



国防电子信息技术丛书

Principles of Flight Simulation

飞行仿真原理

[英] David Allerton 著

刘兴科 译

车万方 审校



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国防电子信息技术丛书

飞行仿真原理

Principles of Flight Simulation

[英] David Allerton 著

刘兴科 译

车万方 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是飞行仿真领域中一本重量级教科书,是作者在英国南安普顿大学、克兰菲尔德大学和谢菲尔德大学近30年开展航空电子、飞行仿真教学和多年从事飞行仿真模拟器开发的基础上编写而成的。其内容涵盖构成飞行仿真的三大支撑要素——建模、数学算法和软件工具,包括飞行仿真的发展演变历程、建模原理、飞行动力学、飞行控制系统仿真、导航系统仿真、飞机仪表显示和视景系统开发、运动平台仿真等关键技术,列举了工程设计中的关键问题,并给出了相应的解决办法。本书注重理论与实践的有机结合,针对具体问题给出了多个参考实例,特别是其中的代码均来自作者参与开发的实际工程项目,具有很高的参考价值。

本书可以作为从事实时飞行仿真系统设计、研制、开发与应用的广大工程技术人员和科研人员的参考书,也可以作为飞行动力学、航空电子学、自动控制等相关专业高年级本科生、研究生的教学用书。

Principles of Flight Simulation, David Allerton.

Copyright ©2009 John Wiley & Sons, Ltd.

All rights reserved. This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Ltd.

本书简体中文字版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons Ltd. 授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2011-7598

图书在版编目(CIP)数据

飞行仿真原理/(英)阿勒顿(Allerton, D.)著;刘兴科译.—北京:电子工业出版社,2013.1

(国防电子信息信息丛书)

书名原文:Principles of Flight Simulation

ISBN 978-7-121-18927-2

I. ①飞… II. ①阿… ②刘 III. ①航空器—飞行模拟—计算机仿真—高等学校—教材 IV. ①V216.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第271480号

策划编辑:马 岚

责任编辑:余 义

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:24.75 字数:634千字 彩插:2

印 次:2013年1月第1次印刷

定 价:69.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

译者序

自莱特兄弟开启载人动力飞行的新纪元以来,人类在征服天空的进程中为自由翱翔的梦想付出了沉重的代价。有数据表明,第一次世界大战时期因训练手段匮乏,造成在训练中牺牲的飞行员比实际空战中还要多。自那时起,世界各国的航空工业先驱们便开始努力探寻利用安全可控的技术手段在非真实飞行条件下学习飞行操控技术的有效途径。在强烈的应用需求牵引下,早在1910年,英国便率先推出了 Sanders 教练机,成为现代飞行仿真设备的萌芽。百余年来,历经两次世界大战的洗礼,在模拟技术、数字技术、微电子技术、多媒体显示技术、自动控制技术的推动下,飞行仿真已经发展成为航空工业的一个重要分支,为促进航空工业发展发挥了不可替代的作用。

作为现代飞行仿真技术的发源地,英美两国长期以来一直是国际飞行仿真行业的引领者,已经建立起从基于计算机的桌面训练系统(CBT)到六自由度全任务飞行模拟器的完整技术体系,形成了一个年产值达数亿美元的庞大产业,其应用领域已经从最初的飞行训练拓展到先进飞机辅助设计、新一代战斗机虚拟采办等各个领域。鉴于飞行仿真的重要作用,从20世纪80年代开始,由英国民用航空管理局(CAA)和美国联邦航空航天局(FAA)牵头,联合英国皇家航空协会组织了一系列行业会议,制定并公布了多个飞行模拟器质量指南,构成了国际民用航空器组织(ICAO)9625号文件《飞行模拟器质量标准手册》(MCQFS)的基本内容,建立起飞行训练器标准和全任务飞行模拟器分级标准。如今,在民航领域,商用飞机飞行员在经主管机构鉴定的模拟器上完成的训练时间已经可以替代相当一部分空中训练。飞行模拟器作为一种不可或缺的训练手段,正在降低运营成本、化解空中风险、提高训练效益等方面发挥着日益突出的作用。

