

# 空气动力学

崔尔杰\*

(中国航天科技集团第 701 研究所)

本文简要回顾空气动力学发展的历史及其在航空航天飞行器研制中的作用,对现代空气动力学新的发展趋势和新一代航天飞行器研制中可能遇到的关键气动力问题进行探讨和分析,并对今后发展提出看法。

## 一、空气动力学与航空航天飞行器发展

空气动力学是研究空气和其他气体的运动规律以及运动物体与空气相互作用的科学,它是航空航天最重要的科学技术基础之一。

### 1. 空气动力学推动 20 世纪航空航天事业的发展

1903 年莱特兄弟研制成功世界上第一架带动力飞机,实现了人类向往已久的飞行梦想。为了研制这架飞机,他们进行过多次滑翔试验,还为此建造了一座试验段为  $0.01\text{m}^2$  的小型风洞。正是这些努力,加上综合运用早期的空气动力学知识,最终获得了成功。

20 世纪初,建立在理想流体基础上的环量和升力理论以及普朗特提出的边界层理论奠定了低速飞机设计基础,使重于空气的飞行器成为现实。40 年代中期至 50 年代,可压缩气体动力学理论的迅速发展,以及对超声速流中激波性质的理论研究,特别是跨音速面积律的发现和后掠翼新概念的提出,帮助人们突破“音障”,实现了跨音速和超音速飞行。50 年代中期,美、苏等国研制成功性能优越的第一代喷气战斗机,如美国的 F-86、F-100,苏联的米格-15、米格-19 等。50 年代以后,进入超音速空气动力学发展的新时期,第二代性能更为先进的战斗机陆续投入使用,如美国的 F-4、F-104,苏联的米格-21、米格-23,法国的幻影-3 等。

1957 年苏联发射第一颗地球人造卫星和 1961 年第一艘载人飞船“东方号”升空,被认为是空间时代的开始。美、苏两国在战略导弹和航天器发展方面的激烈角逐,促使超音速和高超音速空气动力学得到迅速发展。两个超级大国都投入巨大力量,致力于发展地面模拟设备,开邻近高超音速空气动力学和空气热力学的研究。航天方面的研究重点放在如何克服由于高超音速飞行和再入大气层,严重气动加热所引起的“热障”问题上在钱学森先生倡导下诞生了一门新的学科,即物理力学,为航天器重返大气层奠定了科学基础。航空方面的研究重点则放在了发展高性能作战飞机、超音速客机、垂直短距起落飞机和变后掠翼飞机。这一时期,空气动力研究方面的另一项重要成就是“超临界机翼”新概念的提出,它可以显著提高机翼的临界马赫数。20 世纪 70 年代后,脱体涡流型和非线性涡升力的发现和利用,是空气动力学的又一重要成果。它直接导致了第三代高机动性战斗机的产生,如美国的 F-15、F-16,苏联苏-27、米格-29 和法国的“幻影 2000”。

20 世纪 80 年代以后，由于军事需求的强力推动，美、苏两国都开始加紧研制第四代战斗机和高超音速飞行器以及跨大气层飞行器，其中最具有代表性的是 1981 年美国发射的航天飞机。由此形成了现代空气动力学发展的新时期。

## 2. 21 世纪航空航天事业发展的基础

1986 年美国宣布执行单级入轨的国家空气飞机计划 (NASP)，希望能在 20 世纪末研制出马赫数为 25 的空天飞机，但由于作为动力的氢燃料超燃冲压发动机研制中遇到了难于克服的困难，不得不于 1994 年宣布停止研制。随后又制订了以火箭发动机为动力、可重复使用的空天运载器 X-33、X-34 和 X-37 的发展计划，后因 X-33 液氢储箱复合材料脆性断裂等一系列技术问题和财政等其他方面的原因，上述研制计划于 2001 年 3 月终止。以后，美国空军和 NASA 还分别实施了“高超技术”(Hytech) 和“高超-X”(Hyper-X) 计划，但进展并不顺利，作为该计划的第一架 X-43A 首飞失败，2002 年进行的另一次飞行试验也因火箭助推器出现故障而未能成功。美国人在总结这些研制教训时才认识到，一系列高超声速流的基础研究储备不够和风洞等地面模拟设备能力的严重不足是导致失败的主要原因。

1996 年美国制订了 21 世纪空军装备发展的战略性文件，提出建立全球快速机动反应和灵活作战保障能力，全方位占领空中优势的明确目标。航空方面以美国 F-22、联合攻击战斗机 (F-35) 为代表的第四代战斗机，将高机动性、敏捷性、超音速巡航能力、高隐身能力、更大的高度/速度范围等诸多优异性能集于一身，对空气动力学、动力推进、电子控制和材料、工艺等技术提出了更高要求。

## 3. 我国的空气动力学研究

1949 年以前，我国空气动力学研究的基础非常薄弱。中华人民共和国成立后，党和国家高度重视航空航天事业，空气动力学因而获得蓬勃发展。1956 年，北京空气动力研究所成立，这是我国第一个综合性的空气动力研究试验基地。1958 年，为适应航空发展的需要，建立了沈阳空气动力研究院。1976 年，在四川绵阳成立国家级的中国空气动力研究与发展中心，至今已建成各类中大型地面模拟实验设备，包括试验段尺寸为 6m\*8m 的低速风洞、2m 激波风洞、2.4m 跨超音速风洞、200m 弹道靶等共 30 余座。经过 50 多年的努力，我国的空气动力学取得了很大进展，基本能满足现在型号选型和部分定型试验要求。在发展理论与数值计算、地面模拟试验和飞行试验以及在解决型号气动问题方面取得了大批研究成果，使得对飞行器气动特性的预测能力和设计水平有了很大的提高，为我国飞机、战术战略导弹、运载火箭、卫星和其他型航天器研制做出重要贡献。但与美国和俄罗斯相比，无论是实验设备、计算手段还是基础研究都还有明显差距。

## 二、未来发展面临的新问题

### 1. 空气动力学面临许多挑战性的问题

今后 10 年或更长一些时间，航空航天技术必将有更大发展。正在研制和有可能开始投入研制的航空航天飞行器，主要有以下几种。

#### (1) 高机动性作战飞机。

美国计划于 2005 年装备部队的 F-22 第四代战斗机、F-35 联合攻击战斗机和俄罗斯正在研制的 1.44 高机动验证机，以及今后可能发展的更先进的第五代战斗机和无人作战飞机，都属于高机动性作战飞机。这类飞机具有超音速巡航、过失速机动、高度隐形和短距起降能力，是未来进行空战和掌握制空权的主要装备。其发展面临许多有待突破的空气动力学问题，如提高升阻比、减低超音速零升阻力、气动力主动控制 (ACT) 等。而为了提高飞机的机动性和敏捷性，对非定常空气动力学，尤其是对有分离、激波及旋涡的非定常流亟待加强研究。

(2) 可重复使用的高超音速空天飞行器。这种飞行器集飞机、运载器和航天器等多功能于一身，能在大气层内高速飞行，也能进入外层空间在轨运行。它的飞行马赫数可以超过 20，能快速反应做到全球“即时到达”，既可以作为高速运输工具，又可担负空间武器发射平台和实施侦察预警和对敌攻击的任务，是 21 世纪进入空间、控制空间和争夺制天权的关键武器装备。但在气动力方面，如何增升、减阻、气动防热、喷流控制和适应宽广飞行环境的能力等，还需要进一步研究。超燃吸气式发动机是这类空天飞行器的主要动力装置，但其中一些重要空气动力学问题也远未搞清楚。

(3) 大型高速民航机和军用运输机。包括“协和号”的改进和后继型号、类似日本超音速运输计划 (NEXST) 中拟发展的超音速运输机和超大装载量 (可达 1000 人) 高速民航客机。在解决了安全性、经济性和噪声环境污染问题后，这些大型飞机将投入使用，可大大节省空中旅行时间，对快速空中支援、后勤保障和经济发展都会有巨大促进作用。其主要气动力问题是如何增升、减阻，降低气动噪声，进一步缩短起降距离，以及有效操纵和飞行稳定性等。

(4) 地效飞行器。包括近地掠海飞行器巡航导弹。由于在地效区内脱离水面飞行，可不受水文、地理条件的限制，又有海面杂波掩护，雷达很难发现，是信息战的“盲区”，有很大的隐蔽性和突击性，是实施“超平面登陆作战”的理想装备。此外，地效区飞行的升阻比高、装载量大，经济、安全、快速，作为军事运输和客运都有很大的优越性，具有很大的发展潜力。主要气动力问题是如何近地 (水) 平飞稳定、动力增冲、增强抗风浪能力、极低飞高下的有效控制等。

(5) 微型飞行器。微型飞行器是 20 世纪 90 年代提出的新概念飞行器，有极为广阔的应用前景。军事方面，可用于低空战场侦察、作战效果评估、通信中继和对地面目标实施有限攻击。民用方面，可用于环境监测、交通监控、资源勘察、空中摄影、森林防火等。微型和纳型卫星，有很高的实用性和经济性，今后发射量会大幅度增加。主要气动力问题是如何实现低雷诺数流动、高升力和推进机制，以及抗干扰和稳定飞行能力等。

(6) 智能控制可变形体飞行器。由于 MEMS 技术、智能材料与结构、智能自主控制技术的发展,人们已有可能研制出智能控制可变形体飞行器。它将通过设置在飞行器内部的敏感元件、信号采集与分析决策系统、执行机构的自动装置,自主改变形体,对变化的外界环境做出即时响应,以保持不同飞行条件下的最优状态。美国 NASA 制订的“21 世纪航空发展展望”中已对这种飞行器有过设想,并企望在 2030 年左右将其变为现实。其涉及的气动问题主要是微流体力学、自适应形体空气动力学、智能流动控制等。

此外,战略战术导弹、各种应用卫星、无人侦察作战飞机、武装直升机和激光、动能等新概念武器等,也是今后将着重发展的航空航天飞行器类型,这里不作讨论。

上述这些飞行器的研制,对空气动力学发展提出了许多具有挑战性的课题,如超声速和高超声速边界层转捩、湍流、大攻角非定常流动分离导致的复杂流场预测、实验及控制、增升减阻、喷流干扰与推力转向、气动隐身、地面效应、低雷诺数流动与微流体力学、高温气体动力学与气动防热、超燃冲压发动机内流空气动力学与空气热力学等,它们一般都涉及高度非定常、非线性,包括物理/化学变化效应的时空瞬变流场等,有很大的难度。

## 2. 现代空气动力学的发展趋势

分析现代空气动力学发展,可以看出如下四个提点。

一是设计要求的综合性的,充分反映了多学科交叉的提点,如隐身、超音速推进、防热结构、智能控制、MEMS 技术等。因此,如何充分运用多学科综合、一体化设计和多目标优化方法,将成为解决问题的关键。

二是不仅要求对宏观流动现象和总体气动性能给出最终结果,而且要求对流场结构和流动细节有深入的了解。因此,对理论、试验和数值模拟都提出了更高的要求,三者密切结合才有可能使问题得到圆满解决。其作为最终检验的飞行试验,有非常重要的意义,但这是我国的薄弱环节。

三是航空航天技术迅速发展的新现象和新问题层出不穷,急需开展原创性的工作,因此,对物理机制和数学建模问题应给予高度重视,其基础则是大量实验和数值模拟所提供的丰富信息。

四是经济上的可承受性是发展新型航空航天飞行器一个重要的指导原则,要搞“用得起的装备”。只有在空气动力学研究上有原创性的突破,才能导致新的创新设计和新的技术出现,从而降低研制和生产费用。

这些要求反映了现代空气动力学研究工作的发展趋势。

## 三、加强领导,统一规划,迎接挑战

航空航天技术对空气动力学提出了一系列复杂而困难的新课题,面对如此众多的挑战,在规划空气动力学今后的发展时,我们必须结合我国的国情和实际需求,做出“有所为,有所不为”的选择。

## 1. 充分认识空气动力学的重要作用

空气动力学不仅对航空航天飞行器研制有重要作用,而且作为一门独立学科,它的发展对其他学科有着很大的支持和带动作用。如复杂瞬变空间流场测量与显示技术,促进了激光、红外、高分辨率传感技术与新一代信息转换和处理技术的发展;再入飞行器热防护,推动了复合材料制备工艺和检测技术以及等离子应用技术的进步;高温气体动力学的发展为高性能动力装置和大功率激光武器研制,以及新能源开发利用奠定了基础。凡此种种,不一而足。

世界上航空航天技术比较发达的国家都非常重视空气动力学研究工作。为发展空气动力学,往往不惜花费巨大人力和财力。以美国为例,1992年美国宇航局航空预研投资中,空气动力学占28.1%,这还不包括6000多万美元的风洞改造费和2亿多美元的运行支持费。他们认为,空气动力技术对发展航空航天事业非常重要,并认为“它与保持美国在外国竞争中的技术领先地位有关”;过去一段时间不重视这一问题,研究经费投入不足,“是由于政策制定者只关心短期得益项目所造成的”。

## 2. 加大改造和新建科学实验设备的力度

科学实验是创新思想的源泉,对航空航天技术的发展至关重要。要加大对重大设备(如热结构风洞、超燃试验装置、高温气体动力学模拟设备,地面虚拟飞行模拟装置等)改造和新建的力度。美、俄两国的经验教训一再证明,这是关系到航空航天飞行器研制成败的大事。从我国目前情况来看,现有风洞设备尺寸仍偏小,参数偏低,尚缺少某些急需的特种风洞和大型高性能计算机,气动研究水平和解决型号问题的能力与国外先进水平相比还有很大差距,特别是不能满足我国研制先进飞行器的需求。尽快解决这些问题,已成为迫在眉睫的事情。

