

王扬 郭晨 章晓明 编著

现代仿真器技术

Modern Simulator
Technology



国防工业出版社
National Defense Industry Press

现代仿真器技术

Modern Simulator Technology

王扬 郭晨 章晓明 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

现代仿真器技术 / 王扬, 郭晨, 章晓明编著. —北京: 国防工业出版社, 2012.12

ISBN 978-7-118-07432-1

I. ①现… II. ①王… ②郭… ③章… III. ①仿真器 IV. ①TP337

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 257542 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 19½ 字数 338 千字

2012 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 仿真器的构成	1
1.2 仿真器的特点	3
1.3 仿真器的分类及用途	3
1.3.1 按应用领域分类	4
1.3.2 按系统构成分类	7
1.3.3 按使用目的分类	8
1.4 仿真器的开发工具及运行环境	9
1.5 仿真器技术的发展方向	10
1.6 载体操纵型和过程生产型仿真器发展简史	11
第 2 章 仿真器开发平台	13
2.1 仿真器计算机系统	13
2.1.1 仿真器计算机选型及其发展	13
2.1.2 仿真器用计算机的要求	14
2.2 仿真器开发的支撑软件	15
2.2.1 实时面向对象的 ROSE 支撑软件	16
2.2.2 连续过程控制与仿真支撑软件 PROSIMS	20
2.2.3 PROSIMS 与 ROSE 的简单比较及其改进	22
2.2.4 仿真器系统中的教员工作站	23
2.2.5 仿真器系统中的工程师工作站	26
2.3 仿真器开发的关键技术	26
2.3.1 视景仿真技术	26
2.3.2 视景仿真三维图像生成软件	30
2.3.3 视景显示系统	33
2.3.4 仪表和操作设备仿真技术	36
2.3.5 运动仿真技术	39
2.3.6 声响仿真技术	49

第 3 章 虚拟现实 (VR) 与仿真器	55
3.1 VR 技术与仿真器技术的关系	55
3.2 VR 技术介绍	57
3.2.1 VR 系统的构成	57
3.2.2 三维图像技术在 VR 中的应用	57
3.2.3 虚拟音响技术	59
3.2.4 人-机交互	59
3.2.5 特殊感觉	61
3.3 VR 系统	62
3.3.1 VIEW 系统	62
3.3.2 Super Vision 系统	63
3.4 VR 技术在仿真器领域的应用及发展前景	64
3.4.1 载体型仿真器中 VR 技术的应用	65
3.4.2 工业仿真器中 VR 技术的应用	65
3.4.3 医学培训仿真器中 VR 技术的应用	66
3.4.4 军事仿真器中 VR 技术的应用	66
3.4.5 娱乐仿真器中 VR 技术的应用	67
第 4 章 飞行仿真器	69
4.1 飞行仿真器的构成	69
4.2 现代飞行仿真器的特点	70
4.2.1 固定翼飞机飞行仿真器特点	70
4.2.2 旋转翼飞机(直升机)飞行仿真器特点	70
4.3 固定翼飞机飞行仿真的数学模型	71
4.3.1 飞行仿真器数学模型	71
4.3.2 飞行动力学模型	72
4.3.3 飞机发动机动态数学模型	82
4.4 直升机飞行仿真的数学模型	84
4.4.1 仿真器数学模型	84
4.4.2 飞行仿真器数学模型	86
4.5 飞行仿真器的操纵负载仿真系统	90
4.5.1 操纵负载仿真系统的作用	90
4.5.2 操纵负载仿真系统的构成	91
4.5.3 全数字操纵负载仿真系统举例	91

