

# 一种基于聚类分析的液体火箭发动机 稳态过程故障诊断方法

耿 辉, 张 翔, 张素明, 安雪岩  
(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘 要:** 液体火箭发动机故障诊断技术是提高液体火箭可靠性的重要手段, 基于数据分析的发动机故障诊断方法是其未来重要发展方向。本文通过分析液体火箭发动机稳态过程仿真数据, 提出了一种使用发动机稳态过程正常状况/故障状况数据类来实施故障诊断的方法。利用液体火箭发动机稳态过程正常状况/故障状况的仿真数据, 对这一方法的正确性进行了初步分析。仿真分析结果表明, 这一方法有效实用, 其故障诊断效果取决于所使用的发动机正常状况/故障状况数据类的完备程度与数据质量。本文研究为液体火箭发动机稳态过程故障诊断提供了新途径, 对推动液体火箭发动机故障诊断技术发展具有一定意义。

**关键词:** 液体火箭发动机; 故障诊断; 聚类分析

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2014) 05-0086-06

## Cluster analysis based diagnosis method for fault in steady process of liquid propellant rocket engine

GENG Hui, ZHANG Xiang, ZHANG Su-ming, AN Xue-yan  
(Beijing Institute of Space System Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Liquid propellant rocket engine fault diagnosis technology has been proven to be an important approach to improve the reliability of liquid propellant rocket. The engine fault diagnosis method based on data analysis has a bright future. By analyzing the simulation data in steady process of liquid propellant rocket engine, a fault diagnosis method using both normal state data cluster and fault state data cluster in steady process of the engine is proposed. The validity of the method is analyzed with the simulation data of two states. The analysis results show that the method is effective and practical. The fault diagnosis effect mainly depends on the completeness and quality of the data clusters. On the whole, a new way for fault diagnosis of the liquid propellant rocket engine is brought forward in this article, and it may be helpful for progress of the fault diagnosis technology of liquid propellant rocket engine.

**Keywords:** liquid propellant rocket engine; fault diagnosis; cluster analysis

收稿日期: 2014-03-11; 修回日期: 2014-05-06

作者简介: 耿辉 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 研究领域为航天运输系统故障诊断及健康管理

## 0 引言

液体火箭发动机的运行状况, 对于整个火箭的飞行任务成败有着关键性影响。作为提高液体火箭可靠性的重要手段, 发动机故障诊断技术<sup>[1-3]</sup>具有重要的应用价值, 在国外液体火箭上实现了广泛应用。例如, 在德尔它系列、宇宙神系列和阿里安系列等火箭上, 都应用了基于发动机起动过程故障检测的牵制释放技术<sup>[4]</sup>; 在法尔肯系列火箭上, 应用了基于发动机稳态过程故障诊断的动力系统故障实时处理技术。目前, 国内航天界在这一领域主要以故障仿真研究<sup>[5-7]</sup>和诊断方法研究<sup>[8-14]</sup>为主, 工程应用主要集中在发动机试车阶段的故障检测与报警方面<sup>[15-17]</sup>。

随着我国液体火箭发射次数的日益增多, 以及新一代液体火箭动力系统的研制成熟, 积累了

丰富的发动机飞行数据和试车数据。此外, 利用目前较为成熟的液体火箭发动机故障仿真系统, 可以产生发动机正常状况与各类故障状况下的仿真数据。这些丰富的液体火箭发动机飞行数据、试车数据和仿真数据, 为研究基于数据分析的发动机故障诊断方法提供了基础。本文通过分析液体火箭发动机的仿真数据, 提出一种基于聚类分析的发动机稳态过程故障诊断方法, 并对其进行仿真分析。

