

卓越工程师教育培养计划配套教材

飞行技术系列

运输机飞行仿真 技术及应用

汪泓 谢东来 编著



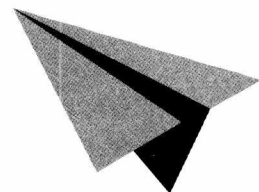
清华大学出版社

013046845

V271.2
10

卓越工程师教育培养计划配套教材

飞行技术系列



运输机飞行仿真 技术及应用

汪泓 谢东来 编著



北航

C1652576

V271.2/10

清华大学出版社
北京

20200810

内 容 简 介

本书分为 11 章,分别论述了运输机飞行仿真技术的发展与现状、飞行模拟机的分级和认证、运输机飞行仿真系统总体设计、飞行仿真建模与解算技术、仿真计算机及网络技术、座舱设备仿真技术、运动系统仿真技术及应用、视景系统仿真技术及应用、航空电子系统仿真技术及应用、声音仿真技术和模拟机辅助系统等内容。本书从飞行仿真工程实际出发,力求结构合理,理论性和实用性并重。

本书既可作为民航运输、民航管理等相关专业的教材,也可作为飞行仿真研究工作的参考书籍。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

运输机飞行仿真技术及应用/汪泓,谢东来编著.--北京:清华大学出版社,2013

(卓越工程师教育培养计划配套教材·飞行技术系列)

ISBN 978-7-302-31768-5

I. ①运… II. ①汪… ②谢… III. ①运输机—飞行模拟—计算机仿真—高等学校—教材 IV. ①V271.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 057823 号

责任编辑:庄红权 洪 英

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17

字 数:410 千字

版 次:2013 年 6 月第 1 版

印 次:2013 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:35.00 元

产品编号:046419-01



我国“十二五”发展规划的重点建设目标之一,是根据国民经济发展对民航业的要求,不断扩充与优化配置航线和飞机等资源。在民航业持续快速发展的同时,必然会使飞行专业技术人才高度匮乏。在《中国民用航空发展第十一个五年规划》中,中国民用航空局对未来20年全行业人才需求进行了预计分析,其中,“十二五”期间需增加飞行员16500人。因此,飞行技术人才的培养是推动或阻碍民航发展的关键。

与其他本科专业相比,飞行技术专业的学生除了学习掌握飞行原理、飞机系统、航空动力装置、航空气象、空中领航、机载设备、仪表飞行程序设计、空中交通管制等飞行技术的专业知识外,还需具备一定的管理能力和较高的英语水平。并且,飞行技术专业人才的培养多采用学历教育与职业教育同步实施的模式,要求同时取得学历学位证书和职业技能证书(飞行驾驶执照)后,才有资格担任民航运输机副驾驶员。

飞行技术人才培养具有专业性强、培养难度大和成本高的特点。伴随着大型民用运输机的生产与发展,必然要求提高飞行员的学历层次。国内设置飞行技术本科专业的高等院校仅有中国民航飞行学院、中国民航大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学、上海工程技术大学等几所。而且,培养学士学位飞行技术人才的历史仅二十多年,尽管积累了一定的培养经验,但适用的专业教材相对较少。

在飞行技术专业的学科建设中,上海工程技术大学飞行学院和航空运输学院秉承服务国家和地区经济建设的宗旨,坚持教学和科研相结合、理论和实践相结合。2010年,上海工程技术大学飞行技术专业被列为教育部卓越工程师教育培养计划的试点专业,上海工程技术大学被列为教育部卓越工程师教育培养计划的示范单位。为满足飞行技术专业卓越工程师教育的需要,上海工程技术大学从事飞行技术专业教学和研究的骨干教师以及航空公司的业务骨干合作编写了“卓越计划”飞行技术系列教材。

“卓越计划”飞行技术系列教材共20本,分别为《运输机飞行仿真技术及应用》、《飞行人因工程》、《机组资源管理》、《飞行运营管理》、《民用航空法概论》、《空中交通管理基础》、《飞机系统》、《航空动力装置》、《飞机空气动力学》、《飞机飞行力学》、《民航运输机飞行性能与计划》、《仪表飞行程序设计原理》、《航空机载电子设备》、《航空气象》、《空中领航》、《陆空通话》、《飞行专业英语(阅读)》、《飞行专业英语(听力)》、《飞行基础英语(一)》、《飞行基础英语(二)》等。

