



国防特色教材·职业教育

航空发动机试车工艺

HANGKONG FADONGJI SHICHE GONGYI

● 陈益林 主编 ●

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 西北工业大学出版社



国防特色教材·职业教育

航空发动机试车工艺

陈益林 主编

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 西北工业大学出版社

内容简介

本书是高等职业技术教育航空发动机装配与试车专业的适用教材。全书共8章,主要介绍航空发动机试车台、航空发动机试车工艺、航空发动机试车工艺文件编制及性能参数整理、航空发动机试车测试技术、航空发动机模拟高空试车、航空发动机试车用传感器、航空发动机的封存和运输包装以及航空油料等内容。各章后均附有思考题。本书在深入调查研究的基础上,总结了近几年来高等职业技术教育课程改革的经验,适应经济发展、科技进步和生产实际对教学内容提出的新要求,注意反映生产实际中的新知识、新技术、新工艺和新方法。突出了职业教育特色,紧密联系生产实际,具有广泛的实用性。

本书可作为高等职业技术学院、职工大学航空发动机装配与试车专业的教材,也可作为工厂航空发动机试车员的自学教材,或者供大专院校相关专业和从事航空发动机试车工作的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机试车工艺/陈益林主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2010.1

ISBN 978-7-81124-815-9

I. 航… II. 陈… III. 航空发动机—试车 IV. V263.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 111528 号

航空发动机试车工艺

陈益林 主编

责任编辑 张冀青

*

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(100191) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhp@263.net

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本: 787×960 1/16 印张: 25.25 字数: 566 千字

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷 印数: 2 000 册

ISBN 978-7-81124-815-9 定价: 45.00 元

前 言

本书是国家国防科技工业局“十一五”国防特色规划教材,是根据国防科技工业局科技与质量司,于2008年11月在北京航空航天大学召开的“十一五”国防特色教材编写出版工作会议的精神编写的。本书可作为高等职业技术学院、职工大学航空发动机装配与试车专业的教材,或作为工厂航空发动机试车员的自学教材,也可供大专院校相关专业和从事航空发动机试车工作的工程技术人员阅读参考。

飞机发明100多年了,这是不平凡的一个世纪。1903年12月17日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、重于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。由于飞机的存在,地球“变小”了。从此,飞机为人类的进步与发展插上了翅膀,将人们的活动范围从陆地、海洋扩展到天空,并且越飞越高、越飞越快、越飞越远,创造了人类历史上一个又一个辉煌,并对社会生活的各个方面产生了和正在产生着极其巨大的影响。

飞机靠发动机提供动力飞上蓝天,航空发动机也同样走过了100多年的光辉历程。从狭义上讲,航空发动机是飞机的一个重要部件,为飞机的飞行提供动力;但从广义上讲,它也是促进整个航空技术发展的推动力。无数事实表明,人类在航空领域中所取得的每一次重大的革命性进展,无不与航空动力技术的突破和进步相关,而飞机发展的需求又牵引和促使发动机向更高的水平迈进,二者互为依存,相得益彰,推动了整个航空事业的蓬勃发展。

中国航空发动机工业的起步并不太晚,在中华民国时期就曾试图建立航空发动机工业,但最终只是修理和装配少量的活塞式发动机。中华人民共和国成立后,自1951年建立活塞式发动机修理厂之后的50多年来,逐步建成了一个比较完整的科研、设计和生产体系,通过引进专利仿制、改进改型和自行研制,已经生产出近60000台发动机,研制出拥有自主知识产权的涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机和涡轮螺旋桨发动机,跨入了世界上少数几个能够独立研制较先进航空发动机国家的行列。

100多年来国内外研制航空发动机的实践表明,要研制出新的发动机,现役发动机的改进、改型都离不开试验,没有大量的试验作后盾是不可能实现的。据报

道,早在 20 世纪 70 年代,英国一种新型发动机被批准定型投入使用前要制造 20 台发动机进行试验,运转万余小时,飞行二千多小时。例如,英国 RB211 发动机的研制费用中,设计占 10%,制造占 40%(主要是工资费和原材料费占制造费的 15%),而试验要占 50%。由于重视研究试验,所以航空技术发展就有了坚实的科学基础,同时也保证了发动机的安全可靠。

