

典型高升阻比飞机气动布局及其发展

Typical High Lift-drag Ratio Aerodynamic Layout and Development for Aircraft

艾俊强 / 中航工业第一飞机设计研究院

摘要: 飞机性能的提高、油价的上涨以及各国对环境保护的更加重视都要求飞机具有更高的升阻比。本文针对飞机减阻的主要途径,对飞翼/翼身融合布局、盒式翼/联接翼布局、层流翼布局等典型高升阻比气动布局的发展和应用前景进行了简要分析。

Abstract: High performance, rising price of oil, and environment protection appeals to higher lift-drag ratio of different aircraft. On the basis of different method to reduce flight drag, this paper briefly introduces the history and prospect of fly-wing/BWB, box-wing/joined-wing and laminar-flow-wing aerodynamic layout.

关键词: 高升阻比; 气动布局; 飞机

Keywords: high lift-drag ratio; aerodynamic layout; aircraft

0 引言

气动布局在很大程度上决定了一架飞机的升阻比,升阻比则是影响飞机续航性能的决定性因素之一。因此,气动布局是现代飞机设计的重要基础。随着对飞机性能要求的不断提高、油价的日益飙升和各国对环境保护的日益重视,通过采用高升阻比气动布局增加飞机航程、减少燃油消耗和降低尾气排放,成为各航空大国和航空企业的共同选择。

在升力一定的条件下,亚声速巡航类飞机的阻力主要由摩擦阻力和诱导阻力构成。因此,提高飞机升阻比的研究都集中在减小摩擦阻力或诱导阻力这两个方向上,同时寻求两类减阻措施的综合应用。近年来,多种具有高升阻比特征的非常规气动布局得到了航空工程人员的广泛重视,其中包括飞翼/翼身融合布局、盒式翼/联接翼布局、层流翼布局等布局形式。

本文简要分析这三种高升阻比气动布局的发展和应用前景,为我国先进气动布局研究提供参考。

1 飞翼/翼身融合布局

飞机的摩擦阻力与全机浸湿面积呈线性关系,去除不必要的机体外露部件即可减小飞机的浸湿面积,从而减小摩擦阻力。飞翼/翼身融合布局正是通过减少与升力无关的部件提高升阻比的直接思维成果。

早在第一次世界大战结束后不久,美国飞机发明家伯内利就提出了将机身剖面按翼型设计的构想。进入单翼机时代以后,航空先行者们设想进一步减小甚至取消产生摩擦阻力的平尾与垂尾等部件,从而制造出仅仅依靠机翼就能翱翔蓝天的“飞翼”。美国人诺斯罗普、德国人霍顿兄弟都是执着于飞翼梦想的代表人物。经过XB-35和YB-49两种飞翼布局轰炸机

的发展和验证后,随着电传操纵技术的成熟,航空史上第一种实用化的飞翼布局轰炸机B-2终于在1989年成功首飞并于1997年装备部队,该机具有升阻比大、隐身性能好等特点。

在B-2轰炸机首飞的同年,美国麦道公司的里贝克等人申报了翼身融合布局(Blended-wing-body, BWB)的设计专利,其后还有其他公司申报了具有较强类似性的混合翼身布局(Hybrid-wing-body, HWB)专利,在世界范围内掀起了翼身融合布局军民两用飞机研究的热潮。从本质上说,翼身融合布局包括有尾和无尾等多种形式,在范畴上可包含飞翼布局。由于翼身融合布局潜在的高升阻比等优点,在1997年兼并了麦道公司的波音公司对翼身融合布局开展了深入研究,先后试飞了X-48系列翼身融合布局缩比验证机,并将翼身融合布局视为未来飞机发展的重要方向(图1)。

