

# 航空发动机滑油系统建模及测试性分析

张航源, 蔡景

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

**摘要:** 针对日常维修中滑油系统不易到达且重要度高的特点, 开展基于仿真模型的滑油系统测试性分析, 优化滑油系统诊断策略; 基于全流量单回路反向循环滑油系统的工作原理, 使用 AMESim 软件建立滑油系统的虚拟仿真模型, 并利用 Simulink 模型仿真结果验证所建 AMESim 模型的准确性, 误差在 3.5% 以内; 建立了滑油系统基本故障事件的贝叶斯网络, 分析滑油系统的五大故障模式, 用于确定滑油系统重要故障事件, 作为开展仿真模型故障注入研究的基础; 在模型中实现故障注入, 通过分析预置测试点参数的变化, 得到故障-测试相关性矩阵, 实现滑油系统测试性分析和优化, 优化后故障检测率提高了 16.7%, 故障隔离率提高了 40.0%; 可以利用测试性分析的结果, 优化滑油系统传感器布局设计, 为滑油系统的故障诊断提供支撑。

**关键词:** 滑油系统建模; AMESim; 贝叶斯网络; 测试性分析; 测试性指标; 故障-测试相关性矩阵

## Modeling and Testing Analysis of Aviation Engine Lubricating Oil System

ZHANG Hangyuan, CAI Jing

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Lubricating oil system has the characteristics of difficulty to reach and high importance in daily maintenance. Based on this, a test analysis of lubricating oil system based on a simulation model was conducted, and the diagnostic strategy of the lubricating oil system was optimized. Based on the working principle of the full-flow single-loop reverse circulation lubricating oil system, a virtual simulation model of the oil system was established by using AMESim software, and the accuracy of the built AMESim model was verified by using simulation results on Simulink model, with an error of within 3.5%. The Bayesian network with basic fault events of the lubricating oil system was established to analyze the five important fault modes of the lubricating oil system, which was used to determine important fault events of the lubricating oil system as the research basics on fault injection in simulation models. Fault injection was implemented in the model, and by analyzing the changes in preset test point parameters, the fault-test correlation matrix was obtained to achieve the test analysis and optimization of the lubricating oil system. After optimization, the fault detection rate was increased by 16.7%, and the fault isolation rate by 40.0%. The test results can be used to optimize the sensor layout design of the lubricating oil system and provide a support for fault diagnosis of the lubricating oil system.

**Keywords:** modeling of lubricating oil system; AMESim; Bayesian network; test analysis; test indicators; fault test correlation matrix

## 0 引言

航空发动机是飞机的动力来源, 其高压转子以每分钟数万转的速度旋转, 齿轮组和主轴轴承高速旋转, 在摩擦力作用下持续机械运转, 需要滑油系统来保证散热、清洗、润滑等功能<sup>[1]</sup>。一直以来, 滑油系统故障率较高, 不易维护, 又是十分重要的系统, 直接影响发动机的安全、可靠运行以及工作性能。据统计, 近年来我国 40% 的飞机停车事故和欧美国家 30% 的飞机发动机事故都是由于发动机滑油系统故障造成的<sup>[2]</sup>。此外, JT3D 的发动机提前故障概率为 20%, 因滑油系统引起的故障率为 38%; Convair 550 机型的发动机提前故障概率为 35%, 因滑油系统引起的故障率分别为 14%。因此, 研究航空发动机滑油系统的故障诊断具有重要意义。

滑油系统建模是航空发动机健康管理研究的重要内容, 其主要任务包括: 1) 开展滑油系统结构、工作原理的分析

研究; 2) 建立滑油系统性能监测和故障诊断的模型; 3) 完善滑油系统设计和实现实时监测; 4) 开展滑油系统故障诊断。一些发达国家早在 1950 年左右就已经开始具备滑油系统的总体设计技术, 其中许多本领域知名的研究机构也都具备专门的模拟仿真平台, 例如 NASA、GFSSP 等<sup>[3-4]</sup>。因为这类软件具有很高的涉密等级, 所以在我国内基本上没有使用权限。目前国内的学者对滑油系统的子系统进行了一定程度的研究。杨家旺等人<sup>[5]</sup>为了解决航空发动机滑油系统参数不易测量的问题, 利用 Flowmaster 仿真建模软件建立了供油系统的模型, 计算结果与实际结果误差在 10% 以内, 为日后国内滑油系统的研究和故障诊断具有十分重要的借鉴意义。

测试性是指产品可以快速而准确地检测自身状态, 并在发现内部故障时进行隔离的一种设计特性<sup>[6]</sup>。测试性起源于航空电子领域, 随着技术的不断进步, 可以逐步应用

收稿日期: 2023-11-11; 修回日期: 2023-12-11。

作者简介: 张航源(2001-), 男, 硕士研究生。

引用格式: 张航源, 蔡景. 航空发动机滑油系统建模及测试性分析[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 43-49.