国外在发动机研制中要做大量的地面试车和飞行试验。例如,俄罗斯装备苏—27 飞机的 AJI—31Φ 发动机,用于地面试车的发动机是 49 台,用于飞行试验的发动机是 8 台,试验机总台数达 57 台;进行地面试车时数为 14 425 小时,飞行试验时数为 6 275 小时,总试验时数达 22 900 小时。20 世纪 70 年代中期在我国引进的英国罗·罗公司“斯贝”MK202 发动机生产专利的技术资料中,涉及该机研制期中所做的整机试车工作也相当多。例如,1969 年 3 月至 1970 年 6 月,其中某一台发动机就进行了模拟飞行循环的 600 小时持久试车。

进入 21 世纪,航空发动机的发展呈现加快态势。发达国家航空工业正在推行综合化、高性能涡轮发动机技术(IHPTET)计划,实现推力质量比高达 15~20 的发展目标。航空发动机试验技术的发展日新月异,新试验领域的开拓及试验、计算的相互渗透和补充不断出现。因此,教育部于 2005 年批准有关高等职业院校开设航空发动机装配与试车专业,培养我国航空发动机制造业和使用部门迫切需要的高素质航空发动机装配与试车的技能型人才。

本书在深入调查研究的基础上,综合航空发动机制造业和使用部门的培训资料,注意反映经济发展、科技进步和生产实际中的新知识、新技术、新工艺和新方法,突出实用的特点,体现创新意识,渗透当代科学思维,反映当代科学技术发展对人才素质的要求。

全书共 8 章,围绕航空发动机试车技术的工艺分析、试车数据的测试和处理等核心知识,全面系统地介绍了航空发动机试车台、航空发动机试车工艺、航空发动机试车工艺文件编制及性能参数整理、航空发动机试车测试技术、航空发动机模拟高空试车、航空发动机试车用传感器、航空发动机的封存和运输包装以及航空油料等内容。书中采用了新国家标准规定的航空发动机试车技术的名词术语,紧密联系生产实际,精选了航空发动机试车技术的典型实例,内容通俗易懂。为了巩固所学知识,启发学生思考问题,各章后均附有思考题。

参加本书编写的有陈益林、晏初宏、杨志敏、庄大石、石博文、倪士勇、洪晓展等老师和工程技术人员。本书由陈益林副教授担任主编,晏初宏副教授、杨志敏

工程师担任副主编。其中绪论、第8章由张家界航空工业职业技术学院陈益林副教授编写,第1章由中国南方航空动力有限公司杨志敏工程师编写,第2章由中国南方航空动力有限公司庄大石工程师编写,第3章由中国南方航空动力有限公司石博文工程师编写,第4章、第6章由张家界航空工业职业技术学院晏初宏副教授编写,第5章由张家界航空工业职业技术学院倪士勇讲师编写,第7章由张家界航空工业职业技术学院洪晓展讲师编写。全书由陈益林副教授和晏初宏副教授负责统稿和定稿工作。

本书由张家界航空工业职业技术学院郭紫贵副教授担任主审,他对全书提出了许多宝贵的建议和修改意见。同时,在本书编写过程中得到了张家界航空工业职业技术学院领导的关心,也得到了徐政坤、屈雁、范正刚、袁江、焦华宾等老师的大力支持,为本书的编写工作提供了资料和很好的建议,在此谨向他们表示衷心的感谢。

