

# 综合试验分布式协同控制 管理技术\*

## Distributed Coordination Control Management Technology for Complex Test

中航工业第一飞机设计研究院 支超有 安 刚 李 霞



支超有

中航工业第一飞机设计研究院飞控液压综合试验室主任。从事飞机飞行控制系统、液压与起落架控制系统试验及其测试工作,国家重点型号综合试验主任设计师,主要研究方向为航空工程试验及其测试技术。

飞机设计研制中的铁鸟综合试验是飞机设计研制中必不可少的环节,是对飞机的飞行控制系统、液压系统和起落架控制系统等全面的检查和验证,对飞机研制成功与否有着关键作用。特别是大型飞机的铁鸟综合试验中,验证系统越来越多,正在向着综合化、数字化、虚拟化、网络

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和硬件资源,应用计算机技术、网络技术、测控总线技术、现场总线技术和数据共享与管理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协同控制管理系统。

化的趋势发展。如何在大型飞机的铁鸟综合试验中开展并行协同试验,以提高试验效率,缩短试验周期,节省试验经费,已经成为开展大型飞机的铁鸟综合试验考虑的关键因素。

大型飞机的铁鸟综合试验是一项大型、复杂的工程试验。试验中需要完成飞行控制系统的驾驶舱操纵分系统、电传飞行控制分系统、自动飞行控制分系统、高升力控制分系统和机械操纵分系统的试验,及飞行控制系统综合试验;液压系统的液压能源分系统、液压综合控制管理分系统、液压舱门控制分系统的试验,及液压系统综合试验;起落架控制系统的起落架收放控制分系统、前轮转弯控制分系统、机轮刹车控制分系统的试验,及起落架控制系统综合试验。在上述基础上,还需要开展飞行控制系统、液压系统、起落架控制系

统、航电系统、供电系统和机电管理系统之间的交联试验,试验项目有数千项。

另一方面,试验中还配置和使用众多的仪器、设备,如铁鸟试验台架、飞行仿真系统、线加速度转台、三轴转台、动静压模拟器、发动机驱动泵模拟装置、多通道协调加载系统、流量负载模拟系统、温度模拟控制系统、位移信号发生器,数据采集系统、动态信号分析系统等测试设备和液压能源泵站等。上述设备有序、协调一致工作是综合试验顺利进行的基础和保障,如何对试验参试设备进行高效、有序、正确地监控和管理也成为试验进行的关键。同时,试验对象越来越复杂、越来越分散,信号采集和控制终端节点呈现开放式、网络化分布式趋势,各个终端节点常用灵活,具有丰富数据处理能力、易于实

\* 航空科学基金(2011ZD03016)资助。

现控制和性价比很高的计算机系统构成,并配置为功能强大、软件编程简单、界面友好的平台。

综上所述,现代飞机系统综合试验中,被试系统越来越复杂、综合程度越来越高,试验支持设备也越来越多、功能结构更加多样化、交联关系越来越复杂,运行控制难度越来越大,这就要求设计研制面向综合试验要求的综合控制管理系统,以更快、更准确、更方便地完成试验。综合试验控制管理系统向着开放分布式、智能信息化、模块柔性组合化的方向发展。

### 分布式协同控制管理系统框架模型

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和硬件资源,应用计算机技术、网络技术、测控总线技术、现场总线技术和数据共享与管理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协同控制管理系统。这种方法具有良好的开放性,可互操作性,可移植性,良好的扩展性和适宜性,并符合分布式、智能化、信息化、数字化的发展趋势。

开放分布式协同控制管理系统设计融合多种结构设计技术,系统首先按部件实现的功能进行层次划分,分为测试应用层、分布式支撑层和执行层。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,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,开放分布式协同控制管理系统。基于上述思想,所构建飞机综合试验开放分布式协同控制管理系统框架模型如下图1所示。

对开放分布式协同控制管理系统而言,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,是整个开放分布式协同控制管理系统运

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协同控制管理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。

