

文章编号:1674-8190(2015)01-087-06

# 支线飞机的非常规/常规融合布局研究

王钢林<sup>1</sup>, 楚亮<sup>1</sup>, 白俊强<sup>2</sup>, 华俊<sup>1</sup>

(1. 中国航空研究院 飞行物理研究中心, 北京 100012)

(2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

**摘要:** 为了在支线飞机设计中利用非常规布局的优势提高其性能, 同时避免其所带来的问题, 提出基于飞翼的非常规/常规融合布局。首先介绍运输类飞机非常规气动布局飞翼的突出优势和面临的问题, 然后提出非常规/常规融合布局, 最后通过设计方案的逐步迭代改进和优化, 得到气动性能优于新一代支线飞机的非常规/常规融合外形布局方案, 其中巡航升阻比提高了约 7.5%、阻力发散马赫数提高了约 2.5%、巡航效率因子提高了约 7.5%, 同时确保了飞机具有良好的机场适应性。基于飞翼的非常规/常规融合布局方案具有进一步提升性能的潜力, 同时避免飞翼的其他一些不利方面, 为未来非常规布局运输飞机的研究奠定一定的基础。

**关键词:** 运输飞机; 气动布局; 非常规; 支线飞机

中图分类号: V211.3

文献标识码: A

## Research on Blended Configuration with Unconventional and Conventional Layout for Regional Aircraft

Wang Ganglin<sup>1</sup>, Chu Liang<sup>1</sup>, Bai Junqiang<sup>2</sup>, Hua Jun<sup>1</sup>

(1. Flight Physics Research Center, Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100012, China)

(2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to get the benefits of unconventional configuration in regional aircraft design to improve its performance, and avoid its weaknesses, the blended configuration with unconventional and conventional layout is proposed. Firstly, outstanding advantages of flying wing for unconventionality of transport aircraft is introduced. Then, blended configuration with unconventional and conventional layout is put forward. Finally, by improving and optimizing a large number of design programs through gradual iteration, the blended configuration with unconventional and conventional layout is obtained. The aerodynamic performance of this layout is better than the new generation of regional aircraft. Such as, the cruise lift to drag ratio is increased about 7.5%, drag divergence Mach number is increased about 2.5%, and cruise efficiency factor is increased about 7.5%. At the same time it has good airport adaptability. And the blended configuration with unconventional and conventional layout for regional aircraft has the potential to further optimize the performance improvements, meanwhile avoid the negative aspects, and lay a foundation for the research unconventional layout of the transport aircraft in the future.

**Key words:** transport aircraft; aerodynamic layout; unconventionality; regional aircraft

## 0 引言

对于运输类飞机而言, 经济性始终是其设计研究过程中追求的主要目标之一, 而飞机的气动性能又是决定其经济性的重要因素。因此, 提升飞机的

气动性能从而追求更好的经济性一直是运输类飞机设计中的主要研究方向。

目前,运输类飞机所采用的常规气动布局形式已经发展了数十年,随着技术的不断进步和研究的不断深入,常规气动布局的潜力已经得到了充分的发挥,其气动效率逐渐逼近常规气动布局形式所能达到的极限状态。因此,面对未来飞机对经济性的进一步要求,非常规气动布局的提出非常必要,针对非常规气动布局的运输类飞机的研究逐渐得到重视和积极的发展。

本文针对支线飞机的特点,研究可以提高该类飞机气动性能和飞行性能的非常规布局形式,同时满足结构等方面的要求和约束,并且确保其与现有机场保障设施之间的兼容性。

## 1 运输类飞机的非常规气动布局

国外对未来客机的非常规气动布局方案已经进行了大量的研究,特别是美国和欧盟在这方面投入了大量的人力和物力资源,其中最主要的是NASA的ERA项目(Environmentally Responsible Aviation Project)和欧盟第六框架计划项目NACRE(New Aircraft Concept RE-search)。

