

# ACMS 客户化编程技术在发动机故障诊断上的应用

陈新霞, 高飞鹏, 黄加阳

(上海民用飞机健康监控工程技术研究中心, 上海 200241)

**摘要:** 发动机系统由于其内部结构复杂, 工作环境恶劣, 极易发生故障, 而发动机在设计之初又无法实现对所有故障的准确探测和隔离; 为了解决飞机投入运营后对发动机复杂故障的探测问题, 文章以 B737-700 飞机的液压机械组件故障探测为例, 提出利用机载的 ACMS 客户化编程技术, 通过自定义相应的故障诊断报文来提高发动机的健康监控水平; 实践证明, 客户化 ACMS 编程技术能够极大地提高航空公司对发动机的故障诊断水平, 方便航空公司日常的运营和维护工作, 最终提高飞机的利用率。

**关键词:** 发动机; 飞机状态监控系统; 客户化; 飞机通信寻址与报告系统; 液压机械组件

## Application of ACMS Customization Programming Technology in Fault Diagnosis of Airliner Engine

Chen Xinxia, Gao Feipeng, Huang Jiayang

(Shanghai Civil Aircraft Health Monitoring Engineering Technical Center, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** Due to the complex structure and poor working condition, engines' faults are more likely to occur. But during the design process of engines, it is impossible to detect and isolate all of the faults or failures. So, in order to solve the detection issue of complicated engine faults, taking hydromechanical unit of B737-700 as an example, this article intend to propose the application of ACMS customized programming technology, which can enable airliners to define grand new reports by themselves to detect the corresponding faults. Then the engine health monitoring level will be raised. Practices has proved that the custmized programming funciton will enhance the fault diagnosis level of engines, faciliate the airliners' operation and maintenance process, and finally promote the fllleet utilization.

**Keywords:** engine; ACMS; Customization; ACARS; HMU

### 0 引言

发动机系统是飞机的动力来源, 为飞机飞行提供必要的推力, 经常被称为飞机的心脏。发动机系统在运行过程中, 由于需要不断的启动、关闭以及为适应各种飞行任务而不停的调整推力, 因此其内部各个部件都承受着极其复杂的循环载荷。尽管随着制造工艺和维护水平的提高, 发动机的可靠性越来越强, 但由于其本身内部结构复杂以及高温高速的恶劣工作环境, 极易发生故障。

根据普惠公司 2011 年的统计数据, 发动机维修成本、飞机非直接运营成本(发动机原因造成的航班延误, 取消以及空中停车等)和燃油成本(发动机性能退化导致的燃油消耗增加)占航空公司全面运营成本的 27%, 而发动机的维护成本占整机的维护成本的 40% 以上。

因此, 对航空公司来说, 及时全面地了解发动机性能并对其故障进行快速、准确的隔离和识别, 就可以更好的安排相关的维护和检查工作, 从而大大降低运营和维护成本, 减少甚至避免重大事故的发生, 最终提高飞机的安全性。

### 1 发动机故障探测架构及原理

对民机发动机系统的故障进行探测和隔离, 并对发动机的

状态进行长期稳定的监控是目前发动机健康管理的主要方法。

从具体的实现方法来说, 主要有以下 3 种:

1) 故障实时探测: 发动机内部的计算机 FADEC 或者 EEC 与飞机维护系统 (OMS/CMS) 相互配合, 根据预先设计的逻辑, 实时探测飞机的故障, 并在故障发生的第一时间通知机组; 如果故障的等级很高, 还可以通过 ACARS 实时下传至地面, 以便维护人员提前做好维护准备。2001 年由 Boeing、GE、Honeywell、Rockwell 等联合制定的 CBM 开放系统体系结构 (OSA-CBM, open system architecture for CBM), 目前已经成为国际上主流的 PHM 体系结构参考模型, 是一种基于逻辑分层的、面向服务的、开放的系统架构, 从图 1 可以看出, 在这个体系结构中健康状态评估是其中 7 个模块之一, 健康评估功能主要覆盖了飞机 PHM 地面系统的系统级、整机级、机队级, 也是本文需要重点研究的领域和方向。部件级/设备级/分系统级/系统级的健康评估主要由各部件/系统自带的分布式 BIT/BITE 及机载健康管理系统实现。

