

大型飞机的总体布局设计分析

General Layout Design Analysis of Large Aircraft

南京航空航天大学航空宇航学院 昂海松



昂海松

南京航空航天大学教授、博士生导师,主要从事飞行器设计的教学与科研工作。

“大飞机”并不是一个严格概念上的名词,所谓“大飞机”,实际指的是“载重量大、航程远”的飞机。对于民用客机,通常指的是干线客机或跨洲运行的客机;对于军用飞机,通常指的是重型或远程运输机、轰炸机和预警机。

目前的大型飞机除协和号等客机和变后掠翼轰炸机外,大多数大飞机还是亚声速飞行器。由于这些飞机有载重量大和航程远的要求,因此大型飞机在气动布局上有其类似的设计特征。另一方面,因大型客机、

目前的大型飞机除协和号等客机和变后掠翼轰炸机外,大多数大飞机还是亚声速飞行器。由于这些飞机有载重量大和航程远的要求,因此大型飞机在气动布局上有其类似的设计特征。另一方面,因大型客机、运输机和轰炸机的不同用途又有各自不同的布局特点。

运输机和轰炸机的不同用途又有各自不同的布局特点。下面,在对现有一些典型大型飞机布局作初步归纳和三维外形重建研究的基础上,给出如下一些对大型飞机布局特点的分析。

大型飞机的总体布局设计

1 常规布局

目前的大型飞机是以“大展弦比机翼、后平尾、单垂尾”的常规布局为主,这是由飞机大承载和远航程的技术要求所决定的,同时这种布局具有较好的纵向和横向飞行稳定性。其中客机大多数设计为下单翼、上反角机翼,这种设计除了考虑到旅客的安全之外,还考虑到可以将主起落架设置在机翼内,这样可以留出机身更多的空间,同时起落架放下时离地面较近。下单翼机翼对翼下发动机还起到一定的隔噪作用,对于客机减噪

有好处。我国研制的“运十”客机就是采用这种大型客机早期的典型布局。

大载重的运输机多半采用上单翼机翼设置,这是因为该类飞机主要用来装载货物或军事装备,货舱地板设计离地面较低便于装卸。大载重飞机的发动机较多,机翼如果再装起落架的话,则承载太大;同时起落架支柱会太高,而不利于结构强度。至于挂载螺旋桨推力装置的大飞机机翼,由于桨盘高度要求,只能设计为上单翼了。

2 特殊布局

(1) 无尾布局和鸭式布局。

对于超声速运输机,由于必须克服“声障”,减小激波强度,因此必须采用小展弦比大后掠角机翼设计。如“协和号”客机设计为细长机翼和无平尾形式,襟翼也起升降舵作用,俄罗斯的图-144 超声速运输机采

用与“协和号”近似的细长机翼和无尾设计。无尾式设计会起到减少配平阻力、提高升阻比的作用。细长翼设计的运输机在亚声速飞行时性能当然不如大展弦比机翼布局。大型超声速飞机也有采用鸭式布局设计的,如欧洲航天总署负责研制计划所初步设计的A2超音速客机方案,飞行速度可达到2.5~5.0倍音速。

(2) 变后掠翼布局。

对于飞行速度范围要求较广的大型飞机,如某些既能适应超声速飞行,又要适应亚声速飞行的轰炸机,有的就设计为“变后掠翼”形式。例如美国的B-1轰炸机,俄罗斯的图-22M(逆火)和图-160(海盜旗)轰炸机都是“变后掠翼”布局。

变后掠翼通常设计有较大的与机身固联的大后掠内翼。内翼既是后掠翼结构支撑与转角机构装载的重要部分,也是产生升力的重要部分,并与机身成融合体。变后掠翼飞机与固定细长三角翼或直机翼飞机相比,纵向操纵实现2个大跨度,布局不可能像“协和号”那样采用无尾式设计,其平尾及升降舵(或全动平尾)的大小和位置设计也比固定翼飞机要求更苛刻。

(3) 飞翼式布局。

飞翼式布局将是未来大型飞机的重要形式。



B-2轰炸机就是为提高飞行效率和隐身需要设计的一种特殊的飞翼式布局,也是世界上第一个成功的大型飞翼式飞机。其布局为无平尾、无垂尾,纵横稳定性与操纵性都靠翼面后缘的多级襟翼、升降舵和副翼来控制。波音公司近期设计的“科幻”客机近似飞翼的翼身融合体(BWB)式布局,很有特色,可以大大提高升阻比和减少耗油量。

