

大飞机总体综合设计技术

General Synthetical Design Technology for Large Commercial Jet

北京航空航天大学 黄俊



黄俊

北京航空航天大学教授、博士生导师。1986 ~ 2000 年,在 011 基地飞机所从事高教机设计工作,2000 年获博士学位,2002 年博士后出站留北航任教,现任飞机系书记兼副主任、航空创新实践基地主任,先后主持各类科研课题 20 余项,发表论文 50 多篇。主要研究方向为飞机总体设计、作战效能分析、隐身技术。

2007 年 3 月,我国大飞机项目正式立项,标志着我国航空事业进入了一个新的发展时期。大飞机现在还没有统一的定义,一般理解应该是起飞总重在 70t 以上的运输类飞机。我国大飞机项目研制内容包括大型客机和专用大型运输机及其配套发

飞机总体设计阶段要做出对新机研制工作具有全局性影响的大部分重大决策,总体设计工作的失误会造成时间和经费上的浪费,甚至直接影响新机研制工作的成败,因此飞机总体设计是飞机研制工作中最为重要的一个阶段。

动机。

自从 1919 年民用航空诞生以来,客机发展成干线和支线 2 大类,一般把 100 座以上、航程在 3000km 以上的飞机叫做干线客机,100 座以下的为支线客机,如我国已成功首飞的 ARJ21 就是典型的支线客机。大飞机项目中的大型客机定位在 150 座级、航程 5000km 以上,为较大的干线客机。严格地讲,客机也是运输机,那些只用来运送货物的飞机叫做专用运输机,有军用和民用之分。军用战略运输机有效载荷 40t 以上,主要承担洲际运输任务;战术运输机载重量 20t 左右。民用货运飞机一般由同型号客机改装而成。我国大飞机项目中的大运定位为有效载荷 30t 以上,具备洲际运输能力。

客机和货运飞机在气动布局、结构、系统,甚至动力装置方面有较大

差异,其关键技术也不完全相同,但总体综合设计技术都是它们能否成功的关键,本文将重点讨论大飞机总体综合设计中的关键技术问题,并提出我国今后一段时期内在本领域的发展提出建议。

飞机总体设计

飞机设计是一门高度综合各种先进科学技术的系统工程,可分为概念设计、初步设计和详细设计 3 个阶段。飞机总体设计一般是指从概念设计到初步设计阶段,进行飞机总体方案设计的过程,主要任务包括设计飞机的基本形式(气动布局、内部装置、受力构件),选择发动机及其他主要设备,设计外形和建立数学模型;确定重心位置、计算重量与惯矩,确定各系统原理并相互协调关系,模型和样机设计,计算飞机的飞行性能,

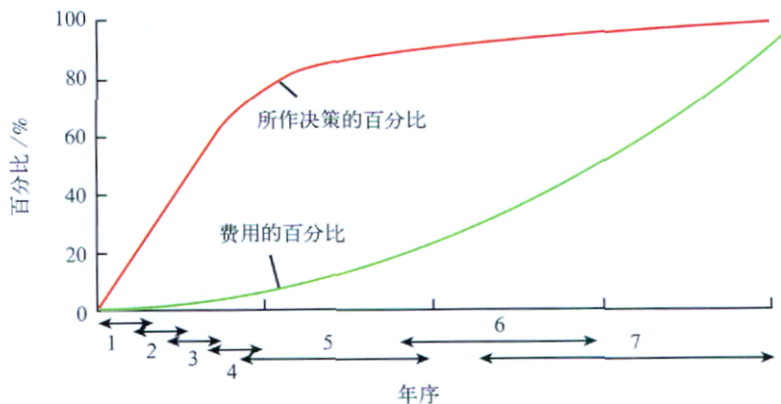
并进行可靠性与寿命分析研究,维护性分析研究,生存性分析研究,作战效能或任务效能分析。