于航空航天领域一些十分重要的系统<sup>[7]</sup>。例如, Thompson 等人<sup>[8]</sup>在信息流模型的基础上,探讨了其在故障诊断方面的应用。马瑞萍等人<sup>[9]</sup>提出了一种测试性分析方法,用于有效检测系统测试中的不可测故障、冗余测试项和模糊故障组等。该方法与模型相结合,通过  $D$  矩阵,可以在短时间内得出准确的测试结果,提高测试效率,有助于满足系统严格的性能要求。另一方面,文昌俊等人<sup>[10]</sup>通过总结测试性分析方法,开发了基于  $D$  矩阵的测试性分析系统,可以在注入单故障和多故障的情况下进行快速、准确的测试性分析。这些研究成果和应用案例为航空领域的发展和應用提供了宝贵的经验和技术支持。

目前业内并未将测试性分析方法应用于航空发动机滑油系统的故障诊断中,本文将基于滑油系统 AMESim 模型对其进行测试性分析,并根据分析结果优化传感器的布局设计,为滑油系统的故障诊断提供支撑。

## 1 航空发动机滑油系统建模

### 1.1 模型的建立

滑油系统零部件众多,结构复杂,因此在建模的过程中需要做一定程度的简化。首先忽略外部环境温度以及飞机飞行姿态对滑油系统内部的影响。其次,忽略滑油在管路中由于惯性而造成的损失。此外,忽略滑油在流动过程中的蒸发与部件接口处的微小泄漏,因为这些损失量相对于总滑油流量是很小的。最后,不考虑管道的微小弯曲,只考虑角度大于  $30^\circ$  时的流动阻力。这些简化可以在保证精度基本不受影响的情况下建模更加方便,且大大提高运算效率<sup>[11]</sup>。

设置滑油箱出口温度为  $122.1^\circ\text{C}$ ,滑油箱压力为  $0.05\text{ MPa}$ ,前轴承腔压力为  $145.1\text{ MPa}$ ,中轴承腔压力为  $174.8\text{ MPa}$ ,后轴承腔压力为  $171.6\text{ MPa}$ ,齿轮箱压力为  $145.1\text{ MPa}$ ,各轴承腔滑油喷嘴出口压力为  $0.05\text{ MPa}$ ,供油泵旁通活门压力阈值为  $2\text{ MPa}$ ,其他旁通活门的压力阈值为  $1\text{ MPa}$ 。

在构建 AMESim 模型时,应按照实际航空发动机滑油系统结构进行建模。首先需要进入草图模式,在元件库中选择适当的元件,并将其拖放到画面区域中,构建零件模型。然后进入子模型模式,对元件进行子模型设置。接下来,进入参数模式,对模型元件进行参数赋值和全局参数设置。最后,进入运行模式进行标准化仿真和批处理运行。通过以上步骤,我们可以建立一个符合实际航空发动机滑油系统特点的完整 AMESim 模型。

在 AMESim 中,有多个元件库可供使用。因本文需要考虑滑油的温度,流量和压力特性,故采用热液压库和机械库中的部件来进行仿真建模。

本文中主要关注油滤的压力参数,因此可以使用 AMESim 中的流阻材料来进行等效代替。这种方法可以简化模型的建立,并能够准确地模拟油滤器产生的压力降。常见的油滤器采用滤芯过滤方式,其复杂的结构在建模和仿真时会增加难度。相比之下,使用节流孔代替滤芯可以

减少该模型结构的复杂性,并且可以精确计算油滤器的压力降。TFORF0 是对称固定孔口的子模型,如图,在每个端口处输入压力,并计算在这两个端口处输出流量。本文采用压降定义法 ( $Q/dP$ ) 来设置节流孔的参数,即用户提供流速 ( $\text{L}/\text{min}$ ) 和相应的压降 ( $\text{Pa}$ ),其流阻特性如图 1 所示。

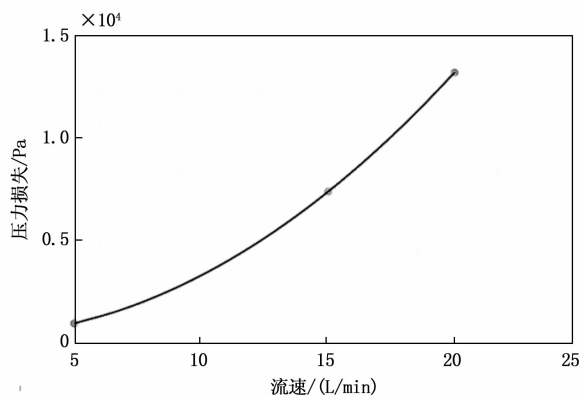


图 1 油滤流阻特性

AMESim 会在两个元件之间自动分配管路模型,用户也可依据实际需要手动调整管路的子模型。由于本文忽略了外部环境温度对滑油系统的影响,所以在 AMESim 中对管路模型进行了简化,忽略管道换热特性与局部压力损失,只考虑管道的收缩扩张以及与滑油与管壁的摩擦损失。

根据滑油系统的工作原理图以及各部件及管路的实际参数,使用 AMESim 中的网络元件模拟真实的元件,建立该全流量单回路反向循环滑油系统的 AMESim 模型,如图 2 所示。

### 1.2 模型的验证

在 AMESim 中,经过模型的搭建和参数设置后,需要对模型进行验证和准确性分析。为此,可以使用实验数据或其他验证手段进行比对验证。比如,可以利用实验数据对模型的输出结果进行比对,通过调整模型参数来提高模型的准确度。此外,还可以使用其他仿真软件或理论手段来验证模型的准确性。本文采用的方法是对比相同边界条件及工况下 Simulink 模型计算结果与 AMESim 模型仿真结果,以验证模型的准确性,误差在  $3.5\%$  以内,如表 1 所示。

