

# 鸭翼弦向吹气对 BWB 飞机气动特性的影响

袁昌运<sup>1</sup>, 夏明<sup>1</sup>, 高维成<sup>2</sup>, 石伟峰<sup>1</sup>, 巩文秀<sup>1</sup>, 袁豪谦<sup>1</sup>

(1.中国商用飞机有限责任公司 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211;  
2.哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**为更好发挥鸭翼的增升抬头效果,对采用鸭翼上表面弦向吹气技术的翼身融合(blended-wing-body, BWB)布局飞机开展计算分析,给出不同迎角及吹气动量系数下的数值模拟结果,分析了鸭翼弦向吹气对 BWB 飞机的流动影响机理,研究了吹气动量系数及弦向吹气位置对全机低速气动特性的影响。吹气前后的计算结果表明,通过在鸭翼上表面布置弦向吹气装置,可显著改变鸭翼表面流动形态,扩大鸭翼上表面负压区域,增大负压峰值,从而提高鸭翼升力,降低 BWB 飞机低速起降的配平和抬头操纵难度,且吹气动量系数越高,增升抬头效果越明显。随着吹气弦向位置向后移动,鸭翼及全机升力系数逐渐增加然后降低,存在一个最佳的弦向吹气位置范围。该技术可直接改善飞机流场,起到增升抬头的作用,对 BWB 飞机的发展和工程应用具有一定的理论参考价值。

**关键词:**翼身融合;鸭翼;弦向吹气;气动特性;数值模拟

中图分类号:V221+.3

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2025)01-0024-07

翼身融合布局(blended-wing-body, BWB)由于其气动效率高的特点,近年来受到国内外研究人员的广泛关注,被认为是最有可能替代传统布局的创新布局方案<sup>[1-5]</sup>。翼身融合布局具有高度融合的宽短扁机身,且由于平尾的取消带来了纵向控制能力不足的问题,尤其是低速起降时,低头力矩的配平压力较大,常伴有较大的升力损失。通过安装近距鸭翼,可缓解翼身融合布局飞机低速起降抬头力矩不足的问题<sup>[6-8]</sup>,研究表明,设计合理的鸭翼可产生20%~35%的抬头力矩增量<sup>[9]</sup>,提升可用升力系数范围,降低 BWB 布局纵向配平难度。

为更好地发挥鸭翼增升抬头效果,国内外研究人员对鸭翼主动流动控制技术开展了相应研究<sup>[10-12]</sup>。目前对鸭翼的主动控制技术研究主要是鸭翼展向吹气技术,刘杰、刘沛清等<sup>[13-15]</sup>针对带近距耦合鸭翼的三角翼布局,开展了对鸭翼沿展向吹气的数值模拟与试验分析。但针对鸭翼弦向吹气,尤其是安装在 BWB 构型上的鸭翼弦向吹气技术,

国内外相关研究较少,随着各国科研机构对 BWB 构型研究程度的加深和工程化进度的加快,有必要对鸭翼弦向吹气主动控制技术开展预先探索工作。

鸭翼弦向吹气是指在鸭翼上表面某弦向位置全展长范围内,沿鸭翼弦长方向,吹出射流,给附面层注入能量,增加鸭翼上表面高负压区范围和负压峰值,从而达到增强鸭翼增升抬头的效果。

本文对某安装有鸭翼的 BWB 构型开展鸭翼弦向吹气的数值模拟,分析了鸭翼弦向吹气能够增加升力系数和抬头力矩的流动机理,进一步给出了吹气动量系数与气动力之间的变化关系,确定了鸭翼最佳弦向吹气位置。

## 1 计算模型及方法

### 1.1 计算模型

BWB 飞机中央升力体机身和翼身融合段通过适当修形以满足客货舱布置初步需求,外翼段采用超临界翼型,前缘后掠角为 40°。机头附近安装有前缘后掠角为 40°、展弦比为 4.15 的鸭翼,在鸭翼某弦向位置全展长范围内设计条状吹气出口,吹气口高度为当地翼型厚度的 10%,全机俯仰力矩参考点