20世纪90年代以来,在吸收借鉴国外航空工业发展经验的基础上,国内逐步认识到飞行仿真对于飞行员培养、先进航空装备发展建设的重要作用,投资引进或自行开发了多套飞行仿真系统,培养了一支从事飞行仿真系统设计、开发与应用的技术团队。进入21世纪以来,随着我国民用航空事业的蓬勃发展和人民空军的二次创业,飞行仿真事业的发展迎来了有利契机,亟需建立一个与我国航空工业发展规模和水平相适应的飞行仿真产业,培养一大批具备复合型知识结构的飞行仿真专业人员。作为后来者,吸收借鉴英美等航空工业先进国家的成功经验成为我们成长进步的一个必要环节。鉴于国内目前尚缺少同等水平的参考用书,希望这本译著能够为广大从事飞行仿真系统设计、研制、开发与应用的科研人员 and 有志于从事飞行仿真研究的在校学生提供有益参考。

几年来,我有幸能够在国内最优秀的科研团队中从事飞行仿真技术研究工作,在学识渊博、技术精湛的领导悉心培养下逐步成长为技术骨干,与身边年轻的同事们共同开拓着军用飞行仿真这片辽阔的沃土,在机遇与挑战并存的工作中实现着我们强军报国的理想。“九层之台,始于垒土;千里之行,始于足下”,相信通过我们这代人的不懈努力,一定能够推动飞行仿真事业的蓬勃发展,尽快缩小与先进国家的技术差距,建成满足应用需求的飞行仿真技术和管理体系。

感谢电子工业出版社马岚和余义两位编辑,他们严谨细致、一丝不苟的工作态度深深感染了我,感谢他们为本书的付梓所付出的辛劳。由于译者的水平有限,尽管翻译过程中付出了很大努力,但仍然可能会在译文或其他方面存在不妥甚至谬误之处,敬请同行专家和读者给予批评指正。

译者

2012年初冬于北京南苑

前 言

我非常幸运自己能够在 20 世纪 60 年代步入校园。在那个年代，我们都是自己动手修补自行车轮胎，并在不理解基本原理的情况下便开始学习如何驾驶摩托车。随后的 70 年代，我一边读书，一边开始在早期的计算机上开展工作。那个时代的计算机还都附带电路图，如果出现故障(其实经常如此)，我们就需要将图纸摊在凳子上进行修理。那是一个对原创开放的年代，我们自己设计操作系统、创造自己的程序语言、搭建自己的编译器。由于那时的计算机运算速度很慢，所以我们需要设计高效的算法，内存也非常紧张，因此高效的数据存储同样至关重要。

正是因为有了这样的经历，早在 20 世纪 80 年代，当我们开发出微处理系统、显卡和队列处理器之后，构建飞行模拟器便似乎成为一件水到渠成的事情。那时，我全部的航空学知识仅是飞行员坐在机舱前部，空乘人员坐在机舱后部。实际上，在与多位飞行员开展深入沟通后，即便是去确认这些假设，也像是一件荒谬的事情。然而，我却开始致力于设计飞行模拟器。近 20 年来，我已经完成了五种型号的飞行模拟器的设计开发，编写了超过 25 万行软件代码，这些实践经验构成了本书的基础。

我从未后悔自己选择担任一名工程师。我认为工程学就是一门应用学科，研究对象就是通过学习理论知识，并将其应用于解决实际问题^①。飞行仿真需要数学、计算机科学、电子学、机械学和控制理论等多门学科的专业知识。换句话说，飞行仿真是系统工程的具体应用，在这片富饶的土地上，各个层次的本科生和研究生都能够提高理论认识，实践来自各门基础学科的专用技术。本书将重点关注软件和算法，因为它们是支撑飞行仿真的基石。正如 20 世纪 70 年代计算机发展的早期，我们从来没有畏惧使用机器码编写程序。同样，21 世纪的学生也不应被飞行模拟器所需软件的复杂性和多样性吓倒。

鉴于飞行仿真的学科特点，本书的涉及范围较广，因此不足的是本书无法对每个专题都进行足够深入的论述。然而，本书将努力在深度和广度之间做到平衡，较为全面地介绍构建一部飞行模拟器或者开发一个模拟器模块所需的主要软件工具。本书中所讲的飞行模拟器将重点关注模块设计，通过在分布式计算机网络和软件模块层面展开论述，旨在构造一个模块化系统，各软件模块可以实现即插即用，如可以单独开发飞机模型、显示系统或者飞行控制系统。