表 1 仿真结果对比

输出参数	AMESim 模型仿真结果	Simulink 模型计算结果	相对误差 /%
滑油总供油量/(L/min)	48.5	48.49	0.02
供油泵后压力/MPa	0.55	0.55	0
前轴承腔供油量/(L/min)	24.3	25.0	-2.8
中轴承腔供油量/(L/min)	3.1	3.2	-3.1
后轴承腔供油量/(L/min)	2.8	2.9	-3.45
齿轮箱供油量/(L/min)	17.2	17.4	-1.15
主供油路温度/ $^\circ\text{C}$	133.7	133	0.53
主回油路温度/ $^\circ\text{C}$	157.1	155.6	0.96

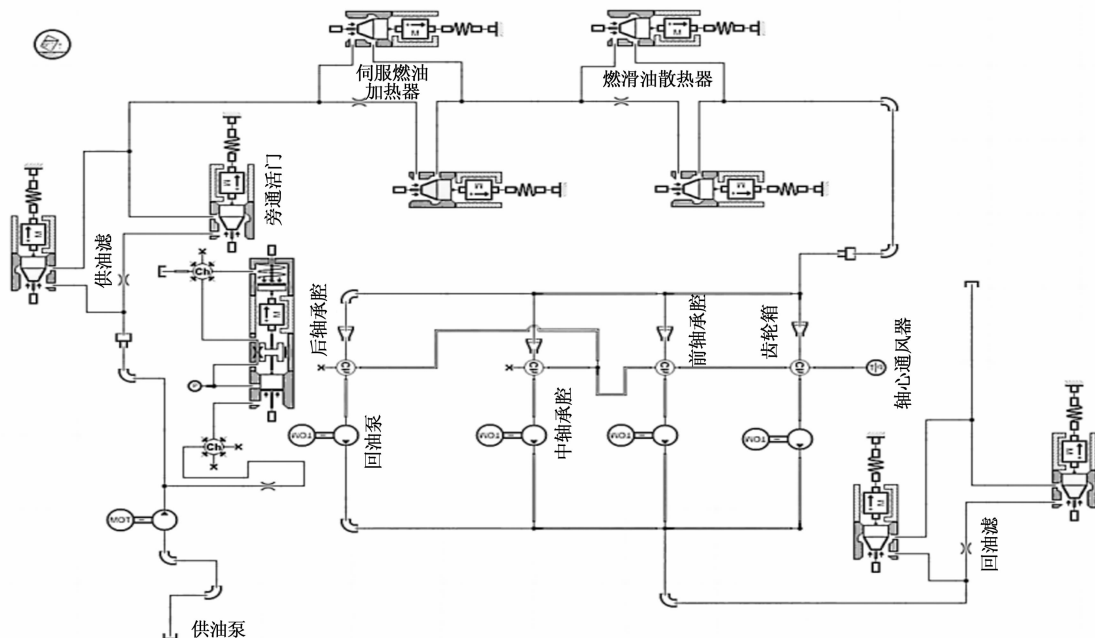


图 2 全流量单回路反向循环滑油系统的 AMESim 模型

## 2 滑油系统重要故障事件确定及注入研究

### 2.1 滑油系统典型故障的贝叶斯网络

结合航空公司相关资料, 根据该型航空发动机滑油系统原理、结构和故障分析, 找出可能导致 5 种典型故障事件: 大量滑油消耗、低滑油压力、高滑油压力、异常滑油温度和滑油污染<sup>[12]</sup>。在事件之间建立有向边, 绘制出滑油系统故障的贝叶斯网络, 具体见图 3。图中节点所对应的事件如表 2 所示。

### 2.2 贝叶斯网络的求解

在构建故障贝叶斯网络时, 我们需要考虑基本事件、中间事件和顶事件之间的因果关系, 并分别赋予它们先验概率和条件概率<sup>[13]</sup>。

首先, 各个节点的概率分布可以帮助我们计算在不同条件下故障事件的概率, 以便采取相应的措施来预防或解决故障事件。同时, 我们也可以通过观察实际事件的发生情况, 不断更新贝叶斯网络的参数, 从而提高预测和决策的准确性和可靠性。

然后, 将各节点的概率分布表输入至 GeNIe 中, 分别计算在各故障模式发生的情况下各个故障事件的发生概率, 如图 4 所示。

最后, 计算各个事件的重要度。根据计算结果, 引发滑油系统故障的重要事件的排序如下: 燃滑油散热器泄漏、泵轴断裂、伺服燃油加热器泄漏、油气分离器损坏、燃滑油散热器堵塞、供油滤堵塞、回油滤堵塞。

### 2.3 重要故障事件注入

在 2.2 节中, 我们筛选出了滑油系统的主要故障事件, 例如泵轴断裂、油气分离器损

坏等。这些故障会发生在滑油系统不同位置处, 对滑油系统造成不同程度的伤害。一般而言, 滑油系统同时出现多种故障的概率很小, 所以我们所提出的故障模型只针对单一故障<sup>[14]</sup>。除此之外, 本文通过测试点的传感器数据来进行故障诊断, 也就是通过故障对测试点产生的影响来判断故障的原因。因此, 故障的选择会受到测试点的参数限制。