取平均气动弦长 25% 的位置,带鸭翼的 BWB 外形及吹气出口位置如图 1 所示。

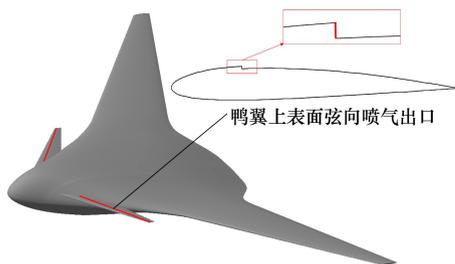


图 1 采用鸭翼弦向吹气技术的 BWB 飞机

### 1.2 数值计算方法及网格

本文主要分析鸭翼弦向吹气对 BWB 飞机低速纵向气动特性的影响,计算来流  $Ma = 0.23$ ,单位长度雷诺数  $Re = 5.36 \times 10^6$ ,利用 CFX 软件进行多迎角求解计算。

在计算过程中采用 SST 湍流模型,利用有限体积法对控制方程进行离散化。为保证精确模拟附面层内流动特征,计算时采用的非结构网格,在物面附近生成了各向异性的棱柱层网格,第 1 层网格密度约为 BWB 飞机平均气动弦长的  $10^{-5}$  倍。鸭翼及 BWB 本体均采用物面无滑移条件 (no-slip-wall),条状吹气出口采用流场入口 (inlet) 边界条件。经过网格无关性验证<sup>[9]</sup>,半模网格单元数约 2 000 万,为更加准确计算鸭翼吹气出口位置附近的流场变化,在网格生成过程中对吹气出口附近的网格进行加密,物面及空间计算网格如图 2 所示。

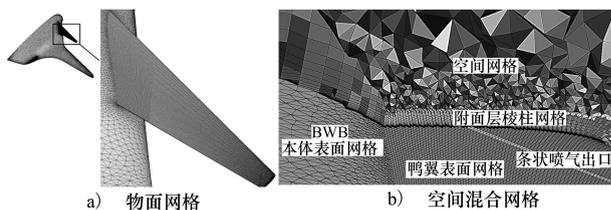


图 2 带鸭翼的 BWB 计算网格

### 1.3 算例验证

本文利用 AIAA 第 2 届高升力构型预测研讨会 (HiLiftPW-2) 上的 DLR-F11 无支架高升力构型<sup>[16-17]</sup>开展数值计算方法验证,所使用的非结构化计算网格约有 1 200 万网格单元,该高升力构型的试验模型及表面网格如图 3 所示。

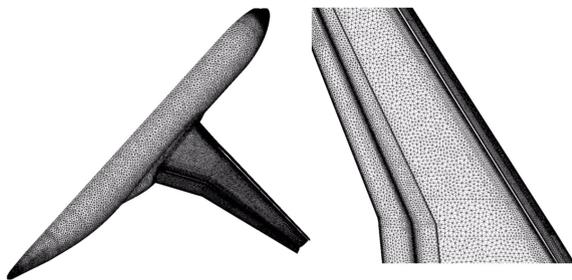


图 3 DLR-F11 模型及计算网格

数值计算工况  $Ma = 0.175$ ,迎角  $\alpha = -5^\circ \sim 25^\circ$ ,基于平均气动弦长的雷诺数  $Re = 15.1 \times 10^6$ ,图 4 给出了计算和试验升力系数  $C_l$  曲线以及升力-力矩 ( $C_l-C_M$ ) 曲线对比。观察可知,升力系数在线性段与风洞试验结果吻合良好,失速后升力系数下降趋势较风洞数据较为平缓,但计算得到的失速迎角和升力变化形态均吻合良好;力矩系数曲线与风洞试验结果在绝对数值上有 10% 左右差距,但在趋势上保持一致。总体而言本文所使用的数值计算方法具备与本研究相匹配的准确度,可用于 BWB 飞机低速纵向气动特性分析。