第 1 章概述了飞行模拟器的发展历程，回顾了各种发展趋势和概念，重点关注其在飞行训练中的作用。第 2 章介绍了系统建模的基本原理。第 3 章论述了飞行动力学的相关背景知识，列出了现代飞行模拟器所需的各种运动学公式。第 4 章从系统角度进一步研究了现代飞机中提出的飞行控制系统的设计方法。第 5 章重点关注了模拟器显示系统所采用的计算机图形学，以及在实时图形应用中使用的 OpenGL 技术。随着航空电子系统在民用和军用飞机中的作用愈发突出，第 6 章主要介绍飞机导航系统建模与仿真问题，特别是卫星导航和惯性导航系统。模拟器开发中的一项主要工作就是模拟器校核与确认，而第 7 章主要介绍了模拟器鉴定过程中采用

^① “我们必须学会做的事情就是从实践中学习。”——亚里士多德

的各种方法。在第5章介绍了计算机图形学的基础上,第8章进一步介绍了模拟器图像生成器中使用的三维实时图形工具,讲解如何运用 OpenGL 和 OpenSceneGraph 技术实现实时渲染。第9章重点关注了教员台所需的用户接口,介绍如何提供更加有效的训练和评估方式。最后一章提出了现代运动平台中涉及的公式和复现运动感所采用的算法,以及这些方法的内在约束。由于涉及范围非常广泛,本书不得不对某些内容进行了省略和简化,如载荷控制、电气驱动、人机接口和飞行训练中的人的因素等问题在本书中都没有涉及。

尽管飞行仿真在大部分高等院校中尚未列为一门正式课程,但它能够为飞行力学、飞行动力学、航空电子学等学科的教学提供素材,可以作为计算机图形学、电子学、电气工程和控制工程等应用教学的实际案例。本书将飞行仿真涉及的多个专业整合在一起,能够作为仿真初学者或者飞行模拟器使用者的入门教材。它还能够为大专院校建设自己的飞行模拟器提供有力支撑,支持相关项目开发,衔接本科和研究生阶段教学。此外,仿真还广泛地应用于其他工业领域,本书旨在为从事模拟器开发工作的技术人员提供相关基础理论,针对具体问题开展论述并给出相关示例代码。

在本书中,介绍或讲述的大部分软件和示例都来自英国谢菲尔德大学正在使用的飞行模拟器,主要是基于我在过去数年间曾经开发的软件。本书中的所有软件都可以从 www.wiley.com/go/allerton 下载(密码:aircraft)^①。

我感到特别幸运的是能够得到多位同事和学生的无私帮助。在南安普顿大学期间,Ed Zalsuka开发了远比那个时代先进的硬件,组成了我们早期模拟器的基础,在低成本仿真领域领先大概10年时间。如果没有他的帮助和鼓励,我可能还在为集成电路开发软件。Dave White(现在是泰雷兹公司训练和仿真事业部首席科学家)为我介绍了飞行动力学的基本理论。在克兰菲尔德大学期间,Michael Rycroft 和 John Stollery 鼓励我在飞行仿真领域开展研究工作,并提供了必要的设施。最后,还得到了由英国高等教育基金委员会提供的75万英镑研究设施开发经费。在谢菲尔德大学期间,David Owens 支持我在工程模拟器领域开展进一步开发工作。过去数年间,多位学生曾对我提供了大力帮助,特别感谢 Tony Clare 在雷达建模和视景生成方面、Stefan Steffanson 在 OpenGL 显示方面、Huamin Jia 在传感器建模方面、Sebastien Delmon 和 Patrick Fayard 在空中飞行控制律方面所做的杰出工作。在本书写作期间,我一直与 Graham Spence 进行着深入的探讨,利用了他在 Linux 和网络方面提供的帮助,以及他提供的数量众多的图形、图片和示例。当我为具体问题所困惑时,他还不止一次地为我提供了软件方面的帮助。还要感谢 Gerhard Serapins 在 CAE 方面提供的帮助,本书中使用了他在运动系统方面的讲义素材,包括图 10.2 和图 10.3。作为英国皇家宇航学会飞行仿真委员会的一名成员,我要对委员会的同仁们的一贯协助和信息支持表示诚挚的感谢。此外,还要感谢英国航空公司、维斯兰特直升机公司、泰雷兹公司、CAE 公司、Frasca、Colin Wood and Sons 等公司长期以来提供的大力支持,特别要感谢泰雷兹公司、CAE 公司和英国皇家宇航学会提供的图片。

