

飞行实时仿真系统及技术

主编 王行仁
编著 王行仁 贾荣珍
彭晓源 冯 勤

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

飞行模拟器是典型的人在回路实时仿真系统,是虚拟现实技术的应用实例。本书以飞行模拟器为背景,讲述建模理论和方法、仿真软件、仿真计算机和接口、环境仿真(包括视景系统、运动系统、操纵负荷系统、音响系统)等内容,全书共分十二章。本书的编写注重理论与实践的结合,具有较强的工程背景,具有多学科综合应用的特点。

本书适合从事飞行实时仿真系统设计、研制、开发与应用的工程技术人员以及高等院校有关专业师生阅读。本书可以作为有关专业研究生的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

飞行实时仿真系统及技术/王行仁等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,1998.9

ISBN 7-81012-778-0

I. 飞… I. 王… II. 飞行模拟;实时仿真 IV. V211.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 11344 号

飞行实时仿真系统及技术

主 编 王行仁

责任编辑 金友泉

责任校对 李宝田

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市学院路 37 号(100083) 62015720(发行部电话)

各地书店经销

涿州市新华印刷厂印装

开本:787×1092 1/16 印张:13.25 字数:336 千字

1998 年 9 月第 1 版 1998 年 9 月第 1 次印刷 印数:1000 册

ISBN 7-81012-778-0/TP·280 定价:13.00 元

前 言

近年来,仿真技术获得了极为广泛的应用。它被广泛用于国防、军事、能源、交通、工业、农业、经济、管理等工程与非工程领域。还广泛应用于产品研制的方案论证、设计分析、生产制造、试验评估、维护和训练等等。

系统仿真技术是以相似原理、控制理论、计算机技术、信息技术及其应用领域的专业技术为基础,以计算机和各种物理效应设备为工具,利用系统模型对实际的或设想的系统进行动态试验研究的一门综合性技术。

飞行模拟器(Flight Simulator)是典型的人在回路实时仿真系统,是虚拟现实技术的应用实例。本书以飞行模拟器为背景,讲述建模理论和方法、仿真软件、仿真计算机和接口、环境仿真设备(包括视景系统、运动系统、音响系统、操纵负荷系统等)。本书的编写结合了20多年来我室承担的歼六飞机飞行模拟器和运七-100飞机飞行模拟器的型号研制任务和多个预研课题的经验和成果,既注重理论又结合实践,具有较强的工程应用背景。本书是在研究生课程教材《飞行实时仿真系统及技术》(1993年内部讲义,参加编写人员除本书四位作者外,还有罗炳海、王郁琴、赵淑华、向复生、王金英)的基础上编写的。

本书共十二章。第一、二章由王行仁教授编写,第三、四、十二章由贾荣珍研究员编写,第五、六、七、九章由彭晓源研究员编写(其中5.4节由贾荣珍研究员编写),第八、十、十一章由冯勤研究员编写。

由于水平有限,难免有错误或不妥之处,望读者批评指正。

目 录

第一章 绪 论

- 1.1 定 义..... (1)
- 1.2 仿真分类..... (1)
- 1.3 实时仿真系统的基本组成及原理..... (3)
- 1.4 实时仿真系统的特点..... (4)
- 1.5 实时仿真系统的国内外发展概况..... (4)

第二章 飞行实时仿真系统

- 2.1 飞行实时仿真系统的组成及原理..... (6)
- 2.2 飞行实时仿真系统的功能..... (7)
- 2.3 飞行实时仿真系统的基本性能..... (8)

第三章 飞行仿真建模与数据库

- 3.1 概 述..... (13)
- 3.2 数学模型..... (13)
 - 3.2.1 基本概念..... (13)
 - 3.2.2 飞行仿真模型的组成..... (14)
 - 3.2.3 模块化、层次化建模方法 (14)
- 3.3 坐标轴系和符号..... (15)
 - 3.3.1 坐标轴系..... (15)
 - 3.3.2 角 度..... (17)
 - 3.3.3 主要参数对照关系..... (20)
- 3.4 数据预处理及函数生成 (23)
 - 3.4.1 通用数据预处理方法..... (23)
 - 3.4.2 通用函数生成处理 (24)
- 3.5 飞行仿真数据库..... (25)
 - 3.5.1 数据库总体结构及管理 (25)
 - 3.5.2 数据项命名规则..... (27)
 - 3.5.3 数据文件类型..... (28)
- 3.6 建模与仿真的 VVA (29)
 - 3.6.1 VVA 概念 (29)
 - 3.6.2 VVA 过程 (29)

第四章 飞行动力学仿真

4.1 概 述.....	(31)
4.2 飞行动力学方程.....	(31)
4.2.1 运动方程.....	(31)
4.2.2 飞机姿态的确定	(32)
4.2.3 方向余弦矩阵.....	(32)
4.2.4 四元数法.....	(33)
4.3 飞行系统仿真模型.....	(35)
4.3.1 飞行系统仿真模型的组成及功能.....	(35)
4.3.2 各模块的功能及特点.....	(35)
4.3.3 飞行仿真软件的模块化结构	(41)
4.4 气动数据的表达形式.....	(41)
4.5 数值积分算法.....	(43)

