

文章编号: 0258-1825(2017)01-0013-08

制空型无人机的关键技术、气动布局及特性

车 竞*, 何开锋, 钱炜祺

(中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要:制空型无人机是未来有人/无人战斗机的重要发展方向。本文分析了制空型无人机的技术特征,指出了它的两条发展途径——即有人战斗机的无人化,以及飞翼布局无人机的升级设计。研究了其技战术要求与关键技术,总结了制空型无人机的两大气动布局,即中小展弦比扁平融合体气动布局和中大展弦比飞翼/无尾布局,在此基础上提出了一种可能的气动布局形式,即小展弦比(鸭式)飞翼布局。最后,对制空型无人机的气动布局设计要求进行了提炼总结,希望能给相关设计人员带来一定的启示。

关键词:制空型无人机;无人战斗机;气动布局;飞翼布局;扁平融合体布局

中图分类号:V279; V221.3

文献标识码:A

doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0013

Key technique and aerodynamic configuration characteristic of UCAV with command of the air

Che Jing*, He Kaifeng, Qian Weiqi

(Computational Aerodynamic Institute of China Aerodynamics Research and Development Center,
Mianyang 621000, China)

Abstract: UCAV with command of the air (UCAV-CA) is considered to be an important development branch for fighter planes or UCAVs in the future. This paper analyses the technical characteristic of UCAV-CA, and points out its two development routes, one is fighter plane unmanned and the other flying wing UCAV updating. And then, the technical and tactical demands and key techniques of UCAV-CA are studied. Furthermore, two important aerodynamic configurations including flat blend wing body with middle/small aspect ratio and flying wing body with middle/big aspect ratio are concluded, and one possible aerodynamic configuration which has (duck style) flying wing body with middle/small aspect ratio is present. Finally, the design demand to UCAV-CA of aerodynamic configuration is summarized, which is expected to bring some suggestions for designers.

Keywords: UCAV-CA; UCAV; aerodynamic configuration; flying wing configuration; flat blend wing body

0 引 言

随着任务的复杂、功能的强大,军用无人机进一步向高空、长航时、隐身化、大机动、低成本等方向发展。国际上已形成三大类无人作战飞机:一类是低成本、高精度制导、一次性对地攻击平台,兼具飞机-导弹综合性能,以以色列的 HARPY 为代表;一类是同

时兼有侦察打击功能的大装载、长航时的综合平台,具有发现即打的能力,以美国的捕食者为代表;还有一类是无人攻击平台,即所谓的无人战斗机(UCAV),其对地攻击型的 RCS 低于四代机一个量级,其空战型具有双倍于有人机的机动过载,具有实时监控、压制性打击、快速拦截等能力,以美国的 X-45、X-47 为代表,欧洲也有“雷神”、“鲐鱼”、“SACCON”、

收稿日期:2015-01-28; 修订日期:2015-03-11

作者简介:车竞(1977-),男,四川成都人,博士,副研究员,研究方向:飞行器设计. E-mail: chejingmail@163.com

引用格式:车竞,何开锋,钱炜祺. 制空型无人机的关键技术、气动布局及特性[J]. 空气动力学学报, 2017, 35(1): 13-19.

doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0013 Che J, He K F, Qian W Q. Key technique and aerodynamic configuration characteristic of UCAV with command of the air[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2017, 35(1): 13-19.

“神经元”等型号。前两类已装备部队,后一类处于在研、演示验证阶段^[1-2]。图1~图4给出了欧美部分无人战斗机型号。



图1 波音“鬼怪蝠”无人战斗机
Fig. 1 “Phantom Ray” UCAV of Boeing



图2 俄罗斯“蝠鱼”无人战斗机
Fig. 2 “Ray” UCAV of Russia

UCAV在军事应用中有很多优势,由于飞机上不搭载人员,执行任务中将不存在人员的生命安全问题。没有人员搭载的环境限制,飞机的尺寸和外形可与常规不同,飞机容易做出灵巧的机动动作等等。如果需要,过载可突破飞行员通常能承受的 $+9g$ 和 $-6g$ 的限制,而且相比较有人驾驶的军用飞机,其隐身性能的提高更容易实现,作战环境和作战任务也将更加宽广^[3]。

