



黑龙江省精品图书出版工程项目
航母与舰载机适配技术

航母舰载机 安全起飞、着舰技术

HANGMU JIANZAIJI
ANQUAN QIFEI ZHUOJIAN JISHU

朱齐丹 张智 张雯 著★



HEUP

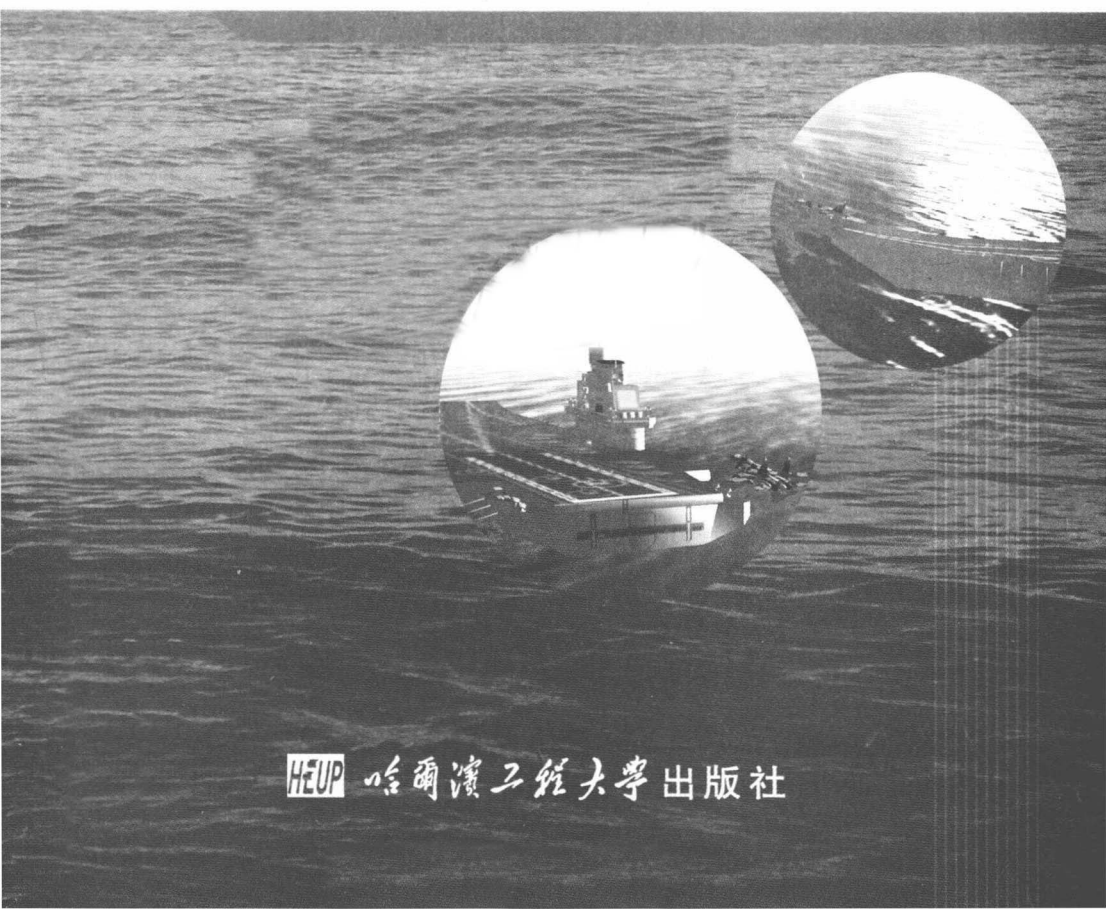
哈尔滨工程大学出版社



黑龙江省精品图书出版工程项目
航母与舰载机适配技术

航母舰载机 安全起飞、着舰技术

HANGMU JIANZAIJI
ANQUAN QIFEI ZHUOJIAN JISHU



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

航母舰载机安全起飞、着舰技术/朱齐丹,张智,
张雯著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2016.3
ISBN 978-7-5661-1228-6

