

V216.7
1001

V216.7
1001-1
(附图表1张)

现代飞行模拟技术

周自全 刘兴堂 编著
余 静 吴小燕



一九九七年十一月一日



30764689

国防工业出版社

· 北京 ·

(本书为国防工业出版社出版)

764639

图书在版编目(CIP)数据

现代飞行模拟技术/周自全等编著. —北京:国防工业出版社, 1997.1

ISBN 7-118-01559-8

I. 现… II. 周… III. 航空器-飞行模拟-地面试验 IV. V216.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 20926 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10¼ 264 千字

1997 年 1 月第 1 版 1997 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 15.50 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于 1988 年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允

曾 铎

秘 书 长 刘琯德

委 员 尤子平 朱森元 朵英贤

(按姓氏笔划为序) 刘 仁 何庆芝 何国伟

何新贵 宋家树 张汝果

范学虹 胡万忱 柯有安

侯 迁 侯正明 莫梧生

崔尔杰

前言

所谓飞行模拟,就是在实验条件下利用飞行模拟装置和/或飞行数学模型代替被研究的飞行器及其系统,所进行的模仿式地面飞行或空中实际飞行。前者称之为地面飞行模拟,后者叫做空中飞行模拟。

近年来出现的空地综合飞行模拟系统是飞行模拟的新发展。它借助遥测、遥控及自适应技术等,将地面飞行模拟与空中飞行模拟有机地结合为一体,实现了现代飞行模拟技术的新突破。

众所周知,现代飞行器(包括飞机、火箭、导弹、宇宙飞船等)是一个高新技术密集的大系统,只有借助先进的飞行模拟手段才能成功地设计、研究、试验和使用。时至今日,现代飞行模拟技术已经成为航空、航天工业和科学发展的重要支柱和关键技术之一,飞行模拟试验研究已贯穿着飞行器新产品研制和新技术应用的全过程。

现代飞行器领域十分广阔,整个飞行模拟技术应用又很广泛,鉴于篇幅有限,作者将在本书中重点讨论和研究飞机的飞行模拟技术,并集中反映作者及其同伴们多年从事现代飞机飞行模拟所取得的经验和成果。

全书共九章。第一章绪论,介绍了现代飞行模拟的状况和基本知识。第二、三章讲述了现代飞行模拟技术的理论基础。第四、五章论述了地面飞行模拟原理、方法与技术,并讨论了地面飞行模拟器的研制及应用。第六、七、八章深入研究了空中飞行模拟技术及其工程实现。第九章简要地介绍了几种典型的空中飞行模拟器(包括空地综合飞行模拟系统)和它们的应用。

本书第一、三、四、五、八章由刘兴堂教授撰写,第二章由吴小

燕讲师撰写,第六、七章由周自全研究员撰写,第九章由余静高级工程师撰写。全书由刘兴堂教授执笔统编。

本书是对现代飞行模拟部分科研成果和实际应用经验的总结。作者热诚希望本书能对我国飞行模拟研究及其应用起到进一步推动作用,尤其希望对从事系统仿真、系统辨识、系统控制、动力学和算法研究的广大科技工作者、大学教师和研究生有所裨益。

全书写作得到了西北工业大学陈士橐教授和航空工业总公司科技委韩宽庆研究员的支持与直接指导;同时得到了中国飞行试验研究院和空军导弹学院领导的关心与支持;不少同行专家和教授为此书提供了宝贵资料;空军导弹学院绘图室帮助完成了整个插图绘制工作。这里,一并谢忱。在此,作者尤其要感谢为评审和出版本书付出心血的各位专家和同志们。

