新一代绿色超声速民机的发展现状与挑战

徐悦^{1*}, 韩忠华², 尤延铎³, 陈黎¹

1. 中国航空研究院, 北京 100012;

2. 西北工业大学航空学院, 西安 710072;

3. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361102

* 联系人, E-mail: xuyue@cae.ac.cn

民航客机早已成为人们生活和交通运输中不可或缺的一部分, 而未来民机发展的一个重要动向就是进一步提高飞行速度来缩减飞行时间, 使空中旅行更为高效、便捷和舒适。目前, 各航空大国纷纷投身于新一代绿色超声速民机的研发浪潮中。2019年6月30日, 中国科学技术协会正式发布了2019年度20个对科学发展具有导向作用, 对技术和产业创新具有关键作用的前沿科学问题和工程技术难题, “绿色超声速民机设计技术”成为航空领域入选的唯一代表, 为加大社会各界对未来国产绿色超声速民机研制的重视力度、顺应世界民机发展趋势、推动我国超声速民机技术的发展提供了重要机遇。

1 发展超声速民机的现实意义

回顾世界民航发展史, 民机飞行速度一直呈不断提高的趋势。其诞生之初的时速仅为数十、上百千米, 到20世纪50年代美国波音707喷气客机面世后, 飞行速度提高到高亚声速。问世于20世纪70年代的欧洲“协和”/苏联图-144等第一代超声速民机的飞行速度提高到马赫数2以上。今后, 这种趋势还将会继续下去。究其原因, 主要是随着社会经济发展和民众生活水平的提高, 人们对空中旅行舒适性的要求越来越高, 其中一个重要方面就是尽量缩短长途飞行时间以避免由此引起的厌倦疲劳, 而这只能通过提高飞机速度来解决。尤其是对远距离飞行, 特别是洲际飞行来说, 超声速、高超声速飞机的现实意义更加突出。目前, 从美洲、欧洲到亚洲的航班均需要十多个小时的飞行时间, 即使机上娱乐设施再先进、再完善, 也很难消除乘客的疲劳感, 因而非常有必要将其缩减一半, 乃至更短时间。从另一方面看, 进一步提高民机的飞行速度, 也是提高人们出行效率, 以适应越来越快的生活/工作节奏的需要, 可有力促进世界各地之间的经济、科技、文化交往和人员往来。此外, 民机作为一种高速交通工具, 目前正面临着地面高速公路, 尤其是高速铁路(国外已经开始研究可在地面真空管道内实现超声速行驶的超高速列车)的有力竞争。今后只有进一步提高飞行速度, 实现超声速, 甚至高超声速飞行, 才能继续维持其相对于地面交通工具

徐悦 中国航空研究院研究员、技术研究一部副总工程师、中国科学技术协会青年科学家论坛执行主席、中国航空学会高级会员、中国航空学会空气动力学分会及舰载机分会委员。2007年于北京航空航天大学获航空宇航推进理论与工程专业博士学位, 2007~2010年在总装备部工程设计研究总院从事博士后

研究工作。长期从事超声速民机、空气动力学、新概念飞行器等方面的研究工作。研究成果获2010和2019年军队科技进步奖与2019年中国航空学会科学技术奖等。

的天然优势。因此, 尽管超声速民机的研制、采购和使用成本将不可避免地会高于传统亚声速飞机, 但其对相当部分长途飞行的乘客和航空公司仍具有很强的吸引力, 因而在与后者的市场竞争中仍拥有自身独特的优势。

2 世界超声速民机发展历程

世界超声速民机的发展最早可以追溯到20世纪50年代。当时, 随着喷气发动机、后掠翼等技术的采用, 战斗机、轰炸机等军用飞机相继实现了超声速甚至两倍声速飞行, 美国、苏联、英国、法国等随即纷纷开始了超声速民机的研制, 以期抢占未来超声速航空运输市场。到20世纪70年代, 苏联图-144和欧洲“协和”相继研制成功并投入商业营运, 代表着世界第一代超声速民机发展热潮的到来。但囿于当时的技术条件, 这两型飞机均存在油耗高、航程短、载客少、使用成本昂贵、起降噪声大、音爆问题严重等性能缺陷, 因此从市场角度来看均不太成功, 其中图-144服役不到10年(载客运营仅半年时间)即停止了航线飞行, “协和”则依靠政府补贴勉强维持商业运营, 到2003年也全部退役。到20世纪90年代, 随着航空科技的发展和民航市场需求的增长, 继“协和”/图-144之后的新一代超声速客机的发展再次受到人们重视, 世界范围内出现了一股

