

文章编号:1674-8190(2021)04-001-11

基于层流机翼的增升装置设计研究进展

李云鹏, 韩永志

(航空工业第一飞机设计研究院 结构设计研究所, 西安 710089)

摘要: 层流机翼的增升装置设计可以起到减阻和降噪的作用。将低阻的层流区域与高效的增升装置相结合,通过采用有效的外形设计和恰当的结构选型,可以实现巡航时层流区域的扩大、起降时增升效果的提升,并显著降低机体噪声。本文根据绿色航空的发展需求,分析了层流机翼和增升装置的技术特征,阐述了在层流机翼状态下增升装置的设计方法,系统地介绍了结构外形、运动机构和辅助装置等的应用现状,在此基础上综述了实现增升装置适应性调整所需要重点研究的技术内容,给出了层流机翼增升装置的未来发展方向和思路。

关键词: 增升装置;层流机翼;高精度流场;轻质多功能结构;运动机构;层流化设备

中图分类号: V224⁺.5

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.04.01

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress of the High-lift Device Design for Laminar Wing

LI Yunpeng, HAN Yongzhi

(The Structure Institute, AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: The lift device design of laminar flow wing can reduce drag and noise. By combining the low resistance laminar flow area with the high-efficiency lift device and adopting the effective shape design and appropriate structure selection, the expansion of laminar flow area during cruise and the improvement of lift effect during take-off and landing can be realized, and the body noise can be significantly reduced. According to the development needs of green aviation, the technical characteristics of laminar wing and lifting device are analyzed, the design method of the lifting device under the condition of laminar flow wing is described, the application status of structure shape, motion mechanism and auxiliary device is systematically introduced. On this basis, the key research contents for realizing the adaptive adjustment of the lifting device are summarized, and the future development direction and ideas of the lift device are given.

Key words: high-lift device; laminar wing; high precision flow field; lightweight multifunctional structure; sports mechanism; laminar fluidization equipment

0 引言

新型飞机的设计是未来航空可持续发展的重要领域,为减少航空器对自然环境和城市环境的影响,必须使未来的飞机更加高效,以减少燃料消

耗、降低碳排放,从而实现绿色飞行的目标^[1]。设计能满足更高需求的下一代机翼是新型飞机研制的关键因素,相比目前的湍流设计状态,层流机翼能够有效地降低飞行阻力,从而提高燃油效率,在有限的燃油条件下提供更远的航程,同时降低环

收稿日期: 2020-11-13; 修回日期: 2021-03-29

通信作者: 李云鹏, vemail@sohu.com

引用格式: 李云鹏, 韩永志. 基于层流机翼的增升装置设计研究进展[J]. 航空工程进展, 2021, 12(4): 1-11.

LI Yunpeng, HAN Yongzhi. Research progress of the high-lift device design for laminar wing[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(4): 1-11. (in Chinese)

境污染^[2]。作为重要的功能翼面,增升装置是飞行安全和载重能力的保障^[3],但同时也是机体噪声的一个重要来源^[4]。如何将层流机翼设计与增升装置优化有机结合是未来机翼设计的一个重要研究方向,兼具科研价值和显著的经济预期。

普朗特的边界层理论在飞机设计领域产生了重要影响,层流技术被认为是实现翼面减阻的有效手段,通过研究人员数十年来的不懈努力,推动了层流技术的发展和应^[5]。从被动的机翼形状适应发展到主动的流动控制,实现了从自然层流到混合层流的技术延伸,推动了分段式偏转向整体化变形的过渡^[6-8]。从层流技术应用的机翼部位来看,主要集中在机翼前缘和后缘结构,也就是增升装置的所处区域。增升装置设计趋向于轻质高效,由局部刚性运动发展到柔性自适应变形,研究领域呈现多学科特征^[7-8]。

本文梳理绿色航空的发展需求,总结增升装置与层流机翼的技术特点,并结合层流机翼的发展需要,介绍增升装置的研究趋势,综述增升装置改型措施和设计关键点,展望未来技术发展方向。

1 需求

1.1 下一代飞行器

伴随着全球化运输的快速增长,能源形势日益紧张、自然环境趋于恶化,各国普遍意识到航空飞行器需要加快升级换代。借助于航空科学技术的日新月异,节能、环保、高效成为未来航空技术的主要发展趋势。降低能源消耗、减少环境污染,是实现航空运输可持续发展的必由之路。因此,必须制定积极的措施,开发先进的技术,打造符合未来清洁环境需要的飞行器。

1.2 绿色航空

近年来,有关绿色飞行的科学技术在航空运输业领域取得了显著进展,在为客户提供最佳的航空旅行的同时,尽可能降低了对环境的影响。随着环保指标的不断提升,迫切需要航空界应对可持续航空发展的挑战,比较突出的约束是:降低污染排放和削弱区域性噪声^[9]。世界各国越来越多地关注绿色航空,突出表现在对排放和噪声的控制指标趋严。

首先,空气质量需要得到改善,减少排放是重

中之重。未来的航空器设计需要与创新的空气动力学设计相结合,采用新型的气动外形,实现降低飞行阻力,提高燃油效率,从而起到减少污染排放的效果。

其次,减少噪声滋扰成为机场扩建计划的关键部分。为使机场噪声减少到当地社区可以接受的水平,必须采用创新的设计削弱机体噪声,特别是在临近机场的起降阶段因机体结构等产生的噪声。

1.3 欧美各国的要求

欧洲和美国对于绿色航空指标的要求各有特点,相对于其他国家而言属于较为严格的控制水平。

1.3.1 欧洲

欧洲航空运输系统关注其竞争力和可持续性方面的新挑战,对绿色航空的指标限制日趋严格:

(1) 相对于2000年的指标,到2050年,通过采用先进的技术使每千米人均二氧化碳排放量减少75%,并使氮氧化物排放量减少90%。飞行飞机的感知噪声排放量减少65%。

