



未来大型客机气动布局设计

Aerodynamic Configuration Design of Future Large Aircraft

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。现任北航航空科学与工程学院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。

我国 C919 大型客机项目于 2009 年通过了工业和信息化部组织的专家评审,顺利进入总体设计阶段,主要部件和系统的供应商已基本确定,并采取合资、联合研发与研制、

安全性、经济性、环保型和舒适性仍然是下一代大型客机发展的主要设计要求,也是客机的评价准则体系。

转包生产等形式与供应商合作,以期实现飞机零部件生产的本土化以及降低飞机的直接使用成本。本文将以后未来大型客机为背景,重点探讨气动布局设计问题,提出我国今后民用客机布局设计技术发展的建议。

未来大型客机设计要求

设计要求是飞机设计的依据,现代客机设计要求主要包括飞机性能、安全性、可靠性和维护性、机载系统性能等内容,还要满足民航当局的适航管理条例要求。比如,空客公司 A380 主要采用增加座位的技术途径达到客公里成本降低 10% 以上的设计目标;波音公司 787 综合使用复合材料、高效发动机、健康监测、先进制造工艺等技术,满足了降低 20% 燃

油消耗的设计要求,同时改善了飞机的舒适性和可维护性;我国 C919 的设计目标是在性能指标与现役同级别先进客机相当的前提下,直接使用成本同比降低 10%。

安全性、经济性、环保型和舒适性仍然是下一代大型客机发展的主要设计要求,也是客机的评价准则体系。波音公司将重点从气动、推进、材料和系统技术入手,力图从提高推进系统可靠度、材料、电击保护、结构和系统健康监测等方面增强飞机安全性,从减少耗油率和维护费用、减轻材料和结构重量、降低制造成本等方面提高飞机的经济性,从降低推进系统噪声、减少排放物污染、能源优化等方面加强环境保护;从降噪和人性化客舱设计等方面提高乘坐

的舒适性。空客公司也提出了下一代民机发展的战略目标,明确了更安全、更经济、更环保和更舒适的设计思想。

针对未来航空环境,美国航空航天局(NASA)于2008年10月请求工业界部门和学术单位对满足2030年代能源效率、环境和运营目标要求的未来商用飞机的先进概念进行研究,即N+3代客机计划,也就是在20~25年之后投入使用、比现役客机先进三代的飞机。N+3代客机的初步设计目标如下:

(1) 飞行噪声比现在使用的联邦航空管理局噪声标准低71dB,当前的标准在机场边界内容纳了部分有害噪声;

(2) 氮氧化物排放比现在标准减少75%以上,现在使用的国际民航组织航空环境保护第六阶段标准旨在改善机场周边的空气质量;

(3) 燃料消耗降低超过70%,以此降低航空旅行的温室气体排放和旅行成本;

(4) 具备在大都会地区优化使用多个机场跑道起降的能力,以减轻空中交通拥堵和延误,具体说就是要在1500m长的备用机场跑道起落。

根据以上设计要求,由波音公司、诺斯罗普·格鲁门、麻省理工学院牵头的3个团队完成了N+3代亚声速大型客机第一阶段的研究工作,下面将参照NASA未来客机的设计要求讨论大型客机的气动布局设计。

飞机气动布局

飞机的气动布局是指飞机不同气动承力面的安排形式。飞机一般由机翼、机身、尾翼和起落架四大部件构成其气动外形,机翼用来产生克服飞机重量的升力,也可装载燃油和安装发动机和/或起落架;机身提供装载空间和飞机其他部件的安装基础;尾翼用于保证飞机的稳定飞行和提供飞行操纵力矩;起落架供起

飞、着陆及地面滑行和停放使用。由此可以看出,机翼是飞机的主要气动承力面,由平尾和立尾组成的尾翼是飞机的辅助气动承力面。简单地说,飞机机翼和尾翼的不同安排就构成了飞机的气动布局。传统飞机的气动布局有以下几种形式。

