

高技术前沿

机务维修迎来可视化协作新模式

■尹富

智慧培训：虚拟战场练就过硬功夫

前不久，上海某学院“航空制造与运维联合实验室”里，一场特别的期末考试正在展开。

航空运维专业的学生们戴上轻量化AR头盔，客机全尺寸模型瞬间浮现在眼前——发动机叶片纹路清晰可见，液压管路里的燃油仿佛在流动，起落架的金属质感十分逼真。大家跟着语音指引伸手操控虚拟部件，每一个动作都被后台系统实时捕捉。

这场不用触碰真机、却可比拟实操的考试，正是AR与AI联手“打造”的培训新场景。

长期以来，机务培训都是件“难事儿”。真机精密部件经不起新手反复拆装；恶劣天气检修、发动机突发停转等高危场景，现实里根本没法实操训练；一旦操作失误，不仅损坏装备，还得承担损失……这些难题让机务培训始终绕不开“学得慢、风险高、效果差”的困境。而AR与AI的应用，正悄悄破解这些痛点。

要实现虚拟培训媲美真机实操，第一步得给飞机做个“数字双胞胎”——这就是数字孪生技术的本事。研发人员用高精度三维激光扫描仪，把真实飞机从头到尾扫了个遍：小到螺栓螺纹、管路角度，大到发动机叶片轨迹、航电电路分布，都被精准复刻成包含物理特性、故障逻辑的数字孪生体。这个“数字双胞胎”不只是长得像，连“脾气”都一样：拆起落架的阻力、液压泄漏的油液流向，都和真机丝毫不差，为机务人员后续训练打下基础。

光有“数字双胞胎”还不够，AR技术让它“显形”又“可触”。机务人员戴上AR头盔，虚拟飞机和实际操作完美融合，伸手就能握住虚拟工具拆装部件，反复尝试也不怕弄坏“飞机”。现实中没法练习的突发情景、高危故障，在虚拟空间能多次重现。空中客车公司在A350飞机维修培训中引入过类似技术。学员在虚拟空间反复练习后，任务完成时间缩短约36%，任务节点判断正确率提升至94%以上。

如果说数字孪生是“道具”，AR是“显示器”，那么AI就是最贴心的“教练+裁判”。训练时，AI记录下学员的拆装步骤、工具使用规范度、故障判断速度，快速建立个人“能力档案”。

考评环节，AI变身“铁面裁判”。以前考评靠经验，现在AI把每步操作量化成具体的指标：螺栓紧固合格率、故障排除准确率、维修效率等，生成详细的“考核报告”。漏装螺栓、扭矩偏差等问题会被标红，还会推送正确操作动画，帮学员



AR+AI让机务维修迈向可视化时代。

AI图片

针对性改进，形成“训练—考评—反馈—优化”的闭环。

未来，这套机务培训模式全面推广后，有望缩短新手独立上岗时间，提升其复杂故障处置能力，减少培训中的装备损耗和安全风险。这种“黑科技”虽然还未全面铺开，已展现出让人期待的潜力。

精准维修：科技慧眼破解诊疗难题

飞机的发动机、航电系统等核心部件，常因结构复杂、视野受限，给故障排查带来极大挑战，盲目拆解不仅耗时费力，还可能损伤精密部件。

AR与AI如同“科技慧眼”与“智能大脑”，凭借可视化指引和数据化诊断，未来有望改变“经验主导”的维修逻辑。

AR眼镜正成为机务人员的“潜在随身助手”。在试点应用中，机务人员绕机检查时，AR眼镜能自动规划路线、实时识别部件状态，遇到异常情况即时报警；拆装作业时，AR眼镜的3D指引功能直接叠加实物，螺栓紧固顺序、扭矩标准等参数一目了然。国内某航空公司的实践显示，该技术可使复杂部件

维修差错率降低50%，效率提升近40%。

AI算法正逐步攻克“看不透”的难题，成为故障诊断“智能医生”。国内某航空公司研发的AI图像识别模型，在实验室测试中可精准识别0.1毫米级磨损裂纹，准确率远超人工。

如今，工程师们还在探索AI预见性维修技术——通过采集飞行、维修数据构建设备健康模型，未来有望提前预警部件疲劳状态，实现从“事后补救”到“事前防范”的跨越。

随着技术不断完善，AR+AI的协同赋能，将推动航空维修逐步迈入精准高效的智慧新阶段。

行业变革：数据驱动重构保障生态

AR+AI给航空机务维修带来的不仅仅是单一环节的效率提升，更是一场保障生态的重构。它正在推动维修保障模式从“经验依赖”转向“数据驱动”，人员能力从“个体经验”升级为“体系共享”，作业逻辑从“被动修理”变为“主动预判”，未来有望让机务维修行业焕发全新活力。

