

舰载战斗机发动机适配性体系研究^{*}

彭云龙, 吴 雄, 史开源, 卜振鹏

(中国人民解放军92728部队, 上海 200436)

摘 要: 为有效促进舰载战斗机发动机研发, 参考国外舰载战斗机发动机研制经验, 结合作战使用需求, 系统梳理了舰载战斗机发动机适配性体系组成, 重点围绕海洋作战适配性、海洋环境适配性、舰载使用适配性阐述了相关能力要求。在此基础上, 提出了整机试验、陆基飞-发适配性试验和舰基舰-机-发适配性试验逐层递进的舰载战斗机发动机适配性体系验证考核方式。分析认为未来舰载战斗机发动机适配性工作应加强体系融合联合攻关, 注重远海长航舰面维修保障能力设计, 加快推进发动机舰载适配性标准规范体系建设。

关键词: 舰载战斗机; 航空发动机; 适配性; 体系框架; 验证考核

中图分类号: V235.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2022) 08-210070-08

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210070

Adaptation System of Carrier-Based Fighter Engine

PENG Yun-long, WU Xiong, SHI Kai-yuan, BU Zhen-peng

(Unit 92728 People's Liberation Army, Shanghai 200436, China)

Abstract: In order to effectively promote the development of carrier-based fighter engine, with reference to the development experience of foreign carrier-based fighter engine and combined with operational requirements, the composition of carrier-based fighter engine adaptation system was systematically reviewed, and the relevant capability requirements were emphatically elaborated on sea combat adaptation, marine environment adaptation and carrier-based use adaptation. Based on this, the verification and assessment methods were proposed, including whole engine test, the ground-based fighter-engine adaptation test and the ship-based carrier-fighter-engine adaptation test. It is suggested that the carrier-based fighter engine adaptation work in the future should strengthen the joint efforts of system integration, pay more attention to the long voyage engine maintenance, and accelerate the construction of carrier-based engine adaptation standard system.

Key words: Carrier-based fighter; Aero-engine; Adaptation; Framework; Verification

1 引 言

舰载战斗机是航母编队攻防作战的核心力量, 其出动架次率是航母作战效能的主要表征指标^[1]。在航母有限的空间和紧张的作业周期内, 要完成舰载机的起降、停放、调运、补给和维修等一系列工作, 对舰载战斗机的气动布局^[2]、结构设计^[3]、约束接口^[4]

和作业停放^[5-6]等提出了特殊要求。即舰载机除具备陆基飞机的基本要求外, 还需实现舰-机适配, 以充分利用舰面资源, 在航母作战体系中发挥出最大效能。发动机作为舰载战斗机最重要的系统组成之一, 也应满足舰船和飞机的适配性要求。

狭义的舰载战斗机发动机适配性(以下简称发动机舰载适配性)是指舰载战斗机发动机在设计和

^{*} 收稿日期: 2021-02-03; 修订日期: 2021-05-02。

通讯作者: 彭云龙, 博士, 工程师, 研究领域为航空动力装置发展论证。

引用格式: 彭云龙, 吴 雄, 史开源, 等. 舰载战斗机发动机适配性体系研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8):210070. (PENG Yun-long, WU Xiong, SHI Kai-yuan, et al. Adaptation System of Carrier-Based Fighter Engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8):210070.)

使用过程中与飞机和舰船各种约束接口的兼容性,包括安装尺寸、性能要求、调运补给、维修保障等。从广义上来讲,发动机舰载适配性可拓展到发动机舰基使用全寿命周期内的健康管理、复杂电磁环境的兼容与防护、战场环境的舰面保障修理、远海长航的舰内贮存等诸多方面。

本文以舰载战斗机发动机舰面使用需求为出发点,参考借鉴国外舰载战斗机发动机研制经验,系统梳理发动机舰载适配性的体系组成,列举发动机舰载适配性研制考核相关试验,分析未来发动机舰载适配性工作的关注重点,为我国舰载战斗机发动机体系研发提供参考。

2 发动机舰载适配性体系构成

当今,航母编队已经逐渐成为各国战略威慑、制海、制空、兵力投射的核心力量^[7]。伴随着航母编队使命任务与作战运用的多样化,对长时间在复杂海洋环境中作战使用的舰载战斗机发动机提出了更高的舰载适配性要求。构建合理的发动机舰载适配性体系有利于在发动机研制的各个阶段贯彻落实舰载战斗机发动机的要求和特点,并不断检查修正,为舰载战斗机发动机成熟发展的螺旋式上升奠定基础。发动机舰载适配性包括发动机舰载使用的方方面面,顶层要求可以概括为海洋作战适配性、海洋环境适配性、舰载使用适配性三个方面,依据顶层要求可细化得到相应的能力要求并牵引出具体技术指标,

