



国防科技图书出版基金

航空压气机 气动稳定性分析方法

Aviation Compressor Aerodynamic Stability Analysis Methods

胡 骏 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

航空压气机 气动稳定性分析方法

Aviation Compressor Aerodynamic Stability Analysis Methods

胡骏 著 |



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

航空压气机气动稳定性分析方法 / 胡骏著. —北京:
国防工业出版社, 2015. 10
ISBN 978 - 7 - 118 - 10164 - 5

I. ①航… II. ①胡… III. ①航空发动机—气动
技术—流动稳定性—分析方法 IV. ①V231.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 256753 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 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 20 $\frac{1}{4}$ 字数 359 千字
2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

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。

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

第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

风扇/压气机气动稳定性是涉及气动热力学、运动稳定性理论、控制理论与技术、压气机设计理论与技术的多学科高度交叉的一门综合学科。它以风扇/压气机的工作过程及其内部非定常的复杂流动为研究对象,在全工况范围内研究风扇/压气机气动失稳的机理和影响风扇/压气机气动稳定性的因素,探索高性能要求前提下确保风扇/压气机具有可靠的气动稳定性的理论和方法,建立满足高性能航空发动机设计需求的风扇/压气机气动稳定性设计技术;它是先进航空发动机设计、研制和使用的重要基础,是实现发动机高性能和高可靠性必要的保障,是发动机设计体系中不可或缺的组成部分。

目前广泛使用的航空发动机为燃气涡轮发动机,风扇/压气机是其中两个重要的压缩部件(若未特别说明,本书将风扇和压气机简称为压气机),压气机的稳定性决定了燃气涡轮发动机的稳定性。喘振和旋转失速是压气机中两类典型的气动不稳定流态。在给定的转速下,从大流量状态开始,不断减小通过压气机的流量,最终将在压气机内发生稳定流态的破坏,使压气机进入喘振或旋转失速状态。对应不同转速的压气机稳定工作的最小流量点构成了其稳定工作边界,简称稳定边界。稳定边界将压气机的特性图划分为稳定工作区域和非稳定工作区域,在稳定边界线的右下方区域,压气机能够保持稳定工作;当工作点穿过稳定边界进入其左边的非稳定工作区域时,压气机将进入旋转失速或喘振等不稳定工作状态。

现有的理论和试验研究结果以及实际应用中发生的事故均表明,当发动机的压气机气动失稳进入旋转失速或喘振等不稳定工作状态时,可能造成的危害有:

- (1) 增加涡轮的热负荷和热应力,造成发动机过热。
- (2) 引起压气机转子叶片的强迫振动,增大叶片的振动应力,破坏其结构完整性。
- (3) 影响压气机的颤振边界。
- (4) 缩小主燃烧室和加力燃烧室的稳定工作范围,引起发动机熄火、停车。
- (5) 损害发动机的结构完整性,直接威胁飞行安全。

因此,在实际飞行过程中,绝不允许发动机在不稳定状态下工作,发动机工作的稳定性已成为保障飞行器飞行安全的硬性要求。

就单纯的保证发动机的稳定性来说,可以通过下移工作点(或工作线)提高压气机的稳定裕度来满足,但这种做法将大大降低发动机的气动性能。因此,在发

动机设计中,气动性能和稳定性之间构成了一对“矛盾”,稳定性研究的基本任务是要在兼顾发动机性能要求的同时保证发动机的稳定性。

现代高性能压气机等转速线上的最高压比点一般在稳定边界线上,而最高效率点也与稳定边界线非常接近,一般位于稳定裕度 $SM \leq 10\%$ 处。但是为了保证压气机(或发动机)稳定工作,需要设定稳定裕度,使得压气机在偏离稳定边界线的右下方的工作点上工作。目前军用航空发动机的稳定裕度 SM 为 $20\% \sim 25\%$,这就意味着压气机可提供的最大增压能力没有得到充分利用,效率损失可达 3% ,甚至更高。因此,压气机设计始终面临着压比、效率和稳定裕度之间的矛盾和折衷,一个好的设计既要能保证高压比、高效率,又要求具有足够的稳定裕度。

