



“十二五”国家重点图书规划项目  
国防特色学术专著·航空宇航科学与技术



陕西省出版资金精品项目

National Defense Monograph



# 飞机起落架动力学设计与分析

聂宏 魏小辉 等编著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

013071164

V226  
10

“十二五”国家重点图书规划项目



国防特色学术专著·航空宇航科学与技术



陕西省出版资金精品项目

# 飞机起落架动力学设计与分析

聂宏 魏小辉 等编著



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

V226  
10

013071184

## 内容简介

本书主要以飞机起落架的动力学问题为重点,论述了飞机起落架动力学分析方法和软件工具、飞机起落架的结构形式和缓冲器的结构形式、起落架的收放形式以及运动学分析方法、起落架振动控制方法等,同时,深入研究并给出了起落架落震动力学、全机着陆和滑跑动力学、起落架收放动力学、起落架摆振动力学、飞机地面滑跑稳定性、前轮操纵动力学、舰载飞机的起降动力学建模及分析方法。

本书可供航空类专业的本科生、研究生、教师及从事飞行器设计和研究的相关人员使用参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

飞机起落架动力学设计与分析/聂宏,魏小辉,等编著. —西安:西北工业大学出版社,2013.1

国防特色学术专著·航空宇航科学与技术

ISBN 978-7-5612-3521-8

I. ①飞… II. ①聂… ②魏… III. ①起落架—动力学—机械设计 IV. ①V226

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 276074 号

## 飞机起落架动力学设计与分析

聂宏 魏小辉 等编著  
责任编辑 李阿盟 雷军

\*

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844 传真:029-88491147

<http://www.nwpup.com>

陕西向阳印务有限公司 各地书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:27.375 字数:672千字

2013年5月第1版 2013年5月第1次印刷 印数:2000册

ISBN 978-7-5612-3521-8 定价:70.00元

# 前 言

飞机起落架作为飞机结构的一个重要部件,承受着当飞机与地面接触时产生的静、动载荷,吸收和消耗飞机在着陆撞击、跑道滑行等地面运动时所产生的能量,在减缓飞机发生振动,降低飞机地面载荷,提高乘员舒适性,保障飞机飞行安全等方面发挥着极其重要的作用。

飞机起落架受力严重、工作环境恶劣、故障率高,大量统计表明,飞机事故中的大约 2/3 都与飞机起落架有直接或间接的关系,其中涉及强度方面的项目占多数。因此,近 30 年来,应用动力学设计与分析技术对起落架进行动强度设计成为国内外的一个研究热点和前沿问题。

因此,本书内容所涉及的飞机起落架动力学设计与分析技术研究工作是从起落架动强度和动态稳定性的角度来考察其动力学性能问题的。在设计中采取有效的措施来提高起落架动力学性能,并降低成本,从而有效地防止由于动力学设计不当而造成的动态载荷过大和稳定性较差等问题,以确保飞机在起飞、着陆(着舰)、滑跑和地面操纵等过程中的安全。飞机起落架动力学设计与分析技术在提高起落架动力学性能、降低成本、确保飞行安全等方面具有重要的理论意义和实用价值。

目前,国内外关于起落架动力学设计与分析技术的相关资料缺乏,而且缺少关于如何系统地应用动力学设计与分析技术专门指导起落架开发工作的书籍。我国起落架研制与生产正由引进、消化、吸收向自主研发的方向发展。如何应用动力学设计与分析技术以提高起落架动力学性能是编写本书的主要目标。

本书是基于笔者近年来关于飞机起落架动力学设计与分析技术所进行的相关研究的成果总结。1989—2010 年期间,笔者的研究工作得到了国家自然科学基金、航空基金、国家型号工程和背景型号研究转横向项目等多项资助。

本书共分 10 章。第 1 章介绍了飞机起落架的简要发展历程、主要功能和组成,并对飞机起落架的动力学问题进行了简要概括。第 2 章介绍了起落架动力学分析方法和建模方法,对典型的起落架动力学问题,如落震、摆振和收放动力学问题建立了仿真分析流程规范。第 3 章介绍了飞机起落架的结构形式和缓冲器的结构形式,给出了支柱式起落架、摇臂式起落架和多轮支柱式起落架的落震动力学建模方法。第 4 章详细论述了飞机全机着陆和滑跑动力学建模与分析过程,并给出了多轮多支柱飞机的全机着陆动力学分析示例。第 5 章介绍了起落架的收放形式以及运动学分析方法,分析了起落架收放载荷及其建模方法,并给出了收放动力学分析示例。第 6 章介绍了起落架摆振分析动力学建模方法和非线性摆振稳定性分析方法,并给出了摆振动力学分析示例。第 7 章介绍了飞机地面滑跑

方向稳定性分析方法,以及前轮操纵系统原理及其分析方法,对前轮操纵系统建模、转弯运动联合仿真和防滑刹车系统建模与分析等问题进行了详细论述。第8章对舰载飞机的着舰冲击动力学、拦阻动力学、弹射起飞动力学和滑跃起飞动力学进行了论述,给出了建模及分析方法。第9章介绍了起落架振动控制方法,并对起落架振动被动控制技术、主动控制技术和半主动控制技术进行了详细论述。第10章介绍了起落架加长对飞机总体设计的影响,并给出了飞机起落架方案设计示例。