系列教材以理论和实践相结合作为编写的理念和原则,具有基础性、系统性、应用性等



特点。在借鉴国内外相关文献资料的基础上,坚持加强基础理论,对基本概念、基础知识和基本技能进行详细阐述,能满足飞行技术专业卓越工程师教育培养的教学目标和要求。同时,强调理论联系实际,体现“面向工业界、面向世界、面向未来”的工程教育理念,实践上海工程技术大学建设现代化特色大学的办学思想,凸显飞行技术的专业特色。

系列教材在编写过程中,参阅了大量的中外文参考书籍和文献资料,吸收和借鉴了现有部分教材的优势,参考了航空运输企业的相关材料,在此,对国内外有关作者和企业一并表示衷心的感谢。

受编者水平和时间所限,书中难免有错误和疏漏之处,敬请读者提出宝贵意见,不足之处还请同行不吝赐教。

上海工程技术大学 汪泓

2012年1月



飞机飞行仿真(flight simulation)是以系统工程、相似理论、控制论、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,利用数学模型与飞机内的部分实物相结合,对飞机系统进行动态试验和研究的一门综合性应用学科。随着飞行仿真技术的飞速发展,飞行仿真设备已经广泛应用于飞行人员培训和飞机工程设计中。目前,在飞机设计中应用飞行仿真技术大大缩短了飞机的设计研制周期,降低了研究设计成本;在民用航空飞行员培训中,模拟训练已经成为安全、高效、低成本的主要训练手段,甚至在某些方面(如飞机应急或故障处置训练)的训练效果已经超越了实装飞行训练。因此,飞行仿真的相关技术受到航空界的高度重视,并取得了飞速的发展。

飞行仿真是一门综合性应用学科,所涉及的仿真技术门类众多,目前在国内还未形成系统的理论体系。特别是在国内民用航空领域,国外仿真技术和产品垄断严重,民用飞行仿真技术的发展和运用举步维艰。根据我们近些年在飞行仿真领域的不懈努力和追求,国内民用航空飞行仿真技术取得了可喜的发展,在飞行仿真技术研究和仿真产品的研制上取得了许多成果。为将国内外飞行仿真技术归纳成较清晰合理的理论体系,使飞行仿真技术在国内民用航空领域得到进一步的推广和应用,本书对国内外飞行仿真相关的新技术和新成果进行了总结。

鉴于此,本书充分利用上海工程技术大学飞行学院、哈尔滨飞行仿真技术研究所和上海航空公司多年来对民用飞行仿真技术研究、飞行学员教学和飞行员培训等方面积累的经验和对运输机飞行仿真技术研究成果及应用进行了整理。全书共分为 11 章,分别论述了飞行仿真技术的发展与现状、飞行模拟机的分级和认证、运输机飞行仿真系统总体设计、飞行仿真建模与解算技术、仿真计算机及网络技术、仿真座舱设备和信号采集与驱动技术、运动系统仿真技术及应用、视景系统仿真技术及应用、航空电子系统仿真技术及应用、声音仿真技术和模拟机辅助系统等内容。本书从飞行仿真工程实际出发,力求结构合理,理论性和实用性并重。因此,本书既可作为民航运输、民航管理等相关专业的教材,也可作为飞行仿真研究工作的参考书籍。

本书是卓越工程师教育培养计划飞行技术专业建设项目内容,由上海工程技术大学组织编写,上海工程技术大学汪泓和哈尔滨飞行仿真技术研究所谢东来共同主笔,隋成城、丁

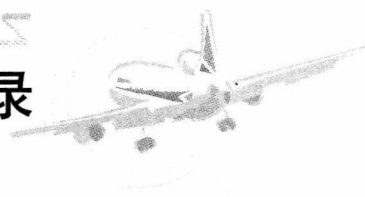


兴国、陈曦、徐宝钢、谢晨、司华伟、孙振宇、赵广兴等同志参与编写。本书经过业内专家多次审阅,他们提出了许多宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

