

文章编号: 1000-8055(2004) 05-0718-06

空间推进系统故障诊断专家系统研究

张纯良^{1,2}, 张振鹏¹, 杨尔辅¹, 张家峰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: 采用人工智能的方法, 对空间推进系统进行了有效的分区, 并利用文中介绍的组合红线算法进行故障判定, 建立了空间推进系统故障诊断的专家系统。通过已有的实验数据、离线回放表明此方法具有实时故障诊断、事后故障分析、系统健康监控等功能、可以有效的满足解决工程实际问题的需要。

关键词: 航空、航天推进系统; 空间推进; 故障诊断; 专家系统; 门限算法

中图分类号: V430

文献标识码: A

Research on Fault Diagnoses Expert System of Space Propulsion System

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

YANG Er-fu¹, ZHANG Jia-feng²

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

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

Abstract: Based on artificial intelligence, the combined red-line algorithm is adopted to pick up fault symptoms. The fault diagnostic expert system for space propulsion system was established. The existing experimental data and off-line data display prove that this expert system is effective in real-time fault diagnosis, post flight fault analysis and healthy monitoring, and it can be used in solving engineering problems.

Key words: aerospace propulsion system; space propulsion; fault diagnoses; expert system; red-line arithmetic

由小推力发动机组成的空间推进系统大量应用于各种空间飞行器中, 它对于飞行任务的完成是至关重要的。特别是对于载人飞船, 空间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健康监控^[1]。

人工智能技术是一门迅速发展起来边沿学

科, 它是人类 20 世纪的重大科技发现。专家系统 (Expert System 简记 ES), 也称为基于知识的系统, 是人工智能的一个最为活跃、最为重要的应用领域^[2]。利用人工智能的先进成果——专家系统 (ES), 研究空间推进系统故障诊断技术, 就是希望能够利用计算机和自动化技术来代替领域专家对空间推进系统运行状态进行长期有效的监控, 以提高空间推进系统的可靠性。同时, 空间推进系

收稿日期: 2003-10-20; 修订日期: 2004-02-26

作者简介: 张纯良 (1967-), 男, 安徽涡阳人, 北京航空航天大学宇航学院副教授, 博士后, 主要从事液体火箭发动机故障检测与诊断、太阳火箭发动机研究。

统故障检测与诊断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价值。

1 推进系统工作模态及相应检测参数分类

本空间推进系统采用的是“挤压式”双组元推进系统, 它有管路、高压气源、推进剂储箱、28 个

发动机和各种控制阀等组成, 原理结构如图 1 所示^[3]。其在空间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现象的发生。

此推进系统采用双冗余结构, 左右两部分相互独立, 但可相互替换、互为热备份, 只是单路所带推进剂不足以完成全部飞行任务。所以全系统并不具有冗余功能, 因此对此推进系统进行健康监控更为必要。本推进系统地面试车时, 测量参数