俄罗斯有着高度重视空气动力学的传统,他们耗费巨额资金,建立的几个国家级气动力学研究实验基地在规模和能力上不亚于美国,对保证前苏联实现载人航天,起到了决定性的作用。尽管前苏联在工业基础,特别是工艺及电子技术方面落后于美国,但依靠先进的空气动力技术,仍然研制成功苏-27和米格-29这样一批性能优越的战斗机,制造出推力强大的火箭和自己的航天飞机,充分显示出重视空气动力学研究实验所产生的巨大效果,这一成功经验值得借鉴。

## 3. 发挥信息技术在空气动力学研究的重要作用

信息技术,特别是计算机技术,对空气动力学发展有着巨大影响。现在和今后将要发展的一些先进航空航天飞行器,如自适应机翼飞行器、可变形体飞行器、仿生飞行器、基于MEMS技术的分布式控制飞行器等,其气动问题的研究在很大程度上都要依赖于计算机。此外,气动测量与控制、数据处理等也离不开计算机。

计算空气动力学(CFD)是20世纪60年代后期迅速发展起来的一个重要学科分支,在空气动力学研究与设计中发挥着愈来愈大的作用。因此,应当在更大范围的广度和深度上充

分发挥计算机在空气动力学研究、试验与设计中的作用,集中力量大力发展计算空气动力学。

#### 4. 组织跨学科协作,促进跨越式发展

在新技术发展中,多学科交叉融合是其突出的特点。要打破部门局限,在全国范围内合理组织跨学科协作,合理配置和利用资源,充分发挥各自作用。同时,要更加重视国际间的学术交流与合作,更有效地利用和借鉴国外先进经验。只有这样,才能加快我国空气动力学发展,跨越式地赶超国际先进水平。在这里还要特别强调基础研究与技术发展相结合的重要性。过去,由于体制等原因,两者的有机结合和协调发展存在一些问题,既不利于在基础研究上尽可能集中有限的力量,也不利于技术上的创新,急需采取有效措施加以解决。

## 航空动力技术

刘大响\* 彭友梅

(中国航空工业第一集团公司)

### 一、 加快发展的世界航空动力技术

以发动机为核心的航空动力系统是航空工业的关键性技术,航空史上重大突破(如动力飞行、喷气推进、跨越音障、垂直起降和超声速巡航等)无不与发动机技术直接相关。无论是军用航空还是民用航空,都把航空动力技术列为重点突破的优先领域,当今世界的航空动力技术正在加速发展。

#### 1. 军用涡轮喷气发动机

从第二次世界大战结束以来,军用航空涡轮喷气式发动机大致发展了四代。

第一代以涡轮喷气发动机为主,20世纪40年代开始研制,50~60年代获得广泛应用。表征发动机综合性能指标的推力重量比(简称推重比)为3~4,涡轮前燃气温度为1100~1300K。

第二代主要是加力式涡轮喷气发动机,基本上是上一代的改型,还有少量涡轮风扇发动机。推重比为5~6,涡轮前温度为1400~1500K。如俄罗斯的米格-21战斗机使用的R-13涡轮喷气发动机和英国斯贝MK-202军用涡轮风扇发动机等,属于第二代。

第三代主要是涡轮风扇发动机,技术上有了很大进步,从20世纪70年代中期开始大量装备第三代战斗机。推重比为7~8,涡轮前温度达到1600~1750K。如美国F-15、F-16使用的F-100, F/A-18使用的F-404,俄罗斯米格-29使用的RD-33、苏-27使用的AL-31F等,属于第三代。

第四代发动机从20世纪80年代开始发展,目前进入研制后期,预计2005年左右装备

使用。推重比为 9~10.5，涡轮前温度高达 1850~2000K，主要用于第四代战斗机。其典型机种有美国 F-22 使用的 F-119、西欧 EF-2000 使用的 EJ-200、法国“阵风”使用的 M88-III，以及俄罗斯 AL-41F 等小涵道比涡轮风扇发动机。

目前，美国和英国的第一、二代军用飞机均已退役，第三代是现役主力机种，并且还在不断地进行改进或改型。俄罗斯、法国、日本、印度、韩国等二、三代并存，以第三代为主。

第四代战斗机具有隐身、过失速机动、不加力超音速巡航、短距起降、超视距多目标攻击等许多特点，较之第三代具有全面优势。2007 年开始将逐步取代第三代战斗机，成为美国、俄罗斯及部分西方国家和我国部分周边国家 21 世纪上半叶的主战机种。

## 2. 民用航空发动机

军用飞机（尤其是战斗机）发动机一直处于航空动力技术的前沿。在充分借鉴军用发动机技术成果的基础上，民用航空发动机也同时经历了活塞式、涡轮喷气、涡轮风扇三个发展阶段，现正朝着高可靠性、长寿命、更经济、更清洁的方向发展。

民用航空发动机发展的主要目标是降低耗油率、降低噪声、降低排放污染、提高推力以满足双发跨洋远程飞行等。目前，马赫数为 3~5 的高超音速运输机发动机正在研制之中，利用航空发动机技术改型而发展的地面燃气轮机已广泛应用。在世界航空强国中，航空动力已形成军用、民用、燃机三足鼎立的格局，成为国民经济的重要支柱产业。

## 3. 各国政府高度重视航空发动机发展

工业水平的提高、科学技术的进步和经济实力的增强，是航空动力发展的基础。美国、英国、法国、俄国、德国、日本等国在重视航空教育、科技和工业技术发展的同时，对航空动力技术的预先研究予以高度重视，相继开展了一系列大型研究计划。

美国军方从 20 世纪 50 年代中期开始实施航空推进技术探索发展计划，70 年代初至 80 年代又实施了先进战斗机发动机计划（ATFE）、先进涡轮发动机燃气发生器计划（ATEGG）和飞机推进分系统综合计划。70 年代末以来，美国航空航天局（NASA）主持并实施发动机部件改进计划、高效节能发动机计划（E3）、先进螺旋桨计划和发动机热端部件技术计划（HOST）。这些研究计划开发各种先进的军、民用发动机提供了坚实的技术基础，使美国航空发动机跨上了一个又一个技术新台阶，达到当今世界的领先水平。

需要指出的是，美国在研制第四代发动机（F-119）的同时，在 1988 年至 2003 年间又投入 50 亿美元，由军方、联邦政府及工业界联合实施“综合高性能发动机技术计划”（IHPTET）；英国也着手进行先进军用核心发动机第 II 阶段计划（ACME-II）。美国、英国两国的共同目标是利用最新的研究成果，使推进系统的能力在现有基础上翻一番，预计 2020 年后有可能研制出第五代推重比 15~20 的发动机。这意味着他们用 15 年左右的时间，取得过去 30~40 年所获得的技术成就。

在 IHPTET 计划成功实施的基础上，美国政府和军方正在制定其后续计划——经济可承

受的多用途先进涡轮发动机（VAATE）计划，发展重点从提高性能转向降低全寿命期成本。其目标是利用 2006~2017 年验证的技术，以能力（推重比和耗油率）与全寿命期成本之比为度量，使第五代发动机的经济可承受性与第四代 F119 发动机相比，提高 10 倍，推重比将达到 25~30。这充分说明，世界航空发动机技术呈加速发展态势。

除美国、俄罗斯及西欧发达国家之外，我国部分周边国家或地区也在大力发展航空发动机技术。如日本已能专利生产第三代 F-100 和 F-110 发动机，并参与世界一流水平的大型民用涡扇发动机的国际合作研制。目前，日本正在与美国、英国合作研制飞行速度 5 倍于声速的 HYPR-9 组合循环发动机，力图在高超声速推进技术领域抢占领先地位。印度自行研制的 GTX-35VS 双转子涡扇发动机，推重比 7.5 左右，将装备在其自行设计的 LCA 轻型歼击机上首飞，还准备引进 40 架装有推力矢量喷管的俄制 SU-30MKI 战斗机，并计划在 15 年内生产 200 架。

## 二、我国航空动力的现状和发展思路

### 1. 航空动力业的长足进步与重大突破

50 多年来，我国航空动力行业经过艰苦奋斗和开拓创新，在维护修理、测绘仿制、改进改型、预先研究、新机研制、民品开发等方面取得很大成绩，累计生产了 30 多个型号、近 6 万台各种类型的发动机，对保障战争胜利、国土防空和空军、海航、陆航的建设做出了重要贡献。我们组建了一批研究、设计、生产等企事业单位，建成了零部件实验器、地面试车台、高空模拟实验台、飞行试验台等基本配套的试验设备，培养锻炼了一支相当规模的科研生产队伍，积累了宝贵的实践经验，具备了一定的技术基础和研制生产能力。特别是改革开放以来，我国航空动力行业在三个方面取得了长足进步和重大突破。

预先研究方面：自行设计研制的推重比 8 一级涡扇发动机的核心机性能达标；功重比 7 一级涡轴发动机验证机达标转型；推重比 10 一级涡扇发动机和功重比 9 一级涡轴发动机三大高压部件研究取得重要进展；第一代全权限数字式电子控制系统完成试飞验证；矢量喷管研究取得重大突破；初步建立了自己的数据库，掌握了一批设计分析软件，积累了一定的技术储备。

型号发展方面：现役机种的排故延寿和改进改型取得系列成果，保证了我军航空武器装备的战斗力和战斗力；引进机种实现了国产化或建成了大修线；第一个按型号规范自行研制、具有知识产权的“昆仑”涡喷发动机设计定型；自主研制的第三代涡扇发动机完成了科研试飞；自行设计的先进涡轴发动机进展良好。

基础条件建设方面：通过技术改造、转包生产和国际合作，设计手段、试验测试、制造技术、质量控制和管理水平有了很大提高；“亚洲第一”的高空模拟试车台通过国家验收，完成了多型发动机的试验任务；工程设计基本上甩掉了绘图版，数控加工、柔性制造能力进步显著；厂、所面貌焕然一新。



## 2. 与世界先进水平差距很大

与世界先进水平相比,我国航空动力行业也还存在不少问题和不足。我们长期在测绘仿制的圈子里徘徊,至今没有一个自行设计的先进发动机走完研究、发展的全过程并装备使用。总体上说,尚没有完全形成自己的先进航空发动机设计体系,实现从测绘仿制到自行设计、从传统设计到预测设计的战略装边。我国现役军民用飞机的动力装置基本上是仿制或采购国外的机种,仍然处于受制于人的被动局面。

究其原因,客观上,航空发动机技术复杂、难度大、研制周期长、需要费用多,而我国工业基础薄弱、技术储备不足、经济力量有限、缺乏实践经验;主观上,管理落后,缺乏科学、民主的决策机制和稳定、权威的中长期发展规划;对基础设施建设、预先研究工作和先期技术演示验证重视不够,投入太少;摊子大、包袱重、力量分散、低水平重复。此外,技术改造滞后,制造、试验手段落后,长期困扰科研工作的试制加工问题始终没有得到很好的解决等等。

## 3. 航空动力的发展思路

在新的世纪里,面对良好的机遇和严峻的挑战,我国航空动力行业认真总结经验教训,深化改革,开拓前进,正在实施自己的发展战略和“五年计划”。本着“需求牵引,技术推动,加强预研,打好基础;集中力量,重点突破;自主创新,形成体系;瞄准前沿,跨越发展”的指导原则,确定了通过20年努力,攀登三个技术台阶,建立完善自己的设计体系,实现两个战略转变,基本形成军、民、燃机三大支柱产业,扭转我国航空动力落后被动局面的发展目标。总的发展思路是,以军用发动机为主线,走军、民、燃机协调发展的“三步走”战略。

第一步是抓紧现有军、民、燃机的改进改型和研型号的研制定型,长我推重比8/功重比7一级发动机研制技术。

第二步,完成推重比10/功重比9一级发动机预研和型号研制工作,为我国下一代飞机提供动力,掌握这一级航空动力的研制技术。

第三步,开展推重比12~15/功重比10~12一级发动机关键技术预先研究,为航空动力的长远可持续发展提供技术储备。

# 三、加速发展我国航空动力的措施建议

为了完成上述艰巨而光荣的任务,加速我国航空动力的发展,我们建议:

## 1. 充分认识航空发动机的重要性,将航空动力列为国家科技重点工程,集中力量,重点突破

发动机是飞机的“心脏”,是知识密集型的军民两用高技术、高附加值产品。它不仅对军机的作战能力和战争的胜负有重大影响,是民机性能和航空事业的关键因素,而且改型发展的燃气轮机在机车、坦克、舰船、发电、泵站等领域有广泛应用,对科学技术、国防建设

和国民经济的发展，都有重大的推动作用。因此，航空动力是一个国家产业技术水平和综合国力的重要标志之一，也是发达国家重点发展的高技术产业和对外严密封锁的核心关键技术。

发动机问题不解决，飞机是上不去的，航空工业也是难以独立自主发展和不完整的。而没有独立自主的、发达的航空工业，就很难赢得军事、政治、经济、科技强大的社会主义大国地位。1939年，苏联政府专门开会做出决定，要钱给钱、要人给人，千方百计优先发展航空发动机。20世纪50年代起，法国政府高度重视航空动力的自主研制，为支持民族工业的发展，宁愿使用自己比较落后的发动机，也不去购买和装备比较先进的美国发动机。他们的做法值得借鉴。

要加大投资力度。美国一项IHPTET计划，15年投资50亿美元，而我国实施的推重比8和推重比10两项大型预研计划，从1980年至2000年的20年中，总计才投入4.3亿人民币。20年的总投入还不及美国一项计划一年经费的1/6，实在是太少了。