总体框架组成见图 1。

2.1 海洋作战适配性

海洋作战适配性是指发动机应满足舰载战斗机履行实施各类作战任务的基本要求。

一是发动机构型。航空母舰的有限空间限制了搭载飞机的数量,这促使舰载战斗机须具备执行防空、截击、反舰和对岸打击等多种任务的能力^[8-9]。为满足这一作战使用需求,舰载战斗机发动机一般采用小涵道比涡扇发动机,在追求更大推重比的同时兼顾更低的耗油率。从美国舰载战斗机发动机的发展规律来看亦是如此。美国现阶段主力舰载战斗机 F/A-18E/F“超级大黄蜂”的 F414-GE-400 发动机相比 F/A-18C“大黄蜂”的 F404-GE-400 发动机,单台加力推力由 78.73kN 增大至 97.86kN,最大耗油率在 0.1774kg/(N·h)基础上降低了 2%,推重比达到 9,其后续的耐久增长型 F414EDE 推重比更是达到了 10。美国最新服役的 F-35C 舰载型采用普惠 F135-PW-400 发动机,单台加力推力达到 191.35kN,推重比已超过 10^[10-11]。随着美国空军空中优势自适应推进技术计划 (ADAPT) 和美国海军变循环先进技术 (VCAT) 等项目^[12-13]的推动,变循环/自适应发动机技术日趋成熟,预期未来舰载战斗机发动机将会采用变循环/自适应的发动机构型,实现舰载战斗机动力的革命性跃升。

