

文章编号:1674-8190(2019)02-147-07

# 共流吹气技术发展与应用研究

张明昊,袁昌盛,田振东,杨涛,王登科

(西北工业大学 航空学院,西安 710072)

**摘要:** 共流吹气(CFJ)技术是一种新型流动控制技术,该项技术在增升减阻及改善失速特性等方面都表现出明显的优势。本文回顾了CFJ技术的发展历史及国内外的研究情况,论述了这项技术的增升减阻机理,探讨了这项技术的理论研究价值,分析了这项技术的应用和典型应用研究现状,总结了这项技术在飞行器设计方向上的四项关键设计问题:飞行器综合设计技术、设计分析及优化方法、元件优化布置技术和飞行控制设计技术。

**关键词:** 飞行器设计;流动控制技术;环量控制;CFJ技术

中图分类号: V211.3

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.02.001

## Research on Development and Application of the Coflow Jet Technology

Zhang Minghao, Yuan Changsheng, Tian Zhendong, Yang Tao, Wang Dengke

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The coflow jet (CFJ) technology, as a new type of integrated flow control technology, has shown potentials in lift enhancement and drag reduction, stall characteristics improvement. The history of the CFJ technology and the research situations at home and abroad is reviewed. The mechanism of CFJ technology's abilities in lift enhancement and drag reduction is discussed, the theoretical values are also investigated. The research status and typical applications are analyzed. The key issues of this technology in aircraft design, such as aircraft integrated design method, design and analysis technology, component layout strategy and flight control system, are summarized.

**Key words:** aircraft design; flow control technology; circulation control; CFJ technology

## 0 引言

近年来,航空飞行器的应用日益广泛,人们也对其提出越来越高的要求。欧洲航空界开展了“2050航空发展展望”等计划<sup>[1]</sup>;美国的“新一代航空运输系统(NextGen)计划”中对未来民用飞机在油耗、噪声、污染排放和起降性能等方面制定了目标<sup>[1]</sup>,我国也在民用飞机科研“十三五”规划中对飞行器的性能提出了类似的要求。

为了应对未来航空业的需求,研究者们不仅开发了实现显著提升现有飞行器性能的多种流动控制技术<sup>[2-4]</sup>,还对现有技术不断进行优化和研究<sup>[5-7]</sup>。CFJ技术作为一种新兴的流动控制技术,具有较强的发展潜力。

本文介绍CFJ技术的研究历史及进展、CFJ技术的增升减阻机理以及CFJ技术的应用研究现状,并分析这项技术在飞行器设计中的关键设计问题,以促进对该项技术的研究和应用。

收稿日期:2018-05-25; 修回日期:2018-09-12

通信作者:袁昌盛,yuanchangsheng@nwpu.edu.cn

引用格式:张明昊,袁昌盛,田振东,等.共流吹气技术发展与应用研究[J].航空工程进展,2019,10(2):147-153,186.

Zhang Minghao, Yuan Changsheng, Tian Zhendong, et al. Research on development and application of the coflow jet technology [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(2): 147-153, 186. (in Chinese)

## 1 环量控制技术的应用历史及进展

环量控制技术可在增升方面显示出优秀的性能,该项技术的工程应用源于 1976 年。当年西弗吉尼亚大学为了探索环量控制技术的工程应用效果,设计了采用如图 1 所示的机翼截面形式的验证机,并开展飞行试验验证了环量控制技术的增升效果<sup>[8]</sup>。



图 1 环量控制演示飞行器的机翼截面示意图

Fig. 1 Schematic of trailing edge coanda configuration of flight demonstrator

1985 年, N. Wood 等<sup>[9]</sup>利用实验模型(如图 2 所示)研究 Coanda 表面局部半径、射口尺寸等参数对环量控制翼型的作用效果,他认为射流与附面层掺混可以推迟附面层分离并使驻点后移而增强环量控制效果。J. Abramson 等<sup>[10]</sup>也在同一时期对来流速度、射流出口高度、射流动量系数等方面展开了研究。

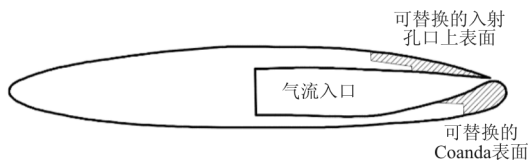


图 2 Wood 采用的环量控制装置简图

Fig. 2 Circulation control device applied by Wood

20 世纪 80 年代后期, G. Shrewsbury<sup>[11]</sup>首次使用 RANS 方法对环量控制技术进行研究, Liu Y 等<sup>[12]</sup>和 J. Slomski 等<sup>[13]</sup>也用该方法对环量控制技术进行研究。