## **2. 充分认识航空发动机的复杂性和规律性，贯彻动力先行、预研先行的方针，加强先期技术演示验证，走核心机/验证机派生发展道路**

航空发动机在高温、高压、多变化的恶劣条件下长时间工作、反复使用，既要性能先进，又要可靠性高、寿命长、成本低。其技术复杂，难度大，研制周期比飞机机体更长，花费资金更多，因此必须提前飞机5-10年开展预先研究和技术验证，相对独立地先行发展。如果定了飞机才考虑发动机，型号立项才搞技术研究，结果必然是发动机赶不上飞机研制的过程，最后不得不买装外国的发动机，从而陷入不断引进、不断测绘仿制的恶性循环。

国内外的经验教训证明，“动力先行，预研先行，走核心机/验证机派生发展道路”是航空发动机研究发展的客观规律。我们必须充分认识这个规律，老老实实按客观规律办事。

## **3. 深化体制改革，加快动力行业的结构调整和战略重组。实行科学管理，切实加强航空发动机研究、发展与生产的集中统一领导**

结构调整是一项复杂的社会化系统工程，应在有利于发展、有利于稳定的原则下，精化分立、整合重组，加快调整的步伐。建议组建中国航空发动机总公司、国家级燃气涡轮研究院和发动机仿真研究中心，并与全国相关高等院校及科研院所一起，形成产、学、研密切结合的科技创新体系和小核心、大协作、哑铃型、高水平、高效益的航空动力产业。

要建立科学、民主的决策机制和竞争、评价、监督、激励机制，协调和处理好发动机与飞机、型号与预研、全新研制与改进改型、自行研制与技术引进、工业部门与使用部门之间的关系，协调好总装备部、军兵种、国防科工委和集团公司之间的关系。

## **4. 稳定发动机科研生产队伍，吸引和培养高级技术人员、高级管理干部和高级技术工人“三高”人才**

国家要发展，行业要振兴，关键要有高素质的人才和一支技术精良、团结战斗的队伍。航空动力行业科技骨干流失严重，高水平的青年科技人才引不下来、稳不住，是长期没能很好解决的最大难题。建议国家和有关单位尽快制定政策、采取切实有效措施，把高水平的人才吸引到航空发动机战线上来。

我们相信，在党和国家的正确领导下，通过动力行业 15~20 年的共同努力，认真贯彻实施“三步走”发展战略，就一定能够实现军、民、燃机协调发展，完成从测绘仿制到自行设计的战略转变，扭转我国航空动力落后的被动局面，跻身世界航空动力强国的行列，并走上持续快速发展的道路。

## 航空制造技术

吴希孟 关桥\* 邵亦陈  
(北京航空制造工程研究所)

### 一、航空制造技术的重要性

民用航空是交通运输体系的重要组成部分，在我国已占到交通运输总量的 5%~6%。改革开放以来，对外贸易、文化交流不断扩大，旅游业蓬勃发展，通用航空市场日趋广阔，民用航空面临着极好的发展机遇。发展民用航空必须有民用飞机，是从国外购买，还是自主研发？这是摆在国人面前必须首先解决的问题。我国民用运输飞机、通用飞机的市场基本上被国外飞机厂商所垄断（表 1）。虽然国内对大型或支线民用飞机的研制也曾制订过各种计划，甚至试图以市场换取部分技术，但终未实现。国务院已批准“十五”期间自主研发支线客机，将在确保自主知识产权的前提下，允许外资和外国专家介入，并实行国际招标采购部分设备，以加快研制进程。我们必须付出艰苦的努力，才能使我们的支线飞机顺利上天和自由飞翔。

表 1 中国民航运输类飞机出产国统计（2001 年底）

	美 国		空 客	前苏联	各型外国 支线飞机	国 产	合 计
	波音	原麦道					
架数	303	55	107	7	67	27	566
百分比/%	53.6	9.7	18.9	1.2	11.8	4.8	100

在军用方面，海湾战争、科索沃战争和在阿富汗进行的反恐战争均显示出，在未来战争中，空中力量将是战争中的核心力量，制空权是有效完成一世作用战任务的前提；对地攻击不仅是夺取空中优势的有效手段，也是消灭地面敌人和作战支撑能力的有效手段；甯运输能

力是大距离机动和应付突发事变的重要手段。空中力量已成为战争中首先使用、大规模使用和全程使用的多功能力量。空军已开始担任战争的“主角”，进行“相对独立的”战争。战斗机、轰炸机、对地攻击机以及侦察机、预警机、电子战飞机、运输机、加油机等特种飞机（包括上述用途的无人飞机）在未来战争中的地位越来越显得重要。

一切民用、军用飞机都要依托一定的制造技术体系及与其相应的工具仪器设备，通过研制、生产过程得到实现。先进的航空制造技术是民用航空装备和高性能航空武器的重要技术基础之一。为了满足航空产品对高性能、减重延寿，以及提高对复杂工作环境的耐受性、安全性、舒适性及降低制造成本的要求，必须尽快提高我国航空制造技术的水平。美国在飞机及其发动机及机载设备的探索研究、型号研究、工程发展等方面执行了数百上千的计划，投入巨资确保其领先地位。其他航空大国也俾发展其航空制造业和先进制造技术。

我国航空科技和工业已走过 50 余年的历程。在党和国家重视之下，取得了很大的发展，有了相当的规模，研制生产了大批航空武器装备和少数民用、通用航空装备。尤其 20 世纪 90 年代以来，军民航空产业和国外航空部队的转包生产已取得显著的进展，一批重点型号已投入小批量生产，研制出一批具有自主知识产权的飞机、发动机、机载设备。但是，我国民用旅客飞机市场基本上被波音、空中客车所占据，通用飞机也在大量引进。引进与合作可以提高我国发展的起点，最终还要靠我们发奋图强、自力更生，迈出自主设计研制的步子。

## 二、航空制造技术发展概况

### 1. 飞机数字化设计/制造/管理一体化

飞机数字化设计/制造/管理一体化技术在民机研制过程中首开先河并取得成效。波音 777 飞机研制采用三维数字化定义（DPD）、数字化预装机（DPA）和并行工程（CE），在世界上第一个实现了无纸设计，打通了从设计、生产到管理的全数字化信息流，使该飞机从立项到首架交付只花了 4 处半的时间，比波音 757/767 的 9-10 年研制周期缩短了一半，用户交货期也由 18 个月缩短到 12 个月，产品成本降低了废品率降低了数据错误率降低了 98%。同样采用虚拟产品开发技术，欧洲空中客车的试制周期从 4 年缩短为 2.5 年。美国已将飞机数字化设计/制造/管理一体化技术应用到 F-22、JSF、RAH-66 等军用飞机研制中显著降低了研制费用及生产成本，大大增强了全球竞争能力。

飞机数字化制造是提高飞机研制和关键零部件的制造能力、缩短研制周期、提高产品质量、降低产品成本的有效途径。数字化主要体现 5 个方面：制造过程的依据是数字化的；制造工艺及过程的控制和管理是数字化的；加工参数是数字化的；实物加工设备是数字化的；实物装配依据、定位控制和检测是数字化的。

以飞机外形钣金件为例，数字化制造比模线样板工作法相比，不仅可以节省大量的工装和生产准备时间，而且可能通过数据直接传递避免模拟量多次反复传递带来的成形型面的误差。

## 2. 大量采用整体结构、轻型结构及特殊要求的结构

民用飞机和特种飞机要求减重,以便安排更多的客运量和载货,或多装油以便增大航程;第四代战斗机要求机体结构效率达到 27%。为此,在飞机机体上大量采用整体结构(含焊接整体结构)、轻型夹层结构和铝锂合金、先进复合材料结构。美国国家研究会先进民用飞机新材料专业委员会对下一代民用运输机提出了将新材料和低成本制造技术相结合的、符合损伤容限设计规范的结构方案(表 2)。

表 2 革新结构方案的汇集

结构概念	应用	优点	限制
整体加筋均布和正交栅格结构	蒙皮/桁条壁板/舱门、地板组合件	减少零件数量、减少紧固件数、减少加工工序	复杂零件、工装成本、损伤容限、维护、检查和修理
精密铸造	吊挂、隔板、安定面、天窗骨架、舱门、结构框架	减少零件数量、降低制造成本、适合于快速制样方法	铸造缺陷,疲劳特性,性能数据库
多向结构/树脂传递模塑	蒙皮,桁条,框,肋	减少零件数目,改善抗分层能力,提高冲击容限	可变纤维/基体分布、性能数据库,加工成本
革新的夹层结构	蒙皮,控制面,边角,舱门,地板组件,水平安定面	高强度/重量比,双向稳定性	吸湿问题,高制造和装配成本,低成本现场检测
层压混杂结构	蒙皮,地板,带板	改善抗疲劳性能,提高刚度	等厚度,监测方法
焊接结构	油箱,压力容器,翼盒结构	减少零件数目,降低制造成本,便于自动化	降低静强度,疲劳性能差,性能数据库
胶接结构	机翼和尾翼盒段结构	减少紧固件数,降低制造成本	疲劳性能差,没有适当的检测方法

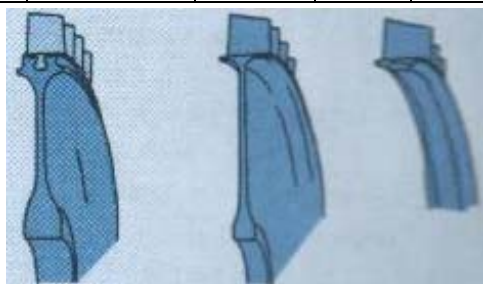
航空高新技术的发展需求,牵引着诸多先进制造技术的进步,如蜂窝和金属层板胶接技术,精密铸造技术,热等静压技术,高能束流焊接技术,添加活化剂的氩弧焊技术,搅拌摩擦焊技术,先进复合材料构件低成本(缠绕技术、树脂转移成形和树脂渗透技术、线束自动铺放技术等),非热压罐固体化技术,各种先进的毛坯成形技术、钣金成形技术(含超塑成形/扩散连接即使

SPF/DB)、热表处理技术等。美国 F-22 战斗机采用了热等静压钛合金铸件经电子束焊制造的主承力构件后机身桁架式后梁,被喻为“继采用亚麻布、铝合金之后,飞机制造业的第三个里程碑”,“钛合金结构采用计算机控制的电子束焊标志着飞机制造新时代的到来”。可见,先进制造技术的进步又推动着航空产业的加速发展。

在航空用喷气发动机方面，提高推重比是发展方向。为此，提高压气机的级压比，减少级数、减少零部件数和一切可省略的结构（见表 3 和图 1），采用轻型高温材料的结构（金属间化合物及其复合材料、钛基复合材料、陶瓷基复合材料、C/C 复合材料的结构及相应的涂层），既能减重又可适应提高发动机工作温度的要求；采用高效冷却结构和密封结构，让更多的气流来提高推力。由此带来整体叶盘制造

表 3 第五代航空用涡扇喷气发动机与 F119、F100 某些参数的比较

发动机		推力/kN		级数				总压比	涵道比	零件数	推重比	
		中间	最大	风扇	高压压气机	高压涡轮	低压涡轮					总级数
F100-PW-100		65.2	105.9	3	10	2	2	17	25	0.6	基数	8
F-119	F-119	105	156	3	6	1	1	11	35	0.6	-40%	10
	相对 F-100 增减率	+61%	+47%	0	-40%	-50%	-50%	-36%			-40%	+25%
IHPTET 计划	推比 20	134	无需加力燃烧室	1	3	1	1	6		无涵道		20
	相对于 F-119 增减率	+27.6%		-66%	-50%		无导向器					



技术（成形与焊接）、宽弦空心及弯扭叶片制造技术（含 SPF/DB）、钛基或金属间化合物复合材料构件（燃烧室或其浮动壁、喷口调节片）制造技术、C/C 复合材料构件（加力燃烧室衬筒、带发汗结构的涡轮叶片和导向叶片）制造技术、纤维增强涡轮盘制造技术、矢量喷管制造技术，适用于不同温度范围的封严、耐磨（含防微动磨损）、抗腐蚀、抗氧化、阻燃或隔热的涂层、膜层及其他表面改性技术等。

在航空机载设备制造技术方面，随着飞机性能的提高和微电子数字技术的发展，航空电子设备大量增加，并向小型化、轻量化、功能强和高可靠性的方向发展。航空电子设备采用高集成度、元件引脚间距已达到 0.3~0.5mm 的微电子器件，并应用高密度组装互连技术。美国在 20 世纪 90 年代中实施 HDMP 计划，使得 X 频段 T/R 组件的成本下降了 10 倍，重

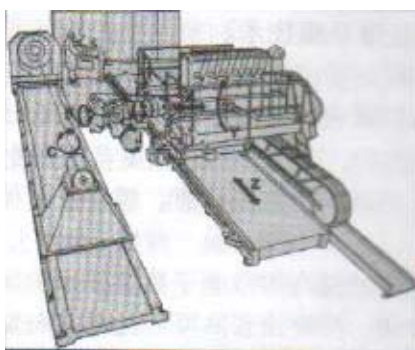
量减小 5 倍，体积减小 5 倍；90 年代末期 MATEP 计划使得 MMIC 功率模块功率提高，性能/价格比提高了一个数量级。在美国第四代飞机机载设备中，大量采用专用集成带内陆（ASIC）多芯片模块（MCM），使产品体积减少了一个数量级，重量不及原来的 20%，可靠性却提高了一个数量级。航空电子制造技术除专用芯片、模块制造技术外，还包括高密度多层印制线路基板、多引脚细间距元器件及 MCM 多芯片模块组装技术和模块表面三防涂层技术。