二是推力瞬变和快速响应能力。舰载战斗机一般采用滑跃或弹射起飞和拦阻着舰的起降方式,发

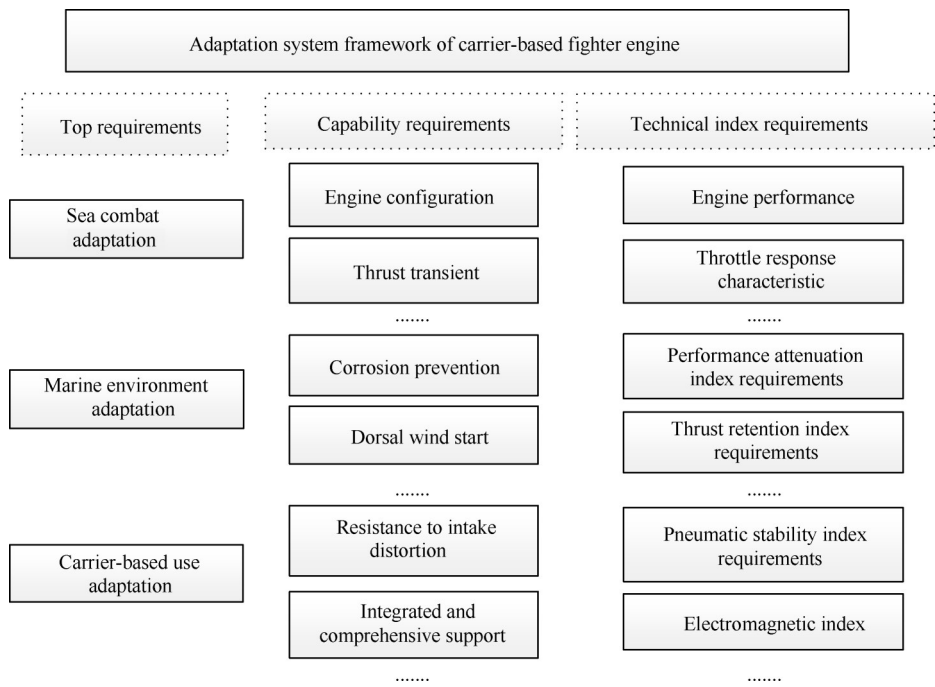


Fig. 1 Adaptation system framework of carrier-based fighter engine

动机除能提供足够大推力满足舰载机舰面起飞外,更重要的是满足着舰和逃逸复飞的精准控制要求^[14]。由于舰载机着舰速度大,航母上必须采用辅助装置进行辅助着舰。美国海军在舰载机着舰程序中采用了下滑道技术,进场着舰时需具备适宜的航迹和海拔高度,以恒定的迎角和一定的下沉率进场着舰,舰载机拦阻钩钩住拦阻索,由拦阻索系统吸收舰载机的动能,完成拦阻着舰。若受其他因素影响,飞机脱离最优着舰下滑道,飞机需要在开始机动5s内修改到一个比原下滑道高15m的新下滑道上以完成安全复飞^[8,15]。同时为保证在着舰失败的情况下能够成功复飞/逃逸,舰载机飞行员在着舰瞬间将发动机油门杆角度推到最大,待确认着舰成功后,才迅速调低发动机状态。如果着舰失败,则需重新拉起飞机,谋求再一次降落。因此,为使舰载战斗机具备上述能力,要求发动机具有良好的控制品质和快速的推力响应能力。美国海军舰载机着舰规范对发动机的推力响应提出如下要求^[16]:“在所有的工作推力下都要有快速加速响应能力(从慢车到军用推力最多5s)”,“在夏令时(90°F)发动机从进场着舰对应的推力到军用推力的加速时间不能超过3s,以使飞机在2.5s内获得 1.5m/s^2 的纵向加速度”,“在舰载机进场下滑的整个过程中,发动机应始终保证飞机对油门指令的快速响应,当油门指令输入后应在1.2s内使飞机加速度达到要求纵向加速度值 $\pm 0.12g$ 的90%”。

三是抗大过载能力。舰载战斗机在每次弹射起飞或拦阻着舰过程中都要承受巨大的轴向和法向过载,这需要发动机具有比陆基飞机更强的抗过载能力。舰载战斗机弹射起飞过程中承受的过载随弹射器动力冲程和飞机末速度的不同而变化,最大可到 $9g$ 以上,传递到发动机上也可达到 $3\sim 4g$ ^[17]。拦阻着舰过程中,舰载机采用无平飘精准着舰,考虑到母舰的横摇、纵倾与升沉运动,舰载机飞机下沉率是陆基飞机的2.5~3倍,发动机承受轴向和法向过载也更大。这需要在发动机整机和部件的结构强度设计中重点考虑。

四是高可靠性和维护性。舰载战斗机随航母出航训练或执行任务远离陆基机场,若发动机出现故障,将影响舰载战斗机的作战使用,大大增加舰载机着舰难度,并且只能依托有限的舰面维修资源进行保障,因此高可靠性是对任何一型舰载机发动机的基本要求。美国F-14“熊猫”舰载多用途重型战斗机早期采用普惠公司的TF30-P-412A发动机,见图2,由于其可靠性维护性较差,仅1974年4月至1976年3

月间就有7架飞机由于发动机故障而失事^[18],严重影响了F-14舰载战斗机的战备状态和作战能力。美国尼米兹级航母的飞机出动率为140架次/日,最新一代福特级航母的目标出动率将增至220架次/日^[19],如此高强度的出动频率,对舰载战斗机发动机可靠性和维护性的要求也将会更高。

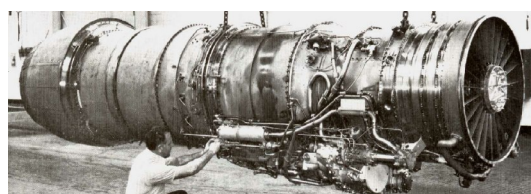


Fig. 2 Pratt & Whitney TF30-P-412A engine^[18]

2.2 海洋环境适配性

海洋环境适配性是指舰载战斗机发动机应满足复杂海洋环境条件下的适用要求。

一是腐蚀防护能力。航母机库空间有限,大量舰载机需停放在甲板上,致使发动机长时间直接暴露在海洋大气环境中。海洋环境具有高温、高湿、高盐雾、霉菌易滋生等特点,混合常规动力航母燃油燃烧排放的烟气或恶劣天气的沙尘,将加剧发动机内部和表面的腐蚀,造成故障增加。据统计,西方国家舰载机机载电子设备因受潮而引起的故障占80%,因霉菌造成的故障占10%~15%。美国配装A-7D“海盜”舰载攻击机的TF-41发动机在服役使用中压气机叶片腐蚀严重,修理中腐蚀报废率高达25%^[17]。所以舰载机发动机必须采用抗腐蚀材料或涂层,并在各种仪器、仪表、成附件、密封件的设计维护程序及发动机雷达/红外隐身设计中充分考虑腐蚀防护要求,强化海洋复杂环境下发动机的抗腐蚀能力。图3显示了美军航母舰载机停放在甲板时遭受海浪冲击和在中东海域遭遇沙尘天气的情景。

