

国防军工

航空发动机专题报告

领先大市-A(维持)

走过 70 年积累开拓之路，迈向加速高质量发展新阶段

2023 年 4 月 12 日

行业研究/行业专题报告

国防军工板块近一年市场表现



资料来源：最闻

首选股票	评级
000738.SZ 航发控制	买入-A
688239.SH 航宇科技	增持-A

相关报告：

【山证国防军工】国际地缘剧变伊始，各国武装加速采购-国防军工 2023 年度策略 2022.12.30

【山证国防军工】锻造新城新质作战力量，内需外贸前景光明-军用无人机专题报告 2022.12.7

分析师：

骆志伟

执业登记编码：S0760522050002

邮箱：luozhiwei@sxzq.com

李通

执业登记编码：S0760521110001

电话：010-83496308

邮箱：litong@sxzq.com

投资要点：

➢ 燃气涡轮发动机是航空发动机中绝对的主流，主要包括涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮螺旋桨发动机和涡轮轴发动机四种。航空发动机起步于活塞式发动机，发展至今的绝对主流是燃气涡轮发动机。以涡轮喷气发动机为基本构型，针对不同的工作场景，发展演化出总体架构有所差别的涡轮风扇发动机、涡轮螺旋桨发动机和涡轮轴发动机。涡轮喷气发动机主要由压气机、燃烧室和涡轮三大部件组成，涡轮风扇发动机、涡轮螺旋桨发动机和涡轮轴发动机则是在三个部件组成的核心机基础上，各自增加风扇/增压级、低压涡轮、动力涡轮等部件。目前多数航空发动机都采用涡轮风扇发动机作为动力源，涡轮轴发动机主要用于直升机发动机。

➢ 航空发动机的研制难度主要体现在设计之难、先进材料之难、制造之难和试验之难，通过长期的实践摸索，核心机的派生发展成为当前各国发动机系列化发展的主要技术途径。核心机包括了推进系统中温度最高、压力最大、转速最高的组件，其研制成本和周期在航空发动机研制中占比较大，是航空发动机研制主要难点和关键技术最集中的部分，目前“部件-核心机-验证机-型号”的航空发动机研制途径是世界各国普遍采取的方法。航空发动机的诞生过程是一个设计、制造、试验、修改、再制造、再试验的反复迭代过程，试验在航空发动机研制过程中起着举足轻重的作用。为了有效应对航空运输需求的快速增长、能源消耗和环境压力以及新军事变革的需求，航空发动机技术不断持续发展，新构型和新概念将不断推出。

➢ 航空发动机产业链主要包括发动机主承包商、子系统供应商、小部件及零部件供应商、原材料供应商四个层次，涵盖研发设计、加工制造和运营维护三大环节。航空发动机主承包商是产业链的链长，核心能力定位于设计、工程和系统集成，负责供应链系统的搭建和维护，居于产业链的核心地位。中国航空发动机集团公司（简称“中国航发”）是我国最主要的发动机主承包商，在 2016 年成立之初就明确了“小核心、大协作，专业化、开放型”的发展模式，经过数十年的发展我国航空发动机产业已形成涉及政府、军方、中国航发、国有企业、民营企业、高校和科研院所等多方主体融合的军民融合产业体系。

➢ 现代航空发动机结构极为复杂，一般而言，单个民用航空发动机零部件数量接近两万件。按照零部件结构形式的不同，发动机零部件可分为盘类件、轴类件、鼓筒、环形机匣及环形件、箱式机匣和叶片等。高性能航空发动机要求在极有限的自重与工作空间、极恶劣的工作条件下保证长期可靠的工作



性能，大量采用了复杂的整体轻量结构，同时大量应用了高性能钛合金、高温合金以及复合材料等难加工材料，对制造技术要求极高。

➤ **航空发动机长时间工作于高温、高压和高转速的恶劣环境下，对于材料的性能提出了极高的要求。**通过总结航空发动机过去的发展历史，可以发现一代新材料引领一代新型发动机，在未来航空发动机性能的提高中，新材料贡献率将达到 50%以上。提高涡轮前温度可直接提升航空发动机的综合性能，航空发动机材料的耐高温性能显得尤其重要。目前航空发动机的主要材料包括高温合金、钛合金、复合材料等，为了满足四代战斗机及未来的隐身飞机对发动机的隐身性要求，隐身材料也得到了广泛应用。

➤ **航空发动机控制系统是航空发动机的大脑。**航空发动机控制系统从液压机械控制、液压机械+电子控制，发展到现代的全权限数字电子控制（FADEC），并向智能/分布式控制方向发展。全权限数字电子控制系统（FADEC）是一种以计算机为核心的控制系统，不仅能够实现从发动机起动、运行、停车的整个运行过程的全部控制功能，保证发动机一直保持在最优条件下运行，而且集成了发动机故障诊断属性，及时发现发动机的“病变”。

➤ **重点公司关注：**重点推荐航发控制和航宇科技。航发控制是航空发动机控制系统龙头，公司主要产品为航空发动机控制系统及部件，作为国内主要航空发动机控制系统研制生产企业，在军用航空发动机控制系统方面一直保持领先，与国内各发动机主机单位均有密切合作，全面参与了国内所有在役、在研型号的研制生产任务，是航发控制系统唯一上市标的，具有稀缺性。航宇科技是航空发动机环锻件核心供应商，公司参与了我国现役绝大部分军用航空发动机生产任务，承担所有预研、在研军用航空发动机型号研制任务，还是国产大飞机 C919 长江系列航空发动机环锻件的核心研制生产单位，公司与多家国际主流航空发动机生产商均签订了长期协议，长期协议涉及多个主流航空发动机型号，有望受益于国内和国际市场的双轮驱动。

风险提示：原材料价格波动；新型号列装不及预期；订单交付不及预期；新型号研发不及预期

目录

1. 航空发动机的分类及发展	10
1.1 涡轮喷气发动机.....	13
1.2 涡轮风扇发动机.....	16
1.3 涡轮螺旋桨发动机.....	23
1.4 涡轮轴发动机.....	26
1.5 无人机用航空发动机.....	28
2. 核心技术与发展趋势	33
2.1 航空发动机研制途径-核心机的不断继承和发展.....	33
2.2 航空发动机发展趋势.....	35
2.2.1 变循环发动机.....	35
2.2.2 多（全）电发动机.....	36
2.2.3 齿轮传动.....	37
2.2.4 桨扇发动机.....	37
2.2.5 间冷回热发动机（IRA）.....	38
2.2.6 高超音速组合发动机.....	39
2.2.7 超音速强预冷发动机.....	40
3. 产业链分布	41
3.1 零部件.....	42
3.1.1 盘类件.....	48
3.1.2 轴类件.....	50
3.1.3 鼓筒.....	50
3.1.4 环形机匣和环形件.....	51
3.1.5 箱体机匣.....	53
3.1.6 叶片.....	54
3.2 材料.....	57
3.2.1 高温合金.....	59

3.2.2 钛合金.....	61
3.2.3 复合材料.....	64
3.2.4 隐身材料.....	67
3.3 控制系统.....	68
4. 投资建议.....	72
4.1 航发控制.....	72
4.2 航宇科技.....	72
5. 风险提示.....	74

图表目录

图 1: 航空发动机分类.....	10
图 2: 典型航空活塞式发动机的剖面图.....	10
图 3: 四种燃气涡轮发动机简单工作原理图.....	11
图 4: 涡轮喷气发动机组成.....	11
图 5: 四种燃气涡轮机的结构图.....	11
图 6: 通用电气 J-79 涡轮喷气发动机结构图.....	13
图 7: 离心式压气机.....	14
图 8: 轴流离心组合式压气机 (T53)	14
图 9: 双转子与单转子发动机结构对比.....	14
图 10: 大涵道比涡轮风扇发动机 GE90 结构.....	16
图 11: 小涵道比加力涡轮风扇发动机 TF30-P-100.....	17
图 12: LEAP 系列发动机具备优异性能.....	17
图 13: 三转子涡轮风扇发动机 (RB211&Trent)	18
图 14: 齿轮传动涡轮风扇发动机 (PW1100G)	18



图 15: 罗罗 Dart 定轴式涡轮螺旋桨发动机.....	23
图 16: 定轴式和自由涡轮式涡轮螺旋桨发动机.....	24
图 17: 装备大功率涡轮螺旋桨发动机 TP400 的 AirBus A400M.....	24
图 18: 采用并列旁置前输出型式的涡轮轴发动机 Arriel.....	26
图 19: 动力涡轮输出功率的三种型式.....	27
图 20: 活塞/涡轴/涡桨/涡扇/涡喷发动机实物图.....	29
图 21: 美国 F119 发动机的核心机（红色线框内部分）.....	33
图 22: F101 核心机的衍生系列化发展.....	34
图 23: 发动机吞水试验.....	34
图 24: 高空台实验舱.....	34
图 25: 自适应变循环发动机结构.....	35
图 26: 自适应变循环发动机四种工作模式.....	35
图 27: F120 双外涵变循环发动机不同工作模式的结构示意图.....	36
图 28: 多电发动机结构示意图.....	36
图 29: 采用了动力齿轮箱的 UltraFan 发动机.....	37
图 30: 采用桨扇发动机的运输机安-70 及其桨扇发动机 D-27.....	38
图 31: 间冷回热发动机原理图.....	38
图 32: 串联式涡轮冲压组合发动机.....	39
图 33: 并联式涡轮冲压组合发动机.....	39
图 34: Strutjet RBCC 发动机.....	40
图 35: RBCC 发动机不同工作模态.....	40
图 36: 弯刀（Scimitar）发动机结构图.....	40
图 37: 佩刀（Sabre）发动机结构图.....	40

图 38: 我国航空发动机科研生产体系创新主体构成.....	41
图 39: EJ200 零部件示意图.....	42
图 40: 航空发动机叶片的工艺流程.....	43
图 41: 锻造工艺分类.....	44
图 42: 精密锻造和精密铸造发动机零部件.....	44
图 43: 可增材制造的发动机零部件.....	45
图 44: 整体叶盘电解加工方法示意图.....	45
图 45: 摩擦焊在航空发动机制造领域的应用.....	46
图 46: 喷丸强化.....	47
图 47: 应用于涡轮叶片的热障涂层.....	47
图 48: 典型的航空发动机盘类件.....	49
图 49: 压气机中的整体叶盘.....	49
图 50: CMF-56 主要轴类零件.....	50
图 51: V2500 发动机增压级和高压压气机中的鼓筒.....	51
图 52: 航空发动机的主要环形机匣及环形件.....	52
图 53: 不同类型的环形机匣.....	52
图 54: 风扇机匣和外涵机匣开始采用复合材料.....	53
图 55: 典型焊接机匣壳体及环形件毛坯.....	53
图 56: CFM56 附件传动机匣.....	54
图 57: 航空发动机叶片.....	54
图 58: 风扇叶片的发展.....	55
图 59: 宽弦空心叶片（三角桁架结构）.....	55
图 60: 压气机静子叶片.....	55

图 61: 涡轮工作叶片.....	56
图 62: 涡轮叶片采用复杂的内腔结构设计实现内部冷却.....	56
图 63: 等轴晶铸造高温合金、定向凝固柱晶高温合金、单晶高温合金叶片（从左至右）.....	57
图 64: 典型型号航空发动机推重比演进.....	57
图 65: 涡轮前温度和冷却技术的演进.....	57
图 66: 不同材料的典型比强度-温度适用范围.....	58
图 67: 典型航空发动机用材的分布示意.....	58
图 68: Trent 800 不同部分的工作温度和压强曲线.....	58
图 69: 航空发动机热端部件及其零件.....	59
图 70: 高温合金在叶片和盘片上应用的发展趋势和对比.....	60
图 71: 2017-2021 年中国高温合金需求与产量.....	61
图 72: 航空发动机低温部件及其零件.....	62
图 73: 我国高温钛合金的发展.....	63
图 74: TiAl 合金在普惠齿轮传动涡扇发动机高压压气机和低压涡轮的潜在应用示意图.....	63
图 75: Genx 发动机用 TiAl 合金铸造低压涡轮叶片.....	63
图 76: 2021 年中国钛加工材在不同领域的应用比例.....	64
图 77: 中国钛加工材历年进出口量（2003-2021）.....	64
图 78: 航空发动机材料发展趋势.....	65
图 79: 树脂基复合材料在发动机冷端部件上的应用.....	66
图 80: 高温合金和陶瓷基复合材料耐温能力变化.....	66
图 81: GE9X 发动机应用的陶瓷基复合材料部件.....	66
图 82: 铝基复合材料用于 B777 发动机导向流叶片.....	66
图 83: F135 锯齿修形喷管.....	67



图 84: S 弯二维喷管在战斗机发动机上的应用.....	67
图 85: 隐身材料在航空发动机上的应用.....	68
图 86: 航空发动机全权限控制系统原理图.....	69
图 87: 发动机控制复杂性变化趋势.....	69
图 88: 航空发动机控制技术发展历程与趋势.....	69
图 89: 某涡扇发动机控制系统总体结构框图.....	70
图 90: 燃油系统总体方案图.....	71
图 91: 未来航空发动机控制技术的重点发展领域.....	71
表 1: 不同类型燃气涡轮发动机特点.....	12
表 2: 涡轮喷气发动机主要型号.....	15
表 3: 涡轮风扇发动机主要型号.....	19
表 4: 涡轮螺旋桨发动机主要型号.....	25
表 5: 涡轮轴发动机主要型号.....	27
表 6: 无人机各种动力装置类型特点.....	28
表 7: 不同类型的发动机所适用的无人机.....	30
表 8: 配置不同类型动力装置的无人机列表.....	30
表 9: 航空燃气涡轮发动机不断涌现的新技术.....	42
表 10: 国内主要航空发动机零部件制造公司情况.....	47
表 11: 国内主要高温合金上市公司情况.....	61
表 12: 国内主要钛合金上市公司情况.....	64
表 13: 不同材料的比强度和比模量.....	65
表 14: 国内主要航空发动机复合材料上市公司情况.....	66

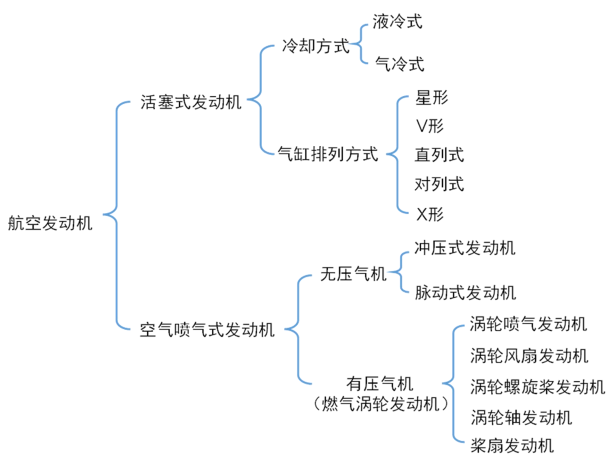


表 15: 国内主要隐身材料上市公司情况.....	68
表 16: 国内主要航空发动机控制系统上市公司情况.....	71
表 17: 重点推荐公司盈利预测及估值.....	73

1. 航空发动机的分类及发展

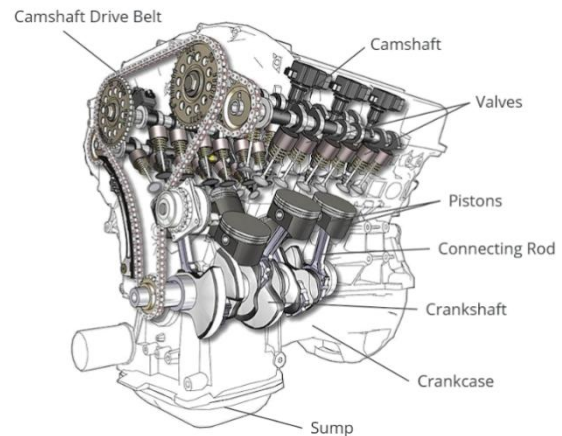
航空发动机起步于活塞式发动机，发展至今的绝对主流是燃气涡轮发动机。活塞式发动机具有油耗低、成本低、工作可靠等特点，在喷气式发动机发明之前的近半个世纪，是唯一可用的航空飞行器动力。随着飞机飞行速度的不断提升，要求发动机功率大大增加，从而导致活塞发动机重量和体积的迅速增加，同时在接近声速时螺旋桨的效率会急剧下降，所以活塞式发动机-螺旋桨组合制约了飞机速度的提升，喷气式发动机能以较轻的重量产生很大的推力，自 20 世纪 40 年代出现后，首先用于战斗机上，随后用于轰炸机、运输机和民航客机上，活塞式发动机逐渐退出了航空业的主战场。由于活塞发动机具有油耗低、结构简单、价格便宜等优点，在功率小于 200kw 的小型发动机上仍有一定优势，广泛用于初级教练机、超轻型飞机、小型直升机、中低速中低空无人机以及农林用小型飞机上。

图 1：航空发动机分类



资料来源：《航空发动机-飞机的心脏》、山西证券研究所

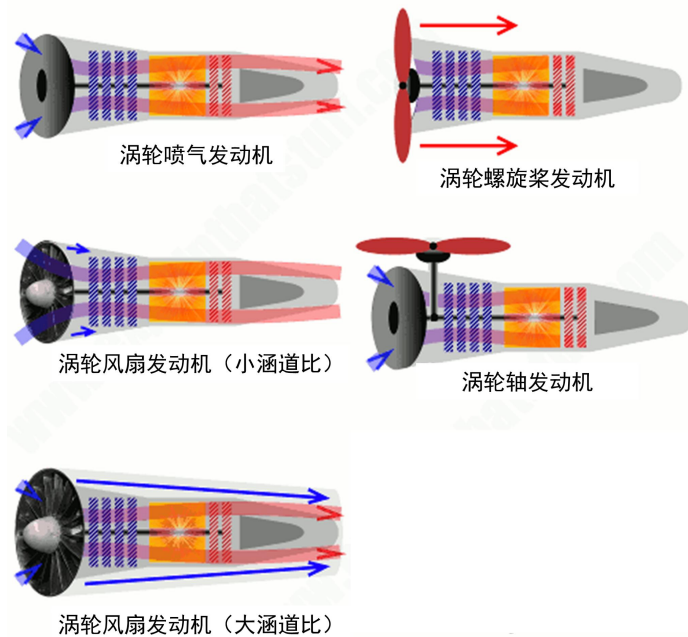
图 2：典型航空活塞式发动机的剖面图



资料来源：AeroToolbox、山西证券研究所

燃气涡轮发动机做为航空发动机中绝对的主流，主要包括涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮螺旋桨发动机和涡轮轴发动机四种，它们的工作场景和总体架构有所差别，但工作原理相似，并且均由涡轮喷气发动机这一基本构型发展而来。

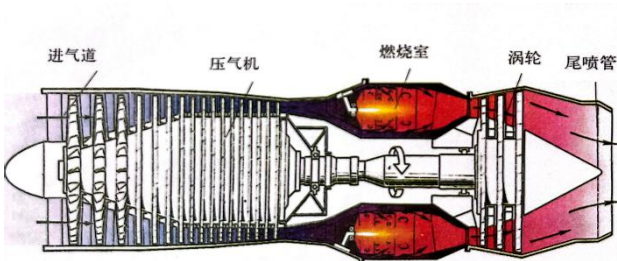
图 3：四种燃气涡轮发动机简单工作原理图



资料来源：explainthatstuff、山西证券研究所

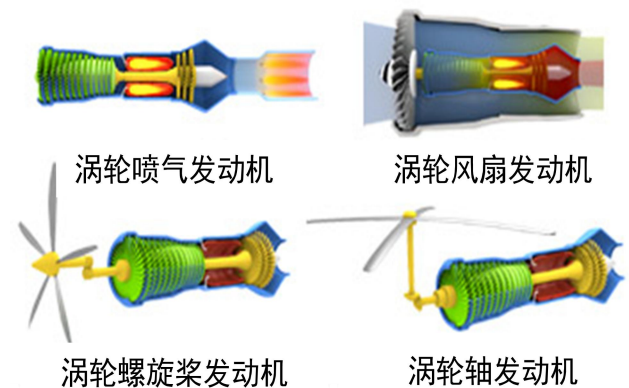
涡轮喷气发动机主要由压气机、燃烧室和涡轮三大部件组成，其中高压压气机、燃烧室和高压涡轮这三大部件组合起来，再配以转子支撑结构、润滑系统、进排气装置等就组成了核心机。涡轮风扇发动机是在核心机基础上由低压涡轮机及其带动的风扇共同组成的。涡轮螺旋桨发动机是在燃气发生器或核心机后加装动力涡轮，动力涡轮的前轴穿过核心机转子，通过压气机前的减速器驱动螺旋桨，产生向前的推力。涡轮轴发动机也是在燃气发生器或核心机后加装动力涡轮，动力涡轮的前轴穿过核心机转子，通过压气机前的减速器减速后由输出轴输出功率，带动旋翼产生升力及推力。

图 4：涡轮喷气发动机组成



资料来源：《航空发动机-飞机的心脏》、山西证券研究所

图 5：四种燃气涡轮机的结构图



资料来源：《Design and Manufacturing of a Miniature Turbojet Engine》、山西证券研究所

表 1：不同类型燃气涡轮发动机特点

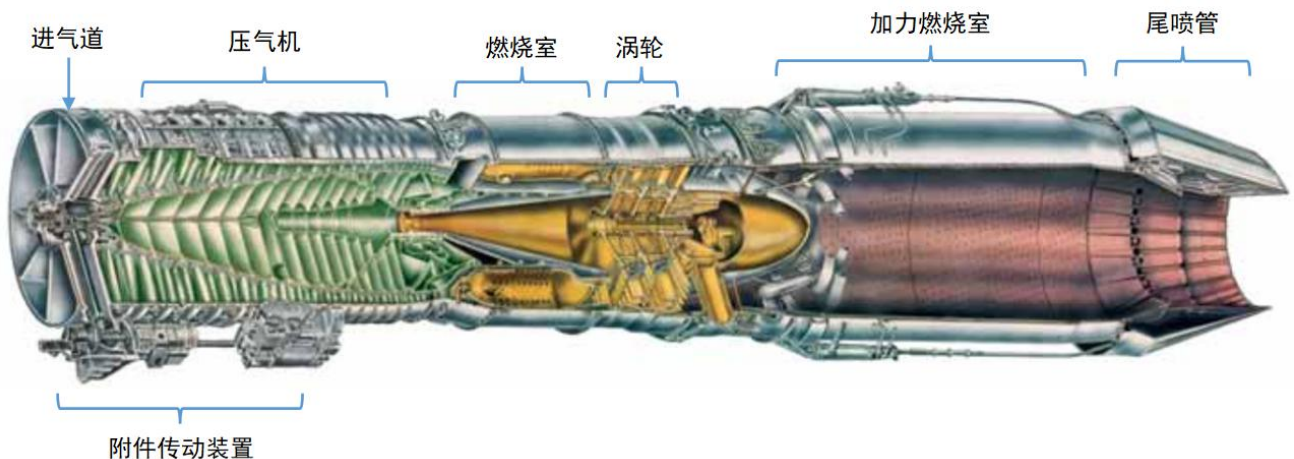
动力装置类型	优点	缺点	主要应用
涡轮螺旋桨发动机	相比活塞式发动机，功率大，功重比大，结构紧凑，运转稳定性好，振动与噪音小，适用的高度和速度范围大；相比涡轮风扇发动机，在低速下效率更高，油耗低	受到螺旋桨效率影响，速度不能太高，飞行高度低	中低速飞行的中小型运输机或对低速性能有严格要求的巡逻、反潜或灭火等类型飞机
涡轮轴发动机	相比活塞式发动机，功率大，功重比大，重量轻，较小的最大截面改善了直升机的气动力性能，运转稳定性好，振动与噪音小	直升机旋翼的转速较低，需要很重很大的减速齿轮传动系统	直升机
涡轮风扇发动机	相比于涡轮喷气发动机，推力大，推进效率高，噪声小，燃油消耗率低，飞行航程远，易于实现系列化	相比涡轮喷气发动机迎风面积大，阻力大（尤其是在高速飞行时）	航空发动机主体，广泛用于战斗机、大型运输机和客机
涡轮喷气发动机	相比涡轮风扇发动机，结构紧凑，推重比大，响应快，高速特性好	低速飞行时油耗较高，飞行航程短	大多数已被涡轮风扇发动机取代，小型涡轮喷气发动机仍应用于中高空高速无人机、靶机靶弹、巡航导弹等领域

资料来源：《航空发动机》、山西证券研究所

1.1 涡轮喷气发动机

涡轮喷气发动机由进气道、压气机、燃烧室、涡轮、加力燃烧室、尾喷管、附件传动装置与附属系统等组成。自由流空气首先由进气道引入发动机，之后压气机将进入发动机的空气减速增压，为燃烧室提供高压空气，以提高发动机热力循环的效率，在燃烧室里燃料燃烧使气体温度大大增高，从燃烧室里流出的具有很高能量的高温高压燃气驱动涡轮高速旋转并产生大的功率，由涡轮轴输出机械功，最后从涡轮流出的仍有一定能量的燃气在尾喷管中膨胀加速，以较大的速度排出发动机从而产生推力，对于有加力燃烧室的涡轮喷气发动机，涡轮后的气流会在加力燃烧室中再喷入燃油进行补充燃烧，以增加燃气流尾喷管前的能量，加大喷气速度，从而增加推力。

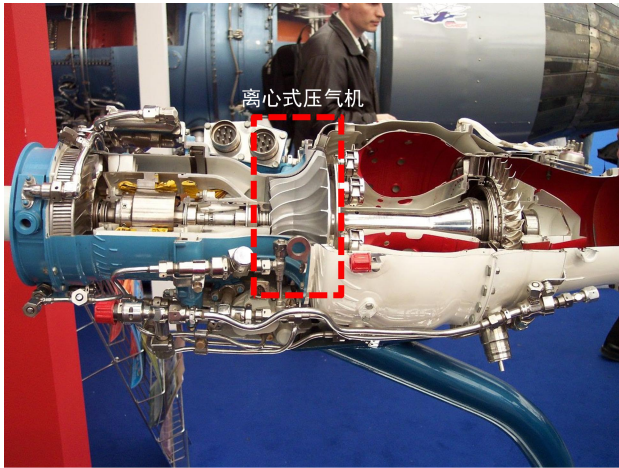
图 6：通用电气 J-79 涡轮喷气发动机结构图



资料来源：MTU、山西证券研究所

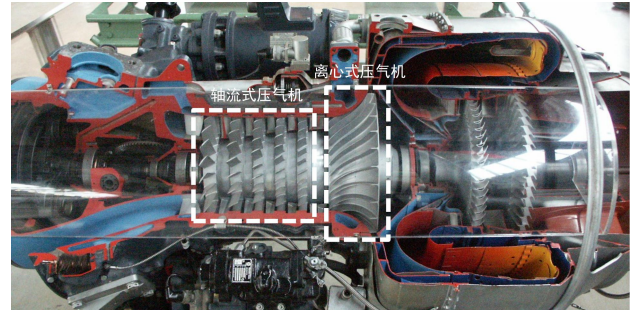
按照压气机的类型不同，涡轮喷气发动机可以分为离心式涡轮喷气发动机和轴流式涡轮喷气发动机。早期涡轮喷气发动机大多为离心式，离心式压气机结构简单，制造方便，坚固耐用，工作稳定性高。但是离心式发动机单位迎风面积大，效率、增压比和流通能力不如轴流式压气机，推力收到限制，所以从 20 世纪 50 年代后，推力稍大的大中型发动机均采用了轴流式压气机，只有小型涡轮螺旋桨和涡轮轴发动机仍采用离心式或者轴流离心组合式压气机。

