

民机翼身融合布局发展分析与展望



孙玉凯,王元元,程文渊,王妙香,杨敏
中国航空工业发展研究中心,北京 100029

摘 要:未来航空业对经济、环保的要求越来越高,翼身融合(BWB)布局因具有巡航效率高、飞行噪声低等优势成为未来民机的理想解决方案之一,并受到国内外广泛关注。本文简要梳理了国内外翼身融合布局技术的发展历程、主要进展,分析归纳了翼身融合布局技术的优势和挑战,总结了主要关键技术,提出民机翼身融合布局设计需进一步收敛、市场和商业前景需细致评估的发展思路建议。

关键词:翼身融合;亚声速客机;飞行器设计;气动外形;大型民机

中图分类号:V271.1

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.07.001

随着经济快速发展和能源问题日益严重,全球航空业对“绿色航空”的要求不断提升,未来民机将充分贯彻“绿色航空”发展理念,以“节能、减排、降噪”为核心,满足未来经济性和环保性要求。自1947年波音B-47轰炸机奠定高亚声速大型喷气式运输机/客机的常规“管-翼”(tube and wings, TAW)布局形式后,在翼梢小翼、超临界翼型等技术的加持下,大型民机的燃油效率持续提升。但发展到当前,常规“管-翼”布局的气动效率潜力几乎被“挖掘”殆尽。

翼身融合(BWB)布局有望成为满足“绿色航空”需求的理想解决方案之一。BWB布局是指机翼和机身高度融合的升力体飞行器布局^[1],其中机身也产生升力,通过机身和机翼融合提升空气动力学效率。BWB布局在飞行效率、节能减排、噪声控制等方面具有明显优势,更易满足民用飞机使用要求,已成为未来民机较为理想的选择。

本文简要梳理国内外BWB布局技术的发展历程、主要进展,分析归纳BWB布局技术的优势和挑战,总结主要关键技术与近年来的研究热点,并对未来发展提出思路建议,为中国未来民机设计提供参考。

1 国内外研究历程

虽然20世纪20—40年代许多研究者对BWB布局技术进行了艰辛的探索和实践,但完整的BWB布局概念由麦道公司的Liebeck在1988年首次提出^[1]。

经过多年发展,BWB布局已经从概念探索发展到应用研究阶段^[2]。最初的BWB布局概念探索集中在800~1000座级的超大型客机上,如美国国家航空航天局(NASA)的第一代和第二代BWB布局、欧盟的VELA1和VELA2概念机等;之后,出于对航运市场需求、绿色航空等因素的综合考虑,探索设计了250~450座级概念,如波音BWB-450概念方案、X-48B/C验证机等^[3]。近年来,BWB布局在设计思想、设计方法、结构、材料、动力、噪声抑制,以及适航符合性等方面的研究不断取得突破^[4],涌现出许多具有代表性的BWB布局概念^[5-6]。

1.1 美国

自麦道公司工程师们提出MD-11翼身融合布局飞机以来,美国就稳步推进BWB布局技术的研究和验证工作,其主要项目如图1所示。1994年,在NASA兰利中心的资助下,麦道公司完成了麦道第二代BWB方案,是斯坦福大学BWB-17验证机的基础。1997—2002年,波音公司发布BWB-450方案,与A380-700相比,其空载重量(质量)降低19%,最大起飞重量降低18%,推力需求降低19%,燃油消耗降低32%^[5]。之后,在NASA N+2/N+3计划下,波音公司亚声速超绿色飞机研究团队推出了其BWB布局方案SUGAR Ray,波音-麻省理工学院团队在SAX-40的基础上提出了H3.2系列布局方案,其中的H3方案部分满足N+2代指标,但距离N+3代节能和噪声指标还有一定的差距,随后NASA提出了有望满足N+3代指标的分布式电推进概念

收稿日期: 2023-03-02; 退修日期: 2023-04-15; 录用日期: 2023-05-19

引用格式: Sun Yukai, Wang Yuanyuan, Cheng Wenyan, et al. Analysis and prospect of blended-wing-body configuration technology development of civil aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(07): 1-12. 孙玉凯, 王元元, 程文渊, 等. 民机翼身融合布局发展分析与展望[J]. 航空科学技术, 2023, 34(07): 1-12.

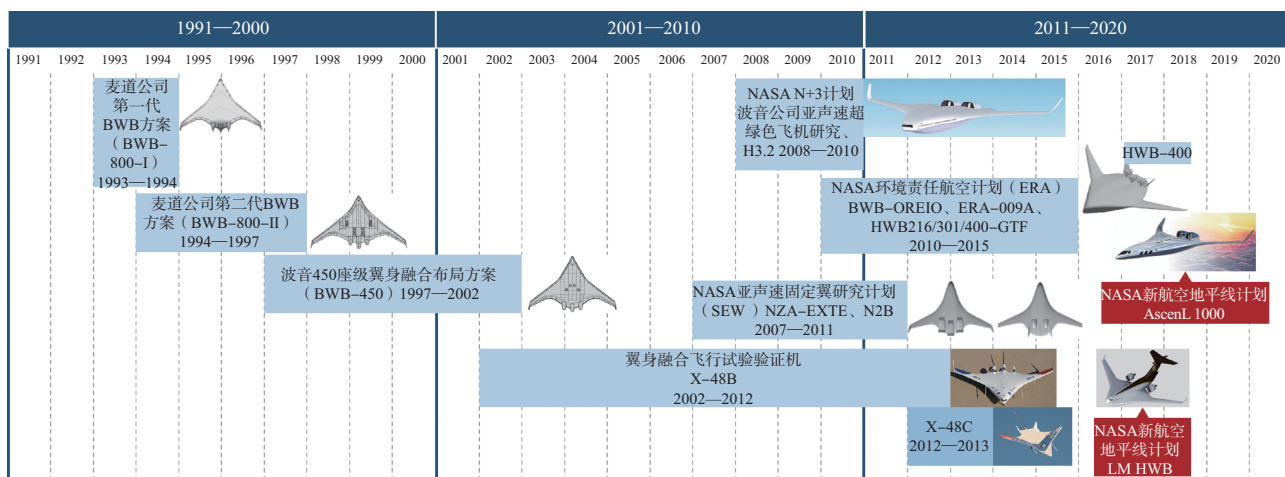


图1 美国主要BWB相关项目

Fig.1 BWB-related projects in the U.S.