2) 状态实时监控: 机载的飞机状态监控系统 (ACMS) 可以根据预先定义的逻辑<sup>[1-2]</sup>, 对发动机的状态进行监控, 并在逻辑触发的时刻, 按照预先定义的方式采集并记录相应的发动机参数; 目前比较通用的发动机相关的 ACMS 报文主要有起飞报 (takeoff report)、爬升报 (climb report)、稳态信号 (stable cruise)、启动报 (start report) 等几种, 这些报文主要用于发动机供应商对其健康趋势的长期分析工作。

3) 航后数据分析: 飞机落地后, 航空公司可以利用快速

收稿日期: 2015-05-04; 修回日期: 2015-06-01。

作者简介: 陈新霞, 女, 高级工程师, 主要从事民用飞机运营维护、故障诊断技术方向的研究。

存取记录器 (QAR) 内部连续记录的海量数据, 对发动机的数据进行连续长期的监控, 从而发现潜在的异常情况, 提前安排相应的维护措施。

虽然发动机的故障探测、健康状态监控等技术研究的比较早, 相关的研究成果也比较多。但是, 由于发动机本身过于复杂, 工况环境变化也非常大, 因此目前对发动机的故障检测和探测方面仍然存在以下几方面困难。

1) 多故障源: 虽然民航发动机在设计之初的维护性指标中, 故障隔离率 (隔离至单个 LRU) 在理论上能够达到 95% 以上, 但是在飞机实际运营过程中, 仍然有很多故障无法隔离至单个 LRU, 甚至无法定位。

2) 故障多样: 以目前最常见的 CFM56 发动机为例, 单台发动机的零部件有上千个, 而每个部件的故障都有可能引起发动机的故障, 甚至整个飞机的故障。

3) 检测困难: 由于发动机系统内部各个部件之间都是相互关联的, 且部分故障的发生是在特定的外界环境和工况下才触发的, 所以很多情况下很难依靠单台监测设备准确判断故障源。

## 2 ACMS 客户化编程技术的应用

实际上, 目前发动机故障探测和趋势预测面临的最大的问题仍然是故障的准确探测、定位和隔离的问题。在发动机设计之初, 无法实现对发动机所有故障的准确定位。同时, 由于发动机在真实的应用过程中的工况也千差万别, 所衍生出来的具体技术问题可能也不尽相同。因此, 即使在后续研发出新的故障探测模型算法, 也不一定适用于同一型号的所有发动机。而 ACMS 的客户化编程技术将有助于解决这一问题。

ACMS (即 aircraft condition monitoring system) 译为“飞机状态监控系统”, 是飞行数据采集组件 (或等同功能模块) 中的可编程模块, 并具有独立的数据采集功能。ACMS 的另一个重要的功能就是实时动态地监控飞机的飞行参数, 并按照预先编程的逻辑, 生成事件报告, 并通过 ACARS 实时传输给地面系统或保存在内置的存储器中, 机组在需要时也可以通过驾驶舱打印机打印, 如图 1 所示。

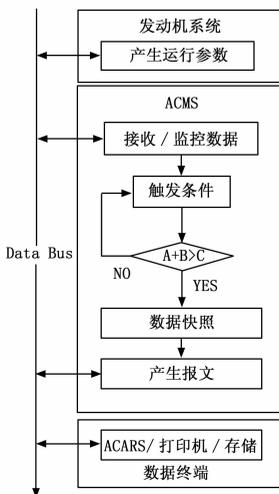


图 1 ACMS 报文产生过程

的<sup>[3]</sup>。该平台中内置了机载 ACMS 模块的编译器, 工程师可以通过平台, 从以下几方面客户化相应的报文:

1) 定义新的参数: 根据现有的监控参数, 通过各种运算, 产生新的参数;

2) 定义新的报文: 主要包括以下几方面:

(1) 发送时间: 实时或者航后;

(2) 触发条件: 触发逻辑方程式;

(3) 采集参数: 参数列表, 参数采集周期, 频率等;

(4) 报文输出格式。

以波音 B787 飞机的地面客户化编程平台的报文触发条件为例, 它提供了高级编程语言的多种通用特性, 主要包括以下几方面:

1) 数据类型;

2) 局部变量申明;

3) If-then-else 控制结构;

4) 多操作数的表达式;