根据对滑油系统的定性分析可知, 赋予部件特征参数的改变量, 即可实现一些故障的模拟, 部件特征参数的调整要依据滑油系统大量的实际故障数据, 由于相关资料的不足, 本文只根据现有的数据与实际经验来设定参数的调整量, 各种故障特征参数的改变量如表 3 所示, 泵轴断裂、油气分离器损坏、燃滑油散热器滑油路堵塞和泄漏的故障注入结果, 如图 5~8 所示。

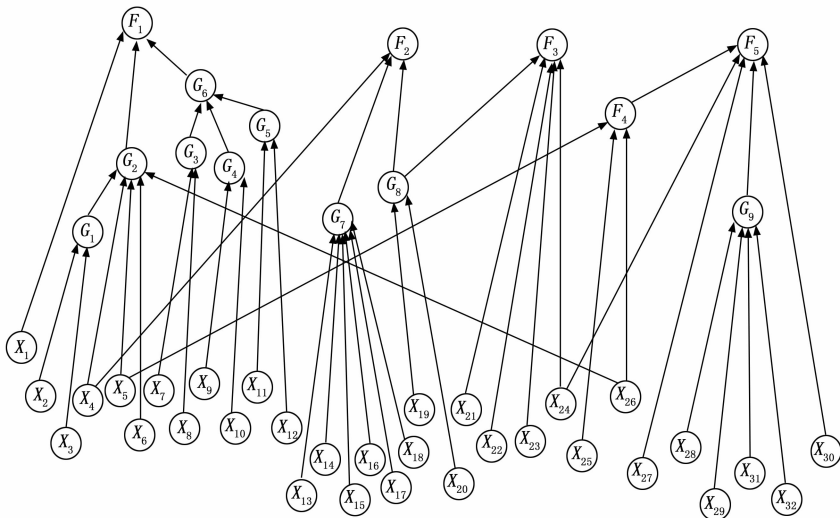


图 3 滑油系统故障的贝叶斯网络

表 2 基本故障事件标号

编号	事件	编号	事件
X <sub>1</sub>	管路泄漏	X <sub>20</sub>	滑油压力传感器故障
X <sub>2</sub>	油气分离器损坏	X <sub>21</sub>	滑油喷嘴堵塞
X <sub>3</sub>	箱体漏油	X <sub>22</sub>	供油管路堵塞
X <sub>4</sub>	滑油泵组壳体碎裂	X <sub>23</sub>	低温启动时,卸压活门打不开
X <sub>5</sub>	伺服燃油加热器泄漏	X <sub>24</sub>	回油滤堵塞
X <sub>6</sub>	齿轮箱漏油	X <sub>25</sub>	燃滑油散热器堵塞
X <sub>7</sub>	前轴承腔封严篦齿失效	X <sub>26</sub>	燃滑油散热器泄漏
X <sub>8</sub>	前轴承腔壳体裂纹	X <sub>27</sub>	供油滤堵塞
X <sub>9</sub>	后轴承腔封严篦齿失效	X <sub>28</sub>	转换齿轮箱严重磨损
X <sub>10</sub>	后轴承腔出现裂缝	X <sub>29</sub>	附件齿轮箱严重磨损
X <sub>11</sub>	前收油池泄漏	X <sub>30</sub>	滑油中渗入水
X <sub>12</sub>	后收油池泄漏	X <sub>31</sub>	主轴轴承故障
X <sub>13</sub>	泵轴断裂	X <sub>32</sub>	油泵转子急剧磨损
X <sub>14</sub>	泵组轴承损坏	F <sub>1</sub>	滑油消耗量大
X <sub>15</sub>	转子破裂	F <sub>2</sub>	滑油压力低
X <sub>16</sub>	安全活门关闭异常	F <sub>3</sub>	滑油压力高
X <sub>17</sub>	旁通活门预紧力低	F <sub>4</sub>	滑油温度异常
X <sub>18</sub>	供油泵进口堵塞	F <sub>5</sub>	滑油污染
X <sub>19</sub>	油压测试系统测试管故障	G <sub>1</sub>	滑油箱漏油
G <sub>2</sub>	滑油附件泄漏	G <sub>3</sub>	前轴承腔漏油
G <sub>4</sub>	后轴承腔泄漏	G <sub>5</sub>	收油池漏油
G <sub>6</sub>	发动机自身泄漏	G <sub>7</sub>	滑油泵组件失效
G <sub>8</sub>	油压测试系统故障	G <sub>9</sub>	机械副磨损严重

表 3 故障注入方式

故障名称	特征参数	注入方式
泵轴断裂	供油泵容积效率	由 0.97 降为 0.02
	滑油箱油位	升高 10%
供油滤堵塞	油滤流阻	升高为原先的 10 倍
伺服燃油加热器燃油泄漏	滑油路出口流量	升高 10%
	滑油箱油位	升高 20%
	换热效率	降低 10%
燃滑油散热器滑油路堵塞	发动机生热量	升高 40%
	滑油路流阻	升高为原先的 10 倍
燃滑油散热器燃油泄漏	换热效率	置为 0
	滑油路出口流量	升高 5%
油气分离器损坏	换热效率	下降 10%
	发动机生热量	升高 30%
回油滤堵塞	滑油箱油位	上升 10%
	供油泵容积效率	降低 40%
回油滤堵塞	滑油箱油位	升高 10%
	油滤流阻	升高为原先的 10 倍

