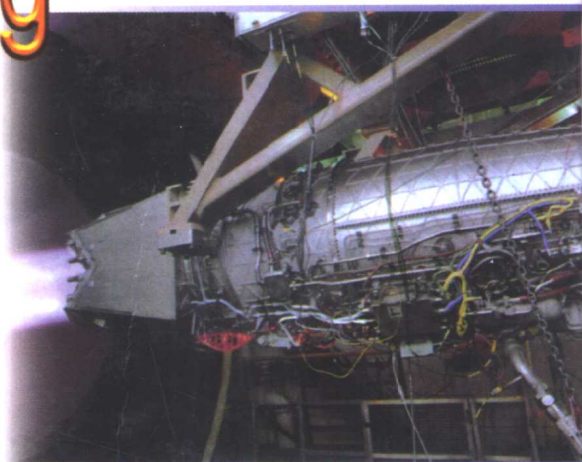


航空发动机高空模拟

Aero-engine Altitude Simulating

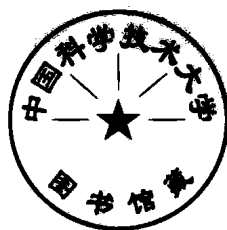
杜鹤龄 编著



国防工业出版社

航空发动机高空模拟 Aero-engine Altitude Simulating

杜鹤龄 编著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机高空模拟/杜鹤龄编著. —北京:
国防工业出版社, 2002.5
ISBN 7-118-02658-1

I. 航... II. 杜... III. 航空发动机—模拟试验和仿真:
高空试验 IV. V23-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 069710 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 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13 334 千字

2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 26.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

ABD71/12 03

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄 宁			
主任委员	殷鹤龄			
副主任委员	王 峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	崔士义	蔡 镭		
委 员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	彭华良	韩祖南	舒长胜

前 言

现代航空发动机的发展,除了继续提高推重比等性能外,特别强调可靠性、耐久性、隐身、对环境条件的适应性以及便于维护等,从而引起航空发动机研制程序的改变。

研制和发展一种新的航空发动机,按照传统的研制程序,从方案设计到定型交付,发动机要试验(4~5)年的时间,仅整机试验就需要 8000h 以上;现代高性能航空发动机,性能高,结构和系统都很复杂,材料新颖,而且更突出可靠性。按照现代航空发动机研制程序,试验时数更多,而且整机试验的时间大为增加,从方案设计到定型交付要试验 11000 多小时。新的研制程序与传统的研制程序相比,就以发动机模拟高空鉴定试验而论,由原来的两个阶段增加到三个阶段。即模拟高空试验时间增加了三分之一以上。不仅如此,飞行前高空鉴定试验的项目和要求,与生产鉴定高空试验的项目和要求完全相同。这点比传统的研制程序要求又提高了一步。又据美国国防部和(美国)航空航天管理局(NASA)联合组织的航空空间协调局(AACB)宣称,一项现代推进系统的研制计划,在(5~6)年的周期中,占用模拟高空试验舱的时间为五万多小时,并且要用(3~4)个高空试验舱。可见其模拟高空试验工作量之大。由此可以看出,没有发动机试验,特别是没有模拟高空飞行环境条件下的高空试验,要想研制高性能的航空发动机是不可能的。现在我国和美、英、日等发达国家航空涡轮发动机通用规范都明确规定:新研制的航空发动机,在模拟高空试验设备上,通过飞行前规定试验或飞行前鉴定试验,装此发动机的原型飞机才能首飞;经模拟高空定型鉴定试验合格或生产鉴定高空试验合格,发动机才

能定型交付。从这里不难理解,为什么模拟高空试验能力已经相当雄厚的发达国家,仍然在投入相当多的人力、物力和财力,改建和新建各类航空发动机模拟高空试验设备,不断发展发动机模拟高空试验技术,开拓新的模拟高空试验项目。

