

# 高级教练机发展研究

张弘<sup>1</sup>, 张承宗<sup>2</sup>, 姚建尧<sup>2\*</sup>, 杨帆<sup>1</sup>, 鲍俊卿<sup>1</sup>, 刘艳芳<sup>1</sup>, 曾嵘<sup>1</sup>

(1. 航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司, 南昌 330024; 2. 重庆大学航空航天学院, 重庆 400044)

**摘要:** 高级教练机是教练机中的高端机种, 主要用于承担军事飞行人员高级驾驶术训练、初始战术训练等任务。高级教练机涉及军事飞行训练、飞行员培养、飞行人员队伍建设、新型航空武器装备使用、作战支援等多个专业领域, 具有飞行训练与技术风险大、经济性要求高、发展周期长的特点, 需要制定可行的发展路线以实现行业高质量发展。本文阐明了发展高级教练机的重要意义, 总结了国际和国内高级教练机的发展历程, 凝练并论述了高级教练机发展中的概念设计、气动设计、动力装置选型、飞行安全保障、座舱设计与操纵系统、地面综合训练、空地一体与机载嵌入式训练系统等关键技术问题, 分析了当前高级教练机发展面临的挑战。研究提出, 高级教练机发展建设应服务于新型航空武器战斗力形成、服务于军事航空飞行训练、服务于军事飞行人才培养、服务于军事航空兵部队训练和作战能力提升保障。为此建议, 建立健全高级教练机建设规划和发展型谱, 构建完善高级教练机协同推进机制, 持续做好高级教练机科研生产和服务保障工作, 深入开展高级教练机发展和飞行训练专业的预先研究, 推进人工智能应用并发展中小推力航空发动机技术。

**关键词:** 高级教练机; 飞行训练; 空地一体; 扩展现实; 地面综合训练系统; 机载嵌入式训练系统

**中图分类号:** V37 **文献标识码:** A

## Development of Advanced Trainer Aircraft

Zhang Hong<sup>1</sup>, Zhang Chengzong<sup>2</sup>, Yao Jianyao<sup>2\*</sup>, Yang Fan<sup>1</sup>, Bao Junqing<sup>1</sup>,  
Liu Yanfang<sup>1</sup>, Zeng Rong<sup>1</sup>

(1. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Company Ltd., Nanchang 330024, China; 2. College of Aerospace Engineering, Chong Qing University, Chongqing, 400044, China)

**Abstract:** The advanced trainer aircraft represent the high-end category within trainer aircraft, primarily used for military flight personnel training regarding advanced flight maneuvering techniques and initial tactical training missions. The advanced trainer aircraft involve multiple specialized domains, such as military flight training, pilot development, flight crew cultivation, use of new aviation weaponry, and combat support. These aircraft are characterized by significant flight training and technological risks, high economic requirements, and lengthy development cycles. Therefore, it is necessary to formulate viable development roadmaps for the high-quality development of these aircraft. This study examines the importance in developing the advanced trainer aircraft, summarizes their development courses in China and abroad, and identifies several key technologies in their design and deployment. These technologies include conceptual design, aerodynamic design, engine selection, flight safety assurance, trainer's cockpit design and control systems, ground-based integrated training, as well as air-ground integrated and airborne embedded training systems. The analysis further addresses prevailing challenges in the current development. It is proposed that development of the advanced trainer aircraft must serve the combat capability generation for new aviation weaponry, requirements for military aviation flight training, cultivation of military aviation talents, and enhancement of training and operational capabilities for military aviation units. Corresponding development recommendations are provided, including establishing and optimizing a comprehensive development plan and model family for the

收稿日期: 2025-09-29; 修回日期: 2025-12-08

通讯作者: \*姚建尧, 重庆大学航空航天学院教授, 研究方向为航空工程与航空发动机结构强度; E-mail: yaojianyao@cqu.edu.cn

本刊网址: [sscae.engineering.org.cn](http://sscae.engineering.org.cn)

advanced trainer aircraft; establishing a robust mechanism for collaborative development; sustaining efforts in the research, production, and service support of the aircraft; deepening pre-research in advanced trainer aircraft development and flight training methodologies; promoting the integration of artificial intelligence; and developing small- and medium-thrust aero-engine technologies.

**Keywords:** advanced trainer aircraft; flight training; air-ground integration; extended reality; ground-based integrated training systems; airborne embedded training system

### 一、前言

军用教练机是专门用于训练部队空勤人员的军用飞机<sup>[1]</sup>。1909年,世界上最早的军用教练机“莱特”A型双座飞机交付部队并用于飞行学员训练。1910年,美国成立军事航空学校,开始有组织的飞行训练<sup>[2]</sup>。1913年,专门设计的“阿佛罗”504-K教练机诞生。这些军用教练机飞行速度低,仅需与同期的战斗机性能相似便可满足飞行员的培养需求。20世纪40—50年代,喷气式战斗机问世,原有的活塞式教练机无法直接衔接飞行速度及机动性能大幅提升后的喷气式战斗机,经喷气式战斗机改装或改型而成的喷气式教练机开始用于战斗机飞行员的高级训练,由此出现了高级教练机。经过数十年的发展,高级教练机主要承担军事飞行人员高级驾驶术训练、初始战术训练任务<sup>[3]</sup>,简单改装或挂载相应载荷后还可承担对抗训练、假想敌训练、联合训练、前线低烈度战术支援、勤务保障等任务。高级教练机的操纵特点、机载设备等与战斗机相当,综合性能接近战斗机,能模拟战斗(攻击)机的战技动作;可将在价格昂贵的战斗机上的军事航空训练科目下载并迁移到训练效费比更高的高级教练机上,有效地缩短飞行训练的时间和成本<sup>[4]</sup>;也可担负低烈度的空中作战、对地攻击、勤务任务,以有限成本提高军事航空力量。一般认为,教练机飞行训练时间约占军事飞行时间的1/3。

当前,高级教练机发展成为航空武器装备体系中不可或缺的机种,各国装备的高级教练机数量众多,仅美国空军、海军就装备T-38C、T-45高级教练机近1000架,在一些小国空军中高级教练机成为主要的作战机种之一。发达国家航空兵围绕飞行训练任务,以高级教练机为中心,形成了包括地面综合模拟训练系统、机载嵌入式训练系统、分布式网络训练系统在内的高级教练机训练综合体。主要航空大国基于高级教练机发展了系列战斗教练机、轻型战斗机、攻击机,如“阿尔法”攻击机、F-5系列战斗机均是由高级教练机衍生发展而来。从装备

发展的角度看,高级教练机既要具有逼近战斗机的性能,又要发挥教学训练效能以适应学员学习,还要发挥经济适用的优势以为替代战斗机训练赢得空间;也需积极采取一机多型衍生模式,为自身发展创造条件。高级教练机不断拓展的独特使用要求,导致型号研制面临着更高的技术挑战,如美国波音飞机公司在研制“红鹰”T-7A高级教练机时因出现诸多技术问题而致工程进度后延<sup>[5]</sup>,迫使美国空军将T-38C高级教练机延期使用。

与战斗机相比,高级教练机既要完成面向单一或多种目标飞机(战斗机)教练任务、飞行员培养任务,又要具备承担多种训练、战斗、保障任务的能力,还要具有良好的经济性以便承担战斗机训练乃至作战任务。高级教练机与战斗机、轰炸机、运输机等同为飞机设计领域的主要研究对象<sup>[6]</sup>,也是较早开始市场化乃至国际化的机种。高级教练机领域已有不少研究,如积极探讨了舰载高级教练机的动力发展途径<sup>[7]</sup>、飞行训练体制和教练机装备<sup>[8-10]</sup>,国际市场教练机装备需求<sup>[11]</sup>、体系作战效能评估与优化<sup>[12]</sup>,航空工程科技未来发展方向<sup>[13,14]</sup>、教练机装备发展问题<sup>[15]</sup>。值得指出的是,当前基于人工智能(AI)、计算机视景等新技术的沉浸式训练、嵌入式训练、高保真多场景模拟训练等,给飞行训练带来了空前的机遇,也对基于教练机装备的传统实装训练模式构成了冲击。面对新技术条件下的军事飞行训练需要和新装备发展需求,正确认识发展高级教练机的重要意义,全面分析高级教练机的需求用途,科学制定高级教练机的发展路线等,是当前高级教练机发展工作的重要课题。

