

大型察打一体无人机发动机能力需求分析

任 东, 刘诗尧, 刘亚君, 张振波
(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 大型察打一体无人机能够更好地兼顾侦察、打击、信息传递等功能, 是世界范围内军用大型无人机发展的主要方向之一。无人机用发动机在使用方式、监控维护方面与有人机发动机有显著区别, 为了分析起飞质量为 15~20 t 的大型无人机对发动机的基本性能、能力需求和研制模式, 采用基于飞机的约束分析和任务分析的方法对发动机基本性能进行计算分析, 结果表明: 起飞质量为 15~20 t 的无人机所需发动机的安装推力为 39~79 kN。结合有人和无人飞机使用区别, 提出大型无人机 9 个应用场景对应发动机的 11 个能力领域。在充分考虑中国自主研发发动机交付数量和使用现状基础上, 提出了发展低成本无人机动力的“1+N”模式发展技术途径。

关键词: 察打一体; 航空发动机; 无人机; 作战能力; 需求分析; 发展模式

中图分类号: V231

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.01.004

Capability Requirement Analysis of Large Reconnaissance/Strike UAV Engines

REN Dong, LIU Shi-yao, LIU Ya-jun, ZHANG Zhen-bo

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Large reconnaissance/strike unmanned aerial vehicles (UAVs), which can better balance functions of reconnaissance, strike, and information transmission, is one of the main directions of the development of military large UAVs worldwide. There are significant differences in usage, monitoring, and maintenance between unmanned and manned aircraft engines. To analyze the basic performance, capability requirements, and development mode of the engine for a large UAV with a takeoff weight of 15–20 tons, fundamental engine performance is calculated and analyzed by aircraft-based constraint analysis and mission analysis. The results show that the installed thrust requirement of the engine is 39kN to 79kN for the UAV with 15–20 tons takeoff weight. Considering the difference between manned and unmanned aerial vehicles, 11 engine capability areas corresponding to 9 mission scenarios of large UAVs are proposed. By fully considering the delivery quantity and current usage status of domestically developed engines in China, a “1+N” mode for developing low-cost UAV engines is proposed.

Key words: reconnaissance/strike; aeroengine; unmanned aerial vehicle; operational capability; requirement analysis; development mode

0 引言

无人机发动机需要具备精确的运行状态监视和对自身运行性能评估的能力, 与飞机控制系统紧密配合, 一方面在无人机作战所需时改变控制模式满足无人机任务需求; 一方面在出现故障时准确定位, 并评估对任务的影响度。一定程度的智能化发展是后续无人机发动机研制和发展的主要方向。

李屹东等^[1]讨论了察打一体无人机的特点与发

展, 察打一体无人机由于兼具侦察和打击能力, 世界很多国家均将其作为重点发展对象, 但目前在役的此类无人机均较小, 隐身能力、载荷量、快速抵达能力等尚有不足。申超^[2]、沈亮等^[3]分析了无人机协同作战优势, 提出具有更高的飞行高度、更快的飞行速度、超强的隐身能力、更大的载弹量、更长的航程航时, 且多用途化、模块化选择搭载设备的大型察打一体无人机将是提升综合战斗力的重点发展方向。任东等^[4]分析了不同作战任务的无人机对于飞行速度、飞行高度、机

收稿日期: 2021-05-19 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 任东(1983), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 任东, 刘诗尧, 刘亚君, 等. 大型察打一体无人机发动机能力需求分析[J]. 航空发动机, 2024, 50(1): 28–34. REN Dong, LIU Shiyao, LIU Yajun, et al. Capability requirement analysis of large reconnaissance/strike UAV engines[J]. Aeroengine, 2024, 50(1): 28–34.