延续至今的超声速民机研制热潮。目前,美国、欧洲各国、俄罗斯、日本等均提出了各自的超声速/高超超声速民机研发计划,并取得了不同程度的进展,其中美国处于明显的领先地位。

为了抢占世界民机技术发展的制高点,维持自身在相关领域的领先地位,美国多年来一直没有放松对超声速民机相关技术的研究。但鉴于先前过于强调超声速民机的大型化、高航速、远航程而带来研制技术难度过大的问题,目前美国已经将关注重点放在小型超声速民机,尤其是超声速公务机上,而将发展大型超声速/高超超声速民机的目标推迟到更远的未来去实现。在这样的思想指导下,目前美国正在开展三型航速 $Ma1.6\sim1.8$ 、载客量 8~18 人的超声速公务机的研制,它们分别是超声速航宇国际公司的“安静超声速运输机”(quiet supersonic transport, QSST)、阿尔利昂公司的 AS2 和斯派克航宇公司的 S-512。与此同时,美国博姆技术公司还在研制一种名为 Overture、外形与“协和”相似的小型超声速民机,其原型机预计于 2023 年首飞。此外,美国波音公司还于 2018 年 6 月推出一种采用大后掠三角翼、双垂尾、乘波体布局的高超声速民机概念方案,其飞行速度可达 $Ma5$,飞行高度超过 29 km,并计划在 21 世纪 20 年代中期进行验证机测试,2040 年前后实现商业运营。

俄罗斯在苏联解体之后,放弃了图-144 的后继机——图-244 大型超声速民机(载客 300 人、航程 10000 km)研发计划,也将研究重点放在技术难度相对较小、成本费用相对较低的超声速公务机上。在 20 世纪 90 年代至 21 世纪初的十多年间,俄罗斯先后推出了图-344、图-444、S-21、S-51 等一系列超声速公务机方案,但由于资金、技术和市场等方面原因,这些方案均没能转入正式研制。在先前的技术成果基础上,目前俄罗斯正在开展 6~8 座、12~16 座、60~80 座等不同级别的新一代超声速公务机/小型客机研究,同时也在探讨在图-22M、图-160 轰炸机基础上派生发展超声速民机的可行性。

自“协和”退役以来,欧洲一直在探讨该机后继机的发展,并曾提出多个超声速民机方案。目前欧洲已将重点转向高超超声速/准高超超声速飞行器领域,并陆续实施了多个相关研究计划,其中最具有代表性的是“长期先进推进概念与技术”(long-term advanced propulsion concept and technologies, LAPCAT)和“零排放近高超超声速运输机”(zero emission hyper sonic transport, ZEHST)计划。前者对飞行速度分别为 $Ma4.5$ 、 $Ma5$ 和 $Ma8$ 的 3 种飞行器概念方案进行了系统研究,后者则拟推出一种巡航速度 $Ma4$ 、巡航高度 32 km 的环保型超声速民机,并预计在 2020 年后进行技术验证,2050 年左右投入使用。此外,目前英国 Hypermach 公司还在研制一种名为“声速星”(SonicStar)、平飞速度达 $Ma3.6$ (今后可提高到 $Ma4$)的超声速喷气公务机。该机采用了等离子体气动控制、电动-燃气涡轮混合动力等创新技术,以满足世界各国对民机环保性日益苛刻的要求。

日本作为超声速民机领域的后起之秀,多年来也一直致力于新一代超声速民机技术的研究开发。日本航宇研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)在 1997~2006 年间主导实施了“国家超声速运输机试验”(National Experimental Supersonic Transport, NEXST)计划,随后又开展了后续的“静音超声速技术论证”(Silent Supersonic Technology Demonstrator, S3TD)计划,对超声速减阻、气动外形优化、复合材料、飞控系统、动力装置等技术进行了验证测试,以促进新一代低音爆、低噪声、低排放超声速民机的研制。在相关技术基础上,JAXA 提出了一种载客 200~300 人、航程为 11000 km 的大型超声速民机方案,其音爆、噪声、排放将分别降至“协和”飞机的 1/2, 1/10, 1/4, 而运营票价仅相当于波音 747 飞机的 1.3 倍。