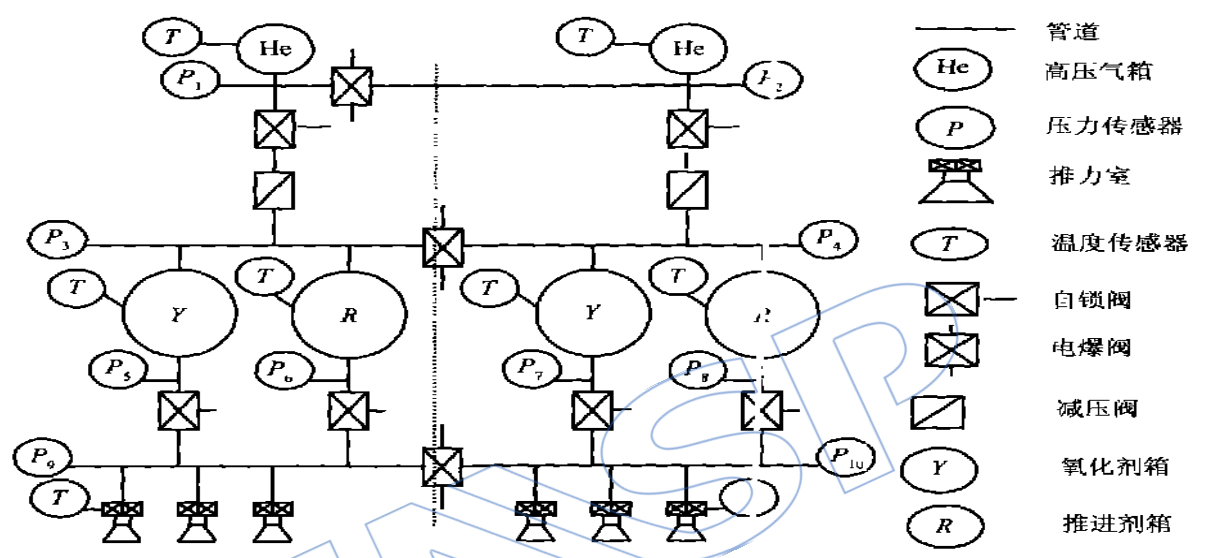


图 1 空间推进系统结构示意图

Fig. 1 Principle picture of space propulsion system

表 1 实时监测参数及位置

Table 1 Real-time parameter and location

序号	符号	位置(功能区)	序号	符号	符号位置(功能区)
1	PT_{t1}	主路高压气源(1, 3)	14	PT_{t14}	4 号轨控发动机氧化剂进口(12)
2	PT_{t2}	副路高压气源(2, 4)	15	PT_{t15}	1 号轨控发动机还原剂进口(11)
3	PT_{t3}	主路减压阀入口(5)	16	PT_{t16}	2 号轨控发动机还原剂进口(12)
4	PT_{t4}	副路减压阀入口(6)	17	PT_{t17}	3 号轨控发动机还原剂进口(11)
5	PT_{t5}	主路减压阀出口(7)	18	PT_{t18}	4 号轨控发动机还原剂进口(12)
6	PT_{t6}	副路减压阀出口(8)	19	PT_{t19}	主路姿控质心发动机氧化剂进口(13)
7	PT_{t7}	主路推进剂箱出口(9)	20	PT_{t20}	副路姿控质心发动机氧化剂进口(14)
8	PT_{t8}	副路推进剂箱出口(10)	21	PT_{t21}	主路姿控尾部发动机氧化剂进口(13)
9	PT_{t9}	主路氧化剂箱出口(9)	22	PT_{t22}	主路姿控尾部发动机氧化剂进口(14)
10	PT_{t10}	副路氧化剂箱出口(10)	23	PT_{t23}	主路姿控质心发动机还原剂进口(13)
11	PT_{t11}	1 号轨控发动机氧化剂进口(11)	24	PT_{t24}	副路姿控质心发动机还原剂进口(14)
12	PT_{t12}	2 号轨控发动机氧化剂进口(12)	25	PT_{t25}	主路姿控尾部发动机还原剂进口(13)
13	PT_{t13}	3 号轨控发动机氧化剂进口(11)	26	PT_{t26}	副路姿控尾部发动机还原剂进口(14)

较多,全系统检测参数共 82 个。故障诊断专家系统对检测的参数实现了分级,第一级:实时压力监测参数 26 个,如表 1 所示;第二级:辅助监测参数 16 个,它们是推进剂储箱静压参数 8 个、储箱膜片压差参数 4 个;第三级:备份监测参数 40 个,它们是轨控发动机室压 4 个、B 类姿控发动机室压 8 个、c 类姿控发动机室压 16 个、温度监测参数 12 个。本故障诊断专家系统立足于地面试车,同时考虑到空间飞行的需要,所以主要检测第一级的 26 个压力监测参数。

2 故障诊断专家系统的设计

2.1 推进系统的功能分区

系统分区是故障分层、故障判断、源发故障定位、故障有效隔离的前提条件。系统分区过“粗”不利于发现故障源和有效隔离;而分区过“细”则故障模式过多,故障判据不明确,故障诊断过于复杂,也不利于系统的有效监控。所以系统分区必须综合考虑、全面分析,本次为故障定位而进行的系统分区遵循以下原则:

- (1) 可以提取出故障判据及算法;
- (2) 各区有实用的故障对策;
- (3) 各区的总和包含空间推进系统的全部;
- (4) 各区有明显的对应关系。

遵循以上原则,针对推进系统的实际情况,考虑到地面试验站的参数检测和应用情况,对系统总共分为 14 个监测区:(1)主路高压气源区;(2)副路高压气源区;(3)主气路电爆阀;(4)副气路电爆阀;(5)主气路减压阀;(6)副气路减压阀;(7)主气路减压阀后气路部分;(8)副气路减压阀后气路

部分;(9)主路推进剂储箱和推进剂电磁阀之间部分;(10)副路推进剂储箱和推进剂电磁阀之间部分;(11)主路推进剂电磁阀和轨控发动机之间部分;(12)副路推进剂电磁阀和轨控发动机之间部分;(13)主路推进剂电磁阀和姿控发动机之间部分;(14)副路推进剂电磁阀和姿控发动机之间部分。各区的实时检测参数如表 1 所示。

2.2 推进系统的故障模式、影响及致命性分析

开展故障模式、影响及致命性分析(FMECA)对本课题研究来说,是为了获取建造专家系统所必须的基础知识,并结合领域专家的经验知识,就可以构造比较完善的推进系统故障诊断专家系统知识库。这一工作在故障诊断专家系统研制中是至关重要的,因为各种客观条件的限制,人们往往无法获取推进系统更深层次的知识,深入进行推进系统的故障模式与影响分析工作就成了获取知识的主要途径之一。这种分析方法,实际上是由:故障模式分析,故障影响分析和危害性分析三个部分组成。通过走访空间推进系统的研究、生产、试验等单位,结合人工智能领域中知识获取与表示方法,可以得出此系统的 FMECA 结果—20 种故障模式。根据工程应用的实际要求,考虑故障发生的几率及危害性,最后进行筛选优化、归纳出需要实时检测的 8 种故障模式,如表 2 所示。

2.3 功能区故障判定

故障判定是故障诊断的关键,因此针对不同的系统、不同的情况,先后有大量故障判据研究成果出现,国内外大量的文献对此进行了报道^[4]。

表 2 空间推进系统 FMECA 优化结果

Table 2 Optimum result of FMECA to space propulsion system

序号	故障模式	影响范围	影响后果
F1	主路高压自锁阀没打开	推进全系统	提前结束飞行任务甚至飞船爆毁
F2	副路高压自锁阀没打开		
F3	主路减压阀出口超压		
F4	副路减压阀出口超压		
F5	主路姿控自锁阀后推进剂泄漏		
F6	副路姿控自锁阀后推进剂泄漏		
F7	主气路漏气		
F8	副气路漏气		

综合各种算法的优缺点, 根据空间飞行器总体规划 and 故障模式“简化”、建议对策“简练”、处理程序“实时、高效”等要求。本专家系统采用单参数“改进红线诊断算法”及多参数“复合红线诊断算法”相结合的组合红线诊断算法, 此种方法具有判据简单, 实时性强, 实用性好等优点。

2. 3. 1 单参数“改进红线诊断算法”

当某一功能区的压力检测参数只有一个时, 有多种故障算法可供选择, 如第 1 功能区。

故障模式: 气体泄漏

监测参数: $PTt1$

故障判据:

(1) 当被控对象的输入 $I(t)$ 和输出 $O(t)$ 在正常范围内变动: $I_{\min}(t) < I(t) < I_{\max}(t)$, $O_{\min}(t) < O(t) < O_{\max}(t)$ 时, 认为系统工作正常, 否则、输出 $O(t)$ 超出正常范围时, 即为故障现象出现。

(2) 监测参数输出的平均值在正常范围, 即 $\bar{O}_{\min}(t) < \bar{O}(t) < \bar{O}_{\max}(t)$ 时, 认为系统工作正常。否则、认为系统出现故障。

(3) 监测参数输出的波动值在正常范围, 即 $\Delta O_{\min}(t) < \Delta O(t) < \Delta O_{\max}(t)$, 认为系统工作正常。否则、认为系统出现故障。

