

## 跟着院士学科技

请想象这样一组画面：

试验台上，一台正在研制的新型航空发动机，还没有真正装上飞机，大屏幕上已展示出它在高原起飞、超声速飞行等各种情况下的工作状态；机库里，一台结束飞行任务回来的飞机刚刚停好，不用拆卸任何部件，一份“健康体检报告”已自动生成。

研发车间，工程师根据电脑上的仿真结果，设计调整发动机某一级叶片的形状，智能机床很快生产出新的叶片；装配现场，工人借助数字

化指引装配发动机，所有数据都被自动记录，成为这台发动机“终身档案”的一部分……

这些正在发生的变化，背后都是数字技术在发挥作用。近年来，数字仿真、数字孪生、大数据分析、人工智能等技术，正加快融入航空发动机的论证、研发、制造、使用和修理全过程，悄然改变着“飞机心脏”的发展路径。

本期“跟着院士学科技”，我们邀请中国科学院院士、空军研究院研究员甘晓华，为您讲述——

## 数字技术：全链条赋能“飞机心脏”研造

■马树廷 宋东彬 本报记者 贾启龙

## 先在电脑里“造”一台发动机

在许多人印象里，研发一型新发动机，总离不开画图纸、制样机、做试验。而今，要研制新发动机，第一步却是先在电脑里“造”一台。

这台“造在电脑里的发动机”，被称为“数字样机”。它不仅具备和真机一样的外形，而且包含材料、气流、受力、温度等大量信息，能将它各种状态下的表现“算”出来。

有了“数字样机”，发动机研发的方式发生了明显变化。

方案比选更充分：过去要比较多种设计方案，往往需要做多套零件，反复试验；现在可以先在电脑里做几十甚至上百种方案的仿真对比，把最优的一种确定为要发展的型号，再做成实物样机，进行试验验证。

性能预测更全面：数字样机可以模拟发动机在高原、高温、高寒等多种环境下的表现，预估推力、油耗、温度等关键指标，为后续设计提供依据，并减少试验量。

问题发现更靠前：某个部位温度过高、某一叶片受力过大，以前可能要到实体试验阶段才能暴露，如今在数字计算的仿真阶段就能发现并修改设计。

简单地说，就是“先在电脑里多设计、多试验，先在虚拟世界里多失败”，真实样机出来后，成功的可能性就更大。

以英国罗罗公司为例，在高达1000发动机项目中，他们首次建立了完整的三维数字样机，实现了气动、结构和冷却系统模型的集成；高压压气机设计采用参数化建模后，叶片改型周期从3周缩短至3天。

## 让研发设计和制造车间“说同一种语言”

数字技术不仅改变了发动机的研发流程，也改变着其制造流程。

过去，从设计到制造，中间往往要经过多次转换：设计图交给工艺人员，工艺人员再写加工流程、编程。每换一次人、换一个环节，都可能带来理解上的偏差。现在，随着“数字化设计—制造一体化”的推进，越来越多企业正在打通这条链路——

设计人员在三维软件中完成零件设计后，不仅生成图纸，还生成包含尺寸、材料要求等信息的“数字模型”。制造部门可以直接在数字模型上提出修改意见，两边在电脑上模拟加工过程，一起寻找既满足性能、又便于生产的方案，避免陷入“图纸很好看，零件很难做”的窘境。融合近年来新兴的3D打印技术，制造环节可在此基础上直接生产，尽可能地减少中间环节和由此引起的问题。

制造部门和设计人员如今“看的是同一个模型，说的是同一套数据”，沟通效率也比以前快多了。

空客A320neo、波音737MAX和中国商飞C919等飞机使用的LEAP系列发动机，应用数字技术后，研发周期缩短了20%，从设计到认证仅用5年就完成，远快于传统7~8年的周期。

## 数字化生产线让“精度”看得见、控得住

航空发动机对精度要求极高，很多尺寸允许的误差只有头发丝直径的几分之一。

在传统模式下，保证精度很大程度上



由中国航空发动机集团有限公司研制的AES100发动机。

新华社发

上依靠熟练工人的经验和反复测量记录。如今，随着数字技术在制造环节深入应用，越来越多的生产线开始变得“可视、可控、可追溯”。

在某发动机零件加工现场，机床与测量设备相连，加工完成后可以自动进行关键尺寸测量，并把结果写入系统。一旦发现偏差接近允许极限，系统会自动提醒操作人员，以便调整后继续加工参数。多台设备的数据汇总到一起，操作人员可以看到整条生产线上不同机床的“稳定性水平”，为设备维护提供依据。