随着加工技术及控制技术的发展,环量控制技术越来越多地应用在飞行器设计方案上,例如英国在 2006 年试飞了使用环量控制技术和射流推力矢量技术取代传统舵面进行飞行姿态控制的 DEMON 无舵面无人机,其后继机型 MAGMA 也在 2017 年 12 月进行了类似的飞行测试<sup>[14]</sup>。随着 N

+3 计划的推行, NASA 也开展了针对环量控制技术在民用飞机上的应用效果研究,并利用缩比模型 AMELIA 开展了风洞实验研究<sup>[15]</sup>。

在上述的应用过程中,传统环量控制技术暴露出如阻力过大、使用不灵活、整体效率不高等缺陷,对此, G. Zha 等<sup>[16-23, 24, 25]</sup>提出性能相比传统环量控制技术有显著提升的 CFJ 技术,并对这项技术开展多角度的研究。这项技术与传统环量控制技术的对比如表 1 所示。

表 1 传统环量控制技术与 Coflow Jet 技术的对比

Table 1 Comparison between traditional circulation control technology and coflow jet technology

名称	传统环量控制技术	CFJ 技术
基本原理	在后缘(尾缘)处利用射流产生的柯恩达效应增强翼型的环量。	利用射流来激励主流克服不利的压力梯度,增加环量并保持高攻角附着。
升力特性	最大升力系数值 7.6	已实现升力系数为 12.6
能源效率	阻力相对大 <sup>[26]</sup> ,同时会对推进等辅助系统提出相对高要求 <sup>[27]</sup>	可在一定条件下产生“负阻力,其运作原理使其对其他系统要求相对小 <sup>[28]</sup> ”
布置要求	需要设置引气装置	可以分布布置

CFJ 技术的实现原理(如图 3 所示)是后缘吸入少量质量流量并由微型压缩机加压,然后在前缘与主流相切的方向上射出实现控制机翼周围的流场的目标。

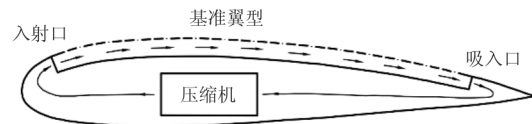


图 3 CFJ 技术的实现原理

Fig. 3 The realization principle of CFJ technology

在工程应用中,入射口和出射口的绝对尺寸和相对尺寸、绝对位置和相对位置及射流的绝对速度和相对速度、基准翼型的形式等设计要素会对应用了这项技术的翼型的升力特性、阻力、力矩特性、失速特性等产生较大影响<sup>[29-30]</sup>。此外,展向分布形式<sup>[31]</sup>和使用策略<sup>[21]</sup>对应用了 CFJ 技术的装置的气动特性、噪声特性产生的影响也不容忽略。相关

研究表明这项技术若能被合理设计和使用将会显著提升相应飞行器的性能<sup>[23]</sup>,故该项技术的发展得到 DARPA、NASA、空军科学研究办公室 (AFOSR)、陆军研究办公室 (ARO)、CIRA 等机构的支持。

## 2 CFJ 技术的增升减阻机理

在作用机理的研究方面, G. Zha 等利用 DES<sup>[32]</sup>、LES<sup>[33]</sup> 等数值仿真与实验的方法<sup>[19-20]</sup> 开展研究,刘沛清等<sup>[34]</sup> 也对该技术的机理进行探讨。

采用 CFJ 技术的翼型在使用状态下通常具有比基准翼型大很多的升力系数,这类翼型的典型速度分布如图 4 所示,可以看出:除了在入射点和吸入点出现尖峰外,翼型上下表面间的速度差较基准翼型显著增大,进而产生更大的升力。