第五章 飞机系统仿真

5.1 飞行仪表仿真.....	(44)
5.1.1 概 述.....	(44)
5.1.2 飞行仿真仪表分类.....	(44)
5.1.3 仿真仪表结构及驱动方式.....	(48)
5.1.4 计算机实时图形仿真仪表.....	(50)
5.1.5 仪表性能仿真.....	(52)
5.1.6 航空仿真仪表发展趋势.....	(53)
5.2 无线电通讯与无线电导航系统仿真.....	(53)
5.2.1 无线电通讯系统仿真.....	(54)
5.2.2 无线电导航系统仿真.....	(54)
5.2.3 导航参数定义.....	(56)
5.2.4 常用机载导航设备.....	(59)
5.2.5 导航参数的计算.....	(60)
5.2.6 无线电导航系统仿真方法及应用实例.....	(62)
5.2.7 地面导航台数据库.....	(64)
5.3 惯性导航系统仿真.....	(68)
5.3.1 概 述.....	(68)
5.3.2 飞机惯导系统常用坐标系.....	(69)
5.3.3 惯性导航系统基本组成及简要原理.....	(70)
5.3.4 飞机惯性导航系统仿真方法及应用实例.....	(71)
5.4 飞行管理系统仿真.....	(74)
5.4.1 飞行管理系统的组成及功能.....	(74)
5.4.2 飞行管理计算机系统(FMCS)简介及仿真	(77)

5.4.3	控制显示组件(CDU)仿真	(78)
5.4.4	FMCS 数据库.....	(80)
5.5	自动飞行系统仿真.....	(80)
5.5.1	自动飞行系统的组成及原理简介.....	(80)
5.5.2	自动飞行系统的仿真方法及特点.....	(81)
5.5.3	自动飞行系统的飞行方式及仿真软件模块功能.....	(82)
5.5.4	俯仰、横滚通道控制原理、控制律及其仿真.....	(87)
5.5.5	导航导引原理及其仿真.....	(90)
5.6	发动机系统仿真.....	(92)
5.6.1	发动机系统的组成及工作原理简介.....	(92)
5.6.2	发动机系统的仿真方法.....	(94)
5.6.3	发动机系统的仿真应用实例.....	(94)

第六章 运动系统

6.1	运动系统的功能及分类	(102)
6.2	六自由度平台运动系统的组成及主要性能指标	(104)
6.2.1	概 述	(104)
6.2.2	六自由度运动系统的组成	(104)
6.2.3	六自由度运动系统的仿真动感及性能指标	(105)
6.3	六自由度运动系统驱动信号的形成	(107)
6.3.1	质心变换	(107)
6.3.2	坐标变换,驱动信号洗出与补偿.....	(109)
6.3.3	作动筒伸长变换	(115)
6.3.4	运动平台驱动信号流程图及系统原理图	(116)
6.3.5	运动系统特殊效应信号类型及仿真	(117)

第七章 操纵负荷系统

7.1	概 述	(119)
7.2	操纵负荷系统数学模型及仿真方法	(119)
7.2.1	数学模型	(119)
7.2.2	驾驶杆力和脚蹬力的仿真方法	(123)
7.3	全数字式(力伺服控制)操纵负荷系统	(124)
7.3.1	全数字式操纵负荷系统的组成	(124)
7.3.2	全数字式操纵负荷系统的原理及特点	(125)
7.4	研制应用实例 1:运七—100 飞机飞行模拟器操纵负荷系统	(127)
7.5	研制应用实例 2:全数字式并行电动操纵负荷系统	(131)

第八章 视景系统

8.1	概 述	(135)
-----	-----------	-------

8.2	选用和设计视景系统时应考虑的因素	(136)
8.3	计算机成像视景系统的基本原理与算法	(142)
8.3.1	坐标变换与透视投影	(142)
8.3.2	目标数字化	(144)
8.3.3	剪裁	(144)
8.3.4	隐藏面的消除	(145)
8.3.5	扫描梯形的划分	(145)
8.3.6	纹理	(146)
8.4	计算机成像系统的基本配置与技术	(146)
8.4.1	数据库	(146)
8.4.2	控制计算机(管理计算机)	(147)
8.4.3	流水并行处理技术	(147)
8.4.4	图像处理器	(148)
8.4.5	图像显示处理器	(148)
8.5	光学显示系统	(148)
8.6	典型系统举例	(150)
8.6.1	Evans & Sutherland 公司的 ESIG 4500 视景系统	(150)
8.6.2	SGI 公司的 Onyx 2 工作站加上 RE ² 或 IR(Infinite Reality)图形子系统	(152)