由于本书涉及知识面广,而作者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

作 者

1995.2. 于西安

目 录

第一章 绪论	1
1.1 飞行模拟的一般概念	1
1.2 飞机飞行模拟与飞行模拟器	2
1.3 现代飞行模拟技术及其应用	3
1.4 现代飞行模拟的工程实现	5
第二章 系统建模与飞行数学模型	9
2.1 引言	9
2.2 数学模型及其形式	9
2.3 数学建模方法与过程	10
2.4 飞行模拟中常用的数学建模方法	13
2.5 采样系统的数学建模	22
2.6 大系统的数学建模与模型简化	26
2.7 飞机飞行数学模型综述	33
2.8 飞行模拟中的典型数学模型	37
第三章 飞行模拟研究中的数字仿真技术	49
3.1 引言	49
3.2 模拟仿真原理和基本方法	51
3.3 模拟仿真技术及其应用	61
3.4 数字仿真原理和基本方法	71
3.5 数字仿真软件及其应用	84
3.6 数—模计算机系统与混合仿真技术	96
第四章 地面飞行模拟系统分析与设计	100
4.1 从空中实际飞行到地面飞行模拟	100
4.2 地面飞行模拟系统的组成和特点	104
4.3 地面飞行模拟的计算机系统和软件	108
4.4 飞行信息取舍及半物理模拟方法	116

4.5 飞行目视信息模拟	122
4.6 飞行角加速度及线过载模拟	133
4.7 操纵杆(蹬)力和舵面气动力的模拟	138
4.8 有关其他飞行信息源的模拟	140
第五章 地面飞行模拟技术的典型应用	146
5.1 引言	146
5.2 地面飞行操纵模拟台及其应用	146
5.3 飞机火控系统地面飞行模拟	156
5.4 空战飞行模拟器及其应用	159
5.5 航空技术专题研究中的地面飞行模拟	163
5.6 地面飞行数学模拟及其应用	166
第六章 飞机飞行动力学的空中模拟理论与技术问题	174
6.1 概述	174
6.2 空中飞行模拟基本原理	176
6.3 空中飞行模拟的控制律研究	179
6.4 变稳定性原理与模型跟踪技术	182
6.5 非线性运动方程下的控制律算法	188
6.6 实现初始条件相似的基本方法	192
6.7 飞机有关参数失配时的模拟补偿技术	194
6.8 保证外部条件相似性的模拟技术	196
第七章 空中飞行模拟器和空地综合飞 行模拟系统的建造技术	200
7.1 引言	200
7.2 空中飞行模拟器的总体方案确立	201
7.3 基本飞机和相似准则的选择	204
7.4 控制系统的结构与特性设计	208
7.5 具有结构缺陷的基本飞机改装技术	216
7.6 非理想测量系统影响的处理方法	222
7.7 空地综合飞行模拟系统的建造原则	224
第八章 用于空中飞行模拟的自适应技术	229
8.1 引言	229
8.2 空中飞行模拟中的自适应控制方案	229

8.3 模型跟踪系统控制律的不断改进	233
8.4 飞行模拟参数估计的 Hagglund's 算法	245
8.5 空中飞行模拟中的参数自适应模型跟踪系统初步设计	253
8.6 空中飞行模拟的多模参数自适应系统	262
第九章 典型空中飞行模拟器及其应用	272
9.1 概述	272
9.2 NT-33A 变稳飞机与 VISTA 计划	278
9.3 RAV 空地飞行模拟系统及有关试验研究	287
9.4 俄罗斯的典型变稳飞机和空地综合飞行模拟系统及其应用	290
9.5 “ASTRA”Hawk 变稳飞机及其应用	296
9.6 HFB-320 变稳飞机和 ATTAS 空中飞行模拟器及其应用	299
9.7 BW-1 变稳飞机及其应用	307
参考文献	310

第一章 绪 论

1.1 飞行模拟的一般概念

在我们周围,凡具有特定功能,按照某些规律结合起来,相互作用、相互依存的事物总体,都属于系统范畴。系统包括工程系统和非工程系统,自然系统和人工系统。系统亦有简单系统和复杂系统,中、小系统和大系统之分。现代飞行器(例如:飞机)显然是一个高新技术密集的复杂大系统。

在系统科学中,一个系统以特有的表征和内在特性而区别于其他系统,这主要是由其实体、属性、活动及环境等四方面内容确定的。实体是组成系统的具体对象;属性是描述实体特性的信息(常以状态和参数表征);活动是指随时间推移发生的状态变化;环境则表示系统所处的界面状况(例如:干扰、约束等)。对于任何系统都有研究这四方面的任务,飞行器亦不例外。