(2) 与增升装置使用密切相关的飞机滑行时段无排放^[10]。

1.3.2 美国

在欧洲航空计划的压力之下,2016年4月,美国国家航空航天局(NASA)通过“新视野航空计划”。着眼于未来蓬勃发展的航空市场,NASA联合美国多家合作公司,共同开发新技术并大力推进其试验、应用,这些新技术有望引领新的飞行时代,实现更高效的航空旅行方式,并获得显著的经济效益。“新视野航空计划”通过未来20年的技术进步,为航空旅行探索最好的绿色飞行技术,实现节能、减排、降耗的目的,并在未来的航空业竞争中处于主导地位^[11]。到2035年后,通过三个阶段的技术推动,相比2005年,将亚声速飞机的燃油消耗量减少60%、污染排放(包含起降阶段)减少80%,噪声降低52 dB^[12]。

1.4 现实意义

从欧美航空技术的规划来看,未来飞行器的研究主要集中在两个方面:减阻和降噪。

1.4.1 减阻

减小飞行阻力是降低燃料消耗的有效措施。在飞行过程中,摩擦阻力占总阻力超过50%,就机

翼而言,减小气动摩擦阻力是较为有效的减阻手段^[13]。减阻的方法包括:层流设计、翼展增大、黏性减阻、湍流边界层阻力研究等。气动减阻的最大潜力是通过边界层吸力进行层流控制,与现今的湍流飞机相比,总巡航阻力可以减半^[14]。新的增升装置结构技术,能够有效扩大机翼层流区域,从而达到减阻效果。

1.4.2 降噪

飞机降噪是跨学科的,涉及多个部位,如增升装置、起落架和发动机等系统。飞机起降阶段的噪声对机场附近居民影响极大,噪声源有:襟翼(后缘和侧缘、缝道)、前缘缝翼、起落架和轮舱、机翼和尾翼(后缘、翼尖)、机身(湍流边界层)等。从分析来看,增升装置使机翼区分为前缘、主翼与后缘三个区域,造成了流场的多个分离和转捩区域,是机体噪声的重要来源之一,主要包括缝翼缝道、缝翼滑轨、襟翼侧边和襟翼滑轨^[15]。根据绿色飞行的需要,应采取综合的跨学科方法来降低噪声,提高乘客舒适度和机场附近社区的宜居程度。

2 技术特征

2.1 增升装置

增升装置是飞机起降过程中最重要的部件之一,与飞机的可靠性、经济性和环境保护有着直接的关系。增升装置是通过运动改变机翼边缘形状,使得边界层气流再分布,从而改善翼面的压力分布;同时借助缝道的作用,将高速气流导入翼面,吹除旧的附面层,通过对翼面气流分离的延迟起到增升效果^[16]。

2.2 层流机翼

根据普朗特的边界层理论,气流在机体气动外形面以两种状态存在:层流和湍流。在靠近机体表面的层流区域,黏性力(表面摩擦)占主导地位,而在离表面足够远的地方,流动实际上是无黏的,速度能够在更大的区域内趋于稳定^[17],如图1所示。在相同雷诺数条件下,由于状态紊乱,湍流与机体产生较大的摩擦,相比之下,层流状态由于流动的顺畅,摩擦要小很多。

然而,层流区域是有限的,在初始一段距离流动后会转变为湍流,在常规飞行条件下,机翼表面的气流以湍流为主。通过大量的理论研究、试验

和工程实践,研究人员发现通过外形修型^[18]或者附加吸气^[19]、排气装置能够对层流区域的扩大到一定的辅助作用^[20]。目前,根据所采用技术手段的不同,形成了自然层流NLF(Natural Laminar Flow)、层流控制LFC(Laminar Flow Control)、混合层流控制HLFC(Hybrid Laminar Flow Control)三种层流机翼类型。

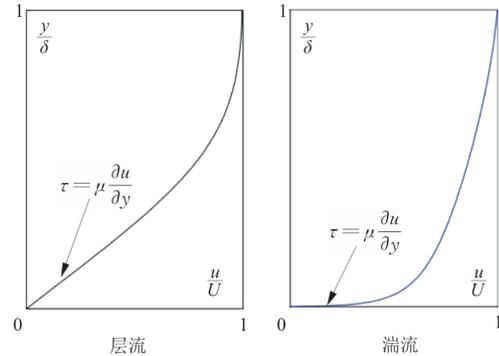


图1 层流与湍流的流速效果对比^[17]

Fig. 1 Laminar and turbulent boundary layer velocity profiles^[17]

传统翼型与各种层流化翼型的流场情况对比如图2所示。

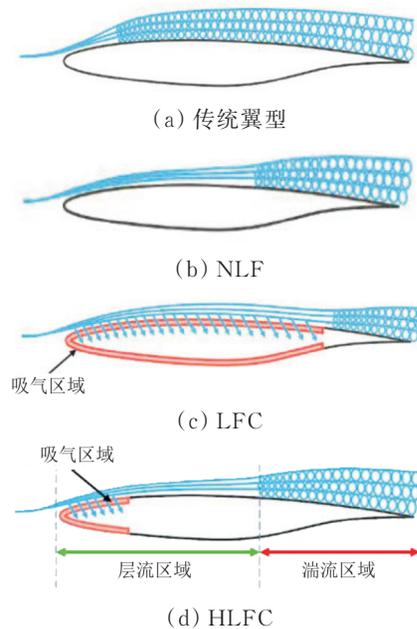


图2 传统翼型与各种层流化翼型的流场对比^[21]

Fig. 2 Comparison of flow field between traditional airfoil and various laminar airfoils^[21]

2.2.1 自然层流NLF

为了扩大翼面层流区,研究人员首先想到的是对翼型的特殊设计,将翼型剖面最大高度点向

后缘移动,并使前缘区域呈现顺压梯度状态,改变流场状态,实现自然层流。在传统机翼表面,湍流之所以占主导地位,是因为流场压力梯度不均匀,较早的产生了流动转捩。通过对翼型优化设计(如超临界翼型),并借助于表面制造技术使机翼型面光滑,可以推迟气流转捩。大型飞机的机翼一般都有较大后掠角,对于后掠角超过 30° 的情况,转捩位置是随后掠角的增大而向机翼前缘移动的,这对自然层流的实施效果有较大的限制。另外,高雷诺数的飞行状态也使稳定的层流流动难以实现,因此在大型飞机上推广使用自然层流翼尚有距离^[22]。

2.2.2 层流控制 LFC

层流控制技术是在翼面上大范围地采用辅助吸气设备,对机翼表面进行流动控制以实现较大区域范围的层流效果,较自然层流技术有更大范围的层流区。但是,辅助设备的设计、安装和工作都带来了实施成本的增加,其实施起来复杂性高、功耗大,且在机翼内部有限的空间内不易实现。