压气机的稳定性研究,正是以解决上述矛盾作为研究的目标,探讨如何在满足高压比和高效率需求的情况下,保证发动机具有可靠的稳定性。

随着战斗机的更新换代,大迎角过失速机动动作的不断采用,发动机的稳定性问题越来越突出。第四代战斗机的五个典型的技术特征是:隐身、超声速巡航、高机动性、综合航电和自主后勤。这些优越特性的实现离不开 S 形进气道和高推重比发动机的使用以及过失速机动的运用,但同时也使得进气畸变对压气机稳定性的不利影响越来越大,对压气机(发动机)的稳定性提出了更高的要求;压气机设计面临着高级压比、高效率、高稳定性与高抗畸变能力综合寻优的挑战,压气机气动性能和稳定性之间的矛盾越来越突出。美军 F22 战斗机的 F119 发动机、欧洲“台风”战斗机的 EJ200 发动机的研制都把稳定性作为与性能同等重要的指标。对于我国在研制的高性能发动机乃至未来更高推重比的发动机来说,稳定性问题将变得更加突出,是新一代航空发动机研制成败的关键技术和技术“瓶颈”。

将发动机埋入机翼的新型飞机构想的好处是提高了飞机的隐身性能,并可大大降低飞机的飞行阻力,但不可避免地增大了压气机进口流场的畸变,使得压气机稳定性问题更为严重、突出;现代高性能战斗机进气道的形状也越来越复杂,如 UCAV(Unmanned Combat Air Vehicle)等先进战斗机都在不断地挑战发动机的稳定性。

军用航空发动机的发展趋势表明,压气机的压比越来越高,级负荷越来越大,工作条件越来越恶劣,气动设计难度越来越大。四代机发动机风扇和压气机的平均级压比已达到 1.7 和 1.5 左右。

高负荷压气机的发展需求对其气动、结构和强度等设计技术提出了挑战,而在如此高的级负荷下如何保证其稳定性更成为一个非常棘手的“难题”;此外,研究畸变条件下压气机非定常流动现象的本质,以便在设计时有针对性地控制某些设计参数,以提高压气机的抗畸变能力,同样具有重要的战略意义。

舰载机要求其发动机具有很好的加速性,需要在短时间内很快达到最大推力;舰载机在起飞和着舰时飞行攻角大,采用蒸汽弹射装置时还有可能在舰上出现大量的蒸汽,致使飞机进气道出口产生大的总压畸变和吞入蒸汽引起的温度畸

变。当舰载机着舰复飞时,需要发动机瞬时加速,同时飞机进气道的总压畸变较大,此时要求发动机具有较高的稳定性。美国在发展舰载机时针对 A-7 飞机两种涡扇发动机的弹射蒸汽吸入试验表明,发动机气动失稳次数占起飞次数的 14.3%~22.4%。因此舰载机对发动机的加速性和抗畸变能力提出了更苛刻的要求,发展舰载机迫切需要解决发动机加速过程稳定性控制问题,以及温度畸变和压力畸变对发动机稳定性影响问题。

大型运输机发动机除了存在与上述发动机类似的稳定性问题外,因其必须满足野外机场起降以及沙漠地区起降的特殊需求,还同时存在由于如沙尘等不同工质异物吸入引起的另一类畸变对发动机稳定性影响的问题。此外,大型运输机一般采用大涵道比的涡扇发动机,这类发动机在起动过程中往往存在稳定性不足的问题。

在航空发动机发展早期,研究人员只重视其性能的好坏,追求高的性能指标,而对稳定性问题未引起足够的重视。这种情况在早期的亚声速、小机动飞行条件下是可以的,但随着飞机飞行速度和高度的不断提高、机动性的不断增加以及导弹武器的使用等,畸变的影响越来越突出,实践中暴露出来的稳定性问题也越来越严重。据报道,美国空军统计了在 1954—1987 年期间战斗机、轰炸机、教练机、运输机、攻击机等五类飞机的使用情况,在统计的飞行状态中,推进系统出现不稳定工作的平均值为 74%,其中战斗机为 89%,运输机最低,为 33%。