① 登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)可注册并获得该文件。——编者注

作者简介

David Allerton 教授于 1972 年毕业于拉格比工程技术学院计算机系统工程系，获得学士学位，1973 年从拉夫堡教育学院获得物理学研究生学位。1977 年，他从剑桥大学获得博士学位，研究方向是并行计算，之后他加入马可尼空间和防御系统公司担任一名助理工程师，从事嵌入式系统软件开发工作。1981 年，他被聘为南安普顿大学电子学系讲师，并于 1987 年晋升为高级讲师。1991 年，他到克兰菲尔德大学航空学院担任电子学教授，并组建航空电子系。2002 年，他受聘为谢菲尔德大学计算系统工程系主任。

Allerton 教授在南安普顿大学、克兰菲尔德大学和谢菲尔德大学期间曾开发了五种型号的飞行模拟器。作为英国皇家宇航学会飞行仿真委员会成员和前任主席，他曾为英国国防和宇航前瞻小组、国家航空电子咨询委员会、合成环境咨询委员会等政府机构工作。1998 年，他获得由英国高等教育基金委员会提供的 75 万英镑资助，用于建设克兰菲尔德大学飞行仿真中心。1992 年到 2001 年间，他在克兰菲尔德大学每年开设一期飞行仿真领域的短期课程。此外，他还是英国工程技术协会会员和英国皇家宇航学会会员，并持有认证工程师资格。他的研究方向包括计算机体系架构、实时软件、计算机图形学、空中管理、飞行仿真、航空电子学和操作系统。他持有 IMC 级私人飞行员驾照，并曾代表约克郡参加网球比赛(以超过 55 岁高龄)。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 历史回顾	1
1.1.1 飞行史上的第一个 40 年(1905 年~1945 年)	1
1.1.2 模拟计算机年代(1945 年~1965 年)	3
1.1.3 数字计算机年代(1965 年~1985 年)	4
1.1.4 微电子技术革命时代(1985 年至今)	5
1.2 仿真的应用案例	7
1.2.1 安全性	8
1.2.2 经济效益	8
1.2.3 训练迁移	10
1.2.4 工程飞行仿真	11
1.3 仿真角色的转变	12
1.4 飞行模拟器构成	15
1.4.1 运动学公式	15
1.4.2 空气动力模型	15
1.4.3 发动机模型	16
1.4.4 数据采集	16
1.4.5 传动模型	17
1.4.6 气象模型	17
1.4.7 视景系统	18
1.4.8 音效系统	19
1.4.9 运动系统	19
1.4.10 控制载荷	20
1.4.11 仪表显示	21
1.4.12 导航系统	21
1.4.13 系统维护	22
1.5 实时仿真基本概念	22
1.6 飞行员感知	24
1.6.1 视觉感知	25
1.6.2 运动感知	27
1.7 训练与仿真	28
1.8 仿真案例	30
1.8.1 商业飞行训练	30

1.8.2	军事飞行训练	31
1.8.3	初级飞行训练	31
1.8.4	陆地车辆模拟器	32
1.8.5	工程飞行模拟器	32
1.8.6	能力测试	33
1.8.7	基于计算机的训练	34
1.8.8	维修培训	34
	参考文献	35
第2章	建模原理	37
2.1	建模的概念	37
2.2	牛顿力学	39
2.3	坐标系	45
2.4	微分方程	46
2.5	数值积分	49
2.5.1	近似方法	49
2.5.2	一阶方法	50
2.5.3	高阶方法	51
2.6	实时计算	55
2.7	数据采集	58
2.7.1	数据转化	59
2.7.2	数据采集	60
2.8	飞行数据	63
2.9	内插	65
2.10	分布式系统	68
2.11	实时协议	77
2.12	建模中的问题	81
	参考文献	82
第3章	飞机动力学	84
3.1	飞行建模原理	84
3.2	大气	84
3.3	力	87
3.3.1	气动升力	87
3.3.2	气动侧力	90
3.3.3	气动阻力	91
3.3.4	推进力	92
3.3.5	重力	93
3.4	力矩	93
3.4.1	静态稳定性	95
3.4.2	气动力矩	96

