

一种飞行员仿真系统的设计

甘欣*

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘 要: 分析了飞行仿真领域中对飞行员仿真的需求, 提出了“全飞行周期飞行员仿真系统”的设想。描述了该系统的功能、接口和配置。针对飞行员行为建模问题提出了一种具有四个层次的模型框架用来组织飞行员在驾驶飞机时的各种简单或复杂的行为模型, 此框架可作为飞行员仿真系统的软件框架。给出了人-机闭环仿真系统的着舰过程计算结果。

关键词: 无人机; 飞行仿真; 飞行员; 模型; 飞行周期

中图分类号: V24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2014) 06-0014-04

飞行模拟器是飞行仿真技术的一种高级应用形式。在飞行模拟器的开发与应用工作中, 经常需要有人来承担飞行员的角色, 执行全飞行周期或某个飞行阶段的飞行任务。如果飞行员角色得不到保证, 研制工作就可能会停顿。如果要充分保证飞行员角色, 则需要投入相当大的人力成本。

这种需求使人想到能否开发一种飞行员仿真系统, 该系统能够驾驶飞行模拟器, 从而部分地代替真实飞行员的工作。

1 飞行员仿真系统的需求

通过对飞行模拟器和飞机型号的研发工作进行分析可知, 飞行员功能仿真的需求至少存在于以下几个方面:

(1) 飞行模拟器的调试或测试 在一个飞行模拟器项目的调试或测试阶段, 为了完成某些系统(如视景系统、航电系统、基座运动系统等)的调试或测试, 需要大量的“飞行配合”, 即为其提供持续的、协调的飞机运动参数。对于动基座模拟器来说, 运动系统的初次调试或扩展调试对驾驶舱内乘坐人员的安全有一定的风险。如果模拟器能够在没有飞行员驾驶的条件下自主完成飞行, 则可以规避这一风险。

(2) 飞行模拟器功能演示 对于一台即将或已经交付使用的飞行模拟器来说, 经常面临着功能演示或飞程序示范的需求。例如, 向鉴定专家组、潜在客户和培训对象进行飞行演示。虽然这些工作可以由真实飞行员来承担, 但如果由仿真系统来承担, 则会有更高的效率或更低的成本。

(3) 飞机性能或使用效能研究 在相关研究中, 如果使用

飞机的六自由度全量运动方程作为飞机的运动模型则能够获得更为精准的结果, 但是六自由度飞行仿真系统必须依赖飞行员的驾驶才能完成全周期飞行。如果用仿真系统代替真实飞行员, 则能够节省人力、提高效率。另外, 使用飞行员仿真系统既能实现实时仿真, 也能实现快速仿真, 而真实飞行员只能实现实时仿真。

(4) 无人机自主飞行控制系统的开发 某些无人机需要具有自主飞行功能以完成全部或部分阶段的自主飞行。无人机自主飞行控制系统的功能实际上与一个飞行员的驾驶功能相近。因此, 将一个功能全面、技术成熟的飞行员仿真系统进行适当修改, 就可以移植到无人机上, 作为自主飞行控制系统来使用, 至少可以作为无人机自主飞行控制系统的设计参考来使用。

2 系统描述

2.1 功能

为了满足实际需求, 可将系统设计成“全飞行周期飞行员仿真系统”。所谓全飞行周期, 是指飞机从在某个机场进行地面准备开始, 获得指挥员的许可后起飞升空, 在空中完成既定任务后, 根据指挥员的命令或剩余燃油量决定着陆, 最后安全地降落在预定机场。

真实飞行员在驾驶飞机时, 要根据自身的知识、经验和能力, 对所接收或感知到的信息进行适当处理, 体现为执行一系列操作, 才能安全地完成一个飞行周期。在仿真系统中, 飞行员的功能通过解算飞行员的行为模型来实现。

收稿日期: 2013-11-04; 退修日期: 2014-03-20; 录用日期: 2014-05-10

*通讯作者. Tel.: 029-86832752 E-mail: 382072303@qq.com

引用格式: GAN Xin. A design of the pilot simulation system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(06): 14-17.

甘欣. 一种飞行员仿真系统的设计[J]. 航空科学技术, 2014, 25(06): 14-17.