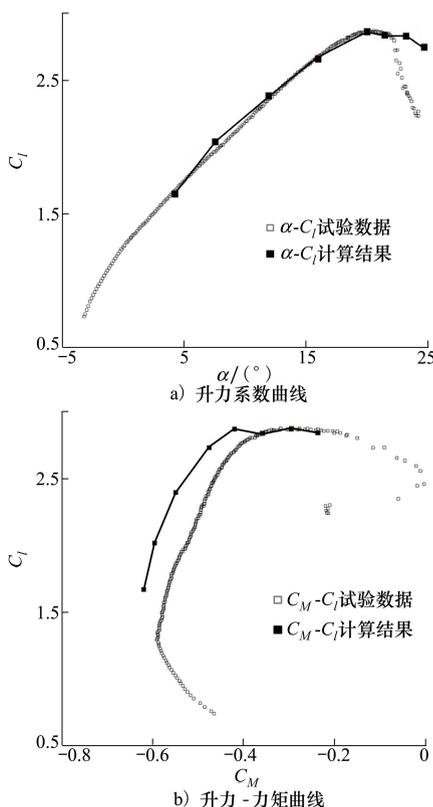


图 4 计算与试验<sup>[17]</sup>气动曲线对比

## 2 鸭翼弦向吹气影响分析

### 2.1 吹气强度影响

根据 Amitay 等<sup>[18]</sup> 的定义,引入吹气动量系数表征吹气强弱,吹气动量系数定义为

$$C_{\mu} = \frac{\dot{m}v_i}{1/2\rho v^2 S_c} \quad (1)$$

式中: $\rho$  为自由来流密度; $v$  为自由来流速度; $S_c$  为鸭翼参考面积; $\dot{m}$  为吹气口质量流量; $v_i$  为吹气速度,吹气动量系数与吹气速度对应关系如表 1 所示。

表 1 吹气速度对应的吹气动量系数

吹气速度 $v_i / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	吹气动量系数 $C_{\mu}$
100	0.063
150	0.135
200	0.230

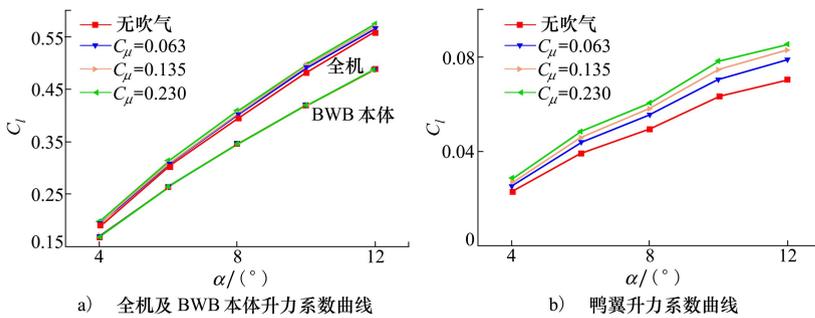


图 5 不同吹气动量系数下的升力系数曲线

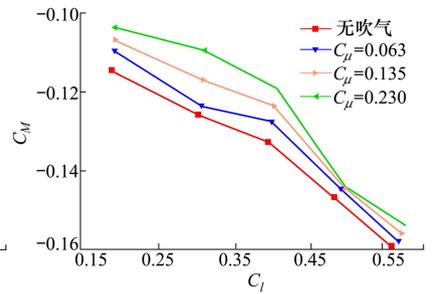


图 6 不同吹气动量系数下的全机俯仰力矩系数曲线

为更好地分析吹气对鸭翼附近流场的影响,图 7 给出了在迎角  $\alpha=4^\circ$  下,未吹气及不同吹气动量系数所对应的鸭翼上表面压力云图。可以看出,在未吹气情况下,受气流加速的影响,鸭翼上表面内侧出现较大范围的深色区域,即高负压区。随着吹气动量系数的增加,内侧高负压区域弦向范围略有收缩,