过去靠人拿卡尺、拿千分尺一条条测量后记在纸上，现在数据自动采集、自动存档，既准确又便于分析。只要遵守工艺、配合系统提示，稳定性比以前更好。

通过这种方式，数字技术正在让发动机制造从过多依靠“经验”变成“经验+数据+系统”共同发力，让高精度、高一致性不再只是少数“老师傅”的看家本领，而是整个生产线的普遍能力。

## 用数据给发动机“看病”

同一型号的发动机，维修频率为何差异显著？一个重要原因在于其经历的“战场”不同：有的历经更多高强度严苛飞行，有的则执行了相对温和的任务。

过去，很多维护计划有统一的标准，比如飞行多少小时必须大修一次。现在，数字技术让维修计划更加“因材施教”。业内正在探索为每一台发动机建立“数字档案”和“数字镜像”，这就是所谓“数字装备”的重要特征。

也正是这个原因，现代航空发动机上布满了各种传感器，就像一组组“电子听诊器”，时刻在收集转速、温度、压力、振动、燃油流量等数据。

简单说，就是“一台发动机一本

账”，而且这本账是自动记的、实时更新的。有了这样的“数字账单”，机务人员就可以更加精细地安排维护。

对“飞得多、飞得狠”的发动机，适当提前检查和更换部件；对状态良好、使用负荷不大的发动机，避免过早拆检，节省资源；对发现变化趋势不正常的发动机，适时做专项检查，防止小问题变成大问题。

这既提高了机队整体的安全水平，又让有限的维修力量和备件资源用在“最该用的地方”。

## 为战机加装了一套看不见的“数字底座”

军事领域，数字技术在发动机全生命周期中的广泛应用，正在成为航空兵部队战斗力生成的重要支撑。

在论证和设计阶段，数字技术可以用更短时间、更少试验次数，形成更成熟的发动机方案，缩短从“概念”到“装备”的距离。在制造阶段，通过数字化生产和质量控制，提高发动机的一致性和可靠性，让每一台“飞机心脏”更加靠谱；在使用和维护阶段，通过状态监测和数字孪生，提高发动机完好率和出勤率，让战机在关键时刻

“拉得出、用得上、顶得住”。这些技术层面的进步，对战斗力的影响是实实在在的，可以让战机发动机飞得更稳、用得更快更可靠。

不过，快步前进，也要守好安全与可靠这两条“红线”。

一方面，大量型号参数、试验数据、故障案例集中在数字平台上，必须采取严格的安全防护措施，防止泄露和攻击；另一方面，如果过度依赖系统和算法，而忽视人员能力建设，一旦系统异常，可能会出现“有数据不会看、没系统不会干”的情况。再先进的系统，也只是辅助决策的工具，在关键时刻还是要靠人来综合判断、拍板决策。

为此，推进数字化的同时，需要统筹推进数据安全防护体系，确保关键信息“进得来、用得上、守得住”；加强基础技能训练，让一线人员在会用新工具的同时，保留扎实的传统本领；在制度上明确“人始终在回路中”，重要结论必须经过人工复核。

数字技术带来的航空发动机变革，是一项体系化工程，不仅在于成本、周期、效率、质量等方面的改进，更影响着供给能力体系、保障方式变革、人员结构转型等多个方面，犹如为战机加装了一套看不见的“数字底座”，托举它们飞向更远的天空。

本版制图：吴淮江



左图：甘晓华近照。

王军摄

AI修饰生成素描画

科研之路充满挑战与荆棘，没有“十年磨一剑”的定力，就不会有“一朝试锋芒”的胜利。

—甘晓华

## “太空菜园”来了

■郝明鑫 卢瑞华



中国空间站的太空番茄长势喜人。图片来自中国载人航天工程办公室

绿意萌动、生机勃勃，经过神舟二十一号乘组3个月的辛勤耕耘，太空番茄长势喜人。一茬茬蔬菜在中国空间站喜获丰收，不仅丰富了航天员的在轨食谱，也为空间站增添了一抹生机。

从神舟十一号乘组开始，空间站内陆续开展多类植物种植实验。截至目前，“太空菜园”实现了多种植物从种子播种到收获的全周期培养。

在空间站开辟“太空菜园”，仅仅是为了满足航天员食物供应吗？

有关专家表示，种植的植物可以通过光合作用为航天员提供氧气和水，在一定程度上净化密闭舱室环境。同时，这些“太空植物”对研究太空微重力等特殊环境对植物生长发育、生理生化等方面影响，从而提高作物生长速度、产量和品质具有重要作用。除此之外，“太空菜园”还能提供情绪价值，航天员通过照料植物可以缓解身心压力，调节情绪。

在“天宫”种菜，难点众多。

太空环境与地球有着很大的差别。太空没有通俗意义上的土壤，需要利用人工栽培基质作为特殊的土壤进行培养。但这并非普通的无土栽培。太空密闭环境对基质的要求极为苛刻，专家专门设计一种可生物降解、能重复

