

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8874.2012.01.023

无人飞行器控制系统实验课程体系研究

曾庆华, 郭振云, 张为华

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

[摘要] 阐述了无人飞行器控制系统实验课程的教学特点, 分析了无人飞行器控制系统实验课程体系建设的原则, 提出了一种经过教学实践检验的无人飞行器控制系统实验教学体系, 进行了相应教学实验装置的开发, 该试验装置能够在组件级、系统级和试验评估级三个层次上组织实验, 可显著提高飞行器控制系统实验教学质量。

[关键词] 无人飞行器; 导航; 制导; 控制; 实验教学

[中图分类号] G642.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-8874(2012)01-0078-03

A Study of the Experimental Course of the Control System of the Unmanned Flying Vehicle

ZENG Qing-hua, GUO Zhen-yun, ZHANG Wei-hua

(College of Aerospace and Materials Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract: The teaching characteristics of the experimental course of the unmanned flying vehicle control system are described. The principles of the experimental course of the unmanned flying vehicle control system are analyzed. Its teaching system of unmanned flying vehicle control system experiment is proposed, which has been tested by teaching practice. On this base, a teaching device has been developed, which can organize the experiment in the three aspects from component, system, to experiment and estimation, thus improves the quality of the experimental teaching of the unmanned flying vehicle control system.

Key words: unmanned flying vehicle; navigation; guidance; control; experiment teaching

随着航空航天技术的迅猛发展, 过于偏重理论的传统教学方式受到了极大挑战。一方面, 航空航天企业需要大量的飞行器设计、导航、制导和控制等方面的专业技术人员, 无人飞行器控制系统设计方面的专业技能尤其受到重视; 另一方面, 各高等院校“重课堂、轻实践”的思想观念根深蒂固, 导致输送给航空航天企业的人才和工程实践活动脱节。有很多学生从本科阶段就开始从事飞行器设计或制导控制等相关专业的学习、研究, 但是, 直至博士阶段, 都很少接触实际的飞行器控制系统和相关的测试、仿真评估方法, 进入企业后, 这种状况严重制约了他们的研发活动。鉴于此, 我们针对航空航天相关专业研究生培养特点, 开展了无人飞行器控制系统实验课程体系的研究, 对实验条件建设、实验内容的组织与实施进行了全面地探索。

一、无人飞行器控制系统实验体系建设

飞行控制技术是现代飞行器设计中的关键技术之一。该项技术是伴随着飞行器技术的发展而发展的, 它经历了一个从人工控制、辅助稳定控制、遥控飞行、辅助导航控

制、自动飞行控制、主动飞行控制的发展历程。正是由于飞行控制技术的发展和运用, 派生出了无人飞行器的一个重要方向。在强劲的军事需求牵引下, 无人飞行器技术与飞行控制技术的迅速融合, 极大推动了无人机、导弹、运载火箭等的蓬勃发展。由于技术的进步, 特别是数字技术的飞速发展, 使得导航、制导和控制技术不断融合, 智能化程度不断提高, 集导航/制导与控制功能于一体的飞行控制系统已成为现代无人飞行器控制系统设计的主流, 飞行控制技术在飞行器系统中的核心地位也日益突出, 无人飞行器控制系统及其相关课程已成为了飞行器设计专业和导航、制导与控制专业的专业主干课程^[1]。一方面, 由于这门课程工程实践性很强, 仅仅通过理论学习, 缺少实践性环节的培养, 很难掌握飞行控制这门技术的精髓; 另一方面, 飞行控制系统的实验设备比较昂贵、专业性强、实验知识综合性强, 实验教学活动很难组织实施, 往往达不到所要求。因此, 如何提高飞行控制系统实验教学质量是当前急需解决的问题。我们认为: 要使飞行控制技术类课程实验教学满足理论和工程教学的要求, 就必须牢牢抓住飞行控制系统设计、研制特点, 将设计与研制过程中可能