由于编著者水平所限,书中难免存在错漏之处,恳请各位专家和读者给予批评指正。

作 者

2013 年 2 月



第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 运输机飞行仿真技术的发展与现状	7
1.3 运输机飞行仿真技术发展趋势	8
参考文献.....	8
第 2 章 飞行模拟机的分级和认证	9
2.1 引言	9
2.2 飞行模拟机的分级和鉴定标准	9
2.3 中国民用航空局飞机飞行模拟机鉴定性能标准.....	17
2.3.1 飞机飞行模拟机一般要求	17
2.3.2 飞机飞行模拟机客观测试	30
2.3.3 飞机飞行模拟机主观测试	61
2.3.4 关于风切变训练的飞机飞行模拟机鉴定要求	69
2.4 国内外飞行模拟机的认证制度和办法.....	71
2.4.1 飞行模拟设备鉴定的申请、受理和颁证.....	71
2.4.2 飞行模拟设备的鉴定要求	73
2.4.3 模拟机鉴定工作流程	79
参考文献	80
第 3 章 运输机飞行仿真系统总体设计	81
3.1 引言.....	81
3.2 运输机全任务飞行模拟机设计.....	81
3.2.1 运输机全任务飞行模拟机的功能	81
3.2.2 运输机全任务飞行模拟机整体结构设计	86
3.2.3 运输机全任务飞行模拟机分系统设计	86
3.3 三自由度平台飞行模拟机整体设计	106



3.4 简易飞行训练器设计	109
3.5 工程飞行模拟器设计	111
参考文献	112
第4章 飞行仿真建模与解算技术	113
4.1 引言	113
4.2 飞行仿真建模技术	114
4.2.1 机理建模技术在飞行仿真中的应用	115
4.2.2 辨识建模技术在飞行仿真中的应用	117
4.2.3 面向对象建模技术在飞行仿真中的应用	118
4.2.4 可视化建模技术在飞行仿真中的应用	119
4.3 运输机常用仿真模型	121
4.3.1 仿真坐标系统定义	121
4.3.2 常用仿真数学模型	122
4.4 飞行仿真解算技术	131
4.4.1 飞机运动微分方程的求解	131
4.4.2 飞机欧拉角的计算方法	132
4.4.3 飞行性能仿真软件实现	134
4.5 飞行仿真验模技术	134
参考文献	138
第5章 仿真计算机及网络技术	139
5.1 引言	139
5.2 仿真计算机技术	139
5.3 仿真系统中的网络通信技术	140
5.3.1 系统延时分析	141
5.3.2 混合实时通信网络	143
参考文献	148
第6章 座舱设备仿真技术	149
6.1 引言	149
6.2 仿真座舱壳体	149
6.3 仿真操纵系统	150
6.3.1 需要模拟的操纵系统设备	150
6.3.2 操纵负荷系统	152
6.4 仿真仪表系统	156
6.4.1 航空仪表的种类	156
6.4.2 仪表仿真技术	157
6.5 接口系统	162



6.5.1 并、串口信号采集和驱动技术	162
6.5.2 现场总线技术	162
参考文献	166
第7章 运动系统仿真技术及应用	167
7.1 引言	167
7.2 三自由度运动平台	168
7.2.1 三自由度电动平台系统	168
7.2.2 三自由度液压平台系统	169
7.3 六自由度运动平台	169
7.3.1 纯电动驱动六自由度平台系统	170
7.3.2 液压驱动六自由度平台系统	176
7.3.3 带气浮六自由度电动平台系统	176
7.4 过载座椅	179
7.5 离心机	180
参考文献	181
第8章 视景系统仿真技术及应用	182
8.1 引言	182
8.2 视景图像生成	182
8.2.1 计算机成像技术	183
8.2.2 成像计算机	186
8.3 视景显示技术	188
8.3.1 实像显示技术	190
8.3.2 广角虚像显示技术	191
8.3.3 立体成像显示技术	194
8.3.4 边缘融合技术	196
参考文献	199
第9章 航空电子系统仿真技术及应用	200
9.1 引言	200
9.2 电气系统仿真	200
9.2.1 电气系统的组成	200
9.2.2 电气系统的建模及仿真方法	205
9.3 传感器仿真	206
9.3.1 大气数据系统	206
9.3.2 雷达系统	206
9.4 电子飞行仪表系统仿真	210
9.4.1 主飞行显示系统	210