最直观的变革，体现在保障模式的迭代上。过去，维修流程、工具管理、资料查询“各成一派”，纸质工卡与分散台账“信息孤岛”，数据难以互通，既耗时又易出错。如今，AR+AI搭建的一体化平台正在将维修全流程纳入数字化管理，实现全生命周期动态追踪。

技术革新也在倒逼人才结构向“复合型”转型。传统机务人员靠“师傅带徒弟”积累经验。在AR+AI时代，未来的机务人员既需扎实的维修技术功底，又要具备解读数据、操作智能设备的复合能力。更关键的是，飞机维修知识图谱系统的研发已启动，正探索将分散的个人“绝活”转化为结构化数字资源，有望让个体经验成为“共享财富”。

这场变革正逐步构建起“数据—技术—保障”的智能闭环生态。AR+AI不再是孤立工具，而是与5G、云计算、数字孪生深度协同；5G技术降低远程AR协作延迟，未来将实现跨地域专家实时支援；云计算为海量维修数据、故障案例提供算力支撑；AI基于全链条数据持续迭代，有望实现“故障自动预警、方案智能生成、操作实时指导”的终极目标。

链条。这一学说获得了学术界的广泛认可，也平息了持续170多年的黄土成因之争。

那年，这位与黄土相伴、简朴一生的老者，郑重接过国家最高科学技术奖证书。荣誉加身之际，他心底最珍视的，依然是祖国广袤的大地。

用一生解读黄土“天书”，即使生命进入倒计时，刘东生的战场仍在科研前线。住院期间，他多次与青年学者会面，勉励他们投身科研事业。他的亲友回忆说，“尽管化疗带来很大的痛苦，他依然坚持写了好多东西。”

2008年3月6日，这位91岁的科学巨星陨落。天空之中，多了一颗“刘东生星”。

后来，中国科学院“老科学家学术成长资料采集工程”工作人员整理其遗存资料时，中国科学院大学副教授张佳静在一盘录制于2007年的口述磁带结尾，捕捉到一声穿越时空的轻轻祝福：“节日快乐……”这声来自“黄土之父”的温暖低语，如同他倾注一生的黄土研究，成为留给世界的悠长回响。

科学家手稿

我们的太空·新知课堂

2025年11月14日，神舟二十号航天员乘组返回地球，一起回家的还有斑马鱼等科学实验样品。

这是斑马鱼第二次登上太空。早在2024年4月26日，4条斑马鱼跟随神舟十八号航天员乘组进驻中国空间站。太空养鱼——一项具有划时代意义的实验开始了。

为什么选择斑马鱼上太空？

专家解释，斑马鱼是脊椎动物，生命力旺盛、繁殖能力强，它的基因组与人类基因组有高达70%以上的相似性，被认为是研究生命现象的模式生物。斑马鱼在微重力下会出现背腹颠倒、旋转、转圈等定向行为异常，通过观察它们在太空环境中的生长发育和行为，可以深入了解脊椎动物在微重力环境下的适应机制，为人类航天活动提供重要参考。它也是中国空间站除了航天员外迎来的首种脊椎动物。

斑马鱼两度飞天，科学家们研究了什么？

专家的回答是，斑马鱼两次旅程的目的和成效各不相同。

首次旅程，由4条斑马鱼与4克金鱼藻组成的小型受控生命保障系统在太空运行了43天，创造了国际水生生态系统在轨时长新纪录。“斑马鱼—金鱼藻—二元生态系统”具备氧气—二氧化碳循环、水质自动净化、定时定量喂食、鱼卵自动收集等功能。这是我国首次在太空中培养、繁殖脊椎动物。

第二次旅程，6条斑马鱼被送往太空，其中包括3条野生型、3条基因敲除型。这次实验聚焦航天医学问题，着力研究微重力对高等脊椎动物蛋白稳态的影响，明确蛋白稳态对失重造成的骨量下降和心血管功能紊乱的调控作用，为空间密闭生态系统物质循环与航天员健康防护提供数据支撑。

空间站内，如何给小鱼喂食和维持生态平衡？

中国科学院水生生物研究所研究员王高鸿介绍，“我们设计了一种特殊的鱼食，牙膏状，每天用注射器推进去，让鱼尽量吃完。”因为没有地球上规律的昼夜和光照，由上行水生支持装置为金鱼藻提供LED光源。金鱼藻通过光合作用产生氧气供鱼呼吸，鱼排泄物又给藻提供营养物质，它们彼此既是生产者又是消费者，组成一个看起来很简单，实际上内部复杂的科学实验装置。