I. ①航… II. ①朱… ②张… ③张… III. ①航空
母舰-舰载飞机-军事技术 IV. ①E926.392

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 062548 号

策划编辑 张晓彤
责任编辑 张晓彤
封面设计 恒润设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 21
字 数 406 千字
版 次 2016 年 3 月第 1 版
印 次 2016 年 3 月第 1 次印刷
定 价 90.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

21 世纪是人类大规模开发利用海洋资源、扩大海洋产业、发展海洋经济和争夺海上权益的新时期。我国作为海洋型国家,随着经济日益融入世界范围,对海洋资源、能源、空间的依赖程度势必增大,因而对海洋运输通道安全的要求也注定越来越高,在这种情况下,打造远洋海军也就成为必然的选择。2015 年《中国的军事战略》白皮书指出,我国海军要“逐步实现近海防御型向近海防御与远海护卫型转变”。航母/舰载机作战系统可以有效地扩展航空作战半径,将作战能力覆盖到远洋,是远洋作战的主力军。我国发展航母,开展航母舰载机相关技术研究是巩固国防、维护发展战略的必然要求。

舰载机着舰引导技术是航母/舰载机技术的关键也是难点。舰载机起降几乎是最危险的任务,狭小的航母甲板空间、复杂的海洋环境使舰载机起降事故频发,据统计多数舰载机非战斗损失来源于起降事故。要发挥航母舰载机的重大军事作用就必须具备安全可靠的舰载机着舰引导技术。

与美国、俄罗斯等国家相比,我国的航母舰载机起降技术研究起步晚,起点高,面临试验基础有限、国外技术封锁、国内相关参考较少的难题。本书结合作者近十年来的舰载机安全起降仿真研究成果,以国外航母舰载机起降原理为基础,以建模、仿真研究为技术途径,分析舰载机滑跃起飞、弹射起飞、引导和阻拦过程的主要安全影响因素,为航母舰载机起降过程安全边界条件的确定提供依据。

本书共分为 4 篇 19 章。其中,第 1 篇包括 6 章,主要介绍舰载机与航母环境的建模方法;第 2 篇包括 4 章,介绍滑跃起飞和弹射起飞的工作原理、建模方法以及安全影响因素;第 3 篇包括 6 章,依次介绍光学引导技术、着舰指挥官指挥技术、进场动力补偿技术及全自动着舰技术的原理和仿真研究方法,分析着舰引导过程的安全影响因素;第 4 篇包括 3 章,主要介绍阻拦系统原理并建模研究其安全影响因素。

本书研究工作得到了国家科技合作专项资助(2013DFR10030)、国家自然科学基金资助(61603110、61304060)、中央高校基本科研业务费专项基金资助(HEUCF160409),在此特别表示感谢。

本书承蒙下列人员的仔细审查:蔡成涛、刘志林、陆军、孟浩、原新、苏丽、杨震、王立辉、吕晓龙、栗蓬、王立鹏、董然、刘恒、李晓琳、李佳桐。

希望我们的基础研究工作成果,会对我国从事航母研究的专业技术人员有所帮助,为我国航母事业的发展做出贡献。

著 者

2016 年 1 月

目 录

绪论	1
----------	---

第 1 篇 舰载机与舰母环境模型研究

第 1 章 航母舰载机起降环境坐标系	9
1.1 大地坐标系	9
1.2 舰载机坐标系定义及变量定义	9
1.3 航母坐标系定义及变量定义	12
1.4 甲板坐标系定义及变量定义	12
1.5 轮板坐标系定义	13
1.6 尾钩坐标系定义及变量定义	15
第 2 章 舰载机机体动力学模型与飞控系统	16
2.1 舰载机动力学模型	16
2.2 舰载机飞行控制系统模型	21
2.3 舰载机发动机模型	23
第 3 章 舰载机起落架与尾钩动力学模型	25
3.1 舰载机起落架模型	25
3.2 舰载机尾钩模型	30
第 4 章 航母甲板运动学模型	36
4.1 美军标模型	36
4.2 正弦拟合模型	39
第 5 章 舰尾流场模型	40
5.1 舰尾流场建模概述	40
5.2 CFD 算法	41
5.3 数据库方法	43
5.4 工程化模型法	43
第 6 章 仿真系统构建	54
6.1 仿真系统软件结构	54
6.2 三维可视化场景设计	56
6.3 仿真系统总体功能界面	59