## 1 基于聚类分析的液体火箭发动机稳态过程故障诊断方法

利用某型液体火箭发动机仿真模型, 可以生成发动机在正常状况和常见故障状况下的仿真数据, 选取了发动机的 12 个监测参数数据, 各参数名称与代号如表 1 所示。

表 1 某型液体火箭发动机仿真数据参数表

Tab. 1 Simulation parameters of a liquid propellant rocket engine

序号	参数名称	参数代号	序号	参数名称	参数代号
1	氢涡轮转速	$nh$	7	燃烧室室压	$P_c$
2	氧涡轮转速	$no$	8	氢泵后压力	$Phpe$
3	燃烧室氢路喷前压力	$Phc$	9	氧泵后压力	$Pope$
4	燃烧室氧路喷前压力	$Poc$	10	发生器出口温度	$T_g$
5	发生器氢路喷前压力	$Phg$	11	氢泵流量	$qh$
6	发生器氧路喷前压力	$Pog$	12	氧泵流量	$qo$

记发动机监测参数个数为  $m=12$ ,  $t$  时刻的发动机各监测参数值分别为  $nh(t)$ ,  $no(t)$ ,  $\dots$ ,  $qo(t)$ , 则  $t$  时刻的发动机全体监测参数值可记为  $m$  维空间上的 1 个数据点:

$$Out(t)=[nh(t), no(t) \cdots, qo(t)]^T \quad (1)$$

通过分析发动机稳态过程仿真数据, 发现正常状况和常见故障状况下的监测参数数据点在  $m$  维空间中具有不同的分布位置。因此, 可以通过对这些监测参数数据点进行聚类, 在  $m$  维空间内建立发动机稳态过程正常状况和常见故障状况的数据类。可以通过分析监测参数数据点在  $m$  维空

间内与正常状况/故障状况数据类的相对位置关系, 对发动机稳态过程实际运行状况进行故障诊断。基于聚类分析的发动机稳态过程故障诊断方法具体设计如下:

1) 步骤 1: 在  $m$  维空间内, 采用适当的聚类方法, 对来自发动机飞行数据、试车数据和仿真数据的监测参数数据点进行聚类 (在进行聚类前, 需要对各监测参数数据分别进行归一化), 建立发动机稳态过程正常状况数据类 (记为  $Cluster0$ ) 和不同故障状况  $A, B, C \cdots$  的数据类 (分别记为  $ClusterA$ ,  $ClusterB$ ,  $ClusterC, \dots$ ), 并计

算各数据类的中心（数据类内各数据点的平均值，分别记为  $Cluster0$ ,  $ClusterA$ ,  $ClusterB$ ,  $ClusterC, \dots$ ）、半径（数据类中心到数据类内各数据点的最大距离（采用欧式距离定义，下同），分别记为  $Radii0$ ,  $RadiiA$ ,  $RadiiB$ ,  $RadiiC, \dots$ ）、各点间最大距离（数据类内各数据点之间的最大距离，分别记为  $Extent0$ ,  $ExtentA$ ,  $ExtentB$ ,  $ExtentC, \dots$ ）。

2) 步骤 2: 分析发动机稳态过程  $t$  时刻的发动机监测参数数据点  $Out(t)$  与各个数据类的位置关系，综合采用以下 3 条准则来诊断  $t$  时刻发动机的实际运行状况：

a) 准则 1: 计算  $Out(t)$  与数据类  $ClusterT, T \in (0, A, B, C, \dots)$  中心  $CenterT$  的距离  $D(t)$ ，若  $D(t) \leq RadiiT$ ，则判断  $Out(t)$  位于数据类  $ClusterT$  内， $t$  时刻发动机处于数据类  $ClusterT$  对应的发动机工作状态；

b) 准则 2: 计算  $Out(t)$  与数据类  $ClusterT, T \in (0, A, B, C, \dots)$  内各数据点的最大距离  $L(t)$ ，若  $L(t) \leq ExtentT$ ，则判断  $Out(t)$  位于数据类  $ClusterT$  内， $t$  时刻发动机处于数据类  $ClusterT$  对应的发动机工作状态；

c) 准则 3: 计算  $t$  时刻的发动机正常状况数据点  $Out0(t)$  到  $Out(t)$ 、故障状况数据类  $ClusterX$ ,  $X \in (A, B, C, \dots)$  中心  $CenterX$  的两条连线方向  $\vec{u}$ 、 $\vec{v}$  之间的空间夹角  $\theta(t) = \arccos \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{\|\vec{u}\|_2 \|\vec{v}\|_2}$ ，若  $\theta(t) < 20^\circ$ ，则判断  $Out(t)$  位于故障状况数据类  $ClusterX$  的位置方向上， $t$  时刻发动机可能处于  $ClusterX$  对应的故障状况。