9.4.2 EFIS 控制设备	212
9.5 通信系统仿真	214
9.6 导航系统仿真	216
9.6.1 飞行管理计算机系统	216
9.6.2 全球定位系统	217
9.6.3 大气数据惯性基准系统	218
9.6.4 无线电导航系统	220
9.6.5 导航系统的仿真方法	221
9.7 自动飞行控制系统仿真	222
参考文献	226
第 10 章 声音仿真技术	227
10.1 引言	227
10.2 环境噪声模拟	227
10.2.1 环境噪声模拟的要求	227
10.2.2 模拟机声音模拟系统	228
10.2.3 环境噪声的模拟技术	228
10.3 语音通信系统模拟	230
10.4 告警声音模拟	230
参考文献	231
第 11 章 模拟机辅助系统	232
11.1 引言	232
11.2 电源系统	232
11.3 主控制台系统	235
11.4 教员台系统	237
11.4.1 教员台功能要求	237
11.4.2 教员台设计	238
11.5 空调系统	250
11.5.1 机载空调系统模拟	250
11.5.2 模拟机环境空调系统	250
11.6 登机梯系统	254
11.7 模拟机防火系统	256
11.8 应急撤离系统	257
参考文献	258



绪 论

1.1 引言

飞行仿真(flight simulation)是系统仿真(system simulation)学科的一个重要分支。系统仿真技术是以相似原理、信息技术、系统理论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试验研究的一门新兴综合性技术^[1]。它为进行实际系统的研究、分析、决策、设计,以及专业人员的培训提供了先进的方法,增强了人们对客观世界内在规律的认识能力。飞行仿真通过构造反映实际的飞机运动行为特性的数学模型,在仿真载体(计算机或其他仿真设备)上复现飞机的复杂活动。

飞行仿真技术的应用最早可以追溯到 20 世纪初。当时对那些没有经验的人来说,动力飞行是相当危险的尝试,所以人们不断地寻找各种方法让新飞行员在非真实飞行的情况下学习操纵飞机。例如,“桑德斯老师”就是一架装在万向接头上的完整飞机,它可以迎风自由地旋转及倾斜。在 1910 年左右某种飞行模拟器就是将一个木桶剖开,装在一个铁环上(见图 1-1)。

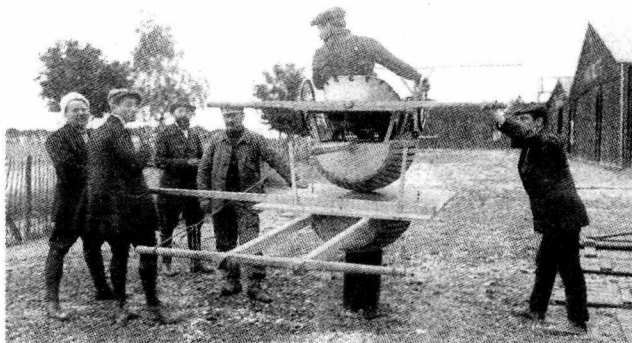


图 1-1 使用木桶、铁环与木头支架做成的飞行模拟器

1929 年,美国人艾德温·林克研制的用于飞行员训练的“蓝盒子林克训练者号”的问世是仿真技术在飞行上应用的一个重要标志。它是世界上第一个用于正式训练飞行技巧的飞行模拟器。艾德温·林克 24 岁开始学习飞行,同期开始研制飞行训练器。他受家族工厂



