



我国大型民机总体技术突破 方向研究

Research on Breakthrough of Our Large Civil Aircraft Concept and Preliminary Design

中航工业第一飞机设计研究院 党举红 郭兆电



党举红

中航工业一飞院总体气动设计研究所高级工程师。毕业于西北工业大学,从事飞机型号及预研的总体研究工作,在型号工作及预先研究方面荣立 2 次部级二等功和 1 次三等功。

大型民机即常说的干线飞机,是民用运输机市场的主体,全球民航运输业每年完成的客、货周转中,有 90% 以上都是由大型民机完成

我国大型民机需要在亚音速常规布局方面充分利用现有技术平台成熟相关技术,同时突破高效气动力技术、复合材料技术、动力装置技术;并且需要提前布局下一代新概念民机的探索研究,力争获得突破,这样才可能在未来的大型民机竞争中占得先机,在未来的民机制造业中占有一席之地。

的。大型民机研制技术难度大,进入门槛高,市场竞争激烈。目前,世界上只有美国、欧盟和俄罗斯全面掌握了大型民机的研制技术,真正主宰大型民机领域的只有波音公司和空客公司(2012 年,波音销售 1203 架,交付 601 架;空客销售 833 架,交付 580 架)。俄罗斯在大型民机领域的份额微乎其微(据俄罗斯空网,俄罗斯在世界民机制造市场份额约为 0.11%)^[1-3]。

我国大型民机的发展经历了漫长的艰难、挫折和失误的过程,随着 ARJ21 飞机即将交付、C919 项目启

动、大型军用运输机的成功首飞,中国已经具备了研制大型民用运输机的能力。但是,要想突破目前的两强垄断,在世界民机市场占有一定的份额,首先需要在关键技术上有所突破,这对于成长中的中国民机工业,尤为重要。

国外大型民机领域格局演变

1 技术积累成就了波音公司

波音的崛起和道格拉斯的衰落是一个此长彼消的缓慢过程,在波音 707 以前,波音先后成功地研制了创造世界单机总产量 12731 架

记录的 B-17 轰炸机、翼下六发的 B-47 轰炸机,60 年过去了,至今仍是美国空军远程常规轰炸和海上攻击主力的 B-52 轰炸机。这些大型飞机的设计、生产和制造完成了波音突破前的技术积累。波音 707 以远航程不经停直飞和“最牢固的飞机”的声誉首次超越了 DC-8 飞机(最终波音 707 销售 1012 架,DC-8 销售 556 架),打破了道格拉斯公司对民用飞机市场几十年的垄断。此后 10 年间,波音成功推出了波音 727、737 和 747 飞机,导致了 1967 年道格拉斯被麦克唐纳公司兼并而成为麦道公司。尤其是波音 747 飞机,当时,面对美国国内市场,道格拉斯公司和洛克希德公司迎合了客户对双发客机安全性的质疑,提出了大同小异的三发客机方案,即后来的 DC-10 和 L1011 三星飞机,而波音公司提出了超大型的波音 747 方案,对比的结果是波音 747 以其优越的经济性,独霸了超大型飞机领域 30 余年,截止 2012 年底波音 747 已累计售出约 1420 架,而 DC-10 生产了 446 架, L1011 仅生产了 250 架。

波音初期的成功靠的是技术积累,后期的成功则靠技术领先。波音 707 之后,考虑到细分市场,波音成功推出波音 727、737 飞机,这是系列化的雏形。波音 757、波音 767 则是追赶空客的结果。经过几十年的发展,波音形成了单通道波音 737 系列,宽体领域的波音 747、777、787 飞机,技术上的成就创造了奇迹,波音 707 是那个时代最好的飞机;波音 737 成为单通道领域的标准机型,也是第一种订单总数突破万架的民用喷气式飞机(截止 2012 年 7 月 12 日,波音 737 家族的订单总数达到了 10039 架);波音 747 一枝独秀 30 余年;波音 777 成为第一架无纸设计飞机;波音 787 的复材用量达到创记录的 50%,创立了多电飞机

