

大型飞机中的若干关键测控技术及其发展趋势

Some Key Measurement and Control Technologies and Their Development Tendencies in Large Commercial Jet

南京航空航天大学航空宇航学院 陈仁文 朱莉娅



陈仁文

工学博士,南京航空航天大学航空宇航学院教授,博士生导师。1991年毕业于南京航空航天大学,获硕士学位,1999年获博士学位。主要研究方向为传感器、测控系统及其网络、智能监测与控制、智能结构等。

大型飞机是衡量一个国家科技、工业水平和综合国力的重要标志之一,它不仅关系到国民经济,而且对维护国家安全和国家利益具有重要的政治意义。大飞机制造涉及到电子、机械、新材料、冶金、化工、工业制造等方方面面,是各种高、精、尖技术

测控技术的应用贯穿于飞机设计、制造、使用和保障的全过程,是高精度加工制造、航空安全和可靠性、航空维护自动化和快速化的基础。随着大型飞机项目研究的逐步深入,测控行业迎来了重大机遇和挑战。

的大集成,因而被誉为工业领域的皇冠。

测控技术的应用贯穿于飞机设计、制造、使用和保障的全过程,是高精度加工制造、航空安全和可靠性、航空维护自动化和快速化的基础。一方面,随着大型飞机项目研究的逐步深入,测控行业迎来了重大机遇和挑战;而另一方面,随着电子技术、计算机技术、网络技术、材料技术等迅猛发展,航空测控技术也得到了很大的发展。测控技术在大飞机中的应用主要包括2个方面,一方面是应用于飞机的设计、制造和维护、修理中,另一方面是应用于飞机的使用中。本文将介绍大型飞机的若干关键测控技术,包括智能与网络传感器技术、航电系统总线技术、结构健康监测与健康监测技术,以及智能结构

技术,并探讨其发展趋势。

智能与网络传感器技术

传感器是飞机的“感觉器官”,是任何测控系统信息的源头和信息获取的关键,在大型飞机测试技术中具有核心、主导的地位。但该项技术往往不被我国飞机设计专家和领导所重视,由于存在许多关键技术需要解决,高精尖的传感器目前尚需要进口甚至被国外技术封锁。

飞机上装备有数以百计的不同功能的传感器,包括用于测量飞行状态、导航、定位参数、动力装置以及燃油、武器与火控参数等的各类传感器。为了对这些传感器进行有效管理,提高其使用效率和精度,增加其使用的便利性和可靠性,具有某些智能(Smart)和自治(Autonomous)

功能,如能够自动采集数据并进行分析、处理、判断和自适应的智能传感器,以及能够实现分布式并行测量的网络传感器受到人们的普遍关注。通常智能传感器具有通过网络传输数据的功能,而网络传感器也具有某些智能功能,因此它们之间的界限是模糊的、交叉的。

由网络传感器组成的分布式传感网络作为一种新型的信息获取与处理系统,综合了先进的通信技术、嵌入式计算机技术、分布式信息处理技术和传感器技术。它将大量的多种类传感器节点组成自治的网络,实现对物理世界的动态智能协同感知。传感器网络的载体有电缆线、电力线、光纤、电磁波等。其中采用电磁波作为载体的无线传感器网络,可以实现小型化、低功耗、远端信息的并行处理,有着传统传感器技术无法比拟的优势,成为大型飞机测控技术中传感器技术的发展趋势。

无线传感器网络通常由电源、感知部件、嵌入式处理器、存储器、通信部件和软件等几部分构成。其中,电源用于提供网络正常运行必须的能量;感知部件用于感知、获取外界信息并将其转换成数字信号;处理器对所获取的信息进行处理、保存,并控制感知部件和电源的工作模式,协调各节点的工作;通信部件负责与其他传感器等进行通信;软件为网络提供需要的软件支持。无线传感器网络的用户,可以是人,也可以是计算机或其他设备。用户既可以主动查询、收集感知信息,也可以被动接收网络发布的信息,同时对感知信息进行分析,对感知对象采取相应的行动,以上2种应用模式分别对应了多到一、一到多的通信模式。