科学实验是人们研究系统的最基本手段,它可以在实际系统上实现,也可以借助模型实验。这里模型作为实际系统的替身,应该能够反映系统的表征和主要特性。模型实验简称仿真,又叫做模拟。

系统仿真是人类研究现实世界(实际系统)最古老的科学和工程方法之一,其历史可追溯至我们祖先的仿鸟飞行和两千年前人类在建筑、造船中对系统比例模型的应用。但它真正形成一门新的边缘学科还是在计算机用于模型研究之后。所谓系统仿真(或称系统模拟),就是利用科学方法构造出一个能够足以反映实际系统表征和基本特性的模型,并在该模型上进行科学实验,从而借助模型结论达到对实际系统分析、设计或开展各种科学研究的目的。由此

不难理解,飞行模拟就是以飞行器及其系统为实验研究对象的系统仿真过程。

模型和运行工具是系统仿真的核心部分。根据采用的模型形式不同,系统仿真被分为物理仿真、数字仿真和半物理仿真。按照所采用的运行工具——仿真计算机的各异,系统仿真又被分为模拟仿真、数字仿真和数/模混合仿真。数字仿真的模型为纯数字模型,所使用的运行工具可以是各种仿真计算机及支持软件。因此,数字仿真又叫做计算机仿真。目前,计算机仿真已成为系统仿真的主流,被广泛地应用于飞行模拟之中。但是,由于现代飞行器是一个复杂的大系统,现代飞行模拟研究课题各种各样,数字仿真往往难以满足要求,所以一般在大型飞行模拟试验中大都采用半物理仿真方法。也就是说,现代飞行模拟实际上是一个以数学模型、实物模型、仿真计算机、仿真软件和其他辅助设备等为一体的半物理实时仿真过程。

1.2 飞机飞行模拟与飞行模拟器

众所周知,飞机作为一种空中武器或飞行载体,它显然比地面及水上运动的载体(或武器)既复杂又具有更大的危险性。为了保证新机试飞一举成功,为了能使飞行员充分安全地完成飞行训练,为了能够在实验室条件下有效地探索飞行战术、技术和完成既定的研究任务,人们早就采用了系统仿真技术,致力于飞行模拟研究及应用。

传统的飞机飞行模拟是在地面实验室条件下完成的,被称为地面飞行模拟。地面飞行模拟应用范围很广,可以简单到飞机部分系统的模拟或某项小专题模拟研究,也可能复杂到通过完善的飞行模拟器完成整架飞机的全任务(起飞、战斗前飞行、空战、退出战斗、返航、着陆等)“地面飞行”,或进行某项大的科研任务(例如:新型电传控制系统的手动—自动状态转换模拟试验)。

地面飞行模拟器是地面飞行模拟设施的总称。通常按照功能

可分为专用飞行模拟器、多功能飞行模拟器和全任务飞行模拟器；按照使用的目的可分为训练飞行模拟器、工程飞行模拟器和研究用飞行模拟器。一台完善的飞行模拟器相当于一架“地面飞行”的飞机。在“地面飞行”中，它能够把飞行员在空中操纵真实飞机时所看到的、听到的、嗅到的、触觉到的飞机姿态、飞机运动、仪表指示、环境变化、周围音响以及本身生理反应等逼真地反映给模拟飞行员，从而构成模拟飞行中的人—机系统特性，获得研究飞行或训练飞行的实际效果。

为了扩大飞行模拟领域、提高模拟有效性和增强模拟逼真度及飞行动感，在上述地面模拟技术的基础上，60年代初出现了空中飞行模拟，这种模拟是在实际飞机上实行的。空中飞行模拟有两种不同的机理类型，即部件实物模型模拟和可变动力学特性模拟。前者采用实物模型代替飞机部分系统或部件进行空中模拟。后者借助专门研制的空中飞行模拟试验机（或称变稳飞机）进行飞行研究。

随着飞行模拟技术和飞行试验研究的发展，近年来出现了空地综合飞行模拟系统，从此直接沟通了地面飞行模拟与空中飞行模拟两大领域，实现了空地综合飞行模拟的新突破。

值得指出，我国于1989年研制成功了空中飞行模拟试验机——BW-1型纵向变稳飞机，填补了空地综合飞行模拟技术的空白，标志着我国已跨入现代飞行模拟领域的世界先进行列。

