



# 我国大型飞机研制中的关键制造技术

Key Manufacturing Technologies of Large Aircraft Development in China

西北工业大学 姜澄宇 王俊彪



姜澄宇

西北工业大学校长, 博士生导师, 中国航空学会副理事长, 中国宇航学会常务理事, 中国机械工程学会理事, 中国航空工业集团科技委委员。曾主持多项国家、国防和“863”领域的科研项目, 获国家科技进步二等奖 1 项、光华科技基金二等奖 1 项、省部级科技进步一等奖 1 项、二等奖 5 项、三等奖 4 项。在国内外刊物上发表学术论文 100 余篇。

28 航空制造技术 • 2009 年第 1 期

对大型飞机研制基本技术特征、发展趋势以及我国目前的航空工业基础进行综合分析, 提出了我国现阶段实施大型飞机研制应着重攻关研究或通过需求牵引发展的关键制造技术问题, 并提出了建议方案。

大型飞机指起飞吨位 100t 以上、商载航程 5000km 以上的航空器, 是大宗远程高效客货运输、战略投送的重要工具。大型飞机已列为我国 2006 ~ 2020 年国家中长期科学和技术发展规划的重大专项, 对于保障我国的国家安全、增强综合国力具有重大战略意义。大型飞机研制在欧美俄等发达国家已有近半个世纪的历史, 对于我国的大飞机工程, 国外有可借鉴的经验。但由于大飞机工程在经济和军事上的战略意义, 我国的大型飞机研制必须是一项立足当前国内国际技术条件、不断融合新技术的独立自主的国家战略创新工程。

大型飞机研制涉及国家工业体系的多个方面, 确定其关键制造技术需要从研制大型飞机必须解决的基本技术问题、发展趋势、国家现有航空工业基础等几个方面进行综合决策。本文对大型飞机研制基本技术特征、发展趋势以及我国目前的航空工业基础进行综合分析, 提出了我国现阶段实施大型飞机研制应着重攻关研究或通过需求牵引发展的关键制造技术问题, 并提出了建议方案。

## 大型飞机基本技术特征及其发展趋势

大型飞机的各个系统并非小型

飞机系统的简单放大,这使得在中小型飞机研制中取得的经验不能直接转移到大型飞机上。尺寸、巡航速度、航载、可靠性等一些基本指标的变化,使大型飞机相对于中小型飞机在动力、机体结构、材料等方面表现出显著不同的技术特征,这些技术特征导致了大型飞机在制造技术上的难题。综合起来,大型飞机的基本技术特征表现在结构、材料、动力、研制模式等几个方面。

### 1 结构

大型飞机与中小型飞机在结构上有很多地方存在严重差别。对于低速度小型飞机一般可按照刚性原则设计制造,但对于临界音速飞行的大型飞机则必须采用柔性设计原则并最大限度提高结构效率才能实现大型飞机的安全可靠性和经济性。由此决定了大型飞机在设计制造上必须采用大型的整体化、轻量化、模块化结构并尽量采用轻质高强度材料,如大型整体壁板、多轮多支柱起落架、整体壁板框肋等。由于空间尺寸大幅增加,重量和柔性增加,精度和可靠性要求很高,部件装配连接也成为大型飞机研制的一个关键问题。

结构的整体化与轻量化是大型飞机的发展趋势。欧盟实施TANGO计划对大型整体结构技术进行研究,希望通过采用新的材料、设计方法和制造工艺,减轻机体结构重量,提高结构效率。在机身对接框、梁等大型结构件上发展了大型整体锻件或挤压件。波音公司在787上发展了复合材料机翼,其中包括复合材料整体壁板。我国在军民用飞机,特别是新支线客机上也已开始研究采用大型整体结构,如大型整体壁板、大型整体机身对接框等,并在关键技术上取得突破性进展,相关技术与经验可作为大型飞机大型结构件研制的借鉴。