4.5.4	力加载系统简介	93
4.6	飞行仿真器的运动系统	95
4.6.1	民用飞行仿真器的运动系统	95
4.6.2	军用飞行仿真器的运动系统	96
4.7	飞行仿真器的其他技术问题	100
4.7.1	飞行仿真器的视景系统	100
4.7.2	飞行仿真器的声响系统	101
4.7.3	飞行仿真器的仪表仿真系统	101
第5章	水面船舶和潜艇操纵仿真器	103
5.1	水面船舶操纵仿真器	103
5.1.1	船舶操纵仿真器的特点和构成	104
5.1.2	水面船舶操纵仿真器的数学模型	105
5.1.3	水面船舶操纵仿真器视景系统的特点	114
5.1.4	ARPA 雷达仿真器简介	115
5.2	船舶轮机仿真器	118
5.2.1	船舶轮机仿真器的主要分系统	119
5.2.2	船舶轮机仿真器的功能	120
5.2.3	船舶轮机仿真器的构成	120
5.3	潜艇操纵仿真器	121
5.3.1	潜艇操纵仿真器的特点	121
5.3.2	潜艇操纵仿真器的功能及主要技术指标	122
5.3.3	潜艇操纵仿真器的构成	123
5.3.4	潜艇仿真器的数学模型	124
5.3.5	潜艇操纵仿真器的潜望镜视景系统	129
5.3.6	潜艇操纵仿真器的运动仿真系统	131
5.3.7	潜艇操纵仿真器的仿真仪表及操纵设备	132
第6章	陆地车辆驾驶仿真器	134
6.1	汽车驾驶仿真器	134
6.1.1	汽车仿真器的类别	134
6.1.2	汽车仿真器的构成及特点	135
6.1.3	汽车仿真器的数学模型	136
6.1.4	汽车仿真器的运动仿真系统	142

6.1.5	汽车仿真器的视景生成及显示	145
6.2	列车驾驶仿真器	147
6.2.1	列车仿真器的构成及其特点	147
6.2.2	列车仿真器的数学模型	149
6.2.3	列车仿真器的运动仿真	152
6.2.4	列车仿真器的视景生成及显示	152
6.2.5	列车仿真器的音响仿真	154
6.2.6	列车仿真器使用的计算机	154
6.2.7	列车仿真器教员站	155
第7章	火力发电厂仿真器	156
7.1	火电机组仿真器的构成及特点	156
7.1.1	现代火电机组仿真器的构成	156
7.1.2	现代火电机组仿真器的特点及性能要求	158
7.2	火电机组仿真器的数学模型	159
7.2.1	火电机组仿真器数学模型的特点	159
7.2.2	火电机组仿真器数学模型应具有的功能	160
7.2.3	数学模型的结构框图	160
7.2.4	锅炉系统的数学模型	161
7.2.5	汽轮机系统的数学模型	176
7.2.6	凝结水及给水系统的数学模型	182
7.2.7	流体网络计算方法	189
7.2.8	发电机和励磁系统的数学模型	193
7.3	火电机组仿真器的支撑软件	197
7.3.1	数据库管理功能	198
7.3.2	数据文件管理功能	198
7.3.3	时间运行环境	199
7.3.4	机组运行管理功能	199
7.4	火电机组控制系统的仿真技术	200
7.4.1	火电机组集散控制系统仿真的类型	200
7.4.2	火电机组集散控制系统仿真的内容	201
7.4.3	控制系统组态的自动化技术	201
7.4.4	操作员站的仿真技术	202
7.4.5	就地操作站及软盘台仿真技术	204

7.5	多媒体技术的应用	204
7.6	BTG 盘台仿真技术	205
7.7	通用型火电机组全范围教学培训仿真器	206
第 8 章	军事训练仿真器	208
8.1	空军训练仿真器	208
8.1.1	单座舱歼击机攻击仿真器	208
8.1.2	双座舱空中格斗仿真器	213
8.1.3	平显仿真系统	215
8.1.4	轰炸机仿真器	218
8.1.5	空中加油仿真器	224
8.2	海军训练仿真器	227
8.2.1	快艇鱼雷攻击训练仿真器	227
8.2.2	潜艇鱼雷攻击仿真器	237
8.2.3	舰载小口径炮对空射击仿真器	247
8.3	陆军训练仿真器	255
8.3.1	步兵武器射击仿真器	255
8.3.2	坦克及其火控系统的仿真器	258
8.3.3	反坦克导弹射击训练仿真器	264
8.3.4	便携式防空导弹训练仿真器	271
第 9 章	现代仿真技术在娱乐仿真器中的应用	279
9.1	汽车模拟器	279
9.1.1	汽车模拟器主要系统简介	279
9.1.2	汽车模拟器的技术特点	280
9.2	飞行模拟器	281
9.2.1	飞行模拟器主要系统简介	281
9.2.2	飞行模拟器的技术特点	284
9.3	虚拟驾马车模拟器	284
9.4	虚拟皮划艇模拟器	285
9.5	雪地摩托模拟器	287
	参考文献	290