3.4.3	气动导数	97
3.5	坐标系	99
3.5.1	机体系	99
3.5.2	安稳坐标系	101
3.5.3	风轴系	102
3.5.4	惯性系	102
3.5.5	坐标系变换	102
3.5.6	地心固联坐标系	103
3.5.7	经纬度	105
3.6	四元数法	106
3.7	运动方程	107
3.8	推进系统	110
3.8.1	活塞式发动机	111
3.8.2	喷气式发动机	116
3.9	起落架	118
3.10	公式集	122
3.11	公式回顾——长距离导航	126
3.11.1	科里奥利加速度	127
	参考文献	130
第4章	飞行控制系统仿真	132
4.1	拉普拉斯变换	132
4.2	仿真中的传递函数	135
4.3	PID 控制系统	136
4.4	配平	142
4.5	飞机飞行控制系统	144
4.6	转弯配位器和偏航阻尼器	145
4.7	自动油门	150
4.8	垂直速度管理	152
4.9	高度保持	156
4.10	航向保持	159
4.11	定位跟踪	162
4.12	自动着陆系统	163
4.13	飞行管理系统	166
	参考文献	171
第5章	飞机显示系统	172
5.1	显示系统原理	172
5.2	绘制线条	174
5.3	字符生成	179
5.4	二维图形操作	181

5.5	纹理	183
5.6	OpenGL	185
5.7	飞机仪表仿真	192
5.8	EFIS 显示器仿真	199
5.8.1	姿态指示仪	201
5.8.2	高度计	202
5.8.3	空速指示器	203
5.8.4	罗盘卡	203
5.9	平视显示器	205
	参考文献	208
第 6 章	飞行导航系统仿真	209
6.1	导航原理	209
6.2	导航计算	211
6.3	地图投影	213
6.4	基本飞行信息	214
6.4.1	姿态指示仪	214
6.4.2	高度计	215
6.4.3	空速指示器	215
6.4.4	罗盘	215
6.4.5	垂直速度指示仪	215
6.4.6	转弯指示仪	215
6.4.7	侧滑球	215
6.5	自动定向仪(ADF)	215
6.6	甚高频全向信标(VOR)	217
6.7	测距仪(DME)	218
6.8	仪表着陆系统(ILS)	219
6.9	飞行指挥仪	220
6.10	惯性导航系统	222
6.10.1	坐标系	223
6.10.2	惯导系统方程	223
6.10.3	惯导系统误差建模	226
6.10.4	惯导系统模型确认	229
6.11	全球定位系统	231
	参考文献	238
	进一步阅读材料	239
第 7 章	模型校核	240
7.1	模拟器鉴定和验收	240
7.2	模型校核方法	243
7.2.1	座舱几何构造	246

7.2.2	静态测试	246
7.2.3	开环测试	248
7.2.4	闭环测试	251
7.3	时延	253
7.4	性能分析	262
7.5	纵向动力特性	264
7.6	侧向动力特性	273
7.7	正确的模型校核	277
	参考文献	278
第 8 章	视景系统	280
8.1	背景	280
8.2	视景系统流水线	281
8.3	三维图形运算	284
8.4	实时图像生成	290
8.4.1	基本的实时线框 IG 系统	290
8.4.2	OpenGL 实时 IG 系统	294
8.4.3	OpenGL 实时纹理 IG 系统	296
8.4.4	OpenSceneGraph IG 系统	297
8.5	视景数据库的管理	306
8.6	投影系统	310
8.7	视景系统中的问题	313
	参考文献	315
第 9 章	教员控制台	316
9.1	教育、训练和教学	316
9.2	专项任务训练和基于计算机的训练	317
9.3	教员的职责	318
9.4	用户界面设计	319
9.4.1	人的因素	321
9.4.2	用户操作分类	321
9.4.3	用户接口结构	323
9.4.4	用户输入选择	325
9.4.5	教员命令	331
9.5	实时交互	336
9.6	地图显示	338
9.7	飞行数据记录	343
9.8	脚本	347
	参考文献	354
第 10 章	运动系统	355
10.1	需要运动系统吗?	355

10.2 运动生理学	357
10.3 驱动器结构	359
10.4 运动方程	362
10.5 运动系统的实现	365
10.6 液压执行机构	371
10.7 液压执行机构建模	374
10.8 运动系统的不足	376
10.9 未来的运动系统	379
参考文献	380
缩略词表	382

第1章 绪 论

1.1 历史回顾

1.1.1 飞行史上的第一个40年(1905年~1945年)