[收稿日期] 2011-05-30

[作者简介] 曾庆华 (1966-), 男, 湖南安乡人, 国防科学技术大学航天与材料工程学院副教授, 博士, 硕士生导师。

碰到的实践性环节提炼出来,形成相关实验模块,让学员能够掌握这些基本的实验方法。通过对飞行控制系统组成结构、测试和评估方法的分析,不难发现:陀螺、加速度计、惯组、舵机是飞行控制系统中最常见的测量控制组件,制导律、控制律是飞行控制系统研究中的核心内容,半实物仿真方法是飞行控制系统中特有的性能评估方法。因此,飞行控制系统实验应围绕如下五个方面,按照组件级、系统级和试验评估级三个层次进行实验内容的组织,建立相对稳定和实用的飞行控制系统实验课程体系,具体包括^[2]:

(1) 系统层面。从全系统角度,了解飞行控制系统及其控制对象。方法是以某导弹飞行控制系统的实物为对象,为学员展示飞行控制系统的各个功能组件,了解组件实物;通过简单的功能实验,让学员深入理解飞行控制系统各组件及其系统的工作原理;利用 Matlab/Simulink 编程,熟悉和掌握控制对象——弹体运动模型。

(2) 敏感装置层面。从运动参数测量的角度,了解和掌握飞行控制系统中敏感装置的工程应用知识。方法是通过开设陀螺、加速度计和惯组的相关实验,让学员熟悉和掌握各种常用传感器的接口特性、标定测试方法、关键性能指标测试方法、误差模型辨识方法和导航解算算法等内容。

(3) 执行机构层面。从操纵飞行器运动的角度,了解和掌握飞行控制系统中执行机构的工作原理和工程应用方法。方法是通过开设舵系统实验,让学员了解舵系统的基本结构,熟悉和掌握舵面控制的极性测试方法、舵回路模型辨识方法等内容。

(4) 控制器层面。从制导律和控制律设计角度,掌握飞行控制器中制导律和控制律的工程实现原理。方法是通过开设单通道姿态控制实验和半实物仿真实验,让学员掌握飞行控制计算机程序实现原理、制导律和控制律设计、评估和验证方法。

(5) 性能评估层面。从试验评估角度,了解和掌握飞行控制系统的综合试验和半实物仿真试验原理。方法是通过开设半实物仿真实验,让学员了解和掌握飞行控制系统综合试验、功能验证与指标评估的基本方法。

二、无人飞行器控制系统实验装置开发

无数教学实践经验表明:当实验教学体系建立、实验内容基本确定后,实验教学质量的保证将和实验装置紧密相关。目前国内外飞行器控制系统领域的教学实验装置非常缺乏,可依托的大都是科研实验环境,或按照科研实验环境的结构组合搭建的实验环境。由于我国教学、科研经费失衡,绝大部分高校往往用数量有限的科研实验条件开展专业实验教学,最为典型的就是一套教学和科研共用的半实物仿真试验环境。即使是欧美名校,虽然其教学经费投入多,专业学习实践保障条件和体制完善,实验项目的设计主题往往也来源于科研,相关教学实验装置往往和科研结合紧密,实验器材多、杂、专,选择性太大、自主性太高,对学生专业综合素质要求很高,实验教学学时数要求很多。这些是目前国内外高校建设导航、制导和控制技术实验室及组织相关教学实验所普遍采取的方法。利用上述方法建成的飞行器控制系统实验室存在以下缺点:

(1) 由于实验设备采用科研实验环境或依据其结构进行搭建,设备造价普遍很高,台套数难以保证,且这类设备对使用者的操作要求高,学生很难参与到实验中来,导

致这类实验停留在演示层面;

(2) 缺乏实验内容的系统性设计和专用实验模块的开发,不能按教学实验大纲系统地安排实验,仅靠零散的导航、制导控制设备或针对性很强的专业级试验系统进行实验,直接导致实验内容不齐全、体系不完备,各实验内容之间联系松散,实验效果不理想。由于我国教育经费投入小、学生数量多、各院校基础参差不齐、实验保障条件不能得到全面保证,欧美培养模式是很难适合我国现有国情的;

