

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2021.01.008

单通道窄体客机气动设计技术分析

赵长辉* 宋凯 王猛 赵婷 任璐璐

(中航沈飞民用飞机有限责任公司工程研发事业部, 沈阳 110169)

摘要: 气动设计是单通道窄体客机的重大关键技术,对飞机性能影响重大。初步梳理和简要分析窄体客机的气动设计技术,主要方法是典型机型的实例研究和相关数据统计分析和对比,内容包括机翼气动设计、增升装置、翼梢小翼、CFD 技术应用等。机翼气动设计分析部分首先概述设计重要性和要求;之后给出典型飞机机翼气动设计实例及主要参数统计数据,包括翼型、平面形状、飞机性能参数等;列出机翼内段-翼根区域气动设计、短舱-吊挂-机翼一体化设计等设计研究课题并简析。增升装置部分首先分析设计难点和问题,之后统计分析波音 737 和 A320 各代机型的增升装置设计,包括前缘后缘增升装置类型和主要参数等。翼梢小翼部分给出融合式小翼、双羽小翼减阻数据和展向升力分布改善图。最后简要介绍了波音公司、空中客车公司和我国 CFD 技术发展应用情况。

关键词: 单通道窄体客机;气动设计;增升装置;CFD

中图分类号: V271.1

文献标识码: A

OSID:



0 引言

气动设计是单通道窄体客机的关键技术,对飞机性能影响重大。单通道窄体客机目前已经发展到了第三代,每一代飞机的气动设计技术都有一定突破,保证飞机性能的全面提升。

本文主要梳理和初步分析窄体客机的气动设计技术,主要方法是典型机型的实例研究和相关数据统计分析,内容包括机翼气动设计、增升装置、翼梢小翼和 CFD 技术应用等。

1 机翼气动设计

1.1 重要性和设计要求

机翼气动设计至关重要,飞机气动效率和性能提升很大程度上取决于机翼气动设计。各代各型窄体客机设计上的进步突出体现在机翼气动设计上。

飞机各飞行阶段单发失效最小爬升梯度等安全

性要求,巡航、续航、起降、爬升和高度等关键性能,与机翼面积、展弦比、后掠角、相对厚度等主要参数选择,三维气动外形设计,增升装置(高升力系统)、操纵面以及翼梢小翼设计密切相关。

高亚声速窄体客机机翼设计要具有较高的阻力发散马赫数 M_{dd} 和巡航马赫数、巡航效率因子 $M(L/D)_{max}$ 和抖振边界。

据统计,目前窄体客机 M_{dd} 达到 0.90 左右,最大使用马赫数 M_{MO} 0.82 以上,设计巡航马赫数约 $M0.78 \sim 0.80$,相较于之前的 $M0.74 \sim 0.76$ 有所提高。例如波音 737 Classic 飞机远程巡航速度为 $M0.745$,737NG 飞机提高到 $M0.785^{[1]}$ 。

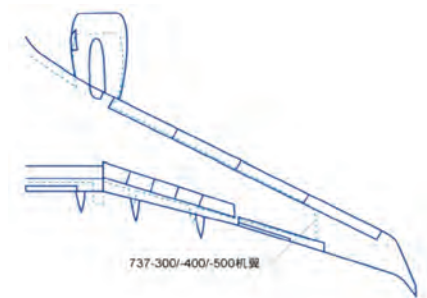
1.2 设计实例和统计数据

窄体客机机翼设计一般分成两侧外翼+中央翼(中机身内),机翼整体油箱设计上要满足飞机载油量要求,需要提供大的内部装油空间。

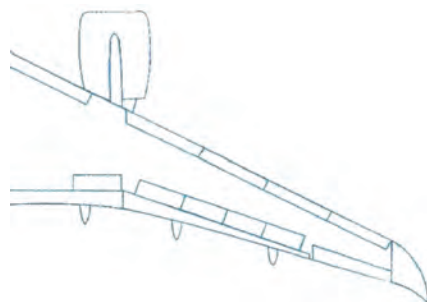
窄体客机外翼平面布置见图 1,各型飞机机翼基本平面外形和布置相似度较高。

* 通信作者。E-mail: zch-sac@163.com

引用格式: 赵长辉,宋凯,王猛,等.单通道窄体客机气动设计技术分析[J].民用飞机设计与研究,2021(1):56-63. ZHAO C H, SONG K, WANG M, et al. Aerodynamics design of single-aisle narrow body airliner[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2021(1):56-63(in Chinese).