### 2 材料

材料性能的不不断提升是大型飞

机发展的基础,有“一代材料技术,一代大型飞机”之论。大型飞机对材料的要求主要源于机体主承力结构、非主承力机构和高温动力机构等3方面的需求。主承力机构(如梁、机身、机翼、起落架等)一般要求材料有高的强重比、耐腐蚀性和抗疲劳性能;非主承力机构则要求材料有高的强重比和安全性;动力机构则要求材料强度高、耐高温、抗蠕变,以适应长时间高温高负荷工作。

大型飞机的发展必须不断地引入和采用先进材料。欧美新研制的A380、B787等机型取得重大进步的关键因素是大量新材料的应用。空客在A380的中央翼盒、机身壁板等大型承力结构件上大量采用复合材料,关键连接件则采用高强度强韧性新型钛合金材料。波音B787则将复合材料用量提高到50%,其复合材料机身、机翼使B787创造了飞机结构复合材料史上的新里程碑。除新机型飞机,波音和空客在其老机型的后继机上也不断引入新材料以达到不断减重、提高经济竞争力的目标。

我国材料行业多年来在航空航天产业发展的带动下,研制开发的材料种类和牌号比较齐全,但在材料的

性能、质量和供货能力上往往不能满足航空产业的需求。

### 3 动力

发动机的安全性和经济性是影响我国未来大型飞机能否赢得世界航空市场的决定性因素之一。大型飞机的发动机为了在获得大推动力的同时具有较高的经济性,一般采用较高的涵道比、总增压比和涡轮前温度,这是目前高涵道比涡扇发动机的基本技术特征。此特征使得大型飞机发动机的前级风扇叶片尺寸较大,低压涡轮级数较多。

为了提高大型涡扇发动机推重比、降低燃油耗率并降低燃气排放量和发动机噪音,欧美推行了多项发动机研究计划,如欧盟的高效环保发动机计划(EEFAE)、低排放发动机计划(ANTLE),美国NASA的超高效发动机技术(UETT)和零二氧化碳研究计划(ZCRP)。这些研究计划体现了现代大型飞机发动机要求不断降低油耗率、减少废气排放、降低噪音、提高可靠性的发展趋势。在制造技术上,则要求能够实现新型发动机所提出的先进燃烧室、先进气动风扇叶片、高品质低压涡轮、高效发动机结构的制造。欧美在推重比15~



20 高性能发动机上,压气机采用整体叶环并采用复合材料来提高发动机结构的效率,采用线性摩擦焊技术将叶片固定在承力轴上以大幅度减轻结构重量。

我国在大涵道比涡扇发动机方面缺乏技术储备,虽然结合太行发动机核心机在风扇/增压级、高压压气机等方面有初步研究,但大量关键技术尚待突破和掌握,在材料、工艺、试验设备、高水平人才等方面尚不能满足先进大型飞机发动机研制的需要。

#### 4 研制模式

大型飞机研制是一项涉及现代

精确制造依据,使波音公司在 B777 的研制中取得研制周期缩短 40%、工程返工率降低 50%、设计更改减少 93% 等重大效益,并提前投入市场。在波音公司的 B787、洛克希德·马丁公司的 F35 以及空中客车公司的 A380 等新型号飞机的研制模式上则体现了以数字样机技术和并行技术为基础的最优能力模式。这些飞机的研制均采取了不同国家、不同地区的最优能力进行组合的并行研制模式,并取得了巨大成功。

由于大型飞机多学科庞大的研制任务,我国的大型飞机项目也势必



工业体系众多领域的大系统工程,需要综合国内甚至国际航空工业体系的整体力量付诸实施完成。这是大型飞机在研制模式上区别于中小型飞机的显著特征,也是发展的趋势。

研制模式直接影响飞机研制的效率、成本、风险和整机性能。大型飞机在研制模式上大致经历了 4 个历史阶段:物理样机阶段、数字样机阶段、并行设计阶段、最优能力阶段。波音公司在 B777 飞机研制中首倡全机数字样机技术,并初步实践了并行研制技术,使物理样机投产之前对全机进行检验成为可能,并提供唯一的