5) 数学函数。

在完成以上客户化编制后, 该平台可以编译生成机载 ACMS 模块可以识别的配置文件, 并上载至飞机, 激活运行。流程如图 2 所示。

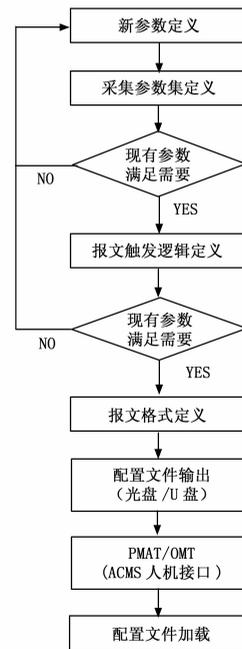


图 2 客户化编程和加载过程

其中 PMAT 以及 OMT 分别是指移动维护访问终端 (portable maintenance access terminal) 以及机载维护终端 (onboard access terminal)。

可见, 对于发动机的疑难故障或者特有故障, 航空公司可以通过对 ACMS 客户化技术, 编制相应的参数监控逻辑, 采集相关的状态参数, 辅助发动机故障的定位和隔离工作, 提高排故效率<sup>[4-5]</sup>。

## 3 应用分析

本节以 B737-800 飞机的液压机械组件的设计缺陷为例, 介绍 ACMS 客户化功能在发动机系统上的应用。

ACMS 客户化功能主要是通过地面客户化编程平台实现

在 B737-800 机队上, 部分 CFM56-7 发动机的液压机械组件 (HMU)<sup>[6]</sup> 存在设计缺陷。具体表现为在发动机加速或者减速时, HMU 旁通活门会发生无法正常运行而导致卡滞的现象, 这极有可能导致发动机空中停车, 进而威胁整个航班的飞行安全。类似的活门卡滞现象在飞机设计之初无法预计, 因此在飞机上并没有明显的故障预警或者提示, 这给航空公司运营和维护工作造成了极大的困扰。

从原理上来说, 活门组件与内表面在旋转和摩擦过程中产生的金属碎屑, 最终导致了旁通活门的卡滞, 因为这些金属碎屑会通过旁通活门结合面转移, 并加速活门的磨损, 从而最终导致活门的磁滞和不正常运行。如果旁通活门卡在较大的开位, 过多的燃油会被旁通, 从而导致发动机指令性的反转, 最终导致发动机空停; 如果旁通活门卡在很小的开位, 旁通的燃油又会过少, 这样会导致发动机对燃油供应的指令响应变慢或者无, 导致发动机速度降得慢或无。因此, 燃油流量, 发动机速度以及发动机加速度与 HMU 旁通活门卡滞现象都有直接的关系<sup>[7]</sup>。

基于以上原理, 利用 ACMS 客户化技术中的参数自定义功能, 重新定义新的参数 Regulator, 用于表示燃油流量 (WF) 与发动机速度 (PS3) 的比值。结合维护经验, 将 Regulator=8 定义为最小减速门槛, 即 Regulator=8 时, 飞机需要尽快减速; 将 Regulator=9 定义为最小加速限制, 即 Regulator=9 时, 飞机需要尽快加速。

综合考虑各方面因素, 以 1 号发动机减速异常和加速异常为例, 利用地面 ACMS 客户化软件工具 (AGS95/ADRT/GSE), 编译如下所示的机载 ACMS 可识别的触发逻辑。

减速异常逻辑:

```
IF (E1_N2ACT >= Min_N2ACT AND E1_REG = 8
AND E1_REGZ-1 = 8 AND E1_REGZ-2 = 8 AND E1_N2ACT - E1_N2ACTZ-1 >= R8_Sensitivity)
THEN E1_R8_count = E1_R8_count + 1
ELSE E1_R8_count = 0
ENDIF
IF (E1_R8_count >= R8_max-count)
THEN E1_R8DA Output is TRUE
ELSE E1_R8DA Output is FALSE
ENDIF
```

加速异常逻辑:

```
IF (E1_N2ACT >= Min_N2ACT AND E1_REG = 9
AND E1_REGZ-1 = 9 AND E1_REGZ-2 = 9 AND E1_N2ACT - E1_N2ACTZ-1 <= R9_Sensitivity)
THEN E1_R9_count = E1_R9_count + 1
ELSE E1_R9_count = 0
ENDIF
IF (E1_R9_count >= R9_max-count)
THEN E1_R9DA Output is TRUE
ELSE E1_R9DA Output is FALSE
ENDIF
```