航空界的先驱们从短距离“跃起”开始学习如何飞行，通过逐步增加跃起的距离直至最终实现了真正的飞翔(Turner, 1913)。至今仍保留着一些关于早期训练设备的记录，但是那个时期的飞行训练大多局限于在地面上对飞行员进行指导，主要目的是让飞行员体验操纵感受。以1910年开发的一款名为 Sanders 的模拟器(Haward, 1910)为例，该模拟器由一个驾驶舱构成，驾驶舱能够随着迎头风转动。如果风力足够强，驾驶舱便能够响应飞行员的输入，从而实现运动。同年，Walters 和 Antoinette (Adorian et al., 1979)开发出一款类似的设备，飞行教员能够手动控制驾驶舱的运动，如图 1.1 所示。

第一次世界大战期间，双座飞机开始用于飞行训练。从1916年到1933年，英国皇家空军(RAF)就使用著名的 AVRO 504 型模拟器作为基本模拟器材。利用该型设备，飞行教员能够演示操作要领，飞行学员能够跟随反复练习，期间他们可以利用语音通话软管进行交流，直到学员达到能够单独飞行的熟练程度。尽管早期的航空学发展非常迅速，但是那时飞行器的操控品质确实相当糟糕，很多达到了不可原谅的程度。有专家指出，一战期间在训练中牺牲的飞行员比空战中牺牲的还多^①(Winter, 1982)。

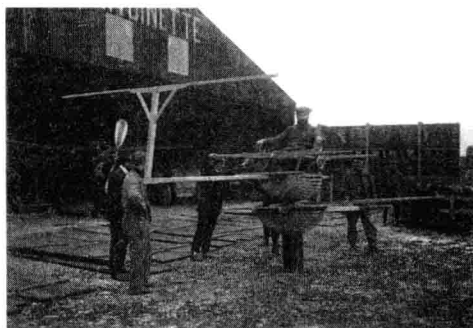


图 1.1 大约 1911 年出现的 Antoinette 飞行训练模拟器(由美国国会图书馆提供)

到1912年，Sperry 就已经开发出安装陀螺仪的基本型自动驾驶仪。在1914年的一次公开表演中，他在驾驶一架 Curtiss 型水上飞机时放开控制，同时让一名技工从机翼上表面走到了翼梢！到了20世纪20年代后期，机载仪表已经可以辅助飞行员安全地在云雨中飞行，而不再需要目视参照地标。在仪表气象条件(IMC)飞行时，飞行员可以利用陀螺地平仪、高度计、空速指示器和罗盘等设备飞行。到了20世纪30年代，尽管飞行训练大纲已经比较成熟，但是那一时期依然使用飞机作为飞行训练的天然课堂，包括仪表飞行训练，而地面学校只能为飞行训练提供理论支持。

^① 在他的著作《The First of the Few》中，Winter 指出在一战中牺牲的 14 166 名英国飞行员中有 8000 名死于训练。在 1918 年 7 月 20 日的国会会议上，国务大臣将其归咎于年轻飞行员普遍缺乏训练。

20 世纪 20 年代后期, 公认的现代飞行仿真的创始人 Edwin Link 开发出一款飞行模拟训练设备, 能够在地面上完成相当一部分仪表飞行训练科目 (Rolfe and Staples, 1986)。Link 在他父亲位于宾厄姆顿的工厂工作, 那是一座制造气动钢琴和教堂风琴的工厂, 他因此具备了深厚的气动力学和机械工程功底。1927 年, 他拿到了飞行驾照, 随即开始利用工程知识建造飞行模拟器。他利用压缩空气转动驾驶舱, 驱动压力计来模拟航空仪表 (Link, 1930)。然而, Link 的观点经受了相当大的阻力, 最初他甚至将模拟器卖给了游乐场。

一战以后, 航空器设计的进步带动了航空工业的快速增长, 比如利用飞机开展货物和邮件投递。美国邮政署就将邮政投递业务转包给了美国陆军航空队。但是到了 20 世纪 30 年代前期, 他们将邮政投递业务扩展到全天候运行, 导致恶性事故急剧增长。因此, 美国陆军航空队从 Link 那里采购了 6 部飞行模拟器, 重点针对仪表飞行训练项目——这或许是飞行仿真在仿真训练中的价值首次被航空界认可。

Link 对于早期飞行训练的贡献影响深远:

- 他利用专用工程技术制造出了一部成功的飞行训练设备;
- 他开发出的飞行模拟器能够满足具体的训练需求;
- 尽管他的飞行模型比较简单且不够精确, 但是该型训练设备却非常有效, 对于提高飞行员的训练质量有很大帮助;
- Link 模拟器的引入确立了飞行训练不仅仅局限于空中飞行训练的概念, 在地面模拟器上同样可以开展有效的训练。