此外,本书的编写也参考了中国南方航空动力有限公司航空事业部的培训教材——《航空发动机装配与试车》,在此特作说明。

由于编者水平有限,书中难免会有疏漏和不足之处,恳请广大读者提出宝贵意见。

编 者
2009年5月

目 录

绪 论	1
0.1 航空发动机试车的一般概念	1
0.2 航空发动机试验技术体系	2
0.3 航空发动机试验技术的发展	4
0.3.1 性能试验	4
0.3.2 适用性试验	8
0.3.3 耐久性试验	9
0.3.4 环境试验	10
0.3.5 飞行试验	11
0.3.6 发动机数值仿真	12
0.4 航空发动机试车技术常用术语	14
思考题	16
第 1 章 航空发动机试车台	17
1.1 试车台总体布置	17
1.1.1 试车台的工艺布置	17
1.1.2 试车台空气动力要求	27
1.1.3 试车台噪声控制	38
1.2 试车台主要设备	46
1.2.1 试车台架	46
1.2.2 发动机进气加温装置	51
1.2.3 试车用发动机进气道	52
1.3 试车台常用系统	54
1.3.1 空气启动系统	54
1.3.2 汽油、燃油和滑油供应系统	55
1.3.3 发动机内部油封系统	58
1.3.4 发动机尾喷口操纵系统	59
1.3.5 液压泵负载系统	60
1.3.6 交直流发电机负载系统	61

1.3.7	发动机操纵系统	61
1.3.8	发动机引气系统	62
1.3.9	抽真空系统	63
1.3.10	螺旋桨顺桨和回桨系统	63
1.3.11	冷却吹风系统	68
1.3.12	发动机清洗系统	69
1.3.13	设备用液压操纵系统	69
1.4	试车台电气设备	71
1.4.1	试车台电气装置	71
1.4.2	发动机和试车台控制装置	74
1.4.3	操纵台	75
	思考题	77
第2章	航空发动机试车工艺	78
2.1	发动机试车的工艺流程	78
2.1.1	发动机在台架上的安装和拆卸	78
2.1.2	发动机启动前的准备	80
2.1.3	发动机内部启封和注油	80
2.1.4	冷运转	81
2.1.5	启动	82
2.1.6	磨合运转	84
2.1.7	试车发动机加温 and 冷却运转	84
2.1.8	发动机控制系统工作检查和调整	84
2.1.9	发动机性能验证	87
2.1.10	接通加力过程的检查	89
2.1.11	推力瞬变和功率变换检查	89
2.1.12	滑油系统的工作检查	91
2.1.13	发动机密封性检查	92
2.1.14	飞机引气和功率分出	92
2.1.15	停车	93
2.2	验收试车	93
2.2.1	试车台和试车设备	94
2.2.2	试车记录	95
2.2.3	试车程序	95

2.3 持久试车	104
2.3.1 飞行前规定试车和定型试车的持久试车	105
2.3.2 中国民航适航标准规定的持久试车	112
2.3.3 发动机低循环疲劳试车	116
2.3.4 1:1 寿命期持久试车	117
2.3.5 加速任务试车	121
2.4 其他几种常用试车	126
2.4.1 双转子发动机稳定工作裕度检查	126
2.4.2 单转子发动机稳定工作裕度检查	130
2.4.3 发动机进口空气加温试车	130
2.5 发动机试车质量控制	132
思考题	134
第3章 航空发动机试车工艺文件编制及性能参数整理	136
3.1 试车工艺文件及编制	136
3.1.1 发动机试车工艺文件	136
3.1.2 发动机试车工艺文件编制	136
3.1.3 典型试车工艺文件表格	138
3.1.4 材料消耗定额的编制	145
3.2 试车常用的发动机性能参数整理方法	145
3.2.1 常用发动机性能参数换算	145
3.2.2 常用发动机间接测试参数的计算	146
3.2.3 涡喷、涡扇发动机试车性能的修正	147
3.2.4 发动机试车性能评定	148
3.3 发动机试车工艺规程示例	152
3.3.1 接收发动机	152
3.3.2 发动机装车	153
3.3.3 发动机启动前的准备工作	158
3.3.4 发动机冷运转	159
3.3.5 发动机假启动	159
3.3.6 发动机启动	160
3.3.7 发动机试车	162
3.3.8 试车时测试参数的允许值	166
3.3.9 发动机使用性能的测试与计算	168