本书各章编写人员及其分工如下:第1,3,8,9章:聂宏;第2,4,5,10章:魏小辉;第6章:许锋;第7章:张明。感谢南京航空航天大学起落架工程技术中心赵凡、方平、汪岸柳、张明星、吴卜圣、柳刚、万峻麟、樊海龙、范伟、吕祥生、陈雷、童美祥、王轩、陈琳、郭湖明、钱小妹、徐燕、于浩、周恩智、周福亮、孙泽鹏、郑蓝、朱琳等研究人员对本书内容的贡献。感谢陶周亮、冯飞、樊蕊、杨礼芳、冀美珊、刘伟、王钰龙、贲亮亮、吴晓宇、邵一舟、李利荣、陈炎、杜进、张钦、尹乔之、陈凯帆、王智成等工作人员对本书出版过程中的帮助。

感谢国家自然科学基金(项目编号:51075203和51105197)对本书研究的支持。

本书的出版既有利于促进我国飞机起落架研发人才的培养,又可以作为工程应用中的参考书籍。

由于水平有限,不足之处在所难免,恳切希望广大读者批评指正,提出宝贵意见和建议。

编著者

2012年10月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 飞机起落架概述	1
1.2 飞机起落架动力学问题	6
第 2 章 起落架动力学分析及建模方法	8
2.1 动力学分析方法概述	8
2.2 虚拟样机与协同仿真技术	9
2.3 起落架系统多学科设计/协同仿真平台	12
2.4 ADAMS/Aircraft 前起落架落震虚拟样机的建立及仿真流程规范	14
2.5 ADAMS/Aircraft 主起落架落震虚拟样机的建模方法	25
2.6 ADAMS/Aircraft 前起落架摆振虚拟样机的建立及仿真流程规范	36
2.7 ADAMS/Aircraft 前起落架收放虚拟样机的建立及仿真流程规范	47
2.8 ADAMS/Aircraft 主起落架收放虚拟样机的建立及仿真流程规范	59
第 3 章 飞机起落架落震动力学	71
3.1 飞机起落架结构形式	73
3.2 飞机起落架缓冲器结构形式	78
3.3 支柱式起落架落震动力学方程	93
3.4 摇臂式起落架落震动力学方程	101
3.5 多轮支柱式起落架落震动力学方程	105
3.6 其他形式起落架落震动力学方程	108
第 4 章 全机着陆与滑跑动力学	109
4.1 全机着陆与滑跑动力学概述	109
4.2 全机着陆与滑跑动力学模型	109
4.3 动力学模型中相关力的计算	116
4.4 飞机地面运动仿真分析	119
4.5 起转回弹	125
4.6 基于 ADAMS/Aircraft 的全机着陆性能动力学分析	128
4.7 多轮多支柱飞机着陆动力学分析	136
4.8 仿真结果分析	150
第 5 章 起落架收放动力学	155
5.1 起落架收放形式及运动学分析	156

5.2	起落架收放载荷 .....	166
5.3	起落架收放动力学仿真 .....	170
5.4	动力学模型的载荷建模 .....	173
5.5	动力学仿真结果分析 .....	174
<b>第 6 章</b>	<b>飞机起落架摆振动力学</b> .....	<b>179</b>
6.1	起落架摆振分析动力学建模 .....	180
6.2	起落架非线性摆振稳定性分析 .....	202
6.3	起落架摆振分析示例 .....	209
<b>第 7 章</b>	<b>飞机地面操纵和刹车系统设计与动力学分析</b> .....	<b>214</b>
7.1	飞机地面滑跑方向稳定性分析 .....	214
7.2	前轮操纵系统原理及分析 .....	222
7.3	前轮操纵系统的模型 .....	230
7.4	飞机操纵前轮转弯运动联合仿真 .....	237
7.5	防滑刹车系统分析 .....	253
7.6	防滑刹车系统组成及数学模型 .....	258
7.7	多轮多通道防滑刹车系统设计 .....	263
<b>第 8 章</b>	<b>舰载飞机起飞着陆装置设计与分析</b> .....	<b>278</b>
8.1	舰载飞机起落架着舰冲击动态性能分析 .....	278
8.2	舰载飞机拦阻动力学分析 .....	284
8.3	舰载飞机弹射起飞动态性能分析 .....	293
8.4	舰载飞机滑跃起飞动态性能分析 .....	299
<b>第 9 章</b>	<b>起落架振动控制设计与分析</b> .....	<b>309</b>
9.1	被动控制技术 .....	309
9.2	主动控制技术 .....	319
9.3	半主动控制技术 .....	344
<b>第 10 章</b>	<b>飞机起落架设计与分析示例</b> .....	<b>376</b>
10.1	起落架加长对飞机总体设计的影响 .....	376
10.2	飞机起落架方案设计示例 .....	397
<b>附录</b>	<b>变量注释表</b> .....	<b>427</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>430</b>

# 第1章 绪论

## 1.1 飞机起落架概述

飞机起落架是飞机的重要承力部件,在飞机安全起降的过程中担负着极其重要的使命。对于现代飞机而言,起落架已经成为关系飞机起降性能、舒适性以及乘员生命安全的重要装置。随着飞机起落架在近、现代飞机结构中的作用日益突出,设计人员面临着新的挑战,需要用最轻质量、最紧凑的结构,设计出最为安全的起落架。即设计出既“强、坚、轻”,且寿命长、可靠性高的飞机起落架。起落架设计也成为一门需要多个专业共同协作的交叉学科。

