

大飞机测控关键技术现状及其应用*

Current Status and Application of Key Measurement and Control Technologies in Large Commercial Jet

西北工业大学航空学院 王仲生 余 汇 芦玉华 李 双



王仲生

西北工业大学教授, 博士生导师, 主要从事自动化检测和故障诊断等方面的科学研究。

大飞机是指一次飞行航程大于3000km、起飞总重量超过100t或150座以上的飞机,它是用来完成空中运输任务的主要工具,也是衡量国家经济实力的重要标志。离开大飞机,一个国家的现代民航事业就无从谈起,军事上的战略打击力量也不完善。为了发展我国现代航空事业,《国

为了避免重大事故或减少一般事故的发生,除了在设计、维护等方面采取有效措施外,还必须采用先进的测控手段,实时监视飞机的工作状况并采取有效措施,保障飞机安全可靠飞行,因此在大飞机研发设计阶段注入测控技术就显得尤为重要。

家中长期(2006~2020)科学技术发展规划纲要》把大飞机项目确定为“未来15年力争取得突破的16个重大科技专项”之一。2007年2月26日,国务院常务会议原则批准大飞机研制重大科技专项正式立项,同意组建大型客机股份公司,同时要求在大飞机研制过程中,要坚持以我为主,积极开展国际合作,坚持体制机制创新,通过自主创新、集成创新和引进消化吸收再创新,突破关键技术。作为衡量国家国防科技工业基础和重要标志的测控技术,在大飞机研发过程中必将发挥重要作用。

大飞机的特点是大而复杂,特别是大型民用客机,在飞行过程中,任何一个关键部位的关键部件(或系统)发生问题,都会对飞机的安全飞行造成严重威胁,甚至导致机毁人亡的悲剧。为了避免重大事故的或减少一般事故发生,除了在设计、维护等方面采取有效措施外,还必须采用

先进的测控手段,实时监视飞机的工作状况并采取有效措施,保障飞机安全可靠飞行,因此在大飞机研发设计阶段注入测控技术就显得尤为重要。

国内外发展现状

测控技术以信息技术、计算机技术、仪器仪表技术为基础,并随着这些技术的发展而发展,在航空、航天等领域得到了广泛应用并取得了长足发展。2005年朱睿等提出了利用飞机运行下载数据对其进行远程实时监控^[1];2006年曾声奎等人提出了人-机-环完整性认知模型,并据此对状态监控与预测技术进行了分类与综合分析^[2]。在国外,2001年Smonath等人提出了一种基于遥测数据的国际空间站远程监测系统^[3];2002年美国国家航空和宇航局(NASA)采用混合智能模型,对飞机的飞行状态进行监测^[4],Marcel等人采用软计算方法进行飞机传

* 国家自然科学基金(50675178)和国防预研项目(Z142006B002)。

感器故障检测和隔离^[5];2004年,Byington等人设计了一个能够自动收集故障事件和对数据进行表示、存储以及高级推理的飞机健康监控维护系统^[6]。

目前,世界各大著名航空制造企业为争夺全球市场,广泛应用测控技术来提高飞机的安全性、可靠性、维修性和降低飞机成本。波音777上安装了上万个感测器(其中一半是与发动机有关),能够将检测的数据流展示给空勤和地勤人员,波音商用飞机集团还正在策划一种把所收集的数据、通信链路、数据存储以及高级诊断和预测算法等组合在一起的三步飞机健康管理(AHM)战略,并计划将基于巨磁阻(GMR)和自旋相关隧道(SDT)技术的固体磁感测器嵌入下一代7E7飞机关键部位和高应力点,来监视飞机机身和外壳,以确定局部高应力是否正在使裂纹扩大,对飞机寿命周期中可能发生的鸟撞、硬着陆以及其他事故,也能利用完好的状态管理技术进行应对^[7]。这样,航空公司就不用定期或不间断地开展检查和维修工作,而只是在需要时进行维修(状态维修)。在完好的状态管理和测控技术的支持下,航空公司在飞机落地之前就知道了是否需要维修,哪些部件需要维修,就可提前备好部件,安排好人员和进度,提高维护效率。

欧洲空中客车公司设计制造的双层宽体客机A380,开创了巨型客机的新纪元。A380的乘客数为555人,客舱分为上下2层,航程14800km。在设计过程中,空客对A380的可维修性给予了高度重视,力图在飞机的设计阶段充分考虑日后的维修难度和成本,使A380真正成为便于使用和维护、经济性优良的巨型客机^[8]。空客通过改进飞机原有系统,为A380增加了状态监控系统,设计了机载维护系统(OMS)和机载信息系统(OIS),可以对飞机系

