

变体飞机技术应用前景与装备谱系研究



韩传东,梅守保

航空工业沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035

摘要:现代战斗机设计追求多任务兼顾、高速与低速飞行性能兼顾、机动性和隐身性兼顾,这些能力需求在设计中往往互相矛盾,变体飞机技术是解决飞机设计中这些矛盾的有效途径。本文从变体飞机技术出发,梳理了军用变体飞机的发展历程,分析了国外典型变体飞机的研制背景、作战任务和变体飞机技术应用情况,创新地提出了变体飞机技术在未来飞机中可变尾翼、可变布置和可变模块化组合的新型应用方式,总结了变体飞机的主战类和支援类装备应用谱系,肯定了变体飞机技术在未来飞机设计中的实用价值,提出了变体飞机技术的应用方向,为变体飞机技术未来的应用提供了参考。

关键词:变体飞机;装备谱系;变后掠翼;模块化;战斗机;轰炸机

中图分类号:V271

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.03.002

随着飞机设计技术的全面进步,对飞机指标的要求也越来越高,人们往往希望一型飞机可以执行所有任务,既有高速飞行能力又有很好的低速性能,既有很强的机动性又有极好的隐身能力,这样可以大大节省飞机的采购成本。但这些能力需求在设计上往往是相互矛盾的,固定的飞机外形所能提供的能力是有限的,所以设计师们只能有所取舍。变体飞机技术是一项经过了大量飞机验证的可以有效平衡飞机设计矛盾的技术,具有广泛的应用前景。最早的变体飞机技术是可变后掠翼技术,该技术的出现是为了兼顾飞机的低速性能和高速性能,20世纪60—70年代,正值美苏争霸时期,攻击性战斗机层出不穷,但当时发动机技术还没有突破性的进步,大载弹量和远航程的战斗机起降距离必然增加,难以保障,不利于快速出动和返回,秉承“动力不足气动补”的思想,“变后掠翼”的设计思想受到各国青睐,并被运用到当时的飞机设计中,成为风靡一时的设计潮流^[1]。

从F-111到F-14,从米格-23到苏-17、苏-24,以及目前仍在服役的轰炸机B-1B、图-22M和图-160,美国和苏联将变体飞机技术应用到军用飞机中,有效地提升了飞机的综合作战能力,这些飞机也成了变体飞机的代表。即使在

21世纪,美国国防预先研究计划局(DARPA)依然在进行变体飞机研究,其开展了变形机翼验证项目,研究目标是设计出一种将监视平台具有的长航时巡航能力与攻击飞机的高速机动能力集于一体的无人机。MFX-2在加州罗伯茨军用试验场进行了多次自主飞行中变形飞行,在5次约10min的飞行中,该无人机在保持姿态与航向以及转弯过程中实现了机翼变形。从一种构型变形为另一种构型约需10s。但美军的变体飞机基本都已退役,现役的飞机型号中很少有变体飞机。

我国在变体飞机技术领域有一定的研究,主要集中在变体结构的设计和新材料的研究上。黄虎等^[2]针对飞机重载大变形伸缩变体机构进行了动力学仿真研究,其建立的方法为各组件的传动传动性能优化和结构强度设计分析提供了一种可靠高效的仿真手段,对于变体飞机伸缩运动部件的结构/机构一体化设计有重要的应用价值。王泓杰等^[3]对典型智能材料结构疲劳可靠性问题的研究进展进行了阐述,对这些问题的后续研究做出了展望。高飞^[4]开展了新型零泊松比蜂窝结构设计、碳纤维复合材料零泊松比蜂窝结构制备和力学性能分析,以及基于新型蜂窝结构在变体机翼中的应用等研究工作。李航航等^[5]对战斗机新结构应用与新材料需

收稿日期: 2022-11-03; 退修日期: 2022-11-23; 录用日期: 2022-12-12

引用格式: Han Chuandong, Mei Shoubao. Research on application prospect and equipment ancestry of morphing aircraft technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(03): 10-15. 韩传东, 梅守保. 变体飞机技术应用前景与装备谱系研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(03): 10-15.