为了实现全飞行周期的飞行员功能仿真,必须建立飞行员在全飞行周期中的行为模型体系。这项工作是系统设计的关键技术。

2.2 接口

一架飞机和一个值班的飞行员组成了一个具有自主飞行功能的“人-机闭环系统”。在这个系统中,飞机和飞行员这两个子系统可以分别是真实系统或者仿真系统。一个飞行员仿真系统能够驾驶的飞机可以是仿真系统(如飞行模拟器),也可以是真实系统(如无人机)。

为了完成飞行员仿真系统的设计开发,应当给定一款明确的飞机,否则两个系统之间的接口设计无法进行,系统测试更无从谈起。

飞行员和飞机之间的接口是双向的,一个方向用于传递飞行员对飞机的驾驶命令,另一个方向用于向飞行员传递飞机的状态或运动参数。

接口的形式和内容取决于给定飞机的具体情况。

2.3 系统配置

飞行员仿真系统由必要的硬件和软件组成。硬件为软件提供存储、运行和通信环境。软件负责信息处理,是系统功能的体现者。飞行员仿真系统的软件是系统开发的主要工作内容。

3 飞行员行为模型的建立

3.1 飞行员行为建模技术探讨

如果把飞行员看作一种系统,则这个系统具有多模式、多输入、多输出、非线性、负反馈、自适应等特征,是一种十分复杂的系统。

目前,国际上关于飞行员行为建模的研究主要集中在空中飞行阶段、人-机闭环条件下的飞行品质研究,例如PIO特性。

经典的McRuer驾驶员模型是关于飞行员在进行某项参数跟踪时的行为模型。其传递函数形式的表达式如下:

$$G_p(s) = k_p e^{-\tau s} \frac{(T_L s + 1)}{(T_I s + 1)(T_N s + 1)} \quad (1)$$

式中: k_p 为飞行员的增益, τ 为飞行员反应的时间延迟; T_N 为神经肌肉系统固有的一阶延迟; T_L 和 T_I 分别为超前和滞后的时间常数。根据文献[1],这些参数在不同的条件下有着不同的值,其变化范围是相当大的。

这一模型是飞行员行为模型中最基本的部分,可以作为飞行员行为建模的关键技术。实际上,为了建立飞行员行为模型体系,还需要具备更多的数学或逻辑表达式。

分析可知,飞行员对飞机的控制行为并不全部属于闭环模式。例如,飞行员对开关(或按钮)的操作,一般可看作开环

控制。不仅如此,甚至飞行员对油门杆和驾驶杆的控制行为也不完全属于闭环控制。例如,飞行员在地面施加起飞推力时对油门杆的操作、在空中急剧机动的初期对驾驶杆的操作,这些控制也可以看作是开环控制。

除了空中飞行阶段以外,全飞行周期还包括飞机在地面的运动。在此阶段,飞行员对飞机的操作包括:通过油门和刹车来控制飞机的速度,低速滑行时通过差动刹车或转弯手柄来控制飞机的方向和轨迹,高速滑行时通过方向舵控制飞机的航向和轨迹等。

在已公开的文献中,尚未看到关于飞行员开环操作和飞行员在地面滑行阶段的行为模型的研究。

飞行员行为建模的另一个重要问题是模式梳理。

分析表明,飞行员对飞机的控制采用何种模式基本上取决于飞行阶段。一个全飞行周期可以大致划分为以下阶段:地面准备、低速滑行至起飞位置、起飞、爬升、加入航线、退出航线、任务飞行、进场、着陆、滑行至停机位置等。实际上,每个阶段还可以细分为若干个子阶段,例如,着陆阶段又可以分为下滑、拉平、两点滑跑、三点滑跑并减速等阶段。在每个阶段内,飞行员至少会使用一种控制模式。例如,在三点滑跑阶段,飞行员主要控制飞机的航向和水平轨迹,俯仰方面可以没有操作,在抬前轮时主要使用开环的拉杆动作,抬前轮后又使用闭环的俯仰角保持模式来控制飞机。由此可见,需要通过合理的飞行阶段划分来完成飞行员控制模式的梳理。这方面的工作可以使用选定飞机的飞行程序(POP或FCOM)作为依据。

如果要考虑飞行员智能特性的仿真,则模型会更为复杂。

开发者可根据具体任务的需求来决定飞行员行为模型体系的内容。

3.2 飞行员仿真系统的模型框架

上节的描述表明,对于全周期的飞行,飞行员行为模型的内容是相当庞杂的。为了使飞行员仿真系统的软件易于开发、测试和维护,软件的设计应该做到结构清晰、层次分明。为此,提出将飞行员的行为模型从低级(或简单)到高级(或复杂)划分为四个层次。表1给出了这种层次划分,并通过列举进行了说明。

