

# 航空设备故障预测与健康管理系统

哈尔滨工业大学航天学院 张嘉钟 张利国



张嘉钟

毕业于北京理工大学,1984年留学于英国爱丁堡大学,现任哈尔滨工业大学航天学院飞行器动力学与控制研究所教授、博士生导师,主要从事机械振动、故障诊断、飞行器动力学方面的研究。

航空装备的安全性是飞行安全的基础<sup>[1]</sup>。

近10多年间,世界航空发达国家为提高航空安全水平,在以前地面安全监控手段的基础上,通过构建设备健康管理系统<sup>[2]</sup>,提高飞行设备的安全性和可靠性。该系统包括设备的状态检测、状态预报、故障诊断、故障评估、故障处理等。先进民航飞机所采用的预测和健康管理系统可以通过诊断、预兆和异常状态推理程序

在航空领域推广和应用故障预测与健康管理系统是一个必然的进程。为了提高维修质量,应加快新技术的应用,推动维修决策的信息化、智能化和科学化。新设备的推陈出新必将使维修工作现代化。为了推动这一进程,应该扎扎实实做好必要的理论和技术准备工作。

来确定飞机可能出现的故障,并生成状态报告。在飞行过程中,如果预测和健康管理系统的状态报告对近期任务产生影响,则通过机载超高频设备直接传送给地面站,在飞机到达下一站之前,地勤人员可以做好维修方案,确保航班高效运行。

预测和健康管理系统也已应用在第4代战机F-22、F-35上,在执行任务过程中,飞机自动进行状态监控和管理,自动记录和分析飞机及各系统的状态,并进行状态的预测、故障的检测和隔离,根据预测和状态信息完成系统重构,上述信息在空中通过JIDS传递给地面保障系统<sup>[2]</sup>。美国X系列超高声速飞机在设计之初就同步开展了其故障预测和健康管理系统的研究工作,这表明,维修决策工作现代化的重要途径是采用状态监测和故障诊断的智能化系统。

我国在航空设备的故障诊断研究上也开展了多方面的工作,例如沈阳飞机设计研究所研发的飞机发动

机故障诊断专家系统,北京航空航天大学研发的飞机电源系统故障诊断专家系统,以及其他单位研发的电子和电器设备故障诊断系统。然而上述工作与国外相比或与其他行业的研究工作相比依然太少,航空研究所应充分借鉴其他行业(如电力工业系统、石油化工工业系统、电子工业系统、机械工业系统)在设备健康管理方面业已取得的成果,并将其应用到航空领域。

由于飞机的特殊要求,如重量轻、体积小、系统复杂、机载设备多、安全性要求高等,在将其他工业系统的技术移植到航空工业的过程中,必然还有许多问题需要进一步开发、研究解决。这类问题是多方面的,例如传感器的布置,由于飞机相当多的部件在设计之初并未考虑故障诊断问题,因此未预留传感器的安装位置,或没有足够的几何空间供传感器安装,导致必要的信号无法测量;又如,由于征兆和故障并不是一一对应