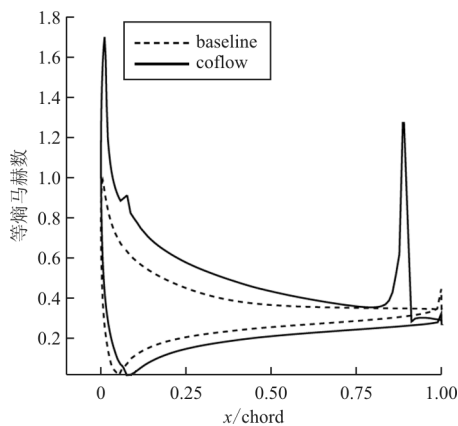


图 4 典型的 CFJ 翼型压力分布图

Fig. 4 Typical pressure profile of CFJ airfoil

从流场结构的角度分析,采用 CFJ 技术的翼型前缘的流场特征如图 5 所示<sup>[23]</sup>。

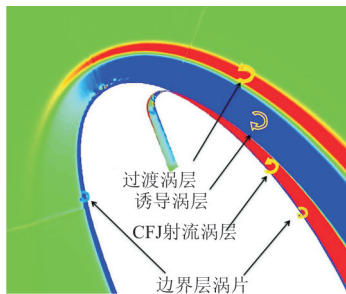


图 5 CFJ6421-SST016-SUC053-INJ009 翼型在  $C_{\mu}=0.35$  且  $AoA=70^{\circ}$  时的涡量云图

Fig. 5 Vorticity contour at  $C_{\mu}=0.35$  and  $AoA=70^{\circ}$  for the CFJ6421-SST016-SUC053-INJ009 airfoil

从图 5 可以看出:在翼型的前缘存在 4 个涡层,翼型表面附近的是边界层涡片,第二层是由速度相对较高的 CFJ 射流在入射口下游产生的逆时针的 CFJ 射流涡层,该涡流层会引起绕前缘附近的气流转向形成第三层的顺时针的诱导涡层;第四层的过渡涡层则会将速度传递到较慢的外层中。CFJ 射流为四个涡层提供抗逆压梯度的能量,上述四个涡层中顺时针旋涡可增加环量并产生更强的增升效果。

CFJ 技术较传统环量技术可以显著降低阻力甚至产生推力<sup>[23]</sup>,该种特性可以用下述两种机理来分析:从压力分布的角度,较大的环量会产生较大的前缘吸力,在一定的条件下前缘的负压区可以产生向前的吸力;从流场特征的角度,射流和主流之间的湍流混合和夹带形成的混合射流可以填补尾迹并减少部分速度损失,当速度损失逆转时就会产生推力。某 CFJ 翼型的阻力特性随攻角变化的特性如图 6 所示<sup>[25]</sup>,可见在条件下这类翼型可以产生较为明显的负阻力现象。

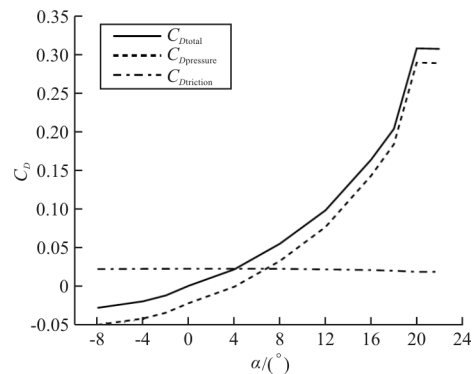


图 6 应用 CFJ 技术的翼型在阻力系数随攻角变化

Fig. 6 Drag characteristics of CFJ airfoil under different angle of attack

在三维层面上,CFJ 技术的作用机理中射流和主流之间的湍流扩散和混合增强能量的横向输送效应则较二维层面更加突出<sup>[29]</sup>,相关研究表明(如图 7 所示<sup>[30]</sup>)这些效应会对装置的三维气动特性和能量利用效率产生较大影响。

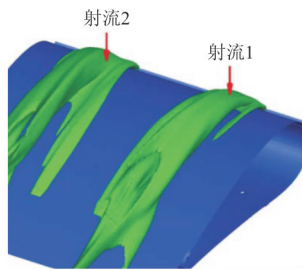


图 7 采用 CFJ 技术的机翼截面上湍流的扩散和混合过程  
Fig. 7 Diffusion and mixing process of turbulent flow on a wing section using the CFJ technology

此外,该技术因抑制分离能力较为突出,可以在攻角为  $70^\circ$  且动量系数  $C_\mu$  为 0.35 时可产生大小为 10.6 的升力系数<sup>[23]</sup>,该结果突破了式(1)给出的最大理论升力系数的限制。

$$C_{L,max} > 2\pi \left(1 + \frac{t}{c}\right) \quad (1)$$

这种情况下,CFJ 翼型后缘周围的流动不再满足 Kutta 条件。CFJ6421-SST016-SUC053-INJ009 翼型在  $C_\mu=0.35$  且  $AoA=70^\circ$  时在高攻角状态下的速度云图如图 8 所示,可以看出:翼型周围的高环量使驻点远离翼型表面并在后缘形成延伸的“虚拟体”以支撑具有超升力系数的翼型,可见  $C_{L,max}$  是强制 Kutta 条件的结果<sup>[35]</sup>,不违反由 Navier-Stokes 方程控制的物理定律。