2.2.3 混合层流 HLFC

混合层流将前缘的吸力与翼型的重塑结合起来,以扩展层流化。在混合层流控制系统中,机翼前缘的少量空气被吸入内部,降低了横流速度,对横流涡流起到了抑制作用,使层流向湍流过渡的位置被推迟到更高的弦比位置,从而产生更大的层流面积^[23]。它是自然层流和层流控制技术的结合,既充分利用了外形,又大幅减少了辅助设备的使用。对于大展长后掠翼的高速飞机,采用混合层流控制是抑制不稳定气流和延迟过渡的一种很有前景的方法。

2.3 技术结合

从增升装置的功能机理可见:稳定与较大区域的附面层是保持增升装置功能的基础,这也是层流机翼所要追求的目标。与层流机翼相匹配的增升装置有助于提升层流效果,从而充分发挥空气动力的潜力,对节能、降噪等环保指标的实现起到有力的推动作用。

欧、美已在此领域有专项研究,并逐步实施了设计、仿真与验证。借助先进的优化手段和软件,采用多目标、多学科综合优化的方式开展设计,采用层流机翼及配套的增升装置能够将飞机的飞行

阻力有效降低;通过设计适用于层流机翼的全新增升装置及对现有系统的升级,使新飞机的性能大幅优于传统飞机,有助于减弱飞行噪声对环境的影响^[24]。

3 实施途径与研究进展

若想在现有的大型飞机上实现二者的有效结合,则相应的增升装置需要作进一步的技术升级,以适应层流机翼的构型要求。首先,在设计环境下对层流机翼增升装置开展外形的优化,增升装置的外形应符合层流机翼的要求;其次,应对增升装置的增升效果与安全性进行评估,如最大升力系数、失速攻角是否符合设计要求;最后,开展增升装置的运动功能和可靠性评估,为装机应用做必要的工程验证。

由于层流机翼对翼面的光滑程度有较高要求,对于突出翼型的阶差、缝隙要尽量减少。对于前缘增升装置,前缘缝翼与机翼对接位置存在阶差和缝隙,因制造带来的形状不规则会对层流效果产生负面影响,故一般不选用前缘缝翼,而是采用诸如克鲁格襟翼或者柔性前缘;对于后缘增升装置,为保持足够的最大升力系数,是一般飞机必备的增升装置,自适应襟翼和主动流动控制是目前研究应用的重要方向。如上所述,要将增升装置与层流机翼综合设计,则围绕其实现目标重点可在以下类型的增升装置上开展技术研究。

3.1 前缘增升装置

在前缘要解决的问题是如何延缓气流的转捩,为达到这一目的,可以从两方面考虑,一是增加前缘弯度和面积,相当于延长了气流的扫掠路程;二是维持机翼表面清洁,避免表面污染对气流转捩的促进效果。

前缘增升装置能够与层流机翼结合的是克鲁格襟翼和柔性前缘。

3.1.1 克鲁格襟翼

层流技术具有较大的潜力可供开发,但是它对翼面的清洁度要求较高,特别是机翼前缘的污染程度对其发挥层流优势有较强的负面作用。

克鲁格襟翼是较为成熟的一种前缘增升装置,在巡航阶段,克鲁格襟翼收起,构成机翼下翼

面前缘的一部分,保持翼型光滑与完整,起到对层流区域的保护作用;在起降阶段,操纵系统驱动克鲁格襟翼展开,能够改善飞机在大迎角状态下的失速特性,此时会对下翼面的层流造成破坏,但是可以起到对机翼前缘的遮盖作用,降低昆虫的污染,对巡航阶段的层流形成具有保护效果。

P. Iannelli等^[25]在“DeSiReH”项目中研究了大展弦比低后掠机翼在自然层流跨声速条件下的气动特性,针对前缘机构的气动特性和运动功能,开展了前缘缝翼、克鲁格襟翼和下垂前缘等机构的气动分析。经过分析计算,克鲁格襟翼因其较好的升力特性、光滑的外形和“昆虫屏蔽”效果成为优选对象,如图3所示。

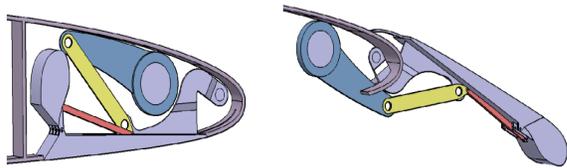


图3 克鲁格襟翼的运动^[25]

Fig. 3 Movement of the Krueger flap^[25]

ASCO公司团队通过“DEAMAK”项目开展了运动机构的设计和复合材料结构的实物制造,通过复合材料RTM(Resin Transfer Moulding)成型襟翼盒段,相比传统的制造方法实现了结构减重^[26]。2019年,在空客A340的“BLADE”项目上进行了飞行验证,如图4所示,以固定形式的克鲁格襟翼测试了防污染效果。



图4 空客A340 BLADE飞行测试^[27]

Fig. 4 Airbus A340 BLADE flight tests^[27]

德国宇航中心(DLR)继“DeSiReH”之后在“HORIZON 2020”框架下的“UHURA”项目中,进行了包括克鲁格襟翼在内的增升装置非定常流体效应分析(如图5所示),并通过风洞试验的数据对CFD计算进行验证,预计在2021年末完成^[26]。

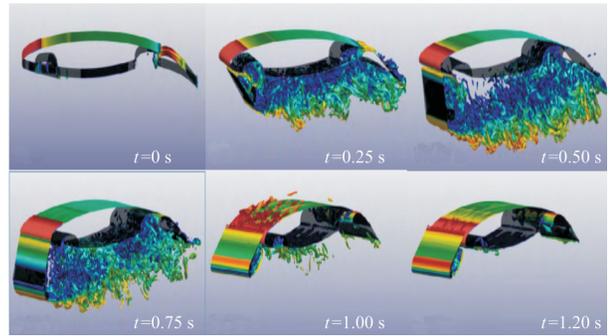


图5 增升装置的非定常CFD结果^[26]

Fig. 5 Unsteady CFD results for high-lift device^[26]