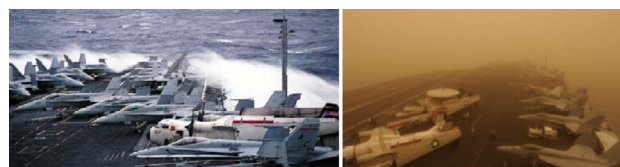


Fig. 3 US navy carrier-based aircraft suffering waves and sandy weather

二是高温环境性能保持能力。航空母舰根据任务需求机动部署在相应海域,全球除北冰洋外,大部分海洋处于温带、亚热带和热带,年度平均气温较高。高温高湿大气条件下,由于空气特性相比标准

大气有较大变化,发动机起动时间增加^[20]、推力下降、油耗增加,进而导致飞机载重和飞行性能降低,影响出动效率。为确保舰载战斗机具备良好的任务能力和飞行性能,发动机在非标准天气尤其是高温高湿条件下应具有良好的起动和推力性能。为此,美国舰载机发动机常选择 32℃ 为设计点^[16],使得在标准天气条件下具有较好的起动性能和较高的动力储备,同时保证了低纬度地区非标准天气的使用。

三是背侧风起动能力。航母甲板上只有特定位置才允许舰载机发动机起动。在瞬息万变的战场环境中,若舰载机发动机起动成功率低,将严重影响飞机的转运调度,甚至可能贻误战机。若起动时间长,将会影响后续飞机的准备工作,降低整个舰载机联队的出动效率。发动机起动性能的主要影响因素除高度、温度、湿度外,就是风环境。海上航行,舰面甲板风可能来自各个方向,出现侧风或尾侧风是常见现象。如果尾侧风存在与发动机排气流相反的风分量,将阻碍发动机正常起动甚至出现复合材料外涵道烧蚀的问题。因此,舰载战斗机发动机需要具备一定的背侧风起动能力。美军 JSSG-2007A《航空涡喷涡扇涡轴涡桨发动机联合使用规范指南》(以下简称 JSSG-2007A)中对有风情况下发动机地面起动包线也提出了相应要求^[21],如图 4 所示。

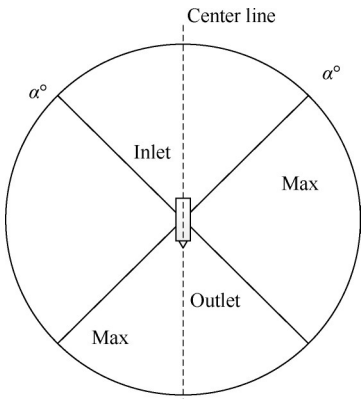


Fig. 4 Ground start wind envelope in US military standard^[21]

四是舰上长期贮存能力。航母编队远海长航,除飞机配套装机发动机外,还将携带一定数量的备用发动机和相关备件。舰载机发动机整机、备件在贮存箱设计和维护保养程序上要能够实现部署周期内舰上贮存腐蚀防护与控制的要求,并满足不同海域的高低温环境、浪涌引起的颠簸冲击和舰上吊运安装维护的需求。

2.3 舰载使用适配性

舰载使用适配性是指舰载战斗机发动机应满足舰载战斗机舰面使用并保证设计功能性能指标的使用要求。

一是抗进气畸变能力。现役舰载战斗机的起飞方式有滑跃起飞、弹射起飞和短距垂直起飞三种。无论是滑跃还是弹射起飞,飞机都需在具有燃气导流功能的偏流板前将发动机推力调整到中间以上状态,然后解锁轮档制动装置实现飞机滑跃或弹射起飞。在起飞过程中,受偏流板反射发动机喷出的高温高压尾气、舰面气流、侧风以及航母舰尾流等因素影响,会在发动机进口产生较大的进气压力、温度畸变或温压组合畸变,引起发动机失速或喘振。若采用蒸汽弹射装置,发动机在飞机起飞过程中也可能吸入弹射装置泄漏蒸汽,加剧进气畸变的程度。美国 A-7“海盗”舰载攻击机发动机弹射蒸汽吸入试验表明,压气机失速次数占起飞次数的 14.3%~22.4%^[14]。若舰载战斗机为短距垂直起降(如 AV-8B“海鹞”和 F-35B),发动机或升力风扇的喷射流也会通过舰船甲板反射到发动机进口产生一定的温度压力畸变。此外,舰载机着舰时舰尾“公鸡尾”气流和来自舰舷的侧风以及航母高速航行舰桥后部的紊流,也会促使发动机进口产生较大的进气压力畸变^[22]。为保证舰载战斗机发动机在各种条件下能够稳定工作,发动机应具备较强的抗进气畸变能力。

