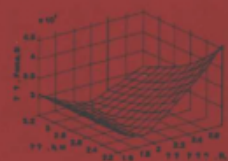
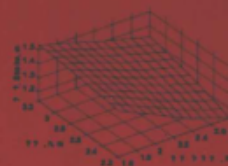
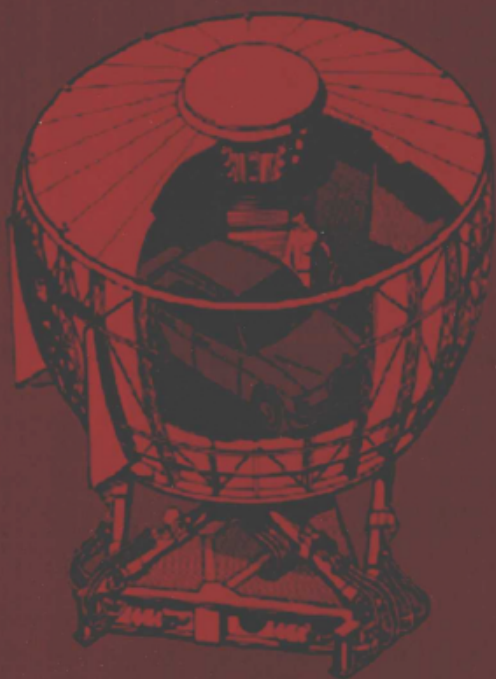


运动模拟器 并联六自由度平台的 理论和应用

YUNDONGMONIQI
BINGLIANLIUZIYOUUDUPINGTAI DE
LILUN HE YINGYONG

赵 强 著



东北林业大学出版社

责任编辑：倪乃华
封面设计：彭 宇



ISBN 978-7-81131-510-3



9 787811 315103 >

定价：21.60元

运动模拟器并联六自由度 平台的理论和应用

赵 强 著

东北林业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

运动模拟器并联六自由度平台的理论和应用/赵强著. —哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2009. 7

ISBN 978 - 7 - 81131 - 510 - 3

I. 运… II. 赵… III. 飞行模拟器—研究 IV. V216. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 116075 号

责任编辑: 倪乃华

封面设计: 彭 宇



NEFUP

运动模拟器并联六自由度平台的理论和应用

Yundongmoni qi Binglianliuziyoudupingtai De Lilun He Yingyong

赵 强 著

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

哈尔滨天兴速达印务有限责任公司印装

开本 787 × 960 1/16 印张 10.5 字数 184 千字

2009 年 7 月 第 1 版 2009 年 7 月 第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 978 - 7 - 81131 - 510 - 3

定价: 21.60 元

内 容 简 介

运动模拟器是一种典型的人在回路中的半实物仿真设备,在航空飞行模拟、航天交会对接模拟、航海模拟、汽车驾驶模拟等领域得到了广泛应用。并联六自由度运动平台是模拟器的关键组成部分,本书对并联六自由度运动平台的运动学、动力学、运动机构优化设计、刚度、振动、误差及控制、仿真等问题进行了深入的研究和分析。

本书各部分内容既相互联系又相互独立,读者可以根据需要选择性地阅读。本书可供高等院校或科研机构从事模拟器等相关研究的教师、科研人员、研究生参考,亦可供从事多年来相关设计和开发的工程技术人员参考。

前 言

运动模拟器在航空飞行模拟、航天交会对接模拟、航海模拟、汽车驾驶模拟等领域得到了广泛应用。运动模拟器是集机械、液压、力学、电子、图形学、多媒体、通讯、自动控制等技术于一体的高科技装备,具有技术含量高、耗资大等特点。每年我国交通、国防等领域都要建设若干不同规格的运动模拟装备。走国内自主研发之路可以提高我国的运动模拟技术水平,还可以节约大量经费开支。为了推动这一技术的发展,作者根据多年来从事模拟器并联六自由度运动平台的研究和开发实践,编写了此书,为从事相关研究和开发的教师、研究生以及工程技术人员提供参考和帮助。