### 1.1.1 飞机起落架的简要发展历程

1903年12月17日,人类历史上第一次有动力、载人、持续、稳定、可操纵的重于空气的飞行器成功飞行。这就是莱特兄弟所制造的“飞行者一号”。然而在这架飞机上,并没有现代起落架的影子,而是有一对类似滑橇的装置。它用带轮子的小车在滑轨上靠落锤装置弹射辅助起飞。如图1.1所示,就是著名的“飞行者一号”。

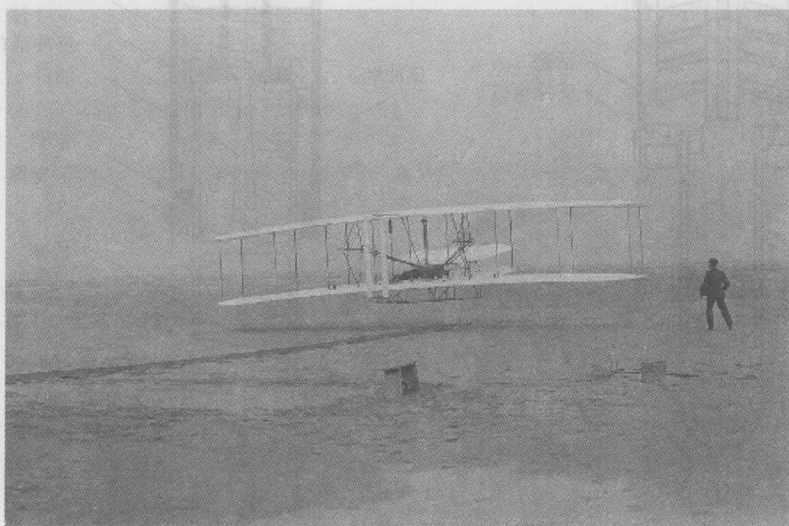


图 1.1 飞行者一号

在1906年上天的 Santos-Dumont(山度士·杜蒙)的“飞机—14BIS”上,就有了现代起落架的样子。在采用轮式起落架以后,飞机在地面的移动、起飞前滑跑和着陆性能都有了很大的提高。该飞机的结构外形和性能参数如图1.2所示。



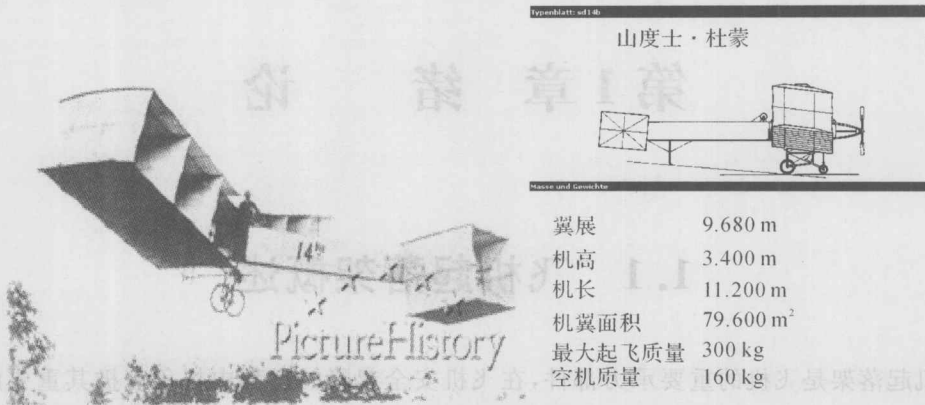


图 1.2 Santos-Dumont 的“飞机—14BIS”

然而随着飞机的逐渐成功,飞机设计质量和飞行速度不断增加,提高飞机的起飞和着陆性能,就成为了急需解决的问题之一。第一次世界大战时的飞机已经有了减震的起落架,这些起落架采用把橡皮绳绕在轴上,并把它们固定在支柱上来进行减震(见图 1.3(a))。此时的起落架在着陆减震方面进入了角色。

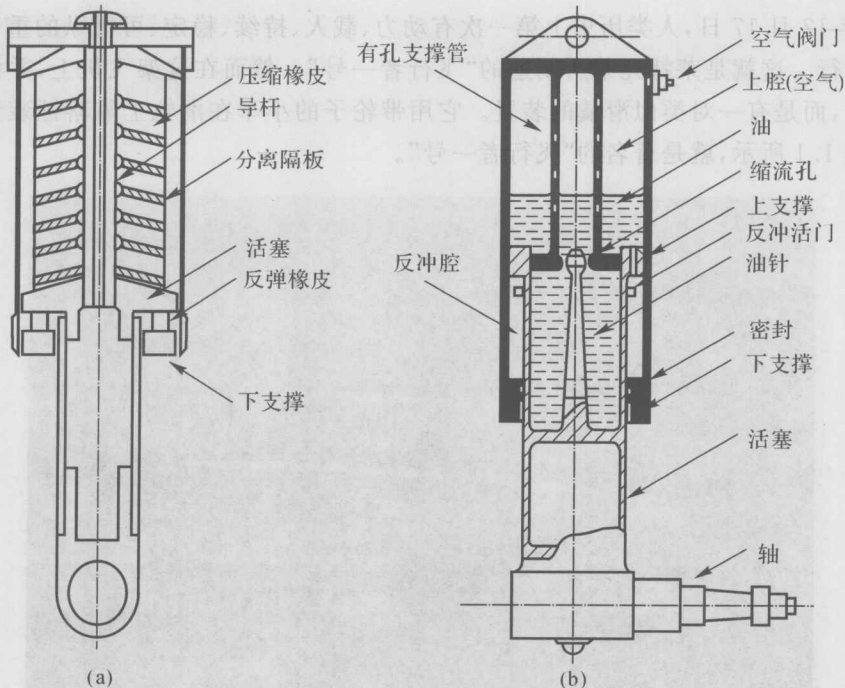


图 1.3 典型的橡皮缓冲支柱和油-气式缓冲支柱

(a) 橡皮缓冲支柱; (b) 油-气式缓冲支柱

因为采用橡皮绳的起落架效率很低,所以当时还有其他一些减震设计方案。其中包括钢盘弹簧、钢片弹簧、空气和油液等类型的缓冲支柱。油-气式支柱是 1918 年才采用的,典型的油-气式缓冲支柱如图 1.3(b)所示。各种缓冲支柱类型的效率/质量对比如图 1.4 所示。

