

# 虚拟试验支撑框架 VITA 研究与实现

彭健, 赵雯, 章乐平, 贾长伟, 蔡斐华, 张丽晔, 许昶

(中国运载火箭技术研究院 研发中心, 北京 100076)

**摘要:** 虚拟试验验证技术可为复杂航天产品的试验验证提供有效的技术支持。结合航天产品研制过程对虚拟试验验证技术的需求, 开展了虚拟试验支撑框架 VITA 研究与实现; VITA 系统由运行中间件及系列辅助工具集组成, 实现对虚拟试验应用系统“试验设计—试验运行—试验分析”全生命周期的支持; 全面介绍了 VITA 运行中间件、集成开发环境、试验设计、试验调度管理、试验记录与回放、试验结果分析、试验数据管理、异构网关、硬件网关等各模块的实现方案, 给出了其在航天复杂产品试验系统互联中的应用情况; 实践表明 VITA 支持对产品关键系统的技术性能验证, 有效解决了产品难以开展大系统联合试验的难题, 后续将完善跨平台功能、提升实时性指标, 实现产品化推广。

**关键词:** 虚拟试验验证; VITA; 运行中间件

## Research and Implementation of Virtual Test and Evaluation Enabling Architecture

Peng Jian, Zhao Wen, Zhang Leping, Jia Changwei, Cai Feihua, Zhang Liye, Xu Chang

(China Academy of Launch Vehicle Technology R&D Center, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Virtual test and evaluation technology can effective support the test validation of complex aerospace products. A research and implementation of VITA (virtual test and evaluation enabling Architecture) is carried out, to meet the technology needs of the development of aerospace products. The VITA system is composed of runtime middleware and a series of auxiliary tools to support the full life cycle of the “test design—test run—test analysis” of the virtual test application system. This paper introduces the implementation of VITA, include runtime middleware, integrated development environment, test design, dispatching management, test data record and playback, test result analysis, test data management, software gateway, hardware gateway and so on. VITA is used in the process of product’s development, application shows that VITA supports the verification of the technical performance for product’s key systems, and effectively solves the product’s large—scale joint test problem.

**Keywords:** virtual test and evaluation; VITA; runtime middleware

## 0 引言

复杂航天产品的复杂程度高、设计难度大、研发周期短、试验次数尤其是飞行试验次数少, 试验验证技术作为其研制过程中的重要手段发挥着关键作用。传统的研制模式依赖大量地面试验的验证, 使得研制周期和经费要求高, 且经常存在设计反复, 在当前研制周期和技术发展的迫切需求下, 存在一定局限。现有试验验证手段的缺乏和试验验证水平的滞后, 无法为复杂航天产品研制过程的顺利开展提供支持, 近年来提出的虚拟试验验证技术可以弥补传统研制模式的不足。虚拟试验验证是一种基于数字样机模型的复杂产品关键系统试验数据产生、获取和分析的系统工程过程, 以建模仿真、虚拟现实和知识工程方法为基础, 在一个由性能模型、耦合环境、流程引擎和可视化交互机构成的数字化试验平台中模拟真实产品的物理试验过程。美国国防部开发了试验与训练使能体系结构 TENA (test and training enabling architecture, TENA), 以提高虚拟试验验证中的互操作、可重用性和组合性, 它可以根据具体的任务将分布在各实验室和靶场设施中的试验、训练、仿真和高

性能计算资源集成起来, 构成多个联合试验验证的“逻辑靶场”。

结合我国航天产品的研制过程对虚拟试验验证技术的需求, 航天一院提出了一套完整的虚拟试验验证使能体系框架 VITA (virtual test and evaluation enabling architecture)<sup>[1-2]</sup>。本文对虚拟试验验证使能体系框架 VITA 进行了技术实现, 主要介绍 VITA 支撑框架研究与实现情况, 包括其系统组成及主要技术特点, 重点介绍系统实现方案及其在飞行器研制过程中的应用情况。

## 1 虚拟试验支撑框架 VITA

### 1.1 系统组成

虚拟试验支撑框架 VITA 作为虚拟试验验证的共性技术支持平台, 主要用于解决复杂航天产品研制试验过程中的异构性、实时性、可交互性等问题, 对试验验证过程进行规范化, 并具有灵活性、通用性、实时性及可扩展性的特点, 能满足工程应用或跨行业应用中的扩展需求。