方案N3-X^[2]。C. L. Nickol和W. J. Haller等^[7]在NASA环境责任航空(ERA)计划的基础上设计了三类不同座级的混合布局飞机:HWB216-GTF、HWB301-GTF和HWB400-GTF,并评估了其性能潜力。在NASA新航空地平线(NAH)计划中,洛克希德-马丁(LM)公司基于混合翼身(HWB)布局军用运输机HWB-757和HWB-777方案,发展了商用货机布局方案(见图2),并分析了市场对此类BWB布局飞机的需求^[8]。

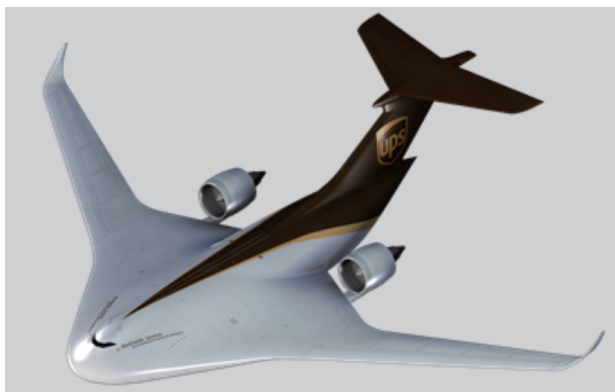


图2 基于HWB-777的混合翼身布局商用货机

Fig.2 Commercial cargo aircraft with HWB configuration based on HWB-777

飞行试验方面,美国在波音BWB-450概念方案的基础上,发展了X-48系列BWB验证机(见图3),在布局可行性验证、多操纵舵面耦合控制、噪声、排放、油耗测试等方面获得了大量经验和数据,为BWB布局的应用研究奠定了坚实基础。



图3 X-48B验证机

Fig.3 X-48B verification aircraft

1.2 欧洲

21世纪以来,欧盟在第五研发框架计划(fifth framework programmer, FP5)下持续支持BWB等新概念布局研究,其中,空客公司牵头开展了翼身融合布局多学科优化设计(MOB)、高效大型民机(VELA)、新飞机概念研究(NACRE)、柔性飞机主动控制2020(ACFA 2020)等项目的研究,如图4所示。

VELA项目^[9]针对750座级的BWB布局开展方案研究,总共发展了三种方案,即VELA 1、VELA 2及VELA 3。VELA项目以工作包的方式向各研究机构分发任务,来自欧洲的研发机构、航空制造商及高校等共17个参与方合作开展技术攻关。VELA的延伸项目——NACRE项目^[10]由空客公司主导,来自欧洲的36个合作方共同参与。该项目以VELA 3作为基准方案,通过重新设计中机身翼型以及外翼段的扭转,并进行整体设计优化,形成了最终方案NACRE FW-2。与原始方案相比,NACRE FW-2将每名乘

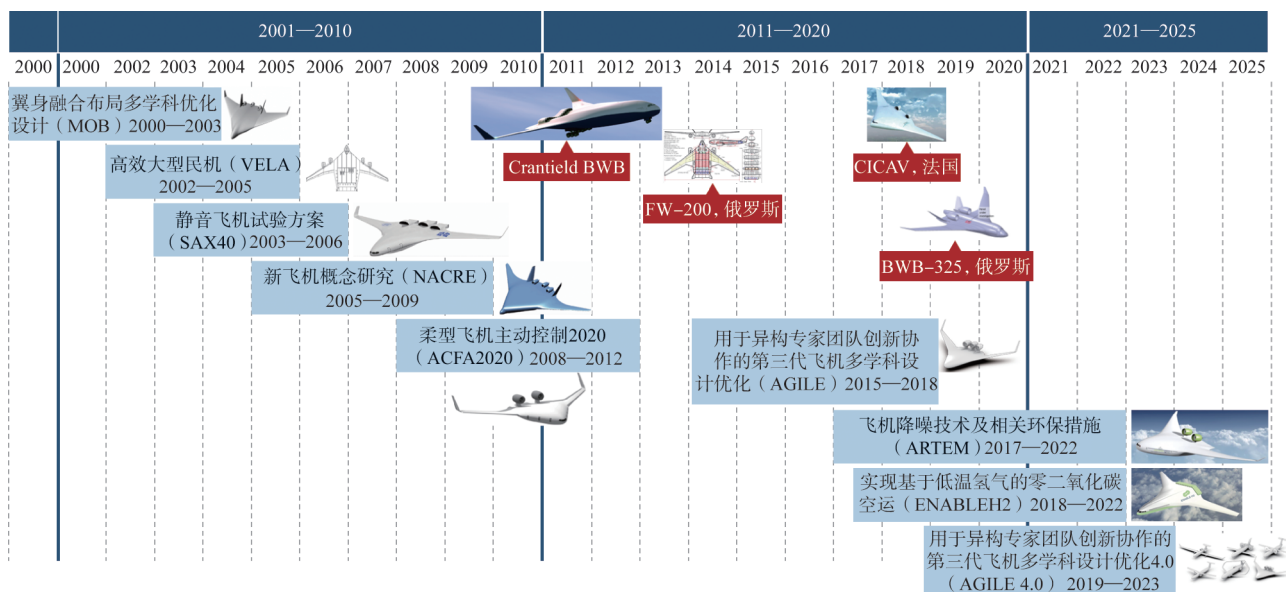


图4 欧洲21世纪以来BWB相关项目

Fig.4 BWB-related projects in the Europe since 2000

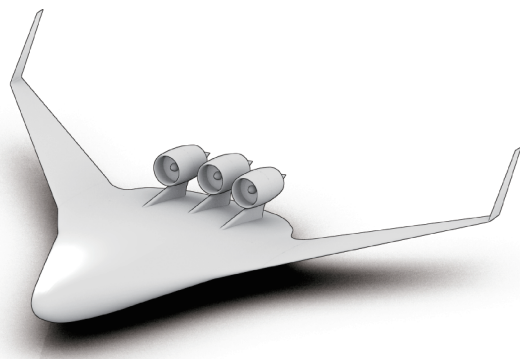
客的可用空间提升了15%,升阻比提升了4.5%,最大起飞重量降低了6.45%,轮挡燃油降低了18.9%,进一步提升了整体性能^[5]。