二是电磁兼容能力。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。特别是像 EA-18G“咆哮者”舰载电子战飞机,除机载电子设备外,还挂载了电子战所需的接收机吊舱、干扰吊舱、反辐射导弹等,对发动机及控制系统的电磁兼容性要求将会更高。因此,美国陆军和空军要求在 1V/m 的辐射电场中测试飞机的耐受性,而美海军则要求在 200V/m 的辐射电场中测试飞机各系统的电磁兼容性^[9,23]。

三是舰面一体化综合保障要求。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需求,满足航母舰载机多机种一体化集约保障的要求。这包含了大量基础性和

预先性的工作,如一站式保障站位、发动机移动试车台、维修车间等。图5为尼米兹级航母配备的发动机维修车间和移动试车台。2020年3月洛克希德·马丁公司宣布交付第500架F-35飞机,但在所交付的500架飞机中F-35C舰载型仅为38架。其中影响F-35C舰载型交付数量的因素之一,是由于F135发动机尺寸较大,并采用了一些新的技术,尼米兹级航母部分设施需通过改装升级才能适应F135发动机维护保障需求。

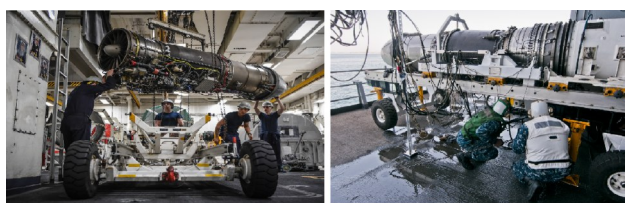


Fig. 5 Aero-engine repair shop and mobile test facility on US navy Nimitz-class aircraft carrier

四是噪声尾流要求。航母甲板空间有限,需同时开展舰载机起降、转运、发动机开车等多项工作。因此对舰载战斗机发动机的噪声指标和尾流提出了要求^[24],以保证在发动机开车时不会对舰面作业人员安全健康或舰面设备产生不利影响。美海军要求舰载机航母起降阶段,航母指挥和操作人员工作位置处噪声不大于135dB^[9]。美军标JSSG-2007A中对未安装的发动机,在海平面静止下工作的近场和远场噪声水平也提出了相应要求。据悉,在试验过程中F-35B飞机曾出现由于发动机排气尾流温度过高,对飞行甲板灼烧过度而损伤航母甲板的现象。

3 发动机舰载适配性验证考核

发动机舰载适配性试验应围绕舰载适配性体系的能力要求及分解细化的技术指标开展实施,从整机试验、陆基飞-发适配性试验和舰基舰-机-发适配性试验三个层级,逐层递进地进行验证和考核,如图6所示。

3.1 整机试验

整机试验是从发动机装备个体层面验证考核舰载适配性的技术指标要求,为舰载适配性能力的实现奠定基础,期间应充分考虑各种复杂环境及边界条件。如通过发动机地面台架试验和高空模拟试验验证考核发动机的推力瞬变和快速响应能力;通过持久试车验证发动机整机可靠性;通过海平面高低温起动试验验证考核发动机海洋舰载环境下的起动

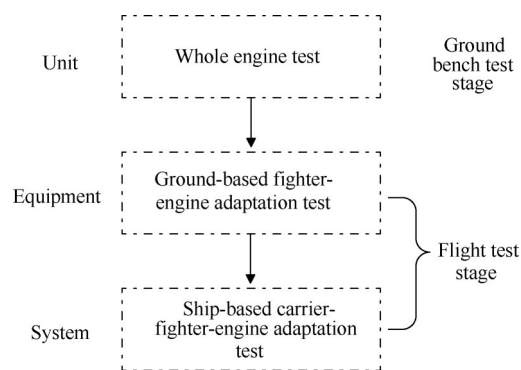


Fig. 6 Verification and assessment methods of carrier-based fighter engine adaptation