利用的植物栽培基质。这种基质以块状结构形式存在，不会脱落碎屑，而且具备良好的通气、保肥和导热性能，保证了“太空种菜”的可行性。

选好了土壤还不够。在失重条件下，植物的根如何向下扎到土壤里呢？神舟二十一号航天员张洪章解释说，虽然没有重力的引导，但是植物的根仍然会往土壤里生长，这是因为植物不仅有向重性，还有向水性。培养基质里含有充足的水分，所以种子在萌发时就会向含有水的土壤里生长。但失去重力，植物的根和茎就不能整齐地向着一个方向生长，呈现出较为凌乱的状态。

航天员表示，在太空“种菜”还有两个困难。一是浇水难，在失重环境下，水停留在根系表面，不容易深入植物根层。为此，科技工作者们开展了大量研究，最终依靠基质颗粒的毛细作用力，让根部与周围环境进行正常物质交换。二是没有阳光照射，喜欢光照的植物就不易生长。在封闭环境中模拟阳光通常需要使用600~1000瓦的灯泡，而这样的设备能耗消耗大，在太空中根本无法实现。随着研究不断推进，科技工作者们发现，阳光中的红光和蓝光对植物生长至为重要。因此，低耗能、可调节光谱的LED灯是不错的选择。

目前，“太空菜园”正在开展生菜（叶菜类）、甘薯（粮食类）、薄荷（芳香类）、地黄（药食类）和向日葵（观赏类）等植物的栽培，后续还将进一步扩大植物栽培的规模和范围，开展批量化植物生产。

## ★ 我们的太空·新知课堂

## 战机弹射座椅演进史

■郭航于晶



长空之上，每一次特技飞行、每一场战训任务都暗藏未知风险。当战机遇险

失控、陷入绝境，弹射座椅便成为飞行员最后的生命屏障。

弹射救生技术的诞生，源于战机性能跃升带来的迫切需求。1942年，德国研发出全球首款实用化弹射座椅，以压缩空气为动力，采用“先抛舱盖再整体弹出人椅”的设计，正式开启了弹射救生的新纪元。受限于早期技术，这款座椅的短板十分明显：压缩空气动力不足、设备体积庞大，只能适配中高空、低速场景，实用价值有限。

很快，火药动力的弹道式座椅取而代之，成为第一代弹射座椅的主流。它以弹射筒及配套抛射筒为动力，能将座椅像炮弹般快速弹出舱外，实现飞行员快速离机。受人体生理极限与动力模式的限制，弹道式座椅的弹射高度仅数米，只能勉强越过战机尾翼，在低空场景下根本无法保证救生伞充分张开，救生成功率受到很大限制。

为破解低空救生这一难点，第二代火箭弹射座椅应运而生。工程师在座椅上加装了小型固体火箭发动机，作为二级动力接力弹射筒，能将座椅推送至数十米高空，有效解决了低空开伞高度不足的问题。

20世纪70年代，第三代程控火箭弹射座椅正式问世。它能实时采集弹射瞬间的飞行参数，精准计算最佳开伞时机，大幅提升了高低空、高低速等不同场景下的救生成功率。历经数十年迭代，第三代座椅至今仍是全球各国空军战机的主力装备。

面向未来，第四代弹射座椅正朝着自适应、智能化、高防护的方向加速演

进。其目标是实现“全场覆盖、高成功率、低损伤”的救生效果。

“救得活”更要“救得好”。第四代座椅搭载小型化椅载惯导系统或自动导向技术，能从弹射启动到人椅分离全程实时监测飞行姿态。配合推力矢量主火箭或多向姿态控制火箭，无论战机处于何种极端姿态，弹射后都能主动修正轨迹，将座椅导向最优救生方向。除此之外，下肢与腰部主动约束技术、头颈部防护装置也实现了迭代发展，火箭推力自适应调节技术变得更加成熟。

从“被动执行”迈向“主动预判”，第四代座椅采用智能预警与自动弹射技术，能够让人工智能算法与战机飞控系统、健康管理系统深度交互，实时分析战机姿态与故障状态。当飞行状态接近或超出安全线时，系统会通过声、光、图像多维度发出预警，自动判断最佳弹射时机并启动座椅，破解了传统模式下“时间紧迫、决策困难、复杂环境适配不足”的核心瓶颈。

从压缩空气的初步探索，到智能算法的精准调控；从单一场景的被动救生，到全域环境的主动适配，弹射座椅的发展是航空科技的迭代史，更是“生命至上”理念的践行史。随着飞行训练与作战场景不断拓展，这款守护飞行员的“生命之盾”，将以更可靠、更智能、更人性化的性能，为每一次作战飞行构筑最后一道安全防线。

上图为：战机弹射座椅工作示意图。

延振宇绘

## ★ 科普笔记