欧盟紧接着布局了ACFA 2020项目^[11],该项目的主要目标是设计一款新型高效的450座级BWB布局客机,并且提供稳健和自适应的多通道控制架构,减轻负载并改善乘客舒适性和飞行操纵质量。

2015—2018年,德国航空航天研究院(DLR)牵头承担了欧盟“地平线2020”框架下的AGILE项目^[12],并在项目第三阶段内完成了包括BWB布局在内的7种非常规布局方案设计与优化工作。其中,BWB布局方案如图5所示,是一款450座级的大型客机,载荷59t,最大载荷下航程为8500km,巡航马赫数为0.85,最大巡航高度约13100m,起飞距离2950m。AGILE后续项目—AGILE 4.0项目^[13]周期从2019年至2023年,将继续在此方案的基础上进行优化设计。

欧盟于2018—2021年开展了ENABLEH2项目^[14]研究,通过推动液氢等相关技术成熟,实现无二氧化碳液态氢空运,并且提升安全性和可持续性。项目团队在研究中基于NASA N3X-Max概念,提出了BWB布局的液氢动力概念方案,如图6所示。该项目将推动液氢动力飞机相关关键技术到2030—2035年达到技术成熟度6级。

除欧盟外,英国克兰费尔德大学提出其BWB布局概念飞机Cranfield BWB^[15],法国于2015—2019年研究并发布

图5 AGILE项目的BWB布局飞机方案^[12]Fig.5 The BWB configuration aircraft of the AGILE program^[12]

440座级BWB布局概念飞机CICAV^[16]。俄罗斯在2014年和2018年分别给出了两款BWB布局概念飞机:FW-200^[17]和BWB-325^[18]。

1.3 中国

近年来,国内BWB布局民机研究持续深化,西北工业大学(见图7)、中国商用飞机有限责任公司(见图8)等高等院校和科研机构在总体、气动布局、结构、飞行控制等方面均开展了大量研究。但总体上,我国在BWB布局民机方面的研究起步较晚。近年来,虽然在关键技术梳理、气动/结构关键技术攻关等方面取得一定进展,但总体进展较慢,飞行验证开展较少且验证能力有限,相比国外仍处于BWB布局概念方案探索阶段,BWB布局预先研究还未完全展开。相比之下,波音、空客等公司开展BWB布局预先研究时



图6 基于美国国家航空航天局N3X-Max Synergy概念的BWB布局氢动力飞机^[14]

Fig.6 Hydrogen-powered BWB aircraft based on NASA N3X-Max Synergy concept^[14]

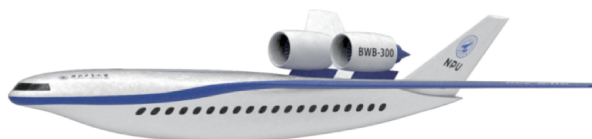


图7 西北工业大学NPU-BWB-300-II翼身融合民航概念方案

Fig.7 Northwestern Polytechnical University's BWB civil aircraft concept NPU-BWB-300-II



图8 中国商飞“灵雀”B翼身融合验证机

Fig.8 COMIC "LingQue-B" BWB verification aircraft

间为2000年前后。

2 代表性项目进展

2022年5月,加拿大庞巴迪公司公布了一段EcoJet项目视频,视频中展示了一款BWB布局的公务机,如图9所示。EcoJet通过BWB设计达到减排50%的目标,庞巴迪的目标是在20年内将EcoJet投入应用。EcoJet项目已经进行

了一段时间,庞巴迪公司为此制作了一个1.2~1.5m长的缩比模型用于风洞试验。2022年9月,该公司制作了翼展6m、20%尺寸的EcoJet无人驾驶缩比验证机,并开始进行飞行测试。



图9 加拿大庞巴迪公司的EcoJet翼身融合公务机

Fig.9 Canada's Bombardier's EcoJet BWB business jet

美国纳蒂鲁斯(Natilus)创业公司正在研制一款翼身融合的无人驾驶货机N3.8T,该货机采用BWB布局,载货量比同等起飞重量的常规布局飞机高出60%,每磅的成本和二氧化碳排放量减少50%。如图10(a)所示,纳蒂鲁斯N3.8T无人驾驶货机最大起飞重量为8618kg,最大航程为1667km,设计可装载三个LD-3航空集装箱,最大有效载荷为3855kg。该机采用BWB布局,平直翼,双垂尾,在机身尾部装配有两台普·惠公司PT6A-67D涡桨发动机,功率约为900kW。该机的1/10缩比模型于2022年5月起开始进行一系列风洞试验,如图10(b)所示。同时,纳蒂鲁斯公司已经开始生产N3.8T货机原型机,目标是于2023年底首飞,预计于2025年取得美国FAR-23部认证并开始交付,首批飞机将交付美国沃拉图斯航空(Volatus Aerospace)公司。除N3.8T外,纳蒂鲁斯公司计划研发一系列无人驾驶货机,包括具有跨声速和洲际航程能力的66t级、110t级和130t级货机。

美国DZYNE技术公司在NASA的新地平线项目支持下,推出了BWB布局支线客机Ascent 1000的概念方案,如图11所示,并给出了Ascent 1000的具体构型描述^[19-20]。DZYNE重新设计了Ascent 1000的起落架位置和收放方式,如图12所示,将双层客/货舱设计优化为单层客/货舱设计,显著降低了全机各剖面的厚度分布需求,优化了气动外形。Ascent 1000支线客翼展约43.0m,长约29.5m,高约7.3m,巡航马赫数为0.8,飞行航程约5926km,装备有两台



(a) N3.8T概念方案



(b) N3.8T货机1/10缩比风洞试验模型

图10 美国纳蒂鲁斯N3.8T无人驾驶货机方案

Fig.10 U.S. company Natilus N3.8T autonomous cargo aircraft



图11 美国DZYNE技术公司Ascent 1000支线客机方案

Fig.11 American DZYNE technology company Ascent 1000 regional airliner BWB solution