求进行了分析,探索了未来新一代战斗机可能采用的结构形式、技术特征,提出未来先进结构材料发展初步需求。

1 国外典型变体飞机技术应用

本节主要列举典型军用变体飞机的应用实例,分析其应用的变体飞机技术。变体飞机技术在军用飞机中主要应用于战斗机和轰炸机,战斗机包括美国的F-111和F-14,苏联的米格-23、苏-17和苏-24,以及欧洲的“狂风”,轰炸机则主要是美国的B-1B,苏联的图-22M和图-160。

1.1 战斗机

F-111战斗机是美国也是世界上最早的实用型变后掠翼飞机^[6],为了同时兼顾美国空军和海军的需求,应用了当时已经较为成熟的变后掠翼技术,机翼后掠角变化范围为 $16^{\circ}\sim 72.5^{\circ}$,起飞时 16° ,着陆及亚声速巡航时 26° ,高低空超声速飞行时可选用 72.5° 以下的适当角度。美国的另一款变体飞机F-14同样应用了变后掠翼技术,F-14的机翼后掠角变化范围为 $20^{\circ}\sim 68^{\circ}$,由机载设备根据飞行状态自动调节,最大变化速度为 $7(^{\circ})/\text{s}$,也可由飞行员手动调节。停放时后掠角最大达 75° ,可大大减小甲板占用面积。

米格-23战斗机是苏联米高扬-格列维奇设计局的首款变后掠翼战斗机。由于技术不够成熟,机翼的后掠角只能在 16° 、 45° 、 72° 三个角度切换。

苏-17是苏联苏霍伊设计局的首款变后掠翼战斗机,后掠角可在 30° 、 45° 、 63° 三个位置上手动调节,机翼全部展开耗时19s,全部收起耗时16s。其后的苏-24战斗机使用了变后掠翼,后掠角可在 16° 、 35° 、 45° 、 68° 这4个角度间调节。

“狂风”战斗机是英国、德国和意大利联合研制的,该战斗机来源于20世纪60年代中期北大西洋公约组织(简称北约)提出的“多用途作战飞机”计划。其作战任务要求“狂风”战斗机具备良好的加速性和机动性、低空快速突防能力和强大攻击力、较大的作战半径和较长的留空时间,能在昼夜和复杂天气条件下作战,具有短距起降能力。这些作战需求对于总体设计来说大多是矛盾的,低速、远航程、短距起降要求有小的机翼后掠角,而高速性能则要求战斗机有大的机翼后掠角,飞机设计师们巧妙地运用了变后掠翼技术解决了这个矛盾。这使得“狂风”战斗机在对空拦截和对地打击任务中均有很好的表现,至今仍有一些“狂风”战斗机服役。

1.2 轰炸机

B-1B是美国北美航空(后被波音收购)研制的超声速

战略轰炸机。为了兼顾高速性能和低速起降性能,该机使用了可变后掠翼设计,可变后掠翼的变化范围为 $15^{\circ}\sim 67.5^{\circ}$,缩短了起降距离,这使其对机场的要求大大降低,同时提高了作战半径。

图-22M是苏联图波列夫设计局研制的一型超声速远程战略轰炸机,应用了变后掠翼技术,其机翼后掠角提供了4个角度可选择, 20° 用于起降, 30° 用于开始爬升和长时间亚声速巡航, 50° 用于低空跨声速飞行突防, 60° 用于超声速巡航。目前该机型仍是俄罗斯的主力轰炸机之一。

图-160是苏联图波列夫设计局研制的一型超声速远程战略轰炸机,由于应用了变后掠翼技术,既可低空亚声速突袭,也可高空超声速发射远程巡航导弹。机翼后掠角变化范围为 $20^{\circ}\sim 65^{\circ}$,最大后掠时,其后缘根部可向上翻折 90° 作为垂直安定面使用。