本文立足高级教练机领域的既有研究以及在我国高级教练机装备方向上的工程实践,研究并评述高级教练机的重要性和发展态势,辨识并把握高级教练机关键技术发展方向,深入探讨高级教练机发展面临的新挑战,据此提出高级教练机发展的工作建议。相关内容扣住工程亟需、前瞻行业发展,可为我国高级教练机领域的发展研究与工程研制提供启发及参考。

## 二、发展高级教练机的重要意义

### （一）军事航空兵训练装备体系中的骨干装备

军事航空兵是一个国家空中国防力量的主体，军事航空飞行人员、军事航空装备构成军事航空兵力量的两大支柱<sup>[6]</sup>。军事航空飞行人员培养、飞行员队伍规模维持需以飞行训练为核心依托，采用包括理论训练、模拟训练、体能训练、心理训练在内的战训体系培养并训练新飞行员，现役军事航空人员的飞行能力也需通过飞行训练得以维持。高级教练机可将在价格昂贵的战斗机上的军事航空训练科目转移到训练效费比更高的高级教练机上，能够有效缩短飞行训练的时间和成本。专门设计的高级教练机对飞行员培训更加友好，故采用高级教练机训练飞行人员效能更高。在航空大国的空军中，高级教练机是军事飞行学院高级驾驶术、初始战术训练的主力装备，也是军事航空兵训练装备体系中的骨干装备。

### （二）航空兵部队作战装备体系的必要支援装备

第二次世界大战以后的国际形势变化表明，动用航空力量的有限规模和大规模武装冲突机会在上升。有限规模武装冲突对抗的双方一般没有现代防空系统，相关战斗任务主要包括摧毁敌方前沿和战术纵深处的重要目标，对地面部队进行空中支援，在中低空摧毁空中目标和空袭兵器、无人机；多用途战斗机执行这类作战场景的任务效费比不高，而轻型战斗机可更高效地完成这类任务。跨声速、大战斗负载、良好机动性、先进航电系统、易于驾驶和维护、低成本是这类轻型战斗机的技术和经济特征，与高级教练机大多重合。基于此，航空界在高级教练机基础上研制轻型战斗机、轻型歼击轰炸机已有较多的成功实践。对于大规模武装冲突，低成本、具有一定作战效能的轻型战斗机依然是前线需要的关键装备。高级教练机不仅能够发挥航空兵部队作战装备体系必要支援的作用，而且是大国军事航空兵战斗力低成本、可持续发展的重要装备基础。

### （三）国际航空装备技术发展和军事航空交流合作的重要载体

高级教练机作为通用航空训练装备，一直是国际航空装备技术发展和军事航空交流合作的重要载

体。飞行员培养训练是世界航空界的共性关注点，我国由航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司承办的军事飞行训练国际交流会议，每次都吸引多国空军人员参加。多国联合发展高级教练机比较常见，如“阿尔法喷气”教练机由德国、法国联合发展，英国“鹰”教练机被美国海军引进并成为研制T-45舰载教练机的基础，俄罗斯、意大利合作研制高级教练机并在合作成果基础上各自发展了雅克-130、M-346高级教练机。加强国际合作，拓展交流途径，有利于促进国际与地区的和平稳定，高级教练机成为此方向上代表性的航空装备。

### （四）国家航空工业发展的重要内容

长期以来，高级教练机设计对经济性、安全性、通用性要求都很高，一直是各国航空工业实力、航空科学技术水平的展示窗口，也成为各国航空工业发展的重要内容<sup>[9]</sup>。许多国家发展航空工业都是从教练机研制起步的。我国的主要航空企业，如沈阳飞机工业（集团）有限公司、哈尔滨飞机工业集团有限责任公司、成都飞机工业（集团）有限责任公司、中国贵州航空工业（集团）有限责任公司、西安飞机工业（集团）有限责任公司、航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司，历史上都曾研制和生产过高级教练机。美国波音飞机公司、洛克希德·马丁公司作为综合性防务装备供应商，近年来分别研制了T-7A、T-50高级教练机。一方面，高级教练机市场竞争激烈，世界上现存20多条高级教练机生产线<sup>[9]</sup>。另一方面，教练机市场空间较大，各国教练机机队尚存大量待更新的老旧机型（如美国空军T-38系列教练机是40年前研制的機種），为航空工业发展提供了重要机遇。

## 三、高级教练机发展历程

### （一）发端起步（20世纪40—60年代）

在喷气式战斗机出现后，飞行速度较低的螺旋桨飞机难以承担喷气式飞机的教练任务。1947年，美国将1架P-80C改装成TP-80C双座战斗/教练机，该机不久转为T-33高级教练机。苏联、西欧国家的早期喷气式高级教练机也是从作战飞机改装/改型而来，如苏联的乌米格-15、雅克-17，英国的“猎人”、蚊T.1。同期的高级教练机还有英国的“喷气

校长”、法国的“教师”、意大利的M-326、美国的TA-4等。

随着战斗机性能的持续提升，早期的高级教练机部分转为中级教练机。1961年，美国空军招标教练机研制发展项目，随后衍生了最早专门设计的高级教练机T-38，一共生产和销售了1146架（至1972年），迄今仍有数百架T-38在延期服役，先后面向第二代战斗机、第三代战斗机、第四代战斗机培养飞行员超过5万名；对T-38的发动机、飞控系统、航电等进行了多次改进/改型，最终型号为T-38C。T-38系列教练机具有高的可靠性和安全性，气动外形设计优良，飞控系统安全可靠，事故率仅为1.2/100 000飞行小时，保持着美国空军超声速飞机的安全纪录。美国曾在T-38基础上研制了F-5轻型战斗机，开启了高级教练机衍生发展战斗机的先河，各型号共生产两千多架。同期，捷克斯洛伐克研制了L-29高级教练机，用于米格-19、米格-21等飞机的飞行员教练培训。

### （二）系统化发展（20世纪70—80年代）

早期的喷气式飞机训练对各机型衔接考虑不够全面，导致整体训练效能不高。一些国家认识到这一问题，开始研究筛选教练机、初级教练机、中级教练机、高级教练机、目标飞机的衔接问题，以减少机型、改善性能、提高效能，由此开启了高级教练机的系统化发展阶段。

1972年，捷克斯洛伐克开始批产L-39高级教练机。1973年，法国、德国合作研制了“阿尔法喷气”高级教练机。1974年，英国研制了“鹰”高级教练机。1975年，意大利研制了MB-339教练机/攻击机。1981年，美国、英国开始合作研制T-45舰载教练机，但直到1994年该机才完成研制并正式担负舰载训练任务。这些高级教练机的训练目标飞机为“美洲虎”“幻影”F-1C、F-4、F-104、米格-23/25等第二代战斗机以及F-14、“狂风”“幻影”2000等第三代战斗机。大多数的高级教练机装备了单台无加力涡扇发动机（推力约为2 t），最小机动速度低（170 km/h左右），最大迎角约为20°，具有较强的衍生发展能力（多有战斗攻击型）。这一阶段发展的“鹰”、L-39等高级教练机纳入了比较科学的飞行训练体制，提高了训练效能，也具有可靠的可靠性、维修性，服役时间普遍较长。

### （三）专业化发展（20世纪90年代—21世纪10年代）

20世纪90年代初冷战结束，各国军队进入了专业化发展的新阶段。第三代战斗机逐渐成为主力机种，第四代战斗机开始服役，相应地一批新的高级教练机启动研制<sup>[17]</sup>并开始发展嵌入式训练模式<sup>[18]</sup>。

