

周自全 著

飞行试验工程

FEIXING SHIYAN GONGCHENG



航空工业出版社



飞行试验工程

周自全 著

航空工业出版社
北 京

内 容 提 要

本书是飞机飞行试验的一部专著,较系统地阐述了飞机飞行试验技术的全过程。本书共计11章和两个附录,其主要内容包括:现代飞机飞行试验的特点、分类、机构及其管理;试飞安全技术;试飞员及其驾驶技术;试飞大纲的制定及试飞队伍的建立;飞机性能、飞行品质及发动机试飞;飞行包线及飞机完整性试飞;航空电子系统试飞;虚拟试飞;试飞测试技术及试验研究机。在附录中还介绍了典型的试飞员驾驶技术、试飞人员因素及其防范等内容。

本书可供航空工业从事设计、制造和管理的工程技术人员学习参考,也可作为其他部门相关人员和航空高等院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

飞行试验工程/周自全著. --北京:航空工业出版社, 2010.12

ISBN 978-7-80243-646-6

I. ①飞… II. ①周… III. ①飞行试验 IV. ①V217

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第225948号

飞行试验工程 Feixing Shiyān Gongcheng

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话: 010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2010年12月第1版

2010年12月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 30.25

字数: 768千字

印数: 1—2000

定价: 98.00元

作者简介

周自全，男，1940年11月11日出生于湖北省武汉市，现任中国飞行试验研究院专务、飞行力学杂志社社长。1964年7月毕业于西北工业大学飞行力学专业，同年9月分配到兰字929部队（中国飞行试验研究院前身）工作，历任专业组长、室主任、副总师、副院长、科技委主任等职。46年来一直承担科研试飞任务，曾任空中飞行模拟试验机总设计师和歼10试飞总师。



1990年以来，获国家科技进步成果奖4项，其中特等奖1项（歼10型飞机，排名第三），一等奖1项（BW-1变稳飞机，排名第一），二等奖2项（IFSTA空中飞行模拟试验机和第三代战斗机试飞技术，均排名第一）。2004年、2007年和2010年分别获航空金奖、全国五一劳动奖章和何梁何利基金科学与技术奖。

工作期间，撰写数十篇科技报告和论文，发表著作5部，包括《现代飞行模拟技术》、《空中飞行模拟器》、《现代导航、制导与测控技术》、《歼10试飞》和《飞行试验工程》。

序

飞行试验在国防工业建设和国民经济发展中发挥着举足轻重的作用。它是航空科学技术探索和研究的有效手段，是新型飞机研制和鉴定的重要环节，是对航空新型号产品摸索和积累使用经验的必由之路。

新机试飞涉及专业面广，包括空气动力学、飞行力学、结构强度、动力装置、航空电子、机电系统、飞机改装、试飞驾驶、试飞测试、数据处理、维修保障，以及试验研究机的研制和应用等；新机试飞状态很多，包括各种包线边界、各种构型和系统模式、各种环境条件等；新机试飞过程中可能会遇到各种意想不到的情况，一型新机可能出现的故障数以千计；现代新机试飞周期很长，少则几年，多则十几年；参试人员很多，通常直接参试工程技术人员达数百名，直接参试单位达几十个，而支持和保障的单位和人员就更多。

总之，飞行试验是一项高技术、高风险和非常复杂的系统工程。

国内外关于试飞技术的文章和书籍不少，但将飞行试验作为一项工程进行全面系统叙述的书还甚少见。《飞行试验工程》一书的出版填补了这个空白，这是一项十分可喜的成果。

我对本书的作者非常熟悉和了解，他是一位非常敬业的科技工作者。几十年来他一直在飞行试验的事业中默默耕耘，带领着团队，从两代变稳飞机的研制和应用，到歼 10 飞机的试飞，都取得了丰硕的成果，为促进飞行试验技术的进步和航空工业发展做出了重要贡献。

几十年来，无论是我当一名试飞员，还是后来成为飞行试验和航空工业的主管领导，对本书作者所从事的科研工作，我都是积极的参与者和管理者，对他的许多理念和不断进取的工作精神是十分赞赏的。基于这个理由，对于本书的出版，我感到非常欣慰。