涡扇发动机,其整体内部布局如图13所示。在Ascent 1000的基础上,DZYNE公司还探索了对标波音737 MAX 8的165座客机Ascent 1600和对标波音737 MAX 9的200座客机Ascent 2000。

在2018年集中公布进展情况后,近年来针对Ascent 1000的相关报道较少,其官方网站也少有相关进展动态更

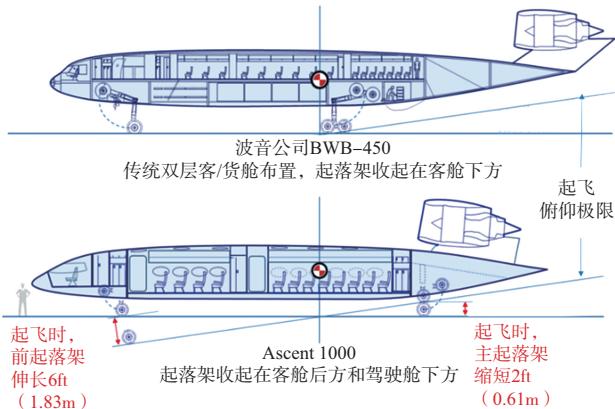


图12 Ascent 1000支线客机起落架设计^[19]

Fig.12 Landing gear design of Ascent 1000 regional airliner^[19]

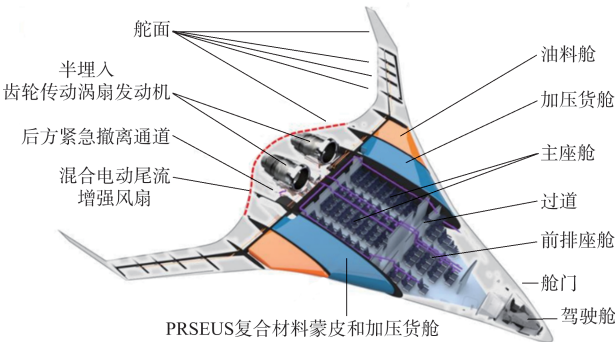


图13 Ascent 1000支线客机整体结构布局^[20]

Fig.13 Overall structural configuration of Ascent 1000 regional airliner^[20]

新^[21],但DZYNE公司的Ascent 1000设计是同类产品中技术成熟度最高的飞机^[22]。

2017年,英国初创公司Samad Aerospace启动混合动力垂直起降公务机eStarling的研制计划,其方案如图14所示。2019年底,该公司表示正在制造eStarling的50%尺寸缩比验证机,此前,该公司的10%、20%尺寸缩比验证机验证了起降性能、悬停性能和悬停转平飞的能力。2021年3月,该机的第二架50%尺寸缩比原型机完成首飞测试。该机计划在2023年进行首次飞行,2025年底之前完成认证和首次交付。

eStarling公务机售价650万美元,翼展为15m,具备垂直起降(VTOL)能力,巡航速度为463km/h,最大起飞重量为3175kg,航程为1000km。该机由5个电动旋翼提供动力:两个可倾转旋翼位于机翼后缘根部,提供垂直起降和巡航期间的动力;两个垂向旋翼位于翼身融合体中间,提供垂直起降时的升力;一个位于T形尾翼提供悬停转平飞时需

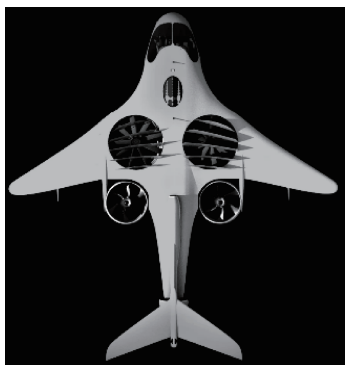


图14 英国 Samad Aerospace 初创公司的6座混合动力垂直起降公务机 eStarling 方案

Fig.14 The 6-seat hybrid VTOL eStarling business jet of British Samad Aerospace start-up company

要的动力。

空客公司在2020年的新加坡航展上展示了一款BWB布局技术验证机“游侠”(MAVERIC),主要用于验证BWB布局飞行控制技术,获取相应的飞行试验数据,如图15所示。“游侠”验证机将比常规布局飞机减少多达20%的燃料消耗,该机全机长2.0m,宽3.2m,机翼面积约为 2.25m^2 ,由两个涵道发动机提供推力,为了提高稳定性和操纵性,该机保留了两个平行垂尾^[23]。该验证机于2017年开始研发,在2019年6月首次升空,空客公司表示正在考虑其他的推进方式,如曾应用在EcoPulse验证机^[24]上的分布式混合动力技术。



图15 空客公司BWB布局验证机“游侠”

Fig.15 Airbus BWB configuration verification aircraft MAVERIC

2020年9月,空客公司发布了代号为ZEROe的3型氢能概念飞机,包括采用氢燃料涡扇发动机的单通道客机、采用氢燃料涡桨发动机的支线客机以及采用氢燃料分布式

推进的BWB布局客机,如图16所示。其中,ZEROe翼身融合布局客机以“游侠”积累的技术成果为基础开展研制,最多可搭载200名乘客,航程约为3074km。2020年空客公司在新加坡航展上公布的ZEROe翼身融合布局飞机如图17(a)所示,与“游侠”相比,该机取消了垂直尾翼,采用了分布式氢动力混合推进。但是,在2022年新加坡航展上,空客公司修改并公布了最新的概念布局,如图17(b)所示。与2020年相比,该布局更接近“游侠”验证机,放弃了分布式推进方案,采用两台发动机,经过改进的设计具有更长、更宽的整体机舱,增加了垂尾,发动机位置更靠后,既可以减小噪声也可以实现边界层抽吸。



图16 空客公司ZEROe氢能概念飞机方案

Fig.16 Airbus ZEROe hydrogen energy concept aircraft solution

2022年5月,德国航空航天研究院牵头完成了欧盟《地平线2020》框架下的飞机降噪技术及相关环境影响(ARTEM)项目,该项目为期4年,致力于开发新型降噪技术。该项目面向2050年远程商用飞机,提出了一种400座级的BWB布局方案BOLT,如图18所示。该布局巡航马赫数为0.84,巡航高度约为13100m(43000ft),航程约为10186km,采用两个超大涵道比的涡扇发动机(涵道比>16)。另外,该项目还提出了一种100座级的电推进BWB布局方案REBEL,致力于中短程商业航线。