(3) 缺乏专用实验操作软件,操作使用复杂,专业性强,实验中编程工作量大、相关技术要求较高,学生运用专业理论知识进行实验研究时额外工作量过大,实验效率低。

为了解决长期困扰飞行器设计相关专业的实验教学问题,我们对无人飞行器的导航、制导和控制系统组成原理进行了深入分析,结合长期从事飞行器总体设计、制导控制系统设计、仿真试验研究等方面的科研成果,研发了一套 ACE-1 型飞控实验装置,在组件级、系统级和试验评估级三个层次上组织实验,为学员搭建了一个实验内容相对独立、体系较为完备的开放式实验平台。该实验装置由弹体结构、简易弹载控制系统、综合控制台、转台、仿真计算机以及相应配套软件等组成。它不仅拥有一套包含惯组、舵机、控制器等主要功能模块在内的简易弹载控制系统,还拥有配套的测试实验设备、仿真设备和各种实验软件,从而能很好的完成敏感装置测量实验、舵系统控制实验、制导律与控制律实验以及半实物仿真实验等关键教学内容。ACE-1 型飞控实验装置还拥有功能相对全面、外形设计仿真度高、操作界面友好、使用方法简单、实验效果直观明了等特点,能极大的提高学员学习该课程的兴趣,有效的增强教学效果。在该实验装置的研发过程中,为了确保教学实验的有序进行,我们牢牢坚持如下原则:

(1) 强调实验内容的完备性。针对飞行控制系统典型组成结构,抽象出常用的敏感装置、执行机构、飞行控制器,将惯组、舵机、惯组等效器、弹体运动仿真器等实验资源进行合理配置和设计,建立了敏感装置实验模块、执行机构实验模块、弹载控制器实验模块、控制系统综合实验模块和用户自主设计实验模块共五大实验模块,可组织开展出飞行器控制系统原理演示实验、加速度计标定实验、陀螺标定实验、陀螺性能测试实验、捷联惯导解算实验、舵机极性测试实验、舵机静态指标测试实验、舵机时域响应实验、舵机频域响应实验、弹载控制器接口实验、制导律设计与评估实验、控制律设计与评估实验、视频制导实验、模拟飞行实验、半实物仿真实验和自主实验等十六个实验项目,确保了飞行控制系统实验内容的完备性。

(2) 低成本解决方案强调原理性。尽最大可能降低实验装置成本,使实验装置台套数得到保证,确保学员人人能够参与到实验中来。这是从三个方面来实现实验装置的低成本:一是选用低成本的飞控组件,如 MEMS 惯组、航模舵机、单片机等;二是利用网络技术对实验装置中的硬件资源进行管理,通过实验资源的分时使用降低成本;三是重点关注成本较高的三轴转台研制,简化其结构,降低其成本。

(3) 实验系统的跨平台性。无人飞行器是指人创造出来的能在大气层内或大气层外空间进行可控飞行的无人装置的总称,一般包括飞艇、无人机、火箭和导弹。各个高

校往往根据自身专业特点,只是重点讲解其中某一类无人飞行器。但随着飞行器技术的发展,各类无人飞行器的控制技术正在不断融合,导航、制导和控制技术也在向着一体化方向发展。因此,飞行控制系统实验体系的建设,特别是与之相关的实验装置,应脱离具体飞行平台或控制系统实现平台的约束,重在飞行器控制理论的实践教学,对各种无人飞行器及其控制系统具有广泛的适应性,关注于原理性实践活动。

(4) 实验的直观性与简便性。学员实验不同于普通的科研任务或项目,飞行控制系统实验一定要具有很强的直观性,以加深他们对原理的理解,还可以提高他们的学习兴趣;另外,应设置必要的硬件动手实验,但操作要简便,一方面可以加深认识,另一方面花费时间又不是很多,便于实验组织。在课程实验装置的研发中,基于 xPC 目标系统 PC104 作为飞行仿真器、控制算法等的运行平台,提供了一系列 Simulink 支持工具包,学生能够方便选用十五个实验项目的典型实验程序,或在自主实验模式下,利用 Simulink 软件编制实验程序。通过实验装置软件系统将实验程序自动下载到实时任务管理子系统,自动运行并实时收集实验数据,从而解决了导航、制导与控制技术实验中编程工作量大、相关技术要求较高等难题,使学生能够专注于专业理论的学习。

三、无人飞行器控制系统课程实验内容

通过研究飞行控制系统课程的特点,从专业实践教学活动的要求出发,我们将飞行控制系统实验课程的内容分为敏感装置实验模块、执行机构实验模块、弹载控制器实验模块、控制系统综合实验模块和用户自主设计实验模块共五大实验模块,并以此为基础,按照组件级、系统级和试验评估级三个层次实验组织的具体要求,设计了十六个实验项目。下面对其中的几个主要实验项目进行简要介绍^[2]:

(一) 导弹控制系统原理演示实验

它是一个原理演示性的实验模块,以实验装置缩比的导弹模型为对象,为学员展示飞行控制系统的各个功能组件,了解组件实物;通过简单的功能实验,让学员深入理解飞行控制系统各组件及其系统的工作原理。

(二) 加速度计标定实验

学员利用实验装置,控制转台分别转动到指定的 6 个位置,由测试计算机通过总线接口获取弹载控制器实时采集的 MEMS 加速度计信号,实验数据处理后进行加速度计误差模型的辨识。

(三) 陀螺标定实验

学员利用实验装置,控制转台分别沿陀螺的 3 个敏感轴以设定的角速度旋转,由测试计算机通过总线接口获取弹载控制器实时采集的 MEMS 陀螺信号,进行实验数据处理,建立陀螺误差模型。

(四) 捷联惯导解算实验

实验装置提供了一个标准弹道数据文件 FlyTrack. Txt,该文件是根据某飞行器仿真飞行而产生的数据文件。学员利用标准弹道数据文件提供的角速度信息、加速度信息来模拟惯组的实时测量信息,自己独立编制捷联惯导解算程序,利用该程序对以上输入信息进行处理,实时解算出飞行器的位置、速度、姿态角等信息,并和标准弹道数据文件相应参数进行对比,分析验证捷联惯导解算的准确性。

更进一步,将模拟的惯组实时测量信息作为前面实验标定得到陀螺、加速度计误差模型的输入,误差模型的输出作为捷联导航解算程序的输入,再次解算飞行器的位置、速度、姿态角等信息。通过比较分析,研究惯组测量误差对捷联导航解算结果的影响。

(五) 舵系统响应辨识实验

学员利用实验装置给多系统施加单位阶跃信号或正弦信号,并采集舵系统的舵反馈信号,得到响应数据,开展时域、频域响应分析,辨识舵机模型和实验结果分析。

(六) 制导律设计与评估

针对实验装置提供的某型飞行器上拉段运动特征,选择制导变量,进行方案弹道设计;以此为基础,选择制导回路的反馈量,进行制导律设计,利用质心运动仿真平台进行制导方案进行评估。

(七) 弹载控制器接口程序实验

掌握实验装置上配备的 Matlab/Simulink 飞控实验工具箱,利用惯组接口模块和舵机接口模块实现弹载计算机对这些组件的访问,并编制一个时序流程,实现弹载控制器电气匹配性的综合测试。

(八) 控制律设计与评估

针对实验装置提供的某型飞行器控制方案,进行控制律设计与评估。利用实验装置提供的硬件、软件工具进行单通道控制律的工程实现研究和产品在回路的半实物仿真评估。

(九) 导弹控制系统模飞实验

模飞实验是模拟飞行器全飞行过程的一个电气匹配性综合实验。在实验中,飞行控制系统将按照给定的时序控制逻辑要求,依序进行敏感装置的数据采集、处理,制导律和控制律的解算,相关单机或电气设备的控制等,学员应重点进行功能性测试、硬件接口匹配性测试和软件接口匹配性测试。

(十) 全系统闭环仿真试验

在数学仿真的基础上,将弹载控制器、舵系统等实物纳入仿真系统,进行半实物仿真实验,并分析评估实验结果,这是一个大型的综合性实验。

四、结束语

本研究可用于指导高等院校、航天航空科研系所的飞行器控制系统实践教学体系的建设,使教学效果得到巩固和提高。实验教学体系通过了国防科大航天学院研究生教学实践的检验,有效地将“理论”与“实践”相结合统一,显著地提高了飞行器控制系统实验课程的教学质量。由于飞行控制系统实验课程教学是一个相当复杂,内容深度很难把握的研究课题。因此,实验内容的组织、实施方法可能存在许多不足,请同行批评指正,以利于我们今后工作的深入开展,持续改进。

[参考文献]

- [1] 曾庆华,郭振云. 飞行控制技术与工程[M]. 长沙:国防科技大学内部教材,2010.
- [2] 曾庆华,张为华. 飞行器控制系统实验教程[M]. 长沙:国防科技大学内部教材,2010.

(责任编辑:卢绍华)