动过载、起降方续航时航程和经济性指标等的不同需求,配装动力基本为成熟型号改进研制。Donald L S 等^[9]提出了航空发动机性能评估和故障诊断的综合方法,利用精度较高的发动机模型和综合诊断算法来提升发动机状态监控能力。Jeffrey B A 等^[10]提出建立一个具备较高模拟精度的自适应航空发动机模型,从而开展先进控制和健康管理。Aziz K 等^[7]提出基于发动机测量参数的推力评估方法,可用于无人机发动机在线推力估计和飞发联合控制。

国内外学者对于军用无人机向大型化和任务多样化发展有较多的研究和论述,但目前大推力级适用于无人机特殊使用需求的涡扇发动机尚无成熟货架产品,对该类型发动机的发展模式也暂无较为明确的技术途径。本文探讨了大型察打一体无人机的能力需求,依据飞机约束分析和任务分析方法,分析发动机的初步性能需求,提出无人机发动机需突破的关键技术和发展技术途径。

1 大型察打一体无人机能力需求

1.1 自主能力需求

2011年美国发布的《无人系统综合路线图》中,提出了4种等级的自主能力,对当前的发展现状依然适用。在2018年美国发布的新版路线图中^[8],自主性、智能化依然是重点发展方向。

由于突破高机动敌我群体目标识别和态势判定、高可靠/抗干扰/抗遮蔽/可支持空中格斗的链路技术等最为关键的关键技术瓶颈尚需时日,因此,短时间内无人作战飞机在地面操控条件下,与有人机搭配执行任务的格局仍然不会改变。

自主能力对于航空发动机来说没有特殊的要求,但需要发动机配备数字电子控制系统,能够执行较为复杂的控制规律,未来要求能够根据飞机实际任务需要,自行调整和优化相应的调节规律,实现飞发推综合管理。控制系统能够对发动机自身的工作状态进行判断,包括部件的工作状态、性能衰减程度等,并能够依据测量参数进行故障定位和故障参数重构,这些都需要发动机控制系统提升数字化、智能化水平。

1.2 典型作战模式

目前在役察打一体无人机仍然采用人在链路指挥的方式,后续大型察打一体无人机会采取有人/无人协同作战模式,达到更高的作战效能,作为数据链

路平台和火力平台,在有人机指挥下进行作战^[9-10]。2种典型的无人机与有人机协同作战模式如下:

(1)典型作战模式1:无人机地面遥控起飞,自主爬升并按预定航线参加编队、巡航,指挥平台控制无人机群作战。

(2)典型作战模式2:无人作战飞机作为有人战机的前哨,利用其信息中继平台的能力和更加优于有人机的隐身能力,提前探索和发现来袭敌机,并将敌机位置信息发送给后方有人指挥机,有人指挥机发出攻击指令后,无人作战飞机利用自身携带的空空导弹攻击敌机。

1.3 典型任务谱

察打一体无人机作为装备体系中一类作战装备,其装备体系任务谱如图1所示。从图中可见,载荷能力提升的大型隐身察打一体无人机至少需要具备信息支援(包括侦察监视、信号情报、目标指示、毁伤评估、预警探测、地形测绘、辐射探测、气象水文、作战搜救、通信中继、信息组网等功能)、信息对抗(包括电子对抗、网络战、诱饵欺骗、心理战)和火力打击(包括时敏目标打击、对地打击、反潜反舰、反雷探测、防空反导)。

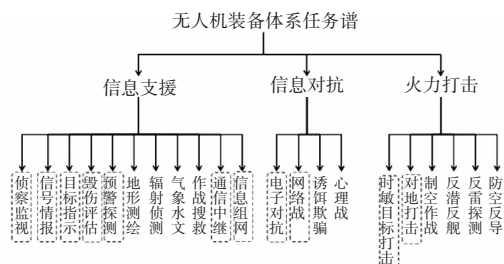


图1 无人机装备体系任务谱

1.4 飞机构型

察打一体无人机主要任务是打击地面固定或时敏目标,在满足必要续航能力的前提下,大幅增强隐身能力,可以有效提升无人机突防能力和自身生存率。与传统布局相比,飞翼布局具有高气动效率、高隐身性、高内部空间利用率以及低气动噪声等优点。飞翼布局具有升阻比大、升力性能好的气动特性^[11],选择飞翼布局可以提高气动效率,在相同的飞行高度和速度条件下,降低对发动机的推力需求,使得发动机可以保持在耗油率更低的节流状态,从而降低燃油消耗、增大航程。

