文章编号:1000-8055(2020)10-2152-07 doi:10.13224/j.cnki.jasp.2020.10.015

舰载高级教练机动力发展途径与未来趋势

彭云龙[1]，吴 雄[1]，丁 婷[2]，卜振鹏[1]
(1. 中国人民解放军 92728 部队，上海 200436；
2. 上海华讯网络系统有限公司 人力资源部，上海 200127)

摘 要：为探索舰载高级教练机动力发展途径与未来趋势，综述了高级教练机发动机发展的 3 个阶段，重点分析了舰载高级教练机对配套动力的使用性能要求和国外舰载高级教练机发动机现状。研究发现：舰载高级教练机配套动力应根据飞机平台动力的需求，在成熟涡扇发动机的基础上围绕长寿命、宽包线、低油耗、强性能保持、易保障维修及“适海性”等相关要求进行改进研制，或选择一款成熟的舰载战斗机动力降状态使用，并且未来将向更大推质比、更低耗油率、更大提取功率、更长使用寿命和飞发一体化设计的方向不断发展。

关 键 词：舰载高级教练机；航空发动机；适海性；发展途径；未来趋势
中图分类号：V235.1 **文献标志码**：A

Development path and future trend of carrier-based advanced trainer engine

PENG Yunlong[1], WU Xiong[1], DING Ting[2], BU Zhenpeng[1]
(1. Unit 92728, the People's Liberation Army of China, Shanghai 200436, China;
2. Human Resources Department,
Shanghai Huaxun Network System Company Limited., Shanghai 200127, China)

Abstract: To explore the development path and future development trend of carrier-based advanced trainer engine, three development stages of advanced trainer engine were summarized, the technical performance requirements of carrier-based advanced trainer engine and the current situation of carrier-based advanced trainer engine abroad were emphatically analyzed. It was found that the carrier-based advanced trainer engine should be developed based on mature turbofan engines for long life, wide flight envelope, low fuel consumption, strong performance retention, easy maintenance and "sea adaptation", or a mature carrier-based fighter power with lower status was chosen, according to the aircraft platform power demand. In the future it would be further developed in the aspects of higher weight ratio, lower fuel consumption, greater extraction power, longer service life and aircraft-engine integration design.

Key words: carrier-based advanced trainer; aero-engine; sea adaptation; development path; future trend

收稿日期:2020-03-26

作者简介:彭云龙(1989－)，男，工程师，博士，研究领域为航空动力装置发展论证。

引用格式: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 Yunlong，WU Xiong，DING Ting，et al. Development path and future trend of carrier-based advanced trainer engine[J]. Journal of Aerospace Power，2020，35(10)：2152-2158.

舰载机决定着航母的作战能力,而舰载高级教练机则是培养舰载机飞行员的核心装备。除中国外,目前世界上有 9 个国家拥有 18 艘现役航母,但能够独立培养舰载机飞行员的只有美国、俄罗斯等少数军事强国,多数国家并没有能够上舰使用的舰载高级教练机,舰载机飞行员的培养只能通过委托培养或改装培训的方式实施[1]。因此,在当今复杂多变的全球局势下,要保证持续有效的航母体系作战打击能力,构建科学的舰载机飞行员培养体系,发展自主的舰载高级教练机是十分有必要的。

一型好的舰载高级教练机及其配套动力除了应满足一般教练机易操作、易维护、高培训质量、低训练成本的基本要求[2],性能上与目标服役战斗机性能接近外,在气动稳定性、结构设计、使用环境、舰面保障等方面与陆基高级教练机也有诸多不同。本文主要通过梳理高级教练机发动机发展历程,分析舰载机高级教练机发动机的使用性能要求和国外发展现状,探究舰载高级教练机动力的发展途径与未来趋势,为我国海军舰载机训练装备的选择或研制提供参考。

1　高级教练机发动机发展历程

教练机是空、海军飞行员训练系统的核心,在理论授课、模拟器练习和教练机空中飞行训练组成的训练系统中,教练机空中飞行训练占到了整个训练系统效益的 70%以上[3]。根据在飞行员训练程序中所处的阶段和承担的教学任务的不同,教练机大致可分为初级、初/中级、中级、中/高级、高级/战斗教练机和同型教练机[4-6],其中高级教练机一般承担高级阶段(AJT)和部分改装阶段(LIFT)的训练内容。高级阶段训练是通过复杂气象、武器使用、基本战术演练等进一步提高飞行技巧;改装阶段训练是在顺利驾驶高性能作战飞机之前通过特定的技术训练使学员掌握作战机动和战术等方面的技能,其中一部分可在高级教练机上实施,剩下部分在现役战斗机同型教练机上完成。

