

文章编号: 1000-8055(2003) 02-0253-05

利用键合图模型进行空间推进系统故障诊断研究

张纯良^{1,2}, 张振鹏¹, 张本斌², 曹永鹏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: 介绍了键合图基本理论, 并利用其理论对空间推进系统进行了故障诊断研究。结果表明利用键合图模型诊断液体火箭发动机故障, 具有建模简单, 模型直观, 故障定位方便等优点, 是液体火箭发动机故障诊断的一个新途径。

关键词: 航空、航天推进系统; 键合图; 空间推进系统; 故障诊断; 故障定位

中图分类号: V434

文献标识码: A

Fault Diagnosis for Space Propulsion System Using the Bond Graph Method

ZHANG Chun-liang^{1,2}, ZHANG Zhen-peng¹

ZHANG Ben-bin², CAO Yong-peng²

(1. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. The First Aeronautics Institute of PLA Air Force, Xinyang 464000, China)

Abstract: This paper introduces basic theory of the bond graph, and by using the theory, fault diagnosis for space propulsion system is studied. The analysis shows that the method has following advantages in fault diagnosis of space propulsion system: simple modeling, intuitive model, easy fault locating. It is a new way to diagnose liquid-rocket engine.

Key words: aerospace propulsion; bond graph; space propulsion system; fault diagnosis; fault locating

1 前言

故障诊断技术是提高空间飞行器可靠性的重要手段。在这方面国内外进行了广泛的研究^[1,2], 提出了多种故障诊断算法—基于神经网络的、小波理论的、灰色系统的、人工智能的及基于数学模型的等, 取得了很大的成功。但通常情况下各种数学模型都是非线性的, 计算量大, 在应用于空间推

进系统这样的复杂动力系统是会存在各种难以克服的困难。键合图理论是国外五十年末首先由美国 Paynter H M 教授提出的, 几十年来, 以 Karnopp D C 及 Rosenberg R C 为代表的一批学者在此领域作了大量的研究工作, 目前它已发展成为一门学科。它与其它系统分析方法相比有它的独到之处^[3]: 可以用统一的方式处理多种能量形式并存的系统; 表达系统动态性能的键合图模

型结构简明、包含信息量大;可以直观的揭示组成系统各元件间的相互作用及能量转换关系,加深人们对系统结构的认识;其动力学方程的建立方法具有规则化的特点,便于计算机自动生成。

目前国外键合图理论已广泛应用于电力、机械、液压控制、动力及医学工程等领域,自 90 年代开始,国外许多专家开始研究将其应用于动力系统的故障诊断与控制,取得了良好的效果。国内也是 90 年代才开始有相关的研究,但主要是系统的动静特性分析。从国外报道情况看键合图理论用于推进系统的故障检测与诊断研究具有建模简单、故障推理方便、故障隔离实时性强等优点,因此国内有必要在这一领域开展相关的研究。

2 键合图模型基本理论

2.1 键合图理论基本概念

系统依据能量守恒的基本原则,由一些基本元件以一定的连结方式用规定的符号来表示,称为系统键合图。键合图理论将多种物理参量统一归纳成四种广义状态变量,即势变量 $e(t)$,流变量 $f(t)$,广义动量 $p(t)$,广义位移 $q(t)$ ^[3]。

势变量 $e(t)$ 和流变量 $f(t)$ 的标量积称为功率 $w(t)$,即:

$$w(t) = e(t)f(t)$$

故势变量和流变量又称为功率变量。

广义动量 $p(t)$ 定义为势变量的时间积分,

即:

$$p(t) = \int e(t) dt$$

广义位移 $q(t)$ 定义为流变量的时间积分,即:

$$q(t) = \int f(t) dt$$

表 1 广义变量与液压流体变量的对应关系

Tabel 1 The corresponding relationship between generalized variable and liquid-flow variable

广义变量	液压流体变量
势变量 $e(t)$	压力 p/Pa
流变量 $f(t)$	流量 $Q/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
广义动量 $p(t)$	压力动量 $N/\text{Pa} \cdot \text{s}$
广义位移 $q(t)$	体积 V/m^3
功率 $P = e(t)f(t)$	功率 $P = pQ/\text{W}$
能量/J	$E(p) = \int f(p) dp$ $E(q) = \int e(q) dq$
	$E(\lambda) = \int Q(\lambda) d\lambda$ (动能) $E(V) = \int p(V) dV$ (势能)

