

国际航空界流传着这样一句话：“发明一架飞机算不了什么，制造一架飞机也没什么了不起，而试验它才无比艰难。”

一般来讲，一架战机的诞生必须经过论证、设计、试制和试飞4个阶段，而试飞在所有环节中周期最长、要求最多、风险最大。俄军苏-57战机2010年首飞，之后经过9年的漫长试飞，

攻克了发动机故障、飞行控制系统失灵、失速尾旋等诸多问题，才进入量产环节。所以说，战机试飞是一个漫长又复杂的过程，需要设计师、试飞员和机务人员等全员参与。

那么，战机为什么要进行多轮试飞？试飞要经历哪些方面测试？首飞要注意什么？本文为您答疑解惑。

战机试飞路漫漫

■唐浚 何丹萍

军工科普

为什么试飞 飞行包线，画上一道“红线”

从战机诞生之日起，试飞就一直伴随着战机成长。

试飞，顾名思义，就是在真实条件下进行科学研究和产品试验的过程。试验对象是各种各样的飞行器，比如战斗机、轰炸机、运输机、直升机以及专用试验研究机等。

广袤天空，浩瀚无际，但战机不是脱缰野马，有着严格的飞行限制，这就是飞行包线。

越过飞行包线，战机可能会发生操作失控、发动机停车、结构损坏等故障问题。试飞目的就是要验证和确定各类飞行包线，给战机画上一道“红线”。

试飞员和试飞工程师，是“红线”边缘的探索者和实践者。在试飞过程中，试飞员要接近甚至突破这条“红线”。

新型机试飞前，没有任何飞行测试数据，几乎是一张白纸。试飞就是摸清新型机的极限在哪里，为新型机填上各项性能参数。飞行速度有多小，战机会因升力不足而无法操纵；飞行速度有多大，战机结构可能发生不可逆的损坏。

为检验装备的动力性、可操作性、安全性等设计方案是否合理，新型机一般要经过成百上千次的试飞才能定型。一旦定型后，才会批量生产，列装部队。

试飞流程是什么 飞行大纲，为性能测试划定标准

早期战机，试飞过程比较简单，常常由设计师、试飞员、试飞工程师组成，整个试飞过程完全是“跟着感觉走”，试飞结果很不托底。那时候，一款新型机只需进行10多轮试飞就可以定型投产。

现代战机结构复杂，包括数十个子系统、上万个零部件，俄军苏-27战机武器悬挂架为6个，苏-35战机武器悬挂架则增加到12个；美军F-22战机的软件程序源代码为400万行，而F-35的软件程序源代码则达到1900万行。

要想把这样复杂又庞大的系统和零部件整合在一起，还要保证安全可靠，试飞的要求、难度远超以往。现代战机的试飞流程，通常是由试飞工程师确定试飞鉴定方案，经过相关航空机构批准后，试飞工程师再根据鉴定方案形成飞行试验大纲，并将试飞任务分配给课题组分头实施。

按照飞行试验大纲要求，课题组



工程师进一步细化，形成每一架次需要试飞哪些科目、获取哪些参数的具体任务单。最后，所有科目都要由试飞员根据任务单进行逐一试飞。

首架验证机生产出来，不能马上试飞，先要在地面进行在环试验，就是给验证机打上液压、通上电，飞行员驾驶战机模拟飞行状态，通过这种方式来检验验证机的各项功能指标。

在环试验完成后，战机即将迎来第一次飞行，也就是我们熟知的“首飞”，这其实只是战机的“入学考试”。

首飞做什么 飞行验证，摸清基本飞行参数

战机首飞，即指验证机首次离地飞行。但首飞之前还需要进行试飞准备和地面滑行两项工作。

地面准备包括测试改装、地面试验和试飞队伍培训等多个内容；地面滑行则分为低速、中速和高速滑行。对现代战机而言，一般低速滑行速度为30-80公里/小时，中速滑行速度为100-180公里/小时，高速滑行速度为200-240公里/小时。

低速滑行主要检查战机滑行运动特性，包括转弯能力、精确保持直线滑行能力和曲线滑行修正能力；中速滑行主要检查战机在滑行振动条件下，结构牢固性和各系统工作状态；而高速滑行风险程度最高，有可能会直接实现首飞。战机在高速滑行过程中，可能会提前离地，此时如果通过油门和刹车中断滑行，可能会因为跑道长度不够造

成飞行事故。这种情况下，将战机加速升空要比强行地面减速刹车更为安全可靠。

1974年，美国YF-16战机在高速滑行时突发故障，试飞员急中生智加速起飞，战机离地飞行，意外地实现了首飞。

在高速滑行试验后，战机就可以进行首飞。战机首飞通常会选择一个能见度高的天气——没有低云和侧风。首飞前，会尽可能减轻战机起飞重量，以最大限度减小起飞离地速度、缩短起飞滑跑距离，从而改善驾驶条件。