高级教练机是飞行学员成长为战斗机飞行员的过渡装备,目的是以最经济的训练成本实现最优的训练效益,使飞行学员达到战斗入门训练的基本水平。高级教练机动力不要求具备先进军用航空发动机卓越的热力学性能或采用最为先进的设计方法,但一定要在接近或实现服役战斗机主要特性的基础上具有较长的使用寿命、较低的耗油率、较高的可靠性、较好的维修性和良好的控制品质[2]。

高级教练机的发展最早可以追溯到 20 世纪初,其配套发动机依据类型和性能的差异大致可以分为以下 3 个阶段:

1) 20 世纪初期至 40 年代

20 世纪初受第一次和第二次世界大战的影响,为满足战争对飞行员的大量需求,德、法、英、美等国生产了大量教练机。当时人类对航空领域的探索刚刚起步,飞机飞行速度不高,飞行性能还比较落后。这一阶段,教练机与作战飞机性能相仿,飞行员培养自始至终采用同一型教练机,主要进行驾驶技能的训练。教练机和战斗机的动力均为活塞式航空发动机,受限于当时的技术水平和制造工艺等方面,发动机使用寿命较短,仅为 300 h 左右,教练机的训练效益相对较低。图 1 为美国的 AT6 教练机和配套动力普惠(PW)R-1340-49 发动机,功率为 447 kW,该发动机属于著名的普惠"黄蜂"系列活塞发动机。

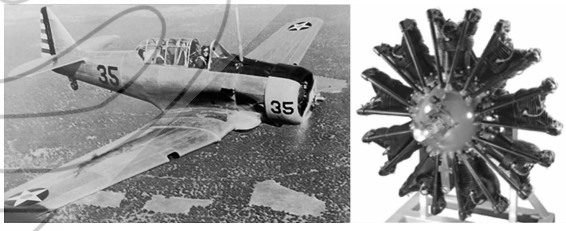


图 1　AT6 教练机和普惠 R-1340-49 发动机

Fig. 1　AT6 trainer and PW R-1340-49 engine

2) 20 世纪 50 年代至 90 年代

1944 年,德国和英国的首批喷气式战斗机投入使用,标志着军用飞机进入喷气时代。喷气战斗机的飞行速度较螺旋桨飞机大幅提高,在飞行性能、操作特性等方面也有显著不同,原有的活塞发动机教练机已无法满足喷气式战斗机飞行员的培养需要。为此飞行员训练体制进行了改革,将原有的活塞式教练机用于初级训练,并在喷气式战斗机基础上进行改型得到喷气式教练机用于高级训练,以实现活塞式初级教练机与喷气式战斗机之间的衔接过渡。这一时期的高级教练机动力多是早期喷气发动机的改型,存在耗油率高、稳定性差、维修困难、工作包线窄等诸多问题,致使飞行员在训练过程中难以充分地发挥飞机的机动性能,训练收益不高。如美国的 T-33 教练机采用的是艾利逊 J33-A-35 发动机,其推力为 21.3 kN,见图 2。后期针对存在的问题,世界各发动机厂商对发动机的气动性能、结构设计、稳定性、控制系