(1) 正常式布局:水平尾翼位于机翼之后的布局形式,是现代飞机采用最多的布局,积累的知识和设计经验最为丰富。飞机正常飞行时,正常式布局的水平尾翼一般提供向下的负升力,保证飞机各部分的合力矩平衡,保持飞机的静稳定性。现代大型客机全部采用这种布局形式,如1957年首飞的波音707客机和1991年首飞的空客公司A340客机气动外形比较,它们几乎没多大区别,最新型的波音787和空客A350也采用类似布局。

(2) 鸭式布局:水平尾翼位于机翼之前的布局形式。鸭式布局是飞机最早采用的布局形式,莱特兄弟设计的飞机就是鸭式布局,由于鸭翼提供的不稳定俯仰力矩造成鸭式飞机发展缓慢。随着主动控制技术的发展,鸭式布局技术日趋成熟,这种布局升力效率高,难点是鸭翼位置的选择和大迎角时俯仰力矩上仰的问题。

(3) 无尾式布局:只有机翼、无平尾、有立(垂)尾的布局形式,一般采用大后掠的三角机翼,用机翼后缘的襟副翼作为纵向配平的操作面。配平时,襟副翼的升力方向向下,引起升力损失,同时力臂较短,效率不高。为解决操纵困难和配平阻力大的问题,无尾式布局的飞机通常采用机翼扭转设计。这种布局的优点是结构重量较轻、气动阻力较小。近年来,在上述3种典型布局的基础上,又发展了飞翼和三翼面布局形式。

(4) 飞翼和三翼面布局:飞翼飞机只有机翼、没有平尾和立尾,一般采用翼身一体化设计,也没有明显的机身,通常在飞翼后缘装襟副翼、升

降舵、阻力方向舵等多个舵面来控制飞机的飞行,具有气动效率高、升阻比大等优点。三翼面布局飞机机翼前面有前翼,后面有平尾,综合了正常式布局 and 鸭式布局的特点,操纵和配平特性好,允许有更大的重心移动范围,不足之处是飞机的总重有所增加。

除上述布局外,随着未来新设计目标的提出,飞机布局也要随之创新,近年来提出了一些新概念布局形式,如翼身融合、斜翼、连翼、环翼、变体等。

在拟定飞机设计要求后,总体设计中的重要工作之一就是进行飞机气动布局设计。一般来说,对于相同的设计要求,不同的设计单位可能得出不同的飞机布局形式,即飞机布局设计具有非唯一性特点。飞机气动布局设计首先通过多种气动布局方案的对比研究,选出最优布局。此外,气动布局设计还要确定翼型和机翼平面形状参数、机身外形、尾翼的布置和参数、发动机及其进排气系统布置、起落架布局等。

未来客机气动布局设计

要同时实现NASA提出的N+3代客机在油耗、废气排放、噪声以及机场适应性方面的设计目标确实是件非常困难的事情,必须从多方面入手,综合利用各种新技术成果。客机的气动布局设计实质上是飞机空气动力的总体设计,其科学依据主要是空气动力学,这自然是飞机设计的核心内容,对于实现未来客机的设计目标起着关键作用,但只通过气动布局设计是远不能解决所有问题的,需要有先进推进、材料、工艺等技术的支撑。发动机是未来客机的关键,发动机效率的提高直接带来油耗、废气排放、噪声方面的收益;轻质高效新材料的使用可减轻飞机结构重量,降低客机巡航飞行时的需用推力;新的结构设计和制造工艺可减少飞机结



诺斯罗普·格鲁门的正常式布局方案

构零件和连接、紧固件数量,除降低结构重量外,还可极大改善飞机的可维护性。

1 正常式布局

现役大型客机以及几乎全部支线客机都采用正常式布局,自然想到在现有先进客机上改进设计能否满足未来 25 年左右的设计要求。按照 NASA 的设计目标,波音公司领导的团队以波音 737 为原准机进行改进设计,正常布局的原准飞机使用超临界翼型,巡航升阻比 18.2。在原准设计上综合使用自然和主动层流控制、机身使用脊状表面减阻、尾翼放宽静稳定性和增加最大升力系数、使用多功能结构 / 减少紧固件 / 减少襟翼整流罩等技术降低杂项阻力,巡航升阻比增加到 20.9,但巡航马赫数 Ma 降低了 6%,为 0.74,在此基础上综合使用先进复合材料结构、高涵道比低排放涡扇发动机、轻质涂层和舱内设施轻质化等技术得到飞机精细设计方案,使飞机油耗降低 44%、噪声降 16dB、氮氧化物排放减少 58%,该方案极大改善了飞机性能,但离设计目标有较大距离。