的,所以存在如何根据征兆来判别故障的问题;还有如何提取故障征兆信息的问题,等等。所以应当对上述理论和技术开展深入的研究。

## 故障预测和健康管理平台的结构与功能

任何一种设备都是根据预定的设计目的和功能实施的,该设备应包括三大基本功能,即故障预测、故障诊断和维修决策。其结构层次可视为具体功能而定,例如,武器装备故障

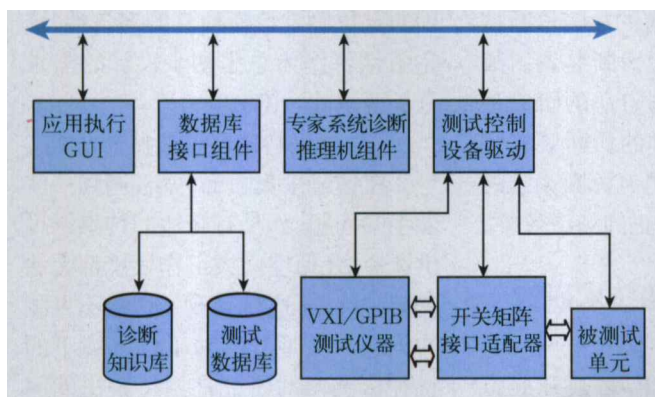


图1 某型航空发动机诊断测试系统结构

预测及健康管理系统由用户层、应用层和支撑层组成,采用分布式C/S结构。故障诊断预测模块接收异常状态信息并进行判断,故障趋势预测模块接收趋势信息,将诊断和预测结果供给分析决策模块综合诊断预测结果,以采取相应的控制措施,并提供维修需求信息<sup>[3]</sup>。

由于采用的技术不同,系统的构建也是多样化的,例如飞机发动机故障诊断测试系统。由自动化测试设备(ATE)对发动机进行实时检测和全面的数据采集,完成测试控制功能。ATE采用现代流行的VXI总线技术实现,专家系统可通过数据共享或网络通信的方式获取ATE测试数据库的数据,调用诊断知识库中的知识和规则进行推理,完成发动机的故障诊断,见图1。

### 1 大型故障分析系统

大型系统多采用分布式总线结构,如图2所示的的机械设备工况监

视与故障诊断系统,计算机监测分析与诊断系统不但可以在线实时监测大型系统的运行状态,还可以根据现场的检测数据实现越限报警、实时故障分析与诊断等功能。前端智能采集器具有多种形式,目前的趋势是采用小型化的系统,如智能信号变送器,CSi变送器模块即是其中的一种。CSi9210机械设备状态变送器是艾默生公司为机械设备健康管理研制的状态变送器,通过在智能仪表中植入预测诊断软件来监测

和分析旋转设备的健康状态,该仪表可向操作及维护人员传输操作信息以预防生产的中断。CSi9210机械设备状态变送器是第一种能诊断电机和泵的轴承失效、联轴器不对中、电机电气问题、泵的气蚀

及不平衡等的智能化现场总线仪表。新的设备使用内置的分析引擎,可精确地发现潜在的故障。这些信息将通过现场总线协议传送到过程自动化系统和AMS™Suite设备,智能设备管理系统预测诊断软件为用户提供了一种获得电机泵类设备实时状态信息的有效方法。有了这些实时

信息,操作人员可以方便地查看旋转设备状态,获得有关机械设备的信息并采取措施改进工厂机械设备的可用性和性能。这款全新的仪表是工厂机械设备健康管理的基础,采用新的数字自动化技术以改进设备的运转及维护,有效避免非计划停车。该类型的工业智能变送器,已成功地研制并被大量用于电力、石油化学,数字化机械制造等工业现场。研发适合于航空设备的专用硬件系统是实现故障预测和健康管理的技术基础。

电力工业的大型故障诊断系统的典型产品有:美国Bently公司的Trendmaster 2000系统;日本三菱公司的HMH系统;瑞士Vibro-Meter公司的Vibro-Turbo系统;加拿大CSI3100系统;中国清华大学的QH-1系统,华中理工大学的HZ-1系统,哈尔滨工业大学的MMMD-3系统等。

### 2 小型故障分析系统

小型便携系统可以视为大型系统的简化版,它保留了单一前端智能采集器和人机界面。便携式故障诊断系统的软件设计主要包括数据采集板的控制和USB通信软件、主机USB设备驱动程序、主机数据分析与处理软件。数据采集板的控制和USB通信软件的功能主要是控制数据采集以及通过USB接口与主机进