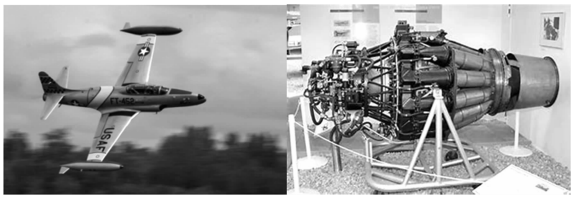


图 2 T-33 教练机和艾利逊 J33-A-35 发动机

Fig. 2 T-33 trainer and Allison J33-A-35 engine

统等进行了改进优化，逐渐形成 20 世纪主流高级教练机配套动力。如美国 T-38 高级教练机动力为两台通用 J85-GE-5J 涡喷发动机，单台中间推力为 11.93 kN，加力推力为 17.16 kN，最大加力耗油率为 0.2235 kg/(N·h)，推质比为 6.6，涡轮前温度为 977 ℃。该发动机是通用 J85-GE-4A 涡喷发动机的改型，与之相比增加了加力燃烧室，特点是采用全钢材料，尺寸小，结构简单，压气机静子叶片、燃烧室、涡轮盘组件和点火器等可单独拆卸更换，主要附件集中于机匣顶部或底部便于维修；法、德合作研制的阿尔法高级教练机配装的是两台拉扎克-04-C6 非加力涡扇发动机，单台推力为 13.24 kN，耗油率为 0.0744 kg/(N·h)，推质比为 4.56，涡轮前温度为 1 130 ℃。该型发动机最初为军用和民用飞机研制，后主要用于军用攻击/教练机；英国“鹰”T. MKI 高级教练机采用动力为一台阿杜尔-151-01 非加力涡扇发动机，推力为 23.13 kN，耗油率为 0.0724 kg/(N·h)，推质比为 4.26。该型发动机是在“美洲虎”教练/攻击机双转子涡轮风扇发动机基础上的改型，阿杜尔发动机在设计之初就注重低空性能和高空超声速性能，并要求巡航时具有良好的经济性。其采用了先进的气动设计和简单紧凑的结构，设计有 12 个单元体，允许在外场不从飞机上拆下发动机就可更换部件，更易于维修。

3) 20 世纪 90 年代至今

20 世纪末随着科学技术的突飞猛进，许多技术瓶颈被相继突破，继第三代战斗机服役之后各国先后研制出第四代、第五代战斗机。原有高级教练机无法从根本上解决训练需求矛盾的问题日益凸显，一些国家开始着手研制新一代高级教练机，期望在满足第三代战斗机飞行高级训练要求的同时兼顾第四、五代战斗机飞行员的训练[7]。与此同时高级教练机配套发动机在推质比、涡轮前温度、控制品质等方面也有了质的飞跃，全权限数字电子控制系统(FADEC)逐步成熟应用，并在此基础上不断对材料、设计、工艺和结构等方面改进升级[8]。表 1 是世界上几款典型的高级教练机及其配套动力，这几款发动机在提供充足动力具有较宽工作包线的同时兼顾了经济性与维修性，使得飞机性能更接近战斗机，保证了飞行员高级训练和改装训练的高效完成。图 3 为美国空军最新订购的 T-7A“红鹰”高级教练机及其配套动力一台通用(GE) F404-GE-402 涡扇发动机[9-12]。该型发动机主要用于 F/A-18C/D“大黄蜂”双发舰载战斗/攻击机，是 F404-GE-400 发动机的性能增强型，加力推力提高了 10%，热端部件检查间隔延长到了 2000 h，改善了燃油消耗，同时保持与基本型的部件通用性超过 95%。

表 1 典型高级教练机及其配套动力

Table 1 Typical advanced trainer and its supporting power

教练机	国家	服役年份	配套动力	最大状态推力/kN	最大耗油率/(kg/(N·h))	涵道比	推质比	涡轮前温度/℃
T-7A	美国	2023	1 台 F404-GE-402 涡扇发动机	78.73(加力)	0.1774	0.34	7.83	1413
T-50	韩国/美国	2006	1 台 F404-GE-102 涡扇发动机	78.71(加力)	0.177	0.34	7.76	1413
M-346	意大利	2008	2 台 F124-GA-200 涡扇发动机	28.36	0.0826	0.47	5.71	1366
雅克-130	俄罗斯	2012	2 台 AI-222-25 涡扇发动机	24.5	0.0651	1.19	5.68	1210

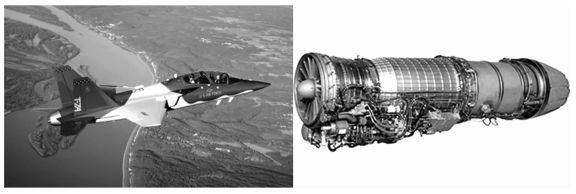


图 3　T-7A“红鹰”高级教练机和通用 F404-GE-402 涡扇发动机

Fig. 3　T-7A “Red eagle” advanced trainer and GE F404-GE-402 turbofan engine

2　舰载高级教练机发动机性能要求和发展现状

2.1　舰载高级教练机发动机性能要求

根据世界各国舰载机飞行员的培养经验,一名海军舰载机飞行员除了完成陆基的常规各阶段训练后还要额外增加完成陆基模拟舰载起降训练(FCLP)和航母上舰资质训练(CQ)[13],所以舰载高级教练机配套动力既要满足陆基高级教练机的性能要求又要满足舰载飞机特殊环境的使用特点。

