DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.1999.05.033
1999年 10月 北京航空航天大学学报 October 1999
第25卷 第5期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.25 No.5

液发推力室和涡轮泵故障监测与诊断技术研究[1)]

杨尔辅 张振鹏 崔定军
(北京航空航天大学 宇航学院)

摘 要 研究了液发推力室和涡轮泵故障监测与诊断技术,介绍了取得的主要研究成果,内容包括:试车结果统计与故障特性分析、故障模式与影响分析、故障数据库的设计与实现、状态分类与特征分析等.此外也介绍了基于人工神经网络理论的动态过程监测与诊断算法、基于时序分析的稳态过程监测与诊断算法和基于频谱方法的事后故障分析与诊断等故障监测与诊断算法.最后,介绍了所研制的工程应用系统,并给出了具体的故障监测与诊断实例.

关键词 液体推进剂火箭发动机; 故障检测; 故障诊断; 故障数据库
分类号 V 430

在航天飞行史上,由于推进系统故障而导致的重大失败次数占总失败次数的50%以上.随着航天技术的发展,对推进系统(如液体火箭发动机,简称液发)的可靠性要求越来越高[1].研究表明,液发系统的故障主要发生在推力室和涡轮泵系统.国内对液发推力室和涡轮泵系统故障监测与诊断技术的首次研究得到了国家"八六三"项目的大力支持,经过2年多时间的努力,完成了拟定的全部研究内容,已通过国家"八六三"专家组的验收.本文针对液发推力室和涡轮泵故障监测与诊断技术的研究情况,简单介绍在该技术的研究中所采用的技术路线、研究方法和取得的主要研究成果.

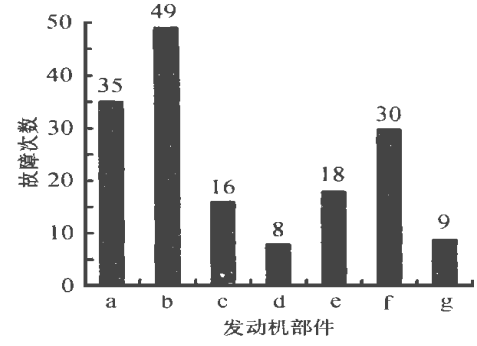
1 试车结果统计与故障特性分析

本研究选择我国21种泵压式液发型号(如:YF-21、YF-75等),首次完成了推力室和涡轮泵系统的试车结果统计与故障特性分析工作,如图1~图3所示.在已经发生的故障中,推力室占35次,涡轮泵占49次,两者相加占发动机总故障的50.91%.研究表明,推力室和涡轮泵系统故障具有如下的特性:

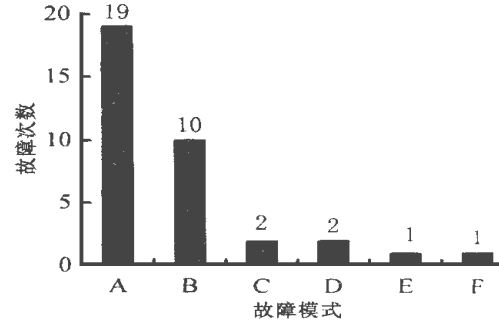
1) 故障多为瞬变的、突发的;

2) 推力室和涡轮泵的故障大多会对系统产生灾难性后果.

因此,加强和完善对推力室和涡轮泵的故障监测与诊断手段,势在必行.