2 变体飞机技术在作战装备中的应用潜力

本节立足于国外典型变体飞机所应用的变体飞机技术,结合现代飞机设计技术发展,并从任务需求角度出发,梳理了变体飞机技术在作战装备中的应用潜力,主要包括变后掠翼、变垂尾、变机内布置和变模块化组合4种方式。

2.1 可变后掠翼兼顾高速和低速

飞机的机翼后掠角很大程度上决定了飞行速度的上下限。增加机翼的后掠角可以提高临界马赫数,延缓激波的产生,减小激波阻力^[7-8]。大后掠角的飞机速度一般较快,现代的超声速战斗机为了达到较快的飞行速度,大多数都采用大后掠角设计,重型战斗机的最大飞行速度一般在马赫数 $Ma\ 2\sim 3$ 。

反之,较小的机翼后掠角更有利于低速飞行,但会由于增大了展弦比而增加飞机的航程,经济性好,并可以减小起降距离,对机场跑道要求降低。民用飞机、运输机、轰炸机、预警机等为了适应亚声速飞行,一般都是小后掠角设计^[9]。

可变后掠翼一般利用机翼的外翼绕翼根转动来实现,设计几种典型的外翼转动角度,适应不同的飞行速度:高速飞行时阻力小、加速快;低速飞行时航程大、起降距离小^[10]。高低速的性能兼而有之的代价就是结构复杂、重量(质量)和造价可能增加、可靠性可能下降。图1所示为一种变后掠翼飞机方案。

2.2 可变尾翼兼顾机动和隐身

飞机的垂尾是横航向平衡、稳定和操纵的重要机构,同时也是飞机上的重要散射源之一。研究表明,减小垂尾的倾角可以有效地减小飞机的雷达截面积(RCS)^[11],但这又

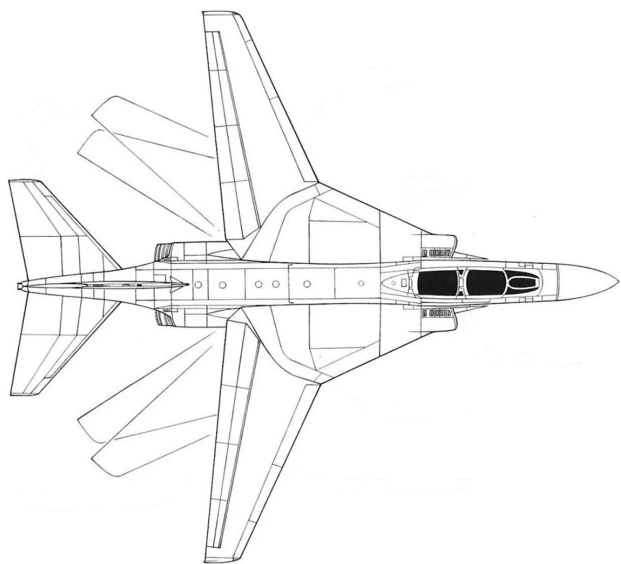


图1 一种变后掠翼飞机方案

Fig.1 A scheme of variable-sweep-wing aircraft

会显著降低垂尾效能而降低飞机的机动性。

可变倾角的垂尾可以通过绕尾翼弦转动实现,垂尾放平以达到较好的隐身性能,垂尾竖起以达到较好的机动性能,兼顾机动和隐身。与变后掠翼一样,增加转轴意味着结构复杂、重量和造价增加、可靠性下降。

2.3 可变机内布置增强任务适应性

变体飞机不仅仅外部形态可变,内部的布置也可以变化,传统的飞机内部布置一般是固定用途的,载荷舱和油箱的位置不可更改。但是在实际使用中,有的时候任务需求与机内布置并未达到最佳匹配,例如,有的时候运输机需要将很多货物快速运送到较近的地方,这并不需要满载燃油,而需要多载货物,此时最好能够将多余的油箱位置给货舱,反之亦然。这样,通过机体内部布置的变化,达到适应任务需求的最佳效果。