降低油耗的实质是减小飞机阻力,波音团队采用大展弦比机翼来提高正常式布局飞机的气动效率,得到了支撑式上单翼方案。该设计方案继续使用层流控制、机身和机翼湍流

部分的脊状表面、先进超临界翼型、低干涉发动机吊舱和低阻支撑等技术,使 Ma 0.74 下巡航升阻比达到 25.97,配装使用先进发动机技术的非常高涵道比涡扇发动机,可降低油耗 46%、噪声 22dB、废气排放 72%。但由于翼展过长,考虑机场适

应性和减重使用了斜支撑和机翼折叠,带来折叠机构的复杂性和整个机翼结构重量的不确定性。

诺斯罗普·格鲁门公司领导的团队以波音 737-500 为参照,开展了一系列研究工作。在气动布局形式选择方面,该团队经过若干布局上的创新设计,最后的首选方案回到了正常式布局。该方案主要使用层流控制、起落架整流罩(也有降噪功能)等气动设计技术。与波音 737-500 相比,机翼后掠角加大 1° 、展弦比增加 61%、翼载荷减少 29%,巡航升阻比接近 20,但巡航高度增加到 13700m。由于罗·罗公司是团队成员,该方案重点使用了三转子超高涵道比(18)涡扇发动机以及后掠风扇叶片、压气机流动控制、形状记忆合金喷口等相关先进技术。此外,该方案使用了大型一体化编织和缝合复合材料结构、超高性能纤维、主动气弹控制、进气道隔声衬套、碳纳米管电缆等先进技术,达到了降低噪声 69.6dB、油耗 63.5%、废气排放 90.6% 的性能指标,同时可使用 1500m 的备用机场跑道,基本上达到了 NASA 的设计目标,不过该方

案中高性能发动机是重点,飞机出厂价格可能相当昂贵。

麻省理工学院领导的团队以波音 737-800 为基准,开展了正常式布局的创新设计,气动布局主要特征为“双气泡”形宽体机身、带自然层流控制的大展弦比小后掠下单翼、双立尾顶端的高平尾、具有附面层吸出功能带隔声衬套的后置涡扇发动机,采用主动载荷减缓和起落架整流等气动技术。此外,该方案使用 3 台涵道比 20 的发动机、先进结构材料和结构减重设计、健康和飞行监视等技术,降低油耗 70%、氮氧化物排放 87%、噪声 60dB,可在 1500m 跑道起降,几乎达到了 NASA 的设计目标。该方案创新性强,较传统正常式布局有独到之处,但其高涵道比要求发动机有更小尺寸和更高效的核心机,可行性受到质疑。

2 翼身融合布局

高升阻比是翼身融合布局的最大优势,这是一种广义的飞翼布局形式。随着 NASA 和波音公司 X-48 翼身融合试验无人机项目研究工作的开展,翼身融合布局受到了全球广泛关注。按照 NASA 的 N+3 代客



波音公司正常布局支撑式上单翼方案

机设计目标,波音公司团队也进行翼身融合布局方案设计。该方案主要采用机翼和垂尾的层流控制、机身和机翼湍流部分的脊状表面、降低杂项阻力和低干涉吊舱等气动设计技术, $Ma0.74$ 巡航马赫数下的升阻比达到 26.6, 高于正常式布局方案, 加之非常高涵道比涡扇发动机、先进结构材料和工艺、噪声屏蔽设计等技术的应用, 波音翼身融合布局方案降低油耗 43.3%、排放 72%、噪声 37dB。但该布局存在客舱容量小、应急逃生通道安排困难、满足机场适用性采取的机翼折叠等问题。