20世纪90年代初，韩国航空工业公司、洛克希德·马丁公司联合提出了T/A-50超声速喷气式攻击机/高级教练机方案，该机以美国F-16战斗机为基础设计，于2002年首飞，装备后提高韩国空军训练效益约40%。俄罗斯雅克设计局、意大利阿莱尼亚·马基公司合作研制高级教练机雅克-130，于1995年实现验证机首飞；双方于1999年结束合作关系，各自在基本型基础上发展高级教练机。俄罗斯的生产型雅克-130于2004年首飞，采用翼身融合机翼边条、全翼展前缘襟翼、放宽静稳定度等先进气动设计，动力装置为2台AI-222-25涡扇发动机。意大利阿莱尼亚·马基公司继续独立研制高级教练机，M-346原型机于2004年首飞，具有较高的推重比，可进行大攻角机动，低速飞行性能好，成为同时期高级教练机的代表性机种。M-346和雅克-130外形相似，但发动机、航电、飞控为全新设计，配置了美国霍尼维尔公司F124-GA-200涡扇发动机，油门响应与战斗机相似；具有四重冗余的数字电传操纵控制系统、“双手不离杆”控制装置以及由飞行员激活的姿态恢复系统，配备嵌入式战术训练系统，可在真实或虚拟环境中模拟传感器、武器和威胁。

此外，为适应第三代战斗机、基础教练机均普及座舱数字显示设备的训练需要，美国将T-38A/B升级为T-38C，对座舱进行航电升级；英国对“鹰”教练机进行改进，推出“鹰”MT.MK1及改型、“鹰”50、“鹰”60、“鹰”100、“鹰”200系列型号。

### （四）信息化、数字化发展（21世纪10年代至今）

2010年以来，各军事大国进入了信息化、数字化建设的新阶段。第三代战斗机成为主力机种，第四代战斗机开始扩大服役，军事飞行员的培训目标与需求相应发生了变化。相关国家开始批量换装以雅克-130、M-346、T-50以及我国L-15为代表的新一代高级教练机。

鉴于T-38C不具备第三代战斗机以上机种的高机动训练能力，美国采用了F-16D改型的第四代战斗机配套教练机，但成本问题突出。美国空军在

2018年招标选择了波音飞机公司、瑞典萨博公司合作研发的T-7A“红鹰”教练机。T-7A运用了部分第四代战斗机技术和先进模拟技术、数字工程技术,具有大迎角飞行操作能力,配备F404-GE-103发动机,兼有模拟第五代战斗机多任务训练的特性。T-7A研制过程先后出现了设计缺陷导致机翼摇晃、弹射座椅与逃生系统方面的问题,导致研制进度后延。为了增加飞行员训练时长,美国空军在2022年推出了“空中机动性基础-模拟器”计划,试图在不降低训练质量的前提下利用虚拟现实技术培训飞行员。英国坚持采用信息化技术改进“鹰”系列高级教练机。

一些中等规模的国家开始研制高级教练机。捷克L-39NG(后改名为L-39“天狐”)开始了现代化改进/改型,于2020年完成型号认证。2023年,伊朗发布“亚辛”高级教练机及生产线,土耳其开始生产在F-16基础布局上发展的“自由鸟”高级教

练机。2024年,西班牙购买了24架“自由鸟”高级教练机。2025年,日本开始更新T-4教练机,美国海军提出了高级教练机T-45更新项目意向。

代表性高级教练机与训练目标飞机的飞行技术性能如表1所示。

### (五) 我国高级教练机领域取得的成就

我国十分重视高级教练机的发展。在米格-15战斗机之后引进了乌米格-15高级教练机,承担米格-15战斗机的训练任务。20世纪50年代,航空320厂试制成功初教-5教练机,航空601所、航空112厂自主研发了歼教-1教练机,以教练机的研制生产拉开了中国航空事业自主创新的序幕。2000年前,相继研制并生产了歼教-5、歼教-6、强教-5、歼教-7、轰教-5、轰运教-7等高级教练机<sup>[19]</sup>,保障了我国航空兵飞行训练的全面实施,部分型号的教练机还销往国际市场。2000年以来,先后研制了山

表1 代表性教练机与训练目标飞机的飞行技术性能

国家 / 地区	飞机	属性	离地速度 / (km·h <sup>-1</sup> )	进场着陆速度 / (km·h <sup>-1</sup> )	最小机动飞行速度 / (km·h <sup>-1</sup> )	最大近地平飞速度 / (km·h <sup>-1</sup> )	最大爬升率 / (m·s <sup>-1</sup> )	最大稳定盘旋法向过载值	最大使用迎角 / °	最大滚转角速度 / (°·s <sup>-1</sup> )	起飞滑跑距离 / m	着陆滑跑距离 / m	备注
美国	T-38	教练机	285	240	200	1100	145	5	19	130	740	650	—
美国	F-4E	目标飞机	290	273	230	1380	160	5	20	140	960	800	第二代战斗机
美国	F-15E	目标飞机	230	260	195	1450	270	7	26	180	340	630	第三代战斗机
美国	F-16C/D	目标飞机	290	260	250	1290	250	6.4	26	193	370	650	第三代战斗机
美国	F-22A	目标飞机	230	240	200	1300	330	6	30	200	350	500	第四代战斗机
美国	T-45A	教练机	230	205	170	1000	41	4	19	165	330	600	舰载教练机
美国	F-18C	目标飞机	260	248	205	1300	240	6.5	30	225	430	600	第三代战斗机
苏联	L-39C	教练机	220	200	165	750	21	3.42	18	150	530	650	—
苏联	米格-29	目标飞机	270	235	210	1400	330	7	26	180	600	600	第三代战斗机
英国	Mk.1	教练机	195	240	177	970	42	3.5	20	140	550	610	—
欧洲	“狂风”	目标飞机	260	213	200	1350	175	4	24	160	780	500	第三代战斗机
法国	“阿尔法喷气”	教练机	220	190	170	1000	57	4	20	180	700	630	—
法国	“幻影”2000C	目标飞机	232	260	185	1350	250	2.5	29	270	690	690	第三代战斗机
意大利	MB-339	教练机	185	189	157	890	43	5.3	17.5	130	550	480	—
美国	F-104S	目标飞机	350	270	220	1360	170	5	20	140	1000	780	第二代战斗机
日本	T-2	教练机	270	230	210	1200	177	3.25	20	270	610	600	—
美国	F-4EJ	目标飞机	290	273	230	1350	150	5	20	165	960	920	第二代战斗机
日本	T-4	教练机	220	200	167	1040	50	4	20	200	500	620	—
美国	F-15J	目标飞机	270	250	195	1450	260	7	26	165	340	630	第三代战斗机
韩国	KTX-II	教练机	260	250	220	1150	138	4.5	29.5	200	400	600	—
欧洲	欧洲战斗机	目标飞机	240	220	200	1350	300	5	30	320	500	480	—

鹰 / 教-9 高级教练机、L-15 高级教练机、以 L-15 为基础发展的教-10 高级教练机、以在役战斗机为基础发展的多型第三代战斗机同型教练机。其中，最能体现新一代高级教练机典型特点的是 L-15/教-10 高级教练机。

L-15 由航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司研制，具有高安全性、高可靠性、良好的维护性、卓越的费效比，兼有战斗机的机动性和教练机的安全性。L-15 可大迎角飞行，显著拓展了起降速度范围，向后能顺畅衔接第三代、第四代战斗机，向前可使初教六毕业学员快速适应<sup>[20]</sup>。L-15 创新采用了基于速度和迎角的防偏离防尾旋控制策略，在国内首次完成全面的大迎角特性、防偏离防尾旋功能鉴定试飞，边界保护完备<sup>[21]</sup>。现有数据分析表明，L-15 在最大爬升率、稳定盘旋过载、最大瞬时盘旋角速度方面均优于雅克-130、M-346、T-50 等新型高级教练机，具有与国外现役第三代战斗机“幻影”2000、F-16、苏-27 等相近的机动性能。此外 L-15 系列飞机（见图 1）还可当作战飞机使用，在对抗训练中扮演部分假想敌角色（如 F-16）；也可用于伴随训练，替代先进战斗机同型教练机的部分训练任务。整体上，L-15 总体技术水平与雅克-130、M-346、T-50 相当，跻身世界一流高级练机行列，部分技术保持国际领先，标志着我国高级教练机研发水平实现跨越式发展。

我国高级教练机研制起点很高，多型高级教练机的研制和生产保障了空军主力机型战斗力的生成，同时积累了教练机研制发展的宝贵经验，为高级教练机领域进一步的高水平发展筑牢了基础能力。