应用层负责测试任务的执行和管理。从水平方向来看,应用层分为两类,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

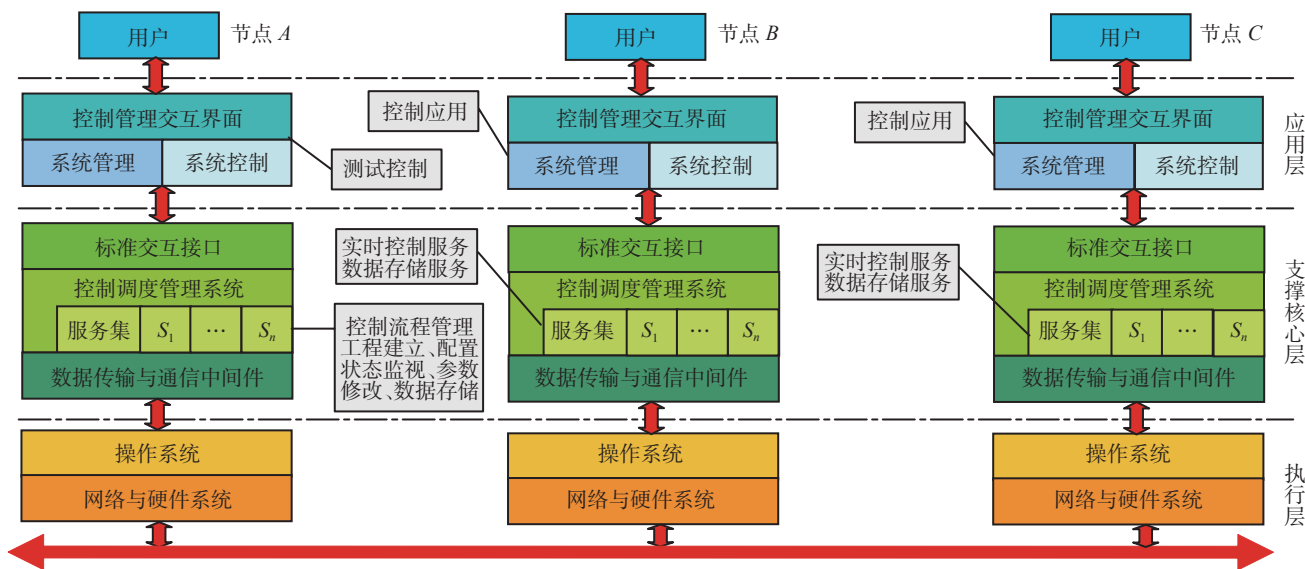


图1 开放分布式协同控制管理系统框架模型

类作为测试任务的具体实现,它采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。

### 分布式协同控制管理系统框架结构

按照上述综合试验开放式控制管理系统的模型框架及实现的功能,综合试验控制管理系统由多个功能模块组成,而一个功能模块则由一个或多个功能单元按一定关系构成。综合试验控制管理系统功能可分为基本功能和扩展功能两大类。综合试验控制管理系统基本功能指为实现一个基本综合试验控制管理系统所必须具备的人机接口交互界面、应用服务和数据传输核心和逻辑控制等系统功能;综合试验控制管理系统扩展功能是根据应用系统的需要而增减的功能。综合试验控制管

理系统框架结构如图 2 所示。

人机接口交互界面封装各种用户界面信息,实现客户端的人-机交互操作,主要由图形界面、Web 浏览器、控制接口组成。主要目的是为用户提供人-机交互接口,包括为用户提供各种文字、图片、视频及声音交互接口。一般情况,提供有静态接口,但当与实时数据、历史数据实现动态连接,提供对用户有用的交互界面,接收各种实时、历史数据,并将用户通过交互界面下达的控制命令、数据检索需求等各种要求传送到通信通道,从而真正实现用户与设备、数据库的数据交互。