3 尾翼布局

这里,我们把安装在机身尾部两侧的平尾+机身上部单垂尾的布局称为“常规式”尾翼布局。国外大型飞机的尾翼设计多半为“常规式”。我们分析大型飞机的“常规式”布局设计有几个特点:(1)通常平尾的后掠角略大于机翼的后掠角,这可以适当减小高速的配平阻力;(2)平尾的上反角等于或略大于机翼的上反角;

(3)平尾的位置高于机翼,这是为了减少机翼尾流对平尾的干扰影响,也有因发动机安装在机身上部,设计高平尾以防止喷流的干扰。

此外,可以发现上单翼布局的大型飞机,其平尾多半设计为高平尾形式(甚至为T形尾),这是为避免机翼尾流干扰的缘故。垂尾通常设计为有后掠角的单垂尾。少数设计有多垂尾,如安-225这个目前承载重量最大的飞机,其设计为双垂尾。

亚声速大型飞机的平尾都设计为水平安定面+升降舵的形式,而不是像战斗机常见的全动平尾。水平尾翼的面积及其与机翼距离设计取决于平尾“尾容量”的大小,而尾容量关系到飞机的焦点位置及纵向稳定性与操纵性。

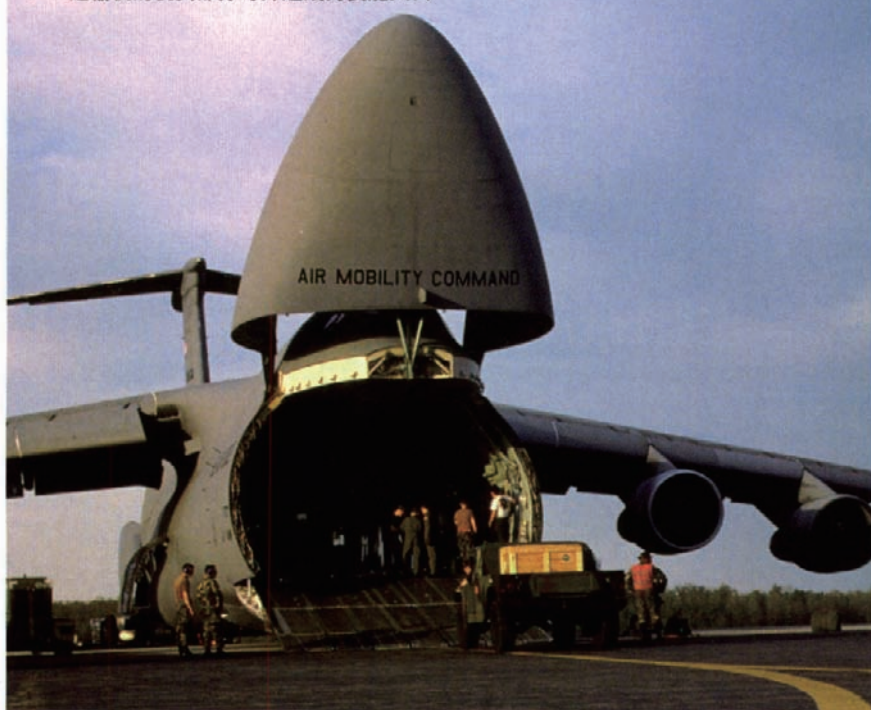
4 发动机的设置

目前,大型飞机一般采用推力较大的涡轮风扇发动机。大型飞机发动机安装位置一般都是机身外置,其中多数是机翼吊挂。目前大型客机多半还是采用2~4台发动机设置。2台发动机则为机翼左右对称吊挂各1台(或2台)。3台发动机的设置,其中1台发动机是安装在机身尾上部,如MD-11飞机。也有的飞机将左右2台发动机安装在机身后部两侧,如MD-90飞机。

重型飞机也有装更多发动机的,如安-225运输机装有6台涡扇发动机。B-52轰炸机装有8台涡喷发动机(目前在改装涡扇发动机)。



C-5 运输机的机头部分可升起成为货舱入口



发动机安装在机身或机翼处各有什么优缺点？发动机安装在机身上的好处是：发动机紧靠机身可减少振动；避免安装在两侧机翼的发动机当一侧发生故障时引起的严重不平衡推力；同时保证机翼周围，气动力稳定。那么为什么大型飞机大部分发动机安装在机翼下呢？发动机安装在机身侧后部，对平尾影响很大，以至不得不采用高平尾，这就需要加强垂尾的结构和平尾控制机构，增加了重量。目前，机翼吊装短舱发动机与机翼的气动干扰问题，通过短舱外形设计与与机翼相对位置的调整已减少到可忽略的程度。机翼吊舱的另一好处是，当飞机作升力过载机动时，吊舱的惯性力对机翼起卸载作用，从而减小了翼根的弯矩。