生产钢琴和管风琴技术的启发,制作了一台可提供俯仰、滚转与偏航等复杂飞行动作的飞行训练器(见图 1-2),1929 年,林克第一次将“蓝盒子”用于训练飞行技巧。

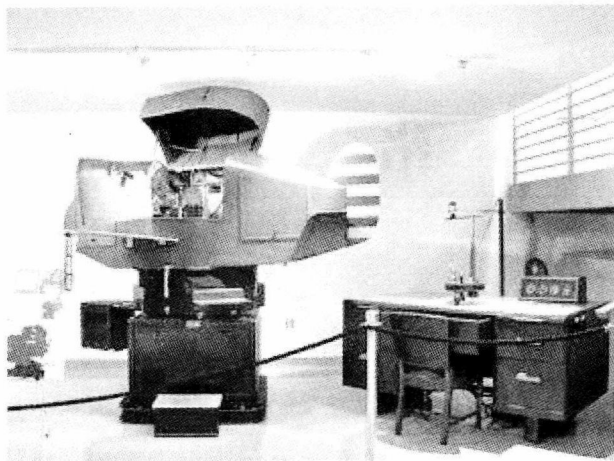


图 1-2 美国人林克研制的用于飞行员训练的“蓝盒子林克训练者号”飞行模拟器

像很多技术一样,飞行仿真技术也是首先应用在军事领域并迅速发展起来,然后广泛应用在民用航空领域。在 1934 年的一天,薄雾笼罩了美国新泽西州内瓦地区,美国陆军飞机公司的代表们聚集在内瓦机场,正在等待一架小型飞机的到来。天气如此糟糕,人们都认为飞机很难准时到达。然而,飞机如期而至,人群顿时欢呼不止。驾驶飞机的是艾德温·林克。林克的飞行经验远远不及经验丰富的军内飞行员,但他却在恶劣气候条件下安全到达,这其中有什么秘密呢?原来,林克此前经常在他自制的训练装置中训练,这个装置就是著名的“蓝盒子林克训练者号”。模拟器最初的推广困难重重,直到 1934 年的“雾天集会”以后,美国陆军航空公司才以 3 500 美元/套的价格订购了 6 套林克模拟训练系统。此后,飞行模拟器日益受到各国重视。第二次世界大战期间,林克公司生产了上万台“蓝盒子”,用来培训同盟国的新飞行员,大约有 30 多个国家的 50 万飞行员在“蓝盒子”里训练过。于是飞行模拟产业从此诞生。直到 20 世纪 70 年代初期仍有些国家的空军在使用这种设备。

第二次世界大战后,飞行控制动力学的研究和通用模拟电子计算机的研制成功促进了飞行仿真技术的发展。20 世纪 80 年代,美国空军建立了先进的仿真实验室,之后飞行仿真技术进入了高速发展的阶段。海湾战争以后,美国公布了其在伊拉克战争中应用系统仿真技术制定作战原则、部署战役兵力和辅助作战的成功案例,各国军事部门由此获得了重要启示。自 1992 年以来,美国总统办公室和国防部每年均修订并公布其国家关键技术和国防关键技术实施规划,其中“仿真与建模”技术一直被认为是“经济高效的高技术”被优先发展。欧洲共同体在 1989 年制定的“欧几里得计划”中,也将建模与仿真技术列为 11 项优先发展的技术领域之一。飞行模拟训练既能进行常规操作训练,又能进行提高应变能力处置各种故障(包括灾难性事故)的训练,它以安全、经济、可控、可重复、无风险、不受气候条件和场地空间限制、高效率、高效益等独特优势,受到各国军方和民用航空领域的高度重视,特别是在民用航空高速发展的今天,飞行模拟训练已经成为飞行员培养过程中必不可少的项目。

到目前为止,飞行仿真技术已经形成了完整的技术体系。进入 20 世纪 90 年代,随着计



计算机技术的飞速发展和仿真技术水平的不断提高,广泛采用了仿真建模和验模技术、科学高效的仿真算法、计算机成像和显示技术、计算机网络通信技术和其他辅助技术等。

1) 建模和仿真技术

建模和仿真技术(M&S)是系统仿真的核心技术。半个多世纪以来,建模与仿真技术在各类应用需求的牵引及有关学科技术的推动下,已经发展形成一个综合性的专业技术体系,并发展为一项通用性、战略性的技术。有人认为,现代建模与仿真(advanced modeling and simulation)技术与高性能计算(high performance computing)一起,成为继理论研究和实验研究之后第三种认识和改造客观世界的重要手段^[2,3]。

从宏观上讲,建模与仿真技术体系是以建模技术、建模与仿真支撑系统技术和仿真应用技术为核心构成的。它以相似原理、模型理论、系统技术、信息技术以及建模与仿真应用领域的有关专业技术为基础,以计算机系统、与应用相关的物理效应设备及仿真器为工具,利用模型对已有的或设想的系统进行研究、分析、试验、运行和评估。现代建模与飞行仿真技术体系结构见图 1-3。