第二次世界大战期间, 仪表飞行条件下的飞行事故频发的问题再次出现, 这是因为机组乘员通常需要夜间长时间飞行, 并经常遭遇恶劣天气。在精神紧张、身体疲劳的状态下, 飞行员非常易于迷失方向。图 1.2 展示了被人亲切地称为绿色盒子的 (因为大部分设备都涂成绿色) 地基“Link trainer”模拟器, 该设备能够辅助飞行员开展仪表飞行训练, 同时还为飞行教员配套提供了用于监视飞行员仪表飞行技能的设备。尽管“Link trainer”模拟器只是基于经验模型的初级模拟设备, 但是它不仅可以模拟飞机驾驶舱的设备环境, 而且可以模拟飞机的动态行为特性。该型设备是一个由气动传动机构控制的小型驾驶舱, 座舱内的设备用于模拟飞机的响应和特性。此外, 该系统还配有一台绘图仪, 便于教员能够实时监控飞行轨迹, 这成为现代教员控制台的原型。二战期间, 超过 50 万盟军飞行员曾经受过“Link trainer”的训练。



图 1.2 “Link trainer”模拟器
(由皇家航空协会提供)

二战期间, 飞行训练领域得到了进一步发展。鉴于飞机的操纵变得更为复杂, 需要掌握从发动机、航空电子、液压到导航系统等多个方面的操纵技能, 模拟器对于飞机操控和正确应对紧急情况等领域的技能训练发挥了重要作用。同一时期, 另一款由英国皇家空军开发的名为 Silloth 的模拟器 (Rolfe and Bolton, 1988), 主要承担了大量轰炸机机组乘员的

训练任务。该型飞行模拟器作为早期专项任务模拟器的代表，是一款固定式设备(没有运动机构)，主要用于优化具体的训练应用。

1.1.2 模拟计算机年代(1945年~1965年)

二战期间出现了反馈控制系统，早期的自动控制装置主要用于稳定舰船和飞机上的炮塔。自那时起，电子电路可以实现对基本微分方程的解算。这种新产品的核心组件是运算放大器，由多个热阴极电子管构成。它通过向电阻反馈电路加入高增益放大器，实现了信号的代数累加。更重要的是，它通过加入电容性反馈实现了信号的积分操作，这种新产品预示了模拟计算机的到来。通常，每个放大器可以被构造成一个由电位器实现增益的累加器或者积分器，这些组件再通过短线连通就能够实时地解算复杂的微分方程组。从那时起到20世纪60年代中期，简单、廉价且功能优异的模拟计算机广泛地用于处理原子弹爆炸、化学反应和电机控制在内的公式运算问题，使得模拟计算成为当时的一门重要工程学科。

在航空领域，模拟计算机被用于建立由一系列非线性微分方程组成的代表飞机动力学运动模型的公式，为研究实验室中的设计师提供了开发先进控制系统的优化手段(Allen, 1993)。实际上，TSR-2和Concord项目拓展了模拟计算机的应用范围，模拟计算实现的主要进步包括：解决了复杂的微分方程(包括非线性方程)问题；实现了实时仿真；可以通过改变电位器的增益或调整部分电路对程序进行快速修改。然而，这项技术也存在诸多不足，主要体现在：

- 真空管可靠性较差且易于漂移，必须定期进行复杂的校准；
- 由于电压范围有限，必须人工按比例调整公式以保证不超过计算机的额定电压范围，且无法降低计算机中使用的变量精度；
- 对两个变量进行乘法和除法操作既慢且困难，尽管已经开发出机械乘法器和变极器，但是缺乏足够精度；
- 诸如三角函数等包含的非线性项很难实现，尽管已经开发出具有预设置位点的计算器，但是这类组件比较贵重，且通常只能用于处理线性运算。