全书分六章,第一章为绪论,介绍模拟器的概况和并联六自由度平台的研究状况。第二章为并联六自由度平台的运动学分析、动力学分析和优化设计方法。第三章为六自由度平台的整体刚度和振动理论研究。第四章为六自由度平台的误差理论。第五章为平台的控制研究。第六章为平台的仿真模型和实验。

本书可供高等院校或科研机构从事模拟器等相关研究的教师、科研人员、研究生参考,亦可供从事相关设计和开发的工程技术人员参考。

本书吸收了国内外专家、学者在六自由度运动平台方面的研究成果,同时还包括作者在此方面的一些理论研究工作的总结。有关教授和专家在百忙之中对本书稿进行了审阅,并提出了宝贵的意见,作者对他们表示衷心的感谢。由于作者水平有限,书中难免存在一些不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

著 者

2008 年 12 月

本书由黑龙江省自然科学基金项目(E200605)资助出版

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 运动模拟器的组成和原理	(1)
1.2 运动模拟器的应用	(2)
1.3 运动模拟器运动模拟系统	(9)
1.4 本书的主要研究内容	(20)
第二章 运动机构的分析及优化设计	(22)
2.1 运动学分析	(22)
2.2 动力学分析	(35)
2.3 运动机构的参数优化	(51)
2.4 运动平台及舱段的运动空间范围	(58)
2.5 底座对基础和地脚螺栓的作用力和作用力矩	(62)
第三章 刚度和振动研究	(64)
3.1 运动机构刚度	(64)
3.2 阻尼自由振动响应	(69)
3.3 振动的键图模型及仿真	(71)
3.4 振动实验研究	(77)
第四章 误差分析	(84)
4.1 位姿误差产生原因分析及其计算	(84)
4.2 上下铰点坐标的测量及误差补偿	(96)
第五章 控制研究	(100)
5.1 液压伺服系统的方案选择	(100)
5.2 单缸伺服系统等效负载的计算	(103)
5.3 单缸伺服系统的传递函数模型	(107)
5.4 控制算法	(111)

2 运动模拟器并联六自由度平台的理论和应用

第六章 全系统仿真与实验	(120)
6.1 全系统的键图模型及仿真	(120)
6.2 考虑液压缸质量的全系统键图及仿真	(133)
6.3 实验测试	(137)
参考文献	(148)

第一章 绪 论

运动模拟器是近几十年来发展起来的大型高科技运动模拟装备,在航空飞行模拟、航天交会对接模拟、舰船与潜艇航海模拟、汽车驾驶模拟、特种车辆动态模拟、娱乐用运动模拟等领域得到了广泛的发展和应用。运动模拟器是集机械、液压、力学、电子、图形学、多媒体、通讯、自动控制等技术于一体的高技术装备,对于航空航天、航海、汽车制造、交通运输等行业的人员培训、产品开发等具有重要的意义,尤其是国防工业,特别需要高水平的运动模拟装备。运动模拟器对新兴武器的开发也具有重要的价值。

1.1 运动模拟器的组成和原理

运动模拟器是一种典型的人在回路中的半实物仿真设备。如图 1-1 所示,它一般由模拟驾驶舱段、视景系统、声效系统、并联六自由度运动平台、液压泵站、主控计算机等多个硬件子系统构成。在软件上包括数据采集和通讯模块、驾驶事件分析模块、车辆(或飞行器等)动力学模块、模拟器动力学模块、视景仿真算法模块、运动平台控制算法模块和虚拟仪表显示控制模块等部分^[1]。

运动模拟器的工作原理和步骤如下:模拟器在开始工作时首先进行系统的初始化,即硬件复位并载入控制程序,设定各部分参数的初值。系统自检,确定各部分初始化是否正确。设备处于正常状态后,发出状态信号给主控计算机,报告系统各部分已就位。主控计算机发出指令激活操纵台,操纵台用于接受仿真人员的驾驶输入。对于汽车模拟器,操纵台包括方向盘、油门、离合器等操纵装置;对于飞机模拟器,操纵台包括操纵驾驶杆、油门杆、脚蹬及开关和按钮等操纵装置。操纵台被激活后,系统开始接受仿真人员的操纵动作和指令,模拟仿真开始。主控计算机随时通过数据采集和通讯模块获取仿真人员的操纵动作或指令(驾驶事件),并启动驾驶事件分析模块对输入的动作和指令进行分析。主控计算机进一步将分析结果输入给车辆(或飞行器等)的动力学模块,由动力学模块解算出车辆(或飞行器等)的响应状态,该状态所对应的参数进一步传递给模拟器动力学模块,由该模块计算出模拟器相应的位移、速度、加速度等参数。根据这些参数,视景仿真算法解算出视频图像信

