

在去年第十三届中国国际航空航天博览会上，歼-20换装国产发动机后，先后完成斜升、垂直上升等飞行动作。换装“中国心”的歼-20，展现出良好性能，成为航展上耀眼的明星。

众所周知，航空发动机是战机的“心脏”，其制造技术被誉为“皇冠上的明珠”。战机的飞行动力主要依靠航空发动机的能量输出。可以说，航空发动机的性能直接决定战机的作战性能，其研发制造水平决定

着一个国家航空工业发展水平。

目前，世界上只有美、俄、英、法、中等少数国家能够独立研发喷气式航空发动机。有数据表明，在过去50年，美国已经在航空发动机领域投入超过1000亿美元，研发F-100系列航空发动机用了20多年，其技术难度可见一斑。那么，航空发动机曾走过怎样的发展历程？研制现代航空发动机又需要攻克哪些技术难题？本文为您一一解读。

# 摘下“皇冠上的明珠”有多难

■沈高剑 姜子晗 杨洁瑜

## 军工科普

### 一代发动机决定一代战机

1903年，“飞行者一号”飞机试飞成功，翻开了人类航空史的新篇章。莱特兄弟的事迹迅速登上世界各大媒体报刊的头条。

莱特兄弟一举成名，却很少有人关注这次人类首飞的“幕后英雄”——查理·泰勒。就是这位名不见经传的技师，将汽车发动机的活塞缸体加固改造，与螺旋桨相连，为“飞行者一号”制造出人类历史上第一台航空发动机。

随后几十年，世界航空工业蓬勃发展，活塞式发动机摆脱了汽车发动机的影子，发展成多缸星型排列的样式。活塞式发动机与螺旋桨的强大动力组合，迅速成为大型轰炸机、运输机的“心脏”。

受两次世界大战影响，活塞式发动机得到快速发展，性能指数持续攀升，单机输出功率从8.95千瓦增长到2500千瓦。

然而，活塞发动机的输出功率达到一定数值时即遭遇瓶颈——以“野马”战机为代表的螺旋桨发动机接连发生超重和音障的问题。一时间，科研人员陷入困境，开始艰难的探索之旅。

无巧不成书。德国科学家冯·奥海因无意中捕捉到了创新灵感。一次飞行旅行，活塞式飞机的振动让奥海因感到十分不适，他灵机一动：“能否发明一种能持续燃烧和喷流、没有往复运动的发动机呢？”大学期间，奥海因对喷气推进的原理和可行性进行深入研究，绘制出第一张喷气发动机的设计图纸。

从哥廷根大学空气动力专业博士毕业后，奥海因很快将设想付诸实践，他把离心压缩机和汽轮机组合在一起，推出首台涡喷发动机。1937年9月的一天，奥海因按下发动机试验台启动按钮，大量气体被发动机瞬间吸入，经过压缩燃烧后，喷出阵阵气流……发动机初步试验宣告成功。短短2年后，加装涡喷发动机的He-178喷气式战机顺利升空。

二战后，涡喷发动机成为航空界的“新宠”。20世纪40年代末，第一批加装涡喷发动机的F-86战机和米格-15战机，飞行速度均超过900公里/小时。数年后，加装加力燃烧室的美军F-100战机突破音速，飞行速度达到1.3马赫。

当时，涡喷发动机在超音速飞行方面展现出独特优势。不过，科研人员很快发现涡喷发动机的一个致命缺陷：大量高温燃气被直接喷出，导致燃气热能浪费、油耗加大、航程缩短。

如何提高发动机能量使用效率？1959年，英国罗罗公司在VC-10客机上，巧妙地用一个“风扇”解决了难题——在发动机头部加装一个“风扇”，将其与发动机后部涡轮相连，由燃烧室喷出的高温燃气驱动涡轮和“风扇”一同旋转，将燃气的热能转化为发动机的前向拉力，涡扇发动机由此诞生。

