

空中飞行模拟器

In-Flight Simulators (IFS)

刘兴堂 吕杰 周自全 著

国防工业出版社

National Defence Industry Press

<http://www.ndip.com.cn>

空中飞行模拟器

In-Flight Simulators (IFS)

刘兴堂 吕杰 周自全 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

空中飞行模拟器 / 刘兴堂等著. —北京: 国防工业出版社, 2003.2

ISBN 7-118-03017-1

I. 空 ... II. 刘 ... III. 飞行模拟器 IV. V216.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 083954 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)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 9½ 插页 1 235 千字

2003 年 2 月第 1 版 2003 年 2 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 25.00 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。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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,原国防科工委于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. 在国防科学技术领域中,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,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备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,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,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,由总装备部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,原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和武器装备建设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 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成
(以姓氏笔画为序)

刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 韩祖南 舒长胜

序

发展现代化高技术的新飞机,为了保证研制的成功,对于它在飞行中可能发生的问题应尽可能在地面进行仿真实验,以便及早发现并采取措施予以解决,避免将来它在空中飞行时出现。

对于有人驾驶的新飞机最关键的问题是飞机的安定性和操纵性问题。莱特兄弟制造的飞机所以成为世界飞机的鼻祖,主要是它在空中飞行能够被飞行员控制。

飞机的安定性和操纵性特别是有飞行员参与后是很难用解析的方法来定量确定的,因此飞机发展的早期对安定性和操纵性的要求只能根据多种飞机飞行的经历,根据飞行员的评述作定性的描述。随着技术进步对飞机的刚体运动有了进一步认识,可以通过解飞机刚体运动方程来确定飞机受外界扰动和飞行员操纵响应的定量变化,这样对于飞机的安定性和操纵性要求(也称飞行品质规范)就有更具体的数据,按这样去做是可以保证当时的飞机有良好的飞行品质。

但第二次世界大战后随着飞机性能的急剧提高,再加上飞行控制系统中广泛采用自动器装置,于是评定新飞机的飞行品质就不能靠计算和分析了,需用在地面进行有飞行员参加的仿真试验。虽然仿真试验台用的硬件都是真飞机上的,但是外景显示画面和飞机运动的过载感觉都不能真实模拟,所以通过地面仿真试验评定飞机飞行品质,有些品质能判断正确,有些品质则会误导,因为地面仿真试验台再做得逼真也不可完全模拟空中飞行。

随着飞机飞行性能和自动化程度进一步提高,发现靠地面仿真试验已不能适应在新机飞行前对其飞行品质的评估,于是发展了空中飞行模拟器或变稳定度飞机。它是用现役成熟的飞机,改

装数字化飞行控制系统,系统的参数可以随时调整,使之模拟新设计飞机各种气动导数和运动响应参数以及驾驶杆力、杆位移的变化等等。由于这种模拟是在飞行中进行的,所以飞行员可以感受飞机过载、视景以及驾驶杆力变化的综合效应。因此在变稳定度飞机上进行新飞机飞行品质的评定是非常逼真有效。上世纪末发展的新一代飞机都经过了变稳定度飞机的模拟试验,而且对试飞中出现的飞行品质问题也通过在变稳定度飞机上的试验而查清原因并研究出了解决措施。所以变稳定度飞机已成为研制新飞机所必须的试验设备。

我国自 20 世纪 70 年代就开始了变稳定度飞机的研制,本书作者直接参与了这方面的工作,取得了很大的成就。他们为了使我国进一步发展这方面的技术,于是利用业余时间写成此书,以享有志于这方面的设计研究人员以及使用人员,这种精神是值得钦佩的。

这部书内容具体、实用,既有自动控制、系统控制和人机工效在模拟器上的应用理论,又有研制和使用空中飞行模拟器的具体工程实践。未来新飞机研制需要发展更好的空中飞行模拟器,研制、使用 and 培训专业人员都需要这方面的专著。然而,有关空中飞行模拟器设计、建造及应用的专著国内至今还没有,国外也仅有介绍空中飞行模拟器的科普性小册子。因此,本书出版无疑将对发展我国新一代空中飞行模拟器有重大推动作用,对从事空中飞行模拟器研制、使用、维护和教学、培训的专业人员有重要参考价值。