上表所述的行为中,第1层“系统操作”是对飞机最基本的操作,都属于开环控制,可以依据飞机的操作规程来建模和开发。

第2层“驾驶技巧”是较为复杂的操作,一般属于闭环控制,需要根据专业理论并结合飞机的操作规程进行建模和开发。

第3层“飞行技术”是对前两层功能的综合运用,可以依据飞机的飞行程序文件进行开发。

第4层“任务能力”是对前三层模型的综合运用,体现了飞行员进行判断、决策和执行的能力,这方面的模型应以军机或

民机的指挥和管理章程为依据。

表1 飞行员行为的层次划分和列举

Table 1 Classification and enumeration of pilot's behavior

层次划分	层次名称	行为列举
1	系统操作	全机加/断电, APU启动/关闭, 发动机启动/关闭, 开环模式的前轮转弯操作, 开环模式的刹车操作, 开环模式的发动机推力控制, 增升装置操作, 起落架收放操作, 开环模式的驾驶杆纵向操作, 开环模式的驾驶杆横向操作, 开环模式的脚踏操作, 飞控系统模式选择, 导航系统操作
2	驾驶技巧	地面滑行中的水平轨迹控制、速度控制; 飞行中速度控制、俯仰角保持、过载保持、定常盘旋(坡度保持)、定速率升降、高度保持、航向保持、航线保持、轨迹控制、编队飞行中的位置控制
3	飞行技术	起飞前准备, 起飞, 加入/退出航线, 空中目标攻击, 地面目标攻击, 空中待命, 全横滚, 筋斗, 失速演示, 空中受油, 编队飞行, 进场, 着陆/舰
4	任务能力	接受/拒绝起飞命令, 接受/拒绝航线飞行命令, 接受/拒绝攻击命令, 加入/退出编队, 接受/拒绝空中受油命令, 接受着陆命令, 自主决定着陆

从软件设计的角度来看, 较高层次的模型可以通过“调用”较低层次的模型实现较为复杂的功能。为此, 各个功能所对应的模型可以设计成“函数”或“子程序”类型的程序模块以方便其它模型的调用。

4 应用举例

根据前文所描述的方案, 针对某个舰基飞机的飞行仿真系统配套开发了一款飞行员仿真系统, 从而得到了一款具有全周期自主飞行仿真功能的系统。本节给出由该系统计算的一次飞机着舰过程的若干结果来说明其效果。

与着陆过程相比, 着舰过程在技术上更为复杂, 对飞行员的敏捷性、控制精度、控制模式等方面的要求更高。因此, 这一计算结果能够充分证明飞行员仿真系统的设计是可行的。

图1是着舰过程中飞机的水平轨迹。由图可见, 飞机的轨迹处于着舰跑道区域以内。

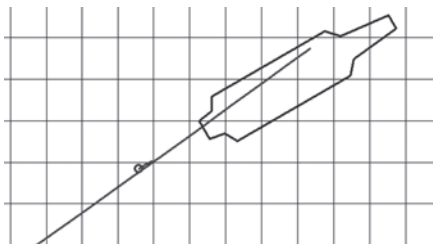


图1 着舰过程中飞机的水平轨迹

Fig.1 Track of landing on a ship

图2是飞机的海拔高度和垂直速度对跑道纵坐标的曲线。由图可见, 飞机在大约80m处主轮着舰, 此时的下沉速度约为4m/s, 飞机停止处的纵坐标约为140m。

图3是飞机的俯仰角和迎角对跑道纵坐标的曲线。由图可

见, 飞机着舰时的俯仰角约为 6° , 迎角约为 10° 。

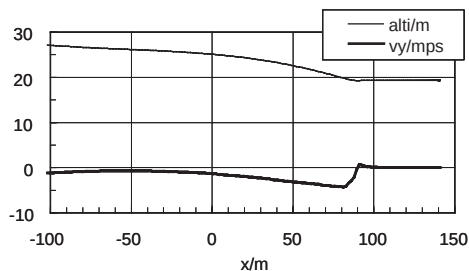


图2 着舰过程中飞机的高度和垂直速度

Fig.2 Altitude and vertical speed of landing on a ship

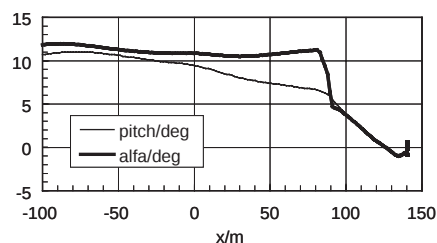


图3 着舰过程中飞机的俯仰角和迎角

Fig.3 Pitch angle and AOA of landing on a ship

图4是飞机的垂直速度和俯仰操纵位移对跑道纵坐标的曲线。由图可见, 飞机的俯仰操纵明显分为几个阶段, 而不是由一种单一的控制律贯穿始终。着舰前, 纵向操纵尽力使飞机保持一个下滑轨迹, 主轮着舰后, 纵向操纵立即开始前推驾驶杆, 最终到达中立位置附近。