将吹气位置固定在鸭翼 25.0% 弦长处,分析吹气气动量系数分别为 0.063, 0.135 以及 0.230 下的气动特性变化规律。图 5 给出了不同吹气动量系数下,全机、BWB 本体以及鸭翼升力系数的变化曲线。本文的迎角研究范围处于民机起降的合理区间,处于升力线性段,基本没有分离或失速发生。在此迎角范围内,随着吹气动量系数的增加,BWB 本体升力系数基本保持不变,但鸭翼升力系数随着吹气动量系数增加而单调递增,受此影响,全机升力系数也随之增加。图 6 给出了对应的俯仰力矩变化,受到鸭翼升力增加的影响,全机俯仰力矩整体提升,BWB 低速起降的配平及抬头操纵难度降低。升力以及俯仰力矩的变化,均显示出该技术具有较好的增升和抬头效果。

但数值变化并不明显。观察鸭翼外侧压力分布,在未吹气(即  $C_{\mu}=0$ ) 时,外侧并未出现深色的高负压区域,随着  $C_{\mu}$  的逐渐增加,外侧前缘的深色区域逐渐变大,上表面负压区范围和负压峰值的增加,为鸭翼提供了更高的升力。

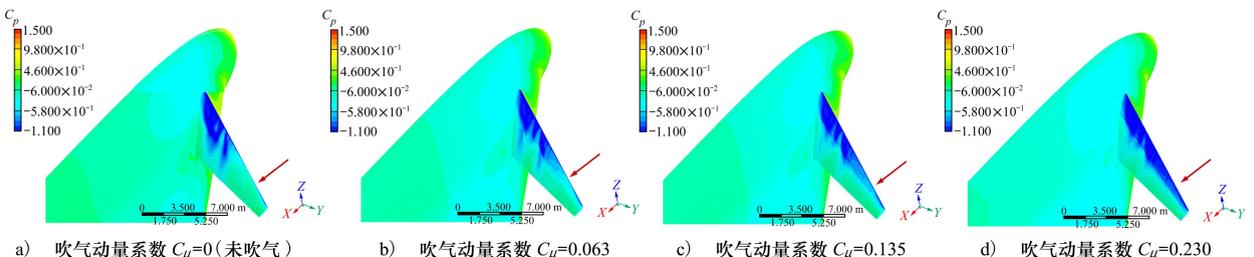


图 7 不同吹气动量系数下的表面压力云图( $\alpha=4^\circ$ )

图 8 给出了不同吹气动量系数下鸭翼 80% 半展

长截面处的压力分布,观察相同刻度下的云图分布

可明显看出,前缘高压区的范围以及前缘吸力峰

的峰值随着吹气动量系数的增加而逐渐增大。

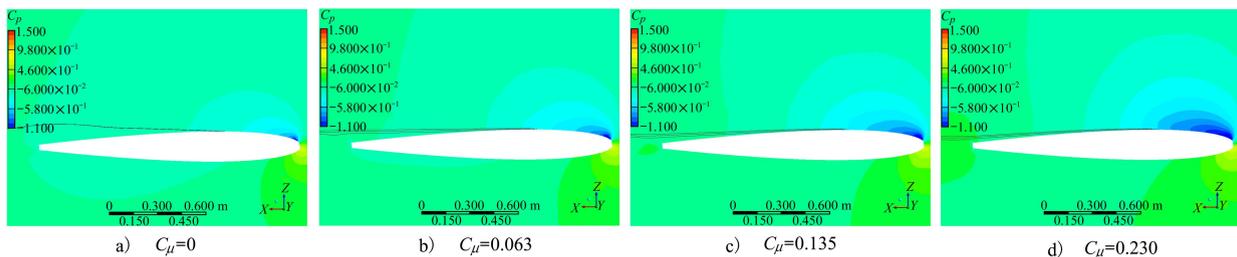


图 8 鸭翼 80%半展长处截面压力云图

图 9 给出了不同吹气动量系数下鸭翼 80%半展长位置截面处的压力系数分布,可以明显看出随着吹气动量系数增加,前缘压力系数的负压峰值迅速增加,对应的负压区覆盖范围也大幅增加,从而提升了鸭翼自身升力、全机升力和抬头力矩。表 2 给出了 80%半展长位置处的截面随着吹气动量系数的增加所引起的负压峰值变化量,在吹气动量系数为 0.063,0.135 及 0.230 情况下,负压峰值相对于未吹气分别提升了 44%,84%和 128%。