ERA项目对未来的民用飞机相关技术,特别是飞机设计和发动机技术进行了全面而系统的研究。ERA将未来的民用飞机发展分为三个阶段:2015年前的N+1代民用飞机,2020年前的N+2代民用飞机,以及2025年以后的N+3代民用飞机。N+1代民用飞机是基于现有民用飞机常规气动布局的改进构型;N+2代民用飞机则完全脱离现有民用飞机布局约束,普遍采用具有更高气动性能的非常规布局形式;N+3代民用飞机的设计则更为大胆和超前。其中,N+2代民用飞机的研究最具有现实意义,最符合目前民用飞机发展需求,因此得到了ERA的重点关注<sup>[1]</sup>。

通过ERA项目研究获得的N+2代民用飞机非常规气动布局已有很多种类,其中飞翼布局以其突出的特点和潜在的优异性能获得了包括ERA在内的诸多研究项目和研究团队的高度重视。与常规布局飞机相比,飞翼具有的突出优势体现在以下四个方面<sup>[2-4]</sup>:①较高的气动效率,较低的燃料消

耗率;②结构效率高,有利于结构重量的减轻;③较高的空间利用率,有利于内部布置;④加工制造相对简单,成本相对较低。

针对上述特点,飞翼气动布局已经在多种军用飞机上得到应用,并且获得了成功。正在尝试飞翼气动布局在民用大型运输机中的探索性研究,但是相对于在军用飞机上的成功,飞翼布局在民用飞机上的应用却面临着一些难以回避的问题,主要有以下五个方面<sup>[5-7]</sup>:

### (1) 非圆增压客/货舱的结构重量问题

飞翼的客/货舱布置在中央翼内,与常规气动布局的圆截面机身有利于增压舱结构的减重不同;

### (2) 乘坐舒适性问题

与常规气动布局圆截面机身客舱布置横向跨度较小不同,飞翼的客舱在中央翼内横向布置的跨度较大,因此在飞机倾斜转向时远离机体轴线位置的乘客将有较大的高度起伏,造成乘坐舒适性的下降;

### (3) 与现有机场地面设施的兼容性问题

飞机布局的大幅度改变将引起客/货舱布局、各种舱门布置等各方面的改变,极有可能与现有各种机场设施不相兼容,带来机场设施大幅度调整的巨大成本代价;

### (4) 与现有适航条例的兼容性问题

### (5) 无法应用于支线中小型运输机问题

飞翼的装载布置在中央翼,中央翼的结构高度随飞翼尺度增大而增大,因此对于中小型运输机受其机体尺寸的限制而无法具有足够的中央翼结构高度进行客/货舱装载布置。

## 2 非常规/常规融合布局

为了进一步提高运输飞机的气动性能及经济性,常规的做法主要包括增大机翼展弦比<sup>[8-10]</sup>,以及采用精细设计空气动力学进行二维半或三维机翼反设计/设计优化。但是,上述的常规做法所能获得的飞机气动性能进一步提升空间仅为5%左右,不易获得较大的收益<sup>[1]</sup>。相反,采用飞翼类非常规的布局方案,通过改变、调整和优化飞机总体/气动布局来提高飞机的气动性能和经济性,则可能

带来较大幅度的收益。

然而,鉴于飞翼存在的五个问题都不易解决<sup>[11-12]</sup>,在支线飞机上应用飞翼布局几乎是不可能实现的。若改变思路,将常规运输飞机气动布局与飞翼布局的优势相结合,形成一种兼具非常规和常规布局特点的新概念气动布局,既可以获得较大幅度的气动性能改善,又可以规避飞翼布局在民用运输类飞机应用中的诸多问题。

飞翼的中央翼的客/货舱布局布置形式,导致飞翼应用于(支线)运输飞机的五个问题,因此,如果以飞翼布局为基础,在其上布置常规的运输飞机的圆(或多圆)截面机身,用于容纳客舱或货舱,使其客/货舱形式与常规布局运输飞机基本一致,同时机身与(飞翼)主翼面之间采用大面积翼身融合形式进行融合过渡,则前述问题均可得以解决。利用飞翼的优势并克服其不利因素,较大幅度提高支线飞机气动性能和经济性也就成为可能。