在对油-气式缓冲支柱与其他形式的缓冲支柱的对比研究之中,由于油-气式支柱在动态条件下具有极高的效率,因而对于吸收下沉速度产生的动能几乎是一种理想的装置。油-气式缓冲器不仅在各种缓冲器中效率最高,而且从能量耗散的观点来看,它也是最好的。正是由于油-气式缓冲支柱的优越性能,迄今为止固定翼飞机所使用的起落架缓冲器基本都采用油-气式缓冲器。

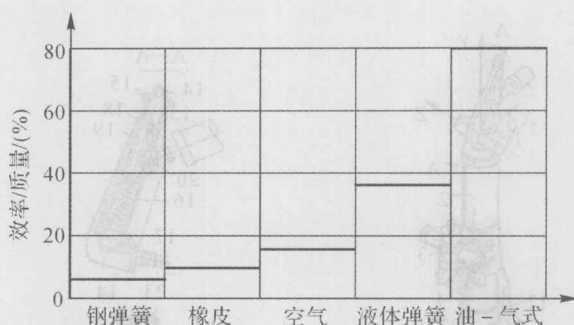


图 1.4 各种缓冲支柱类型的效率/质量对比

随着飞行速度的提高,现代飞机的起落架都要求可收放,以减小飞行时的空气阻力。因此,起落架的结构形式也由架构式发展为支柱式和摇臂式。架构式起落架结构示意图以及具有架构式起落架的 20 世纪二三十年代的飞机如图 1.5 所示。

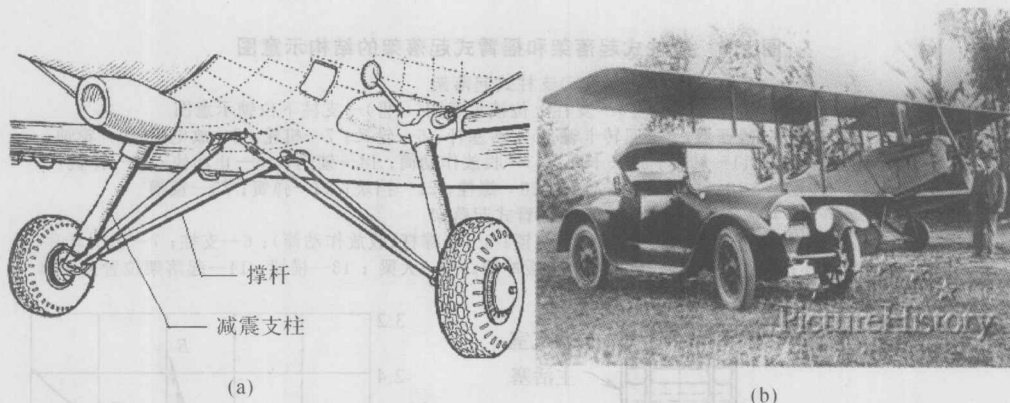


图 1.5 架构式起落架结构示意图和 20 世纪二三十年代的飞机

(a) 架构式起落架; (b) 20 世纪二三十年代的飞机

支柱式起落架和摇臂式起落架的结构示意图如图 1.6 所示。

除了起落架结构形式上的改进之外,油-气式缓冲器的内部设计也一直在改进和发展之中。为了提高起落架缓冲器的吸收能力,降低起落架着陆,尤其是地面滑行和操纵时的动态载荷,设计者发展出双动式的缓冲支柱。双动式支柱包括两个室而不是通常的单室,单动式和双动式缓冲支柱的结构示意图及缓冲性能对比如图 1.7 所示。

具有这种双动式缓冲支柱的起落架,能改善在粗糙或不平地面滑行的冲击吸收特性。而且双腔式缓冲器可通过调整低气压室和高气压室的填充参数(充气压力和两个气室的容积)来调整空气室所吸收的能量,从而提高整个缓冲器的效率。这样就可以在相同的设计行程条件下,使过载系数减小。另外,缓冲器内部的细节设计和参数优化设计,也是改进和研究的重点之一。类似于为双动式支柱确定载荷-行程曲线的另一种改进方法,是在缓冲支柱活塞内加一个阀门。这个阀门是弹簧加载的,在给定的载荷下阀门将被打开,从而改进缓冲支柱的弹簧速率。