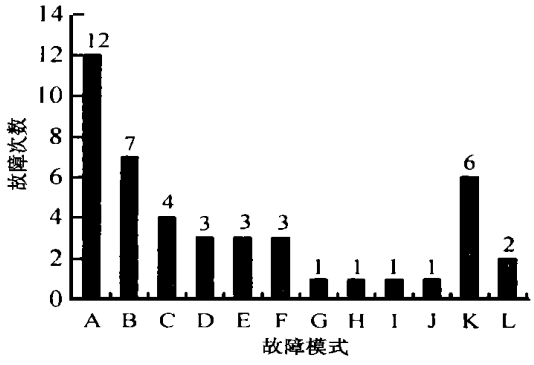
a—推力室;b—涡轮泵;c—自动器;d—发生器;
e—密封件;f—管路;g—其它
图1 发动机试车部件故障次数统计



A—裂纹、撕裂、断裂;B—烧蚀;C—泄露;
D—爆炸; E—高频不稳定燃烧;F—喷管内壁失稳
图2 推力室各故障模式故障次数统计

收稿日期:1998-04-20 第一作者 男 28岁 博士生 100083 北京
1) 国家"八六三"高技术计划资助项目

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.c



A—断裂;B—泵爆炸;C—烧蚀;D—磨损;E—卡死;
F—叶片脱落;G—转速低;H—起火;I—叶冠脱落;
J—氢泵损坏;K—端面密封失效;L—轴承损坏

图3 涡轮泵各故障模式故障次数统计

2 故障模式与影响分析

研究中主要对以下类型的故障模式进行了故障模式与影响分析(FMEA)工作.

对推力室的工作包括:

1) 焊缝裂纹或撕裂;

2) 推力室喉部烧蚀;

3) 不稳定燃烧;

4) 推力室爆炸等.

对涡轮泵系统的工作包括:

1) 端面密封失效;

2) 转子叶片断裂;

3) 泵诱导轮断裂;

4) 涡轮进气导管破裂;

5) 轴承损坏;

6) 泵气蚀;

7) 涡轮叶冠脱落等.

推力室和涡轮泵系统的故障模式重要性排队如表1所示.

表1 我国液发推力室和涡轮泵故障模式排队结果

排序	部 件	故障模式
1	推力室、涡轮泵	裂纹、撕裂、断裂
2	推力室、涡轮泵	烧蚀
3	推力室	泄漏
4	涡轮泵	磨蚀
5	推力室、涡轮泵	爆炸
6	涡轮泵	堵塞、卡死
7	推力室	不稳定燃烧
8	涡轮泵	叶片脱落
9	涡轮泵	转速降低

3 故障数据库的设计与实现

建立完善的故障数据库是开展液发推力室和涡轮泵故障监测与诊断技术的重要基础,本研究基于中文Windows95操作平台,采用Visual FoxPro3.0数据库开发工具,建立了较为完善的推力室和涡轮泵系统故障数据库系统,其应用方面主要是:

1) 进行故障数据管理;

2) 事后故障分析和定位;

3) 和其他数据库一起配合使用,完成液发系统的故障监测与诊断任务.

数据库所具有的主要功能有:

1) 检索;

2) 浏览;

3) 输入、插入、修改;

4) 重要性排队;

5) 监测参数推荐;

6) 数据收集;

7) 报表生成等.

4 状态分类与特征分析

本研究对适合推力室和涡轮泵系统的状态分类、特征分析、特征量的选择以及监测与诊断参数的选择方法进行了系统的研究,其主要研究内容包括:

1) 特征分析与特征量选择

研究了第一性和第二性状态特征信息的表征以及它们之间的信息转换关系.从时域和频域2个方面研究了特征量的选择问题,特征频率 ω_N 及对应的功率谱密度 $S_x(\omega_N)$ 可作为频域特征量;时域的特征量包括时域模型参数 φ_j、时域模型残差方差 σ_a^2、用时域模型参数 φ_j 及残差方差 σ_a^2 构造的判别距离值等.

2) 状态分类方法[2]

① 几何距离分类方法.包括:自回归参数 φ_i 构造的距离判别函数、降维距离判别函数、残差偏移距离判别函数等;

② 信息距离分类方法.主要是基于信息论的Kullback-Leibler信息距离判别函数(简称DKL函数).