采用这种非常规/常规融合布局的支线飞机可以保持常规客机机身增压舱的近圆形截面模式,从而有利于增压舱结构设计,避免结构增重;在满足乘坐舒适性要求的前提下,客舱内部布置也可以采用与普通支线客机相同的每排五座或六座的常规单通道布置形式;在机身理论气动外形的设计中保证机身客舱段左右两侧能够正常设置乘客舷窗。这样的客/货舱设计将使乘客在这种非常规/常规混合布局支线飞机的乘坐体验与现有客机保持一致,同时在最大限度上兼容现有机场相关的地面设施,适应对相关适航方面的要求,从而有利于提高市场对非常规布局运输飞机的接受程度。

飞翼对飞控系统的要求较高,造成可实现性下降,为了避免这一问题,本文所研究的非常规/常规融合布局未采用无尾形式,选择 V 型尾翼作为飞机的纵向配平及横航向操纵舵面。与正常的平尾和垂尾相比,V 型尾翼虽然给飞行控制带来一些较为复杂的问题,但在减阻和结构减重方面却能获取较大收益。

最终所得到的以飞翼为基础的非常规/常规融合布局支线飞机的概念,如图 1 所示。

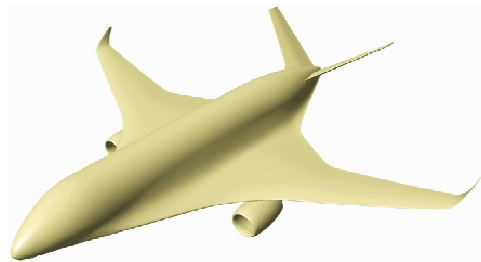


图 1 基于飞翼的非常规/常规融合布局支线飞机  
Fig. 1 Blended configuration with unconventional and conventional based on flying wing of regional aircraft

### 3 设计方法及迭代过程

根据图 1 所示的布局外形特点,构造参数化的三维数模,采用工程迭代设计的方法,分为两个研究阶段,不断调整和优化主要总体气动外形参数,先后形成七十多个飞机方案构型,进行详细的气动特性及其他相关评估,最后得到具有显著气动性能收益的非常规/常规融合布局支线飞机外形方案。

第一阶段为方案选型设计,通过改变设计参数进行足够规模的选型设计迭代,对比分析不同外形参数的调整、气动外形建模方式的改变所得到的一系列设计方案,经过迭代形成较优的方案。这一阶段的工作重点是通过一轮一轮的设计迭代,因此需要关注各个设计方案所能达到的气动力指标之间的相对优劣关系和幅度。随着设计迭代的进行,设计方案的气动性能得到不断提高和改善,最后完成新型支线客机非常规布局外形方案的冻结。

第二阶段工作将集中在对冻结方案进行初步的性能评估计算,主要结构、装载、系统初步布置等方面,形成初步的总体设计方案,并给出新型支线客机采用非常规布局之后相对于常规布局设计方案所能获得的收益,以及可能付出的代价。

在气动计算方法方面,本文混合使用 Euler 方法和 RANS 方法,在获取迭代方案气动性能提升增量时采用具有较高效率的 Euler 方法,而在需要获得较为准确的气动数据时则采用 RANS 方法。