西北工业大学在2023年1月30日宣布翼身融合民机技术研究取得重大突破,其翼身融合民机技术研究团队的NPU-BWB-300翼身融合缩比试验机(见图19)完成试验试飞,进行了试验机的起降、通场、规划航线自主飞行等科目测试。NPU-BWB-300-II方案(见图7)在国际上率先提出“后体加长BWB布局”概念,采用单排16座设计,机身两侧均匀布置了8个舱门,该方案的综合性能处于国际领先水



(a) 2020年



(b) 2022年

图17 空客公司ZEROe翼身融合布局氢能概念飞机方案

Fig.17 Airbus ZEROe BWB configuration of hydrogen energy concept aircraft



图18 ARTEM项目的BWB布局飞机方案BOLT

Fig.18 BOLT BWB configuration aircraft of the ARTEM project

平,达到或接近NASA N+2 宽体客机发展目标。

3 技术特点分析

欧盟议会运输和旅游委员会发布的《到2050年实现“绿色协议”目标的投资情景和路线图》中指出,BWB布局目前技术成熟度为3~4级,其技术可行时间预计到2040年之后,即当前BWB布局技术还处于预先研究或先期技术开发阶段^[25]。

3.1 优势分析

与常规“管-翼”布局飞机相比,BWB布局具有诸多优



图19 西北工业大学NPU-BWB-300翼身融合缩比验证机

Fig.19 Northwestern Polytechnical University's NPU-BWB-300 BWB scaling verification aircraft

势。目前研究显示,翼身融合设计已从250~450座级扩展到较小(100座)座级支线机/公务机及超大座级客机,均显示出了优越的综合性能优势^[1]。

3.1.1 巡航效率增加

在相同装载要求下,BWB布局能够降低全机浸润面积从而减小摩擦阻力,与常规“管-翼”布局相比,BWB布局的巡航效率可以提高15%~20%,油耗更少,具有经济环保优势。如图20所示,几种具有代表性的BWB布局民机方案的巡航效率因子已达20以上,并且具有低噪声、低排放、轻重量的潜力^[1]。与大座级BWB相比,由于BWB的每座浸润面积优势随座级的减小而逐渐降低,小座级BWB气动优势不明显^[26]。

在近期的一项研究中,S.Ammar等^[27]设计了一型200座级BWB布局客机,并与A320进行了性能比较。从表1可知,与A320相比,优化后的BWB布局飞机升阻比提高了22%,最大起飞重量减少了7.5%,BWB布局更大的升力面和更小的质量使机翼载荷更低,并且起飞距离减少了37.6%,布局优势明显。

3.1.2 飞行噪声降低

噪声排放标准的日趋严苛与民航运营规模的持续增长促使降噪技术成为目前民机发展的热点^[2],相关研究表明,BWB本身就提供了一个低噪声的布局特征,具有巨大降噪潜力。BWB布局的发动机通常安装在机身背部,宽大的中机身和后置动力系统提供了出色的发动机噪声遮蔽能力,发动机噪声不会通过机翼下表面反射,发动机引起的噪声排放得以降低^[2]。

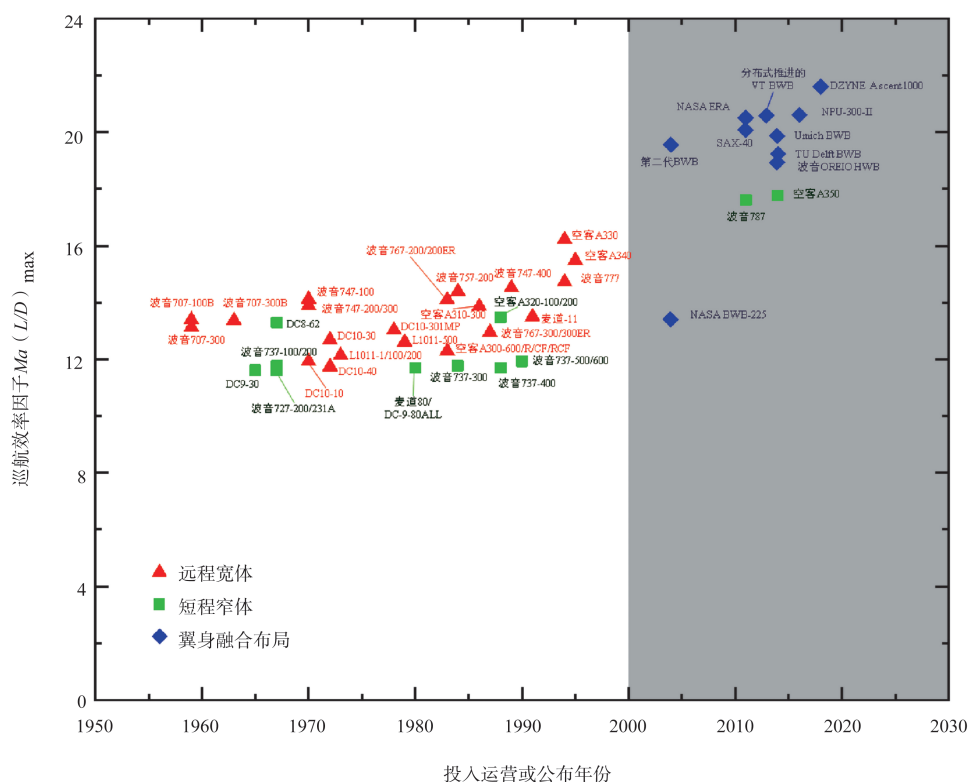


图20 常规布局民机和BWB布局民机巡航效率情况对比

Fig.20 Comparison of cruise efficiency between traditional configuration civil aircraft and BWB civil aircraft