VITA 采用对象化、层次化思想描述了试验运行支撑、试验数据管理和应用系统构建方法, 实现对虚拟试验应用系统“试验设计—试验运行—试验分析”全生命周期的支持。其核心是 VITA 运行中间件, 以及集成开发环境、试验设计、试验调度管理、试验记录与回放、试验结果分析、试验数据管理、

收稿日期: 2017-01-19; 修回日期: 2017-02-16。

作者简介: 彭健(1983-), 女, 湖南常德人, 高工, 主要从事虚拟试验、系统仿真技术方向的研究。

异构网关、硬件网关等系列辅助工具集，系统组成如图 1 所示。

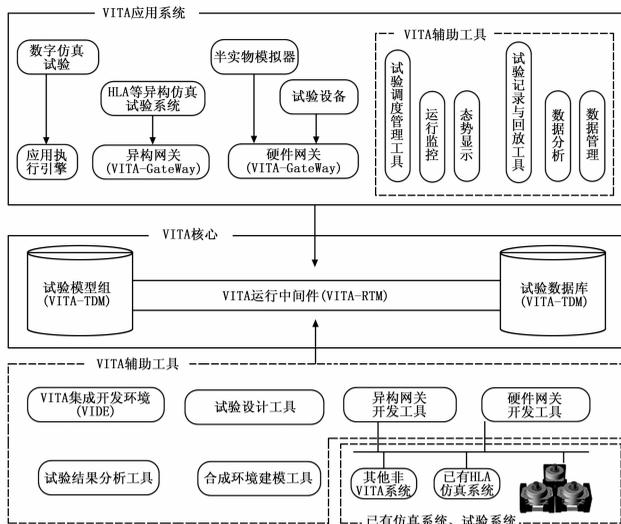


图 1 虚拟试验支撑框架 VITA 系统组成

### 1.1.1 试验设计阶段

VITA 提供了虚拟试验规划工具完成试验模型的配置，利用 VOM 生成工具和 VIDE 集成开发环境完成对象模型的生成和试验流程的构建，提供的试验分析工具进行实验设计。

### 1.1.2 试验运行阶段

VITA 为虚拟试验应用提供全程的试验控制和信息收集和监控功能。包括：自动集成分布在网络上的试验模型；通信管理工具和试验过程监控；试验过程记录回放；异构系统的接入；硬件系统的实时访问；动态、实时试验数据收集存储等。

### 1.1.3 试验分析阶段

VITA 为虚拟试验应用产生的数据提供了进行分析的工具。通过试验结果分析工具可以对单次试验产生的数据进行初步的比对分析，如曲线、图表、均值、方差、实物试验数据和虚拟试验数据比对分析等；对多次运行的试验过程，可在试验设计工具中进行参数灵敏度、近似模型分析和模型参数趋势分析等。

## 1.2 技术特点

在 VITA 基础上可以进行航天复杂产品的单机虚拟试验和全系统集成虚拟试验，从产品整体性能的角度考核各系统协同工作的能力，为分系统及总体的设计方案验证提供支撑。其主要技术特点包括：

1) VITA 运行中间件采用安全可靠的应用程序接口构建虚拟试验应用，提供分布式对象通信能力，实现了虚拟试验应用逻辑和通信解耦、互操作，提高虚拟试验的开发效率，缩短开发周期，降低试验系统开发成本。

2) 虚拟试验分布式对象描述语言元模型描述了虚拟试验分布式对象的类和数据结构，以及它们之间的关系，实现了虚拟试验分布式对象的标准化描述，有助于虚拟试验分布式对象的重用和组合，实现试验资源的充分利用。

3) 虚拟试验对象模型构建过程中采用框架代码自动生成的方式，完成对象模型从描述语言文本到标准 C++ 语法格式的对象模型框架的转变，减少了应用开发人员的工作量，提高