### 4 融合布局方案气动特性

最终得到的非常规/常规融合布局支线飞机外形方案的巡航气动特性分别如图 2~图 5 所示。

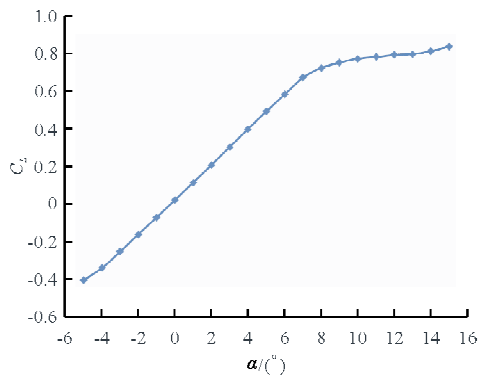


图 2 巡航状态升力系数曲线

Fig. 2 Lift coefficient of cruise status

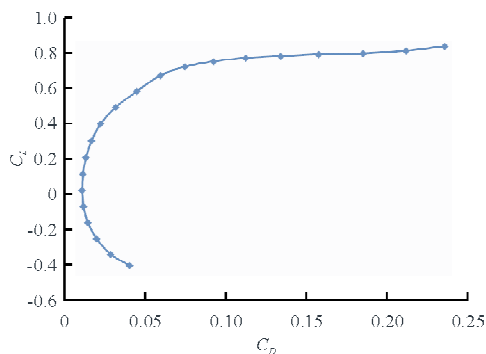


图 3 巡航状态极曲线

Fig. 3 Polar curve of cruise status

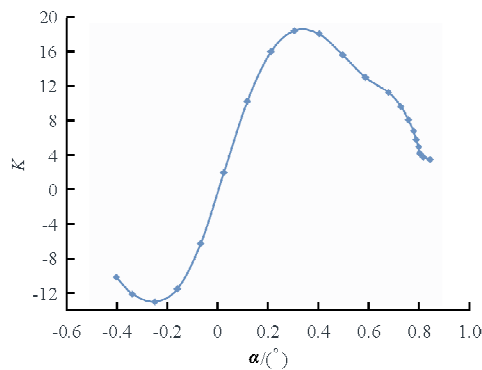


图 4 巡航状态升阻比随迎角变化曲线

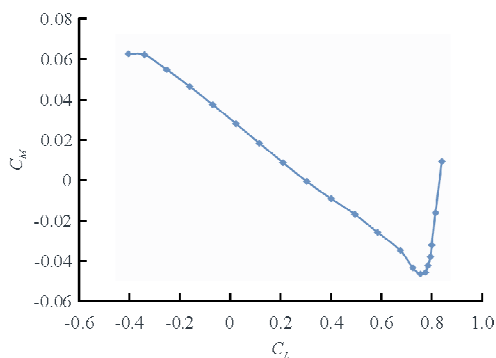
Fig. 4  $L/D$  ratio vs  $\Lambda o \Lambda$  of cruise status

图 5 巡航状态俯仰力矩随升力变化曲线

Fig. 5 Pitch moment vs lift of cruise status

从图 2~图 5 可以看出:该方案在  $Ma=0.78$  巡航状态下的巡航升阻比为 18.59(巡航升力系数为 0.303),巡航效率因子为 14.5,巡航状态静稳定度约为 9.5%,在同等飞行条件下,其巡航升阻比较相同类型的新一代支线客机<sup>[13-14]</sup>(如 C100 系列)提高了约 7.5%,显示了非常规/常规融合布局的发展潜力。

从图 2 可以看出,升力系数在 0.7 之前保持了良好的线性度。同时,从图 5 可以看出:在此升力系数之前俯仰力矩也具有良好的线性关系;在升力系数达到 0.7 之后,俯仰力矩呈现了比较严重的上翘现象,但此时的升力系数已超过巡航设计升力系数的 2.3 倍,因此这种力矩上翘现象不影响设计方案的可行性。

以  $\Delta C_D/\Delta Ma > 0.1$  作为阻力发散判据,定巡航升力系数的阻力发散曲线如图 6 所示。

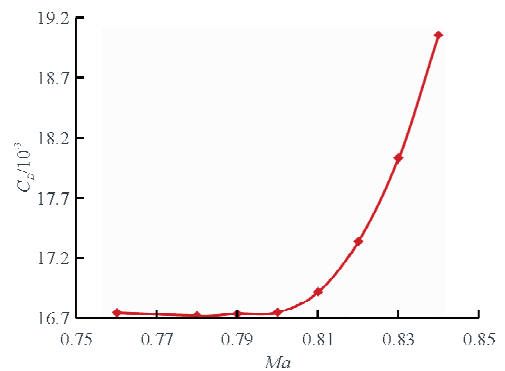


图 6 阻力发散曲线

Fig. 6 Curve of drag divergence

从图 6 可以看出:非常规/常规融合布局方案的阻力发散马赫数介于 0.83 和 0.84 之间,比新一代常规布局支线客机提高大约 2.5%,表明在巡航马赫数 0.78 附近的一个较大范围内飞机都具有较高的巡航效率,因而飞机的巡航效率对于巡航速度是稳定的。