第九章 音响系统

9.1	概述	(155)
9.2	飞行模拟器音响系统建模、应用实例及软件	(156)
9.3	音响发生器原理	(158)
9.3.1	模拟式音响发生器	(159)
9.3.2	数字式音响发生器	(161)

第十章 计算机系统

10.1	飞行模拟器对计算机系统配置要求	(163)
10.2	外围通道与接口	(166)
10.2.1	模拟量输入通道(AI)	(166)
10.2.2	模拟量输出通道(AO)	(166)
10.2.3	离散量输入通道(DI)	(167)
10.2.4	离散量输出通道(DO)	(167)
10.2.5	数字量输入输出通道(DD)	(168)
10.2.6	计算机接口与信息传送	(173)
10.3	实时管理软件	(173)
10.3.1	实时管理软件的功能	(173)
10.3.2	实时仿真程序与系统的硬件结构和用户需求有关	(174)

10.3.3	任务调度模块的分类与调度优先级.....	(174)
10.3.4	飞行模拟器实时管理程序举例.....	(175)
10.4	计算机网络.....	(177)
10.4.1	网络在飞行模拟器中的应用.....	(177)
10.4.2	ISO 开放系统互连模型.....	(177)
10.4.3	局域网(LAN)的体系结构.....	(179)
10.4.4	分布交互仿真中网络协议与特点.....	(180)
第十一章 教员控制台		
11.1	概 述.....	(183)
11.2	教员控制台的组成与原理.....	(184)
11.2.1	教员控制台系统的组成.....	(184)
11.2.2	触摸式控制显示系统原理.....	(185)
11.3	教员控制台系统页面设置.....	(186)
第十二章 飞行模拟器的性能检测与评估		
12.1	飞行模拟器性能规范.....	(195)
12.2	飞行模拟器的性能检测与评估.....	(197)
12.3	飞行模拟器自测试软件.....	(199)
参考文献		(201)

第一章 绪 论

1.1 定 义

客观世界中的物理现象和物理系统通常可以用数学方程来描述。例如我们熟悉的“质量—弹性—阻尼”机械运动系统和“电感—电阻—电容”电路的动态过程都可以用二阶微分方程来描述；又如飞机驾驶舱内操纵面板上各种开关按钮的操作顺序及其相互之间的约束关系、操纵面板上各种信号指示灯的明暗顺序及其相互之间的约束关系，都可用逻辑关系式来描述。也就是说客观世界中的任何连续系统、离散事件系统或连续/离散事件混合系统在理想情况下都可以建立数学模型(Mathematic Model)。

计算机是一种解算工具。简单来说，仿真(Simulation)是建立相应物理系统的数学模型在计算机上解算的过程。数学模型是仿真的基础，只有建立正确的数学模型和数据，才能得到正确的仿真结果，仿真才有意义和价值。

计算机的发展经历了模拟计算机(Analog Computer)、混合计算机(Hybrid Computer)、数字计算机(Digital Computer)的历史过程。相应地，仿真的发展也经历了模拟仿真(Analog Simulation)、混合仿真(Hybrid Simulation)、数字仿真(Digital Simulation)的历史过程。目前，采用数字计算机的数字仿真获得了普遍的应用。

随着技术的发展，仿真技术的应用在扩大，仿真不仅仅是建立相应物理系统的数学模型在计算机上的解算过程。在型号产品研制过程中，要求对已研制生产出来的产品或原型机进行试验验证和评估，产品或原型机实物将替代原来在计算机上对应的数学模型，构成既有数学模型又有实物的更为复杂的仿真系统。

从技术应用的角度看，系统仿真技术可定义为：以相似原理、控制理论、计算机技术、信息技术及其应用领域的专业技术为基础，以计算机和各种物理效应设备为工具，利用系统模型对实际的或设想的系统进行动态试验研究的一门综合性技术^[1]。

1.2 仿真分类

按对象性质仿真，可分为连续系统仿真(Continuous System Simulation)和离散事件仿真(Discrete Events Simulation)；按功能可分为工程仿真(Engineering Simulation)和训练仿真(Training Simulation)；按应用领域可划分为工程领域仿真和非工程领域仿真；按虚实结合的程度又可分为结构仿真(Constructive Simulation)、虚拟仿真(Virtual simulation)和实况仿真(Live Simulation)。

下面着重叙述在工程应用领域内连续系统仿真的常用分类方法。一般分为以下三大类：

1. 数学仿真(Mathematical Simulation)

数学仿真无需昂贵的系统,也无需模拟生成真实环境的各种物理效应设备,而是建立数学模型,编好程序,在计算机上运行试验,再现和评价真实世界的事物特性,可以通过键盘等输入设备改变系统参数或系统结构,可以通过CRT、打印机、绘图仪显示输出仿真结果,或者将仿真结果存储在磁盘上,如图 1.1 所示。数学仿真应选择合适的步长,可以实时运行,也可以在非实时(欠实时或超实时)条件下运行。数学仿真尤其适用于研究开发、方案论证和设计阶段。