当战机完成一个架次飞行并成功降落，战机最基本的系统功能就得到初步考核，标志着该机型完成首飞。

关于首飞还有两个不为人知的小细节：一是首飞时，战机飞行时间比较短，飞行过程中不会收起落架；二是通常会安排战机组飞行跟观测，在空中对战机进行实时观测、记录飞行数据、拍摄照片和视频，保证战机在首飞过程中的安全。

后续工作干什么 全面体检，优化战机性能

首飞后，战机还要进行调试试飞和定型试飞两个环节，才能正式列装部队。

调整试飞，就是发现并改善战机各种设计和试制问题，相当于“摸底考试”。

一般来说，战机试制过程中，难免会出现失误和遗漏。比如，一个合格的产品装在新型机上使用，一定不会正

常工作；机务人员对新型机认识不够充分，偶尔会出现操作失误。这些不确定因素，会造成试飞前计算的数据与实际飞行数据存在差异。调整试飞可以集中解决战机设计和制造问题，使战机保持在相对稳定的试飞状态。

调整试飞后，战机将进入定型试飞，这是战机的“毕业考试”。这个阶段，将对定型战机进行全面体检，鉴定战机是否达到技术指标和使用要求。

定型试飞是在国家飞行试验研究基地进行，通常会制造多架验证机，以加快试飞工作进度。例如，美国国家航空航天局阿姆斯特朗飞行研究中心、俄罗斯茹科夫斯基空军基地、英国吉内蒂克集团等，都是世界著名的试飞机构。

在战机试飞过程中，定型试飞风险最大、耗时最长、科目最多。特别是对新研制的战机来讲，这一阶段，从基本飞行性能到边缘科目，从航电系统到机载武器都要进行全面测试。

完成定型试飞后，战机会正式列装部队。

试飞铺就通天路。试飞贯穿于战机设计、研制、生产、鉴定和使用的全过程，是各种航空新技术研究的重要手段。例如，高超音速、前掠翼、变后掠翼、垂直起降等重大技术，“眼镜蛇”“赫伯斯特”“落叶飘”等机动动作，无一不是通过飞行试验研究取得的。

可以预见，随着新技术快速发展，试飞内容将变得更加丰富、更加科学、更加高效。

上图：在第15届莫斯科国际航空航天展览会上，苏-57战机在完成飞行表演后降落。

新华社发



『练好本领，才能因应时代之变』

海军某修理厂仪表技师夏伟伟

■赵振宇 胡丹青

南海之滨，椰风拂面。傍晚，银盘般明月从海面悄然升起，椰树摇曳的倒影定格在银色沙滩上。

伴随巨大轰鸣声，最后一架战机平稳落地，海军某修理厂仪表技师夏伟伟拭去额头上的汗水，结束了一天忙碌的工作。

身材魁梧、两眼炯炯有神，见到夏伟伟第一眼的人，很难将他与仪表技师联系在一起。篮球场上，风风火火的他，不时上演突破上篮的精彩动作；到了维修一线，他又心细如发，一丁点问题也不会从他的眼皮子底下溜走。

在战友们眼中，赛场上他是能攻善守的好队友，工作中又是一名严谨细心的好搭档。夏伟伟常说：“打篮球与做仪表技师有着相似之处，都是在细节上下功夫。传球的速度、投篮的精准，决定最终得分多少；而维修仪表，同样是要准确发现问题、快速处理故障。”

仪表设备是飞机获取参数、找准航线的“眼”，维修不能有半点马虎。“细致出真功。”夏伟伟深谙这个道理，20多年的军旅生涯，为了练得真功，他下了比常人更多的功夫。

刚入伍时，面对密密麻麻的仪表设备，他一脸愁云。学理论、练操作，在老班长的细心帮助下，用了一年多时间，夏伟伟进步飞快，很快就可以独当一面。

当时，我国战机多使用机械仪表设备，有时候地面通电试车参数正常，但一上天仪表就反馈有偏差。年轻好强的夏伟伟没有气馁，他暗下决心要和仪表故障“杠”到底。

通过与工厂人员实地交流、收集飞行员反馈，夏伟伟成功整理出一套减少误差的操作办法，这套经验一直沿用至今。

“练好本领，才能因应时代之变。”夏伟伟认为，战机不断迭代更新，但故障的类型和特点都是有迹可循。“这和打篮球一样，虽然每一场对手不一样，但只要用心总结、刻苦训练，就能找到克敌制胜的‘招数’。”

一次定检任务中，夏伟伟对路线进行检查。在检查氧气系统时，他发现一个致命故障——氧气仪表显示为“0”。这可是一个大问题。战机飞行时如果遇到紧急情况，机上所有人员的呼吸全部要靠氧气维持。”夏伟伟不由得惊出一身冷汗。

夏伟伟马上召集战友们对氧气系统进行全方位检查。时间一分一秒地过去，午后骄阳似火，豆大汗珠从夏伟伟的脸颊滑过，他来不及拭去汗水，马上开展详细排查，最后断定是供氧管路或氧气瓶有裂痕，才导致氧气泄漏。