特性等。

需要重点强调的是模拟舰面条件下的温压组合畸变台架试验和整机抗腐蚀敏感性试车。

发动机进口流场畸变不仅影响发动机的工作稳定性,而且会严重影响发动机的结构完整性和寿命,畸变将增大涡轮叶片超温的危险性,引起压气机转子强迫振动,激发叶片-盘的耦合振动,影响压气机的颤振边界等^[25]。在舰载战斗机发动机装机前开展模拟舰面条件下的温压组合畸变整机台架试验,能够有效规避发动机舰面复杂环境下稳定性裕度低,发动机偏流板前大状态时压气机发生喘振的风险,并获得发动机整机气动稳定性的能力边界。

海洋环境对发动机的性能、可靠性和安全性的影响是显著的,也是长期的。处于海洋环境中的舰载机发动机不可避免地要遭受化学腐蚀、微生物腐蚀、电偶腐蚀和冲刷腐蚀等各种形态的腐蚀。整机抗腐蚀敏感性试车试验应被设计成在尽可能短的时间内,充分验证考核各种环境条件下的整机抗腐蚀特性,有时为模拟真实环境需要也可与吞砂、吞冰等试验结合开展。1998年美军在对某飞机开展的长达两个月的运行试验中发现,若每次舰载机海上飞行后不能保证发动机进行完好的清洗干燥,将导致压气机内部密封条严重腐蚀侵蚀现象的发生,引发燃气涡轮转子卡滞故障^[21]。

3.2 陆基飞-发适配性试验

陆基飞-发适配性试验是指发动机配装飞机平台通过在地面模拟舰面使用条件的方式开展相关试验项目,校验发动机与飞机平台所组成装备系统的适配性,同时规避试验风险、节约试验资源。包括陆基模拟舰面起降、偏流板前开车试验、噪声排气测量试验、不同环境下的起动试验、暖机试验等。

舰载机战斗机在弹射起飞和着舰拦阻过程中,发动机在大轴向过载条件下工作,其承力系统将受到较大的冲击力。同时舰载机着舰操作方式与陆基飞机着陆操作方式存在差异,要求发动机在低功率状态具有良好的推力响应特性。因此,在舰载机上舰前,需开展陆基模拟舰面起降试验,随飞机考核验证发动机装机后的抗大过载能力与推力响应特性。

通过发动机模拟舰面条件下的温压组合畸变台架试验可以获得发动机的抗进气畸变理论阈值,而开展偏流板前开车试验则是在逼近实际起飞使用的条件下验证发动机的气动稳定性。因为,即便温压组合畸变台架试验能够模拟偏流板折射燃气的瞬态变化流场,也无法充分考虑飞机机体对发动机进口进气畸变的影响。

陆基装机后发动机噪声、排气尾流测量试验可为确定上舰后发动机开车时对人员与设备影响的危险区域,规划航母舰面作业区域提供参考依据。不同环境下的起动试验通过在不同地域、不同海拔、不同气温,结合飞机验证发动机不同环境下的起动能力。舰载战斗机发动机暖机性能直接影响到飞机的出动能力,陆基发动机装机暖机试验在试车台架暖机试验的基础上验证装机状态下暖机对发动机性能、稳定及飞机出动率的影响。

3.3 舰基舰-机-发适配性试验

舰基舰-机-发适配性试验是在航母上验证考核母舰-飞机-发动机三者组成舰载战斗机作战打击装备体系的适配性,也是发动机舰载适配性试验的最重要环节,具体包括舰面起降、舰面偏流板前开车、侧风起动、电磁兼容试验、海洋环境适应性检查、维护保障措施验证等。

舰面侧风起动试验验证考核装机发动机在舰面规定起动站位不同尾侧风环境下的起动能力。电磁兼容试验检查发动机在舰面复杂电磁场和机载电磁辐射设备工作条件下的工作情况。海洋环境适应性检查需在一段时间的舰载机海洋训练、使用或发动机舰上贮存后,开展发动机性能试验和分解检查,验证发动机在真实海洋环境下贮存、工作的可靠性,并随后续配装使用持续定期开展。

舰载机发动机舰面维护保障措施验证是舰基舰-机-发适配性试验的重点,发动机研制阶段的综合保障方案设计都是围绕发动机随飞机上舰后的维护保障展开的,而各种维保设计方案能否落地也直接关系到该型舰载机战斗力的形成。舰面维护