Contents

Chapter 1	Review	1
1.1	Composition of Simulator	1
1.2	Characteristics of Simulator	3
1.3	Classification and Application of Simulator	3
1.3.1	Classification According to Application Areas	4
1.3.2	Classification According to System Composing	7
1.3.3	Classification According to Simulator Use	8
1.4	Development Tool and Running Environment of Simulator	9
1.5	Development Prospect of Simulator Technology	10
1.6	Simple Review for Development of Vehicle Operation and Process Production Simulators	11
Chapter 2	Platforms for Simulator Development	13
2.1	Computer Systems for Simulator Development	13
2.1.1	Selecting and Development of Simulator Computer	13
2.1.2	Requirements for Simulator Computer	14
2.2	Support Software for Simulator Development	15
2.2.1	Real-time Object – oriented Support Software Environment	16
2.2.2	Continuous Process Control and Simulation Support Software—PROSIMS	20
2.2.3	Improvement of PROSIMS Simple Comparing It with ROSE	22
2.2.4	Instructor Workstation in Simulator System	23
2.2.5	Engineer Workstation in Simulator System	26
2.3	Key Technologies in Developing of Simulator	26
2.3.1	Vision Simulation Technology	26

2. 3. 2	Creating Software of 3D Vision Simulation Image	30
2. 3. 3	Vision Display System	33
2. 3. 4	Simulation Technology of Instrumentation and Operation Facilities	36
2. 3. 5	Simulation Technology of Motion	39
2. 3. 6	Simulation Technology of Sound	49
Chapter 3	Virtual Reality (VR) and Simulator	55
3. 1	Relation of Technique of Virtual Reality and Simulator	55
3. 2	Introduction to VR Technology	57
3. 2. 1	Composing of VR System	57
3. 2. 2	Application of 3D Image Technology in VR	57
3. 2. 3	Virtual Sound Technology	59
3. 2. 4	Interaction of Man-Machine	59
3. 2. 5	Unusual Sense	61
3. 3	VR System	62
3. 3. 1	VIEW System	62
3. 3. 2	Super Vision System	63
3. 4	Application and Prospect of VR in Simulator Domain	64
3. 4. 1	Application of VR Technology in Vehicle Simulator	65
3. 4. 2	Application of VR Technology in Industrial Simulator	65
3. 4. 3	Application of VR Technology in Medical Training Simulator	66
3. 4. 4	Application of VR Technology in Military Simulator	66
3. 4. 5	Application of VR Technology in Entertainment Simulator	67
Chapter 4	Flight Simulator	69
4. 1	Composition of Flight Simulator	69
4. 2	Characteristics of Modern Flight Simulator	70
4. 2. 1	Characteristics of Flight Simulator for Fixed Wing Airplane	70
4. 2. 2	Characteristics of Flight Simulator for Rotaplane (Helicopter)	70

4.3	Mathematical Model of Fixed Wing Airplane Flight Simulation	71
4.3.1	Mathematical Model for Fixed Wing Airplane Flight Simulation	71
4.3.2	Flight Dynamical Model of Fixed Wing Airplane	72
4.3.3	Dynamical Mathematical Model of Airplane Engine	82
4.4	Mathematical Model of Helicopter Flight Simulation	84
4.4.1	Content of Mathematical Model for Helicopter Simulator	84
4.4.2	Mathematical Model of Helicopter Flight Simulator	86
4.5	Manipulation Simulation System of Flight Simulator	90
4.5.1	Function of Operation Load Simulation System	90
4.5.2	Composition of Operation Load Simulation System	91
4.5.3	Example of Full Digital Operation Load Simulation System	91
4.5.4	Brief Introduction of Force Loading System	93
4.6	Motion System of Flight Simulator	95
4.6.1	Motion System of Civil Aviation Simulator	95
4.6.2	Motion System of Military Flight Simulator	96
4.7	Other Technical Issues of Flight Simulator	100
4.7.1	Vision System of Flight Simulator	100
4.7.2	Sound System of Flight Simulator	101
4.7.3	Instrumentation Simulation System of Flight Simulator	101
Chapter 5	Handling Simulator of Surface Vehicle and Submarine	103
5.1	Handling Simulator of Surface Vehicle	103
5.1.1	Characteristics and Composing of Vehicle Handling Simulator	104
5.1.2	Mathematical Model of Surface Vehicle Handling Simulator	105
5.1.3	Characteristics of Vision System for Surface Vehicle Handling Simulator	114
5.1.4	Brief Introduction of ARPA Simulator	115
5.2	Marine Engine Room Simulator	118
5.2.1	Main Sub-Systems of Marine Engine Room Simulator	119