麻省理工学院团队按照 NASA 设计目标, 以 350 座级的波音 777-200 加长型为参照, 完成了翼身融合布局方案设计。该方案采用无立尾带翼梢小翼的翼身融合布局形式, 气动上采用前缘带弯度的升力体机身、无前缘缝翼和襟翼的机翼、发动机嵌入机身上表面后部以吸入机体部分 40% 弦长的附面层并屏蔽发动机噪声、带整流罩的起落架等布局和技术方案, 0.83 马赫数下的巡航升阻比达到 24.2。加之平齐安装涵道比 20 的高性能涡扇发动机, 隔声衬套、可变喷口面积、推力矢量以及先进结构材料和设计技术的应用, 使该方案降低油耗 54%、氮氧化物排放 81%、噪声 46dB。该方案的问题仍然是小尺寸高效率发动机核心机。

3 其他布局

飞机气动布局设计受设计单位的技术基础和传统文化的影响, 如法国达索飞机公司偏爱无尾布局、波音公司的飞机几乎清一色采用正常式布局(X-45、X-48 采用飞翼布局除外), 企业的文化氛围有时候会限制设计上的创新。由于诺斯罗普·格鲁门公司领导的团队没有客机设计和研制背景, 在 N+3 代客机的概念设计中, 尝试了若干新型布局形式, 虽然最后的首选方案回到了正常布局, 但它们的非常规布局研究值得关

注和借鉴。

(1) 嵌入式发动机的三翼面布局。这种气动布局形式除三翼面布局的特点外, 具有噪声屏蔽、降低发动机吊舱阻力和减少浸湿面积、可能部分吸入机身附面层的优点, 但存在推力损失和机翼结构复杂等挑战。

(2) 连翼布局。这是一种非常规布局形式, 具有小结构重量、低机身阻力、良好的跨声速气动性能, 不足之处是由于浸湿面积增大和部件之间的干扰使飞机零升阻力增加、发动机和翼面布置不能对发动机噪声产生遮挡效应。



(3) 鸭式布局。除具备鸭式布局的固有特点外, 附加升力面使飞机诱导阻力增大, 同时飞机稳定性和操纵性方面也面临新的挑战。

(4) 用桨扇发动机的槽形翼三翼面布局。这是一种新概念布局形式, 优点是经济性好、可有效降低起飞着陆滑跑距离, 缺点是机翼浸湿面积和重量增加、机翼结构制造和集成困难。

(5) 小展弦比全翼展承载体布局。一种全新的气动布局形式, 优点是诱导阻力相对小、旅客登机和下机效率更高、可使用分布式推进系统, 缺点是全机阻力大、发动机噪声难于控制。

(6) 嵌入式发动机的翼身融合布局。优点是噪声屏蔽、减阻和部分机身附面层吸入, 缺点是机舱空间小、推进效率降低、总体集成困难。

通过以上分析, 由于各自的优缺点, 每一种创新气动布局都难以同时满足 NASA 未来 N+3 代客机的设计目标。

我国客机气动布局设计的发展建议

中国商用飞机有限责任公司的 C919 客机已完成气动布局设计, 采用正常式布局, 在翼型、翼梢、发动机短舱、前机身等方面使用了先进的空气动力和声学设计技术, 气动性能指标比现役同级别飞机有所提高。由以上讨论可以看出, 要以现有成熟技术

与未来可预知技术使大型客机同时满足未来 25 年左右的设计目标是非常困难的, 必须以发展、前瞻的眼光来看待未来客机的创新问题, 为提高我国未来大型客机的设计水平及其市场竞争力, 在飞机气动布局

设计方面应注意以下工作:

(1) 加强对正常布局客机的挖潜研究、重点进行后掠机翼的层流控制、先进翼型、稳定环量控制等方面的深入研究, 同时开展分布式喷口和襟翼、可收放狭板旋涡发生器、起落架整流、逆流喷口、高效进气道、隔声衬套等新技术的研究工作。

(2) 重视翼身融合等新概念气动布局形式的预先研究, 梳理各种非常规气动布局形式的优势和不足, 探讨未来大型客机的正确发展方向。

(3) 气动布局设计仅是实现未来客机设计目标的关键一环, 还须加强配套技术的研究和发展。高效率发动机是满足未来客机设计要求的核心, 必须高度重视和加大科研投入。此外, 先进结构材料、制造工艺、先进电缆、健康检测等技术也应得到重点研究。 (责编 小颖)