波音 767-200 和波音 787 飞机上正在试验装有对开式反向推力装置的短舱发动机，这对大型飞机缩短着陆距离有很大的好处。

大型飞机的机翼气动外形设计

1 亚声速飞机机翼

42 航空制造技术·2009 年第 2 期

现代大型运输机(包括客机)越来越要求有较大的巡航速度，亚声速大型运输机的巡航速度现在已达到 900 ~ 1000km/h，在这种接近(或已进入)跨声速的高速飞行速度下，选择适当的翼型和机翼形状就显得很重要了。

自从发明了在高亚声速、跨声速时可以大大延缓或减弱激波的“超临界翼型”以来，大型亚声速飞机多半采用“超临界翼型”。超临界翼型除了可以减小激波外，还有增大机翼容积的作用。大型亚声速飞机机翼多采用多段不同翼型，机翼根部翼型与梢部翼型有较大差别。

为了使大型飞机(亚声速)有较大的升阻比，一般都设计为大展弦比，传统的飞机展弦比为 7 左右。新一代大型客机的展弦比增大到 9 ~ 10。对于亚声速飞机机翼，既要保证一定的大展弦比又要减小激波，则机翼后掠角不能太大，也不能太小。据我们统计，大型客机的机翼 1/4 弦线后掠角约在 30° ~ 38°。通过气动计算可以发现，在这样的后掠角下，对减弱跨声速时激波还是起了重要

作用的，同时还能保证有较大的展弦比。机翼后掠角的另一作用是，能增加飞行的横向稳定性。这是因为侧向速度对左右机翼会产生不同升力，从而对飞机侧滑具有自动恢复稳定的功能。亚声速大型飞机机翼前缘多半为直线，而后缘为多段折线型。直前缘一方面能从来流获得稳定升力，另一方面也便于机翼内部直梁结构的设计。而大型运输机机翼的后缘一般设计为多段型，有的为 4 段，根部后缘后掠角小(甚至为零)，逐段增大。这种设计有如下几种作用：(1) 增加内翼段的升力；(2) 便于设计更有效的襟翼，提高起降性能；(3) 根部机翼还承担起落架收放机构；(4) 更有利于吊舱发动机的机翼支撑承力结构的设计。

从我们对飞机三维外形重建研究中，还发现大型飞机机翼多半设计为有“弯扭”形状。这里“弯曲”通常仅为“上反角”的设计。如不少下单翼设计为具有约 6° 的上反角，而重型飞机的上单翼多半设计为 0° 或 2° ~ 5° 的下反角。而“扭转”设计相对复杂些，根部机翼段多半设计有 3° 多的安装角，而逐渐光顺变换到 0° 安装角。因此根部机翼段是“变翼型”的。根部正安装角将对提高巡航时升力起作用。而机翼梢部通常设计有负安装角(约 3° ~ 4°)，因此翼梢段也是“变翼型”的。翼梢负安装角的设计对于大迎角时减小翼梢处气流分离是有重要作用的。波音 787 的流线型机翼设计是对常规布局机翼设计的一个创新。波音 787 的机翼平面形状的后缘流线光滑，并经过弯扭三维优化设计，有良好的气动特性。其鲨鱼鳍式翼尖设计也较独特。波音 787 机翼的升阻比要高于常规的客机约 5%。

机翼的翼尖设计也有多种形式，有的翼尖设计向外后斜置的切削型。还有的设计有翼尖小翼。翼尖小翼也有上斜置小翼和上下小翼 2 类。

这两种设计对减弱翼尖涡起到作用。尤其是翼尖小翼可以明显减小因翼尖尾涡引起的诱导阻力,有的达到减阻 1% 的作用。

2 超声速飞机机翼

超声速大飞机机翼的后掠角较大,如“协和号”机翼后掠角为 57° ,同时由于前缘为“S”形,机翼前段是类似于更大后掠角的 76° 的“边条翼”,这对减弱激波和增加大迎角时的涡升力有很大作用。而变后掠翼的超声速大型飞机的机翼有 2 个不同速度段的后掠角,如图 -22M 轰炸机机翼的后掠角分别有 20° 和 65° 。

3 翼身融合体

减阻是大型运输机改进设计的主要目的之一,为提高给定升力系数下巡航飞行的升阻比,必须尽可能地减小阻力,尤其是减少摩擦阻力。而摩擦阻力主要取决于飞机的浸润表面积。因此如何满足要求容积下减少浸润表面积,实现摩擦阻力的减小,便成为翼身融合体设计概念的出发点。研究表明,翼身融合体民机外形与传统的常规布局民机外形比较,可减少浸润面积达 $1/3$ 之多。