舰载战斗机由于特殊的作战环境与起降方式,对动力装置提出了更高的要求[14],这些要求同样适用于舰载高级教练机。主要可概括为以下六点:一是抗进气畸变能力。海上舰面环境复杂,舰载机受母舰高速航行尾流、舰舷侧风等因素影响会加剧发动机进气压力畸变程度,导致发动机工作不稳定甚至喘振;另外无论是滑跃式航母还是弹射式航母,舰载机起飞位的偏流板都会引起发动机进口的温度场畸变,所以要求发动机具有较强的抗温度/压力组合畸变能力;二是抗大过载能力。舰载机在弹射起飞或阻拦着舰过程中发动机都要承受巨大的轴向和法向过载,而舰载高级教练机以舰载战斗机飞行员培养为目的,其高强度的舰载起降频次相比舰载战斗机可能更大,这要求发动机具有更强的抗大过载能力;三是推力瞬变和快速响应能力。与陆基飞机相比,舰载机在着舰过程中对飞行速度和下滑轨迹有精准的控制要求,如果着舰失败需立即复飞,这需要发动机具备良好的控制品质和快速的推力响应能力,对舰载高级教练机更是如此;四是海洋环境适应能力。海洋工作环境具有高温、高湿和高盐雾的特点,这些恶劣条件会加速发动机内部和表面的老化腐蚀,所以必须采用抗腐蚀材料或各种抗腐蚀涂层,强化海洋环境下发动机的性能保持;五是电磁兼容能力。航母上装有各种指挥、控制、导航、探测和电子设备,雷达工作频率覆盖范围宽,而舰载机为了保证在海上恶劣气候条件下全天候起降以及海上无地标情况下的远程自主导航能力,也装有大量专用机载电子设备,异常复杂的舰面电磁环境要求其配套动力装置满足相应的电磁兼容要求;六是舰面一体化综合保障能力。与陆地上航空场站不同,航母上空间狭小维修保障资源有限,舰载机发动机应充分考虑与母舰、飞机的适配性要求,减少保障工作量和资源的需求,满足航母舰载机多机种一体化集约保障的要求。

总结来看,舰载高级教练机发动机应是一型具有较长的翻修寿命和总寿命、工作包线宽广、耗油率低、性能保持能力强、易保障维修且满足航母舰载训练、海洋环境使用和舰-机-发适配等“适海性”[15-16]要求的涡扇/涡喷发动机。

2.2　舰载高级教练机发动机发展现状

2.2.1　美国舰载高级教练机发动机

美国海军早期的舰载高级教练机为 TA-4J“天鹰”舰载高级教练机,配装一台普惠 J52-P-6B 涡喷发动机,推力为 37.8kN。J52 发动机是普惠公司为美国海军攻击机和战斗机设计研制的一型中等推力级无加力双转子涡喷发动机,其派生出了多个不同型号,先后应用于美国海军A-4M/F/J“空中之鹰”单发攻击机、EA-6B 双发电子对抗飞机等多个机型,截止 1972 年 J52 发动机的飞行时数已累计达到 2.5×10^6 h。

20 世纪 90 年代在英国“鹰”高级教练机的基础上美国麦道公司和英国宇航公司联合研制出 T-45“苍鹰”舰载高级教练机用于替代 TA-4J,目前有 T-45A/C 两个型号,动力装置为一台罗·罗 F405 系列无加力涡扇发动机,如图 4。前期采用 F405-RR-401(阿杜尔 871)无加力涡扇发动机,推力为 26.7 kN,2008 年以后的升级版 F405-RR-402(阿杜尔 951)采用了全权限数字电子控制系统,且推力增加至 28.9 kN,并延长了发动机寿命,同时更易于维护保养。英国和法国联合研制的阿杜尔系列发动机自 1976 年英国“鹰”式教练机列装服役至 20 世纪 90 年代,已成功在多型飞机(英/法美洲虎攻击机、日本三菱 F1 战斗机/T2 教练机)上装配使用了十多年,是一款十分成熟可靠的发动机[17]。为满足 T-45 舰载高级教练机使用,罗·罗公司通过改进材料和冷却将燃烧室和涡轮翻修寿命从 1000 h 提高到 2000 h,并广泛采