《飞行试验工程》一书从先进试飞理念和试飞文化出发，以先进的试飞技术为基础，比较全面系统地叙述了飞行试验的内涵和关键环节。

本书特别突出了如下几个方面：

(1) 试飞安全技术，包括试飞风险分析和管理、试飞顺序和试飞限制的选择、各试飞专业应注意的试飞安全环节和技术措施等。

(2) 试飞员和试飞驾驶技术，包括试飞员素质要求、试飞员培养、试飞驾驶技术、人素工程的技术分析、检查程序和错误防范措施等。

(3) 在试飞技术上,着重强调飞机性能与推进性能的综合、人机闭环飞行品质试飞方法和判据、颤振激励、航空电子综合和频谱空间特性试飞等方面的技术,指出了针对使用任务性能试飞的重要性。

(4) 试飞测试技术中,着重强调空地一体试飞测试和监控的重要性,并指出分布式、多总线的机载测试和 INET 全域网络的遥测遥控是试飞测试技术发展的方向。

(5) 虚拟试飞是虚拟现实技术在飞行试验中的应用,建模和飞行模拟是虚拟试飞的核心。无论是保障试飞安全还是提高试飞效率,飞行模拟都将起到越来越重要的作用,各专业的真实试飞与虚拟试飞相结合是必然的发展趋势。

(6) 试验研究机在航空技术发展和支持型号研制中发挥了不可替代的作用,没有试验研究机的领先研究和新技术演示验证,不可能有真正的航空科技的创新,也不可能有型号研制的顺利发展。

上述这些内容对于现代飞行试验来说都是非常关键的,也是所有从事飞行试验和从事航空科技工作的人必须关注的理念和技术。

此外,本书自始至终还贯穿一个观点,飞行试验是从事航空科技和航空工业发展的所有机构和人员的共同事业,在飞行试验这个平台上,所有参研、参试人员必须齐心协力,相互理解、配合和支持,形成健康的试飞文化,只有这样才能使这项高技术、高风险和高投入的事业得到安全和有效发展,为国防科技和航空工业发展做出更大贡献。

试飞英雄

原航空航天工业部副部长

原中国航空工业第一集团公司科技委主任

王 昂

2010年9月于北京

前 言

飞机飞行试验是集科学性、实践性、风险性于一体，投资巨大，技术复杂的系统工程，它在国防和经济建设中具有举足轻重的作用。世界上所有航空强国无不重视飞行试验的发展。我从事飞行试验工作46年，在各级领导的关怀和支持下，主要完成了四件事：第一件事是地面飞行模拟。1966年我主管的强5操纵品质飞行模拟试验是全国第一个型号飞机的飞行模拟试验，其中运用到的SB-6是全国第一个飞控铁鸟台和飞行模拟器。后来参与了一系列的地面飞行模拟器建设和应用，建立了集团公司飞行仿真重点实验室。第二件事是空中飞行模拟试验机研制。带领研究团队历时17年分别研制成功了单轴、多轴两代变稳飞机，这是国内仅有的两架空中飞行模拟试验机。目前第一架变稳飞机已经退役，第二架变稳飞机（IFSTA）一直承担着繁重的科研和试飞员培训任务。第三件事是歼10飞机科研试飞与定型试飞。作为试飞总师，与联合试飞队伍一起，在近20年的试飞周期内，从试飞技术攻关和试飞设施建设到设计定型试飞，完成了许多开创性的工作。歼10试飞中的一些试飞理念、试飞模式和试飞技术在后来的型号试飞中得到了推广和应用。第四件事是电传操纵飞机飞行品质等飞行试验技术研究。从20世纪80年代进行的跟踪操纵品质（HQDT）和驾驶员诱发振荡（PIO）等人机闭环飞行品质试飞研究，到后来的颤振激励技术攻关和大迎角试飞等，我与同事们一道，已经全面掌握和应用了第三代机试飞技术。