3.3.10	发动机各系统检查	170
3.3.11	检查油滤	174
3.3.12	发动机内部油封	174
3.3.13	发动机启封	175
3.3.14	发动机附件的调整	175
3.3.15	发动机换件与补充试车	184
3.3.16	发动机卸车	186
3.4	发动机试车常用标准	187
	思考题	190
第4章	航空发动机试车测试技术	191
4.1	测试精度要求和测试误差分析	191
4.1.1	测试精度要求	191
4.1.2	测试误差分析	192
4.1.3	测试方法和测试仪表的选择原则	195
4.2	稳态参数的测试方法	196
4.2.1	发动机推力测试	196
4.2.2	发动机功率测试	198
4.2.3	空气流量测试	202
4.2.4	燃油流量测试	209
4.2.5	转速测试	213
4.2.6	温度测试	216
4.2.7	压力测试	222
4.2.8	整机振动监测	226
4.2.9	推力轴承轴向载荷的测试	230
4.2.10	应力测试	235
4.2.11	声学测试	239
4.2.12	气流速度测试	243
4.3	过渡态参数的测试	246
4.3.1	过渡态测试的特点	246
4.3.2	过渡态参数测试受感部和传感器的选择	247
4.3.3	过渡态参数测试的二次仪表配置	247
4.4	动态参数的测试	248
4.4.1	动态参数测试在发动机整机试车中的应用	248

4.4.2 动态温度测试	248
4.4.3 动态压力测试	249
4.5 发动机试车数据的采集和处理	256
4.5.1 试车数据的采集	256
4.5.2 试车数据的处理	261
4.5.3 用户性能计算程序	262
思考题	262
第5章 航空发动机模拟高空试车	264
5.1 航空发动机模拟高空试车的类型和功能	264
5.1.1 直接连接式模拟高空试车	264
5.1.2 自由射流模拟高空试车	265
5.1.3 推进风洞试车	266
5.2 航空发动机模拟高空试车设备	267
5.2.1 SB—101 直接连接式模拟高空试车设备和系统	268
5.2.2 设备能力和运行特点	269
5.2.3 CS—01 简易模拟高空试车设备	271
5.3 直接连接式模拟高空试车技术	272
5.3.1 高空稳态性能试车	272
5.3.2 推力(功率)瞬变和流量瞬变试车	279
5.3.3 功能试车	284
5.3.4 启动和再启动	287
5.3.5 进气畸变试车	290
5.3.6 高空风车旋转试车	292
5.3.7 发动机进气加温和进气加温加压持久试车	295
5.3.8 高低温启动和加速试车	297
5.3.9 标准海平面静止状态模拟试车	303
5.4 试车程序	303
5.5 发动机模拟高空试车的完成	307
思考题	308
第6章 航空发动机试车用传感器	309
6.1 发动机试车常用传感器	309
6.1.1 发动机试车对传感器的要求	309

6.1.2	发动机整机试车用传感器	310
6.1.3	部件试验用传感器	320
6.2	新型传感器	323
6.2.1	光纤传感器	323
6.2.2	薄膜传感器	324
6.2.3	红外传感器	327
6.2.4	谐振式传感器	330
6.3	飞行试车用传感器	332
6.3.1	飞行试车常用传感器	332
6.3.2	综合传感器系统	335
6.4	智能传感器	337
6.4.1	智能传感器的组成	337
6.4.2	典型智能传感器	339
6.4.3	其他智能传感器	341
	思考题	341
第 7 章	航空发动机的封存和运输包装	342
7.1	发动机的封存包装	342
7.1.1	封存包装方法	342
7.1.2	不同封存期限的包装容器	344
7.1.3	封存包装材料	344
7.2	发动机的运输包装	346
7.2.1	运输包装箱	346
7.2.2	运输标志	347
7.2.3	技术文件、装箱单的设置和库存规则	351
7.3	发动机封存包装工艺	352
7.3.1	工作间和工艺设备	352
7.3.2	工艺流程	353
7.3.3	典型封存包装工艺及要求	357
	思考题	362
第 8 章	航空油料	363
8.1	航空燃料	363
8.1.1	航空燃料的一般要求	363

