

1 绪论

1.1 引言

飞行模拟能真实地再现航空器的驾驶，主要用于飞行训练、飞行器设计或其他目的人为地再现飞机飞行及其飞行环境。它包括飞机飞行动力学模块、发动机模块、通信导航模块、其他飞机系统模块和模拟驾驶舱（虚拟或硬件）等，能响应人对飞机的操纵，并对外界环境因素（如空气密度、湍流、风切变、云、降水等）对飞机的影响进行模拟。飞行模拟主要用于飞行训练、飞行器的设计和开发，以及对飞机特性和操纵品质的研究。飞行模拟包含飞行模拟软件、桌面飞行训练器（Basic Aviation Training Device, BATD）、飞行训练器（Flight Training Device, FTD）和飞行模拟机（Full Flight Simulator, FFS），如图 1-1 所示，即纯软件、配置简单硬件、配置仿真驾驶舱，直到最高级配备六自由度运动系统和虚像显示视景的飞行模拟机。



图 1-1 飞行模拟系统

飞行模拟系统已广泛地运用于航空工业设计和研发,以及飞行员与机组成员培训。飞行模拟游戏在飞行爱好者和飞行理论学习中被大量使用。桌面飞行训练器用于飞行学校课堂教学,飞行训练器常用于小型飞机机型改装训练,飞行模拟机用于飞行学员的机型改装和机组的复训。工程飞行模拟机用于航空器制造商研制和试验飞行器的硬件。使用了模拟与激励技术,后者对真正的人工硬件输入或真实的信号(激励)实施响应。在飞行模拟机中研制和试验飞行器的软件或使用模拟技术比在实际飞行中用飞机做测试要来得安全。研制和试验飞行器的系统,在飞机与其系统的开发阶段,称为“铁鸟”。其采用与真实飞机 1:1 设计,保证了试验的真实性,为飞机系统集成、试飞安全、试飞故障排查、后续型号改进等提供重要保障。

1.2 民用飞行模拟层次分类

飞行模拟可以分成四个层次:飞行模拟软件、桌面飞行训练器(BATD)、飞行训练器(FTD)和飞行模拟机(FFS)。

1. 飞行模拟软件

较具影响力的飞行模拟软件有美国的微软模拟飞行系列软件、洛克希德马丁公司 Prepar3D、Laminar Research 公司开发的 X-PLANE 模拟飞行软件与开源模拟飞行软件 FlightGear。国内中国民用航空飞行学院 2006 年独立研发完成的 TB20 和西门诺尔飞机模拟飞行软件,具备两种机型飞行模拟能力,软件部分性能与微软模拟飞行 98 和 2004 接近,可用于构建桌面飞行训练器系统(见图 1-2)。随着计算机软硬件技术的发展和飞行仿真建模技术的发展,飞行模拟软件不仅作为游戏供大众娱乐,也用于课堂教学。中国民用航空飞行学院使用微软模拟飞行 FSX (Flight Simulator X) 和洛克希德马丁公司 Prepar3D 软件进行飞行理论基础教学。

1) 微软模拟飞行软件

微软模拟飞行是一个能在 Windows 操作系统下运行的飞行模拟软件,如图 1-3 所示。作为一个能在家中运行的飞行模拟器,它满足飞行爱好者、飞行员的需求。微软模拟飞行是微软公司的早期产品之一,有别于其他商业利益驱使的微软产品,微软模拟飞行是该公司历史最悠久的项目,比 Windows 操作系统历史还要早 3 年。