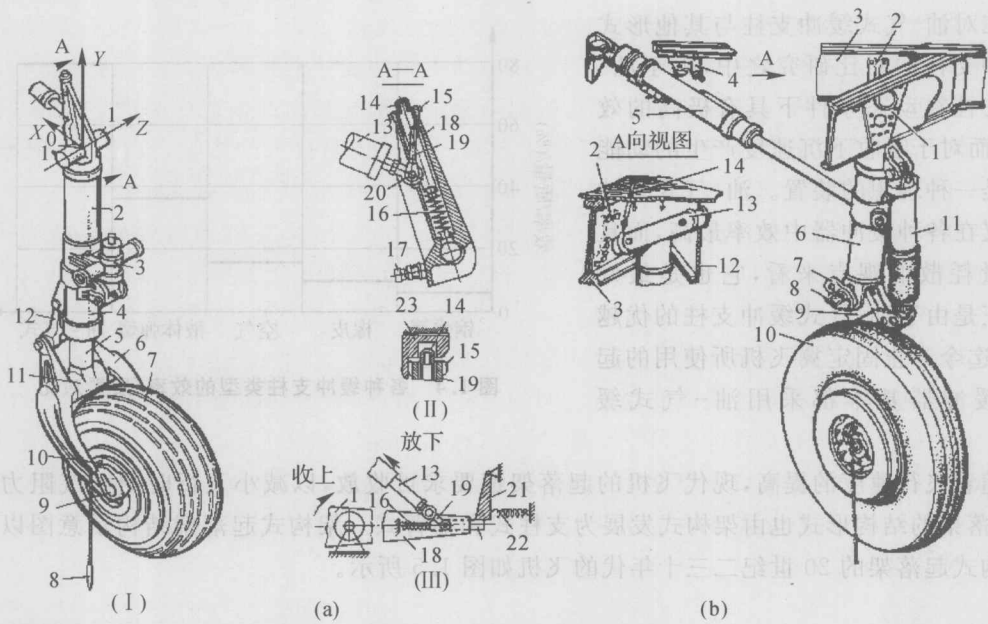


图 1.6 支柱式起落架和摇臂式起落架的结构示意图

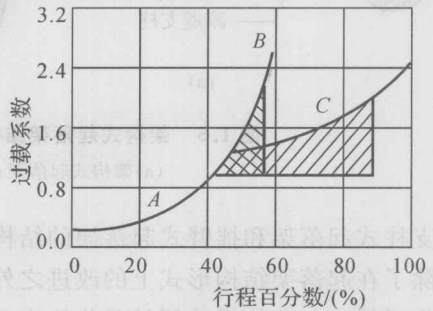
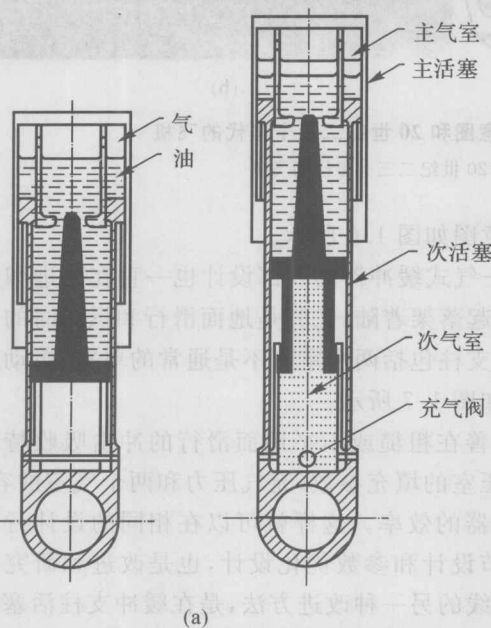
(a) 支柱式起落架

(I) 一起落架结构; (II) 一支柱上位锁示意图; (III) 一支柱下位锁示意图

1—横梁; 2—支柱; 3—减摆器; 4—回转卡箍; 5—活塞杆; 6—轮叉; 7—机轮; 8—放电垂; 9—轮轴; 10—机轮温度显示器; 11—转轴; 12—卡环; 13—收放作动筒; 14—锁销; 15—止动块; 16—弹簧; 17—注油嘴; 18—摇臂; 19—锁环; 20—螺栓; 21—挡块; 22—弹簧; 23—锁槽

(b) 摇臂式起落架

1,2—起落架固定接头; 3—机翼内撑梁; 4—上位锁; 5—斜撑杆(收放作动筒); 6—支柱; 7—牵引耳片; 8—支柱上位悬挂环; 9—摇臂; 10—机轮; 11—缓冲器; 12—大梁; 13—横梁; 14—起落架位置指示器



	缓冲器种类	
	单动式	双动式
曲线	AB	AC
行程增量	8.4%	41.6%
行程增量比	1.0	5.0
能量增量	3.8	23.7
能量增量比	1.0	6.2

图 1.7 单动式和双动式缓冲支柱的结构示意图及缓冲性能对比

(a) 单动式和双动式缓冲支柱; (b) 缓冲性能对比

图 1.7(b)所示为两种形式缓冲支柱的行程及能量比较。在 1.0~2.0 单位过载增量范围内,双作动缓冲支柱的行程及对应吸能能量较单动式缓冲支柱大得多。

从 20 世纪 70 年代以来,随着对于飞机起落架结构形式和内部构造的改进空间越来越小,研究者们开始探讨其他可能的着陆减震设计方案。受气垫船技术的影响,设计者们还设计出了一种气垫起落装置。气垫起落装置(ACLS)是 20 世纪 70 年代发展起来的一种飞机起落装置。装有气垫起落系统的飞机在机身下部装有环形弹性气垫体,空气通过接地区域周围的许多小孔自垫体排出。这样形成一个支持飞机的空气压力垫和一个尽量减小垫体和地面之间摩擦力的空气润滑层。