现代飞机总体设计具有创造性与科学性、反复迭代与多轮逼近、综合权衡与全面协调等特点。作为飞机型号研制的第一个阶段,飞机总体设计阶段要做出对新机研制工作具有全局性影响的大部分重大决策,总体设计工作的失误会造成时间和经费上的浪费,甚至直接影响新机研制工作的成败,因此飞机总体设计是飞机研制工作中最为重要的一个阶段。图1是飞机研制各阶段所需费用和所做出决策的变化趋势(以百分比表示),图中前4个阶段为总体设计过程,花费的时间最多,占总工作时间的20%~25%,所花费资金不大于5%~10%,而所作的方案决策却占了75%~80%。不难看出,总体设计是飞机研制过程中责任最重大的阶段。成功的总体设计可以利用相对不太先进的单项技术设计出综合性能优异的飞机;相反地,在一个平庸的总体设计基础上,哪怕采用最先进的技术也难以得到整体性能出众的飞机。例如苏俄在诸多单项技术落后于西方的情况下,却设计出足以抗衡、甚至超过美国的先进飞机,在很大程度上归功于总体设计的成功。

传统的飞机总体设计由于专业理论和计算工具的限制,设计人员要先根据经验和判断制定飞机总体设计方案,再对所得到的方案进行分析和校核,即对设计方案进行系统分析;随着计算机技术和各种分析工具的日益成熟,现在的飞机总体设计通盘考虑设计要求、约束和评价指标,产生一个最优的设计方案,这种设计方法称为系统综合,可提高设计质量和缩短设计周期;多学科设计优化技术就是实现系统综合的主要工具。作为大飞机项目研制的关键技术之一,飞机总体综合设计不仅要完成传统飞机总体设计的工作内容,

而且具有利用现代设计方法获得最优总体设计方案的含义,即要在相对不太先进的单项技术基础上得到综合性能优异的飞机,这对我国的大飞机项目具有非常现实的针对性。

证和拟订客机设计要求需要对民用航空市场进行客观的调查和对世界或地区经济发展作准确分析,由于众多不确定因素的影响,根据对过去的调查和分析做出对未来市场和经济



注:1为战术/技术要求的分析,2为定出飞机概念,3为拟定设计方案,4为拟定草图方案,5为工作设计,6为制造飞机、台架试验,7为飞行试验。

图1 飞机研制的不同阶段所需费用的变化和所作决策的分布

大飞机总体综合设计关键技术

1 设计要求论证

设计要求是设计飞机的依据,军用飞机的设计要求亦称战术技术指标,一般由用户提出,民用飞机的设计要求则主要由飞机制造商自行拟定。设计要求决定飞机的性能水平,直接影响飞机的生存与发展。几十年的空运竞争使得降低成本成为运输机成功的关键,市场需要的是高效率的运输工具。以客机为例,市场需求和经济发展是影响客机市场的最主要因素,新技术的运用旨在提高飞机效率。因而论

发展的准确预测具有很强的挑战性。表1是飞机制造商对地区民航市场的增长率预测,表2为不同类型客机的需求预测,图2为经济增长与民航客运周转量之间的关系。可以看出,经济增长直接影响民航的增长,民航增长率一般为经济增长率的1.5~

表1 飞机制造商预测的地区民航平均年增长率 %

地区	空客公司(2004 ~ 2023)	波音公司(2005 ~ 2024)
欧洲	5.0	3.4
欧美	4.9	3.6
亚美	6.3	4.6
欧亚	5.9	5.6
中国国内	8.7	8.8
全球	5.3	4.8

表2 飞机制造商对不同类型客机的需求预测 架

地区	空客公司(2004 ~ 2023)	波音公司(2005 ~ 2024)
单通道干线客机	10902	13478
双通道客机	2792	2234
400座以上客机	1648	591
新飞机交付总量	17328	25694