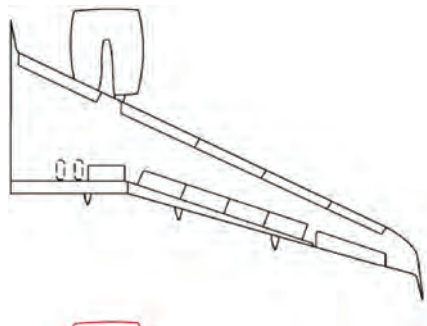


(a) 波音 737NG

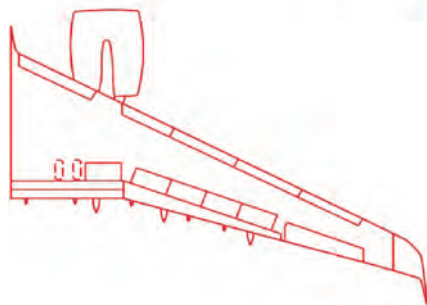


(e) C919

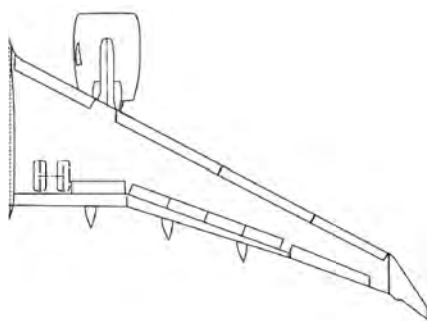
图 1 窄体客机的机翼平面布置图



(b) A320neo 和 A321



(c) A220(C 系列)



(d) MC-21

波音 737 前两代机型采用尖峰翼型,波音 737NG 机翼外侧采用超临界翼型。A320 采用 D57S 超临界翼型,相对厚度与 A310 相同,但是后梁之后的厚度加大 30%,以便有足够空间容纳襟翼及其操纵系统。A220、MC-21 和 C919 飞机普遍采用新一代超临界翼型。

窄体客机机翼平面形状都为双梯形,内段为直角梯形,外段为高向尺寸较大的斜梯形,内段和外段分界是发动机短舱。内段通常布置小弯度(甚至反弯度)翼型,外段布置基本工作翼型。从整体上看是平直后掠前缘;后缘带有转折,内段平直(无后掠角),外段后掠。中等后掠角,1/4 弦线后掠角($\Lambda_{1/4}$)和前缘后掠角一般分别为 25° 和 28° 。上反角约 $5^\circ \sim 6^\circ$ 。展弦比约 9~12。增大展弦比可以有效提高气动效率,但是受到结构设计和翼展限制,随着结构技术进步,特别是复合材料结构机翼可以采用更大展弦比。

直角梯形机翼内段气动上的好处是后缘襟翼无后掠角,效率提高,升阻特性改善。根弦加长,减小了根部上表面的相对厚度,并使最大厚度弦向位置前移,这些对高速流动特性的改善,足以抵消因后掠减小对 M_{dd} 的影响。这种平面形状还可变换成根部翼型或切面外形的后缘修形,使之有利于升阻比的提高。从结构角度,这种形状有利于结构和起落架布置,改善受力形式和增大根部有效空间。

机翼前后缘有增升装置(高升力系统)和操纵面。增升装置一般为前缘缝翼和后缘襟翼(内侧和中部)。后缘外侧为副翼。后缘襟翼(一般分为内外两段)前缘布置 4 块~5 块扰流板,内侧扰流板用作减速板,外侧扰流板用于辅助副翼进行滚转操纵,着陆阶段扰流板一起用作减速板。

系列化机型的机翼一般采用基本相同的机翼,实现高通用性。A321 飞机相对于 A320 飞机,最大起飞重量增大约 20%,将单缝襟翼增加后缘子翼成为双缝襟翼,扩大机翼面积,同时调整操纵面、增升装置布局,以满足起降性能要求。

表 1 给出几种窄体客机的机翼和飞机性能参数数据,可以初略看出新研机型机翼气动力设计优于老一代机型。

表 1 窄体客机机翼参数和飞机性能参数

	波音 737-8	A320neo	A220-300	C919
面积/ m^2	127.0	122.4	112.3	126.1
翼展/m	35.92	35.80	35.10	35.80
展弦比	10.1	10.5	11.0	10.2
$W/S/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	647	645	622	613
M_{cru}	0.788	0.78	0.78~0.82	0.785 [*]
M_{MO}	0.82	0.82	0.84 [*]	0.82 [*]
$V_{\text{app}}/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	240 [*]	244		240 [*]
H_{max}/m	12 497	12 310	12 497	12 130
H_{oei}/m		5 945		6 095
H_{icru}/m	10 942 [*]	10 820		
L_{TFL}/m	2 134	2 160 ¹	1 890	2 200
L_{LFL}/m	1 500	1 530 ¹	1 509	1 800 [*]