3 发展绿色超声速民机的关键技术挑战

随着国家间、民间的各种交往日益密切而频繁,传统亚声速民机的性能弊端日益暴露,在很多方面已难以适应时代要求,对新一代超声速民机的需求也越来越迫切。然而自“协和”停飞以来,世界上已经没有正在商业运营的超声速民机,新一代超声速民机的研发困难重重。这是因为新一代超声速民机必须具备绿色环保的系列特征,这其中除了低阻力、低油耗的常规需求外,还要保证其音爆水平降到可接受的程度,并满足日益提高的机场周边噪声标准和发动机低排放要求,绿色超声速民机设计中仍存在如下若干关键问题亟待解决。

3.1 音爆预测与抑制

音爆是由飞行器在超声速飞行时产生的激波和膨胀波系在大气中演化,传播到地面引起的巨大爆炸声,是超声速飞行中特有的一种气动声学现象^[1,2]。图 1 为音爆产生、传播和“N”型波形成示意图^[3]。一般情况下,音爆的强度较大、持续时间短,声压短时间内发生剧烈变化,引起动物的惊吓、恐慌,妨碍人类的正常作息,对生态环境和人类生产带来严重影响。自 20 世纪 50 年代,人们就对音爆开展了大量研究,旨在降低超声速飞行时引起的音爆强度。然而,截至目前先进超声速民机方案的音爆水平才降低到 80~85 PLdB(PLdB 又称感觉声压级,计算方法为 Stevens^[4]发展的 MARK VII 方法),而 NASA(National Aeronautics and Space Administration)的“N+3”计划要求音爆水平不超过 70 PLdB。尽管国际民航组织还未给出具体的音爆标准,但 NASA 的要求也具有一定参考价值。由此可见,现存的巨大差距使新一代绿色超声速民机的研制面临巨大挑战,音爆预测与抑制成为超声速民机发展过程中的关键问题之一。

准确地预测音爆是超声速民机研制过程中进行音爆水平评估和抑制的前提,是绿色超声速民机发展中的重要研究课题^[2,3]。自 20 世纪 50 年代开始,国际上针对音爆预

图1 (网络版彩色)音爆形成示意图^[3]

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of sonic boom^[3]

测开展了系统性研究,发展了 Whitham 修正线性化音爆预测理论、简化预测方法、波形参数法、CFD(computational fluid dynamics)近场计算方法、基于增广 Burgers 方程的远场传播方法、全场 CFD 模拟等多种音爆计算和远场传播方法。考虑到计算量和音爆预测精度的因素,近场采用 CFD 计算与远场基于增广 Burgers 方程传播已成为当前国际上预测音爆的主要步骤和方法。例如,美国航空航天学会(American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA)于 2014 和 2017 年,以及将于 2020 年举办的音爆预测研讨会中,都将该方法作为代表对当前音爆预测水平进行讨论(<https://lbpw.larc.nasa.gov/>)。

目前,在近场音爆的 CFD 计算方面,在保证近场音爆信号计算精度的前提下,已能够应用网格自适应技术大幅度减小计算量,提高近场音爆的计算效率。在远场传播方面,已经能够考虑大气分子弛豫、大气热黏吸收、大气分层、几何声学、大气风梯度和非线性效应对音爆传播的作用。此外,模拟地表大气的湍流效应对音爆的作用和预测由飞机非定常飞行引起的超音爆方面也逐渐受到关注。因此,音爆预测方法未来将主要朝着考虑更多大气效应(如大气边界湍流效应等)和非巡航状态下音爆预测的方向发展。

音爆抑制技术主要分为基于流动控制的音爆抑制技术和基于不同低音爆机理的布局设计方法两大类。基于流动控制的音爆抑制技术又分为主动抑制技术和被动抑制技术。主动抑制技术通常利用附加能量来干扰飞行器周围的激波膨胀波系来实现音爆抑制,如热流注入、电磁聚焦、声阻抗和矢量发动机技术,通过改变飞机附近波系分布,形成激波干涉或反射等来削弱波系强度,进而降低音爆。被动抑制技术主要利用机械结构来改变飞机周围流场,设计合理的波系分布来降低音爆,其最具代表性的是静音锥技术。2004 年,湾流公司发明了静音锥技术并将其应用于 QSJ(quiet supersonic jet)超声速公务机上。后来 NASA 使用加装静音锥的 F-15B 进行飞行测试,进一步验证了静音锥降低音爆的效果。