广义动量和广义位移是能量变量,即通过一根健上的能量 $E(t)$ 为:

$$E(t) = \int f(p) dp = \int e(q) dq$$

键合图理论广义变量与液压流体变量的对应关系如表 1 所示。

键合图基本元件称为键合图元;键合图元件的连线代表功率的流动,称为健;键元间能量传递的地方称为通口,通口可分一通口、二通口、多通口三类。

2.2 键和图理论模型介绍

键合图模型的建立分以下几步:(1)编健号一般从 1 开始,连续编号;(2)利用键合图元健间的关系,标注功率流方向—功率流的正方向、即能量流动的自然方向,用半箭头表示;(3)标注因果关系—键合图元的关系一般有积分因果关系、微分因果关系两种,键合图上用画在健的一端并且与健垂直的短划线来表示;(4)键合图的变换和简化—通过等效变换来实现,目的是减少推导方程过程中可能出现的差错;(5)依键合图为依据,建立键合图条件下的系统数学模型,并进行计算推导等。

组成液压流体系统的键合图模型可按理想模型、静态模型、动态模型三个层次来建立。只考虑元件功能,忽略所有的物理效应的模型称为理想模型。在理想模型基础上再考虑阻性效应的模型称为静态模型。除考虑阻性效应外还考虑容性效应和(或)惯性效应的模型称为动态模型。

3 空间推进系统故障诊断算法

3.1 空间推进系统工作过程

空间飞行器的推进系统是一个复杂的动力系统,它有高压供气部分、推进剂储箱、大量的发动机和各种控制装置等组成,结构示意图如图 1 所示^[4]。

此空间发动机推进系统的工作原理^[4,5]:首先打开主副路上各液气开关,系统完成推进剂填充过程,然后进行系统自检,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就表明此部分有故障,认定为“泄漏”故障模式。健康监控系统以此为依据、对推进系统进行健康监控—永久关闭上游对应的系统控制装置,相应将该路的发动机全部切换至另一路。

3.2 空间推进系统的键和图模型

空间推进系统采用双组元、二冗余的“挤压式”燃料供应系统,使用过程中、图 1 左右两部分完全相同,互为热备份,称为主路推进系统和副路推进系统。正常情况下只有一路推进系统工作(主路或副路),当故障发生时经过故障隔离可能会两