## 四、高级教练机关键技术问题

### （一）概念设计问题

这部分工作在军机装备领域一般认为是方案设

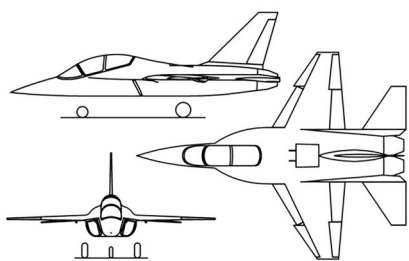


图1 L-15AFT 三面图

计<sup>[22,23]</sup>，在民机领域被称为概念设计<sup>[24]</sup>，俄罗斯则称之为外部设计。通常，在明确发展什么样的高级教练机之前，需要研究分析以下概念内容：目标战斗机的拟训练科目，教练机训练、模拟训练、理论训练、心理训练、体能训练之间训练科目的组合配置，不同级别教练机之间训练科目的配置组合，高级教练机与同型战斗教练机或者高级教练机与战斗机之间训练科目的组合配置，采用的训练大纲和评判标准。

为此，主要从四方面开展高级教练机的概念设计。① 基于用户视角的概念需求设计，研究分析国内乃至国际航空兵的飞行训练需求。② 基于竞争飞机视角的概念标杆设计，研究分析当前和未来一段时间可能出现的同类竞争教练机—目标飞机的总体情况。国际先进教练机寿命一般为 20~30 年，教练机研制要有前瞻性。这部分概念设计成果应解决研制和生产单位“不能做得差”的问题，也要注意竞争机型的需求不一样、训练目标飞机不一样、潜在用户装备体系不一样的客观实际。③ 基于研制生产单位及其供应链体系自身优势视角的概念优势识别，研究分析本单位及其供应链体系在教练机领域当前和未来一段时间可能的优势领域。这部分概念设计成果要解决研制生产单位“做得好”的问题。④ 基于研制生产单位及其供应链体系自身劣势视角的概念劣势识别，研究分析本单位及其供应链体系在教练机领域当前和未来一段时间可能的劣势领域以及必要时争取研制生产保障条件的可能性。这部分概念设计成果要解决研制和生产单位“是否能做”的问题。

总的来说，概念设计工作立足用户视角设计高级教练机“做什么”、提前考虑高级教练机在用户处“如何用”；面向国际环境和同类机型竞争形势，保证教练机的设计性能“不能差”；审视自身劣势并正视不足、把握自身优势条件以“做得更好”，支持教练机用户“用得好”，实现面向用户的高级教练机训练能力“交钥匙工程”。需要对高级教练机概念设计理论方法及支持技术<sup>[25]</sup>给予重视。

### （二）气动设计问题

高级教练机气动设计由高级教练机飞行技术性能要求所决定。对高级教练机气动外形设计有实质性影响的主要特性包括：亚声速、中高度飞行的机动性和持续机动性（应与目标飞机的机动性相当），

大使用迎角，小速度起飞速度和着陆速度，可在长度有限的跑道使用等。对于拟改型轻型战斗机的高级教练机，还面临作战应用场景可能带来气动外形相似的要求。

高级教练机气动设计过程可划分为五方面。① 气动概念设计，在该阶段确定飞行器绕流类型和总的布局形式。② 外部气动设计，确定满足飞行器给定要求的气动力特性值的允许范围。③ 结构方案综合，确定1个组别的飞机统一气动布局构型和部件的互相位置。④ 参数综合，搜索并确定布局部件几何参数的组合。可制定综合数值-物理试验方法，在多方案中搜索合理的几何布局参数组合时，将风洞试验数据用于修正数学模型，支持缩减新一代飞机布局参数综合所需的时间和经费。⑤ 考虑实际飞行情况的详细气动力设计，高级教练机普遍配备了主动控制系统，相关气动设计过程更加复杂，气动力设计计算软件将发挥不可替代的作用。

研究气动设计问题的目的是选出气动力特性组给定值的几何参数集合，形成最终的气动布局和气动力特性数据库。当前的先进教练机气动布局主要是根据高机动性要求来设计的，如T-50、雅克-130气动力设计总体上是在第三代战斗机气动力设计成果基础上的改进实施，相应气动设计没有充分考虑隐身要求（美国正在研制的T-7A也没有考虑隐身布局）。考虑引入隐身设计要求<sup>[26]</sup>，将气动力特性、雷达散射特性、经济性要求纳入高级教练机气动力设计，是未来高级教练机气动设计和飞机布局权衡的发展方向。

### （三）动力装置选型问题

当前主流的高级教练机大多采用涡扇发动机，而初级教练机多采用涡桨发动机或活塞发动机<sup>[27]</sup>。高级教练机是多乘员飞机且飞机驾驶多是飞行学员，应系统分析高级教练机对动力的需求<sup>[28]</sup>，重视动力安全性和适航问题<sup>[29]</sup>。

高级教练机双发布局具有更好的安全性，如选用成熟的单发也可保障安全性。对于单发的高级教练机，动力装置都是中等以上推力的涡扇发动机；对于双发的高级教练机，动力装置则为中小推力涡扇或涡喷发动机；个别高级教练机采用涡桨发动机。教练机受经济性的限制多采用中小推力的涡扇发动机，应重视研制此类发动机。对于中等以上推

力的涡扇发动机，如质量控制有潜力，在高级教练机同样有应用前景。

对于航空大国，高级教练机是航空训练的主力装备，需要动力应用的自主可控。动力装置的选型和飞机气动力、结构设计密切相关，发展教练机动力装置要同其他机型的动力需求以及教练机国际市场需求一并考虑。教练机是否选择带加力的发动机则应根据经济性等要求确定。一般对于教练机基本型，可选用不带加力的发动机，且必要时还可根据留空时间要求以降低参数的方式使用发动机。对于拟衍生发展为轻型战斗机的高级教练机，可选用带加力的同型发动机。对于使用周期长又有衍生发展规划的高级教练机，设计时应在结构、气动等方面留有未来换发的余地。

### （四）飞行安全保障技术问题

先进高级教练机的机动性能、驾驶特性已高度接近第三代战斗机，部分性能开始接近第四代战斗机，可再现作战场景下（包括危险在内）影响飞行员的各种因素。这些因素可造成飞行学员精神紧张，易出现飞行事故。高级教练机上学员状态有差别，甚至还有需要淘汰的学员。高级教练机飞行安全保障问题相对于战斗机而言更有特殊性。

高级教练机飞行安全保障充分，可在专门训练（如持续高机动性训练）中减轻飞行学员的心理负担并增强安全信心。先进的高级教练机配备了常规的机载飞行安全保障系统，包括弹射座椅、惰性气体系统、防火系统、迎角限制系统、反尾旋系统等；但不可忽视这些常规系统的可靠性和安全性，需要重视高级教练机的安全体系韧性<sup>[30]</sup>，如波音飞机公司在研的T-7A即因弹射座椅问题延迟了交付计划。一般地，高级教练机座椅在复杂条件下的救生能力要向战斗机靠拢，而且要向复杂条件下最不利姿态的弹射救生需求靠拢。

对于拟衍生发展战斗教练机、轻型战斗机的高级教练机，未来的作战场景复杂多样，也面临潜在的安全风险。在使用机载武器时，轻型战斗机的质量惯性、气动力特性、飞行参数限制等都可能发生显著的变化，大部分作战场景都伴随着低高度、小速度机动，与地面相撞的危险性在提高。发展限制飞机运动参数的机载飞行安全保障系统，实现“无忧虑”安全飞行对于教练机、轻型战斗机十分重

要。现有的机载飞行安全保障系统分为被动式、主动式、半主动式3种：被动式系统以迎角限制器、过载指示器为代表，半主动式系统可通知机组成员并产生控制作用，主动式系统可实现异常情况的自动告警和改出。在高精度探测的基础上辅以AI技术形成主动式防撞地飞行安全保障系统，值得优先发展。

