

# 现代飞机综合试验与测试 技术研究

## Synthetic Experiment and Testing Technology of Modern Aircraft

中航工业第一飞机设计研究院 高亚奎 支超有 张 芬



高亚奎

中航工业第一飞机设计研究院副总设计师,研究员。博士生导师,享受政府特殊津贴。主要从事飞行控制与系统仿真技术研究。

在现代飞机的设计研制中,按照研制工作的要求,完成零部件的生产后,要求开展零部件的试验,以检验零部件的生产是否满足设计要求;随后进入对零部件的组合和互联阶段,综合功能相对独立的子系统或分系统。同时开展子系统或分系统的试验,验证组成子系统或分系统的

面对现代最新飞机系统综合试验中测量点分散、测试参数种类多、数据信息量大、数据处理和信号分析复杂的现状,采用开放分布式测试系统,具有模块化、柔性化、组合化特点;具有广泛的适用性,满足多种测试环境要求,提供多种测试性能,融合多种信号测试能力;具有良好的灵活性,根据客户需求改变测试系统的功能及性能,采用多种技术满足测试要求;具有良好扩展性,伴随相关技术的发展,保证应用系统的先进性,实现测试能力的不断进步,满足飞机系统综合试验的发展对测试不断提出的分布式、智能化、信息化、数字化要求。

零部件之间接口关系是否兼容和协调一致,验证子系统或分系统的功能和性能是否满足设计、规范、标准的要求;在完成子系统或分系统的验证试验之后,开展系统的综合试验,验证子系统或分系统之间接口关系是否兼容和协调一致,以及从飞机整机的角度全面验证飞机系统的功能和性能是否满足设计、规范、标准的要求。

现代飞机系统综合试验中,综合的系统越来越多、综合程度越来越高、交互关系越来越复杂,试验中测试技术向着开放分布式、智能信息化和模块柔性组合化的方向发展。

### 综合试验现状及发展趋势

国内外飞机设计制造公司在飞机(如 F-35、B787、B777、A380、A-400M、A320/340、LCA、EMB-170/190、Dornier 728、M346)设计研制中,不管是战斗机、运输机,还是客机,各公司一律选择了建造“铁鸟”综合试验台方案,完成飞控系统、液压系统和起落架控制系统的综合试验,有时也包括了电气系统和综合航电系统。

如美国波音公司在最新飞机波音 787 的研制中,建造了综合试验设施 ITV (Integration Test Vehicle,

ITV)。综合试验设施 ITV 目的就是在系统以及部件安装到飞机以前,发现综合中的问题,以便供应商有时间进行修正。综合试验设施由飞控系统、液压系统、飞行控制台、航电系统和维护系统的真实部件组成,系统部件能够无缝联结综合在一起;配置有 3 套完整的飞行控制电子装置,可以同时联接到液压系统,或者联接到飞控系统部分或全部作动器;通过模拟液压源和飞控系统的作动器来开展单项试验,支持硬件和软件的综合;供应商与波音共同建造,建立公共通用接口,以便由不同的供应商提供的试验台可以在一起工作;具有良好的可移动性和可重复使用。同时具有体积小、重量轻优点,相当于波音 777“铁鸟”的 1/3,只有 75t 重。

欧洲空中客车公司在其最新飞机 A380 研制中,同样建造了“铁鸟”试验台,用于设计、综合、优化和验证飞机的飞行控制系统、液压能源系统、起落架及其控制系统、综合航空电子系统、飞机电气系统等关键系统。在“铁鸟”综合试验中,完成飞行控制系统中机械运动的线位移、角位移、拉压力、扭矩、转速,电压信号、数字量、开关量等数据总线信号等信号的测量;完成液压能源系统流体特性压力、流量、温度信号的测量;完成起落架及其控制系统流体特性压力、流量、温度信号,机械运动线位移、角位移、力信号等的测量;以及完成综合航空电子系统中数据总线信号和飞机电气系统中电量信号的测量。

美国洛克希德·马丁公司在其最新飞机 F-35 研制中,也建造了类似“铁鸟”试验台的综合试验设施 ITV,在 F-35 飞机系统综合设施 VSIF (Vehicle Systems Integration Facility) 飞机各系统的综合试验中,开发了能够采集各种数据的综合系统,这些数据包括:模拟量、数字量、视频和通过反射内存来自其他系统