图 1-2 中国民用航空飞行学院模拟飞行实验室



图 1-3 微软模拟飞行软件

1976 年程序员 Bruce Artwick 在一篇关于三维计算机图形程序的文章中提出了他的设想，并在 1977 年成立了一家名为 subLOGIC 的公司。公司最初为包括 Intel 8080、Altair 8800 和 IMSAI 8080 在内的若干计算机平台销售飞行模拟器。1979 年在 Apple 平台上发布了模拟飞行 1，1982 年他们将一个支持彩色图形适配器的 IBM PC 版本授权给微软，该版本被称为微软模拟飞行。1988 年微软模拟飞行 3.1 版本达到了商业上的成熟，且继续包含了 3D 建模和图形硬件加速技术。进入 21 世纪后，微软陆续发行新的版本，2004 年的模拟飞行 9.0 版本拥有更多的机型和地景，开始在飞行爱好者中风靡。为庆祝人类实现动力飞行 100 周年，2006 年发布的模拟飞行 10.0 版本或 FSX 涵盖全球超过 24 000 个机场，包括主要地标和热门城市的丰富的地景。通过 SDK 可以进行二次开发，其开放性使得爱好者、软件公司陆续开发地景插件、飞机插件等，

通过插件扩展飞行仿真度，其受欢迎程度得到很大提升。微软模拟飞行也包含复杂的天气模拟，以及下载真实世界天气数据的功能。新版本的附加功能还包括具有交互式空中交通控制功能的空中交通环境、包括有着多年历史的道格拉斯 DC-3 和现代化的波音 777 在内的飞机模型、交互式课程、挑战和飞机检查单^[1]。模拟飞行软件有地图和位置设置页面、气象设置页面、配重和燃油设置页面、故障设置页面等（见图 1-4），能满足初级飞行训练的需求，被航空院校用于飞行理论教学，FSX 成为业界模拟飞行软件的标杆。



图 1-4 地图页面和配重、燃油设置页面

2) 洛克希德马丁公司 Prepar3D 模拟飞行软件

2009 年，洛克希德马丁公司从微软公司购买 Microsoft ESP（微软模拟飞行 FSX SP2 的企业模拟平台）产品，包括源代码在内的知识产权。2010 年基于 ESP 源代码开发的新产品被称为 Lockheed Martin Prepar3D^[2]。

Prepar3D 软件最新 4.3 版本支持 64 位 Windows 操作系统，能多线程运行。Prepar3D（见图 1-5）通过逼真的环境让用户进行沉浸式培训。软件包括教学版本、专业版本和军用版本，适用于商业、学术、专业或军事教学。软件具有以下特点：可用于快速创建虚拟世界中任何地方的学习场景，包括水下到太空轨道空间；改进虚拟现实（VR）性能的新渲染技术；提高了碰撞检测效率，减少响应时间；支持分布式交互模拟（DIS）网络会话并与其他模拟器集成，可以多地分布式运行，在相同环境中学习和测试；可以重新创建场景，进行不同的实验；在浸入式环境中学习科学、技术、工程和数学原理；模拟航空情景、空中交通管制、地面车辆操作和灾难响应，可用于广泛的学习场景，包括飞行程序培训、驾驶舱熟悉、飞行计划、空中交通管制员培训和应急准备；支持场景中编程人工智能（AI）行为；利用多通道功能在多个系统上同时运行，来提高多屏幕和环幕、球幕显示性能或用作单独视景软件等功能。