巡航效率因子随马赫数的变化曲线如图 7 所示,可见巡航效率因子在马赫数 0.81 附近达到最大值 14.5,较新一代常规布局支线客机提高了约 7.5%,表明飞机具备在更高速度条件下更高效的巡航能力。

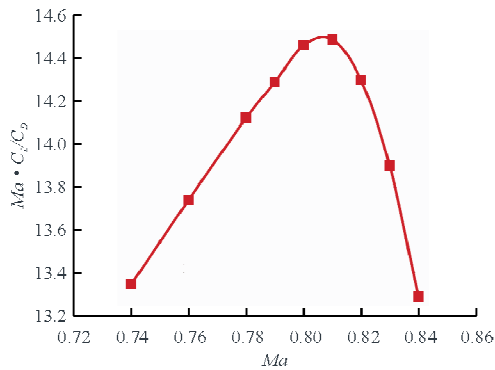


图 7 巡航效率因子随马赫数变化曲线

Fig. 7 Cruise efficiency factor vs Mach number

## 5 基本飞行性能分析

与相类似的新一代常规布局支线飞机(如 C100 系列)相比,在航程和油耗方面均有不同程度的改善。本文研究所得到的设计方案标准商载 1 200 n mile 航程油耗为  $5.097 \times 10^3$  kg,较常规布局低 5.5%,每架次飞行将节约燃油 297 kg;转场航程 8 126 km,较常规布局高 31.4%。

在起降性能方面,该方案的起飞地面滑跑距离为 891 m,较常规布局缩短 9.4%;起飞离地速度(海平面高度)降低到了 216 km/h;飞机离地时的升力系数为 0.9,飞机接地时的升力系数为 1.4。起降状态升力系数的较大幅度缩减,可降低缝翼和襟翼的设计难度<sup>[15]</sup>。根据估算,采用简单开缝式襟翼系统就可满足飞机正常起降的要求,也起到了降低飞机成本,提高经济性的作用。

## 6 机场适应性

地面服务车辆包括:乘客登机桥或登机梯,厨房服务车,供水车,地面电源车,空调车,加油车或加油管,行李货物装卸车,卫生间清理车等。上述车辆设备同时接近飞机,就必须有各自的路线和位置,不能相互干扰,更不能互相碰撞或碰撞飞机。除了客舱舱门外,货舱门的布置也应考虑这些方面的要求。

经过模拟机场适应性测试,现有的机场设备可以完全发挥其作用,不需另外设计相匹配的服务车辆等后勤设备,地面服务车辆的布局如图 8 所示,全机数字样机模拟场景如图 9 所示,模拟结果表明

