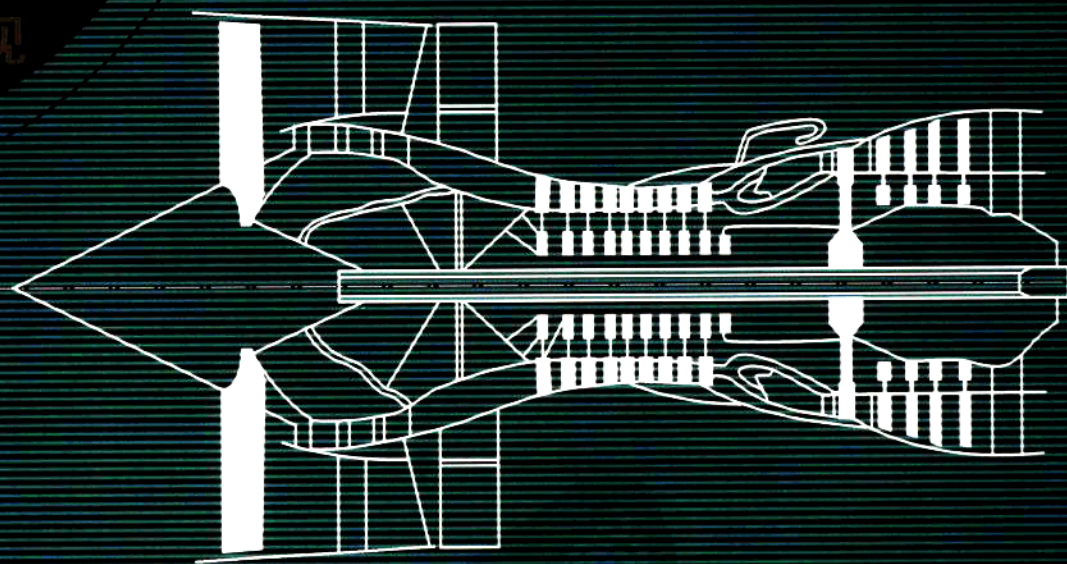


动力机械及工程热物理



航空发动机试验 和测试技术

● 张宝清 编著



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

国防科工委十五规划教材



国防科工委“十五”规划教材·动力机械及工程热物理

航空发动机试验和测试技术

张宝诚 编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

本书概述了进入 21 世纪航空发动机的发展趋势以及对其试验和测试技术的要求;围绕着发动机性能、可靠性和操纵性,全面系统地论述了航空发动机研制、定型和发展所需的试验和测试技术,包括试验技术基础知识、整机试验、部件试验、可靠性试验、高空模拟试验和飞行试验;较详细地论述了 21 世纪初发动机试验技术、设备和测试系统的发展,诸如动态测量、过渡态测量、高温测量、级间参数测量、加速任务试车、机动载荷模拟器、遥测遥控、试验数值仿真、试验数据库、状态监控与故障诊断以及各类新型传感器等。此外,还概述了各类发动机的试验特点。书中引述了大量的发动机基础试验、专题试验和发展试验的实例,给出了许多可供参考的试验数据和分析结果。

本书可作为航空高等院校飞行器动力工程专业教学用书,也可供从事飞机、航空发动机、燃气轮机和热能动力工程等相近专业的设计、试验、生产、检测、维护和管理的工程技术人员以及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机试验和测试技术/张宝诚编著. —北京:
北京航空航天大学出版社,2005.3

ISBN 7-81077-594-4

I. 航… II. 张… III. ①航空发动机—试验②航空发动机—测试 IV. V263.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 015328 号

航空发动机试验和测试技术

张宝诚 编著

责任编辑 胡敏

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083)

发行部电话:010-82317024

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印制 各地书店经销

开本:787×960 1/16

印张:50.5 字数:1 131 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷

印数:2 000 册

ISBN 7-81077-594-4 定价:65.00 元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禔
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春

总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部、职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验和生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性的劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探



索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出及适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山和陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术以及核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学和西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入21世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国



防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观和价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝

目 录

第 1 章 航空发动机试验技术的现状和发展

1.1 20 世纪 90 年代发动机和 21 世纪初发动机	1
1.1.1 航空发动机的现状及发展趋势	1
1.1.2 通用技术的发展	16
1.2 发动机研制和发展对试验技术的要求	25
1.2.1 试验的必要性	26
1.2.2 试验技术和设备的发展	27
1.2.3 发动机典型试验项目及说明	29
1.2.4 试验方法的发展	32
1.3 试验和测试技术的自动化、综合化和智能化	34
1.3.1 20 世纪 90 年代发动机试验和测试技术的发展	34
1.3.2 几个关键技术	38
1.4 发动机通用规范中有关试验的要求	39
1.4.1 军用发动机规范	39
1.4.2 民用发动机适航性条例	43
1.5 发动机试验分类	49
1.5.1 研究、探索性试验	49
1.5.2 新机或改型试验	50
1.5.3 批生产发动机常规试车	52
1.5.4 发动机工作状态	54
1.5.5 试验常用术语	55
习 题	56

第 2 章 试验技术的基础知识

2.1 相似理论	58
2.1.1 相似的概念	58
2.1.2 相似三定理	59
2.2 信号分类及描述	60
2.2.1 确定性信号和非确定性信号	61
2.2.2 信号的描述	62
2.2.3 随机信号	65
2.2.4 相关函数和功率谱密度函数	67
2.3 信号变换	69



2.3.1	电阻式变换器的原理	70
2.3.2	电感式变换器的原理	73
2.3.3	电容式变换器的原理	76
2.3.4	压电式变换器的原理	77
2.3.5	热电式变换器的原理	79
2.3.6	光电式变换器的原理	82
2.3.7	新型变换器工作原理简介	85
2.4	信号传输	90
2.4.1	信号传输的种类	90
2.4.2	噪声及其抑制	91
2.4.3	无线传输	93
2.4.4	旋转体上信号传输	97
2.4.5	光输系统	98
2.5	信号测量	99
2.5.1	电桥	99
2.5.2	调频测量系统	101
2.5.3	电荷放大器	102
2.5.4	数字测量系统	103
2.6	信号处理	104
2.6.1	模拟分析方法	105
2.6.2	数字分析方法	107
2.6.3	模拟-数字混合分析方法	108
2.7	信号记录	109
2.7.1	磁带记录仪	109
2.7.2	磁光盘记录器	111
2.7.3	数据采集系统	113
2.8	试验数据处理方法	115
2.8.1	试验数据的平均法	115
2.8.2	回归分析	116
2.8.3	正交试验和方差分析	120
	习 题	126

第3章 发动机整机试验

3.1	相似工作条件、相似参数和换算参数	127
3.1.1	大气条件对发动机工作参数的影响	127
3.1.2	相似工作状态和相似参数	129
3.1.3	发动机工作过程参数对标准大气条件的换算	132
3.2	沿发动机流道主要热力参数及工作特性的测量	133



3.2.1	沿发动机流道热力参数的测定	134
3.2.2	节流特性试验	141
3.2.3	过渡状态试验	142
3.2.4	涡轮前后燃气温度的测定	143
3.3	自动化试车台	147
3.3.1	典型试车台	147
3.3.2	用于特定试验的试车台	151
3.3.3	试车程序	154
3.3.4	测控软件及数据采集系统	159
3.4	典型整机试验	164
3.4.1	涡喷发动机全流程参数测试与分析	164
3.4.2	进气道与发动机相容性试验	172
3.4.3	压气机的气动稳定裕度试验方法	190
3.4.4	研究发动机噪声的设备及其试验	192
3.4.5	启动特性试验	195
3.4.6	防冰系统试验	199
3.5	通过整机试验研究压气机和燃烧室	203
3.5.1	用改变喷口面积法研究压气机特性	203
3.5.2	用整机试验调试燃烧室	206
3.6	发动机操纵性的研究	209
3.6.1	操纵性包括的主要问题	209
3.6.2	主要试验	213
3.7	各种航空发动机的试验特点	214
3.7.1	涡扇发动机的试验特点	214
3.7.2	加力式涡喷发动机的试验特点	215
3.7.3	涡桨发动机和涡轴发动机的试验特点	216
	习 题	219

第 4 章 可靠性试验

4.1	可靠性概述	221
4.1.1	发动机可靠性和评定指标	221
4.1.2	结构完整性大纲中的试验	225
4.2	耐久性考核试车	229
4.2.1	试车目的和内容	229
4.2.2	试车结果评定	233
4.3	发动机加速任务试验	234
4.3.1	加速任务试验的由来	234
4.3.2	加速试车基本理论	235