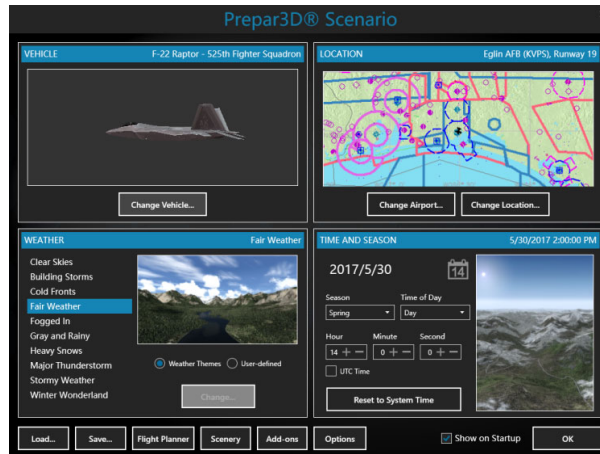


图 1-5 Prepar3D 软件启动画面

3) X-Plane 软件

X-Plane 是一款由 Laminar Research 公司开发的个人专业飞行模拟器，其历史最早可追溯到 1989 年。最新版本 11.0 (见图 1-6)，开始支持 VR 设备，可以用于虚实结合的飞行训练。该软件有 Android、iOS、webOS、Linux、Mac 和 Windows 等众多操作系统发行版本^[3]。X-Plane 和其他软件打包成为完整且模拟逼真的飞行模拟平台。软件开放式的构架，利于使用插件扩展功能，吸引消费者，仅 www.x-plane.org 网站上就有相关插件等资源文件超过 3 万个 (见图 1-7)。X-Plane 也成为唯一能与微软模拟飞行 FSX 和洛克希德马丁公司 Prepar3D 匹敌的模拟飞行软件。其商业版本支持美国联邦航空管理局 (Federal Aviation Administration, FAA) 的 BATD 认证，可记录飞行训练时间^[4]。



图 1-6 X-Plane 11.0 软件

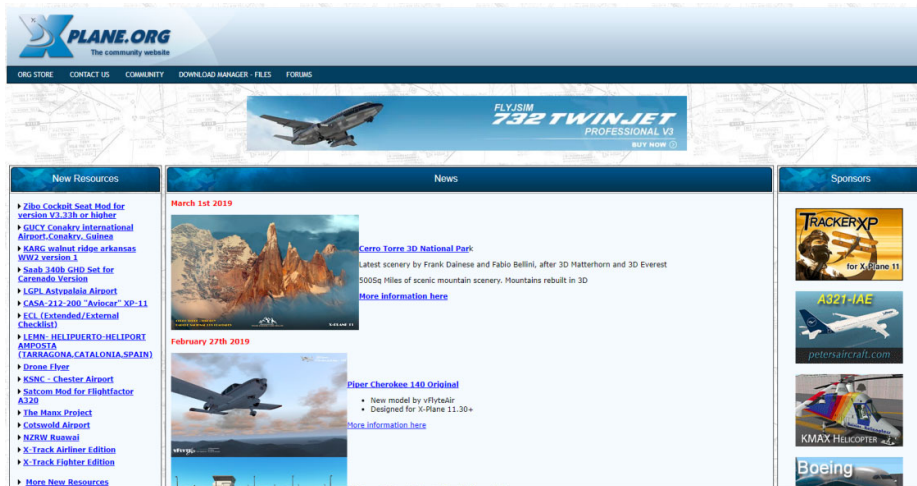


图 1-7 X-Plane 插件网站

4) FlightGear 软件

FlightGear 是一个始于 1997 年的多平台飞行模拟器、开源软件项目。它自 1997 年第一次发布以来不断发展，目前最新版本为 FlightGear 2018.3.2。该项目适用于 Linux、Microsoft Windows 和 Mac OS X 操作系统，如图 1-8 所示。计算机显卡需支持 OpenGL。该软件采用 GNU 通用公共许可证是自由软件，开放源代码，鼓励爱好者参与研发。

早期 FlightGear 开发者使用 LaRCsim 模型（来自 NASA）和其他自由使用的数据，来构建核心飞行模拟代码。

版本 0.9.0 ~ 1.0.0（2003—2007）支持 3D 驾驶舱仪表盘图像效果虽有长足进步，但低于同期的 X-Plane。视景中地形采用免费分发的 SRTM 高层数据，具备斜坡跑道等，支持超过 20 000 个机场跑道、3D 云彩，支持多操作系统、多种开放飞行数据模型（Flight Data Model，FDM），如 JSBSim 总共可模拟大约 100 种飞行器。