5.2.2	Function of Marine Engine Room Simulator	120
5.2.3	Composing of Marine Engine Room Simulator	120
5.3	Submarine Handling Simulator	121
5.3.1	Characteristics of Submarine Handling Simulator	121
5.3.2	Function and Main Specification of Submarine Handling Simulator	122
5.3.3	Composing of Submarine Handling Simulator	123
5.3.4	Mathematical Model of Submarine Handling Simulator	124
5.3.5	Periscope Vision System of Submarine Handling Simulator	129
5.3.6	Motion Simulation System of Submarine Handling Simulator	131
5.3.7	Simulation Instrumentation and Operation Facilities of Submarine Handling Simulator	132
Chapter 6	Terrestrial Vehicle Driving Simulator	134
6.1	Automobile Driving Simulator	134
6.1.1	Classification of Automobile Simulator	134
6.1.2	Composing and Characteristics of Automobile Simulator	135
6.1.3	Mathematical Model of Automobile Simulator	136
6.1.4	Motion Simulation System of Automobile Simulator	142
6.1.5	Vision Creating and Display of Automobile Simulator	145
6.2	Train Driving Simulator	147
6.2.1	Composing and Characteristics of Train Simulator	147
6.2.2	Mathematical Model of Train Simulator	149
6.2.3	Motion Simulation of Train Simulator	152
6.2.4	Vision Creating and Display of Train Simulator	152
6.2.5	Sound Simulation of Train Simulator	154
6.2.6	Computers Used in Train Simulator	154
6.2.7	Instructors Workstation of Train Simulator	155
Chapter 7	Power Plant Simulator	156
7.1	Composition and Characteristics of Power Plant Simulator	156

7. 1. 1	Composing of Modern Thermal Power Generating Set Simulator	156
7. 1. 2	Characteristics and Performance Requirements of Modern Thermal Power Generating Set Simulator	158
7. 2	Mathematical Model of Power Plant Simulator	159
7. 2. 1	Characteristics of Mathematical Model of Thermal Power Generating Set Simulator	159
7. 2. 2	Function Possessed with Mathematical Model of Thermal Power Generating Set Simulator	160
7. 2. 3	Configuration Chart of Mathematical Model	160
7. 2. 4	Mathematical Model of Boiler System	161
7. 2. 5	Mathematical Model of Steam Turbine System	176
7. 2. 6	Mathematical Model of Condensing Water and Feedwater System	182
7. 2. 7	Computing Method for Fluid Network	189
7. 2. 8	Mathematical Model of Generator and Excitation System ...	193
7. 3	Support Software of Power Plant Simulator	197
7. 3. 1	Management Function of Database	198
7. 3. 2	Management Function for Data Files	198
7. 3. 3	Time Running Environment	199
7. 3. 4	Management Function for Generating Set Operation	199
7. 4	Simulation for Control System of Power Plant Simulator	200
7. 4. 1	Simulation Type of Centralizing-Distributing Control System for Thermal Power Generating Set	200
7. 4. 2	Content of Centralizing-Distributing Control System for Thermal Power Generating Set	201
7. 4. 3	Automation Technology of Control System Configuration ...	201
7. 4. 4	Simulation Technology of Operator Workstation	202
7. 4. 5	Simulation Technology of on the Spot Workstation and Soft Panel	204
7. 5	Application of Multimedia Technique	204
7. 6	Simulation for BTG Panel	205
7. 7	Universal Full Mission Power Plant Training Simulator	206