虽然这些科研工作对我国航空技术和航空工业发展做出了一定的贡献，取得了一些成果，但是也付出了巨大的代价。1984年12月4日，在一次我主管的电操纵试飞验证项目中，由于传感器故障，试飞员未能及时转入备份操纵，造成飞机失控而进入尾旋，损失了一架歼教6飞机，所幸两名试飞员无恙。在后来的型号试飞中，也出现过许多险情。在一次低空大速度飞行中，由于燃油系统故障，燃油表显示的总油量足够，但实际油箱的供油量已不足，幸好地面监控站发现，紧急指挥试飞员关加力，收油门减速，挽救了飞机。否则，按照当时耗油率，再过10多秒钟，这架飞机将无可挽救。还有一次，一架电传飞机进场着陆时，由于侧风扰动造成严重的横向驾驶员诱发振荡（PIO），当时离地只有1~2m，幸运的是，试飞员事先经过专项变稳飞机PIO培训，他判断准确，处置恰当，驾驶飞机复飞后安全着陆（试飞记录表明，从PIO发散到收敛只有5s）。世界上类似原因发生过不少坠机事件。再有一次，一架电传操纵飞机进行颤振激励地面检查试验时发现前翼舵面扭转频率下降了5Hz，当即取消了飞行。后来检查发现该翼面转轴轴套松脱，若不是地面实时监控发现，一旦飞机带故障上天，后果将不堪设想。这些都是我亲身经历的事件。其实类似事件在飞行试验中不胜枚举，有一些也造成了严重的后果。造成这些事件的原因有技术的，有管理的，有产品的，也有人为的。因为飞行试验牵涉的环节和因素实在太多，稍不注意，轻则影响工程进度，重则造成无法弥补的后果。这些历历在目的经验教训促使我编写了这本飞行试验工程的书。

经过多年试飞工作发现,我们的试飞理念、试飞技术和试飞管理仍存在许多问题。由于工作需要,我曾与欧、美、俄、日和以色列等国家和地区飞行试验的工作者有过一些交流和合作,在国内也参加过许多交流、讨论、论证和评审等技术活动,我也想借此机会把这些活动中了解到部分信息通过本书反映出来,供同行参考,这也是促使我写本书的原因之一。

国内外关于飞行试验技术方面的著作不少,但较全面地叙述飞行试验工程的书不多见。因此本书从系统工程的角度来重点叙述飞行试验的各个方面,并没有刻意叙述某一项具体的、系统的试飞技术细节。

本书首先强调了飞行试验在航空发展和飞机研制中的地位 and 作用,目的是希望相关人员更关注和支持飞行试验事业的发展。随后本书强调了试飞安全和试飞员素质方面的要求和相关技术,之所以将这两方面内容放在突出地位,除了重点强调试飞安全技术和试飞员飞行技术外,还力图宣传和营造一种良好的试飞文化,包括试飞安全文化,这两方面是其他试飞工作的基础。当然专业试飞技术是重要的,从第4章到第9章主要是以战斗机型号试飞为主线叙述了不同专业的试飞技术侧面。飞机平台试飞着眼于飞机的总体行为,着重于试飞操纵和机动动作设计,以及飞机响应参数的识别和处理,检查各种动态模型的正确性;航空电子和机载系统试飞着重于试飞规划和系统试飞综合设计,大到体系试飞协调,小到传感器精度,包括各种信息测试和总线数据的处理,检查系统的功能和指标。由于篇幅所限,本书只是将一些重要的,或自认为应该特别提及的部分做了些描述,目的是引起试飞工程师们的特别关注。试飞测试是试飞技术的重要组成部分,没有测试的试飞只是飞行,不是真正意义上的试飞,因此本书将测试专门作为一章,重点强调试飞测试技术发展趋势;最后两章分别对虚拟试飞和试验研究机做了专门叙述。虚拟试飞必须着重叙述,一方面是因为目前许多人对虚拟试飞仍然不够重视,另一方面这项技术在今后飞行试验中必将有更大的应用空间,忽视它的应用对试飞工作者来说是可惜又可悲的事情。与虚拟试飞一样,试验研究机的研制和应用仍然有许多人不够重视。忽视它,不仅对飞行试验事业,而且对整个航空航天事业都是巨大的损失,因此本书最后以较大篇幅叙述了试验研究机,包括国外情况、历史情况和应用需求,希望给能够影响航空事业前途的人们和试飞工程师们一些启示。