用了防腐措施，增加了备份燃油系统，同时提高抗电磁干扰能力，为解决 T-45A 飞机着舰下滑过程中发动机响应慢的问题对燃油控制系统也做了相应调整。

近几年，美国海军拟规划发展一型更为先进的舰载高级教练机来替代 T-45A/C，并对 T-7A“红鹰”表示出浓厚的兴趣[18-19]。T-7A 的配装动力为通用 F404-GE-402 涡扇发动机，主要用于 F/A-18C/D“大黄蜂”双发舰载战斗/攻击机。美海军这种通过选择一型成熟的舰载机发动机降状态使用为舰载高级教练机提供动力，以提高发动机寿命，增加循环数的思路，可以说是一种简单高效的方法。



图 4 T-45 舰载高级教练机和阿杜尔涡扇发动机

Fig. 4 T-45 carrier-based advanced trainer and Adour turbofan engine

2.2.2 俄罗斯舰载高级教练机发动机

俄罗斯海军仅有一艘库兹涅佐夫号航母和一个舰载战斗机团，舰载战斗飞行员规模较小。为满足舰载战斗飞行员培养需要，俄海军在低空性能优异的 Su-25 攻击机基础上改装得到了 Su-25UTG 舰载教练机，其动力为两台图曼斯基 R-195 无加力涡喷发动机，单台推力为 44.18 kN，如图 5。Su-25 攻击机 1975 年首飞，1984 年装备部队，Su-25UTG 舰教练机于 1989 年底上舰试飞。从时间跨度上看，图曼斯基 R-195 涡喷发动机自配装 Su-25 首飞至 Su-25UTG 舰载改装后试飞也经历了十多年的使用经验积累。

通过上述舰载高级教练机对动力装置性能要求的分析和国外舰载高级教练机发动机发展现状的回顾，不难发现，舰载高级教练机动力装置最有效地发展途径是围绕其对发动机长寿命、宽包线、低油耗、强性能保持、易保障维修及“适海性”等使用要求选择一款成熟可靠的发动机进行改进研制，或直接选用一型成熟的舰载战斗机动力降状态使用，以提高使用寿命。



图 5 Su-25TUG 舰载教练攻击机和图曼斯基 R-195 涡喷发动机

Fig. 5 Su-25TUG carrier-based advanced trainer and Tumansky R-195 turbo engine

3 未来舰载高级教练机发动机发展趋势

舰载高级教练机动力的发展离不开舰载战斗机飞行员培养需求的牵引，同时也应与高级教练机的发展相匹配。

随着美国 F-35C 第四代舰载战斗机的服役，拉开了未来信息化、体系化、智能化海上空战的序幕[20]，这对未来舰载战斗机飞行员的训练培养提出了更高的要求，包括飞行技巧、态势感知、作战思维等方面。未来舰载高级教练机性能上将会向新一代舰载战斗机进一步靠拢，能够实现超声速巡航、超机动、持续大机动飞行、智能辅助决策等飞行训练，并具有更为先进的航电系统，这也要求配套动力应是具有更高推质比、更低油耗和更大功率提取的小涵道比涡扇发动机。美国空军的下一代高级教练机 T-7A“红鹰”直接选用 F/A-18C/D“大黄蜂”舰载战斗/攻击机的配套动力也侧面印证了这一观点。

同时，各国为节省训练成本，优化训练体制，促使着高级教练机朝着“一机多型，一型多用”的方向发展[21-22]。一方面空海军可以联合培养、共同规划、协同发展，另一方面高级教练机在实现教练功能的基础上也可改装成为战术飞机。如俄罗斯在高级教练机雅克-130 的后续发展中即规划有相应的作战机型，意大利也在 2017 年发布了 M-346 高级教练机的攻击作战机型 M346FA，韩国在 T-50 高级教练机的基础上开发推出了 FA-50 轻型攻击机。同样，舰载高级教练机也可改装发展成为舰载轻型攻击机，实现对地火力支援的功能。俄罗斯库兹涅佐夫号航空母舰的舰载机设计部署方案即为 20 架 Su-33 和 4 架 Su-25UTG，Su-25UTG 舰载教练机通过改装后就可承担对地攻击任务。“一机多型、一型多用”的发展思路要求舰载高级教练机将会长期驻舰伴随训练或承担相应作战任务，发动机也将长期暴露在恶劣的海洋环境和复杂的电磁环境中。因此，考虑当前第五代军用发动机的技术特征[23-26]，未来舰载高级