1.3 现代飞行模拟技术及其应用

现代飞行模拟是一种综合性的高新技术，它以系统仿真、飞行动力学、电子技术、自动控制理论、自适应技术为基础，广泛地应用于航空工业和科学的各个方面。

(1) 在新机研制的每个阶段发挥重大作用。新机研制通常经历战术—技术指标提出，概念设计、详细设计、试制、验证试验和试飞等阶段。飞行模拟将贯穿新机研制的全过程：在战术—技术指标提

出阶段,进行指标论证;在概念设计阶段,通过工程飞行模拟器从诸设计方案中选择出最佳的初步设计方案;在详细设计阶段,通过工程飞行模拟器评定飞机的稳定性和操纵性,评定座舱布局,评定飞行控制系统和航空电子系统,进行人机工效学测定等,从而完善气动力设计、座舱设计、系统最优化设计;在试制阶段,通过工程飞行模拟器进行综合系统试验和飞机与系统性能的演示,并完成试飞前的机组人员训练,以减小试飞风险;在验证试验和试飞阶段,利用工程飞行模拟器帮助拟定和修改试飞大纲,复现试飞中暴露出来的问题、查找原因并提出解决方法。

总之,飞行模拟在新机研制的每个阶段都能够充分发挥作用,从而做到合理设计、加速试验、缩短研制周期、减少工程风险等。

(2)进行广泛的航空科学研究。现代飞行模拟技术是进行航空科学研究的强有力手段和重要工具,其研究领域是十分广泛的:飞行模拟与飞行试验相结合研究飞机操纵性、稳定性和机动性,制定飞行品质规范;研究飞机载荷谱,制定飞机强度规范;研制武器配置和效率,制定火控指南;预测和研究新型高效控制方案和系统;研究飞行员传递函数和人—机特性并进行工效学测定;研究飞机及其系统间的匹配及参数最优化;研究新的战术技术方案;研究飞行系统的冗余技术等。

(3)拟合风洞、理论计算和试飞数据(例如:气动导数等),为设计提供科学依据。

(4)进行飞行驾驶技术探索,尤其是飞机进入临界状态和危险飞行状态情况时的改进驾驶技术及其继续飞行的可能性。

(5)复现实际飞行中难以重复的飞行状态或飞行故障状况,研究其出现这些状态的原因,寻找出处置措施。

(6)进行飞行训练。模拟飞行训练已成为飞行模拟最活跃的部分。因为它具有经济、节能、不受气象条件限制、效率高、绝对安全等独特的优点,从而得到了广泛应用,发展十分迅速。80年代以来在国际上飞行训练模拟器已进入商品化时代,形成了十分繁荣的市场,许多国家竞相研制、使用各种飞行训练模拟器。截止目前可

以说已经没有一种新机不具有自己的训练模拟器。据统计 1979~1983 年仅美国用于飞行训练模拟器的费用就达 50 亿美元。

(7)辅助飞行试验研究。飞行模拟是飞行试验研究的同伴和重要助手,主要用于拟合试飞与地空模拟数据、帮助拟定和修改试飞大纲或进行专题试飞研究等。世界上发达国家的试飞机构除拥有大量地面模拟装置外,都拥有空中飞行模拟试验机。例如:俄罗斯飞行研究院就拥有 20 多种空中飞行模拟试验机和空地综合飞行模拟系统。美国不仅在 F-16, F-17, F-18, A-10, B-1 和航天飞机的研制和试飞中利用了空中飞行模拟试验机,而且为了解决今后 20 年间(从 1990 年起)的研究和试飞任务,制定了建造新型变稳空中飞行模拟试验机的计划,即 VISTA 计划。