采取多厂所、多部门甚至国际化的最优能力研制模式,以发挥我国当前工业体系的整体优势,研制出具有国际竞争力的大型飞机。我国从运 10、新舟 60、ARJ21 等型号研制中的经验,以及在计算机、信息、网络、数据库、数控等技术方面的产业化发展成果,为实施大型飞机的最优能力研制模式奠定了基础。

#### 我国的航空工业基础

我国自建国以来建立起了独立自主的完整航空工业体系,能够研制和生产运输机、战斗机、直升机等各

种类型的飞机。但在航空制造技术领域,跟踪性研究偏多,自主创新研究和原创性成果偏少。在科学研究和技术发展方面,理论与实际、科学与工程的关系不紧密;研究中软的多、硬的少。试验研究少、水平低,设计必需的工程基础数据和制造必需的基础工艺试验数据严重缺乏、可信度低。虽然在设计制造领域的某些理论方法研究方面取得了一些国际先进或领先水平的成果,但在航空复杂产品设计技术和平台开发、制造工艺及装备研发、制造系统技术以及现代大型制造企业管理的应用基础研究等方面存在相当大的差距。在数字化技术体系方面,我国厂所分离的技术体系下,数字样机中并未包含制造所需的全部数据集;和面向产业链协同的数据集成与服务能力不强;工艺过程中依赖于经验及试错的加工方式,而作为工艺和工装定义支撑的制造过程中各类知识,特别是生产现场的试验数据,缺乏积累和重用;复杂零件制造工艺过程不稳定,对新机型复杂零件制造需要相对较长时间的试验和探索;对于企业制造核心知识的异质分散管理,缺乏集中管理手段,企业技术易随着新老交替和人员流动而流失。

迄今为止,我国仍没有支撑航空宇航先进制造技术自主创新和跨越发展的国家重点实验室,尚未形成适应航空宇航制造工程学科发展的完整体系,不能很好地满足国家建设和参与国际竞争的需要。对于材料制备、加工成形等大量高新核心技术我国尚未掌握,许多重大装备不能自主制造,缺乏自主创新能力。

目前,我国已定型生产的航空材料(含类别、牌号、品种与规格)及其相应的标准与规范,基本上能满足国内军用飞机研制的需要。针对大型客机所需的关键材料,如高强度铝合金、钛合金、树脂基复合材料、GLARE 层板等,从技术上看,已具

备试用条件,但要转化为在特定工况下使用的零部件,并体现出大型客机的总体效能尚需做大量工作。尤其由于我国航空工业一直以军机为主,国内的材料体系和制造工艺绝大多数没有取得适航认证,这将极大制约我国大型客机的研制。正因如此,在ARJ21飞机的研制中,大量的采用了国外的材料、标准件和工艺标准。

针对大型客机所需的关键制造技术,例如大型整体壁板成形技术、大型轻合金结构的先进焊接技术、低成本复合材料制造技术等,国内已经开展了多年的研究,某些技术已经在军机上试用,在转包生产中,也在某些国外零部件生产方面取得过国外飞机制造商及适航部门的认可,但是,要满足大型客机研制的需要,必须尽快开展适航认证工作。

## 大型飞机研制关键制造技术

大型飞机工程对我国的航空工业体系是一次整体带动和升级,制定正确的产业带动和产业升级战略决策是确保大型飞机工程成功的关键。在航空制造领域,本文认为产业层面的问题需要制定合适的政策对其进行引导升级,以满足大型飞机研制的需要;对于一些重大技术问题,则应由行业主管部门确认并成立专项课题进行关键技术攻关。根据目前我国航空制造业的基础和大型飞机发展趋势,笔者认为我国在大型飞机研制过程中,大型结构件制造技术、数字化柔性装配技术和数字化应用技术等需要作为关键技术专门组织力量进行攻关研究。