教练动力将会更加注重长寿命设计与管理技术。如采用新型的高分子复合材料,既可以解决海洋环境防腐问题又能大大减轻发动机质量;引入发动机健康管理、智能控制等技术,能够有效评估发动机状态,预测高强度舰载起降训练与海洋环境贮存造成的性能衰减,管理发动机维修计划,延长发动机使用寿命。

此外,舰载高级教练机舰面起飞位偏流板前的高频次使用势必会造成发动机进口的温度/压力组合畸变,增加发动机喘振风险。2000 年美国曾在例行保障时为全部的 T-45 舰载高级教练机换装了改进后的进气唇口,有效改善了部分工况下的流场质量,减少了发动机喘振和压气机失速次数[27]。未来舰载高级教练机发动机也将在努力提高气动稳定性的同时进一步强化飞发一体化设计技术,充分考虑发动机与飞机之间的协调和相互影响,提高复杂条件下的抗进气畸变能力。

结合舰载高级教练机动力装置的发展途径,未来舰载高级教练机动力将会在选择成熟可靠发动机进行改进研制或选用舰载战斗机配套动力的基础上更加侧重对发动机的性能提升、长寿命设计与管理,以及飞发一体化联合设计。

4　结　论

舰载高级教练机在飞行员培养训练体系中起到衔接基础教练机和舰载战斗机的重要作用,是舰载战斗机飞行员培养不可或缺的重要装备。本文通过回顾高级教练机发动机的发展历程,分析舰载高级教练机对配套动力的性能要求,梳理国外舰载高级教练机发动机现状,认为当前发展舰载高级教练机动力的最有效途径是根据飞机平台的动力需求,在成熟可靠涡扇发动机基础上围绕舰载高级教练机发动机长寿命、宽包线、低油耗、强性能保持、易保障维修及"适海性"等方面的相关要求进行改进研制或直接选用一型舰载战斗机配套动力降状态使用。未来舰载高级教练机配套动力将朝着更高推质比、更低油耗、更大提取功率,更长使用寿命和飞发一体化联合设计的方向不断发展。

参考文献:

[1] 吴雄,金惠明. 国外舰载飞机飞行员培养模式发展启示[J]. 教练机,2016(3):6-10.
WU Xiong, JIN Huiming. Inspiration from development of pilot's training mode for carrier aircraft at abroad[J]. Trainer, 2016(3):6-10. (in Chinese)

[2] 潘应雄,李泰安,刘卓,等. 美国空海军联合高级教练机训练需求探析[J]. 教练机,2012(4):47-52.
PAN Yingxiong, LI Taian, LIU Zhuo, et al. Research on training requirement of the U. S. joint AJT[J]. Trainer, 2012(4):47-52. (in Chinese)

[3] 黄种荣,梁云瑞. 飞行训练体质与教练机的发展[J]. 教练机,2011(1):7-10.
HUANG Zhongrong, LIANG Yunrui. Flight training system and development of trainer[J]. Trainer, 2011(1):7-10. (in Chinese)

[4] 世界飞机手册编写组. 世界飞机手册(2000)[M]. 北京:航空工业出版社,2001.

[5] 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 Daming. Analysis on equipment requirements for trainer abroad[J]. Trainer, 2014(4):25-30. (in Chinese)

[6] THOMAS R. US air force pilot selection and training methods[R]. Dayton: Air Force Research Laboratory, 2000.

[7] 刘卓,潘应雄. 新一代高级教练机发展趋势研究[J]. 教练机,2010(4):26-29.
LIU Zhuo, PAN Yingxiong. Research of the development trend of new generation advanced jet trainer[J]. Trainer, 2010(4):26-29. (in Chinese)

[8] 刘勤,周人治,王占学. 军用航空发动机特征分析[J]. 燃气涡轮试验与研究,2014,27(4):59-62.
LIU Qin, ZHOU Renzhi, WANG Zhanxue. Characteristic analysis on military aero-engines[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2014, 27(4):59-62. (in Chinese)

[9] TIRPAK J A. Teeing up the T-X[J]. Air Force Magazine, 2015, 98(6):48-50.