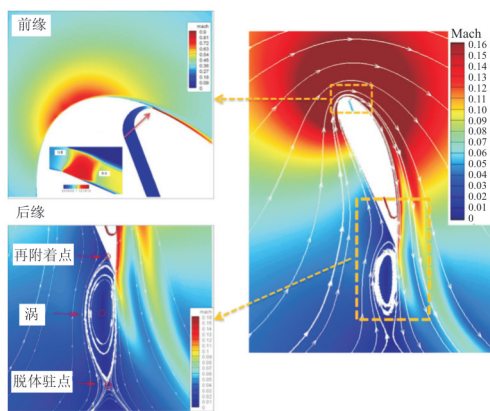


图 8 CFJ6421-SST016-SUC053-INJ009 翼型在  $C_\mu=0.35$  且  $AoA=70^\circ$  时在高攻角状态下的速度云图  
Fig. 8 Mach number contours and streamlines at  $C_\mu=0.35$  and  $AoA=70^\circ$  for the CFJ6421-SST016-SUC053-INJ009 airfoil

相关研究表明该类翼型的升力系数主要取决

于翼型周围流体能够从射流中吸收多少能量来克服逆压梯度以保持流动附着而不仅与翼型的几何形状有关<sup>[23]</sup>。可见对 CFJ 技术的研究可以将流体力学扩展到新的领域。

综上所述,CFJ 技术的独特机理能显著改善基准翼型的气动效率特性、失速裕度等方面的性能,此外该技术的运行原理可以保证整个系统具有较高的能量利用效率和使用的灵活性。翼型是飞机、风力涡轮机、螺旋桨、泵等装置中的基本元件,因此,该流动控制技术的研究成果可以扩展至众多系统中。

虽然现有大多数 CFJ 翼型实验中使用高压气罐与真空罐来实现吹气和吸气,但相关工程实践表明通过合理地设计可以实现将安装在实验装置中的独立压差源作为驱动器<sup>[24,36-37]</sup>。

### 3 CFJ 技术的应用研究现状

环量控制技术的研究通常需要与工程应用案例相结合。本文根据具体的使用策略与平台的任务特性选取三个典型的研究对象进行分析。

#### 3.1 电动通用航空飞行器的机翼

电动通用航空飞行器主要挑战在于现有电池能量密度限制该类飞行器的性能<sup>[21]</sup>。

Coflow Jet 公司针对上述问题对采用 CFJ 技术的 4 个座电动通用航空飞行器(如图 9 所示)开展深入研究<sup>[21]</sup>并对其他可采用 CFJ 技术的飞行器进行一定程度的探索,CFJ 技术的引入使得机翼的整体气动效率更高,进而使飞机具有的更大的航程和更好的环保特性,同时 CFJ 技术提供的高升力系数使这种飞行器具有更好的飞机适应性。

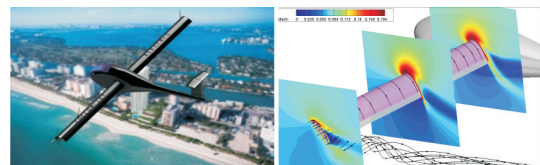


图 9 采用 CFJ 技术的通用航空飞行器电动飞机  
Fig. 9 Electric general aviation aircraft using CFJ technology

上述飞行在机翼中需要布置分布式流动控制



系统<sup>[36,38]</sup>,一种可行的装置形式如图 10 所示。

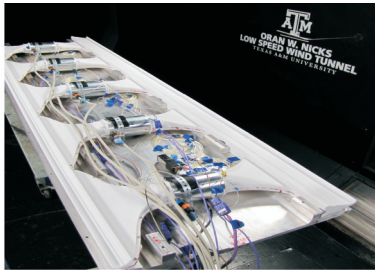


图 10 机翼装置布置

Fig. 10 Wing device arrangement

该研究对象主要讨论 CFJ 技术其在低速飞行状态下的性能,并可结合飞行器设计方案讨论该项技术在机翼上的应用效果。

### 3.2 平流层飞艇螺旋桨

临近空间飞艇的飞行高度和速度变化会对螺旋桨的工作特性产生不利影响。传统定桨距螺旋桨在设计上的局限导致在整个飞行过程中的综合性能较差。针对上述问题,在螺旋桨上应用 CFJ 技术并根据当前飞行状态控制螺旋桨的流场分布可以提高螺旋桨效率<sup>[24,31,39]</sup>。实验装置如图 11 所示<sup>[40]</sup>。