4.3.3	加速试车方法	237
4.3.4	加速任务试车程序的确定	241
4.3.5	典型加速任务试车举例	245
4.4	发动机结构完整性主要考核试验	251
4.4.1	低循环疲劳试验	251
4.4.2	转子结构完整性试验	254
4.4.3	主轴疲劳试验及典型试验器	260
4.4.4	机匣静强度试验	265
4.4.5	叶片静频和动频的测量	269
4.4.6	发动机环境和吞咽试验	272
4.5	发动机振动测量	276
4.5.1	发动机振源及振动特点	276
4.5.2	发动机振动测量和分析	280
4.5.3	整机振动监控标准	285
4.6	发动机润滑和传动系统试验	288
4.6.1	润滑系统试验	288
4.6.2	传动系统试验	290
4.6.3	轴承组件试验	292
4.7	发动机耐久性考验的新型装置——机动载荷模拟器	293
4.7.1	机动载荷模拟器设计要求	293
4.7.2	机动载荷模拟器	295
4.7.3	X射线间隙探测装置	297
	习 题	298

第5章 发动机部件试验

5.1	部件试验及其作用	299
5.1.1	发动机研制和发展所需的部件试验	299
5.1.2	部件试验结果对整机研制的作用	301
5.2	压气机试验和设备	301
5.2.1	压气机模型试验	302
5.2.2	真实压气机试验	303
5.2.3	压气机气动试验	311
5.3	主燃烧室试验	324
5.3.1	主燃烧室试验内容	325
5.3.2	燃烧室试验设备	329
5.3.3	常压及高压环形燃烧室试验	336
5.3.4	模拟准则	343
5.3.5	激光相位多普勒粒子分析仪 PDPA	345



5.3.6	燃气分析技术	355
5.4	涡轮试验	361
5.4.1	涡轮主要试验内容	361
5.4.2	涡轮试验器及试验	363
5.4.3	高温涡轮气冷叶片冷却效率试验	368
5.4.4	超、跨声速对转涡轮试验台	371
5.5	加力燃烧室试验	372
5.5.1	新歼击机加力燃烧室技术特点及其试验要求	372
5.5.2	试验设备及主要试验	374
5.5.3	加力燃烧室性能的台架燃气分析法	375
5.5.4	加力燃烧室高空舱试验	377
5.6	喷管试验	380
5.6.1	喷管的发展	380
5.6.2	喷管试验	383
5.6.3	典型矢量喷管试验	390
5.7	发动机控制系统试验	394
5.7.1	全权限数字式电子控制系统	394
5.7.2	主要试验	400
5.7.3	典型试验设备说明	402
5.8	部件试验结果对整机的适用性	403
5.8.1	概 述	403
5.8.2	稳定工作状态	403
5.8.3	过渡状态性能	407
	习 题	409
第 6 章 高空模拟试验及飞行试验空测技术		
6.1	高空模拟试验必要性及试验内容	410
6.1.1	高空模拟试验的必要性	410
6.1.2	高空台试验的特点	411
6.1.3	高空台试验内容	412
6.2	高空试验台及其数据采集系统	415
6.2.1	高空试验台及其发展	415
6.2.2	自动化数据采集系统	422
6.3	连续式高空台模拟试验方法	423
6.3.1	试验范围	423
6.3.2	GKS 高空台主要设备说明	424
6.3.3	模拟试验方法	427
6.4	试验性能的计算	428