版本 2.4.0（2011）具备全新的天气模式，能真实表现不同天气现象，如雾层、降水、降雪等；改进视觉体验，增强图形表现，能渲染出栩栩如生的高山地形、3D 城市地景、飞机壳体的金属质感光泽表面、水波以及阳光反射；实验性地引入 HLA 接口层，允许用户创建一个模拟器集群，甚至可以与商业飞行模拟器协同工作；改进众多飞机模型，包括空客 320 家族、米格 15、波音 757 等。

版本 2.6.0，在飞机操作、AI、环境、空气动力学、接口、场景、视觉效

果等方面做出进一步改进，支持 64 位 Windows 操作系统^[5]。

因为 FlightGear 开放源代码和文档，所以被多所大学、研究所用于科学研究^[6]。田纳西大学用于飞行模拟器的研制；ARINC 使用 FlightGear 作为测试和评估飞行管理计算机航空电子设备和相应地面系统的一部分；伊利诺伊大学厄巴纳香槟分校使用 FlightGear 作为空中防止结冰仿真研究平台；爱荷华州立大学一个高级项目旨在使用基于 FlightGear 的软件改造一些旧的模拟机；明尼苏达大学的人因研究实验室使用 FlightGear 改造了单发、单座模拟机；加拿大不列颠哥伦比亚省西蒙菲沙大学使用 FlightGear 用于模拟开发自主飞行器所需的控制算法；印度班加罗尔航空发展局使用 FlightGear 作为飞行模拟设施的图像生成器，用于对战斗机航母起降评估研究。国内多家单位使用 FlightGear 进行飞行仿真相关研究，民航二所使用 FlightGear 构建了机场场面监视模拟视景系统。



图 1-8 FlightGear 软件

2. 桌面飞行训练器

1997 年，美国联邦航空局发布了《基于个人计算机的航空培训设备的咨询通告》AC 61-126，讨论了基于 PC 的飞行模拟训练。PC-ATD 设备包括模拟飞行软件、飞行操纵硬件（飞行操纵杆、舵等）、显示器等。FAA 将 PC-ATD 的使用限制在初级和仪表飞行训练期间的一些基本任务中。

随着技术进步和航空界对 PC-ATD 的经验积累，FAA 发布的 AC 61-136 更

新了定义并扩展了基于 PC 的飞行模拟设备，批准航空培训设备及其用于培训和体验原有的 PC-ATD 标准不再执行，新批准使用 BATD 和 AATD (Advanced Aviation Training Device) 于航空培训。其核心要求比飞行模拟机和飞行训练器更具通用性^[7]。例如，根据 AC 61-136B，BATD “提供至少能完成综合地面训练和飞行仪表培训课程相关能力的培训平台”，产品如图 1-9 所示。



图 1-9 Precision Flight Controls 公司的 BATD 产品

BATD 和 ATTD 的硬件规格类似。

(1) 具备人工飞行操纵和飞机系统控制的硬件，而非使用键盘和鼠标。

(2) 教员可以通过软件虚拟控件设置飞机配置、位置和天气，以及编制飞行课程、暂停飞行或冻结飞行。

(3) 控制装置、仪表和开关的物理布置，以及外观和操作应至少按照切实可行的方式对飞机系列中的一架飞机进行仿真。制造商应尽最大努力重建实际放置的物理开关和代表通用飞机仪表板的其他所需控制的外观、布置、操作和功能。

桌面飞行训练器 BATD 与飞行模拟机 FFS 之间差异明显，不仅仅是技术，也在于它们不同的用途。简单地说飞行模拟机是特定飞机的替代品，并且在许多情况下，使用飞行模拟机的飞行员可以接受操作模拟飞机所需的所有训练并且在不离开地面的情况下获得该飞机的类型等级，为了达到实现该目标所需的仿真水平，飞行模拟机复制仿真飞机的驾驶舱。它还必须具有宽视角、高分辨率显示屏；“飞行”特征在真正的飞行范围内与真实飞机的特征非常相似；精