统的状态进行全面监控。

加拿大国家研究委员会(NRC)从1992年就开始了飞机综合诊断和测控系统的开发^[9]。该系统包括飞机通讯寻址及报告系统(ACARS)、飞行计划时间表、飞行派遣、飞机维护历史、故障查找手册(TSM)和最小设备清单6个数据库,能够对飞机故障进行精确检测和定位,并具有建议最佳维修策略、评估飞机健康状况和预报故障等功能。据保守估计,一个拥有40架飞机的航空公司应用该系统,每年至少能节省15亿美元。

2004年,美海军航空兵武器系统部与诺斯罗普·格鲁曼公司签订了一项合同,开发“敏捷快速全球作战保障系统(ARGCS)”^[10],其目标是通过可变规模自动测试设备的研发,使这种自动测试系统能用于多种武器系统全寿命周期的测试和监控。该项目结构采用模块化ATE、合成仪器和通用模块、通用测试接口,支持交互测试和诊断,实现了不同维护阶段之间的互操作,并能重复使用维护数据,加快装备测控系统的开发,能快速适应未来软硬件技术的发展,减少维护时间,简化维护级别,降低虚警率。

测控技术正向高速数据采集、多进程、多用户、高实时性方向发展,网络化、可视化、智能化测试分析也成为测控技术的一个重要发展方向。

大飞机测控关键技术

大飞机远程测控系统由机上监测、数据传输和地面监控中心3部分组成。机上监测系统用来实时监测飞机的工作状态,并将检测数据通过空地数据链以声音、图形、图像等形式传输到地面监控中心;地面监控中心通过智能化分析和处理,对飞机进行远程实时监控,并为维修决策提

供可靠信息。

1 信息传感技术

在测控技术中,传感器是用来感受飞机的结构和性能参数的。所测的参数有应力、应变、振动、温度、断裂等。在这类传感器中,最有发展前途的是将光纤传感阵列、接收器件和发射器件埋入材料内组成的SMART结构,SMART不仅能敏感上述各种参数,还可以接收、发射电磁波,成为有知觉的皮肤和有神经的结构材料。未来,用这种SMART结构材料可以制造全新的飞机。

测量仪器仪表是测控技术分析工作的基础,其精度和性能直接影响分析处理方法的选用、分析处理参数的设置及分析处理结果。传感技术与微电子技术(主要是微处理器)综合运用,能使传感器向更高层次发展,现已研制成具有若干新功能的所谓SMART传感器,并正在不断地实用化。SMART传感器代表着传感器技术发展的一个新趋势。它将采集、显示、分析集于一体,采用高集成度设计思想,对所采集的数据不但提出高精度和数据量的要求,同时还集成了数据处理功能。网络化智能传感器^[11]进一步完善了SMART传

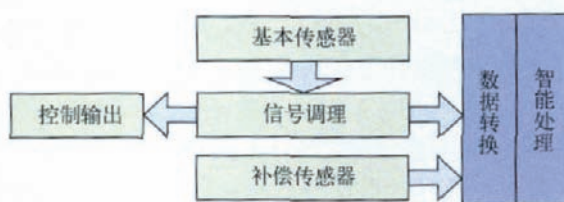


图1 智能传感器基本功能模块

感器。智能传感器基本功能模块配置如图1所示。

应用在大飞机上的传感器件,是分析处理数据的基础,也是对系统进行控制的源头所在。在设计飞机时就应加以考虑,使其布置位置与系统设计相结合;只有在正确的位置布置传感器,才能有效地获得飞机的各种状态信息,也才能对飞机进行可靠

监测和控制。

数据采集处理系统作为前端接口的一个重要部分,对其要求很高,正在通过采用各种大规模与超大规模集成电路的高速器件,来实现高速、超高速采样率和高分辨率的转换。另一方面,随着微型计算机的发展,计算机作为测控技术的核心设备,其应用范围正在扩大,它会使传统测控技术的概念发生重大变化。系统采用多计算机工作站和网络技术集散式结构,或采用神经元计算机、超级计算机等实现高速并行处理,达到试验测控的联机实时数据处理、分析与显示。高速高精度数据采集系统及相应配套软件、高性能测控工作站、高精度信号调理器、电子扫描测压系统等,在风洞试验、飞机结构强度试验、发动机试验和仿真试验中发挥了重要作用。例如利用计算流体动力学方法可以获得一定速度下的有关试验数据,而不必动用大型气动力或发动机试验设备。这种方法不仅能解决空气动力学、动力以及飞机结构/动力的综合性技术问题,而且还可用来研究高速动力系统的可行性与可操纵性设计中的关键技术^[12]。