了应用开发效率。

4) 试验数据管理系统在虚拟试验过程中对虚拟试验分布式对象模型、试验资源和试验数据等数据存储管理服务进行统一管理，充分实现了试验资源的共享和可重用。

5) VITA 工具集提供了在现有模型资源和中间件基础上快速对虚拟试验进行方案设计和运行的工具，便于对试验过程进行管理，增强了本平台在使用过程中的友好性。

6) VITA 采用了层次化的平台结构，通过分层次设计的支撑平台，可以充分实现平台的灵活性、通用性，平台中目前已包含了开展虚拟试验所需的基本模块，接口开放，可从各个层次进行工具扩展。

## 2 系统实现方案

### 2.1 VITA 运行中间件

VITA 运行中间件 (VITA-RTM) 是在试验运行期间为试验对象、试验资源提供实时通信的平台，用以解决异构试验系统间的互联、互通、互操作问题<sup>[3]</sup>。软件提供 4 类服务和 4 种组件，4 类服务为 VITA 对象模型管理、VDL 编译服务、时间管理服务及 VITA 资源动态监控服务，4 种组件为 VITA 发布订购组件、VITA 消息处理组件、VITA 实时组件及 VITA 模型运行组件，功能结构如图 2 所示。

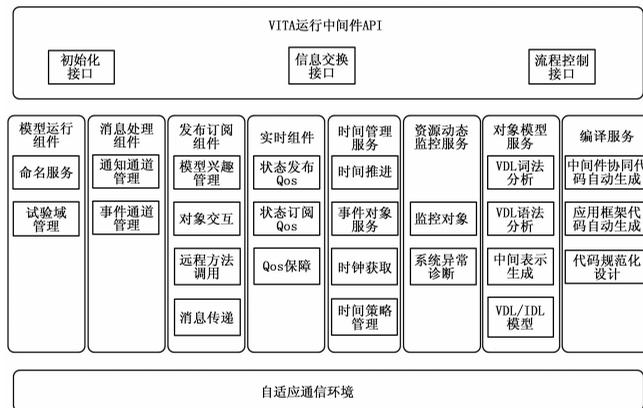


图 2 VITA 运行中间件功能结构

针对 4 类服务，虚拟试验运行前需要建立虚拟试验模型，为实现虚拟试验建模与虚拟试验应用运行的松耦合，VITA 为虚拟试验开发了特定的建模语言 VDL (VITA Design Language, VITA 定义语言) 和应用程序开发配置文件 XML。VITA 对象模型管理，负责维护对象模型元模型定义等信息。VDL 编译服务，负责将试验对象建模 VDL 文件，编译为可在 VITA 中间件上运行的试验对象 C++ 程序框架。时间管理服务，负责保证整个试验能够正确有序的进行，时间管理服务的时间推进机制包括基于反馈的时间推进机制和保守的时间推进机制两种。VITA 资源动态监控服务，负责为整个虚拟试验场景提供一个实时监控的功能。

针对 4 种组件，VITA 发布订购组件，负责为试验对象提供交换数据的发布订购模式，保证对象的正确交互和基于类型等形式的兴趣管理，并提供远程方法调用功能。VITA 消息处理组件，负责试验对象进程、代理进程和监控进程等各种进程之间的信息传递、交互和管理。包括：通知通道管理，负责创

建与维护通知通道, 供试验应用程序传输数据使用; 事件通道管理, 负责创建与维护事件通道, 供试验应用程序传输数据使用。VITA 可以提供通知通道和多事件通道两种传输数据的传输方式, 为确保数据传输的实时性和可靠性, VITA 实时组件为通知通道和多事件通道提供可靠 QoS 传输服务。VITA 模型运行组件, 负责加载试验对象, 并对试验对象进行远程管理。包括: 命名服务, 负责为 VITA 对象模型实例提供透明定位, 用于划分不同的试验域及试验域内部结构; 试验域管理, 负责试验域的创建、销毁, 试验域内应用的注册、加入和退出。

### 2.2 集成开发环境

集成开发环境 (VITA-IDE) 是虚拟试验验证的集成开发环境, 集模型编辑、模型代码自动生成、模型测试、想定编辑、应用框架代码自动生成、应用测试等功能于一体, 以提高模型构建效率, 提供模型测试手段和模型复用基础<sup>[4-5]</sup>。以在应用构建和执行过程减少用户编码为目标, 为中间件提供工具支撑, 提高应用的可靠性和开发效率。