基于不同低音爆机理的布局设计方法主要有 JSJD (Jones-Seebass-George-Darden)低音爆反设计方法和低音爆优化设计方法。JSJD 方法始于 20 世纪 60 年代,其通过在机头和机尾设计较强的激波来防止激波系归并,最终在远场形成平顶状或斜坡状的低音爆波形,迄今为止该方法仍然在超声速飞机布局设计中发挥重要作用。低音爆优化设计方法是随着气动优化技术的进步发展而来的,20 世纪 90 年代就有低音爆布局优化设计的相关报道。低音爆优化设计方法目前主要有基于伴随的梯度优化方法、基于代理优化的低音爆设计方法和传统进化类算法,在运用高精度的音爆分析中,前两类优化设计方法由于计算效率较高而受到广泛研究。2011 年, Rallabhandi^[5]就推导出了耦合近场 CFD 方法与远场 Burgers 方程传播的伴随方程,并成功应用到了超声速客机的低音爆优化设计中。近年来,国内黄江涛等人^[6]也发展了伴随优化方法。2018 年, Kriz^[7]采用代理优化方法对第二届音爆研讨会的轴对称标模进行了低音爆优化设计,国内的乔建领等人^[8]也采用该方法对音爆标模进行了低音爆设计,验证了优化技术在低音爆设计和抑制中的地位。

目前,这两大类音爆抑制技术方法仍然存在一些不足。基于流动控制的音爆抑制技术中,如静音锥技术、能量注入等需要在降低音爆的同时,减小对气动性能等方面的影响。基于不同低音爆机理的布局设计方法中,低音爆优化设计方法需要进一步考虑在兼顾飞机气动性能的情况下降低音爆强度,发展考虑低音爆设计的多学科优化设计技术,以同时满足低音爆和较高气动性能的要求。

3.2 超声速民机宽速域高效气动布局

超声速民机飞行马赫数跨度大,以巡航马赫数为 1.6 的超声速民机为例,其由起飞到巡航的马赫数跨度约为传统高亚声速民机的 2 倍左右。飞行马赫数的跨度大,要求飞机能够在起飞阶段到巡航阶段及巡航阶段到着陆阶段仍然具有较高的气动效率,才能为超声速巡航阶段提供充裕的燃油,增加超声速民机的航程。以西安飞北京的航班为例,目前历时最少为 1 小时 25 分钟,其中巡航时间约为 50 分钟,非巡航速度飞行时间约占总时间 40%。若以超声速民机飞行,非巡航速度飞行时间可能达到 50%。此外,据估计,如果“协和”号超声速民机在亚声速域范围内的升阻比降低到 7,那么有 40%的燃油将用于低速飞行^[9]。也就是说,亚声速或跨声速飞行的气动效率对超声速民机的燃油消耗有重要影响。然而,低速飞行性能一般要求飞机具有大展弦比、小后掠角,而超声速巡航性能的要求恰好相反。因此,为研制经济绿色超声速民机,兼顾低速和超声速气动性能的宽速域高效气动布局成为其关键问题之一。

为更好兼顾超声速民机的低速起降性能和超声速巡航性能,目前研究的气动布局形式主要有可变后掠翼布局、斜置翼布局、双向飞翼布局和三角翼布局等,4 类布局

示意图如图2所示。

可变后掠翼布局根据超声速民机低速飞行和超声速巡航时对机翼后掠角和展弦比的不同要求而提出,它能够较好地兼顾低速和高速气动性能。目前,美国湾流公司设计的一款超声速公务机的概念机就采用了该布局^[10]。在起降和低速飞行阶段,机翼后掠翼角较小、展弦比大,而在进入超声速巡航阶段时,机翼后掠角减小,以提高巡航性能。采用可变后掠机翼布局,湾流公司的概念机能够很好地兼顾低速和超声速巡航性能。然而,该布局存在机翼转向机构结构设计困难、重量较大等缺点。