第 2 篇 舰载机起飞技术

第 7 章 滑跃起飞技术	65
7.1 滑跃起飞技术发展历程	65
7.2 舰载机滑跃起飞的工作流程	67
7.3 滑跃起飞过程动力学建模	68
7.4 滑跃甲板型线模型	70
7.5 滑跃起飞仿真实例	72
第 8 章 滑跃起飞影响因素分析	74
8.1 舰载机推重比	74
8.2 滑跑距离	76
8.3 预置舵偏度	77
8.4 甲板纵摇	79
8.5 滑跃甲板出口角	80
8.6 甲板风对滑跃起飞过程的影响	81
第 9 章 弹射起飞技术	84
9.1 弹射起飞技术发展历程	84
9.2 弹射器的组成及工作原理	86
9.3 舰载机弹射起飞的动力学模型	90
9.4 弹射系统模型	97
9.5 蒸汽动力数学模型	106
第 10 章 弹射起飞影响因素分析	118
10.1 舰载机质量变化对弹射起飞的影响	118
10.2 甲板风变化对弹射起飞的影响	119
10.3 甲板纵摇变化对弹射起飞的影响	120
10.4 甲板剩余长度变化对弹射起飞的影响	122

第 3 篇 舰载机着舰引导技术

第 11 章 舰载机着舰引导技术概述	127
11.1 早期着舰技术发展时期	127
11.2 第二次世界大战后着舰技术发展时期	128
11.3 现代着舰技术发展时期	130

第 12 章 菲涅耳光学引导技术	134
12.1 菲涅耳助降系统的结构组成	134
12.2 菲涅耳助降系统的工作原理	136
12.3 菲涅耳助降系统的布局技术	140
12.4 菲涅耳助降系统的补偿技术	144
12.5 菲涅耳助降系统的稳定驱动器模型	156
12.6 菲涅耳光学引导系统的性能分析	156
第 13 章 着舰指挥官指挥技术	160
13.1 着舰指挥官指挥技术的发展	160
13.2 LSO 指挥指令集概述	166
13.3 指令操作关联模型	167
13.4 非对称变论域自适应模糊控制模型	179
第 14 章 进场动力补偿技术	201
14.1 APCS 简介	201
14.2 APCS 原理与补偿策略	204
14.3 传统 APCS 设计	211
14.4 变结构 APCS 设计	216
第 15 章 全自动着舰引导技术	226
15.1 全自动着舰引导技术的发展	226
15.2 全自动着舰引导技术的基本组成及原理	229
15.3 全自动着舰引导律研究	231
15.4 甲板运动预报与自动补偿技术研究	241
15.5 舰尾流场补偿技术	244
15.6 全自动复飞决策技术	245
第 16 章 舰载机着舰引导影响因素分析	251
16.1 光学引导下滑角度对引导过程影响分析	251
16.2 甲板运动对落点偏差影响分析	254
16.3 着舰侧风及斜角甲板角度对引导过程影响分析	255
16.4 尾钩弹跳对着舰挂索影响分析	259
16.5 转弯过程对下滑道调整影响分析	261