表 4 故障特征参数

故障名称	故障特征参数
泵轴断裂	泵失去输入功能,用供油泵的容积效率替代
供油滤堵塞	供油滤流阻
伺服燃油加热器燃油泄漏	滑油出口流量、滑油出口压力、发动机生热率、油位
燃滑油散热器滑油路堵塞	燃滑油散热器流阻、发动机生热率
燃滑油散热器燃油泄漏	滑油出口流量、滑油出口压力、发动机生热率、油位
油气分离器损坏	供油泵容积效率、油位
回油滤堵塞	回油滤流阻

### 2.4 故障特征参数的提取

根据对滑油系统故障的分析,寻找 7 种故障的特征参数类型,这些参数会在故障发生时直接发生变化。需要区别的是,测试点参数的变化是由故障参数变化引起的。故障特征参数选取如表 4 所示。由故障分析可知,不同的故障发生可能会对滑油系统的输出参数造成相同的影响,一个

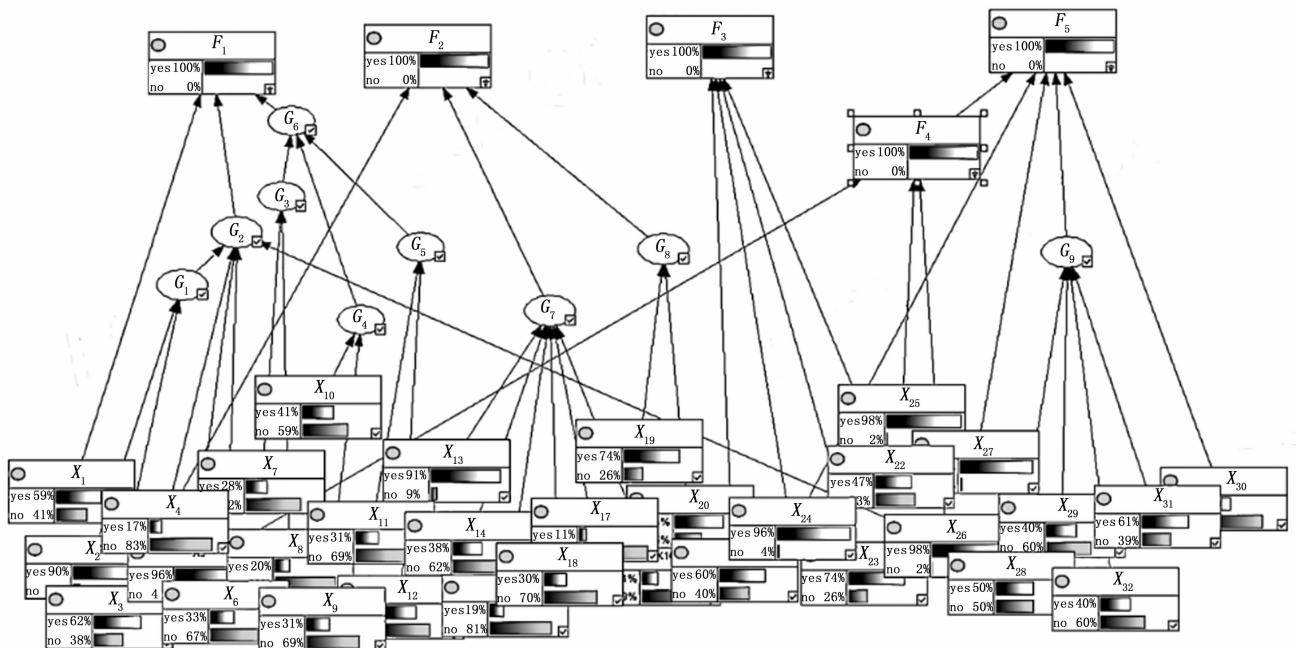


图 4 贝叶斯网络计算结果

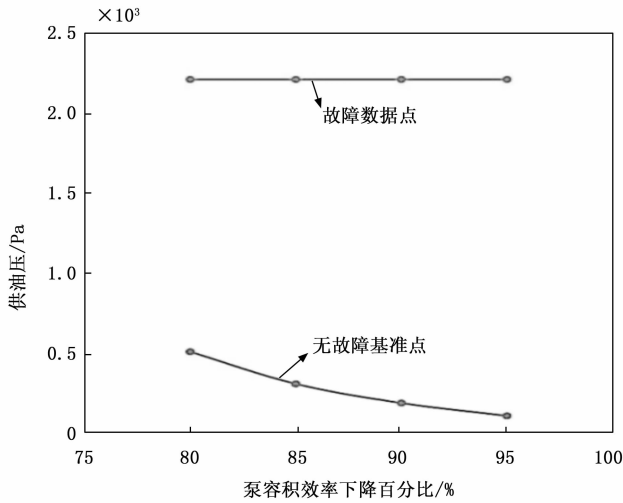


图 5 泵轴断裂故障注入结果

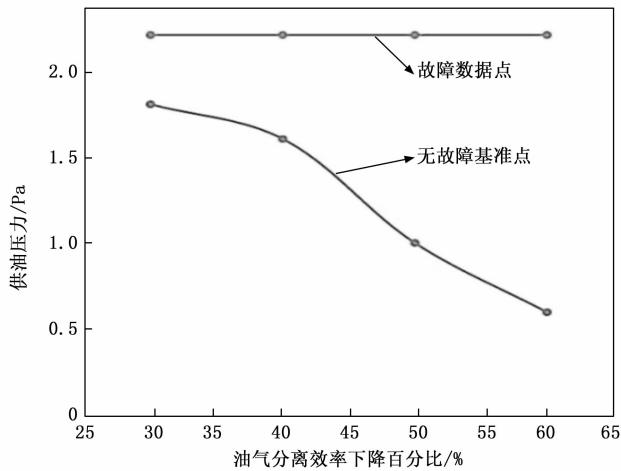


图 6 油气分离器损坏故障注入结果

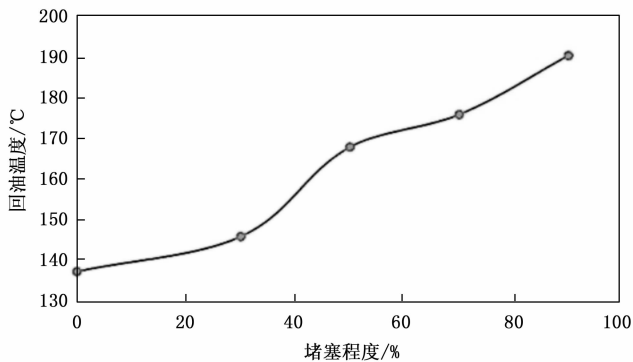


图 7 燃滑油散热器滑油路堵塞

故障的发生将会对滑油系统不同的输出参数造成影响, 将故障按照表 3 中的方法注入后, 可以得到故障与测试点输出结果之间的对应关系, 如表 5 所示。

### 3 滑油系统测试性分析

#### 3.1 测试性分析方法

故障-测试相关性矩阵是一个仅包含 0 和 1 的布尔型矩阵, 通过布尔量反映出故障模式和测试点之间的关系<sup>[14]</sup>。故

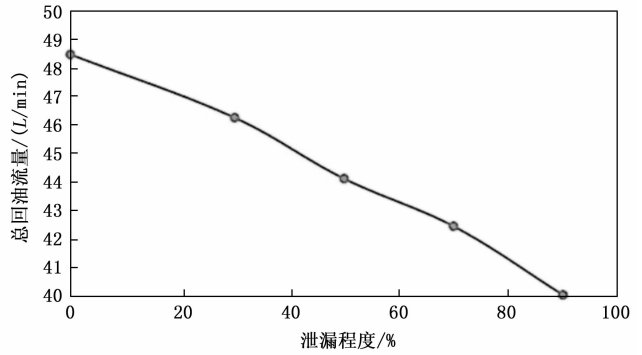


图 8 燃滑油散热器燃油泄漏

表 5 故障与测试点之间的关系

故障名称	部件性能参数变化	测试点输出结果变化
泵轴断裂	供油泵容积效率急剧降低	供油压力急剧降低
供油滤堵塞	供油滤流阻增大	供油滤压差开关量变化
伺服燃油加热器燃油泄漏	出口滑油流量、压力增大, 发动机生热增大	回油温度升高, 油位升高
燃滑油散热器滑油路堵塞	出口滑油流量、压力增大, 发动机生热增大	回油温度升高, 油位升高