表1 BWB布局飞机与A320性能对比

Table 1 Performance comparison between BWB aircraft and A320

性能	空客 A320	BWB 布局	增益/%
升阻比	18.14	22.17	22
航程/km	4360	4360	0
平衡跑道长度/m	2210	1380	-37.6
比燃料消耗率/((kg/s)/N)	0.017	0.017	0
最大起飞重量/kg	79816	73828	-7.5

3.1.3 载荷分布更加合理

如图21所示,常规布局客机的大部分惯性载荷集中在两个机翼之间狭窄的机身内,而机身本身又不产生升力,因此机翼要承受较大的剪力和弯矩。相反,BWB布局飞机的结构载荷沿着机翼横向分布,其中机身提供的升力就占了全机总升力的20%以上,不仅气动载荷分布和惯性载荷分布相对于常规布局更为合理,而且机翼承受的剪力和弯矩大约是常规布局的一半,从而有降低飞机结构重量的潜力。

3.2 挑战分析

3.2.1 纵向、航向操纵稳定性难度大

BWB布局纵向、航向操纵能力偏低,其质量分布和外

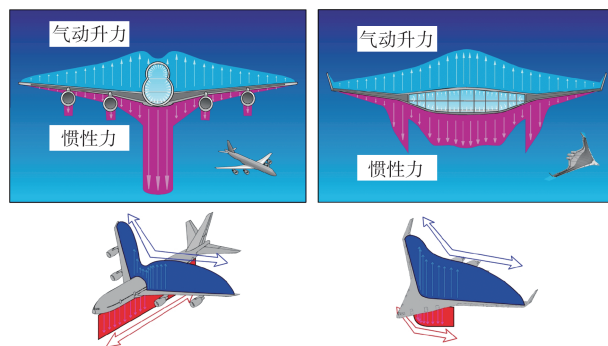


图21 常规布局与BWB布局的气动、惯性载荷分布

Fig.21 Comparison of aerodynamic, inertial pressure loads between TAW and BWB

形相比常规布局在纵向、航向上更加不稳定^[2]。目前诸如V形尾翼、延长机身等方法虽然能够提高BWB布局飞机的稳定性,但一定程度上会增加飞机整体重量、增大飞机阻力、降低巡航性能优势。如何在发挥BWB布局巡航性能优势下,提出满足纵向、航向操纵稳定性的设计方案仍是一大挑战。

3.2.2 宽短中机身客舱布局面临挑战

一方面,与常规“管”型机身相比,BWB布局飞机中机身

宽短,导致每排座位较多,当飞机进行滚转飞行时,外侧座椅的乘客将承受较大过载,将影响乘客的舒适度;另一方面,BWB布局由于需要中机身提供升力,其中机身设计必然遵循空气动力学原理,会在一定程度上约束客舱布局设计。对于大型干线翼身融合客机来说,每排座位在24座以上,飞机越大,外侧乘客承受的载荷越大,飞机滚转的加速度与客舱外视野的缺失效果相叠加,可能会使部分乘客感到不适;而对于中小型支线翼身融合客机来说,需要重新设计客舱布局方案以满足适航和气动要求,常规机身采用的“上层客舱+下层货舱”双层客舱布局或导致BWB布局方案的中机身过厚,降低方案气动效率。另外,翼身融合相对集中的客舱布局也对紧急逃生方案有较大影响,带来安全性挑战。

3.2.3 起降性能要求更高

下一代民机对起降性能提出了更高的要求,使BWB布局的起降性能面临较大挑战,需进一步提升。与常规布局相比,BWB布局的中机身相对较短,纵向配平能力有限,加之噪声排放标准提高,限制了传统高增升装置(如传统多段增升装置)的使用,导致现有多种BWB布局不容易满足下一代民机起降性能指标^[2]。NASA ERA计划的研究结果显示,其代表性方案的油耗、噪声、排放三项指标均可实现N+2发展目标,唯独起降场长指标未纳入其研究范畴,一定程度上暗示短期内尚难以满足起降指标。波音公司和NASA于2017年重启的X-48C验证机计划,重点研究BWB布局短距起降问题,也充分反映了该问题的复杂性和难度。为此,一是优化BWB布局设计,提高总体气动布局的起降特

性;二是设计小低头力矩的新型高增升系统;三是发展主动流动控制技术,配合高增升系统共同提高起降性能。

3.2.4 气动弹性问题更加严重

一是需要注意BWB布局的激波俯仰振荡问题。当飞机接近声速时,与常规布局飞机仅有机翼部分受到激波俯仰振荡相比,BWB布局的中机身上表面也可能会出现局部达到超声速的情况,其面临的激波俯仰振荡问题可能更为严重,在进行中机身设计过程中需要通过合理的气动外形设计规避。二是需要注意BWB布局的体自由度颤振问题。三是需要注意BWB布局的阵风响应问题。与常规布局飞机相比,BWB布局飞机阵风响应更加敏感,其中机身更容易受到阵风影响,进而直接影响乘客的舒适度。

3.3 关键技术

参考国内外相关学者的工作,本文对BWB布局涉及的主要关键技术/关键使能技术做了归纳和梳理,如图22所示。

BWB布局的关键技术涉及总体设计技术、气动设计技术、结构设计技术、控制系统设计技术、降噪技术、推进系统设计技术以及试验与试飞技术。BWB布局具有的气动效率高、潜在噪声屏蔽等优势,是机身、机翼、舵面、引擎高度集成的结果。因此,BWB布局飞机的设计具有多学科集成的特性,即需要通过多学科设计优化(MDO),在不同专业约束之间权衡,得出翼身融合设计的最优方案,这不仅需要开发全新的、适用于BWB布局的设计工具,也需要通过试验与试飞测试和验证积累设计数据,总结设计经验。



图22 BWB布局的主要关键技术/关键使能技术

Fig.22 Critical technologies/critical enabling technologies of BWB

(1) 总体设计技术

BWB布局的总体设计技术主要涉及座级与平面形状设计技术、客舱/货舱设计技术和整体结构设计与重量估算技术等。其中,座级设计决定了BWB飞机的尺寸、市场定位和平面形状,小、中、大座级的BWB布局特征均不相同^[2];BWB布局的客舱/货舱设计难度高于传统TAW布局,需要兼顾气动外形、动力系统以及操纵面布置等;整体结构设计重量估算技术主要面临结构设计和结构评估方法的挑战,BWB布局实际产品设计经验较少。