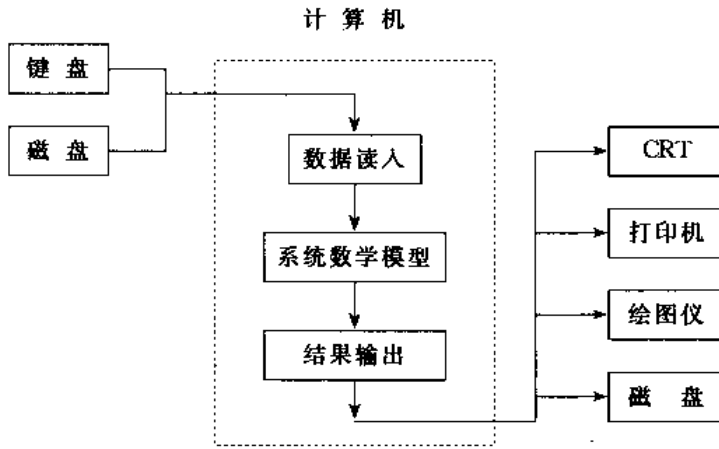


图 1.1 数学仿真

2. 实物在回路中仿真(Hardware-In-Loop Simulation)

实物在回路中仿真又称为半实物仿真。它是将系统的部分实物(如控制系统的传感器、控制计算机、伺服执行机构)接入回路进行的试验。这种仿真试验的对象实体动态特性通过建立数学模型、编好程序在计算机上运行,此外要求有相应的模拟生成传感器测量环境的各种物理效应设备,如图 1.2 所示。不同类型的传感器要求有不同类型的生成环境,例如气压传感器要求有气压模拟装置,角度、角速度传感器要求有模拟转台等等。由于回路中接入实物,半实物仿真系统必须实时运行。



图 1.2 半实物仿真系统

3. 人在回路中仿真(Man-In-Loop Simulation)

人在回路中仿真是操作人员、飞行员、宇航员在系统回路中进行操纵的仿真试验。这种仿真试验的对象实体动态特性仍通过建立数学模型、编好程序在计算机上运行,此外要求模拟生成人的感觉环境的各种物理效应设备,包括视觉、听觉、触觉、动感等人能感知物理环境的模拟生成,如图 1.3 所示。由于操纵人员在回路中,人在回路中仿真系统必须实时运行。

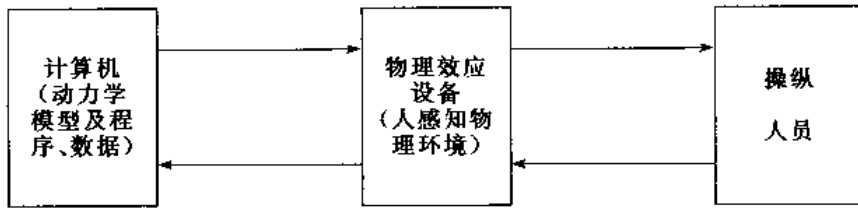


图 1.3 人在回路中仿真系统

1.3 实时仿真系统的基本组成及原理

半实物仿真系统和人在回路仿真系统都属于实时仿真系统。实时仿真系统由以下几部分组成：

1. 仿真计算机

仿真计算机是实时仿真系统的核心部分，它运行实体对象和仿真环境的数学模型和程序。一般来说，采用层次化、模块化的建模方法，将模块化程序划分为不同的速率块，在仿真计算机中按速率块实时调度运行。对于复杂的大型仿真系统，仿真计算机的运行速度满足不了实时性要求时，可采用多台计算机联网实时运行。

2. 物理效应设备

物理效应设备的作用是模拟复现真实世界的物理环境，形成仿真环境或称为虚拟环境。物理效应设备实现的技术途径多种多样。方案之一是采用伺服控制回路，通过伺服控制回路控制形成相应的物理量，例如三轴转台复现飞行器的角运动，动、静压模拟器复现大气压力的变化，三轴转台和动静压模拟器都由伺服控制回路控制实现。方案二是在已存储好的数据库中搜索相应的数据，转换为相应的物理量，例如地形地貌等地理环境的复现。