本书的编著和出版得到了中国飞行试验研究院刘选民院长的关心和支持,陈怿和张东卫两位同仁为本书的出版进行了大力帮助。在本书编著过程中得到了许多朋友的支持和帮助,特别是寿圣德、袁慧馨、程厚梅、蒋祖国、全昌业、李树有、霍培锋、白效贤、田福礼、朱良龙、任朴舟等研究员从不同的专业角度为我提供素材和建议。研究生张晓敏对全书进行了修改和整理,程淑萍女士自始至终进行稿件打印和修改,在此对他们的帮助、支持和辛勤劳动表示衷心感谢。

由于本人技术水平和经历所限,许多内容和观点肯定有不妥或错误之处,希望读者以批判的态度去阅读和参考,并不吝赐教,我会诚恳接受,并将予以修正。

周自全

2010年8月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 现代飞机及其试飞	1
1.2 现代飞机飞行试验的特点	4
1.2.1 飞机飞行试验是大系统工程	4
1.2.2 试飞内容极其复杂	5
1.2.3 必须试飞考核各种使用边界	5
1.2.4 试飞风险大,且具有风险重复性	6
1.2.5 试飞耗费巨大	7
1.3 飞行试验的分类	7
1.3.1 研究性试飞	8
1.3.2 调整和鉴定试飞	8
1.3.3 试用和使用试飞	9
1.4 试飞机构和试飞管理	10
1.4.1 航空大国的试飞机构	11
1.4.2 试飞项目管理	14
1.5 飞行试验发展的历史和趋势	16
1.5.1 世界飞行试验发展	16
1.5.2 中国飞行试验技术发展	19
1.5.3 飞行试验发展趋势	20
1.6 本章小结	23
第 2 章 试飞安全技术	25
2.1 试飞安全和风险评估	25
2.2 试飞安全管理	26
2.3 保证试飞安全对试飞队伍的素质要求	27
2.4 试飞顺序选择安排	27
2.4.1 领前试飞研究对保证试飞安全具有重要意义	28
2.4.2 型号试飞任务安排顺序	28
2.5 试飞限制要求	30
2.5.1 构型限制	30
2.5.2 重量、重心和非对称限制	31
2.5.3 速度高度飞行包线限制	31
2.5.4 迎角限制	32

2.5.5	起飞和着陆阶段的速度限制	32
2.5.6	载荷限制	32
2.5.7	局部振动值的限制	33
2.5.8	发动机试飞限制	34
2.5.9	燃油系统工作限制	34
2.5.10	飞控系统工作限制	34
2.5.11	起落架工作限制	35
2.5.12	环控系统工作限制	35
2.5.13	液压系统工作限制	35
2.5.14	座舱盖和弹射座椅工作限制	35
2.5.15	电源系统工作限制	35
2.5.16	试飞电磁环境限制	36
2.6	地面遥测监控	36
2.7	专业试飞安全技术	38
2.7.1	颤振试飞	38
2.7.2	飞控试飞	39
2.7.3	飞行品质试飞	40
2.7.4	大迎角试飞	41
2.7.5	发动机试飞	42
2.7.6	航电武器系统试飞	43
2.7.7	关于人素工程的考虑	44
2.8	试飞安全设施	46
2.8.1	试飞员学院(校)	46
2.8.2	遥测监控站	46
2.8.3	地面飞行模拟器	47
2.8.4	反尾旋装置	47
2.8.5	试飞现场安全保障设施	47
2.9	本章小结	48
第3章	试飞员和试飞员驾驶技术	50
3.1	试飞员的作用	50
3.1.1	试飞员的素质和水平关系着试飞安全和试飞效率	50
3.1.2	试飞员对于优化飞机设计起着举足轻重的作用	50
3.1.3	试飞员对新机使用起着承上启下的作用	51
3.2	对试飞员的要求	51
3.2.1	对试飞员的基本素质要求	51
3.2.2	对试飞员的基础理论要求	52
3.2.3	对试飞员的工程要求	54
3.2.4	试飞技术	55
3.3	驾驶员属性分析	61