2.4 可变模块化组合增加任务多样性

随着设计水平的提升和设计标准化的发展,模块化设计技术和思想已经逐步深入飞机的设计中,不同系统间的接口都有规范可循,单个系统的更改一般不会对其他系统或整个飞机造成巨大影响^[12]。

更进一步将飞机的各个主要部件模块化组合,形成具有不同能力、可执行不同任务的飞机。可将机头、中后机身、机翼、任务载荷等设计成具有规范接口的标准化模块系列,为了执行不同任务而使用相应的模块组合成一架飞机。例如,机头可以设计成带座舱的有人机机头、带智能计算机的智能无人机机头、带具有强大探测能力的传感器机头等;

中后机身可以设计成具有信息处理和指挥席位的预警机机身、具有巨大装载空间的运输机机身、具有一定燃油和武器的轰炸机机身等。这样,可以大大增加飞机的任务多样性和适应性,但是由于模块连接而产生结构增重、多种类型的模块连接的气动耦合与干扰问题、操纵性和稳定性问题、电磁兼容问题等。与普通的产品设计不同,飞机设计是多学科的综合设计,需要解决的问题很多,飞机模块化组合的难度相当大。图2所示为一种模块化飞机方案。



图2 一种模块化飞机方案

Fig.2 A scheme of modular aircraft

3 变体作战飞机谱系

本节主要分析了主战类飞机和支援类飞机的短板,立足于变体飞机技术在作战装备中的应用潜力,分析了这些应用潜力解决装备短板的可能性。

3.1 主战类飞机

3.1.1 战斗机

战斗机一般具有优秀的机动性能和较高的速度,但作战并不止于此,到达能力是战斗机的核心能力之一,作战半径越大,战斗机的作用就越大,对敌人的威慑就越大。基于变体飞机技术,可以发展远航程的变体战斗机,在传统战斗机的能力基础上,兼具远航程和高机动能力,可以执行多种作战任务,可控制的区域更大,可对遥远的重要军事目标进行打击。

变体战斗机的历史悠久,美国、苏联/俄罗斯、英国等国家均有成熟的型号,但都是围绕着变后掠翼开展的且均已退役,其实在变体战斗机中可挖掘的能力还有很多:变尾翼以达到兼顾机动性和相对极致的隐身性能、变机内布置以达到兼顾多种装载需求、变模块化组合以达到兼顾多种任务功能需求等。总之,变体飞机技术是解决未来战斗机设计中能力冲突问题的有效手段之一。

3.1.2 轰炸机

轰炸机往往由于载弹量和作战半径的苛刻要求而不具备或在一定程度上缺乏高机动能力,未来的复杂强对抗的作战环境对轰炸机的生存力要求越来越高。基于变体飞机技术,可以发展具有高生存力的变体轰炸机,在传统轰炸机的能力的基础上兼具高机动性,在自身受到威胁时提升自身生存力,降低对护航任务的需求,在战场中执行任务更加灵活。

变体轰炸机同样是强国研发的变体飞机,美国和苏联均有成熟的型号,在这方面的技术较为成熟,军事强国也乐于将资金投入这种强大的战略装备中,部分型号甚至仍在服役。既可高空高速飞行、远程突袭,又可低空突防的轰炸机,对于一般的防空系统来说是非常难以拦截的。

3.2 支援类飞机

3.2.1 预警机

目前的预警机大多是由螺旋桨飞机或民用飞机改装而成,无法做大过载机动,飞行速度较慢,且隐身性能较差,生存力较低,必须依靠战斗机护航。而预警机的任务区域却往往是相当危险的,由于要为战斗机提供战场态势支持,所以有时需要在战场前沿附近执行预警任务,很容易受到隐身飞机和远距空空导弹的攻击,目前的空空导弹很难拦截,预警机仅能依靠自身携带的诱饵弹等防御手段进行有限的自卫。变体飞机技术使得预警机可以兼顾高速高机动与长航时能力,在保证长航时预警的前提下,可利用高机动性规避敌机的攻击,具有较高的生存力。