Chapter 8 Military Training Simulator	208
8.1 Training Simulators for Air Force	208
8.1.1 Attacking Simulator for Single Seat Cabin Fighter Plane ...	208
8.1.2 Air Wrestle Simulator for Two-seater Cabin Fighter Plane	213
8.1.3 Simulation System of Plane Display	215
8.1.4 Bomb Carrier Simulator	218
8.1.5 Air Refuelling Simulator	224
8.2 Training Simulators for Navy	227
8.2.1 Attacking Training Simulator of Fish Torpedo Mosquito Craft	227
8.2.2 Fish Torpedo Attacking Simulator for Submarine	237
8.2.3 Simulator of Ship-based Small-bore Pompom Shooting	247
8.3 Training Simulators for Army	255
8.3.1 Simulator of Infantry Weapon Shooting	255
8.3.2 Simulator of Tank and Its Control of Fire	258
8.3.3 Training Simulator for Antitank Missile Shooting	264
8.3.4 Training Simulator for Shoulder Launched Air Defence Missile	271
Chapter 9 Application of Modern Simulation Technology in Entertainment Simulator	279
9.1 Car Driving Simulator	279
9.1.1 Brief Introduction for Main Systems of Car Driving Simulator	279
9.1.2 Technical Characteristics of Car Driving Simulator	280
9.2 Flight Simulator	281
9.2.1 Brief Introduction for Main Systems of Flight Simulator ...	281
9.2.2 Technical Characteristics of Flight Simulator	284
9.3 Virtual Carriage Driving Simulator	284
9.4 Virtual Rowboat Simulator	285
9.5 Snow Autobike Simulator	287
References	290

第1章 绪 论

仿真一词译自英文 Simulation,意为模拟,模仿,仿造。可以说,凡是为了一个特定的目的而采用的以假代真的手段,都可以分成两大类:物理仿真和计算机(数字、数学)仿真。物理仿真范围较广,如航天专业中人的失重仿真、飞行器设计中的模型风洞仿真试验和船舶设计中的水池(水洞)模型仿真试验等。中国古代建筑设计模型,甚至军队训练用手榴弹(重量、外观一致)和仿真古董(假古董)都可归入这一类。另外一类则是计算机仿真,是将被仿真对象以数学模型取代,在计算机(模拟机、混合机或数字机)中进行运算的试验方法。现代仿真技术主要是指使用数字计算机的仿真系统。

仿真器一词则是译自英文的 Simulator,过去常译作模拟器。由于很多仿真器用于培训(训练)指挥和操作人员,在军事部门又被称为训练器、模拟器或教练仪(Trainer)等,在电力部门称为仿真机。这种名词上的不统一,常造成误解,例如仿真机被误解为仿真计算机,仿真器和训练器等被误解为小型简易的器械,但现代仿真器常常是成套的复杂系统。比较准确的名称应该是训练仿真系统(Training Simulation System)。本书大部分讨论的都属于这一类的系统,但为了通俗和简单,仍沿用仿真器这一名词。

仿真器除了主要用于培训人员外,还可作分析研究用,例如计算机中装入被仿真对象的数学模型(导弹、发电机组等),并与真实的控制系统和仪表(自动驾驶仪、分布式控制系统等)相连接,借以调试控制系统。这种方式有时称作半实物仿真,或者 Stimulation 激活式仿真。

1.1 仿真器的构成

一套功能齐全的典型的训练仿真器,其原理框图如图 1-1 所示。图中各部分的主要作用如下:

实时仿真计算机:主要用于被仿真对象数学模型的实时运算,由智能化接口采集仿真操作设备的信号和向仿真仪表输出所需的信号,控制仿真运动生成子系统、视景生成子系统和音响生成子系统的工作,以及接收教员/工程师/系统人