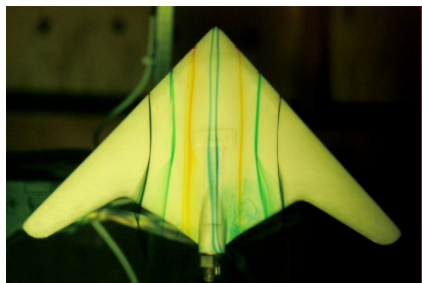


图3 “SACCON”无人战斗机
Fig. 3 “SACCON” UCAV

制空型无人机是指能够取得制空权的空中优势无人战斗机。所谓制空权,是指交战一方在一定时间对一定空间的控制权。制空型无人机不仅要承担对地攻击、侦查、拦截等任务,还应在空战格斗中取得一定的优势。相比对地攻击型,更强调机动性,敏捷性和人工智能化。制空型无人机是未来高空高速无人

战斗机的发展重点,也是下一代有人战斗机的发展方向,集有人/无人战斗机优势与发展趋势于一身,是未来航空航天领域的战略制高点之一。



图4 X-45验证机
Fig. 4 “X-45” UCAV

1 制空型无人机的技战术要求、关键技术及发展思路

根据制空型无人机的作战任务,本文初步提炼出其技战术指标,总结其关键技术;结合当前有人/无人战斗机的技术水平,指出其发展研制的两种思路:即有人战斗机的无人化,以及飞翼布局无人机的升级设计。

1.1 制空型无人机的技战术要求

制空型无人机是性能全面的无人战斗机,作战任务广泛,突出空战格斗能力,其技战术指标应高于当前有人/无人战斗机,包括^[4-7]:

(1) 大空域、大速域、远航及久航要求。未来制空型无人机作战任务广泛,综合作战能力强,作战空域、速域跨度大,且要求能进行远距离攻击和长时间巡航侦查与待命,因此远航及久航能力需要进一步提高。比如美国F/A-XX方案设想如果采用亚声速巡航方式,续航时间将高达50h,其作战半径将会史无前例地达到上万km;而如果采用高超声速巡航方式,其作战半径则超过1600km^[4]。

(2) 雷达全频域、红外隐身要求。F-22即使不采用任何吸波材料,前向RCS也不超过 0.1 m^2 。美军提出下一代有人/无人战斗机应实现雷达全频域隐身以及红外隐身^[5],要求RCS低于当前4代机一个量级,全向RCS达到 0.01 m^2 ^[6]。

(3) 超声速巡航能力。具有长航时的无加力超声速巡航能力,并向中低空扩展。

(4) 超常规机动能力。由于采用超常规气动布局、矢量推力发动机和智能化飞行控制系统,下一代战机将普遍具备超声速高机动和亚声速超常规机动的能力。俄罗斯拟采用二元矢量喷口发动机,其俯仰角度可达 $\pm 20^\circ$,可以 60° 大迎角低速飞行和机动^[4-5]。

波音公司宣称,F/A-XX 能够实施各种超常规机动,常规的爬升、盘旋、滚转和直线加速等特性,也将全面优于 F-22,具备完成导弹防御、空中遮断和近距支援等作战任务的空中机动能力^[4,7]。

1.2 制空型无人机的关键技术

目前,制空型无人机面临的重大难题是敌我识别、态势感知、自主空战、远程通信与防电磁干扰等^[8],这些问题是制约制空型无人机安全飞行并完成空战任务的关键,有赖于人工智能、信息感知与融合、数据链路等技术的突破。此外,根据上述技战术要求,国外对制空型无人机还提出了一些与气动结构相关的关键技术^[9],如:

(1) 新型气动布局。新型气动布局可兼顾高速飞行和久航飞行时的气动性能,有的还可兼顾飞行控制,有可能成为支撑下一代战斗机满足确保空中优势,甚至建立空天优势、提高远航和久航能力两项要求的关键技术。国外正在探索的新型气动布局技术主要包括飞翼布局 and 自适应变形布局。

(2) 多功能结构技术。多功能结构技术主要是指集成任务传感器功能的结构。它可显著增大传感器孔径和作用距离,还可提高飞机的低可观测性能,是下一代战斗机实现以信息和网络能力为中心进行设计的关键支撑技术。

(3) 低可观测技术。由于美国国防部认为主要依靠外形设计实现低可观测的战斗机将在 2020 年左右面临极大的威胁,其他可保证低可观测性能的技术发展情况值得关注,例如美国空军正在研究的纳米材料和综合飞行器能量管理技术等,可能会成为实现宽带隐身和多光谱隐身的关键。特别是纳米材料,国外认为它还有可能带来流动控制技术和结构设计技术的变革,显著提高飞机的升阻比和降低结构重量。

(4) 变循环发动机。变循环发动机可兼顾高速飞行和远航飞行性能。美国空军和工业界进行的分析显示,亚声速飞机采用变循环发动机可将航程和续航时间分别提高 30% 和 70%,而超声速飞机则可分别提高 40% 和 80%。

(5) 新一代数据链技术。通用、高速、安全保密、抗干扰的新一代数据链将保证下一代战斗机满足其确保空中优势,甚至建立空天优势、帮助实现信息优势和适应网络中心战、提高多功能性等能力要求的关键支撑技术。目前,美国国防部和美国空军为适应网络中心战的发展,正在大力加强包括数据链在内的网络中心基础设施和技术开发工作。

(6) 智能蒙皮^[5]。智能蒙皮是 1985 年由美国空军提出的新技术构想,所谓智能蒙皮,是一种利用智

能材料对外界环境变化作出机敏反应的机构。一般由信息传感器、控制器和驱动器组成,具有信息传递、处理和驱动三种功能。美军下一代战斗机之所以采用智能蒙皮,主要在于智能蒙皮具有十分显著的特点:一是有助于提高飞机的飞行性能;二是有利于飞机隐身;三是有利于发现隐身目标;四是增加飞机的可靠性;此外,智能蒙皮技术还具有可提高飞机的可用性,有利于飞行器设计小型化和简单化等特点。

1.3 制空型无人机的发展思路

总结制空型无人机的关键技术特征,结合现有设计技术水平,制空型无人机主要有两条发展途径。

其一是在现役战斗机的基础上无人化。无人化能大大放宽对飞机机动性的限制,使之具备超机动作战能力。无人化也是下一代战斗机的发展方向之一。美国提出的下一代战机的构想,认为它应该是一款无人机,因为根据现在空中作战的规律发展,今后无人机比有人机有更大的优势。

自主空战的无人战斗机虽然还比较遥远,但利用传感和通信技术,远程控制作战是可实现的。当代战斗机都具有超声速巡航、过失速机动、宽频带隐身等特点。下一代战机规划中更是提出了雷达全频域隐身、红外隐身、超常规机动、高空高速长航时、增强态势感知能力等需求。战斗机的这些特点与发展趋势与制空型无人机的需求一致。因此,将四代机甚至五代机进行无人化设计,最贴近制空型无人机的发展规律,也能够有效利用现有战机的设计经验,降低设计门槛。

第二种发展思路是基于当前无人战斗机的通用构型。波音公司联合美国空气研究实验室(AFRL)提出了无人战斗机通用的基本构型,即 AFRL UCAV 1303 试验型,为典型的飞翼/无尾布局。西方各国的无人验证机,如 X-47B、雷神、神经元、鬼怪鳐等,也都采用了飞翼/无尾布局。这种全新的布局设计方式,在雷达隐身、气动特性方面具有较强的优势,但由于没有垂直/斜置尾翼,航向稳定与操控明显不足,若将其发展成为制空型无人机,需要开展创新舵面控制研究。