③ 监测与诊断参数选择研究.研究了参数选择的一般方法,并针对YF-75发动机给出了具体的监测与诊断参数组成,其中一级参数包括主燃烧室压力等12个参数,二级参数包括燃烧室氧喷前压力等13个参数.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.c

5　故障监测与诊断算法研究

5.1　基于人工神经网络理论的动态过程监测与诊断算法

根据动态过程的特点和在研制推力室和涡轮泵系统实时故障监测与诊断工程应用系统上的特殊困难,本研究基于人工神经网络理论,研究了神经网络在推力室和涡轮泵系统动态过程监测与诊断中的应用,尤其是很好地解决了推力室和涡轮泵系统启动过程的故障监测与诊断问题[3,4].

在具体应用中,分别建立了推力室和涡轮泵以及发动机系统的人工神经网络理论模型,再构造基于如前所述的状态分类与特征分析方法,将推力室和涡轮泵系统众多的输出参数归结到少数几个 DKL 判别函数上.为了提高故障监测与诊断的准确性和降低系统的虚警率,采用了 2 个诊断准则,即阈值准则和连续准则.

5.2　基于时序分析的稳态过程监测与诊断算法

本研究在大数定律极其推论的基础上,提出了一种基于 AR(Auto-Regressive)模型的推进系统故障监测实时快速自适应算法,简称 RFA 算法,解决了传统运用时序分析方法进行故障监测与诊断时参考模型的实时建立问题[5,6].实际应用结果表明,该算法不仅实时快速,而且稳定可靠,可以有效地用于推力室和涡轮泵系统故障的自适应监测与诊断.

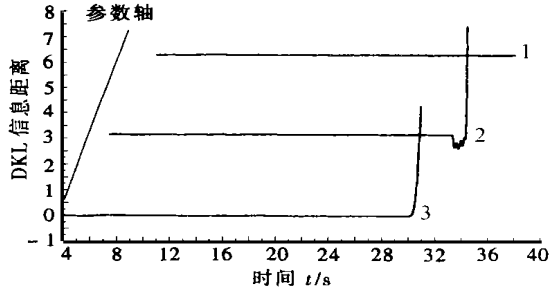
5.3　基于频谱方法的事后故障分析与诊断

频谱分析方法在推力室和涡轮泵故障监测与诊断中是一项行之有效的技术,通过频谱分析,可以获得较为准确的推力室和涡轮泵技术状态的频域特征,从而为研究先进的故障监测与诊断算法与研制工程应用系统打下必要的技术基础.本研究基于频谱分析方法(包括传统的 FFT 频谱方法和 AR 现代谱方法),进行推力室和涡轮泵故障尤其是振动故障信号的分析与诊断工作,研究表明,FFT 频谱方法主要用在推力室和涡轮泵事后故障的分析与诊断中;AR 现代谱方法则比较适合于实时的故障监测与诊断应用.此外,本研究还特别给出了涡轮泵系统振动故障的频谱分析结果.

6　工程应用系统

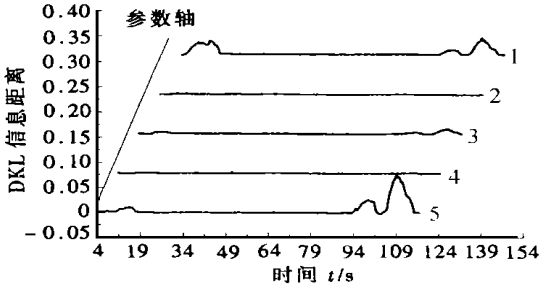
本研究也完成了一个“推力室和涡轮泵故障监测与诊断的工程应用系统”,目的在于进一步将其应用到地面试车实时监测和事后故障分析中去.根据实时性、有效性、可靠性、开放性与通用性的系统设计原则,系统具备的主要功能为:①实时监测推力室和涡轮泵的工作状态;②实时进行异常和故障报警,并能实时显示各级系统信息;③故障时重要参数当前数值屏幕显示及报警;④实时故障诊断功能;⑤监控系统数据传输自我诊断能力,不对发动机原测量系统造成任何影响;⑥试车过程、监测参数、系统状态信息及其他系统有关参数自动记录功能等.