然而，“风扇”加大了迎风面积，速度越快阻力越大，这对高速飞行的战机极为不利。因此，一开始涡扇发动机只能在货运大飞机上使用。

20世纪60年代，英国研制出装配小型“风扇”的航空发动机，加装到“鬼怪”战机上可以达到与同时期涡喷发动机相近的推重比，且耗油率更低、航程更大。一时间，涡扇发动机成为现代航空发动机的主角。时至今日，涡扇发动机仍是各国战机的主要选择。

航空界有句名言：“一代发动机决定一代战机。”涡扇发动机在近60年的发展过程中，伴随着三代战机的成长起飞。事实上，这是一个复杂又漫长的过程，以俄罗斯AL-31F加力式涡扇发动机为例，其研制过程耗时12年，试验机多达



图①：2018年11月6日，加装了矢量喷口的歼-10B推力矢量验证机亮相第十二届中国国际航空航天博览会，飞出“眼镜蛇”“落叶飘”等超级机动动作，标志着中国国产发动机技术取得重要突破并进入实用阶段。

图②：NK-32航空发动机。资料照片

51台，总运转22900小时。由此可见，研制航空发动机并非易事，需要反复试验论证，才能加装到战机上。

### 研发发动机要解决多重难题

研发一款新型航空发动机需要多少年？

以第四代航空发动机研发为例：从前期设计到进入工程制造和发展阶段，美国用时9年，欧洲四国联合用时10年。毫不夸张地说，现代航空发动机的研发需要动用举国之力。这也是世界上只有少数国家能够自主研发航空发动机的原因。

20世纪60年代以来，世界各国在航空发动机的研发过程中，总结出“技术验证机—工程验证机—原型机”为核心的样机迭代模式。经过反复验证，样机的可靠性、耐久性将会得到持续提升，直至达到定型标准。这一过程看似简单，但研发出发动机样机仍需解决四大难题：

一是提高增压比。如果将航空发动机比作一个喷气气球，那么内部压力越大，气球飞得越快。为获得更高的增压比、产生更大推力，航空发动机内的空气通常需要经过多级压气机叶片压缩。那么，提升风扇叶片的增压效率至关重要。

如何提高增压比？20世纪80年代，英国丹顿教授开发出一套三维叶轮机械数值模拟程序。它可以将空间细分为很多独立单元格，通过计算机模拟计算出各个节点上的流体参数。这些仿真数据可以有效缩减发动机试验时间，国外一家企业使用模拟仿真方法后，研制第四代航空发动机的时间较上一代缩短了5年。

二是增强耐高温能力。军用涡扇发动机的涡轮前温度越高，越有利于提升发动机推力。发动机燃烧室的温度超过2000℃时，涡轮产生的温度将达到1500℃。在这样的高温环境下，一般金属会熔化殆尽，增强发动机内部构件的

耐高温能力势在必行。

既然金属难以抵挡超高温，科研人员另辟蹊径——开发陶瓷材料。比如，美国普惠公司开发出的陶瓷基复合材料，可以承受1500℃高温，重量却只有镍基高温合金的1/3，持续在1200℃以上高温下工作具有良好的抗疲劳性。

三是解决承压难题。发动机叶片每分钟转速高达15000—16000转，此时转动叶片的离心力相当于叶片重量的10000倍。航空发动机1个叶片榫头所承受的离心力约为15吨。因此，解决连接榫头承压问题非常重要。

为此，英国罗罗公司反其道而行，直接摒弃连接结构，在新研发的EJ200涡扇发动机上采用整体叶盘结构设计，减少应力集中带来的断裂风险；简化压气机转子结构，使发动机重量减少30%以上，高转速下的承压问题迎刃而解。

四是找出问题隐患。发动机不光是设计出来的，更是试验出来的。一款新研发的航空发动机，必须经过叶片飞脱试验、耐久试验、吞鸟试验等30多种试验，在试车台、高空模拟试车台和试验机上运转上万个小时，以充分暴露发动机的各种问题。

为提高试验效率，国外航空发动机企业开发出智能化试验平台。21世纪初，美国阿诺德工程发展中心的高空台完成了现代化和一体化升级改造，增加了多种故障模拟以及快速诊断排故等功能，可对试验件的功能、性能、安全可靠性能进行全面测试评估，加速了航空发动机的研制进程。