美国航空航天局(NASA)喷气推进实验室(JPL)于1997年起开展了传感器网计划,它将传感器网络的功能从单纯监控扩展到对周围环境做出反应并进行控制。传感器群之

间的通信使用标准的无线电元件,在特定的入口群可以通过因特网连接终端用户访问现场,实现远程控制。最终在网络操作系统中嵌入智能芯片,它可以在不与任何终端用户或控制系统通信的情况下,对采集的数据分析并做出响应。上述传感器网作为一个分布式网络,每个群收集到的信息和数据都可以供其他群共享,从而实现在大范围的区域内,提供一个遍布的、连续的、嵌入式监控现场。根据NASA/JPL,传感器网的设计可以应用到许多领域,包括环境检测、安全和国土防御以及太空探索等。

随着无线射频标识(Radio Frequency Identification,RFID)技术的发展,它正在成为无线传感器网络的一部分。2006年,美国联邦航空局正式允许被动RFID标签放置于飞机部件上,目前波音和联邦快递(FedEX)已经对货运飞机MD-10的一些主要零部件进行了有源RFID标签的使用评价。RFID利用射频波在读写器和带有RFID标签的物品之间传送数据,它具有动态读写能力,传输距离远且对视线没有要求。RFID标签可以安装在飞机的各部分,包括飞行甲板、电子设备间、货舱等。在飞机上使用活动标签,可以监控航空物流、设备及零部件的使用情况,从而提高各部件的可见度,减少维护工作量及相关费用。

射频(RF)技术的应用还包括综合射频传感器,它将飞机上所有射频传感器综合在一起,完成信号的发射、接收和预处理。发展综合射频传感器可以大幅减少传统分离式机载天线带来的数量多、布局难、影响飞机气动特性等不利因素的影响,可靠性高、且易维修。此外,还研究有基于nRF系列无线收发芯片的飞机线路识别系统,利用该便携式系统,可以对机载系统线路进行分析与测试、对机载设备故障和线路故障进行快

速准确的定位。

总之,无线传感器网络技术与传统传感技术相比,其优势在于:分布节点中多角度和多方位的信息综合可以有效地提高信噪比;传感器网络成本低;网络具有自治性,系统容错能力强;传感器节点与被测对象距离近,可消除环境噪声对系统性能的影响;多节点信息的融合,有利于提高信息感知的性能、扩大感知的范围;借助具有移动能力的节点及网络结构的调整能力,可以有效地消除传感的盲区。

航空电子综合系统总线技术

自20世纪70年代以来,飞机系统的设计重点放在了飞机的电子系统而非气动和结构设计上。现代飞机各个电子设备或子系统都装备有独立的计算机,而这些计算机除了满足各自子系统任务的实时处理外,还需要进行子系统间信息的交联以实现系统功能的综合,这就导致了航空电子综合系统的出现(以下简称航电系统)。数据总线作为航电系统的中枢,负责各子系统间的信息交换,其技术的发展是航电系统研究、开发的核心问题。

1 MIL-STD-1553 和 MIL-STD-1773 总线

1978年,美国军方制定了军用航空数据总线标准MIL-STD-1553,首先运用于美国空军F-16战斗机。该总线为时分式指令/响应串行多路数据总线,采用屏蔽双绞线或同轴电缆作为传输介质,总线结构如图1所示。1553总线作为航电系统发展初期推出并沿用至今的一种数据总线,在航电设备的综合化等方面发挥了重要作用。其工作模式决定了它只能集中式控制分布式处理,消息传输速率最快只有1Mbit/s,每次消息传输中最大的消息块长度仅为16bit/w,消息的平均吞吐量为200~300kbit/s,最多仅