的数据。此外,还需要实时显示功能,和能方便地管理来自系统传感器的数据。

为了满足上述要求,在 NI 公司的硬件和第三方工具的基础上,开发了用户软件。系统成功的关键因素是将分布在飞机系统综合试验 VSIF 室的 5 台 PXI 机箱通过 PXI-6653 进行同步无缝连接。甚至在工程研制的中间阶段,提出要求实现在 3 个操作位置同时控制数据采集操作,通过使用柔性软件和标准组件,实现了上述要求。PXI 平台允许对系统的通道进行 60% 的扩展,以便满足将来的需要。飞机系统综合试验 VSIF 数据采集系统通过多台服务器实现分布式操作,以保证负载的均衡和满足平台的需要,分布式的软件结构提供了 6 个客户应用节点,以满足将来扩展的需要。

先进的软件结构和 NI 硬件,为洛克希德·马丁公司的飞机系统综合试验提供了高度灵活配置、可扩展的系统,满足目前和将来 F-35 系统综合试验的需求。

在飞机设计研制的验证试验方面,国外已经向着综合化、虚拟化和数字化方向来发展。其“铁鸟”综合试验中,综合的系统越来越多,各系统之间交互越来越多,交互关系越来越复杂,“铁鸟”台架结构越来越简单,并且在“铁鸟”综合试验中越来越多地采用了数字化技术。

### 开放式测试系统框架

飞机系统综合试验中将飞行控制系统、液压系统、起落架控制系统、航电系统、电气系统等多个功能系统综合在一起。从信号测试的角度看,对飞行控制系统而言,需要完成反映飞行控制系统机械运动的线位移、角位移、拉压力、扭矩、转速信号的调度和测量记录,在静态试验项目的测量中,这些信号表现为缓慢稳态的变化,而在动态试验项目的测量中,这

些信号变为连续的瞬态变化,这就要求既要能完成信号的测量记录,也能进行多通道、高速、连续的数据采集,以及进行多通道的信号分析。为了兼顾到飞行控制系统上述稳态变化和瞬态变化信号的测量记录,优选的方法是使用基于 PXI 总线、VXI 总线、甚至 CPCI 或 PCI 总线的测试系统。

飞行控制系统内部传输的电压、数字量和开关量等信号反映飞行控制系统状态变化,对这些信号的测量则使用基于 LXI 总线的数字多用表等测量设备,既能适应输入量程范围宽,又能在进行高精度测量的同时进行连续的数据采集记录。而对飞行控制系统内部各设备之间数据信息传输是通过机载数据总线(如 ARINC-429、MIL-1553B、AFDX 等)实现的。这就要求配置相应总线板卡的基于 PXI 总线、CPCI 总线和 VXI 总线的测试设备,对机载数据总线信息进行检测记录分析处理。

对液压能源系统而言,需要完成流体特性压力、流量和温度信号的测量,以及在起落架及其控制系统试验中,需要完成流体特性压力、流量、温度信号和机械运动线位移、角位移和力信号等的测量。对温度等缓慢变化信号的测量中可以使用基于 LXI、工业以太网、CAN 和 RS-485 现场总线的现场数据采集模块,而对于脉动压力等高速变化瞬态信号的测量则要求采用 PXI 总线、CPCI 总线和 VXI 总线的测试系统,以便进行多通道、高速和连续的数据采集。

综合航空电子系统中电磁信号和数据总线信号的检测可以使用基于 LXI、GPIB 总线的智能仪器,以及基于 PXI 总线、CPCI 总线、VXI 总线的数据总线信号测试设备。