3. 接口设备

仿真计算机输出的驱动信号经接口变换后驱动相应的物理效应设备。接口设备同时将操作人员或实物系统的控制输入信号馈入仿真计算机。

实时仿真系统原理框图如图 1.4 所示，它实现半实物仿真或人在回路中仿真。在仿真计算

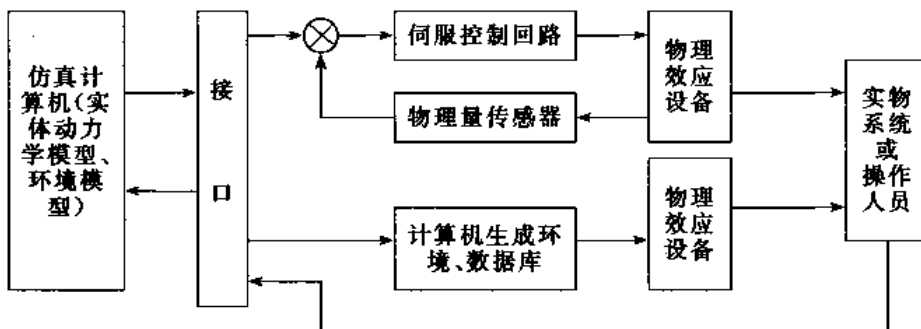


图 1.4 实时仿真系统原理框图

机中通过对动力学系统和环境的数学模型解算，获得系统和环境的各种参数。对于半实物仿真系统，这些参数通过物理效应设备生成传感器所需要的测量环境，对于人在回路中仿真系统，

这些参数通过物理效应设备生成操作人员所需要的感知环境。从而构成完整的闭环仿真系统。物理效应设备是实现系统仿真所需要的中间环节,它的动态特性、静态特性和时间延迟都将对仿真系统的置信度和精度产生影响,应该有严格的技术指标要求。

1.4 实时仿真系统的特点

实时仿真系统是虚、实结合的系统,它具有以下特点:

1. 建立仿真模型。任何仿真系统的实现,必须建立仿真实体的数学模型,例如飞行仿真系统必须建立飞行器的飞行动力学数学模型,它是一组变系数非线性微分方程组,通过选择合适的数值积分算法,将微分方程转换为差分方程形式,即为在数字计算机上能实现的仿真模型。除建立仿真实体数学模型外,还应建立环境模型,例如飞行仿真系统中的大气环境(气压、气温、阵风、紊流、颠簸气流等)模型、地理环境(地形、地貌)模型等。

2. 实物系统的接入与仿真环境的生成。实时仿真系统需要接入实物系统,例如将飞行控制系统(包括传感器、飞控计算机、执行机构)接入飞行仿真系统进行含实物仿真试验。各种物理效应设备将复现实物系统所需要的环境,通过物理效应设备和接口使仿真计算机和接入的实物系统构成一个完整的含实物仿真系统。

3. 系统仿真技术具有良好的可控性、无破坏性、可多次重复、经济、安全,不受气象条件和场地环境的限制。

4. 系统仿真技术可广泛应用于国防、制造业、能源、交通、农业、经济、管理、训练等工程与非工程领域。可广泛应用于产品研制的方案论证、设计分析、生产制造、试验评估、运行维护、人员训练的全过程。

5. 系统仿真的实时性。仿真计算机从“并行”计算的模拟计算机发展到“串行”计算的数字计算机,其中突出的技术关键是如何保证仿真系统的运行实时性。实时性体现在循环迭代计算的帧周期上,应根据仿真系统内的信息变化快慢选定帧周期,对飞行实时仿真系统来说,帧周期一般为几 ms 至几十 ms。

1.5 实时仿真系统的国内外发展概况

研究设计一个控制系统不能孤立地进行,必须和被控对象紧密结合。被控对象可以是飞机、导弹、运载火箭、舰船、电站,化工过程等等。在 50~60 年代,仿真仅仅作为研究设计控制系统的一种试验手段。当时控制系统的设计是在被控对象已经设计定型之后进行的,例如飞行控制系统的控制律是在飞机气动外形布局设计确定之后设计的,飞行控制系统的主要目的在于能代替飞行员驾驶飞机,减轻飞行员的工作负担。70 年代出现主动控制技术(Active Control Technology),将飞机的气动外形布局设计与飞行控制系统控制律的设计结合进行,以设计出飞行性能更佳的飞机,此时仿真技术应用于整个飞机的研制。到 70 年代末,美、英、法国已建成较完善的飞行仿真试验中心。飞行模拟器已经成为和风洞、喷气发动机试验台、结构环境试验设备并列为航空四大试验研究设施。

30 年代美国生产了用于飞行员训练的林克飞行训练器,它使飞行员熟悉飞机的驾驶操作,着重在飞机的机械操纵特性。经过 40 年的发展,到 70 年代,飞行模拟器有了很大改进,仿真

计算机由数字计算机代替了模拟计算机,并着重在飞机的飞行性能、航空电子和武器系统的仿真。再经过近 20 年的发展,到 90 年代,由单武器平台性能仿真发展到多武器平台在作战环境下的体系对抗仿真,着重在仿真器联网的分布交互仿真。