燃滑油散热器燃油泄漏	燃滑油散热器流阻增大	供、油温度急剧升高
油气分离器损坏	供油泵容积效率降低	供油压力降低
回油滤堵塞	回油滤流阻增大	回油滤压差开关量变化

障-测试相关性矩阵可以通过测试性模型得到, 其主要形式如公式 (1) 所示:

$$D = \begin{matrix} & T_1 & T_2 & \cdots & T_j \\ F_1 & ft_{11} & ft_{12} & \cdots & ft_{1j} \\ F_2 & ft_{21} & ft_{22} & \cdots & ft_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F_i & ft_{i1} & ft_{i2} & \cdots & ft_{ij} \end{matrix} \quad (1)$$

式中,  $ft_{ij}$  均为布尔值,  $ft_{ij}$  表示测试点  $T_j$  可以检测和隔离故障  $F_i$ ,  $ft_{ij}=0$  则表示不能。

基于故障-测试矩阵, 可以分析出所研究对象在测试性分析中存在的不可测故障、不可隔离故障、冗余测试性和模糊故障组等。

不可测故障: 指所有的测试点都检测不到的故障。在故障-测试相关性矩阵中行向量  $F_i = [ft_{i1}, ft_{i2}, ft_{ij}]$  为零向量的故障为不可测故障。

不可隔离故障: 指所有测试点以及它们的组合都不能隔离出的故障。

冗余测试点: 指两个或两个以上测试点对所有故障的测试结果均相同。在故障-测试相关性矩阵中表现为有多个列向量相同。

模糊故障组: 指所有测试点对两个或两个以上的故障有相同的测试结果。

基于故障-测试矩阵的测试性一般分析流程如图 9 所示。

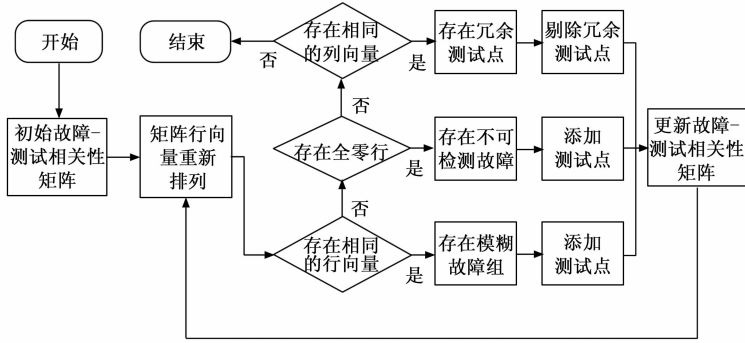


图 9 测试性分析流程

测试性指标主要包括：故障检测率（FDR）、故障隔离率（FIR）、虚警率（FAR）等<sup>[15]</sup>。测验性水平主要包含了测试的精度和时效性两个方面，其中，测试的精度主要是通过（FDR）、（FIR）和（FAR）来确定的，而测试的快捷性则是通过测试所花费的时间来体现的。本文主要针对（FDR）和（FIR）进行研究。