上述针对不同种类和特性信号测量记录系统由多种测试总线组成,是典型的混合总线测试系统。飞机系统的综合试验及其信号检测如图

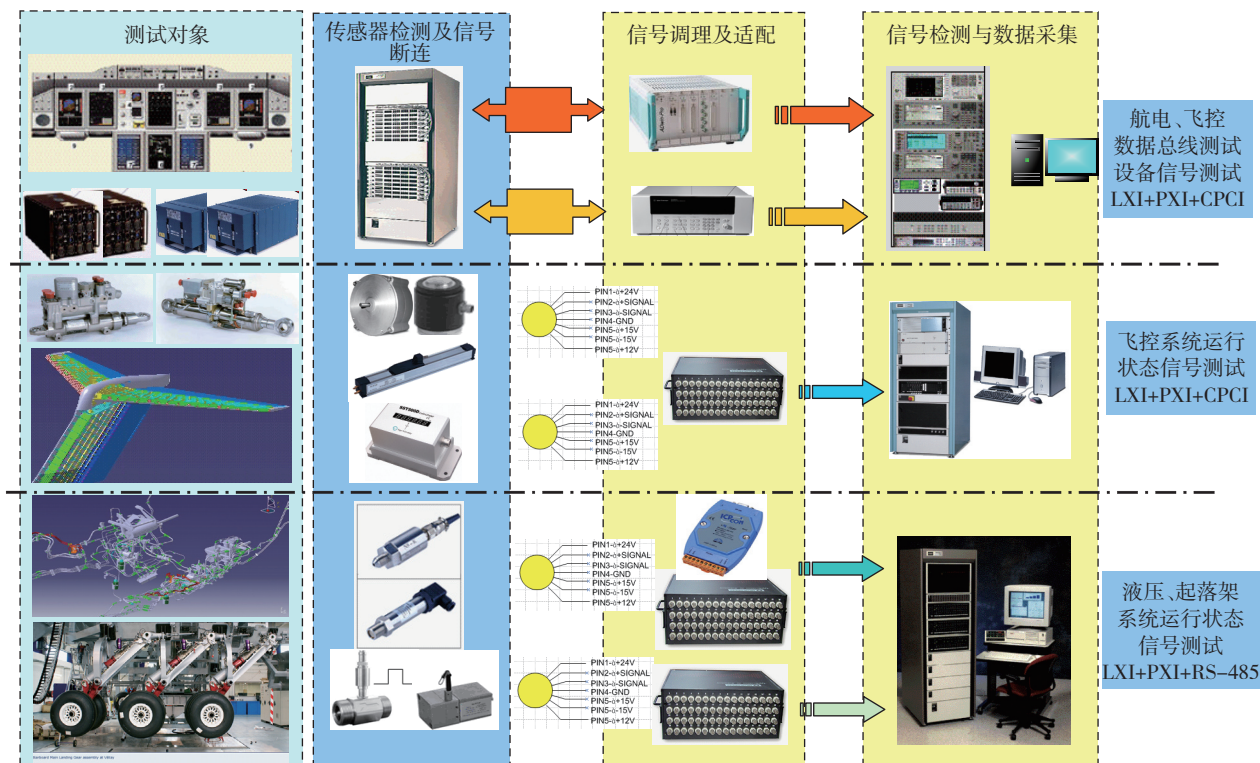


图1 飞机综合试验及其信号检测

1 所示。

飞机系统综合试验是一项大型、复杂工程,试验对象复杂、分散,信号采集和控制终端节点呈现开放式、网络化、分布式趋势,配置和使用仪器、设备多,众多设备或子系统是在不同的硬件、软件异构环境。如何保证设备有序、协调一致工作是综合试验顺利进行的基础和保障,其有效方法就是对异构的软件、硬件,应用网络技术、测控总线技术与现场总线技术构建通讯支持平台并对其综合,组建综合试验开放分布式测试系统具有如下优点:良好的开放性、可互操作性、可移植性、良好的扩展性和适宜性,其符合分布式、智能化、信息化、数字化的发展趋势。

开放分布式测试系统分为测试应用层、分布式支撑层和执行层。其设计融合了多种结构设计技术,系统首先按部件实现的功能进行层次划分,再采用面向对象技术对各层中的功能组件进行封装和组织。同层功

能对象之间通过对象接口进行信息和数据交互,而层间对象则通过标准交互接口进行通信。此外,各节点上的测试调度管理系统之间是以客户/服务器机制进行工作的;位于应用层中的测试控制与测试应用之间也是客户/服务器的关系,而此时的核心系统则相当于中间件。总的来说,开放分布式测试系统。