世界上首款飞翼布局飞机是美国B-2隐身轰炸机,与之相似的美军X-47B无人验证机、国内的“攻击-11”无人机、“彩虹-7”无人机等,均采用飞翼式布局,要求发动机内埋于飞机机身内部,尽量降低飞

机前向横截面积,这就一定程度上限制了发动机自身的尺寸不能太大。典型的飞翼布局发动机安装结构如图2所示。

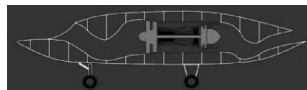


图2 典型的飞翼布局
发动机安装结构

1.5 吨位级别和飞行包线

综合作战能力的提升,要求飞机载荷量大幅提高,飞行包线既要适应左边界低速范围、也要兼顾高亚声速范围,发动机使用包线的变更要求配装动力必须从活塞发动机或者涡轮螺旋桨发动机更替为使用范围更广、推力级别更大的涡扇发动机。

在役/在研的中大型无人机起飞质量和典型巡航高度如图3所示。近年来不断发展的大型无人机起飞质量均超过10 t。飞机的起飞质量是由载荷携带量、机身质量和载油量决定的,当对作战半径和任务载荷量需求提升时,飞机总起飞质量随之提升,如X-47B无人机的作战半径约2000 km、可以携带2 t攻击型导弹,其整机起飞质量已经增大到了20 t^[12]。

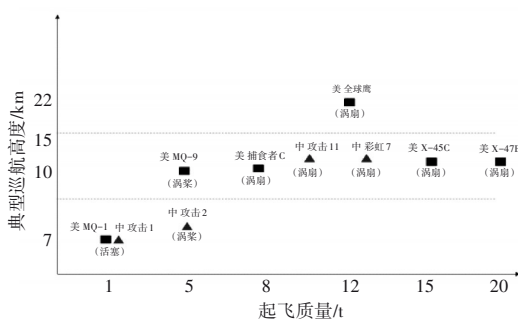


图3 起飞质量和典型巡航高度

此类无人机具备高亚声速飞行能力,发动机典型使用包线如图4所示。由于没有驾驶人员的生理限制,无人机在飞行姿态(倒飞、大过载飞行)、持续滞空时间(长时间连续飞行)等方面优于有人机。当进入高亚声速区域,如 $Ma > 0.9$,飞翼式布局飞机机身上表面气流分离较低亚声速条件下剧烈,阻力大幅增大,其气动性能明显降低^[11],因此实际上这类飞机的最大飞行马赫数不超过0.9。在飞行高度方面,由于此类飞机的功能定位并非用于执行空战、格斗、追击等,在15 km左右已经可以满足所有战技指标要求。

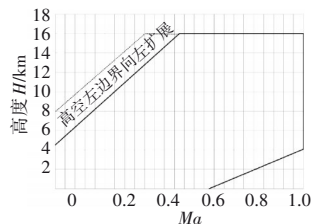


图4 发动机使用包线

特别值得提出的是无人机对于高空左边界持续稳定飞行能力的需要。通过仿真分析^[13],类似X-47B飞机的巡航马赫数比较小,其最佳升阻比是在 $Ma = 0.45 \sim 0.55$ 之间取得,转换到典型巡航高度上, $H = 8 \text{ km}$ 、 $Ma = 0.45 \sim 0.55$,对应飞行表速约为330~380 km/h; $H = 10 \text{ km}$ 、 $Ma = 0.45 \sim 0.55$,对应飞行表速约为300~350 km/h。飞行速度范围靠近发动机稳定工作左边界。

2 发动机的性能需求

2.1 发动机能力需求分析流程

根据上述察打一体无人机的的发展趋势判断,依据配装飞机的任务能力需要,对发动机的能力需求开展分析,其流程如图5所示。

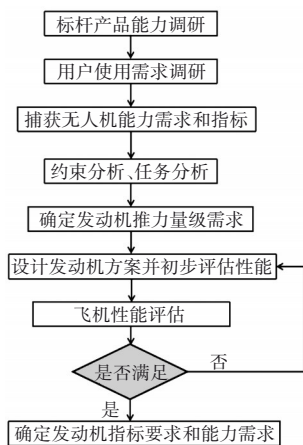


图5 能力需求分析流程

2.2 选取的必要特征参数

根据理论分析方法^[14],参考类似构型的X-47B验证机为例,给出部分主要的飞机构型参数,包括展弦比、浸润面积比、最大升力系数、燃油结构系数、升阻比等^[12]。