2倍,对市场的预测直接影响制造商对新飞机设计要求的制定,如空客公司对未来20年400座以上巨型客机

艺的选择有助于提高飞机性能(如A380飞机的新材料应用方案,见图3)。即使采用传统的正常布局,为保

飞机的纵向稳定性和配平取决于飞机重心位置;飞机的操纵性和飞行品质与转动惯量相关。现在有多种半理论-半工程方法可用于估算飞机的正常起飞重量,但准确性难以保证。因此,在飞机的概念和初步设计阶段,如何更精确地预估其质量特性,对大飞机总体设计方案的确定有重大影响。质量特性预估的核心问题是飞机结构质量的确定,复合材料越来越多地应用于飞机结构,给飞机结构质量估算带来了新的困难。

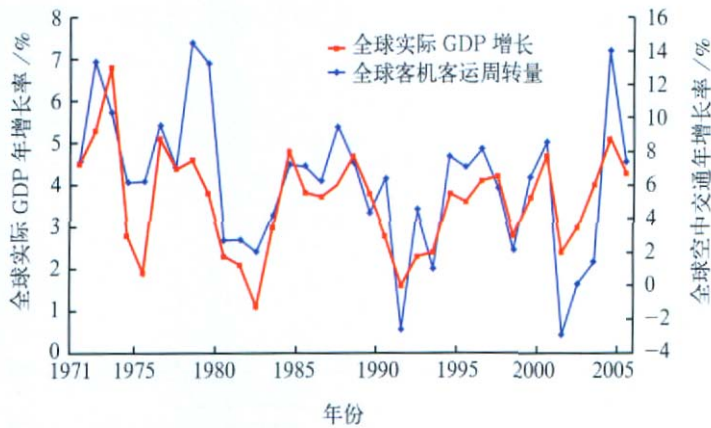


图2 经济增长与民航发展之间的关系

市场较乐观,因而得出了A380的设计指标;而波音公司认为巨型客机的市场不大,波音747仍具备竞争力,从而修改了波音7X7的设计要求,形成了波音787。

历史经验表明,正确的设计要求保证了飞机的市场竞争力和制造商的经济效益,波音747就是最好的例子,从1969年开始到A380交付,几十年无竞争对手。因此,设计要求的论证是大飞机成功与否的关键技术之一。

2 总体布局设计技术

客机和专用运输机之间总体布局有较大区别。客机一般采用下单翼正常式气动布局,今天看来,几乎所有客机的外形都差不多,只存在大小之分;专用运输机为了货物装卸方便,一般采用上单翼正常布局、高置平尾。尽管大飞机在气动、总体和结构布局方面已经形成了鲜明的特点,但在非常规或新概念构型设计、挖掘传统布局的气动潜力、新材料与复合材料的选择和应用方面仍然有大量工作,如翼身融合体布局、环翼布局、三翼面布局等均可能成为大飞机的构型,波音787通过精细化设计大幅度提高了正常布局飞机的效率,高性能金属材料、复合材料及先进工

证和提高飞机的安全性、经济性、环保性及舒适性,总体布局也要做大量细致工作,如A380的机身设计就考虑过多种布局方案,对整个飞机而言则用了10年时间经过数十个方案设计才得到最后的A380,使其可用空间比波音747增大49%。总体布局设计是获得高效率大飞机方案的关键技术。

3 质量特性预估技术

飞机质量特性包括质量(重量)、质心(重心)和质量分布(转动惯量)。大飞机的正常起飞重量是一个非常重要的参数,直接影响飞机的出厂价格、性能指标和使用维护成本;

4 数字化设计与分析技术

数字化设计技术贯穿飞机研制的全过程,已经成为飞机制造企业的核心竞争力。国外已经从早期的图纸数字化,经过数字模型和数字样机,进入了数字化工厂阶段(大量机上管路走向协调、安装固定,以及飞机部件和全机装配等工作都先在计算机上模拟进行,见图4和图5),并朝着基于知识工程的网络环境方向发展,我国飞机数字化设计技术近年来取得了重大进展,但针对大飞机方案设计,快速、高效、实用的数字化设计技术仍有待突破。