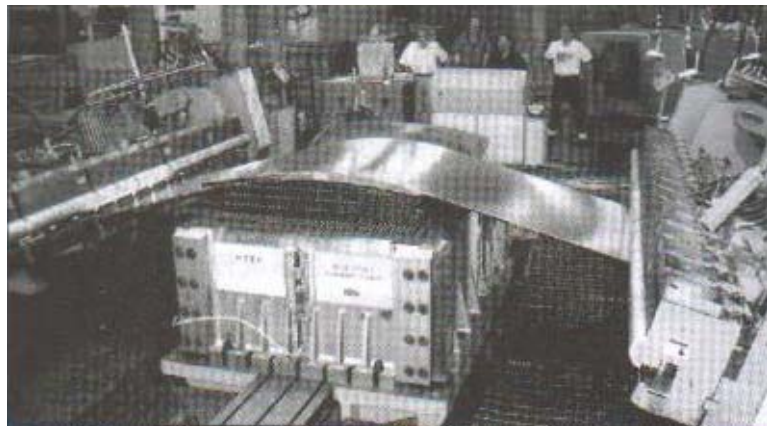
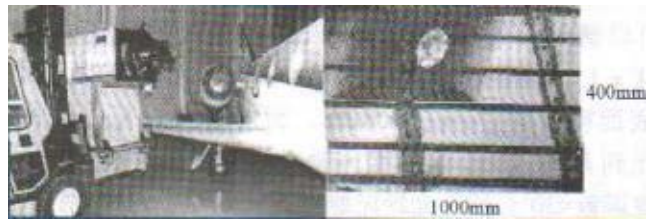
所有上述技术的突飞猛进，都是综合采用相关先进技术的结果。

### 3. 广泛采用柔性化的生产技术及装备

在航空零部件切削加工中，数控机床、柔性加工中心（含车削中心、磨削中心）、柔性生产线已大量采用，自动化车间也有不少实例。在管理方面遵循精益的思想，力求取消一切无效环节，对流程进行再造，采用单件流原理（一个被加工的工件不间断地通过整个制造过程，无储存）组织生产，采用 6 $\sigma$  的统计方法控制产品及服务的质量。

在特种加工和装配工序中，也大量采用数字化、柔性化的生产和检测方法及设备，如复合材料构件制造中的线束铺放技术（图 2），柔性自动化装配系统（图 3），计算机控制电子束和激光束焊接技术（图 4），机器人弧焊技术以及自动化检测技术（图 5）等等。近年来，柔性模具（图 6）的出现有可能取代钣金成形中众多专用模具，特别适于实现数字化、柔性化研制及多品种小批量的生产要求。





在切削、减薄加工的同时，增量成形方法也有极大的发展。国外已利用激光快速原形制造（RPM）技术制造出 RAH-66 直升机的结构件和座舱控制系统的样件；利用大功率激光器熔化金属粉末沉积技术和快速原形相结合制造出近净形的钛合金复杂结构件（F-22 的接头，F/A18-E/F 的机翼翼根吊环及用于降落连接杆）；在加工了冷却通道并充填以临时填充物的高温合金骨架上，利用电子束物理气相沉积（EB-PVD）沉积金属间化合物复合材料的外壳形成微叠层的复合材料涡轮叶片，有可能将涡轮进口温度提高 300 和进一步减少冷却气流用量，并保持涡轮叶片的高塑性；国外还利用溶胶-凝胶法制备微叠层状的热障涂层，不仅具有更高的隔热效率，而且抗氧化/抗腐蚀性能也很理想。

#### 4. 精密加工技术

精密、超精密加工技术是保障惯性器件、伺服机构及液压系统的精密偶件等精密零件质量的决定因素，其精度已提高到 0.1~0.01  $\mu\text{m}$ 。美国、西欧和日本非常重视超精密加工技术



的发展和应⽤，美国陆、海、空三军制造技术计划均集中巨额外资、⼈⼒，微米级坐标镗、磨床已进⼊⽣产线， $0.1\sim 0.01\ \mu\text{m}$  超精密加⼯机床及加⼯⽅法和复合加⼯技术已⽤于关键零件的批量⽣产。

光电零部件中单晶 Ge 红外透镜的面形  $N=2$ ， $N=0.2$ ，中心偏差  $X=1$ ，表面粗糙度  $B=V$ ；非球⾯光学零件尤其是非轴对称非球⾯的光学零件表面粗糙度  $R_a=0.008\ \mu\text{m}$ ，⾯形精度为  $1/6$ ；激光陀螺的反射镜基⽚超精密抛光到  $R_q<0.1\text{nm}$ ，陀螺腔体激光环路细长孔直线度  $10\ \mu\text{m}$ ，孔径变化  $<5\ \mu\text{m}$ ，空间孔⾓度  $<30^\circ$ ；国外光纤陀螺已达到  $0.001^\circ/\text{h}$  的精度，红外制导导弹的蓝宝石整流罩的表面粗糙度  $R_a=0.008\ \mu\text{m}$ ，光圈及光圈误差为  $N=5$ ， $N=1$ 。硬脆材料光学器件的超精密车削、磨削、抛光、镀膜、检测是保证探测、导航、瞄准系统精度的关键。

微机电系统 (MEMS) 是航宇制造技术的新领域，它是把硅或其他材料制成基本尺寸的几微米至几毫米的、具有机电多控制功能的独⽴系统。由于 MEMS 具有体积小、精度高、重量轻、性能稳定、可靠性高、能耗低、响应快、效率高、抗干扰能力强和功能多样化、集成化等特点，将⽤于导航与制导系统、测量与控制系统、显示系统、通信系统等。美国已将 MEMS 技术与航空航天、通信技术并列为三大科技发展领域。20 世纪 90 年代已研制出  $2\text{cm}\times 2\text{cm}\times 0.5\text{cm}$ 、重 5g 的惯性测量元件样件，陀螺的漂移误差  $10^\circ/\text{h}$ ，目前已达到  $1^\circ/\text{h}$ ；硅微加速度计精度为  $0.8\text{nm}/\text{h}$ ，已批量⽣产。F-22 飞机的大气数据系统传感器采⽤了硅谐抗摆式传感器，座舱显示系统采⽤了数字式微反射镜器件。

### 三、建 议

#### 1. 提前安排预研，使制造技术具有储备和快速反应的能力

从国内外经验看，一种新材料的结构和新型功能结构的制造技术，从预研到工业化⽤⼤致需要经过几年到十余年甚至更长的时间。因此，航空制造技术既要有型号背景的需求，⼜必须相对独⽴地予以提前研究。也就是说，航空制造技术要有储备和快速反应的能力。否则，就不能为型号研制和⽣产及时提供快捷、高效、优质、低成本的⽤⼤制造技术。需求牵引和技术推动应相辅相成。

#### 2. 尽快形成⽣产能力，先进制造技术必须配套

航空制造技术的特点是要求不断地解决新型材料结构和新型功能结构的制造问题，在尽⼒减重的前提下，要保证结构有⾼的强度、刚度，尤其要有⾼的损伤容限。目前，军机的寿命已达到 8000 飞行⼩时 (30 日历年)，民机达到了 60000 飞行⼩时。因此，在制造过程中⼀定要充分发⽤材料和结构的性能，并通过某种处理赋予它特殊要求的功能。航空制造技术必须⼩⼼处理从毛坯、加⼯、装配、试验以及维护修理等全过程的所有问题。先进制造技术和相关技术必须配套，否则难以在工程化⽤中形成⽣产能力。

### 3. 要重视大型专用制造装备的研制

航空专业工艺设备是实现先进制造技术的不可缺少的载体。一些关键设备，若要受制于人，必须立足自我，而自行研制需要较长的周期，必须提前安排，否则会影响新机研制和生产。

## 航空电子系统

金德琨

(中国航空第二集团公司科学技术委员会)

### 一、 航空电子是飞机的重要组成部分

航空电子是把电子技术应用到航空领域的一门学科，现在已延伸到泛指飞机、导弹、宇航上为完成飞行任务和其他任务的所有各种电子设备和系统。就飞机而言，通常包括记载通信、导航、识别、雷达、光电探测、电子战、大气数据测量、任务管理系统、飞行管理系统、飞行控制系统、座舱显示控制系统、数据链、飞行参数及语言记录等。

从 1949 年“Avionics”(Aviation+electronics)这个词出现，至今已有半个多世纪。特别是近 20 年来，随着微电子、计算机、信息技术的发展推动及航空技术的需求牵引，航空电子得到了飞速发展，其趋势呈指数曲线上升。在飞机总价格中所占比例也越来越大，在战斗机中占 30%以上，在特种飞机，如预警机、侦察机、电子战飞机中超过 50%，在民用飞机中占 15%-20%。

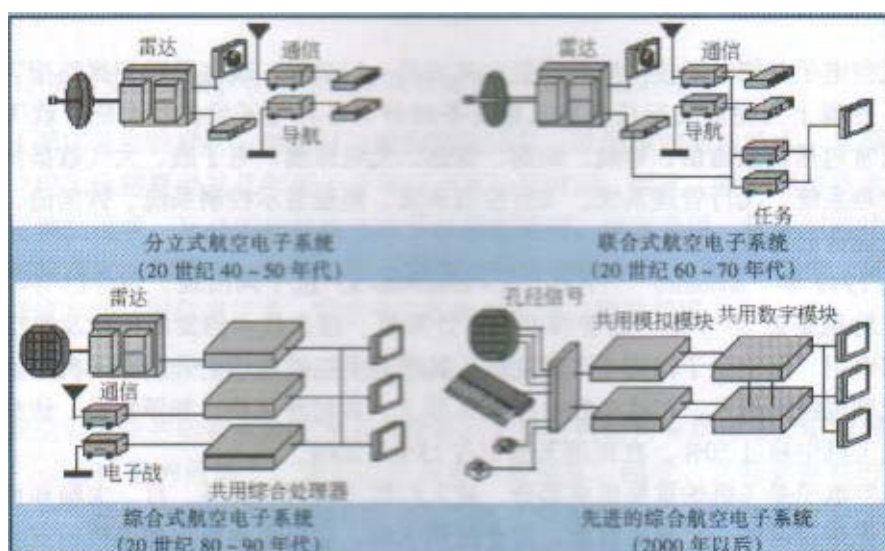
航空电子是飞机的重要组成部分，被人们称之为飞机的耳、目、大脑和神经，是飞机先进程度的一个重要标志。对于民用飞机，它极大地影响到飞机的安全性、经济性、舒适性。先进的航空电子可使民航客机实现“四维”(三维空间加一维时间)自动导航，起飞前设定好航线、时间和目标函数(如燃料耗费最少)，飞机将根据周边环境(气象、风向、风速等)和空中交通管制规则，自动地选择最佳高度、速度飞抵目的地，飞行员仅起监视和应急处理作用。完善的多余度自动飞行控制系统和发动机控制系统极大地保证了飞机的安全性，提高了乘员的舒适性。

航空电子对军用飞机更是起着举足轻重的作用。战斗机是一个综合作战武器，其作战效能早期主要取决于机体、发动机和武器，现在则很大程度上依赖于航空电子。一位北约军事专家通过仿真和实战经验，提出飞机的作战效能和航空电子性能成三次方关系，最近的几次局部战验证了其正确性。1991 年“海湾战争”历时 42 天，伊拉克大批军事基地和地面设施

被摧毁，40 多架飞机被击毁，而多国部队飞机无一架在空中被击落，主要是多国部队有先进的侦察、监视、通信手段，有先进的航空电子和武器。1998 年“沙漠之狐”军事行动，规模虽然比不上“海湾战争”，武器也没有使用新的，但航空电子的进一步完善，提高了制导精度，“效费比”远远超过 1991 年。北约对南联盟和阿富汗空袭所使用的“手术刀”式的空对地攻击方式对进攻方的损失几近于零，但对对方的打击却是致命的。

## 二、航空电子的发展历程

50 多年来，航空电子的发展经历了 4 个阶段（图 1）。



(1) 20 世纪 40~50 年代，飞机上的航空电子，如通信、导航设备等（称之为外场可更换单元，LRU）均是离散、独立设置的，相互之间如有联系也是点到点，我们称之为离散系统。

(2) 20 世纪 60~70 年代，以 F-16 战斗机和波音 737-200 民航客机为代表，采用中央处理器和总线（1553B、ARINC-429）把所有的 LRU 连接起来，构成一个联合式航空电子系统。到目前为止，几乎所有的在役战斗机和大部分民航客机都采用这种结构。与离散式相比，联合式可以实现部分资源共享、显示和控制得到部分集中、一定的容错和重构功能，从而提高了系统效能。

(3) 20 世纪 90 年代开始研制一种全新的系统结构——综合式航空电子系统。用标准外场可更换模块（LRM）代替外场可更换单元，将标准模块安装在集成式的机柜中，通过高速光纤总线、网络和功能强大的软件，构成一个高度综合的航空电子系统。这些模块一旦脱离系统，就不能构成独立的应用单元。综合式结构的最大优点是，采用开放式结构，具有相当的灵活性；系统的功能可以增减、元器件可以升级、模块可以更换，标准模块大部分具有通用性，由软件随时赋予功能定义；容错、重构能力更强，资源得到了最大限度的共享，不但性能提高，而且购置成本和使用成本大大减少，改进改型也方便。即将服役的 F/A-22 战

斗机和正在航线的 B-777、A-320、A-340 等先进的民航科技均采用这种结构。

(4) 目前正在研制一种更加先进的综合式航空电子系统。在上述系统结构的基础上, 全系统采用统一航空电子网络 (UAN), 以光开关阵列模块为传输枢纽, 通过光母板和机柜间的光纤, 不但交链同一机柜内的模块, 而且向前连接到传感器, 向后连接到座舱及飞机管理系统。信号传输速率达 8Gb/s, 延时很小, 处于不同位置的不见、模块间的信息传输时间可以达到同一量级, 空间布局不受距离限制。该系统的综合已经延伸到射频传感器, 在物理结构上完全取消了按功能划分的概念。美国目前正在研制的 F-35 战斗机采用的就是这种结构。