张明辉等^[27]对翼身融合布局构型开展了克鲁格襟翼设计并进行了风洞测试,结果表明增升效果对设计参数较为敏感,襟翼头部前缘半径和弦长的增大有利于流畅的稳定并避免了分离现象。

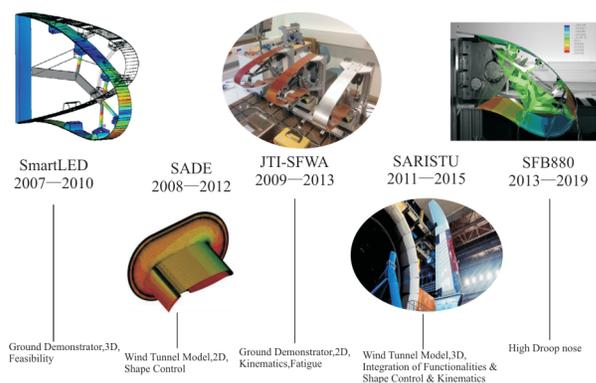
R. Kulhanek等^[28]对克鲁格襟翼与机翼之间的缝道进行了进一步的分析测试,结果表明,缝道的形状和制造效果对流场的状态有较大影响,襟翼尾缘的竖直状态对最大升力系数有显著的影响。

A. Shmilovich等^[29]对克鲁格襟翼起降阶段的升阻比进行了分析,在此基础上对襟翼头部的形状与噪声的关联性进行了对比研究,从降噪角度优化了头部形状。

3.1.2 柔性前缘

为保持机翼前缘的增升效果,需要前缘适度的向下变形,依靠柔性结构(铰链机构和柔性蒙皮)传递载荷、位移和能量,可以实现结构的无缝变形。将具有驱动、感知和控制功能的元器件与柔性结构相结合,可以构成基本的智能变形结构。智能变形结构具有广泛的实用价值,被视为具有突破性的新技术,在变体飞机和自适应机翼的研究中发挥了重要作用^[30]。应用于机翼前缘的智能变形结构保持了翼面的完整性,不会在机翼外形面产生对缝或者台阶,使得前缘气流的流动区域平缓,促使气流转捩推迟,改善了翼面的流场,扩大了层流区域。另外一方面,柔性的无缝结构能够避免气流经过缝道所产生的噪声,从而起到削弱噪声的作用。

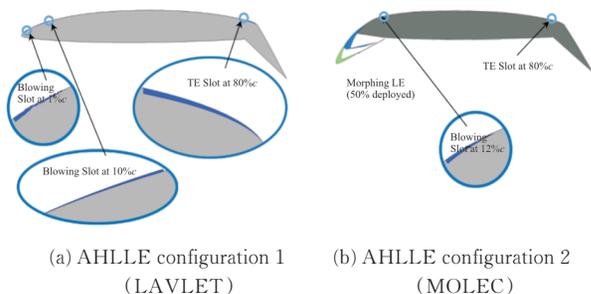
德国宇航中心从2007—2019年分五个阶段研究了柔性前缘技术,如图6所示,通过内部的连杆运动机构对前缘柔性蒙皮进行驱动,实现了前缘无缝结构的弹性变形^[31]。

图 6 DLR 的柔性前缘研究过程^[31]Fig. 6 The procession of DLR's morphing structures^[31]

整个研究过程经过了 SmartLED 的虚拟仿真、地面展示;SADE 的 2D 风洞测试、变形控制;SWFA 的机构优化、疲劳测试;SARISTU 的蒙皮多功能集成;SFB880 的全尺寸件制造、运动测试^[32]。其蒙皮结构以复合材料为基础,集成了抗鸟撞、防除冰、防雷击等功能,驱动机构经过不断地拓扑优化和材料改进,实现了轻质高可靠性。但是,风洞试验结果也显示表面的制造容差对上翼面的气流状态有较高的敏感性。

C. Vittorio 等^[33]研究了内部机构的优化过程,提高了变形的精准控制,降低了内部的应力集中,并以镍钴合金为材料进行了实物验证,探索了其应用到航空器的可行性。

NASA 的 AHLLE 项目 (Advanced High-Lift Leading-Edge) 是为层流机翼寻求适用的增升装置。AHLLE 项目检验了多种基于层流翼的前缘概念方案,进行了包括增升效果、层流兼容、复杂程度、噪声、重量等多方面的评估比较,最终选择两种方案用于风洞测试,如图 7 所示。

图 7 AHLLE 项目构型^[34]Fig. 7 AHLLE configuration^[34]

最终 LAVLET (Laminar Airfoil Virtual Leading Edge Technology) 与 MOLEC (Multi-Objective Leading-Edge Concept) 方案入选, LAVLET 为前

缘固定但带有两个吹气孔, MOLEC 为柔性前缘带有一个吹气孔,两种构型均辅助以后缘吹气。试验结果表明,两种构型最大升力系数均超过了预期指标, MOLEC 略优于前者,同时这两种方案均显著优于传统的克鲁格襟翼方案。

葛文杰等^[35]开展了柔性前缘内部机构的拓扑优化,采用基结构法分析前缘外形,采用多目标法分析柔性机构,建立了柔性前缘的拓扑优化模型,验证了影响因子对结果的差异化影响,并通过实验验证了分析方案的可行性。

纪斌等^[36]开展了柔性伸缩蒙皮支撑结构的多目标拓扑优化,使用正六边形对设计域进行离散,采用基于非支配排序遗传算法 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II),得到多个可用于柔性伸缩蒙皮的支撑结构。

吕帅帅等^[37-38]针对柔性前缘的蒙皮在工程简化基础上开展了全参数优化设计,通过对 NSGA-II 遗传算法的改进来适应三维蒙皮的多目标优化求解,在柔性前缘变形精度控制和优化分析方面体现了效率优势。