2 制空型无人机的气动布局

根据制空型无人机的作战任务和技战术要求,中/小展弦比扁平融合体布局和中/大展弦比飞翼/无尾布局是制空型无人机最有可能的布局形式。

2.1 中/小展弦比扁平融合体气动布局

中/小展弦比扁平融合体布局主要集中在下一代战斗机的设计上。例如洛·马公司提出的五代机设计

概念(图 5),其机头与 F-22 相似,但更加扁平;尾翼以很大角度外倾,可减小角反射带来的 RCS;该机强调高速度和敏捷性^[9]。



图 5 洛·马公司五代机构想概念图

Fig. 5 Future fighter concept of Lockheed Martin

图 6 为苏霍伊公司提出的五代机方案,采用串联式三翼面气动布局,前置的全动近距耦合鸭翼与机身边条完全融合,前掠机翼又与机身完全融合,翼根向后延伸至机尾形成水平安定面,双垂尾大角度外倾,外形超扁平,还可能采用变体技术^[10]。



图 6 苏霍伊公司五代机视频截图

Fig. 6 Future fighter concept of Sukhoi

这类战斗机通常具有较高的速度、机动性和敏捷的操纵性,具有快速的对空指向性,作战任务上仍然以空中格斗、空中压制为主,作战对象是具有隐身特征和超声速巡航能力的飞机,因此布局上更加突出超声速巡航和超声速机动作战能力,外倾的尾翼也能有效减小 RCS 的角反射效应。若能解决战斗机无人化的几个难题,则该布局不失为一种先进的、最可能的制空型无人机气动布局^[11]。

2.2 中/大展弦比飞翼/无尾布局

中/大展弦比飞翼/无尾布局是目前国外无人战斗机研制、演示验证的主要气动布局形式,源于美国波音公司与空气研究实验室(AFRL)提出的 UCAV 通用的基本构型,即 AFRL UCAV 1303 试验型^[12],该型验证机为典型的无尾飞翼布局(图 7)。

应美国海军要求,对于下一代有人战斗机规划,波音公司也提出了自己的五代机方案,即 F/A-XX 方案(图 8)。该布局采用中等展弦比双发飞翼无尾布局,全翼身融合,强调隐身性能和高升阻比^[9]。

2011 年 2 月,诺·格公司研制的 X-47B 无人作战飞机成功实现首飞。该机为翼身融合的大展弦比飞翼布局外加蝙蝠型双翼(图 9)。X-47B 采用无尾

布局的最大优势在于能大大降低飞机的重量,提高作战的机动性。不过,无尾布局带来的稳定性控制方面的问题,尤其是航向静稳定性问题,会使 X-47B 等无人作战飞机面临较大的技术挑战。而且,无尾布局没有垂直安定面遮挡后机身与尾喷流,其红外隐身也是设计过程中需要考虑的重要因素^[13-15]。

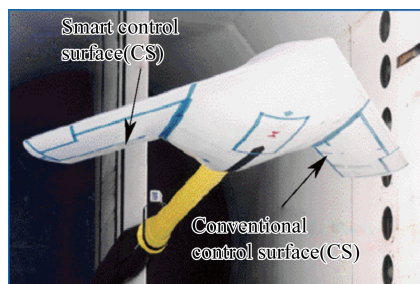
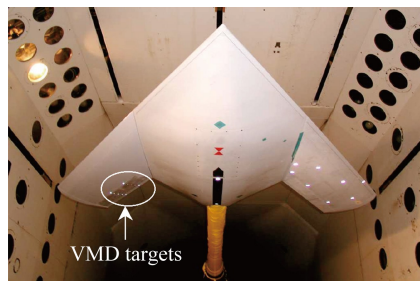