苏联 МИГ21Φ 飞机的飞行员手册中也不得不规定:“P13Φ-300 发动机,在高空小油门飞行时,不排除出现停车的可能性”。另一个最为典型的例子是美国 20 世纪 60 年代中期投入越南战争使用的 F-111 战斗机(装用 TF30 涡扇发动机),因进气道与发动机匹配问题被迫从战场上退役,停止使用,并且不得不回过头来重新研究、解决其进气道与发动机的匹配问题,花了大约 10 年时间,教训是十分沉重的。此外,新近投入使用的普惠公司 PW6000 也走过了一条极其不平坦的道路,导致其设计失败的根本原因是高压压气机稳定裕度达不到设计指标要求,成为最新一例因稳定裕度不达标造成巨大经济损失的经典案例。

由此可以看到,发动机稳定性问题也是西方航空大国迄今尚未真正解决的技术难题。也正是在上述背景下,自 20 世纪 70 年代以来,美、英及苏联等发达国家下大力气把航空发动机稳定性问题作为推进系统的关键技术开展研究,包括理论基础、设计和评定技术的研究等。

由于航空发动机的稳定性是在发动机使用过程中不可逾越的“红线”,是评价发动机气动性能的前提,同时又对发动机的结构完整性和可靠性有着极其重要的影响,因而决定了发动机的适用性,已成为发动机设计体系中不可或缺的重要内容。美、英及俄罗斯等国家已经将发动机的稳定性作为当代先进航空发动机的三项战术技术指标之一加以贯彻(性能、可靠性、稳定性),稳定性评定已成为贯穿发动机全寿命周期的重要内容。

当代高性能发动机必须满足一些通常是相互矛盾的要求,如足够的稳定性、低耗油率、长寿命、高推重比和低成本等。为达到足够的稳定裕度,可以通过将压气机的工作点匹配在低于其最大压比和最高效率点来实现,但这显然与降低成本和高推重比所需要的低油耗和最大级压比相矛盾。为达到最佳的综合性能,发动机的设计应使其恰好具有满足功能需要的稳定裕度。一台设计良好的飞机发动机,除了实现性能好、可靠性高的要求之外,还必须满足飞机适用性技术指标,这就要求在整个飞行包线范围内发动机能够稳定地工作并提供足够的推力,也就是说,必须在推力大、燃油消耗率低、发动机重量轻、可靠性高、寿命长和成本低等要求与稳定裕度要求之间进行折衷,达到最佳的平衡。为此,在飞机发动机研制周期的各个阶段,自始至终都要进行稳定性评定。因而不但需要发展和完善发动机性能设计的理论和技术,也迫切需要发展发动机稳定性设计的理论和技术,先进的稳定性设计技术可以直接转化为发动机性能的提升或设计难度的降低。

压气机内部气流流动的强增压过程决定了其具有气动失稳的特性,而作为发动机中的增压部件,其稳定性决定了发动机的稳定性。因而,在发动机的稳定性设计系统中,压气机稳定性设计是一项最为重要和基础的内容。

本书从压气机稳定性设计需要出发,结合国内外的最新发展动态和作者从事压气机稳定性研究 30 余年的成果,努力从基础理论和应用实践两个方面系统地阐述压气机稳定性的理论和分析方法,突出内容的系统性和工程实用性,供科研、设计和生产单位的研究人员参考使用,也可供高等院校相关专业的师生参考。

在本书成稿过程中,得到了赵勇研究员、屠宝锋博士以及刘超和陈娟娟硕士的协助,在此表示衷心的感谢。并谨以此书作为作者从教 30 年的纪念。

由于压气机稳定性问题十分复杂,有些理论问题尚处于探索和发展之中,加之作者的经验和水平有限,本书内容和文字方面的错误和不足之处在所难免,敬请读者不吝批评指正,以便不断修改完善。

作者

2015.3

目 录

第 1 篇 压气机的气动稳定性问题

第 1 章 压缩部件分类及压缩系统	2
第 2 章 压气机的气动稳定性问题	8
2.1 旋转失速现象与分类	9
2.2 喘振现象与分类	11
2.3 进气畸变的影响	15
第 3 章 压气机气动稳定性研究	20
参考文献	22

第 2 篇 均匀进气条件下压气机稳定性分析方法

第 4 章 非设计点性能计算的基元叶栅法	26
4.1 物理模型及控制方程	26
4.2 控制方程的求解	28
4.3 基准攻角与落后角	31
4.4 流动损失	38
第 5 章 稳定性判据判稳方法	47
5.1 Koch 的最大静压升系数法	47
5.2 Koch 最大静压升系数法应用	50
第 6 章 稳定性分析方法	58
6.1 一维压缩系统稳定性分析模型和计算分析方法	58
6.2 二维压缩系统稳定性分析模型和计算分析方法	77
第 7 章 基于动态过程的稳定性分析方法	101
7.1 Moore - Greitzer 模型	101
7.2 一种简化的 Moore - Greitzer 模型	112
7.3 一种二维可压缩过失速动态模型	119
参考文献	129