2. 3. 2 多参数“复合红线诊断算法”

当某一功能区的压力监测参数有多个时(如有 4 个), 有多种故障算法可供选择, 如第 13 功能区。

故障模式: 推进剂泄漏

监测参数: $PTt19, PTt21, PTt23, PTt25$ 。

故障判据:

(1) 检测到的 4 个参数 ($PTt19, PTt21, PTt23, PTt25$) 值 $x_i (i= 1, 2, 3, 4)$, 小于正常值。

(2) 检测到的 4 个参数 ($PTt19, PTt21, PTt23, PTt25$) 值 $x_i (i= 1, 2, 3, 4)$, 总平均值 $\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_i$ 小于正常范围。

(3) 检测到的 4 个参数 ($PTt19, PTt21, PTt23, PTt25$) 波动值 $\Delta x_i (i= 1, 2, 3, 4)$, 总波动值 $\sum_{i=1}^4 \Delta x_i$ 超出正常范围。

(4) 检测到的 4 个参数中有 3 个小于正常范围。

$I_{\min}(t), I_{\max}(t), O_{\min}(t), O_{\max}(t), \bar{O}_{\min}(t), \bar{O}_{\max}(t), \Delta O_{\min}(t), \Delta O_{\max}(t)$ 及正常值、正常范围等为从领域专家那里提取的, 经过优化分析得到的特征参

数^[5]。

在对故障判据的使用上, 不同的判据具有不同的“决定权”, 有些判据具有“一票否决权”, 如多参数复合红线诊断算法中的判据(1), 当这种情况发生时, 即认为系统出现了故障; 而有些判据具有“建议权”, 如多参数复合红线诊断算法中的判据(3), 当这种情况发生时, 认为系统可能出现了故障, 要求对这一功能区重点监视。

2. 4 空间推进系统故障诊断专家系统的使用界面设计

任何一个专家系统的人机接口界面主要有两个部分, 一个是专家系统知识获取人机接口界面, 此接口在专家系统设计时使用, 主要完成专家系统知识获取、表示, 知识库建立等功能; 另一个是专家系统用户人机界面, 主要是为用户设计的, 目的是为了为了更好的让用户方便的使用专家系统。本故障诊断专家系统的人机接口界面主要是后一种, 主要包括: 软件安装界面、运行界面、主控界面、配置界面等。

运行界面是专家系统的运行主要界面, 分为仿真区、故障诊断控制区、状态控制区、显示区等, 主要完成故障部位显示、故障显示模式控制、故障相关参数调整等功能, 如图 2 所示^[6]。

2. 5 故障诊断专家系统的总体结构

基于知识的故障诊断专家系统有知识库、知识获取程序、数据库、推理机、解释程序、进程控制机制等组成。它利用人类专家的知识 and 经验、设备的工作过程知识、参数等来获取系统的知识并建立知识库。具有对知识库的修改和扩展灵活等优点^[7]。

故障诊断专家系统的整体结构框架如图 3 所示。它包括状态仿真模块及数据库、实时故障诊断模块及相关数据库、事后故障分析模块、故障推理模块及数据库、试车状态控制模块等。故障诊断专家系统与试车台原数据采集系统通过“数据传递接口”连接, 为了隔断专家系统对原试车系统的影响, 文中数据传递接口设计采用“单工”工作方式—即原试车台数据采集系统输出数据给故障诊断专家系统, 而故障诊断专家系统只接受不反向访问。

状态仿真模块通过对状态仿真数据库的访问, 可以实现推进系统的全方位仿真, 包括推进全系统工作状态(正常、故障) 仿真, 单个功能区工作状况的仿真, 故障级别仿真等。