的概念。

2 双发宽体成就了空客公司

20 世纪 60 年代后期,双发宽体的经济性已经显现,最初麦道公司和洛克希德公司也想研发双发宽体客机,考虑到发动机推力、可靠性,以及丹佛高原机场的单发起降问题,最终双发变三发。波音公司更进一步,开发了四发的波音 747 飞机。而刚刚成立的空客公司集欧洲各国优势选择了双发宽体的 A300 飞机,双发宽体的优势在于经济性和低噪音,相比当时的三发飞机,其经济性是当时最好的,噪声几乎下降 50% 多,成为当时最安静的飞机。后来,麦道也想重回双发领域,但最终取消了 DC-10 的双发计划。波音也曾向英国提出过双发宽体的 7X7 计划。空客坚持双发宽体的技术路线终成正果,麦道和洛克希德的三发宽体陆续被市场抛弃,洛克希德再也没有回到民机领域,麦道最终被波音收购。

在 A300 之后,空客又陆续研制了宽体 A310 系列、单通道的 A320 系列(A318/A319/A320/A321)、远程型宽体 A330/A340 系列、超大型双层 A380 系列。目前正在研制全新远程中等运力的 A350 系列。随着 A380 的交付,空客公司不仅终结了波音 747 飞机在超大型飞机领域近 40 年的垄断,成为今日世界民机制造业两强之一,且在各机型段,形成了和波音几乎是一一对一的白热化机型竞争态势(图 1)。

3 俄罗斯的民机制造

航空强国俄罗斯在大型民机领域曾经相当辉煌过,前苏联时期研制生产了 150/180 座级的 Tu-154 飞机、超音速的 Tu-144 飞机、350 座

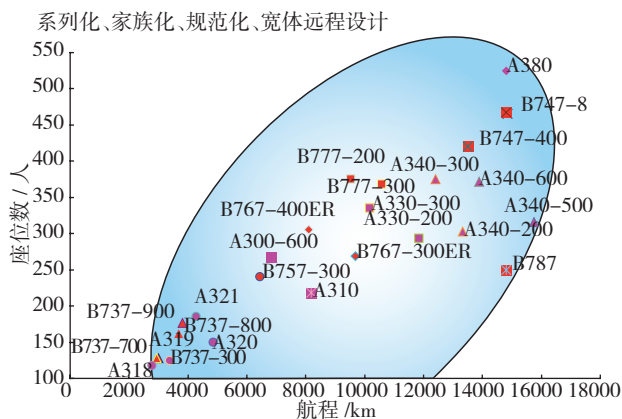


图1 波音和空客系列飞机的竞争图

级的 IL-86 飞机、400 座级的 IL-96 飞机、200 座级的 Tu-204/214 系列飞机。由于冷战原因, Tu-154 飞机、IL-86 飞机和 IL-96 飞机只取得了苏联自己的适航证。前苏联解体前夕研制的 Tu-204/214 系列飞机涵盖了客运、货运和客货两用型别,是俄罗斯仅有的几种符合欧洲最新噪声标准的民机之一,该机的许多性能指标甚至超过了波音 757 飞机,但该机市场接受程度较低,20 多年总销售量仅百余架。尽管如此, Tu-204/214 飞机还是让俄罗斯人看到了振兴航空工业的希望,俄罗斯政府重组航空制造业,启动了单通道系列的 MS-21 飞机研制,并提出了借此占领民用航空市场 10% 份额的近期目标。

4 未来的民机格局

目前,亚音速常规布局已趋成熟,新的亚音速布局和超音速布局正处在突破的前夜,技术发展提供了机会,亚音速布局下两强垄断格局的打破期待着中国、俄罗斯和加拿大庞巴迪的努力;未来新型亚音速布局和超音速布局的格局取决于技术突破的进展,谁先在新型布局和超音速布局上获得突破,谁就能赢得先机,就可能在未来大型民机领域占有一席之地。

世界先进大型民机的发展特征

世界先进大型民机是科学与

技术发展的集中体现,历经数代发展,机型也趋于固化,单通道领域以100-200座的波音737系列和A320系列为代表,宽体双发领域以250座的波音787和A350为代表,远程领域有双发的波音777和四发的波音747、A380飞机。先进大型民机的技术发展方向,就是以提高安全性、经济性、维护性、环保性,降低直接运行成本,使旅客更舒适地旅行行为追求目标,飞机总体布局不断精细化、空气动力技术稳步推进、经济性持续提高^[4-9]、更加重视安全与环保^[10-11]、机载设备推陈出新、动力装置更新换代^[12]。非常规布局和超音速布局的研究力度越来越大,也提示了未来可能的突破方向。