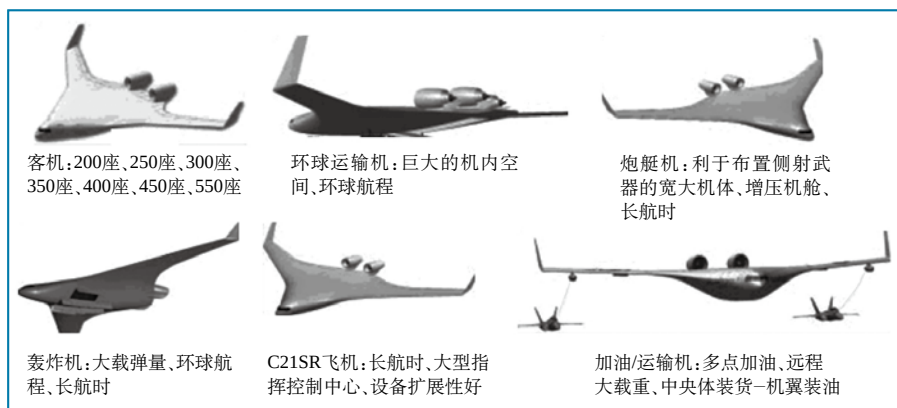


图1 波音公司的翼身融合飞机家族化发展构想

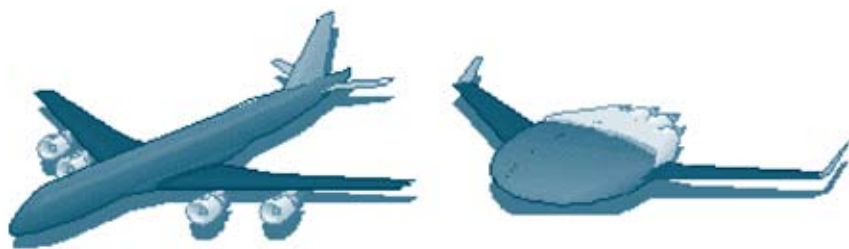


图2 用于对比的常规布局与翼身融合飞机示意图

表1 常规布局与翼身融合飞机浸湿面积对比

	常规布局	BWB布局
机身(m ²)	2137	2044
机翼(m ²)	1115	557
动力系统(m ²)	372	111
尾翼(m ²)	465	46
合计(m ²)	4088	2759
浸湿面积减小幅度	32.5%	

波音公司利用典型方案的研究结果表明,在飞机座级相当条件下,翼身融合布局飞机的全机浸湿面积比常规布局减小32.5%,见图2和表1所示,从而为减小摩擦阻力、提高升阻比创造了条件。基于翼身融合布局飞机方案的气动力计算和试验都证实了这一结论。英国克莱菲尔德大学将翼身融合布局飞机与空客已有机型进行对比,发现翼身融合布局飞机的最大升阻比改善幅度达20%以上。

正是因为升阻比上的显著优

势,与常规布局飞机相比,飞翼/翼身融合布局飞机可以节约大量燃油。由于燃油需求量的减少,飞机机体尺寸也可适当减小,从而减轻了飞机的起飞重量,也使得安装推力更小的发动机成为可能,从而更大幅改善飞机的环保特性。因此,为了满足美国国家航空航天局(NASA)提出的未来民航飞机N+2阶段

要求,波音公司和诺斯罗普·格鲁门公司分别提交了翼身融合布局方案和飞翼布局方案(图3),这两种方案都采用了基于最新技术的动力系统。尽管双方的名称不同,但实际区别仅在于发动机内置还是外置,以及是否保留垂尾。根据波音公司和诺斯罗普·格鲁门公司的公开材料,双方的飞机设计方案分别可以节约燃油52%和41.5%、降噪34dB和74.7dB。由此可见,飞翼/翼身融合布局可带来的巨大收益。

欧洲的空中客车公司也不甘落后。从2002年起,该公司开展了重点针对翼身融合布局的超高效大型飞机(Very Efficient Large Aircraft, VELA)研究计划(见图4)。此外,俄罗斯中央流体研究院(TsAGI)等单位也进行了翼身融合布局飞机研究。

2 盒式翼/联接翼布局

除了摩擦阻力外,飞机巡航飞行的另一个阻力来源是机翼等部件产生升力时的诱导阻力。对于亚声速巡航类飞机,诱导阻力在量值上与摩擦阻力相近,各占飞机总阻力的40%左右。因此,减小飞机的诱导阻力是提高飞机气动效率的另一个有效途径。