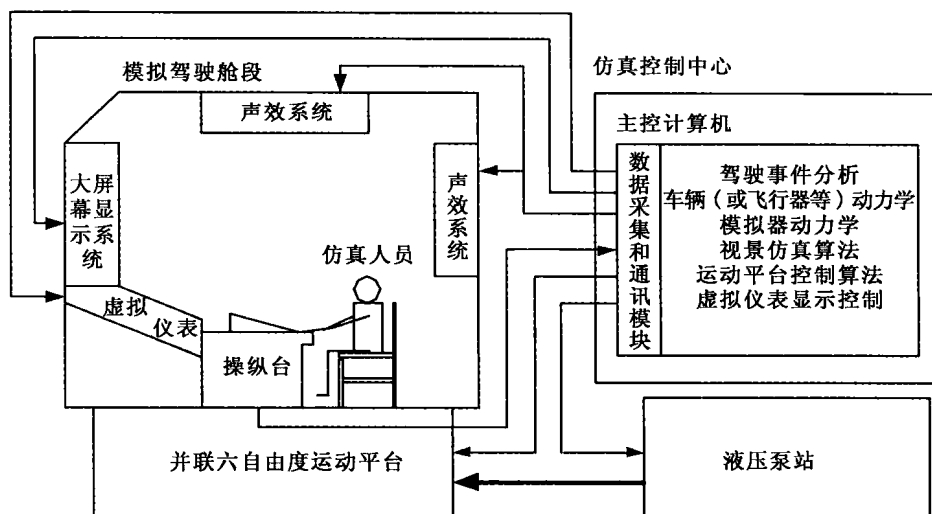


图 1-1 运动模拟器的组成

号、声响信号；虚拟仪表显示由控制算法所解算出的虚拟仪表各控件的示值信号；运动平台控制算法解算出平台的控制信号以及液动力源的動作指令。这些信号指令由通讯模块分别发送到模拟器驾驶舱大屏幕显示系统、声效系统、六自由度运动平台和液压泵站处，控制它们产生相应的动作和响应，实现对驾驶事件的模拟。同时数据采集和通讯模块不断采集各部分数据反馈给主控计算机，实现闭环反馈控制。由于系统各部分都在主控计算机的统一控制下协调动作，因此能给仿真人员营造出一个视觉、听觉、体感等各方面都很逼真的、有如身临其境的模拟环境。

1.2 运动模拟器的应用

1.2.1 飞行模拟器

飞行模拟器又称计算机飞行仿真系统，是在地面模拟飞行器在空中飞行和地面运动的设备，是典型的人在回路中的实时仿真系统和虚拟现实的应用实例。根据飞行模拟器规范，一台飞行模拟器的定义是“复制特定飞机座舱的一个装置，并通过各种地面和飞行状态接近地描述实际飞机的能力”。飞行模拟器是以机械动力学、计算机技术和控制理论为基础，以计算机和模拟再现真实环境和人体感觉的各种物理效应设备为工具，借助系统模型对操作人

员的技能和素质进行评价或对飞行器性能进行研究的一门综合性技术设备。它可以用于训练飞行人员、飞机发动机试验及模拟武装直升机发射导弹时的振动环境等。

目前飞行模拟器在航空试验中显得越来越重要,它能为新机的研制、飞机的飞行品质的研究提供重要的试验数据。采用飞行模拟器部分地取代真机试验具有如下的显著优点^[2]。

(1) 经济。可节约大量的研制和训练经费。例如,飞行模拟器训练 1 h 的费用仅为真机空中每小时实训费用的 8% 左右。在飞机的设计研制过程中,工程飞行模拟器已与风洞、发动机试车台和结构试验设备被航空界公认为四大航空试验设备^[3]。