1) 故障检测率：指在规定的条件和时间内，能够检测到的故障数和系统或产品本身的故障总数的比值，可以用数学公式表示为：

$$FDR = \frac{N_D}{N_T} \times 100\% \quad (2)$$

式中， $N_D$  表示规定时间和条件下检测到的故障数量， $N_T$  表示系统发生的故障总数。

2) 故障隔离率：表示用规定的方法将检测到的故障正确隔离到不大于规定模糊度的故障数与检测到的故障数之比，可以用数学公式表示为：

$$FIR = \frac{N_j}{N_D} \quad (3)$$

式中： $N_j$  表示在规定条件下隔离到不大于规定模糊度的故障数， $N_D$  表示在规定条件下可检测到的故障总数。

### 3.2 航空发动机滑油系统测试性建模

#### 3.2.1 建模前假设

为了简化构建测试性模型的步骤，本文对建模过程做出以下假设：

- 1) 传感器是绝对可靠的，即其不会出现故障且不会产生虚警；
- 2) 被检测的部件只有正常和异常两种状态，不会出现第 3 种状态；
- 3) 同一时刻内至多只有一个部件发生故障，不会出现故障叠加。

根据以上假设，可以对滑油系统进行测试性建模。

#### 3.2.2 故障样本集确定

根据贝叶斯网络的求解结果，可知引发滑油系统故障的重要事件分别为：泵轴断裂、油气分离器损坏、供油滤堵塞、伺服燃油加热器泄漏、燃滑油散热器堵塞、燃滑油散热器泄漏、回油滤堵塞。由此可以得到滑油系统的故障样本集合，如表 6 所示。

表 6 故障样本集

编号	故障名称
F <sub>1</sub>	泵轴断裂
F <sub>2</sub>	供油滤堵塞
F <sub>3</sub>	伺服燃油加热器燃油泄漏
F <sub>4</sub>	燃滑油散热器滑油路堵塞
F <sub>5</sub>	燃滑油散热器燃油泄漏
F <sub>6</sub>	油气分离器损坏
F <sub>7</sub>	回油滤堵塞

#### 3.2.3 初始测试点确定

由于航空发动机滑油系统结构复杂，不易安装太多的传感器，所以测试点的选择应根据实际工程情况，做到经济可行。并且尽量保证用最少的测试点来对大部分甚至全部故障进行监测。除此之外，还应考虑到所选择的测点所需的传感器的精度和安装传感器的实际空间，通常情况下，测点应尽量设置在组件的出口处。

本文选取的航空发动机滑油系统初始测试点为：供油泵后压力、供油滤压差开关量、回油温度、滑油箱油位、供油温度、回油滤压差开关量、燃滑油散热器出口流量。上述测试点的数据可以通过滑油系统 AMESim 模型和 Simulink 模型输出得到。在此基础上，对每一个测点的故障输出进行分析。各个测试点的基本信息如表 7 所示。

表 7 测试点信息

测试点编号	测试参数名称	测试点位置	相对误差/%
T <sub>1</sub>	供油泵后压力	供油泵出口	0.5
T <sub>2</sub>	供油滤压差开关量	供油滤旁通活门	2
T <sub>3</sub>	回油温度	回油泵出口	1
T <sub>4</sub>	滑油箱油位	滑油箱	2.5
T <sub>5</sub>	供油温度	供油泵出口	1
T <sub>6</sub>	伺服燃油加热器出口流量	伺服燃油加热器出口	0.5

#### 3.2.4 故障-测试相关性矩阵建立

按照第 3 节中的故障注入方法将 7 个重要故障分别注入后，计算得出的测试点参数数值与稳态值的相对误差，并与上表中的测试点相对误差进行比较，如果超出所假设的误差范围则表示测试点可以对该故障做出监测，反之则不能监测该故障。根据以上的方法，可以建立故障-测试相关性矩阵  $D_1$ ，具体如表 8 所示。

表 8 故障-测试相关性矩阵  $D_1$

测试点 T \ 故障 F	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
F <sub>1</sub>	1	0	1	1	1	0
F <sub>2</sub>	0	1	0	0	0	0
F <sub>3</sub>	0	0	1	1	1	1
F <sub>4</sub>	0	0	1	0	1	0
F <sub>5</sub>	0	0	1	1	1	0
F <sub>6</sub>	1	0	1	1	1	0
F <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	0

### 3.3 测试性分析及优化

根据 3.1 中故障-测试相关性矩阵的相关参数 (不可测故障、不可隔离故障、冗余测试点和模糊故障组) 的计算公式, 借助 Matlab 软件进行分析, 可以得到故障-测试相关性矩阵  $D_1$  的分析结果: 不可测故障为  $F_7$ ; 不可隔离故障为  $F_1, F_6$ ; 冗余测试点为  $T_5$ ; 模糊故障组为  $F_1, F_6$ 。