[10] CEIR C. Advanced pilot training (T-X) program background and issues for congress[R]. Washington: Congressional Research Service, 2017.

[11] JEREMIAH G. Air force T-7A red hawk trainer[R]. Washington: Congressional Research Service, 2019.

[12] PIKE J. T-7A red hawk/T-X advanced trainer replacement[EB/OL]. [2019-10-17]. https://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/t-7.htm.

[13] 胡军龙. T-45 舰载教练机作战基础训练[J]. 教练机,2014(4):8-12.
HU Junlong. Basic operational training of T-45 carrier-based trainer[J]. Trainer, 2014(4):8-12. (in Chinese)

[14] 彭友梅. 舰载飞机发动机的技术特点[J]. 燃气涡轮试验与研究,2005,18(2):56-57.
PENG Youmei. Technical features for ship-board aircraft engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2005, 18(2):56-57. (in Chinese)

[15] 霍亮,侯昕序,齐红德,等. EWIS 耐海洋环境设计[J]. 飞机设计,2019,39(1):45-48.
HUO Liang, HOU Xinxu, QI Hongde, et al. Marine environment resistant design of EWIS[J]. Aircraft Design, 2019, 39(1):45-48. (in Chinese)

[16] 肖军,廖志忠,吴连锋. 空空导弹弹体结构海洋环境腐蚀防

护[J]. 航空兵器,2019,26(6):86-92.
XIAO Jun,LIAO Zhizhong,WU Lianfeng. Study on corrosion protection on structure of air-to-air missiles in marine environment[J]. Aero Weaponry,2019,26(6):86-92. (in Chinese)

[17] MICHAEL F. The Rolls-Royce/Turbomeca Adour the optimum trainer engine[R]. Brussels:Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition,1990.

[18] VALERIE I. The Air Force's new trainer jet is attracting the Navy's and Marine Corps' interests[EB/OL]. [2019-05-07]. https://www.defensenews.com/digital-show-dailies/navy-league/2019/05/07.htm.

[19] Naval Air System Command. US naval aviation vision 2016—2035[M]. Washington:Naval Aviation Enterprise,2016.

[20] GERTLER J. F-35 joint strike fighter(JSF) program[R]. Washington:Congressional Research Service,2018.

[21] 朱宇,朱妍如. 新型教练机发展需求与 APT 方案[J]. 教练机,2015(1):11-15.
ZHU Yu, ZHU Yanru. Development demand and APT program of new-type trainer[J]. Trainer,2015(1):11-15. (in Chinese)

[22] 朱宇. APT 方案与一机五型构想[J]. 教练机,2016(1):7-10.
ZHU Yu. APT plan and idea for an aircraft with five versions[J]. Trainer,2016(1):7-10. (in Chinese)

[23] 梁春华,索德军,孙明霞. 美国第 6 代战斗机发动机关键技术综述[J]. 航空发动机,2016,42(2):93-97.
LIANG Chunhua,SUO Dejun,SUN Mingxia. A review on the key technologies of the sixth generation fighter engines in US[J]. Aeroengine,2016,42(2):93-97. (in Chinese)

[24] 程荣辉,张志舒,陈仲光. 第四代战斗机动力技术特征和实现途径[J]. 航空学报,2019,40(3):022698.1-022698.10.
CHENG Ronghui, ZHANG Zhishu, CHEN Zhongguang. Technical characteristics and implementation of the fourth-generation jet fighter engines[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2019,40(3):022698.1-022698.10. (in Chinese)

[25] 李宏新,谢业平. 从航空发动机视角看飞/发一体化问题[J]. 航空发动机,2019,45(6):1-8.
LI Hongxin,XIE Yeping. Fundamental issues of aircraft/engine integration from the perspective of aeroengine[J]. Aeroengine,2019,45(6):1-8. (in Chinese)

[26] 晏武英. 制空作战飞机发动机发展历程及未来趋势[J]. 航空动力,2020(1):59-64.
YAN Wuying. Development and future trend of air superiority fighter engine[J]. Aerospace Power,2020(1):59-64. (in Chinese)

[27] BARE E A,BYRD J. Boeing T45A inlet 16-foot TT test 519[R]. Hampton,Virginia,US:National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center,1999.

(编辑:王碧珺)