斜置翼布局是另外一种考虑高低速飞行时对机翼后掠角和展弦比的不同要求而设计的布局。它与后掠翼的最大不同是,在超声速巡航时两侧机翼分别向前和向后转向,形成前掠翼和后掠翼,其升力分布和体积等效截面积分布更广,降低波阻的效果更加显著。同时,由于两侧机翼转向一致,可将两翼连接成整块机翼,并由中央转向机构控制转向。相比于可变后掠翼,斜置翼布局能减小机翼设计和转向机构的结构重量。1977年, Jones^[11]针对兼顾超声速和跨声速性能的超声速运输机提出了斜置翼布局,该布局具有低阻力、低结构重量、低机场噪声、较好的亚声速飞行效率和超声速巡航性能的优点。2006年, Wintzer等人^[12]通过对比分析小型超声速民机的斜置翼布局与常规布局形式的性能,发现斜置翼布局的超声速巡航性能与常规布局相近,但低速性能远高于常规布局。2009年起,国内诸多研究单位也对斜置翼布局在超声速民机中的应用开展了广泛研究,并取得了重要研究成果。然而,斜置翼布局目前仍然存在诸如纵向和横向稳定性等问题,需要进一步研究。

双向飞翼布局通过在低速和超声速巡航时转变飞行方向,来达到兼顾低速和超声速巡航时气动性能的目的。2010年,美国迈阿密大学的 Espinal等人^[13]提出了一种超声速民机的双向飞翼布局。该布局以大展弦比状态进行起飞和着陆,而在超声速巡航飞行时,飞翼水平旋转90°,以小展弦比状态进行超声速飞行。此外,在巡航状态下,该布局的升力分布沿飞行轴向分布较为均匀,有效改善了音爆等效截面积分布,具有低音爆的特点。然而,双向飞翼布局存在由低速飞行到超声速飞行转向的关键问题。

为了使超声速民机能够在高低速性能之间取得较好折中且现阶段容易实现,三角翼布局更为众多研究机构和航空制造商关注和研究,例如美国 NASA 低音爆公务机的验证机 X-59、美国 BOOM 公司的 BOOM Airliner、俄罗斯苏霍伊设计局设计的 S-21 SSBJ(supersonic business jet)、欧洲的 HISAC SSBJ 概念布局等^[9]。在考虑起降阶段和低速飞行的性能时,有些布局将三角翼设计成内外两段机翼,内段翼的前缘后掠角较大,外段翼较小,如 S-21;而有些布局将三角翼前缘线设计成 S 形,如 X-59、“协和”号。

综上所述,三角翼布局在兼顾高低速气动性能的超声速民机布局中受到了诸多研究机构的关注。而双向飞翼布

图2 (网络版彩色)4类超声速民机气动布局

Figure 2 (Color online) Four types of aerodynamic configuration of supersonic civil aircraft

局、可变后掠翼布局以及斜置翼布局在宽速域高效气动性能方面虽然有非常吸引人的优势,但目前存在的问题有待进一步研究。

3.3 超声速民机动力装置

理想的超声速民机需要具备水平起降、可重复使用、远距离超声速巡航、经济环保和全速域内可靠高效工作等基本能力,在大推力、低油耗、少排放、低噪声等指标方面对动力装置提出了更高要求。现有常规空天动力装置(如涡喷/涡扇发动机、冲压发动机、火箭等)尚不能很好地满足民机超声速飞行的需求,新动力技术的开发与应用或新概念动力装置的发展与突破已迫在眉睫。超声速民机在发展过程中,应根据技术发展的成熟程度与工程实现的复杂程度,遵循“由易至难、由中低超声速至中等超声速再至高超声速”的不同目标需求的原则,采用不同型式的动力装置。

在目前军/民用飞机涡扇发动机的基础上,针对超声速民机的使用环境进行改型设计及优化,发展可供小型超声速民机,尤其是超声速公务机使用的先进涡扇发动机。该类发动机的关键技术难题集中在降低噪声与排放和提高经济性等方面。研究表明,选择中等涵道比(3~4)会适当减小波阻、降低噪声,并保证较高的燃油效率。此外, P&W, GE 和 RR 等公司已开展了低排放燃烧室的研究。GE 和 NASA 于 2014 年测试了某一特定喷管概念,极大地降低了地面阶段的噪声。2016 年, NASA 联合 Aerion、波音、洛马等公司,旨在对低噪声动力系统的全新概念开展系列地面试验。2018 年, GE 正式宣布为 Aerion 公司的 AS2 超声速公务机完成了首台超声速发动机 Affinity 的初步设计,其可满足当前排放标准和 5 级噪声限制要求。Affinity 属于双轴中等涵道比发动机(图 3),采用了低阻力进气锥、可调后缘的固定进口导流叶片、2 级宽弦整体叶盘风扇、9 级高压