(2) 安全。在地面的模拟飞行没有任何危险,可以避免事故发生而造成的生命财产损失,这对一些边界科目的试验和训练更有特殊意义。

(3) 高效。不受空间(如机场空域)、时间(如季节、气候、黑夜)、地点的限制,可以方便、容易、灵活地设置和改变试验或训练的条件等,因此大大缩短了飞行员的训练时间和飞行器的研制周期。

从飞行模拟器的当前发展情况来看,飞机飞行模拟器主要可以分为以下三大类^[2]:

(1) 训练用模拟器:主要用于对某一特定机型的空勤人员进行训练。

(2) 研究用或工程开发用模拟器:主要用于新机或系统的研制和进行某些专题研究。

(3) 特殊用途模拟器:如双机格斗空战、空中加油、舰载飞机起落等。

1964 年美国的 Cappel 研制成功了第一个直升机飞行模拟器,并申报了专利^[4],该模拟器如图 1-2 所示。中国国际航空公司(CA)引进的加拿大 CAE 公司生产的飞行模拟器如图 1-3 所示。

飞行模拟器的硬件部分主要由座舱系统、视景系统、运动系统和仿真计算机组成,软件部分主要由飞行仿真软件 and 数据处理系统软件组成,参见图 1-4^[2]。

1.2.2 车辆运动模拟器

1.2.2.1 汽车运动模拟器

汽车运动模拟器是一种能够逼真模拟汽车驾驶动作,并能在主要性能上获得与实车驾驶相同感觉的仿真设备。它是用于汽车产品开发、“人—车—环境”交通特性研究和驾驶培训的一种重要工具。现有的车辆运动模拟器主要有两种,训练型模拟器(参见图 1-5)和开发型模拟器(参见图 1-6)^[5-7]。

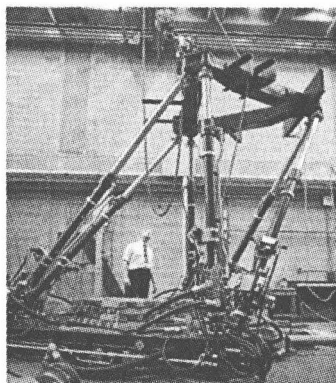


图 1-2 最早的飞行模拟器

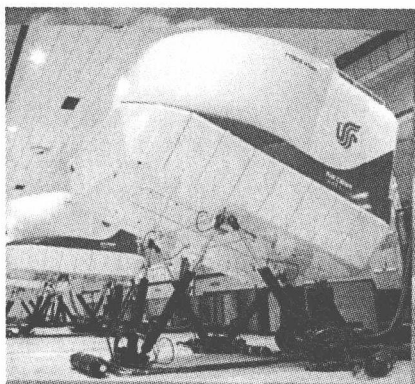


图 1-3 国航引进的 CAE 飞行模拟器

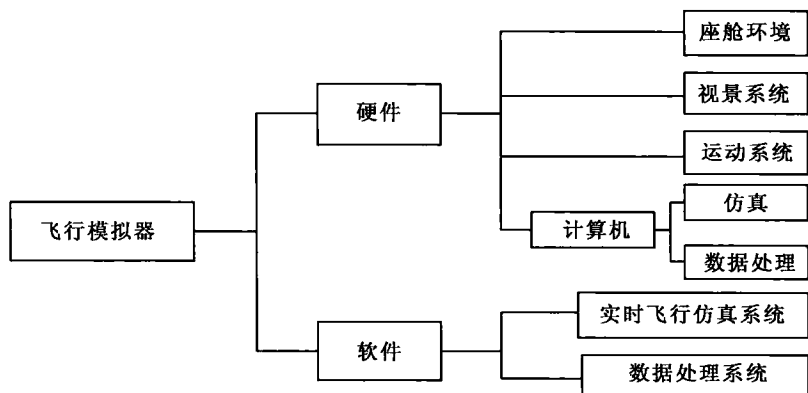


图 1-4 飞行模拟器的硬件软件组成^[2]