飞机的诱导阻力与机翼展弦比有着

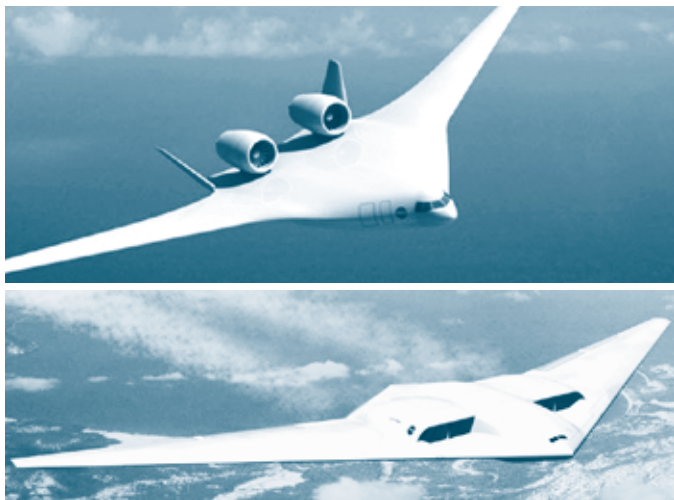


图3 波音公司(上)和诺斯罗普·格鲁门公司(下)的未来民航飞机N+2方案



图4 风洞试验中的两种VELA研究方案

直接关系,在其他机翼设计参数相同的条件下,展弦比越大则诱导阻力越小。然而,飞机翼展的增加受到机翼强度与刚度、飞行速度、机动性、机场设施等因素的限制。因此,“全球鹰”等高空长航时飞行器尽管非常重视续航能力,展弦比也只能达到25左右,民航飞机的展弦比一般只有10左右,具有超声速性能的战斗机、轰炸机、运输机的展弦比则一般不超过4。

在无限增加翼展的条件下要设法增大有效展弦比,这是一对难以解决的矛盾。现代军民用运输类飞机上采用翼梢小翼可以减阻5%以上,这是利用翼梢的端板效应,在翼展增加较小的条件下增大了飞机的当量展弦比。更为彻底的解决方案是在机翼总面积不变的条件下,改单翼为双翼设计并在翼梢以端板相连,既加大了两副机翼自身的展弦比,又充分利用了翼梢的端板效应。如此,便产生了减阻效果非常显著的盒式翼布局。

盒式翼布局其实有着悠久的发展历史。早在1924年,德国空气动力学家普朗特就曾经指出盒式翼布局是阻力最小的布局形式。近几十年来,盒式翼

布局在美国和西欧一直受到广泛重视,还发展出菱形翼布局、联接翼布局等布局形式。其中,联接翼布局因美国空军的“传感器飞机”(Sensor Aircraft)项目影响较大,并进一步衍生出同平面联接翼、多平面联接翼、钻石翼等形式。

与常规布局相比,盒式翼/联接翼布局不仅减小了诱导阻力,还有以下优点:后掠的前翼和前掠的后翼改善了飞机的面积律特性,减小了飞机的跨声速激波阻力;两副机翼分别在重心前和重心后。因此,两副机翼上的舵面协调偏转能够减小飞机的配平和操纵阻力;两副机翼互相支撑,能够有效减轻机翼的结构重量;升阻特性一定的条件下翼展较小,即展向效率较高。相对较小的翼展对战斗机而言可提高滚转机动性,对超大型运输机而言可化解机场设施对飞机翼展的限制问题。以常规布局飞机为基准,对不同多平面机翼布局形式进行比较(按升力相同、翼展相同、机翼高度相同等条件,都配置了合理的翼型和扭转),大量研究成果都指出盒式翼飞机具有最佳的展向气动效率(图5)。对