3.2.2 运输机

运输机是战场中的高价值目标,是战场中保障物资供给、转场运输的重要装备,是敌人的首要打击目标之一,运输机一般机身和翼展较大,机动性差,对护航的依赖性大。利用变体飞机技术赋予运输机高生存力,使其在战场中可以安全执行任务,顺利保障战斗机快速机动转场与物资持续供给,成为稳定的后勤支柱。

3.2.3 加油机

加油机是战场中的高价值目标,是延长战斗机作战半径的主要装备,也是敌人的首要打击目标之一,加油机一般由民用飞机或运输机改型,机动性差,对护航的依赖性很大。利用变体飞机技术赋予加油机以高生存力使其在战场中可以安全执行加油任务,有力保障战斗机实施远距打击任务,使加油机成为稳定的战场支柱。

3.2.4 侦察机

侦察机是获取战场情报、监视敌方动态、战场目标指示

的重要装备,某些电子战飞机也兼具侦察能力,侦察机的能力强调长航时远航程、高生存力、传感器性能和高通信能力等。现有的侦察机主要有三类:一是长航时无人侦察机,该类侦察机的自卫能力和机动性差,生存力较差,信息处理能力有限;二是由战斗机改型的具有高生存力的侦察机,该类侦察机的航程航时相对较小,信息处理能力有限;三是由民用飞机改型的大型侦察/指挥机,该类侦察机的自卫能力较差,护航依赖性强。利用变体飞机技术研发兼具长航时、高机动、具有强大信息处理能力的侦察机是解决多种侦察机能力矛盾的有效途径。

3.2.5 电子战飞机

电子战飞机是战场中重要的信息节点,是干扰敌方雷达、通信等设施,实施电磁作战的重要装备。现有的电子战飞机有两类:一是由运输机改型的实施远距支援干扰的大型干扰机;二是由战斗机改型的可实施远距和随队支援干扰的电子战飞机。大型干扰机的护送距离有限,面对强敌时无法将战斗机安全护送至有效攻击范围内;高机动电子战飞机虽然可执行随队支援干扰任务,将战斗机护送到距离目标更近,但由于吊舱的重量和阻力,作战半径较同型战斗机缩减较多。利用变体飞机技术研发一型兼顾长航时/远航程与高机动的电子战飞机是解决这一矛盾的有效途径。

4 结束语

虽然变体飞机技术在冷战时期被广泛应用,但是未来依然有其应用前景^[13]。历史表明,变体中的变后掠翼技术是在发动机技术不足的情况下弥补飞机性能的有效手段之一,同时,变后掠翼也是战略轰炸机补短板、提升性能的上佳手段。近年来鲜有变体飞机问世,究其原因主要是材料的轻量化制造遇到“瓶颈”、变体飞机的军事保障成本较高、变体飞机设计技术没有突破性进展。随着设计技术和材料制造技术的发展,除变后掠翼技术外,新的变体飞机技术将应运而生^[14],满足不断变化的国际环境和作战需求,增强其任务灵活性,成为新一代飞机的优选方案之一。

AST

参考文献

- [1] 艾俊强,李士途. 变体飞机典型形式的历史发展及其应用机型浅析[J]. 航空工程进展, 2010, 1(3):205-209.
Ai Junqiang, Li Shitu. Brief history and prospect of typical morphing aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and