图 7：离心式压气机



资料来源：维基百科、山西证券研究所

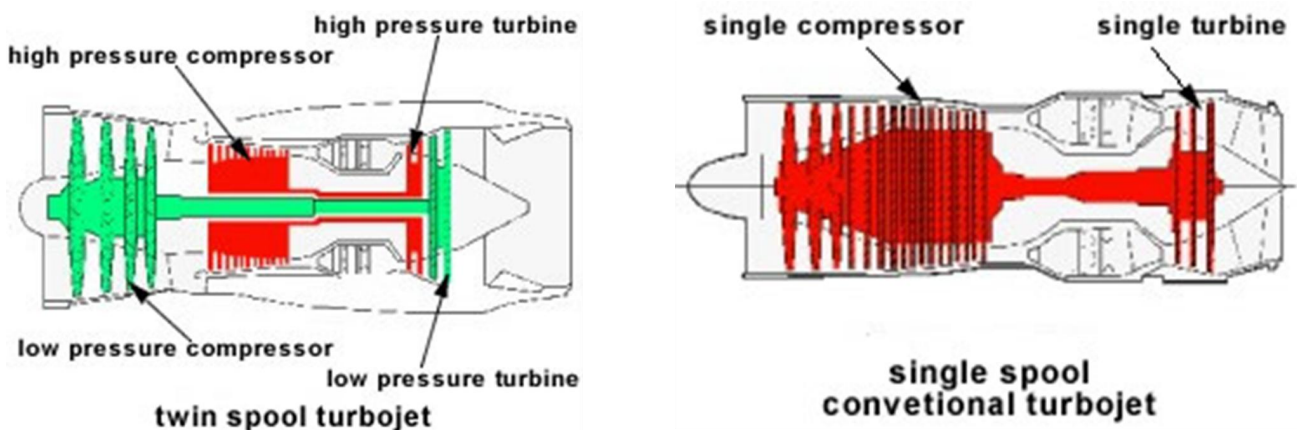
图 8：轴流离心组合式压气机（T53）



资料来源：维基百科、山西证券研究所

轴流式涡轮喷气发动机按发动机转子结构不同，又可分为单转子和双转子涡轮喷气发动机。单转子涡轮喷气发动机的压气机和涡轮共用一根轴，结构简单，造价低廉，是早期涡轮喷气发动机多采用的结构，但是单转子稳定工作的范围窄，随着增压比的提高，单转子涡轮喷气发动机已经被双转子发动机所取代。双转子发动机将压气机和涡轮分为高压和低压两级，高压压气机和高压涡轮连接形成高压转子，低压压气机和低压涡轮连接形成低压转子，低压转子的传动轴从高压转子中穿过，两个转子可以以各自最佳的工作转速转动，从而具有总增压比高、效率高、稳定工作范围宽、启动功率小、加速性好等特点。

图 9：双转子与单转子发动机结构对比



资料来源：pilotfriend 网站、山西证券研究所

涡轮喷气发动机从 20 世纪 40 年代中后期开始服役至今，已发展到第三代。第一代涡轮喷气发动机用于装备亚音速战斗机，推重比很小只有 2-3，均为单转子发动机，一部分是离心式发动机，一部分是轴流式发动机。第二代涡轮喷气发动机主要用于装备第一代超音速战斗机，于 20 世纪 50 年代中期开始服役，推

重比为 4-5，多是单转子加力式涡轮喷气发动机，结构相对简单，性能还较低，研制周期较短，从方案设计到定型一般不到 5 年。第三代涡轮喷气发动机主要用于装备第二代超音速战斗机，于 20 世纪 50 年代末 60 年代初开始，主要由苏联发展研制，此时美、英等西方国家已开始发展使用第一代涡轮风扇发动机，这一代涡轮喷气发动机是双转子加力式涡轮喷气发动机，性能较高，推重比为 5.5-6.5。涡轮喷气发动机发展到第三代已达到巅峰，之后世界各国基本转向发展涡轮风扇发动机。

表 2：涡轮喷气发动机主要型号

国家	型号	分类	推 力 (kN)	加力推力 (kN)	质 量 (kg)	推重比	装备机型	制造/装备 时间
英国	惠特尔 W.1	单转子离心式	5.34	—	254	—	E-28/39	1937
德国	BMW-003	单转子轴流式	7.83	—	623	—	Me-262	1940
德国	JUMO-004	单转子轴流式	8.8	—	719	—	Me-262/HO-229/Ar-234	1940
美国	I-A	单转子离心式	5.56	—	—	—	XP-59	1942
英国	尼恩 RB.41	单转子离心式	22.24	—	726	3.15	F-9F/G-AJPH	1944
美国	I-40/J33	单转子离心式	24	—	815	3	F-80/T-33	1944
苏联	TR-1	单转子轴流式	12.7	—	885	1.5	苏-11/伊尔-22	1946
美国	J47	单转子轴流式	34	—	1450	2.4	F-86/B-36/B-47	1947
苏联	VK-1	单转子离心式	26.5	—	870	4.27	米格-15/图-14/伊尔-28/ 米格-17	1947
美国	J42	单转子离心式	22.2	—	—	—	F-9F	1948
法国	阿塔 101	单转子轴流式	16	—	850	1.9	神秘/超神秘	1948
苏联	AM-3	单转子轴流式	85.75	—	3100	2.8	图-16/图-104/米亚-4	1950
美国	J57	双转子轴流式	38.7	66.75	2279	2.9	F-100/F-101/B-52	1952
美国	JT3C	双转子轴流式	53.4	—	1587	3.43	波音 707-120/波音 720/ 麦道 DC8-10	1953
苏联	R-11	双转子轴流式	38.22	56.35	1065	5.4	雅克-28/米格-21/苏-15	1956
美国	J75/JT4	双转子轴流式	71.5	117.9	2706	4.45	F-105/F-106/U-2/F-107/ 波音 707-220/波音 707-320/道格拉斯 DC8-20/道格拉斯 DC8-30	1956
美国	J79	单转子轴流式	44.48	70.28	1644	4.42	F-104/B-58/F-4/A-5/幼狮	1956
法国	阿塔 8/9	单转子轴流式	70.6	—	1582	4.55	军旗/幻影	1956
苏联	RD-9B	单转子轴流式	31.87	—	708	4.6	米格-19/雅克-25	1957
美国	J85	单转子轴流式	15.77	22.28	310	7.3	T-38/T-2C/F-5	1958
美国	CJ610	单转子轴流式	13.8	—	191	7.36	利尔喷气 23/24/25/28/29、西风 1123、HFB320 汉莎喷气	1966
苏联	R13-300	双转子轴流式	41.2	64.7	1132	5.8	米格 21SM/ST/MF、苏 -15T/TM/UM、苏-25	1966

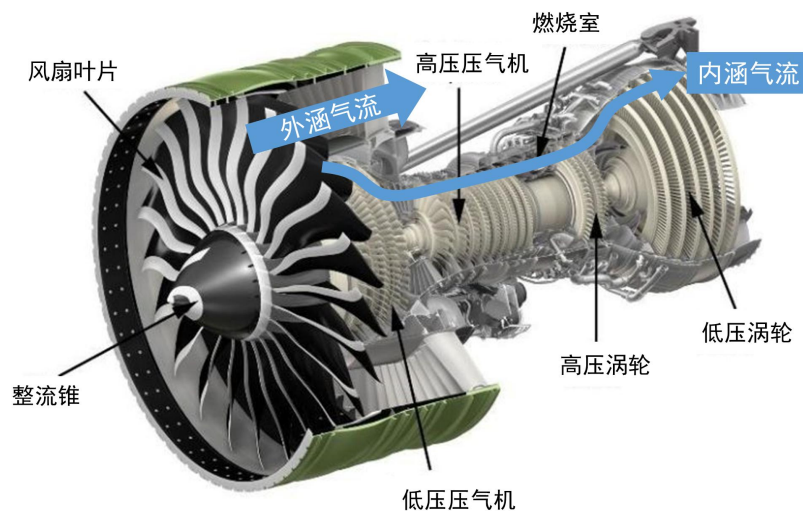
国家	型号	分类	推力 (kN)	加力推力 (kN)	质量 (kg)	推重比	装备机型	制造/装备 时间
苏联	R29-300	双转子轴流式	81.4	122.58	1880	6.65	米格-23/米格-27/苏-24	1972
英/法	奥林帕斯 593	双转子轴流式	169.2	—	3386	5.4	协和号	1973
苏联	R27V-300	双转子轴流式	67.66	—	1350	5.11	雅克-36M/雅克-38	1974

资料来源：《航空发动机图鉴》、山西证券研究所

1.2 涡轮风扇发动机

由高压压气机、燃烧室和高压涡轮构成的核心机和由低压涡轮及其所带动的风扇共同组成的发动机就是涡轮风扇发动机。自由空气流在风扇中增压后，分成两股向后流，一股流入核心机并最终由尾喷管流出，称为内涵气流，一股由核心机机匣和外涵机匣间的环形流道中流出，称为外涵气流，内外涵两股气流产生的推力之和就是涡轮风扇发动机的推力。外涵与内涵空气流量之比称为涵道比，这是影响涡轮风扇发动机性能好坏的一个重要循环参数。

图 10：大涵道比涡轮风扇发动机 GE90 结构

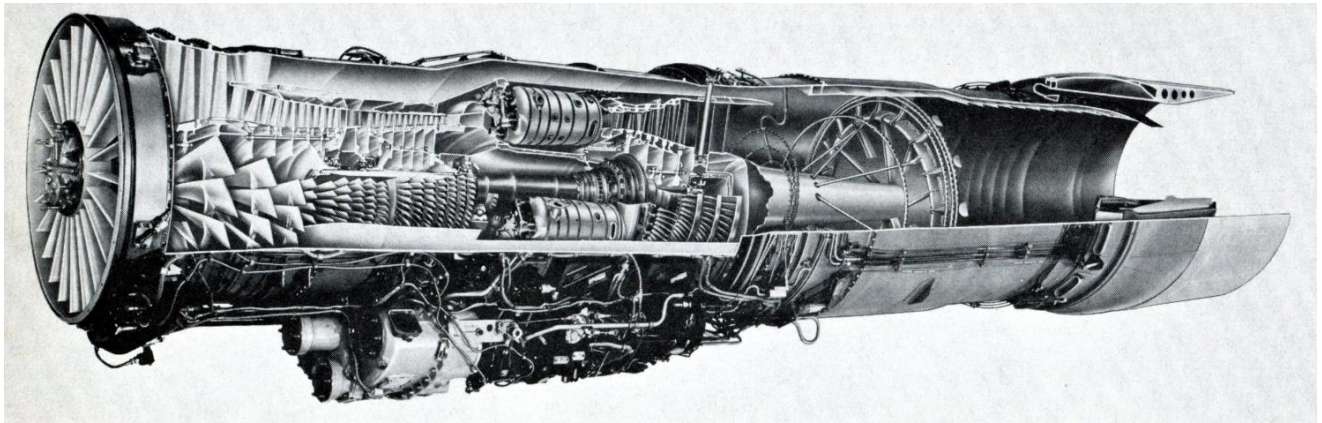


资料来源：SAM CHUI、山西证券研究所

涡轮风扇发动机中，由高压涡轮流出的燃气需要先在低压涡轮中膨胀做功，会消耗掉很多能量，流出低压涡轮后燃气温度和压强会大大降低，因此内涵道中的气流所产生的推力要比涡轮喷气发动机低些，但是尾喷管的排气能量损失会小很多，同时低压涡轮带动风扇转动，压缩外涵道空气喷出，也产生一定推力，内外涵气流的总推力是比涡轮喷气发动机大的，而且能量损失又降低了，经济性优于涡轮喷气发动机。高涵道比涡轮风扇发动机（涵道比为 4-9）排气速度低、推进效率高、经济性好，适用于大型远程客机和运输

机，但是高涵道比涡轮风扇发动机迎风面积大，不适合做超音速飞行，一般战斗机用的加力涡轮风扇发动机的涵道比大多小于 1。

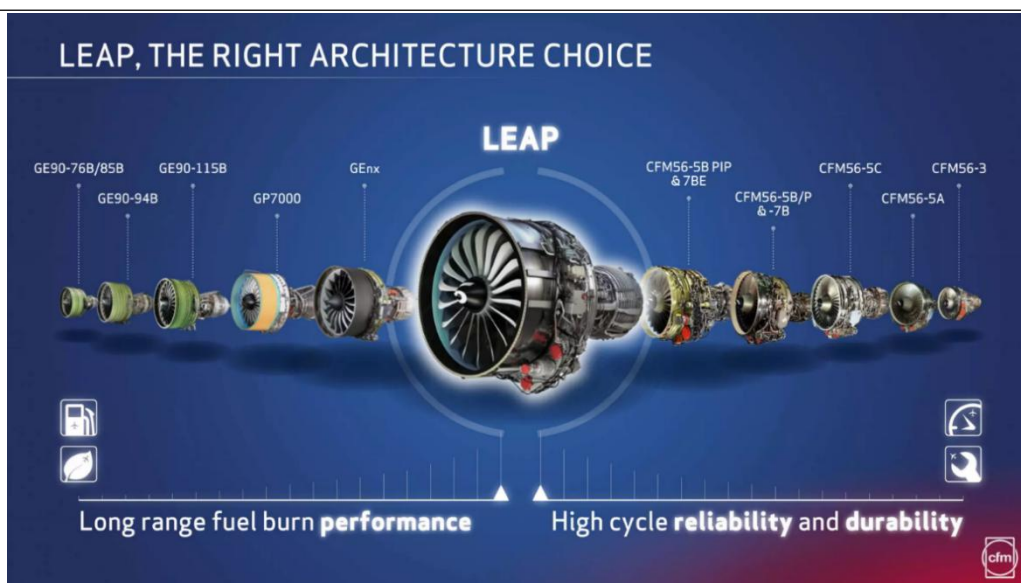
图 11：小涵道比加力涡轮风扇发动机 TF30-P-100



资料来源：维基百科、山西证券研究所

20 世纪 60-70 年代，普惠公司曾凭借 JT 系列小涵道比涡轮风扇发动机统治了全球民用发动机市场，但由于对技术进步估计不足以及 70 年代全球燃油危机带来的冲击，CFMI 公司（GE 航空和赛峰公司合资公司）凭借一款更大涵道比从而更省油的全新涡轮风扇发动机-CFM-56，挑战了普惠公司的霸主地位，并最终在窄体干线客机市场独占鳌头。进入 21 世纪后，CFMI 公司又研发出 LEAP 系列涡轮风扇发动机，相比 CFM-56 在燃油消耗和碳排放上均明显减少，而且噪音更低，是目前主流窄体客机 A320neo、737MAX 以及 C919 共同的动力选择。

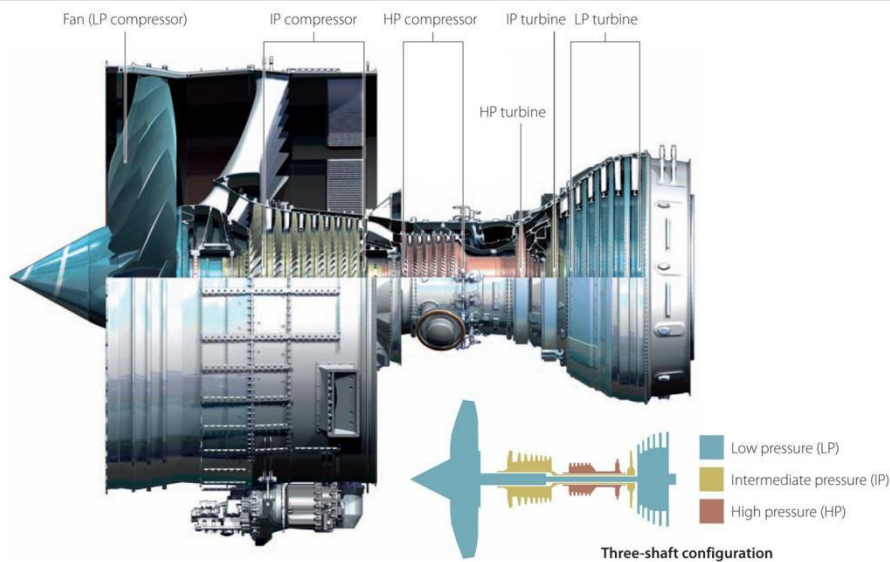
图 12：LEAP 系列发动机具备优异性能



资料来源：CFMI、山西证券研究所

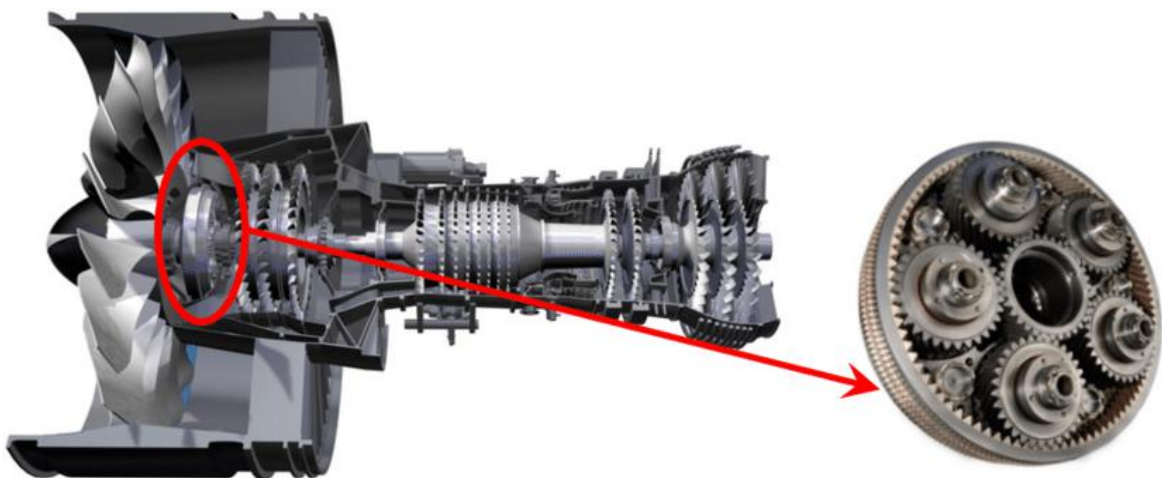
两种另辟蹊径的技术升级之路——三转子涡轮风扇发动机和齿轮传动涡轮风扇发动机。涡轮风扇发动机中，低压涡轮带动风扇和低压压气机一起转动，但是风扇和低压压气机的最佳转速差别较大，低压压气机的转速被风扇限制，不能充分发挥作用，为了解决这个问题，就出现了罗罗公司的三转子涡轮风扇发动机和普惠公司的齿轮传动涡轮风扇发动机。三转子涡轮风扇发动机将高压压气机分为中压、高压两个转子，分别由中压、高压两个涡轮转子带动，通过增加一个轴，形成高压、中压和低压三个涡轮带动的三套系统。齿轮传动涡轮风扇发动机，通过在风扇和低压压气机之间增加一个齿轮高速减速器，使风扇和低压压气机可以工作在各自最佳的转速下，解决了二者转速匹配的问题。

图 13：三转子涡轮风扇发动机（RB211&Trent）



资料来源：Pinterest、山西证券研究所

图 14：齿轮传动涡轮风扇发动机（PW1100G）



资料来源：TheFlyingEngineer、山西证券研究所

涡轮风扇发动机在军用和民用领域的发展目标有所差异，军用领域侧重于高推重比，民用领域侧重于环境友好。军用领域第一代涡轮风扇发动机是 20 世纪 60 年代末 70 年代初发展起来的，代表型号有美国的 TF30、英国的斯贝 MK202、瑞典的 RM8 等，这一代发动机性能水平较低，推重比只有 5-6，研制周期一般为 5-7 年。第二代涡轮风扇发动机，发展于 20 世纪 70 年代中后期及 80 年代，用于装备第三代战斗机，代表型号有美国的 F100、F110 和 F404、英德意联合研制的 RB199、法国的 M53-P2、俄罗斯的 RD-33 和 AL-31F 等，这一代发动机性能水平较高，推重比达到 7.5-8.0（M53-P2 为 6.6），不加力耗油率降至 0.6-0.8kg/(daN*h)，可靠性、维修性和耐久性高，作战适用性强，从验证机到原型机研制结束，通常要用 10 年左右时间。第三代涡轮风扇发动机是 20 世纪 90 年代发展起来的，用于装备第四代战斗机，代表型号有美国的 F119、法国的 M88-2、英德意西联合研制的 EJ200 等，这一代发动机推重比超过 10，能够为飞机提供超音速巡航能力，是目前最为先进的航空发动机，由于综合了各种先进技术，突破多项技术难点，这一代发动机从验证机到原型机研制结束要用 15 年以上，研制费用高达十几亿美元。民用领域大涵道比涡扇发动机发展至今主要经历了 4 个阶段，即第一阶段（总压比为 22~30，涵道比为 4.2~5.0）、第二阶段（总压比为 28~34，涵道比为 5~6）、第三阶段（总压比为 30~40，涵道比为 6~8）及世纪交替的第四阶段（总压比 40~50，涵道比 8~11）。

表 3：涡轮风扇发动机主要型号

国家	型号	分类	推力 (kN)	加力推力 (kN)	质量 (kg)	推重比	涵道比	装备机型	制造/装备时间
英国	康威 RB.80	双转子	77.86	—	2161	—	0.3	“胜利者”轰炸机/维克斯 VC-10/波音 707-420/道格拉斯 DC8-40	1960
美国	JT3D	双转子	75.56	—	1769	4.36	—	波音 707/波音 720/麦道 DC8/C-135/C-141/E-3A	1960
苏联	D-20P	双转子	52.96	—	1468	3.68	1.0	图-124	1960
美国	CF700	双转子	18.67	—	330	—	1.9	“猎鹰”20/“佩刀”75	1960
美国	TF33	双转子	75.56	—	1769	4.36	—	C-141/C-135B/E-3A/B-52H	1961
英国	斯贝 RB163	双转子	50.7	—	1126	4.6	0.71	“湾流”/BAE111	1962
英国	斯贝 RB168	双转子	44.5	91.25	1857	5.01	—	“掠夺者”NA39、F-4K/M、AMX、“猎迷”反潜巡逻机	1963
美国	JT8D	双转子	85.6	—	2056	4.1	—	麦道 MD-80/道格拉斯 DC9/波音 727-100/波音 737-100/200	1963
美国	TF30	双转子	80.1	111.72	1831	6.3	—	F-111/F-14/A-7	1965
苏联	NK-8	双转子	102.9	—	2100	4.9	—	伊尔-62/图-154	1966
苏联	D-30	双转子	117.67	—	2640	4.55	—	图-134/图-154/米格-31/伊尔-76/伊尔-62/A-40	1966

国家	型号	分类	推 力 (kN)	加力推力 (kN)	质 量 (kg)	推重比	涵道比	装备机型	制造 / 装 备时间
美国	TF39	双转子	182.8	—	3187	5.8	8.0	C-5	1968
美国	CF6	双转子	215.3	—	3734	5.88	4.4	道格拉斯 DC10/空客 A300/ 空客 A310/波音 747/波音 767/E-4	1968
英国	“飞马”	双转子	95.42	—	1796	6.8	1.4	“鹞” / “海鹞” 战斗机、 AV-8B	1968
美国	JT9D	双转子	202.8	—	4014	5.15	5.15	波音 747/ 波音 767/ 空客 A300/空客 A310/道格拉斯 DC10	1969
英/法	阿杜尔	双转子	20.54	30.82	—	4.7	0.75	“美洲虎” 攻击机/T-2/F-1/ “鹰” /T-45	1972
美国	TF34	双转子	41.28	—	670	6.4	6.2	S-3A 反潜机/A-10A	1972
苏联	NK-144	双转子	171.62	—	3540	4.9	0.6	图-144	1973
美国	F100	双转子	79.18	129.45	1703	7.75	0.4	F-15/F-16/X-47B	1974
美国	F101	双转子	75.6	136.9	2023	6.9	2.01	B-1B	1976
法国	M53	单转子	53.9	83.36	1470	5.78	—	“幻影”2000/“幻影”4000	1976
苏联	D-36	三转子	63.73	—	1106	5.87	5.6	雅克-42/安-72/安-74	1977
英国	RB211-524	三转子	213.9 (起飞 推力)	—	4452	5.1	4.4	洛克希德 L-1011/波音 747/ 波音 767	1977
英/德 /意	RB199	三转子	40.48	71.17	965	7.5	1.1	“狂风”	1978
美国	F404	双转子	53.3	71.2	995	7.3	—	F/A-18A/B/C/D、F-117、 T-7A、X-45B/C、T/A-50、 LCA	1979
美/法	CFM56	双转子	106.8	—	2187	4.98	5.9	波音 737NG/空客 A320neo/ 空 客 A340/KC-135R/C-135ER/E -6A/P-8A/E-737	1979
苏联	AL-31F	双转子	76.2	122.58	1530	8.1	0.75	苏-27	1980
苏联	RD-33	双转子	49.42	81.4	1055	7.87	—	米格-29/米格-29K/“泉龙”	1981
美国	CF6-80	双转子	257.4	—	4300	6.1	4.97	波音 747/ 波音 767/ 空客 A330/C-2	1981
苏联	NK-321	三转子	137.2	245	3650	6.85	1.4	图-160	1981
美国	PW2000	双转子	170.1	—	3311	5.2	5.77	波音 757/C-17	1982
苏联	D-18T	三转子	229.8	—	4100	5.7	5.6	安-124/安-225	1982
美国	F110/118	双转子	78.06	124.6	1778	7.2	0.76	F-16C/D、F-14B/D、 F-15E/EX、B-2A、U-2S	1985
英国	Tay	双转子	55.1	—	1338	4.6	3.18	“湾流” /福克 100	1986
美国	CF34	双转子	40.99	—	717	5.8	6.2	ERJ190、CRJ700/900、道	1986

国家	型号	分类	推 力 (kN)	加力推力 (kN)	质 量 (kg)	推重比	涵道比	装备机型	制造 / 装 备时间
								尼尔 928、ARJ21	
美国	PW4000	双转子	222.4	—	4273	5.6	5.0	空客 A300/A310/A330、波音 747/767/777、KC-46	1987
英 / 美 / 德 / 日	V2500/V2500-A1	双转子	111.2	—	2242	5.06	4.6	空客 A319/A320/A321、麦道 MD-90、KC-390	1988
美国	TFE1042/F124	双转子	26.8	41.15	617	—	0.4	IDF/L-159/X-45A 无人机	1991
瑞典/ 美	RM12	双转子	80.5	—	1050	7.8	0.31	“鹰狮”	1992
苏联	PS-90A	双转子	156.89 (起飞 推力)	—	2950	5.4	4.36	伊尔-96/图-154/图-204/伊尔-76MD	1992
英国	遑达 700	三转子	300.3	—	4785	6.4	5.1	空客 A330	
美国	GE90	双转子	342.5	—	7825	4.9	8.7	波音 777	1995
英国	遑达 800	三转子	331.9	—	5942	5.7	6.2	波音 777	1995
法国	M88	双转子	48.71	72.97	897	5.68	0.3	“阵风”	1996
美国	F414	双转子	65.64	97.8	1120	9.1	0.27	F/A-18E/F、“鹰狮” NG、KF-21	1998
英 / 德 / 意 / 西	EJ200	双转子	60	90	990	9.2	0.4	“台风”	1999
美国	F119	双转子	97.86	155.68	1860		0.3	F-22	1999
英国	遑达 500	三转子	235.8	—	4835	4.97	7.5	空客 A340-500/600	2000
俄 罗 斯	RD-133	双转子	—	91.19	1145	8	—	米格-29	2000
英国	遑达 900	三转子	311.4	—	6436	4.94	8.7	空客 A380	2004
美国	GP7000	双转子	297.9	—	6085	5	8.7	空客 A380	2005
美国	PW6000	双转子	100.24	—	2289	4.5	5	空客 A318	2005
乌 克 兰	AL-222	双转子	24.51	—	440	5.7	1.18	雅克-130/L15	2007
英国	遑达 1000	三转子	283.6	—	5409	5.35	10.4	波音 787	2007
美国	GEEnX	双转子	319.9	—	5642	5.78	9.0	波音 787/波音 747-8	2008
俄 罗 斯	AL-55	双转子	21.76	—	315	7.05	0.55	HJT-36	2008
美国	F135	双转子	124.6	191.35	—	—	0.57	F-35	2010
法/俄	SaM146	双转子	70.81	—	2159 (带 短舱)	—	4.43	SSJ100	2010
俄 罗	117S	双转子	86	140	1380	—	—	苏-35/苏-57	2010