### 人机协作让设计师梦想成真

一款新型航空发动机的研发技术再先进、设计图纸再完美、试验再成功，不能批量生产出来，最终还是取决于发动机制造厂的制造技术水平。

冷战时期，美苏两国开展军备竞赛，单从发动机产能方面讲，美国通用

电气公司在全国设立多条生产线，每月最多可组装1000多台发动机；苏联9家工厂开足马力，一年内能生产出4000多台发动机。

进入21世纪，随着信息技术与工业生产的深度融合，航空发动机生产进入智能化制造阶段，呈现出“数字化、网络化、智能化”的新特征。人机协作模式下的航空发动机制造，大致分为以下3步：

第一步是精密制造。航空发动机的内部结构复杂，每个零部件的加工精度和表面质量的标准极高。为了让构件与图纸要求丝毫不差，工程师会综合运用精密制坯、抗疲劳制造、特种加工等多项先进技术，将加工误差缩小到微米级。此外，近几年兴起的3D打印技术也被引入航空发动机的制造工序，有效攻克零部件制造复杂、难以切削等难题。

第二步是智能组装。航空发动机各零部件的组装必须丝毫不差，任何安装错误都可能导致无法挽回的事故。在自动化生产线上，工程师通过操控机械臂，一般按照压气机叶片、燃烧室、油路管路、涡轮、涡轮轴、发动机外壳，加力燃烧室的顺序依次安装。同时，工程师还可以借助增强现实技术，在操作屏幕上观察每个零部件的准确位置，以检查安装是否正确。

第三步是出厂检验。为保证每台出厂的发动机都是合格品，工厂会对每台发动机进行详细检查。目前，法国赛峰集团已实现自动化系统与品控人员协同开展检查工作，机器人会在预定的检查点从不同角度拍摄安装情况，并实时将这些图像与发动机的数字模型进行比对。机器人每小时可检查460个点位，每天能够完成6台发动机的检查任务，大幅提升了检验效率。

出厂并非意味着结束。随飞机上天的新型航空发动机还需要接受实用性测试，针对使用过程中出现的问题，持续优化产品设计。从这种意义上讲，航空发动机的出厂“合格证”永远都是暂时的，只有时间和战场，才是其最严苛也最有效的“检验员”。



身材魁梧，体格健硕，笑起来眼角的眼鱼纹聚成了一朵花。初次见到航天科工集团二院某研究所研究员唐旭东，很难将眼前这位憨厚的大哥，与技术牛人联系起来。

也难怪同事们说他“牛”，近几年唐旭东的成绩单很亮眼——取得国家发明专利10余项、授权软件著作权2部、发表专业论文40余篇。大家说，唐旭东是研究所里的“定盘星”，只要他一出手，就没有啃不下来的“硬骨头”。

有一年，唐旭东接到集成式全数字电动舵机的科研任务。当时，这款新设备在国外被广泛运用，而国内关键技术仍被“卡脖子”。了解这一情况后，唐旭东眉头一皱，甩出一句话：“别人能做出，我们凭什么不行？”

说干就干。然而，他在梳理资料后发现，该技术一无数据指导，二无参数引路——就像造房子，连地基还没有打下一根桩。

一时间，唐旭东犯了难。几天后，通过论证分析，他制订了一份攻关计划表，详细标注了工作内容和步骤。但令大家意外的是，他又大手一挥，把“时间”一栏勾掉了。

这是为何？唐旭东内心清楚任务的艰巨性——“任务越是复杂、越是重要，越不能盲目赶时间、追进度。必须沉下心来，从基础理论知识开始学习，日积月累、久久为功，直到干出来为止。”

虽然计划表上没有时间，但唐旭东的心里始终装着一个计时器。他争分夺秒地开展科研攻关——各种书籍资料堆满办公室，对照教程资料，自学零部件设计制造等相关技术。那段时间，唐旭东的大脑每天都在高速转动，时常迸出创新火花。