保障措施验证从航母的角度出发验证发动机装机状态的维修性以及配套保障资源的满足程度。包括按照维护规程、排故手册开展预防性维修和修复性维修工作,检查装机状态下可原位完成工作项目的可视性、可达性、可操作性,操作时间是否满足要求;检查配套工具、备件、技术资料等保障资源的适用性和可操作性,检查地面保障设备与发动机维护接口的适配性;随机工具箱、随机备件箱、发动机包装箱舰上系固措施可行性、可靠性验证,堆码方式及存放空间检查验证;地面保障设备与舰面电源、油源、气源、水源接口的适配性检查等。

4 发动机舰载适配性工作建议

舰载战斗机发动机是航母作战体系的重要一环,其功能、性能与飞机平台及航母环境条件的适配性直接影响舰载机的出动效率和保障效益,必须高度关注舰-机-发的适配性设计。因此,舰载战斗机发动机适配性工作应是贯彻发动机论证、设计、试制、试验、生产和使用的全流程、系统性工作。结合行业发展现状,对未来发动机舰载适配性工作提出以下几点建议。

4.1 建立联合团队协同解决适配性问题

舰载战斗机发动机适配性问题在航母舰载机建设发展中逐渐显现,并引起业内重视,这决定了对发动机舰载适配性的理解和认识也将随着航母编队远海巡航与任务遂行的实施不断拓展深化。发动机只是舰载适配性中母舰-飞机-发动机三个构成主体之一,对当前已认识或今后新出现的舰载适配性问题应从系统的角度出发,建立舰船、飞机与发动机的联合团队,从舰船结构设计、飞机平台优化、发动机性能提升等多个方面并行推进联合攻关。消除行业壁垒,促进学科融合,避免舰、机、发研制试验相互脱离、各自为政,被动解决舰载战斗机发动机适配性问题的尴尬局面。

4.2 高度重视发动机舰面维修保障工作

航母编队远海长航期间发动机的舰面维修保障能力是后续舰载适配性工作需重点关注的问题之一。远海的发动机维修保障不单单依靠发动机的维修单元体设计、综合保障方案、保障资源规划,更与舰载战斗机的训练出动使用强度,航母舰面保障站位设置、移动试车台能力、维修车间设计等密切相关。在远海长航过程中航母编队还会遇到短时大纬度跨越机动、持续复杂恶劣天气遭遇、昼夜高强度多机种出动等情况,这导致发动机的维修保障需求大

大增加。据了解美军尼米兹级航母航空联队90%以上的人员是作战维修和后勤保障人员,由此可见舰面维修保障的重要性。为实现航母上舰载战斗机发动机的在编维修和中级修理,美海军尼米兹级航母和法国戴高乐航母均设置了航空发动机维修车间和舰面移动试车台,以满足航母多型发动机的维修保障需求。

4.3 加快推进舰载适配性标准规范建设

航空发动机研制作为一项复杂的系统工程,发动机舰载适配性的贯彻更依赖于一系列标准规范的约束。在这方面美国起步较早,在20世纪70年代就发布了第一版涡喷、涡扇发动机通用规范 MIL-E-5007D。1985年美海军意识到通用规范要求已不适用于实际使用,海军修订了规范,执行 MIL-E-5007E(AS)。1995年美国国防部发布 JSGS-87231A,统筹了空、海军的使用需求,并将适用范围扩充为航空涡轮发动机(涡喷、涡扇、涡桨和涡轴)。1998年美国总结 F119 发动机研制经验形成了 JSSG-2007《航空涡轮发动机联合使用规范指南》,2004年更新为 JSSG-2007A,其中涵盖了大量的发动机舰载适配性要求。同期,美国国防部、行业技术委员会和发动机企业也颁布制定了 MIL-STD-3024《推进系统完整性大纲》等一些列配套标准。以 GE 航空集团为例,其内部标准包括材料、设计、零件、试验、工艺、检验、质量管理和资源控制等20类,共计8200余项^[26]。对照美军航空发动机的研发标准体系的演变历程,我国在航空发动机舰载适配性标准体系建设上还存在较大欠缺。现行的航空发动机标准颁布日期较早,虽然进行了修订,但核心内容仍是以空军或陆航为适用对象,缺少海军航空发动机特别是舰载机发动机全寿命全要素的标准化要求。后续国内应基于现有标准,逐步修订建立目标功能要求层、功能验证准则层、详细设计规范层和工业应用标准层的四层级发动机舰载适配性标准规范体系,从标准规范上为发动机舰载适配性工作保驾护航。