第 4 篇 舰载机着舰阻拦技术

第 17 章 阻拦系统组成与原理 267

17.1 阻拦系统的发展 267

17.2 阻拦系统组成 270

17.3 阻拦系统工作原理 275

第 18 章 阻拦系统建模 277

18.1 阻拦系统液压建模 277

18.2 阻拦索有限元建模 284

18.3 阻拦系统动力学建模 294

18.4 阻拦过程综合仿真 295

第 19 章 阻拦影响因素分析 306

19.1 偏心偏航对阻拦索极限拉力影响分析 306

19.2 钩索滑移及其对阻拦过程影响分析 309

19.3 偏心偏航阻拦过程舰载机运动轨迹分析 312

19.4 钩索摩擦因数对钩索滑移及阻拦受力的影响 313

19.5 其他影响因素分析 314

参考文献 316

绪 论

一、航母的重要意义

航母自诞生已有近百年历史,回顾其发展历程,航母在军事大国海军装备序列中已具有了核心地位,成为现代海军不可或缺的武器。目前,世界上拥有航母的国家有中国、美国、俄罗斯、法国、英国、意大利、西班牙、巴西、泰国、印度、阿根廷等十余个国家。其中,美国无论从航母数量上还是从技术上而言都无愧于“航母第一大国”的称号,它已拥有现役航母 12 艘且以重型核动力为主,主要搭载 F/A—18E/F 型舰载机;俄罗斯、法国和英国具有航母的自主研发能力,但它们的航母编队规模远不及美国;其他几个国家虽然也拥有 1~2 艘航母,但都只是上述四个国家的追随者。

实际上,航母的战略意义远大于其战术作用,它关乎国家战略和国防政策,在保卫国家海洋国土、维护海洋权益、保护海上交通要道安全等方面都起着举足轻重的作用,是现代国家国防力量和综合实力的重要组成部分^[1-3]。

21 世纪是一个资源时代,伴随着陆地资源的日益枯竭,海上资源的争夺将成为本世纪的一大争端。我国的海岸线长达 1.8 万公里,拥有几乎世界上最为宽广的浅海大陆架,具有丰富的矿产资源和巨大的开发价值,然而我国的海疆一直是“惊涛骇浪”“暗流涌动”。近几年来,国人的海洋意识不断增强,为了提高我国的海上威慑力,中国迈开了从积极防御的“绿水”海军向具有远洋作战能力的“蓝水”海军发展的步伐,在这种形势下我国发展航母也是大势所趋。2012 年 9 月 25 日,伴随着民众多年的期盼,中国的辽宁号航母(见图 0-1)完成了交接入列,中国终于迎来了航母时代。

二、航母舰载机起降的重要性

航空母舰之所以能成为海军重要力量,主要依赖于其所特有的武器装备——舰载机。功能各异的多型舰载机组成了航母航空联队,它们担负着夺取局部海域制空权、制海权,实施对陆打击、反潜作战、远程预警、作战指挥等重要作战使命。舰载机是航母强大作战威力之所在,是航母战斗力的来源和生存的基础。

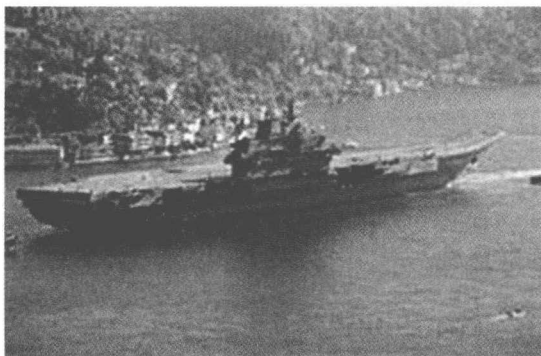


图 0-1 辽宁号航母

舰载机技术是航母的关键,与陆基飞机的主要区别是,舰载机要在航母甲板上完成起降,这并非易事。

第一,航母甲板上为舰载机提供的起降空间有限。航母的起飞甲板仅长 90 ~ 130 m,降落甲板长 220 ~ 270 m,还不足陆基飞机起降跑道的 1/10。如何在短距离内加速完成升空、如何在短距离内迅速降低速度完成降落是舰载机首先要解决的问题。舰载机起飞过程必须借助于滑跃甲板或弹射器,使舰载机在有限的距离内达到安全起飞的速度;着舰过程也必须借助于阻拦系统快速吸收舰载机的动量,将舰载机的拦停距离限制在有限的甲板长度范围内;若着舰拦停失败,舰载机还必须能够在有限的甲板长度内加速,实现安全逃逸。