其中,机体各部分的质量占比见表1。采用理论计算分析得到的该型飞机的典型升阻性能^[12],在 $Ma = 0.30$ 时,最大升阻比约为11.1;在 $Ma = 0.45$ 时,最大升阻比约为12.15;在 $Ma = 0.45$ 时,最大升阻比约为7.6。

表1 机体各部分的质量占比^[12]

机型	G 机体	G 动力	G 载荷	G 燃油
空中优势战斗机	0.28 ~ 0.32	0.18 ~ 0.22	0.11 ~ 0.13	0.26 ~ 0.3
战斗轰炸机	0.24 ~ 0.28	0.12 ~ 0.16	0.1 ~ 0.12	0.35 ~ 0.4
轰炸机(中型)	0.22 ~ 0.24	0.08 ~ 0.1	0.07 ~ 0.1	0.45 ~ 0.5
X-47B(攻击型)	0.25	0.093	0.09	0.42

2.3 约束分析

约束分析的目的是确定满足飞机设计要求的可行域,从中选出初步设计的飞机翼载(m_{T0}/S)和起飞推重比(F/gm_{T0})。约束条件分析时采用飞机气动性能和推进系统性能的估算模型。确定飞机性能约束边界,需建立翼载、飞机推重比和各飞行任务段性能之间的

函数关系式,以求得对应约束边界,再通过所有约束边界求得可行域。约束分析通用公式为

$$\frac{T_{sl}}{W_{TO}} = \frac{\beta}{\alpha} \left[\frac{D+R}{\beta W_{TO}} + \frac{1}{V} \frac{d}{dt} \left(h + \frac{V^2}{2g_0} \right) \right] \quad (1)$$

选择典型的起飞、巡航和着陆任务段,不同任务段需要对式(1)进行相应的裁剪和赋值,其中起飞距离分别为 1.5 km 和 1.0 km;着陆滑跑距离为 600 m;巡航段 11 km、 $Ma=0.75$ 和 8 km、 $Ma=0.5$,巡航起始质量比为 0.9,初步得出飞机的解空间,如图 6 所示。

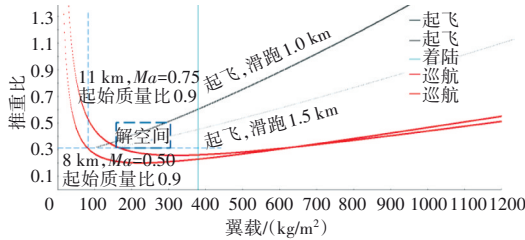


图 6 飞机及发动机解空间

起飞推重比暂取 0.30~0.35;翼载取决于飞机具体的机型设计,参考 X-47B 无人机,取值 240 kg/m^2 。根据起飞推重比可行空间,15 t 级以上无人机起飞质量对应的发动机非安装推力需求如下,更大的推力可以进一步缩短起飞滑跑距离,起飞推重比均取为 0.3~0.4。

(a) 无人机起飞质量为 20 t,则起飞推力为 59~79 kN(安装推力);

(b) 无人机起飞质量为 18 t,则起飞推力为 53~70.6 kN(安装推力);

(c) 无人机起飞质量为 15 t,则起飞推力为 44~59 kN(安装推力)。

2.4 任务分析^[14]

根据此类飞机的气动性能特征,由于其在高亚声速状态下,升阻比有较大幅度减小。因此其巡航飞行会选择偏低速,从其作战用法上看,选择偏低速也有利于延长留空时间和即时任务反应判断时间。下面选择 3 种典型的巡航加作战任务剖面分析,飞机起飞质量设定为 20 t、空质比设定为 0.36、任务载荷设定为 2 t,降落时剩余质量占比约束条件暂时设定为 0.56。

2.4.1 剖面 1 任务

剖面设定为暖机、起飞、爬升到 8 km、 $Ma=0.6$,在 8 km、 $Ma=0.6$ 巡航并盘旋 5 圈,投弹 2 t,在 8 km、 $Ma=0.6$ 巡航后降落。计算得到的巡航状态安装推力和安装耗油率需求如下。