(2) 气动设计技术

BWB布局的气动设计技术主要涉及气动布局设计优化方法、增生装置设计技术、飞机-发动机集成设计技术、主动流动控制技术、边界层抽吸技术、气动载荷设计与优化和沟槽壁面技术等。由于BWB布局具有翼身融合程度较高、设计约束强、多学科耦合紧密等特点,传统TAW布局的气动设计经验并不能直接用于BWB布局气动设计,目前基于计算流体力学(CFD)的综合优化设计是BWB布局方案设计的主流方法^[2]。大部分BWB布局飞机的发动机一般布置在机身后部,有背撑式和嵌入式两种方式,可以与边界层抽吸技术相结合,进一步提升飞行性能。

(3) 结构设计技术

BWB布局的结构设计技术主要涉及全机结构方案设计技术、整机/部件重量评估技术、先进结构设计与分析技术、复材结构设计与制造技术、非圆截面客舱/货舱增压技术、拉挤杆缝合高效一体化结构设计(PRSEUS)^[28-29]等。其中,PRSEUS全复材结构概念通过高度集成的连接方式显著降低结构重量,相比早期复合夹层板方案能够减重28%,是一种具有工程应用前景的技术途径^[2]。

(4) 试验试飞技术

BWB布局的试验试飞技术主要涉及全机地面加载方案设计与试验技术、BWB布局缩比模型设计与加工技术、BWB布局风洞试验测试技术、飞行试验测试技术等,其技术难点在于缩比模型的相似原理。通过试验试飞技术,对BWB布局的稳定性、操纵性、控制算法、声学特性、气动特性等进行测试验证,推动技术成熟和向工程应用转化。

(5) 推进系统设计技术

BWB布局的推进系统设计技术主要涉及发动机布局设计技术(背撑式/嵌入式)、分布式推进系统与油电混合技术等。其中,发动机布局设计技术需要与BWB总体和气动设计方案一致;分布式推进系统与油电混合技术主要针对可能会采用混合动力/全电分布式推进的BWB布局方案。

(6) 控制系统设计技术

BWB布局的控制系统设计技术主要涉及舵面布置与控制策略设计技术、飞控系统设计和控制分配策略等,是BWB布局设计的重点和难点。由于BWB布局与传统TAW布局存在显著差异,不能直接沿用,其控制方案、舵面布局需要重新设计和优化。

(7) 降噪技术

BWB布局的降噪技术主要涉及机体布局设计降噪技术(机体遮蔽技术等)、发动机流道降噪修型和声学处理、起飞/进近航迹优化设计、部件降噪技术(静音制动、静音增升等)等。BWB布局降噪设计的核心在于尽可能提高飞机本体低速性能并发展更安静、高效的动力系统^[2]。

4 总结及展望

本文系统梳理了国内外民机BWB布局技术的发展历程和近年来的主要进展,分析了技术优势和挑战,并归纳了BWB布局的关键技术。展望未来,对后续研究提出以下三点建议:

(1) 全面开展BWB布局客机乘坐和飞行安全性研究

目前,美军B-2隐身轰炸机已服役多年,B-21隐身轰炸机也于2022年12月2日公布,两型隐身轰炸机均采用翼身融合无尾布局。由于客机需要同时满足安全、经济、环保、舒适及适航符合性等要求^[2],考虑到BWB布局可能会存在的乘客安全性(如逃生方案)和舒适性(如滚转载荷过大)的问题,应在现役军用BWB飞机基础上,借鉴军机经验,加强乘客逃生、BWB飞行控制等客舱安全和飞行安全相关技术攻关,尽快提高技术成熟度,加速发展BWB布局客机。

(2) 总体布局设计仍需进一步收敛

常规“管-翼”布局民机经过几十年的探索和优化,已经在气动外形、系统部件布局方案上充分收敛,不同座级飞机分别探索出近乎最优的布局方案。例如,现役干支线民用客机大多采用发动机两侧机翼吊装布局。但对于BWB布局来说,其针对不同座级飞机的气动外形、系统部件布局方案仍需进一步收敛。一方面,通过预先研究进一步收敛的总体布局优势方案将为型号探索更确定的初始设计状态;另一方面,随着总体布局方案的收敛,结构设计和重量估算能尽早介入,积累设计和分析经验,加速BWB布局飞机的型号研制。

(3) 运营的适用性仍需细致评估

一方面,BWB布局技术的应用会带来新的项目风险和适航挑战,也面临起降、近进场航迹不适应,机场设备不兼

容, 维保服务不匹配等具体问题, 这些问题和挑战可能成为 BWB 布局飞机投入运营的障碍; 另一方面, 波音、空客、商飞等公司当前和今后一段时间推出的新机型/升级机型仍然是“管一翼”常规布局飞机, 其配套服务和管理是围绕常规布局飞机设置的, 这些飞机很可能服役到 2050 年, 也会挤压 BWB 布局民机的市场占比。另外, BWB 布局飞机的广泛应用需要全球民航业合力共同推动, 也是各大航空制造商的竞争高点, 在合作与竞争环境中的研发进程也最终决定了 BWB 布局飞机真正问世的时间。