为了提高我国国防实力和促进民用航空的发展,充分发挥我国新建成的大型航空涡轮发动机模拟高空试验设备的作用,根据笔者在航空发动机模拟高空试验设备的设计与建设、发动机模拟高空试验技术研究以及国内外航空发动机模拟高空试验的实践,特编写了这本《航空发动机高空模拟》。全书共分7章,主要包括航空发动机模拟高空试验的作用、类型、试验技术、参数测量与试验数据处理和不确定度分析、试验设备以及模拟高空试验发展展望等方面的内容,重点是讨论航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机模拟高空试验技术。主要供飞机和发动机及其相近专业的研究、设计、试验、生产、使用和维护方面的工程技术人员和技术管理人员,以及航空院校飞机与发动机等专业的教师和学生参考。目的是抛砖引玉,激发更多的学者、工程技术人员,丰富和发展我国航空发动机高空模拟这门新型的工程科学。

本书出版过程中,承蒙吴大观老专家的指导和帮助,在这里特向吴老和为本书出版给予指导帮助的专家、学者、技术人员以及有关领导表示衷心的感谢!

本书编写过程中曾引用吴大观、刘大响、康毅、李志广、马庆祥、刘亚真、蒋福庆、毛熙昌、常淑清、丘永生、乔文道、吴行章、唐秀东、王晓凤、梁咏华、彭梅宜、陈大筏、杨义庭等所编写而未正式出版的文献或译文中的资料或数据或图表,特致以谢意。

编者

二〇〇一年十月

内 容 简 介

本书阐述航空发动机模拟高空试验的作用、类型、试验技术、参数测量、试验数据处理和不确定度分析、试验设备以及发展展望,重点是讨论航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机模拟高空试验技术;可以供飞机和发动机及其相近专业的研究、设计、试验、生产、和使用维护方面的工程技术人员与技术管理人员,以及航空院校飞机与发动机专业的教师和学生作为工作与学习的参考。

The Roles, the Categories, the Test Methods, the Parameters Measuring, the Datum Processing, the Datum Uncertainty Analysis, the Test Facilities and the Development Prospects of the Aero-engine Simulated Altitude Test are expounded in the book, as well as the techniques of the Aero-engine Simulated Altitude Test are emphasized. The book should serve equally to the technicians, the managers in the domain of the research, the design, the test, the production, the services of the Aircraft and the Aero-engine and the teachers and students in the Aero-university.

目 录

引言	1
第一章 绪论	8
1.1 航空发动机模拟高空试验发展过程简介	8
1.2 航空发动机模拟高空试验的作用	13
1.3 航空发动机模拟高空试验的特点及其优越性	28
第二章 航空发动机模拟高空试验的类型和功能	32
2.1 直接连接式模拟高空试验	32
2.2 全尺寸飞机进气道与发动机联合试验	40
2.3 自由射流式模拟高空试验	44
2.4 半自由射流式模拟高空试验	52
2.5 管道—喷管式模拟高空试验	54
2.6 推进风洞试验	56
第三章 直接连接式模拟高空试验技术	65
3.1 航空发动机模拟高空试验中飞行状态的模拟及其参数的确定	65
3.1.1 标准大气模型的特点	65
3.1.2 非标准大气的特点	66
3.1.3 模拟飞行状态参数的确定	69
3.1.4 工质模拟问题	70
3.2 直接连接式模拟高空试验主要试验项目和试验方法	72
3.2.1 高空稳态性能试验	72
3.2.2 推力瞬变试验	113
3.2.3 功能试验	126
3.2.4 启动和再启动试验	134