第 3 篇 进气畸变条件下压气机气动稳定性分析方法

第 8 章 进气畸变指数	134
--------------------	-----

8.1	流场畸变的来源及分类	134
8.2	畸变指数	136
8.3	稳定边界压比损失的关联	150
第9章	进气畸变效应	154
9.1	流场畸变对压气机或发动机工作的影响	154
9.2	压气机对稳态周向畸变的动态响应	159
第10章	平行压气机模型	163
10.1	经典平行压气机模型及其局限性	163
10.2	一种改进的多子压气机模型	168
第11章	激盘模型	189
11.1	进口畸变沿压气机传递的二维可压缩模型	189
11.2	用时间相关法计算畸变沿压气机传递	200
11.3	一种准三维“激盘”方法	204
第12章	基于动态过程的稳定性分析方法	216
12.1	二维不可压缩模型	216
12.2	二维可压缩模型	224
第13章	彻体力模型	226
13.1	基于激盘/半激盘的彻体力模型	229
13.2	基于通道平均的三维彻体力模型	230
13.3	三维非定常黏性彻体力模型	234
13.4	CSAC 三维彻体力模型计算方法	235
	参考文献	257

第4篇 压缩系统流动不稳定性的主动控制

第14章	主动控制研究的现状及主动控制技术	260
14.1	主动控制研究现状	260
14.2	主动控制的主要技术措施	264
第15章	压缩系统主动控制的动力学模型	288
15.1	压缩系统主动控制的一维动力学模型	288
15.2	压缩系统主动控制的二维动力学模型	296
	参考文献	308

Contents

Part I Aerodynamic Stability Problems in Compressors

Chapter 1	Compression Elements and Compression Systems	2
Chapter 2	Aerodynamic Stability Problems in Compressors	8
2.1	Rotating stall Behaviour and Types	9
2.2	Surge Behaviour and Types	11
2.3	The Effects of Inlet Distortion	15
Chapter 3	The Study of Compressor Aerodynamic Stability	20
	Reference	22

Part II Analysis Methods of Compressor Stability under Clean Inflow

Chapter 4	Blade Element Method for Off – Design Performance	
	Calculation	26
4.1	The Physical Model and Control Equations	26
4.2	Method of Solving the Control Equations	28
4.3	The Reference Incidence and Deviation	31
4.4	Flow Losses	38
Chapter 5	Stability Correlation	47
5.1	Koch Method of the Maximum Static Pressure Rise Coefficient	47
5.2	Application of Koch Method	50
Chapter 6	Stability Analysis Methods	58
6.1	One – dimensional Stability Analysis Model and Calculation Method	58
6.2	Two – dimensional Stability Analysis Model and Calculation Method	77
Chapter 7	Stability Analysis Method Based on Dynamic Process	101
7.1	Moore – Greitzer Model	101
7.2	A Simplified Moore – Greitzer Model	112
7.3	A Two – dimensional Compressible Dynamic Model	119
	Reference	129

Part III Analysis Methods of Compressor Stability under Distorted Inflow

Chapter 8 Inlet Distortion Index	134
8.1 The Source and Types of Flow Distortions	134
8.2 The Distortion Index	136
8.3 Correlation of Surge Pressure Ratio Loss	150
Chapter 9 Effects of Inlet Distortion	154
9.1 Effects of Distortion on Compressor or Engine Operations	154
9.2 The Dynamic Response to Steady Circumferential Distortions	159
Chapter 10 Parallel Compressor Model	163
10.1 The Classical Parallel Compressor Model and its Limitations	163
10.2 An Improved Multi – subcompressor Model	168
Chapter 11 Actuator Disk Model	189
11.1 A Two – dimensional Compressible Model for the Transfer of Inlet Distortion along the Compressor	189
11.2 Calculating The Transfer Process of Inlet Distortion along the Compressor with a Time Dependent Method	200
11.3 A Quasi Three – dimensional “Actuator Disk” Method	204
Chapter 12 Stability Analysis Method Based on Dynamic Process	216
12.1 Two – dimensional Incompressible Model	216
12.2 Two – dimensional Compressible Model	224
Chapter 13 Body Force Models	226
13.1 Body Force Model Based on Actuator Disk	229
13.2 Body Force Model Based on Passage – averaged Flow	230
13.3 Unsteady Viscous Body Force Model	234
13.4 Body Force Model of CSAC	235
Reference	257