1 亚音速布局进入精细化时代

经过几十年的发展,大型民机总体布局相对稳定,翼吊布局成为主流布局,且日趋成熟。现在,大型飞机发展的主题是渐进式发展和不断降低成本、提高经济性。

以单通道飞机为例,图2是波音737MAX和A320NEO降低油耗的技术方向收益图,从图中可以看出,对改型飞机而言,飞机布局改进对降低油耗的贡献在1%~2%之间,亚音速布局进入了精细化时代,动力装置技术进步已经成为提高飞机经济性的主要方面。图3是波音787飞机降低油耗技术方向收益图,从图中可以看出,对新机型研制而言,动力装置技术进步也是提高飞

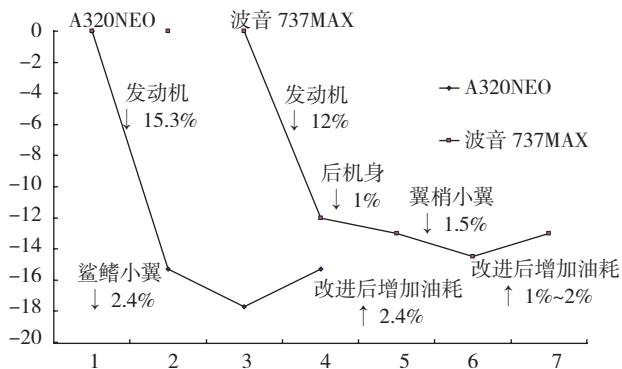


图2 波音737MAX和A320NEO降低油耗的技术方向收益图

机经济性的主要方面,同时,总体布局优化、系统功能综合、降低功耗及结构轻量化都是新机型设计时提高经济性的重要因素。

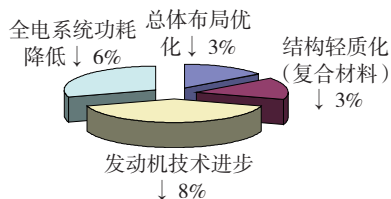


图3 波音787降低油耗的技术方向收益图

2 安全性、经济性、环保性不断提高

安全性的门槛就是适航证,FAA适航证和JAR适航证既是当

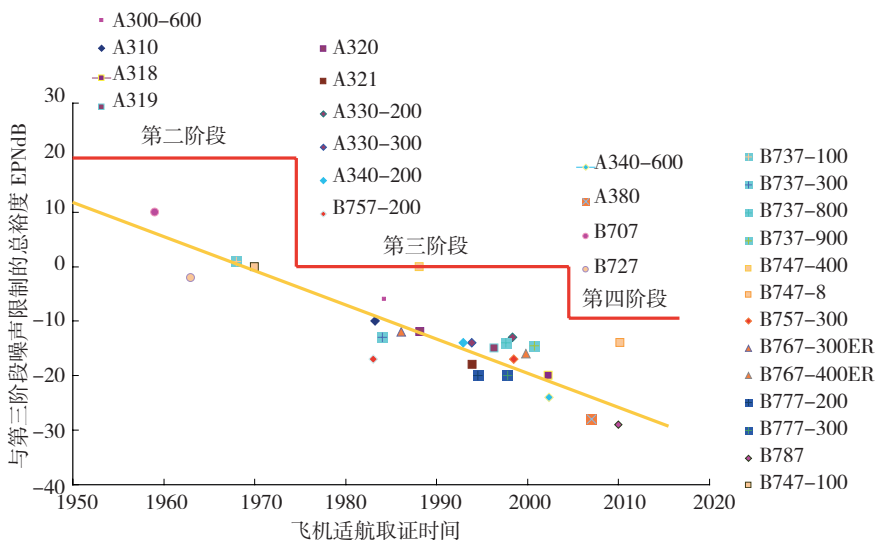


图4 大型民机适航噪声水平发展趋势

今研制大型飞机的首要目标,也是航空公司选购飞机的重要依据,未来飞机的安全性将提高10倍,事故率降低到现在的1/10。

经济性是航空公司赢利的前提,也是飞机设计追求的目标,A380飞机的燃油经济性比其直接竞争机型提高13%左右,平均单座运营成本降低15%~20%,是第一种每乘客每百千米消耗燃油不足3L的远程飞机。波音787飞机与同级别