1.4 现代飞行模拟的工程实现

现代飞行模拟是一个复杂的系统工程。整个工程包括如下主要部分,如图 1-1 所示。

- (1)试验设计和先验知识获取;
- (2)系统模型建立和验证;
- (3)飞行模拟系统设计与构成;
- (4)飞行模拟试验研究和结果分析。

1.4.1 试验设计和先验知识获取

试验设计和先验知识的获取是飞行模拟研究的准备工作和重要基础。通常,试验设计包括风洞试验、专题试验和飞行试验。试验的类型、规模和内容主要根据飞行模拟任务而确定,其目的在于获得系统建模的有关数据信息和系统部分特性。先验知识的获取同样是按照飞行模拟任务采集其与建模和模拟试验相关的专业知识。对于现代飞行模拟研究而言,飞行动力学,系统辨识、控制理论、自适应技术、数据处理技术、系统仿真、算法设计等方面的专业知识尤为重要。

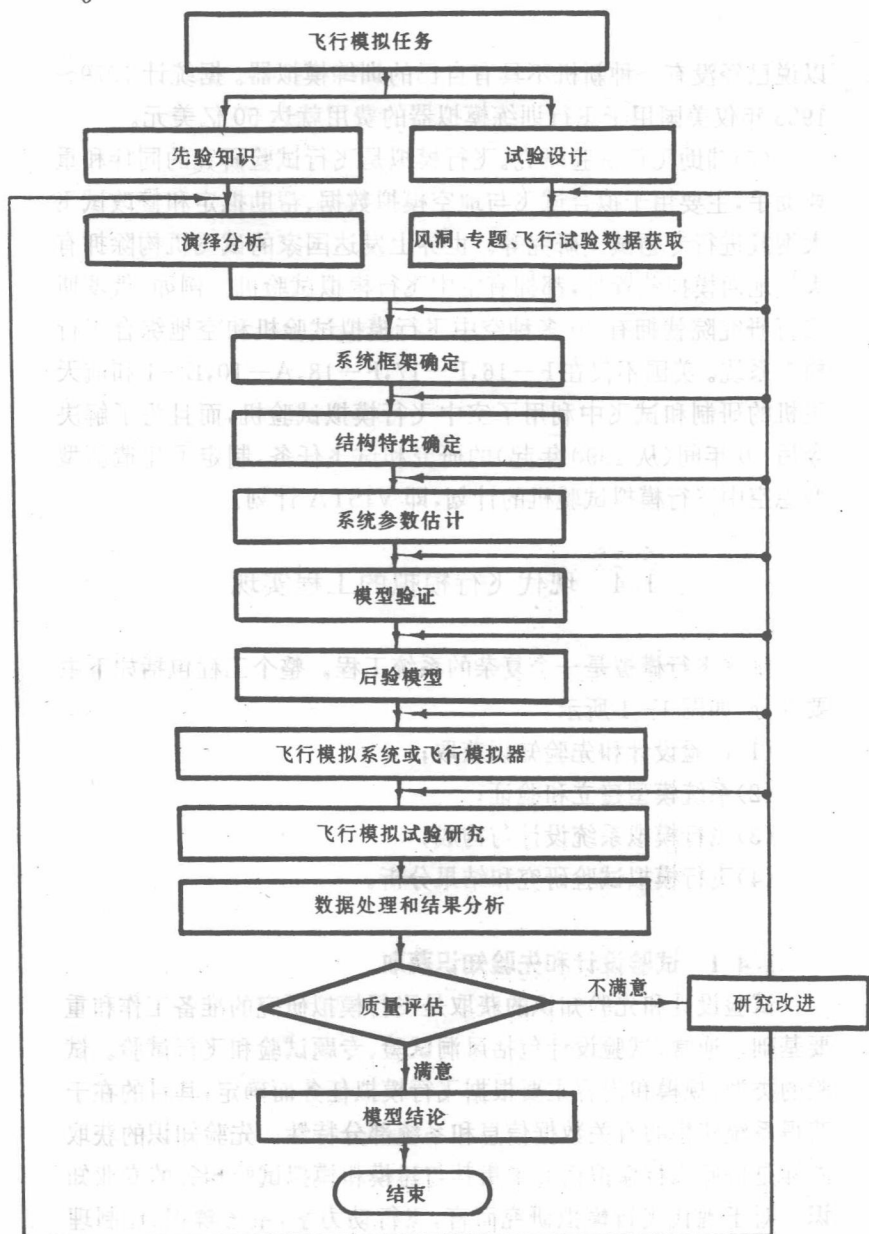


图 1-1 现代飞行模拟工程示意图