能挂接 31 个终端。因此 1553 总线不能保证关键数据的固定传输带宽和实时性以及非关键数据对带宽的实时动态抢占,并无法满足扩展 I/O 的需求。

由于 1553 总线使用屏蔽双绞线

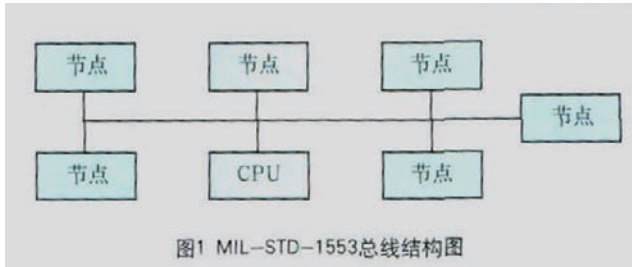


图1 MIL-STD-1553总线结构图

等带宽较窄的传输介质,容易受到机载环境中的电磁干扰,因此很难满足高性能、高可靠性、高速率的传输要求。美国国防部于 1988 年发布了新的军用标准 MIL-STD-1773。该标准利用光纤作为传输介质代替屏蔽双绞线及同轴电缆,其他高层协议与 1553 相同,1773 总线的数据传输速率可达到 20Mbit/s。光纤具有带宽高、损耗低、抗电磁干扰能力强、质量轻等优点,适合现代战机使用。1773 总线于 20 世纪 90 年代后被美国国家航空航天局(NASA)和海军(NAVY)以 F-18 战斗机作为标准机型使用,在英国的“山猫”直升机(Lynx Helicopter)上也得到了应用。目前,波音(Boeing)公司已经制造出基于 1773 标准的双速率收发器,它具有 1Mbit/s 和 20Mbit/s 2 种速率,可分别供 1553 和 1773 总线使用。

2 ARINC429 总线

ARINC429 总线是由美国航空无线电公司(ARINC)制定的航空电子设备间数字信息传输的统一工业规范,该规范同时规定了航电设备的技术指标、电气性能、外形和插接件等,为系统互联提供了统一的平台。ARINC429 总线广泛使用于波音系列飞机、欧洲空客等机型,它是一种广播式单向串行数据总线,传输介质为双绞屏蔽电缆,数据传输位速率最

高为 100kbit/s。

ARINC429 总线和 MIL-STD-1553 总线作为联合式航电系统总线结构,已经提出了子系统的概念,改变了最初分离式航电系统各功能器件间完全独立的模式,初步实现

了航电系统的综合化。但这 2 种总线结构尚缺乏综合信号的能力,只是实现了命令和显示的部分综合,且受工作模式和传输介质的影响,数

据传输速率都较慢,无法满足新一代飞机的航电系统对飞机内部信息传输速率的要求。

3 高速数据总线 HSDB

1988 年美国提出“宝石柱”计划,其重要特点是采用高速数据总线 HSDB,以光纤技术构成双冗余度的通信信道,HSDB 总线的数据传输速率上升到 50Mbit/s,消息最大长度为 4096 字。HSDB 总线相较于 1553 和 ARINC429 总线信息传输的实时性更强,且在扩展 I/O 方面有所改善,可以挂接 128 个终端设备。美国自动工程师协会(SAE)还在此总线标准的基础上发布了 2 个具体标准——AS4074.1 和 AS4074.2,即通常所说的线性令牌传输总线 LTPB(Linear Token Passing Bus)和光纤分布式数据接口 FDDI(Fiber Distributed Data Interface),上述标准在军机 A-12、YF-22 等机型中得到了广泛使用。

LTPB 从物理上看是星形拓扑结构,易于监控网络信息的传送及整个网络的状态,从逻辑上看按地址递增形成环形拓扑结构,如图 2 所示。此外,每个终端均设有令牌旋转定时器 and 令牌持有时间定时器,可以有效降低消息的

延迟时间。与 1553 水平式数据综合形式不同,LTPB 具有更强的容错和系统重构能力。

4 光纤通道技术(FC)

高清晰、数字化的视频通信要求几百 Mbit/s 甚至 1Gbit/s 的数据传输速率,上述几种总线均无法满足要求。为了满足上述需求,美国国家标准委员会(ANSI)的 X3T11 小组于 1993 年制定了光纤通道技术(Fiber Channel, FC),该总线技术的信号传输速率已由最初的 1Gbit/s 发展到 4Gbit/s,并正在向 10Gbit/s 发展。

光纤通道技术采用一种分层的协议标准,共分 5 层,包括介质接口层、传输协议层、帧协议层、综合服务层和高层服务层。光纤通道技术还定义了 3 种拓扑结构形式:点对点型(Point to Point)、仲裁环型(Arbitrated Loop)和交换型(Fabric)。其中点对点结构最简单;仲裁环型可以提供 126 个设备的高速连接;交换型功能最强大,最多可连接 1600 万个设备。为了适应航电环境,光纤通道技术还提供了航电环境专用的协议子集 FC-AE,它规定了民用和军用航空光纤通道交换网络与环路拓扑连接设备的选择。