飞机相比,可节省20%的燃油。经济性的另一重要表现是飞机完好性,这是飞机易用好用的直接体现,也是波音空客飞机广受欢迎的原因。

随着人们环保意识的增强,环保性越来越受到重视,尤其是噪声要求,1977年开始执行第三阶段噪声限制,2006年开始执行第四阶段噪声限制,2013年年初又提出了新的噪声标准,新标准比现行的商用飞机噪声标准进一步降低7dB。图4是大型民机适航噪声水平的发展趋势,噪声限制的每一次提高都会淘汰掉不合格者,2002年欧盟采用了

新的噪声标准,俄罗斯飞机因发动机噪声不达标被禁止飞入欧盟国家即是例证。对新机研制而言,噪声标准越来越严,限制越来越高,未来飞机噪声要减少到现在的1/4~1/2,环保性将成为新机型适航的又一道难关。

3 动力装置更新换代

几十年来,大型民机的动力装置经历了从涡喷到涡扇,总压比、涵道比从低到高的变化。

目前,大涵道比发动机的总压比达到40~52,涵道比达到8~11,发动机的性能、可靠性、耐久性、经济性和环保性等都有了显著提高。图5是罗·罗公司高涵道比涡扇发

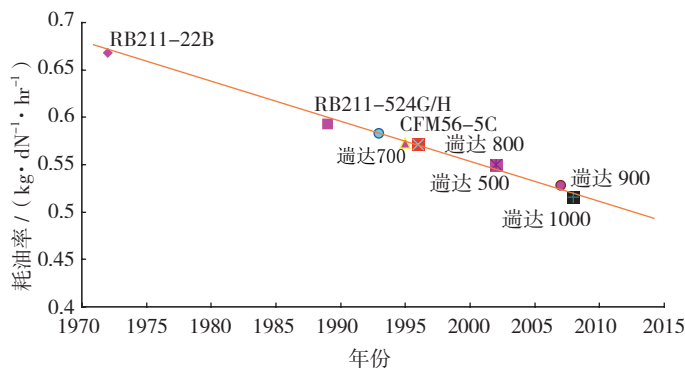


图5 罗·罗公司部分涡扇发动机巡航耗油率随时间变化

发动机耗油率随时间变化图,发动机耗油率已接近 0.5kg/dN/hr,最大推力已超过 50000daN,空中停车率从每 1000 飞行小时 1 次下降到 0.002~0.005 次左右,返修率达到每 1000 飞行小时 0.06~0.01 次,发动机在飞机上不拆换工作时间达到 16000h,最长超过 40000h,发动机的噪声强度和污染物排放分别降低了 75% 和 80%。对亚音速大型民机而言,发动机技术进步已逐步变成了提高飞机性能的主要方面,尤其是对飞机的经济性、噪声和碳排放。预计到 2020 年,与 CFM56-3 相比,大涵道比涡扇发动机的燃油消耗降低 20%,噪声将减少 30dB,CO₂ 排放减少 50%,NO_x 排放减少 80%。

4 机载系统集成化智能化

机载技术推陈出新,新技术如多电技术、液压增压技术等不断出现,系统综合化程度空前提高,极大地提高了机载系统的可靠性,提升了飞机性能和全机安全性。

机载系统的发展体现了 2 个特点:一是航电系统突出模块化、综合化、信息化和智能化,越来越趋向更加完整协调的航空电子体系方向发展。综合化的航电系统有效地提高了系统的自动化程度、系统的自修复和故障诊断能力,从而提高了系统和全机的可靠性水平;二是机电系统中,通过多电技术、大功率器件、高压力体制和综合控制,实现

了系统功能、能量、控制和物理四方面的全综合,系统的功能更加强大,结构趋于简单、重量更轻,使用更加优化,成本效益更高,系统的冗余度和可靠

性也达到了更高的水平。

5 新结构新材料大量应用

对飞机经济性的不断追求,使飞机材料和结构技术不断进步,这方面的进展主要体现在复合材料等高效轻质结构材料的大量应用,波音 787 飞机达到了 50%,A350XWB 更是宣称 53%。复合材料等高效轻质结构的应用,极大减轻了飞机重量,使飞机成为真正意义上的轻质飞机,提高了飞机结构的使用寿命和经济性。未来,飞机复合材料的大规模应用将使飞机减重 30% 以上,直接制造成本降低 40% 以上。