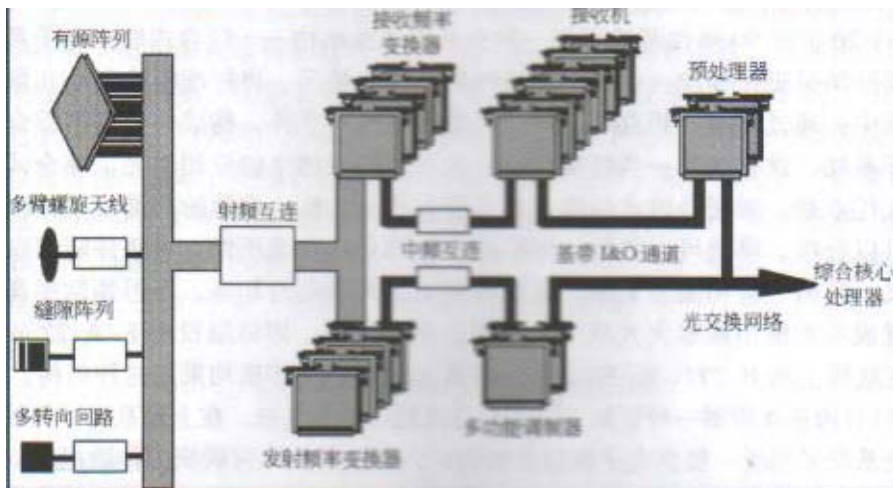
### 三、 航空电子的发展趋势

未来以网络为核心的交通运输和信息化战争中, 飞机平台上的航空电子系统将具有以下发展趋势。

#### 1. 系统综合化

由于多任务、多功能的要求, 未来的飞机必须要高度综合化。不仅是雷达、电子战斗、通信、导航、识别、显示等电子系统要利用总线进行数据综合, 而且还要对其信号进行综合, 对各类信息进行融合, 并对飞行控制、发动机控制、机电系统也要进行综合。

对同类子系统要进一步地进行更完全的综合。例如, 对射频传感器 (雷达、电子战、通信、导航、识别等) 的综合, 要把 60~70 副天线综合成 10 多副天线, 用共用射频模块分频、分时完成上述多有传感器的发射和接收, 既提高探测、识别性能, 还能大幅度减小体积、重量和功耗, 降低成本 (图 2)。



机电共用系统的综合, 改变了其长期分散的局面, 统一了管理和控制, 发展成如同传感器综合一样的完全综合。例如, 联信公司研制的“热和能量管理系统”将完全取代传统的环控、辅助动力、应急动力和发动机启动装置。对全机系统的综合并深入到系统内部, 将是今后发展的必然趋势。

## 2. 结构开放化

以共用标准为基础，建立具有很大灵活性的一种航空电子系统结构，其特征是：使用明确的接口标准，支持可互操作性、可移植性和可变规模能力。这些标准的使用一般不需要专门的开发成本，或只付少量费用即可。其借口包括硬件接口、软件接口、机械安装接口。硬件接口一般采用 SCI（可变相干规模接口）或 FCAE（航空电子光纤通道）可作为候选对象。

开放式系统结构一般采用商用货架产品（COTS）或用商用货架产品的元器件组成的标准电子模块（SEM）。其优点是即便于技术和元器件的更新换代，又便于系统的扩充和减裁，降低系统开发及使用成本。

## 3. 处理模块化

模块化的目的是把系统划分成各种便于重构和可维护的单元、以处理各类信号和数据。按照标准模块的规范设计，采用超高速集成电路（VHSIC）、多芯片模块（MCM）和高密度组装技术，可做成具有各种功能的标准电子模块（SEM），每一模块都有完善的自检功能；模块的两边都有屏蔽盖板、中心散热板和肋条及高密度连接器和定位销。

## 4. 信息全球化

在信息无时无处不在的今天，飞机无论是民用还是军用，离开了信息就不能飞行，就不能执行任务。除了完成飞机平台本身的控制、显示外，航空电子还要探测和感知周边态势，实现飞机内外信息的沟通。飞机上的航空电子在全球信息栅格（GIG）中是一个节点，通过这个节点，飞机才能了解内外信息，掌握周边态势并保障飞行执行给定的任务，否则就是一个“瞎子”，寸步难行。

为适应 21 世纪全球空中交通需求，全球无隙运行统一规范的空中航行系统迅速发展，1993 年完成定义进入实施阶段，即“通信、导航、监视/空中交通管理系统”（CNS/ATM，我国简称为“新航行系统”）。当前的通信包括航空移动卫星通信、高频通信、甚高频通信、二次监视雷达的 S 模式数据链通信，并通过建立航空电信网络（ATN），将空中（机载）和地面数据通信融为一体，实现空地计算机联网。导航包括卫星导航、陆基无线电导航、惯性导航等系统和相信的着陆引导系统，能实现区域导航。监视系统包括二次监视雷达为主的独立监视系统、结合选址式自动相关监视或广播式自动相关监视系统，扩展了监视覆盖范围。

信息化战争，最重要的是信息的获取、处理、交换、应用。因此，作战飞机上传感器越装越多，连续、告诉、安全地与海、陆、空各种平台（如预警机、侦察机、电子作战机、友机、卫星、军舰、地面站等）交换各种信息。只有这样，才能感知周边态势，做出正确的威胁判断和最后决策，以适应未来战争的全球到达和精确打击的要求。与此同时，作战飞机也向一体化网络输送本机及其所探测到的信息和处理结果，使自身成为 C<sup>4</sup>ISR 网络中的一个节点，有效地发挥每架飞机在作战装备体系中的作用。这也是未来军用航空电子系统的一项重要功能。

## 5. 座舱智能化

民用飞机由于航线事先设定,只要本机定位准确、导航精度满足要求、对飞机周围环境(风速、风向、气象等)测量准确,通过飞行管理系统(FMS)和自动飞行控制系统(AFCS)就能完成给定的飞行任务。飞行管理系统通过优化飞行数据剖面 and 连接自动飞行控制系统,可使油耗减至最少并保证飞行安全、舒适和准确无误地到达目的地。正是因为民航客机的高度自动化、智能化,人们戏称驾驶员是“电子保姆”(图3)。



军用飞机由于战场环境的复杂化和信息处理量的不断增加,飞行员的负担达到了难以承受的地步。采用合适的人-机接口和智能化措施,造就一个智能化座舱,是未来的发展方向。合适的人-机接口应以虚拟显示为核心,充分利用视觉、听觉、触觉,一切从飞行员出发。美国正在研制的 F-35 战斗机将采用“大图象”(Big Picture)显示,用两个 8in×10in 显示器并列在座舱的上半部,使飞行员能同时观察机外观景;还采用头盔瞄准显示器,加上机上的红外传感器,可以实现 360°的全景观察。采用三维声音告警可判断威胁进入的方向,采取响应的语音识别和语音控制及座椅、操纵杆、油门杆的多维调节,也是为了方便飞行员。为分担飞行员对各种信息的处理,使飞行员集中精力进行高层判断和决策,采用以人工智能为基础的“驾驶员助手(PA)”是发展方向。

## 6. 价格商业化

价格是指一套系统从开发到生产,再到使用维护的全寿命周期成本。随着功能的增加和性能的提高,航空电子的价格也呈上升趋势,出现“买不起,用不起”的现象,价格成为航空电子发展的一个重要的问题。美国提出“经济上可承受(Affordability)”的采办政策,如JSF(F-35)飞机从研制开始,就把全机价格定在2800~3500万美元(1994年币制,空军型、海军陆战队型、海军型价格不同)。估计我国这一问题也将越来越突出。

解决价格问题的根本途径在于市场化、商业化、军民通用化，在于飞机的能力和成本（开发成本、生产成本、使用成本）的均衡。价格还涉及飞机（包括军用飞机）的发展战略，单纯的一国自产自销的时代已经过去。今后的发展更多地倾向于多国合作。

## 7. 军民通用化

由于民用飞机的航空电子是建立在民用标准、民用规范、民用（含工业用）元器件及批量生产的基础上，其成本比军用飞机便宜得多。随着技术的发展，民用飞机航空电子的质量将大幅度提高，更新速度也会加快。空中客车A-320民用科技在20世纪80年代就成为全面实现“操纵和控制飞机飞行的电传操纵系统（FBY）、操纵和控制飞机发动机运行的全权数字式电子控制系统（FADEC）和计算机管理飞行任务的航空电子系统”综合为一体的“全电控制飞机”。B-777、A-340随后也完成了类似的高度综合，它们都具有开放式结构和高度模块化的特征。

军用航空电子在冷战结束后，数量大幅度减少，而功能越来越多、要求越来越高，结果使得厂商不愿生产军用品，关闭了不少军品生产线。为实现“经济上可承受”的采办政策，各国军方都号召尽量采用民用标准、规范和元器件。从发展来看，军民通用是大势所趋。

## 四、 我国航空电子的现状和对策

我国航空工业从1951年建立至今，已有半个多世纪。先后经历了维修、引进生产、仿制、自行研制4个阶段，与之相应的航空电子行业大致也经历了上述过程，累计交付各类设备5000余种和1万多架飞机配套，基本满足了国内需求。

我国从事航空电子研制的所、厂分别属于中国航空工业的两个集团和中电科技集团，还有一部分属于地方，总计约5万人，约40%从事研制工作。20世纪70年代前，我国的航空电子除引进苏联技术而生产的雷达、通信、导航、识别设备外，其余均属机电式仪表。70年代末，我们开始引入航空电子系统的概念，80年代开始研制，90年代初完成了自行研制的联合式航空电子系统及其关键子系统的试飞、鉴定，并相继进入型号研制。90年代末我们着手进行综合式航空电子系统的研制，目前已初步完成地面原理样机。

多年来，我们重视和国外的交流与合作。先后同美国Honeywell和Rockwell-Collins、法国Sextant、英国GEC-Marconi等公司及俄罗斯国家航空系统研究院（Tochnnac）等公司进行设备、软件和系统方面的合作和人员交流，有的产品（如气象雷达、大气数据计算机、S-模式应答机等）还销往美国，美方不少航空电子软件都在我国由我们进行验证，并获得美国FAA和欧洲JAA的认可。通过合作，我们提高了技术和管理水平，取得了一定的经济效益，促进了我国航空电子的发展。

虽然我国的航空电子工业已经具备一定规模和研制力量，但从总体上看，我们相当部分的产品还比较落后，系统综合化程度不高，模块化、通用化刚起步，开发能力还很薄弱，

整体能力和水平与世界先进水平相比还有较大差距。

为加速我国航空带脑子的发展，应该制订符合我国国情的发展目标。争取用10~15年时间，建立一支强有力的航空电子总体队伍，掌握综合系统的核心技术和关键设备的制造技术，通过全球采购保证民机和军机的系统配套，最终赶上世界水平。为实现上述目标，建议采取以下对策。

### **1. 加大预研，领先发展**

航空电子相对于飞机平台既有配套的从属性，又有相对的独立性，特别是在微电子、信息技术飞速发展的今天，植根于此的航空电子也获得了快速发展，因此才出现一代飞机平台、几代航空电子的局面。没有航空电子的独立发展，就不可能迅速提供新产品，保障飞机平台更新。

我国目前从属性大于独立性，即必须有飞机的型号任务才有航空电子的研制任务和技术改造经费，而且型号少、周期长。等飞机型号出来和航空电子系统研制出来，其落后之势必不可免。不仅如此，甚至还出现与世界飞机发展趋势相反的局面，即一代电子、几代飞机。为改变这种状况，必须加大航空电子的预先研究和先期投入。

### **2. 加强总体，协调发展**

航空电子总体是对航空电子系统、子系统、设备和关键技术及试验方法的全面考虑和研究。要从系统的观点出发，始终着眼整体与部分、整体与环境之间的关系，整体地、综合地考察研究对象。在整体与部分相互依赖、相互结合、相互制约的关系中揭示系统的特性和运动规律，并对其组成、结构、功能、联系方式等进行综合研究，以实现航空电子总体的最佳化。

我国目前的航空电子行业体制是40年前形成的，经过几次国家机构改革，现在分别属于不同部门。40年前的航空电子设备是离散和独立的，尚未形成系统概念。今天的航空电子已形成高度综合的系统，而我们缺乏系统的总体考虑，没有总体部门统一设计，处于无序竞争状态。因此，加强航空电子总体设计是当务之急。

### **3. 国际合作，加快发展**

世界经济全球化、一体化趋势对航空工业的发展有着深刻影响，尤其是航空电子发展迅速，“全球采购”更加明显。要利用全球化的契机，充分开展国际合作与交流。结合国情和双方利益，在基础技术方面可开展课题合作研究，共建联合实验室和试验设备，共建研究发展中心；生产、转包生产。抓住全球化的契机，充分开展国际合作，可以加快我国航空电子的发展。为适应经济发展，国家已决定和国外合作发展50座和70座的



支线客机。如何利用这个机会,提高我国航空电子的水平,是决策者应认真谋划好的一件大事。

我国航空电子的发展正面临着一个国民经济快速稳步发展、经济体制改革全面推行、加入WTO后更加开放的国际环境。展望新世纪,相信我国的航空电子必将获得更快的发展。

## 结构寿命可可靠性与飞行安全

高镇同\*

(北京航空航天大学)

### 一、飞机结构疲劳寿命的重要性

空中交通运输日益发达以来,飞机空难屡见不鲜。典型的疲劳破坏事故最早可追溯到近半世纪前,两架英国慧星-1 客机于 1954 年 1 月和 4 月先后在空中断裂解体,分别有 35 人和 21 人全部遇难,引起世人极大关注。根据从海中打捞出的机体残骸的研究分析,确认为机身疲劳破坏:因为高空气压低,为适应人体需要,每次飞机升空时必须在座舱内充压,多次充压使机身蒙皮重复受到张力作用,导致疲劳断裂。另一引人注意的事件发生在 1979 年 5 月,一架美制 DC-10 客机起飞后不久左发动机在空中脱落,飞机坠毁,273 人全部丧生。从事故现场拾得被折断的安装发动机的螺栓,观察其断口外貌,呈现疲劳破坏特征。据不完全统计,仅 1999 年下半年,全世界民用飞机就发生了 16 起空难事故。事故原因除了恶劣天气、操作不当、人为因素外,大多是飞机结构疲劳引起的。此外所谓“疲劳”,系指没有生命的物体也会由于长期使用和多次重复受力而过劳致“死”。