张浦芳

2002.6.2

中国科学院院士、中国工程院院士

前 言

众所周知,现代飞行器(包括飞机、火箭、导弹、飞船、卫星等)是一个高技术密集的复杂大系统。为了不断提高它们的性能和增强其系统功能,需要进行探索性理论研究、地面试验研究及飞行试验研究。飞行模拟研究就是其中必不可少的技术手段和主要研究方向之一。实践证明,现代飞行器特别是飞机只有借助先进的飞行模拟技术才能有效地分析、研究、设计、制造、使用和训练。为大家广泛知道的飞行模拟是在地面试验室条件下实现的,它被称之为地面飞行模拟。随着科学技术尤其是计算机仿真技术、飞行控制技术和飞行试验技术的进步,还出现了在实际飞行中进行航空、航天科技研究的飞行模拟,这就是所谓“空中飞行模拟(In-Flight Simulation)”。实现这种飞行模拟的专用实验设施是空中飞行模拟试验机,俗名空中飞行模拟器。

空中飞行模拟器,又叫做变稳飞机,被俄罗斯人称为空中飞行动力学实验室。它能够通过变稳电传系统保证在飞行状态不变情况下,使本机及其控制系统的动态特性在大范围内改变,必要时还可以改变座舱布局和操纵型式,从而同被研究飞机的响应相一致。空中飞行模拟器的研究对象包括战斗机、轰炸机、运输机、直升机及航天飞机等各种航空器和航天器,其应用领域覆盖着飞行力学、飞行控制、飞行试验、航空电子等学科专业的相关课题及新机试飞员培训等。

空中飞行模拟器的突出特点在于:

- 通用性强,一架空中飞行模拟器可应用于许多机种研究和训练;
- 使用方便,技术性能裁剪性好;

- 安全可靠,具有双套、多余度操纵系统,可试飞风险内容而不冒风险;

- 研究费用小,它一般由本机改装而成,其成本低于地面飞行模拟器;

- 模拟逼真度高,可说是在真实的空间环境感觉和飞行员心理状态下,为飞行模拟研究提供了先进综合航空设施和唯一高级飞行训练工具。

因此,空中飞行模拟器在航空、航天科技和工业发展中的作用与地位越来越突出。例如,现代飞机尤其是具有复杂控制系统的飞机,像 YF-16, YF-23, F-16, F-18, YF-22, Su-27 及航天飞机等都毫无例外地进行过空中飞行模拟器验证和试飞员培训。不仅如此,空中飞行模拟器还用来开展多方面飞行品质研究(飞机稳定性与操纵性、人感系统特性、驾驶诱发振荡、大气扰动影响等)和其它航空科技研究,如飞控技术、显示技术、人机工效、综合电子等,以及进行地面飞行模拟校核。

总之,空中飞行模拟器是实现空中飞行模拟的一种多机种、多专业、高效率和低费用的通用飞行试验研究机,没有它就没有空中飞行模拟技术及应用。因此,空中飞行模拟器的设计、建造及应用被认为是发展空中飞行模拟技术的基础性工程和关键环节,一直受到世界发达国家的高度重视。据统计,50 多年来世界上已先后研制和使用了百余种空中飞行模拟器,仅俄罗斯飞行试验研究院就拥有近 20 种。

跟踪世界先进航空、航天技术,我国同样十分重视空中飞行模拟技术及应用的发展,于 20 世纪 80 年代末和 90 年代中期先后研制成功了空中变稳试验机(BW-1)和综合空中飞行模拟试验机(I-IFSTA)。前者填补了我国空中飞行模拟技术领域空白,后者实现了空中飞行模拟器的跨越式发展,并进入了世界先进行列。

我们有幸参加了上述两种型号的空中飞行模拟器研制和其后的应用研究,深感空中飞行模拟器的设计、建造及应用是一项艰巨而复杂的系统工程,它涉及学科知识面广、技术难度大,经过努力

实现了研制中的多方面突破,并积累了一些经验,因此有责任将其奉献给社会,或许对广大读者有所裨益。

全书共六章。第1章 飞行模拟技术与飞行模拟器引论。论述了飞行模拟技术的概念、理论和方法;讨论了飞行模拟器的原理、类型及应用。第2章 空中飞行模拟的理论及方法。阐明了空中飞行模拟器的理论基础和工作原理;讨论了空中飞行模拟器的模拟方法及关键技术问题。第3章 空中飞行模拟器的设计与建造技术。研究了空中飞行模拟器的总体设计技术和主要系统设计方法;讨论了新模拟器首飞前的有关试验技术并总结了空中飞行模拟器的建造原则。第4章 国外空中飞行模拟器实例及分析。介绍了国外典型空中飞行模拟器,分析了它们的设计、建造思想和应用情况。第5章 国内空中飞行模拟器研制和应用。重点阐述了我国自行研制的BW-1和IIFSTA空中飞行模拟器的设计思想、关键技术和工程实现等问题。第6章 改善空中飞行模拟器性能的新途径。讨论了采用新理论与新方法改善现有空中飞行模拟器性能的必要性;研究了利用参数自适应模型跟随技术和多模参数自适应控制技术改善空中飞行模拟器性能的新方法。