- Engineering, 2010, 1(3):205-209. (in Chinese)
- [2] 黄虎, 吴兴文, 张帆, 等. 飞机重载大变形伸缩变体机构动力学仿真研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(9):61-68.
- Huang Hu, Wu Xingwen, Zhang Fan, et al. Dynamic simulation of telescopic mechanism for morphing aircraft in the condition of heavy loads and large deformations[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(9): 61-68. (in Chinese)
- [3] 王泓杰, 王晨, 沈星. 典型智能材料结构疲劳可靠性问题研究进展[J]. 航空科学技术, 2022, 33(3):52-64.
- Wang Hongjie, Wang Chen, Shen Xing. Research progress on fatigue reliability in typical smart material structure[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(3): 52-64. (in Chinese)
- [4] 高飞. 面向变体结构的蜂窝结构设计与制造研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- Gao Fei. Research on design and manufacturing of honeycomb structure of morphing structures[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [5] 李航航, 阎勇, 尹航. 战斗机新结构应用与新材料需求分析[J]. 航空科学技术, 2020, 31(4):8-13.
- Li Hanghang, Yan Yong, Yin Hang. New structure application and new material requirement analysis for fighter aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(4): 8-13. (in Chinese)
- [6] 《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, 2011.
- 《World Aircraft Handbook》Compilation Group. World aircraft handbook[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [7] Raymer D P. Aircraft design: A conceptual approach[M]. 6th Edition. Reston: AIAA, 2012.
- [8] 刘虎, 罗明强, 孙康文, 等. 飞机总体设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2019.
- Liu Hu, Luo Mingqiang, Sun Kangwen, et al. Aircraft conceptual design[M]. Beijing: Beihang University Press, 2019. (in Chinese)
- [9] 桑为民, 陈年旭. 变体飞机的研究进展及其关键技术[J]. 飞行力学, 2009, 27(6):5-9.
- Sang Weimin, Chen Nianxu. Development and technologies of the morphing aircraft[J]. Flight Dynamics, 2009, 27(6):5-9. (in Chinese)
- [10] 乐挺, 王立新, 艾俊强. 变体飞机设计的主要关键技术[J]. 飞行力学, 2009, 27(5):6-10.
- Yue Ting, Wang Lixin, Ai Junqiang. Key technologies in morphing aircraft design[J]. Flight Dynamics, 2009, 27(5): 6-10. (in Chinese)
- [11] 黄浩然, 王宏伟, 常旭. 垂尾电磁散射特性分析与 RCS 缩减方法研究[J]. 科技视界, 2015(15): 149-150.
- Huang Haoran, Wang Hongwei, Chang Xu. Analysis of electromagnetic scattering characteristics of vertical tail and research on RCS reduction method[J]. Science & Technology Vision, 2015(15): 149-150. (in Chinese)
- [12] 钟师胜, 李江, 刘金, 等. 面向模块化设计的产品模块系统结构建模[J]. 中国制造业信息化, 2004, 33(5):91-94.
- Zhong Shisheng, Li Jiang, Liu Jin, et al. Structural modeling of the product design system oriented to the modularization[J]. Chinese Manufacturing Informatization, 2004, 33(5):91-94. (in Chinese)
- [13] 白鹏, 陈钱, 徐国武, 等. 智能可变形飞行器关键技术发展现状及展望[J]. 空气动力学学报, 2019, 37(3):426-443.
- Bai Peng, Chen Qian, Xu Guowu, et al. Development status of key technologies and expectation about smart morphing aircraft [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37(3): 426-443. (in Chinese)
- [14] 张亦波, 刘牧东, 熊峻江. 变体飞机技术[J]. 航空科学技术, 2013(6):64-68.
- Zhang Yibo, Liu Mudong, Xiong Junjiang. Morphing aircraft technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2013(6): 64-68. (in Chinese)

Research on Application Prospect and Equipment Ancestry of Morphing Aircraft Technology

Han Chuandong, Mei Shoubao

AVIC Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China

Abstract: Modern fighter design pursues multi task, high-speed and low-speed flight performance, maneuverability and stealth. These capability requirements are often contradictory in design. Morphing aircraft technology is an effective way to solve these contradictions in aircraft design. This paper sorts out the development history of morphing aircraft, analyzes background, mission and application of foreign morphing aircraft technology of typical morphing aircraft, proposes new application modes of morphing aircraft technology innovatively such as morphing tail, morphing configuration and morphing modularization. It also summarizes main-battle and supporting equipment ancestry of morphing aircraft with affirmation of application value of morphing aircraft technology in future aircraft design and comes up with application direction of morphing aircraft technology. As a result, it can be viewed as a reference for future application of morphing aircraft technology.

Key Words: morphing aircraft; equipment ancestry; variable sweep wing; modularization; fighter; bomber