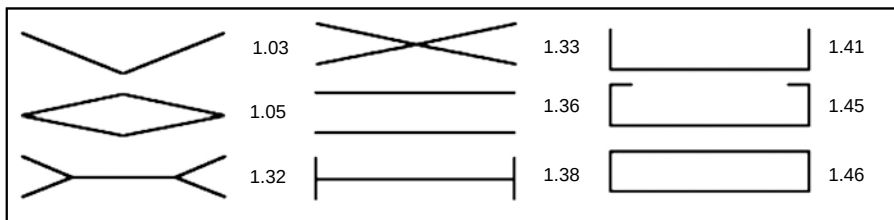


图5 不同机翼布局(前视图)的展向气动效率比较

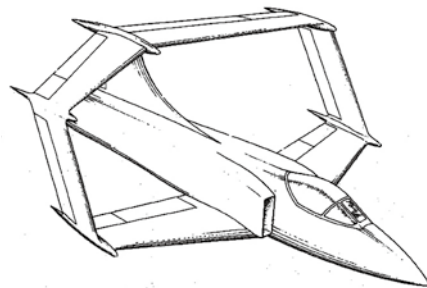


图6 洛克希德·马丁公司1974年提出的盒式翼战斗机方案

一种典型单通道客机的分析结果也表明,与常规布局方案相比,在机翼面积和翼展相同时,盒式翼布局方案的最大升阻比提高了26%以上。

正是因为盒式翼/联接翼布局具有多种优点,在军民用、巡航与机动类飞机上都受到了广泛重视。洛克希德·马丁公司长期坚持盒式翼/联接翼布局研究,甚至在1974年还申报过盒式翼高机动战斗机专利,如图6所示。洛克希德·马丁公司认为,对于大型运输类飞机,盒式翼布局方案不仅在升阻特性上拥有显著优势,机翼重量也比常规布局方案减轻了30%。因此,洛克希德·马丁公司先后提出了基于盒式翼布局的多种亚声速军民用运输机和加油机方案,其中加油机方案具有同时为多架受油机进行硬管加油的能力,该公司还参加了NASA的未来民航飞机N+2阶段研究,如图7所示。此外,意大利比萨大学的弗雷迪亚尼教授提出了双垂尾与后翼构成涵道、具有进一步减阻潜力的盒式翼布局大型客机概念。

在联接翼布局方面,1977年美国就有人申报了联接翼战斗机专利;美国专家沃尔科维奇在1982年完成了联接翼超声速运输机方案,他的研究成果在全球范围推动了联接翼布局研究热潮。上世纪末到本世纪初,更多联接翼飞机方案走进了人们的视线。洛克希德·马丁公司提出了低声爆联接翼超声



图7 洛克希德·马丁公司的未来民航飞机N+2方案

速运输机方案,如图8所示;美国空军的“传感器飞机”项目中出现了诸多联接翼布局方案,见图9。这种方案不仅具有显著的气动和结构优势,还能为机载传感器提供开阔的视野,这些方案对很多国家的联接翼技术研究产生了重大影响。此外,小直径炸弹(Small Diameter Bomb, SDB)则是第一种大批生产的联接翼无动力滑翔炸弹,见图10所示。这得益于联接翼提供的高升阻比,高空投放的射程达到120km以上。

3 层流翼布局

飞机的摩擦阻力不仅取决于浸湿面积,还与边界层密切相关。早在莱特兄弟的“飞行者一号”取得成功的第二年,



图8 洛克希德·马丁公司的低声爆联接翼超声速运输机方案

普朗特就提出了边界层概念,随后将边界层分为层流和湍流两类,并指出层流摩擦阻力小于湍流摩擦阻力。尽管至今为止几乎所有实用飞机都是按湍流流动设计,但延迟从层流到湍流的转捩,甚至利用层流控制技术实现全层流流动,仍是航空业界需要长期努力的方向。由于各种原因,层流研究以机翼为首要对象,主要从开发先进的层流翼型和高效的层流控制技术两个方向入手。

在20世纪30年代,以美国航空咨询委员会(NACA, NASA的前身)为代表的研究机构开发了NACA6系列等自然层流翼型,第一代实用化的自然层流翼型随后被用于美国的P-51“野马”和英国的“喷火”等战斗机上。这两种飞机得益于先进的翼型和精良的制造工

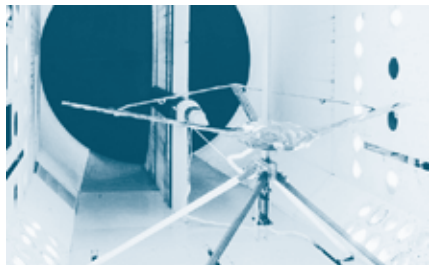


图9 风洞试验中的联接翼布局传感器飞机

艺(光洁的机翼表面是维持层流的重要保证)。尽管当时的技术距离完全层流相差甚远,这两种战斗机仍然成为美国和英国在第二次世界大战中最优秀的战斗机,有诸多改型的最大速度超过700km/h, P-51H还创造了784km/h的世界活塞飞机飞行速度绝对纪录。

二战以后,层流翼型在高速飞机上得到了广泛应用,但飞行速度的提高和机翼后掠角的增加也对维持机翼的层流流动产生了不利影响。随着后掠角的增加,机翼的最大转捩雷诺数快速下降,对于后掠角 30° 以上的机翼,在工程上已经很难实现自然层流。为了继续发挥层流翼型减阻效果好、气动效率高的优势,航空业界目前主要有两个选择,其一是采用主动层流控制技术,其二是将飞行速度和机翼后掠角减小到能够维持自然层流的范围,同时以最小的代价对局部流场进行控制,从而衍生出专门的层流翼气动布局。

主动层流控制技术研究在20世纪70年代以后一度成为热点, NASA在大量计算和试验的基础上,利用F-111、F-14、波音757、F-16XL等机型进行了大量技术验证,欧洲也基于达索公司隼-50公务机和空客A320客机等机型开展了相关研究。研究表明,对双发亚声速民机而言,如能在机翼、尾翼上实现50%弦长的层流区和发动机舱上实现40%的层流区,飞机的升阻比可以提高14.7%,从而显著减少燃油消耗