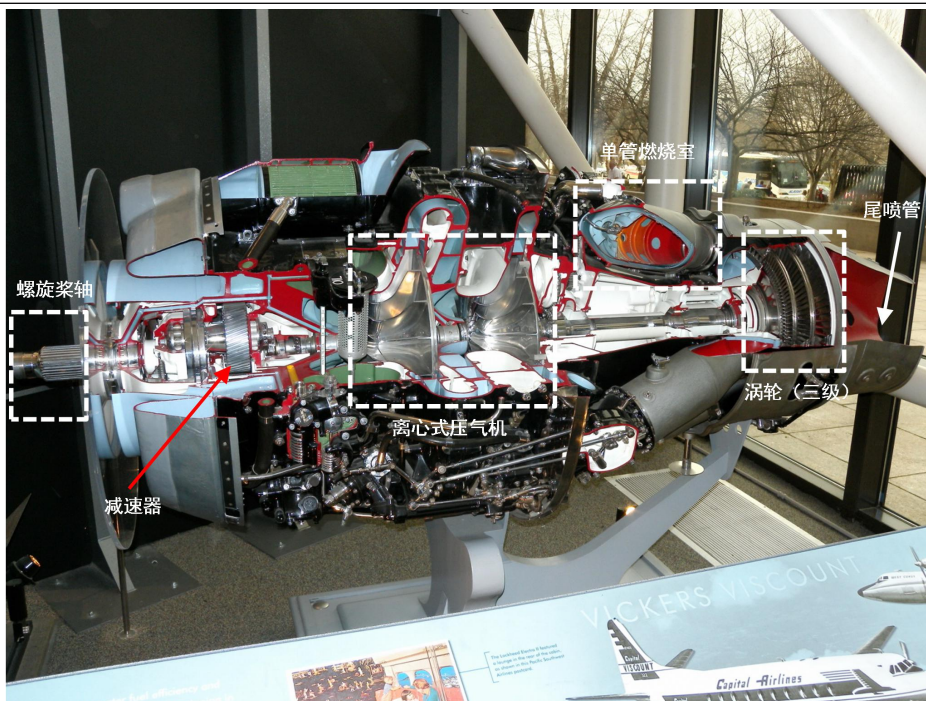
国家	型号	分类	推 力 (kN)	加力推力 (kN)	质 量 (kg)	推重比	涵道比	装备机型	制造 / 装 备时间
斯									
英国	遑达 XWB	三转子	330.19	—	7277	—	9.6	空客 A350XWB	2013
美国	PW1000G	双转子	106.6	—	—	—	12	空 客 A320neo/A220 、 MRJ70/90 、 MC-21 、 CS100/CS300	2013
美/日	HF120	双转子	9.1 (起飞 推力)	—	211.3	5.17	2.9	Honda Jet	2013
美/法	LEAP	双转子	143.1	—	3008	—	11	空 客 A320neo/ 波 音 737MAX/C919	2015
俄 罗 斯	PD-14	双转子	136.35	—	2870	—	8.6	MC-21	2018
美国	GE9X	双转子	597.4	—	7500	—	10.3	波音 777X	2020

资料来源：《航空发动机图鉴》、维基百科、山西证券研究所

1.3 涡轮螺旋桨发动机

涡轮螺旋桨发动机是在燃气发生器或核心机后加装动力涡轮，燃气在动力涡轮中膨胀做功，驱动动力涡轮高速旋转，动力涡轮的前轴穿过核心机转子，通过压气机前的减速器驱动螺旋桨，产生向前的推力。涡轮螺旋桨发动机中燃气的大部分能量由动力涡轮吸收并从动力轴上输出，涡轮出口的燃气所产生的推力较小，仅占涡轮螺旋桨发动机输出功率的 10%左右。涡轮螺旋桨发动机的基本构造除了具有与涡轮喷气发动机相似的燃气发生器、动力涡轮、尾喷管、发动机附属系统及附件传动装置外，还需要有减速器部件和螺旋桨。

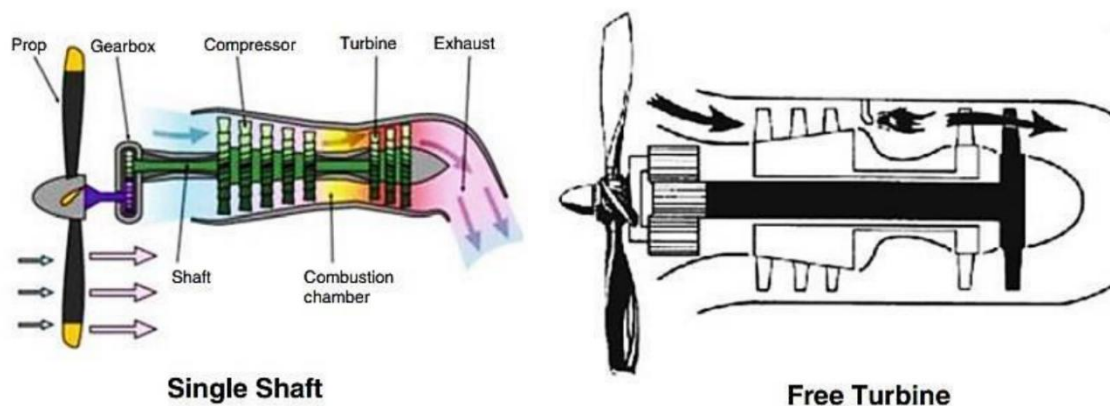
图 15：罗罗 Dart 定轴式涡轮螺旋桨发动机



资料来源：Wikimedia Commons、山西证券研究所

涡轮螺旋桨发动机分为定轴式和自由涡轮式两种。动力涡轮与燃气发生器的涡轮连接在一起的就是定轴式，动力涡轮与燃气发生器的涡轮分开的，各自以不同转速工作的就是自由涡轮式，目前大多数的涡轮螺旋桨发动机都是自由涡轮式。

图 16：定轴式和自由涡轮式涡轮螺旋桨发动机



资料来源：《Classifications of Aircraft Engines》、山西证券研究所

为了克服涡轮喷气发动机的耗油率高经济性差以及活塞式发动机功率小等缺点，涡轮螺旋桨发动机在 20 世纪 40 年代后期、50 年代初期得到迅速发展，曾广泛用于旅客机和军用运输机，但由于螺旋桨不适用于高亚音速飞行，随着涡轮风扇发动机的出现，干线客机和大型军用运输机均采用了涡轮风扇发动机，20 世纪 70 年代后各国已不再研制大功率涡轮螺旋桨发动机。由于涡轮螺旋桨发动机在亚音速、短航线内的经济性好，目前在一些小型支线客机、小型运输机和通用飞机中仍被采用。

图 17：装备大功率涡轮螺旋桨发动机 TP400 的 Airbus A400M



资料来源：Wikimedia Commons、山西证券研究所

表 4：涡轮螺旋桨发动机主要型号

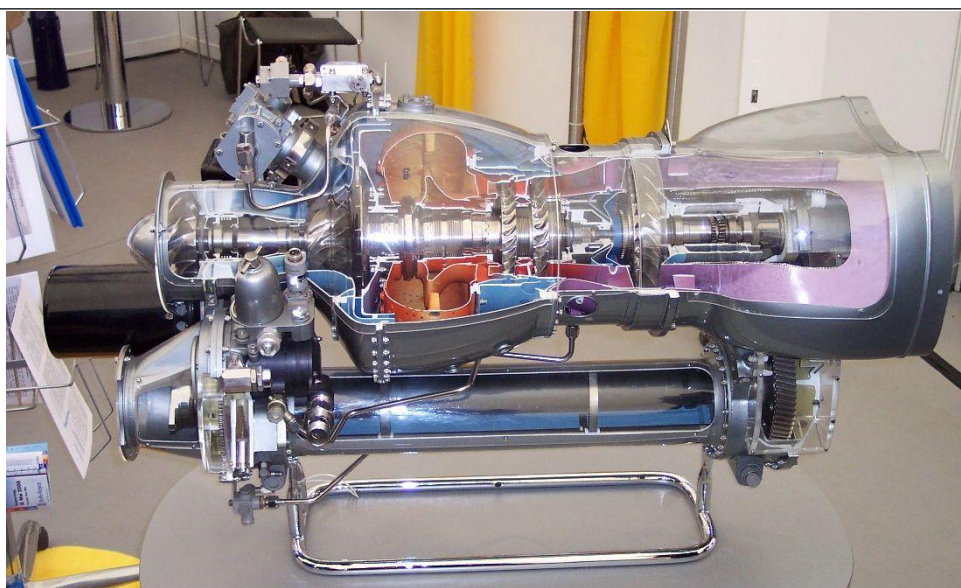
国家	型号	起飞功率 (kW)	质量 (kg)	功重比	装备机型	制造/装备时间
苏联	NK-12	11025	3075	3.6	图 -95/ 图 -114/ 图 -116/ 图 -142/安-22	1954
美国	T56/501	3910	880	4.4	C-130/E-2C/P-3C	1956
苏联	AI-20	3169	1084	2.76	安 -10 、 安 -12 、 伊 尔 -18/20/22、 别-12、 伊尔-38	1956
苏联	AI-24	1875	600	3.13	安-24/安-26/安-30	1960
加拿大	PT6A	932	260	3.58	“空中国王”、T-6A、EMB312/314、赛斯纳 208	1963
美国	T64 涡桨	2935	327	8.97	C-27A	1963
加拿大	PW100/PT7A	1342	391	3.4	ATR42/72、福克-50、“冲”-8、新舟 60、C-295	1983
美国	CT7	1294	356	3.63	萨博 340/CN-235	1983
美国	AE2100	3096	716	4.3	C-130J/C-27J/ 萨 博 2000/US-1A	1993
俄罗斯	TV7-117S	1839	530	3.5	伊尔-112/伊尔-114	1997
西 / 德 / 英/法	TP400	7979	1830	4.36	A400M	2011

资料来源：《航空发动机图鉴》、维基百科、山西证券研究所

1.4 涡轮轴发动机

涡轮轴发动机和涡轮螺旋桨发动机结构类似，都是在燃气发生器或核心机后加装动力涡轮，通过动力涡轮输出功率，带动旋翼产生升力及推力。涡轮轴发动机多用于直升机，20世纪50年代中期之前，直升机发动机都是活塞式发动机，50年代中期涡轮轴发动机开始用作直升机动力。由于涡轮轴发动机相比活塞式发动机具备功率大、振动小、体积小以及重量轻等一系列优点，60年代以后新研制的直升机基本都采用了涡轮轴发动机作为动力。

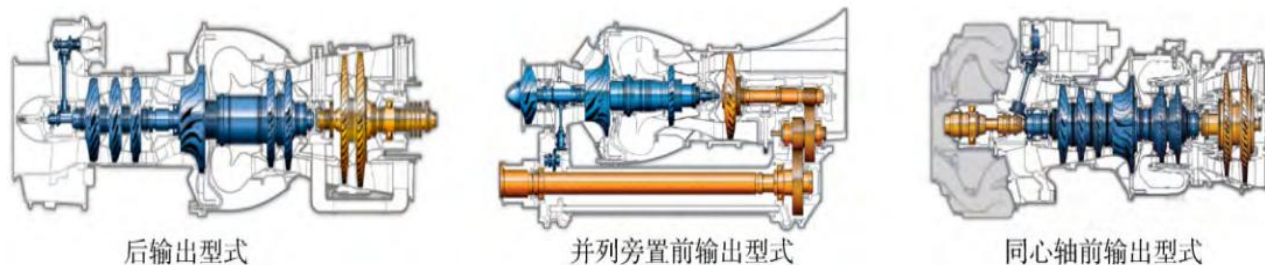
图 18：采用并列旁置前输出型式的涡轮轴发动机 Arriel



资料来源：维基百科、山西证券研究所

涡轮轴发动机按照有无自由涡轮分为定轴式涡轮轴发动机和自由涡轮式涡轮轴发动机，虽然定轴式涡轮轴发动机结构简单，但是起动性能、加速性能和经济性不如自由涡轮式涡轮轴发动机，目前大部分涡轮轴发动机都是自由涡轮式结构。动力涡轮输出功率的型式有三种，分别为后输出型式、并列旁置前输出型式和同心轴前输出型式，后输出型式使发动机长度加长，并列旁置前输出型式使发动机尺寸变大，都给轴系支撑、润滑和传动带来困难，同心轴前输出型式结构紧凑，转子刚性好，可以简化承力结构、滑油系统和轴系的布置，但是设计和制造难度大，随着材料、加工制造和转子动力学技术的发展，同心轴前输出型式已经逐渐取代其他两种型式，成为主流构型。

图 19：动力涡轮输出功率的三种型式



资料来源：《航空涡轴发动机发展趋势》、山西证券研究所

表 5：涡轮轴发动机主要型号

国家	型号	起飞功率(kW)	质量 (kg)	功重比	装备机型	制造/装备时间
美国	T53	1343	248	4.5	UH-1/AH-1/卡曼 K-MAX	1958
美国	T55	3643	374	9.7	CH-47	1961
美国	Model250-C/T63/T703	533	127	4.2	贝尔-407/贝尔-206/卡-226/恩斯特龙/AW109/MD500/CH-58D	1962
美国	T64 涡轴	2935	327	8.97	CH-53	1963
苏联	TV3-117	1633	285	5.7	卡-27/卡-28/卡-32/卡-50/米-8/米-14/米-17/米-24/米-25/米-28	1972
法国	阿赫耶	478	112	4.87	EC-145、AS365/350、S-76	1977
美国	T700	1126	198	5.67	UH-60/AH-64 阿帕奇/AH-1W/贝尔 214	1978
苏联	D-136	7355	1077	6.83	米-26	1982
法国	阿赫尤	357	101	3.5	EC135/AS355/EC120/A109	1986
英/法	RTM322	1566	256	6.12	EH101/AH-64/NH-90/WS-70C	1990
加拿大	PW200	463	108	4.3	EC135/S-76D	1991
美国	T800	995	150	7.8	RAH-66/AW-129/“超山猫”舰载直升机	1993
德 / 法 / 英	WTR390	958	169	5.67	“虎”式直升机	1993
美国	T406/AE1107	4586	440	10.4	V-22	2000
俄罗斯	VK-2500	1491	298	5.0	卡-32/卡-50/卡-52/米-14/米-17/米-24/米-28	2003
法国	阿蒂丹	1204	180	4.9	“北极星”/EC175/卡-62	2009
美国	T408	5600			CH-53K/CH-47F	2019

资料来源：《航空发动机图鉴》、山西证券研究所

1.5 无人机用航空发动机

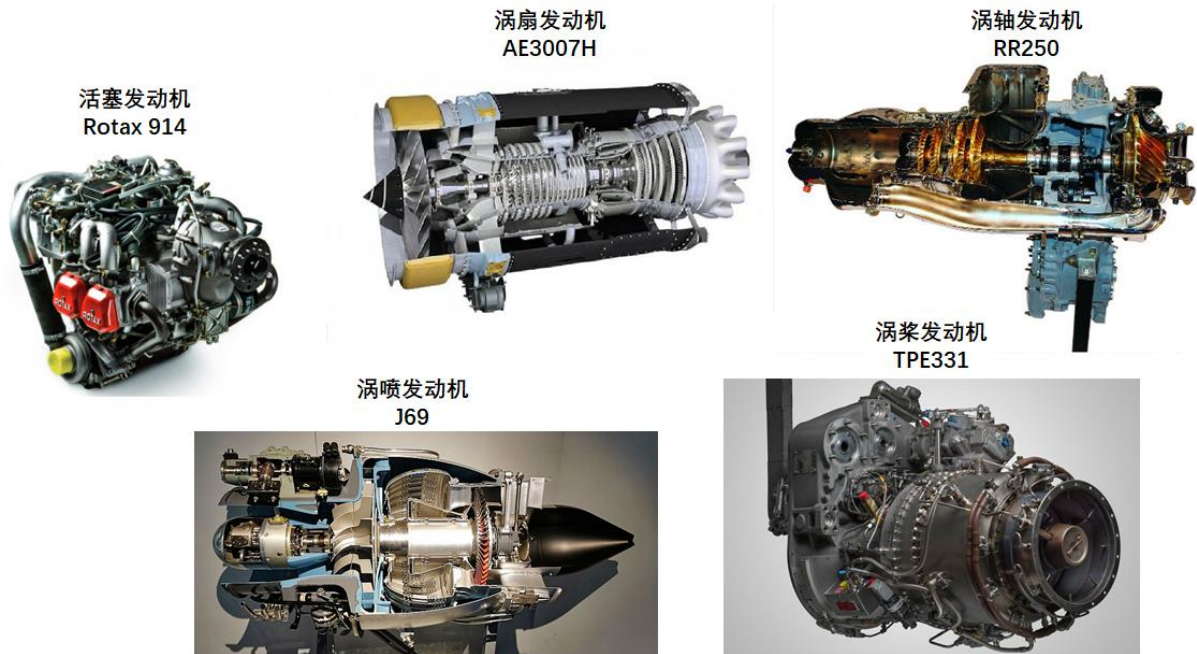
无人机动力装置主要为无人机提供满足飞行速度和高度要求的推力，并为无人机航电系统和任务载荷系统提供电力及功率支持，作为无人机的“心脏”，其性能在很大程度上决定了无人机的作战性能。为了满足无人机在飞行高度、航时、工作任务等方面的不同需求，无人机动力装置的功率和推力变化范围很大，但基本上是属于中小型发动机的范畴，按类型分为电动动力系统、活塞动力系统和空气喷气动力系统。

表 6：无人机各种动力装置类型特点

动力装置类型		优点	缺点
活塞动力系统	二冲程发动机	结构简单、运动部件少、重量轻、转速高、维护性好	噪声、污染和耗油率较高、寿命短、工作效率低
	四冲程发动机	相对于二冲程发动机，结构复杂、成本高、重量大	排气污染低、振动小、工作效率高，还可以于增压器组合提高最大飞行高度
	旋转活塞发动机	相比于往复活塞发动机（二冲程/四冲程发动机），旋转活塞发动机结构更加紧凑、简单，具有功重比高、振动与噪声小等优点	活动部件易损耗，寿命较短，油耗高，排放特性较差
喷气式动力系统	涡轴/涡桨发动机	相比于活塞发动机，功重比大，结构紧凑，高原性能好，振动小，燃料适用性好	与涡扇发动机和涡喷发动机相比，适航范围受限，只能应用在亚音速飞机上
	涡扇发动机	相比于涡喷发动机，推力大，推进效率高，噪声小，燃油消耗率低，飞行航程远，寿命长，易于实现系列化	相比于涡喷发动机迎风面积大，阻力大（尤其是在高速飞行时）
	涡喷发动机	相对于涡扇发动机，结构紧凑，推重比大，响应快，适航范围极其广泛	低速飞行时油耗高，成本和技术门槛高
	冲压发动机	相比涡轮发动机结构简单、重量轻、推重比大、成本低，在飞行马赫数大于 3 的条件下使用有较高的经济性，适合高空高速飞行	不能自行起动，须用其他发动机作为助推器，并且只有飞行器达到一定飞行速度后才能有效工作
电动动力系统	锂电池驱动	能量密度高、平均输出电压高、输出功率大、可快速充放电、使用寿命长	充电时间长，续航时间短、过放电会导致电池性能下降、低温时电池性能下降明显等
	氢燃料电池驱动	续航时间长、环保	燃料电池体积较大、氢气难于保存和获取、成本高
	太阳能电池驱动	环保无污染	受天气状况、电池封装材料、电池封装方式、飞行条件下对发电效率要求等因素的制约

资料来源：《无人机用航空活塞发动机关键技术的研究进展》，《无人机系统概论》，山西证券研究所

图 20：活塞/涡轴/涡桨/涡扇/涡喷发动机实物图



资料来源：维基百科、山西证券研究所

活塞发动机是无人机最早、最广泛使用的动力装置，技术较为成熟，具有良好的经济性和可靠性，一直在中低速无人机和长航时无人机领域占据主导地位，相较汽油活塞发动机，重油活塞发动机具备更优异的燃油性能和高空性能。相比活塞发动机，**涡轴/涡桨发动机**具有功重比大、结构紧凑、振动小、高原性能好、燃料适用性好、便于维修等优点，因而涡轴发动机代替了活塞发动机成为直升机的主要动力装置，尤其 0.7t 级以上的直升机平台多采用涡轴发动机，在中空长航时领域，涡桨发动机也在大中型固定翼无人机中具有广泛应用。在万米以上高空条件下，活塞发动机因空气稀薄性能急剧衰减，螺旋桨的推进效率也同样会大幅降低，能够解决活塞发动机升限和高原起降问题的多级增压技术尚待攻克，因而必须使用高增压比高性能的燃气涡轮发动机，其中**涡喷发动机**具有结构紧凑、质量轻、尺寸小、推重比大、响应快和相比涡扇发动机成本低等显著优点，能使飞行器实现高速飞行，高空、高速无人机动力装置一般会首选涡喷发动机，另外在高速靶机、靶弹等特殊的应用领域小推力涡喷发动机仍然具有独特的地位，而**涡扇发动机**具有耗油率低、寿命长、易于实现系列化等优点，其质量和推力等级能与无人机实现较好匹配，对于高空长航时无人机，涡扇发动机仍是最佳动力选择，其升限一般在 10000~20000 m，最大飞行马赫数（Ma）可以达到 0.85，世界最高水平的无人机多数配备的是涡扇发动机。**冲压发动机**在飞行马赫数大于 3 的条件下使用相比燃气涡轮发动机有较高的经济性，适合高空高速飞行，但缺点是不能自行起动，需借助其他发动机助推飞行至 0.5Ma 以上才能有效工作。电动无人机目前常用的是**锂电池**供电，多用于小型固定翼和多旋翼无人机，但锂电池存在续航时间短、低温下性能差的问题，因而衍生出**氢燃料电池**和**太阳能电池**动力能源，

多用于中型固定翼和体型较大的多旋翼。

表 7：不同类型的发动机所适用的无人机

发动机类型	速度 (km/h)	使用高度 (m)	续航时间 (h)	起飞重量 (kg)	适用的无人机类型
活塞发动机	110~260	2500~9750	1~48	30~1150	低速、中低空的长航时、侦察、监视、反辐射无人机等
涡喷发动机	700~1100	3000~17500	0.2~3	160~2500	飞行时间较短的中高空、高速侦察机及靶机和无人攻击机
涡扇发动机	500~1000	3000~20000	3~42	600~12000	中高空长航时侦察、监视及无人作战飞机
涡桨发动机	357~500	14000~16000	25~32	1650~3200	中高空长航时无人机
涡轴发动机	160~390	4000~6100	3~4	658~1100	中低空、低速短距/垂直起降无人机
微型电动机/活塞发动机/喷气发动机	36~72	45~150	<10	<0.1	微型侦察、监视、搜索无人机

资料来源：《无人机动力技术发展现状与展望》，《无人机系统概论》，山西证券研究所

由于无人机动力需求与有人驾驶飞机有一定区别，而国内大部分资源都投入到主力战机的配套发动机研发中，导致目前国内无人机动力的发展滞后于无人机系统的发展。活塞发动机方面，国外主要有奥地利罗塔克斯（Rotax）公司、美国莱康明（Lycoming）公司、美国大陆（Continental）公司、德国 Limbach 公司、英国 RCV 公司以及美国猛禽涡轮增压柴油机公司等，国内主要有宗申动力（001696.SZ）、安徽航瑞、航天科工三院 31 所等。涡轮燃气发动机方面，中国航发的 AEF50E/AEF100 涡扇发动机、AEP50E/AEP60E 涡桨发动机以及 AEF20E 涡喷发动机，航天科工某院所的 CTF-3 涡扇发动机，中发天信的 XX850 涡喷发动机等可用于无人机的发动机。

表 8：配置不同类型动力装置的无人机列表

发动机类型	国家	机型	动力装置	投入使用年代	升限/m	功率	推力	研发企业
活塞发动机	中国	翼龙-1	C115 活塞发动机	2017（换装国产发动机）	7000	84.6kw	——	宗申动力
		翼龙-1D	C145 活塞发动机	2018	7500	106.6kw	——	宗申动力
		“彩虹” CH-3	C115 活塞发动机	2016（换装国产发动机）	6000	84.6kw	——	宗申动力
		“彩虹” CH-4	DB416 云雀重油发动机	2022（换装国产发动机）	9000	118kW	——	航瑞动力
		“彩虹” CH-5	金鹰重油发动机	——	10000	600kW	——	航瑞动力
	美国	MQ-1 “捕食者”	914 涡轮增压汽油活塞发动机	1994	——	84kW	——	Rotax

发动机类型	国家	机型	动力装置	投入使用年代	升限/m	功率	推力	研发企业
		Aerosonde	EL-005 重油发动机	——	2438	2.98kw	——	莱康明
	俄罗斯	猎户座	APD-115T 活塞发动机	2016 首飞	7500	84.6kw	——	Itland
	以色列	“苍鹭” Heron 1	914 涡轮增压汽油活塞发动机	1994 首飞	——	84kW	——	Rotax
		Hermes 900	914 涡轮增压汽油活塞发动机	2009 首飞	——	84kW	——	Rotax
	伊朗	Shahed 129	914 涡轮增压汽油活塞发动机	2012 首飞	——	84kW	——	Rotax
	土耳其	TB-2	912 汽油活塞发动机	2014 首飞	7600	60kW	——	Rotax
涡喷发动机	美国	BQM-34A “火蜂”	J69-T-29A 涡喷发动机	1952	18000	——	7.6kN	特里达因公司
	中国	翼龙-10	XX850 涡喷发动机	——	21000	——	——	中发天信
涡扇发动机	美国	X-45A 无人战斗机	F124-GA-100 涡扇发动机	2002 首飞	12000	——	26.8kN	霍尼韦尔
		X-47A 无人战斗机	JT15D-5C 涡扇发动机	2003 首飞	——	——	——	——
		X-47B 无人战斗机	F100-220U 涡扇发动机	2011 首飞	>12200	——	64.9kN	普惠公司
		RQ-4“全球鹰”	AE3007H 涡扇发动机	2001	20000	——	32kN	罗罗公司
		“暗星” RQ-3 无人机	FJ-44-1A 涡扇发动机	1996 首飞	>19800	——	8.6kN	威廉姆斯
		“复仇者” MQ-20	PW54B 涡扇发动机	2009 首飞	18288	——	17.75kN	普惠公司
		“人鱼海神” MQ-4C 无人机	AE3007H FADEC 涡扇发动机	2013 首飞	17220	——	38.4kN	罗罗公司
涡桨发动机	美国	“死神” MQ-9	TPE331-10T 涡桨发动机	2014 首飞	>15000	700kW	——	霍尼韦尔
	以色列	“苍鹭” (Heron) TP 无人机	PT6A-6A 涡桨发动机	2004 首飞	14000	894kw	——	普惠公司
	中国	翼龙-2	AEP50E 涡桨发动机	2017 首飞	9900	500kW	——	航发动力
	土耳其	“游骑兵” Akinci A	AI-450S 涡桨发动机	2019 首飞	9100-12000	336kw	——	马达西奇



发动机类型	国家	机型	动力装置	投入使用年代	升限/m	功率	推力	研发企业
涡轴发动机	美国	MQ-8B “火力侦察兵”	RR-250-C20W 涡轴发动机	2000	6100	313kW	——	罗罗公司
	加拿大	CL327 无人直升机	WTS-125 涡轴发动机	——	——	92kW	——	威廉姆斯

资料来源：《中国无人机动力装置现状浅析》，《高空长航时无人机动力装置的现状与发展》，维基百科，山西证券研究所

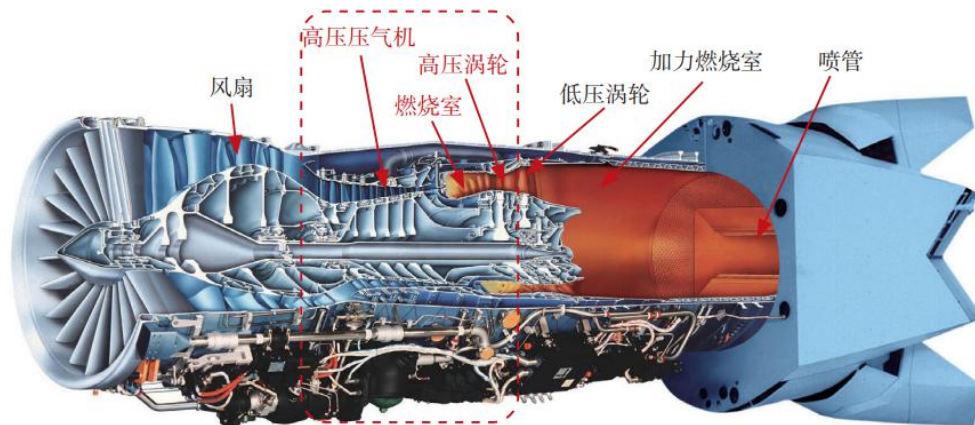
2. 核心技术与发展趋势

航空发动机运行在极端环境下（高温、高压、高转速、高负荷），要求重量轻、体积小、可靠性高、经济性好，因而必须设计精巧、加工精密，这些都给材料和加工工艺提出了很高的要求。而且航空发动机技术涉及专业广、结构复杂、性能水平高、新材料应用多、技术难度大、投资大、周期长，研制难度超乎想象，是现代工业“皇冠上的明珠”，是一个国家工业基础、科技水平和综合国力的集中体现，是大国地位的重要象征。航空发动机的研制难度主要体现在设计之难、先进材料之难、制造之难和试验之难。