图 11 CFJ 技术在螺旋桨上的应用

Fig. 11 Application of CFJ technology on propeller

该研究对象主要讨论 CFJ 技术在临近空间条件等特殊飞行状态下的应用效果。

### 3.3 短距离起降亚音速客机的中央体

为了应对 CESTOL 标准,QUEIA 亚音速翼

身融合客机方案在机身和内翼段应用了 CFJ 技术,CFJ 技术的布置方式如图 12 所示,其中气流在机身后部的发动机处被吸入,并通过引流装置和压缩泵将气流从机身前缘射出。相关研究表明:上述过程中有近 80% 的射流能量被用于产生推力,而这一特性可以减小发动机的负担<sup>[41]</sup>。在使用策略上,与仅在起降阶段使用吹气襟翼等动力增升装置的飞行器相比,QUEIA 飞行器巡航过程都会利用 CFJ 技术提升飞行性能。



图 12 CFJ 技术在大型客机上的应用

Fig. 12 Application of CFJ technology in large passenger aircraft

QUEIA 飞行器将 CFJ 技术与翼身融合布局客机相结合,提升飞行器的巡航效率、起降性能和环保特性。参考文献[42]中将其与 SAX-40、B787-800 等飞行器进行比较,结果表明 QUEIA 飞行器相似飞行器在节能、适应性和噪声特性上优势明显。

该研究对象主要讨论 CFJ 技术在高亚音速状态下的使用效果及使用策略。

## 4 CFJ 技术在飞行器设计中的关键设计问题

结合前文对背景、机理、意义、应用案例的讨论,可见 CFJ 技术对飞行器的设计及应用的影响还需展开深入研究。

### 4.1 飞行器综合设计技术

目前应用 CFJ 技术的飞行器方案的设计策略通常采用“基准元件等效替换<sup>[21]</sup>”和“将特定参数和状态下将应用 CFJ 技术的二维截面特性视为翼型<sup>[21]</sup>”等方式。基准元件等效替换法是指将采用 CFJ 技术的机翼或翼端的数据替换基准飞行器的相应部分来探讨 CFJ 技术在飞行器上的应用效果;“将特定参数和状态下将应用 CFJ 技术的二维截面特性视为翼型”是指将 CFJ 技术在二维实验或仿真数据进行处理后作为一种翼型开展飞行器

设计。上述两种方法忽略 CFJ 技术与飞行器上其他气动装置间的相互影响和可能给飞行器带来的非气动影响,因此仅能定性地讨论 CFJ 技术在特定飞行状态的气动性能,不适合作为一种完善的设计方式。

要使 CFJ 技术在飞行器上充分发挥潜力,需要将推进系统、升力系统、结构设计、控制系统设计等方面进行协同设计与优化,可见 CFJ 技术更突出功能的耦合和一体化设计来提升飞行器的性能。

## 4.2 设计分析方法

CFJ 技术具有较强的可设计性,其升阻特性、力矩特性、能量利用效率等方面的影响受入射口的尺寸与位置、吸入口的尺寸与位置等参数影响较大,因此可以基于同一基准翼型根据不同需求设计多种不同特性的翼型。但应用了 CFJ 技术的翼型与传统翼型有很大区别且流动现象较为复杂,这对设计和仿真技术提出较高的要求。

现有 CFJ 技术研究主要集中在基于 RANS 方法研究这项技术的气动特性,但为了更好地推进这项技术的工程化进程应考虑使用新的分析手段与优化策略。

## 4.3 元件优化布置技术

CFJ 技术在工程上的应用方式主要分为以下两个趋势:集中化<sup>[29]</sup>和分布化<sup>[42]</sup>。“集中化”是指利用布置在飞行器中的一个或一组元件作为实现 CFJ 技术所需要的压差源并利用导流装置将其转移到所需的位置上,其总体思路与使用一个发动机实现推进和供气的 MAGMA 无人机相似。“分布化”是指将实现 CFJ 技术所需要的压差源直接布置需要应用该技术的部分,其总体思路采用分布电力推进技术的 X-57 相似。