随着技术的发展,现代战争更重要的是体系对抗,仿真技术不仅仅应用于单个武器平台(例如一架飞机、一枚导弹),而是应用于多武器平台在作战环境下的体系对抗。1983 年美国提出了 SIMNET(Simulation Networking)计划,这是一种多武器平台的联网仿真,到 80 年代末 SIMNET 计划结束时,已形成了约 260 个地面装甲车辆仿真器和飞机飞行模拟器以及通讯网络、指挥所和数据处理设备等互联的网络,分布在美国和德国的 11 个城市。在 SIMNET 的基础上发展了异构型网络互联的分布交互仿真(DIS—Distributed Interactive Simulation),1989 年 3 月在美国由 Central Florida 大学的仿真与训练研究所(IST—Institute of Simulation and Training)主办召开了第一届 DIS 研讨会,并成立工作小组,此后每年举行两次研讨会。1992 年 3 月第六届 DIS 研讨会上,提出了 DIS 的体系结构,并从第一届研讨会开始就着手制定 DIS 的各种规范协议。DIS 可定义为:采用协调一致的结构、标准、协议和数据库,通过局域网或广域网将分散在各地的各种类型仿真系统互联,人可以参与交互作用的一种综合环境。

我国航空航天领域在 50 年代末开始对飞行控制系统进行半实物仿真试验,自行研制三轴转台等仿真设备。在“七五”、“八五”期间,我国建立了一批大型的仿真实验室或仿真系统,在我国研制飞机、导弹、运载火箭、舰船等型号中发挥了重要作用。

我国民航于 1975 年首次引进波音—707 和 tri-jet 飞机的飞行模拟器,1988 年引进 MD—82 飞机飞行模拟器,1992 年后又陆续引进波音—737,747,757,767,777 飞机飞行模拟器和空中客车飞机飞行模拟器,都用于民航飞行员的培训。

我国于 1975 年开始自行研制飞行模拟器。1983 年,我国成功研制成歼六飞机飞行模拟器。1993 年又成功研制成运七—100 飞机飞行模拟器,采用了多项先进技术,达到了国外 80 年代末的国际先进水平^[2]。

第二章 飞行实时仿真系统

2.1 飞行实时仿真系统的组成及原理

飞行实时仿真系统用于飞行器的飞行性能和飞行控制、制导、导航等系统的研究。飞行半实物仿真系统(图 2.1)将接入飞行控制、制导、导航等系统的传感器、计算机、执行机构等实物,飞行器飞行动力学数学模型、系统模型、仿真环境模型、外干扰模型等都在仿真计算机上解算,仿真环境模型产生的驱动信号将控制各种物理效应设备,形成各种传感器测量用的虚拟环境。仿真总控台将控制整个仿真系统的运行,包括初始条件和参数的设置、运行过程中的监控和参数记录存储、运行后的试验结果评估和文档建立等。

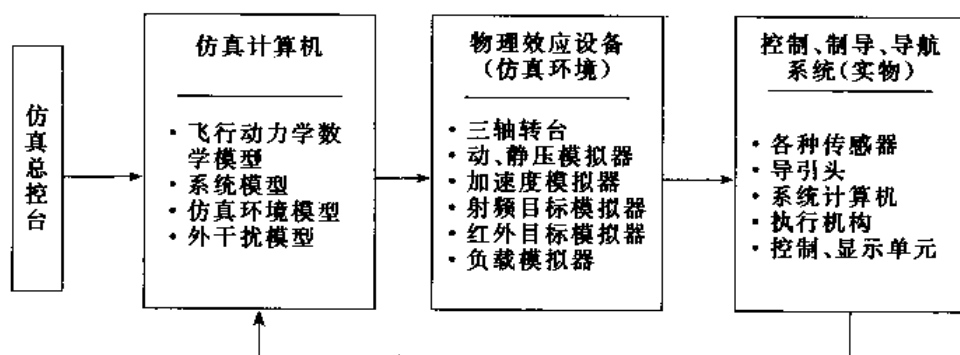


图 2.1 飞行实时仿真系统(半实物仿真系统)

飞机飞行控制系统的主要传感器有姿态陀螺仪、航向陀螺仪、动-静压传感器、过载传感器等,飞机飞行控制半实物仿真系统相应的物理效应设备有三轴转台、动-静压模拟器、加速度模拟器等。三轴转台模拟复现飞机姿态角运动,分别由仿真计算机中飞行动力学数学模型解算出的俯仰角、倾斜角、航向角等基本信号驱动。仿真实验时,飞行控制系统的水平姿态陀螺、航向陀螺、角速率陀螺安装在三轴转台上。动-静压模拟器是一种由伺服系统控制气体容器压力变化的装置,控制信号由仿真计算机中大气数学模型和飞行动力学数学模型解算获得,飞机上的动-静压传感器直接与气体容器连接。稳定的恒速转台产生的离心加速度分量是实现加速度模拟的一种技术方案,仿真实验时,加速度传感器置于恒速转台上,其位置和测量轴线方位随加速度信号改变。飞行控制系统的执行机构操纵飞机舵面时将克服气动载荷形成的铰链力矩;它是飞行速度、飞行高度、舵偏角的函数,负载模拟器将模拟生成铰链力矩加载于飞行控制系统的执行机构(舵机),负载模拟器是一种力伺服系统。