(1) 在 $H=8 \text{ km}$ 、 $Ma=0.6$ 巡航点,对应的安装推力需求为 $\geq 14.6 \text{ kN}$;

(2) 在 $H=8 \text{ km}$ 、 $Ma=0.6$,巡航段发动机安装耗油率需求为 $\leq 0.96 \text{ kg}/(\text{kN}\cdot\text{h})$ 。

2.4.2 剖面 2 任务

剖面设定为暖机、起飞、爬升到 5 km、 $Ma=0.5$,再爬升到 10 km、 $Ma=0.7$,在 10 km、 $Ma=0.75$ 巡航并盘旋 5 圈,投弹 2 t,在 10 km、 $Ma=0.75$ 巡航后降落。计算得到的巡航状态安装推力和安装耗油率需求如下。

(1) 在 $H=10 \text{ km}$ 、 $Ma=0.75$ 巡航点,对应的安装推力需求为 $\geq 15.5 \text{ kN}$;

(2) 在 $H=10 \text{ km}$ 、 $Ma=0.75$,巡航段发动机安装耗油率需求为 $\leq 0.898 \text{ kg}/(\text{kN}\cdot\text{h})$ 。

2.4.3 剖面 3 任务

剖面设定为暖机、起飞、爬升到 5 km、 $Ma=0.5$,在 5 km、 $Ma=0.5$ 巡航 1330 km 并盘旋 5 圈,投弹 2 t,在 5 km、 $Ma=0.5$ 巡航后降落。计算得到的巡航状态安装推力和安装耗油率需求如下。

(1) 在 $H=5 \text{ km}$ 、 $Ma=0.5$ 巡航点,对应的安装推力需求为 $\geq 15.4 \text{ kN}$;

(2) 在 $H=5 \text{ km}$ 、 $Ma=0.5$,巡航段发动机安装耗油率需求为 $\leq 0.858 \text{ kg}/(\text{kN}\cdot\text{h})$ 。

3 对发动机的能力需求

3.1 基本能力需求

无人机与有人机最大的区别是没有了驾驶人员在操控链路中的主观感知和操控。有人驾驶飞机的飞行员根据操作手册规定的操作方法,在出现各种突发情况的处置策略建议基础上,根据飞行操控经验、座舱体验(振动、过载、声音提示等)和直观判断(嗅觉、视觉、听觉等)进行综合决策后,进行相应的处置操作。无人机在远距离执行任务时,所有处置均需要依靠飞控计算机(发动机控制器提供的相关参数和信息)的自主决策,与人操控的区别是当满足处置逻辑进入条件时会马上执行相关逻辑。

不同的使用场景需要发动机具备相应的拓展能力,满足飞机使用需求,发动机需要具备的能力与无人机使用场景间映射关系见表 2。

3.2 其他能力需求

高隐身能力是此类大型察打一体无人机有效提升自身生存力的最大保证,加之配装大推力级涡扇发

表2 无人机使用场景和发动机能力映射关系

使用场景	发动机能力
使用场景1.根据飞机实时重量、飞行任务需求,向飞控计算机提供实时推力,飞发实现最佳交联控制	能力1.装机状态推力估计
使用场景2.无人机自动完成出动准备、按规划路径滑行、起飞空中任务执行和降落	能力2.发动机自动完成起飞前相关操作 能力3.发动机油门操控权限
使用场景3.无人机空中任务执行,需要发动机提供推力优先或者油耗优先模式	能力4.发动机能够识别飞机使用场景,在不同场景下设置不同目标控制模式
使用场景4.无人机空战模式下,需要发动机具备短时间内大幅提升性能,提升飞机机动能力	能力5.发动机具备增能使用模式
使用场景5.空中飞行时,当发动机出现测量故障、执行机构故障时,发动机可利用其他测量参数完成正常控制,确保飞行任务执行	能力6.发动机参数重构
使用场景6.由于进发匹配、环境影响等产生或者即将产生喘振现象时,发动机可预判和提前处置使得自身恢复正常工作	能力7.发动机对失速和喘振的预判和对应的有效处置逻辑
使用场景7.无人机在起飞或者降落过程遭遇鸟撞或者吸入异物时,发动机能够根据参数变化给出告警和处置逻辑	能力8.吞鸟告警
使用场景8.无人机需要大幅度降低地面维护工作量,提高作战出动效率	能力9.发动机健康管理和精准维护定位 能力10.发动机周期性检查优化和检查项目缩减
使用场景9.为防止对表面涂层的破坏,无人机不允许开展接触式检查	能力11.发动机非接触式检查和探伤