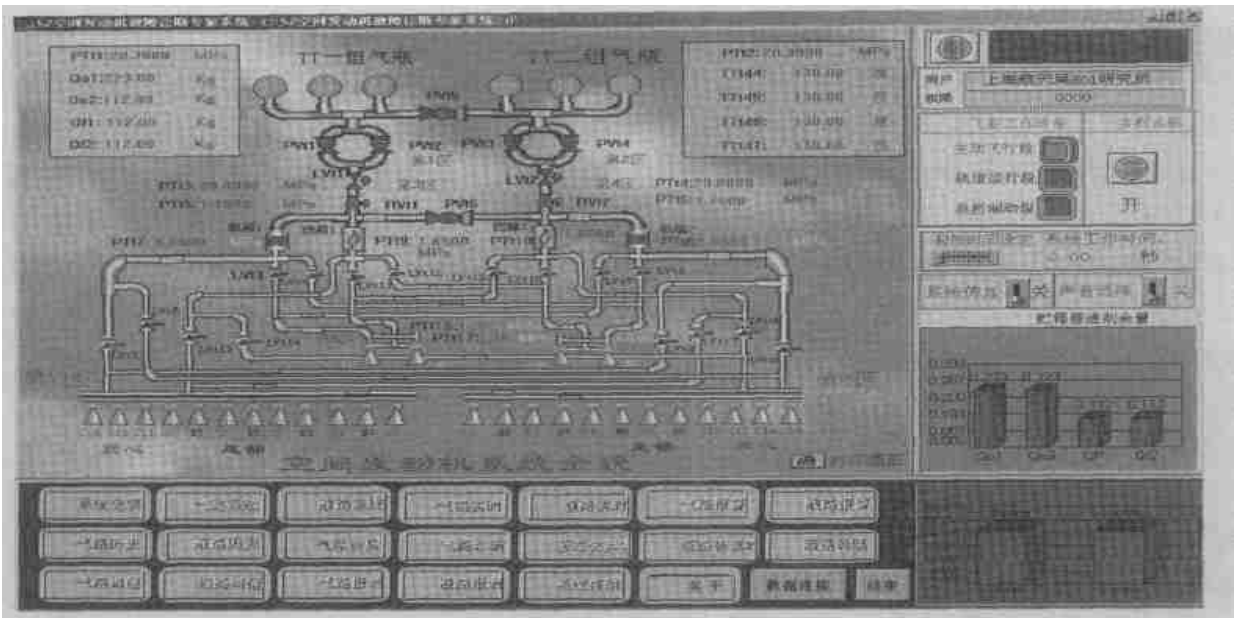


图 2 专家系统运行主界面

Fig.2 Main operation interface of expert system

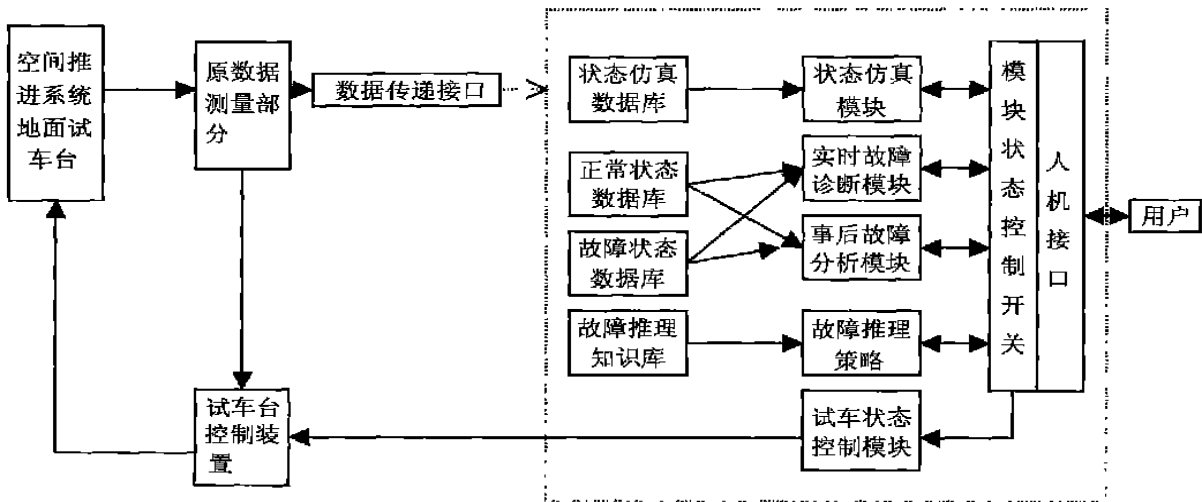


图 3 故障诊断专家系统结构图

Fig.3 The whole frame of diagnosis ES

实时故障诊断模块主要利用表 1 中的 26 个实时检测参数,利用组合红线算法对全系统及各功能区进行表 2 的 8 种故障的实时诊断,包括状态检测、故障确定、故障分级、可能引发的二次故障及影响后果等。