应用服务层作为用户层与设备数据层的中间层,将二者隔离,保证因用户要求变化而产生的相互影响,同时也保证一个设备与多种用户界面关联的实现,该层根据综合试验控制管理系统特点,主要由领域服务和

交互服务组成。

领域服务构件封装与各种设备实体相对应数据对象、视频对象和声音对象等。领域构件收集了所有设备的配置信息、当前状态信息以及历史信息,通过各种通道(Internet、现场总线等)为各种用户接口提供服务,并将采集的实时信息按系统要求存储到数据库中,以及传输显示在用户的图形界面和浏览器,同时也负责将各种用户控制、配置信息传送到设备数据层。

这里并不是所有用户层的交互界面、接口都能直接访问领域构件。与用户远程访问通道紧密相关,通常只有与领域服务构件具有统一数据传输协议的各种专用软件,才能通过广域网或局域网直接访问领域服务构件,而各种 Web 或 WAP 浏览器的客户端则需要通过交互服务构件实现对领域服务构件的间接访问。由

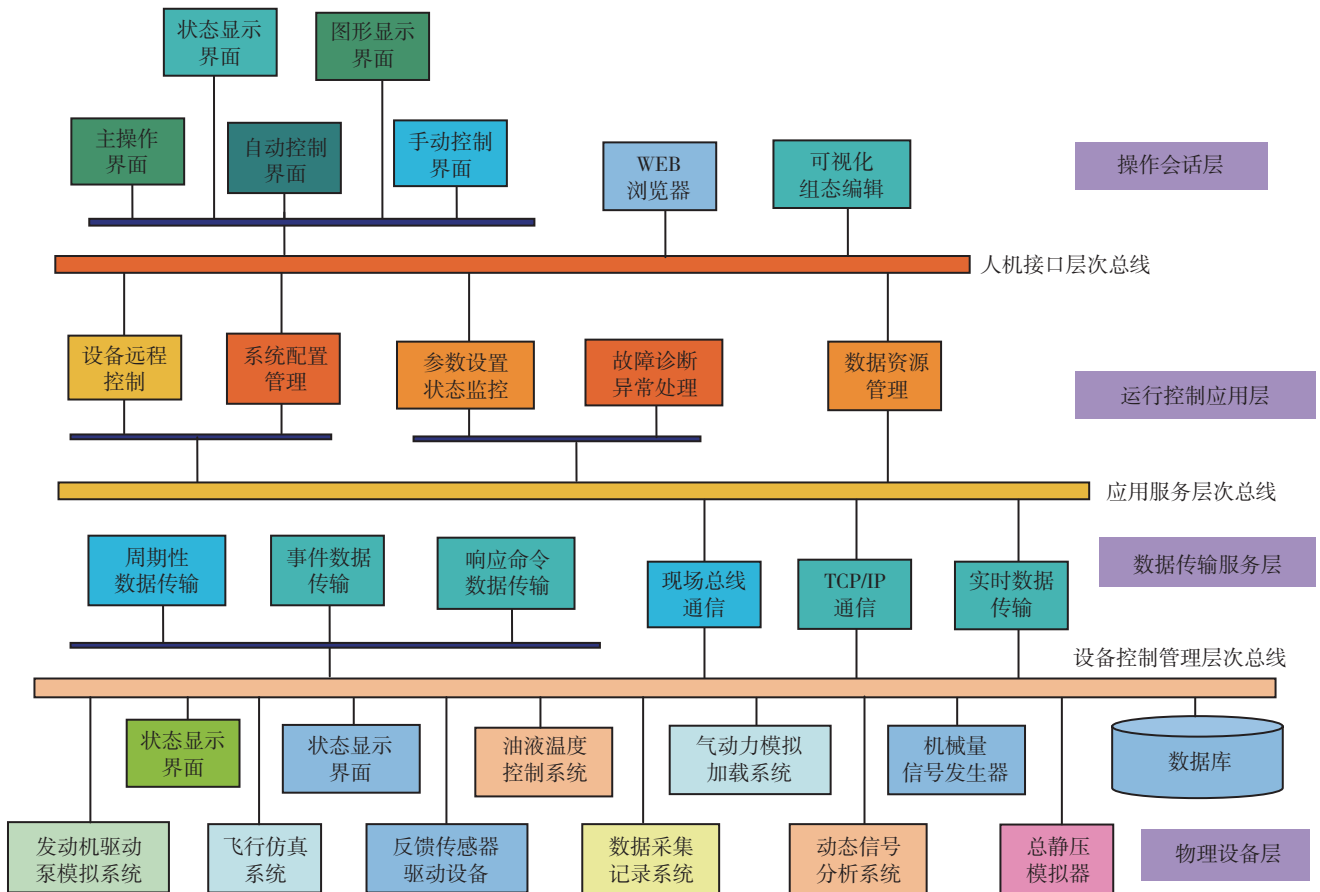


图2 综合试验控制管理系统框架结构

于使用通信通道、浏览器各不相同,各种用户接口具有不同的交互风格,数据传输格式各有不同。

领域服务构件作为基本处理核心,通过与其关联的各个接口的数据交换,实现访问该构件的众多方法。考虑到领域服务涉及到各种工位数据、视频及声频信号,该构件包括多个接口,当然,随着各种应用的需要变化,用户可相应增加新的接口。当需要与各种设备进行数据交换,它通过数据接口实现与数据库和设备管理构件的数据交换,或者通过数据接口传送实时和历史数据信息,并接受各种控制命令、数据检索查询要求。

交互服务构件的主要功能便是为各种类型通用客户终端提供交互服务,将其服务请求转换、传输给领域服务构件。同时,将领域服务构件的响应转换、传输给相应的客户端,简单说,就是起到了各种不同风格的交互方式与领域服务构件交互方式的转换作用。