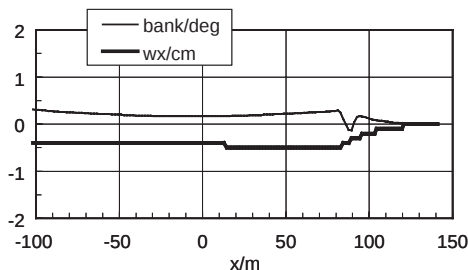


图4 着舰过程中飞机的垂直速度和俯仰操纵

Fig.4 Vertical speed and pitch control of landing on a ship

图5是飞机的坡度和横向操纵位移对跑道纵坐标的曲线。由图可见, 飞机着舰前有 0.3° 左右的右滚转坡度。这是因为为了有利于飞机着舰, 舰船要以一定的速度航行, 而着舰跑道纵轴与船体纵轴有一个大约 7° 的夹角, 这一夹角导致着舰跑道上有一定的正侧风分量, 为了克服这一侧风分量, 飞机可以使用直线带右滚飞行的策略来跟踪着舰跑道。当飞机着舰后这一右滚坡度就不存在了, 这时横向驾驶逐渐回中。

计算结果表明, 飞行员仿真系统能够驾驶数字飞机完成在舰船上降落这样复杂的过程。

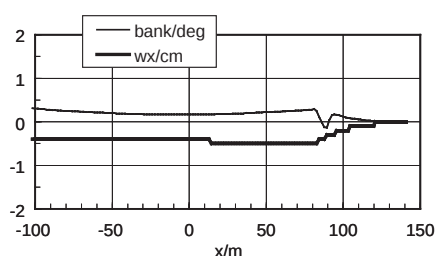


图5 着舰过程中飞机的坡度和副翼偏角

Fig.5 Bank and rolling control of landing on a ship

5 结束语

通过全飞行周期飞行员仿真系统的开发,获得了一个具有全飞行周期自主飞行功能的人-机闭环飞行仿真系统。该系统已经应用于飞行模拟器的自主飞行演示和飞机使用效能研究。

飞行员仿真技术能够满足一些实际需求,因此具有一定的推广应用价值。另外,为了获得更好的应用,应该对这项技术进行持续和深入的研究。

AST

参考文献

- [1] 刘兴堂,赵红言,雷虎民. 飞行员数学模型与新机飞行品质预测[J]. 飞行力学, 1997, 15(1): 30-36.
LIU Xingtang, ZHAO Hongyan, LEI Humin. The pilot mathematical model and predication of new aircraft flying qualities[J]. Flight Dynamics, 1997, 15(1): 30-36. (in Chinese)
- [2] 颜世伟,高正红. 基于人工神经网络的驾驶员操纵行为模型[J]. 飞行力学, 2012, 30(2): 105-109.
YAN Shiwei, GAO Zhenghong. Research on pilot behavior model based on artificial neural network[J]. Flight Dynamics, 2012, 30(2): 105-109. (in Chinese)
- [3] 姚渊,屈香菊. 一种多任务驾驶模型的层次结构. 飞行力学, 2004, 22(2): 15-19.
YAO Yuan, QU Xiangju. A hierarchical structure of multi-task pilot model[J]. Flight Dynamics, 2004, 22(2): 15-19. (in Chinese)
- [4] 葛志浩,徐浩军,胡飞,等. 先进战斗机人-机闭环系统仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(3): 389-391.
GE Zhihao, XU Haojun, HU Fei, et al. MATLAB simulation model of closed-loop aircraft-pilot system[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004 24(3): 389-391. (in Chinese)
- [5] LIU Li, GE Zhihao, XU Haojun, et al. Pilot modeling and simulation under extreme conditions[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(10): 2875-2877.
- [6] 闵桂龙,徐浩军,蔡军,等. PIO研究中的驾驶员控制行为模型[J]. 电光与控制, 2012, 19(10): 70-73.
MIN Guilong, XU Haojun, CAI Jun, et al. Pilot control behavior model during PIOs[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(10): 70-73. (in Chinese)

作者简介

甘欣(1968—) 男, 学士, 高级工程师。主要研究方向: 飞机操纵设计和飞行模拟器开发。

Tel: 029-86832752

E-mail: 382072303@qq.com

A Design of the Pilot Simulation System

GAN Xin*

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: The paper analyzes the requirements for the pilot simulation in flight simulation field. A concept of full-flight-period pilot simulation system is suggested. The functions, interfaces and configurations of the system are described. The question about pilot behavior modeling is discussed, and a frame of four classes to organize a pilot's simple or complex behavior models is designed. The frame can be used for designing the software of a pilot simulation system. The results of landing on a ship calculated by a pilot-aircraft simulation system are presented.

Key Words: UAV; flight simulation; pilot; model; flight period

Received: 2013-11-04; Revised: 2014-03-20; Accepted: 2014-05-10

* Corresponding author. Tel: 029-86832752 E-mail: 382072303@qq.com