光纤通道技术的优点体现在数据传输的高速率、高质量、高实时性、高可靠性、高带宽和开放式网络结构等方面。将光纤通道技术作为航电系统的主要网络,能够满足现代飞机

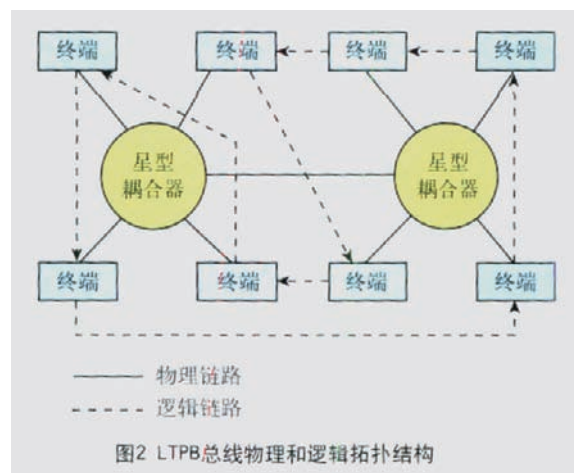


图2 LTPB总线物理和逻辑拓扑结构

对数据传输性能的日益增长的需求。但由于 FC 技术本身的复杂性和航电系统的特殊要求,要使其真正很好地在航电系统中应用还有很多技术问题有待解决。

5 全双工交换式以太网 (AFDX)

近年来商业计算机通信工业发展迅速,以太网的传输速率达到千兆至万兆以上,因此,全双工交换式以太网 (AFDX) 技术,作为具有开放式网络通信协议的以太网技术在航电领域的应用应运而生,并表现出巨大的灵活性和扩展性,现有的 AFDX 技术数据传输速率已经达到传统总线技术 ARINC429 的千倍以上。由于 AFDX 技术以以太网技术为基础,它可以充分利用已经发展成熟的商用技术和开放式标准,同时可以获得众多第三方厂商的技术支持,从而缩短开发周期、降低开发成本。但同样由于以以太网技术为基础,其不确定性使得该技术在航电系统中的应用受到了阻碍。

AFDX 网络由终端系统 (End System)、AFDX 交换机 (Switch) 及传输链路 (Link) 组成,网络拓扑结构为星型,如图 3 所示。其中,终端系统嵌入在航空计算机系统中,将航

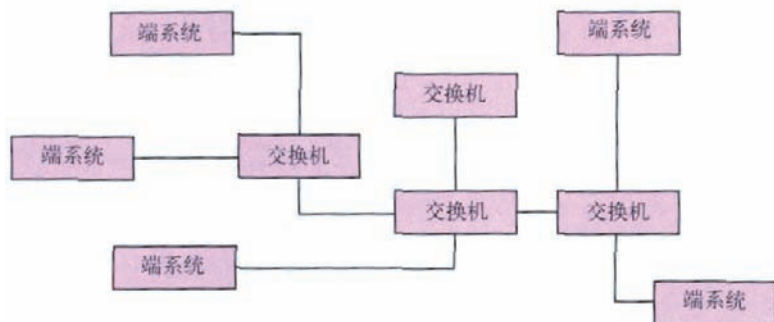


图3 AFDX网络拓扑结构图

空子系统与 AFDX 交换机相连;传输链路是一个终端系统到另一个或多个终端系统之间的单向逻辑路径;交换机完成系统的信息交换,是整个网络的核心。

目前,波音公司已经将 AFDX

技术用于机内的娱乐系统,并准备在飞机的关键系统(如飞行控制系统)中也采用 AFDX 技术。与波音公司相似,考虑到 AFDX 技术可以改变传统总线技术在费用、性能和灵活性上的缺点,空中客车公司也已经把 AFDX 技术应用于空客 A320 的乘客娱乐系统,并已经将 AFDX 用于 A380 的通信链路技术。

6 CAN 总线的高层协议 CANaero-space

CAN(Control Area Network, 控制局域网)总线产生于汽车领域,

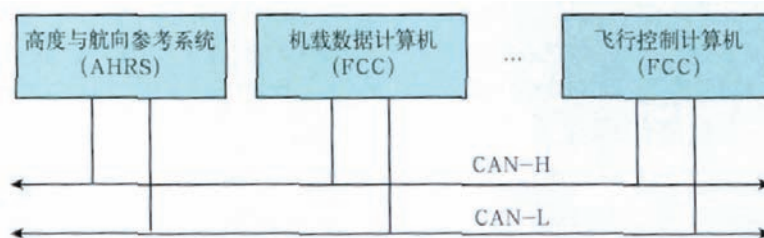


图4 CANaerospace总线拓扑结构图

近年来逐步成为具有代表性的一种工业现场总线,它是支持分布式、实时控制的串行通信网络。其通信介质是双绞线、同轴电缆或光导纤维,通信速率为 1Mbit/s。CAN 总线对报文进行编码,代替了传统的站地址编码,使得网络内节点数在理论上不