刘兴堂教授撰写了本书前言和第1、2、3、6章,参与了第4、5章撰写并进行了全书统稿。吕杰和周自全两位研究员撰写了第4、5章大部分内容。

本书力图反映空中飞行模拟器的当前学术水平和最新科技成果,期望能对我国飞行模拟技术研究及应用,尤其是空中飞行模拟器的发展和新机研制起到重要的推动作用。

本书的主要读者对象是从事航空、航天技术研究和科学试验的设计师、工程师、试飞员及工作人员,亦可作为航空、航天高等院校、部队飞行学院、试飞员学院的师生和从事系统仿真、计算机应用、控制科学与工程、系统工程、机械、电子、力学及算法研究等领域的广大科技工作者的参考书。

本书得以问世,首先是国防科技图书出版基金的资助和顾诵芬院士、李明院士的热情鼓励、积极推荐以及直接指导,同时得到

了中国飞行试验研究院领导和空军工程大学首长的关心与支持，这里一并忱谢。

本书在撰写过程中得到了许多同仁们的关心和帮助。中国飞行试飞研究院袁东研究员、刘艳高级工程师、金国强与乔建军工程师及空军工程大学导弹学院吴晓燕教授、柳世考副教授和张双选、王革命、张武森、邓建军、孙文等硕士为作者提供了许多重要而详实的资料和数据，并协助完成了书稿打印及所有图表绘制。在此，对于他们的辛勤劳动表示衷心地感谢。

本书撰写过程中，作者曾参阅了国内外部分专家、学者的宝贵文献，收益匪浅，在此谨向他们表示敬意。这里尤其要感谢为本书出版付出心血的评委、责任编辑以及其他同志们。

由于作者水平有限，书中定有不妥甚至错误之处，敬请广大读者不吝赐教。

作 者

目 录

第 1 章 飞行模拟技术与飞行模拟器引论	1
1.1 飞行模拟技术	1
1.1.1 系统仿真技术及应用	1
1.1.2 飞行模拟技术概论	3
1.1.3 飞行模拟器及应用	6
1.1.4 国内外飞行模拟器发展概况	8
1.2 地面飞行模拟器	10
1.2.1 地面飞行模拟器基本原理	10
1.2.2 地面飞行模拟器结构及组成	13
1.2.3 主要模拟系统及其模拟方法	15
1.3 空中飞行模拟器	29
1.3.1 空中飞行模拟器基本原理	29
1.3.2 空中飞行模拟器分类和特点	31
1.3.3 空中飞行模拟器发展前景	32
第 2 章 空中飞行模拟理论与方法	34
2.1 空中飞行模拟的信息相似理论	34
2.2 空中飞行模拟的运动学相似理论	36
2.2.1 空中运动相似及其数学描述	36
2.2.2 实现运动学相似的响应反馈法	37
2.2.3 实现运动学相似的模型跟随法	39
2.3 空中飞行模拟的控制理论与方法	42
2.3.1 问题提出及解决方法	42
2.3.2 空中飞行模拟的基本控制律及其形成	43
2.3.3 变稳能力与被模拟飞机特性间的关系	45
2.3.4 控制面少于模拟自由度时的匹配技术	47

2.3.5	三自由度变稳飞机的经验模拟方法	54
2.4	空中飞行模拟的修正理论及方法	59
2.4.1	引言	59
2.4.2	尺寸误差的修正	59
2.4.3	伺服机构影响的修正	61
2.4.4	试验条件同模拟条件差异的处理方法	65
2.4.5	非理想测量系统影响的补偿方法	67
2.4.6	保证初始条件相似的技术措施	69
2.5	空中飞行模拟的人工感觉	70
2.5.1	人工感觉概念及系统	70
2.5.2	人工感觉模拟原理及方法	71
2.5.3	人工感觉数学模型的建立	74
2.6	空中飞行模拟的显示界面	76
2.6.1	概述	76
2.6.2	目标跟踪显示系统的功能要求	77
2.6.3	目标跟踪显示的技术考虑	79
2.6.4	人-机闭环飞行模拟中的显示系统	82
第3章	空中飞行模拟器的设计与建造技术	83
3.1	综述	83
3.2	研制目标及基本设计与建造原则	84
3.2.1	研制目标	84
3.2.2	基本设计与建造原则	85
3.3	总体研制方案的确立	85
3.4	本机选型的若干考虑	86
3.5	空中飞行模拟相似准则的选取	91
3.6	模拟飞行任务剖面的确定	94
3.7	主要系统的部件功能及主要要求	96
3.8	地面试验与飞行试验	103
3.9	变稳电传控制系统设计	105
3.9.1	引言	105
3.9.2	控制系统结构形式的确定原则	105
3.9.3	控制系统的结构形式设计	107