3.3.1 驾驶员是传感器·····	61
3.3.2 驾驶员是信息处理器·····	62
3.3.3 驾驶员是伺服作动器·····	62
3.4 试飞员培养·····	64
3.4.1 试飞员成长之路·····	64
3.4.2 理论和工程培训·····	64
3.5 试飞员的座舱鉴定任务·····	66
3.5.1 概述·····	66
3.5.2 座舱鉴定的内容·····	66
3.5.3 关于座舱性能的试飞员评述·····	68
3.6 本章小结·····	69
第4章 试飞准备 ·····	71
4.1 试飞总体方案·····	71
4.1.1 试飞目的·····	71
4.1.2 试飞对象·····	72
4.1.3 试飞依据·····	72
4.1.4 试飞工作内容·····	73
4.1.5 试飞方法·····	79
4.1.6 承试飞机任务分配·····	79
4.1.7 试飞工作计划安排·····	80
4.1.8 地面试验·····	82
4.1.9 试飞保障·····	83
4.1.10 试飞组织管理·····	83
4.2 试飞大纲·····	84
4.2.1 试飞大纲的分类·····	84
4.2.2 设计定型试飞大纲与试飞总体方案的区别·····	85
4.2.3 制定试飞大纲的依据·····	86
4.2.4 试飞项目选择·····	86
4.2.5 试飞项目举例·····	87
4.2.6 试飞构型选择·····	88
4.3 试飞计划·····	89
4.4 试飞队伍的建立和培训·····	91
4.5 试飞设施建设·····	93
4.5.1 试验机和通勤飞机·····	93
4.5.2 大型通用地面试验设备·····	94
4.5.3 专用试飞设施·····	95
4.6 本章小结·····	95
第5章 首飞、飞机性能和发动机试飞 ·····	97
5.1 概述·····	97

5.2 首飞	98
5.2.1 试飞准备	98
5.2.2 地面滑行	101
5.2.3 首飞	103
5.3 大气数据校准试飞	104
5.4 飞机性能试飞	110
5.4.1 飞机性能试飞的意义、内容和状态	110
5.4.2 飞行性能换算	111
5.4.3 起飞和着陆特性试飞	113
5.4.4 飞机爬升性能试飞	114
5.4.5 巡航性能试飞	116
5.4.6 作战性能	117
5.4.7 下降特性	117
5.5 发动机试飞	118
5.5.1 发动机系统使用性和相容性及影响因素	118
5.5.2 动力装置试飞的输入技术文件	120
5.5.3 典型的试飞技术	122
5.5.4 发动机使用性能试飞技术	125
5.5.5 发动机试飞测试和数据处理分析	126
5.5.6 发动机试飞的特殊考虑	128
5.5.7 发动机推力	128
5.6 性能、能量与机动性	131
5.7 本章小结	137
第6章 飞行品质试飞	139
6.1 概述	139
6.1.1 飞行品质要求	139
6.1.2 影响飞行品质的基本环节	139
6.1.3 飞机设计过程中飞行品质规范的应用	141
6.1.4 飞行品质规范等级的应用	142
6.2 飞行品质试飞的典型操纵	142
6.3 飞行品质开环试飞	146
6.3.1 纵向稳定性	147
6.3.2 飞机短周期响应特性试飞	147
6.3.3 机动飞行中的操纵感觉和稳定性	150
6.3.4 横航向模态特性	151
6.3.5 横航向动态响应特性	152
6.3.6 横航向的操纵性能	153
6.4 驾驶员诱发振荡	154
6.4.1 驾驶员诱发振荡现象	154