飞机每飞行一次就受到一次循环载荷(力)的作用,多次飞行重复受载后就会在某些薄弱部位萌生裂纹。随着使用时间的增长,裂纹逐渐扩大厉害到一定使用期限,最终完全断裂破坏。该使用期限就称为疲劳寿命。若飞机达到疲劳寿命,在空中肢解,则会造成灾难性事故。事故发生的危险性还在于疲劳破坏之前无明显变形先兆。可见,飞机结构寿命对飞行安全至关重要。

1955 年,瑞典科学家 Bo Lundberg 撰文“飞机结构的疲劳寿命”(Fatigue Life of Airplane Structures, JAS, June 1955),首次论述飞机结构疲劳寿命和载荷谱概念,开辟了飞机疲劳研究新领域。此后,各国相继开展了大量研究工作,研究成果已用于各大飞机设计部门。如美国波音公司曾对飞机寿命制订有三个设计指标:60000 飞行小时、25000 个起落次数、20 个日历年服役期。只要达到其中任何一个指标,飞机寿命即告结束。台湾中华

航空公司 2002 年 5 月 25 日失事的一架波音 747 飞机，已经使用了 22 年，就很可能是超期服役的缘故。

我国自建国初期到 20 世纪 70 年代，生产的大量飞机都未给出寿命，更没有针对飞机寿命短、薄弱部位多的问题进行延寿。这就使用部门在工作中带来很大困难和盲目性，以致经常发生机毁人亡的事故。1970 年 7 月 16 日，我国一架直升机从高空坠毁，机上 7 人全部遇难。当时，周恩来总理批示要查明事故原因，航空工业部领导随即召集大会，著名数学家华罗庚先生莅会指导。经调查研究，该机旋翼系统轴颈发生疲劳破坏，究其原因是由于没有明确的使用寿命、盲目飞行造成的。会议决定：提高飞机结构的强度、科学合理地确定飞机使用寿命已刻不容缓。随后航空工业部和空军可靠性办公室组织专业人员全面开展飞机结构定寿和延寿研究，至今已有 32 年。

在厂所、院校众多人员的共同努力下，我国目前已经可以准确地预测飞机结构寿命，保障飞行安全。在民航运营的两种主要国产飞机—运七和运八，自 20 世纪 80 年代交付使用至今已有 10 余年，运七累计飞行约 70 万小时，从未出现结构疲劳破坏事故；运八飞行 13 万多小时，结构也没有发生疲劳破坏。在军用飞机方面，通过采取抗击疲劳措施，数千架飞机使用寿命从每架 1000 多飞行小时延长到 3000 飞行小时，增加产值近一倍。应该指出：我国生产的飞机虽然寿命不如国外先进机型长，但是如果能够准确地预测寿命、合理地安排检修周期、严格地执行维修大纲，飞行安全仍然是可以保障的。

## 二、 飞机结构寿命可靠性概述

澳大利亚科学家 A. O. Payne 曾主持以 92 架美 P51 战斗机为对象的一项大规模疲劳试验，发现疲劳寿命试验数据呈现很大的分散特性，最长的疲劳寿命为最短的疲劳寿命数倍。试验结果还指出：疲劳裂纹必然发生在结构受载严重部位的孔洞、凹角、沟槽等应力集中区。疲劳寿命长短取决于重复施加在结构上的疲劳载荷和结构本身对疲劳的抗力—疲劳强度。疲劳载荷除与飞行动作有关，还受风力、风向和驾驶员操纵等偶然因素的影响，随时间千变万化；另一方面，疲劳强度也受到材料组织的不均匀性和加工制造的不一致性等偶然因素的影响。

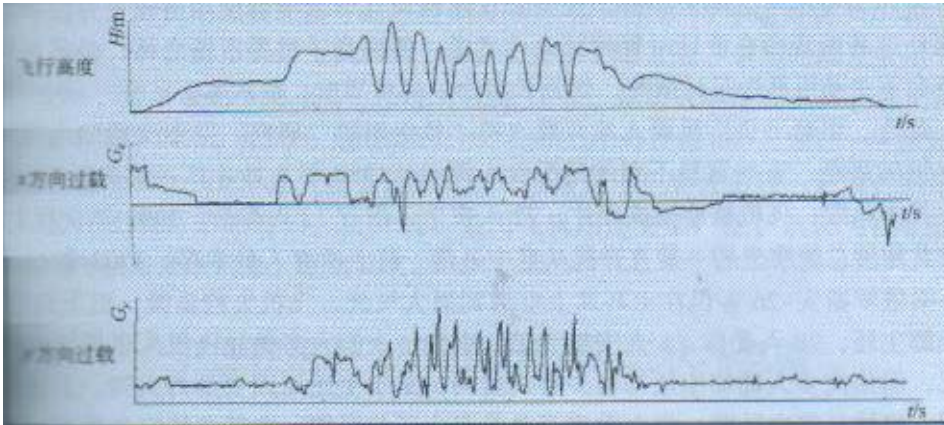
飞机结构寿命的分散性，使用疲劳载荷、疲劳强度和疲劳寿命必须作为随机变量来处理。疲劳过程的随机本质决定了传统力学的定值方法不可能给出全面、准确的描述。疲劳寿命受必然性和偶然性协同作用控制，必然性反映因果关系，偶然性反映随机差异，二者的耦合行为对物理系统产生的效应以概率演化出现。紊乱无序的随时机差异虽无法用定值方法描述，但它的群体则遵循某些统计规律，使无序变为有序，这就构成了结构寿命可靠性的理论框架。

可靠性一般定义为产品在规定工作条件下、在规定时间内、在完成规定功能下的能力。可靠度则是度量可靠性的指标，以概率表示，如 99%，99.9% 等。结构寿命可靠性研究旨在从经济性和维修性要求出发，保证结构在使用寿命期间、在规定工作条件下、在完成规定功能下因疲劳断裂失效的概率减至最低程度。失效概率等于 1 减去可靠度，如取可靠度为 99.9%，则失效概率为 0.1%。美国 A.M.Freudenthal 等人于 20 世纪 70 年代初率先进行收音

机结构可靠性的研究。其结构可靠性研究以疲劳寿命为对象展开，并提出确定使用寿命的分散系数方法，一直被沿用至今。

根据我国的长期实验研究，对大型结构疲劳寿命可以划分为两个阶段，他别处理。在出现某一指定“工程裂纹”以前的寿命称为裂纹形成寿命，从工程裂纹扩展至断裂的寿命称为裂纹扩展寿命，二者之和为全寿命。工程裂纹一般规定在 1mm 左右量级。裂纹形成寿命的分散性大于裂纹扩展寿命的分散性，按正态分布理论和经验数据可求出两类分散系数值。在大型结构的实验研究中，只能提供极少量试验件，甚至仅 1 件。为保证其有足够置信度，分散系数依试件个数减少而相应增大。

解决飞机定寿和延寿的先决条件是：编制出能模拟飞机真实飞行情况的载荷-时间历程（图 1），即载荷谱。作用在飞机上的载荷每时每刻都在波动变化，即使同一架飞机在同一条航线上每次飞行所随的载荷也不尽相同，且载荷大小及其发生先后次序都会影响结构的操作，以致人们长期为许多问题所困扰。疲劳载荷谱的编制一度被视为难解之谜，众说纷纭，无所适从。



飞行载荷与国情密切相关，国际上关于飞机载荷数据属于机密或知识产权。国外所颂的疲劳载荷谱技术资料（如 FALSTAFF 谱等），经过检验，与实际情况有不符之处。因此，只能自力更生，另辟蹊径。历经 20 余年研究，我国采集数据 28 亿多个，通过测试、研究和分析，解决了这一悬而未决的问题。表面考虑，疲劳载荷大小和先后次序存在无限多种排列组合形式，但实质上载荷变化自然形态及其效应呈现一定统计特征，可以从中构造具有中等疲劳操作程度的随机谱型，据此建立高置信度中值载荷谱编制原理。为保证足够的信息量，还设置了最少采样次数的判据，并对载荷谱赋予其高置信度（90%或 95%）。实践表明：采用中值载荷谱进行全机疲劳试验时，能真实地展现结构依赖于时间的裂纹萌生、裂纹扩展和最终断裂的全过程；能揭示结构的薄弱部位；根据少量个体测得的中值试验寿命，除以分散系数，即可推断出批量产品中最弱结构的寿命，以此作为群体的使用寿命，在理论上可以做到安全可靠，万无一失。

### 三、展 望

30 多年来我国航空部门以沉痛的代价换取了飞机结构完整性的实现。目前,我国对使用寿命的预测是利用已生产出的成品进行全机疲劳模拟实验完成的,飞机的一切疲劳薄弱部位以及疲劳寿命长短,要到产品定型后才能最终确定。根据全机疲劳试验所发现的问题,再改进原设计,甚至更换材料,势必导致产品研制周期过长,研制费用过高。

基于唯象观点,人们已逐渐认识到结构破坏过程和发展规律,有条件将产品使用寿命作为预定设计指标。在计划方案可行性论证时,直接进行疲劳细节设计,强化疲劳薄弱部位,在产品定型之前,以预定寿命为基础开展主动可靠性设计。从传统的产品可靠性评定演变为主动可靠性设计是科技进步的发展方向。

飞机使用寿命的长短直接关系到产品在市场上的竞争能力。目前国际大型运输机使用寿命已达到 6 万~9 万飞行小时,而我国仅为 2 万~3 万飞行小时。其原因除了材料和制造水平上的差距外,主要是在结构设计时未考虑使用寿命可靠性要求,而国外产品的寿命在设计时就得到充分考虑。要跻身于世界市场之林,必须开展预定寿命下主动可靠性设计研究,做到长寿命、高可靠度、低成本。

此外,很有必要广泛深入地开展飞机“救生系统”研究。空中交通的人身安全是永恒的话题,有些意料不到的情况发人深省。1967 年 6 月 4 日一架美制 DC-4 客机在英国坠毁,飞机被冲撞成碎片,72 人丧生,但有 12 人存活。1999 年 9 月 11 日中非共和国总统乘坐的一架直升机从空中坠落,机上所有人员幸存。2002 年 11 月 9 日一架俄罗斯安-26 客机在土耳其上空遇到强大气流,飞机失控坠毁,机上总计 28 人全部生还,20 人受伤,8 人安危无恙。事后,人们大多关注飞机失事原因和伤亡情况,但如此多人能够生还却很少有人过问,至于生还原因更鲜为人知。上述事件表明:机体从高空坠落,幸存者绝非吉人天相完全出于偶然,必然与人体-机体相关结构和飞机冲撞地面的某些特定条件有关。为此,建议围绕飞机“救生系统”项目,进行可靠性设计研究,这对飞行安全会大有裨益。

## 民用飞机和直升机的发展

张彦仲

(中国航空工业第二集团公司)

1903 年,莱特兄弟首次完成了有动力的载人驾驶飞行。100 年来,飞机航程已达 1 万多千米,巡航时间 10 多个小时,飞行速度达到 3 倍音速,飞行高度达到 3 万米以上,客机座位数达到 550 座级。

飞机是 20 世纪科学技术最辉煌的创造之一,改变了人类的社会、经济和生活状况。飞

机已广泛应用于客运、货运、工业、农业、海洋、医疗、救灾等方面。到 2001 年底，世界民用飞机和直升机已达 34 万架，预计未来 10 年还需要 5 万架。

20 年后，科技进步将使飞机的阻力和结构重量下降 20%，研制时间及费用下降 30%~35%，维护费用下降 40%，安全性提高 10 倍，运输成本降低 50%，氧化氮排放及事故率下降 80%，使民用飞机的安全性、经济性、环保性和舒适性进一步改善。

21 世纪，500~1000 座大型客机和新一代超音速客机将先后投入航线，涡扇支线飞机使用比例将迅速增长，直升机、通用飞机用途更加广泛，航班飞机、直升机、通用飞机将形成网络，联结社区。

## 一、世界发用飞机和直升机的现状与发展

### 1. 航班飞机

1935 年，第一架活塞式商业运输机 DC3 投入使用，速度 330km/h。1950 年，第一架涡轮螺旋桨客机—英国的“子爵号”投入航线，速度 550km/h。1952 年，第一架涡轮喷气式客机—英国的 DH106“慧星号”加入航线，速度 850km/h。20 世纪 60 年代，涡轮风扇式客机投入航线，使载客数百人的跨洋商业飞行成为现实。

(1) 干线飞机。干线飞机一般指 100 座以上、航程大于 3000 千米的民航班机。现在世界上有干线飞机约 1.2 万架，预计到 2021 年全世界干线飞机将达到 2.4 万架。干线飞机生产企业经过激烈竞争，主要剩下美国波音公司和欧洲空客公司。目前的干线飞机几乎都是涡扇飞机，波音 777 是最新机型的代表：全数字化设计，采用电传控制、高涵道比发动机、电子综合显示系统和大量的复合材料。

材料改进改型、系列化、大型化是干线飞机的发展趋势。波音公司和空客公司已经形成了从 100 多座到 400 多座的系列飞机，代表机型有 150 座级的 A320、B737，400 座级的 A340、B747。空客公司正在研制世界上最大的客机—A380，载客 550 人，计划 2006 年交付用户，座千米营运成本将比目前的波音 B747 减少 15%~20%。国外还在研究载客 1000 人，采用飞翼布局的运输机（图 1）。