3.10 空地综合飞行模拟系统的建造	111
3.10.1 空地综合飞行模拟系统概念及原理	111
3.10.2 空地综合飞行模拟系统的建造原则	112
3.10.3 空地综合飞行模拟系统的功能协调	114
第4章 国外空中飞行模拟器实例及分析	117
4.1 引言	117
4.2 美国的典型空中飞行模拟器	120
4.2.1 概述	120
4.2.2 NT-33A 变稳飞机	121
4.2.3 VISTA/NF-16D 变稳定性空中飞行模拟试验机	128
4.2.4 RAV 空地综合飞行模拟系统	131
4.2.5 Learjet-24 空中飞行模拟试验机	134
4.2.6 Gulf stream- II (湾流- II) 空中飞行模拟 试验机	137
4.2.7 C-131B 空中飞行模拟试验机	140
4.3 俄罗斯的典型空中飞行模拟器	141
4.3.1 概述	141
4.3.2 Tu-154M IFS 空中飞行模拟器	143
4.3.3 Tu-154 变稳飞机	145
4.3.4 Mi-6 空地综合飞行模拟系统	148
4.4 “ASTRA” Hawk 变稳飞机	152
4.4.1 引言	152
4.4.2 “ASTRA” Hawk 变稳飞机的基本性能	152
4.4.3 “ASTRA” Hawk 的本机选型	153
4.4.4 变稳系统及主要机载设备	153
4.5 德国的典型空中飞行模拟器	155
4.5.1 概述	155
4.5.2 HFB-320 变稳飞机	156
4.5.3 CCV-F104-G 空中飞行模拟试验机	160
4.5.4 先进技术试验飞机系统 ATTAS	164
4.5.5 先进技术试验直升机系统 ATTHes	169
第5章 国内空中飞行模拟器研制及应用	175

5.1 引言	175
5.2 BW-1 变稳飞机	175
5.2.1 概述	175
5.2.2 基本原理、功能及模拟能力	176
5.2.3 本机的选取	177
5.2.4 总体布局与系统配制	178
5.2.5 变稳飞行控制系统	181
5.2.6 BW-1 变稳飞机的典型工程应用	183
5.3 综合空中飞行模拟试验机 IIFSTA	185
5.3.1 引言	185
5.3.2 IIFSTA 的总体设计	185
5.3.3 IIFSTA 的变稳电传飞控系统设计	189
5.3.4 IIFSTA 的人机界面设计	199
5.3.5 IIFSTA 的测试系统设计	202
5.3.6 IIFSTA 的飞行试验及应用	202
第 6 章 改善空中飞行模拟器性能的技术途径	206
6.1 引言	206
6.2 用于空中飞行模拟器的参数自适应模型跟随 技术	207
6.2.1 综述	207
6.2.2 自适应控制方案的确定	208
6.2.3 飞机运动模型建立及控制律形成	210
6.2.4 参数辨识方法及辨识参数设计	214
6.2.5 最小二乘辨识算法及其改进	219
6.2.6 参数缓慢/剧烈变化下的辨识算法	223
6.2.7 噪声方差估计器设计	229
6.2.8 改进后的递推辨识算法	230
6.2.9 辨识器参数设计	232
6.2.10 控制律参数设计	234
6.2.11 仿真试验及结果分析	234
6.3 用于空中飞行模拟器的多模参数自适应控制 技术	237

6.3.1 综述·····	237
6.3.2 快速采样多变量模型跟随控制律的形成·····	238
6.3.3 多模参数辨识方法及其选择·····	240
6.3.4 卡尔曼滤波方程建立·····	241
6.3.5 基于卡尔曼滤波器的多模参数辨识算法·····	244
6.3.6 多模参数自适应控制系统的综合·····	251
6.3.7 仿真系统构成及仿真试验·····	255
6.3.8 仿真分析结论及系统进一步改进·····	270
参考文献·····	272