基于上述思想,飞机综合试验开放分布式测试系统框架如图 2 所示。

对开放分布式测试系统而言,构建于硬件之上的操作系统将作为具体测试计算任务的执行中心,是分布测试的最终承担者。执行结构层为上层提供了运行平台,是整个开放分布式测试系统运行的基础。由各种异构的测试设备及系统所组成支撑核心层负责整个系统运行的调度、管理和信息处理工作,包含了数据与通信中间件、测试调度管理系统、服务集和标准化接口等组件。其中,数据与通信中间件为开放分布式测试系

统内核提供了统一的数据处理场所和跨平台工作机制,它们隐藏了不同网络系统间的差异,通过多种通信协议来实现测试模型和数据在节点间的透明分布。测试调度管理系统根据测试任务的具体要求来确定最佳测试策略,并对测试的执行过程进行控制。

标准交互接口界面是实现测试应用层与分布式系统支撑层沟通的桥梁,通过接口的标准化设计有利于实现系统分布的透明性和系统模型的可重用性等功能。

对于应用层负责测试任务的执行和管理。从水平方向来看,应用层分为 2 类,测试应用类和系统监视与控制类,其相互关系类似于具有中间件的客户/服务器模型。系统监控类作为客户,向用户(操作人员)提交系统实际运行时的性能数据和和其它相关信息;测试应用类作为服务器,进行具体的测试运算工作。测试应用类作为测试任务的具体实现,采

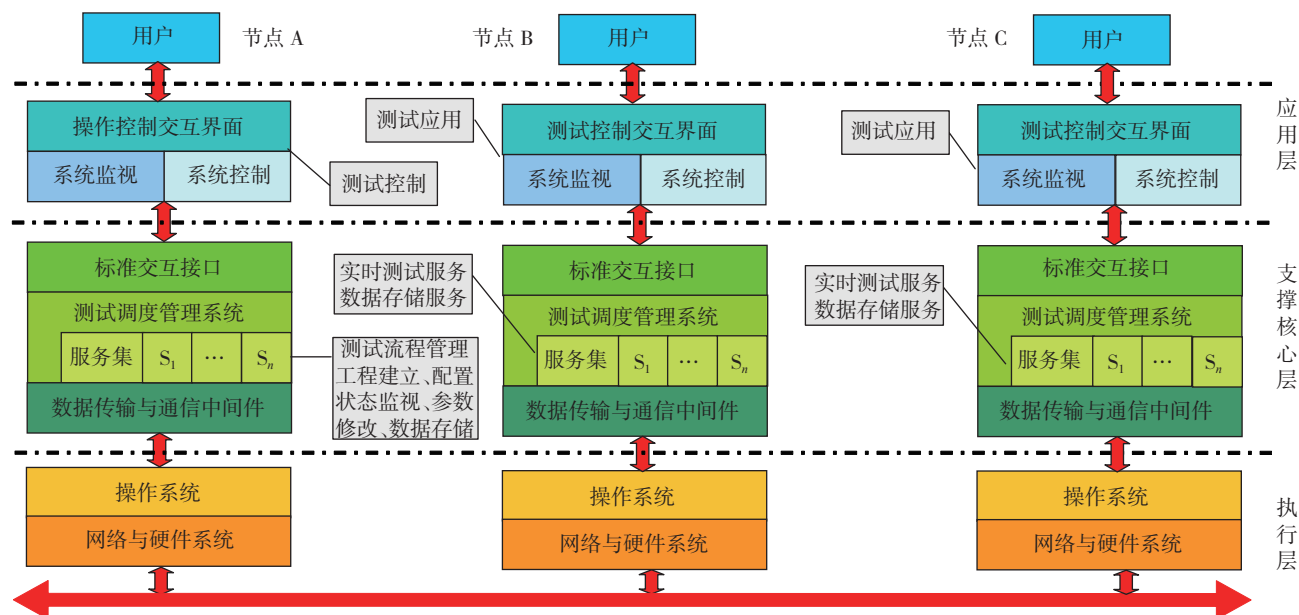


图2 开放分布式测试系统框架

用面向对象和模块化技术对测试任务进行分解和分布,并提供了一系列的与测试计划相关的功能。

### 开放分布式测试关键技术

开放分布式测试系统的综合中涉及混合总线技术、同步控制技术、实时数据交换技术、数据资源管理和试验知识管理等技术,其中同步控制技术、实时数据交换技术是实现开放分布式测试的关键。同步控制用于同一总线的测试系统中测试任务之间的同步,实时数据交换技术用于异构测试系统之间的数据交换以及协同运行。