3.2 后缘增升装置

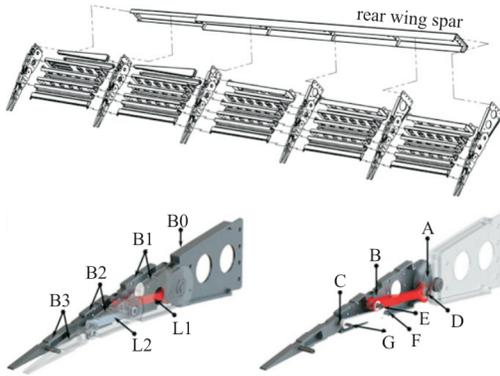
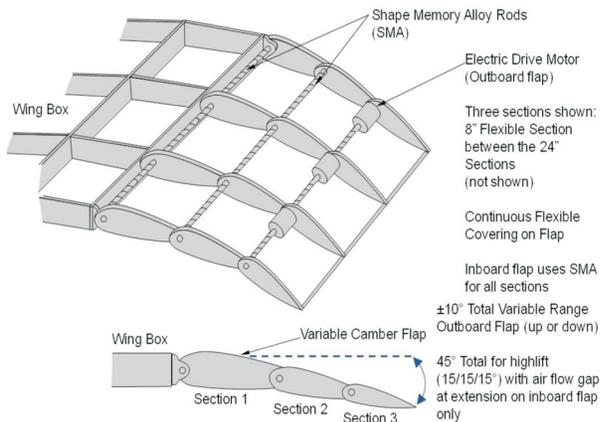
相比前缘,后缘要解决的问题相对复杂一些,主要体现在弦长更长、翼型更薄和变形幅度更大。后缘的解决措施更多的集中在运动机构优化与辅助设备配置方面,在保持襟翼增升功能的同时,尽量实现减弱缝隙、阶差的效果,直至无缝变形。为达到这一目的,可以从自适应襟翼结构和辅助流场控制装置来实现增升与层流效果的综合。

3.2.1 自适应襟翼

未来的飞行器机翼将以柔性、无缝的自适应结构为主,通过自适应结构能够根据飞行需要改变翼型基本形状,从而维持较好的气动性能^[39]。传统意义的增升装置是刚性结构,自适应柔性结构的应用使得增升装置结构简化,不再以多段式的缝道结构形式来改变流场,而是采用连续的翼面弯度设计实现层流扩大化。

在智能材料成熟度较低和工程化前景不明朗的情况下,自适应结构的主要发展趋势是以机械式结构为基础,升级成熟材料辅助以优化驱动机构的设计^[40]。例如欧洲的自适应襟翼 ATED (Adaptive Trailing Edge Device)^[41]、美国的连续变弯度襟翼 VCCTEF (Variable Camber Continuous

Trailing Edge Flap)^[42],二者具有一定的共通性,即基于已有材料的合成或组合构成柔性蒙皮,襟翼内部分成三个串联铰接段,通过旋转作动器或者记忆合金扭力杆形成驱动路线,如图8~图9所示。

图8 ATED项目^[41]Fig. 8 Project of ATED^[41]图9 VCCTEF项目^[42]Fig. 9 Project of VCCTEF^[42]

杨智春等^[43-44]对该类型的铰接自适应结构开展了运动学规律、气动特性分析,结果表明,铰链间的缝隙是偏转幅度的约束,铰链点的运动范围与驱动角度呈正相关,最大升阻比随后缘偏角的增大先升后降。

王瑞等^[45]针对大型飞机柔性变弯度后缘襟翼开展了气动和机构的综合优化设计,优化分析了反平行四边形的机构形式,提高了柔性变形效果,并对起降和巡航构型进行了气动分析,结果显示,变弯度襟翼能够有效提高升力和升阻比。

国内研究机构对后缘襟翼变弯度带来的气动收益进行了评估。王斌等^[46]在三维模型上开展了变弯度减阻技术分析,结果显示变弯度技术在升力系数较大时能够有效的起到减阻作用;何萌

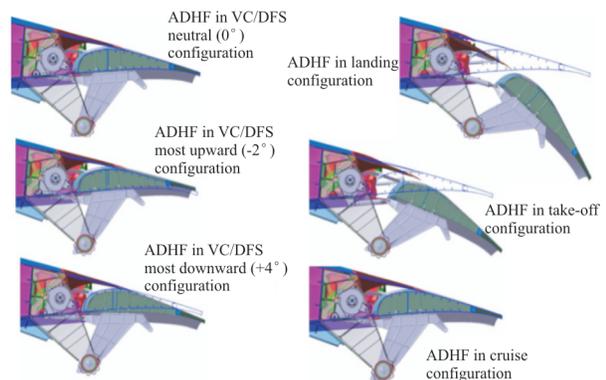
等^[47]对襟翼变弯度减阻收益进行了评估,结果显示,大巡航升力系数下通过增大诱导阻力能够较大程度削弱激波阻力,显著提高升阻比。

自适应结构逐渐提高成熟度,包括NASA的ACTE (Adaptive Compliant Trailing Edge)^[48]和空客的ADHF (Adaptive Dropped Hinge Flap)^[49]在工程化实用阶段取得了一定进步。

FlexSys公司同NASA合作的自适应后缘项目ACTE实现了飞行测试,如图10所示。通过后缘与机翼的无缝对接,使翼面形成一个柔性整体,在机动飞行时根据载荷状态实时调整形状,通过自适应变形使机翼结构整体化,表面层流稳定化,从而达到减轻飞行阻力、提高燃油经济性,减弱机体噪声的目的。

图10 ACTE项目^[48]Fig. 10 Project of ACTE^[48]

ADHF结构作为一种多功能的后缘增升装置,已在空客A350XWB和波音B787飞机上应用。它通过内部的连杆机构设计,使得扰流板、折流板和襟翼协同作用,如图11所示。在巡航状态下,需要襟翼小角度偏转起到操纵面的辅助作用,此时上、下翼面的缝道由扰流板和折流板封堵,从而使得流场连续,延迟了流场转换,具有相应的层流控制效果。在起飞和着陆阶段,仍然保持了缝道结构形式,具有必要的增升作用。

图11 ADHF项目^[49]Fig. 11 Project of ADHF^[49]

3.2.2 主动流动控制

主动流动控制通过引入外部能量,对翼面指定区域的流动状态形成干扰,起到控制的作用。主动流动控制具有控制气流分离时机的效果,能够根据需要显著提高流场质量,具有满足下一代航空器挑战的潜力。主动流动控制的主要技术有零质量射流、等离子体射流、涡流发生器、边界层吹吸气等。

通过喷气装置来对翼面的流场实行控制,达到改变增升装置流场状态的目的,是未来的一种层流控制趋势。德国宇航中心通过在机翼前缘和后缘安装辅助装置开展了流场控制研究,如图 12 所示。