5 结 论

舰载战斗机是航母编队战斗力形成的关键因素,发动机作为舰载战斗机的重要系统组成,其舰载适配性直接影响到航空联队作战效能的发挥。

通过借鉴欧美舰载机战斗机发动机研制经验,梳理发动机舰载适配性体系组成,研究认为应在发动机研制过程中从海洋作战适配性、海洋环境适配性、舰载使用适配性三个方面贯彻落实发动机舰载

适配性要求,并采用整机试验、陆基飞-发适配性试验和舰基舰-机-发适配性试验的方式逐步进行验证考核。

结合舰载战斗机发动机的发展,建议未来发动机舰载适配性工作应从系统工程的角度出发,加强体系融合联合攻关,更加注重远海长航发动机舰面维修保障能力提升,持续推动发动机舰载适配性标准规范体系建设。

参考文献

- [1] 赵远征. 航母关键系统对架次率的影响研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(9): 145-149.
- [2] 郭润兆, 张宏, 张健. 舰载机布局的机舰适配性设计研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(6): 5-8.
- [3] 郭润兆, 段卓毅, 李小卫. 舰载机机舰适配性体系研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(3): 10-13.
- [4] Hernando J L, Martínez-Val R. Carrier Suitability of Land-Based Aircraft [C]. Brisbane: 28th International Congress of the Aeronautical Science, 2012.
- [5] 王钱生. 舰载机总体设计主要关键技术概述[J]. 飞机设计, 2005(6): 6-11.
- [6] 王春晖. 美国 F-35 舰载机与舰船平台的适配性设计分析[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(8): 149-152.
- [7] 渔翁. 舰机适配性对航母设计的影响[J]. 现代舰船, 2006(10): 33-38.
- [8] 王钱生. 航母适配性的基本设计要求[J]. 飞机设计, 2006(6): 32-35.
- [9] 谢文姣. 舰载机舰机适配性分析[J]. 国际航空, 2013(1): 27-30.
- [10] Gertler J. F-35 Joint Strike Fighter (JSF) Program [R]. Washington: Congressional Research Service, 2018.
- [11] Naval Air System Command. US Naval Aviation Vision 2016-2035 [M]. Washington: Naval Aviation Enterprise, 2016.
- [12] 晏武英. 美国新一代国家级军用航空动力预研计划分析[J]. 航空动力, 2018(2): 35-39.
- [13] 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.
- [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.
- [15] 段卓毅, 王伟, 耿建中, 等. 舰载机人工进场着舰精确轨迹控制技术[J]. 航空学报, 2019, 40(4): 6-20.
- [16] Thomas R, Marshall H, Melvin L, et al. Review of the Carrier Approach Criteria for Carrier-Based Aircraft Phase I; Final Report [R]. Patuxent River: Naval Air System Command, 2002.
- [17] 路西法. 舰载机发动机技术解读[J]. 舰载武器, 2015

- (7): 76-84.
- [18] 白 玮. “熊猫”——F14舰载多用途重型战斗机[M]. 北京: 航空工业出版社, 2007.
- [19] 陈 练. 效率致胜——美国航母提高舰载机出动架次率新招数[J]. 现代舰船, 2008(10): 20-22.
- [20] 邢 洋, 李兆红, 郭海红, 等. 舰载机发动机高温条件下起动试验研究[J]. 推进技术, 2018, 39(6): 1234-1239. (XING Yang, LI Zhao-hong, GUO Hai-hong, et al. Experimental Investigation on High Temperature Starting of Carrier Based Aircraft Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(6): 1234-1239.)
- [21] US Department of Defense. Joint Service Specification Guide Engine Aircraft Turbine[R]. Washington: US Department of Defense, 2004: 56-58.
- [22] 田宝林. 舰载机对动力装置特殊要求的分析[J]. 航空发动机, 1999, 35(2): 58-64.
- [23] 潘 涵, 宋东安, 邢 芳, 等. 国外舰载机电磁安全性研究[J]. 舰船科学技术, 2003, 25(3): 150-154.
- [24] 王 超. 舰载飞机发动机射流对甲板周围环境的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [25] 刘大响, 叶培梁, 胡 骏, 等. 航空燃气涡轮发动机稳定性与评定技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.
- [26] 王 粲, 张 腾. 军用航空发动机标准发展概述[J]. 航空动力, 2020(3): 57-60.

(编辑:梅 瑛)