#### 1 同步控制

同步控制是开放分布式精确测量的基础和保障,独立的测试设备或同一机箱内部仪器模块之间同步通过设备内总线实现,已经获得广泛的应用。这里,重点讨论不同测试设备或测试系统之间的同步,常用的同步控制包括基于 LXI 总线测试系统之间的同步,以及 PXI 总线测试系统之间的同步。

一般的网络定时协议 NTP(Network Time Protocol) 只能达到毫秒级的精度, LXI 采用了 IEEE

1588/Precision Time Protocol(PTP),用于分布式系统中各节点的同步实时时钟。

PTP 能保持多设备之间的同步,在千兆以太网达到毫秒级以下的精度,在模块之间达到纳秒级的精度。PTP 适用于多通道、分布式的测试场合。

PTP 精确定时实现步骤如下:

(1) 主时钟节点向网络中的所有其它装置节点发送同步脉冲和当前时间,所有从装置节点把它们的时钟设置到主时钟。

(2) 各从设备节点发送时间戳记应答主装置节点,主装置节点计算同步脉冲源发送时间和不同接收时间之间的偏置量。

(3) 主装置节点向各从装置节点发送偏置值,以补偿主装置同步脉冲与从装置接收时间的差值。

在经过这一初始调准后,周期性的同步脉冲就可以保持从装置节点与主时钟节点间的精确同步,从而使测试系统能适应最严格地分布式测量应用的要求。

在 PXI 总线的测试系统中,对于多通道、不同种类的信号的测量记录中,往往使用配置有各种各样的数

据采集模板的多台 PXI 机箱组成分布式的测试。在这种混合信号的数据采集中,其关键是保证采集系统的同步,对分布式系统同步的实现使用 IRIG 时钟信号,在每个 PXI 机箱配置 PXI-6653 同步仪器模板,将 PXI-6653 同步板以星型的形式连接到时钟源,以提供启动脉冲和 10MHz 的时钟。

启动脉冲用于控制各 PXI 机箱中仪器模板工作的启动,以便开始数据采集记录,10MHz 的时钟用于各 PXI 机箱中仪器模板扫描的同步,保证了在同一时钟控制下的数据采集操作。

#### 2 实时数据采集与数据分析处理

不同测试设备或系统之间数据交换的有效方法通过实时网络实现,实时网络是 20 世纪 90 年代兴起的一种依靠光纤线缆连接起来的高性能、高吞吐量的局部实时通信网络。它采用先进的硬件控制技术,并利用系统总线在网络节点间自动维护一个逻辑上全局共享的内存空间,用户通过对共享内存空间的读写来实现网络节点间的数据交互和信息共享。实时网络与普通网络的最大区别在于共享内存区的维护和数据

的刷新不需要用户或软件的参与,而完全靠硬件系统自身来完成。

反射内存网实际上是在每台被连接的计算机里都安装一块反射内存卡,各反射内存卡通过光纤或者同轴电缆进行连接。这些卡形成一个连续的环状结构,反射内存卡之间通过自定义的网络协议进行通信,各个反射内存卡在逻辑上共用一段地址。在反射内存网络中,反射内存存在物理上分布于各个计算机中(反射内存卡中),逻辑上共享同一段内存地址。任何一台计算机都可以像访问普通内存一样方便地访问共享的反射内存。由于反射内存网络采用了简化的网络协议,所以具有非常高的传输速度,一般在微秒的量级上。

对反射内存网络中的计算机而言,根本不用考虑反射内存卡之间的传输问题,从而极大地减轻了计算机的工作负担。一旦反射内存网络中的任何一台计算机向反射内存写数据,改写的数据立刻以很高的速度通过高速光纤或同轴电缆传输到其它网络节点的复制共享内存。也就是说,数据的传输物理上完全专享高速专用网络。整个数据复制过程没有总线冲突,没有耗时的协议开销,也没有不可确定的数据破坏。各处理器之间的通信速度和访问内存的速度一样快,从而保证了整个系统的实时性。