表 2 吹气对鸭翼前缘负压峰值的影响(80%半展长)

吹气动量系数 $C_{\mu}$	前缘负压系数峰值	变化比例/%
0	-0.43	
0.063	-0.62	44
0.135	-0.79	84
0.230	-0.98	128

### 2.2 吹气弦向位置影响

吹气口采用全展向设置,由鸭翼当地弦长比例定义其所处位置  $C_i$ ,表达式为

$$C_i = \frac{L}{C_{local}} \quad (2)$$

式中:  $L$  为吹气口距前缘距离;  $C_{local}$  为当地弦长。

固定吹气动量系数  $C_{\mu} = 0.230$ (对应吹气速度  $v_i = 200 \text{ m/s}$ ),研究 12.5% ~ 75.0% 当地弦长的不同吹气位置对 BWB 气动特性的影响。图 10 给出了  $\alpha = 4^\circ$  下,不同吹气位置的鸭翼表面压力分布,为便于对比,同时给出了未吹气时的压力分布。

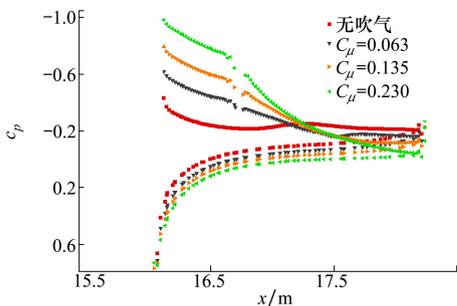


图 9 鸭翼 80%半展长处截面压力系数分布曲线

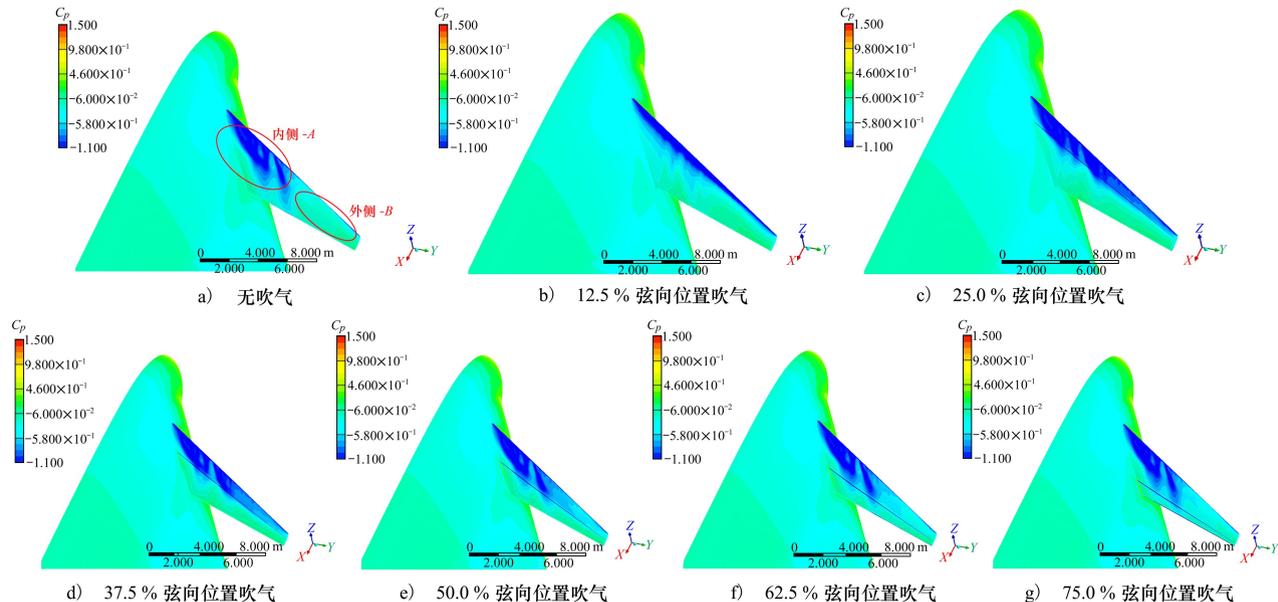


图 10 不同弦向位置吹气的表面压力分布

此处对鸭翼内侧和外侧的压力分布变化分别进行分析。

1) 观察内侧区域 A: 从图 10a) 可以看出, 鸭翼内侧在未吹气情况下高负压的区域覆盖了前缘约 30%~50% 的弦向范围; 观察图 10b), 在前缘 12.5% 弦向位置处施加吹气后, 负压区被限制在前缘至吹气口的范围, 相对于未吹气时降低了内侧负压覆盖面积; 图 10c)~10d) 也可观察出相同规律; 但随着吹气位置向后移动, 从图 10e)~10g) 可以看出, 内侧的负压分布形态基本与未吹气时的特征逐渐趋向一致。图 10 的压力分布变化表明, 吹气位置靠前的情况下, 内侧的高负压范围被限制, 基本保持在吹气口和鸭翼前缘之间, 但随着吹气位置的后移, 内侧的高负压区域逐渐扩大, 直至与未吹气时的负压分布形态一致。