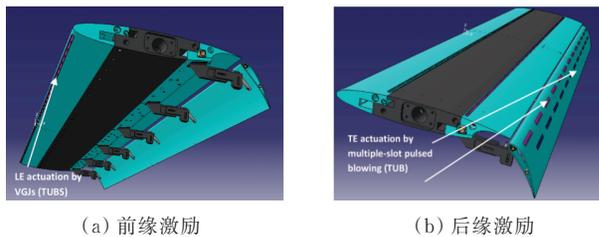


图 12 主动流控制^[50]

Fig. 12 Active flow-separation control^[50]

P. Scholz 等^[51]在机翼前缘下侧安装涡流发生器,实现了推迟气流分离,延缓了失速,并对提高升力有益;F. Haucke 等^[52]在后缘安装多缝脉冲喷气系统以延缓湍流分离,实测显示,升力系数得到了显著提高;郝璇等^[53]进行了定常吹气方式对增升效果的评估,结果表明,随吹气量的增加,升力系数的增加效率逐渐降低;M. Desalvo 等^[54]对比了襟翼前缘上游和下游的振荡射流激励效果,结果显示,该方法能有效改善襟翼的富勒效果,简单的单块襟翼在振荡射流和横流间隙的匹配下,能够与富勒襟翼的增升效果相当。

4 关键技术

创造未来的机翼不是一件容易的事情,而作为增升装置在此方面尤为突出。对于工程设计人员而言,未来飞机设计面临的挑战是需要不断探索最佳的材料、制造和组装技术,以及空气动力学和翼面结构方面的新技术,来创新增升装置的设计,以适应未来航空市场发展的需要。

若要适应新的环保降噪和减排要求,现有的增升装置需要在设计和制造方面作出改进升级。

技术研发需要兼顾超前性与工程可实施性,将新技术成熟度提升是其满足未来绿色航空实际要求的关键。以下方面是未来需要重点解决的问题。

4.1 高准确度流场仿真技术

增强 CFD 预测能力,有助于增升装置气动设计和优化的实践。民用运输飞机起降过程中的最大升力系数和失速迎角是增升装置设计的两个关键参数,受湍流模型、模拟方法等因素的限制,CFD 模拟难以准确地得到这些参数。欧洲的 EU-ROLIFT 项目和美国的 HiLiftPW 项目针对增升装置的流场开展了一系列地分析、评估和试验,以期能够提高利用 CFD 工具对升力系数、转捩影响、失速现象的准确评估能力。虽然随着计算机的飞速发展,CFD 在飞机气动设计中的应用越来越广泛,但是增升装置流场的边界层过渡、层合分离、湍流附线和边界冲击等流动现象非常复杂,研究适合大展弦比后掠翼增升构型的数值方法、湍流模型和网格生成标准,并明确理解增升流动的物理特性仍然是一个巨大的挑战^[55]。提高流场的仿真准确度,有助于对增升装置结构做出简洁有效的改型设计,实现减轻结构重量、提升变形效率的目标。流场仿真的准确同时要兼顾增升装置的结构特征,综合开展气动和机构的仿真优化。

4.2 轻质多功能结构设计技术

伴随着各种新材料、新技术的应用,增升装置翼面结构趋向于轻质化、整体化发展,即实现结构多功能的一体化。增升装置作为相对独立的翼面,便于实施结构和功能的整体性设计,特别是整体化成型的复合材料和增材制造技术成为主要应用研究趋势,同时兼顾了抗鸟撞、防除冰和雷电保护的需要。在一体化成型显著降低零件数量和装配工作量的同时,整体化的翼面结构便于从制造阶段控制翼面光洁程度,减少对缝和阶差,这些都是有利于层流形成的外形特征,而且对缝的减少对于机体的降噪也是有益的。

4.3 高可靠运动机构设计技术

增升装置的功能实现是基于可靠的运动机构设计。为实现层流区域的扩大,需要对机翼前缘和后缘的运动机构做出适应性改进,以使相应的

增升装置翼面与机翼形成较好的相对位置关系。对于运动机构设计,应深入研究自适应结构形式,拓展仿生运动机构的应用,实现变形与承载的协调。有别于常规增升装置的缝道机构设计,为实现外形的光顺与整体化,需要采用新型的运动机构和驱动方式,既要与层流的翼面外形相适应,还要降低机构复杂程度,提升整体的承载能力和运动可靠度。降低增升装置运动机构故障率是实现其正常功能的前提,否则气动设计的优势将在可靠性问题上大打折扣。

4.4 高效率层流转化技术

将自然层流技术与主动流控制相结合的混合层流技术,是层流技术发展的一个主要应用趋势。谈到层流控制就要涉及层流转换装置的效率,通过转换设备产生的层流区域大小与设备重量的比值可以看作层流控制设备的效率衡量指标。要提升层流区域的效果,既要从转换原理上改进,又要优化设备,降低动力需求,减轻结构重量,缩小空间占用,从而以较低的附加成本实现层流效果。

5 结束语

(1) 随着减阻、降噪的要求逐步工程化,基于层流机翼的增升装置设计与发展将显著改变未来飞行器的机翼设计,使得飞行过程更节能、更安静。

(2) 通过柔性结构与主动流控制相结合的方式有望提高增升与层流的协调,实现对减阻、降噪指标的技术层面保障。

(3) 在层流机翼的增升装置研究中,存在关键技术有待突破的问题,需要从提高流场仿真准确度、推进结构功能一体化设计、提升运动机构的可靠性、增强层流化设备的转换效率等方面入手来解决。