## 2 仿真分析

为验证上文提出的基于聚类分析的液体火箭发动机稳态过程故障诊断方法，仍利用某型液体火箭发动机仿真模型，分别生成：

1) 发动机在正常状况下的起动后 10 s 内（发动机起动后约 3 s 进入稳态过程）仿真数据，记为  $Out0(t)$ ,  $t \in [1, 10]$ ；

2) 发动机在稳态过程 4 种常见故障状况

（故障 A: 氢泵气蚀；故障 B: 氢泵泄漏；故障 C: 氧泵气蚀；故障 D: 氧泵泄漏，故障发生时刻选为起动后 4~7.5 s（此时发动机处于稳态过程）的随机时刻）、6 级故障严重程度（气蚀/泄漏故障因子（0 到 1 之间）分别选为 5%，10%，15%，20%，25% 和 30%）下的各自仿真数据（发动机起动后 10 s 内），记为  $OutX-S(t)$ ,  $X \in (A, B, C, D)$ ,  $S \in (5, 10, 15, 20, 25, 30)$ ,  $t \in [1, 10]$ 。

选取故障发生时刻之后 0.5 s 时刻（记为  $t^*$  时刻）的故障状况监测参数数据点  $OutX-S(t^*)$ ，对其中的各监测参数数据分别进行归一化（选取正常状况下的各监测参数稳态值的 70%~130% 区间，作为归一化后的  $[0, 1]$  区间），具体方法为：  
 $t^*$  时刻某监测数据(归一化后)=

$$\frac{t^* \text{ 时刻该监测数据} - 70\% \times \text{正常状况下的该监测数据稳态值}}{(130\% - 70\%) \times \text{正常状况下的该监测数据稳态值}} \quad (2)$$

对于稳态过程正常状况下的监测参数数据点  $Out0(t)$ ,  $t \in [3, 10]$ ，也按照公式 (2) 进行归一化，归一化后的  $Out0(t) \approx [0.5, 0.5, \dots, 0.5]^T$ ,  $t \in [3, 10]$ 。

将归一化后稳态过程正常状况数据点  $Out0(t)$  与故障状况数据点  $OutX-S(t^*)$  分为两组：

1) 故障聚类数据点：除某一特定故障严重程度（例如：5%）之外的其他故障状况数据点（例如： $OutX-S(t^*)$ ,  $S \in (10, 15, 20, 25, 30)$ ），用来聚类生成不同故障状况数据类；

2) 验证数据点：正常状况数据点  $Out0(t)$  与某一特定故障严重程度的故障状况数据点（例如： $OutX-S(t^*)$ ），用来验证利用不同故障状况数据类来进行故障诊断的方法。

由于已知各故障聚类数据点的故障类型，因此可以直接将各故障聚类数据点归入 4 种故障状况数据类  $ClusterX$ ,  $X \in (A, B, C, D)$ 。按照步骤 1 中的定义，计算得出各故障状况数据类的中心  $CenterX$ ,  $X \in (A, B, C, D)$ 、半径  $RadiiX$ ,  $X \in (A, B, C, D)$ 、各点间最大距离  $ExtentX$ ,  $X \in (A, B, C, D)$ 。

按照步骤 2 中的准则 1、准则 2，分别判断验证数据点的工作状况（是否处于故障  $X \in (A, B, C, D)$  状况），结果如表 2 所示。

表 2 采用准则 1、准则 2 对验证数据点工作状况的判断情况

Tab. 2 Analysis results of working conditions at verifying data points obtained by Rule 1 and Rule 2