2 处理识别技术

随着科学技术的发展,各种智能处理算法在测控数据处理中得到了成功应用。如神经网络、专家系统、模糊逻辑、支持向量机等算法都可以为数据分析结果做出合理而有意义的结论,为飞机维护人员提供重要的参考依据。

识别技术可以通过嵌入式计算机与中央维护系统 CMS 计算机进行联接^[13],下载并加密保存 CMS 计算机中记录的故障数据,故障分析专家系统软件通过对故障数据的分析,给出故障发生的原因、排故方法和步骤、所用工具及所需保障资源等信息。同时通过地空数据链实时将飞行参数和故障信息传回到地面系统,

地面系统通过接收 ACARS 数据并对其进行译码,再把译码后的信息输入故障诊断专家系统,以实现飞机的远程监控。地面诊断系统可实时查询飞机电子维护手册和故障模式库,并结合历史故障数据,采用混合智能诊断技术对故障原因进行定位。还可以通过地空数据链将信息上传至飞机,对故障的应急处理和维修提出建议^[14]。同时还可将监测结果分发到地面其他相关部门,做好飞机排故准备,例如准备航材备件、维修检测工具等,指导维修人员进行维修,缩短排故时间。

3 监测控制技术

监测控制技术是指能自动获取信息,并利用相关知识和策略,采用实时动态建模、在线识别、人工智能、专家系统等技术,对飞机进行监测、控制、自诊断和自修复的技术。监测控制技术能有效地提高飞机的安全性,使其获得最佳性能,并使系统具有高可靠性、高可维护性、高抗干扰能力和对环境的适应能力,以及优良的通用性和扩展性。自动控制技术、计算机技术、信号处理技术、数据通信技术、模式识别技术等的综合和应用,就构成了监测控制技术。

计算机网络与智能控制技术的结合,产生了网络控制系统(NCS)。最初的计算机控制系统采用直接数字控制 DDC (Direct Digital Control),它在 20 世纪 70、80 年代占据主导地位。它强调计算机直接参与对象进程的控制,传感器的模拟量输出和执行器的模拟量输入都和数字计算机点对点连接。它是完全集中式体系结构,全部的控制策略在一台计算机中完成。由于所有的功能集中在一台计算机中,计算机的任何回路失效^[15]。随着监测控制规模的日益扩大及计算机技术的进一步发展,集散控制系统 DCS(Distributed Control System)得到了人们的重

视。DCS 比 DDC 在控制方面有了很大的改进,它将控制分散到多个小型控制器中,而每个控制器只处理部分控制回路,这样一个故障只会影响系统的一部分。网络控制系统 NCS(Network Control System)又称控制网络,分布式控制系统、工业以太网和现场总线控制系统(FCS)都属于网络控制系统。NCS 的出现标志着监测控制系统正向网络化、集成化、分布化和智能化的方向发展^[16]。

工程应用

1 网络化测控系统

网络化测控系统的设计目标是对飞机的飞行安全提供高可靠性保障服务。它可将航空公司、制造单位、科研院所、高等院校等资源连成网络,做到知识共享和资源共享,并具有高度的开放性和可扩充性。

该系统采用三层网络结构,分别为机上监测系统、地面监控中心和远程专家终端。

机上监测系统主要监测能够反映飞机工作状态的各种性能和结构参数,包括压力、温度、转速、振动、应力、应变等。机上人员根据监测参数的变化,对飞机进行实时监控。对于无法排除的故障,将故障信息发送到地面监控中心,在远程专家协同下对故障做出快速判断和处理。

地面监控中心是整个系统的核心,它由多个智能化监控模块组成。这些模块对空地通信系统传输的数据既有各自独立的分析和处理功能,各模块之间又互相协作和协同监控。同时能将分析诊断结果通过空地通信系统反馈给机上人员和地面维护人员,以保证飞机安全可靠飞行和进行快速维修。地面监控中心结构如图 2 所示。