在应用服务层中,将交互服务和领域服务分离,一方面将保证领域服务的稳定,使其受交互方式的影响降到最小,另一方面,也为交互方式的扩展提供了方便的接口。随着计算机、通信新技术的发展,无法预期将来会使用何种方式进行综合试验控制管理。目前,用户在应用层的 Web 浏览器中,可从 Web 服务器下载静态或动态超文本标记语言(HTML)、无线标记语言(WML)、可扩展标记语言(XML)页面,或者从服务器下载包含嵌入的 Applet 小客户应用程序、基于 JavaBeans 构件结构的构件的页面,相应的在交互服务构件中利用 Java 服务器页面(JSP)技术或 Servlet 技术提供相应服务。

在用户层和应用服务层之间存在大量的数据通信,虽然在编程语言的实现上各有差异,但在基本结构上却有很多相似点,都使用基本的客户服务器计算模型,即 C/S 通信框架。

设备控制管理层作为应用层,是综合试验控制管理系统运行的关键部分。所有的操作都是在这一层实现的,它若需要获得用户指令或更新用户界面,则需要通过应用服务层来进行处理。

该层主要包括设备构件和数据库两部分,设备构件包括各种设备驱动和设备实体,通过设备管理、数据采集和控制构件,为应用服务层提供设备状态和实时数据服务。数据库作为信息存储基础,在部分综合试验控制管理系统中使用,通常用于存储各种设备的配置信息和历史数据信息。

设备控制管理构件为外部提供各种数据及服务,包括与工作需要密切相关的设备管理、设备更新策略、设备通信策略。设备更新策略包括各种设备数据实时更新,在设备通讯中实现数据更新;由用户控制实现的数据更新;设备周期性轮巡实现的数据更新。设备通信策略包括各种设备通信策略,其子类分别使用 OPC、DDE、基本 I/O 通信实现数据通信的策略。当然,这里并没有概括全所有的通信策略,用户可根据实际应用情况生成新的子类。

综合试验控制管理系统扩展功能对基本综合试验控制管理系统在功能上加以扩展或在性能上加以提高,形成用户所需的综合试验控制管理应用系统。而状态监控、故障诊断等可以提高系统性能,以及增强综合试验控制管理系统的功能。在综合试验开放式控制管理系统中,应用系统的可伸缩性主要是通过增加或减少相应的扩展功能模块来实现。