### （五）座舱设计与操纵系统技术问题

飞机座舱是高级教练机学员、教员的工作场所，应对外部观察、座舱位置、座舱盖和座舱外廓尺寸等进行协同设计。高级教练机座舱设计应优先考虑学员、教员操作，兼顾与目标飞机座舱相似，避免与目标飞机座舱差异过大而影响训练效能<sup>[31,32]</sup>，这是与作战飞机座舱设计不同之处。高级教练机一般是双座机或是多座机，学员座、教员座采用前后串座或者左右并座取决于目标飞机座舱。高级教练机的航电设备需根据目标飞机的航电设备和座舱情况进行调整，座舱及其界面应留有优化空间，如T-38教练机在使用期间进行了多次座舱界面的优化调整，适应多种目标飞机的训练要求。采用大尺寸屏幕并结合软件实现的界面是值得重视的方向。未来的高级教练机座舱需要引入智能化技术，满足智能性、交互性方面的设计要求，实现部分的教员教学智能化。

在国际范围内，战斗机的操作系统有侧置驾驶杆和中心杆模式，大型飞机还有驾驶盘模式。鉴于潜在的目标飞机有多种，高级教练机驾驶杆模式也应具备多种模式以适应不同潜在用户的需要。高级教练机的座舱和操纵系统设计应尽量做到无需太大的硬件改动，而是通过软件来实现对不同目标机型的座舱训练适用性，也可根据需要做到杆力梯度和油门力度可调。考虑到飞行学员在起落阶段心理紧张，可在操纵和显示模式方面针对起降、中空训练分别设计不同模式。一般地，高级教练机的座舱显示设计要下载先进的飞机座舱显示模式，向先进机种靠拢。先进战斗机都采用了电传操纵模式，先进教练机也可采用电传操纵系统以降低学员操纵压力。未来战斗机如采用光传操纵系统，高级教练机也应跟随调整为光传操纵系统。此外，舰载机着舰环境复杂<sup>[33-35]</sup>，舰载教练机和陆基教练机的控制与操纵规律存在一定区别，应予重视。

### （六）地面综合训练技术问题

地面综合训练系统是高级教练机综合训练体系的重要组成部分，既有为特定机型配套、也有允许多机型兼顾的设备和设施：前者主要分为空勤训练设备、地面训练设备、维护训练设备，后者主要涉及各类型航空生理心理训练设备等。空勤训练设备中最重要的类别是飞行训练模拟器，包括基于计算机的训练系统、综合程序训练器、部分任务模拟器、单舱动基座全任务模拟器、双舱全任务模拟器、多机对抗战术基础模拟训练系统、飞行训练管理系统等。

高级教练机的地面综合训练系统采用基于效能的综合训练体系架构设计、面向全要素训练的模拟训练系统集成、飞行训练管理和安全监控技术，实现从单一教练机到涵盖教练机、空地模拟训练装备或系统、训练支持系统的综合训练系统集成交付的转变。运用理论计算、风洞试验、试飞实测的多维拟合数据回归技术，建立高逼真度的系统模型，实现高级教练机全包线模拟飞行；可真实地反映高级教练机特性，配合真实航电系统功能模块、模拟训练任务模块，实现高逼真度的模拟训练。构建飞行训练管理系统，建立基于实时数据链的飞行训练安全实时监控系统，实现飞行训练规划、计划、监控、评估等的全程动态管理。模拟训练的关键指标包括逼真度（与训练效能密切相关）和可用性，而逼真度又与任务目标、使用环境、威胁环境、武器使用、经济性目标、训练评价、飞行学员学习规律等关联。整体上，地面综合训练系统逐步从“单机/单域仿真”迈向“智能+沉浸+云网端+体系对抗”的一体化生态，核心趋势是多域互联、数据闭环、标准化协同。

### （七）空地一体与机载嵌入式训练系统技术问题

高性能战斗机对飞行员在态势感知、信息融合、武器操控、战术运用、自主决策等核心能力方面的训练要求持续提升。若日常训练完全依赖真实兵力、战机、传感器、雷达、武器系统，将面临中远距空战训练受限于空域范围、靶场资源调配复杂度高、空/面威胁与电子战手段的协同难度高、真实训练综合保障压力及成本高的问题。若单纯依赖地面全任务模拟器等开展虚拟训练，则难以复现真实飞行及空中对抗场景下的生理心理

负荷与动态态势感知体验。在此背景下，作为新型空地一体综合训练模式的机载嵌入式训练应运而生，通过机载系统内置的联网战术武器模拟功能，依托机载训练任务计算机生成虚拟空对空/面对空威胁，或者从联网训练任务控制站获取战术信息与战场态势并通过座舱显控区域（含头盔显示器等）与飞行员进行交互，使飞行员在高逼真度、高挑战性的虚拟作战场景中与规模及属性可配置的虚拟对手进行对抗，进而支持战术能力提升或作战技能保持。

高级教练机机载嵌入式训练系统主要承担基础性的高性能战斗机先进战术武器训练内容，支持实装-虚拟-构造（LVC）混合训练、多模式灵活训练，提高训练效率和水平，减少实装训练的成本与风险。在功能设计、系统配置上应充分考虑教学特点，配套开发训练功能，以在有限的训练大纲时间内合理安排训练内容。例如，高级教练机利用虚拟雷达配合训练数据链提供雷达使用训练功能，无需配装真实雷达；利用虚拟目标和虚拟武器并结合座舱显示，开展不同难易程度目标的攻击训练等。

#### （八）其他的一些共性技术问题

以上阐述的高级教练机概念设计、气动设计、动力装置选型、飞行安全保障、座舱设计与操纵系统、地面综合训练、空地一体与机载嵌入式训练等技术问题，在其他作战飞机领域同样存在；两大类机型在使命任务、性能功能、经济性、安全性等方面存在区别，故高级教练机相关的技术发展、技术运用、技术投入在整体技术架构下又有侧重。作战飞机相关技术问题的解决在有些情况下可以不过分计较投入和代价（典型的如美国B-2隐身轰炸机单价高达20亿美元），而高级教练机追求高安全性、高训练效费比，有些技术发展成本较高的技术（如隐身技术）在高级教练机上运用就比较持重。当前各国对军事航空兵训练的低成本、可持续发展需求成为共识，高级教练机地面综合训练、空地一体、机载嵌入式训练技术等作战飞机训练领域同样得到运用。高级教练机研制发展的技术难点还有总体设计方案优化<sup>[36]</sup>、结构设计、质量与通用质量工作、试飞试验、训练试用等，这些属于飞机研制发展的一般性工作范畴，限于篇幅而不再逐一阐述。

## 五、高级教练机发展面临的挑战

### （一）新型航空主战装备应用对高级教练机的研制发展提出新要求

高级教练机的配置原则是向前与基础教练机形成合理的跨度，向后与未来一段时期的主战飞机形成有效衔接，整体实现缩短飞行训练时间、降低飞行学员淘汰率、提高训练综合效能的目标<sup>[37]</sup>。战斗机跨代发展趋势鲜明，当前各国航空兵开始淘汰第二代战斗机、大量装备第三代战斗机、批量装备第四代战斗机、启动研制第五代战斗机。第三代战斗机以高机动、信息化为特点，第四代战斗机以隐身、高机动、大航程、超声速巡航、超视距作战为特点；第五代战斗机还在研制之中，目前看重平台、高智能、远航程、全向强隐身、超声速巡航、体系作战应是主要特点。

高级教练机发展整体上是基于主战装备发展的正向设计问题。以L-15、M-346、T-50、雅克-130为代表的先进高级教练机，主要基于第三代战斗机的平台技术，也综合了第三代战斗机航电和武器运用特点，另外引入了体系化、信息化、网络化的训练手段，能够完成第三代战斗机的主要高级训练科目并可承担第四代战斗机的部分训练科目，但无法支持第四代战斗机的部分重要科目（如隐身条件下的科目）训练。随着第四代战斗机的逐步普及，更多承担第四代战斗机训练科目或是高级教练机以后的发展方向。此外，随着无人飞行平台智能化程度越来越高，作为多乘员机种的高级教练机未来也应具备飞行员运用智能飞行平台训练乃至作战的功能。

### （二）军事航空飞行训练体制改革对高级教练机发展提出新要求

当前主要军事航空大国都实行二级/三级飞行培训机制。二级飞行培训机制包括基础飞行训练、高级飞行训练，三级飞行培训机制分为基础飞行训练、中级飞行训练、高级飞行训练；中级飞行训练科目迁移至其他级别飞行训练科目后，三级飞行训练就精简为二级飞行训练。相应的教练机有初级教练机、中级教练机、高级教练机。我国飞行训练工作中已开展了初级教练机直上高级教练机的成功实践<sup>[20,37]</sup>。