超音速飞机也是 21 世纪的发展方向。2 倍音速的喷气客机“协和”号和图 144 在 20 世纪 60 年代即研制成功，由于技术和经济原因，“协和”号仅生产了 15 架。美国正在预研新

型的巡航速度为 2.4 倍音速的涡扇运输机,可使现在 10h 的飞行缩短到约 4h,并有望在 2020 年前后投入运营。同时国外还在探索高超音速飞行。

(2) 支线飞机。支线飞机一般指 100 座以下的民航班机。2000 年全世界拥有支线飞机约 5300 架,预计未来 20 年世界还需要约 8000 架。

现在的支线飞机主要有涡桨、涡扇两种机型。1980 年以前,投入航线的主要是涡桨飞机,当前的代表机种有 ATR72、DHC8 等。从 1996 年开始,涡扇飞机的需求迅速增长,涡桨飞机需求下降,2001 年涡扇型的交付量已占整个支线飞机交付量的 80%,预计未来 10 年涡扇支线飞机的交付比例将保持在 80%左右。

新型涡扇支线飞机具有大型飞机的舒适性、安全性,飞机寿命超过 4 万个起落、5 万个飞行小时,具有多种航程、各种座级的系列化机型,现在世界 30 座以上新支线飞机的发展集中在涡扇机型。

30~50 座级涡扇支线飞机已进入市场的机型主要有加拿大的 CRJ200 和巴西的 ERJ135/140/145。70~100 座级新型涡扇支线飞机多数处在研制阶段或刚进入市场,如加拿大的 CRJ700/900 和巴西的 ERJ170/175/190/195。

## 2. 通用飞机

通用飞机指商用航班飞机之外的民用飞机,以小型飞机为主,其在民用飞机中机种最多、数量最大,主要用于农林业、救护、勘探、私人飞机和其他用途。目前全世界有通用飞机(不含直升机)约 30 万架,其中美国有约 21 万架。

目前,活塞式、涡桨式和涡扇式通用飞机并存。涡扇型主要用于公务飞行,在通用飞机在价格最贵,已生产的机型有近 30 种,在研机型近 10 种。在未来的 10 年,全球将交付约 8000 架涡扇公务机。公务机也有涡桨式,但涡扇型已占主流。

其他通用飞机分为三个层次:第一层为中小型涡桨飞机,主要用于通用航空公司和大型飞机学校。第二层为轻小型飞机,约占通用飞机总数的 50%,多为私人拥有。第三层是超轻型飞机,以活塞发动机为主,价格便宜。

通用飞机的发展方向是降低采购和使用成本,提高安全性,减少噪声和排污。美国于 1994 年颁布了《通用航空振兴法案》(GARA);美国国家航空航天局也推出了“通用航空推进装置计划”(GAP),目的是研制更廉价、更轻、高效的发动机;还推动了“小飞机运输系统计划”(SATS),目标是在未来 10 年内让小飞机实现以 4 倍于高速公路的速度到达全美 25%的城镇、乡村和偏远地区,在 25 年内到达 90%。

## 3. 直升机

全世界共有民用直升机 22290 架,平均每百万人拥有直升机 3.9 架。预计未来 10 年世界将交付 9000 多架民用直升机。

直升机发展的关键是旋翼、发动机、传动机、传动系统、飞控系统和复合材料等。旋翼

桨叶经历了木质、金属、复合材料桨叶的发展过程，以改善气动、使用和维护性能，桨叶的寿命从几百小时发展到无限寿命。桨毂用弹性铰或其他柔性元件取代了金属轴承，近期还出现了全复合材料的无轴承旋翼，具有简化、长寿、免维护的优点。

新型的直升机发展趋势是，机体结构大面积采用复合材料，装备先进的涡轴发动机，彩高度综合的航电系统，采用复杂的优化翼型、无轴承或弹性铰式桨毂。最大平飞速度约300km/h，噪声水平接近 80Db。

人们一直在探索研制新概念机。美国目前正在研制中的倾转旋翼机（图 2），兼具直升机垂直起降和固定翼飞机升限高、速度快、航程远、有效载荷大的优点（表 1），可能成为未来的重要交通工具。



表 1 倾转旋翼机、直升机和涡桨飞机主要性能对比

比较机型	起飞方式	起飞重量/kg	速度/(km/h)	升限/m	航程/km
倾转旋翼机 V22	垂直	24947	638	7925	3336
直升机 CH47	垂直	24494	298	3095	1042
涡桨飞机 Q8-400	滑跑	28600	648	7620	2400

## 二、 民用飞机和直升机的技术发展

### 1. 空气动力技术

先进的气动技术能够提高飞机的升力、降低阻力，达到省油和降低排放的目的。现在大中型飞机广泛使用超临界机翼，人们正在加强层流技术和翼身融合体的研究，致力于转捩和湍流结构、三维分离和再附着、旋涡等方面的研究，以便提高飞机的气动效率。预计未来 20 年，亚音速飞机的升阻比将从现在的 20 提高到 40 左右。

### 2. 发动机技术

发动机技术的主要发展方向是提高推重比、降低油耗、减少污染，实现途径主要是提高涵道比、压缩比、涡轮前温度等。过去的 40 年里，发动机的耗油率降低了 40%，预计未来 20 年，有望再降低 30%~40%，推重比从 10 提高到 15~20。同时适应 6~25 倍音速飞行的超燃冲压发动机和适应从起飞到超音速飞行的脉冲爆震波发动机等新概念发动机的研究也在

进行。

### 3. 航空控制技术

现在飞机主要采用机械和电传操纵控制技术。电传操纵应用范围将进一步扩大,以提高飞机的操纵性、改善飞机的舒适性、进一步放宽安定度、逐步淘汰机械液压操纵。发展方向是光传操纵,提高抗干扰能力,改善飞行品质,降低飞机员的操纵疲劳及飞机的事故率。

### 4. 新材料

机体材料主要包括铝合金、钛合金和复合材料,发展重点是研究和扩大复合材料的使用。复合材料比同等强度的铝部件减重 25%,其在直升机的用量已达 80%以上,在空中客车公司 A380 飞机中的用量达到 25%。发动机材料主要是高温合金钢占 2/3,钛合金和其他材料占 1/3。人们正在研制热塑性复合材料、陶瓷基复合材料等。智能材料和智能结构将进一步实现自检测、自适应。预计在未来的 20 年中,新材料的应用将使飞机总重量减轻 20%。

### 5. 旋翼与抗坠毁技术

直升机旋翼主要是提高气动效率和使用寿命。通过研究高性能专用翼型和特型桨尖,优化桨叶形状,预计未来 20 年,旋翼气动效率将提高约 5%。通过使用复合材料,旋翼寿命已做到无限。抗坠毁技术可提高直升机坠毁时机上人员的生存概率,新型直升机乘员的抗坠毁生存概率已能做到大于 85%。

### 6. 空中交通管制技术

空中航路变得日益拥挤,基于卫星通信导航技术的新一代空中导航技术,允许飞行员按照自己选择的航线而不是指定的航线进行自由飞行,从而达到省时、省油 and 解决航线拥挤的目的。在未来的 20 年中,该技术会逐渐成熟,并得到广泛应用。改善空中交通管理系统,将能使目前国际航班机队每次飞行的油耗和二氧化碳排放减少 6%~12%。

### 7. 环保新技术

飞机对环境的影响主要是噪声和污染物排放。发航飞机的噪声在过去 30 年降低了 20dB。目前正在研发的技术在未来 20 年内将使飞机噪声进一步降低 20dB。飞机排放的主要污染物是二氧化碳、一氧化碳、氮氧化物及碳氢化合物,可导致温室效应。NASA 计划到 2025 年,把氮氧化物的排放量减少到现在的 1/5、二氧化碳减少 50%。

### 8. 新燃料

为解决能源短缺和环境污染,国外从 20 世纪 50 年代就开始研究各种航空替代燃料,目



前看好的主要有液氢和液态天然气。液氢来源多，燃烧时不产生碳氧化合物，产生的氮氧化合物也只有煤油燃烧时的 1/3，等热值含量是煤油的 2.78 倍。但液氢沸点低、密度小、易爆、单位体积热值仅有煤油的 23% 等工程应用难题还需要研究克服，目前还没有成熟的航空煤油替代方案。

## 9. 虚拟现实技术

在飞机研制中，虚拟现实技术可为设计者和用户提供先期演示验证，可对设计方案、技术性能和布局进行合理性检验，提高设计质量、缩短研制周期。未来 25 年中，研制周期可望缩短 50%。在训练上，利用虚拟现实技术所提供的逼真环境，在保证训练质量的前提下减少实际飞行时间，降低训练费用。

# 三、中国民用飞机和直升机的现状与发展

## 1. 航班飞机和通用飞机的现状及发展

### (1) 现状。

我国航空工业始建于 1951 年，先后研制的民用飞机主要有农-5、运-5、运-7、运-8、运-10、运-11、运-12 等系列（表 2），合作生产了 MD82/83/90-30 飞机。现在生产的机型为农-5、运-5、运-7、运-8、运-12 等系列飞机。

机型	最大起飞重 /kg	最大商载 /kg	速度 / ( km/h )	使用升限 /m	航程 /km	续航时间 /(h : min)
农-5	2450	960	220	4280	282	5 : 45
运-5	5250	1500	239	4500	845	5 : 36
运-7	21800	4700	503	8750	1983	4 : 30
运-8	61000	20000	662	10400	5615	10 : 30
运-10	110000	25000	974	12000	6400	8 : 30
运-12	5670	1984	328	7000	1340	5 : 20
MD82	67810	19969	925		3798	

我国干线飞机曾自行研制过 150 座级四发涡扇旅客运输机—运-10。1980 年首飞成功，共飞行了 130 个起落，170 个飞行小时，后停止研制，未能设计定型和投入航线使用。此外，还与麦道公司合作生产过 37 架、150 座 MD82/83/90-30 涡扇飞机，1999 年停产。涡扇支线飞机研制发展刚刚起步。

我国现在生产的机型均为涡桨飞机。运-12 是多用途飞机，旅客运输型可载客 19 人，是唯一取得英国、美国型号合格证的国产飞机，已销售 120 多架，其中出口到 20 多个国家 94 架。运-8 是我国现在生产的最大的运输机，装四台发动机，最大商载 20t，已交付 80 多架。运-7 是双发多用途飞机，客机可载客 50~60 名，已交付 200 多架。运-5 是单发螺桨通用飞机，可乘 12 名乘客，已生产 1000 多架。

我国现有航班飞机 665 架，其中 100 座以上的飞机有 579 架，100 座以下的有 87 架；现在通用飞机 387 架（不含直升机）。预计未来 20 年我国需要航班飞机约 1700 架，其中支线飞机约 600 架。

## （2） 发展

### 1) 改进改型现有飞机。

改进改型是飞机发展的一个特点，以适应不同用途、地区特点，不断提高技术水平。其中：

运-12 飞机已有系列改进改型机型。高原型运 12E 已于 2001 年取得中国民航适航证，更换了发动机、新型螺旋桨和先进电子设备，机体寿命延长 1.6 万 h，单发升限从 3000m 提高到 4200m。运-12F 型正在研制，重新设计机身，更改机翼、尾翼等，商载提高 500kg。

运-8 飞机最新完成的改进改型是运-8F400，驾驶体制由 5 人改为 3 人，重新设计了机头和驾驶舱，安装了先进的航电设备等，已于 2002 年取证。高原型运-8F600 正在研制中，驾驶体制改为 2 人，更换发动机、螺旋桨，机体寿命延长 10000h，货舱容积从 137m 扩大到 170m。运-8F800 正在论证，其最大商载从 20t 提高到 30t，航程增加到 7800km。

### 2) 研制发展涡扇支线飞机。

合资生产 30~50ERJ145 系列飞机（图 3）和自主研发 70~90 座级 ARJ21 飞机，两个项目已经启动。



合资生产的 ERJ145 系列飞机，包括 ERJ145（50 座）、ERJ140（44 座）、ERJ135（37 座）多种型号和改型，系统及部件通用性达 98%。ERJ145 飞机升限 11278m，巡航速度 833km/h，航程基本型约 2000km，延程型近 4000km，基本覆盖国内所有航线。计划于 2003 年开始向用户交付飞机。

自主研发的 ARJ21 基本型为 72 座，航程 1200km，巡航速度 833km/h，巡航高度 10668m，计划 2007 年 6 月取得型号适航证，其中发动机和机载设备进口，有系列机型发展计划。

### 3) 发展大型运输机

重点研究商载 40~50t、航程 5000km 的大型运输机。我国已经基本具备研制该吨级飞机的能力。大型运输机应走军民结合、军机优先、以军促民、国家投资，自主发展和国际合作相结合的道路，希望能列入第十一个五年计划。

## 2. 中国直升机的现状和发展

### (1) 现状。

1956 年我国开始建立自己的直升机工业，研制了直-5、直-6、直-7、直-8、直-9、直-11 直升机，国际合作研制了 EC120 直升机，参与了西科斯基公司 S92 直升机研制。现在生产的主要直升机为直-8、直-9、直-11、EC120（表 3）。

直-8 是 13t 级直升机，涡轴、三发、单旋翼带尾桨式，陆地水上都可起降。

表 3 国产直升机的主要性能

机型	最大起飞重量/kg	巡航速度/(km/h)	使用升限/m	航程/km	巡航时间(h : min)
直-8	13000	248	3050	800	4 : 06
直-9	3850	293	4500	910	4 : 24
直-11	2200	238	5240	600	3 : 42
EC120	1770	232	6035	748	4 : 12