导弹控制制导系统具有姿态传感器、加速度传感器、导引头等测量装置。导弹制导系统的制式有多种,主要区别在于导引头的结构和特性不同,按导引头接收的能量和信号的物理特性来分,有射频、红外、可见光图像,红外图像等。对于不同类型的导引头,进行半实物仿真实验

时,必须有对应的射频目标模拟器和红外目标模拟器。

飞行模拟器是典型的人在回路仿真系统,飞行模拟器复现空中飞行环境,用于对飞行员进行起飞、着陆、爬升、转弯、机动飞行等训练,也可用于对飞机飞行性能、飞机操纵品质、机载系统性能进行分析研究。飞行模拟器由仿真计算机、模拟座舱、运动系统、视景系统、音响系统、操纵负荷系统、仿真总控制台组成(如图 2.2 所示)。飞行器飞行动力学数学模型、系统模型、仿真环境模型、外干扰模型等由仿真计算机解算,通过运动系统、视景系统、音响系统形成给飞行员多维感知信息仿真环境,飞行员根据上述信息犹如在空中一样操纵“飞机”飞行。

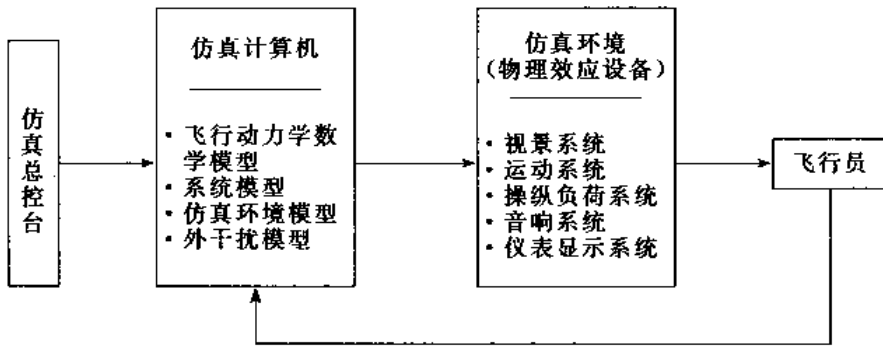


图 2.2 飞行实时仿真系统(人在回路仿真系统)

模拟座舱的布局与飞机座舱一样。模拟座舱内的仪表系统实时指示或显示各种飞行参数和系统参数。音响系统给飞行员提供各种音响效果,如发动机噪声、气流噪声。视景系统产生座舱外的景象,包括机场、跑道、灯光、建筑物、田野、河流、道路、地形地貌、活动目标(空中和地面)等,同时能模拟能见度、雾、雨、雪、闪电等气象条件,以及白天、黄昏、夜间的不同时刻景象。操纵负荷系统给飞行员提供操纵载荷力的感觉,操纵载荷力随飞行速度、飞行高度、舵偏角等的变化而变化。运动系统给飞行员提供运动感觉,目前常采用的六自由度运动系统能提供瞬时过载,但不能提供持续过载,持续过载的模拟可采用离心机、抗荷服、过载座椅等。

2.2 飞行实时仿真系统的功能

飞行半实物仿真系统的功能主要在于对飞行控制、制导、导航系统进行分析研究,包括控制规律、制导规律和导航方式的确定,参数的选择,系统的匹配等,同时对飞行器(飞机、导弹)的动态特性、飞行品质、制导与导航精度进行分析评估。

飞机飞行模拟器的主要功能有:

- (1) 评定飞机飞行动力学特性;
- (2) 飞机飞行操纵性和稳定性研究;
- (3) 飞行控制系统控制律研究;
- (4) 评定飞机操纵系统;
- (5) 评定座舱布局和仪表显示;
- (6) 评定航空综合电子系统的结构、硬件和软件;
- (7) 机载武器系统的评定;
- (8) 对空攻击和对地攻击;

- (9) 空战和武器群仿真;
- (10) 飞行综合控制管理系统研究;
- (11) 应急和故障条件下的操作特性研究;
- (12) 飞行训练。

由上述可以看出,飞行实时仿真系统主要应用于工程研究。其中飞行模拟器(人在回路实时仿真系统)除应用于工程研究外,还应用于人员的培训。工程型飞行模拟器与训练型飞行模拟器的基本原理和组成是相同的,但在性能和使用要求上有所区别,工程型飞行模拟器应考虑通用性,易于进行参数的修改和调整,易于获得和评估仿真结果,对所研究的项目和内容应详细建立数学模型,而训练型飞行模拟器具体针对某一机型,座舱布局要求与真飞机的完全一样,其“飞行”特性着重要求对飞行员操纵输入的飞行参数输出响应与真飞机一样,即更着重在输入/输出的外特性上一致。

工程型飞行模拟器是飞机设计研制的重要工具。通过工程飞行模拟器可以及早发现问题,减少风险;对机载系统进行综合验证,解决各系统之间的动态匹配关系;加速系统试验过程,缩短研制周期;分析解决飞机试飞后发现的技术问题;使飞行员及早参与飞机的设计研制工作。波音公司在研制波音—777 飞机的同时已开始研制波音—777 飞机的飞行模拟器。