常规的油-气式减震支柱通过油液缩流过程来吸收能量。当气垫起落系统着陆时,机身下的大量流体被压缩,并通过垫体和地面之间的空隙逸出,从而达到能量吸收的作用。如图 1.8(a)所示的是由俄罗斯爱罗里克科学与生产公司和索柯尔飞机工厂合作设计制造的澳洲野狗“Dingo”水陆两栖轻型飞机。当使用为 C-119 设计的系统时,气垫起落系统和常规起落架的减震性能是很相似的(见图 1.8(b))。

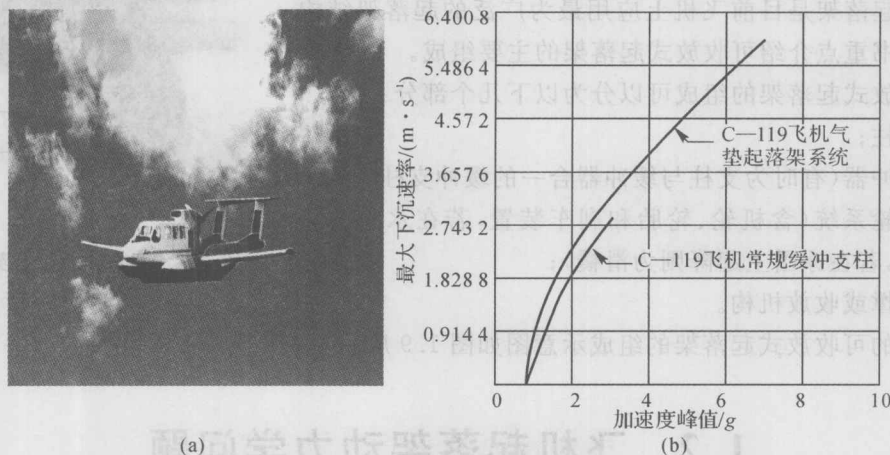


图 1.8 澳洲野狗“Dingo”及 C-119 飞机气垫起落系统的能量吸收

(a)澳洲野狗“Dingo”; (b)C-119 飞机气垫起落系统

除了对气垫起落系统的探讨研究之外,从 20 世纪 70 年代开始,控制系统被广泛地应用于对飞机起落架着陆冲击载荷的减震设计之中。迄今为止,对于嵌入控制系统的飞机起落架系统的动态性能的分析研究仍然是飞机起落架着陆减震技术的重点和热点之一。1976 年以来, J. R. Mcgehee 详细研究了大型弹性飞机的着陆减震控制系统,并实际应用于某些飞机的起落架系统之中。I. Ross 在 1979 年到 1983 年间的文献中,探讨了一种主动控制技术在某些军用飞机的起落架系统中的应用。其他研究者关于嵌入控制系统的飞机起落架系统的动态性能做了大量类似的研究工作。值得提出的是 C. D. Berg 和 P. E. Wellstead 在 1998 年的文献中探讨了电流变油液在飞机起落架缓冲器中的应用。2003 年, Y. T. Choi 和 N. M. Wereley 探讨了应用电流变/磁流变油液对缓冲器动态性能的控制研究。

### 1.1.2 飞机起落架的主要功能

飞机起落架是飞机在地面停放、滑行、起降滑跑时用于支撑飞机质量、吸收撞击能量的飞

机部件。其主要功能包括：

- 1) 承受飞机与地面接触时产生的静、动载荷,防止飞机结构发生破坏;
  - 2) 消耗飞机在着陆撞击和在不平整的跑道上滑行时所吸收的能量,防止飞机发生振动;
  - 3) 在飞机着陆后,为了缩短滑行距离,吸收和消耗飞机前进运动的大部分动能;
  - 4) 在飞机的地面滑行过程中,纠正飞机航向,操纵飞机转弯。
- 这些都是飞机起落架的基本功能,对于舰载飞机而言,其起落架还需要实现一些特殊功能,如弹射起飞、拦阻着舰等。为了满足飞机起落架的这些功能要求,其动力学问题显得尤为突出。

### 1.1.3 飞机起落架的主要组成

总体而言,飞机起落架大致可以分为固定式和可收放式两大类。固定式飞机起落架多用于小型低速飞机上,而可收放式起落架是目前飞机上应用最为广泛的起落架结构形式。本书重点介绍可收放式起落架的主要组成。

可收放式起落架的组成可以分为以下几个部分:

- 1) 支柱;
  - 2) 缓冲器(有时为支柱与缓冲器合一的缓冲支柱);
  - 3) 机轮系统(含机轮、轮胎和刹车装置,若在水上起降则为浮筒,若在冰雪上起降则为滑橇);
  - 4) 支撑或收放机构。
- 典型的可收放式起落架的组成示意图如图 1.9 所示。

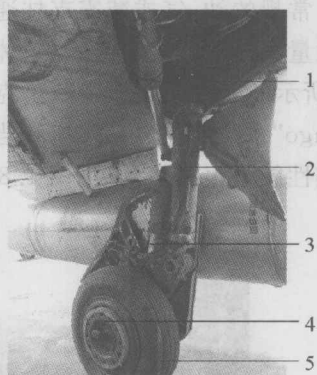


图 1.9 可收放式起落架组成

1—收放机构; 2—支柱; 3—缓冲器;  
4—机轮; 5—轮胎

## 1.2 飞机起落架动力学问题

作为飞机的重要组成部分,起落架不仅要满足一定的静强度设计标准和要求,更重要的是还必须满足诸如起飞、着陆、滑跑、地面操纵等一系列的动力学要求。

现代飞机的起落架不单纯只是一个结构,而且是一种相当复杂的机械装置。它包括缓冲系统、机轮、刹车和防滑系统、控制系统、电气系统、液压系统、收放系统以及其他一些系统和装置。只有这些系统彼此间协调运作,才能保证飞机安全平稳地起降和地面运动。而在此过程中,起落架的动力学问题又往往是起落架设计人员最为关心的问题之一。