Part IV Active Control of Flow Instability in Compression Systems

Chapter 14 Research Status of Active Control	260
14.1 Research Status of Active Control	260
14.2 The Main Technical Methods of Active Control	264
Chapter 15 Dynamic Models of Active Control in Compression Systems	288
15.1 One – dimensional Dynamic Models	288
15.2 Two – dimensional Dynamic Models	296
Reference	308

第1篇 压气机的气动稳定性问题

压气机内部气流流动的强增压过程决定了其具有气动失稳的特性,而作为航空发动机中的增压部件,其稳定性决定了发动机的稳定性。因而,在发动机的稳定性设计系统中,压气机稳定性设计是一项最为重要和基础的内容。压气机气动稳定性是涉及气动热力学、运动稳定性理论、控制理论与技术、压气机设计理论与技术的多学科高度交叉的一门综合学科。它以压气机的工作过程及其内部非定常的复杂流动为研究对象,在全工况范围内研究压气机气动失稳的机理和影响压气机气动稳定性的因素,探索高性能要求前提下确保压气机具有可靠的气动稳定性的理论和方法,建立满足高性能航空发动机设计需求的压气机气动稳定性设计技术。

第 1 章 压缩部件分类及压缩系统

目前航空飞行器广泛使用的是带有压缩部件的航空发动机,这一类航空发动机也被称为燃气涡轮发动机,因为这一类发动机的压缩部件都是由燃气涡轮驱动的。图 1-1 所示为一台混合排气的双涵道涡轮风扇发动机简图。气体从左前方进入发动机,首先经过风扇被压缩,其总温和总压升高;而后分为内涵和外涵两路,靠近旋转轴的内涵空气,经过高压压气机被进一步压缩,总温和总压进一步升高;高压气体进入燃烧室,与喷油嘴喷入的燃料混合、燃烧,变成高温、高压的燃气;高温、高压的燃气进入涡轮膨胀做功,最后在尾喷管中与风扇后离轴较远的外涵气流混合,并膨胀加速,高速排入大气。尾喷管高速排出燃气,燃气对发动机施以反作用力,推动飞机前进。

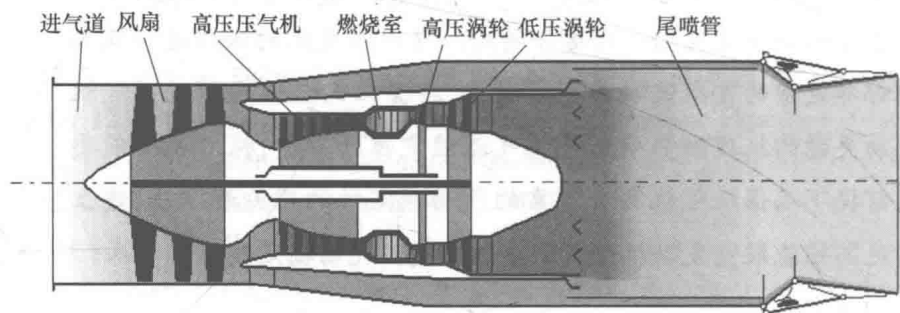


图 1-1 混合排气的双涵道涡轮风扇发动机结构

图 1-2 给出了其他三种形式的燃气涡轮发动机简图。比较这些发动机的结构不难发现,高压压气机、燃烧室和高压涡轮构成了这一类发动机的一个基本单元,其涡轮发出的功正好供给压气机消耗,独自成为一个能量平衡系统,而其作用就是产生一定量的高温、高压燃气,所以被称为燃气发生器。又由于在其基础上,配备不同的部件即可组成各种形式的燃气涡轮发动机,所以又被称为核心机。