分组 方案	验证数据点	故障聚类数据点	验证数据点工作状况判断情况 (准 则 1)	验证数据点工作状况判断情况 (准 则 2)
1	$Out0(t)$	$OutX-S(t^*)$ ,	对于 $Out0(t)$ 的工作状况, 正确判	对于 $Out0(t)$ 的工作状况, 正确判
	$OutX-5(t^*)$	$S \in (10, 15, 20, 25, 30)$	断为非故障状况; 对于 $OutX-5(t^*)$ 的工作状况, 错 误判断为非故障状况	断为非故障状况; 对于 $OutX-5(t^*)$ 的工作状况, 错 误判断为非故障状况
2	$Out0(t)$	$OutX-S(t^*)$ ,	对于 $Out0(t)$ 的工作状况, 正确判	对于 $Out0(t)$ 的工作状况, 正确判
	$OutX-10(t^*)$	$S \in (5, 15, 20, 25, 30)$	断为非故障状况; 对于 $OutX-10(t^*)$ 的工作状况, 正 确判断为相应故障状况 A/B/C/D	断为非故障状况; 对于 $OutX-10(t^*)$ 的工作状况, 正 确判断为相应故障状况 A/B/C/D
3	$Out0(t)$	$OutX-S(t^*)$ ,	对于 $Out0(t)$ 的工作状况, 正确判	对于 $Out0(t)$ 的工作状况, 正确判
	$OutX-15(t^*)$	$S \in (5, 10, 20, 25, 30)$	断为非故障状况; 对于 $OutX-15(t^*)$ 的工作状况, 正 确判断为相应故障状况 A/B/C/D	断为非故障状况; 对于 $OutX-15(t^*)$ 的工作状况, 正 确判断为相应故障状况 A/B/C/D
4	$Out0(t)$	$OutX-S(t^*)$ ,	对于 $Out0(t)$ 的工作状况, 正确判	对于 $Out0(t)$ 的工作状况, 正确判
	$OutX-20(t^*)$	$S \in (5, 10, 15, 25, 30)$	断为非故障状况; 对于 $OutX-20(t^*)$ 的工作状况, 正 确判断为相应故障状况 A/B/C/D	断为非故障状况; 对于 $OutX-20(t^*)$ 的工作状况, 正 确判断为相应故障状况 A/B/C/D
5	$Out0(t)$	$OutX-S(t^*)$ ,	对于 $Out0(t)$ 的工作状况, 错误判	对于 $Out0(t)$ 的工作状况, 正确判
	$OutX-25(t^*)$	$S \in (5, 10, 15, 20, 30)$	断为故障状况 A 与 C; 对于 $OutX-25(t^*)$ 的工作状况, 正 确判断为相应故障状况 A/B/C/D	断为非故障状况; 对于 $OutX-25(t^*)$ 的工作状况, 正 确判断为相应故障状况 A/B/C/D
6	$Out0(t)$	$OutX-S(t^*)$ ,	对于 $Out0(t)$ 的工作状况, 正确判	对于 $Out0(t)$ 的工作状况, 正确判
	$OutX-30(t^*)$	$S \in (5, 10, 15, 20, 25)$	断为非故障状况; 对于 $OutX-30(t^*)$ 的工作状况, 错 误判断为非故障状况	断为非故障状况; 对于 $OutX-30(t^*)$ 的工作状况, 错 误判断为非故障状况

从表 2 可以看出, 对于多数验证数据点, 按照准则 1 与准则 2 均能正确判断其工作状况, 对验证数据点工作状况的错误判断情况包括:

1) 采用分组方案 1 和 6 时, 按照准则 1 与准则 2, 均将  $OutX-5(t^*)$  和  $OutX-30(t^*)$  错误判断为非故障状况 (即发生漏警问题)。这是因为在故障聚类数据点中不包括具有与  $OutX-5(t^*)$  和  $OutX-30(t^*)$  相接近的故障严重程度的数据点, 因此生成的故障状况数据类  $ClusterX, X \in (A, B, C, D)$  不能将  $OutX-5(t^*)$  和  $OutX-30(t^*)$  覆盖在内。

2) 采用分组方案 5 时, 按照准则 1, 将

$Out0(t)$  错误判断为故障状况 A 与 C (即发生虚警问题), 这是因为故障状况数据类  $ClusterA$  与  $ClusterC$  的半径过大, 将正常状况数据点  $Out0(t)$  也覆盖在内, 但此时如按照准则 2 进行判断, 则无此问题。