图10 SDB借助于联接翼实现了较大的无动力射程



图11 用于NASA研究的“湾流”公务机,黑色表面密布微小鼓包

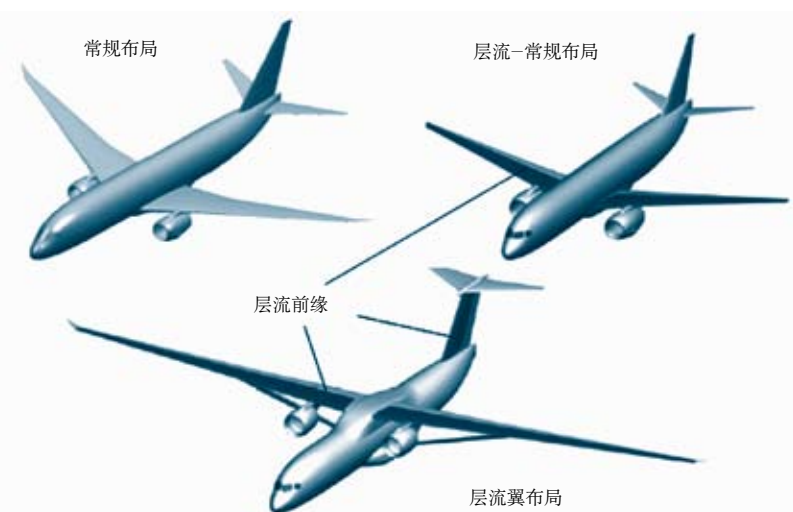


图12 波音公司用于对比分析的三种N+3单通道飞机方案

表2 波音公司三种方案的部分参数和升阻比对比

	常规布局	层流-常规布局	层流翼布局
机翼面积(m^2)	127.43	126.17	164.18
翼展(不含翼梢小翼)(m)	35.27	37.28	61.57
展弦比	9.76	11.02	23.09
1/4弦后掠角($^\circ$)	25.14	20.13	8.02
设计巡航马赫数(Ma)	0.785	0.74	0.74
巡航升阻比	18.2	20.9	25.97
巡航效率因子($Ma \cdot L/D$)	14.29	15.47	19.22
升阻比提高幅度		15%	43%
巡航效率因子提高幅度		8%	35%

和节约飞机运营成本。由于目前研究的各种主动层流控制措施都需要引气、吹除等系统,导致飞机系统复杂度和重量剧增,从而抵消了

气动效率提高带来的好处,因此并没有得到实际应用。近年来兴起一种被动层流控制思想,即在机翼表面生成类似荷叶表面凸起的大量微小鼓包,使气流产生摩擦阻力的接触表面积减小却又不足以产生湍流,见图11。这一原理的工程应用还需要解决工艺制造和日常维护等难题。

作为一种新兴的气动布局形式,层流翼布局不仅通过采用小后掠角获得更好的层流流场,还充分利用小后掠角机翼根部扭矩小的特点,配备有较常规布局飞机更大的机翼展弦比,从而进一步减小了机翼的诱导阻力。因此,层流翼布局同时综合了减小摩擦阻力和减小诱导阻力两种减阻思路,提高飞机升阻比的效果非常显著。

在针对NASA未来民航飞机N+3阶段要求的研究中,波音公司针对单通道飞机,分别对常规布局、应用层流翼设计思想的常规布局和层流翼布局开展了方案设计与分析,见图12。研究结果显示,层流-常规布局飞机和层流翼布局飞机的巡航升阻比分别比常规布局飞机提高了15%和43%,巡航效率因子则分别提高了8%和35%,见表2。由此可见,一旦层流翼布局进入工程实用,必将通过飞行效率的大幅提高显著改善飞机的经济性和环保性。

4 结束语

提高飞机的升阻比,进而实现节油、经济、降噪、减排等目标,是各国航空业界的持续追求。本文分析的三类型高升阻比气动布局都已有长达数十年的研究历史。可以预见,随着相关技术的更加成熟,这些气动布局在不久的将来投入使用后,必将极大地提高飞机的各项性能。

参考文献(略)

作者简介

艾俊强,硕士,研究员,中航工业首席技术专家,中航工业第一飞机设计研究院副总师,享受国务院政府特殊津贴,多次荣获省部级科技进步奖,航空报国突出贡献奖,多次荣立中航工业集团公司一等功,从事飞行器空气动力研究。