图 7 1303 布局的风洞试验

Fig. 7 Aerodynamic test of "1303" configuration in wind tunnel



图 8 波音公司五代机构想概念图

Fig. 8 Future fighter concept of Boeing



图 9 X-47B 无人战斗机

Fig. 9 X-47B UCAV

2010 年 7 月,英国 BAE 系统公司首次公布了“雷神”无人作战飞机(图 10)。该机采用飞翼/无尾布局设计,主要验证流体推力矢量和环量控制等关键气动技术^[16-17]。

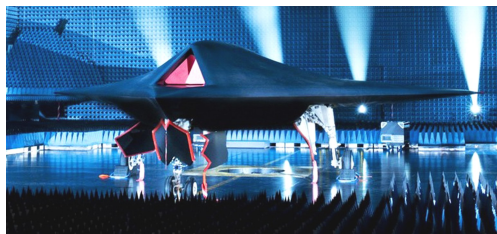


图 10 “雷神”无人战斗机

Fig. 10 “Taranis” UCAV

2012 年 1 月,由法国主导的欧洲五国联合研制的“神经元”无人作战飞机技术验证机也正式亮相^[18](图 11)。它是一种集侦察、监视与攻击于一身的多功能无人作战平台,除了能完成侦察、监视、通信中继和电子干扰等任务外,更重要的是其直接攻击能力。此类飞翼布局无人机的优点是^[10]:

- (1) 消除了尾翼,减小最小阻力;
- (2) 消除了喷流对尾翼的干扰和机翼上可能的激波干扰;
- (3) 消除了非升力面;
- (4) 采用静不稳定外形,配平阻力较小;
- (5) 可通过方式放松静稳定性设计,边界层控制等方式,提高最大升力系数。

不足之处在于^[10]:

- (1) 最大升力系数小,起飞着陆需要大攻角;
- (2) 稳定性设计中采用机翼外洗,诱导阻力激增;
- (3) 跨声速飞行,厚翼带来较大阻力;
- (4) 航向稳定性减退;
- (5) 俯仰控制的力矩较短,需要更大或更多的控制面;
- (6) 横航向控制耦合增加了飞控的复杂性;
- (7) 尾旋恢复需要采用非传统方式。



图 11 “神经元”无人战斗机

Fig. 11 “Neuron” UCAV

为了解决无尾布局操纵和控制的难题,洛马公司启动了“创新控制操纵器计划”^[19],旨在探索新型的操纵面气动控制方案,他们在 F-117 基础上设计 1 个无尾方案。经过风洞试验后,选定了 2 种布局交空军

进行飞行试验,一种主要突出了翼面上的扰流片和开缝-折流片,一种主要突出了全动翼尖,2 种布局相对简单,但仍有足够的操纵效率。上述研究表明新型的操纵面系统的研究和推力矢量的综合应用是解决高隐身机动布局操纵和控制的重要方法。

飞翼布局涉及的气动关键技术主要有:(1)背负式进气道设计技术。背负式进气道能否广泛应用取决于在各种飞行状态下,进口的流场能否满足进气道性能以及发动机匹配的要求,尤其是大迎角和有侧滑时的进口流场质量,机翼和边条的漩涡、机身分离的尾迹是否进入进气口以及超声速时进口流场马赫数的大小等。(2)航向控制技术。目前飞翼布局一般采用翼尖开裂式阻力舵、扰流板、全动翼尖(AMT)、开裂式襟副翼或差动式襟副翼等阻力式方向舵来实现航向控制(图 12)。对大展弦比飞翼布局采用阻力舵实现航向控制效率较高,但对小展弦比飞翼布局则效率相对较低。