8.1.2 航空汽油	365
8.1.3 喷气燃料	367
8.2 航空润滑油	371
8.2.1 润滑油主要性能指标	371
8.2.2 基础油与添加剂的作用及用途	373
8.2.3 润滑油类型及选用	376
8.2.4 防锈油	382
8.3 其他航空油料	384
8.3.1 航空液压油	384
8.3.2 航空仪表油	386
8.3.3 航空润滑脂	387
8.3.4 防护和专用油脂	388
8.3.5 固体润滑剂	389
思考题	389
参考文献	390

绪 论

0.1 航空发动机试车的一般概念

航空发动机提供飞机飞行的动力,与地面、水面运输工具的动力装置不同,当地面、水面运输工具的动力装置出现问题时,可以停车或者停泊来排除故障;而航空发动机的“工作岗位”是在数千上万米的空中,发动机一旦在空中出现问题,飞机将失去动力,以致无法保持飞行高度和速度,轻则导致飞机无法完成任务,重则造成机毁人亡的重大事故。同时,与其他机械装置相比,发动机结构十分复杂,零件数目达数万个。而且发动机主要零部件的工作环境十分恶劣,常常处于高温(最高可接近 $2\,000^{\circ}\text{C}$)、高压(几十个标准大气压)和高速转动(转速可达每分钟几万转)的工作状态。任何一个零件出现问题,都可能导致发动机停车或破坏,并引发灾难性后果。因此,在任何一台航空发动机正式投入使用(服役)前,必须对其性能、功能、强度以及可靠性有充分的认识 and 了解,以便安全、有效、合理地使用,做到万无一失。

另外,由于航空发动机的研制和发展是一项涉及空气动力学、工程热物理、传热传质、机械、强度、传动、密封、电子、自动控制等多学科的复杂的综合性系统工程,而且航空发动机内部的气动、热力和结构材料特性如此复杂,以至于到目前为止,仍然不能够从理论上给予详尽而准确的描述,所以只有依靠实际对发动机的试验来获得。通过试验,可以验证设计,扩展已有的经验关系式,并有可能促进对物理机理的进一步认识,而航空发动机设计能力的提高也主要依靠试验数据的不断扩大和完善,对已有的经验关系式的扩展以及对理论分析的完善。近百年来国内外研制航空发动机的实践证明,新型航空发动机的诞生和现役发动机的改进、改型都离不开试验。航空发动机的发展史就是一个设计,制造,试验,修改,再制造,再试验……不断摸索和反复完善的过程,甚至有人说,发动机主要是靠试出来的。由此可见,试验在航空发动机研制过程中起着举足轻重的作用。

多年实践表明,要研制出新的发动机,没有大量的试验作后盾是不可能实现的。航空发动机试验的分类标准多种多样,有根据研究目的分类的,有根据研究阶段分类的,有根据研究对象分类的等。其中按不同特征和最终目的可分为以下几种:

(1) 科学研究试验

科学研究试验是用于研究发动机及其部件和附件的一般特性,以建立发动机的设计、计算、试验和使用的原则。

(2) 研制试验

研制中的航空发动机需要经过长时间的试车,以便调整性能,考验可靠性和耐久性,并最

终鉴定航空发动机是否符合型号规范。研制试验可分为：

① 性能试验。整机性能试验主要检验发动机的空气流量、推力、燃油消耗率和稳定性裕度。部件性能试验则主要检验部件的性能特性。

② 适用性试验。适用性试验用于测定航空发动机对油门和进口气流流场条件变化的响应。

③ 耐久性试验。耐久性试验包括低周疲劳寿命、应力断裂或蠕变寿命、振动特性、抗外来物损伤、包容能力等机械结构的强度试验。

(3) 批生产发动机试车

每一台批生产发动机都要在地面试车台上进行工厂试车和检验试车两种试车。从航空发动机各组成部分的试验来分类,可分为部件试验和全台发动机的整机试验,一般也将全台发动机的试验称为试车。部件试验主要有进气道试验、压气机试验、平面叶栅试验、燃烧室试验、涡轮试验、加力燃烧室试验、尾喷管试验、附件试验以及零组件的强度和振动试验等。整机试车有整机地面试车、高空模拟试车、环境与吞咽试车及飞行试车等。