动力学特性的好坏是衡量一副起落架性能优劣的重要标准。在现代飞机起落架设计中,所涉及的动力学问题主要包括:

- 1) 落震动力学问题;
- 2) 着陆与滑跑动力学问题;
- 3) 收放动力学问题;
- 4) 摆振动力学问题;
- 5) 地面操纵动力学问题;

- 6) 舰载飞机起落架起飞、着舰动力学问题;
- 7) 起落架动力学控制问题。

这些都是起落架设计、制造以及试验过程中较为重要的动力学问题,同时,也是起落架装置动力学研究领域较为主要的研究课题。本书的后续章节中,将进行更为详细的分析和讨论。

## 2.1 起落架动力学分析

起落架动力学分析是建立在五自由度模型基础上的。在五自由度模型中,起落架的动力学分析主要考虑起落架在着陆过程中,起落架与跑道之间的相互作用,以及起落架在着陆过程中,起落架与跑道之间的相互作用。起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。

起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。

起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。

起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。

起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。

起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。起落架动力学分析的主要任务是研究起落架在着陆过程中的动力学特性,以及起落架在着陆过程中的动力学控制问题。

## 第 2 章 起落架动力学分析方法及建模方法

### 2.1 动力学分析方法概述

好的起落架设计必须建立在正确的动力学分析的基础上。不管是在设计之初,通过动力学分析寻找符合要求的设计方案,还是最后通过动力学分析校核起落架系统是否满足设计要求,动力学的分析方法都是至关重要的。

较为传统的分析方法是建立动力学微分方程组,根据初始条件求解方程,对相应问题给出特解。这种方法的优点是成本较低,周期较短,但是由于计算方法的限制,对于某些问题,动力学方程还不能很好地给出解答。

另一种方法就是进行试验分析,试验分析可以较为真实地反映现实情况,得到的试验结果较为真实可信,但是试验成本普遍较高,这在一定程度上也限制了试验的应用。

近些年来,随着计算机技术的进步,虚拟样机技术得到了迅速的发展。机械工程中的虚拟样机技术又称为机械系统动态仿真技术,是 20 世纪 80 年代随着计算机技术的发展而迅速发展起来的一项新技术,其核心是机械系统运动学和动力学仿真技术,同时还包括三维 CAD 建模技术、有限元分析技术等。

运用虚拟样机技术,可以大大简化起落架系统的设计开发过程,大幅度缩短开发周期,并且可以节约大量的成本。

目前,国际上已经出现很多商用虚拟样机软件,其中较为成熟的是美国 MSC 公司开发的 ADAMS 软件。ADAMS 是用于虚拟样机分析的应用软件,用户可以运用该软件非常方便地对虚拟机械系统进行静力学、运动学和动力学分析。同时,该软件又是虚拟样机分析开发工具,其开放性的程序结构和多种接口,可以成为特殊行业用户进行特殊类型虚拟样机分析的二次开发工具平台。

ADAMS 中有专门的飞机模块,即 Aircraft 模块。用户可以在此模块中建立完整的起落架系统虚拟样机模型,并进行相应的运动学、动力学的分析和产品的开发。关于虚拟样机技术将在第 2.4~2.8 节中做进一步说明。

我国飞机起落架的研制,从新中国成立至今,伴随着新机种的设计,经历了从仿制、测绘改型到自行设计 3 个阶段,共定型和生产了十几种型号。起落架的设计、制造、试验技术有了较大的发展。但目前起落架研制从设计、制造、试验、试飞到定型平均需要 5~10 年。而目前欧美等国家新机起落架的研制平均只需 2~3 年,起落架的改型甚至只需要 6 个月就可以基本完成,造成这种研制周期差异较大的主要原因是国外普遍采用了先进的起落架设计手段和设计技术。

## 2.2 虚拟样机与协同仿真技术

### 2.2.1 虚拟样机与协同仿真技术概述

传统航空、航天产品的设计通常采取“设计—制造—试验—改进—设计”的串行模式,尽管在结构设计方面采用 CAD 软件,电路设计采用 EDA 软件,性能分析采用 CAE 软件,但由于不同学科的软件相对独立,产品的性能指标往往是通过大量的试验来获取特征参数的。从单一学科或局部性能指标来看,这种设计方法的效果比过去先进。但由于缺乏系统级设计工具和方法,在产品初期对各个学科(子系统)之间的相互耦合关系认识不全面,人为地将影响航空、航天产品性能的气动、运动、结构和控制等学科割裂开来,以至于当后期进行物理样机的总体调试时系统存在不稳定因素,需要不断协调影响产品性能的参数。几经反复,单一学科性能指标和技术参数几经修改,已经发生了很大的变化。这不仅降低了飞行器的总体性能,而且周期长、效率低,总体应用效果不是很理想。