半年后，唐旭东成功打造出第一台电动舵机样机，其智能控制算法设计科学，软件运行稳定，得到业界人士一致肯定。

看着这台样机，唐旭东像是欣赏一件艺术品，他笑呵呵地对大家说：“你看，我们的技术不比国外差！”

机器“没差”，他的身体却变差了。一次体检，唐旭东被诊断出脑垂体瘤，医生嘱咐他：“如不及时手术，可能会危及生命。”但那时候产品研发进入关键阶段，唐旭东悄悄把体检报告藏在抽屉里，继续投入工作。直到手术前一天，唐旭东向所里领导请假，大家才知道他的病情。

为了这件事，妻子既生气又心疼，唐旭东笑着向妻子道歉：“等这个项目结束，我一定好好休息，好好陪你。”

唐旭东的“牛脾气”，妻子是知道的。但她没有想到，唐旭东能倔到这

# 「拓荒牛」的「牛脾气」

■雷彬赵森

种地步——手术出院后尚在康复期，得知产品攻关遇到技术难题后，他立刻返回工作岗位。

从头了解情况、逐个部位排查、逐项问题分析……技术难题成功攻克，唐旭东拖着疲惫身躯回家休息。妻子叹了口气，无奈地说：“你啊，真是一头‘老黄牛’，不累倒不要休！”

“科研工作连着部队战斗力建设，军工人不能有丝毫懈怠。”唐旭东常把这句话挂在嘴边。不久前，一项系统试验遭遇技术瓶颈，唐旭东带领团队成员奔赴试验场，争分夺秒地开展攻关。

勇当技术“拓荒牛”，唐旭东的“牛气”不减当年——连夜修改方案，现场进行论证，经过多次改进，他们最终找到问题破解方法，保证了该系统试验的顺利进行。

“唐老师，真牛！”从试验场凯旋，研究所里的同事们向他连连点赞。

## 铸剑·人物速写

### 德国枪械设计师雨果·施麦瑟将冲锋枪和重机枪的优势合二为一，成功打造出一款名枪——

# Stg-44:突击步枪的“鼻祖”

■李双吉 陈昭

## 军工档案

提及突击步枪，不少军迷会联想到AK-47、M16等世界名枪，但说起突击步枪的“鼻祖”——Stg-44，大多数人并不知晓。

二战期间，冲锋枪的问世弥补了近距离作战火力不足的问题，但冲锋枪的有效射程仅有100米左右，不能满足远距离射击需要。而射程更远、威力更大的重机枪又存在重量大、灵活性差等方面问题。

如何将这两种枪械的优势合二为一？德国黑内尔公司枪械设计师雨果·施麦瑟率先开启了新型枪械的研发工作。研发初期，雨果遇到了一个难题——新枪威力更大，但难以保证连续射击的稳定性。

在一次武器展会上，一支采用短药筒弹药、能够稳定射击的步枪引起雨果的注意。“使用短药筒弹药可以提高步枪射击稳定性。”兴奋不已的雨果马上开展试验论证，并成功研制出7.92毫米子弹。这种子弹尺寸仅为过去步枪子弹的三分之二，枪的后坐力大大减小，冲锋枪连续稳定射击的技



术难题也随之破解。

1942年，第一批冲锋枪诞生，之后被命名为MP-43冲锋枪，并顺利通过军方审批，开始进行量产。次年，这款新枪投入实战，在库尔斯克会战的一次战斗中，德军阵地上数支MP-43冲锋枪突然开火，密集的子子弹射程更远，威力更猛，其突出的作战效能得到了战场验证。

“我们需要更多的MP-43冲锋枪！”新枪的良好性能让德军下令加大MP-43冲锋枪的生产数量，并将其更名为Stg-44突击步枪。

二战后，各国纷纷仿制仿制Stg-44，突击步枪随之取代冲锋枪和半自动步枪成为步兵的主要武器。时至今日，在中东地区仍能见到Stg-44突击步枪的身影。

上图：Stg-44突击步枪。资料图片