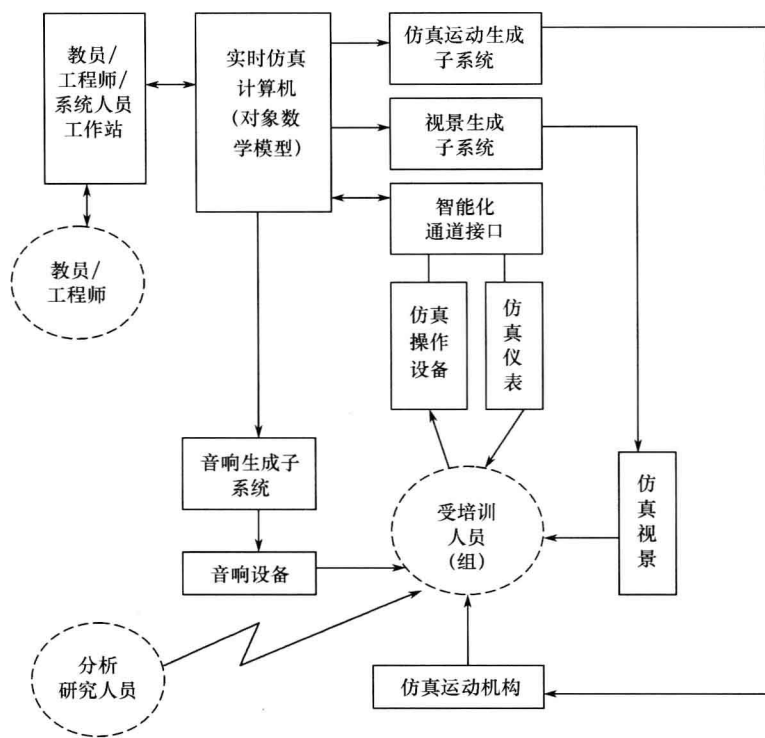


图 1-1 典型的训练仿真器原理框图

员工作站的命令和向其发送必要的信息。显然,仿真计算机是仿真器的关键设备。

教员/工程师/系统人员工作站:仿真器的监控设备,主要任务是向仿真计算机加载程序,启动、停止、暂停(冻结)和恢复(解冻)仿真器,监视和干预仿真器的运行,加入仿真故障和事故等。

仿真运动生成子系统:实时生成仿真对象的运动,如作用于对象的线加速度和角加速度产生的惯性力,对象的姿态角等,并将所有计算转化为使运动平台能够接收的信息,发送给仿真运动机构。

视景生成子系统:实时生成对象所处的仿真视觉环境,并将视景的视频信号输出至放映设备。

仿真视景:将视频信号转化为图像映出。

音响生成子系统:实时生成对象所处的音响环境,控制音响设备发出音响。

智能化通道接口:将仿真计算机运算结果中的有关信息,经转换输出至仿真仪表,将仿真操作设备的操作信息,经转换输入至计算机。

仿真仪表:包括各类模拟量仪表和数字表、指示灯、报警器、记录仪等,其中部分为真实设备仪表,部分为改装仪表,部分为仿真仪表。

仿真操作设备:包括各种操纵杆、舵轮、方向盘、脚踏开关,以及各类工业分布式控制系统操作站、手动操作器等。其中部分为改装设备,部分为仿真设备。

1.2 仿真器的特点

由图 1-1 看出,典型的仿真器有以下特点:

(1) 仿真器是闭环系统,受训人员(单人或多人)是闭环系统的主要环节。换句话说,仿真器是以人员为闭环的人-机系统。所有的运动、视景、音响和仪表等为闭环中的人制造出一个完整的仿真环境,通过人眼、耳和身体四肢的感受传递到人的大脑,大脑做出决策,然后手、脚使用操作设备反馈给仿真计算机,仿真计算机再按对象数学模型运算后,控制仿真环境发生相应的变化。如此连续循环,构成整套仿真器的运行。

(2) 由于人员处于闭环中,因此仿真器必须是实时运行的。这不但要求仿真计算机达到实时运算的速度要求,而且仿真环境的响应都必须达到实时。例如仿真视景,考虑到人眼的视觉动态暂留时间,要求每幅图像的显示帧时必须小于 40ms。

(3) 高逼真度的仿真环境。为使构成闭环中的人不会由于仿真环境与真实环境之间的差异,造成误解或产生误操作,甚至养成习惯性误动作,要求仿真环境必须具备很高的逼真度。因此,要求数学模型应能正确描述被仿真对象;要求各接口和子系统响应速率应与真实情况一致;要求仿真视景应该精细,接近真实的自然视觉环境;要求各种情况下的噪声和其他声响与真实环境一致;要求人体感受到的加速度和角加速度所产生的惯性力的大小和方向,以及姿态角与真实情况一致;要求仿真仪表的布置、状态指示、外形与真实仪表盘相同;还要求仿真操作设备使用时,每次感受到的反作用力或力矩均应与实际设备一致。

(4) 仿真器是数字仿真与物理仿真的综合技术。由于上列第(3)项所要求的仿真环境的逼真度高,这就不仅仅对仿真计算机及其运行的仿真程序(对象的数学模型)要求实时和准确,而且在仿真器系统中,除了采用一般的物理仿真方法解决环境仿真要求外,在特殊情况下,还要采用十分特别的手段。例如,用底部凹凸不平的小型水池和微型声呐来仿真空中雷达对地面的回波效应等方法。

1.3 仿真器的分类及用途

仿真器可以有多种分类方法,如培训用仿真器和工程分析用仿真器等。本