想要从成千上万条管路中，准确找到裂痕，是一项极其复杂的工作。看着战友们为难的表情，夏伟伟主动站了出来，前去排除故障。

阴暗逼仄的机舱内，夏伟伟打着手电筒，一点一点地查找裂痕，从驾驶舱到休息舱，从工作舱到地板舱……身材高大的夏伟伟，没有被狭窄的空间限制住，他拿出在篮球场上带球突破的本领——正手、反手、勾手……几个动作反复做下来非常灵活。

“找到了！”过了一会儿，夏伟伟成功在氧气瓶底部发现一处头发丝般粗细的裂痕。更换氧气瓶，故障得以顺利排除。看着氧气仪表数值恢复正常，夏伟伟开心地笑了。

“别看他平时大大咧咧的，工作起来却像一个大姑娘，‘绣花功夫’了不得。”渐渐地，夏伟伟严谨细致的工作态度在厂里出了名。

“不管多么复杂困难的问题，只要有他在，我们感觉很托底。”提起夏伟伟，战友们纷纷竖起大拇指。

军工人物

改进加特林机枪——

土洋结合的“格林快炮”

■韩启仁 倪浩洋



洋务运动期间，清政府对国外先进武器表现出极大渴望。这时候，加特林机枪凭借能够连续射击、火力强悍的特点走进清政府的视野。1874年，清政府不惜花重金购买了数十挺加特林机枪。

虽然加特林机枪火力强悍，但存在重量大、战场机动性差等问题。随后，清政府命令金陵机器局仿制并改进这种武器。金陵机器局摒弃了加特林机枪沉重的金属双轮，巧妙地将机枪安装在独轮小车上，这使得重达120公斤的机枪可以在崎岖的道路上灵活行动，大

大增了这款武器的战场机动性。随后，清政府相继在上海、南京和天津等地建立生产线，进行大规模生产。这款机枪射出的子弹声与当时火炮打出的炮弹声有些相似，于是清政府把它称之为“格林快炮”，并大量装备清军。

上图：金陵机器局仿制改进的“格林快炮”。

资料照片

十年攻关只为海上搜救而生

■任剑翔 李纬

是一个世界性难题。虽然当时初步建立了近岸飞行员搜救体系，但无法满足战时中远海域的搜救需求。于是，李洪烈萌生了一个想法——研制一套可靠的飞行员遇险定位系统。

研发之初，他们面对的几乎是一张白纸，没有太多材料可以借鉴学习，李洪烈马上成立攻关团队，深入部队和军工企业进行调研。设计多大合适？安装在哪个部位？会不会干扰飞行？每一个问题的背后，都需要一次次试验做支撑。

他们用辛勤付出编织出梦想的翅膀，助力项目成果的诞生——2017年6月，第一代飞行员遇险定位系统问世。

为检验系统可靠性，团队成员、海

上搜救学科方向带头人杨航主动请缨，参加真实海域环境测试。一天上午，他佩戴好飞行员遇险定位系统，跳入冰冷刺骨的海水中，无助力漂浮近3个小时。

归来后，看到杨航嘴唇发紫，手脚还生了冻疮，妻子心疼不已。他却笑着说：“能收集到第一手试验数据，苦点累点都值得！”

“我们设计的系统好不好用，官兵最有发言权。”为了让系统更贴合部队需要，杨航详细收集了官兵的意见，不断改进升级系统。

李洪烈介绍说，该系统具备地理信息、传感器检测、生命体征探测、自动化智能报警和应答信息处理等功能，能够为遇险人员提供高精度、全天候的实时

定位服务。

去年底，李洪烈凭借发明成果获得军队科技进步一等奖。

“方位确定，飞行员‘落水’等待救援！”今年10月下旬，一场由该校与地方交通运输部门组织的海上搜救演练，在渤海某海域展开。

演练现场，笔者看到，搜救机组依托该系统提供的数据，从定位决策到开展搜救，整个救援过程进展顺利。

“这次演练只是一个起点，后面我们还要持续创新改进系统，让官兵们用上更好的设备。”李洪烈说。

集智攻关

海上搜救，时间就是生命。飞行员紧急弹射逃生时，高效精准搜救关系到他们的生命安全。一直以来，落水人员定位难、时效性要求高、指挥协同复杂等特点，制约着海上搜救课题发展。

前不久，海军航空大学某科研团队自主研发出一套飞行员遇险定位系统。装上这个系统，飞行员一旦遇险，搜救队会及时赶赴现场，开展搜救。

在模拟训练中心，笔者见证了这款系统的使用效果。当飞行员落水后，遇险定位系统自动开机发出信号，信号传输到指挥船和塔台，在监控室显示屏上呈现出一颗不停闪烁的绿色荧光点，光点所处坐标就是搜救目标具体位置。

“海上搜救不同于陆地搜救，落水人员定位受天气、海况等因素影响，定位数据差距大。”该项目负责人李洪烈教授介绍说，这套系统能够在中远海域的特殊海洋环境下进行海上航空遇险应急搜救。

研制该系统，李洪烈和团队成员用了整整6年。通过查阅资料，李洪烈发现，早在二战时期，飞行员海上搜救就

历史钩沉