### 测试组件设计及功能实现

通过对试验测试过程的分析发现,其测试过程可分为不同的几种类型,而每种类型试验测试过程,可抽象归纳为不同测试操作。利用面向对象的分析思想,将各种测试操作进行分类抽象,就形成一些基本的公共操作,将这些公共操作设计为测试组件。试验测试中,按照试验测试的要求,通过选择组合配置这些基本的测试组件。首先,形成完成测试工作的测试任务;其次,对测试任务的执行

完成数据采集,记录存储工作,接着进行完成数据处理;最后,完成测量结果的输出。

下面对试验中测试组件进行详细说明。

**User Interface(用户接口组件):** 提供用户操作接口功能,负责系统的配置、仪器的控制、对象的创建,管理测试任务的执行以及执行的顺序,图形曲线的显示、分析等。

**Test Configure(试验配置组件):** 根据试验测试任务的要求,选择仪器模块,定义测量通道和通道所对应的传感器,设置测量通道转换系数,定义测试操作以及执行顺序,实现满足要求的专用测试系统。

**Test Execute(测试执行组件):** 测试执行在于对测试定义的实现,完成特定测试任务所要求的数据采集工作,根据测试定义的要求,记录保存各测量通道的采集数据。

**Sensor Calibrate(传感器标定组件):** 定义并实现了传感器的标定中数据采集和转换系数的计算。

**Device Calibrate(设备校准组件):** 定义并实现了仪器设备的校准中数据采集和转换系数的计算。

**Digital Multi Meter(数字多用表组件):** 定义并实现虚拟数字多用表功能,用于对传感器信号的监视,以及测量数据记录保存。

**Digital Scope(数字存储示波器对象类):** 定义并实现虚拟的数字存储示波器功能,用于多通道连续数据采集、记录,以及监视。

**X\_Y Curve(数字化 X-Y 记录仪组件):** 定义并实现虚拟数字化 X-Y 记录仪,在连续的数据采集记录中,得到相关物理量之间的图形曲线。

**Instrument(仪器组件):** 定义了仪器的量程范围、测量信号的类型(如模拟量、数字量、开关量)和仪器的状态等属性,以及相应的设置、初始化、关闭、读、写方法等。

**Measurement(测量组件):** 负责

向仪器读取信号,采取不同的测量策略,并将测得的数据转换成测试分析需要的形式。

**Data Acquire(数据采集组件):** 根据试验任务的要求,完成数据采集工作。

**Data Process(数据处理组件):** 按照各测量点传感器的标定系数,将测量通道所记录的电压值转换为物理量值,进一步按照传感器安装的空间位置及与测量点的传动关系,得到测量点的测量结果。

**Data Analysis(数据分析组件):** 定义并实现了时域数据分析、频域数据分析,完成自相关、互相关,自谱、倒谱、功率谱等分析功能。

**Graph Display(图形曲线显示组件):** 以图形曲线的形式显示所采集记录的信号,或者是存储所采集记录的数据结果;根据对所记录采集数据生成图形曲线,提供光标控制的图形曲线分析方法,完成对图形曲线的标注和分析。以及打印输出满足要求的图形曲线,并完成对图形曲线标注数据的输出,打印输出符合试验报告的结果报表。

### 结束语

面对现代最新飞机系统综合试验中测量点分散、测试参数种类多、数据信息量大、数据处理和信号分析复杂的现状,采用开放分布式测试系统,具有模块化、柔性化、组合化特点;具有广泛的适用性,满足多种测试环境要求,提供多种测试性能,融合多种信号测试能力;具有良好的灵活性,根据客户需求改变测试系统的功能及性能,采用多种技术满足测试要求;具有良好扩展性,伴随相关技术的发展,保证应用系统的先进性,实现测试能力的不断进步,满足飞机系统综合试验的发展对测试不断提出的分布式、智能化、信息化、数字化要求。

(责编 三丰)