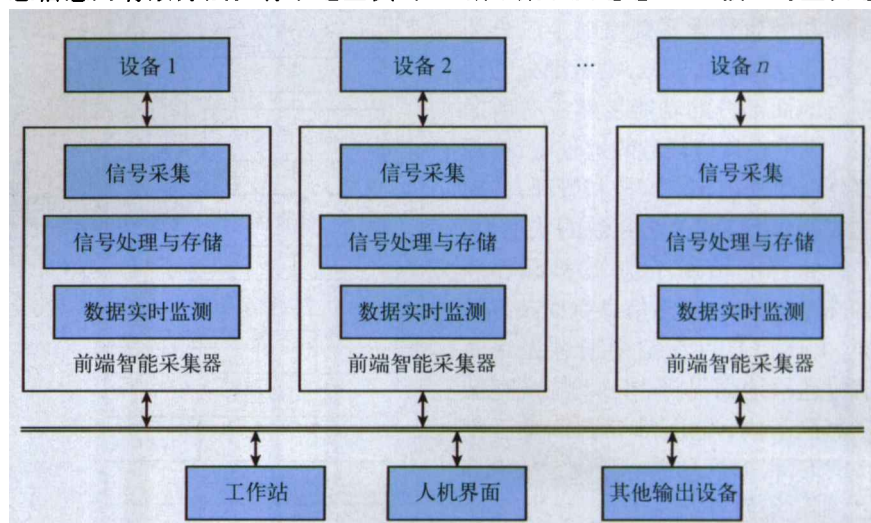


图2 大型故障诊断系统框图

行数据通信。主机数据分析与处理软件将传感器采集的数据进行分析处理,可以根据要求进行信号的功率谱分析、倒谱分析、小波分析以及自相关分析等,通过与正常运行时相关的参数对比,可以判断出设备是否存在缺陷、故障,也可通过几种方法联合起来提高诊断的正确性和精确度。

便携式检测仪表和分析仪器是最早出现的故障检测装置,其主要功能是对检测对象的一些重要运行参数进行测量,分析人员根据测量得到的数据判断检测对象的运行状态。如振动测量仪、温度测量仪、轴承检测仪等,生产厂家有丹麦的 B & K 公司、瑞典的 SPM 公司等。

在线监测仪表系统是继便携式检测仪表和分析仪器后出现的针对某一具体对象的专用故障监测系统,适用于需实时监测运行状态的工业生产系统。较成熟的产品有:美国 Bently 公司的 7200 系列、9000 系列、3300 系列,西德 Philips 公司的 11 MS700 系列以及申克公司的 VIBROCON-TROL 2000 系列,瑞士 Vibro-MetCr 公司的 MMS 系统等。

### 3 航空设备故障预测和健康管理系统

由于航空设备的特殊性,其故障预测和健康管理系统原则上应分为机载部分和地面部分,机载部分的功能与地面部分的功能显然应有所区别。飞机在执行任务的过程中,机载部分自动进行状态监控和管理,自动记录和分析飞机及各系统的状态,并进行状态的预测、故障的检测和隔离,根据预测和状态信息完成系统重构,上述信息可在空中通过无线通信传递给地面保障中心系统或存储在黑匣子内;地面部分则侧重于维修决策,根据信息进一步确定故障部位,制定维修方案。

根据机载部分和地面部分特点,

机载部分应具有以下功能:状态监测功能,数据存储功能,分系统功能级故障预测功能,提供分系统故障对飞行任务的影响评估或警示。

地面部分的功能应具有以下特点:数据传输与存储功能,状态显示功能,分系统功能级故障诊断与分系统部件级故障诊断功能,提出维修方案和维修规范。

根据上述分析,可设想构建如图 3 所示的结构框架。

故障诊断系统是根据诊断对象故障的特点,利用现有的故障诊断技术研制而成的自动化诊断装置。故障诊断的各种理论与方法的研究最终都必须落实到具体的诊断装置或诊断系统的研制上,只有诊断系统的研制成功才能产生真正的经济效益。

### 前期理论研究和技术研究

为实现检测诊断维修这一目的,完成系统平台的设计,必须开展以下述 3 方面(信号、诊断和维修决策)理论和技术问题的前期研究工作,以便为设备的设计打下坚实的理论基础和技术基础。

#### 1 信号方面的问题

(1) 分系统诊断信息完备性研究。

由于征兆和故障并不是一一对

应的,为了正确地匹配征兆与故障,诊断信息必须是完备的。对于不同的分系统来说,其完备性的内容是存在差异的,例如某电器设备的供电电源,如果诊断级别仅定位在确定电源工作是否正常,即分系统故障的级别上,则电源输出的电压信号就是工作是否正常的唯一判据,如果要判断电源本身部件是否有故障,至少还要引入电源的输入电压信号,因此,从这个意义上讲,应规划各分系统的诊断级别定位,然后根据各分系统诊断级别的定位确定诊断信息的完备性,该完备性将作为总体初步设计的需求分析要求的一部分。