2.1 航空发动机研制途径-核心机的不断继承和发展

核心机包括了推进系统中温度最高、压力最大、转速最高的组件，其研制成本和周期在航空发动机研制中占比较大，是航空发动机研制主要难点和关键技术最集中的部分。根据《核心机技术发展》数据，航空发动机研制过程中发生的 80% 以上的技术问题都与核心机密切相关。

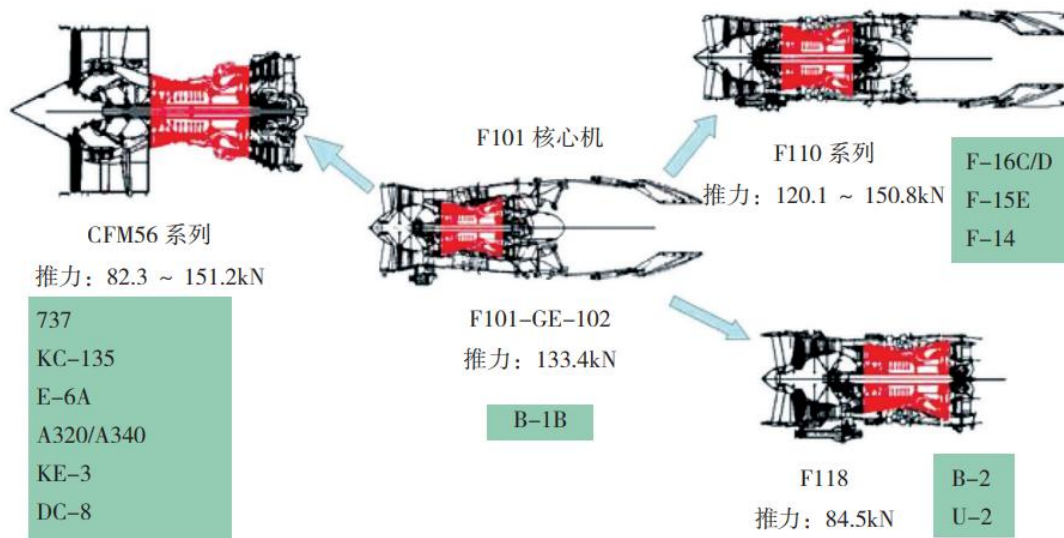
图 21：美国 F119 发动机的核心机（红色线框内部分）



资料来源：《核心机技术发展研究》、山西证券研究所

通过长期的实践摸索，目前“部件-核心机-验证机-型号”的航空发动机研制途径是世界各国普遍采取的方法。采用核心机在真实发动机工作环境下评估部件性能、部件间的匹配、总体技术性能指标等，可以充分暴露问题，攻下高温、高压和高气动机械负荷三关，减少后续工程发展时的技术风险，缩短工程发展周期，降低成本，提高可靠性。另外核心机的衍生系列化发展，可以降低新发动机研发的技术风险，缩短研制周期，提升零件的通用性，有利于降低设计、生产成本和维修费用。核心机衍生发展发动机产品的主要方式包括，核心机按比例缩放，或者在核心机基本几何参数保持不变的情况下，改变风扇或低压压气机的级数和直径、涡轮的冷却和材料等。

图 22：F101 核心机的衍生系列化发展



资料来源：《核心机技术发展研究》、山西证券研究所

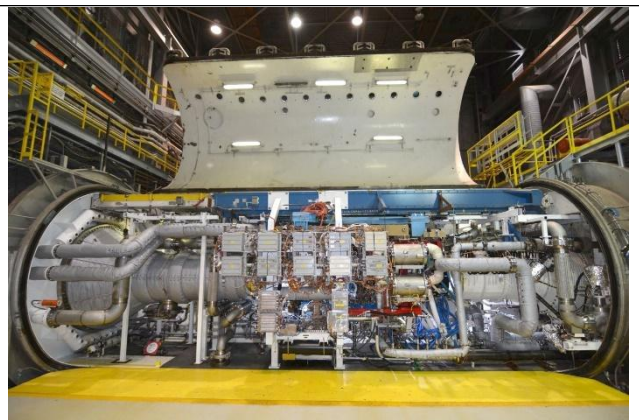
航空发动机的诞生过程是一个设计、制造、试验、修改、再制造、再试验的反复迭代过程，试验在航空发动机研制过程中起着举足轻重的作用。由于航空发动机的主要零部件工作在高温、高压和高转速的极端恶劣环境下，并且航空发动机的研制和发展是一项涉及到多学科的复杂的综合性系统工程，因此新型航空发动机的研制，从部件到整机都要通过设计-试制-试验的几个循环才能达到实用阶段，试验在航空发动机研制过程中起着举足轻重的作用。以研究设备和研究对象为标准，航空发动机试验包括零部件试验、整机地面试验、整机高空模拟试验、环境与吞咽试验和飞行试验五大类，后四类试验均为全台发动机的整机试验。

图 23：发动机吞水试验



资料来源：维基百科、山西证券研究所

图 24：高空台实验舱



资料来源：维基百科、山西证券研究所

2.2 航空发动机发展趋势

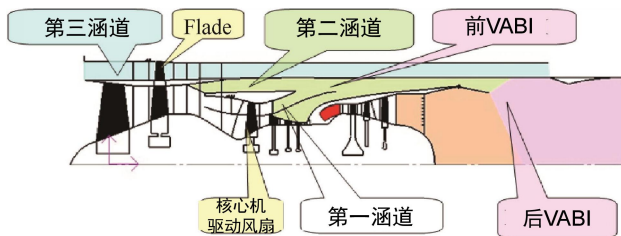
从世界航空发动机发展历程来看，燃气涡轮发动机仍将在较长时间内占据军民用航空动力的主导地位，为了有效应对航空运输需求的快速增长、能源消耗和环境压力以及新军事变革的需求，航空发动机技术不断持续发展，新构型和新概念将不断推出。

2.2.1 变循环发动机

变循环发动机通过改变一些部件的几何形状、尺寸或位置，来调节增压比、涡轮前温度、涵道比等热力循环参数，改变发动机循环工作模式，使发动机能够适应不同的任务需求或更宽的工作范围。

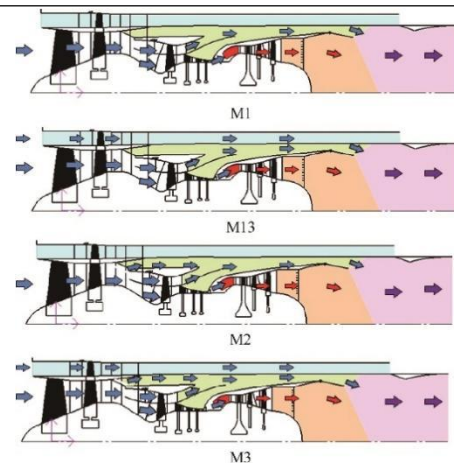
双外涵道变循环发动机通过改变特定部件的构型，使其在起飞和亚音速飞行时采用双涵道涡扇工作模式，在爬升/加速和超音速飞行时采用单涵道涡喷模式，从而保持不同工况下性能良好，典型型号有 F120 发动机。自适应变循环发动机（ACE）是在传统双外涵道变循环发动机的基础上增加第三涵道，通过打开关闭不同涵道可以形成四种工作模式，具有更强的循环调节能力和任务适应性。

图 25：自适应变循环发动机结构



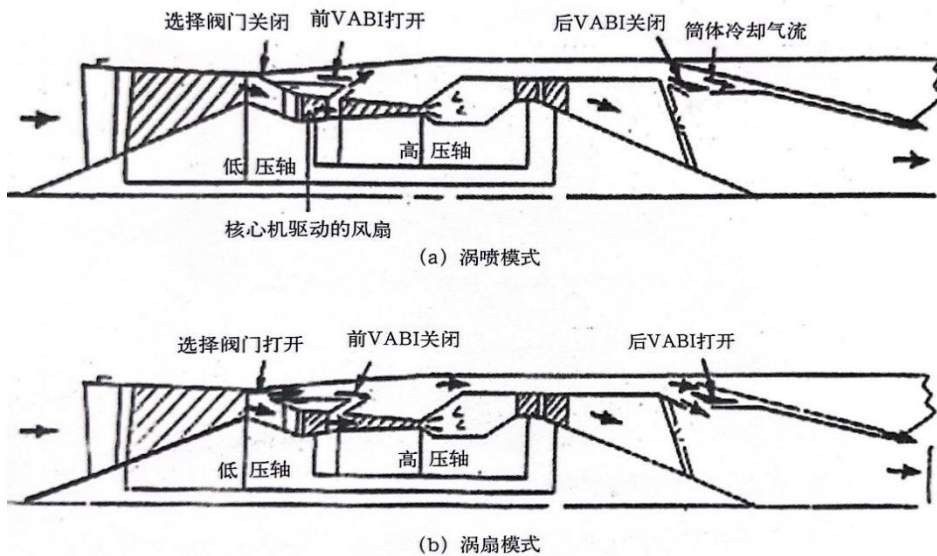
资料来源：《Matching mechanism analysis on an adaptive cycle engine》、山西证券研究所

图 26：自适应变循环发动机四种工作模式



资料来源：《Matching mechanism analysis on an adaptive cycle engine》、山西证券研究所

图 27: F120 双外涵变循环发动机不同工作模式的结构示意图

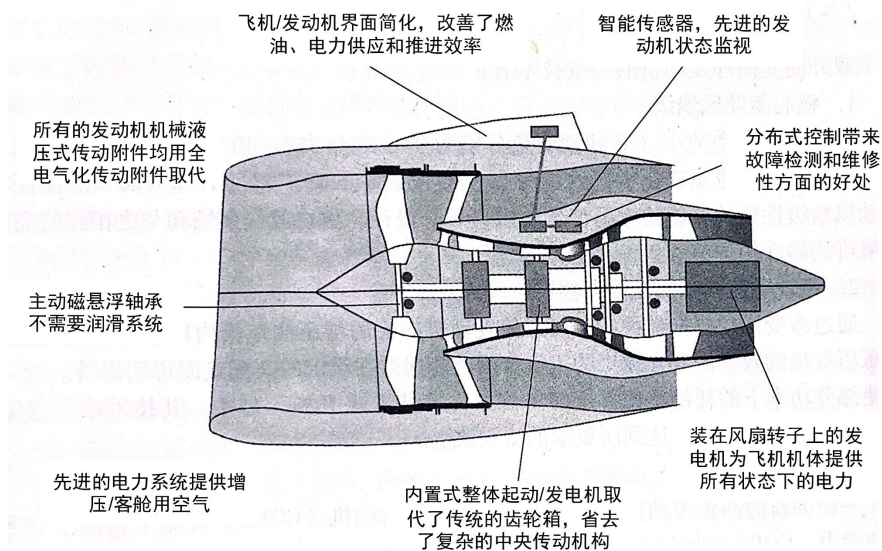


资料来源:《航空发动机-飞机的心脏》、山西证券研究所

2.2.2 多（全）电发动机

自 20 世纪 80 年代开始兴起的多电/全电发动机技术，采用电力系统部分甚至全部取代飞机/发动机的液
压、气源和机械系统，取消了传统的接触式滚动轴承、滑油系统、功率提取轴、减速器和相关机械作动附
件，从而简化发动机结构设计、减小迎风面积、降低系统质量，改善发动机的可靠性、维修性和经济性。

图 28: 多电发动机结构示意图

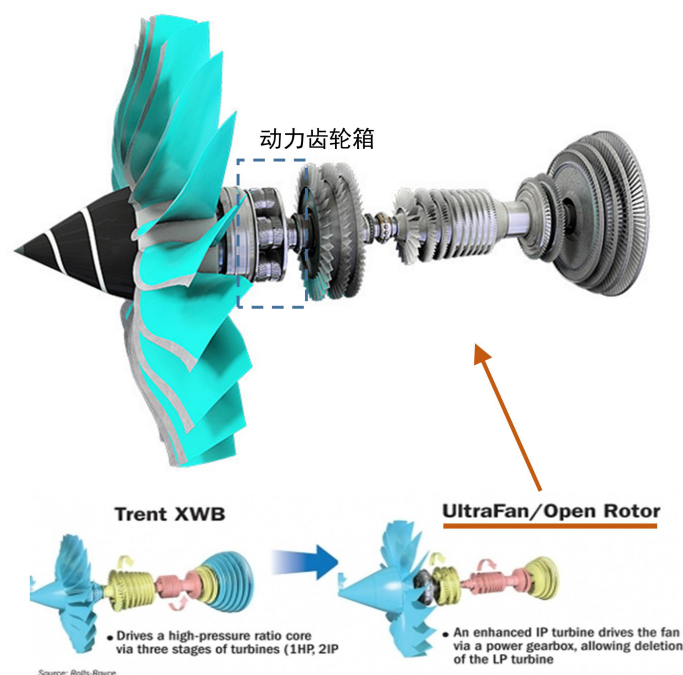


资料来源:《航空发动机》、山西证券研究所

2.2.3 齿轮传动

由于风扇直接由低压涡轮驱动，一般在风扇之后还装有压气机，但是风扇、压气机和低压涡轮的最佳转速差别较大，因而为达到发动机的总体设计要求，只得增加压气机和低压涡轮的级数，如果在低压涡轮、压气机和风扇之间装一个齿轮减速器，可以使各部分工作于最佳转速，减少涡轮级数。齿轮传动方案最早是由普惠公司运用在其中等推力发动机上（PW1000G），之后罗罗公司将齿轮传动运用在大推力发动机上，将世界上传输功率最大的齿轮箱嵌入三转子发动机，研发了“超扇”（UltraFan），通过引入齿轮传动系统，完全取消了现有的低压涡轮，涵道比提高到 15~20: 1，总压比提高到 60~70: 1，油耗和噪声均大幅下降。齿轮传动的难点在于航空发动机减速器的使用功率远远大于普通机械，而且一旦航空发动机推力过大，齿轮箱受力过大则容易变得不可靠。

图 29：采用了动力齿轮箱的 UltraFan 发动机



资料来源：Rolls-Royce、山西证券研究所

2.2.4 桨扇发动机

桨扇发动机也称为开式转子发动机，是构型融合的经典范例，它既具有涡轮螺旋桨发动机耗油低优势，又具有涡扇发动机适于高速飞行的特点，集经济性和速度于一体，但由于桨扇发动机噪声、振动及减速器性能差，以及无外涵机匣带来的安全性问题，桨扇发动机尚未得到广泛应用，苏联研制的 D27 桨扇发动机装配于安-70 中程军用运输机，这是目前唯一在役的桨扇发动机。

图 30：采用桨扇发动机的运输机安-70 及其桨扇发动机 D-27

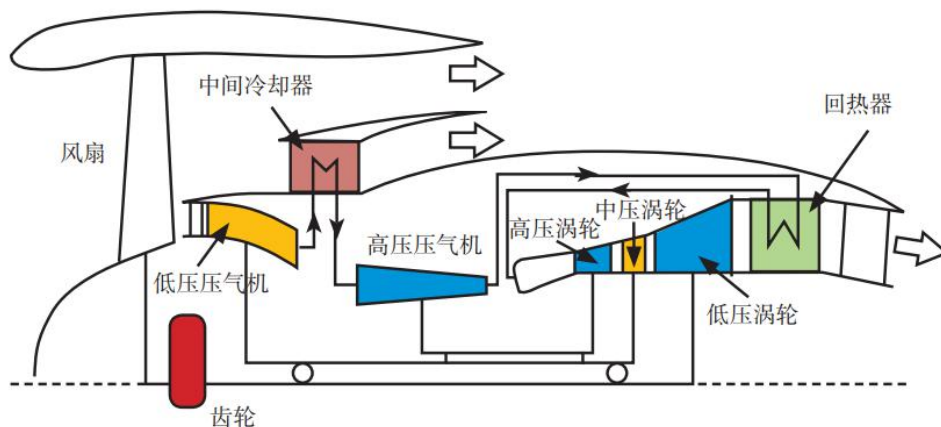


资料来源：维基百科、山西证券研究所

2.2.5 间冷回热发动机（IRA）

间冷回热是在普通高压压气机和低压压气机之间增加中间冷却，降低高压压气机进口温度，使其易于冷却；而在尾喷管中增加回热器，将排气中的部分热量送回到燃烧室进口的高压排气中，提升从压气机出来的空气温度。间冷回热技术通过增加压缩空气中间冷却和排气回热两个过程，提升了核心机热效率，减少了油耗，减排降噪。目前间冷回热技术已在地面和舰船燃气涡轮发动机上得到应用，但是如果用于航空发动机，换热器技术带来的收益尚不能弥补换热器过重带来的损失，换热器仍需要继续提升换热效率或者减轻重量。

图 31：间冷回热发动机原理图



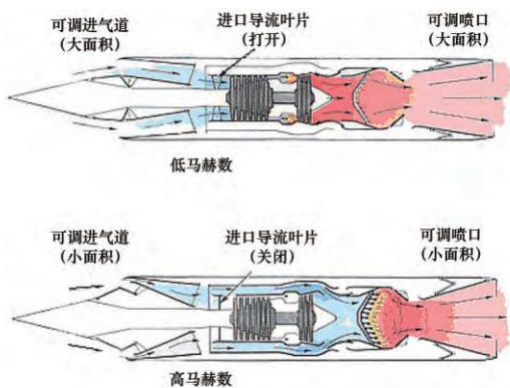
资料来源：《航空涡轮喷气发动机技术发展》、山西证券研究所

2.2.6 高超音速组合发动机

高超音速飞行器飞行范围宽广，高度覆盖 0-40km 或者更高，飞行速度覆盖亚音速到高超音速，目前任何单一类型的发动机都无法在如此宽广的飞行包线内稳定可靠工作，必须发展先进的动力组合装置，将不同类型发动机的最高性能段集成于一种发动机，目前发展出的组合循环推进系统中，涡轮基组合循环（TBCC）和火箭基组合循环（RBCC）是最有希望的高超音速组合动力形式。

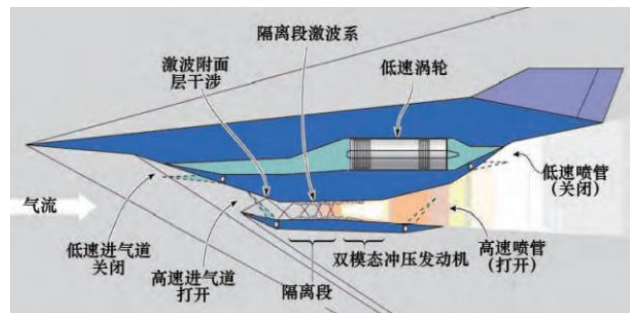
涡轮基组合循环系统（TBCC）又称为涡轮冲压组合发动机，包括串联式和并联式两种组合方式。串联式中涡轮发动机和冲压发动机前后同轴串置，通过控制导流叶片的开闭，达到在起飞和低速飞行时涡轮发动机工作，加速和高速飞行时冲压发动机工作，涡轮发动机和冲压发动机不能同时工作。并联式涡轮发动机加力燃烧室与冲压发动机燃烧室分开，两种发动机可同时或部分同时工作，但相比串联式存在结构复杂，空间尺寸大，与飞行器一体化设计困难等问题。

图 32：串联式涡轮冲压组合发动机



资料来源：《航空发动机科学技术的发展与创新》、
山西证券研究所

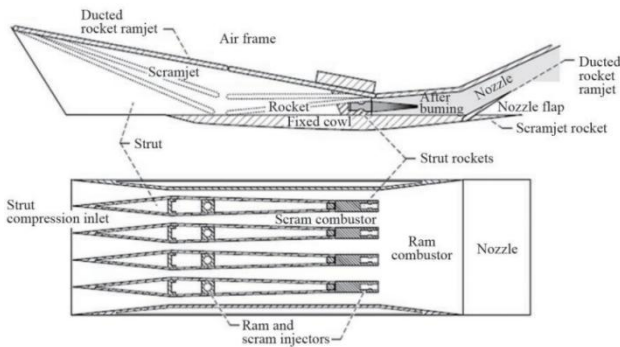
图 33：并联式涡轮冲压组合发动机



资料来源：《航空发动机科学技术的发展与创新》、
山西证券研究所

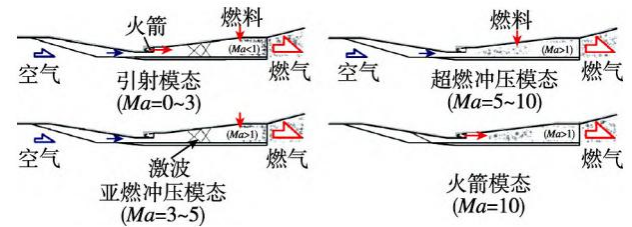
火箭基组合循环系统（RBCC）又称为火箭冲压组合发动机，通过将火箭发动机和吸气式发动机有机地组合在一起，可以在不同高度和速度范围内保持较高的推重比及比冲，大幅降低运输成本，是未来可重复使用天地往返运输和临近空间飞行器的最有潜力的动力方案之一。RBCC 发动机随着飞行速度的提高将分别经历引射模态、亚燃模态、超燃模态和纯火箭模态。

图 34: Strutjet RBCC 发动机



资料来源:《火箭基组合循环动力研究进展》、山西证券研究所

图 35: RBCC 发动机不同工作模式

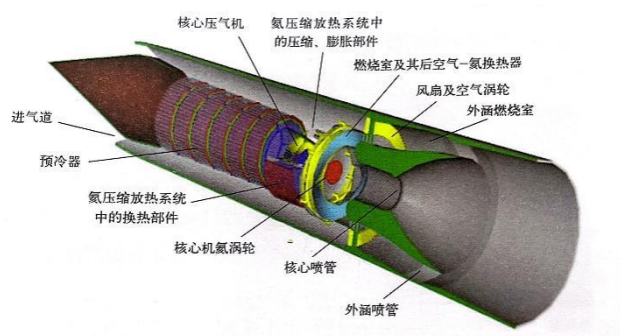


资料来源:《火箭基组合动力研究进展与关键技术》、山西证券研究所

2.2.7 超音速强预冷发动机

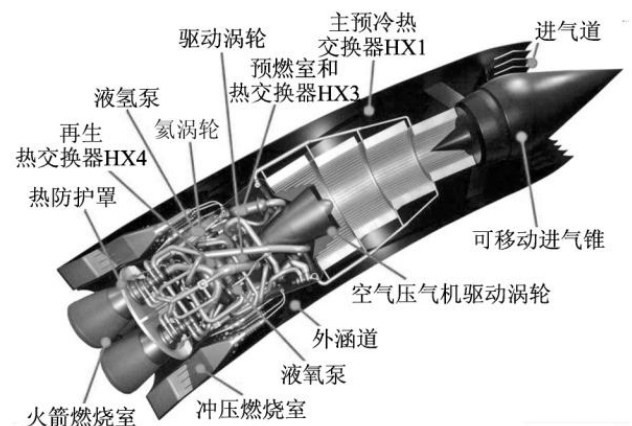
实现高超音速飞行的另一种方案是强预冷。预冷是指将进入发动机的高温空气冷却到航空涡轮发动机能正常工作的温度,进而获得性能提升及扩展涡轮发动机的工作范围。英国喷气发动机公司 REL 在 20 世纪 80 年代提出强预冷技术方案,并在 2012 年 11 月宣布该方案地面试验成功,并以这种方案为基础研发了弯刀 (Scimitar) 和佩刀 (Sabre) 两种强预冷发动机。弯刀发动机采用常规涡轮发动机加上强预冷系统,用于 Ma=5 的高超音速飞机,佩刀发动机从原理方案看,是弯刀发动机与火箭发动机的组合,用于 Skylon “云霄塔” 航天飞行器。

图 36: 弯刀 (Scimitar) 发动机结构图



资料来源:《航空发动机-飞机的心脏》、山西证券研究所

图 37: 佩刀 (Sabre) 发动机结构图



资料来源:《预冷高超声速发动机发展及应用研究》、山西证券研究所

3. 产业链分布

航空发动机产业链主要包括发动机主承包商、子系统供应商、小部件及零组件供应商、原材料供应商四个层次，涵盖研发设计、加工制造和运营维护三大环节。航空发动机主承包商将核心能力定位于设计、工程和系统集成，主要进行总体设计、系统集成、市场销售和售后服务等，并研发、制造部分关键分系统和零部件，其余大量的分系统和部件均转包或者分包给其他专业化公司。航空发动机主承包商是产业链的链长，负责供应链系统的搭建和维护，居于产业链的核心地位。2016年成立的中国航空发动机集团公司（简称“中国航发”）是我国最主要的发动机主承包商，其旗下的航发动力是我国军用航空发动机唯一整机上市公司，航发动力的产品几乎涵盖了国内所有军用型号航空发动机。中国航发成立之初就明确了“小核心、大协作，专业化、开放型”的发展模式，我国航空发动机产业经过数十年的发展已形成涉及政府、军方、中国航发、国有企业、民营企业、高校和科研院所等多方主体融合的军民融合产业体系。

图 38：我国航空发动机科研生产体系创新主体构成

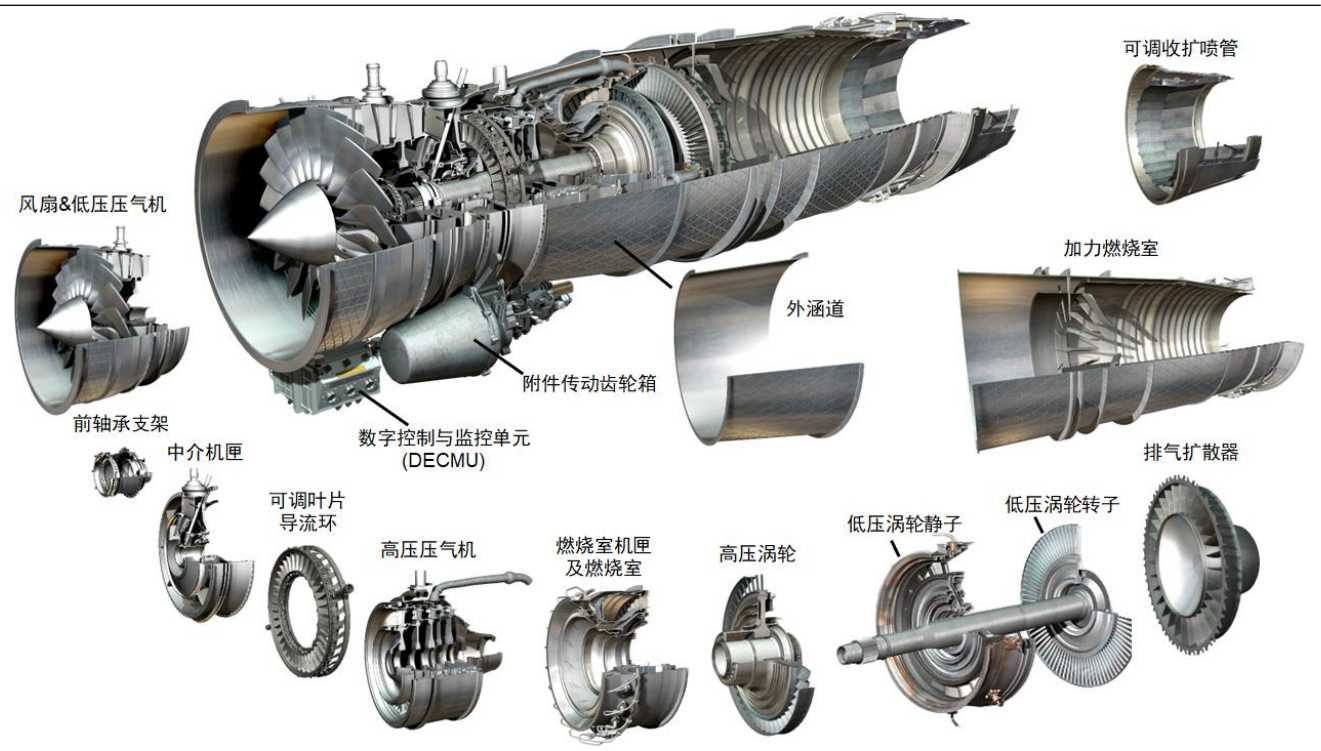


资料来源：《航空发动机关键核心技术攻关的组织策略研究》、山西证券研究所

3.1 零部件

燃气涡轮发动机一般是由燃气发生器（压气机、燃烧室、涡轮）、进排气管（进气道、尾喷管）、滑油系统、燃油系统、空气系统、电气系统及附件传动部件组成，此外还有减速器和动力涡轮（涡轮螺旋桨发动机和涡轮轴发动机），风扇和低压涡轮（涡轮风扇发动机）等部件。按照零部件结构形式的不同，发动机零部件可分为盘类件、轴类件、鼓筒、环形机匣及环形件、箱式机匣和叶片等。零部件按毛坯提供方式可以分为锻件、铸件和钣金件。现代航空发动机结构极为复杂，一般而言，单个民用航空发动机零部件数量接近两万件。