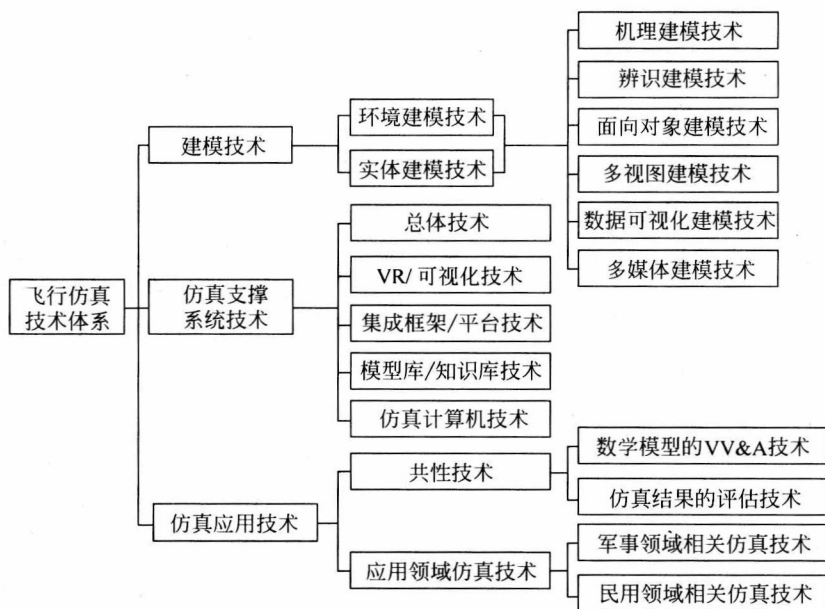


图 1-3 飞行仿真技术的体系结构

模型是对系统及其性质进行定量描述最直接和最清晰的科学手段之一。从仿真系统的组成和相互关系来看,模型是仿真系统的核心。特别是飞机飞行系统的数学模型,它的优劣直接关系到飞行仿真系统是否能逼真地反映飞机的真实性能,并决定仿真系统的成败。

仿真系统的建模包括对原始系统进行仿真的数学建模及仿真系统的各个分系统的建模。对飞行仿真系统来说,原始系统就是飞机本身,仿真系统的各分系统一般包括模拟座舱系统、操纵系统、视景系统、音响系统、运动系统等分系统。本书所研究的内容主要是飞机本身的相关的数学建模。

建模主要是处理飞机系统与模型之间的关系。建模一般要求具有准确性、描述的真实



性、鲁棒性和有效性等。所建立的数学模型是否符合系统仿真的要求主要通过验模过程来检验。

目前,飞行仿真验模通常采用 VV&A(verification, validation and accreditation)技术,即模型的校核、验证和确认技术^[4]。数学仿真模型校核的内容包括数学仿真模型与原始系统的相似关系和误差估算、数值算法、仿真程序逻辑、计算机性能的匹配和精度分析等。数学仿真模型的验证是指将仿真程序测试结果与理论结果或试验结果进行比较,从而验证数学仿真模型的有效性。确认是指在观察仿真系统的使用、查阅相关文档,对整个建模的可信性进行评估的基础上,确认仿真结果是否可接受。

2) 科学高效的仿真算法

仿真算法是计算机仿真最重要的关键技术之一。有了系统的数学模型后,要进行计算机仿真首先必须将数学模型转换成计算机能够计算的仿真模型,这就是仿真算法。飞行仿真的核心计算就是飞行力学问题的求解,飞行力学问题工程求解的目标是得到和分析数值结果,其方法通常是采用求解微分方程、代数方程的数值方法。仿真算法主要是指飞机运动微分方程的数值算法。

对于给定的问题,在选择具体的数值方法时应考虑以下因素^[5]:

(1) 所要求的最后结果的精度和计算方法的稳定性,即在给定步长上允许的误差对最终结果的影响。

(2) 为了得到具有给定精度的最终结果所需要的总计算量。该计算量与每一步计算过程的计算复杂性以及总步数有关。

(3) 在计算机上该计算方法程序化的复杂性将直接影响到仿真计算的实时性。

(4) 计算机的性能需求,即计算速度、存储容量、数的表示方法和有效数字位等。

仿真算法要求具有收敛性、精确性和实时性。目前常用的飞行力学数值计算方法有欧拉法、四元数法、阿当姆斯法、预测和修正法等。

3) 计算机成像和显示技术

在高逼真度的全任务飞行模拟器中,视景系统是重要的组成部分。视景系统为飞行员提供了一个逼真的飞行训练的外界可见环境。视景系统的内容逼真程度、内容丰富程度、显示的清晰度、实时性和视场角的大小都直接影响飞行仿真的效果。在早期的飞行模拟器中,视景环境由可控制摄影机摄取地景沙盘模型的视频景象形成,缺乏灵活性,不能产生与实时飞行状态相符合的正确的透视图像,在视野上受到限制,也不能产生大范围的透视景象效果。随着计算机成像技术的飞速发展和高速、高性能处理器的应用,实时计算机成像系统已广泛应用于飞行仿真视景系统。视景仿真技术可分为计算机成像技术和图像显示技术两个方面。