#### (2) 微型特殊环境传感器研究。

在信号采集方面,常常遇到一些棘手的问题,如没有合适的传感器可供选择,几何空间或工作环境都无法安装传感器,这就导致了信号不可测的问题。微型和特殊工作环境下的特种传感器的研究是亟待解决的问题。目前,在该领域我国与西方工业发达国家还存在相当大的差距,信号的获取已经成为诊断工作的瓶颈。

#### (3) 信息容错性研究。

信号的真实性和完整性无论是对状态监测还是对故障诊断的结果都是至关重要的,为确保信号的真实性和完整性,根据可靠性的要求,关键部位要设置多个

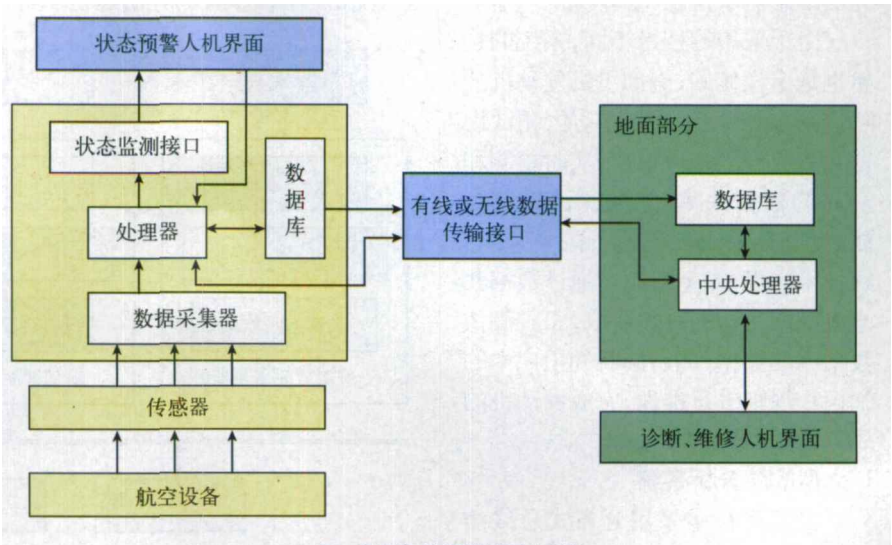


图3 监测与诊断维修平台结构

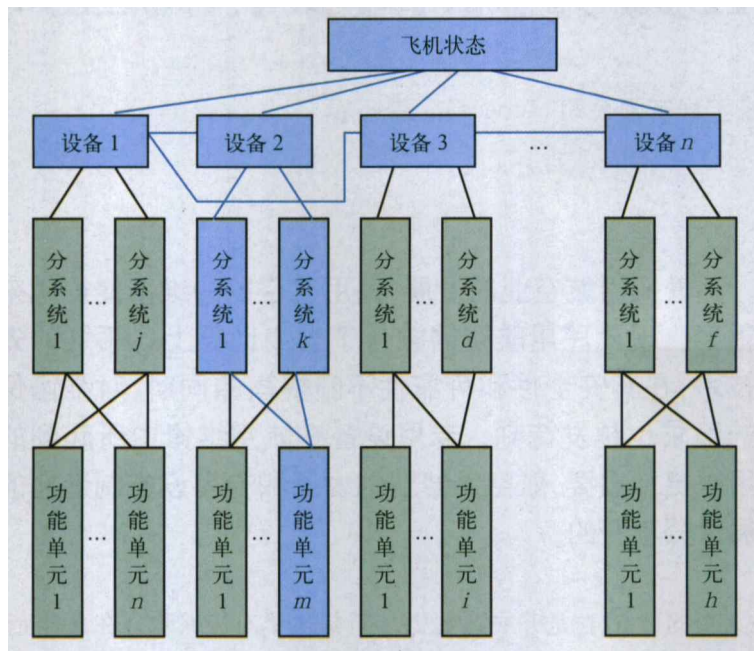
传感器,因此,传感器合理布局也是亟待解决的问题。出于空间和可靠性的考虑,只能设置满足诊断要求的合理数量的传感器。