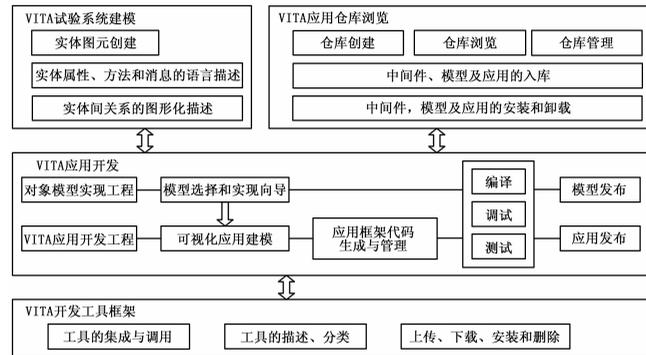


图 3 集成开发环境功能结构

如图所示, 集成开发环境主要分为 VITA 试验系统建模、VITA 应用仓库浏览、VITA 应用开发和 VITA 开发工具框架等模块, 其中 VITA 应用开发又具体分为对象模型实现、VITA 应用建模、VITA 应用框架代码生成、代码测试 4 个子模块。

### 2.3 试验设计工具

试验设计工具通过试验设计方法生成虚拟试验样本, 在 VITA 平台上运行, 对得到的多种试验结果进行分析处理, 通过试验分析获取对试验因子与性能指标之间影响关系, 通过评估方法给出试验方案的综合定量评价, 给出虚拟试验方案优劣的综合判据, 辅助系统用户做出合理决策。系统的设计思路是: 首先, 完成试验的整体规划, 形成试验方案; 然后, 通过试验设计方法生成试验样本, 并依据试验样本运行试验方案。系统的整体架构如图所示。

VITA 试验设计工具主要由试验方案编辑器、试验样本生成工具、试验运行控制器三部分组成, 以及与 VITA 对象模型库、VITA 试验设计库、VITA 中间件的接口。其中, 试验运行控制器负责将试验设计系统与集成开发环境、试验调度管理系统、试验数据记录与回放系统连接起来, 完成完整的虚拟试验。

### 2.4 试验调度管理工具

试验调度管理工具对多次和单次运行的综合试验进行动态

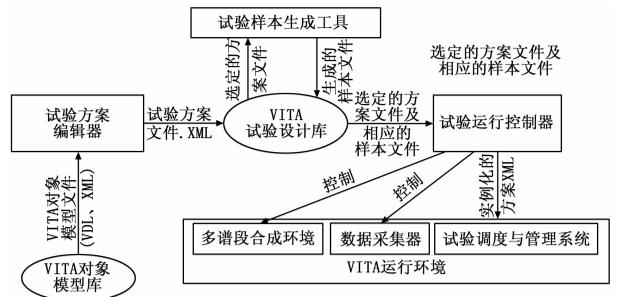


图 4 VITA 试验设计工具结构

管理, 管理实体对象、控制和驱动试验过程推进, 使试验的分发、部署和运行控制更为方便, 有效提高试验运行效率。

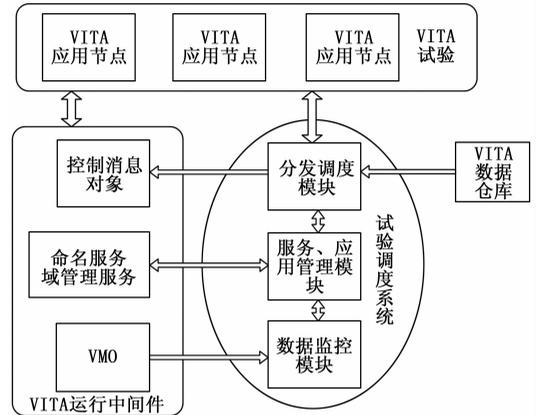


图 5 VITA 试验调度管理工具模块交互图

VITA 试验调度管理工具主要包括 3 个模块:

- 1) 试验分发与调度模块。试验分发与调度模块主要负责 VITA 试验应用的下载、分发、部署、运行控制、管理等;
- 2) 试验数据监控模块。试验动态与静态信息监控模块主要负责从 VITA 运行中间件获取静态信息以及实时的动态信息, 然后显示与工具界面上供用户浏览, 达到数据的实时监控和统计的目的;
- 3) 服务及应用管理模块。试验服务管理模块主要负责中间件服务的封装, 服务的启动配置、控制以及域、应用的运行管理。

### 2.5 试验记录与回放工具

数据记录与回放工具主要用于对 VITA 中间件上产生的虚拟试验过程数据进行收集、保存和回放, 并为下一步的试验数据分析与挖掘以及可视化展示提供数据支撑。数据记录回放系统比照集中式记录回放工具 MAK DataLogger 设计, 采用全收发模式, 其总体结构如图所示。

数据记录回放系统由数据记录回放工具生成器及数据记录回放工具组成, 其中数据记录回放工具由数据记录回放工具生成器根据 VITA 应用自动生成。

数据记录与回放工具生成器由 5 个模块组成, 分别为数据记录回放设置模块 (含用户界面)、数据记录代码生成模块、数据回放代码生成模块、数据处理代码生成模块及数据上传/下载代码生成模块。其中数据记录回放设置模块为用户设置需要记录的 VITA 应用系统信息提供可视化的编辑手

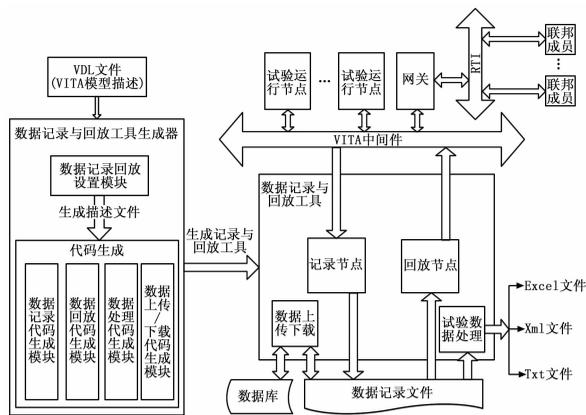


图 6 数据记录回放系统总体结构

段；各代码生成模块根据用户的配置生成相应的数据记录回放工具代码。

数据记录回放工具由试验数据记录节点、试验数据回放节点、试验数据处理工具和数据上传下载共 4 个模块组成。试验数据记录节点对试验过程中的所有数据进行记录；试验数据回放节点依据记录的数据文件对试验过程进行回放；试验数据处理工具支持将记录数据文件导出并按需求转换格式；数据上传下载模块调用数据库接口实现数据文件到数据库的上传下载。

### 2.6 试验结果分析工具

试验结果分析工具从 VITA 试验数据库中获取试验运行结束后对应试验设计系统设计的试验方案的试验结果数据文件，采用结果分析算法库中提供的处理方法从灵敏度、数据统计、相关性等方面进行分析，最终得出分析结果报告。

VITA 试验结果分析工具包括试验结果数据管理、试验结果数据分析方法配置、试验结果数据分析方法等功能模块，总体框图如图 7 所示。

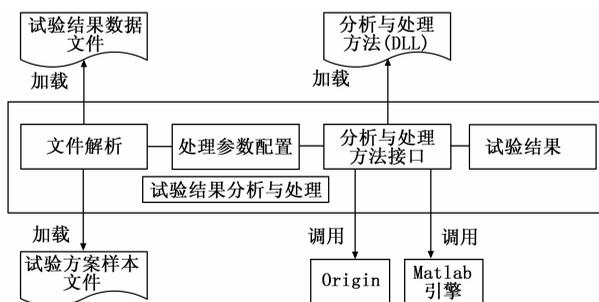


图 7 VITA 试验结果分析工具总体框图

#### 2.6.1 文件解析

从 VITA 试验设计库加载选定的试验方案文件及对应的试验样本文件，解析出参与试验的实物因子及对应相关的信息。加载 VITA 试验结果数据库的试验结果数据文件，解析出试验后的实体相关因子及实体属性数据以及运行过程中的动态信息。