针对表 2 中的虚警问题, 可以采用“准则 1+准则 2”来对监测参数数据点的工作状况进行判断, 即仅当准则 1 与准则 2 的判断结论一致 (均为“发动机处于正常状况”或均为“发动机处于某种故障状况”) 时, 才判断发动机处于某种工作状况。

针对表 2 中的漏警问题,按照准则 3 来判断验证数据点是否位于故障状况数据类  $ClusterX$ ,  $X \in (A, B, C, D)$  的位置方向上,结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出,在按照准则 1 与准则 2 进行判断发生漏警问题时,按照准则 3,仍能正确判断出验证数据点  $OutX-5(t^*)$  和  $OutX-30(t^*)$  的位置方向,这是因为  $OutX-5(t^*)$  和  $OutX-30(t^*)$

的故障严重程度虽然超出了故障状况数据类  $ClusterX$ ,  $X \in (A, B, C, D)$  的范围,但它们在  $m$  维空间中的分布位置仍位于相应故障状况数据类  $ClusterX$ ,  $X \in (A, B, C, D)$  的位置方向上。

从上述分析结果可看出,在对液体火箭发动机稳态过程进行故障诊断时,可综合采用准则 1~3 来诊断发动机实际运行状况,诊断流程如图 1 所示。

表 3 采用准则 3 对验证数据点工作状况的判断情况

Tab. 3 Analysis results of working conditions at verifying data points obtained by Rule 3

分组方案	验证数据点	故障聚类数据点	验证数据点工作状况判断情况 (准则 3)
1	$OutX-5(t^*)$	$OutX-S(t^*)$ , $S \in (10, 15, 20, 25, 30)$	对于 $OutX-5(t^*)$ , 正确判断为位于相应故障状况数据类 $ClusterA/B/C/D$ 的位置方向上
6	$OutX-30(t^*)$	$OutX-S(t^*)$ , $S \in (5, 10, 15, 20, 25)$	对于 $OutX-30(t^*)$ , 正确判断为位于相应故障状况数据类 $ClusterA/B/C/D$ 的位置方向上

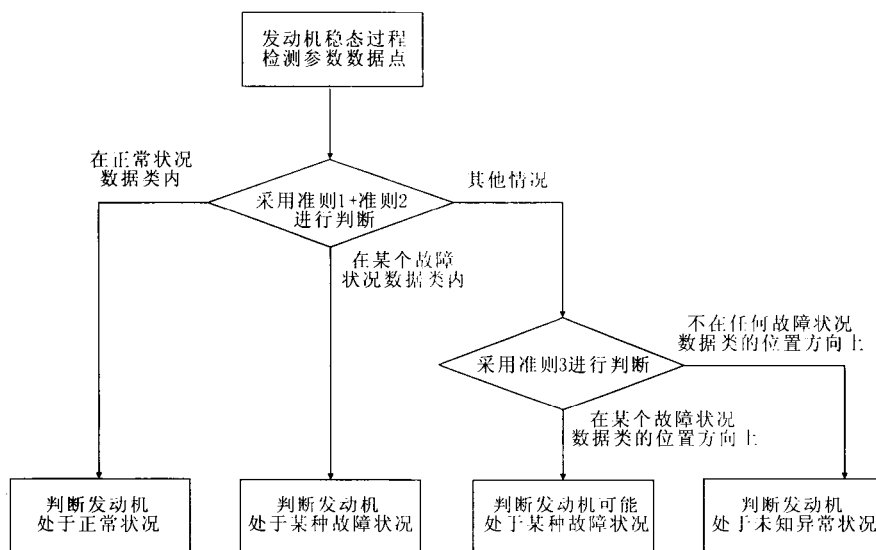


图 1 液体火箭发动机稳态过程故障诊断流程图

Fig. 1 Flow chart for fault diagnosis in steady process of liquid propellant rocket engine

### 3 结束语

基于数据分析的故障诊断方法,是液体火箭发动机故障诊断的未来重要发展方向。本文通过分析液体火箭发动机的仿真数据,提出了一种基于聚类分析的发动机稳态过程故障诊断方法。仿