气动、结构和性能分析工具是大飞机总体设计的重要基础,虽有许多成熟的软件系统可供选择,但如何进一步改善这些分析工具与多学科设计优化平台的接口、提高计算精度和

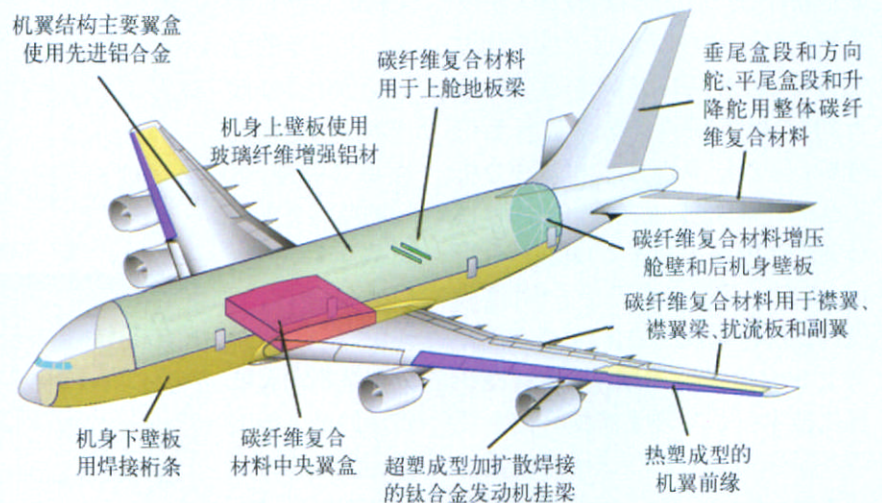


图3 A380飞机的新材料应用方案

计算效率,依然是需要深入研究的问题。

5 多学科设计优化技术

飞机总体设计的实质就是一个多学科权衡与平衡的过程,以航空航天设计为背景,20世纪90年代初正式提出了多学科设计优化概念,经过近20年的发展,多学科设计优化技术逐步从基础研究和应用研究走向工程实践,将对飞机总体设计产生深远的影响,对提高大飞机总体方案的设计质量、缩短设计周期、避免返工有积极作用。iSIGHT/FIPER和ModelCenter是最为成熟的多学科设计优化商用软件,使用成熟软件可省去优化方法、优化策略等方面的工作,但参数化几何建模、学科分析模型的自动生成、学科间的解耦、数据管理与数据交换、不确定因素处理等是大飞机多学科设计优化需要认真对待的问题。鉴于客机大都系列化发展的惯例,大飞机项目也要考虑这个问题,如大客机应有基本型、加长型、缩短型、公务型等系列,因而面向飞机族的多学科设计优化也是一个关键技术。

6 虚拟综合保障技术

飞机的综合保障有明确的定义,这里的虚拟综合保障技术是一个广义的概念。现代大飞机研制一般走国际合作之路(图6),我国大飞机项目也会这样,如发动机要先依靠进口。大飞机由数万、甚至数十万零件组成,供应厂商遍布全世界;大飞机的使用寿命在20年以上,有繁多的维护、修理问题。所以在总体设计阶段,必须考虑飞机的供应链、大部件跨区域(或跨国)运输、飞机的使用维护等问题,以保证飞机的研制进度,减少维护时间和降低维护成本。虚拟综合保障技术就是在计算机上对这些可能的问题进行仿真,提出解决方案。如A380飞机机翼在英国制造,尺寸大、运输方式复杂,须对运输过程进行模拟,发现并解决问题。

在飞机维护过程中,如需更换某零件或设备,维修人员能否直接可达,是否需要专用地面设备,均需在总体设计阶段进行仿真。

7 地面和空中安全性分析与设计技术

大型客机的地面安全性主要指突发事件发生后乘客的紧急撤离,空中安全除针对传统的劫机、爆炸外,增加了恐怖分子对飞机的攻击。不管飞机上有多少乘客,适航条例要求90s之内所有乘客安全撤离飞机;机组、乘客、管理等因素对客机地面安全性有重要影响,但技术因素,如机舱内部设计、应急逃生门设置、阻燃材料的选择、抗冲击设计、导向音/视频综合引导系统的应用等对乘客的快速撤离起到重要作用。客机在起飞着陆的低空飞行阶段,可能受到恐怖分子的肩负式导弹威胁。因此在大飞机总体设计阶段,有必要对飞机的地面安全性进行分析,选择应用适合的设计技术改善地面安全性;如果飞机的使用范围内存在被外面攻击的危险,应在总体设计阶段考虑是否安装自保护系统,如告警、干扰、激光摧毁等装置。