动机,既能够支撑飞机有足够的任务载荷能力,又能够支撑飞机有一定的突防能力(可进行高亚声速飞行),基于飞机对发动机能力的牵引,从飞机的特征出发,发动机在原改进基础上,还需考虑在抗进气畸变、S弯排气系统、低滑油消耗、热管理等4个方面开展进一步研究工作。

3.2.1 抗进气畸变

此类飞机的安装构型要求发动机内埋在机身内^[16],由于要达到低雷达反射特征,进气系统需采用S弯进气道,可以利用弯道的特性对发动机前部的风扇转子以及后部的高温部件进行有效遮挡,显著降低雷达反射信号辐射特征。

S弯进气道这种构型会在飞机机动、起降时给发动机带来比常规进气道更大的畸变^[17],要求发动机的风扇和压气机有更大的喘振裕度和更强的抗畸变能力。

3.2.2 排气系统

喷管采用S弯构型且出口与飞机机身高度一体化是实现后向高红外隐身的关键设计特征,矩形喷口的应用在相当大的空间范围内减少了喷管内部高温壁面在给定方向的投影面积,从而减小发动机红外辐射特征。既要满足遮挡要求,又要与后机身完美融

合,需要发动机与飞机开展紧密的联合设计,从而达到设计目标。

3.2.3 低滑油消耗

大型察打一体无人机能够长时间连续的在空中执行任务,X-47B无人机随着执行任务地点距离起飞地的距离不同,而有不同的持续作战时间,当不进行空中加油时,最大的持续作战时间约为25.1 h^[18]。这一使用方式给发动机润滑系统带来巨大挑战,在现有的润滑系统不发生变化的情况下,需要对降低滑油消耗技术进行研究,而未来可能需要进一步大幅度提升滑油系统效率,或者发动机的轴承材料发生革新性改变,甚至采用无需润滑的转子系统。

3.2.4 热管理

相比有人机,大型察打一体无人机可选择性搭载更多的传感器和各种先进探测、视频监控设备等,未来可能使用先进的激光武器,这些负载将全部由电力来驱动,而电力能量的最终来源均是发动机,需要从发动机上提取大量的功率,提取量级可能达到兆瓦级。由于电能的利用率问题,转换过程中会产生大量的热量,这些热量对飞机和发动机各系统有非常大的负面影响,因此,高效热管理技术是一项需要重点开展研究的关键技术。

4 发动机的研制模式

4.1 基于成熟型号改进是稳妥和低成本的技术途径

全球鹰无人侦察机装配的 AE3007H 发动机源自公务机动力改装,“捕食者”C 复仇者察打一体机装配的 PW545B 发动机源自赛斯纳 560XL 公务机 PW545A 发动机改装,X-47B 无人作战飞机装配的 F100-PW-220U 发动机源自为 F-15 和 F-16 飞机的 F100-PW-220 发动机。中大型无人机所装配发动机均为现有成熟动力产品或者在现有发动机基础上适应性改进,其原因为:(1)美国航空发动机领域有丰富的发动机货架产品;(2)成熟产品在生产制造、维修性、维护性、综合保障都较为成熟,能够用最快的周期提供无人机动力装置;(3)在成熟发动机上通过适应性改进可以降低研制风险;(4)成熟产品的在役使用量很大,有些到寿发动机经过维修和更换件,还能够给出客观的使用寿命,符合无人机低采购成本的使用理念。

4.2 “1+N”研制模式

中国各军兵种对各类无人机及相关发动机的总需求量呈逐步递增的趋势^[19-20],技术先进性和综合费效比是当前世界各国普遍考虑的问题,即用最经济的投入获得最大的战技指标能力提升,由于无人机的战损比例要高于有人机,成本问题是采购时必须重点考虑的因素。