路交叉工作,如主路气源+ 副路推进剂管路+ 主路发动机组成的混合推进系统完成空间飞行器的姿、轨控制,但无论那种情况其推进系统工作模式可归纳为如图 2 的形式。

对图 2 进行分析、建立推进系统的静态情况的键合图如图 3 所示。采用静态键合图、而非更为

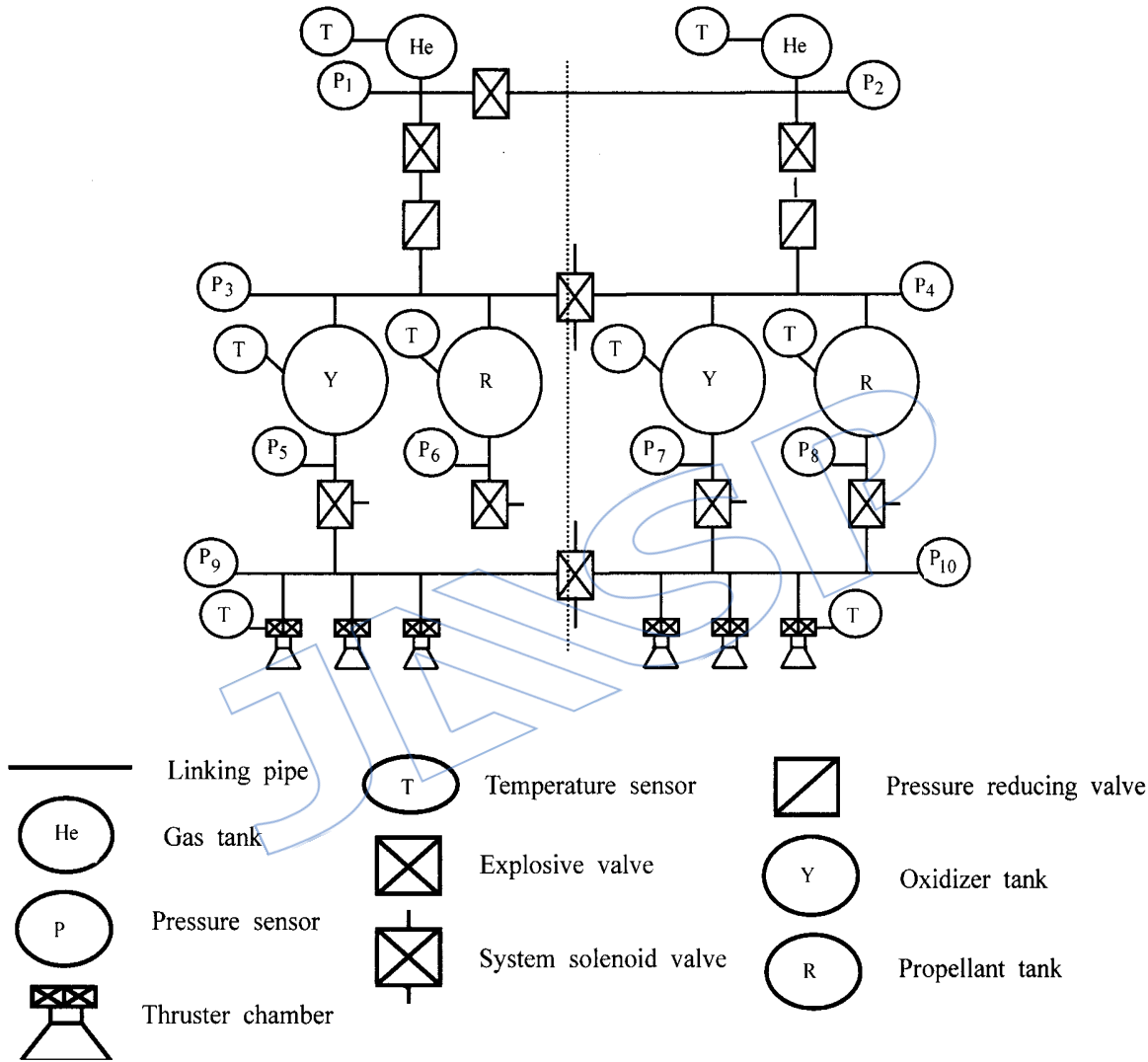


图 1 空间推进系统结构图
Fig. 1 Structure sketch of bipropulsion system

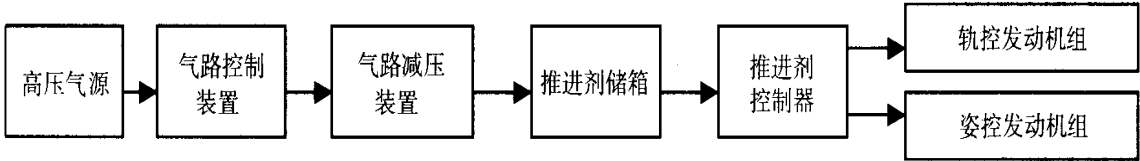


图 2 空间推进系统的物理抽象模型
Fig.2 Abstract model of aerospace propulsion system

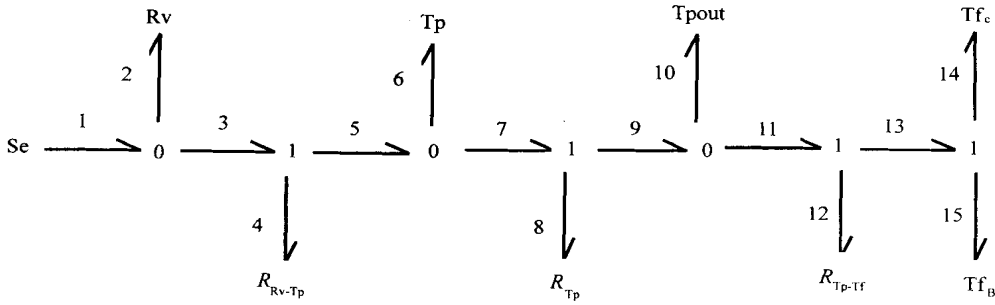


图 3 空间推进系统的键合图 (R_v 为减压阀; R_{Rv-Tp} 为减压阀与推进剂储箱间的液阻; T_p 为推进剂储箱; R_{Tp} 为推进剂储箱液阻; T_{pout} 为推进剂储箱出口; R_{Tp-Tf} 为推进剂储箱与发动机间液阻; Tf_e , Tf_B 为姿、轨控发动机组(能量变换器))