6.4.1	推力的计算	428
6.4.2	动量阻力和净推力	430
6.4.3	耗油率	431
6.5	发动机风洞及测试设备	431
6.5.1	发动机风洞	431
6.5.2	发动机风洞试验	433
6.5.3	风洞试验数据采集系统	438
6.6	发动机飞行试验	440
6.6.1	发动机使用方法和环境对其寿命的影响	441
6.6.2	发动机飞行载荷谱	445
6.6.3	飞行高度-速度图及飞行科目	452
6.6.4	发动机飞行试验台试验	456
6.6.5	典型飞行试验	460
6.6.6	发动机常规空测技术	466
6.7	飞行参数的换算	470
6.7.1	国际标准大气	470
6.7.2	高度定义	472
6.7.3	飞行高度、速度和马赫数的确定	472
6.7.4	大气静温的确定	475
	习题	476
第7章 航空发动机动态测量、高温测量和级间参数测量		
7.1	发动机动态测量	477
7.1.1	压气机流场三维动态测量	477
7.1.2	动态燃气温度测试系统	485
7.1.3	湍流反应流的激光测量	490
7.1.4	动态测试系统及其应用实例	499
7.2	先进高温测量技术	507
7.2.1	光学高温计	507
7.2.2	拉曼相干反斯托克斯光谱仪(CARS)用于测量燃气温度和燃气分析	515
7.2.3	红外测温法	521
7.2.4	涡轮进口温度光纤测量系统	529
7.2.5	高温应变测量系统	534
7.3	级间参数测量	538
7.3.1	级间参数测量方法及其传感器	538
7.3.2	发动机叶片叶尖径向间隙的测量	549
7.4	发动机过渡过程试验和测量	555
7.4.1	轴流压气机失速/喘振的测试	555



7.4.2	瞬态、脉动流场的测量	563
	习 题	572
第 8 章 航空发动机测试系统		
8.1	发动机测量探针系统的智能化	573
8.1.1	智能探针系统的组成	573
8.1.2	校准试验	580
8.1.3	试验应用效果	584
8.2	发动机非稳态过程测试系统	585
8.2.1	动态压力畸变数据采集和处理系统	585
8.2.2	发动机进口瞬态温度场测试系统	591
8.3	发动机飞行试验自动化综合测试系统	596
8.3.1	飞行试验遥测地面站(FTTGS)	596
8.3.2	实时遥测数据采集/处理系统(QUAD7)	601
8.3.3	VTR—100 可视遥测系统	611
8.3.4	国内典型飞行试验采集系统	612
8.4	发动机通用测控软、硬件	616
8.4.1	GDAS II 测控软件层次结构	617
8.4.2	主要功能说明	617
8.4.3	人机界面	623
8.4.4	航空通用高速高精度测控系统硬件简介	623
	习 题	638
第 9 章 发动机试验技术的发展和仿真		
9.1	试验技术发展的策略和趋势	640
9.1.1	信息时代的发动机试验	640
9.1.2	虚拟仪器	647
9.1.3	并行处理技术	650
9.1.4	试验、计算数据可视化	651
9.2	发动机故障诊断及监控技术	657
9.2.1	诊断与监控的定义和作用	657
9.2.2	监控和诊断系统的组成	659
9.2.3	常用故障诊断技术	665
9.2.4	V2500 发动机状态监控和性能分析软件	669
9.2.5	涡轮叶片振动监测系统	673
9.2.6	涡轮发动机紧急故障监测器	677
9.2.7	发动机神经网络监控技术	680
9.3	发动机试验数据库	686
9.3.1	发动机数据库概述	687



9.3.2	发动机试验数据库	693
9.3.3	发动机故障数据库	696
9.3.4	发动机专家系统库	698
9.4	发动机试验仿真	702
9.4.1	推进系统数值仿真试验台(NPSS)	702
9.4.2	仿真与发动机试验的关系	710
9.4.3	涡扇发动机实时数值仿真	712
9.4.4	发动机部件故障仿真专家系统	718
9.5	发动机系统分析的计算机模拟技术	721
9.5.1	集总形式的气体动力学方程	722
9.5.2	部件模拟模型	723
9.5.3	模拟结果	733
	习题	735
第10章	航空发动机试验用传感器	
10.1	发动机用常规传感器	737
10.1.1	发动机试验对传感器的要求	737
10.1.2	整机试验用传感器	738
10.1.3	部件试验用传感器	751
10.2	新型传感器	754
10.2.1	光纤传感器	754
10.2.2	薄膜传感器	756
10.2.3	红外传感器	758
10.2.4	新型谐振式传感器	761
10.3	飞行试验用传感器	763
10.3.1	发动机飞行试验用传感器	764
10.3.2	综合传感器系统	767
10.4	智能传感器	769
10.4.1	智能传感器工作原理和功能	769
10.4.2	典型智能传感器	772
附表1	标准大气表	775
附表2	国产喷气燃料的技术数据	776
参考文献		777