压气机、环形燃烧室、1级高压涡轮、2级低压涡轮和外部膨胀式可调喷管,并由全权限数字式电子控制(full authority digital electronic control, FADEC)系统控制^[14]。Affinity有望结合军用发动机高速巡航和民用发动机经济环保的优点,为超声速民机发展取得革命性进步。

针对大型化、高航速、远航程的超声速民机,需要适时推出先进的变循环发动机(variable cycle engine, VCE)。VCE通过改变部件几何形状、尺寸和位置,来调节整机热力循环参数,调整发动机循环工作模式,进而使发动机在各种工况下均处于最佳工作状态,如图4所示^[15],图中数字序号表示发动机典型截面编号。自20世纪60年代起,美、日等国便对VCE展开研究。1971年,NASA启动了超声速巡航研究(Supersonic Cruise Research, SCR)计划,GE与PW公司提出双涵道和变流路控制两种不同概念的VCE方案。1976年,NASA开展了超声速推进技术研究计划——VCE项目。1985年,NASA制定了高速推进研究(High Speed Propulsion Research, HSPR)计划。1989年,日本开启高超速运输推进系统研究(Hypersonic Transport Propulsion System Research, HYPR)计划,研制名为HYPR-T的VCE。前期各项计划的实施使美国在VCE关键技术领域取得重大突破,并于20世纪90年代研制出双外涵带核心驱动风扇(core driven fan stage, CDFS)的世界首台变循环发动机F120。20世纪90年代至21世纪初,在综合高性能涡轮发动机技术(Integrated High Performance Turbine Engine Technology, IHPTET)计划下,GE与艾利逊公司在F120的基础上研制出第四代VCE——可控压比发动机(controlled pressure ratio engine, COPE)^[16]。自适应(循环)发动机(adaptive cycle engine, ACE)是VCE的延伸与发展,亦被称为第五代VCE^[17]。2007年,美国空军在VAATE研究计划下启动自适应通用发动机技术(Adaptive Versatile Engine Technology, ADVENT)计划,旨在开发和验证ACE关键技术。GE公司采用COPE的关键技术,在发动机外围增加一个从主风扇出来的单独流道和一个“转子叶片上的风扇(fan on blade, FLADE)”^[18]。2012年,美国空军开启ADVENT的后续计划——AETD计划,旨在促进采用三流道结构的ACE技术的成熟。PW公司对F135发动机进行了深度改型,并开展了自适应风扇台架试验。2016年,美国空军制定了ACE新计划——AETP计划,旨在延续AETD计划,实现三流道自适应发动机从技术原型机到工程验证机的顺利过渡。在多年来对ACE的研究基础上,美国又规划了ADAPT计划,旨在将先前不够实用的新技术引入到具有发展潜力的生产型ACE上。

针对体型更大、航程更远、航速更快($Ma5+$)的飞行需求,需要配套研制适用于亚-跨-超-高超声速的全速域内可重复高效使用的组合动力装置。目前绝大部分公开的高超声速飞机方案中,涡轮基组合循环(turbine-based combined cycle, TBCC)发动机是最为主流的动力方案。TBCC是以涡

图3 (网络版彩色)GE Affinity 先进涡扇发动机结构示意图

Figure 3 (Color online) GE Affinity advanced turbofan engine

图4 (网络版彩色)典型变循环发动机结构示意图

Figure 4 (Color online) Typical variable cycle engine

轮发动机为基础,通过与冲压发动机、火箭发动机等动力形式进行科学组合形成的全速域动力系统,具有全域内比冲高、飞行速度范围广、可重复使用等优势^[19]。自20世纪50年代起,美国便对TBCC展开研究,主要围绕高速涡轮基技术、冲压发动机技术和组合技术制定了一系列研究计划。在涡轮基技术领域,典型的研究计划包括IHPTET/VAATE, MIPCC, RATTLRS, HiSTED和STELR等。在冲压发动机技术领域,美国开展了HyTech, FALCON, X-51A和MSCC等计划。在组合技术领域,美国开展的研究计划主要包括RTA, FaCET, MoTr和AFRE等。其中,AFRE计划由DARPA于2016年正式公布,旨在研发和地面验证能在 $Ma0\sim5+$ 范围内连续工作的碳氢燃料、全尺寸TBCC发动机,试图完成发动机地面模态转换演示验证。此外,日本、俄罗斯、欧盟等也对TBCC展开了研究,如日本启动了组合循环发动机验证项目HYPR90-C,并研制了吸气式涡轮冲压膨胀循环(air-turbo ramjet engine, ATREX)发动机;俄罗斯为两级入轨飞行器MIGAKS研发了先进的涡轮冲压组合动力;欧盟LAPCAT计划亦论证了以TBCC为动力的民用高超声速飞行器实现半环球航程的可行性。