本文主要利用故障检测率和故障隔离率这两个测试性指标来判断所选测试点的优劣。根据 3.1 中  $FDR$  和  $FIR$  的计算公式, 求得初始测试点的测试性指标  $FDR$  和  $FIR$  的计算结果为:  $FDR=85.7\%$ ,  $FIR=71.4\%$ 。

由于故障-测试相关性矩阵的分析结果中存在不可隔离故障, 冗余测试点和模糊测试点, 所以需要进行测试性优化。

一般情况下, 如果不考虑监测成本, 测试点越多得到的信息越准确, 所以对于不可检测和不可隔离故障, 一般通过增加测试点的方法来进行优化, 这需要分析特定故障来做出决策。

如果测试性模型中没有不可检测故障和不可隔离故障, 则需要考虑故障诊断的时间效应, 即越早诊断出故障并进行隔离, 诊断效果越好。因此, 在没有不可检测故障和不可隔离故障的情况下, 一般通过优化测试顺序来降低故障诊断所需总时间。

在本文中, 优化时直接删除冗余测试点  $T_5$ , 对于  $F_1$  (泵轴断裂) 和  $F_6$  (油气分离器损坏) 两个故障, 增加测试点  $T_7$  (总回油流量) 来区分, 对于不可测故障  $F_7$  (回油滤堵塞), 增加测试点  $T_8$  (回油滤压差开关量) 来监测。

测试点优化后再次分别注入重要故障事件, 可得故障-测试相关性矩阵  $D_2$  如表 9 所示。

通过计算可得优化后的故障-测试相关性矩阵  $D_2$  中, 故障检测率提高了 16.7%, 故障隔离率提高了 40.0%, 如表 10 所示, 没有不可检测、不可隔离故障、冗余测试点和模糊故障组。

表 9 故障-测试相关性矩阵  $D_2$

故意 测试点	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_6$	$T_7$	$T_8$
$F_1$	1	0	1	1	0	0	0
$F_2$	0	1	0	0	0	0	0
$F_3$	0	0	1	1	1	1	0
$F_4$	0	0	1	0	0	0	0
$F_5$	0	0	1	1	0	1	0
$F_6$	1	0	1	1	0	1	0
$F_7$	0	0	0	0	0	0	1

表 10 优化前后测试性指标对比 %

	故障检测率	故障隔离率
优化前	85.7	71.4
优化后	100	100

### 4 结束语

本文基于全流量单回路反向循环滑油系统的工作原理, 使用 AMESim 软件建立滑油系统的虚拟仿真模型, 然后基于统计数据分析滑油系统五大常见的故障模式并调研故障事件, 依据事件之间的逻辑关系建立滑油系统基本故障事件的贝叶斯网络, 从而确定重要故障事件。最后通过在模型中注入故障, 观察预置测试点参数的变化, 得到故障-测试相关性矩阵, 进而进行滑油系统测试性分析和优化, 优化后故障检测率提高了 16.7%, 故障隔离率提高了 40.0%。

#### 参考文献:

- [1] 张成玉. 航空发动机机械磨损故障的诊断研究 [J]. 设备管理与维修, 2020 (24): 147-148.
- [2] 朱日兴. 民用航空发动机润滑系统适航审定技术分析 [J]. 民用飞机设计与研究, 2021 (2): 112-117.
- [3] CHENG A K. SSME alternate turbopumps axial thrust balance and secondary flow models [R]. Sverdrup Technology MSFC Group Report No. 322-002-91-153-R01, 1992.
- [4] MAJUMDAR A K, LECLAIR A C. A generalized fluid system simulation program (GFSSP), version 6 [C] //51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Orlando, 2015.
- [5] 杨家旺, 姜会庆, 周琳. 航空发动机滑油供油系统建模及应用 [J]. 工业技术创新, 2019, 6 (3): 80-85.
- [6] 葛名立. 机载设备测试性建模与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (12): 36-41.
- [7] 张子剑, 姜利, 龙中权, 等. 面向飞行器发射控制系统可靠性提升的测试分析 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (10): 63-69.
- [8] THOMPSON M C, RICHARDSON DJ, CLARKE LA. Information flow model of fault detection [C] //Proceedings of the International Symposium on Software Testing and Analysis. Cambridge, 1993: 182-192.
- [9] 马瑞萍, 杨海波, 张磊, 等. 导弹测试设备自动计量检定系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2003 (9): 702-703.
- [10] 文昌俊, 陈立, 黄一凡, 等. 基于 D 矩阵的装备测试性分析系统 [J]. 湖北工业大学学报, 2021, 36 (1): 5-8.
- [11] 朱永新. 基于改进支持向量机的航空发动机滑油系统故障诊断研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
- [12] 沈燕良, 王建平, 曹克强. 飞机滑油系统故障分析 [J]. 润滑与密封, 2004 (3): 101-103.
- [13] SUBASISHD, VALERIE V, CRUZ J G, et al. Bayesian network for motorcycle crash severity analysis [J]. Transportation Research Record, 2023, 2677 (11): 51-63.
- [14] MARCO B, CRISTINA M P, ANTONIO L, et al. Te-stability evaluation in time-variant circuits: a new graphical method [J]. Electronics, 2022, 11 (10): 1589-1589.
- [15] 杨其国. 基于多信号模型的现场可更换模块测试性建模与分析 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (5): 35-38.