3.2.5	高、低温启动和加速试验	142
3.2.6	进气畸变试验	151
3.2.7	高空风车旋转试验	160
3.2.8	发动机进口空气加温持久试车与进口空气 增压和加温持久试车	162
3.2.9	整个飞行包线内的发动机振动测量试验	169
3.2.10	关键部件振动与应力测量试验	170
3.2.11	环境结冰试验	172
3.2.12	吞冰试验	182
3.2.13	吞入大气中液态水试验	184
3.2.14	吞入火药气体试验	190
3.2.15	发动机进口气流压力和温度瞬变试验	195
3.2.16	修正系数验证试验	201
3.2.17	发动机放热和滑油冷却试验	202
3.2.18	飞机系统引气试验	203
3.2.19	发动机工作稳定性验证试验	203
3.2.20	发动机代用燃油和应急燃油以及新油 品鉴定试验	204
3.2.21	发动机及其控制系统的高空性能特性试验	207
3.2.22	海平面静止状态模拟试验	208
3.2.23	发动机部件特性测定试验	209
3.2.24	航空发动机模拟高空试验的完成	218
3.2.25	航空发动机直接连接式模拟高空试验若 干特定问题	219
第四章 航空发动机模拟高空试验的参数测量和数据 处理方法		235
4.1	参数测量和数据采集处理系统在航空发动机模 拟高空试验中的作用	235
4.2	航空发动机模拟高空试验参数测量的特点和基 本参数测量方法	236

4.2.1 航空发动机模拟高空试验参数测量的特点和基本要求	236
4.2.2 航空发动机模拟高空试验基本参数测量	238
4.3 航空发动机模拟高空试验对稳态、瞬态以及动态数据采集处理系统的主要要求	264
4.3.1 对稳态和瞬态数据采集处理系统的主要要求 ..	264
4.3.2 对动态数据采集处理系统的主要要求	271
4.4 航空发动机模拟高空试验数据处理方法	276
4.5 参数测量不确定度分析和发动机高空性能与特性数据的不确定度	287
4.5.1 参数测量误差和不确定度分析	288
4.5.2 发动机高空性能和特性试验数据的不确定度分析举例	298
第五章 航空发动机模拟高空试验设备	302
5.1 飞机和航空发动机的发展及其对模拟高空试验设备的主要要求	305
5.2 航空发动机模拟高空试验设备的重要组成部分的主要特性	307
5.2.1 气源与动力	308
5.2.2 高空试验舱(或试验段)	325
5.2.3 排气冷却系统	335
第六章 航空发动机模拟高空试验数字仿真技术	352
6.1 航空燃气涡轮发动机建模技术的发展	353
6.2 计算流体动力学在发动机试验中的应用	364
第七章 航空发动机模拟高空试验发展展望	372
参考文献	394

Contents

Foreword	1
Chapter1 Introduction	8
1.1 Briefly Explanation of the Development Process of the Aero-engine Simulated Altitude Test	8
1.2 Roles of the Aero-engine Simulated Altitude Test	13
1.3 Characters and Superiorities of the Aero-engine Simulated Altitude Test	28
Chapter 2 Categories and Functions of the Aero-engine Simulated Altitude Test	32
2.1 Aero-engine Direct-connected Simulated Altitude Test	32
2.2 Combinatory Test of the Full-scale Aircraft Inlet and Engine	40
2.3 Free-jet Simulated Altitude Test	44
2.4 Semi-free-jet Simulated Altitude Test	52
2.5 Duct-nozzle Simulated Altitude Test	54
2.6 Propulsion Wind Test	56
Chapter 3 Direct-connected Simulated Altitude Test Techniques	65
3.1 Simulation of Flight Conditions and Deducing the Parameters of the Flight Conditions in Aero-engine Simulated Altitude Test	65
3.1.1 Characters of the Standard Atmosphere Model	65
3.1.2 Characters of the Nonstandard Atmosphere	66
3.1.3 Deducing the Parameters of Simulated Flight Conditions	69