受限制。这种报文编码的方式,还可以使不同的节点同时接收相同的数据,非常适合分布式系统。同时,CAN 总线是一种多主站总线,各主站依据优先权访问总线,发生冲突时采用 CSMA/CD(带有冲突检测的

载波监听多路访问控制)解决问题。

CAN 总线自身具有一些特点,包括多主竞发模式带来的不可预测性、优先权低的信息可能由于节点出错造成堵塞、为满足在航空航天领域应用单条总线形式需要采用多冗余方式。上述特点限制了 CAN 总线在对实时性、可靠性、抗干扰性要求很高的航空航天领域使用。然而,CAN 总线只规范了 ISO/OSI 7 层标准模型中的数据链路层和物理层,因此美国、欧洲都在 CAN 总线规范的基础上,发展出了基于

CAN 总线的高层协议。其中,德国 Stock Flight Systems 公司于 1997 年制定了一种基于 CAN 总线的新型航空机载设备通信总线协议 CANaerospace,该协议于 1998 年开始应用于飞行器中,获得了优异的表现。美国航空航天局 (NASA) 于 2001 年将其标准化为“先进通用航空运输实验数据总线 (AGATE Databus)”。CANaerospace 的总线拓扑结构如图 4 所示,它具有以下主要特点:(1) 支持多主发送,无需系统启动过程,避免主站失败导致出现问题;(2) 动态网络,支持节点的热插拔;(3) 可扩展的开放性,将固定定义减到最少,具备高灵活性。(4) 完全公开、免费的全部技术资料,简单易用。

CANaerospace 总线的应用包括:在 Eurocopter 公司的全天候救援直升机中作为导航系统、飞翔状态传感器和飞行员控制单元之间的接口;在 Ae270 商用和小型运输机的航空舱系统中负责 7 个智能化单元

间的通信;作为Bombardier-Rotax公司的V220/300T型航空发动机监测单元与飞行员间的通信接口;作为NASA小飞机运输系统(SATS)飞行测试项目中的机载航电通信主干网络等。可见,CANAerospace总线协议是一种具有潜力的、适用于航电系统的总线网络形式。

从上述航电系统总线技术的发展不难看出,具有高数据传输速率、高可靠性等特点的各种新型总线网络技术将在现代飞机航电系统中得到应用和发展,当然也面临着很多需要探讨和研究的问题。

结构健康监测(SHM)与健康管理技术

故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)是指利用现有知识来预测飞机部件未来的健康状况,是一种综合后勤学和维修效益的技术。相较于传统的维修方式,PHM能够比较全面、准确、实时地进行故障诊断和预测,有利于减少寿命周期成本、保障飞机飞行安全。PHM系统包括机载实时诊断与预测、飞机状态报告与记录、地面诊断与自主式后勤3部分。其中机载PHM系统的体系结构包括:集中式结构,适合系统规模小、子系统较少的情况;分布式结构,利于降低系统测试费用,但冗余性、可靠性较低;集中式和分布式结合而成的分层融合式结构,在低层次收集信号、高层次诊断、预测结果,更加适用于现代飞机高智能化、高复杂性的要求。

结构健康监测(Structural Health Monitoring, SHM)作为PHM技术在结构领域的具体应用,最初主要对结构载荷进行监测,目前正向结构损伤监测、损伤定位、结构寿命预测等方面发展,逐渐发展至具有对于结构损伤具有自修复、自保护的功能。飞机结构表面或内部可能