中国第 3 代军用大推力级涡扇发动机已经逐步成熟,陆续会有较多的到寿发动机,去加力后推力量级满足此类无人机使用需求,但其冷端部件和成附件远未达到使用寿命,而热端部件经过修理和部分更换后,结合科学的余寿确定方法,还能够继续给出比较可观的使用寿命。

从技术角度看,满足大型察打一体无人机当前使用和未来能力升级,相关关键技术目前都有一定的技术储备,基于可用资源,提出“1+N”发展模式,如图 7



图 7 “1+N”发展模式

所示。即基于 1 个主机,根据无人机使用需求,从较为成熟的技术包中选配技术模块,快速搭建出不同能力特征的发动机,降低研发成本、采购成本和损耗成本。

5 结束语

(1)随着智能化程度逐步提升,无人机将向任务多样化、大型化、隐身化方向发展,随着使用包线的扩展,装配动力装置将替换为兼顾推力和耗油率的涡扇发动机;

(2)发展 15~20 t 大型无人机,其装配涡扇发动机安装推力为 39~79 kN,基于军民用成熟发动机型号改制发展大型无人机动力装置是世界各国普遍采用的低成本研制途径;

(3)中国第 3 代军用涡扇发动机已经具备较高成熟度,去加力后性能可满足大型察打一体无人机使用需求;

(4)先进无人机发动机更加关注智能控制、飞发交联、健康管理、在线监测、模式识别、控制逻辑扩展优化及视情维护等能力领域;

(5)先进察打一体无人机对发动机提出的高隐身、抗过载、长航时等特殊能力需求,目前均已具备相当的技术基础,可在短时间内移植到型号应用;

(6)以现有成熟航空发动机型号产品为基础,根据不同无人机对发动机的具体需求,按照成熟度优先、适当选配新技术的模式,模块化发展无人机动力装置,是兼顾技战术指标达成和经济可承受性的优选模式。

参考文献:

[1] 李屹东,李悦霖.察打一体无人机的特点与发展[J].国际航空,2014(9):24-27.
LI Yidong, LI Yuelin. Evolution of hunter-killer drone[J]. International Aviation, 2014(9): 24-27. (in Chinese)

[2] 申超,李磊,吴洋,等.美国空中有人/无人自主协同作战能力发展研究[J].战术导弹技术,2018(1):16-21.
SHEN Chao, LI Lei, WU Yang, et al. Research on the capability of the U. S. manned/unmanned autonomous collaborative operations[J]. Tactical Missile Technology, 2018(1): 16-21. (in Chinese)

[3] 沈亮,欧阳平.捕食者系列无人机特点及发展经验[J].飞航导弹,2012(12):33-36.
SHEN Liang, OUYANG Ping. Development status and trend of predator series UAVs[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2012(12): 33-36. (in Chinese)