### 资源协作及设备协同控制管理

综合试验控制管理系统功能的实现是围绕试验任务的进行而完成的。在试验任务的过程中,多项试验任务并发执行,易产生共享资源的冲突,从而导致死锁、饿死的发生,且由

于试验的并发性,上述问题往往难以再现,加大了并行试验难度。为了避免上述问题的发生,从并行试验任务的分解、任务的调度和试验资源的分配三个主要环节入手,研究试验各资源相互协同的工作机理,实现试验资源的合理配置与试验任务的优化调度和并行试验中设备的协同控制管理。

在并行试验资源协作中引入 Agent 技术,由于 Agent 技术所具有的自治能力、智能和目标驱动属性,能够通过各种交互、学习、推理等方法感知和适应复杂的动态环境,以及自动追求目标等能力特性。能较好地解决并行试验资源竞争问题。将并行试验各相关资源看作智能元 Agent,研究并行试验多智能元 MultiAgent 的协作机理入手,为并行试验协同控制管理打下基础。图 3 为并行试验协同控制管理总体框架。

并行试验协同控制管理逻辑分配各项试验任务、控制管理试验支持设备,按照试验任务对象间的交联关系,以并行试验效率最高和系统成本最小为目标,对试验任务进行分解。然后,根据子任务需求资源矩阵,采用 Multi Agent 协作与竞争的方法构造合理的资源—任务匹配矩阵 RCM (Resource Task Matrix),资源—任务匹配矩阵主要用来表征不同子任务占用资源的状况,完成资源的分配。最后,系统根据子任务粒度大小及任务优先级等多种标准,进行任务调度与试验协同控制管理,实现并行试验。

上述并行试验协同控制管理中试验的任务分解、资源分配、任务调度等工作可以视为多智能元活动过程,这种并行试验多 Agent 的模型框架包括四层:任务分解调度 Agent、任务 Agent,资源 Agent 和接口 Agent。

任务分解调度协同控制管理 Agent 是系统的核心。将多个复杂的试验任务分解成若干粒度较小的

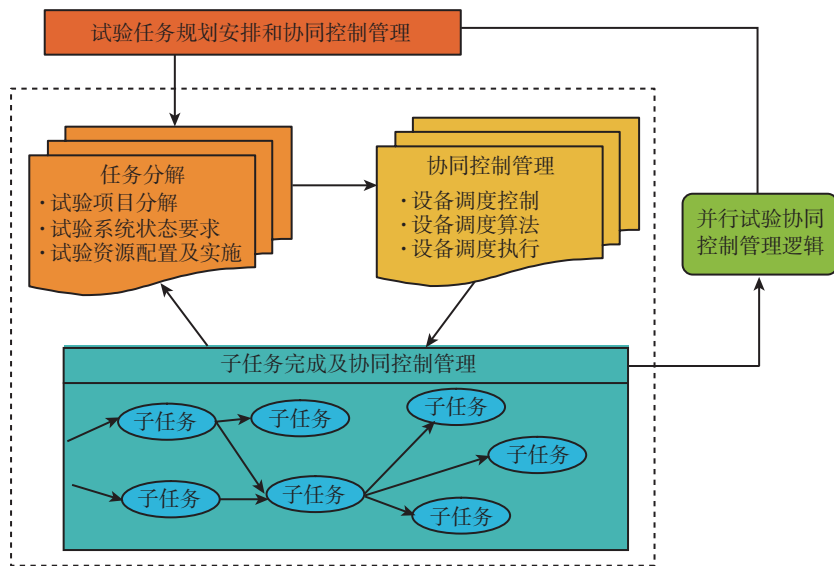


图3 并行试验协同控制管理总体框架

子任务,并按照这些子任务控制管理最适宜的资源运行,这是并行试验区别与传统顺序测试的一个显著特征。主要涉及到子任务的粒度控制、子任务的管理、子任务资源的分配、子任务的最短截止时间和子任务的最低松弛时间等问题。