相关实验为药物研发、疾病预防

「太空养鱼」知多少

■郝明鑫 卢瑞华

和治疗等领域提供了新的思路。随着太空探索的不断深入，太空养鱼实验必将为我们揭示更多生命奥秘，为实现航天强国贡献力量。

下图：在中国酒泉卫星发射中心空间应用系统科学实验样品制备室，中国科学院水生生物研究所研究员在调试水生生态系统（备份件）。

新华社发



美军披露制造技术新进展

■赵辉

他山之石

近日，美国国防部《2025年度战争部制造技术规划重点成果》报告出炉。这份报告梳理了过去一年美军在制造技术方面的最新进展，进一步明确了未来的发展愿景，清晰勾勒出其推动制造技术进步的国防工业基础，以追求技术优势赢得军事竞争的战略企图。

在核心项目层面，该报告重点阐述了陆军、海军、空军、国防后勤局及国防部长办公室牵头的5个子规划下的18项具体成果。

其中，陆军子规划聚焦材料研发、低成本制造和工业基础本土化发展三大目标，加大对指控系统、地面装备、航空装备、单兵装备等资金投入。项目进展主要集中在导弹部件自动化制造、复合材料橡胶履带、锂电池等方面。

海军子规划围绕潜艇、航母、驱逐舰及舰载机等海军作战平台的制造改进，发掘潜在的重大采办投资项目，研发支持性制造技术。项目进展主要集中在造船厂数字化转型、轻量化起爆炸药、涂覆材料改进等方面。

空军子规划专注高速飞行器、推进

系统、轻量化结构、特种涂层、太空环境生存能力以及关键材料等研究。项目进展主要集中在氮化镓材料工艺、高速飞行器复合材料、质量自动化检测等方面。

国防后勤局的子规划致力于推动先进制造技术的成熟化、规模化和成果应用验证，为小企业、国防供应商等提供低风险技术实施途径。项目进展主要集中在增材制造实现、抗压零部件快速制造、新型高性能低成本锂电池工艺等方面。

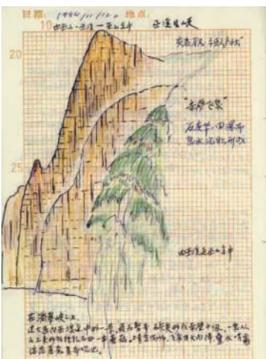
国防部长办公室牵头的制造科学与技术计划，则紧盯跨军种的国防制造需求。项目进展主要集中在服装纺织品智能化生产、新型高密度反应材料的低成本高效率生产、质量控制与质量保证系统等方面。

这些项目的推进，实质是美军将制造能力转化为作战能力的战略部署，其核心意图是通过追求本土化制造业重塑和赢得技术优势，缩短国防工业技术从规划到战场的转化周期，同时降低供应链风险。

从整体发展趋势看，美军制造技术显现出聚焦更趋前沿、军地协同持续深化、人才培养愈发紧迫等三大信号。通过强化国防制造的韧性与技术优势，为作战提供强大工业基础已成为美军当前的优先事项。

用一生解读黄土“天书”

■郭志帅 刘丰源



1994年，刘东生到三峡考察，这是他留下的野外手绘图。

选自《中国著名科学家手稿珍藏档案选》

1954年，沟壑纵横的黄土高原迎来了一群特殊的“客人”——中国首个第四纪野外考察队。年轻的地质学者刘东生参加了这次考察，开启了他对黄土的研究征程。

黄土，是中华民族古老文明的底色，是民族休养生息的根基，更是一座蕴藏地球环境变迁奥秘的巨大宝库。刘东生敏锐察觉到，黄土虽非传统矿产，其蕴藏的科学研究价值却远超矿产：“它像一把钥匙，能够解开无数的谜。”

自此，破解黄土之谜成为刘东生毕生锚定的方向。这份深沉的热爱，化作他此后数十年潜心钻研的不竭动力。

刘东生踏遍黄土高原，从南到北，自东向西，完成了逾千公里的剖面研究。吃住在野外，坚持徒步考察是他的常态。为观测关键地质现象，他攀爬过陡峭的黄土崖；野外涉水时，他曾连人带马摔入河中，相机被

冲下瀑布，生命几度悬于一线。尽管如此，刘东生始终笃信，无论技术如何飞跃，野外实地调查都是地质学不可替代的基石。

凭借着数十年如一日的坚持，刘东生在黄土领域的研究取得了卓越成就。自19世纪起，学界围绕黄土成因形成多派学说，“风成说”与“水成说”的核心争论持续了一个多世纪，“残积说”“湖成说”等观点也各执一词。这些学说却始终因实证不足而难以形成共识。

从1954年开始，刘东生持续对黄土进行研究，他带领调查小队通过实地调研掌握了大量的第一手资料，并用定量模型还原了黄土的搬运与沉积过程。在此基础上，他提出“新风成学说”，不仅将风成沉积的证据从黄土高原顶部黄土层拓展到整个黄土序列，更完整勾勒出“物源—搬运—沉积—沉积后变化”这一演化