训练型模拟器主要用于对新驾驶员的训练;开发型模拟器能对人—车—环境系统进行模拟,可用于道路交通、汽车产品的设计和开发研究。

汽车运动模拟器具有安全性高、再现性好、可开发性强、成本低等显著特点。训练型模拟器可以用于驾驶模拟教学,也可以用于对道路交通进行主观评价,包括对设计中的道路线形、交通标志、交通设施、交通安全、汽车性能以及 ITS 等的评价,还可以用于对道路的特殊现象进行模拟再现,如交通事故、交通流特性、道路服务水平等^[5,8]。开发型模拟器规模大、造价高、功能强、模拟效果更真实,是研究或开发汽车新产品的重要工具,近年来已成为国际上的一个重要发展方向。

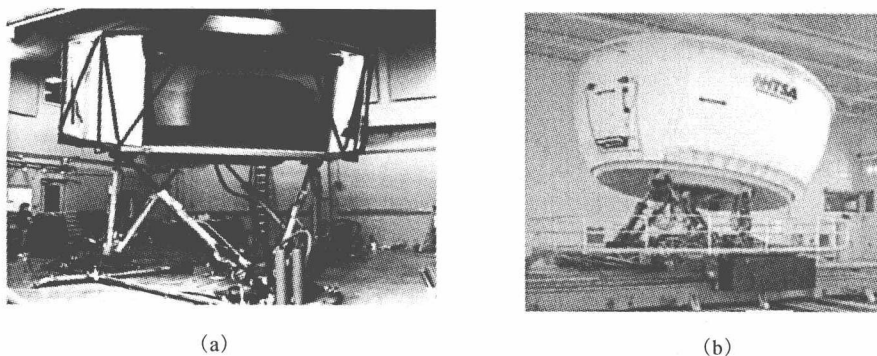


图 1-5 训练型模拟器

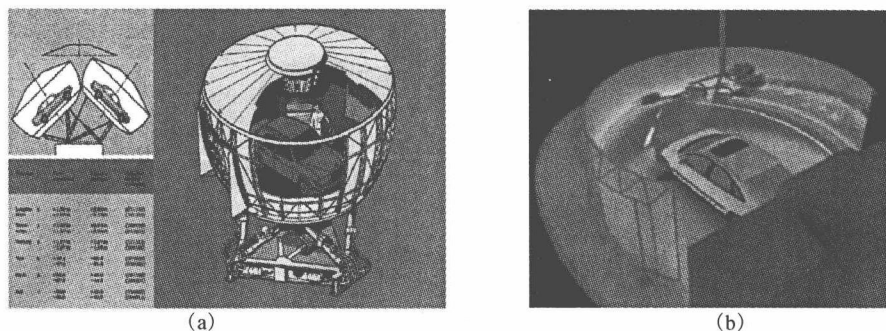


图 1-6 开发型模拟器

1.2.2.2 列车运动模拟器^[9,10]

随着我国高速铁路和城市轨道交通事业的快速发展,列车司机培训技术和列车性能研究需要进一步的提高,迫切需要开发高水平的列车运动模拟器。列车驾驶模拟器是一个典型的人在回路中的列车动态实时仿真系统,其仿真对象包括两类:列车性能仿真和列车驾驶环境仿真。列车性能仿真是指对列车牵引/制动特性、动力学特性、控制逻辑等的模拟。对于高速列车和地铁列车驾驶仿真器,则还需要对列车自动控制(Automatic Train Control, ATC)、列车自动操纵(Automatic Train Operation, ATO)、列车自动保护(Automatic Train Protection, ATP)系统进行仿真。列车驾驶环境仿真主要是重构列车驾驶时的视觉、听觉、体感环境,使受训司机有身临其境的感受^[9]。

现代化的高速列车和城市轨道交通列车技术对列车司机提出了更高的要求,同时也要求有更先进的设备来培训和考核列车司机。我国原有的培训方

6 运动模拟器并联六自由度平台的理论和应用

式和考核技术已经不能适应高速列车和城市轨道交通列车司机培训的需要,开发先进的全功能列车驾驶模拟器用于司机培训考核工作具有重要的意义^[10]。具有列车运动体感模拟仿真系统的全功能列车驾驶模拟器及其体系结构参见图 1-7 和图 1-8。该模拟器可以更科学、高效地培训司机,提高司机的操纵技术,巩固加强司机安全驾驶的能力。