由于化学腐蚀、应力作用、撞击、热疲劳等原因产生损伤及裂纹,如果不及时间补救,可能引起损伤的进一步扩展,进而导致结构破坏、造成重大事

应控制等功能,使其自身或其所处环境处于最优状态,即所谓智能功能,其工作原理如图5所示。

智能结构实际上是复合材料结

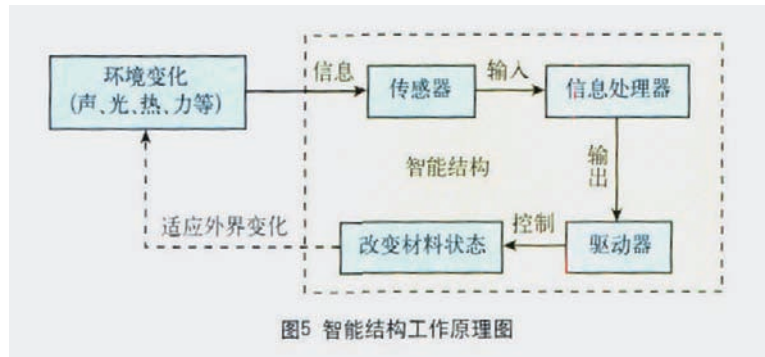


图5 智能结构工作原理图

故。利用结构健康监测,可以在损伤发生的初期即发现损伤,从而提供飞机结构的安全性评估,预测结构的寿命,保证飞机的安全。结构健康监测系统主要包括4个部分:传感器系统,数据采集、处理及传输系统,损伤识别、模型修正、安全评定与预警系统,以及数据管理系统。

目前,结构健康监测与健康管理技术的研究涉及的应用对象相当广泛,研究也取得了较好的成果。如美国NASA将光纤传感器网络埋入碳纤维复合材料飞机蒙皮,使材料具有感知力和判断力。

然而,结构健康监测技术还面临着许多困难和挑战,比如被监测结构本身复杂、监测系统所处环境复杂、传感器采集信息不完全或不确定、采集信号时背景噪声大、信号之间的交差耦合、分析时间过长、实时性差等。SHM技术的研究热点将集中在智能传感技术、先进的信号处理技术、失效计算方法、信号质量分级与评价方法、损伤识别技术、提高系统有效性及可靠性等方面。

智能结构技术

智能结构(Smart Structure)是将传感器、驱动器、微控制器及相应电路等集成在结构中,使该结构不仅具有传统的承受载荷、保持形状等功能,还具有识别、分析、处理及自适

构与测控系统相结合的产物,或者说测控系统融合到传统材料和传统结构后的产物。因此,测控技术也是飞行器智能结构中极其重要的一环。智能结构技术中包括智能材料、智能材料的配置、控制器、结构集成几个关键技术。其中,智能材料根据功能特点可分为2类:一是对外界激励具有感知功能的材料,即传感元件,主要包括压电材料、光导纤维、电阻应变丝等;二是能在外界环境或内部状态变化做出响应或驱动的材料,即驱动元件,主要包括形状记忆合金、压电元件、流变材料和磁致伸缩材料等。合理地布置传感、驱动元件可以以低能耗获得高性能的结构,反之则可能影响系统的精度并导致系统不稳定。智能结构的控制器一般由分布式微处理器和中央处理器,控制的对象就是结构本身。控制器必须有很好的实时性和可靠性,才能应对结构所处环境中的非线性、不确定性及时变性。此外,智能结构集成的技术,关系到力学特性、结构稳定性、使用寿命等很多方面的问题。

目前智能结构技术在大飞机中可能的应用主要包括4种。

1 智能蒙皮

智能蒙皮是指在航空航天器、军舰、潜艇的外壳(蒙皮)内植入智能结构,它具有随外界条件变化而变化及探测周围环境的能力,适合于电子

战(包括识别、预警、隐身和通信等)、材料内部损伤监测、减振降噪及飞行器座舱的自动通风、保暖、冷却。在航空航天领域应用智能蒙皮,有利于提高飞机的飞行性能,使飞行器设计小型化、简单化,提高飞机的可靠性和可用性。

智能蒙皮目前的研究主要集中在以下几个方面:(1)智能蒙皮天线。智能蒙皮天线包含多个辐射单元和能决定波速方向的相位控制装置,通过光纤与辐射单元连接实现通信和雷达计算功能。智能蒙皮天线可用于直升机的动目标雷达显示、高空和长续航无人机工作,在甚低频时作为测角天线、预警机远距离监视及目标跟踪天线。智能蒙皮天线具有先进的电学和结构特性,可以提高无线电通信的距离和质量,有效提高飞行器的空气动力性能、减轻飞行器重量和体积。(2)智能隐身技术。以智能蒙皮代替线和黑箱,安装隐蔽,通过无源定向操作达到隐身的目的。光纤智能隐身作为智能隐身技术的一种,不仅可以隐身,还可以自动校正飞行。(3)预警技术。由于智能蒙皮能探测射频、雷达波、激光、核辐射等多种信号,可用于监视和预警。