8 成本预测与效能分析技术

大飞机主要用于商业航空,而商业航空的目的就是赚取利润,飞机的采购和运营成本越低,利润就可能越大,即使是军用运输机也要考虑效费比问题。客机的费用包括采购成本和运营费用。飞机的高性能要求、安全性考虑、质量控制、小批量生产等

因素会导致采购成本的增加,数字化设计技术的应用在一定程度上降低了采购成本,在总体设计阶段,一般采用自上而下的方法来预测飞机的出厂价格,但需要大量的统计数据,否则难以保证准确性。民用运输机的运营成本分间接和直接2部分,间接运营成本主要与管理相关,直接运

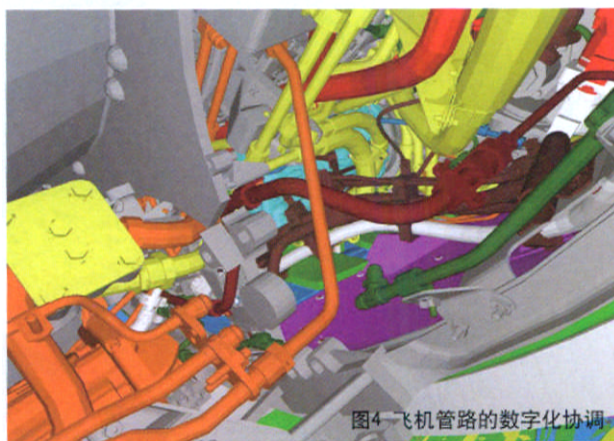


图4 飞机管路的数字化协调

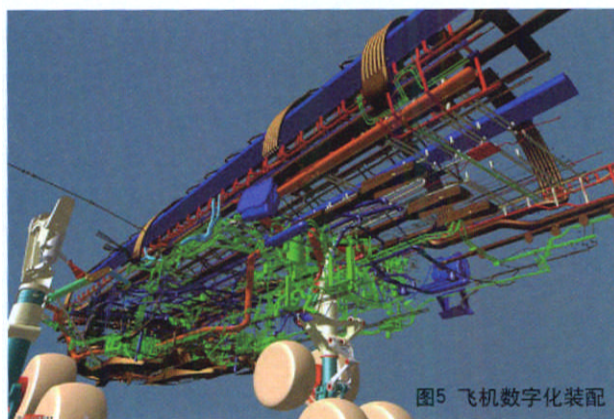


图5 飞机数字化装配

营成本包括燃料消耗、飞机贬值、保险和机组费用,以及与设计相关的发动机和机体的维护费用等。至于民用飞机的运营效率和军用运输机的作战效能,要从效能指标体系选择、评估理论与方法入手进行专门研究。在总体设计阶段如何较准确估算飞机的出厂价格、预测飞机的不可靠费用和维修成本,并通过效能分析来评估飞机的效费比,对提高大飞机的市场竞争力有重要作用。

9 环境适应性分析与设计技术

飞机的环境适应性包括环保性和机场适应性。环保性主要考虑飞机的噪声污染和排放污染,虽然两者

都与发动机直接相关,但在飞机总体设计阶段,评估噪声级别及其对环境的影响,分析 CO₂ 与其他气体的排放量及其对大气层的破坏,从布局、发动机短舱、前后缘增升装置设计等方面降低噪声污染,都是非常重要的