一种新型号航空发动机或者改进、改型发动机,制造出来后都必须进行大量试验,以确定发动机是否能够为飞机提供足够的推力以保证飞机的飞行速度。而且在提供足够推力的同时,燃料消耗能否满足飞行时间(航程)的要求,发动机功能能否满足各种飞行条件(如起飞、着陆、爬升、机动等)的要求以及发动机的寿命和可靠性能否满足要求。

发动机试验的种类很多,试验设备、试验条件、试验环境、试验参数等也千差万别,但试验目的(目标)却不外乎以下几个方面:

- ① 验证所提出的新概念、新技术是否可行。
- ② 考核所设计的零、组、部件是否达到了设计要求。
- ③ 通过试验修正调整设计中选用的参数,使产品最终调整到符合设计要求。
- ④ 暴露问题,对原设计不合适之处进行修改,使其最终达到可工作的状态。
- ⑤ 排除故障时,通过试验,验证所采取的排故措施是否合适。
- ⑥ 积累试验数据,掌握设计经验,验证计算程序。
- ⑦ 发展新的试验技术、试验方法和测试手段,为设计人员提供更多、更详细、更有用的数据等。
- ⑧ 考核发动机的可靠性、耐久性,包括强度、疲劳、极限工作状况等。

0.2 航空发动机试验技术体系

在试验技术体系中,除在地面进行的性能试验、适用性试验、耐久性试验和环境试验外,还包括飞行试验。航空发动机的试验技术体系,如图 0-1 所示。

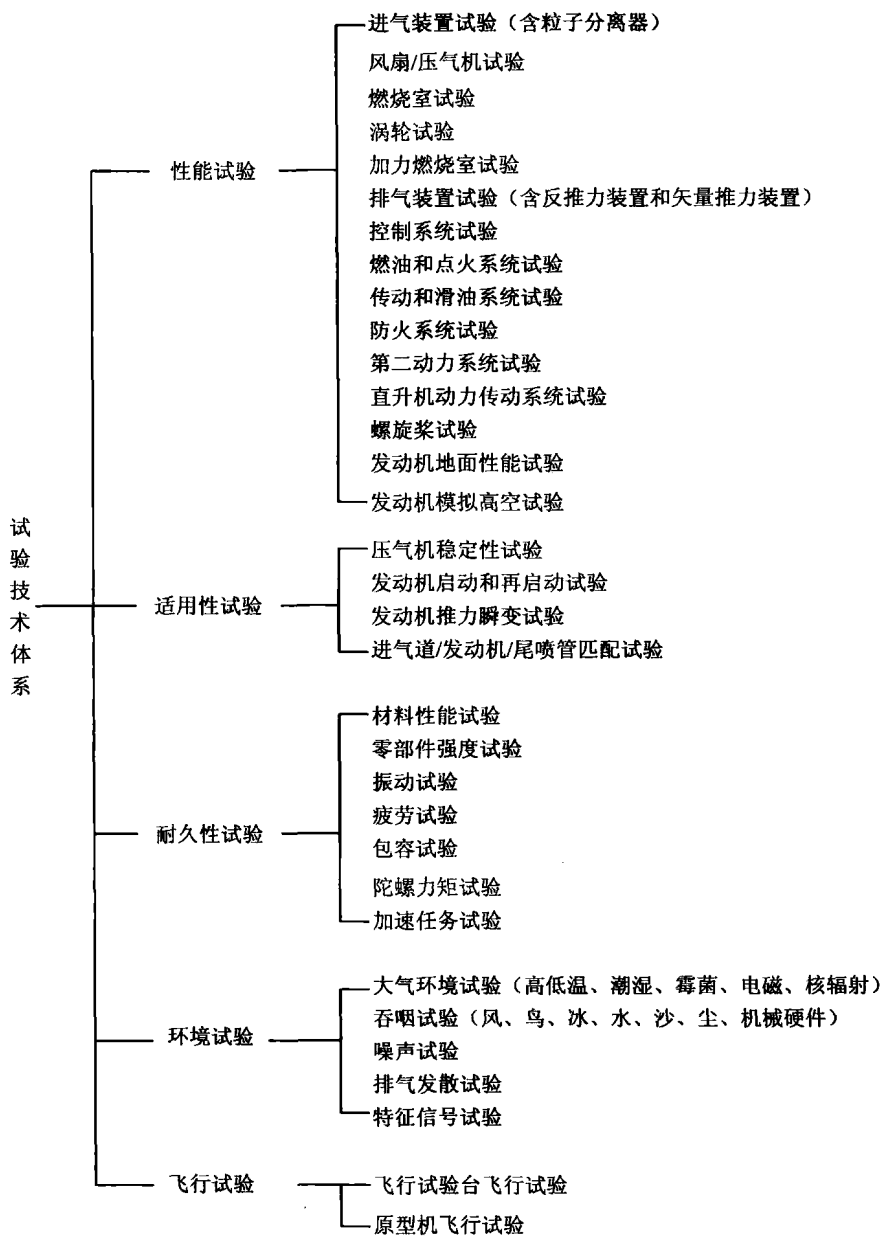


图 0-1 航空发动机试验技术体系

0.3 航空发动机试验技术的发展

0.3.1 性能试验

性能试验是在设计条件下测试发动机的推力和耗油率等性能指标,以及空气流量、压力、温度和各部件的性能。从 20 世纪 30 年代末航空涡轮发动机发明开始,到 20 世纪 50 年代末一批马赫数达 2 以上的加力涡喷发动机研制成功为止,对发动机的要求和试验的重点是性能。在初始阶段,对发动机的寿命没有较高要求,一般只有几十小时。