在上述燃气涡轮发动机中,风扇和压气机均属于压缩部件,其基本功用就是通过对气流做功,提高气流的总压。民用大涵道比涡扇发动机通常都带有增压级,也称为中压压气机,增压级也是压缩部件。在本书中,为了描述方便,若未特别说明,将风扇、压气机和增压级统称为压气机。

第二次世界大战结束之前,世界上批量生产的仅有两种型号航空燃气涡轮发动机,分别是英国生产的 Welland 发动机和德国生产的 Jumo (004) 发动机。Welland 发动机采用单级双侧进气的离心式压气机,而 Jumo (004) 发动机的压气

机是轴流式的。两种发动机的性能比较见表1-1。

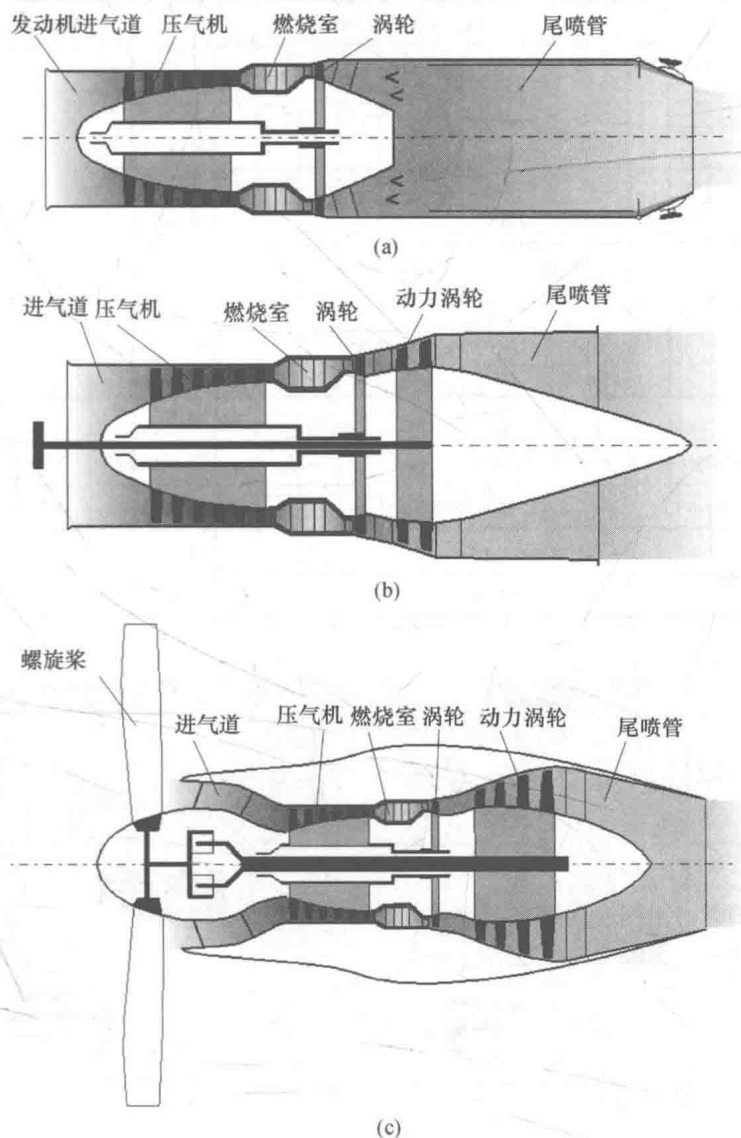


图1-2 其他形式的燃气涡轮发动机结构

(a) 涡轮喷气发动机; (b) 涡轮轴发动机; (c) 涡轮螺旋桨发动机。

然而半个多世纪以来,航空燃气涡轮发动机得到了飞速发展,发展方向始终沿着高推重比、低油耗、长寿命和高可靠性进行。航空燃气涡轮发动机的推力已由最初的200~300kg发展到现在的58000kg,几乎增大了200倍;耗油率由最初的大于 $0.1\text{kg}/(\text{N}\cdot\text{h})$ 降到了 $0.035\text{kg}/(\text{N}\cdot\text{h})$,降低了约 $2/3$;发动机的寿命由最初的几十小时发展到了2万~3万小时;而推重比则由最初的小于1发展到了大于10。图1-3和图1-4分别显示了航空燃气涡轮发动机耗油率和推重比的发展趋势。