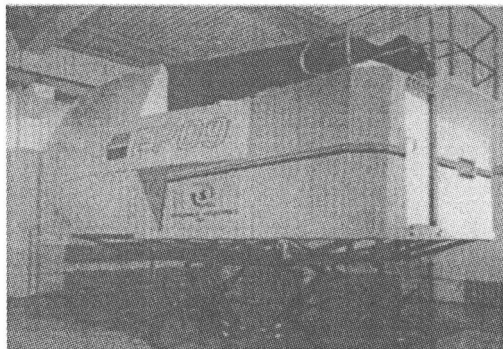


图 1-7 全功能列车驾驶模拟器实物图

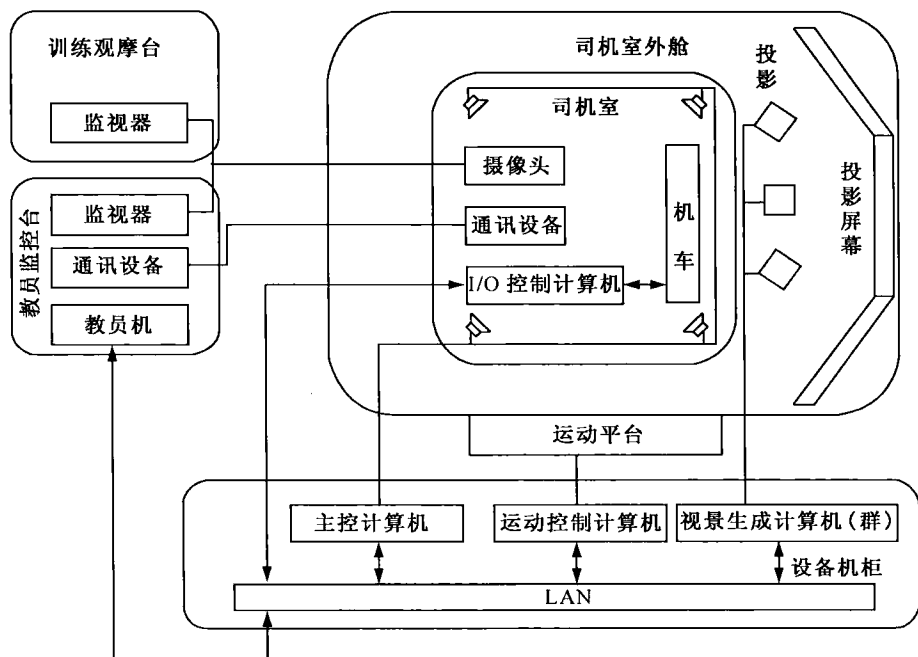


图 1-8 全功能列车驾驶模拟器体系结构

采用全功能列车驾驶模拟器进行司机培训考核具有如下优点^[10]。

(1) 安全性高。使用全功能列车驾驶模拟器可以安全地进行实车训练中无法进行的某些故障与突发事件的应急训练,且不会危及设备或人员安全,是极其安全的训练方式。

(2) 再现性好。由于机车状态和实验条件等因素很难控制,实车训练再现性不易保证,使用模拟器则可以方便地进行参数及训练条件设定、数据采集及模拟环境的设定,再现性好。

(3) 培训质量好,培训效率高。使用全功能列车驾驶模拟器对司机进行培训不受时间和空间限制,能在最短的时间里高效地培训合格的司机。

(4) 节约培训考核费用。使用全功能列车驾驶模拟器对司机进行培训考核不占用运营时间和线路、不占用运营车辆、训练系统功耗低,不仅不影响正常运营时间、减少了车辆设备的使用损耗,而且还节省了实车训练需要的大量能耗。

1.2.2.3 特种车辆运动模拟器^[11]