涡喷发动机的发明就是一个在试验原型机上试凑的长期过程。结果,在原型机试验中,由于压气机和涡轮不匹配而引起喘振,并烧坏了涡轮叶片。为此,罗·罗公司于 1941 年建造了第一台压气机试验设备。通过不断地试验,W2 发动机终于在 1943 年达到了设计推力 7 100 N。后来在一些国家的研究中心和公司建设了一批部件试验设备,主要是性能试验设备。自 1947 年突破声障后,发动机的飞行包线越来越大,普通海平面地面试车台上测得的性能和工作特性已经不能反映在高空高速条件下的实际情况,一些国家在 20 世纪 40 年代末至 50 年代末建设了一批模拟高空试验舱。这批试验舱的建成,为马赫数达 2 以上的涡喷发动机的研制成功起到了重要作用。没有模拟高空试验舱就没有先进的发动机,这就是国内外发动机界的一致结论。

到 20 世纪 50 年代末,试验设备和测试手段已有足够能力来确定发动机的性能,因此使得设计出来的发动机完全可以达到所要求的精度。在一台发动机的型号研制过程中,首次发动机试验就达到性能指标已经不是难事。在此期间,测试技术从单点模拟仪表指示和人工记录向多点巡回检测和自动记录发展。由于发动机循环参数的提高和多项新技术的应用,对性能试验技术和设备提出了新的要求。

1. 风扇/压气机试验

风扇/压气机试验包括叶栅吹风、缩尺或大尺寸低速模型和全尺寸实物试验。在全尺寸实物试验中又有单转子单级、单转子多级、单转子双涵和双转子双涵几种形式。随着压气机性能的不断提高,出现了进口加温加压的压气机试验台。随着涡扇发动机的出现,全尺寸双转子双涵风扇/压气机试验成为必不可少。压气机是发动机研制中最困难的部件之一。据 20 世纪 70 年代的估计,多数发动机研制要经历 2~8 次压气机重新设计,而每一次重新设计要花费 1 000 万美元,在某些情况下要花费 5 000 万美元。在这种因素的驱使下,美国空军 1972 年决定在航空发动机实验室建设国家级的压气机研究设备(CRF),用于研究全尺寸多级风扇和压气机的稳态和瞬态特性。该设备用了 12 年时间,于 1984 年建成,设备的总功率达 22 370 kW,转速为 30 000 r/min,有 640 条数据采集通道,采集频率为 100 000 Hz,可试压气机增压比达 40。它对压气机设计技术的发展起到了重要作用。