**任务 Agent:** 其主要功能是工作过程的定义、控制过程实例的执行(包括创建、激活、暂停和终止等)、任务的调度、工作流控制、数据的维护以及执行过程中的管理和监控等。当启动一项试验任务时,与之相对应就创建一个任务 Agent。

**接口 Agent:** 其主要功能是完成试验对象与系统间的接口关系连接,是构造并行试验资源—任务匹配矩阵的基础。

**资源 Agent:** 它与系统所有资源相关联,如测量仪器、控制设备、试验能源、人机接口、输入/输出设备等。当任务 Agent 要访问数据资源或使用某个设备时,它就向与之相关的资源 Agent 发送请求,资源 Agent 负责管理匹配的资源,将操作结果返回给任务 Agent。资源 Agent 还包括一个特殊的子类共享资源 Agent,它是多任务可以共同申请使用的资源 Agent,是任务间可能发生的冲突所

在,因此是系统设计的关键。

下面分析并行试验协同控制管理中多 Agent 协同工作机理。系统每启动多个试验任务流程时,任务分解调度 Agent 就创建一个任务 Agent,并读取试验流程数据库,将相应的参数传输给任务 Agent。任务 Agent 解释试验执行过程,在执行过程中,它与资源 Agent 和接口 Agent 交互协商完成并行试验协同控制管理任务,具体过程如下。

(1)任务 Agent 询问资源 Agent 和接口 Agent 能否参与活动、完成分配的任务,任务 Agent 在询问过程中需将任务信息传递给资源 Agent 和接口 Agent。任务信息包括:任务名称、任务描述、任务优先级、任务的截止时间和任务的最低松弛时间等。

(2)资源 Agent 根据某种策略计算能否接受分配的任务。若为真,则将该任务记入任务列表中,并向任务 Agent 发送任务就绪通知,否则,任务 Agent 只能处于阻塞等待状态。

(3)任务 Agent 在某个时刻通过接口 Agent 连接相应的测试通道处理分配的任务。

(4)资源 Agent 完成任务处理后,给任务 Agent 发送一个任务完成通知。

(5)任务 Agent 计算活动变迁条件,然后根据计算结果激活后继活动。

在并行试验协同控制管理中,多个子任务的执行是一项复杂的过程,如前所述,多个子任务同时处于运行状态,有可能同时要求某个共享资源 Agent 的参与。为解决这个问题,可以按照任务的截止时间和最低松弛时间等参数给每个子任务分配一个优先级,当出现冲突时,共享资源 Agent 可以处理优先级别较高的子任务,而推迟执行优先级别较低的试验任务。

在多个子任务执行过程中,当某个资源 Agent 不能接受安排的任务、或者要求延迟处理时间,任务 Agent、资源 Agent 和接口 Agent 之间要通过任务分解调度 Agent 反复协商。实际中,可以采用不同的协商算法,如选择另外一个子任务、允许延迟处理任务或增加子任务的优先级等。

多智能元 Multi Agent 系统由多个自主、半自主的 Agent 组成,具有较强的自治与协作能力,将 MultiAgent 协同工作模型及协同工作机理引入并行试验协同控制管理中,可有效解决并行试验任务分解、资源分配与调度等复杂问题。

### 结束语

面对现代飞机系统综合试验被试系统越来越复杂、综合程度越来越高和试验支持设备越来越多、功能结构多样化、交联关系复杂的现状,采用开放分布式协同控制管理系统,满足多种试验环境对控制管理的要求,具有模块化、柔性化、组合化特点,以及广泛的适用性、良好的灵活性和扩展性。随着分布式、智能化、信息化、数字化技术的发展,保证了应用系统的先进性,实现综合试验控制管理能力的不断进步,满足飞机系统综合试验的发展对控制管理不断提出的要求。

(责编 日午)