6.4.2 驾驶员诱发振荡原因分析	154
6.5 PIO 判据及其应用	157
6.5.1 姿态带宽准则	157
6.5.2 Gibson 平均相位速率准则	159
6.5.3 Gibson 最大 APC 频率增益准则	160
6.5.4 Smith - Geddes 准则	160
6.5.5 R. Smith 准则	161
6.5.6 回路分离参数法 (LSP) 准则	163
6.5.7 进场着陆最优姿态响应准则	163
6.5.8 航迹带宽准则	164
6.5.9 Neal - Smith 准则	165
6.5.10 等效系统参数准则 (时域)	167
6.5.11 等效系统参数准则 (频域)	167
6.5.12 姿态回落准则 (时域)	168
6.5.13 GM/PM 准则	169
6.5.14 航迹超调准则	170
6.5.15 姿态带宽 (频域) 加回落 (时域) 准则	171
6.5.16 姿态带宽 (频域) 加回落 (频域) 准则	172
6.5.17 杆力梯度、阻尼比准则	174
6.5.18 俄罗斯 A 准则	174
6.5.19 俄罗斯 N 准则	175
6.5.20 OLOP 准则	179
6.5.21 横航向 APC 的预测准则	181
6.6 人机闭环系统试飞	184
6.7 大迎角试飞	188
6.7.1 第三代战斗机的大迎角特性	188
6.7.2 大迎角特性的有关定义	190
6.7.3 大迎角飞行试验阶段划分	192
6.7.4 一种典型飞机的试飞情况	194
6.7.5 反尾旋伞	196
6.8 敏捷性和过失速机动试飞	199
6.8.1 概述	199
6.8.2 敏捷性判据及试飞评定方法	200
6.8.3 过失速机动试飞	203
6.9 本章小结	209
第 7 章 飞行包线和结构完整性试飞	210
7.1 概述	210
7.2 飞机结构完整性试飞内容	212
7.2.1 飞机结构静载荷和静强度试飞	212

7.2.2	飞机结构动载荷和动强度试飞	214
7.2.3	飞机结构疲劳载荷和疲劳/断裂强度试飞	215
7.2.4	飞机结构热载荷和热强度试飞	215
7.2.5	飞机结构可靠性和维修性验证试飞	215
7.3	飞机结构载荷和强度试飞	216
7.3.1	飞机结构载荷和强度试飞的目的	216
7.3.2	飞行载荷和结构强度试飞的技术准备	216
7.3.3	飞机载荷和强度试飞机动方法	217
7.4	颤振和气动伺服弹性	218
7.4.1	颤振和气动伺服弹性的机理和模型迭代	218
7.4.2	颤振/ASE 要求	220
7.4.3	颤振/ASE 试飞方法	221
7.4.4	颤振边界预测	224
7.4.5	安全考虑	224
7.5	振动飞行试验	225
7.5.1	飞机振源、振动特性及危害	225
7.5.2	振动飞行试验的意义	226
7.5.3	飞机振动环境飞行试验	227
7.5.4	飞机炮振飞行试验	229
7.5.5	可靠性环境测量	230
7.6	本章小结	232
第8章	航空电子系统试飞	234
8.1	概述	234
8.2	航空电子系统综合功能试飞	235
8.2.1	航电系统的试飞阶段	235
8.2.2	主要试飞内容	236
8.3	导航系统的鉴定试飞	241
8.3.1	战术导航	241
8.3.2	自动返航方式	242
8.3.3	特殊功能	243
8.4	空/空主模式鉴定试飞	243
8.4.1	多功能火控雷达 (MFCR) 试飞	243
8.4.2	空空航炮精度试飞	246
8.4.3	导弹操作	246
8.4.4	关于空空导弹试验的几点说明	246
8.5	空/地模式鉴定试飞	248
8.5.1	多功能火控雷达	248
8.5.2	轰炸精度	249
8.5.3	航电和火控雷达试验数据的统计原理	249

8.6 一种主动雷达制导空空导弹试飞	252
8.6.1 导弹功用和性能	252
8.6.2 制导模式	252
8.6.3 载机对导弹的控制	253
8.6.4 载机导弹系统试飞的目的和内容	253
8.6.5 试飞方法	254
8.7 频谱空间特性的试飞	257
8.7.1 频谱空间	257
8.7.2 雷达试飞补充说明	259
8.7.3 雷达截面积测量试飞	262
8.7.4 光电系统试飞	265
8.7.5 红外目标特性试飞	270
8.7.6 电子战试飞	273
8.8 本章小结	276
第9章 试飞测试	278
9.1 概述	278
9.1.1 试飞测试系统的作用	278
9.1.2 现代试飞测试的通用要求	279
9.1.3 试飞测试的分类	280
9.2 一种典型的 ADAS 系统	281
9.2.1 基本原理和结构	281
9.2.2 ADAS 达到的目标	287
9.3 地面数据采集系统	287
9.3.1 系统原理结构	287
9.3.2 数据处理	288
9.3.3 显示监控和指挥	290
9.4 试飞测试技术的发展	291
9.4.1 F-22 的机载测试系统	291
9.4.2 F-22 和 F-35 新的机载测试系统	293
9.4.3 A380 试飞机载测试系统	295
9.4.4 飞行试验遥测技术的发展趋势	296
9.5 外部参数测量	301
9.5.1 光电经纬仪	302
9.5.2 测量雷达	302
9.5.3 激光雷达	303
9.5.4 卫星导航定位测量	303
9.5.5 摄影测量	304
9.6 本章小结	305