键问题。

11 适航性考虑

适航性是飞机在寿命周期内,其整体及各部件和系统在预定运行环境和使用条件下保证安全运行的品质,涉及飞机的设计、制造、使用及

特别是近年来运八、轰六、新舟 60 等飞机的系列改进设计,为大飞机的研制奠定了基础,可以说已具备完成大飞机总体设计的能力。为了获得更优的总体设计方案,提高大飞机效率和市场竞争力,并为今后的改进改型和新型号研制提供技术储备,在飞机总体综合设计方面,今后应加强以下工作:

重视对国内外民航运输市场的调查和研究,提高对未来经济发展和民航市场需求预测的客观性,科学制订大飞机设计要求和战技指标;加强新概念、非常规大飞机气动布局的预先研究,为新一代大飞机研制提前储备技术;支持飞机数字化设计技术研究和软件开发,在总体设计阶段实现大飞机的数字化协调、装配、总装,能进行机场适应性、飞行管理、维护和维修性虚拟检查;促进多学科设计优化技术在大飞机实际工程型号中的应用,加强气动、结构强度、飞行性能和飞行品质的高精度快速计算分析方法研究;注重大型客机地面安全和可能的空中安全问题,从理论分析和试验验证入手,研究和解决大飞机安全性(不含由空中交通管理部门负责的使用安全)分析与设计问题;从大飞机项目研制工作开始,应注意对飞机设计、试验、试制、试飞费用数据的统计,为今后大飞机

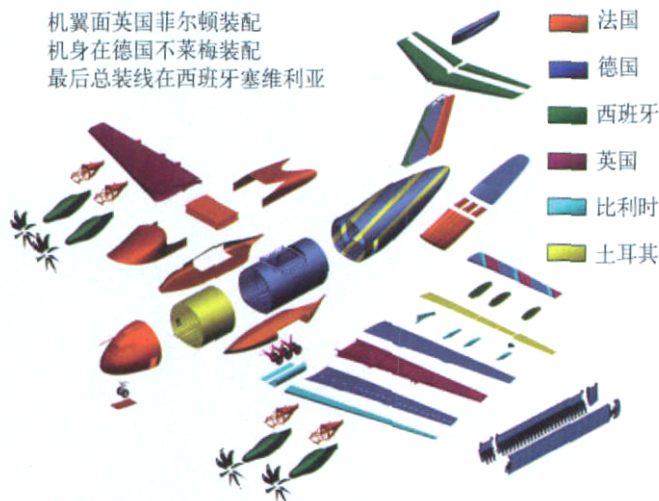


图6 A400M运输机的制造合作伙伴分布

工作。如 NASA 考虑用机体结构遮挡发动机噪声的向下传播,采用锯齿状发动机短舱喷口降低噪声等。客机的机场适应性主要考虑飞机能在什么飞行区等级的机场起着陆、高原机场的使用以及对机场设施的适应性等,专用运输机则要考虑在简易或快速维修后机场、甚至无机场时的起着陆问题。

维修,目的是保证飞行安全。大飞机总体设计阶段必须考虑型号合格证 (Type Certificate) 的取证问题,这是飞机取得适航证 (Certificate of Airworthiness) 而进入市场的前提,具体工作是将适航标准或条例中与设计有关的内容进行分解,并反映在设计中。

10 舒适性评估与设计技术

客机舒适性的影响因素包括飞行品质、客舱空间和环境(压力、温度、湿度、供氧、通风)、座椅及其在客舱内的布局(图 7) 等,驾驶舱(图 8) 人机环境也应属于舒适性范畴。舒适性与经济性是一对矛盾,在大飞机总体设计阶段,用什么



图7 波音787客舱



图8 A350驾驶舱

样的指标或指标体系来衡量飞机的舒适性,如何对其定量评估,怎样分析驾驶舱的人机工效,并最终落实到飞机设计上,都是必须解决的关

我国的现状及发展建议

虽然大飞机项目立项较晚,但我国在运输机设计方面经历了运七、运八和运十等型号的研制,自行设计了歼八 II、歼轰七和歼十等战斗机,特

成本预测打基础;加强大飞机环保性和舒适性的研究工作,以期在理论上取得突破,并落实到设计中去。

(责编 淡蓝)