图 39：EJ200 零部件示意图



资料来源：Eurojet、山西证券研究所

高性能航空发动机要求在极有限的自重与工作空间、极恶劣的工作条件下保证长期可靠的工作性能，大量采用了复杂的整体轻量结构，同时大量应用了高性能钛合金、高温合金以及复合材料等难加工材料，对制造技术要求极高。先进工艺技术贯穿在航空发动机的整个研制生产过程甚至全寿命周期，装备是工艺技术的载体，只有掌握了先进的工艺和装备技术，才能满足制造高性能航空发动机的需求。

表 9：航空燃气涡轮发动机不断涌现的新技术

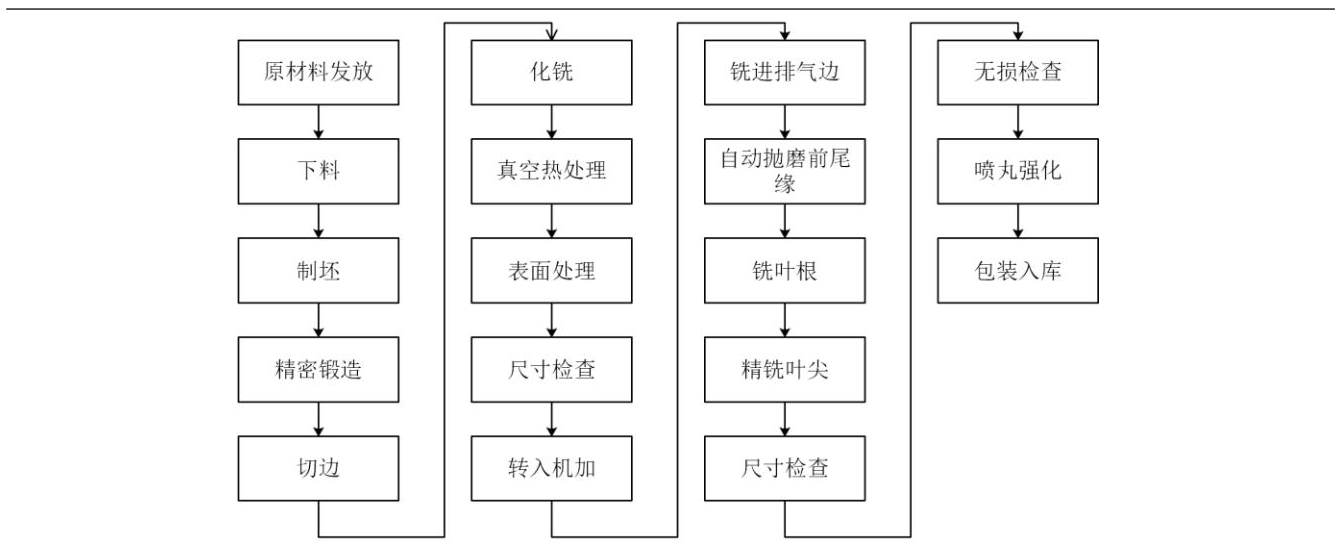
年代	1940-1959	1959-1969	1969-1979	1980-1999	2000-2020
技术 进展	机种 涡喷、涡桨、涡轴	涡喷、涡桨、涡轴、 涡扇	涡喷、涡桨、涡轴、 涡扇	涡喷、涡桨、涡轴、 涡扇	涡喷、涡桨、涡轴、 涡扇

年代	1940-1959	1959-1969	1969-1979	1980-1999	2000-2020
结构	轴流式压气机 加力燃烧室	环管燃烧室 可调喷管	三转子结构 环形燃烧室	宽弦叶片、空心叶片、 整体叶盘、矢量喷管	无盘转子、多点燃 油喷管
材料	高温不锈钢 钛合金	镍基合金	低温复材	单晶材料 低应力陶瓷	高温复材 金属间化合物
工艺	锻造、机加、抛光	复合加工、自动化 加工	粉末冶金、高速切 削	定向结晶铸造、超塑 成形、电化学加工	陶瓷成型、3D打 印、绿色加工

资料来源：《航空发动机零部件精密制造技术》、山西证券研究所

航空发动机典型零部件从成形制坯到加工制造的完整工艺技术链一般包含不同的工艺方法，由多个工艺和工序组成，涉及冷成形、热成形、热处理、机械加工等专业，上下游工艺和工序间的影响不可忽略，最终产品质量问题是全工艺周期各阶段、各工序等综合作用的集中体现。除通用机械加工制造技术之外，现代航空发动机制造特别关注的主要制造技术包括先进金属成型技术、先进焊接技术、特种加工技术、增材制造技术和表面处理技术。

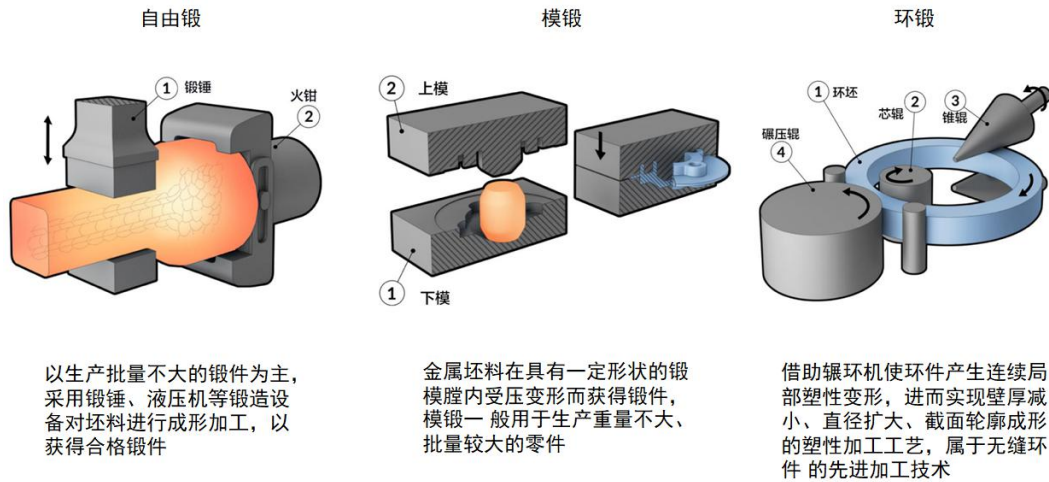
图 40：航空发动机叶片的工艺流程



资料来源：航亚科技招股说明书、山西证券研究所

铸造和锻造是最基本的热加工成形技术，大多数航空关键零件是采用铸造或锻造技术来生产毛坯的。相比于铸造，经过锻造的金属坯料组织变得更加致密，力学性能得到增强，同时锻造加工保证了金属纤维的连续性，具有更长的使用寿命，所以针对同种材料，锻造零件的力学性能一般优于采用铸造工艺制备的零件，但是铸造的优点在于可以大量生产形状复杂、用锻造工艺或者机加工很难生产的零件，尺寸精度高，机加工余量小且经济性好。目前航空发动机机的零部件锻件毛坯占毛坯总重量的一半以上。

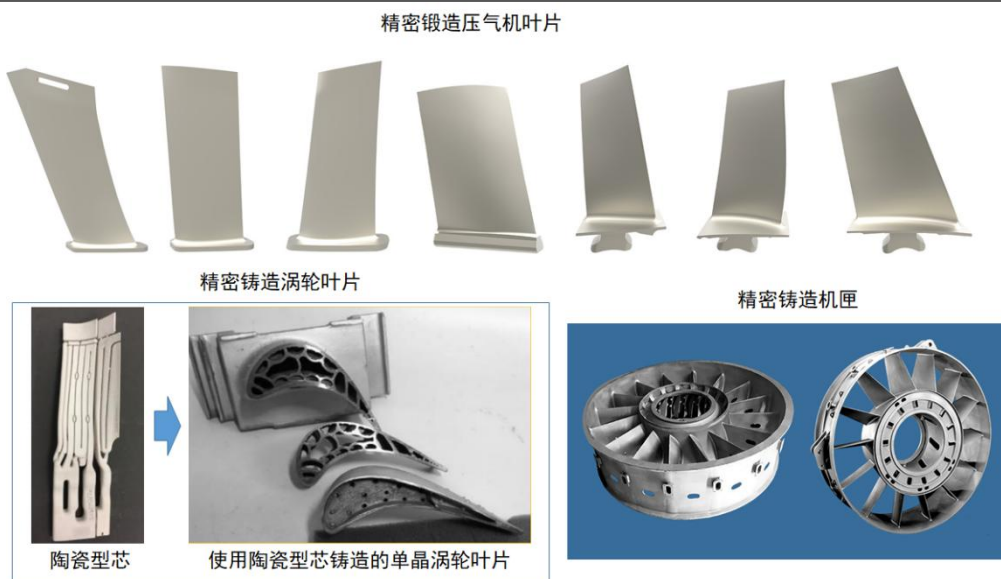
图 41：锻造工艺分类



资料来源：派克新材招股说明书、山西证券研究所

“近净成形”是目前先进金属成型技术的发展方向，毛坯制成后不再冷加工或者只需少量冷加工就可用作最终使用零件，提高了材料使用率，缩短了加工周期。先进金属成型技术主要包括了精密铸造、精密锻造、精密旋压和粉末冶金等技术，其中精密铸造技术广泛应用于空心薄壁、型腔复杂的涡轮叶片制造，精密锻造技术广泛运用于压气机叶片，根据《航空发动机叶片精锻成形可靠性技术》数据，全球约超过 90% 的航发叶片使用精锻制造技术进行生产，精密旋压技术在整流罩、燃烧室锥体、压气机外壳等零件上得到广泛应用，粉末冶金技术广泛用于涡轮盘制造。

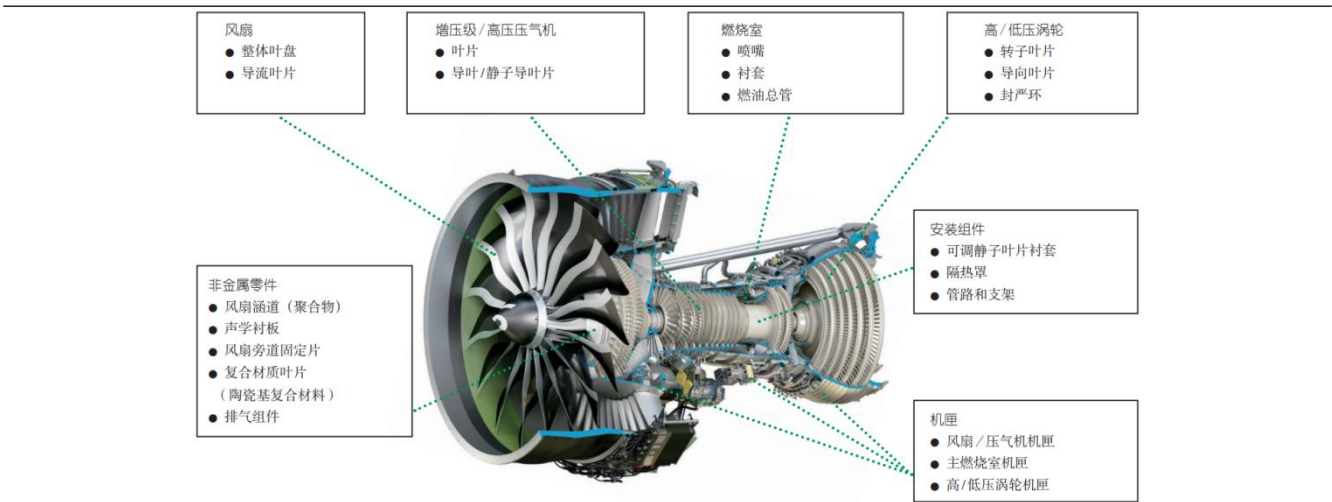
图 42：精密锻造和精密铸造发动机零部件



资料来源：《DEVELOPMENT OF ADVANCED CORES AND CASTINGS FOR IMPROVED GAS TURBINE PERFORMANCE》、PCC、hyatech、山西证券研究所

增材制造技术是基于零件的数字模型将复杂的三维零件分解成多层简单二维结构，然后逐层制造累加，最终实现零件的三维实体，也称为 3D 打印技术。该技术改变了传统的毛坯-加工-处理-装配的工艺流程，能够直接实现复杂结构的制造，在保证零部件性能的同时，简化工艺流程，缩短研制周期。目前航空发动机制造商和零部件供应商已将增材制造技术用于开发商业化的零部件，并不断扩大在航空发动机上的应用。

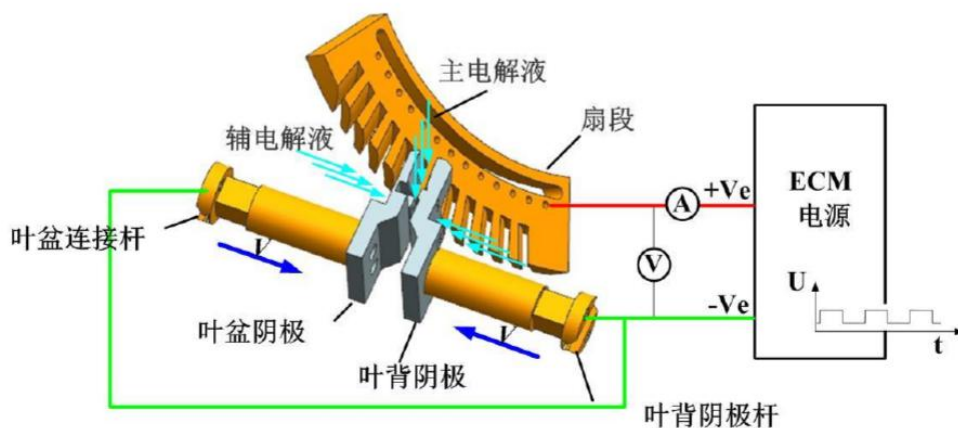
图 43：可增材制造的发动机零部件



资料来源：《风扇/压气机增材制造技术的应用与发展趋势》、山西证券研究所

特种加工技术是指加工过程中不需要利用比工件更硬的工具，也不需要施加明显的机械力，而是直接利用电能、热能、化学能、光能或者它们的组合，使工件材料被去除或改变性能，达到所需的形状、尺寸和表面质量要求。目前常用于先进航空发动机中的特种加工技术包括电加工、高能束流加工以及特种能源加工，其中电加工和高能束流加工被用于涡轮叶片气膜孔的加工，电加工还广泛应用于难切削复杂结构（整体叶盘、机匣、火焰筒等）的成形。

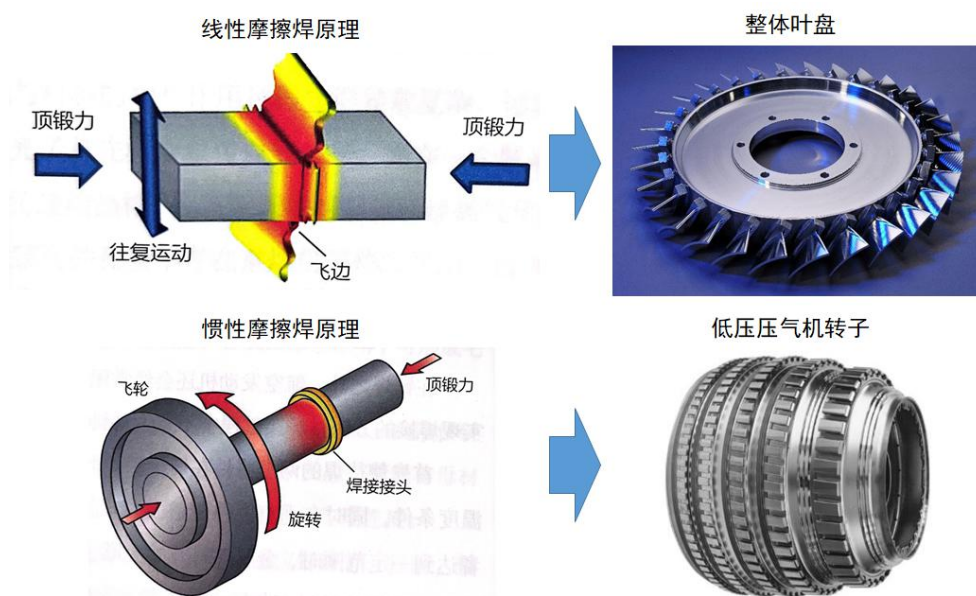
图 44：整体叶盘电解加工方法示意图



资料来源：《钛合金整体叶盘型面电解加工技术研究及机床装备研制》、山西证券研究所

焊接是一种优质高效的实现永久性连接的工艺方法，焊接方法从传统的电弧焊、钎焊，发展到先进的激光、电子束等高能束流焊和摩擦焊等固相焊。电子束焊是采用高速、高能量密度的电子束流作为热源进行焊接的工艺，具有深宽比大、焊接残余变形小、焊接工艺参数容易实现精确控制、在真空环境下焊缝纯净等特点，广泛应用于发动机整体转子、机匣和轴等重要结构的焊接。摩擦焊是利用摩擦生热的原理实现零件焊接的技术，接头强度和可靠性高，是承受较高应力零部件的较为可靠的焊接方法，用于航空发动机制造领域的摩擦焊技术主要包括惯性摩擦焊和线性摩擦焊，惯性摩擦焊需要待焊零件的一端通过旋转来完成，因此适合航空发动机盘轴类零件的焊接，线性摩擦焊被用于将叶片焊接到叶盘上形成整体叶盘。

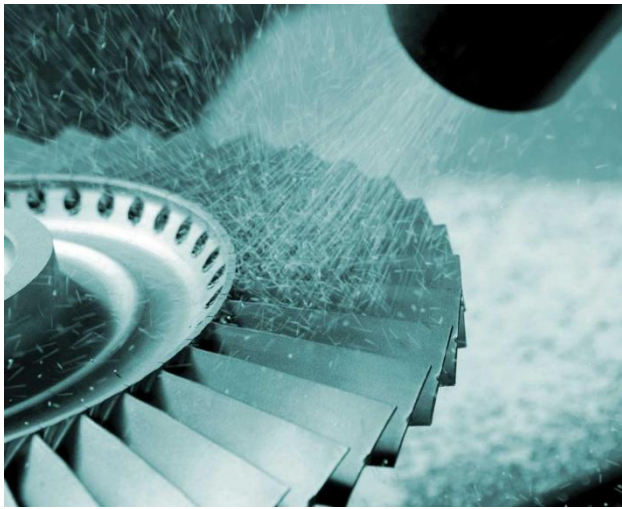
图 45：摩擦焊在航空发动机制造领域的应用



资料来源：《皇冠上的明珠-航空发动机》、AluStir、TWI、山西证券研究所

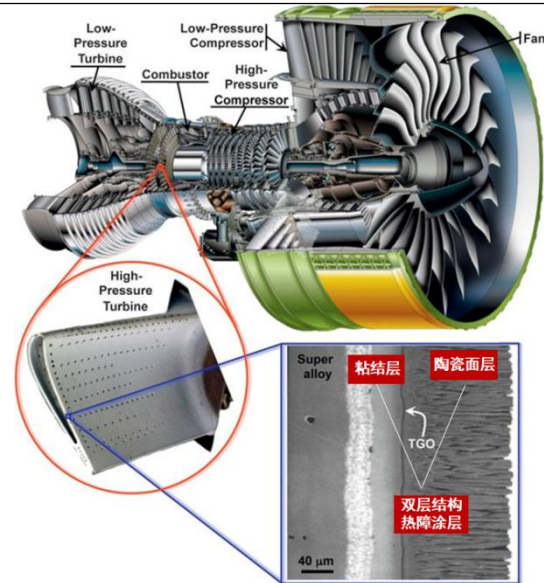
为了改善零部件的表面状态，满足零部件耐腐蚀、耐磨、抗氧化和耐高温等特殊功能性要求，提高零部件的服役寿命等，需要对零部件表面进行处理，航空发动机中常用的表面处理技术主要包括化学处理、表面强化和涂层技术。化学处理是通过腐蚀、电镀、阳极化等化学处理手段改善材料表面状态的一种表面改性工艺。表面强化是通过表层塑性变形，在零件表面形成高残余应力，提高表面应力集中的“冷变形”工艺，主要用于涡轮盘、压气机盘、叶片等的表面喷丸强化。涂层可分为封严、耐磨、热障等涂层，其中封严涂层可用于机匣组件，耐磨涂层可用于轴类零件，热障涂层可用于涡轮叶片。

图 46：喷丸强化



资料来源：ProgressiveSurface、山西证券研究所

图 47：应用于涡轮叶片的热障涂层



资料来源：谷歌、山西证券研究所

表 10：国内主要航空发动机零部件制造公司情况

公司代码	公司简称	主营业务	航空发动机零部件产品类型
600765.SH	中航重机	主要从事锻铸、液压环控等业务。锻造业务主要产品是飞机机身机翼结构锻件、中小型锻件，航空发动机盘轴类和环形锻件、中小型锻件，航天发动机环锻件、中小型锻件，燃气轮机叶片，核电叶片，高铁配件，矿山刮板，汽车曲轴等产品。铸造业务主要为汽车、工程机械等领域配套泵、阀、减速机液压铸件，叉车零部件、管道阀门以及航空等铸件。液压环控业务主要包括液压和热交换器两部分。	航空发动机盘轴类和环形锻件、中小型锻件
688239.SH	航宇科技	主要从事航空难变形金属材料环形锻件研发、生产和销售。按照应用领域划分，公司产品包括航空发动机环形锻件、航空发动机机匣等航空锻件、火箭发动机壳体等航天锻件、燃气轮机锻件、能源装备锻件等。	航空发动机环形锻件、航空发动机机匣锻件
605123.SH	派克新材	专业从事金属锻件的研发、生产和销售的高新技术企业。主营产品涵盖辗制环形锻件、自由锻件、精密模锻件等各类金属锻件，可应用于航空、航天、船舶、电力、石化以及其他各类机械等多个行业领域。	航空发动机机匣、燃烧室、密封环、支撑环、承力环等环锻件
300775.SZ	三角防务	主营业务为航空、航天、船舶等领域的锻件产品的研制、生产、销售和服务。公司目前的主要产品为航空、航天和船舶领域的锻件产品。	航空发动机的前轴颈、风扇盘、压气机盘、整流罩、涡轮轴、低压涡轮盘、高压涡轮盘、锥轴等盘类锻件
300855.SZ	图南股份	高温合金、特种不锈钢等高性能合金材料及其制品的研发、生产和销售。主要产品包括铸造高温合金、变形高温合金、特种不锈钢等高性能合金材料及其制品，主要应用在包含航空发动机、燃气轮机、核电装备等军用及高端民用领域。	铸造机匣

公司代码	公司简称	主营业务	航空发动机零部件产品类型
300034.SZ	钢研高纳	面向航空航天的高温合金、发动机精铸件、航空发动机盘锻件等；面向发电设备制造领域的燃气轮机涡轮盘、防护片等；面向石油、化工、纺织、冶金等领域的高温合金离心铸管及静态铸件、高温合金精铸件、切断刀等	铸造涡轮叶片、航空发动机盘锻件
600893.SH	航发动力	国内唯一能够研制涡喷、涡扇、涡轴、涡桨、活塞等全谱系军用航空发动机的企业	精密铸造涡轮叶片、精密锻造压气机叶片
603308.SH	应流股份	专注于高端装备核心零部件的研发、制造和销售，主要产品为泵及阀门零件、机械装备构件，应用在航空航天、核电、油气、资源及国防军工等高端装备领域。	叶片、机匣、喷嘴环、导向器等高温合金热端部件
000534.SZ	万泽股份	主营业务为微生态活菌产品、高温合金及其产品的研发、生产及销售。高温合金业务方面专注高温合金材料和核心部件的研发制造，致力于研发、生产具有自主知识产权和国际竞争力的精密铸造叶片、高温合金粉末盘件、高温母合金及其合金粉末等	精密铸造叶片和粉末涡轮盘
688510.SH	航亚科技	专注于航空发动机关键零部件及医疗骨科植入锻件的工程化研发、专业化制造和零部件系统集成。	航空涡扇发动机压气机叶片、转动件及结构件（整体叶盘、整流器、机匣、涡轮盘及压气机盘等盘环件、转子组件等）
430513.NQ	中科三耐	高温合金母合金材料、船用增压器叶片、工业燃气轮机热端涡轮叶片、重型燃气轮机热端涡轮叶片、航空航天用特种精密铸件、玻璃棉喷吹离心器等	航空发动机叶片
688333.SH	铂力特	专注于工业级金属增材制造（3D 打印）的国家级高新技术企业，为客户提供金属增材制造全套解决方案，业务涵盖金属 3D 打印设备的研发及生产、金属 3D 打印定制化产品服务、金属 3D 打印原材料的研发及生产、金属 3D 打印结构优化设计开发及工艺技术服务（含金属 3D 打印定制化工程软件的开发等）	高温合金复杂机匣、燃油喷嘴、空心叶片、散热器
300696.SZ	爱乐达	航空零部件的数控精密加工、特种工艺处理和部组件装配。产品包括飞机机头、机身、机翼、尾翼及起落架等各部位相关零部件、发动机零件以及航天大型结构件。	风扇机匣、中介机匣、燃烧室外涵机匣等零件
A22167.SZ	航安型芯	长期专注于航空发动机、燃气轮机（“两机”）领域的特种陶瓷产品，主营业务为熔模铸造用陶瓷型芯及铝硅质陶瓷坩埚的研发、生产及销售。	陶瓷型芯（涡轮叶片的熔模铸造过程中用于形成叶片复杂精密内腔）
688237.SH	超卓航科	国内少数掌握冷喷涂增材制造技术并产业化运用在航空器维修再制造领域的企业之一，主要从事定制化增材制造和机载设备维修业务。	航空紧固件（卡箍产品）

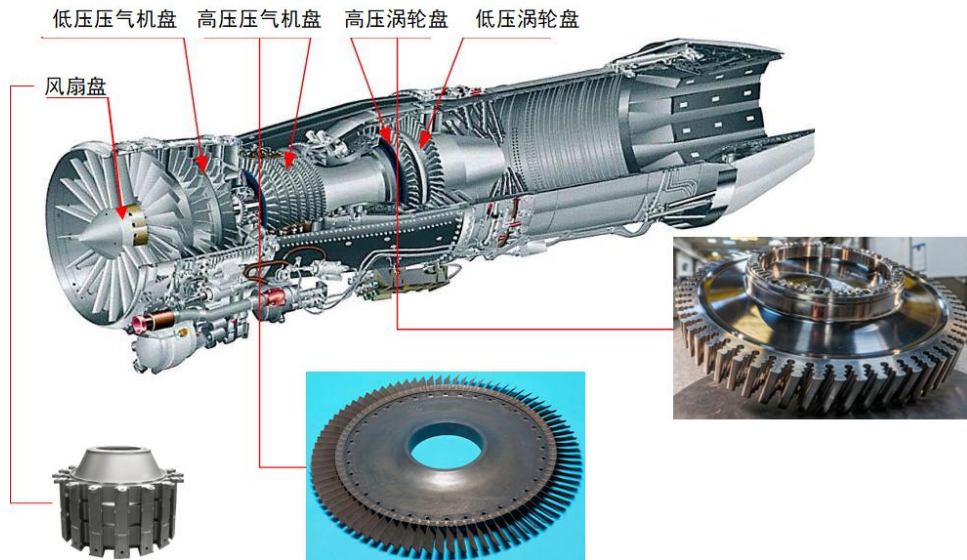
资料来源：WIND、公司官网、山西证券研究所

3.1.1 盘类件

航空发动机盘类件主要包括压气机盘和涡轮盘，其主要工作于高转速、高温和高压环境下。压气机盘的工作温度一般在 0~430℃，涡轮盘的工作温度一般在 500~800℃，二者转速一般都在 1000r/min 以上，工