发展我国大型民机的难点

我国大型民机研制所处的形势和俄罗斯有点类似,即面对同一个成熟的垄断市场,进入的也都是单通道系列业已竞争成熟的领域。而且,我国的民机设计基础较为薄弱,不仅缺乏先进大型民机总体设计、气动设计、系统控制和结构设计方面的成熟经验,而且国内没有大型民机研制所需的大涵道比涡扇发动机,没有经过适航验证的材料体系,也很少有满足适航要求的机载设备。因此,尽管我国已具备了研制大型民机的能力,也已经启动了 C919 飞机的研制,但仍将面临安全性和经济性等主要技术难点。

1 安全性

对于一个市场的新进入者,安全性几乎是需要面临的第一个困

难,一个全新的机型在投入使用初期都有一个“可靠性增长期”,在这段时间内,通常会遭遇这样那样的故障和问题,随着使用的增加,飞机的可靠性也会不断提升。波音 787 交付后相继发生了起火、漏油和玻璃裂纹等故障;A380 交付初期也曾面临问题频现的尴尬。俄罗斯的 SSJ-100 更是在飞行表演时撞山坠毁。因此,安全性是一架新飞机的第一道难关。

对于我国大型民机而言,安全性的问题来自两方面,一是 FAA 适航, Tu-204/214 飞机通过换发动机和西方机载设备仅通过了 JAR 适航,这是 Tu-204/214 飞机不易为别的航空公司甚至俄罗斯国内航空公司接受的原因之一。不能通过 FAA 适航,体现的是航空技术的差距,目前,世界民机适航要求越来越高,如何提高航空技术水平,使之达到 JAR 和 FAA 标准是我们面临的第二道难关。二是飞行安全,一架新飞机是非常脆弱的,SSJ-100 飞机的坠毁对俄罗斯支线机的打击几乎是致命的。如何缩小和世界先进民机安全性的差距,从技术上保证飞机所有系统安全可靠工作,并及时发现隐患,是我国大型民机设计必须面对的问题。

2 经济性

波音 747、A300 这些机型都是以经济性取胜,波音 747 飞机 1970 年进入市场,载客数超过当时最大客机近 2 倍,加上超远距离航程,使航空公司运营成本下降了 2/3。A300 飞机在东方航空公司实际测试的每座英里油耗比 L1011 飞机低 20%,比波音 727 飞机低 34.6%,以无与伦比的经济性成为航空公司的赚钱机器。A380 的每乘客每百千米油耗在 3L 以内,民机技术发展几乎就是经济性持续提高的代名词。我国的民机水平仍处于起步阶段,作为追赶者,我们尚不具备波音、空

客那样成熟的总体设计能力,如何提高经济性期待着空气动力技术、结构技术、发动机技术及总体布局方面的综合或是分项技术的进步。

我国大型民机总体技术突破方向

未来较长一段时间内,亚音速常规布局仍将是民用运输机的主流布局,直到亚音速新型布局或是超音速技术取得突破。对于民用飞机,不管是型号设计还是研究项目都是以经济性、安全性、环保性和舒适性为目标,A380通过总体优化设计,使全机部件阻力分别减少2%~10%;使用复合材料达23%,总重计30t。波音787飞机采用了平滑机翼技术、电传飞控技术、流线型短舱技术和高性能发动机。

在研究项目方面,2011年,NASA完成了新复合材料制造方法试验,仅此可以减轻结构重量10%;2009年环境依赖航空(Environmentally Responsible Aviation,ERA)项目第一阶段启动,2013年ERA项目第二阶段启动,选定了8项关键技术进行验证,分别是主动流动控制增强垂直尾翼飞行验证、损伤捕获复合材料验证(目标是减重25%)、柔性自适应后缘飞行验证、高负荷前端压气机验证、第二代UHB比例推进器集成验证、低氮氧化物发动机燃烧室验证、襟翼和起落架降噪飞行验证、UHB发动机和HWB飞机一体化验证等。欧盟第5、6框架计划中的航空技术研究取得了丰硕的成果,TANGO计划的成果已在A380、A400M运输机的设计上得到应用;2007~2013年的第7框架计划中的航空技术更是围绕着流动控制减少阻力、噪声控制、整体结构、环保发动机、材料轻质化等主题开展的;俄罗斯的“2002~2010年和2015年前俄罗斯民用航空装备发展”计划,也提出了“飞机气动阻力降低10%~20%,结构重量减小20%”等具