不同的布置方式具有各自的特性并对应于不同的使用条件,集中化布置的可以降低小型的无人机的系统的复杂程度;载人飞行器通常采用分布化布置来提升整机的安全性。布置方式的优化设计是 CFJ 技术实用化的关键之一。

## 4.4 飞行控制设计技术

传统的环量控制技术参与控制的主要参数为射流动量系数,传统舵面的主要控制参数为舵偏

角,而应用 CFJ 技术的翼型产生的升阻系数和力矩系数与飞行状态、射流动量系数等多个参数有关。

在已采用 CFJ 技术的翼型后缘布置传统舵面的控制方式的效果和使用策略仍处于探索阶段<sup>[43]</sup>,但为了实现不同飞行状态下的可控性需要综合调整可动态调整的即时翼段的安装角、射流动量系数等参数。

## 5 结束语

本文通过综合国内外相关研究,分析了 CFJ 技术的产生背景,并从二维和三维的角度分析了 CFJ 技术的增升减阻机理,论述了 CFJ 技术的应用研究现状,并选取电动通用航空飞行器的机翼、平流层飞艇螺旋桨、短距离起降亚音速客机的中央体三个典型应用案例探讨 CFJ 技术在飞行器设计上应用优势及应用策略,并进一步总结出了 CFJ 技术在飞行器设计中的飞行器综合设计技术、设计分析及优化方法、元件优化布置技术和飞行控制设计技术四项影响 CFJ 技术在飞行器设计中应用效果的关键设计问题,希望能够促进 CFJ 技术的工程化和实用化。

### 参考文献

- [1] 朱自强,吴宪成,陈迎春,等. 民机空气动力设计先进技术[M]. 上海:上海交通大学出版社,2013:651-659.  
Zhu Ziqiang, Wu Xiancheng, Chen Yingchun, et al. Advanced technology in aerodynamic design of commercial aircraft[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013: 651-659. (in Chinese)
- [2] Lumley J L. Flow control: passive, active and reactive flow management by Mohamed Gad-el-Hak[J]. Mechanical Engineering, 2000, 43(4): 726-727.
- [3] Gad-El-Hak M. Flow control: the future[J]. Journal of aircraft, 2001, 38(3): 402-418.
- [4] Sellers W, Singer B, Leavitt L. Aerodynamics for revolutionary air vehicles[C]. AIAA-2003-3785, 2003.
- [5] 白俊强,邱亚松,陈迎春,等. 连接机构对增升装置气动性能影响研究[J]. 空气动力学学报,2012,30(6):798-804.  
Bai Junqiang, Qiu Yasong, Chen Yingchun, et al. Study on influence of brackets on the aerodynamic performance of high-lift system[J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2012, 30(6): 798-804. (in Chinese)
- [6] 张笑民. 上单翼飞机起落架整流罩减阻研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.  
Zhang Xiaomin. Drag reduction investigation on high-wing