大型飞机的结构形式

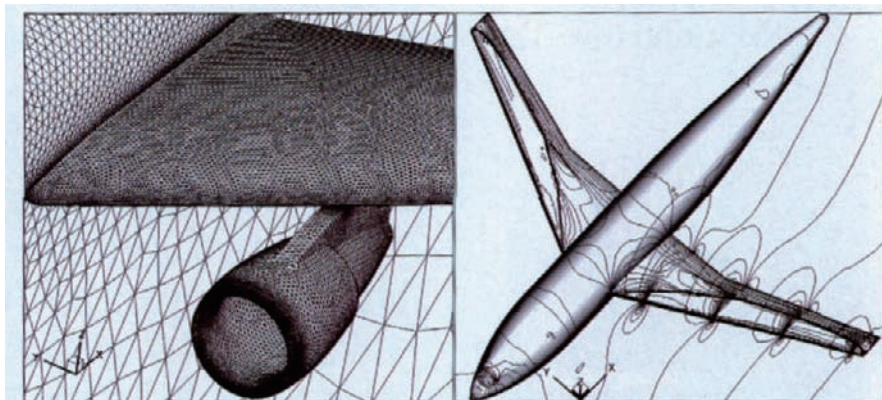
1 大型民机的结构形式设计

大型客机结构设计的主要目标是如何达到商业公司对客机两方面的要求:提高飞机的经济性和安全性;提高乘客和机组人员使用的舒适性。提高飞机的经济性和安全性,主要与结构的材料、结构强度、结构可靠性设计和先进制造工艺等有关,如减轻结构重量,抗腐蚀,提高飞机的使用寿命,可维修性好等。舒适性是民用客机重要的技术指标之一,如在机舱结构及其内饰方面,要为乘客营造一个优雅、舒适的客舱生活环境,以赢得广大乘客的喜欢。

目前,大型飞机机舱多设计为前

后 3 级(或 2 级)布局,有的有上、下 2 层,截面形状有圆形,竖立近似椭圆形,横置近似椭圆形,竖立双近似圆弧形等。根据运载对象不同,又分为客舱、货舱、客货两用舱。

飞翼式布局客机的客舱设计是个新问题,至今尚无实物。波音公司提出的 BWB 客机给出了有关客舱设计方案,但中间的乘客在紧急情况下如何能迅速撤离出舱还是个问题,



大型飞机 CFD 网格和气动特性计算结果

因为舱门在两侧。

2 大型军用运输机的结构形式

为了能够装载较大尺寸的车辆、直升机和坦克等武器装备,以及运转较多的带有空降装备的人员,需要大容量和重承载能力的大型军用运输机,这是提高快速反应作战能力的后勤支援重要手段。大型军用运输机结构上的特点是:货舱容积大,舱门大,地板低,后机身尾部高,因为通常都是设计重型装备从后舱门开进。现在也有从侧舱门运进装备的运输机设计,通常所承载的装备体积不大,否则大侧舱门开口设计对纵向承力结构设计有困难。

现代运输机货舱大都选用宽机身直通设计,为此,货舱地板纵梁进行了加强改进设计。地板上布置有系留环、导轨、滚珠、滚棒系统等设施,这些设施延伸到可在飞行中放下的货桥上,货桥上有货物降落伞拽出装置。当装卸重量超过 29.5t 时,要用液压操纵的稳定器的 2 个撑杆支撑着飞机。

总体布局优化设计

在激烈的市场竞争环境中,需要不断创新设计开发满足用户需要的新型飞机,做好总体布局的顶层优化设计是十分重要的。随着计算机技术的发展和计算流体力学(CFD)数值方法的迅速发展,为大型飞机的总体布局的优化设计提供了良好的工具。目前 CFD 计算技术在飞机初

始设计阶段,几乎可以完全代替昂贵而费时的风洞试验(因为每修改一次外形,就需要重新制造新的风洞试验模型)。结合 MDO 多学科优化设计方法,还可以满足更多范围设计要求的综合设计。运用 CFD 方法进行飞机总体布局的优化设计,可以进行大量的基本构形和局部形状的反复修改设计,使设计方案在综合平衡技术要求下达到最佳选择,而且可以大大缩短设计周期。

波音 BWB 大型客机的设计方案就采用了多学科设计优化方法(MDO)对 450 座的 BWB 外形进行了优化设计,包括沿展向几个位置翼型弦长、后掠、厚度和扭转等设计变量完成了平面形状、厚度和扭转的优化,还优化了蒙皮厚度、燃油的分布、翼梢的位置和控制面的偏角,在优化中满足对航程、平衡、结构设计、最大升力、稳定性、控制效率和平衡等的约束。

(责编 依然)