在多级飞行训练模式下，学员在每完成一个级

别的飞行训练后就更换教练机种，需要重新适应新教练机种的操作界面和操作特性，这一过程势必“无用功”且易产生风险。瑞士皮拉图斯公司宣称PC-21 涡桨教练机能覆盖全部战斗入门训练，但PC-21 毕竟采用的是涡桨动力，尽管为了模拟喷气发动机特点而对发动机和控制系统进行了调整改进（使之更像喷气式飞机），操作规律及特性与喷气式战斗机还是有差别的。在继续发展模拟训练的基础上，提升教练机技术经济性水平并拓展飞行包线，依托少数甚至一种教练机完成学员的成长飞行训练，是值得深入研究的发展内容。

### （三）多机组乘员飞机飞行训练对高级教练机发展提出新要求

当前世界军事航空大国均大力发展运输机、加油机、特种飞机、轰炸机等多机组乘员飞机。随着运输机、加油机在世界空军装备规模的逐步扩大，新的多乘员飞机飞行训练对运输型高级教练机发展形成了新需求，如美国在比奇喷气400A基础上改进研制了双发涡扇高级教练机T-1A（见图2）。与面向战斗机飞行训练的高级教练机衍生发展成为战斗教练机、轻型战斗机类似，面向运输机、加油机的运输型高级教练机也有望衍生发展成为轻型运输/勤务机、轻型特种飞机，进而充分发挥高级教练机的研制效益。

值得注意的是，美国空军在高级训练飞行阶段将战斗机和轰炸机分在一组，而把运输机和加油机同组。运输机、加油机专业训练的重点课目是机型基础训练，这与轰炸机专业训练（包含与战斗机类似的突防训练科目）既有联系也有区别。在未来的运输型高级教练机基础上衍生发展轰炸教练机以满足轰炸机飞行训练要求，是一种可能的解决方案。将轰炸机和歼击机分在一组，采用歼击型高级教练机承担部分轰炸机高级飞行训练

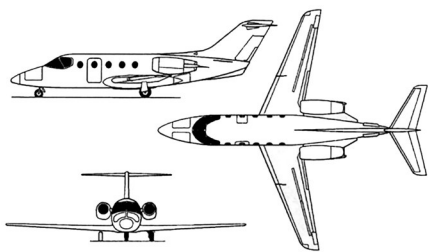


图2 美国空军运输机/加油机高级教练机T-1A三面图

科目，再转入轰炸机完成型号改装飞行是另一种可能的解决方案。

### （四）扩展现实与人工智能技术应用对高级教练机发展构成了挑战

高级教练机是军事飞行训练的传统装备，采用类似战斗机的设计，可仿真作战飞机的飞行特性，让学员在真实飞行状态下适应动态战斗环境，多与地面训练系统共同构成高级飞行员训练系统。依托具有良好视觉效果的地面训练系统，飞行学员、教员可获得强化训练体验和增强教学平台，为进一步的真实飞行做好准备。伴随着信息技术的发展，一键式软件架构可将高级教练机、地面训练系统设备整合在一起；在地面上使用设备进行训练的飞行学员将使用与首次在高级教练机上进行真实飞行时一致的人机接口和飞机功能，有效提升飞行学员的准备程度、熟练程度和安全性。

虚拟现实、增强现实、混合现实等被称为扩展现实，广泛地应用在游戏中，相关技术的成熟度<sup>[38]</sup>、质量、成本等均具备在军事训练领域推广应用的条件。模拟训练、扩展现实、AI技术相结合，可发展出嵌入式训练模式并实现实时虚拟构造（I-LVC）：将真实飞机、地面仿真器、计算机生成实体融合<sup>[39,40]</sup>，创建高度逼真的训练场景。将真实飞机与地面训练系统结合，I-LVC可以仿真当前战术环境中的多种任务（如教员在执行任务时生成实时威胁），这就使原来代价高昂的飞行训练、战术训练、空地一体联合训练变得经济可行。与AI技术融合、深化跨平台联合训练、机载环境下算力运行等，成为高级教练机LVC混合训练面临的技术挑战和发展机遇。

### （五）数字工程对高级教练机研制发展的挑战

现代教练机研制生产和保障使用已经发展成为体系复杂、技术先进、地域宽广、供应链长、全周期长的体系工程。数字工程可实现在多个供应商之间、飞机与地面系统之间、用户与厂家之间经济高效且无缝衔接的单源数据流，相关设计、制造、测试、产品支持等团队成员以及用户都可以访问和查看实时数据；再综合运用基于模型的系统工程（MBSE）方法、基于模型的飞机设计<sup>[41]</sup>，将显著提高教练机研制生产和使用保障的工作效率、工作质

量、产品质量。数字工程也可支持数字分析和预测性维护,增强高级教练机持续发展能力并提高飞行训练效能。

一般认为,高级教练机使用周期长,其间会进行多轮改进、多机种衍生发展,因而数字工程、MBSE对教练机发展具有独特价值。数字工程尽管不可能完全替代传统的教练机研究设计开发和测试工作,但确实可以提高整体效率,支持解决传统模式下分散作业、纸面传递导致的效率低、易出错等问题。也要注意,数字工程、MBSE的前期经费投入较大,准备时间、人员投入也不会小,将有长期建设、近期目标之间的权衡,导致挑战与机遇并存。

## 六、我国高级教练机发展建议

### (一) 建立健全高级教练机领域规划与发展型谱

高级教练机是主战航空装备、基础教练机之间发挥“承上启下”作用的重要航空装备,事关主战航空武器装备战斗力形成、航空兵部队训练作战能力构建、军事航空飞行人员队伍建设<sup>[42]</sup>,国际上代表性的教练机装备体系如图3所示。建议面向军事航空飞行人员培训、航空兵部队训练与作战能力建设,持续跟踪航空武器装备的新进展以及部队航空

武器装备使用保障的新形势与新要求,深入研究国际军事飞行训练新技术、新手段、新趋势<sup>[43-45]</sup>,系统开展军事飞行训练效能评估<sup>[46]</sup>;识别当前飞行训练能力建设短板并把握发展新方向,明确高级教练机性能提升和先进技术发展重点,针对性地开展具体型号高级教练机的体系贡献率评估<sup>[47]</sup>;论证和优化高级教练机领域中长期建设规划与发展型谱,明确高级教练机“十五五”时期发展目标、建设方案、实施路径并纳入国家“十五五”规划,综合性、全方位推进高级教练机领域建设。

### (二) 构建并完善高级教练机协同推进机制

我国高级教练机产业已发展成为涉及“产学研用”多个部门和行业、覆盖多个航空主机厂所、供应链遍及全国甚至部分国外地区的现代高技术产业集群,也已形成面向国内和国际两个市场的发展格局。建议建立国防科技工业、高校、地方优势民企乃至国际优势企业参与的高级教练机协同推进机制,合力解决高级教练机规划计划、科研生产、保障使用、预先研究、国际交流、引进/外销等方面的重点问题;针对高级教练机衍生发展以及相关机型外贸销售、产业协同、关键技术攻关、投融资、人才培育等方面的需求,形成跨部门沟通协调机制,构建涵盖法律法规、产业政策、技术标准、效

初始飞行筛选	学员通用基础训练	学员专业高级训练	新飞行员战斗入门训练	部队飞机改装过渡训练	部队飞机改装训练
SR-20、T-53A	T-6A	运输机/加油机专业 T-1A	→	→	C-17、KC-135、KC-10、B-52等
		战斗机/轰炸机专业 T-38C	T-38C	→	F-15、F-16、A-10
				F-16D	F-22、F-35
		→	→	B-1、B-2等	
旋翼机专业 UH-1H	→	→	H-60、CV-22等		

(a) 美国

筛选/初级训练	基础训练	高级训练	战斗入门训练	部队飞机改装训练
雅克-52	前线航空兵专业 L-39	前线航空兵专业 雅克-130		苏-27、米格-29等
	运输和远程航空兵 L-410		→	安-26、安-12、伊尔-76等
	直升机专业 米-2	直升机专业 米-8	→	米-8T、米-24等