第 10 章 虚拟试飞	306
10.1 概述	306
10.1.1 虚拟试飞和飞行模拟	306
10.1.2 飞行模拟的发展	307
10.2 飞行模拟的作用、限制与对策	310
10.2.1 飞行模拟的作用	310
10.2.2 飞行模拟的限制	314
10.2.3 克服飞行模拟限制的对策	315
10.3 飞行模拟的分类	316
10.3.1 非实时飞行模拟	316
10.3.2 人在回路中的飞行模拟	317
10.3.3 硬件在回路中的飞行模拟	321
10.3.4 空中飞行模拟	325
10.4 研制模拟器需要考虑的因素	326
10.4.1 需求定义分析	326
10.4.2 建模	327
10.4.3 座舱	328
10.4.4 视景	329
10.4.5 数据记录、显示和分析	331
10.4.6 模拟和飞行试验的综合	331
10.4.7 验证和确认 (V&V)	332
10.5 试飞模拟的试验程序	334
10.5.1 确定试飞模拟目标	334
10.5.2 建立模型和实施验证与确认	335
10.5.3 确定试飞矩阵的模拟	335
10.5.4 开发试验机动作和安全考虑	336
10.5.5 故障模态效应试验	336
10.5.6 培训试飞队伍	336
10.5.7 比较试验结果和更新模拟	337
10.6 本章小结	337
第 11 章 试验研究机	339
11.1 概述	339
11.1.1 定义与分类	339
11.1.2 试验研究机在航空技术发展中的作用	339
11.1.3 不同历史时期试验研究机发挥的作用及工作重点	341
11.1.4 试验研究机发展状况	343
11.2 X 系列飞机	347
11.2.1 X-1 促使 X 飞行器家族的诞生	348
11.2.2 X-15 首次实现临近空间的有人驾驶飞行	349

11.2.3 X-29A 前掠翼方案	350
11.2.4 X-31A 过失速机动试飞	350
11.2.5 X-36A 无尾飞行器的试飞研究	351
11.2.6 X-43A “Hyper-X” 高超声速试验飞行器	351
11.2.7 X-45A 和 X-47A 无人作战飞机的起步	352
11.2.8 X-51 高超声速计划的延续	352
11.3 气动力试验研究机	354
11.3.1 气动力试验研究机发展	355
11.3.2 气动力试飞验证的价值和范围	357
11.4 飞控和飞行品质试验研究机	359
11.4.1 飞控系统的悖论和研究途径	359
11.4.2 现代飞机飞行控制系统的功能和性能要求	362
11.4.3 现代飞控系统的研发和试验途径	362
11.4.4 空中飞行模拟试验研究机	368
11.5 发动机试验研究机——飞行试验台	377
11.5.1 发动机飞行试验台的分类和特点	377
11.5.2 俄罗斯飞行试验台试飞研究	378
11.5.3 美国飞行试验台试飞研究	381
11.5.4 法国发动机试飞	383
11.5.5 英国、德国、意大利的发动机试飞	384
11.5.6 关于飞行试验台能力的讨论	385
11.6 机载系统试飞验证平台	387
11.6.1 机载系统的发展和试飞验证	387
11.6.2 典型的机载系统试飞验证平台	389
11.6.3 机载系统试飞验证平台的作用	401
11.6.4 机载系统试飞验证平台的研究内容	403
11.6.5 多机协同攻击/防御信息网和数据链系统演示验证	404
11.7 本章小结	406
附录 I 典型的试飞员驾驶技术	408
附录 II 试飞员人为因素及其防范	454
参考文献	462