体目标。

分析这些研究项目和波音787、A380、A350飞机的技术特点,可以看出:(1)大型民机从提高发动机系统的可靠性、结构材料健康监测、电击保护、控制系统健康监测等方面提高飞机安全性;(2)从全机减阻、减轻材料重量、降低部件和全机制造成本、系统资源优化、降低维护费用等方面提高飞机的经济性;(3)从降低发动机系统噪声、气动噪声、减少污染排放等方面提高环保性和舒适性。

由此可见,大型民机发展都是以减阻减重为技术主线,以提高安全性、环保性,降低成本为目标。我国大型民机首先是要建立平台,其次是立足现有平台强化基础、缩短在飞机总体技术、材料技术和系统技术的差距,并在此过程中不断积累技术优势。同时通过在减阻减重及新型布局等一些前沿技术领域的突破来获得具有较大经济性优势的机种,打破格局的平衡。我国大型民机技术突破应重点关注的几个技术领域是:(1)通过亚音速常规布局成熟相关技术;(2)通过总体优化尤其是布局流动控制研究,寻求大幅度减少阻力的突破;(3)通过复合材料的大规模应用,大幅度减轻重量,缩短与世界民机技术水平的差距;(4)通过研制大涵道比涡扇发动机,掌握大型飞机研制的主动权,建立独立、完整、强大的大型民机产业;(5)通过新型布局创新研究,不仅寻求未来大型民机突破方向,而且使我国在未来大型民机竞争中赢得先机。

1 亚音速常规布局成熟技术

NASA在新型亚音速布局和超音速布局方面开展了多项研究后认为,新的亚音速布局可能出现在2025年左右,超音速民机再次进入航线的时间是2030年左右,在亚音速新型布局或超音速布局突破之前

的这段时间,亚音速常规布局仍将是大型民机的典型布局。在常规布局上,充分利用现有或未来的技术平台成熟技术、缩短差距,主要包括:(1)持续进行亚音速常规布局的优化和改型设计,建立起一整套成熟可靠的设计、试验、计算、评估的方法和手段;(2)突破民用飞机系统设备技术,获得一批经过适航认证的机载系统和设备;(3)突破民用飞机材料技术,获得一批经过适航认证的体系化的民机材料。

2 高效气动力技术

减阻是飞机设计的主题之一,现代宽体大型民机巡航状态下,摩阻占飞机总阻力的45%以上,减小摩阻的努力产生了2个技术热点,一是翼身融合体(BWB)概念,二是层流控制。同样雷诺数 Re 下,层流摩阻系数比湍流摩阻系数小90%,因此扩大层流区,甚至实现全层流流动是减阻的一个重要方向和途径。NASA开展了波音757飞机混合层流流动控制(HLFC)等一系列试验研究,空客也用A320飞机进行了混合层流控制飞行试验,NASA的ERA项目第二阶段验证中有主动流动控制增强垂直尾翼飞行验证,欧盟第7框架计划中流动控制研究占有相当的比重,层流控制是减阻潜力最大的技术领域。

CFD技术是通过飞机布局优化来减小阻力的重要方法,也是世界性热点技术之一。通过CFD技术能够优化飞机气动布局、能够显著缩短飞机研制周期,减少风洞试验量,降低试验成本。A380飞机基于CFD技术对机身进行优化设计,飞机阻力减少了2%。空客公司CFD技术规划目标是,到2025年高雷诺数CFD能够生成供设计使用的数据,缩减风洞试验75%。CFD技术的难点在于湍流模型、转换模型和网格划分。

因此,积极开展层流控制、CFD

等前沿技术研究,寻求大幅度减少阻力的突破,从而大幅度提高未来飞机的经济性。

3 航空先进复合材料技术

轻量化结构技术是波音 787 飞机的四大核心技术之一,复合材料等长寿命轻质结构可以减轻机体结构重量,降低生产成本和燃油消耗,提高飞机性能。同时长寿命轻质结构和整体结构件的大量应用也改变了飞机的维护模式,从定期维护更新为视情维护,A340-600 飞机的设计目标寿命为 100000 飞行小时,相当于 20 年的日历寿命。A380 飞机设计目标寿命为 135000 飞行小时,相当于 25 年的日历寿命,这使得飞机的维护成本大幅度下降。

我国的复合材料种类少、用量少、性能较差,且未能掌握 T800、T1000 等高性能复合材料工艺,急需突破相关技术,缩短技术差距。航空先进复合材料等轻量化结构技术主要包括:(1)高性能复合材料技术,包括复合材料研制等;(2)大型复合材料结构的设计与制造技术;(3)复合材料低成本设计制造技术;(4)大型超音速民机的复合材料相关技术;(5)新型先进材料技术;(6)飞机结构健康监测技术。