真分析结果表明,这一方法有效实用,其故障诊断效果取决于所使用的发动机正常状况/故障状况数据类的完备程度与数据质量。本文研究为液体火箭发动机稳态过程故障诊断提供了新途径,对推动液体火箭发动机故障诊断技术发展具有一定意义。

## 参考文献:

- [1] 张育林, 吴建军. 液体火箭发动机健康监控技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.
- [2] 陈启智. 液体火箭发动机故障检测与诊断研究的若干进展[J]. 宇航学报, 2003, 24(1): 1-11.
- [3] 张惠军. 液体火箭发动机故障检测与诊断技术综述[J]. 火箭推进, 2004, 30(5): 40-45.
- [4] 万军, 唐国金, 李道奎, 等. 国外牵制释放发射技术研究现状[J]. 导弹与航天运载技术, 2008(3): 57-61.
- [5] 吴建军, 张育林, 陈启智. 液体火箭发动机实时故障仿真系统实现[J]. 推进技术, 1997, 18(1): 26-30.
- [6] 王建波, 于达仁, 王广雄. 液体火箭发动机泄漏故障实时仿真[J]. 推进技术, 1999, 20(5): 1-5.
- [7] 蔡益飞. 某液体火箭发动机故障仿真分析[J]. 上海航天, 2004(5): 34-38.
- [8] 李大鹏, 王小军. 液体火箭发动机启动过程检测研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2005(1): 1-5.
- [9] 谭松林, 赵万明, 毛根旺. 液氧煤油火箭发动机启动故障检测[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 702-706.
- [10] 陈启智, 刘洪刚. 液体火箭发动机智能故障诊断[J]. 火箭推进, 2006, 32(1): 1-6.
- [11] 刘洪刚, 魏鹏飞, 谢廷峰, 等. 液体火箭发动机地面试车过程的实时故障检测方法研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1660-1663.
- [12] 谢廷峰, 刘洪刚, 黄强, 等. 液体火箭发动机故障检测与诊断的反向选择算法[J]. 推进技术, 2009, 30(3): 337-341.
- [13] 黄强. 基于云 - 神经网络的液体火箭发动机故障检测方法[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(1): 11-15.
- [14] 窦唯, 刘占生. 液体火箭发动机涡轮泵故障诊断的新方法[J]. 推进技术, 2011, 32(2): 266-270.
- [15] 谢廷峰, 刘洪刚, 吴建军. 液体火箭发动机分布式健康监控系统的分析与设计[J]. 火箭推进, 2004, 30(3): 7-12.
- [16] 刘洪刚, 谢廷峰, 丁伟程, 等. 液体火箭发动机实时故障检测与报警原型系统的设计与实现[J]. 火箭推进, 2005, 31(4): 21-25.
- [17] 刘洪刚, 谢廷峰, 黄强, 等. 液体火箭发动机地面试车实时故障检测与报警系统[J]. 导弹与航天运载技术, 2008(1): 49-52.

(编辑: 王建喜)

(上接第 23 页)

- [6] MROZINSKI D P, HAYES J R. Numerical and experimental analysis of a hypersonic variable geometry inlet, AIAA-1999-899[R]. USA: AIAA, 1999.
- [7] 李航, 李博. 二元高超声速进气道的内压段设计[J]. 航空动力学报, 2013, 28(6): 96-102.
- [8] 袁化成, 滕健, 郭荣伟. 内收缩比可控的二元高超声速变几何进气道研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(11): 73-79.
- [9] HENDERSON L K. Maximum total pressure recovery across a system of shock waves[J]. AIAA Journal, 1964, 2(6): 1138-1140.
- [10] HEISER W H, PRATT D T, DELEY D H, et al. Hypersonic airbreathing propulsion[M]. Washington, D C: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 1994.
- [11] SMART M K. Optimization of two-dimensional scramjet inlets[J]. Journal of Aircraft, 1999, 36(2): 430-433.
- [12] SMART M K, TREXLER C A. Mach 4 performance of a fixed-geometry hypersonic inlet with rectangular-to-elliptical shape transition, AIAA 2003-0012 [R]. USA: AIAA, 2003.

(编辑: 王建喜)