图 12 飞翼布局飞机的多种控制舵面

Fig. 12 Diversified control surface of flying wing UCAV

3 小展弦比(鸭式)飞翼布局特性及关键技术

综合扁平融合体及飞翼气动布局特点及国内外无人机发展趋势,兼具这两类布局特点的小展弦比(鸭式)飞翼布局可能成为制空型无人机或下一代战斗机概念布局的主要发展方向。

3.1 布局特点

该类布局与 X-36 比较类似,为提高隐身,消除垂尾,并遮挡尾喷管;为提高机动性可保留鸭翼(也可以不要鸭翼);为提高超声速性能,鸭翼和主翼的后掠角可能适当加大,面积适当缩小。这种无尾飞翼布局的横航向稳定与操纵控制目前依然是个难题,低亚声速

这个方面国外还有些技术积累,跨超声速这方面的研究不多,也就说还存在新型操控措施的创新研究机会。

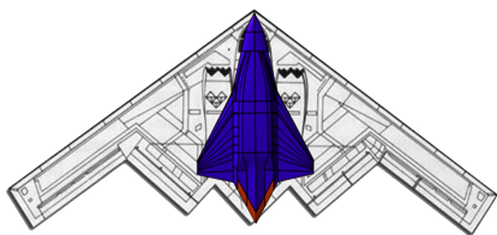


图 13 大/小展弦比飞翼布局飞机比较图

Fig. 13 Comparative configuration of big/small aspect ratio



图 14 X-36 验证机

Fig. 14 "X-36"

目前可以在现有战斗机鸭式布局基础上来探索这种布局概念特征及设计技术,如去掉 V 尾和腹鳍、设计背负式发动机、缩小机翼面积、加大翼身融合、大力发展推力矢量技术(重点解决航向稳定与控制)、优化设计后体等。也可以在大展弦比飞翼布局无人机的基础上缩减展弦比,增加鸭翼等等。这种布局具有更好的低可探测性、超声速性能,若发动机技术有新的突破,机动性、航程、航时也会有较大提高。整个概念从工程技术延续性、技术成熟度、经济可承受性等角度看有一定发展前途。

3.2 关键技术

除了上文中列出的飞翼布局气动关键技术,小展弦比(鸭式)飞翼布局在气动领域还需要重点突破以下关键技术^[10]:

(1) 新概念流体推力矢量技术研究。近年来由于技术的进步,一些控制措施甚至孕育着新概念飞行器的产生,如用孔壁控制代替操纵面、利用 Coanda 效应的超环量控制代替增升装置、采用智能材料的变形飞行器等。通过气流相互作用,实现矢量偏转,有望取代现有复杂的机械推力转向装置,也利于采用矩形尾喷管,便于遮挡红外隐身。这种流动控制的一体化问题特别重要。必须考虑到整个飞机的设计,除了能够输送(热)空气之外,还要使其能够通过辅助射流输送约 10% 的主气流,并能够加工适合的喷口。这种非机械式推力矢量的优点是减轻了重量,简化了复杂性,从而提高了可靠性。

(2) 低速增升环量控制技术研究。采用环量控制,可使翼型升力系数高达 20,升力增量与喷流动量比高达 80,可大幅提高短距起降能力,也可用于发动机推力转向控制。这种流动控制的基本原理已经开展了多年的研究。但是,这种系统的设计以及与飞行器的一体化问题,还是存在一些挑战。为了确定合适的工作系统,通气管道、增压室设计、结构设计和空气温度都是必须考虑的问题。特别是,耐用、低成本、狭窄缝隙的加工要通过研制柔性、可调唇口来解决。

(3) 高机动增稳控制技术研究。采用舵面控制、射流控制和推力矢量控制进行增稳和高机动操纵,是可行的技术途径。

(4) 气动布局/隐身/推进/结构/控制一体化多学科设计优化技术。为了提高飞行器总体性能尤其是隐身和气动性能,未来战斗有人/无人机将会逐渐取消外挂,并进行控制舵面的缩减,这都将加大操稳和控制的难度;而且布局的一体化融合,必将带来各学科的一体化融合,因此设计上必须采用多学科设计优化方法来协调各学科设计矛盾,提高飞行器总体性能。