2) 观察外侧区域 B: 从图 10a) 可以看出, 鸭翼在未吹气情况下, 外侧几乎不存在深色的高负压区域, 表明该区域负压数值较低; 图 10b)~10d) 显示, 在上表面施加吹气技术后, 外侧高负压区弦向范围逐渐扩大, 意味着外侧开始提供更多的升力; 从图 10d)~10g) 可以看出, 随着吹气口从 37.5% 弦向位置继续向后移动时, 鸭翼外侧的高负压弦向范围逐渐减小, 鸭翼外侧的负压增益效果逐渐降低, 当吹气口移动到 75.0% 弦向位置时, 外侧的负压分布特征相当于未吹气状态。

图 11 给出不同吹气位置处的全机升力系数, 该曲线呈现明显的递增-峰值-递减的过程, 升力增减与吹气所导致的鸭翼表面压力分布变化密切相关,

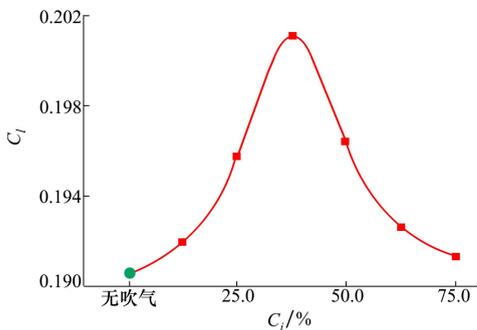


图 11 不同吹气位置的全机升力系数 ( $\alpha=4^\circ$ )

表明存在可实现最大升力增量的最佳吹气位置。各吹气位置对应的升力变化原因分析如下:

1) 吹气口位于 12.5% 弦向位置时, 相对于未吹气情况, 内侧高负压区域面积缩小, 外侧高负压区域面积增加, 二者相互抵消后, 升力依然有一定程度增加;

2) 吹气口位于 25.0% 以及 37.5% 弦向位置时, 相对于上一个吹气口位置, 内侧和外侧的高负压范围均有所增加, 因此升力继续升高;

3) 吹气口位于 50.0%~75% 弦向位置时, 内侧高负压区域范围相对于上一个吹气位置基本保持不变, 而外侧高负压区域范围开始收缩, 受此影响, 升力开始降低; 当吹气口在 75% 弦向位置时, 除了吹气口自身的高负压外, 鸭翼表面压力分布形态已经与未吹气时基本一致。

### 3 结论

针对某带鸭翼的 BWB 构型, 采用全展向范围内的弦向吹气技术, 研究不同吹气动量系数及吹气位置下的气动特性变化规律, 得到如下结论:

1) 处于一定弦向位置, 吹气技术可有效增加鸭翼外侧的高负压区范围及吸力峰大小, 从而提升鸭翼和全机升力, 并提供了一定的抬头力矩;

2) 吹气动量系数越大, 弦向吹气所产生的升力和抬头力矩增量越高, 在  $4^\circ$  迎角下, 吹气动量系数从 0.063 增加到 0.230, 与未吹气相比, 外侧典型截面负压吸力峰提升了 34%~98%, 鸭翼升力提升了 11.4%~19.5%;

3) 弦向吹气效果与吹气所处位置密切相关, 在内侧和外侧压力分布变化的共同作用下, 存在一个升力增量最大的最佳弦向吹气位置, 位于弦向 37.5% 位置附近。

需要注意的是, 本文研究仅限于升力系数线性段的迎角范围内, 下一步的工作是研究在更大迎角下, 弦向吹气技术对鸭翼脱离涡以及本体的气动特性影响。

### 参考文献:

- [1] GREITZER E M, BONNEFOY P A, DE LA ROSA BLANCO E, et al. N+3 aircraft concept designs and trade studies[R]. NASA/CR-2010-216794, 2010
- [2] GRAHAM W R, HALL C A, MORALES M V. The potential of future aircraft technology for noise and pollutant emissions

- reduction[J]. *Transport Policy*, 2014, 34: 36-51
- [3] ORDOUKHANI E, MADNI A M. Blended wing body architecting and design: current status and future prospects[J]. *Procedia Computer Science*, 2014, 28: 619-625
- [4] 夏明, 龚国敬, 黄涛, 等. 考虑客货舱布置约束的 BWB 机身剖面优化设计[J]. *航空计算技术*, 2019, 49(4): 27-30  
XIA Ming, GONG Guojing, HUANG Tao, et al. Optimal design on BWB body profile under cabin and cargo arrangement constraints[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2019, 49(4): 27-30 (in Chinese)
- [5] 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
- [6] ALI M Z, KUNTJORO W, WISNOE W, et al. Aerodynamics analysis on the effect of canard aspect ratio on blended wing body aircraft using CFD simulation[J]. *Materials Science and Engineering*, 2020, 834(1): 012015
- [7] SANIM F, IMISI-OLUWA A, MAT S, et al. Experimental studies of the effect of rectangular-shaped canard on a generic blended wing body (BWB)[C]//*International Seminar on Aeronautics and Energy*, Singapore, 2022: 3-17
- [8] KAPSALIS S, BLIAMIS C, KAPAROS P, et al. Parametric investigation of canards on a flying wing UAV using the Taguchi method[J]. *Aerospace*, 2023, 10(3): 264
- [9] 夏明, 袁昌运, 巩文秀, 等. 鸭翼对 BWB 飞机低速纵向气动特性的影响[J]. *空气动力学学报*, 2020, 38(5): 1004-1010  
XIA Ming, YUAN Changyun, GONG Wenxiu, et al. Low-speed longitudinal aerodynamic influence of canard on BWB aircraft [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2020, 38(5): 1004-1010 (in Chinese)
- [10] 刘沛清, 易渊. 鸭式布局大迎角复杂涡系干扰与控制技术[J]. *空气动力学学报*, 2020, 38(6): 1034-1046  
LIU Peiqing, YI Yuan. Vortex interaction mechanism and control technology of canard configuration at high angle of attack[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2020, 38(6): 1034-1046 (in Chinese)
- [11] GARCÍA-ORTIZ J H, BLANCO-RODRÍGUEZ F J, PARRAS L, et al. Experimental observations of the effects of spanwise blowing on the wingtip vortex evolution at low Reynolds numbers[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2020, 80: 133-145
- [12] MEYER J, SEGNER A. Effects of periodic spanwise blowing on delta-wing configuration characteristics[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(4): 708-715
- [13] 刘杰, 刘沛清, 曹硕. 非共面近距耦合鸭式布局鸭翼展向脉冲吹气增升特性[J]. *实验流体力学*, 2011, 25(4): 37-41  
LIU Jie, LIU Peiqing, CAO Shuo. Lift-enhancement of canard-spanwise pulsed blowing of non-coplanar close-coupled canard configuration[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2011, 25(4): 37-41 (in Chinese)
- [14] 刘沛清, 樊文博, 曹硕. 近耦合鸭式布局鸭翼展向吹气涡控技术数值模拟研究[J]. *飞机设计*, 2010, 30(5): 7-11  
LIU Peiqing, FAN Wenbo, CAO Shuo. Numerical simulation on vortex-control technology of canard-spanwise blowing of close-coupled canard wing configuration[J]. *Aircraft Design*, 2010, 30(5): 7-11 (in Chinese)
- [15] 刘沛清, 温瑞英, 张国伟. 鸭翼展向吹气涡控技术增升特性研究[J]. *实验流体力学*, 2006, 20(3): 39-44  
LIU Peiqing, WEN Ruiying, ZHANG Guowei. A study on lift enhancement with vortex control technique of canard-spanwise blowing[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2006, 20(3): 39-44 (in Chinese)
- [16] 王运涛. HiLiftPW-1~HiLiftPW-3 数值模拟技术综述[J]. *航空学报*, 2018, 39(7): 021997  
WANG Yuntao. An overview of HiLiftPW-1 to HiLiftPW-3 numerical simulation technologies[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(7): 021997 (in Chinese)
- [17] RUMSEY C L, SLOTNICK J P. Overview and summary of the second AIAA high-lift prediction workshop[J]. *Journal of Aircraft*, 2015, 52(4): 1006-1025
- [18] AMITAY M, SMITH D R, KIBENS V, et al. Aerodynamic flow control over an unconventional airfoil using synthetic jet actuators[J]. *AIAA Journal*, 2001, 39(3): 361-370