### 1 大型结构件制造技术

大型结构件,如大型机翼整体壁板、大型复合材料结构件、大型整体框与结构等,是大型飞机的主要承力件,关系到大型飞机的结构强度、安全可靠性和经济性,是大型飞机的关键。但飞机大型结构件的制造一般涉及大型设备和特种工艺,研究成本

极为高昂且专业性强,故该类技术需要行业部门进行专项研究突破。目前已有研究基础但需进一步开展研究的有:大型机翼整体壁板成形技术、大型复材结构件成型技术、大型整体框锻造与轻合金结构件铸造技术以及大型结构件制造寿命预测技术等。在航空产业体系布局中,应加强大型结构件专业化生产的导向。

### 2 数字化柔性装配技术

大型飞机装配由于部件尺寸大、装配精度高、各部件尺寸需要协调而成为一个特殊的关键问题。大型飞机装配需要大型工艺装备和高精度复杂系统定位设备,并且根据大型飞机产业化发展,需要构造数字化装配线,解决批量装配问题。需要解决的关键技术包括大型飞机数字化装配线及其模式、壁板件柔性装配系统、大型壁板自动钻铆系统、大部件对接系统、大型飞机部件精准对接系统、大型飞机部件的转运与装配、飞机装配工装快速设计、电磁铆接等新型连接工艺等。

### 3 大型飞机研制数字化应用技术

大型飞机制造过程中,产品配套关系复杂,大量复杂零件需要协调。以现代计算机技术为基础的数字化技术是解决该问题的关键。利用数字化技术建立数字样机中心,实现飞机设计和工作流程控制、信息传递与共享,通过虚拟装配与协调,解决工程数据发放前的不协调以及干涉问题,建立基于产品链协同的信息共享体系,实现设计部门、各类制造企业间信息的标准规范和惟一性是实现大型飞机快速、高效研制的关键。需要研究解决的技术问题包括建立数据中心、数字样机中心、知识中心,建立以数字量为依据的集成研制体系、基于产品链协同的信息共享体系、异地数据包传递与控制体系等。

## 三点建议

根据大型飞机的目标需求及阶

段发展要求,结合我国已有的航空工业基础,在制定和确认我国大型飞机研制关键技术、实施大型飞机工程对我国航空产业的带动战略方面,本文提出以下3点建议:

#### (1)凝练重大关键制造技术谱。

根据大型飞机性能指标要求,分析国际上大型飞机研制的经验,在新的起点上凝练我国发展大型飞机的重大关键制造技术谱。如大型机翼整体壁板成形技术、复合材料制造工艺技术、大型结构件加工技术、数字化装配技术、大型零件数字化检测方法、大型工艺装备、大型飞机制造工艺规范、新材料制备及其应用、飞机适航技术等。

#### (2)梳理现有制造技术成果。

理清我国可用于大型飞机制造的基础和实力;分析在新舟60和ARJ21等民机研制中已积累的制造技术,针对大飞机的需求和目标,开展适应性研究;结合大型客机的要求,开展关键制造工艺的工程化、适航性研究。

#### (3)加强产学研合作。

发挥各方优势,组建大型飞机关键制造技术联合研究与攻关团队;积极开展国际合作;探索新的产学研合作与国际合作模式;组织多层次的人才培养。

## 结束语

我国制定现阶段大型飞机研制的关键制造技术应适应于我国现阶段的航空工业基础,采用大幅度超越我国航空工业基础的技术则必将使我国的大型飞机产业陷入受制于人的局面。制定合适的大型飞机研制关键制造技术并合理促进其发展,既能保证我国大型飞机研制在我国航空工业的基础上实现自主创新,又能牵引我国航空工业的整体进步,促进我国大型飞机技术水平的不断提升。

(责编 依然)