(1) 计算机图像生成技术

随着计算机图形图像解算处理能力的大幅度提高,仿真视景的逼真度越来越高,相应的应用软件技术也随之发展。对于飞行仿真系统,其仿真视景生成包括视景建模技术和图像实时解算技术。

视景建模技术体现在自然环境和人造实体建模两个方面。真实的地形地貌是视景环境的基础,为实现真实性,目前的视景库的建模方法是以数字地图、地形数据(如 DEM 数据等)、卫星照片及机场三维景物为基础,进行优化预处理,借助各类软件工具(如 MultiGen、Terrex



等)进行建模。人造实体的仿真实现是在前述的视景上增加活动或静止的交通运输工具等人造的实体内容。在军事仿真中,视景中要生成仿真对抗中敌我双方的军事实体,例如敌我双方的飞机、导弹、地面部队对空发射的炮火等。

为了提高视景的图像质量,充分利用计算机的硬件资源,图像实时解算技术一直是仿真研究的重要课题。在飞行仿真视景的实时解算中,一般采用下列几种技术:

① 大地形数据库管理技术:高性能的视景仿真应用要求能在大面积复杂数据库上连续运行而无延迟,对高精度和真实地理信息方面的要求使仿真应用更加复杂。采用大地形数据库管理技术,可以把数据库进行分块,动态分配数据库,消除显示效果上的跳动。

② 多纹理技术和层次细节(levels of detail, LOD)方法:随着仿真环境要求的提高,对纹理的真实性要求也越来越高。因此,对同一物体,根据距离的远近,需要构建由细到粗多个层次的模型,铺设不同的纹理,以降低实时渲染的负载,提高解算速度。

③ 纹理的重复粘贴:对数据库进行统筹分析,找出其纹理的共性,对其纹理进行重新加工。在数据库中,对有共性的景物和地貌都粘贴同一纹理,可节省纹理内存,提高解算速度。

④ 纹理内存采用分页管理:对于大型复杂的数据库,受纹理内存的限制,不可能一次性装入所有的纹理。在实际工作中,采用分页管理纹理内存的方法,预先对纹理进行排序、分类,在程序运行时,根据飞行状态,预先算出所需的纹理,动态分配纹理内存,以提高解算速度。

⑤ 地景库优化技术:在地景数据库构造阶段,为了改善渲染性能,在组内对多边形进行排序,为了达到优化的目的,进行空间重组及分组,合理分配数据库的细节等级,实现多边形计算的最简化。

⑥ 实时三维图形生成技术:三维图形的生成技术已经较为成熟,其关键是如何实现“实时”生成。为了达到实时的目的,图形的刷新频率不能低于 24 帧/秒,最好是高于 30 帧/秒以上。在不降低图形的质量和复杂度的前提下,如何提高刷新频率是该技术的主要研究内容之一。

(2) 图像显示技术

目前,飞行仿真系统的视景显示技术主要有:多窗口虚像、WIDE 虚像、感兴趣区域球幕显示(头位跟踪和眼位跟踪两种方式)、球形幕多通道拼接方式、多板块背投影显示方式。按这些方法构成的显示系统各有优点和局限性,可根据不同需求选择使用。

① 虚像显示技术:多窗口、WIDE 虚像显示是利用球面反射镜无限远成像的原理,由投影器、背投屏幕和球面准直镜构成。飞行员通过球面准直镜观看背投屏幕上的视景图像,其结果是所看到的视景具有非常强的纵深感,给飞行员创造一个逼真的视觉环境。限于硬件结构,这种显示方式的水平视场可达 220° ,但垂直视场最大只能达到 60° 。