事后故障分析模块主要利用试车台提供的二级检测参数、参考一级和三级检测参数完成推进系统的其它不需要立即采取措施故障模式的诊断功能,诊断方式和实时诊断相似。

试车状态控制模块主要完成推进系统健康控制。此模块根据故障诊断模块的判断结果进行推

进系统的控制,采用三级控制方式。(1)系统某功能区出现状态变异、如管道内压力波动较大等,此类现象的发生不会影响推进系统的正常工作,但容易引发系统故障,对此类现象必须密切关注,故障诊断专家系统内设定为“提示”级故障;(2)专家系统发现推进系统内单区出现了故障现象,如管道内出现压力下降的趋势,此类故障不会立刻引发、但可能很快引发推进系统出现灾难性后果,对此类故障必须尽快进行诊断,故障诊断专家系统内设定为“报警”级故障,采用“红色”或“声音”两种方式报警;(3)系统出现了表 2 中的故障,此类

故障会很快引发系统部分功能区瘫痪或灾难性后果的发生,故障诊断专家系统内设定为“实时控制”级故障。当然是否使用试车台控制模块可根据情况而定。

故障推理模块主要完成源发性故障确定的功能,具体推理过程可以参考文献[8]。使用过程中根据具体情况可以利用“模块状态控制开关”打开一个或多个功能模块。

数据库是专家系统的关键,在设计数据库时,采用了标准化、智能化的设计思想。这样可以根据使用情况很容易的对数据库实现修改、增加、删除等功能,同时也易于专家系统版本的更新升级,本专家系统已从 1.0 版升级到 2.0 版^[6]。

3 结 论

应用文中介绍的方法,已开发出推进系统故障诊断专家系统。经过多种程序错误测试和进行的六次共 2 603 s, 224 200 个实测数据的离线回放,及各种模拟操作表明,本专家系统具有以下特点:

- (1) 使用本系统所提出的故障判据,没有发现有故障误检、故障漏检的情况,说明采用“组合红线算法”是可行的。
- (2) 本专家系统具有实时诊断、实时控制及事后数据分析的功能。
- (3) 故障诊断专家系统中,软件方面设定有错误防范、操作提示、帮助指导等功能,可以大大

减少系统瘫痪和误操作的可能性,专家系统具有很好的可靠性。

(4) 采用系统仿真技术,具有多媒体功能,视觉、听觉效果良好。

参考文献:

- [1] Benzing D A, Whitaker K W. SSME Condition Monitoring Using Neural Network and Plume Signatures[R]. *AIAA* 96 - 2824, July, 1996.
- [2] 吴波, 马玉祥. 专家系统(修订版)[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001.
- [3] 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.
- [4] Jeffrey L Musgrave, Ten-Huei Guo, Edmond Wong, Ahmet Duyar. Real-Time Accommodation of Actuator Fault on Reusable Rocket Engine[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1997, 5(1): 100- 104.
- [5] 张纯良, 张振鹏, 祝刚. 利用改进时序模型提取空间推进系统特征参数[J]. 推进技术, 2002, 23(6) 457- 459.
- [6] 杨尔辅, 张纯良, 张振鹏. 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[R]. 北京 航空航天大学宇航学院, 2000.
- [7] 张炜, 张玉祥, 黄先祥. 导弹推进剂加注设备实时智能诊断系统[J]. 推进技术, 2002, 23(6): 489- 491.
- [8] 张纯良, 张振鹏, 袁军娅, 等. 空间推进系统的故障推理研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(2): 255- 258.

ZHANG Chun-liang, ZHANG Zhen-peng, YUAN Jun-ya, et al. Investigation on Fault Reasoning for Power System Used in Space Vehicle[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2002, 17 (2): 255- 258.