系统结构由 3 级组成,即参数级、部件级和系统级.故障监测与诊断系统与发动机原测量系统之间的数据传输通过专用的数据接口和专用的系统数据通信协议完成,传输可靠,不对原测量系统造成任何影响.本研究选择了 YF-75 发动机以往 10 次地面试车情况(其中 7 次正常,3 次含有故障或异常情况),完全根据原始试车数据,按照实际试车的情况,采用一台 Pentium 586/133 微机模拟测量系统计算机(上位机)以一定的周期发送原始试车数据,另一台 Pentium 586/133 微机做监控计算机(下位机),接收从上位机传来的数据,对推力室和涡轮泵故障监测与诊断工程应用系统的有效性进行验证,选择连续准则为 3 次,阈值为 0.2,验证系统的总有效率在 90%以上.图 4 为氢涡轮泵诱导轮断裂故障发生时系统的一个应用实例,图 5 则为正常时系统的工作情况.



1—燃烧室压力;2—氢涡轮泵转速;3—氧涡轮泵转速

图 4　实例 1:氢涡轮泵诱导轮断裂故障



1—燃烧室压力;2—氢涡轮泵转速;3—氧涡轮泵转速
4—氢涡轮泵出口压力;5—氧涡轮泵出口压力

图 5　实例 2:正常试车

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.c

7 结束语

液发推力室和涡轮泵故障监测与诊断技术的研究具有十分重要的意义,本文简要介绍了该技术研究的情况和取得的一些主要研究成果,为我国对该项技术的进一步研究做了一些必要的工作,并对工程应用系统的具体实现进行了大胆的尝试.

参考文献

1 杨尔辅,张振鹏,刘国球,等.YF-75发动机状态监控与故障诊断工程应用系统的研制.推进技术,1997,18(1):65～72

2 黄 仁,钟秉林.机械制造过程的工况监视与故障诊断.西安:西安交通大学出版社,1991

3 Yang Erfu, Zhang Zhenpeng, Liu Guoqiu. A real-time dynamics model for condition monitoring based on neural networks. In: third Pacific International Conference on Aerospace Science and Technology (PICAST '3) Conference Proceedings. Shanxi: Shanxi Science and Technology Publishing House, 1997. 324～331

4 Yang Erfu, Zhang Zhenpeng, Liu Guoqiu, *et al*. A real-time system for condition monitoring of propulsion system using BP-ART hybrid neural networks. In: Gong Yaonan, ed. Proceedings of the second Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science. 1997. 410～415

5 Yang Erfu, Zhang Zhenpeng, Cui Dingjun, *et al*. A real-time fast adaptive algorithm for propulsion system failure detection based on AR model. AIAA ST-96-W. 2.09, 1996

6 杨叔子,吴 雅,王治藩,等.时间序列分析的工程应用.武汉:华中理工大学出版社,1992

Study on Fault Monitoring and Diagnosis Techniques for Thrust Chamber and Turbo-pump Systems of Liquid Rocket Engines

Yang Erfu Zhang Zhenpeng Cui Dingjun

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, School of Astronautics)

Abstract It is shown that most of the failures of liquid propellant rocket engines pressured by turbo-pump systems take place at thrust chamber and turbo-pump systems. A brief introduction to the study on fault monitoring and diagnosis techniques for thrust chamber and turbo-pump systems of liquid propellant rocket engines has been made. The main contents are faults statistics and property analysis of fire-tests results, failure modes and effect analysis, the design and realization of failure database system, condition classifiers and character analysis, and so on. In addition, several algorithms for fault monitoring and diagnosis are also included. Finally, an engineering application system for fault monitoring and diagnosis of thrust chamber and turbo-pump systems is demonstrated and some application samples are also illustrated.

Key words liquid propellant rocket engine; fault detection; fault diagnosis; failure database system

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.c