作状态下的盘类件承受了很大的应力。

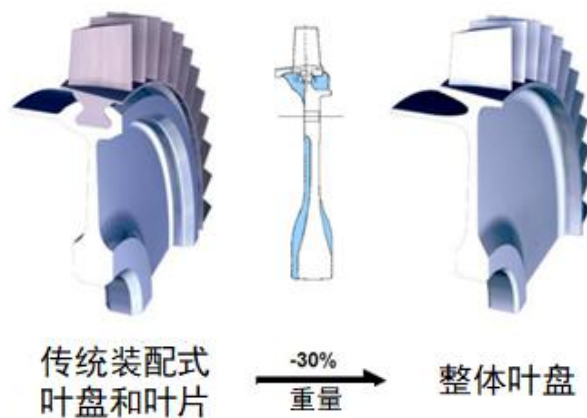
图 48：典型的航空发动机盘类件



资料来源：谷歌、山西证券研究所

压气机盘包括风扇盘、低压压气机盘和高压压气机盘，风扇盘和低压压气机盘一般选用钛合金，高压压气机盘选用钛合金和高温合金，随着工艺技术的不断提高，目前将叶片和轮盘作为整体的整体叶盘结构在压气机中得到了广泛应用，有效减轻了结构重量，避免榫头和榫槽的气体逸漏和磨损，提升了航空发动机的使用性能和寿命。涡轮盘的工作环境较恶劣，材料一般选用变形高温合金和粉末高温合金。航空发动机盘类零件的加工工艺过程主要包括毛坯制造、机械加工、热处理、无损检测和静平衡等。盘类件毛坯批产零件通常采用模锻件，新机研制多采用自由锻件。

图 49：压气机中的整体叶盘

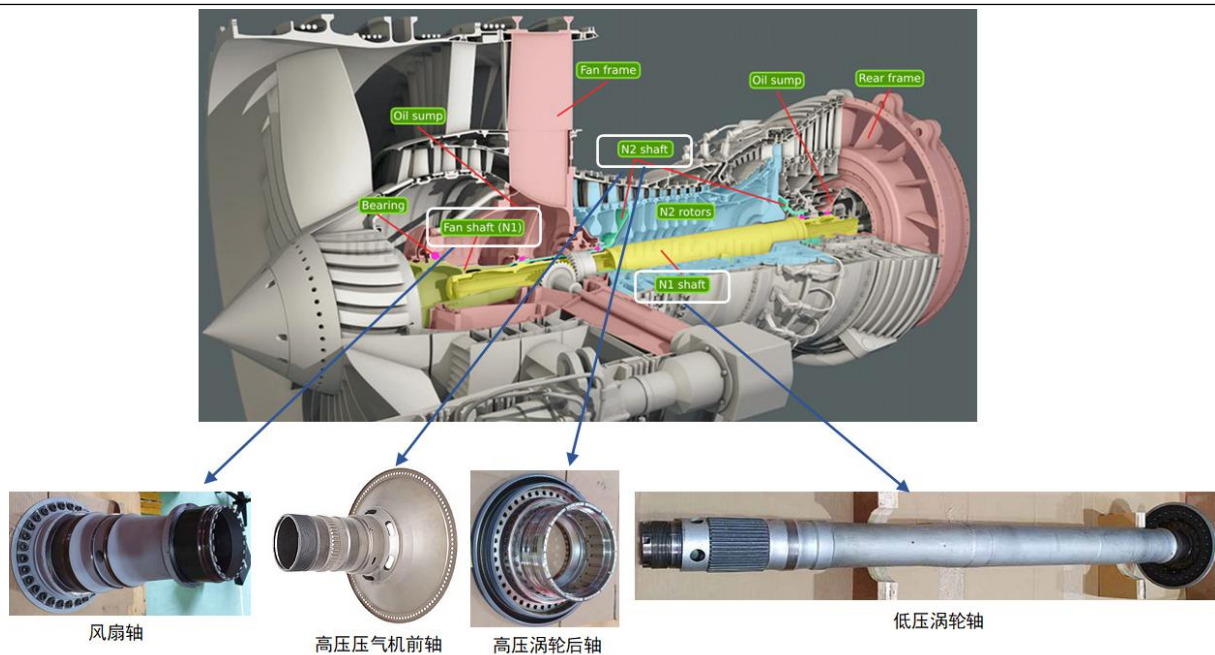


资料来源：《An activity-based-parametric hybrid cost model to estimate the unit cost of a novel gas turbine component》、山西证券研究所

3.1.2 轴类件

轴类件是指用于连接、传递扭矩且具有一定强度和刚性及长径比的回转类零件，航空发动机的轴类零件主要是指压气机轴、风扇轴、涡轮轴等，对于涡轴和涡桨发动机还包括自由涡轮轴，它们与相应的盘件、叶片组成风扇转子、压气机转子和涡轮转子，并通过联轴器连成整体，通过轴承支撑高速旋转。轴类零件位于旋转中心，相比叶片及盘类零件工作温度较低，一般低于 400℃。

图 50：CMF-56 主要轴类零件



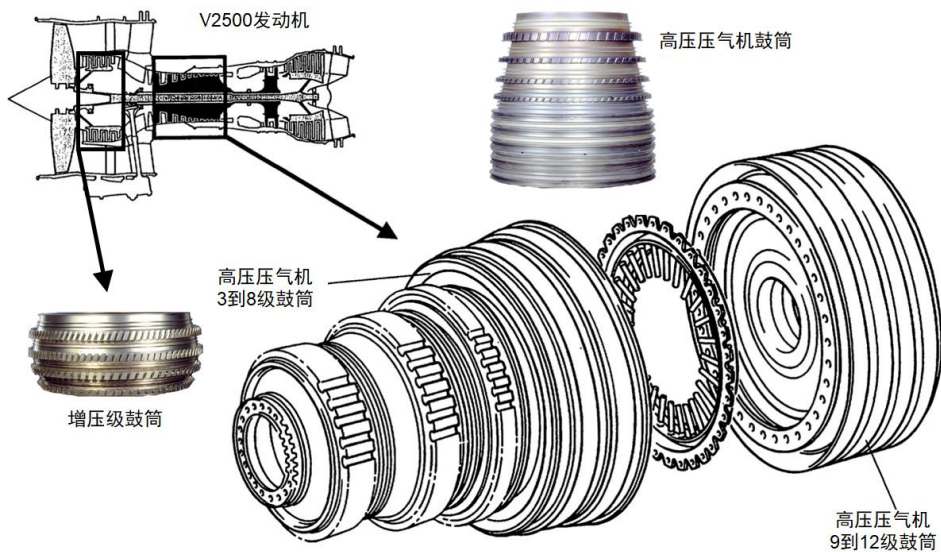
资料来源：MTU、aviationfleetsupport、DeviantArt、山西证券研究所

风扇轴和压气机轴的工作温度较低，可选用比强度高的钛合金。涡轮轴工作温度较高，多选用合金结构钢、不锈钢或高温合金。涡轮轴、压气机轴颈、高压涡轮后轴、鼓筒轴等外表面直径差大，强度要求高，一般采用模锻件。压气机轴的外表面直径差不大，可选用棒料。

3.1.3 鼓筒

为了提高发动机性能，发动机鼓筒组件从单盘的机械紧固连接结构发展成整体化、一体化结构，主要包括风扇单元体中的增压级整体鼓筒和高压压气机中的焊接鼓筒。鼓筒与相应的叶片、盘、轴颈等零件组成转子，是发动机的关键转动件，鼓筒工作于高速、高压的环境，高压压气机鼓筒工作温度为 200~600℃。

图 51: V2500 发动机增压级和高压压气机中的鼓筒



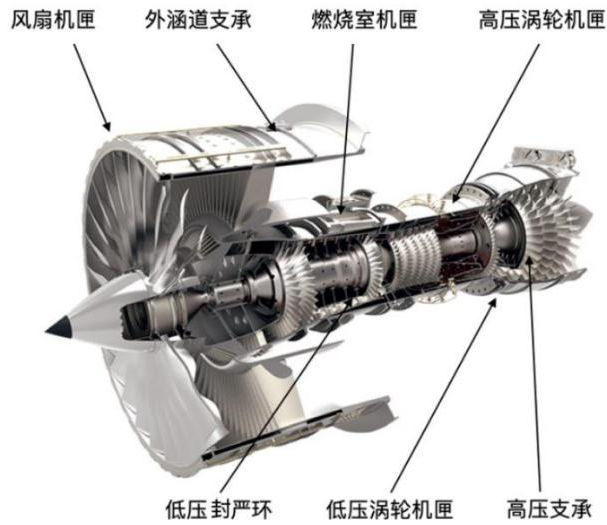
资料来源：IAE、山西证券研究所

增压级鼓筒材料通常选用钛合金，高压压气机前鼓筒材料通常选用钛合金，后鼓筒材料通常选用高温合金，增压级鼓筒毛坯为模锻件。

3.1.4 环形机匣和环形件

机匣是航空发动机的主要零组件，起着支撑、传力和气体封严等作用，各段机匣间相互连接，共同构成发动机的外壳，按照机匣的结构形式可以分为环形机匣和箱体机匣两大类。发动机环形机匣按照机匣在航空发动机上的位置可分为进气机匣、风扇机匣、压气机机匣、中介机匣、燃烧室机匣、外涵机匣、涡轮导向器、涡轮后机匣等。环形机匣按其结构特点可分为开式环机匣、整体式环机匣和带整流支板的环形机匣。燃烧室机匣、涡轮机匣等热端部件工作温度高且周向变形不均匀，均采用整体环形机匣，大多数压气机机匣由于工作温度不高，周向变形不均匀问题不突出，一般采用对开环形机匣，进气机匣、中介机匣、涡轮后机匣等属于带整流支板的机匣，结构复杂，是发动机上的主要承力件。环形件在发动机部、组件中所处的位置不同，按功能可分为承力环形件、连接环形件等。

图 52：航空发动机的主要环形机匣及环形件



资料来源：派克新材招股说明书、山西证券研究所

图 53：不同类型的环形机匣



资料来源：谷歌、山西证券研究所

环形机匣类零件的材料通常选用钛合金和高温合金，少量环形机匣选用不锈钢、复合材料等，例如压气机机匣通常选用不锈钢和钛合金，燃烧室机匣和涡轮机匣通常需用高温合金，外涵机匣采用了复合材料。环形件通常选用铝合金，结构钢、不锈钢，高温合金和钛合金。

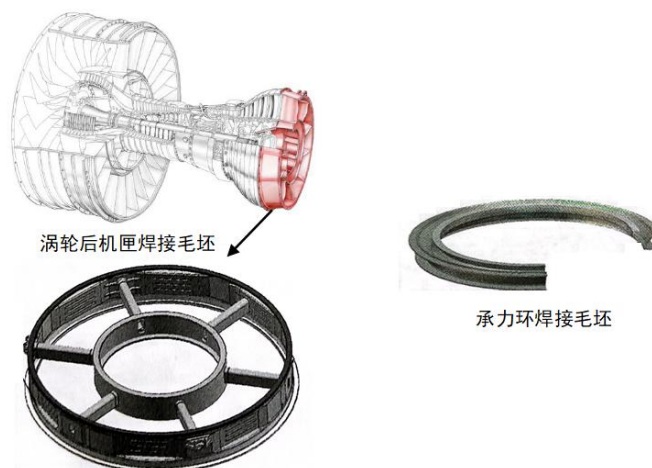
图 54：风扇机匣和外涵机匣开始采用复合材料



资料来源：《航空发动机用树脂基复合材料应用进展与发展趋势》、山西证券研究所

环形机匣和环形件毛坯通常采用锻造毛坯、铸造毛坯和焊接毛坯三大类型。由于在相同材料的条件下锻件的机械强度和冲击韧性比铸件高，工艺过程比较简单，因此大部分的环形机匣壳体及环形件都采用锻造毛坯，环形机匣毛坯的锻造方法有自由锻、辊轧和模锻，环形件的锻造方法有自由锻和辊轧。对于结构复杂、机械加工工艺性差、零件刚性要求好的机匣壳体及环形件需要采用铸造毛坯。焊接机匣是将组成机匣的不同毛坯，如锻件、铸件和钣料等，通过焊接形成一个新的毛坯。

图 55：典型焊接机匣壳体及环形件毛坯



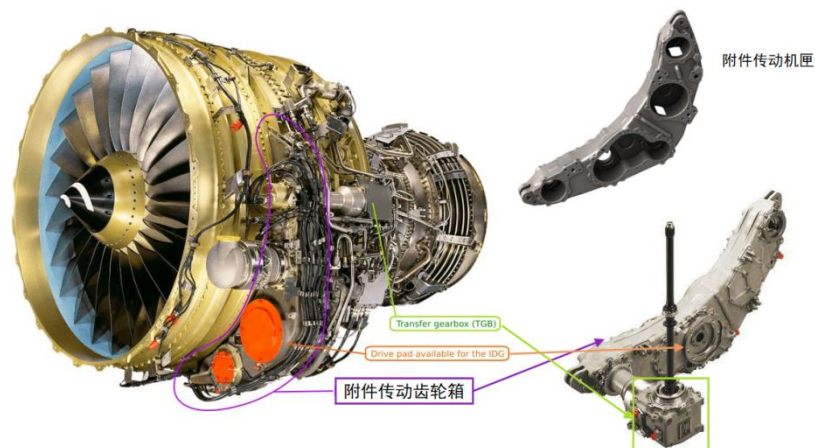
资料来源：《航空制造工程手册》、山西证券研究所

3.1.5 箱体机匣

航空发动机的箱体机匣是指中央传动机匣、附件传动机匣、减速器机匣、滑油箱机匣、滑油泵机匣和双速传动机匣等。箱体机匣大部分安装在发动机外部，中心传动机匣虽在发动机内部，但也在高、低压气

机的轴心部分，工作环境温度较低。箱体机匣一般选用铝合金和镁合金，镁合金相比更轻，是箱体机匣采用最多的材料，箱体机匣通常采用铸造毛坯。

图 56：CFM56 附件传动机匣

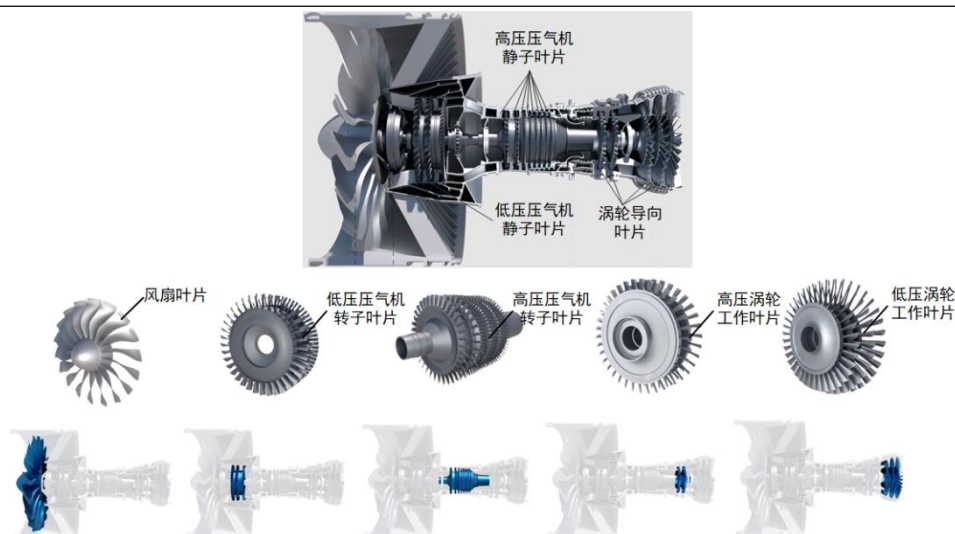


资料来源：CFM、山西证券研究所

3.1.6 叶片

叶片按照主要功能可以分为风扇叶片、压气机叶片和涡轮叶片。叶片是发动机关键部件，工作条件苛刻，在转子高速转动下，承受的离心力很大，同时压气机叶片和涡轮叶片还要承受高温高压气体的热冲击，高温高压气体的温度从几百度到上千度不等，叶片在承受这些交变应力及热应力时最容易产生疲劳破坏，因此叶片的可靠性要求极高。

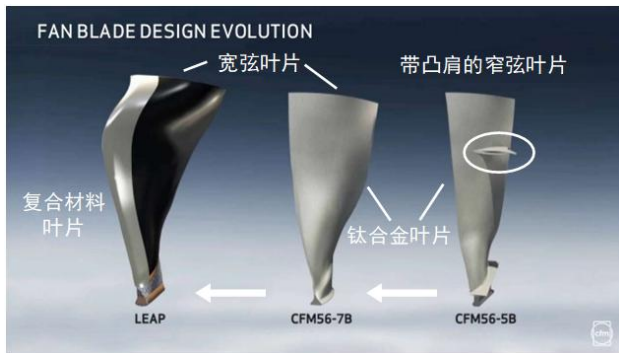
图 57：航空发动机叶片



资料来源：MTU、山西证券研究所

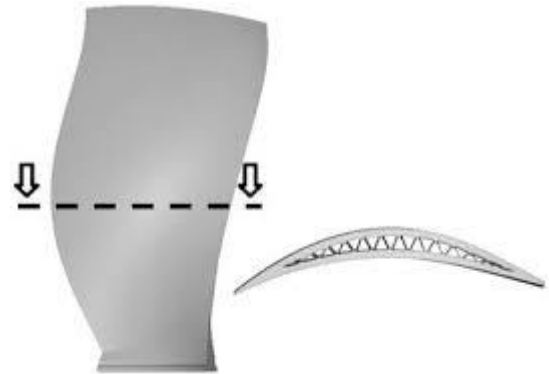
风扇叶片根据展弦比的不同分为窄弦风扇叶片和宽弦风扇叶片。窄弦风扇叶片是早期结构，为了提高抗震和抗外物打伤能力，常常在叶身部位带有凸肩。宽弦风扇叶片不带凸肩，分为实心叶片和空心叶片。钛合金宽弦风扇叶片自 20 世纪 90 年代已得到广泛应用，随着发送机性能的不不断提升，整体叶盘和复合材料风扇叶片也开始得到应用。风扇叶片一般采用锻件毛坯。

图 58：风扇叶片的发展



资料来源：CFM、山西证券研究所

图 59：宽弦空心叶片（三角桁架结构）



资料来源：谷歌、山西证券研究所

压气机叶片分为压气机转子叶片和压气机静子叶片，其中压气机静子叶片根据其安装结构分为带安装板类静子叶片和带旋转轴静子叶片两类，压气机叶片毛坯一般选择锻件，材料多为钛合金和高温合金。

图 60：压气机静子叶片



带旋转轴颈静子叶片

带安装板类静子叶片

资料来源：谷歌、山西证券研究所

涡轮叶片包括涡轮工作叶片和涡轮导向叶片。涡轮工作叶片包括高压涡轮工作叶片和低压涡轮工作叶片。高压涡轮工作叶片一般只有一级，主要由榫头、缘板和叶身组成，几乎所有的高压涡轮工作叶片都不带叶冠，由于高压涡轮工作叶片承受的温度更高，所以一般采用带冷却气膜孔的空心叶片。低压涡轮工作叶片级数比高压涡轮工作叶片多，一般 1~5 级，结构上除了与高压涡轮工作叶片都有榫头、缘板和叶身外，

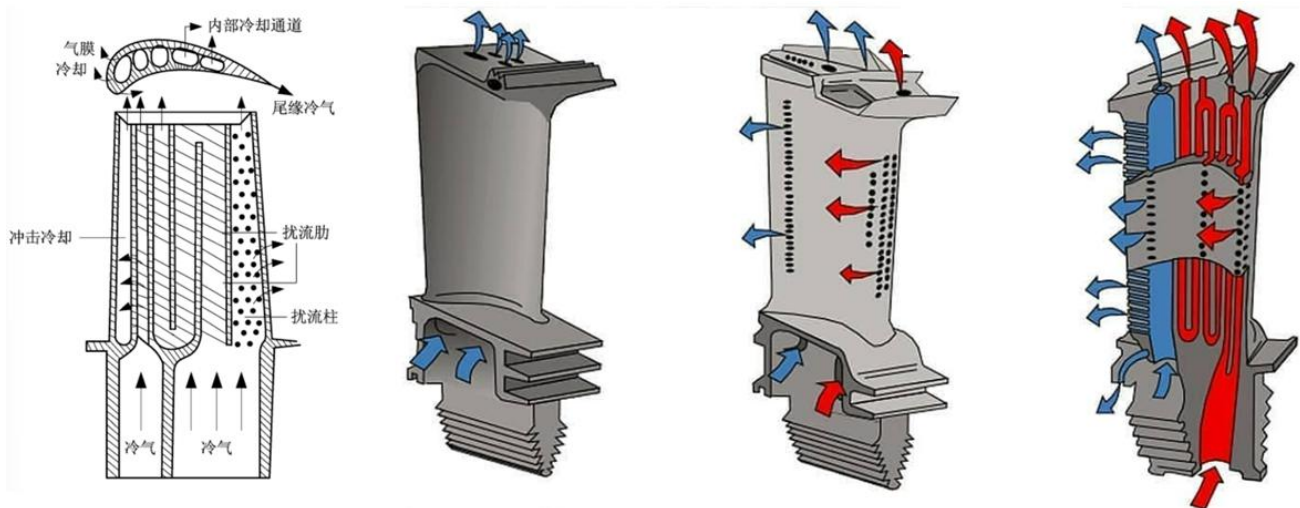
低压涡轮工作叶片一般带叶冠，用来减少叶片叶尖与机匣之间的漏气和吸收振动能量，另外由于低压涡轮工作叶片工作温度相对低一些，并且随着级数增加工作温度越来越低，所以低压涡轮工作叶片只有部分是空心的，后几级叶片一般是实心的。由于涡轮叶片为合金化程度更高的高温合金，并且大部分为空心薄壁结构，型腔复杂，难以锻造成型，只有采用铸造工艺才能满足要求。

图 61：涡轮工作叶片



资料来源：《航空制造工程手册》、山西证券研究所

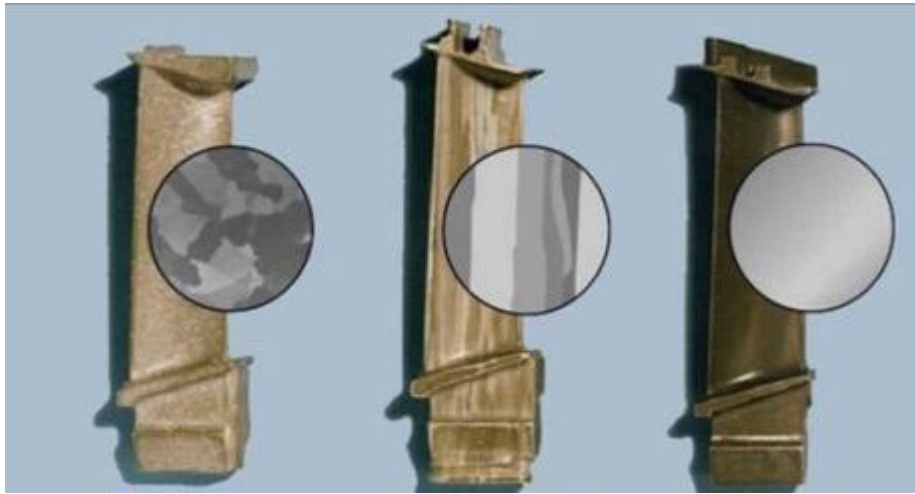
图 62：涡轮叶片采用复杂的内腔结构设计实现内部冷却



资料来源：《航空发动机的故事》、山西证券研究所

随着航空发动机涡轮前温度的不断提高，工作条件日益苛刻，涡轮叶片材料的选择不断发生里程碑式变革，经历了从变形高温合金，等轴晶铸造高温合金、定向凝固柱晶高温合金、单晶高温合金、Ti-Al 系金属间化合物到陶瓷基复合材料的变化。

图 63：等轴晶铸造高温合金、定向凝固柱晶高温合金、单晶高温合金叶片（从左至右）

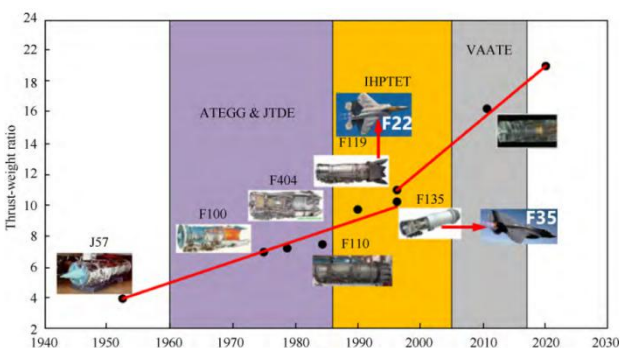


资料来源：《航空涡轮喷气发动机技术发展》、山西证券研究所

3.2 材料

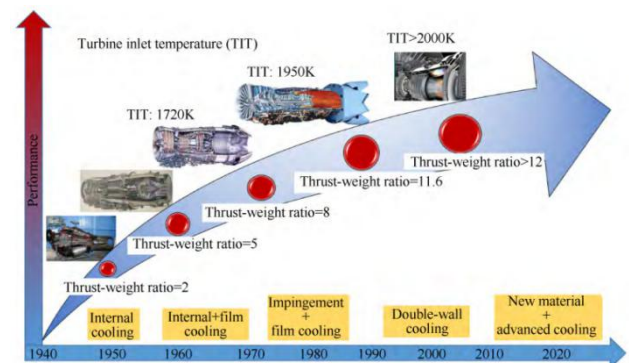
由于航空发动机长时间工作于高温、高压和高转速的恶劣环境下，对于材料的性能提出了极高的要求，通过总结航空发动机过去的发展历史，可以说一代新材料引领一代新型发动机，根据《先进材料在航空航天中的应用》数据，在未来航空发动机性能的提高中，新材料贡献率将达到 50% 以上。航空发动机结构演进的目标是提高推重比、功率重量比，增压比和涡轮前温度，这些性能指标的提升要求航空发动机材料具备高比强度以及耐高温性。在航空发动机涡轮和风扇设计水平相同的前提下，涡轮前温度每提高 100 摄氏度，发动机推力增加 15%，提高涡轮前温度可直接提升航空发动机的综合性能，推重比 15~20 以上的发动机，涡轮前温度最高达 2227~2470℃，航空发动机材料的耐高温性能显得尤其重要。

图 64：典型型号航空发动机推重比演进



资料来源：《陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展》、山西证券研究所

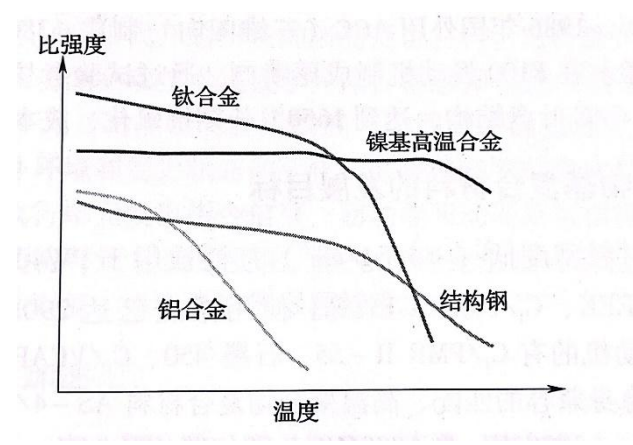
图 65：涡轮前温度和冷却技术的演进



资料来源：《陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展》、山西证券研究所

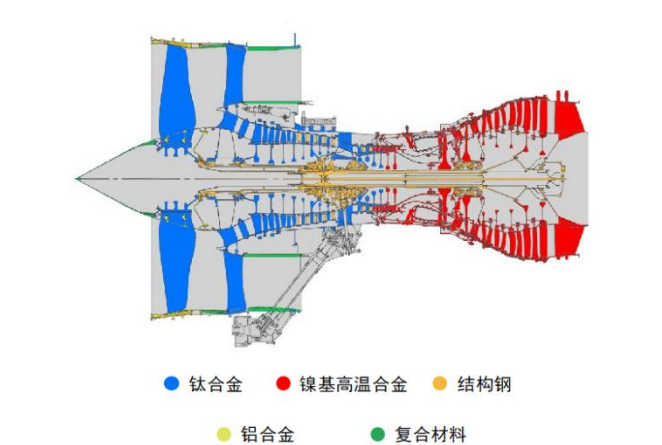
目前航空发动机的主要材料包括高温合金、钛合金、复合材料、铝合金和结构钢等，按重量占比看，高温合金占 55%~65%，钛合金占 25%~40%，铝合金和钢占 10%，复合材料占比低是由于其低密度优点造成的。高温合金是能够在 600℃以上的高温环境下抗氧化或耐腐蚀，并能在一定应力条件下长期工作的金属材料，是燃气涡轮发动机热端部件不可替代的关键材料。钛合金相比高温合金、钢等金属材料，具有低密度、高比强度、抗疲劳、耐腐蚀、工作温度范围宽等优良性能，轻质高强，减重效益显著，是航空发动机低温部件的主要材料。复合材料具有重量轻、强度高、模量大等特点，目前在航空发动机中使用最广泛的复合材料有用于低温部件的树脂基复合材料，用于高温部件的陶瓷基复合材料、碳-碳复合材料和金属基复合材料等。