工作时,首先由传感仪表和数据采集系统对被测数据进行采集,并利用计算机进行分析和特征提取。如果特征明显,则可直接进行处理,例

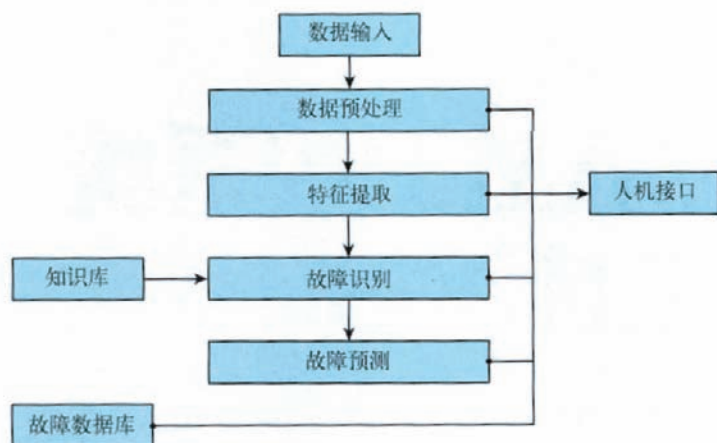


图2 地面监控中心结构图

如与知识库中的特征进行模式匹配,直接得出处理结果;如果不明显,可应用智能数据分析方法,例如输入神经网络或支持向量机等进行分类;还可应用小波分析等进行处理,以快速得到处理结果。

对于无法反映当前可能出现的飞机非正常状态数据,可将其输入预测算法,对飞机状态和故障进行预测。地面监控中心还可以通过网络将数据发送到远程专家端,借助于专家的经验 and 知识对系统提供支持。

2 可视化测控系统

可视化测控系统利用计算机仿真技术,将数字信息转化为直观可视的图形图像。可视化测控系统为人们进行远程实时监控提供了一个良好的监视环境。

监测的参数包括油温、油压、油耗、振动等。当出现异常情况时,能用可视化方法实时显示异常参数的变化,并进行监控和预测。对于振动数据,可以将其输入振动分析模块,如进行时域分析、频域分析、时频分析等。监控和分析结果以可视化方式直观地呈现给用户,为维护人员快

速分析提供支持。图3为飞机结构裂纹图像采集及识别过程。

(1) 图像预处理。

图像预处理是对获取的图像信息进行图像增强和复原等运算,以完成对目标图像的光线补偿、平滑、噪声抑制、邻域平均滤波和中值滤波等操作,为图像分割和特征提取提供尽可能有效的图像数据。

(2) 图像分割。

图像分割是把数字图像分成互不相交(不重叠)的若干区域,检测出图像的各个物体或同一物体的各个部分,并把它们的图像与其余景物分离。其中最重要的是边缘检测,即通过某种算法突出图像中灰度变化的区域,因为有裂纹区域和无裂纹区域的最大差别是灰度不同,所以这一步非常关键。采用灰度图像二值化原理能将裂纹图像从背景中有效分离出来。

(3) 特征提取。

特征提取是在图像分割的基础上,对物体一些重要部分所具有的特征向量进行定量估计。把抽取的一组特征组合在一起,就形成了特征向量,

可作为裂纹决策和判断的主要依据。

在分析过程中,我们利用 IMAQ Vision Builder 进行图像采集,采用小波分析方法进行处理。采集卡为 NI 公司的 IMAQ PCI-1409 图像采集卡。与人工视觉相比较,机器视觉的最大优点是精确、快速、可靠和数字化。图像处理是一个很复杂的过程,要求图像采集卡能够提供质量良好的视频信号,还要提供良好的光源和优质摄像头。

将采集的裂纹图片首先读入该系统,经过图像预处理、边缘检测、图像二值化、数学形态处理和边界提取后,就会快速给出处理结果。

图像处理的每一步需要根据图片类型,选择相应的处理算法。从结果可以看出,可视化图像识别可以完成高质量图像采集、数据变换和传输,并通过算法处理,提取出所需的处理结果。同时还可以识别用振动等无法识别的早期故障,如微缺陷等,可得到理想结果,如边界值等。可视化图像识别测控技术为用户提供了一个良好的可视化交互界面。

结束语

测控技术在产品设计、研发、生产、制造、维护中得到了广泛应用,必将为我国大飞机项目提供强大的技术支撑。本文通过国内外测控技术在航空中应用现状的分析,提出了我国大飞机项目中测控技术的应用与面临的问题及解决的关键技术,并用网络化测控系统和可视化测控系统两个实例进行了说明。在我国大飞机研发过程中,需要突破的关键技术很多,如能突破测控的关键技术,我国大飞机的质量必将提升到更高的水平。

注:本文有参考文献 16 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向编辑部索取。(责编 淡蓝)

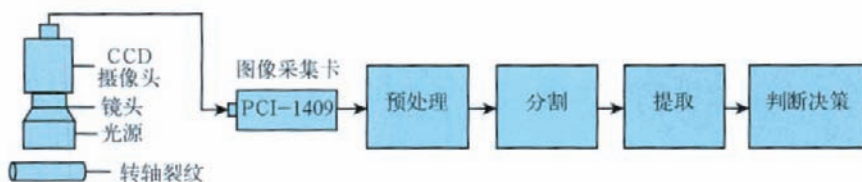


图3 裂纹图像采集和识别过程