以上逻辑中相关参数缩写的具体涵义如表 1 所示。

简单地说, 当 Regulator=8 时, 发动机需要尽快减速, 从 Regulator 连续为 8 的第 3 s 开始计算, 如果发动机加速度大于等于 -0.375 的时间超过 5 s (含 5 s), 则触

发警告, 即燃油旁通不足导致供油过多。

表 1 报文参数工程涵义表

序号	缩写	具体涵义	备注
1	R8_max_count	Regulator=8 的最大的计数值(5)	ACMS 客户化参数
2	R8_Sensitivity	Regulator=8 的 N2 变化率灵敏度(+ -0.375)	ACMS 客户化参数
3	R9_max_count	Regulator=9 的最大的计数值(5)	ACMS 客户化参数
4	R9_Sensitivity	Regulator=9 的 N2 变化率灵敏度(+ -0.375)	ACMS 客户化参数
5	E1_REG	1 号发动机 Regulator 的值	ACMS 客户化参数
6	E1_REGZ-1	1 号发动机前一秒 Regulator 的值	ACMS 客户化参数
7	E1_REGZ-2	1 号发动机前两秒 Regulator 的值	ACMS 客户化参数
8	E1_N2ACT	1 号发动机, N2 转速	飞机基本参数
9	E1_N2ACTZ-1	1 号发动机, 前一秒 N2 转速	ACMS 客户化参数
10	E1_R8_count	1 号发动机, Regulator=8 时, 计数器输出值	ACMS 客户化参数
11	E1_R9_count	1 号发动机, Regulator=9 时, 计数器输出值	ACMS 客户化参数
12	E1_R8DA	1 号发动机, Regulator=8 时, 逻辑的输出真值	ACMS 客户化参数
13	E1_R9DA	1 号发动机, Regulator=9 时, 逻辑的输出真值	ACMS 客户化参数

当 Regulator 为 9 时, 发动机需要尽快加速, 从 Regulator 连续为 9 的第 3 s 开始计算, 如果发动机加速度小于等于 0.375 的时间超过 5 s (含 5 s), 则触发警告, 即燃油旁通过多导致供油不足。

为了使维护人员能够清楚的了解报文中的相关信息, 还需要通过 ACMS 客户化软件设置相应的报文内容, 确定最终的报文参数以及对对应参数的显示格式, 如图 5 所示。

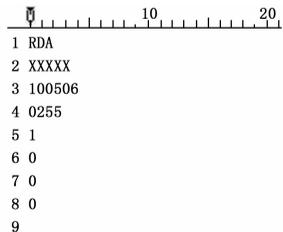


图 3 控制代码检测算法报文样本

图 3 中对应各个部分参数的工程涵义如表 2 所示。

当以上报文的触发条件满足时, ACMS 系统就能自动生成上述报文, 并通过 ACARS 下传至地面, 从而提前通知地面维护人员, 做好更换 HMU 组件的相关准备。

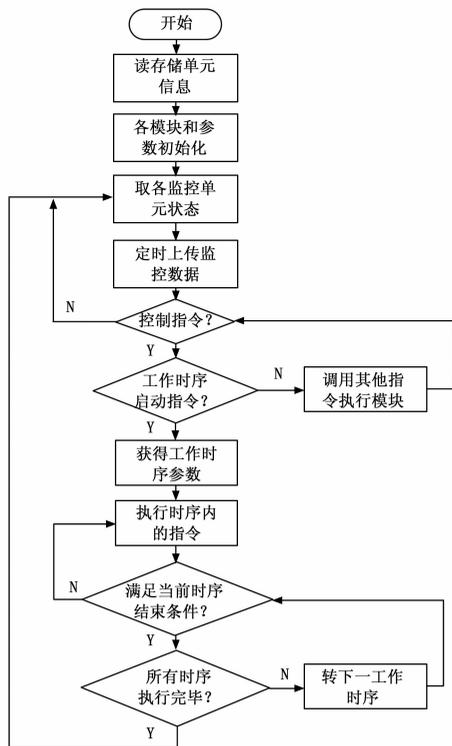


图 3 软件时序图

流程运行过程中, 软件可保存流程中间变量和状态, 系统断电恢复后可继续执行断电前执行的流程; 通过数字滤波技术, 即滤除异常数据, 保证数据的正确显示; 当程序出现异常、温度超过设定限值时或加热时温度数据不发生变化的情况时, 停止加热并终止流程, 并给出提示。

5) 容错设计:

系统设计中采用大量容错技术, 当流程运行时, 为防止误操作, 均给出提示信息。软件设计中采用互斥量的方法以保护被控单元, 如: 流程运行中对加热装置进行温控时, 不再响应

(上接第 2320 页)

表 2 报文参数工程涵义表

序号	参数	工程涵义	备注
1	RDA	ACMS 报头	ACMS 客户化参数
2	XXXXX	飞机尾号	飞机基本参数
3	100506	日期	飞机基本参数
4	0255	时间	飞机基本参数
5	1	1 号发动机减速异常	ACMS 客户化参数
6	0	2 号发动机减速正常	ACMS 客户化参数
7	0	1 号发动机加速正常	ACMS 客户化参数
8	0	2 号发动机加速正常	ACMS 客户化参数

4 结束语

目前, 上节所提到的 ACMS 报文已经作为标准被广泛用于 CFM56-7 世界机队的 HMU 设计缺陷监控。以国内某航空公司为例, 其对该报文设置了标准的处置方案“报文不过夜”, 即要求在接收到报文的当天有明确的处置方案。由于该报文的引入, 该航空公司 B737 飞机机队从未发生由于 HMU

手动控制对加热装置进行温控, 该方式可有效避免误操作而损坏被控单元, 干扰流程运行。

在监控界面中, 当前模式不能使用的操作按钮均处于无效状态, 除非能进入其有效操作模式。各控制单元和传感器均有不同量程限制, 若用户设定值超出其范围, 系统将会忽略用户操作并给出提示。

3 系统运用分析与结论

系统经过 500 多次运行考核, 共出现 2 次故障, 分别为温度传感器显示异常和数据采集异常, 故障发生后系统自动报警, 经检查发现异常原因分别为温度传感器损坏和数据采集模块松动, 进行相应修复后系统运行正常。仪器运行过程中, 测控系统可精确测量控制仪器分析测量过程中时间、流量、压力、温度等参数, 消除了人为操作失误环节, 能够自动记录和存储分析测量过程中各参数, 便于数据的分析与处理, 大大减轻了操作人员的工作强度。其组件式的设计方式, 减少了系统故障排除时间, 大大提高了系统的可维护性。

该化学仪器研制完成后, 参加了 2014 年在约旦举行的禁核试核查综合演练 (Integrated Field Exercise 2014, IFE14) 活动, 并成功运用。其中测控系统运行稳定、可靠, 能够长时间无人值守的稳定工作, 系统操作简单方便, 非技术人员简单培训即可实现控制与操作。

参考文献:

[1] 屈毅, 宁铎, 等. 基于模糊 PID 控制的温室控制系统 [J]. 计算机应用, 2009 (7): 248-251.  
 [2] 李学军, 周元, 等. 基于三维模糊 PID 控制策略的水泥分解炉温度控制系统研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23 (10): 37-42.  
 [3] 任一, 刘旺开, 等. 遗传算法模糊 PID 测控系统在环控试验台中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2012 (3): 690-693.  
 [4] 李自强, 薛美盛. 用于 PID 参数自鉴定的性能指标仿真研究 [J]. 自动化与仪表, 2009 (2): 30-33.  
 [5] 王永皎, 廖建军. Visual C# 2005 + SQL Server 2005 数据库开发与实例 [D]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

的设计缺陷导致的发动机空中停车事件。

可见, ACMS 客户化编程技术的引入, 能够极大地提高航空公司的发动机状态监控和故障诊断水平, 方便航空公司日常的运营和维护工作, 最终提高飞机的利用率。

参考文献:

[1] Boeing. B737 Aircraft Maintenance Manual [Z].  
 [2] Boeing. B777 Aircraft Condition Monitoring System Description Document [Z].  
 [3] 徐爽, 王尔宝, 张希第. 客户化 ACMS 在引气系统的应用 [J]. 航空工程与维修, 2013, 261 (3): 57-58.  
 [4] 黄加阳, 刘昕, 柏文华, 等. 民用飞机健康状态评估方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (10): 3526-3528.  
 [5] 宋东, 屈娟, 陈杰. 基于数据挖掘技术的飞机故障诊断专家系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (10): 2603-2605.  
 [6] CFMI. CFM56 Commercial Engine Service Memorandum 0015 [Z].  
 [7] 张翹. A320 飞机引气系统的特点及故障分析 [J]. 航空工程与维修, 1999, 215 (5): 18-20.