(b) 俄罗斯

图3 国际上代表性的教练机装备体系

能评价的体系架构，促进高级教练机产业融合与协同创新；继续办好珠海军事飞行训练国际交流会议，更好发挥国际交流平台对军事飞行训练、高级教练机行业的交流和拉动效应；考虑在中国航空学会下设教练机分会，促进教练机专业技术协同推进和学术交流。

### （三）稳健推进高级教练机科研生产和服务保障工作

高级教练机科研生产交付是航空武器装备建设的重要工作，应根据有关要求继续做好高级教练机科研生产交付并确保装备质量和服务质量，针对性实施教练机科研生产质量系统工程和可靠性系统工程。当前多型高级教练机在多地域使用，应根据用户需要做好高级教练机售后服务和专项保障，积极服务用户和飞行训练任务；认真听取飞行人员对现役高级教练机使用操作、效能评估、效能提升方面的意见与建议，及时解决高级教练机使用中的质量与可靠性问题<sup>[48,49]</sup>，按要求做好质量问题归零<sup>[50]</sup>。也应认真做好“十四五”时期高级教练机科研生产和使用保障的经验教训总结分析，根据需要适时开展有关高级教练机可靠性提升工作，持续增强高级教练机机队装备保障水平和飞行训练能力。

### （四）深入开展高级教练机发展和飞行训练专业的预先研究

高级教练机发展建设应服务于新型航空武器战斗力形成、军事航空飞行训练、军事飞行人才培养、军事航空兵部队训练和作战能力提升。应持续开展新型航空武器飞行训练需求研究，快速提出高质量方案并争取专项支持，保证相关战斗力及时形成；持续跟踪研究国际军事飞行训练进展及趋势，协同航空兵部队研究并解决高级教练机在飞行训练、维护使用中遇到的新问题，根据当前航空兵装备构成、飞行员生理心理和飞行训练特点，形成专项研究意见，保障军事飞行训练体制发展和高级教练机领域发展。把握国内和国际军事斗争形势的趋势，围绕国家相关需求和教练机发展规律，积极开展高级教练机衍生发展工作，实施战斗教练机、轻型战斗机发展专题研究；与用户联合确定高级教练机各型衍生发展机型的定位、特点、性能、功能、作战效能要求等重点课题，适时开展有关衍生机型的能力建设。

### （五）推进人工智能技术在高级教练机领域的深入应用

当前，AI、扩展现实技术加速发展，支持创建高度逼真的训练场景，与早已运用的飞行模拟器相结合并将AI模拟技术引入到飞机驾驶舱中，可让飞行员在真实的战斗机座舱里与虚拟敌机作战，对军事飞行训练势必产生深远的影响。建议就AI、扩展现实技术在飞行训练中运用进行专题立项，及时启动一批有应用前景、较为紧迫的项目研究，将规避飞行模拟训练以及AI、扩展现实技术可能带来的负面训练效果作为重点内容；树立对新技术运用的宽松培育环境，鼓励和促成新技术发展应用，建立新技术领先试用的快速通道，适时安排训练试用。

### （六）发展适用于高级教练机的动力系统

应对高级教练机发展的动力需要，发展高推重比、长使用寿命、经济性好的中小推力涡扇发动机技术，适时立项开展研制工作。可选择成熟的大推力涡扇发动机在有关教练机平台进行飞发一体化设计预先研究，为高级教练机平台飞行技术性能提升做准备。关注可持续航空燃料在高级教练机动力装置中的应用进展，安排有应用前景的可持续航空燃料在高级教练机上进行试验试飞乃至领先试用；结合有关机型的科研生产进展，择机开展高级教练机绿色设计与制造实践，确保军事航空飞行训练在满足训练安全目标的基础上加快实现环境可持续。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** September 29, 2025; **Revised date:** December 8, 2025

**Corresponding author:** Yao Jianyao is a professor from the College of Aerospace Engineering, Chongqing University. His major research fields include aeronautical engineering and aero-engine's structural strength. E-mail: yaojianyao@cqu.edu.cn

#### 参考文献

- [1] 张弘, 张志林, 杨波, 等. 航空武器训练装备体系研究 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2018.  
Zhang H, Zhang Z L, Yang B, et al. Research on aviation weapon training equipment system [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2018.
- [2] 梁云瑞, 刘敏, 杨昌发, 等. 两机制飞行训练装备体系发展思考 [J]. 教练机, 2021 (3): 26-30.  
Liang Y R, Liu M, Yang C F, et al. Thoughts on the development of two-plane flight training equipment system [J]. Trainer, 2021 (3):

- 26–30.
- [3] 《世界飞机手册》编写组. 世界飞机手册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.  
Editorial Board of *World Aircraft Handbook*. World aircraft handbook [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001.
- [4] 潘洪山, 贺武涛. 对教练机的特性认识和发展思考 [J]. 教练机, 2012 (3): 28–30.  
Pan H S, He W T. Characteristics cognition and development thought of training aircraft [J]. *Trainer*, 2012 (3): 28–30.
- [5] 何梓源, 张砚青, 李娜. “红鹰”教练机缘何难执教 [N]. 解放军报, 2023-02-03(10).  
He Z Y, Zhang Y Q, Li S. Why is “red hawk” training aircraft difficult to teach [N]. *PLA Daily*, 2023-02-03(10).
- [6] Daniel D P. Aircraft design: A conceptual approach [EB/OL]. (2019-08-15)[2025-12-15]. <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/3FA7A3E7F71EE4C357CC0935DA6D009A/S000192401900099Xa.pdf/aircraft-design-a-conceptual-approach-sixth-edition-d-p-paymer-american-institute-of-aeronautics-and-astronautics-reston-va-2018-xxx-1062pp-illustrated-distributed-by-transatlantic-publishers-group-97.pdf>.
- [7] 彭云龙, 吴雄, 丁婷, 等. 舰载高级教练机动力发展途径与未来趋势 [J]. 航空动力学报, 2020, 35(10): 2152–2158.  
Peng Y L, Wu X, Ding T, et al. Development path and future trend of carrier-based advanced trainer engine [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(10): 2152–2158.
- [8] 杨帆, 刘艳芳, 金玲. “军事飞行训练国际交流会议·2024”综述 [J]. 教练机, 2024 (4): 3–45.  
Yang F, Liu Y F, Jin L. Military flight training international conference 2024 [J]. *Trainer*, 2024 (4): 3–45.
- [9] 温智翔, 彭柳, 王二振, 等. 从第17届迪拜航展看军用教练机发展趋势 [J]. 教练机, 2021 (4): 14–18.  
Wen Z X, Peng L, Wang E Z, et al. Development trend of military trainer upon the 17th Dubai airshow [J]. *Trainer*, 2021 (4): 14–18.
- [10] 黄种荣, 梁云瑞. 飞行训练体制与教练机的发展 [J]. 教练机, 2011 (1): 7–10.  
Huang Z R, Liang Y R. Flight training system and development of trainer [J]. *Trainer*, 2011 (1): 7–10.
- [11] 王大明. 国际上教练机的装备需求浅析 [J]. 教练机, 2014 (4): 25–30.  
Wang D M. Analysis on equipment requirements for trainer abroad [J]. *Trainer*, 2014 (4): 25–30.
- [12] 张子伟, 郭齐胜, 董志明, 等. 体系作战效能评估与优化方法综述 [J]. 系统仿真学报, 2022, 34(2): 303–313.  
Zhang Z W, Guo Q S, Dong Z M, et al. Review of system of systems combat effectiveness evaluation and optimization methods [J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(2): 303–313.
- [13] 孙聪, 赵群力, 孙侠生. 航空工程科技未来20年发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(5): 55–64.  
Sun C, Zhao Q L, Sun X S. Development strategy of aeronautical engineering science and technology in the next 20 years [J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(5): 55–64.
- [14] 向巧, 黄劲东, 胡晓煜, 等. 航空动力强国发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 106–112.  
Xiang Q, Huang J D, Hu X Y, et al. Research on aero engine em-
- power development strategy [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(2): 106–112.
- [15] 张弘. 对教练机装备跨越发展六个问题的思考 [J]. 教练机, 2012 (3): 7–16.  
Zhang H. Thinking on six questions of striding development of trainers [J]. *Trainer*, 2012 (3): 7–16.
- [16] 何为荣, 庄志谦, 岳显忠. 空军飞行训练管理学 [M]. 北京: 蓝天出版社, 2000.  
He W R, Zhuang Z Q, Yue X Z. *Airforce flight training management* [M]. Beijing: Blue Sky Press, 2000.
- [17] 郭道平. 高级教练机迎来第三次浪潮 [J]. 国际航空, 2003 (7): 12–17.  
Guo D P. Advanced trainer’s third wave [J]. *International Aviation*, 2003 (7): 12–17.
- [18] Wedzinga G. E-CATS: First time demonstration of embedded training in a combat aircraft [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2006, 10(1): 73–84.
- [19] 周国强. 简明中国飞机手册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2023.  
Zhou G Q. *Concise Chinese aircraft manual* [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2023.
- [20] 张大尉, 杨帆, 徐超, 等. 从初教6直上教10看新一代高教机的高适应性 [J]. 教练机, 2021 (3): 35–38.  
Zhang D W, Yang F, Xu C, et al. High adaptability of the new generation advanced trainer from the prospective of “directly from PT6 to L15” [J]. *Trainer*, 2021 (3): 35–38.
- [21] 于守国, 周成. L-15高级教练机飞行初探 [J]. 教练机, 2012 (1): 3–5.  
Yu S G, Zhou C. Primary probe into the flight affairs for L-15 advanced jet trainer [J]. *Trainer*, 2012 (1): 3–5.
- [22] 刘虎, 罗明强, 孙康文. 飞机总体设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2019.  
Liu H, Luo M Q, Sun K W. *Aircraft conceptual design* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2019.
- [23] 飞机设计手册编委会. 飞机设计手册第4册: 军用飞机总体设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.  
Editorial Board of *Aircraft Design Manual*. *Aircraft design manual volume 4: Military aircraft conceptual design* [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000.
- [24] 李为吉. 飞机总体设计 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.  
Li W J. *Aircraft conceptual design* [M]. Xi’an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005.
- [25] 刘虎, 罗明强, 田永亮. 飞机总体设计支持技术探索与实践 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.  
Liu H, Luo M Q, Tian Y L. *Exploration and practice of supporting technology for aircraft conceptual design* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2013.
- [26] 张考, 马东立. 军用飞机生存力与隐身设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.  
Zhang K, Ma D L. *Survivability and stealth design of military aircraft* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [27] 樊宇, 张玉虎, 李庆谊. 世界典型军用螺旋桨教练机研究 [J]. 教练机, 2022 (2): 9–13.  
Fan Y, Zhang Y H, Li Q Y. Research on the world’s typical military propeller trainers [J]. *Trainer*, 2022 (2): 9–13.