2 损伤监测智能结构

损伤监测智能结构可以诊断结构损伤的位置、类型及程度,并进行结构健康状况评估,以预防事故发生。主要包括飞机起飞前判断飞机是否能够飞行、飞机飞行中遇到意外损伤进行自诊断和自修复、飞行过程中监测各结构健康状况、飞机关闭动力后提高完整结构信息等方面。它是结构健康监测的一个重要分支。

3 强度及形状自适应智能结构

自适应智能结构不仅能承载、传动,而且能根据外界环境的变化,在自诊断基础上,自适应地调节到最优状态。自适应智能结构包括强度自适应智能结构及形状自适应结构。其中形状自适应智能结构可以根据环境的变化和任务的需要自适应地触发驱动件,改变结构的外形,并通过传感元件反馈形成闭环控制。其中典型的形状自适应结构包括自适应机翼和自适应旋翼。自适应机翼不采用铰链结构,在飞行中根据飞行状况和结构承载,依靠机翼自身的扭转、弯曲等形式,改变翼型和攻角,从而获得最佳气动特性。

4 减振降噪智能结构

智能结构与振动主动控制相结合,可以有效地消除飞行器的有害振动,从而减轻对航电设备的干扰、提高系统可靠性;同时可以抑制噪声

光纤光栅的微弯特性,构成了一套能够用于智能结构振动监测的系统等。图6为南京航空航天大学进行的飞机座舱降噪综合控制的系统结构。该系统采用主、被动一体化结构,可以综合主动和被动振动控制的优点。由于控制了结构振动,由结构振动引起的辐射噪声也得到了有效抑制;该项研究还结合了小孔吸声等方法,使噪声得到更好的抑制。

当前智能结构面临的主要问题包括:智能结构的多学科性带来的一体化问题;许多智能材料未标准化,性能信息了解不全面;结构的重量、成本、可靠性及可服务性等问题。针对上述问题,未来智能结构的研究方向将主要集中在新的控制方法、新型的智能复合材料、宽频带大位移驱动、系统集成和传感/驱动元件的优化配置等方面。

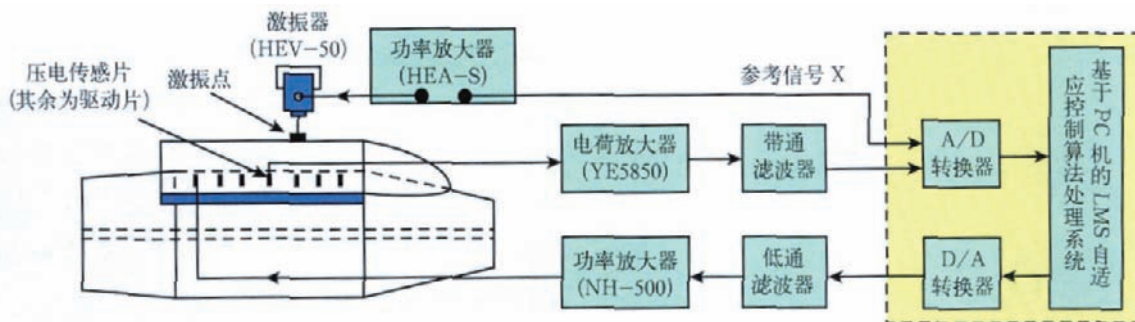


图6 飞机座舱减振降噪系统结构框图

传播,有利于维护旅客及机组人员的健康和乘坐的舒适性。减振降噪智能结构是保证飞机安静飞行的一项重要技术,各国都投入大量资金进行研究。如在波音777-300ER中,研究者利用形状记忆合金制成可变面积的发动机锯齿形零件以降低发动机中的气流剪切及噪声; Lord公司利用磁致伸缩材料研制的一套智能减振系统,已经安装在飞机发动机支架上并证明可以降低20dB以上;南京航空航天大学智能材料与结构研究所利用压电元件结合振动主动控制技术,成功地抑制了飞机座舱模型的振动及噪声;该所还利用长周期

结束语

本文简要分析了大型飞机及航空航天领域测控技术中的几个关键问题,介绍了无线传感器网络技术、航电系统总线技术、结构健康监测与健康管理系统,以及智能蒙皮和智能结构技术的研究成果,总结了各自研究存在的问题并指出了上述技术的发展方向。

注:本文有参考文献40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)