参考文献

- [1] BANKE J. NextGen aircraft design is key to aviation sustainability [EB/OL]. (2020-04-16)[2020-11-13]. <https://www.nasa.gov/aero/nextgen-aircraft-design-is-key-to-aviation-sustainability>.
- [2] ALLISON E, KROO I, STURDZA P, et al. Aircraft conceptual design with natural laminar flow[C]// The 27th International Congress of the Aeronautical Sciences. UK: Optimage, 2010: 1-2.
- [3] SMITH A. High-lift aerodynamics [J]. *Journal of Aircraft*, 1975, 12(6): 501-530.
- [4] 刘沛清, 李玲. 大型飞机增升装置气动噪声研究进展[J]. *民用飞机设计与研究*, 2019(1): 1-10.
LIU Peiqing, LI Ling. Development of investigation on high-lift device noise for large aircrafts[J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2019(1): 1-10. (in Chinese)
- [5] ANDERSON J D. Ludwig prandtl's boundary layer [J]. *Physics Today*, 2005, 58(12): 42-48.
- [6] ABBOTT I, DOENHOFF A, STIVERS L. Summary of airfoil data: NACA Report No. 824 [R]. US: NACA, 1945.
- [7] 罗佳杰, 宋文滨. 层流机翼及其增升装置嵌套协同优化方法[J]. *航空学报*, 2021, 43(2): 125377.
LUO Jiajie, SONG Wenbin. Nested collaborative optimization of laminar wing and high-lift devices [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 43(2): 125377. (in Chinese).
- [8] WUDERLICH T, DAHNE S, HEIRICH L, et al. Multi-disciplinary optimization of an NLF forward swept wing in combination with aeroelastic tailoring using CFRP [J]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2017, 8(4): 673-690.
- [9] ACARE. Delivering Europe's vision for aviation[C]// Strategic Research & Innovation Agenda. Brussels: ICCAIA, 2017: 13-14.
- [10] VALDES R M A, BURMAOGLU S, TUCCI V, et al. Flight path 2050 and ACARE goals for maintaining and extending industrial leadership in aviation: a map of the aviation technology space[J]. *Sustainability*, 2019, 11(7): 2.
- [11] National Aeronautics and Space Administration. New aviation horizons initiative and complementary investment [R]. Washington: NASA, 2016: 1-6.
- [12] NASA. NASA aeronautics strategic implementation plan 2019 update[R]. Washington: NASA, 2019: 40.
- [13] SCHRAUF G. Status and perspectives of laminar flow[J]. *The Aeronautical Journal*, 2005, 109(2): 639-644.
- [14] BECK N, LANDA T, SEITZ A, et al. Drag reduction by laminar flow Control [J]. *Energies*, 2018, 11(1): 24-25.
- [15] WERNER D. Almost 40 years of airframe noise research: what did we achieve [J]. *Journal of Aircraft*, 2010, 47(4): 353-367.
- [16] RUDOLPH P. High-lift systems on commercial subsonic airliners[R]. US: NASA, 1996.
- [17] GREEN J. Laminar flow control-back to the future[C]// The 38th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. Seattle: AIAA, 2008: 10-11.
- [18] 马晓永, 张彦军, 段卓毅, 等. 自然层流机翼气动外形优化研究[J]. *空气动力学学报*, 2015(6): 812-817.
MA Xiaoyong, ZHANG Yanjun, DUAN Zhuoyi, et al. Study of aerodynamic shape optimization for natural laminar wing [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2015(6): 812-817.

- (in Chinese)
- [19] 杨一雄, 杨体浩, 白俊强, 等. HLFC后掠翼优化设计的若干问题[J]. 航空学报, 2018, 39(1): 155-168.
YANG Yixiong, YANG Tihao, BAI Junqiang, et al. Problems in optimization design of HLFC sweep wing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(1): 155-168. (in Chinese)
- [20] 朱自强, 吴宗成, 丁举春. 层流流动控制技术及应用[J]. 航空学报, 2011, 32(5): 765-784.
ZHU Ziqiang, WU Zongcheng, DING Juchun. Laminar flow control technology and application[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(5): 765-784. (in Chinese)
- [21] LYER V, BERTRAM O. Preliminary design and system considerations for an active hybrid laminar flow control system[J]. Aerospace, 2019, 6(10): 109.
- [22] 李权, 段卓毅, 张彦军, 等. 民用飞机自然层流机翼研究进展[J]. 航空工程进展, 2013, 4(4): 404-405.
LI Quan, DUAN Zhuoyi, ZHANG Yanjun, et al. Progress in research on natural laminar wing for civil aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(4): 399-406. (in Chinese)
- [23] SHI Y, CAO T, YANG T, et al. Estimation and analysis of hybrid laminar flow control on a transonic experiment[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 2020, 58(1): 118-132.
- [24] European Research Establishments in Aeronautics. From air transport system 2050 vision to planning for research and innovation[R]. Europe: EREA, 2012: 11-12.
- [25] IANNELLI P, WILD J, MINERVINO M, et al. Design of a high-lift system for a laminar wing[C]// The 5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences. Germany: DLR, 2013: 3-5.
- [26] WALLIN S, CHEN S, CAPIZZANO F, et al. Unsteady CFD results for deflecting high-lift systems[C]// 8th European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering (ECCOMAS 2020) & 14th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XIV). Barcelona: CIMNE, 2021: 3856.
- [27] 张明辉, 陈真利, 毛俊, 等. 翼身融合布局机克鲁格襟翼设计[J]. 航空学报, 2019, 41(9): 86-99.
ZHANG Minghui, CHEN Zhenli, MAO Jun, et al. Design of Krueger flap for civil aircraft with blended-wing-body[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 41(9): 86-99. (in Chinese)
- [28] KULHANEK R, PATEK Z, VRCHOTA, P, et al. Experimental and CFD study of slotted Krueger flaps aerodynamics in critical locations [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2020, 31(2): 618-628.
- [29] SHMILOVICH A, DICKEY E. Leading edge devices for enhanced high-lift and reduced noise [C]// AIAA Scitech 2020 Forum. USA: AIAA, 2020: 115-127.
- [30] 于靖军, 郝广波, 陈贵敏, 等. 柔性机构及其应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 59-60.
YU Jingjun, HAO Guangbo, CHEN Guimin, et al. State-of-art of compliant mechanisms and their applications [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 59-60. (in Chinese)
- [31] VASISTA S, RIEMENSCHNEIDER J, MONNER H P. DLR's research in morphing structures for aeronautics[C]// AIAC 2019. Germany: DLR, 2019: 10-15.
- [32] SCHORSCH O, LUHRING A, NAGEL C. Smart intelligent aircraft structures (SARISTU) [C]// Proceedings of the Final Project Conference. Switzerland: Springer, 2016: 187-197.
- [33] VITTORIO C, GASPARI D A, RICCI S. Optimization of compliant adaptive structures in the design of a morphing droop nose [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 27(7): 22.
- [34] BRIGHT M, KORNTHEUER A, KOMADINA S, et al. Development of advanced high lift leading edge technology for laminar flow wings[C]// The 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston: AIAA, 2013: 1-12.
- [35] 葛文杰, 朱鹏刚, 刘世丽, 等. 基于柔性机构的机翼前缘变形多目标优化[J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(2): 211-217.
GE Wenjie, ZHU Penggang, LIU Shili, et al. Exploring further multi-objective optimization for shape change of aircraft leading edge using compliant mechanisms [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010, 28(2): 211-217. (in Chinese)
- [36] 纪斌, 金栋平. 柔性伸缩蒙皮支撑结构的多目标拓扑优化[J]. 计算力学学报, 2018, 35(1): 1-6.
JI Bin, JIN Dongping. Multi-objective topology optimization of support structure for flexible telescope skin [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2018, 35(1): 1-6. (in Chinese)
- [37] 吕帅帅, 王彬文, 杨宇. 三维变弯度机翼前缘柔性蒙皮优化设计[J]. 应用数学和力学, 2020, 41(6): 604-614.
LYU Shuaishuai, WANG Binwen, YANG Yu. Optimal design of flexible skin on the leading edge of a 3D variable-camber wing [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2020, 41(6): 604-614. (in Chinese)
- [38] 吕帅帅, 王彬文, 杨宇, 等. 基于遗传算法的机翼柔性蒙皮全参数优化设计[J]. 应用力学学报, 2020, 37(2): 617-623, 931.
LYU Shuaishuai, WANG Binwen, YANG Yu, et al. Normal optimization design of flexible skin of airfoil based on genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(2): 617-623, 931. (in Chinese)
- [39] 倪迎鸽, 杨宇. 自适应机翼翼型变形的研究现状及关键技术[J]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 297-308.
NI Yingge, YANG Yu. Research on the status and key technology in morphing airfoil of adaptive wings [J]. Advances in

- Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(3): 297-308. (in Chinese)
- [40] 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)
- [41] PECORA R, MANGIFICO M, AMOROSO F, et al. Structural design of an adaptive wing trailing edge for large aeroplanes[C]// Smart Intelligent Aircraft Structures Proceedings of the Final Project Conference. Switzerland: Springer, 2016: 159-170.
- [42] NGUYEN N, LEBBOFSKY S, TING E, et al. Development of variable camber continuous trailing edge flap for performance adaptive aeroelastic wing[C]// SAE 2015 Aero-Technology Congress & Exhibition. US: SAE International, 2015: 4-5.
- [43] 解江, 杨智春. 自适应机翼柔性翼肋的受控运动学规律研究[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(7): 917-921.
XIE Jiang, YANG Zhichun. Study of controlled kinematics of the flexible rib of adaptive wing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2007, 26(7): 917-921. (in Chinese)
- [44] 杨智春, 党会学, 解江. 基于动网格技术的柔性后缘自适应机翼气动特性分析[J]. 应用力学学报, 2009, 26(3): 548-553.
YANG Zhichun, DANG Huixue, XIE Jiang. Aerodynamic characteristics of flexible trailing edge adaptive wing by unstructured dynamic meshes[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2009, 26(3): 548-553. (in Chinese)
- [45] 王瑞, 田云, 刘沛清, 等. 大型飞机柔性变弯后缘襟翼气动/机构优化设计[C]// 2017年中国力学大会. 北京: 中国力学学会, 北京理工大学, 2017: 11.
WANG Rui, TIAN Yun, LIU Peiqing, et al. Aerodynamic/mechanism optimization design of flexible bending trailing edge flap for large aircraft[C]// The Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics 2017. Beijing: The Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Beijing Institute of Technology, 2017: 11. (in Chinese)
- [46] 王斌, 郝璇, 郭少杰, 等. 宽体客机巡航机翼变弯度减阻技术[J]. 空气动力学学报, 2019, 37(6): 974-982.
WANG Bin, HAO Xuan, GUO Shaojie, et al. Cruise drag reduction of variable camber wing of wide-body civil transport[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37(6): 974-982. (in Chinese)
- [47] 何萌, 杨体浩, 白俊强, 等. 基于后缘襟翼偏转的大型客机变弯度技术减阻收益[J]. 航空学报, 2020, 41(7): 165-180.
HE Meng, YANG Tihao, BAI Junqiang, et al. Drag reduction benefits of variable camber technology of airliner based on trailing edge flap deflection[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(7): 165-180. (in Chinese)
- [48] MILLER E, CRUZ J, LUNG S, et al. Evaluation of the hinge moment and normal force aerodynamic loads from a seamless adaptive compliant trailing edge flap in flight[C]// The 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston: AIAA, 2016: 3-6.
- [49] RECKZEH D. Multifunctional wing movables: design of the A350XWB and the way to future concepts[C]// The 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Germany: ICAS, 2014: 71-73.
- [50] CIOBACA V, WILD J. An overview of recent DLR contributions on active flow-separation control studies for high-lift configurations[J]. Aerospace Lab, 2013(6): 3-5.
- [51] SCHOLZ P, KAHLER C, RADESPIEL R, et al. Active control of leading edge separation within the german flow control network[C]// 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. USA: AIAA, 2009: 71-77.
- [52] HAUCKE F, BAUER M, GRUND T, et al. An active flow control strategy for high-lift flaps[C]// CEAS/KATnet II Conference on Key Aerodynamics Technologies. Bremen: KATnet II Germany, 2009: 135-147.
- [53] 郝璇, 刘芳, 王斌. 基于襟缝翼吹气技术的短距起降飞行器增升策略的数值模拟研究[J]. 航空工程进展, 2016, 7(4): 408-419.
HAO Xuan, LIU Fang, WANG Bin. The numerical simulation research on high lift enhancement strategies of STOL aircraft based on flap and slat blowing[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7(4): 408-419. (in Chinese)
- [54] DESALVO M, WHALEN E, GLEZER A. High-lift performance enhancement using active flow control[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 2020, 58(10): 4228-4242.
- [55] RUMSEY C, SLOTNICK J, SCLAFANI A. Overview and summary of the third AIAA high lift prediction workshop [J]. Journal of Aircraft, 2018, 56(1): 22-23.

作者简介:

李云鹏(1977-),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:增升装置、机翼结构设计。

韩永志(1981-),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:结构优化,创新结构设计。

(编辑:马文静)