4 动力装置技术

对于大型民机来说,发动机已经成为制约民机发展的瓶颈,俄制民机 2002 年因噪声禁入欧盟、庞巴迪 C 系列 2006 年因发动机而下马。我国的航空发动机从无到有、从小到大经历了几十年的发展,但民用大涵道比涡扇发动机始终没能突破。民用大涵道比涡扇发动机要求安全可靠、节能环保、良好的维护性和经济性,研制大涵道比涡扇发动机,突破大型民机动力装置技术,掌握大型民机研制的主动权,建立独立、完整、强大的大型民机产业,对我国的军民用飞机均有不可估量的作用。

5 新型布局

常规布局的增长潜力和收益已经不能满足未来高效快捷运输的需要,新型亚音速布局和超音速布局成为各国研究的重点,美国、俄罗斯、法国和其他一些国家均有新概念布局研究项目,这方面美国进展最快,从 2007-2010 年,波音公司用 X-48B 缩比模型进行了 3 年相关试飞。从 2012 年 8 月开始,改型的 X-48C 又开始了新一轮试飞,截止 2012 年 10 月底,共进行了 100 次试飞,完成了三发、双发等多种构型验证。并且,ERA 验证计划中也有新型布局的验证。图 6 是 X-48C 验证机。



图6 X-48C验证机

自“协和”和 Tu-144 之后,超音速布局要解决的是音爆问题,NASA 的“N+”计划已经开展了几年,从原理探索到飞行试验,重点是减轻音爆、起飞和着陆时的噪声、高空排放、耐用结构等。FAINT 项目中采用改装的 F/A-18 飞机从 2012 年 10 月到 11 月已进行了 13 次试飞;QUIET SPIKE 项目中采用改装的 F-15B 飞机在 2012 年也进行了试飞。

研究新型布局,开发新技术是打破垄断、在未来大型民机竞争中占得先机的绝好机会。错过这个机会,我国的大型民机又会处于被动的地位。因此,根据目前已渐明确的技术方向,加大新概念民机的探索研究力度,争取获得突破是非常必要的。

结束语

我国民机产业规模小,技术相对薄弱,大型民用飞机还没有走完一个真正意义上的先进民机研制全过程,与世界先进水平还有较大差距,因此,我国大型民机需要在亚音速常规布局方面充分利用现有技术平台成熟相关技术,同时突破高效气动力技术、复合材料技术、动力装置技术;并且需要提前布局下一代新概念民机的探索研究,力争获得突破,这样才可能在未来的大型民机竞争中占得先机,在未来的民机制造业中占有一席之地。

参考文献

- [1] 张洋.世界飞机手册 2011 年版.北京:航空工业出版社,2011.
- [2] Ray Whitford.民用客机的发展演变.北京:航空工业出版社,2010.
- [3] 张庆伟,林左鸣.世界民用飞机手册.北京:航空工业出版社,2009.
- [4] 张彦忠.大飞机气动总体技术的发展.中国工程科学,2009(5):4-17.
- [5] 黄俊.未来大型客机气动布局设计.航空制造技术,2010(19):26-29.
- [6] 中国科学技术协会,中国航空学会.航空科学技术学科发展报告(2008-2009).北京:中国科学技术出版社,2009.
- [7] Ilan Kroo. Innovations in Aeronautics 2004 AIAA Dryden Lecture, AIAA-2004-0001.
- [8] Bushnell D M. Potential Impacts of Advanced aerodynamic Technology on Air Transportation System Productivity, NASA TM-109154.1994.
- [9] Frank G, Andy K, Bernard G. Transport Weight Reduction through MDO: The Strut-Braced Wing Transonic Transport, AIAA-2005-4667.
- [10] 师成梅,张生贵,侯峰.飞机外部噪声预计软件及应用.噪声与振动控制,2009(S1):495-498.
- [11] 潘凯,黄文超,王宗康.大型客机适航噪声限制的发展预测.结构强度研究,2010(2):13-18.
- [12] 刘大响,金捷,彭友梅,等.大型飞机发动机的发展现状和关键技术分析//大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年年会论文集.北京:中国航空学会,2007:139-144.

(责编 夏宛)