- aircraft landing gear fairing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese)
- [7] 刘沛清, 邢宇, 李玲, 等. 现代大型飞机起落架气动噪声研究进展[J]. 空气动力学学报, 2017, 35(6): 751-759.
- Liu Peiqing, Xing Yu, Li Ling, et al. Progress in aeroacoustics investigation of modern large aircraft landing gear[J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2017, 35(6): 751-759. (in Chinese)
- [8] Djojodihardjo H, Thangarajah N. Research, development and recent patents on aerodynamic surface circulation control-A critical review[J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2014, 7(1): 1-37.
- [9] Wood N, Nielsen J. Circulation control airfoils-past, present, future[C]//23rd Aerospace Sciences Meeting, 1985: 204.
- [10] Abramson J, Rogers E. High-speed characteristics of circulation control airfoils[C]//21st Aerospace Sciences Meeting, 1983: 265.
- [11] Shrewsbury G. Analysis of circulation control airfoils using an implicit Navier-Stokes solver[C]. USA: Aerospace Sciences Meeting, 1985.
- [12] Liu Y, Sankar L, Englar R, et al. Numerical simulations of the steady and unsteady aerodynamic characteristics of a circulation control wing airfoil[C]//39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2001: 704.
- [13] Slomski J, Gorski J, Miller R, et al. Numerical simulation of circulation control airfoils as affected by different turbulence models[C]. AIAA-2002-851, 2002.
- [14] Ren Y, Zhang D, Deng F. Research on the influence of fluidic thrust vector parameters on the single expansion ramp nozzle of the air-breathing hypersonic vehicle[C]. AIAA-2017-2113, 2017.
- [15] Hange C. Performance challenges of hybrid wing gestol transports[C]. AIAA-2009-1133, 2009.
- [16] Zha G, Paxton C, Conley C A, et al. Effect of injection slot size on the performance of coflow jet airfoil[J]. Journal of aircraft, 2006, 43(4): 987-995.
- [17] Zha G, Paxton C D, Conley A. Novel flow control method for airfoil performance enhancement using co-flow jet[J]. Progress in Astronautics and Aeronautics, 2006, 214: 293.
- [18] Zha G, Paxton C. High performance airfoil with co-flow jet flow control[P]. USA: 12/461, 167, 2010-05-27.
- [19] Dano B, Kirk D, Zha G. Experimental investigation of jet mixing mechanism of co-flow jet airfoil[C]//5th Flow Control Conference, 2010: 4421.
- [20] Dano B, Zha G, Castillo M. Experimental study of co-flow jet airfoil performance enhancement using discreet jets[C]. AIAA-2011-941, 2011.
- [21] Lefebvre A M, Zha G. Design of high wing loading compact electric airplane utilizing co-flow jet flow control [C]. AIAA-2015-0772, 2015.
- [22] Liu Z, Zha G. Transonic airfoil performance enhancement using co-flow jet active flow control[C]. AIAA-2016-3472, 2016.
- [23] Yang Y, Zha G. Super-lift coefficient of active flow control airfoil: What is the Limit? [C]. AIAA-2017-1693, 2017.
- [24] Kirk D. Experimental and numerical investigation of a high-performance co-flow jet airfoil[D]. USA: University of Miami, 2009.
- [25] Lefebvre A, Dano B, Bartow W, et al. Performance and energy expenditure of coflow jet airfoil with variation of mach number[J]. Journal of Aircraft, 2016, 53(6): 1757-1767.
- [26] Hossain M A, Uddin M N, Islam M R, et al. Enhancement of aerodynamic properties of an airfoil by co-flow jet (CFJ) flow[J]. International Journal of Scientific & Engineering Research, 2015, 4(1): 103-112.
- [27] Lefebvre A M. Investigation of co-flow jet flow control and its applications[D]. USA: University of Miami, 2015.
- [28] 宋超, 杨旭东, 朱敏, 等. 应用离散型协同射流的翼型增升减阻研究[J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(2): 191-196.
- Song Chao, Yang Xudong, Zhu Min, et al. Investigating lift increase and drag reduction for airfoils using discrete CFJ(co-flow jet)[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015, 33(2): 191-196. (in Chinese)
- [29] Englar R. Circulation control pneumatic aerodynamics: blown force and moment augmentation and modification-past, present and future[C]//Fluids 2000 Conference and Exhibit, 2000: 2541.
- [30] Jones G S. Pneumatic flap performance for a 2-D Circulation control airfoil, Steady & Pulsed[R]. NASA/CP-2005-213509.
- [31] Zha G, Gao W, Paxton C D. Jet effects on coflow jet airfoil performance[J]. AIAA Journal, 2007, 45(6): 1222-1231.
- [32] Wang B, Zha G C. Detached-eddy simulation of a coflow jet airfoil at high angle of attack[J]. Journal of Aircraft, 2011, 48(5): 1495-1502.
- [33] Im H, Zha G, Dano B. Investigation of co-flow jet airfoil mixing mechanism using large eddy simulation[C]. AIAA-2011-3098, 2011.
- [34] 刘沛清, 旷建敏, 屈秋林. 联合射流控制技术的增升效果和机理[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(6): 737-740.
- Liu Peiqing, Kuang Jianmin, Qu Qiulin, Effect and mechanism of lift-enhancement of the co-flow jet technology[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(6): 737-740. (in Chinese)
- [35] O Smith A M. High-lift aerodynamics[J]. Journal of Aircraft, 1975, 12(6): 501-530.
- [36] Zha G, Yang Y, Ren Y, et al. Super-lift and thrusting airfoil of coflow jet actuated by micro-compressors[C]//2018 Flow Control Conference, 2018: 3061.
- [37] Ren Y, Zha G. Design of injection and suction ducts for co-flow jet airfoils with embedded micro-compressor actuator [C]//2018 Flow Control Conference, 2018: 3062.
- [38] Ren Y, Zha G. Simulation of 3D co-flow jet airfoil with em-