训练型飞行模拟器具有节能、经济、安全、不受场地和气象条件的限制、缩短训练周期、提高训练效率等突出优点。训练飞行模拟器按用途和复杂程度,一般可分为三类:

(1) 全任务飞行模拟器(FFS—Full Flight Simulator)

它由模拟座舱、视景系统、运动系统等组成,可覆盖包括起飞、着陆在内的 90% 以上飞行科目的训练。是目前最为先进、完整的训练工具。全任务飞行模拟器分为 A, B, C, D 四个等级,其中 D 级性能最高,训练科目覆盖面最大^[4]。

(2) 飞行训练器(FTD—Flight Training Device)

飞行训练器一般没有运动系统和视景系统,但几乎包括飞机上所有系统的仿真,进行某些系统的专门训练和飞行训练。飞行训练器分为(1~7)共七个等级。

(3) 以计算机为基础的训练(CBT—Computer-Based Training)

最初用于飞行理论教学,是先进的教学手段之一。实质上是具有图形图像、文本显示、语音的多媒体计算机系统。随着技术和需求的发展,将从目前的静态 CBT 向动态 CBT 发展。

2.3 飞行实时仿真系统的基本性能

下面着重讲述人在回路飞行实时仿真系统,即飞行模拟器的基本性能。飞行模拟器原理方块图如图 2.3 所示,它是一种复杂的仿真系统。

我国自行研制的运七—100 飞机飞行模拟器具有以下基本性能^[7]。

1. 功能

- | | |
|------------------------|-------------------|
| (1) 飞行前的准备; | (6) 夜航; |
| (2) 滑行和起飞; | (7) 通讯、导航、转场; |
| (3) 爬升、平飞、转弯、下滑、进场和着陆; | (8) 各种飞行条件下的失速模拟; |
| (4) 航线飞行; | (9) 飞行中的特殊情况处理; |
| (5) 复飞; | (10) 实时飞行记录; |

(11)复现飞行；

(12)锁定与冻结。

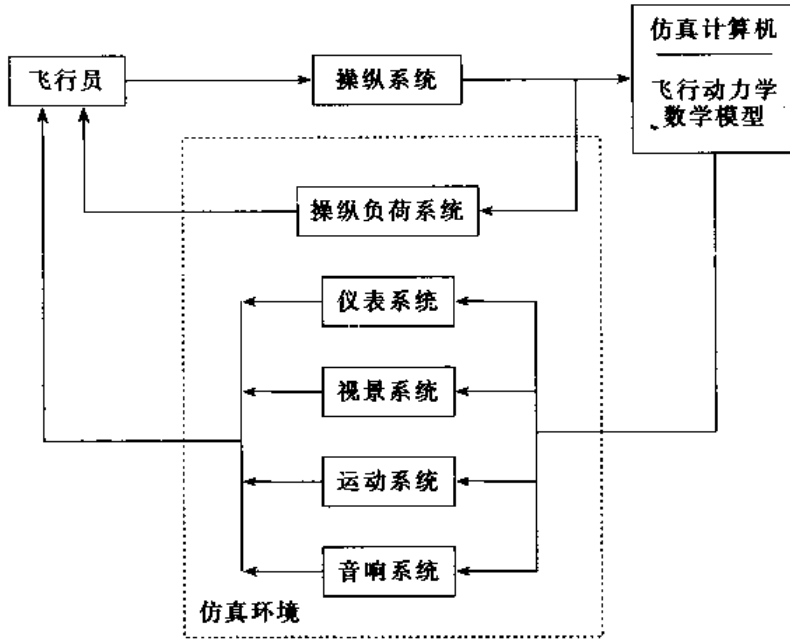


图 2.3 飞行模拟器原理方块图

2. 液压驱动的六自由度运动系统

3. 计算机成像视景系统

三通道、四窗口。对每个飞行员的视场角为 $75^{\circ} \times 30^{\circ}$ 。

4. 数字式操纵负荷系统

帧速率为 1 000 Hz, 液压伺服加载。

5. 采用分布式多处理机计算机系统

6. 接口

A/D 80 路, D/A 200 路, 开入 704 路, 开出 575 路, D/D 接口包括: ARINC429, ARINC575, RS-422 和 RS-232。

7. 建模与算法

采用全量变系数非线性方程;

采用实时快速数值积分算法;

模块化建模、划分速率块调度。

8. 编程语言采用 FORTRAN77, C 语言, 汇编语言

9. 模拟式音响系统

10. 触敏式监视器教员控制台

11. C 级飞行模拟器

12. 可用率 $A > 97\%$

下面讨论几个概念上的重要问题。

1. 建模是仿真的基础

建立数学模型是仿真的基础。如果数学模型不正确, 则仿真结果也不正确; 如果数学模型