第二,受海浪等环境因素的影响,航母必然存在纵摇、横摇和升沉等运动,这将严重影响起降航迹的稳定性,因此舰载机在起降过程中必须克服航母甲板运动的影响。

第三,航母的运动对海面的气流场环境产生很大的影响,将在航母上空以及航母后方形成特殊的流场分布,尤其是舰载机着舰阶段处于低速飞行状态,这些特殊的流场会对舰载机着舰产生严重干扰,舰载机在着舰过程中必须能够克服航母流场的影响。

上述困难交织在一起,使得舰载机起降任务非常困难,而且极具风险。据统计,舰载机起飞、着舰阶段是事故率最高的阶段,起飞、进近、着舰阶段时间仅占舰载机执行任务时间的 4%,而事故率却占整个事故的 60% 以上。因此,舰载机起降技术是航母的头等关键技术^[4-6]。

三、舰载机起降飞行仿真技术

纵观航母的百年历史,其舰载机起降安全技术的早期研究成果多是建立在惨

痛的飞行事故和大量的飞行试验的基础上的,这种完全基于试验的技术发展方式需要巨大的人力、物力消耗。随着现代计算机技术及系统仿真技术的快速发展,基于仿真的技术研究具有成本低廉、使用方便、灵活高效等特点。因此,利用仿真技术研究舰载机起降技术,再配合飞行试验验证,可以有效避免盲目的试验带来的危险。

早在 19 世纪 60 年代,美国就意识到计算机仿真是研究现代飞行技术最便捷、最高效的方式,此时伴随着美国海军对航母技术的需求,涌现出一批科技人员从事舰载机起降技术的仿真研究。其中比较有代表性的是,1964 年美国的 System Technology 公司受海军研究局的委托,利用简单的频域模型仿真,研究了菲涅耳灯光助降系统的稳定补偿方式对舰载机着舰下滑过程的影响,该项研究为美国菲涅耳灯光助降系统稳定补偿方式的选择和使用提供了理论指导^[7]。从 19 世纪 80 年代开始至今,美国学者 K. Hefflef Robert 将其提出的“Pilot - Vehicle - Task Model”理论应用于舰载机起降技术的仿真研究,为美国海军提供了巨大技术支持^[8-9]。2002 年,美国重新修订《舰载机进场着舰规范》时,将仿真研究结果和试验验证结果同样作为制定规范的依据,这充分体现了仿真研究对舰载机起降技术的重要性^[10]。

此外,舰载机起降技术仿真还是舰载机飞行模拟器的基础。具有高逼真度、实时性的飞行仿真可以结合半物理设施构成飞行模拟器,飞行模拟器是飞行仿真技术的高级发展阶段。在对驾驶技术和操作规程不熟悉的情况下,飞行员驾驶舰载机是非常危险的,因此在空中飞行之前要在飞行模拟器上进行适应性训练、操作规程训练以及技能训练,当各项技能达标后才能进入空中飞行训练阶段。

考虑到舰载机起降任务的难度、危险性以及事故多发性,舰载机模拟器比其他陆基飞机模拟器的需求更大。美国军标 NATOPS LANDING SIGNAL OFFICER MANUAL 指出,舰载机飞行员在进行上舰训练之前必须经过模拟器训练,而且要求训练环境可变。因此,发展舰载机模拟器是十分必要的,它不但可以为飞行员提供必要的起降操纵技术培训、起降规程训练、舰载机适应性训练和上舰能力评估,而且还能为舰载机起降规程、LSO 指挥规程的研制提供辅助作用^[11]。