注: * 估计值;¹ A320 数据, V_{app} 进场速度, H_{max} 最大适航审定高度, H_{oei} 单发升限, H_{icru} 初始巡航高度, L_{TFL} 起飞平衡场长, L_{LFL} 着陆平衡场长。

1.3 一些设计难点问题

机翼内段-翼根区域气动设计的好坏对整机气动特性特别是升阻特性有很大影响。高马赫数以后,设计得不好将使根部区域的等压线后掠角大为减小,在比较小的迎角下就出现激波并引起复杂的激波-边界层干扰,导致分离抖振,使整机性能恶化。在高 M 数、低 C_L (快速下降) 状态下,短舱内侧机翼下表面可能出现局部流速过高而引发一系列问题。

对于翼吊发动机布局,发动机短舱及吊挂与机翼一体化设计是一个重要问题,也是飞机推进系统一体化设计的重要内容,在这一领域世界领先飞机企业、研究机构等开展了大量研究工作,取得重要成果,有力支撑先进民用客机产品发展^[2-6]。

发动机短舱-吊挂与机翼一体设计高度复杂,设计不好会降低飞机气动特性和飞行性能,甚至造成重大问题,这方面不成功的例子是波音 737max 飞机。波音 737max 飞机为安装大直径、高涵道比发动机,不得不将短舱安装位置前移和上移,见图 2,结果带来复杂的气动力和操纵特性变化问题,保证稳定性的 MACS 控制系统设计不完善导致严重事故。

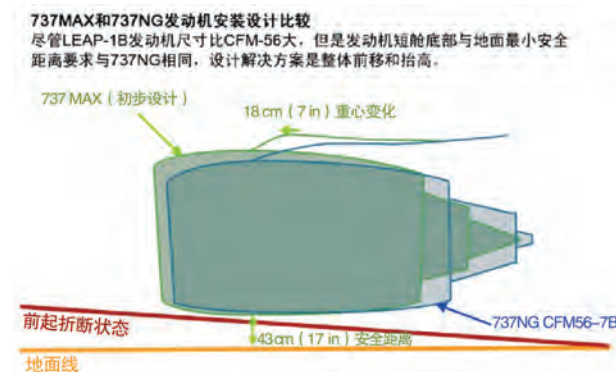


图 2 波音 737max 短舱吊挂设计更改

气动和结构综合优化设计、气动-结构耦合设计是机翼设计近期重要研究内容,国内外学术界做了很多研究工作^[7-8]。

2 增升装置

增升装置(高升力系统)是飞机起降性能和爬升性能的重要保证,在起飞、爬升、进场、着陆等阶段提供足够高的升力系数,以实现起飞着陆性能要求和适航要求,例如单发失效条件的爬升梯度等要求,噪声要求。

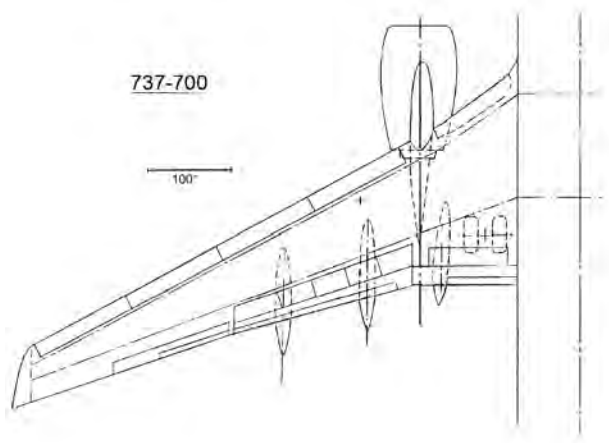
增升装置设计和布局上要与机翼气动力设计、结构设计和飞机总体设计充分协调。带有增升装置的多段翼型要进行精细优化设计,机翼翼型后缘区域厚度充分考虑后缘襟翼系统形式选择和布置要求。后缘较薄的超临界翼型不利于后缘襟翼布置, A320 系列飞机机翼后缘进行增厚处理。机翼发动机吊挂-短舱布置展向阻断增升装置,发动机尾喷流对襟翼气动特性和噪声特性有直接影响。发动机反推力装置工作状态下与襟翼的相互作用也比较复杂^[9-10]。