本文的非常规/常规融合布局方案与现有机场地面设施完全兼容。

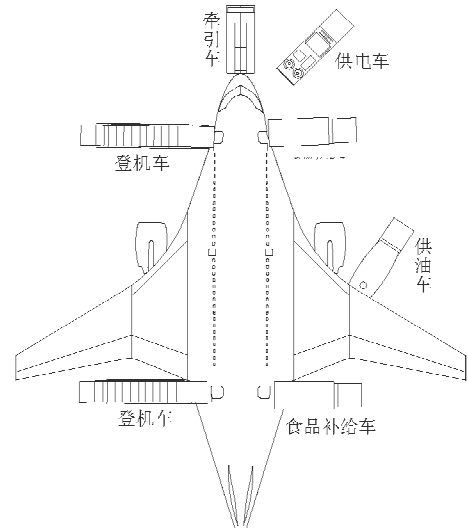


图 8 机场地面服务车辆布局

Fig. 8 Layout of service car on airport

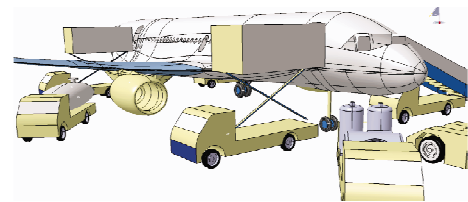


图 9 地面服务车辆数字样机模拟场景

Fig. 9 Simulation scene for service car on airport

## 7 结束语

本文提出并研究了一种基于飞翼的非常规/常规融合式气动布局方案,其利用非常规布局所带来的在气动性能方面的优点的同时,在一定程度上回避了非常规布局所带来的问题,通过详细的设计和气动分析,表明其可以应用于支线运输类飞机,并具有较同类常规布局飞机更高的性能。

综上所述,本文针对新概念运输飞机的研究达到了预期目的,表明较小尺寸的支线飞机也可以通过采用非常规布局提高其性能,但所采用的非常规布局形式需要异于大型运输类飞机。这些研究为未来非常规布局运输飞机的研究和发展奠定了一定的基础。

## 参考文献

- [1] Collier F. Overview of NASA's environmentally responsi-

- ble aviation (ERA) project [C] // NASA Environmentally Responsible Aviation Project Pre-Proposal Meeting. Washington, DC., 2010.
- [2] Qin N, Vavalle A, Le Moigne A, et al. Aerodynamic considerations of blended wing body aircraft [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2004, 40(6): 321-343.
- [3] Bolsunovsky A I, Buzoverya N P, Gurevich B I, et al. Flying wing-problems and decisions [J]. Aircraft Design, 2001, 4(4): 193-219.
- [4] Esteban S. Static and dynamic analysis of an unconventional plane-flying wing [R]. AIAA-2001-4010, 2001.
- [5] Mukhopadhyay V. Blended wing body (BWB) fuselage structural design for weight reduction [R]. AIAA-2005-2349, 2005.
- [6] Mukhopadhyay V, Sobieszczanski-Sobieski J, Kosaka I, et al. Analysis, design and optimization of non-cylindrical fuselage for blended-wing-body (BWB) vehicle [R]. AIAA-2002-5664, 2002.
- [7] Dmitriev V G, Shkadov I M, Denisov V E, et al. The flying wing concept the challenge for the future [R]. AIAA-2003-2887, 2003.
- [8] 方宝瑞. 飞机气动布局设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1997.
- Fang Baorui. Design for aircraft aerodynamic configuration [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [9] 程不时. 飞机设计手册: 第5册——民用飞机总体设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2005.
- Cheng Bushi. Manual of aircraft design: Volume 5—conceptual aircraft design for civil aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [10] 张锡金. 飞机设计手册: 第6册——气动设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- Zhang Xijin. Manual of aircraft design: Volume 6— aerodynamic design [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [11] Liebeck R H. Design of the blended wing body subsonic transport [J]. Journal of Aircraft, 2004, 41(1): 10-25.
- [12] Mialon B, Hepperle M. Flying wing aerodynamics studies at ONERA and DLR [R]. CEAS/KATnet Conference on Key Aerodynamic Technologies, 2005.
- [13] Marsh G. Bombardier throws down the gauntlet with CSeries airliner [J]. Reinforced Plastics, 2011, 55(6): 22-26.
- [14] Dillner B, May F W, McMasters J H. Aero-dynamic issues in the design of high-lift systems for transport aircraft [R]. Seattle WA: Boeing Military Airplane Corporation, 1984.
- [15] McDonald N, Fuller R. The management of safety on the airport ramp [J]. Aviation Psychology in Practice, 1994, 23(4): 148-157.

#### 作者简介:

**王钢林**(1975—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞机总体设计,新概念飞行器、飞机设计方法。

**楚亮**(1980—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞机总体设计、飞机气动布局设计。

**白俊强**(1971—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:飞行器总体及气动设计、计算流体力学。

**华俊**(1955—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:飞行器气动设计、机翼防冰系统数值模拟、计算流体力学与控制系统耦合。

(编辑:赵毓梅)