4 结语

超声速民机不仅具备传统亚声速民机难以比拟的性

能优势,更能适应世界民航运输业快速发展的时代要求,因此超声速民机已逐渐成为世界航空工业界的研究热点。但是,“协和”、图-144等第一代超声速民机的发展兴衰,以及各国新一代超声速民机研发的经验教训表明,未来超声速民机设计面临的最大挑战是要同时满足经济性和环保性方面的要求。以目前世界范围内的超声速民机设计技术水平来衡量,要推出满足相关适航标准、具备足够市场竞争力的新一代绿色超声速民机,实现经济可承受的绿色超声速飞行存在极大挑战。与20世纪60~70年代相比,当今世界的航空科技水平有了巨大提高,先前阻碍超声速民机实用化的各种技术瓶颈正不断得以缓解或消除,研制绿色超声速民机的技术条件日益成熟。可以预见,随着世界各国相关研发工作的推进,新一代绿色超声速民机将有望在21世纪第3个10年结束之前面世。

争力的新一代绿色超声速民机,实现经济可承受的绿色超声速飞行存在极大挑战。与20世纪60~70年代相比,当今世界的航空科技水平有了巨大提高,先前阻碍超声速民机实用化的各种技术瓶颈正不断得以缓解或消除,研制绿色超声速民机的技术条件日益成熟。可以预见,随着世界各国相关研发工作的推进,新一代绿色超声速民机将有望在21世纪第3个10年结束之前面世。

推荐阅读文献

- 1 Zhu Z Q, Lan S L. Study of supersonic commercial transport and reduction of sonic boom (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2015, 36: 2507–2528 [朱自强, 兰世隆. 超声速民机和降低音爆研究. *航空学报*, 2015, 36: 2507–2528]
- 2 Han Z H, Qiao J L, Ding Y L, et al. Key technologies for next-generation environmentally-friendly supersonic transport aircraft: A review of recent progress (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2019, 37: 620–635 [韩忠华, 乔建领, 丁玉临, 等. 新一代环保型超声速客机气动相关关键技术与研究进展. *空气动力学学报*, 2019, 37: 620–635]
- 3 Qian Z S, Han Z H. Progress and challenges of sonic boom research (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2019, 37: 601–619 [钱战森, 韩忠华. 声爆研究的现状与挑战. *空气动力学学报*, 2019, 37: 601–619]
- 4 Stevens S S. Perceived level of noise by mark VII and decibels. *J Acoust Soc Am*, 1972, 51: 575–601
- 5 Rallabhandi S K. Sonic boom adjoint methodology and its applications. In: 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2011
- 6 Huang J T, Zhang Y D, Gao Z H, et al. Sonic boom optimization of supersonic jet based on flow/sonic boom coupled adjoint equations (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2019, 40: 51–61 [黄江涛, 张绎典, 高正红, 等. 基于流场/声爆耦合伴随方程的超声速公务机声爆优化. *航空学报*, 2019, 40: 51–61]
- 7 Kirz J. Surrogate-based shaped optimization of a low boom axisymmetric body. In: 2018 Applied Aerodynamics Conference, 2018
- 8 Qiao J L, Han Z H, Song W P. An efficient surrogate-based global optimization for low sonic boom design (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2018, 39: 67–80 [乔建领, 韩忠华, 宋文萍. 基于代理模型的高效全局低音爆优化设计方法. *航空学报*, 2018, 39: 67–80]
- 9 Sun Y, Smith H. Review and prospect of supersonic business jet design. *Prog Aerosp Sci*, 2017, 90: 12–38
- 10 Henne P A. Case for small supersonic civil aircraft. *J Aircraft*, 2005, 42: 765–774
- 11 Jones R T. The oblique wing-aircraft design for transonic and low supersonic speed. *Acta Astronaut*, 1977, 4: 99–109
- 12 Wintzer M, Sturdza P, Kroo I. Conceptual design of conventional and oblique wing configurations for small supersonic aircraft. In: 44th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, 2006
- 13 Espinal D, Lee B, Sposato H, et al. Supersonic bi-directional flying wing, Part II: Conceptual design of a high speed civil transport. In: 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2010
- 14 Fu Y, Lu J. Powerplant is the key for the return of supersonic airliners (in Chinese). *Aerosp Power*, 2019, 6: 15–16 [付玉, 卢娟. 发动机成为超声速客机回归的关键. *航空动力*, 2019, 6: 15–16]
- 15 Gou X Z, Zhou W X, Huang J Q. Component-level modeling technology for variable cycle engine (in Chinese). *J Aerosp Power*, 2013, 28: 104–111 [苟学中, 周文祥, 黄金泉. 变循环发动机部件级建模技术. *航空动力学报*, 2013, 28: 104–111]
- 16 Keith B D, Basu D K, Stevens C. Aerodynamic test results of controlled pressure ratio engine (COPE) dual spool air turbine rotating rig. In: ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air, 2000
- 17 Sun M X, Liang C H. Progress and revelation of US adaptive cycle engine development (in Chinese). *Aeroengine*, 2017, 43: 95–102 [孙明霞, 梁春华. 美国自适应发动机研究的进展与启示. *航空发动机*, 2017, 43: 95–102]
- 18 Giffin III R G, Johnson J E. FLADE gas turbine engine with counter-rotatable fans. U.S. Patent, US 7246484, 2007-7-24
- 19 Wang W W, Li D, Zeng J. Development of propulsion system for near-space HTHL high-speed vehicles abroad (in Chinese). *Gas Turb Exp Res*, 2014, 27: 57–62 [王巍巍, 李丹, 曾军. 国外水平起降临近空间高速飞机动力的发展. *燃气涡轮试验与研究*, 2014, 27: 57–62]