直-9 是 4t 级直升机，涡轴、双发、涵道尾桨式，已生产近 100 架。直-11 是 2t 级直升机，涡轴、单发、单旋翼带尾桨式。EC120 是由中国、法国、新加坡联合投资研制，用户有 20 多个国家。

### (2) 发展。

#### 1) 改进生产现在机型。

直-11 正在研制半日发型改型，更换发动机等，以改善高温高原性能，使用升限从 5240m 提高到 6000m，无地效升限从 3000m 提高到 4484m。双发型正在论证。

直-9 已有系列机型，其中更换发动机改善高温高原性能的 H410A 在 2001 年完成取证，使海拔 4000m 无地效起飞重量提高 380kg。H425 正在研制，改进旋翼系统、航电系统、结构及内设，设计抗坠毁燃油系统，提高舒适性，商载提高 100kg。H450 正在论证。

直-8 正在研制新的改进型直-8F，主要是换装大功率发动机，研制具有防冰能力的复合材料桨叶以替换原金属桨叶等，使用升限从 3050m 提高到 4700m。

2) 研制发展 6t 级直升机：装两台涡轴发动机，采用综合航空电子系统，采用抗坠毁设计，坠毁时机上人员自下而上概率>85%，结构复合材料逐步达到 80%，覆盖面基本为复合材料。

3) 预研攻关 10t 级直升机：现在以技术预研攻关为主，开展以发动机、传动系统、旋翼、复合材料为核心的关键技术研究，重点突破 2400 马力涡轴发动机关键技术。

4) 前沿研究倾转旋翼机及其他概念机：倾转旋翼机兼具直升机垂直起落和固定翼飞机升限高、速度快、航程远的优点，是未来的重要运输工具，已建议列入“863”计划，同时探索与国外合作研制。

直升机总体目标是，经过 10~15 年的发展，形成 2t、4t、6t、10t、13t 级直升机系列，形成具有一定国际竞争力的直升机研制和生产能力，技术上以突破发动机、传动、旋翼、抗

坠毁、复合材料等关键技术为重点，整体技术达到或接近世界先进水平，成为国民经济的增长点 and 国防装备的可靠研制与生产基地。

民用飞机在各国政府的支持下，已经取得了惊人的成就。民机的发展必须纳入国家的发展战略，必须坚持“改进生产一代、研制发展一代、预研攻关一代”的发展思路，必须坚持自主开发和国际合作相结合、技术和贸易相结合、军用和民用相结合的道路。

## 参考文献

- [1] 张彦仲.中国直升机、运输机的未来发展.中国工程科学,2002.第4卷,第8期
- [2] 张彦仲.航空环境工程与科学.中国工作科学,2001,第3卷,第7期
- [3] AIRBUS Group. The Airbus Global Market Forecast,2002
- [4] Boeing Commercial Airplanes. Current Market Outlook,2002
- [5] Jane's Aero-Engines. Issue Ten,2001
- [6] Jane's All the World's Aircraft,2001-2002
- [7] Jane's Helicopter Markets and Systems. Issue Thirteen,2001
- [8] Zhang Yanzhong. The future special aircraft and its challenges on aeronautical technology. ICETS.Beijing,China,Volume1, Paper No.141-150, October 11,2000

# 大型飞机发展趋势与主要技术

陈一坚\*

(中国航空工业总公司 603 研究所)

航空产业(包括民用航空和军用航空)不仅是国家经济发展的支柱之一，也是保卫国家安全和主权的主要手段之一，所以世界各国都投入巨资大力发展，以壮大国力，航空产业具有多学科、多专业、知识密集的高技术特点，其难度大、综合性强，需要相关技术产业的支持，以及大量的试验验证和实践积累，因此投资强度大、研制周期长。半个多世纪以来，世界强国都不遗余力发展航空产业，不仅自身取得了瞩目的进步，同时也还动了相关产业的发展 and 进步。

## 一、 国内外发展形势

### 1. 民用航空飞机

民用航空飞机具有快速、安全、舒适、经济、多适用性的特点。民用航空飞机按用途可分为民用客机、民用货运机和通用飞机，而民用客机又有干线飞机(150座以上)和支线客

机（50~120 座级）之分。从技术上讲，它们没有本质的区别，大多能够通用。

大型客机一般为载客 150 人以上，航程超过 3000km 的客机。从 20 世纪 60 年代起，随着 150 座以上喷气客机的出现，航空运输在人类交通运输业中成为重要的交通工具。世界航空客运今后每 10 年将增长 1.6 万亿人公里，货运周转量平均年增长率将达到 5%~7%。到 2020 年，世界航空客运量估计将达到 6.4 万亿人公里。2001~2020 年，全世界航空公司大型喷气飞机总需求量将超过 1.8 万架，总价值将超过 1.4 万亿美元。我国是世界上民航运输增长最快的地区之一。1999 年全国民航年运输总周转量和旅客周转量已经上升为世界第 9 位和第 6 位。预计未来 20 年我国民航客运周转量年增长率为 8.3%，2020 年民用飞机机队总规模将达到 1852 架，需增加飞机 1325 架。加上退役飞机需要用更新飞机替换，共需补充民用飞机 1690 架（其中大型飞机 1119 架），价值约 2000 亿美元。

美国、欧洲等紧紧抓住大型民用飞机，作为其占有世界航空市场份额的重要手段。2000 年，美国波音公司大型飞机的年销售额达 311 亿美元，欧洲空中客车公司销售额达 172 亿美元，最近空客公司销售量已赶上波音公司。当今大型民用机市场几乎被美国波音公司和欧洲空中客车公司所垄断，诸如波音公司的 B-747、B-777 等，空中客车公司的 A-300、A340 等，超音速客机则有法国的“协和”号。

我国航空产业从无到有，从仿制到自行设计，50 多年来走过了艰难而曲折的道路。但是，大型军、民用飞机的现状与国外发达国家相比还相当落后，与国家经济发展和国防安全的需要相比也很大适应。民用飞机除运-7、运-12、运-8 为国产外，大型飞机几乎全部依靠进口。

## 2. 大型军用运输机

大型军用运输机载重能力一般为 40~50t，能载百名以上全副武装士兵或相应的各种装备，航程达 4000km 以上。

在近 20 年的历次高技术局部战争中，大型军用飞机都发挥了巨大的作用。它们快速、机动和大纵深的作战能力，直接提高了整个战争的大机动和快速反应能力，加速了战争进程，增强了持续作战能力。快速空运和大范围精确打击是高技术局部战争的的决定性因素。美国在海湾战争期间，出动大型运输机及大型特种飞机共 1135 架次，几乎与出动的歼击机、攻击机和轰炸机共 1193 架次的数量相近。“911”事件后的阿富汗战争中，美国动用大型运输机共 140 架次。

大型军用运输机，美国的代表型号有 C-130、C-17、C-5 等，俄罗斯的代表型号有伊尔-76、伊尔-96 等。战略轰炸机，美国的代表型号有 B-52、B-1、B-2，俄罗斯早期的代表型号有图-22、图-160 等。我国目前没有大型运输机，预计需要装备 200~300 架大型军用运输机。

大型军用、民用飞机的发展趋势是：大型化，载客量超过 500 座，货运量超过 50t；航程一般达 1 万 km；高升阻比（预计 10~15）；低油耗、低噪声、低污染、经济性好。美国的

代表型号有正在研制的波音 747X 和正在开发初期的“音速巡航者”，空中客车公司则以 A-380 为代表。战略轰炸机朝着高超音速（马赫数为 10~15）、隐身、精确制导和洲际打击方向发展，值得引起注意。

从现在起，如果再不抓住发展机遇，抓紧大型飞机研制，我国将摆脱不了引进外国大型飞机的局面。从经济角度看，将损失巨大的时常；从国家安全角度考虑，将受制于人。一旦政治形式突变，军、民用航空飞机都将瘫痪，后果不堪设想。

## 二、大型飞机的主要技术

大型军、民用飞机和中小型军、民用飞机，技术上是相通的，基本上可以通用。除军用飞机有其特殊的技术要求外，一般包括 11 个方面的主要技术。

### 1. 总体布局技术研究

新一代大型飞机目标决策和指标体系优化技术。

三翼面布局研究：非主动控制常规总体布局、主动控制技术的总体布局、先进气动技术（如超临界机翼、层流控制技术、翼梢装置、发散后缘等）总体布局、高升力系统综合研究。

机体/飞控/动力装置综合优化设计研究：机翼与机身一体化构型、机体与发动机一体化构型、机身尾段与尾翼一体化构型、多点式及多轮式起落架布置、飞机构型与维护/服务的一体化设计。

宽体机身布局研究：具有覆盖远航程和短航程的能力系统化发展；机身横剖面形式；客舱内部布置，包括单、双层客舱，头等舱、公务舱、经济舱的设置；舱内布置如何快速响应航空公司经营策略变化；宽体机身布局与地面服务设备设施关系等。

超音速技术基础研究：超音速运输机总体布局及机场适应性。

### 2. 先进气动力设计技术研究

减阻技术研究：超临界机翼设计，层流机翼设计技术，发散后缘技术，先进翼梢设计技术，一体化/融合体技术，采用涡流片技术提高增升装置效率，变弯度机翼，动力效应模拟和滑、喷流影响研究等。

高效增升装置研究：完善二元多段翼型分析和优化设计技术、三元多段机翼分析和优化设计技术、动力增升技术，高升力装置风洞试验技术的应用，以及开展增升装置噪声分析及其抑制手段。

近地面空气动力特性研究：近地面飞行空气动力特性、操纵性及稳定性，超低空技术。

超音速技术基础研究：超音速运输机的多目标气动优化设计技术、气动弹性设计技术、进场噪声分析和降噪技术。

### 3. 长寿命结构设计技术研究

新型高性能结构及相关技术、工艺研究：宽机身大开口优化设计技术，整体油箱先进技

术, 先进货运系统技术, 先进动力短舱/反推力装置结构及相关工艺, 先进大型起落架结构及相关工艺, 大型整体壁板先进加工工艺, 新型加劲结构及相关工艺(含金属结构和复合材料结构), 新型夹芯结构及相关工艺, 新型叠层结构及相关工艺等。

复合材料主结构应用技术研究: 先进的载荷预测技术, 先进结构分析/优化设计技术, 结构耐久性及损伤容限设计与评定技术, 结构抗腐蚀先进设计技术, 先进减振降噪技术。

#### **4. 系统综合技术研究**

主动控制技术研究放宽静安定性技术, 载荷减缓控制技术, 利用变稳飞机进行空中飞行试验, 利用工程模拟器进行飞行品质研究等。此外, 还包括系统重构技术、抗雷击技术、系统局部光传操纵等技术。

#### **5. 材料选用**

为提高飞机的结构效率, 减轻重量, 便于按损伤容限准则进行设计, 实现对飞机的长寿命要求, 民用客机结构设计所用之材料应比较成熟, 总体水平高, 技术数据齐全。

#### **6. 起落架系统研究**

非对称载荷会带来结构动力学上的一些问题, 如起落架着陆、刹车、滑行时的不对称载荷等。因此, 应对起落架进行系统研究, 包括悬持结构必须承受起落架的巨大载荷的研究, 起落架载荷分配设计多个起落架缓冲刚度的匹配研究, 地面运动的协调性和转弯操纵研究等。

#### **7. 客舱的舒适性设计**

舒适性是民用客机重要的技术指标之一。在机舱内饰方面, 要为乘客营造一个优雅、舒适的客舱生活环境, 而且所采用的美学观点、艺术格调以及所体现的文化品位应得到国内外大多数乘客的认可, 还要进行隔噪声、降噪声等设计。

#### **8. 试验条件与能力**

必须具备风洞试验、结构强度试验、系统试验方面的条件和能力。

#### **9. 制造条件**

由于大型客机尺寸大, 飞机的部件和零件尺寸也大, 由此而导致了一系列特殊要求, 如大尺寸的原材料如毛坯供应, 大型加工设备和大型数控加工设备, 大尺寸热处理设备, 大尺寸、复杂曲面蒙皮成型设备, 大尺寸复合材料构件的制造设备, 大型检测设备, 大型厂房等。

#### **10. 适航性研究**

通过适航审查后投入营运, 这是民用客机区别于其他类型飞机的显著特征。对民用客机

来讲，安全性是头等大事，而适航规章则是满足安全性要求的最低标准。适航要求客机研制的全过程始终处于受控状态，其设计、试验和生产等研制环节都必须严格按程序进行。

## 11、非常规布局大型飞机总体技术

大型民用飞机的客座数超过 700 座，将进入特大型飞机的范畴。目前在研制方面存在的问题有：

由于现有机场限制，飞机尺寸一般限制在  $80\text{m} \times 80\text{m}$  之内，由此带来飞机难以获得最佳气动性能的问题。飞机尾流将导致机场方面不得不对特大型飞机进行严格的限制，这将使特大型飞机丧失潜在的优势，而且通过气动设计减小尾流的潜力也有限。

噪声问题：大尺寸、大重量势必增加噪声。特大型飞机满足第三阶段噪声要求尚有可能，但如果适航强制执行第四阶段噪声要求，噪声将成为一大难题。此外，起落架和襟翼放下后引起进场噪声增大，减小进场速度对噪声有利，但增加了气动设计难度。

布局问题：鸭翼气动布局、飞翼气动布局、复合式翼气动布局、倾转翼总体布局及其相关的专门问题。

总之，我国航空产业半个世纪以来发展是迅速的，但与世界先进水平相比，尚有不小的差距，尤其是大型军、民用飞机的研制水平。为了迎头赶上航空强国，我们应该在主要技术的研究方面下大功夫，花大气力，以便在将来大型飞机研制中缩短差距，为民族复兴大业增添光彩。

## 致谢

此篇文章得到黄其青教授、陈俊章总工程师、刘积仓副总工程师和李丽同志协助，一并到致谢。