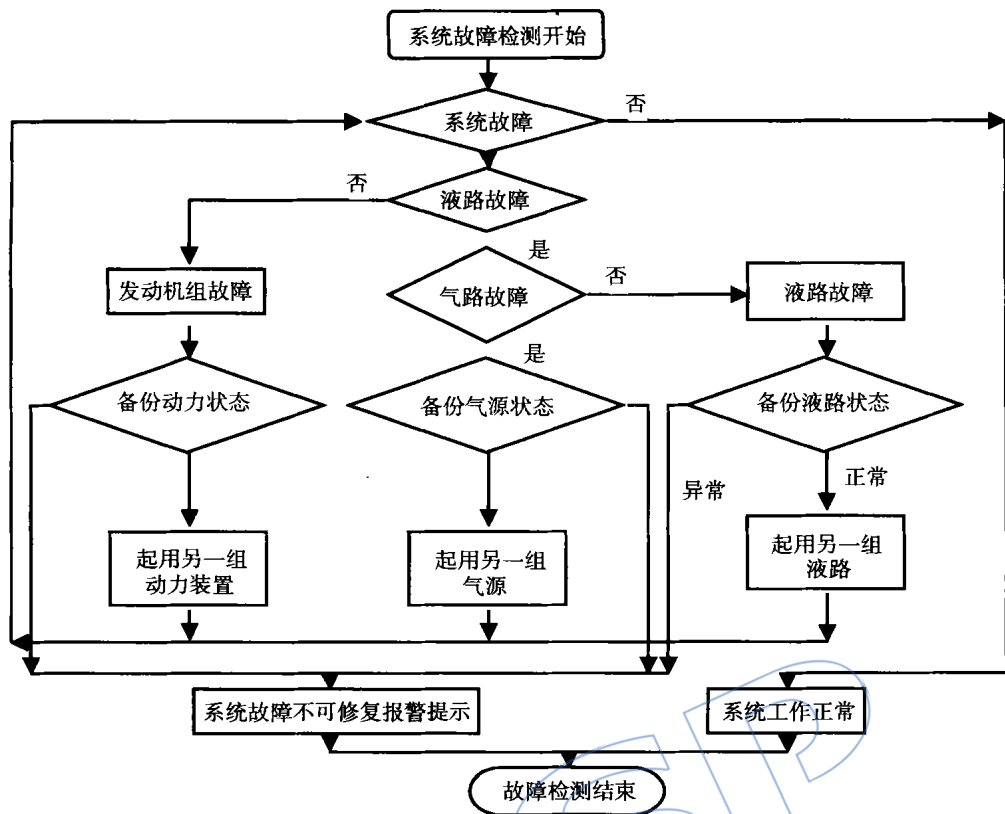


图5 推进系统故障推理过程图

4 结 论

(1) 用有向图方法研究空间推进系统的故障传递机理,可以清楚直观地描述出系统故障传播的过程,有利于故障源的定位。

(2) 故障源的定位和隔离牵涉到对系统进行层次划分的问题。划分过细,则推理过于复杂,难于实时检测;划分过粗,则不利于故障源的精确定位,难于故障隔离。本文对空间推进系统的层次划分,做到了:① 各功能模块的组合包括了推进系统的全部部件;② 各功能模块故障传播关系明确,故障推理机制合理,可迅速发现故障源。因此文中针对空间推进系统的特点进行的层次划分是适当的。

(3) 针对推进系统的具体情况,文中抽象出的故障传播模型,并以此为基础设计的故障推理流程简单实用,很好的解决了工程上的复杂问题,离线检测结果正确,表明此方法合理,具有工程使用价值。

(4) 文中方法可以很好的解决单故障源的定

位问题,对于多故障源情况的故障定位,容易出现故障源漏检现象,如何解决此类问题还需要进一步研究,这也是故障检测与诊断研究的一个重要问题。

参考文献:

- [1] Whitehead B, Ferber H, Ali M. Neural Network Approach to Space Shuttle Main Engine Health Monitoring [R]. AIAA 90- 2259.
- [2] 旷武岳, 谭松林. 液体火箭发动机可靠性设计综合分析方法研究[J]. 推进技术, 1997, 2(22): 9- 12.
- [3] 何译夏. 航天飞机主发动机的故障监测与隔离[J]. 火箭推进, 2000, 2: 26- 36.
- [4] 杨尔辅, 张振鹏, 张梦, 等. SZ空间发动机故障检测与诊断专家系统2.0研制与使用手册[Z]. 北京: 北京航空航天大学宇航学院, 2000.
- [5] 周建军. 基于有向图和故障树的导弹故障诊断系统研究[D]. 北京: 航天机电集团四部, 2001.

(责任编辑 杨再荣)