- chanics, 2017, 186: 339-409.
- [11] Dawicke D S, Newman Jr J C, Starnes Jr J H, et al. Residual strength analysis methodology: Laboratory coupons to structural components[C]// Third Joint FAA/DoD/NASA Conference on aging aircraft. Albuquerque, NM: 1999.
- [12] ASTM E561. Standard test method for K-R curve determination[S]. ASTM 2010-PA-01, 2010.
- [13] Dawicke D S. Fracture testing of 2324-T39 aluminum alloy [R]. NASA CR-198177, 1996.
- [14] Newman Jr J C. Finite element analysis of initiation stable crack growth, and instability using a crack tip opening displacement criterion[R]. NASA TM-84564, 1982.
- [15] Tan P W, Raju I S, Newman Jr J C. Stress intensity factor calculations using the boundary force method[R]. NASA TM-89158, 1987.
- 作者简介:**  
贾 琪(1992—),男,硕士,助理工程师。主要研究方向:飞机结构疲劳断裂及损伤容限分析。
- (编辑:赵毓梅)

~~~~~

(上接第 153 页)

- bedded micro-compressor actuator[C]. AIAA-2018-0330, 2018.
- [39] Xu H Y, Xing S L, Ye Z Y. Numerical study of the S809 airfoil aerodynamic performance using a co-flow jet active control concept[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2015, 7(2): 1-20.
- [40] 朱敏, 杨旭东, 宋超, 等. 应用协同射流控制的临近空间螺旋桨高增效方法[J]. 航空学报, 2014, 35(06): 1549-1559. Zhu Min, Yang Xudong, Song Cao, et al. High synergy method for near space propeller using co-flow jet control[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6): 1549-1559. (in Chinese)
- [41] Zha G, Aspe S, Dussling J J, et al. Co-flow jet aircraft[P]. USA: 8262031, 2012-9-11.
- [42] Noor R M, Assad-Uz-Zaman M, Mashud M. Effect of co-flow jet over an airfoil; numerical approach[J]. Contemporary Engineering Sciences, 2014, 7(17): 845-851.
- [43] Zhang J, Xu K, Yang Y, et al. Aircraft control surfaces using co-flow jet active flow control airfoil[C]//2018 Applied Aerodynamics Conference, 2018: 3067.
- 作者简介:**  
张明昊(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器设计。  
袁昌盛(1971—),男,博士,副教授。主要研究方向:飞行器总体设计、计算机辅助飞行器设计及微型飞行器设计。  
田振东(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器设计。  
杨 涛(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器设计。  
王登科(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器设计。
- (编辑:赵毓梅)

~~~~~

(上接第 170 页)

- 究[J]. 中北大学学报:自然科学版, 2017, 38(5): 111-115. Li Jiwei, Wang Qiu, Zhao Wei. Investigation on aerodynamic heating characteristics of hypersonic flat pate/cylinder juncture flow[J]. Journal of North University of China; Natural Science Edition, 2017, 38(5): 111-115. (in Chinese)
- [11] 李艳丽, 李素循. 高超声速绕钝舵层流干扰流场特性研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1472-1477. Li Yanli, Li Suxun. Investigation of interactive hypersonic laminar flow over blunt fin [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(6): 1472-1477. (in Chinese)
- [12] 朱自强, 吴子牛, 李津, 等. 应用计算流体力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998. Zhu Ziqiang, Wu Ziniu, Li Jin, et al. Applied computational fluid mechanics [M]. Beijing: Beihang University Press, 1998. (in Chinese)
- [13] Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme V. A second order sequel to godunov's method[J]. Journal of Computational Physics, 1979(32): 101-136.
- [14] Anderson W K, Thomas J L, van Leer B. A comparison of finite volume flux vector splitting for the Euler equations [J]. AIAA Journal, 1986, 24(9): 1453-1460.
- [15] Yoon S, LU-SGS implicit algorithm for three dimensional incompressible Navier-Stokes equations with source term [C]//The 9th AIAA CFD Conference, 1989.
- 作者简介:**  
黄尚坤(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:计算流体力学。  
肖素梅(1966—),女,博士,教授。主要研究方向:机电控制。  
庞宇飞(1971—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:CFD 网格生成。  
周 佳(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向:计算流体力学。
- (编辑:赵毓梅)