#### 2.6.2 处理参数配置

提供需要进行数据分析的实体属性配置界面，从众多实体属性中选择出需要进行数据处理的属性，并自动匹配出试验方

案、样本中的试验因子及水平选择。

#### 2.6.3 分析与处理方法接口

通过分析与方法接口实现与具体数据处理方法软件 的连接。对于 .dll 形式的灵敏度分析、数据统计分析方法，采用直接加载的方式，通过调用的方式实现；对于饼图、趋势图等显示模式，采用调用 Origin 接口实现；对于相关性分析具体方法，采用调用 .dll 形式文件或通过调用 Matlab 引擎实现。

### 2.7 试验数据管理系统

试验数据管理 (VITA-TDM) 系统是集数据管理和流程管理于一体的综合系统，主要为 VITA 中间件提供数据支撑<sup>[6-7]</sup>。通过对设计模型、仿真数据、试验数据和试验流程的统一管理，实现海量数据的存储共享和分析处理，试验任务的分发和进度监控。基于三层应用服务体系架构，兼容多种实物试验数据和虚拟试验数据格式，并具备 SOAP 标准接口，提供强大的扩展 API。

### 2.8 异构网关工具

异构网关工具是 VITA 的异构仿真系统接入工具，实现对已有 HLA 对象资源的集成和重用<sup>[8]</sup>。可应用于仿真、试验及虚拟试验领域中各类 HLA 异构模型资源的接入，提高大系统跨平台应用的构建效率，促进对象模型资源的重用。VITA/HLA 异构网关运行在 VITA 中间件与 HLA RTI 之间，既作为 VITA 系统中的一个应用节点，同时又是 HLA 仿真资源中的一个联邦成员，通过应用节点和联邦成员间的数据映射，实现异构系统间的数据转发。

### 2.9 硬件网关工具

硬件网关是 VITA 的硬件接入工具，实现实物设备与数学模型的联合试验。可应用于半实物仿真和虚拟试验领域中实物设备接入试验平台的场合<sup>[9]</sup>。支持各种转台、舵机等实物设备，及等效器、弹上机等半实物设备。硬件网关采用通用实物设备接入技术实现，通过协议的灵活配置，实现实物设备虚拟试验验证平台的快速无缝集成，在解决了多种传输协议异构性问题的同时，实现了用户“零代码”编写，缩短了虚拟试验验证应用的开发周期；同时，由硬件协议转换器实时的完成协议匹配及转换，满足虚拟试验常用实物设备接入的实时性要求。

## 3 应用情况

虚拟试验支撑框架 VITA 已在航天复杂产品关键系统半实物仿真与实时仿真试验系统互联中得到应用，可应用于工业部门的多系统联合验证、异地试验系统构建、试验场或靶场间跨地域的大系统互联等领域<sup>[10-11]</sup>。

以某飞行器虚拟试验系统应用过程为例，在试验准备阶段由 VITA 平台进行试验规划，确定试验方案，然后由总体及分系统分别建立虚拟试验模型并设定试验参数。在试验运行阶段，各分系统在 VITA 平台的统一调度和管理下按照飞行时序开展试验，各分系统通过数据接口接收 VITA 平台发出的指令及数据，并将 VITA 平台所需数据实时反馈给平台。在试验评估阶段，VITA 平台调用各分系统的数据进行数据处理，在平台上进行数据显示和回放，对试验数据进行分析并对试验结果进行评估。分析评估结束后，试验数据和试验分析报告统一上

传至 VITA 平台的统一试验数据管理系统。



图 8 基于 VITA 的系统级联合虚拟试验

实践表明 VITA 支持对产品总体、控制、力学环境等关键技术的技术性能验证,有效解决了产品难以开展大系统联合试验的难题。

### 4 总结

虚拟试验支撑框架 VITA 突破了以运行中间件为核心的多项关键技术,作为虚拟试验领域的共性技术和关键产品,主要功能及技术指标已达到国内领先水平,与同类产品相比具有辅助工具丰富、使用便捷、底层代码自主可控等突出特点。后续将大力开展系统应用测试,完善跨平台功能、提升实时性指标,并逐步开展产品化应用推广相关工作,扩大应用领域,推动军工行业虚拟试验验证水平的提高。

### 参考文献:

[1] 赵 雯, 彭 健. 复杂军工产品虚拟试验验证技术研究与发展 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (6): 1257-1260.