# Effect of canard-chordwise blowing on the aerodynamic characteristics of blended wing body aircraft

YUAN Changyun<sup>1</sup>, XIA Ming<sup>1</sup>, GAO Weicheng<sup>2</sup>, SHI Weifeng<sup>1</sup>,  
GONG Wenxiu<sup>1</sup>, YUAN Haoqian<sup>1</sup>

(1.Beijing Aircraft Technology Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China, Beijing 102211, China; )  
(2.School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** To enhance the effect of the canard increasing lift and pitching moment coefficient of the blended-wing-body(BWB) aircraft, numerical simulation is adopted to analyze the effect of the canard-chordwise blowing on the low-speed aerodynamic characteristics of BWB configuration. By presenting the results of blowing momentum coefficient at different angles of attack, the flow mechanism of chordwise blowing device's influence on the lift and pitching moment coefficient is analyzed, followed by investigating the effect of the blowing momentum coefficient and chordwise blowing position on the low-speed aerodynamic characteristics. The numerical simulation results show that by arranging a chordwise blowing device on the upper surface of the canard, the flow pattern of canard can be significantly improved, enlarging negative pressure region on the upper surface of canard and increasing the peak negative pressure, resulting in an increase in lift coefficient of the canard and a decrease on the difficulty of the longitudinal trimming and maneuvering in the takeoff and landing of the BWB aircraft. Increasing the blowing momentum coefficient produces more favorable interference. As the chordwise blowing position moves backwards, the canard and the whole aircraft lift coefficient increases gradually and then decreases, where an optimal range of chordwise blowing position can be reached. The results of the article show that the chordwise blowing device directly improves the flow field of the canard and increases the lift and pitching moment coefficient, which provides theoretical support for the advanced research of BWB configuration aircraft.

**Keywords:** blended-wing-body; canard; chordwise blowing; aerodynamic characteristics; numerical simulation

**引用格式:**袁昌运, 夏明, 高维成, 等. 鸭翼弦向吹气对 BWB 飞机气动特性的影响[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(1): 24-30

YUAN Changyun, XIA Ming, GAO Weicheng, et al. Effect of canard-chordwise blowing on the aerodynamic characteristics of blended wing body aircraft[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2025, 43(1): 24-30 (in Chinese)