Fig. 3 Bondgraph model of aerospace propulsion system

复杂的动态键合图模型, 原因如下: (1) 推进系统故障诊断是功能诊断, 即通过检测到的系统参数, 按一定的方法, 判断系统是否可完成设定功能, 可完成设定功能判定系统处于正常状态, 反之为故障状态, 利用静态模型完全可以达到此目标; (2) 从键合图理论的观点来说, 当管道不太长, 管经不太小, 流体的密度不是特别大时, 可以忽略流体惯性效应的影响; (3) 当管道不太长, 管经不太大, 流体压力变化不太大, 流体为液体时, 可忽略流体容性效应的影响。

3.3 空间推进系统故障分析

此空间飞行器推进系统采用“挤压式”燃料供应系统, 其在运行过程中主要防止管路裂开, 焊缝开裂及断开, 多余物堵塞管路, 减压装置工作异常等。对这些部件的监控是通过感测压力参数来实现的。通常情况下也以压力为检测参数, 采用复合红线法进行推进剂供应系统“泄漏”故障判定, 即检测到的压力 p 在 $[p_{\min}, p_{\max}]$ 区间时认为系统正常^[6]。这种方法对“泄漏”故障模式的认定时, 有不得已之处, 即系统压力参数对“管路泄漏”和“管路堵塞”无丝毫反应能力, 无论是“管路泄漏”还是“管路堵塞”都表现为管路压力降低。解决此问题必须依靠新的方法。

图 3 空间推进系统的键合图, 可以写出空间推进系统的特征方程如下:

$$e1(t) = e2(t) = e3(t) = e(R_v) \quad (1)$$

$$f3(t) = f5(t) = f4(t) = \frac{e4(t)}{R_{Rv-Tp}} \quad (2)$$

$$e5(t) = e7(t) = e(6) = e(T_p) \quad (3)$$

$$f7(t) = f8(t) = f(T_p) =$$

$$f9(t) = \frac{e8(t)}{R_{Tp}} \quad (4)$$

$$e9(t) = e11(t) = e10(t) = e(T_{pout}) \quad (5)$$

$$f11(t) = f12(t) = \frac{e12(t)}{R_{Tp-Tf}} = f13(t) \quad (6)$$

若以方程式(1)~(6)为基础, 改用液阻为判断依据就可以很容易的区别出“管路泄漏”和“管路堵塞”两种故障模式, 判据为某 x 区间的液阻 $R_x = e_x(t)/f_x(t)$, 当:

$R_x \subseteq [R_{x\min}, R_{x\max}]$: 系统正常;

$R_x \geq R_{x\max}$: 管路堵塞;

$R_x \leq R_{x\min}$: 管路泄漏。

此空间推进系统地面全系统试车时设置压力检测参数 66 个, 温度检测参数 12 个, 流量检测参数 4 个, 可以提供键合图模型所需要的压力、流量参数。

另外采用液阻作为判据还有一个很大的优点: 可以很方便的完成故障源定位, 不需要繁琐的故障推理, 因为液阻本身就含有管路区间(位置)的概念。

4 结 论

通过本文的研究, 可以认为键合图用于火箭发动机的故障诊断是可行的, 它与其它方法相比具有以下优点:

(1) 键合图建模简单, 模型直观性强。

(2) 故障诊断方法灵活, 适应性强, 诊断范围广。

(3) 故障源定位方便, 为故障隔离, 实时控制

提供可能。

目前键合图应用与火箭发动机故障诊断研究方兴未艾。相信随着键合图理论的发展,对火箭发动机故障诊断研究的深入,会有更多的研究成果出现。

参考文献:

[1] 陈启智. 液体火箭推进系统健康监控技术的演变[J]. 推进技术, 1997, 18(1): 1– 8.

[2] Patton R J. A review of Parity Space Approaches to Fault

Diagnosis Applicable to Aerospace Systems[R]. AIAA – 92 – 4538.

[3] 王中双. 键合图理论及其在系统动力学中的应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.

[4] 蔡永胜. 空间推进系统故障诊断方法研究[J]. 推进技术, 1997, 18(1): 88– 89.

[5] 张纯良, 张振鹏, 杨尔辅. SZ 空间发动机故障监测与诊断专家系统算法研究报告[R]. 北京: 北京航空航天大学宇航学院, 2000.

[6] 张纯良, 张振鹏, 袁军娅, 张本斌. 空间飞行器推进系统的故障检测[J]. 宇航学报, 2001, 22(4): 85– 89.