[2] 廖 建, 赵 雯, 彭 健, 等. 复杂产品虚拟试验支撑框架 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (4): 1249-1252

[3] 贾长伟, 廖 建, 彭 健, 等. 基于心跳监测机制的中间件监控方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (11): 3654-3655.

[4] 贾长伟, 莫怡华, 廖 建, 等. 面向虚拟试验的可视化对象建模工具设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (12): 4019-4021.

[5] 蔡斐华, 彭 健, 廖 建, 等. VITA 定义语言及其编译器的设计与实现 [J]. 计算机仿真, 2014, 7 (31): 283-286.

[6] 蔡斐华, 廖 建, 彭 健, 等. VITA/HLA 异构网关自动生成技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (12): 4101-4103.

[7] 蔡斐华, 褚厚斌, 张丽晔, 等. 通用实物设备接入技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 23 (5): 1810-1812.

[8] 郑小鹏, 张丽晔, 彭 健, 等. 航天试验数据管理系统的设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (12): 4154-4156.

[9] 张丽晔, 彭 健, 郑小鹏, 等. 试验数据统一访问技术研究 [J]. 计算机仿真, 2014, 9 (31): 319-322.

[10] 李 鑫, 郭 晶, 贾长伟, 等. 多谱段合成环境数据生成系统 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (11): 3783-3786.

[11] 郭 晶, 李 鑫, 彭 健, 等. 基于 SEDRIS 的虚拟试验合成环境建模技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (10): 3455-3457.

(上接第 254 页)

制其向目标中心移动,从而形成一个偏差值逐渐收敛的闭环控制,最终实现无人机精确稳定的自主降落。

### 3 试验结果与分析

为考察无人机在机器视觉辅助下自主着降的精度,本文对系统进行了试验。首先制作带有十字标识的目标板,置于空旷场地中。遥控搭载运动相机的无人机飞行之目标附近,启动自主着降程序。无人机将采集到的画面实时回传至地面站,地面站程序根据十字标识偏离图像中心的位置对无人机的姿态进行调节,使其向目标中心移动,直至无人机平稳降落至地面。试验过程如图 7 所示。

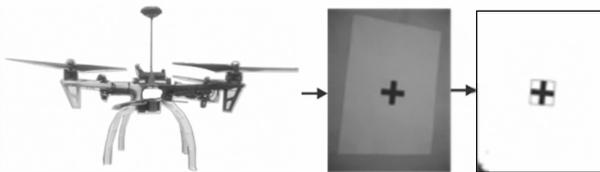


图 7 试验过程示意图

系统安装完成后进行五组试验,考察无人机降落的精度,即无人机降落后其中心与目标中心的偏差。将试验结果进行统计,如表 1 所示。

根据试验结果分析可以得出无人机自主着降系统的平均降落精度在 5 cm 以内。

### 4 结语

针对四旋翼无人机自主降落的需求设计了基于 LabVIEW

表 1 试验结果统计

组别	降落精度/cm
第一组	4.3
第二组	4.7
第三组	3.2
第四组	4.4
第五组	2.8

和机器视觉的自主着降系统,设计了便于识别的目的地标识,配合图传和数传模块实现了无人机的自主着降,且降落精度较高。对于四旋翼无人机的自主飞行具有一定的参考价值,能够应用在物流配送、高压线路巡查、测量测绘、地质勘探、交通监控等众多领域。

### 参考文献:

[1] 刘 刚. 基于视觉导航小型无人机自主着陆控制策略研究与应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.

[2] 李永健. 基于机器视觉的四旋翼无人机定点着陆系统设计与实现 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.

[3] 宋慧慧. 基于单目视觉的四旋翼无人机位姿估计与控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

[4] 方 胜, 李有森, 李魏魏, 等. 基于 NI Vision Assistant 的机器视觉在钢球表面检测中的应用 [J]. 仪表技术, 2008, (5): 27-29.

[5] 孟庆宽, 何 洁, 仇瑞承, 等. 基于机器视觉的自然环境下作物行识别与导航线提取 [J]. 光学学报, 2014 (7): 180-186.

[6] 董 玲, 杨洗陈, 雷剑波. 基于机器视觉的激光再制造机器人离线自动编程研究 [J]. 中国激光, 2013 (10): 114-121.