3.1.4	Simulated Problems of the Work Medium	70
3.2	Chief Contents and Methods of the Direct- connected Simulated Altitude Test	72
3.2.1	Altitude Steady-state Performance Test	72
3.2.2	Thrust Transient Test	113
3.2.3	Functional Test	126
3.2.4	Starts and Restarts	134
3.2.5	Low and High Temperature Starting and Acceleration Test	142
3.2.6	Inlet Airflow Distortion Test	151
3.2.7	Altitude Windmilling Test	160
3.2.8	Endurance with the Heating and Compressed Engine Inlet Air	162
3.2.9	Engine Vibration Survey in the whole Engine's Flight Operating Envelope	169
3.2.10	Vibration and Stress Test of the Engine Key Parts	170
3.2.11	Environmental Icing Test	172
3.2.12	Ice Ingestion Test	182
3.2.13	Atmospheric Water Ingestion Test	184
3.2.14	Armament Gas Ingestion Test	190
3.2.15	Engine Inlet Airflow Pressure and Temperature Transient Test	195
3.2.16	Verification Test of the Correction Factors	201
3.2.17	Engine Heat Rejection and Oil Cooling Test ...	202
3.2.18	Customer Air Bleed Test	203
3.2.19	Verification Test of the Engine Operation Stability	203
3.2.20	Alternate Fuel and Emergency Fuel and New Fuel Identify Test	204

3.2.21	Engine and its Control System Altitude Performance and Characteristics Test	207
3.2.22	Simulated Sea Level Stead-state Test	208
3.2.23	Engine Component Performance Test	209
3.2.24	Aero-engine Simulated Altitude Test Completion	218
3.2.25	Typical Problems in the Aero-engine Direct- connected Simulated Altitude Test	219
Chapter 4 Parameters Measuring and Datum Processing in the Aero-engine Simulated Altitude Test		235
4.1	Roles of the Parameters Measuring and Datum Acquiring and Processing System in the Aero-engine Simulated Altitude Test	235
4.2	Characters of the Parameters Measuring and Basis Parameters Measuring Methods in the Aero-engine Simulated Altitude Test	236
4.2.1	The Characters and Basis Requirements of the Parameters Measuring in the Aero-engine Simulated Altitude Test	236
4.2.2	Basis Parameters Measuring Methods in the Aero-engine Simulated Altitude Test	238
4.3	Main Requirements of the Aero-engine Simulated Altitude Test to the Steady-state, Transient, Dynamic Parameters Measuring and Datum Acquiring and Processing System	264
4.3.1	Main Requirements of the Aero-engine Simulated Altitude Test to the Steady-state and Transient Parameters Measuring, Datum Acquiring and Processing System	264
4.3.2	Main Requirements of the Aero-engine Simulated	

Altitude Test to the Dynamic Parameters Measuring, Datum Acquiring and Processing System	271
4.4 Aero-engine Simulated Altitude Test Datum Processing Methods	276
4.5 Uncertainty Analysis of the Measuring Parameters and Deducing the Aero-engine Altitude Performance and Character Datum Uncertainty	287
4.5.1 Analysis of the Parameters Measuring Errors and Uncertainty	288
4.5.2 Examl Analysis of Datum Uncertainty in the Aero-engine Altitude Performance and Character test	298
Chapter 5 Aero-engine Simulated Altitude Test Facilities	302
5.1 Development of the Aircrafts and Aero-engines and the Main Requirements of the Aero-engine Simulated Altitude Test Facilities	305
5.2 Main Components and Characters of The Aero- engine Simulated Altitude Test Facilities	307
5.2.1 Air Sources and Powers	308
5.2.2 Simulated Altitude Test Chamber	325
5.2.3 Exhaust cooling system	335
Chapter 6 Digital Simulated techniques of the Aero- engine Simulated Altitude Test	352
6.1 Development of the Mathematical Model Establishment techniques of the Aeronautical Gas Turbine Engines	353
6.2 Application of the Computational Fluid Dynamics in the Aero-engine Test	364
Chapter 7 Development prospects of the The Aero-engine	

Simulated Altitude Test	372
Reference	394