目前可查到的美国海军的实用舰载机飞行模拟器有如下两个。

1. 美国 USNTPS (United States Naval Test Pilot School) 模拟器

USNTPS 模拟器(见图 0-2(a))用于辅助飞行规程的制定、新型飞行测试技术的研究,向飞行员、着舰指挥官和工程师提供必要的培训。2002 年美国海军着手对旧版《舰载机着舰准则》(*Carrier Approach Criteria for Carrier-Based Aircraft*)进

行了改进,在改进研究过程中,USNTPS 模拟器发挥了巨大作用^[10]。

2. 美国 LEMOORE 训练基地模拟器

美国海军的 LEMOORE 训练基地(见图 0-2(b))为舰载机飞行员提供陆地训练和模拟器训练,有资料显示美国 F/A-18 舰载机飞行员在上舰训练之前至少要在 LEMOORE 进行 50 小时的模拟器训练。该飞行模拟器支持完整的 case III 起飞、马歇尔航线、全自动着舰、无线电静默条件下的回收模拟。模拟器的飞行环境可变,利用模拟器飞行员能够完成机型适应性训练、日间起降规程训练、夜间起降规程训练、精确和非精确的着舰技术训练、全航线训练、无线电操作规程训练、紧急情况规程训练以及空对空和空对地作战训练。

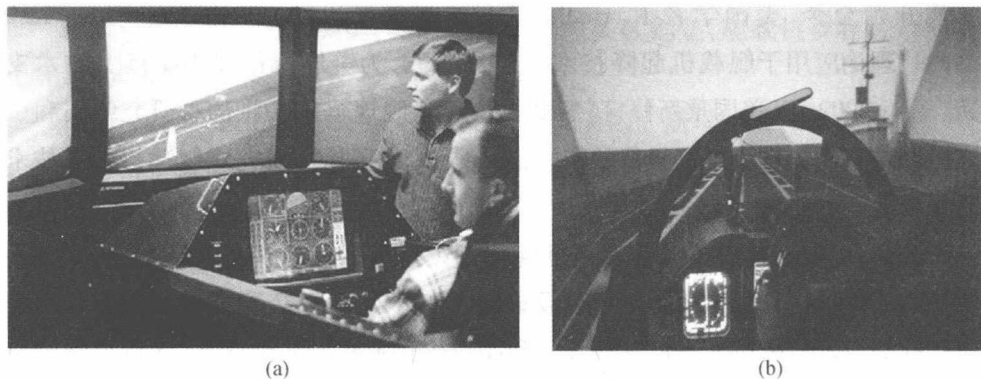


图 0-2 美国现役飞行训练模拟器

(a) USNTPS 飞行模拟器;(b) LEMOORE 飞行训练模拟器

四、本书的主要内容

本书的目标是从技术上分析航母舰载机起降安全性问题,在深入分析美国、俄罗斯等航母先进国家相关技术的基础上,以其典型系统和设备为例,通过完整建立舰载机起降过程的动力学模型及综合仿真系统,分别对舰载机起飞、着舰引导指挥、着舰阻拦等核心环节,分析系统的工作原理和关键技术,并对主要影响因素的影响进行仿真分析,以此作为确定舰载机起降过程安全边界条件的依据。

本书根据任务的不同将舰载机起降关键技术分为起飞技术、着舰引导技术、阻拦技术。图 0-3 列出了仿真研究上述各项技术所需的支撑模型。由图 0-3 可知,仿真研究上述各项技术都需要舰载机模型、航母模型和海上环境模型的支持,因此建立舰载机模型、航母模型和海上环境模型是仿真研究舰载机起降关键技术