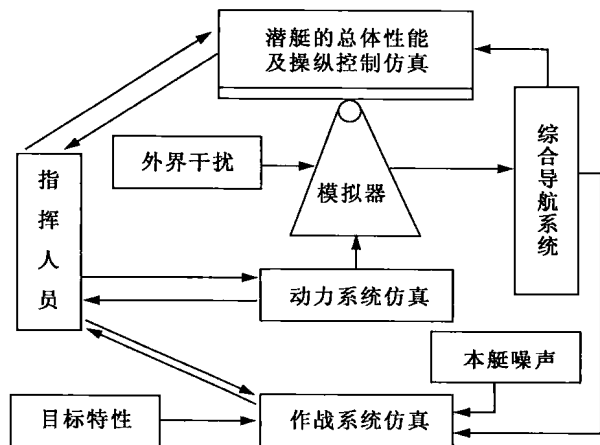
由于坦克、装甲车等特种车辆使用环境恶劣、复杂,低频大振幅运动和高频小振幅振动耦合,振动与冲击相对较大。此类车辆的运动模拟器要求载荷大、频响高,振幅大,垂直冲击加速度峰值高,能够兼顾高频小振幅振动和低频大振幅运动。常规的六自由度运动平台一般只能实现低频大振幅运动,而振动台一般只能实现高频小振幅振动,所以特种车辆只用上述其中之一很难实现模拟要求,可以采用低频大位移的六自由度运动平台加装高频、小幅度的垂直激振台的方案,就能实现特种车辆的低频运动和高频振动的复合广谱振动。这种模拟器方案能够完成特种车辆武器装备在振动、冲击等运动环境下的人体试验,并能完整、系统地进行乘员模拟训练,也能对武器装备及模拟技术进行工程设计和改进研究。

1.2.3 舰船或潜艇运动模拟器

采用舰船或潜艇运动模拟器可以实现对舰艇操纵和海况的真实模拟。研制舰艇运动模拟器的意义^[12-16]如下。

(1) 模拟器是舰艇综合性能仿真系统中必不可少的物理设备。舰艇的研制是一项浩大、复杂的工程,运用计算机软、硬件及相关的物理设备、控制台屏等构成综合仿真试验系统,可以把实舰(艇)诸多复杂因素和条件组合成不同的试验方案(或工况)开展综合仿真试验研究,由仿真的结果获得舰艇的综合特性,包括作战能力、作战适用性、舰船特性和系统特性,通过评估、抉择达到优化设计的目的。下面以潜艇为例说明。一般可将潜艇划分为三个有机联系

的关键大系统,即作战系统、操艇控制系统和动力推进系统,相应建立三个有机联系的综合性能仿真系统,如图 1-9 所示。由图中动力仿真系统解算出实艇的运动参数并传给模拟器,模拟器逼真地产生出实艇运动所具有的姿态角、加速度和角加速度,提供操艇人员运动感觉和相关传感器所需的信号。操艇人员根据其所获得的运动感觉和信号进行操控。整个综合仿真系统是典型的“人在回路中”的半实物闭环仿真系统,显然,模拟器是其中不可缺少的重要组成部分,而且它模拟运动的逼真程度还是整个系统仿真性能的决定因素之一。

图 1-9 潜艇综合性能仿真的逻辑框图^[13]

(2) 模拟器为驾驶人员的海况适应性训练提供了条件。舰艇在实际海况中是做六自由度运动,即横摇、纵摇、升沉、横移、纵移和偏航。仿真大风浪中舰艇的运动,使操纵者有身临其境的体感,为航海训练提供条件。而现代潜艇高技术、大规模、操纵复杂的特点,给艇员的航行操纵提出了很高的要求,常规的海上训练费用高、周期长、风险大。一些耗资巨大或十分危险的训练项目如战术对抗、应急操纵等则根本无法在海上进行实际演练,采用计算机仿真技术研制的航海训练模拟器,可以在系泊状态下对艇员进行导航和操艇系统的综合模拟训练,实现业务部门对艇员的考核和评估,并能够配合作战系统进行全面系统的战术演练^[12]。

(3) 模拟器为舰(艇)用设备调试提供了手段。由于模拟器可以将舰艇在随机海况作用下的响应真实地再现出来,因此可以将舰用设备放到运动模拟器上进行试验,就能够减少海上实舰(艇)试验的次数,这对于降低舰(艇)用设备的试验费用、缩短研制周期具有重要的意义。