尽管模拟计算机能够显著提高飞行模型的分辨率，但是在运动系统和视景系统方面的进步却非常缓慢。这些早期的模拟器只有简易的运动驱动平台，通常局限于2个或3个自由度，且大部分只能用于模拟仪表飞行条件。这一时期模型板的出现成为一项重大进步，利用模型板能够呈现逼真的外部场景。它利用一部挂在小型支架上的摄像机沿飞机的飞行路径掠过地面，摄像机被安装在一个万向节机构上，可以实现与飞机模型同步在俯仰、偏航、滚转三个方向上的运动。摄像机的视频输出显示在置于飞行员前方的监视器上，模型板的尺寸与飞行员视点位置的几何关系呈正比。尽管利用细粒度的模型板可以实现非常高的逼真度，但是该系统仍存在两大缺陷。首先，飞行员可能会飞出模型板的边界。一种解决方案是将模型板置于活动基板上并沿一个巨大的滚轴运动，这样可以实现模型板的不断循环。第二点不足是摄像机可能会与模型板相撞，而修理模型板甚至摄像机都是一笔不菲的开销。这类系统还为恶作剧爱好者提供了无尽的机会，比如他们会在最后阶段在摄像机前面放上一支蜘蛛。

这一时期取得了两项重大进步。第一，航空公司开始认识到飞行模拟器的重要作用，因为模拟器不仅能降低训练事故，而且能显著压缩训练费用。第二，为航空公司制造飞行模拟器的企业发展成为英美两国的一个重要产业，如英国著名的 Redifon 和 Link Miles 公司。

1.1.3 数字计算机年代(1965年~1985年)

当二战之后模拟计算机被广泛地应用于实时仿真的时候，数字计算机(从密码破译设备发展而来)的进展却非常缓慢。最初，数字计算机只用于商业领域，特别是数据处理和工资管理系统。那一时期，随着运算速度的不断提升，开发出了早期的编程语言，存储设备的容量也不断增大。然而，直到20世纪60年代中期晶体管出现后，才促进了数字计算机的大发展。到了20世纪70年代，从60年代的大型计算机发展而来的小型机已经广泛地用于科学计算。随着处理器速度的持续提升，计算机已经能够满足以15 Hz(即15次/s)的频率解算飞机的运动方程。当速度低于15 Hz时，计算机产生的延迟便能够被飞行员觉察到，会给飞行员的操作带来无法预料的影响。早期的数字计算机主要利用定点运算和优化代码来达到这一速度，而没有采用较慢的浮点运算，且编程通常使用汇编语言。然而，直到20世纪70年代后期，通过在小型计算机上使用高级编程语言，利用硬件浮点处理器才将系统刷新速率提升到了50 Hz或60 Hz。事实上，那个时期的多家模拟器公司都是利用自己开发的处理器才实现了实时处理的需求。

随着小型计算机处理速度的提高，模拟器制造商将数字技术应用到视景系统的开发中，并取得了两项主要成就。第一项成就为利用专用硬件设备，场景中定义的光点可以转换为阴极射线管(CRT)所在坐标系中的坐标。通过快速响应的视频放大器，CRT中的电子束可以经过偏转绘制数以千计的亮点来生成或明或暗的场景。这套系统不仅能够精确地绘制光点，用于生成逼真的夜间图像，而且可以通过调整每个光点的密度来模拟光点的边界或者模糊效果。第二项进步来自投影设备。发展到这个阶段，CRT显示设备已经置于飞行员的前方，然而这种图像缺乏逼真度，飞行员的眼睛需要聚焦于CRT屏幕，盯着似乎处于数公里之外的点。此外，CRT屏幕的面积比运输机的挡风玻璃小得多。经过对多种镜头(包括菲涅耳透镜)的测试，平行投影仪被用于民航模拟器中。从原理上讲，该系统是利用来自于CRT的光束通过半银镜反射到球面镜的某个区域，再反射回半银镜上成为飞行员看到的图像。这一调整取得了两大进步：

- 图像经过扩大，可以将由小尺寸CRT输出的图像填充到整个飞机窗口。商用运输机的前挡风窗口近似于长方形，所以视景系统可以安装在模拟座舱的外部，从而通过调整CRT光束的反射回路便可以修正光学失真或者将图像反转；
- 飞行员接收到的发自CRT的光束几乎能够保持平行，因此能够产生神奇的距离感。

从20世纪70年代到90年代初期，校准投影系统得到了广泛应用。由于彩色CRT取代了黑白CRT来提供影像，加之高速图像处理器的图像处理能力显著提高，从而使校准投影系统有足够的分辨率和带宽支持来自图像发生器生成帧频为60 Hz的数据。然而，该类投影设备存在三项固有不足：

- 制造一块精密的机械弧形曲面镜造价昂贵；