图 66：不同材料的典型比强度-温度适用范围



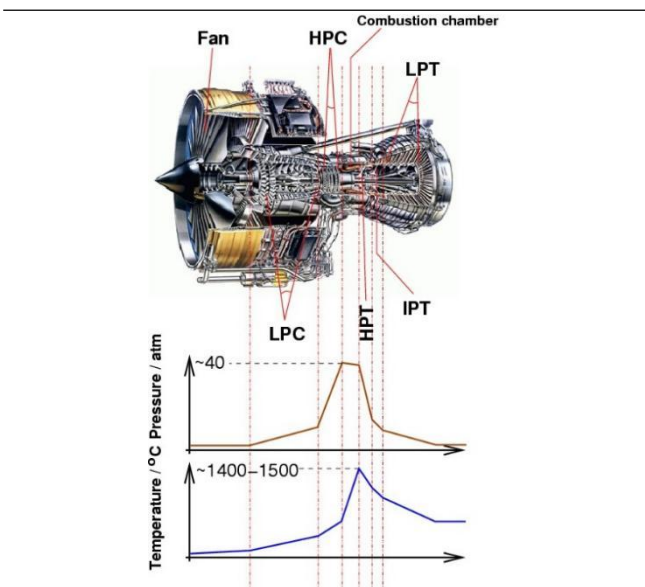
资料来源：《航空材料技术》、山西证券研究所

图 67：典型航空发动机用材的分布示意



资料来源：Rolls-Royce、山西证券研究所

图 68：Trent 800 不同部分的工作温度和压强曲线



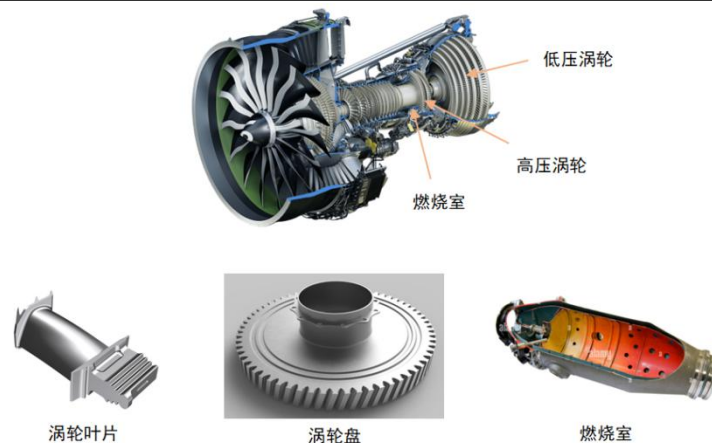
资料来源：Rolls-Royce、山西证券研究所

四代战斗机及未来的隐身飞机对发动机的隐身性提出了较高的要求，发动机产生的雷达散射信号和红外辐射信号占整个飞机尾部方向特征信号的 95%以上，如果发动机不能实现后向的隐身，则隐身飞机无法实现全方位的隐身，其作战能力将大打折扣，隐身材料的应用可以在不改变结构设计的前提下降低红外辐射和雷达散射截面（RCS），F119 和 F135 发动机就采用了大量的隐身涂层，比如红外隐身涂层和雷达吸波涂层。

3.2.1 高温合金

高温合金是指以铁、钴、镍为基，加入大量强化元素，能在 600℃ 以上高温及一定应力作用下长期可靠工作的一类金属材料。高温合金主要用于制造发动机涡轮热端部件，主要包括涡轮盘、涡轮导向叶片、涡轮工作叶片、燃烧室和加力燃烧室的各种零部件。

图 69：航空发动机热端部件及其零件

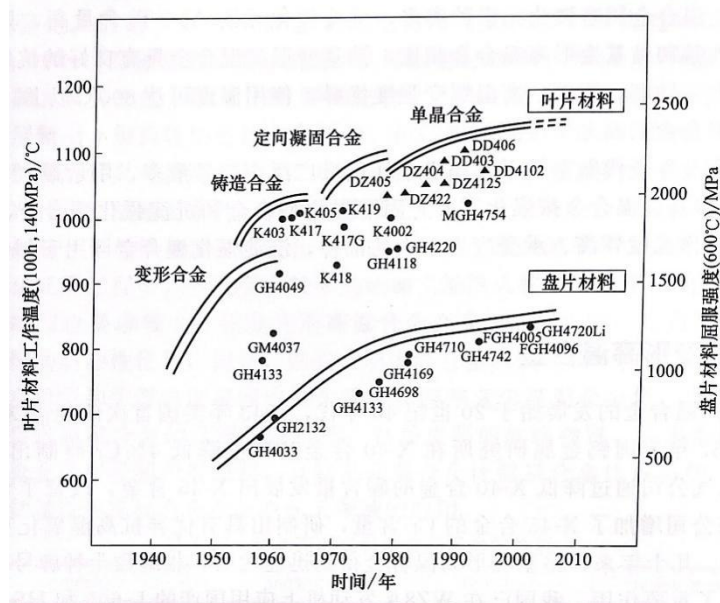


资料来源：维基百科、山西证券研究所

根据合金基体元素不同，高温合金可以分为铁基、镍基和钴基三类，其中镍基高温合金在航空发动机中使用最广泛，牌号最多，用量最大，占到发动机总重量的 50~65%。根据合金材料成型方式，高温合金可分为变形合金、铸造合金和粉末冶金合金。变形合金加工变形性能良好，可通过冷、热加工制备出各种型材或零件毛坯，是最早用于航空发动机的高温合金。随着航空发动机的发展，为了提高热强性能，变形高温合金中相继加入多种合金元素，导致变形加工愈发困难，铸造高温合金应运而生，铸造高温合金元素总量显著高于变形合金，持久强度和抗拉强度都明显高于变形高温合金，可以不再考虑锻造变形能力，可通过精密铸造方法或定向凝固工艺铸造出形状复杂且有通畅内腔的无余量空心薄壁叶片，铸造高温合金按凝固方法可分为等轴晶铸造高温合金、定向凝固柱晶高温合金和单晶高温合金三类，目前各国先进航空发动机都采用定向、单晶高温合金制造涡轮叶片。随着高温合金工作温度和强度的不断提升，合金中的强化元

素含量不断增加，成分越来越复杂，热加工性能变得很差，不少高性能镍基高温合金只能以铸态使用，但是由于铸造组织偏析严重，导致了显微组织的不均匀和力学性能波动，从而开始使用粉末冶金工艺生产高温合金，粉末高温合金主要用于制造涡轮盘、压气机盘、鼓筒轴、涡轮盘等发动机热端高温承力转动部件。

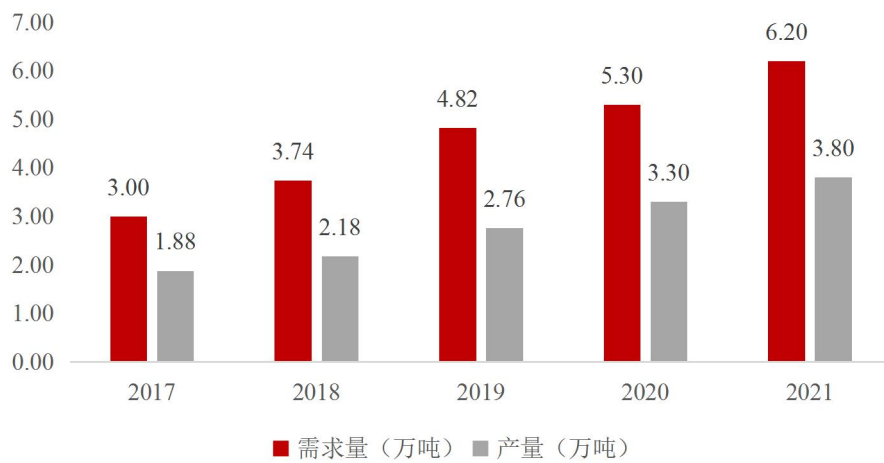
图 70：高温合金在叶片和盘片上应用的发展趋势和对比



资料来源：《航空航天用先进材料》、山西证券研究所

我国高温合金的发展经历了从仿制到自主创新的三个阶段。20 世纪 70 年代前，是我国高温合金的创业起步阶段，研制和发展了 GH 系列变形高温合金和 K 系列的铸造高温合金，这一阶段通过仿制、消化和发展前苏联高温合金为主的合金及工艺，质量达到了前苏联标准和水平。70 年代后至 90 年代初，我国引进和试制了一批欧美体系的高温合金，并按照欧美的技术标准进行研制和生产，研制出高性能变形高温合金、初代 DZ 系列定向凝固合金、初代 DD 系列单晶合金和初代 FGH 系列粉末高温合金。90 年代后期至今，随着新型先进航空发动机的研制和生产，通过新工艺的开发和应用，研制和生产了一系列高性能高档新合金。我国高温合金行业经历了从仿制到自主创新的发展历程，初步建立了完整的高温合金研制体系，但总体而言在研制能力、科研条件和生产技术方面，与国际先进水平还有一定差距，整体产能上还无法满足下游军民领域日益增长的需求。

图 71：2017-2021 年中国高温合金需求与产量



资料来源：中航上大招股说明书、山西证券研究所

表 11：国内主要高温合金上市公司情况

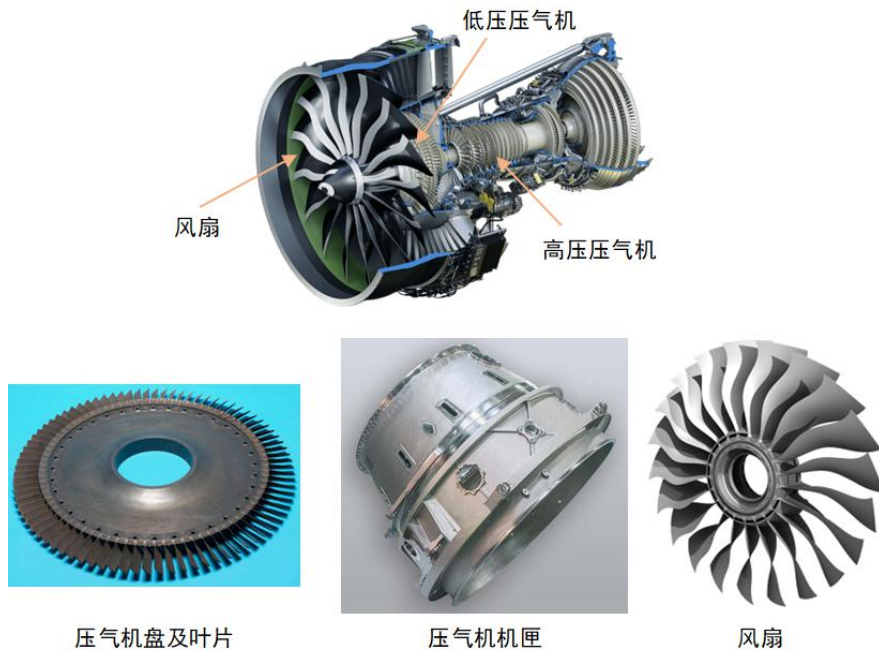
公司代码	公司简称	主营业务	主要高温合金产品类型
300034.SZ	钢研高纳	面向航空航天的高温母合金、发动机精铸件、航空发动机盘锻件等；面向发电设备制造领域的燃气轮机涡轮盘、防护片等；面向石油、化工、纺织、冶金等领域的高温合金离心铸管及静态铸件、高温合金精铸件、切断刀等	铸造高温合金、变形高温合金、粉末高温合金
600399.SH	抚顺特钢	以特殊钢和合金材料的研发制造为主营业务，主要产品为高温合金、不锈钢、工模具钢、合金结构钢等。产品广泛应用于航空航天、能源电力、石油化工、交通运输、机械机电、环保节能等领域。	变形高温合金
300855.SZ	图南股份	高温合金、特种不锈钢等高性能合金材料及其制品的研发、生产和销售。主要产品包括铸造高温合金、变形高温合金、特种不锈钢等高性能合金材料及其制品，主要应用在包含航空发动机、燃气轮机、核电装备等军用及高端民用领域。	铸造高温合金、变形高温合金
688122.SH	西部超导	主要从事高端钛合金材料、超导产品和高性能高温合金材料的研发、生产和销售。	铸造高温合金、变形高温合金、粉末高温合金
688231.SH	隆达股份	专注于航空航天和燃气轮机等领域用高品质高温合金业务，产品分为铸造高温合金母合金和变形高温合金。	铸造高温合金、变形高温合金

资料来源：WIND、公司官网、山西证券研究所

3.2.2 钛合金

钛合金的最大性能特点是高比强度，在钛合金的耐热能力范围内，航空发动机部件大部分选用钛合金材料代替铝合金、钢或者高温合金，能够获得显著的减重效益，提高推重比，降低油耗。钛合金的使用温度从室温到接近 600℃，航空发动机用钛合金主要用于制造发动机的低温部件，包括风扇和压气机的叶片、盘、机匣等关键件，以及各类管路、紧固件等。

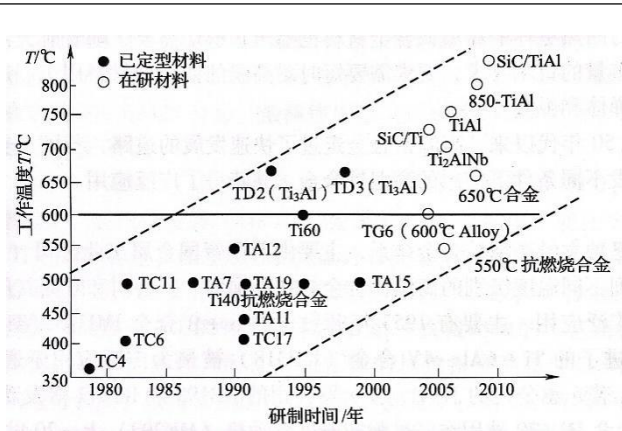
图 72：航空发动机低温部件及其零件



资料来源：维基百科、山西证券研究所

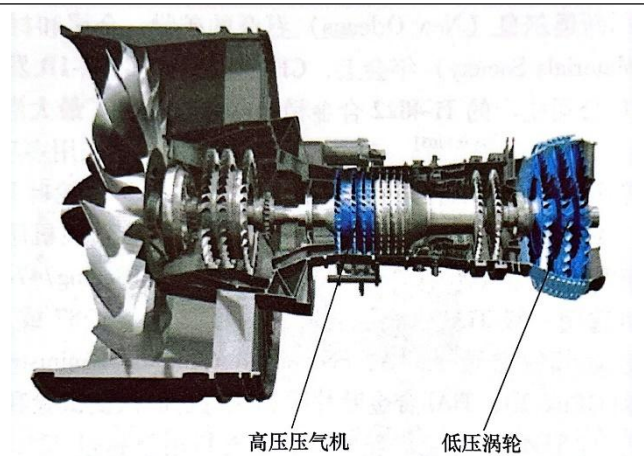
钛合金按照退火组织分类为 α 钛合金、 β 钛合金和 $\alpha+\beta$ 钛合金三类，我国分别以 TA、TB、TC 表示。按照合金材料成型方式，钛合金可分为变形钛合金、铸造钛合金和粉末钛合金。按照性能特点分为低强度钛合金、中强度钛合金、高强度钛合金、高温钛合金、低温钛合金、耐蚀钛合金、损伤容限钛合金等。航空发动机用钛合金主要是能在高温工作条件下（ $300^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ ）具有较高的比强度、高温蠕变抗力、疲劳强度、持久强度和组织稳定性的高温钛合金。高温钛合金发展的主要目标是提高合金的使用温度，目前钛合金在发动机 375°C 以下低温段的应用受到密度更小的树脂基复合材料的竞争，在高温段（主要指高压压气机和低压涡轮部分）与镍基高温合金的竞争中，传统钛合金的耐热能力已接近极限，性能潜力提升空间已有限，目前在研的主要是 600°C 和 650°C 高温钛合金，而作为广义“钛家族”的成员，随着新材料技术成熟度的提高，轻质耐热的 Ti-Al 系金属间化合物（ Ti_3Al 基、 Ti_2AlNb 、TiAl 基）和钛基复合材料（包括 Ti 基、 Ti_3Al 基和 TiAl 基）成为 600°C 以上非常有潜力的候选材料。钛合金具有很高的氧化生成热同时导热性又很差，当压气机中叶片和机匣发生摩擦时，很容易引发钛的燃烧，产生钛火，这个问题直接推动了阻燃钛合金的研究和发展，阻燃钛合金主要用于压气机机匣和叶片。

图 73：我国高温钛合金的发展



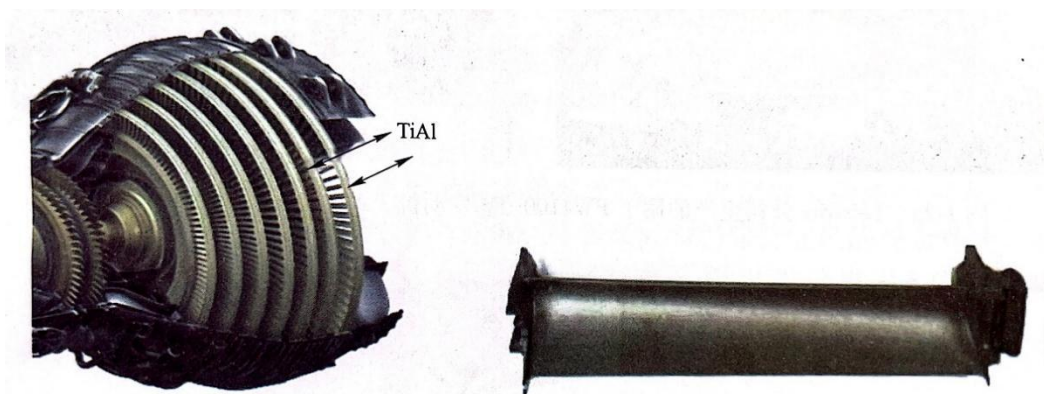
资料来源：《航空材料技术》、山西证券研究所

图 74：TiAl 合金在普惠齿轮传动涡扇发动机高压压气机和低压涡轮的潜在应用示意图



资料来源：《航空发动机钛合金材料与应用技术》、山西证券研究所

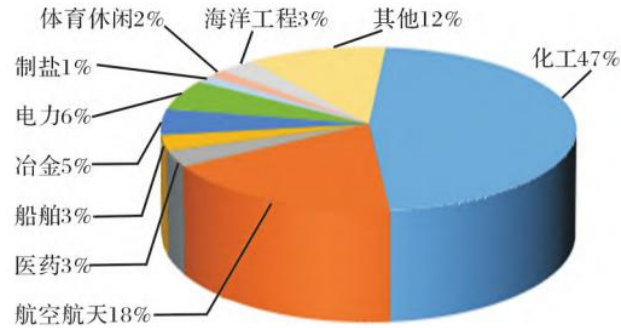
图 75：Genx 发动机用 TiAl 合金铸造低压涡轮叶片



资料来源：《航空发动机钛合金材料与应用技术》、山西证券研究所

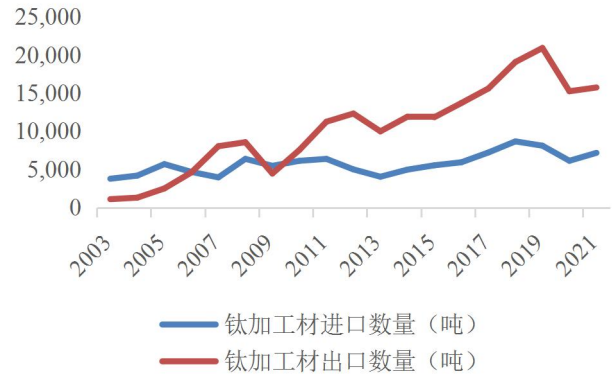
我国钛及钛合金产业在最近的十几年中得到快速发展，2021 年我国海绵钛产量达到 13.99 万吨，居全球第一，占到全球产量的 61.6%，2021 年共生产钛加工材 13.59 万吨，从产业规模看，我国已经成为世界钛产业大国。但是我国钛合金在航空航天领域的用量偏低，高端领域钛合金还不能完全满足航空工业跨越式发展要求，产业结构仍需持续优化。全球范围内航空航天用钛材始终占据钛材总需求的 50%左右，而 2021 年国内航空航天用钛材的比例仅为 18%，2021 年我国钛加工材进口 7175 吨，主要为航空航天等高端领域用钛合金，随着国内军用飞机的升级换代和新型号列装，以及国产大飞机 C919 取得适航认证后的需求释放，高端钛合金材料市场空间广阔。

图 76：2021 年中国钛加工材在不同领域的应用比例



资料来源：《2021 年中国钛工业发展报告》、山西证券研究所

图 77：中国钛加工材历年进出口量（2003-2021）



资料来源：WIND、山西证券研究所

表 12：国内主要钛合金上市公司情况

公司代码	公司简称	主营业务	主要钛合金产品
600456.SH	宝钛股份	主要从事钛及钛合金的生产、加工和销售，是中国最大的钛及钛合金生产、科研基地。主要产品为各种规格的钛及钛合金板、带、箔、管、棒、线、锻件、铸件等加工材和各种金属复合材产品	全谱系各种规格的钛及钛合金板、带、箔、管、棒、线、锻件、铸件等加工材和各种金属复合材产品
002149.SZ	西部材料	主要从事稀有金属材料的研发、生产和销售，拥有钛及钛合金加工材、层状金属复合材料、稀有金属材料、金属纤维及制品、钨钼材料及制品、稀有金属装备、钛材高端日用消费品和精密加工制造等八大业务板块。	钛合金板材、带材、管材
688122.SH	西部超导	主要从事高端钛合金材料、超导产品和高性能高温合金材料的研发、生产和销售。	高端钛合金棒材、丝材、锻坯等

资料来源：WIND、公司官网、山西证券研究所

3.2.3 复合材料

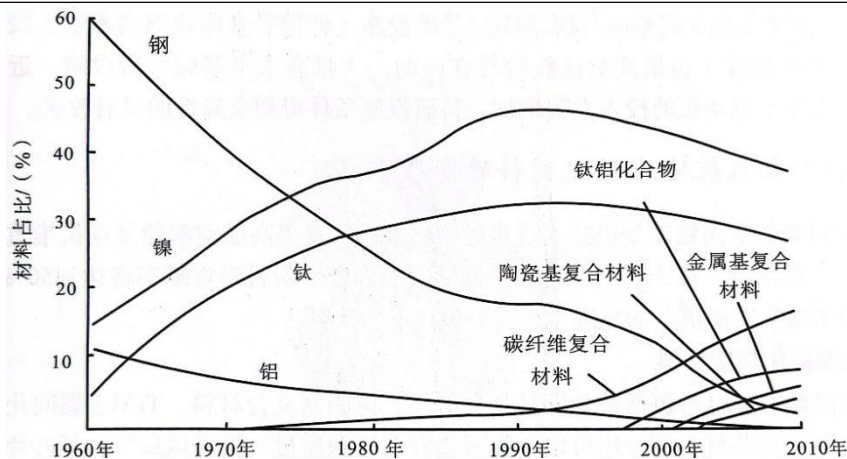
复合材料是指由两种或两种以上物理和化学性质不同的材料经过复杂空间组合而形成的新型材料，可以弥补单一材料的不足，发挥组合后的新特征。复合材料具有比强度和比模量高、抗疲劳性能好、热膨胀系数小、高温性能好、减震能力强、成型工艺性好等优点，优异的综合性能可适应未来航空航天飞行器的发展趋势，在进入 21 世纪后，复合材料在发动机中占比不断提高，成为发动机材料中的主体，复合材料的使用对发动机减重、提高推重比至关重要。

表 13：不同材料的比强度和比模量

材料	密度 / (g/cm ³)	抗拉强度 /10 ³ MPa	弹性模量 /10 ⁵ MPa	比强度 / (GPa·cm ³ /g)	比模量 / (10 ² GPa·cm ³ /g)
钢	7.8	1.03	2.1	0.13	0.27
钛合金	4.5	0.96	1.14	0.21	0.25
铝合金	2.8	0.47	0.75	0.17	0.26
硼纤维/铝复合材料	2.65	1.0	2.0	0.38	0.57
硼纤维/环氧复合材料	2.1	1.38	2.1	0.66	1.0
碳纤维 I/环氧复合材料	1.6	1.07	2.4	0.67	1.5
碳纤维 II/环氧复合材料	1.45	1.50	1.4	1.03	0.97

资料来源：《航空航天用先进材料》、山西证券研究所

图 78：航空发动机材料发展趋势

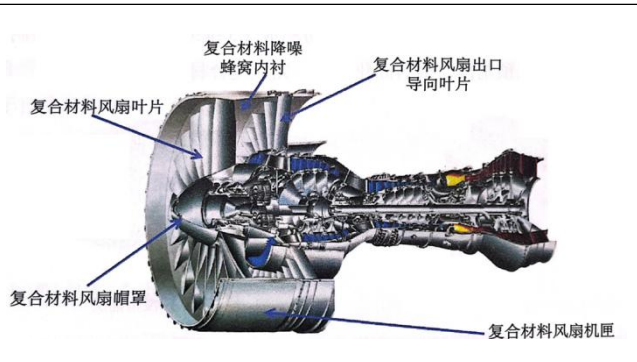


资料来源：《航空航天材料概论》、山西证券研究所

复合材料分类方式很多，按照基体材料的不同可分为聚合物基复合材料（以树脂、橡胶等为基体）、金属基复合材料（以铝、镁、钛等金属及其合金为基体）和无机非金属基复合材料（以陶瓷、玻璃、水泥、石墨等为基体）。航空发动机广泛使用的复合材料主要包括树脂基复合材料、陶瓷基复合材料和金属基复合材料。树脂基复合材料主要用于航空发动机的冷端部件（风扇机匣、压气机叶片、进气机匣等）、发动机短舱和反推力装置等，目前已形成 280℃~450℃涵盖四代的耐高温树脂基复合材料体系。陶瓷基复合材料密度低（仅为高温合金的 1/4~1/3），热膨胀系数小，抗腐蚀性好，理论最高使用温度高达 1650℃，对减轻发动机涡轮叶片质量和降低涡轮叶片冷气量意义重大，是发动机高温结构的理想材料，但是陶瓷基复合材料的脆性大，极大限制了它在航空发动机上的应用。航空发动机用最多的金属基复合材料主要包括钛基复合材料和铝基复合材料，钛基复合材料作为广义钛合金材料已在上一节做了介绍，应用于发动机风扇导向流叶片或者压气机静子叶片的铝基复合材料，相比于石墨纤维环氧树脂基复合材料耐冲击（冰雹、鸟等外物冲

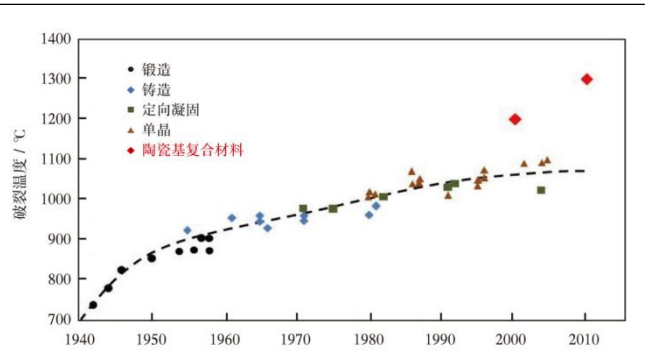
击)能力更好,抗冲蚀(沙子、雨水等)能力更高,成本下降了1/3以上,而且损伤易发现。