Summary for “新一代绿色超声速民机的发展现状与挑战”

Progress and challenges of next generation green supersonic civil aircraft

Yue Xu^{1*}, Zhonghua Han², Yancheng You³ & Li Chen¹

¹ Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100012, China;

² School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

³ School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China

* Corresponding author, E-mail: xuyue@cae.ac.cn

After decades of development, the design technology of high subsonic civil aircraft has been quite mature in terms of safety, economy, comfort and environmental friendly. But for trans-continental and trans-oceanic travel, the flight time up to more than ten hours is still too long, and it becomes the bottleneck in the comfort and rapidity of long-distance travel experience. In contrast, the design technology for supersonic civil aircraft (at least twice speed as fast as that of subsonic one) has been greatly improved, which can greatly shorten the duration in the air.

Concorde, the 1st generation supersonic civil aircraft, putting into commercial operation in January 1976, was one of the greatest technological innovations of mankind at that time. But its weaknesses of high fuel consumption, unbearable noise level and pollution problem have seriously weakened the market competitiveness and finally led to the end of commercial operations.

There were setbacks, but the technology development never stopped. Compared with that in the 1960s and 1970s, the theory level and practical level of aviation technology have been greatly improved with the help of achievements in fundamental science and technology area. The various technical bottlenecks that hindered the development of supersonic civil aircraft have been continuously alleviated or eliminated, and the technical conditions for the development of green supersonic civil aircraft have become increasingly mature.

Since the 1990s, supersonic civil aircrafts have attracted great attention again and gradually become one of the research hotspots. The current concerns about the next generation supersonic civil aircraft cover a wide range, not only the normal demand of low resistance and low fuel consumption, but also some environmentally friendly features. The strength of sonic boom should be reduced to an acceptable level, and continue meet both the increasing noise standards around the airport community and low engine emission requirements.

In China, on one hand, we started late but have made great progress in the research of supersonic civil aircraft, such as the fields of aerodynamic configuration, sonic boom prediction and its suppression technology, and supersonic drag reduction technology. And a wide range of independent tools for supersonic civil aircraft concept design, near-field/far-field sonic boom prediction, and multi- design-point/multi-objective aerodynamic configuration optimization design were developed. On the other hand, the supersonic commercial engine technology is still in a blank state, which is a key issue that restricts the development of China's green supersonic civil aircraft.

Compared with the current development level of supersonic civil aircraft design technology worldwide, there are still significant challenges to achieve supersonic flight with economically affordability and green feathers. But it is foreseeable that the next generation green supersonic civil aircraft could be expected before the end of the third decade of this century.

aviation, supersonic civil aircraft, environmentally friendly, design technology

doi: 10.1360/TB-2019-0594