[4] 任东,刘诗尧,李瑞军,等.无人作战飞机动力发展现状和趋势浅析

- [C]// 中国无人机大会.北京:中国航空工业发展研究中心,2014: 90-94.
- REN Dong, LIU Shiyao, LI Ruijun, et al. Analysis on the development status and trend of unmanned combat air vehicle (UCAV) engine [C]// China Drone Conference.Beijing: China Aviation Industry Development Research Center, 2014: 90-94. (in Chinese)
- [5] Donald L S, Jeffrey B A. An integrated approach for aircraft engine performance estimation and fault diagnostics[R]. NASA-TM-2012-217725.
- [6] Jeffrey B A, Donald L S. Constructing an efficient self-tuning aircraft engine model for control and health management applications[R]. NASA-TM-2012-217806.
- [7] Aziz K, Ece Y, Onder T. Thrust modelling of a target drone engine with nonlinear least-squares estimation based on series expansions[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2023(1): 38-52.
- [8] 李磊, 王彤, 蒋琪. 从美军2042年无人系统路线图看无人系统关键技术发展动向[J]. 无人系统技术, 2018(4): 79-84.
- LI Lei, WANG Tong, JIANG Qi. Key technology develop trends of unmanned systems viewed from unmanned systems integrated roadmap 2042[J]. Unmanned Systems Technology, 2018 (4) : 79-84. (in Chinese)
- [9] 程龙, 王治, 马坤. 美军察打一体无人机多机协同作战样式研究[J]. 国际航空, 2020(10): 17-20.
- CHENG Long, WANG Zhi, MA Kun. Cooperative engagemengt of U.S. Armed ISR UAV[J]. International Aviation, 2020 (10) : 17-20. (in Chinese)
- [10] 樊锐, 张鑫龙, 马磊, 等. 有人/无人机协同作战研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020(3): 230-236.
- FAN Rui, ZHANG Xinlong, MA Lei, et al. Research on manned/unmanned aerial vehicle teaming[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020 (3) : 230-236. (in Chinese)
- [11] 孙占久, 刘龙, 李华, 等. 飞翼布局无人机气动/隐身综合性能分析[J]. 飞行力学, 2018(3): 15-18.
- SUN Zhanjiu, LIU Long, LI Hua, et al. Analysis on aerodynamic/stealth synthetical performance of flying wing UAV[J]. Flight Dynamics, 2018(3): 15-18. (in Chinese)
- [12] 李志, 孙智孝. X-47B战术技术指标分析研究[J]. 航空科学技术, 2016, 27(4): 60-63.
- LI Zhi, SUN Zhixiao. Analysis and research on tactic and technique characteristics of X-47B[J]. Aeronautical Science and Technology, 2016, 27(4): 60-63. (in Chinese)
- [13] 陈刚, 昂海松. 从X-47A到X-47B分析无人作战飞机的设计思想[C]//中国无人机大会.北京:中国无人机大会, 2012: 263-268.
- CHEN Gang, ANG Haisong. Analysis of design idea of Unmanned combat air vehicle from X-47A to X-47B[C]//China Drone Conference.Beijing: China Drone Conference, 2012: 263-268. (in Chinese)
- [14] Mattingly J D, Heiser W H, Daley D H. 航空发动机设计[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 17-94.
- Mattingly J D, Heiser W H, Daley D H. Aircraft engine design[M]. Beijing: Science Press, 1992: 17-94. (in Chinese)
- [15] 陈刚. 两种无人作战飞机的三维外形重建与气动隐身特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- CHEN Gang. Three-dimensional lofting reconstruction of two UCAVs and research on their aerodynamic characteristics and stealth characteristic[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [16] 马怡, 潘志雄, 罗烈. X-47B飞翼气动布局设计分析[J]. 航空科学技术, 2014, 25(12): 1-4.
- MA Yi, PAN Zhixiong, LUO Lie. X-47B flying wing aerodynamic configuration analysis[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(12): 1-4. (in Chinese)
- [17] 安佳宁. 亚声速无人机背部S弯进气道设计与试验[J]. 航空发动机, 2020, 46(2): 51-55.
- AN Jianing. Design and test of S-shaped inlet at back of subsonic unmanned aerial vehicle[J]. Aeroengine, 2020, 46 (2) : 51-55. (in Chinese)
- [18] 金朝, 胡宝洁, 薛飞, 等. 空海一体战之矛X-47B作战能力评估[J]. 飞航导弹, 2014(3): 47-51.
- JIN Zhao, HU Baojie, XUE Fei, et al. The spear of airsea battle X-47B operational capability assessment[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(3): 47-51. (in Chinese)
- [19] 刘怡彪. 军用无人机市场发展前景研究[J]. 科技经济导刊, 2020, 28(17): 41.
- LIU Yibiao. Research on the development prospect of military UAV market[J]. Technology and Economic Guide, 2020, 28 (17) : 41. (in Chinese)
- [20] 何晓骁. 高隐身察打一体无人机前景分析[C]// 第八届中国航空学会青年科技论坛. 广州: 中国航空学会, 2018: 27-31.
- HE Xiaoxiao. Prospect of high stealth reconnaissance and attack integrated UAV[C]// The 8th Youth Science and Technology Forum of Aviation Society of China. Guangzhou: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2018: 27-31. (in Chinese)

(编辑: 程海)