的基础。

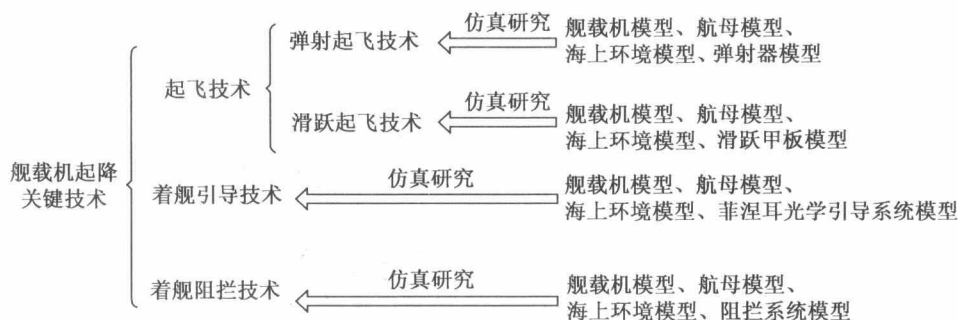


图 0-3 仿真研究舰载机起降技术的模型需求

根据上述分类,本书共分为4篇19章。第1篇主要介绍舰载机起降过程的动力学建模方法,共6章,分别介绍舰载机、母舰甲板运动、流场环境等数学建模以及综合仿真系统构建;第2篇主要介绍舰载机起飞关键技术,共4章,分别介绍舰载机滑跃起飞和弹射起飞的工作原理、建模仿真、主要影响因素及安全规律分析;第3篇主要介绍舰载机着舰引导过程的关键技术,共6章,分别介绍非涅耳光学引导,舰载机动力补偿和LSO指挥过程的建模仿真,主要影响因素和安全规律分析;第4篇主要介绍舰载机着舰阻拦的关键技术,共3章,分别介绍阻拦系统的工作原理、建模仿真分析和影响因素。



第1篇 舰载机与航母环境模型研究



本篇是航母舰载机安全起飞、着舰技术仿真研究的前期准备,主要定义了建模所需的坐标系,建立了舰载机模型、航母模型和海上环境模型。

第 1 章 航母舰载机起降环境坐标系

本书涉及的多数模型是运动学和动力学模型,而坐标系是动力学建模和运动学建模的基础。本章给出了后续建模所需的大地坐标系($S_g:O_gx_gy_gz_g$)、舰载机本体坐标系($S_b:O_bx_by_bz_b$)、舰载机气动坐标系($S_a:O_ax_ay_az_a$)、舰载机航迹坐标系($S_k:O_kx_ky_kz_k$)、航母坐标系($S_s:O_sx_sy_sz_s$)、甲板坐标系($S_d:O_dx_dy_dz_d$)、轮板坐标系($S_w:O_wx_wy_wz_w$)、尾钩坐标系($S_T:O_Tx_Ty_Tz_T$)的定义及相关变量的定义。

1.1 大地坐标系

大地坐标系是三维空间中衡量物体位置和姿态的基准,因此它是定义所有其他坐标系的基础。

大地坐标系或惯性坐标系 $O_gx_gy_gz_g$ (标记为 S_g),与大地固定联系。原点 O_g 是平面大地上的某点,轴 z_g 铅垂向下,轴 x_g 在水平面内,轴 y_g 按右手定则确定。

1.2 舰载机坐标系定义及变量定义

本节介绍舰载机动力学和运动学建模过程中所涉及的坐标系及变量定义。

1.2.1 舰载机本体坐标系

舰载机本体坐标系 $O_bx_by_bz_b$ (标记为 S_b) 与舰载机机体固定联系。原点 O 在舰载机的质心;轴 x_b 沿舰载机结构纵轴指向前;轴 z_b 在对称平面内,垂直于纵轴指向下;轴 y_b 垂直于对称面指向右。

1.2.2 与机体牵连的大地坐标系及舰载机姿态变量的定义

为了定义舰载机的姿态变量,我们引入了与机体牵连的大地坐标系。

所谓与机体牵连的大地坐标系 $O_{bg}x_{bg}y_{bg}z_{bg}$ (标记为 S_{bg}) 是原点跟随机体平移的大地坐标系,即原点与机体坐标系的原点 O 重合,三个轴 x_{bg}, y_{bg}, z_{bg} 分别平行于大地坐标系的三轴 x_g, y_g, z_g 。