第 1 章 航空发动机试验技术的现状和发展

1.1 20 世纪 90 年代发动机和 21 世纪初发动机

航空发动机是工作条件复杂、要求苛刻、技术难度大、研制周期长和研制费用高的热动力装置。发展和实现高推重比的航空发动机取决于多学科的研究成果和进程。航空发动机的研制是一项复杂系统工程,它涉及到气动热力学、传热传质学、燃烧学、结构强度、电子控制技术、材料学、制造工艺以及试验和测试技术等学科的成果在航空发动机上的应用。它是基础技术、专业技术和综合技术的融合体。

1.1.1 航空发动机的现状及发展趋势

20 世纪 60 年代中期,伴随现代高新技术的不断涌现,发达国家的推进技术日益高速发展。就战斗机发动机而论,70 年代中期至 80 年代投入使用的推重比 8 一级的第二代加力涡扇发动机主要有 F100、F404、F110 及 RB199 等;这一代发动机不仅性能水平是当时一流的,而且耐久性、可靠性、可操纵性和维修性都有较大的提高和系列化的发展。

1. 推重比 8 一代发动机的技术特点

(1) 推重比是衡量战斗机发动机技术先进性的综合指标

该指标是在发动机总体结构布局合理的情况下,采用先进部件技术和高性能参数实现的。图 1-1 示出这一代发动机的推重比都在 8 左右。随高新技术不断发展和应用,发动机推重比将出现明显上升趋势。

(2) 高涡轮前温度是这一代发动机的第二个特点

例如 F110—GE—100 发动机涡轮前温度达 1 728 K,一般均在 1 500 K 以上。在发动机设计中,为了获得高推重比和高单位推力,必须尽可能选取高涡轮前温度。这就要求有高性能的耐高温材料和先进的冷却技术来保证,才能达到目的。这一代发动机热端部件广泛采用定

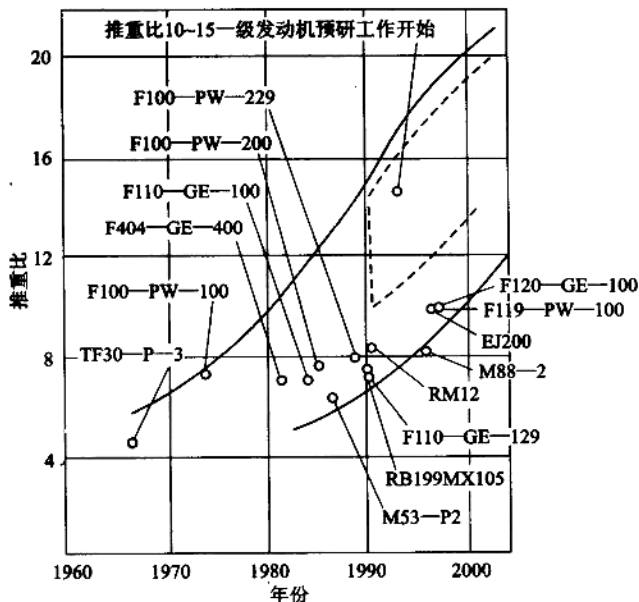


图 1-1 某些发动机推重比的变化

向凝固、单晶等材料 and 先进的冷却技术(如对流、气膜和冲击冷却以及发散冷却等),因此涡轮前温度都很高。由图 1-2 可以看出, F119、EJ200 和 M88-2 的涡轮前温度分别达 2 050 K、1 750 K 和 1 850 K。苏联的 P2000 也达到 1 743~1 843 K 范围。高涡轮前温度对发动机可靠性、耐久性有重大影响,也对试验和测量提出了新要求。

(3) 高增压比

为了提高发动机性能水平,必须在提高涡轮前温度的同时相应地提高发动机总增压比。这就要求压气机和风扇采用先进的部件设计技术,使其具有高的级负荷、大喘振裕度和轻质量。这一代发动机采用了超、跨声速风扇和压气机。平均级压比都比较高,在 1.27 以上,总压比都在 20 以上,如 F100-PW-229 发动机的总压比高达 33.6。图 1-3 示出某些发动机总增压比的变化。

(4) 耗油率逐渐降低

耗油率是衡量发动机经济性的重要指标之一,它的高低也直接影响发动机的水平。专家认为,提高燃料利用率是 20 世纪末至 21 世纪初要解决的主要问题。特别对军用加力涡轮发动机,加力耗油率尤为重要,它的降低会直接增加飞机航程或者减少机载燃料储备,从而使飞