② 球面实像显示技术:球形幕实像显示方式可分为球形幕头位跟踪方式和球形幕多通道拼接方式两种。球形幕头位跟踪方式的视场较大(视场角可达水平 360° ,纵向 180°),其缺点是大面积图像显示时的分辨率较低,起落、超低空训练时景物清晰程度不够,难以完成起落、超低空搜寻地靶的训练科目。球形幕多通道拼接方式是比较理想的一种方式,既保持有一定的视场角又能兼顾分辨率和图像清晰度,随着图像生成计算机硬件功能的增强和投影仪技术的发展,构成宽视场显示时,通道间的缝隙、亮度、色差及图像整体一致上都可以满足视觉的要求。

③ 板块显示技术:多板块背投影显示方式是随背投影技术发展而形成的一种新型显



示方式。其特点是视场可以任意扩大,并且所有显示的图像均匀一致,分辨率高,图像清晰。

4) 计算机网络通信技术

现代高性能飞行仿真系统一般由多个相对独立的分系统(如飞行仿真解算系统、视景生成系统、操纵系统、运动系统、武器控制系统、仪表系统、音响系统等)构成。整个系统一般要由几台甚至几十台相互进行数据交互的计算机组成。因此,实时可靠的计算机网络通信技术是飞行仿真系统的关键技术之一。

飞行仿真系统的网络通信系统一般有以下要求:

(1) 实时性好:尽可能缩短系统的总延时。运输机飞行仿真系统一般要求系统的总延时小于 $130\text{ms}^{[6]}$ 。

(2) 可靠性好:要求数据通信过程中不出现数据丢失和传送错误。

(3) 抗干扰能力强:对环境要求低,便于维护。

(4) 扩展性好:可灵活地增减网络通信节点。

随着计算机网络通信技术的飞速发展,目前在飞行仿真中网络通信也有多种可选择的方式。一般根据系统的实际性能和成本需求可采用多层次的仿真通信网络。通信实时性要求高的分系统之间可采用实时网络通信,如目前较通用的 VMIC 公司的 VMIPCI-5565 系列环形反射内存卡、SCRAMNet 环形反射内存卡等建立的实时通信网络,网络通信延时都在纳秒级,可以满足飞行仿真系统内部实时通信的要求。对于网络通信实时性要求不高的数据通信可以采用 $100\text{M}/1\,000\text{M}$ 快速以太网,利用 TCP 或 UDP 方式进行通信。

5) 其他辅助技术

飞行仿真系统中还用到运动系统控制技术、多媒体技术等辅助技术。飞行仿真系统的运动系统一般采用液压或电动的运动平台或抖振座椅等技术。在音响系统中使用多媒体控制技术。

飞机的飞行仿真可以分为飞行训练仿真和工程仿真。飞行训练仿真设备可用于军用机飞行与作战模拟训练、民用机飞行员训练和宇航员训练。训练内容包括驾驶员基本训练和可选科目训练、机组改装、升级和技术恢复训练、机型取证、技能开发和评定训练、飞机系统和程序训练、试飞支持训练、战术程序训练和战争任务演习,并可完成航空交通管制部门在飞行模拟器上的测试,训练模拟器在故障处置训练方面的作用是其他训练工具无法替代的。目前,模拟训练已经成为民用航空飞行员培训的主要手段,而且有取代实装飞行训练的可能。工程模拟器主要用于特定飞行器的研制和特定技术的研究。其中,工程发展模拟器主要用于飞机型号和产品的开发,随着“虚拟制造”技术在我国航空业的普及,模拟器的应用不仅涉及飞机工程发展,还包括制造、材料和操作;研究模拟器的主要目的是解决模拟的差异性,改进和发展新技术,实现最大可能的模拟真实性,研究基本的人机关系特殊课题和特殊试验课题,用于航空航天基础研究,以及改进运输系统效率、安全和环境质量等。由于工程飞行仿真技术在飞机设计中的应用,大大缩短了飞机的设计研制周期,降低了研究设计成本。

飞行训练仿真的目的是利用飞行仿真设备训练飞机使用人员(包括飞行员、空中机械师、空乘人员和地面机务人员等),对应的模拟设备称飞行训练模拟器。飞行训练模拟器可以根据任务和功能划分为不同的类型。例如,全任务飞行模拟器(full flight simulator)、任务型飞行训练器(mission flight simulator)和简单的基于计算机的训练器(CBT)等。飞行