(4) 结构与传感器安装的协调问题。

为实现信号的采集,我们必须在

以图4为例说明故障传播的方式,若某一功能单元模块发生故障,该故障将根据相关关系传播。显然,结构不同时,其传播途径也不同。所以应针对不同设备构建一系列相应的拓扑结构,以适应多机种的需求。

(2) 分系统故障征兆与故障部



注:蓝色表示传播途径。

图4 设备相关结构图

总体设计之初就综合考虑结构与传感器安装和布局的协调问题。但现实表明搞结构设计的人员基本上没有考虑安装传感器的要求,其结果是传感器无法安装或者是信号线无法引出。

## 2 诊断方面的问题

(1) 构建设备各系统相关的拓扑结构模型。

飞机上的分系统种类繁多,如发动机系统、液压系统、电源系统、电气系统、仪表系统等,而且每一个系统本身又包括了若干个子系统,因此,必须建立系统相关拓扑的结构图,在该图的基础上构建航空设备故障传播拓扑结构。现实情况是,每一种类型飞机所配置的系统都存在相当大的差异,如何使诊断维修设备能适应各种机型的维护是必须面对和亟待解决的问题。

位相关性研究。

由于功能单元模块是可更换的,因此故障分析定位到功能单元一级即可。基于上述设想,在分系统故障征兆与故障部位相关性研究方面,将主要探讨各功能单元发生故障时,分系统产生的故障征兆与分系统各个功能单元间的相关关系,重点解决功能单元一级故障定位的问题。目前,故障诊断的推理方法有多种,如模糊矩阵法、专家诊断系统、神经网络法、故障树法、支持向量基方法等<sup>[4]</sup>。

(3) 系统故障诊断技术研究。

近年来,人们对诊断知识的获取、表达、组织和推理方法作了大量的研究,目前仍没有获得突破性进展。根据诊断知识的利用方式,可以分为基于模型的方法与基于规则的方法两大类。基于模型的方法可以充分利用系统的内部知识,有利于系

统整体的故障诊断;其缺点是系统的建模误差或外部干扰将对故障诊断的结果产生重大的影响。基于规则的方法,其适应性广、灵活,但故障的在线估计比较困难。

## 3 维修决策方面的问题

(1) 评估故障对飞机性能影响的严重程度。

飞机各部位的故障对飞机性能的影响程度并不都是相同的,其中的影响程度表现出有轻、有重,有缓、有急。因此机载系统应该将故障部位以及它们的影响程度显示出来,使飞机操作者明确当前飞机所处的状态。

(2) 制定维修决策和提出维修规范。

由于飞机型号多,单元部件更新换代快,故障发生的部位多样化,因此维修人员的处理故障经验相对表现不足。基于确保维修质量的考虑,维修决策系统应依据部门制定的维修标准,提出维修内容及其相应的维修规范和检验方法。

## 结束语

在航空领域推广和应用故障预测与健康管理系统是一个必然的进程。为了提高维修质量,应加快新技术的应用,推动维修决策的信息化、智能化和科学化。新设备的推陈出新必将使维修工作现代化。为了推动这一进程,应该扎扎实实做好必要的理论和技术准备工作。

## 参考文献

- [1] 武维新,周雄武.提高航空装备安全水平的思考.航空装备质量与安全,2007,3-6.
- [2] 罗垂林.航空装备安全性面临的主要问题及对策建议.航空装备质量与安全,2007,7-12.
- [3] 木志高,胡海峰,胡莒庆.武器装备故障预测及健康管理系统设计.兵工自动化,2006,3:20-22.
- [4] 龚伟.电气设备在线状态监测与故障诊断系统技术的研究.科技资讯,2007,14:70-71.

(责编 伟杰)