AST

参考文献

- [1] Okonkwo P, Smith H. Review of evolving trends in blended wing body aircraft design[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2016, 82: 1-23.
- [2] 王刚, 张彬乾, 张明辉, 等. 翼身融合民机总体气动技术研究进展与展望[J]. *航空学报*, 2019, 40 (9): 623046.
Wang Gang, Zhang Binqian, Zhang Minghui, et al. Research progress and prospect for conceptual and aerodynamic technology of blended-wing-body civil aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40 (9): 623046. (in Chinese)
- [3] 何开峰, 毛仲君, 汪清, 等. 缩比模型演示验证飞行试验及关键技术[J]. *空气动力学学报*, 2017, 35 (5): 671-679.
He Kaifeng, Mao Zhongjun, Wang Qing, et al. Demonstration and validation flight test of scaled aircraft model and its key technologies[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2017, 35(5): 671-679. (in Chinese)
- [4] Chen Zhenli, Zhang Minghui, Chen Yingchun, et al. Assessment on critical technologies for conceptual design of blended-wing-body civil aircraft[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(8): 1797-1827.
- [5] 夏明, 巩文秀, 郑建强, 等. 欧美翼身融合大型民机方案综述[J]. *民用飞机设计与研究*, 2021 (3): 123-134.
Xia Ming, Gong Wenxiu, Zheng Jianqiang, et al. A review of blended-wing-body for large civil aircraft of Europe and America[J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2021 (3): 123-134. (in Chinese)
- [6] Liebeck R H. Design of the blended wing body subsonic transport[J]. *Journal of Aircraft*, 2004, 41(1): 10-25.
- [7] Nickol C L, Haller W J. Assessment of the performance potential of advanced subsonic transport concepts for NASA's environmentally responsible aviation project[C]. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2016: 1030.
- [8] Hooker J R, Wick A T, Hardin C J. Commercial cargo derivative study of the advanced hybrid wing body configuration with over-wing engine nacelles[R]. NASA/CR-2017-219653, 2017.
- [9] Martin Hepperle. The VELA project[Z]. DLR, 2005.
- [10] NACRE. New aircraft concepts research [EB/OL]. (2022-05-25). <https://cordis.europa.eu/project/id/516068>.
- [11] ACFA. Active control for flexible 2020 aircraft[EB/OL]. (2019-07-16). <https://cordis.europa.eu/project/id/213321>.
- [12] AGILE. Aircraft 3rd generation MDO for innovative collaboration of heterogeneous teams of experts[EB/OL]. (2015-04-24). <https://cordis.europa.eu/project/id/636202>.
- [13] AGILE. AGILE 4.0[EB/OL]. (2019-05-06). <https://cordis.europa.eu/project/id/815122>.
- [14] ENABLEH2. ENABLING cryogenic hydrogen based CO₂ free air transport[EB/OL]. (2018-05-18). <https://cordis.europa.eu/project/id/769241>.
- [15] Smith H. Advanced blended wing body high capacity airliner BW-11 project specification[D]. England: Cranfield University, 2011.
- [16] Gauvrit-Ledogar J, Defoort S, Tremolet A, et al. Multidisciplinary overall aircraft design process dedicated to blended wing body configurations[C]. 2018 Aviation Technology, Integration and Operations Conference, 2018: 3025.
- [17] Bolsunovsky A L, Buzoverya N P, Chernyshev I L, et al. Arrangement and aerodynamic studies for long-range aircraft in "Flying wing" layout[C]. 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2014.
- [18] Dubovikov E, Fomin D, Guseva N, et al. Manufacturing aspects of creating low-curvature panels for prospective civil aircraft[J]. *Aerospace*, 2019, 6(2): 18.
- [19] Page M A, Smetak E J, Yang S L. Single-aisle airliner disruption with a single-deck blended wing-body[C]. 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2018.
- [20] Yang S, Page M, Smetak E J. Achievement of NASA new aviation horizons n+2 goals with a blended-wing-body x-plane

- designed for the regional jet and single-aisle jet markets[C]. 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018: 521.
- [21] DZYNE Technologies. DZYNE technologies[EB/OL]. (2022-04-10). <https://www.dzynetech.com/>.
- [22] Pedro D, Bravo-M, Fernando M, et al. Unconventional aircraft for civil aviation: A review of concepts and design methodologies[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2022, 131: 100813.
- [23] Arisa G. What it will be like flying on Airbus' blended wing MAVERIC aircraft[EB/OL]. (2020-02-11). <https://www.forbes.com/sites/marisagarcia/2020/02/11/what-it-will-be-like-flying-on-airbus-blended-wing-maveric-aircraft/?sh=15be3d9a6526>.
- [24] Daher-Safran-Airbus. EcoPulse: Defining the future of hybrid-electric aviation[EB/OL]. (2022-04-05). <https://www.daher.com/en/ecopulse/>.
- [25] TRAN Committee. Investment scenarios and roadmaps to achieve the Green Deal targets by 2050[R]. PE 699.651, 2022.
- [26] Reist T A, Zingg D W. Optimization of the aerodynamic performance of regional and wide-body-class blended wing-body aircraft[R]. AIAA-2015-3292, 2015.
- [27] Ammar S, Legros C, Trépanier J Y. Conceptual design, performance and stability analysis of a 200 passengers blended wing body aircraft[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 71: 325-336.
- [28] 王凯剑, 张睿, 李岩. 翼身融合客机 PRSEUS 壁板参数识别研究与优化设计[J]. *航空科学技术*, 2021, 32 (5): 44-53. Wang Kaijian, Zhang Rui, Li Yan. Parameters identification research and optimization design of PRSEUS panel in blended-wing-body civil aircraft[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32 (5): 44-53. (in Chinese)
- [29] 董立君, 孙伟, 张永杰, 等. 基于 PRSEUS 结构的翼身融合布局机身结构优化设计[J]. *航空科学技术*, 2023, 34 (3): 49-57. Dong Lijun, Sun Wei, Zhang Yongjie, et al. Optimization design of blended-wing-body layout rear fuselage based on PRSEUS structure[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34 (3): 49-57. (in Chinese)

Analysis and Prospect of Blended-Wing-Body Configuration Technology Development of Civil Aircraft

Sun Yukai, Wang Yuanyuan, Cheng Wenyan, Wang Miaoxiang, Yang Min

Aviation Industry Development Research Center of China, Beijing 100029, China

Abstract: The increasing severity of energy and environmental issues has put forward higher requirements for the rapidly developing global aviation industry. The Blended-Wing-Body (BWB) configuration is expected to become one of the practically solutions for future civil aircraft due to its advantages such as high cruise efficiency and low flight noise, which has attracted widespread attention worldwide. This paper briefly reviews the development process and main progresses of BWB configuration development around the world. The advantages and challenges of BWB are analyzed. The critical technologies are summarized. The conclusion and future work are proposed that the design solution of BWB civil aircraft configuration needs to be further converged, as well as the prospects of the business and the market need to be carefully evaluated.

Key Words: BWB; subsonic airliner; aircraft design; aerodynamic shape; large civil aircraft