(5) 变形结构技术。要兼顾高速与低速、巡航与机动等性能,采用变形结构技术是重要的发展方向,但利用机体结构变形或智能材料进行实现,除突破智能材料研发技术外,还需要解决变形体气动及结构设计、变形过程的非线性气动特性、控制技术等。

4 对制空型无人机气动布局设计的启示

通过对制空型无人机作战指标、技战术要求的分析,结合扁平融合体布局和飞翼/无尾布局的特点,参考文献[20-23]对小展弦比飞翼 ICE 飞机的气动计算数据,提炼总结了制空型无人机气动布局的部分设计要求。

(1) 对飞行性能的要求。高机动性,超声速稳定盘旋过载 10 左右;最高可实现以马赫数 1.5 进行超声速巡航 15 min 左右(根据 F-22 的超声速巡航时间假设);若需要提高航程可外挂副油箱。以上这些要求同时需要高性能的发动机作为支持。如发动机剩余功率大,可提高飞机的加速性能,耗油率低可提高续航性能,但发动机功率大其重量也会相应增大,飞机的总重和体积就会增大,如何协调这之间的矛盾关系还需要具体分析。

(2) 对气动特性的要求。从文献[21]对小展弦比飞翼飞机气动性能的计算数据中可知,马赫数 0.6 飞行时最大升阻比 3.5 左右,最大升力系数 0.7 左右;马赫数 1.5 飞行时最大升阻比 2.6 左右,最大升

力系数 0.8 左右。因此若要进一步提高巡航性能和过载,则需要进一步提高升阻比和最大升力系数,这就需要在翼型设计时进行考量。

(3) 稳定特性。为了增加飞机超声速的机动性能,在亚声速区纵向采用放宽静稳定设计。因此,此类飞机在亚声速区为轻微静不稳定设计——根据经验,静稳定度可设计在 $-5\% \sim -1\%$ 之间。超声速区,随着焦点后移,飞机变为纵向静稳定,稳定裕度可设计在 $5\% \sim 10\%$ 之间。由于飞翼本身特性,在整个飞行阶段航向是很小的静不稳定,可设计在 -1% ,纵横向的静不稳定可通过控制率设计或增稳构型设计进行改善。同时,飞翼的大迎角稳定特性比中小迎角下更差,此时需采用推力矢量和全动翼尖等新型操纵机构以提供其足够的控制力矩,并通过采用飞/推一体化等先进的控制系统设计才能保证其获得满意的大迎角飞行品质。

5 结束语

本文重点分析了制空型无人机的技战术要求、关键技术及发展思路,总结了制空型无人机两种可能的气动布局——中/小展弦比扁平融合体布局和中/大展弦比飞翼布局。在此基础上,提出小展弦比(鸭式)飞翼布局构想。最后,提炼总结了制空型无人机气动布局的部分设计要求,希望能够给相关设计人员带来一定的启示。

参 考 文 献:

- [1] Nangia R K, Palmer M E. A comparative study of UCAV type wing planforms-aero performance and stability considerations. AIAA 2005-5078[R]. Reston: AIAA, 2005.
- [2] Jirasek A, Commings R. SACCON static and dynamic motion flow physics simulations using COBALT. AIAA 2011-3965 [R]. Reston: AIAA, 2011.
- [3] Sathe A, Pant R. Conceptual design studies of an unmanned combat aerial vehicle. AIAA 2010-9306[R]. Reston: AIAA, 2010.
- [4] Sun L H. The competition of the sixth generation fighters[J]. Electronics Optics and Control, 2012, 19 (10): 1-7. (in Chinese)
孙隆和. 第六代战斗机的竞争[J]. 电光与控制, 2012, 19 (10): 1-7.
- [5] Shi H L, Wu W B, Zhang L, et al. A review on the typical technic characters of fighters of the sixth generation in the U. S. air force[J]. National Defense Science and Technology, 2010, 31(4): 10-13. (in Chinese)
石怀林, 武卫兵, 张立, 等. 美军第六代战斗机典型技术特征[J]. 国防科技, 2010, 31(4): 10-13.
- [6] He K F. Research on aerodynamic configuration of UCAV based on aerodynamics and stealth integration[R]. Mianyang: China Aerodynamics Research and Development Center, 2014. (in Chinese)
- 何开锋. 基于气动/隐身综合的无人机气动布局研究[R]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2014.
- [7] Shi S D. On development of the sixth fighter of America[J]. Defence Science and Technology Industry, 2012, (3): 66-68. (in Chinese)
史三东. 浅谈美国第六代战机的发展[J]. 国防科技工业, 2012, (3): 66-68.
- [8] Chen W, Zhu B K. Four problems for fighter turned unmanned [J]. Winged Missiles Journal, 2014, (3): 30-32. (in Chinese)
陈伟, 朱保魁. 战斗机无人化难以破解的四个难题[J]. 飞航导弹, 2014, (3): 30-32.
- [9] Su H J. Delopment and key technologies research of foreign next-generation fighter[R]. China Aviation Industry Development Research Center, 2012. (in Chinese)
苏海军. 国外下一代战斗机发展及关键技术研究[R]. 中国航空工业发展研究中心, 2012.
- [10] Che J. Configuration and key aerodynamic technologies of foreign next-generation fighter[R]. Mianyang: China Aerodynamics Research and Development Center, 2012) (in Chinese)
车竞. 国外下一代战斗机布局及气动关键技术[R]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2012.
- [11] Li J L, Tu Z Z, Liu Z T. The research progress of the sixth generation fighter of USAF [J]. Electronics Optics and Control, 2014, 21(6): 3-8) (in Chinese)
李金梁, 涂泽中, 刘振庭. 美第六代战斗机研究进展情况[J]. 电光与控制, 2014, 21(6): 3-8.
- [12] Chandrasekhara M S, Brian L T. Aerodynamic studies over a maneuvering UCAV 1303 configuration [C]// 2010 RAES Aerodynamics Conference. University of Bristol, Bristol, UK, 2010.
- [13] Zhang Y, Gao J C, Zhou H, et al. X-47B carrier-based UCAV of USN[J]. Winged Missiles Journal, 2009, (1): 12-14. (in Chinese)
张洋, 高纪朝, 周昊, 等. X-47B——美国海军舰载无人战斗机[J]. 飞航导弹, 2009, (1): 12-14.
- [14] Stenfelt G, Ringertz U. Lateral stability and control of a tailless aircraft configuration[J]. Journal of Aircraft, 2010, 46 (6): 2161-2163.
- [15] Chung J, Hallberg E, Cox S, et al. Landing pitch control analysis for a blended wing body UCAV[R]. AIAA 2010-1035, 2010.
- [16] Yang H J, Guan S Y. Future air force fighter[J]. Winged Missiles Journal, 2013, (1): 10-133. (in Chinese)
杨慧君, 关世义. 未来空军战机[J]. 飞航导弹, 2013, (1): 10-13.
- [17] Li C L, Li G C. The taranis UCAV plan of Britain[J]. Winged Missiles Journal, 2008, (7): 15-18. (in Chinese)
李春林, 李高春. 英国雷神无人战斗机计划[J]. 飞航导弹, 2008, (7): 15-18.
- [18] Guan J, We G F. Six countries of Europe develop corporately neuron UCAV[J]. Winged Missiles Journal, 2006, (7): 17-19. (in Chinese)
关军, 魏国福. 欧洲六国联合研制神经元无人战斗机[J]. 飞航导弹, 2006, (7): 17-19.
- [19] Zhu Z Q, Wang X L, Chen Z M, et al. Aerodynamic characteristics of unmanned aerial vehicles and its shape design [J]. Acta Aerodynamica et Astronaut Sinica, 2006, 27(2): 161-174. (in Chinese)
朱自强, 王晓璐, 陈泽民, 等. 无人驾驶飞行器的气动特点和设计[J]. 航空学报, 2006, 27(2): 161-174.