图 79: 树脂基复合材料在发动机冷端部件上的应用



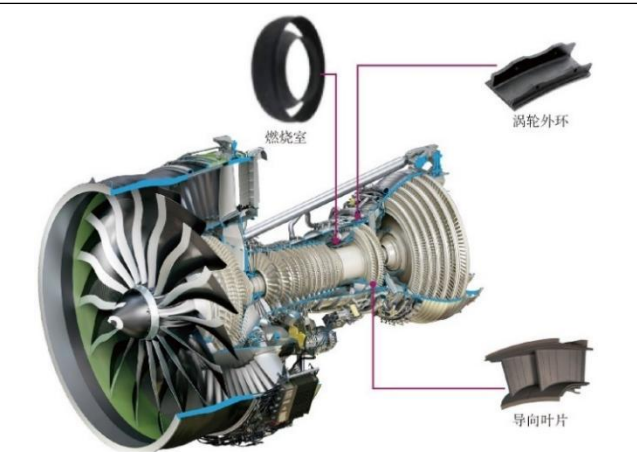
资料来源:《航空发动机的故事》、山西证券研究所

图 80: 高温合金和陶瓷基复合材料耐温能力变化



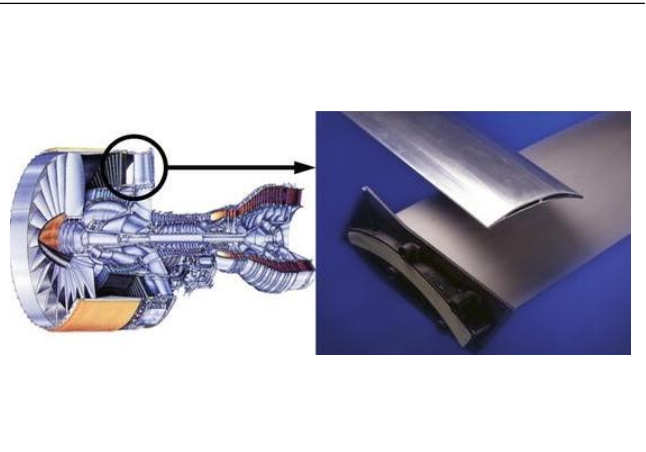
资料来源:《航空发动机用陶瓷基复合材料研究进展》、山西证券研究所

图 81: GE9X 发动机应用的陶瓷基复合材料部件



资料来源:《航空发动机用陶瓷基复合材料研究进展》、山西证券研究所

图 82: 铝基复合材料用于 B777 发动机导向流叶片



资料来源:《航空航天用先进材料》、山西证券研究所

经过多年发展,我国高性能树脂基复合材料已取得重大突破,T300 级和 T700 级碳纤维复合材料已在飞机机体结构上得到批量应用,主要力学性能接近东丽 T800 碳纤维的国产 T800 级碳纤维也已实现百吨级稳定性生产,但是与国外先进水平相比,我国树脂基复合材料在航空发动机上的应用比例不高,仍需继续提升设计、制造、实验技术水平及工程化能力,以满足未来先进发动机的研制需求。陶瓷基复合材料方面,国内起步较晚,与国外先进水平差距较大。

表 14: 国内主要航空发动机复合材料上市公司情况

公司代码	公司简称	主营业务	主要产品
600862.SH	中航高科	主营业务分为“航空新材料”和“高端智能装备”两大板块,	航空发动机复材风扇叶片、流

	业务范围涵盖航空新材料、高端智能装备、轨道交通零部件、汽车零部件、医疗器械等应用领域	道板、垫板
--	--	-------

资料来源：WIND、公司官网、山西证券研究所

3.2.4 隐身材料

航空发动机的红外特征和雷达特征是通过发动机进/排气系统表征出来的。发动机进气系统腔体、排气系统腔体、各种缝隙和边缘是主要的雷达波散射源，常用的进/排气系统雷达隐身技术包括遮挡雷达散射源、边缘修形（进气口、喷口和缝隙）以及采用雷达波吸收材料和结构。发动机进气系统腔体、排气系统腔体和尾喷流是主要的红外辐射源，常用的进/排气系统红外隐身技术主要包括遮挡红外辐射源、高温壁面的冷却、尾喷流的快速降温以及采用合理的表面材料。进/排气口发动机的各种隐身技术中，隐身材料的应用不会影响发动机或者飞机的总体设计，不会对发动机推力、耗油率特性产生不利影响。

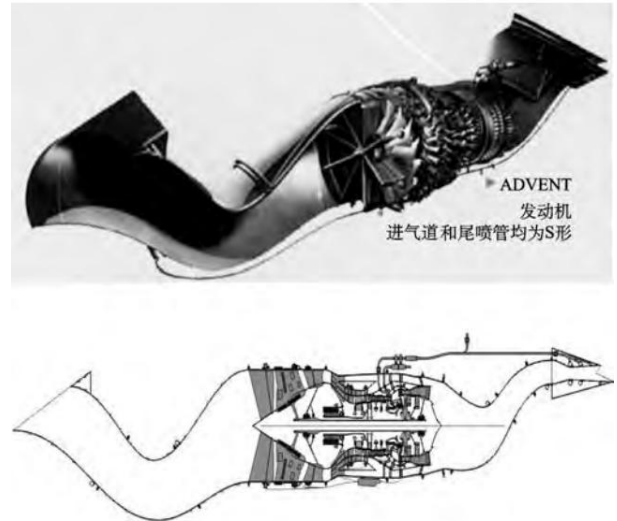
图 83：F135 锯齿修形喷管



资料来源：《航空发动机尾喷管的气动/隐身特性研究》、山西证券研究所

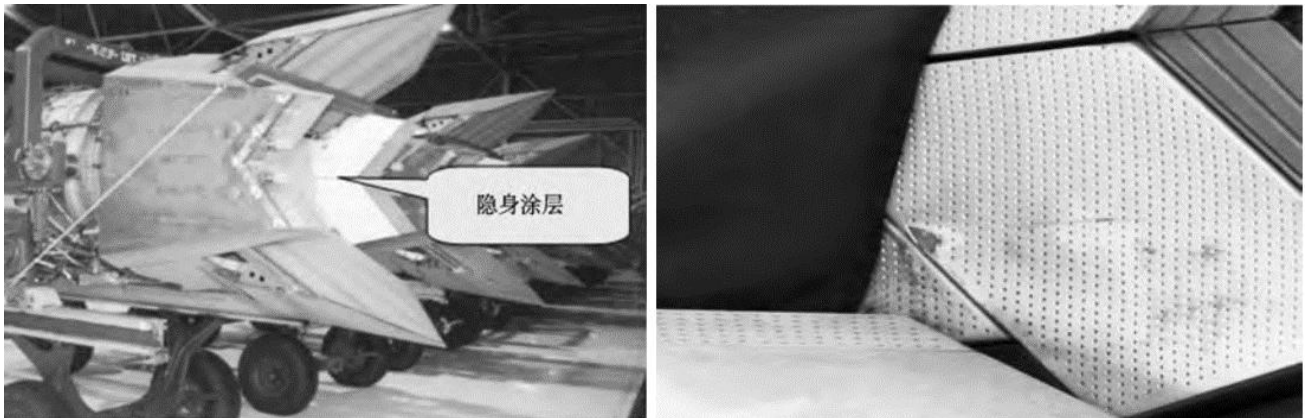
隐身材料存在多种分类标准。针对探测技术而言，隐身材料分为为雷达隐身材料、红外隐身材料、可见光隐身材料、激光隐身材料以及多频谱隐身材料等。按照材料用途隐身材料可以分为隐身涂层材料和隐身结构材料，隐身涂层材料是将隐身材料涂覆在武器装备部件表面，以降低其雷达和红外目标特性，隐身结构材料是将吸收剂分散在特种纤维（如玻璃纤维、石英纤维）增强的结构材料中，形成结构复合材料，可替代部分现有武器装备金属材料制造的结构件，实现结构和隐身功能的一体化。

图 84：S 弯二维喷管在战斗机发动机上的应用



资料来源：《航空发动机隐身技术分析》、山西证券研究所

图 85：隐身材料在航空发动机上的应用



资料来源：《航空发动机隐身技术分析论述》、山西证券研究所

隐身技术从上世纪 70 年代初才开始走向应用，处于早期阶段的隐身材料存在隐身频带窄、涂层厚重、力学强度不足、维护成本高等问题，此阶段隐身武器以雷达隐身为主，进入 90 年代，隐身技术进入成熟阶段，隐身材料向多频谱兼容化发展，此阶段隐身武器以兼具雷达、红外、激光等多频谱隐身功能为主。我国在隐身材料上的研发起步较晚，各国在隐身技术领域存在严密的技术封锁，我国目前已在隐身材料部分细分领域实现技术突破，并在多型武器装备上进行了应用。

表 15：国内主要隐身材料上市公司情况

公司代码	公司简称	主营业务	主要隐身材料产品
002625.SZ	光启技术	新一代超材料尖端装备产品的研发、生产及销售	超材料功能结构、超材料高性能电磁罩及超材料高性能天线
688281.SH	华秦科技	主要从事特种功能材料，包括隐身材料、伪装材料及防护材料的研发、生产和销售，产品主要应用于我国重大国防武器装备如飞机、主战坦克、舰船、导弹等的隐身、重要地面军事目标的伪装和各类装备部件的表面防护。	防腐隐身涂层材料、结构隐身材料
A22176.SH	佳驰科技	全面覆盖隐身功能涂层材料、隐身功能结构件，以及电子信息领域电磁兼容材料等在内的产品设计、制造、测试、销售和服务	隐身功能涂层材料、隐身功能结构件

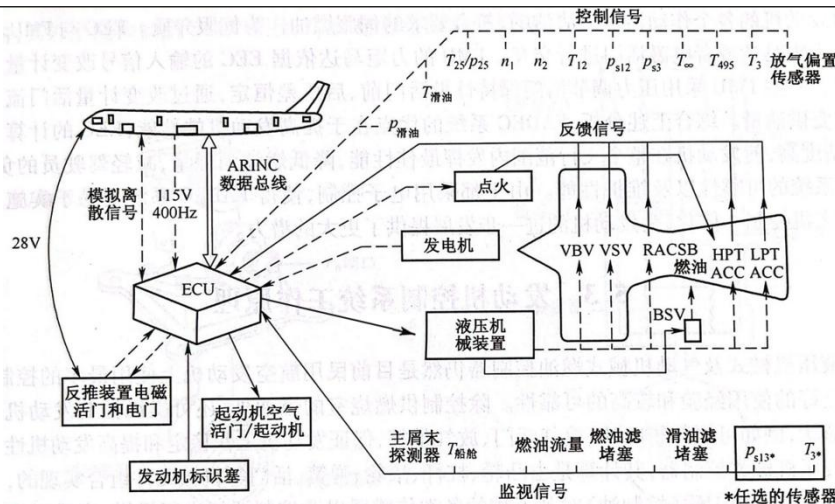
资料来源：WIND、公司官网、山西证券研究所

3.3 控制系统

航空发动机的工作过程是极其复杂的气动热力过程，航空发动机随着其环境条件（如高空低速飞行、强气流冲击、武器发射等）和工作状态（如慢车、巡航、加力、加速及减速状态等）的变化，它的气动热力过程将发生很大的变化，发动机可能会出现压气机喘振、燃烧室熄火、加力燃烧室振荡等不稳定的工作

情况。航空发动机控制系统通过对发动机主燃烧室和加力燃烧室燃油量、静子叶片位置、放气阀开度以及尾喷口面积等参数的控制，实现发动机在任何环境条件和工作状态下都能稳定可靠的运行，并充分发挥其性能效益。

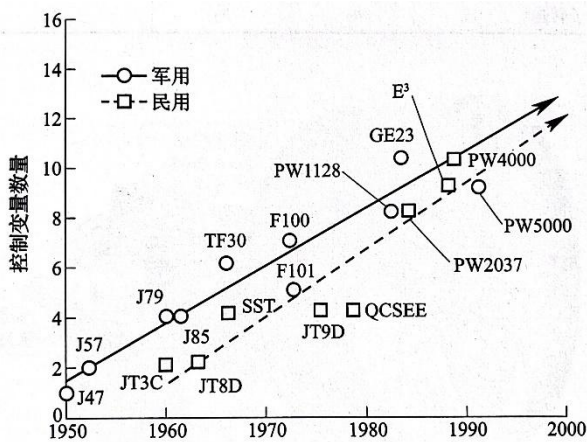
图 86：航空发动机全权限控制系统原理图



资料来源：《航空发动机附件系统》、山西证券研究所

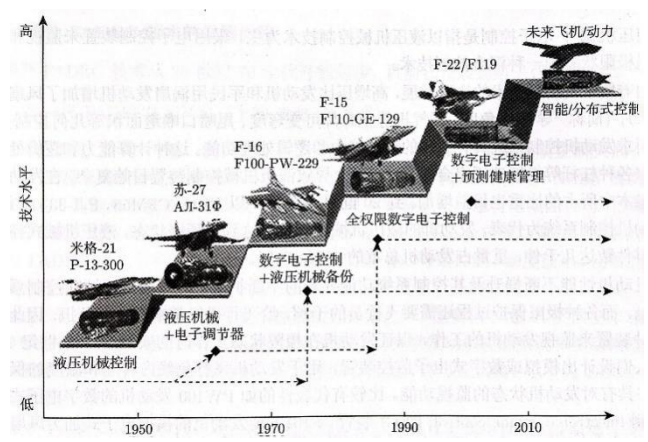
航空发动机控制系统从 20 世纪 40 年代简单的液压机械控制、液压机械+电子控制，发展到现代的全权限数字电子控制（FADEC），并向智能/分布式控制方向发展。这一发展的特点可归纳为，由单变量控制系统发展到多变量控制系统，由机械液压式控制系统发展到数字式电子控制系统，由进气道、发动机及尾喷管各部分单独控制发展到三者组成的推进系统综合控制以及飞行/推进系统的综合控制，由集中式控制系统发展为分布式控制系统。

图 87：发动机控制复杂性变化趋势



资料来源：《飞机发动机控制—设计、系统分析和健康监视》、山西证券研究所

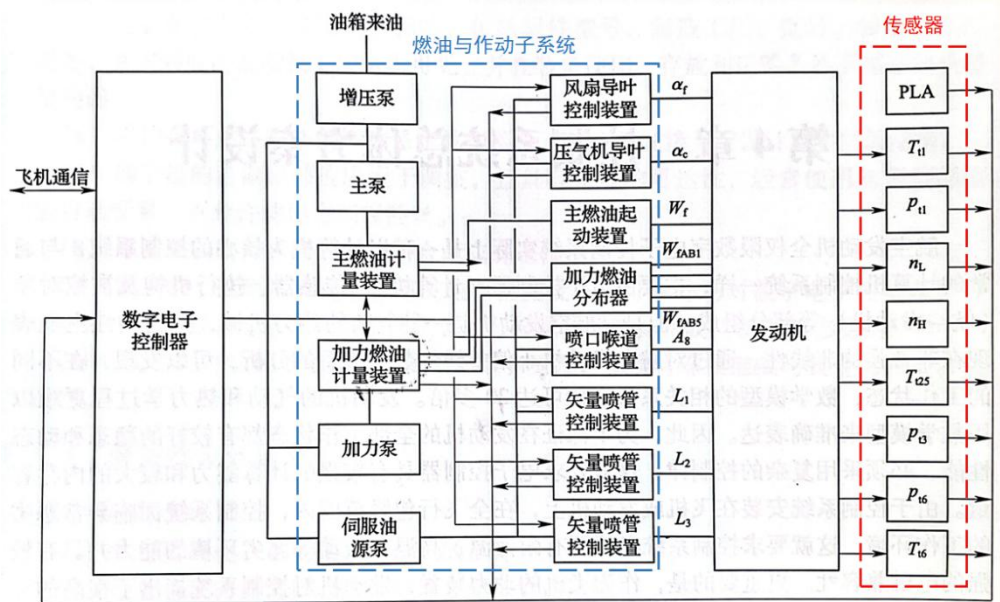
图 88：航空发动机控制技术发展历程与趋势



资料来源：《航空发动机控制系统设计技术》、山西证券研究所

航空发动机全权限数字电子控制系统（FADEC）是一种以计算机为核心的控制系统，不仅能够实现从发动机起动、运行、停车的整个运行过程的全部控制功能，保证发动机一直保持在最优条件下运行，而且集成了发动机故障诊断属性，及时发现发动机的“病变”。FADEC 主要由控制计算机子系统、传感器子系统、燃油与作动子系统、电气子系统等部分组成。控制计算机子系统分为电子控制器（EEC）和嵌入式软件两部分，共同负责处理来自传感器和开关装置的信号，经过各种算法和控制逻辑的计算后输出驱动控制信号，经电缆传输给相应的液压机械装置。燃油与作动子系统包括燃油子系统和伺服作动子系统，燃油子系统包括燃油泵（增压泵、主泵、加力泵和伺服泵）、燃油计量装置、燃油滤、燃油管路、喷嘴等，伺服作动子系统包括伺服控制单元、伺服作动器及相应附件。传感器子系统包括控制用传感器和状态监视用传感器等。

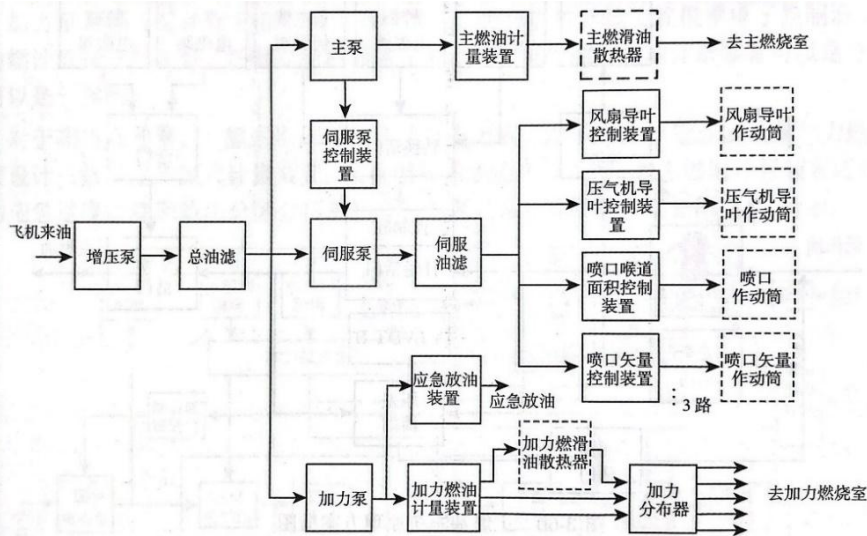
图 89：某涡扇发动机控制系统总体结构框图



资料来源：《航空发动机全权限数字电子控制系统》、山西证券研究所

燃油系统涉及发动机的燃油供给以及以高压燃油为液压动力的作动系统，燃油系统的本质属于控制系统的执行环节，其任务是将电子控制器的指令转换为实际的燃油流量和几何位置或角度，其中燃油计量装置、风扇导叶控制执行机构、压气机导叶控制执行机构、喷口喉道控制执行机构、矢量喷管控制执行机构都是以燃油为介质的液压机械作动装置，用以实现位置或油量的调节功能，增压泵、主泵、加力泵和伺服泵等燃油泵主要负责供油和增压，燃油泵将飞机油箱来油增压到一定水平，并将其分为两股，一股是送往燃烧室的主燃油，另一股则是为执行机构提供动力的伺服燃油。

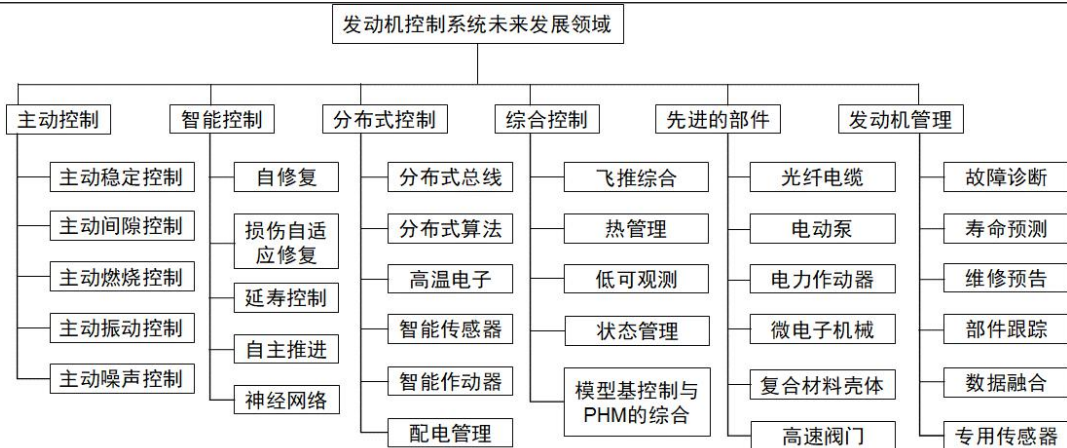
图 90：燃油系统总体方案图



资料来源：《航空发动机控制系统设计技术》、山西证券研究所

未来 FADEC 系统将向主动控制、智能控制和分布式控制的方向发展。另外通过采用电动燃油泵、作动器系统和先进的电子硬件，可以提高 FADEC 系统硬件的可靠性，通过采用先进的控制逻辑和设计方法，并与其他机载系统（进气道控制系统、飞控系统、火控系统等）相综合，能够获得更好的系统性能和提高控制品质，同时控制系统的寿命将进一步提高，从而降低系统的研制和使用成本。

图 91：未来航空发动机控制技术的重点发展领域



资料来源：《航空发动机全权限数字电子控制系统》、山西证券研究所

表 16：国内主要航空发动机控制系统上市公司情况

公司代码	公司简称	主营业务	主要产品
000738.SZ	航发控制	国内主要航空发动机控制系统研制生产企业，全方位参与所有在研在役航空发动机控制系统，在航空发动机控制系统细分领域处于行业领先地位	航空发动机控制系统中的液压机械部分

资料来源：WIND、公司官网、山西证券研究所

4. 投资建议

航空发动机产业由于其高技术、高投入等特点，发展周期往往以数十年计，我国从仿制开始起步，到自主研发探索，已走过了 70 多年的艰难发展之路，进入新世纪随着大推力加力式“太行”涡轮风扇发动机（WS-10A）的设计定型以及不断改进成熟，我国发动机研制水平已显著提升，航空发动机国产化进程不断加速，更多不同类型的先进型号发动机也将“瓜熟蒂落”，国内军用航空发动机市场进入“放量建设”新阶段，民用航空发动机领域，在获得 ARJ21 新支线飞机和 C919 大型客机项目的支持后，以及随着“飞发分离”等体制机制改革逐步到位，我国商用航空发动机项目的进展也在逐步提速，民用航空发动机前景强劲。关于航空发动机产业链，我们重点推荐的标的是航发控制和航宇科技。

4.1 航发控制

公司是航空发动机控制系统龙头。公司主要产品为航空发动机控制系统及部件，作为国内主要航空发动机控制系统研制生产企业，在军用航空发动机控制系统方面一直保持领先，与国内各发动机主机单位均有密切合作，全面参与了国内所有在役、在研型号的研制生产任务，是航发控制系统唯一上市标的，具有稀缺性。

航空装备升级换代加快叠加实战化训练强度加大，推动航空发动机需求高速增长。国内航空动力装备将形成一、二代机加速淘汰，三代机批量稳定交付、四代机研制、五代机预研加速的局面，航空装备升级换代加速，同时随着航空兵实战化训练强度加大，飞行员平均飞行小时数极大增长，加速航空发动机损耗，这将极大推动航空发动机需求。公司作为中游分系统供应商，将受益于航发下游旺盛需求，业绩有望持续快速增长。

风险提示：新型军机列装不及预期；募投项目进展不及预期；新产品研发不及预期

4.2 航宇科技

公司是航空发动机环锻件核心供应商。公司主要从事航空难变形金属材料环形锻件的研发、生产和销售业务，公司产品广泛应用于国内外航空发动机、导弹、运载火箭、燃气轮机等领域。公司参与了我国现役绝大部分军用航空发动机生产任务，承担所有预研、在研军用航空发动机型号研制任务，还是国产大飞机 C919 长江系列航空发动机环锻件的核心研制生产单位。公司目前的境外航空客户群覆盖了主流国际航空发动机生产商，公司与 GE 航空、普惠（P&W）、赛峰（SAFRAN）、罗罗（RR）、霍尼韦尔（Honeywell）、MTU 等国际主要航空发动机生产商均签订了长期协议，长期协议涉及多个主流航空发动机型号。

国内军用航空发动机市场放量叠加国外商用航空发动机市场持续回暖，形成双轮驱动。受益于新一代航空装备大规模列装需求，以及航空发动机国产化进程加速，国内军用航空发动机市场进入“放量建设”新阶段，随着疫情影响的逐步消退，国际主流航空发动机厂商的订单自 2021 年以来持续复苏，公司有望受益于国内和国际市场的双轮驱动，实现业绩的高速增长。

风险提示：募投项目进展不及预期；新型航空装备列装不及预期；原材料价格波动

表 17：重点推荐公司盈利预测及估值

证券代码	证券名称	收盘价	EPS				PE				投资评级
		2023/4/11	2022A	2023E	2024E	2025E	2022A	2023E	2024E	2025E	
000738.SZ	航发控制	23.77	0.52	0.73	0.95	1.23	45.4	32.6	25.0	19.4	买入-A
688239.SH	航宇科技	74.90	1.29 (E)	1.91	2.88	4.32	58.1	39.2	26.0	17.3	增持-A

资料来源：Wind、山西证券研究所

5. 风险提示

(1) 原材料价格波动。航空发动机原材料如镍、海绵钛等原材料价格如果出现大幅波动，可能会给公司生产经营带来不利影响，影响公司盈利水平。

(2) 新型号列装不及预期。新型号航空发动机列装情况受国家战略需求影响，受国家国防政策及军事装备采购投入的影响较大，如果国家战略部署发生变化，会影响国内列装的规模和进度。

(3) 订单交付不及预期。航空发动机因其结构的复杂性，涉及的原材料和零部件数量多、供应链条长、配套环节复杂、管控难度大。外部零部件配套供应不及时可能导致订单交付不及预期。

(4) 新型号研发不及预期。航空发动机产业链长、研发难度大、投资大、周期长、风险高，存在新型号研发达不到预定任务目标、预期性能指标以及研制费用超支、研制周期拖延等风险。

分析师承诺：

本人已在中国证券业协会登记为证券分析师，本人承诺，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告。本人对证券研究报告的内容和观点负责，保证信息来源合法合规，研究方法专业审慎，分析结论具有合理依据。本报告清晰地反映本人的研究观点。本人不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点直接或间接受到任何形式的补偿。本人承诺不利用自己的身份、地位或执业过程中所掌握的信息为自己或他人谋取私利。

投资评级的说明：

以报告发布日后的 6--12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中：A 股以沪深 300 指数为基准；新三板以三板成指或三板做市指数为基准；港股以恒生指数为基准；美股以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。

无评级：因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见的结果的重大不确定事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。（新股覆盖、新三板覆盖报告及转债报告默认无评级）

评级体系：

——公司评级

- 买入： 预计涨幅领先相对基准指数 15%以上；
- 增持： 预计涨幅领先相对基准指数介于 5%-15%之间；
- 中性： 预计涨幅领先相对基准指数介于-5%-5%之间；
- 减持： 预计涨幅落后相对基准指数介于-5%- -15%之间；
- 卖出： 预计涨幅落后相对基准指数-15%以上。

——行业评级

- 领先大市： 预计涨幅超越相对基准指数 10%以上；
- 同步大市： 预计涨幅相对基准指数介于-10%-10%之间；
- 落后大市： 预计涨幅落后相对基准指数-10%以上。

——风险评级

- A： 预计波动率小于等于相对基准指数；
- B： 预计波动率大于相对基准指数。

免责声明：

山西证券股份有限公司(以下简称“公司”)具备证券投资咨询业务资格。本报告是基于公司认为可靠的已公开信息，但公司不保证该等信息的准确性和完整性。入市有风险，投资需谨慎。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，公司不对任何人因使用本报告中的任何内容引致的损失负任何责任。本报告所载的资料、意见及推测仅反映发布当日的判断。在不同时期，公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。公司或其关联机构在法律许可的情况下可能持有或交易本报告中提到的上市公司发行的证券或投资标的，还可能为或争取为这些公司提供投资银行或财务顾问服务。客户应当考虑到公司可能存在可能影响本报告客观性的利益冲突。公司在知晓范围内履行披露义务。本报告版权归公司所有。公司对本报告保留一切权利。未经公司事先书面授权，本报告的任一部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯公司版权的其他方式使用。否则，公司将保留随时追究其法律责任的权利。

依据《发布证券研究报告执业规范》规定特此声明，禁止公司员工将公司证券研究报告私自提供给未经公司授权的任何媒体或机构；禁止任何媒体或机构未经授权私自刊载或转发公司证券研究报告。刊载或转发公司证券研究报告的授权必须通过签署协议约定，且明确由被授权机构承担相关刊载或者转发责任。

依据《发布证券研究报告执业规范》规定特此提示公司证券研究业务客户不得将公司证券研究报告转发给他人，提示公司证券研究业务客户及公众投资者慎重使用公众媒体刊载的证券研究报告。

依据《证券期货经营机构及其工作人员廉洁从业规定》和《证券经营机构及其工作人员廉洁从业实施细则》规定特此告知公司证券研究业务客户遵守廉洁从业规定。

山西证券研究所：

上海

上海市浦东新区滨江大道 5159 号陆家嘴滨江中心 N5 座 6 楼

太原

太原市府西街 69 号国贸中心 A 座 28 层
电话：0351-8686981
<http://www.i618.com.cn>

深圳

广东省深圳市福田区林创路新一代产业园 5 栋 17 层

北京

北京市西城区平安里西大街 28 号中海国际中心七层
电话：010-83496336