针对传统设计方法的缺点,一种新的飞行器设计方法——虚拟样机技术——应运而生。虚拟样机(virtual prototype)是国际上 20 世纪 80 年代随着计算机技术的发展,在 CAX 技术基础上发展起来的新型技术。虚拟样机是由分布的、不同工具开发的甚至异构的子模型组成的模型联合体,主要包括产品的 CAD 模型、产品的外观表示模型、产品的功能和性能仿真模型、产品的各种分析模型(可制造性、可装配性等)、产品的使用和维护模型以及环境模型等。借助虚拟样机,设计人员可以通过成熟的三维计算机图形学,模拟在真实环境下产品的各种运动和动力特性,并能根据仿真结果优化产品的设计方案。采用虚拟样机技术就是采用并行工程理念,融合现代管理技术、先进设计/制造技术、先进仿真技术、多学科分析与优化技术,将“管理”“技术”和“人”有机地集成为一个协调的统一体,建立设计、仿真、试验、制造和项目管理的协同开发环境,以实现产品设计过程的全生命周期管理和产品创新设计,缩短研制周期,降低研制成本与研制风险,提高研制质量。虚拟产品开发与传统产品开发流程比较如图 2.1 所示。采用虚拟样机技术后,飞机设计过程是一个支持自上而下设计,自下而上综合验证过程的 V 形系统,如图 2.2 所示。

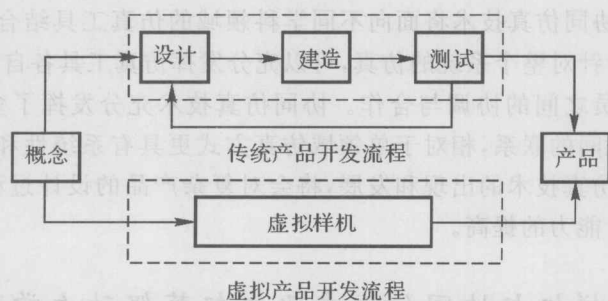


图 2.1 虚拟产品开发与传统产品开发流程比较



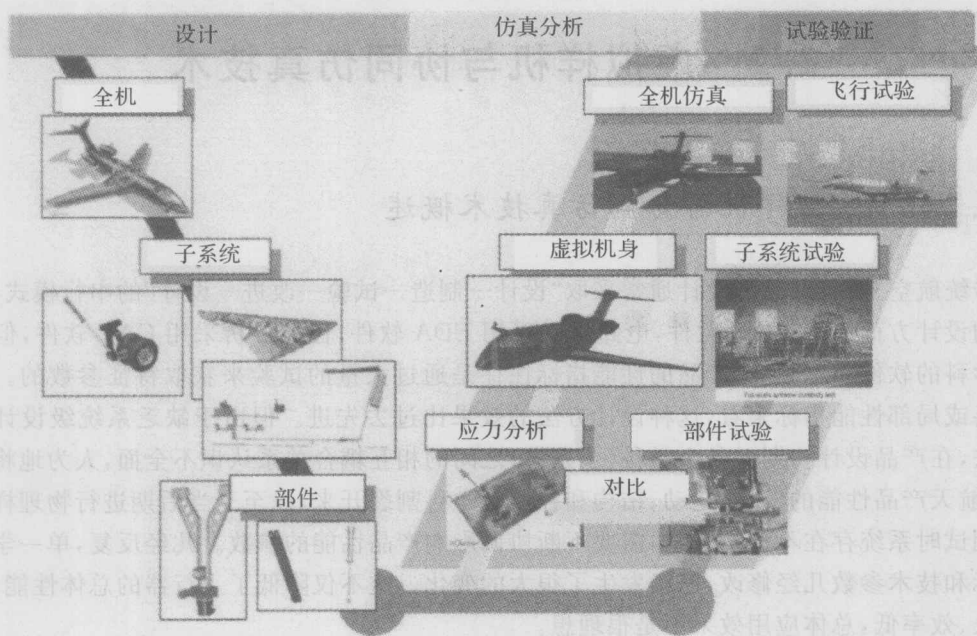


图 2.2 基于虚拟样机技术的飞机设计过程

虚拟样机技术在航空、航天产品设计的各个阶段力求各学科的平衡,充分考虑各学科之间的互相影响和耦合作用,应用有效的设计/优化策略和分布式计算机网络系统,来组织和管理整个系统的设计过程,通过充分利用各学科间的相互作用所产生的协同效应,以获得系统的整体最优解。它的优点在于可以通过各学科模块化并行设计来缩短设计周期,通过考虑学科间的相互耦合来挖掘设计潜力,通过系统的综合分析来进行方案的选择和评估,通过系统的高度集成来实现航空、航天产品的自动化设计,通过各学科的综合考虑来提高可靠性,通过门类齐全的多学科综合设计来降低研制费用。

协同仿真是虚拟样机的重要支撑技术之一。飞机的设计涉及运动、控制、动力、强度、气动、安全性和疲劳等多个学科,若需对产品在实际工作状态下的性能进行精确仿真,必须考虑不同学科的耦合作用和影响,在产品完成之前通过不同学科之间系统级的耦合与集成仿真,对产品的性能进行全面评估。为了应对这样的需求,CAE 仿真技术也正从单学科向多学科领域发展。多领域协同仿真技术将面向不同学科领域的仿真工具结合起来,共同构成一个统一的仿真系统,进行针对整个系统的仿真,可以充分发挥仿真工具各自的优势,同时,还可以加强不同领域开发人员之间的协调与合作。协同仿真技术充分发挥了多领域仿真工具的优势,体现了不同分系统间的联系,相对于单领域仿真方式更具有系统性和合理性,仿真结果的置信度也更高。协同仿真技术的出现和发展,将会对复杂产品的设计过程提供更加强大的支持,从而促进产品设计能力的提高。

### 2.2.2 虚拟样机与协同仿真在飞机起落架动力学研究中的应用

虚拟样机技术已经在国外一些飞机制造企业中得到了成功的应用。美国联合攻击战斗机