- [28] 甘晓华, 薛洪涛, 雷友锋. 航空发动机工程通论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2021.  
Gan X H, Xue H T, Lei Y F. General theory of aeroengine engineering [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2021.
- [29] 王桂华, 丁水汀, 单晓明, 等. 航空发动机安全性与适航技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.  
Wang G H, Ding S D, Shan X M. Safety and airworthiness technology of aero-engine [M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [30] 陈志伟, 焦健, 赵廷弟, 等. 装备体系韧性分析理论与技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2024.  
Chen Z W, Jiao J, Zhao T D, et al. Theory and technology of resilience analysis in equipment system-of-systems [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2024.
- [31] 李航航, 宋笔锋, 高宏建. 教练机训练效能计算方法改进 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(6): 680–683.  
Li H H, Song B F, Gao H J. Computation method improvement of military training plane effectiveness [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(6): 680–683.
- [32] Gao M, Ai J L, Li Z W, et al. On exploring method and software for evaluating effectiveness of military training aircraft [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(6): 607–611.
- [33] 许鑫泽, 洪冠新, 杜亮, 等. 复杂环境下舰载机人工进近着舰模型 [J]. 航空学报, 2025, 46(13): 108–122.  
Xu X Z, Hong G X, Du L, et al. Manual approach and landing model of carrier-based aircraft in complex environments [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(13): 108–122.
- [34] 《世界舰载机手册》编委会. 世界舰载机手册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2012.  
Editorial Board of *World Carrier Aircraft Handbook*. World carrier aircraft handbook [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2012.
- [35] 胡军龙. T-45 舰载教练机作战基础训练 [J]. 教练机, 2014 (3): 8–12.  
Hu J L. Basic operational training of T-45 carrier-based trainer [J]. Trainer, 2014 (3): 8–12.
- [36] 黄俊, 怀进鹏, 武哲. 高级教练机总体设计方案优化选择 [J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(6): 656–659.  
Huang J, Huai J P, Wu Z. Optimization selection in conceptual design of advanced trainer aircraft [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(6): 656–659.
- [37] 闫会明, 张大尉, 何飞, 等. “两机”训练体制下的飞行员培养探析 [J]. 教练机, 2022 (3): 11–14.  
Yan H M, Zhang D W, He F, et al. Analysis on pilot training under the “two models of aircraft” training system [J]. Trainer, 2022 (3): 11–14.
- [38] 张新国. 国防装备系统工程中的成熟度理论与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.  
Zhang X G. Theory and application of maturity model in defense materiel system engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [39] 李维, 余伏章, 赵平均, 等. 高级教练机 LVC 训练技术研究及原理验证 [J/OL]. 航空工程进展, 1–6. [2025-12-15]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1479.V.20250519.0903.006>.
- Li W, Yu F Z, Zhao P J, et al. Research and principle verification of LVC training technology for advanced trainer aircraft [J/OL]. 航空工程进展, 1–6. [2025-12-15]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1479.V.20250519.0903.006>.
- [40] 张昱, 张明智, 胡晓峰. 面向 LVC 训练的多系统互联技术综述 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(11): 2515–2521.  
Zhang Y, Zhang M Z, Hu X F. On multi-system integration technology oriented to LVC training [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(11): 2515–2521.
- [41] 李敏浩, 殷凯, 詹超. 基于模型的现代商用飞机研发 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2023.  
Li M H, Yin K, Zhan C. Model-based commercial aircraft development [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2023.
- [42] Ausink J A, Marken R S, Miller L L, et al. Assessing the impact of future operations on trainer aircraft requirements [M]. Arlington: RAND Corporation, 2005.
- [43] Gao Y, Zhang Y Y, Zhou X G, et al. Overview of simulation architectures supporting live virtual constructive (LVC) integrated training [R]. Shanghai: 2021 6th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC), 2021.
- [44] Ardil C. A comparative analysis of multiple criteria decision making analysis methods for strategic, tactical, and operational decisions in military fighter aircraft selection [J]. International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering, 2020, 14(7): 275–288.
- [45] Ardil C. Trainer aircraft selection using preference analysis for reference ideal solution (PARIS) [J]. International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering, 2020, 14(5): 193–204.
- [46] 周悦, 刘金辉, 武力强. 军用教练机训练效能定量评估研究 [J]. 国防科技, 2015, 36(4): 129–133.  
Zhou Y, Liu J H, Wu L Q. Research on quantitative assessment to the training efficiency of military trainer aircraft [J]. National Defense Science & Technology, 2015, 36(4): 129–133.
- [47] 臧波, 梁云瑞, 李泰安, 等. 高级教练机体系贡献率评估思考 [J]. 教练机, 2023 (4): 5–8, 16.  
Zang B, Liang Y R, Li T A, et al. Thinking on evaluation of contribution rate of advanced trainer system [J]. Trainer, 2023 (4): 5–8, 16.
- [48] 任羿, 王自力, 杨德真, 等. 基于模型的可靠性系统工程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2021.  
Ren Y, Wang Z L, Yang D Z, et al. Model-based reliability systems engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021.
- [49] Ren Y, Qian C, Yang D Z, et al. Model-based reliability systems engineering [M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024.
- [50] 樊会涛, 张同贺, 徐琰珂. 装备系统故障归零的一般方法 [J]. 中国工程科学, 2025, 27(1): 248–257.  
Fan H T, Zhang T H, Xu Y K. General method for fault return-to-zero of equipment system [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(1): 248–257.