致的音响系统和运动系统准确地重新创造飞行的感觉。

飞行训练器中的 4 级、5 级和 6 级用于低仿真度或代表一个类型飞机的飞行模拟设备。因此，它们低于飞行模拟机的要求，它们也不能用于完成飞行员必须接受的所有训练。

BATD 或 AATD 并非旨在替代特定的飞机，甚至是一系列相关的飞机，它不是模拟器，而是用于在整个培训计划中补充飞机和地面教室的航空培训设备，通常在飞行训练和地面训练期间传授航空知识和飞行政务任务。其目的不是帮助飞行员发展和磨练飞行技能，而是帮助飞行员理解和应用重要概念，并实践和掌握适用于各种飞机的一般程序。

西门诺尔/TB20 飞机桌面练习器研制项目由原中国民航总局立项，中国民用航空飞行学院课题组负责承担研制（见图 1-10），项目于 2006 年通过科技鉴定。目的是研制一套满足 AC 61-126 要求，功能完整、半物理式的西门诺尔飞机实时飞行训练桌面练习器，包括完整的虚拟座舱仪表、飞行动态模拟、三维视景系统、通信导航系统、音效模块、教员对训练的管理等，技术涵盖了计算机图形学、实时工业控制、网络通信、多媒体技术和飞行运动数学模型等方面。限于当时技术条件，硬件仍采用 PFC 公司飞行模拟硬件，经过飞行教学测试该模拟训练系统已经满足飞行政务模拟训练需求。



图 1-10 中国民用航空飞行学院研制的桌面飞行训练器

3. 飞行训练器和飞行模拟机

飞行模拟可以追溯到 1910 年，一个模拟驾驶舱安装在有两个半圆滑轨的基座上（见图 1-11），飞行员通过操纵杆控制其各种飞行姿态。这种飞行模拟器只能熟悉飞行操作，没有对飞行性能的模拟。

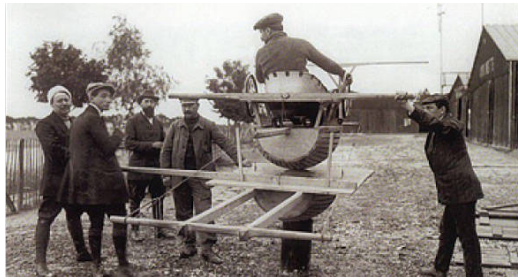


图 1-11 第一台飞行模拟机

第一次世界大战中，为了培养飞行员练习空间定位，Ruggles Orientator 开发出电动控制模拟驾驶舱，由飞行教员转动控制轴上的“驾驶舱”，飞行员需要通过操纵试图保持驾驶舱水平。很快模拟驾驶舱就配置了越来越复杂的仪器，这些仪器可以通过气动或机械方式进行控制。绘图仪可以记录学生的飞行路径：在地图上绘制飞行路径，飞行学员可以练习无线电信标导航飞行。

第二次世界大战期间，航空技术大幅发展。飞行任务越来越复杂，驾驶舱人员之间的配合变得尤为重要。飞行模拟机开始针对特定飞机类型的飞行性能和驾驶舱布局，用于训练飞行员、轰炸机机组团队飞行^[8]。

第二次世界大战结束后，民用航空引入了由泛美航空公司制造的第一架客机飞行模拟器（见图 1-12）。该机没有运动系统，没有视景系统，但驾驶舱各个细节被完全模拟。模拟计算机和程序的使用，使机组人员能够执行所有飞行动作，完成常规培训程序和紧急程序^[2]。这种训练非常有效，即使今天按照中国民航法规 CCAR-60 部《飞行模拟设备的鉴定和使用规则》，飞行训练器 5 级最低设备要求中，依然可以不配备视景系统。当然，从市场需求角度，只满足最低标准的飞行模拟设备销路堪忧。



图 1-12 Linker 飞行训练器