前后缘增升装置都需要作动系统,作动系统不能过于复杂,应做到使用维护简单,维修保障成本相对较低。尺寸要适当小、重量轻,包容运动机构的整

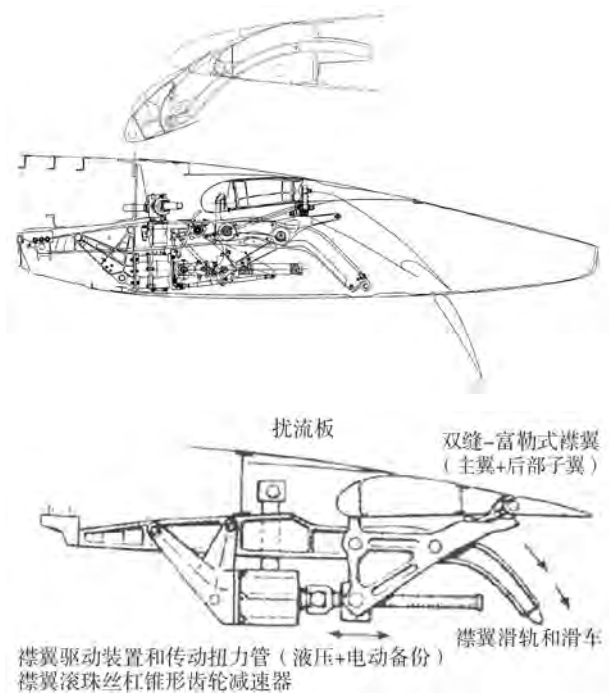
流罩的数量尽可能少,减小阻力代价。

窄体客机增升装置设计上在保证各方面要求的前提下,呈现逐步简单化的趋势。

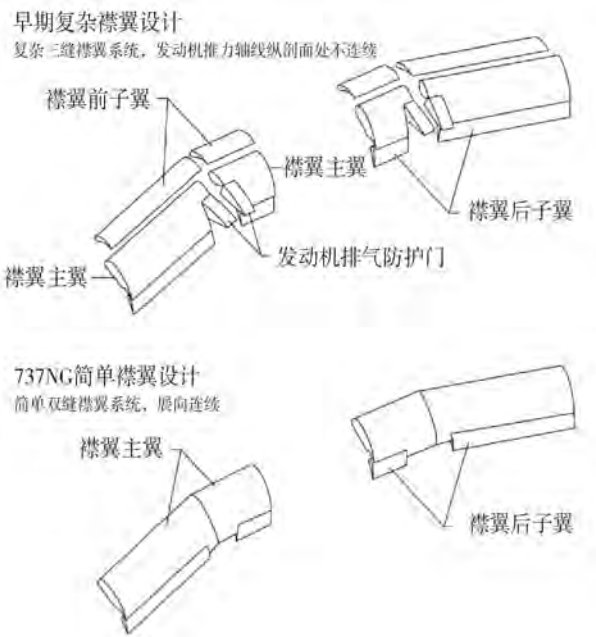
波音 737 第一代和第二代机型采用三缝襟翼 + 克鲁格襟翼(短舱内侧) + 前缘缝翼(短舱外侧)设计,尽管效率较高,但是系统复杂。第三代的波音 737NG 飞机采用双缝襟翼(主翼 + 后部子翼) + 前缘克鲁格襟翼(内侧,1 段)和缝翼(外侧,4 块)的设计,增升装置进行全面优化,取得了满意的效果。波音 737NG 飞机增升装置设计见图 3。



(a) 平面图



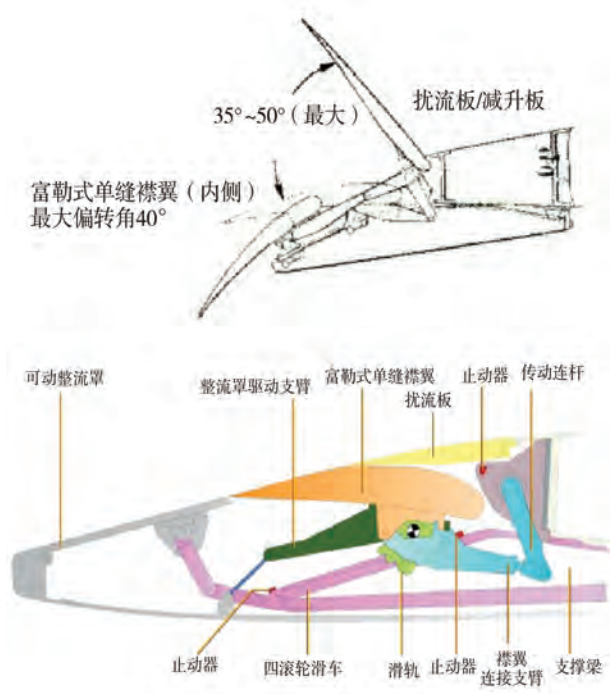
(b) 后缘双缝襟翼和前缘缝翼设计细节(外侧机翼)



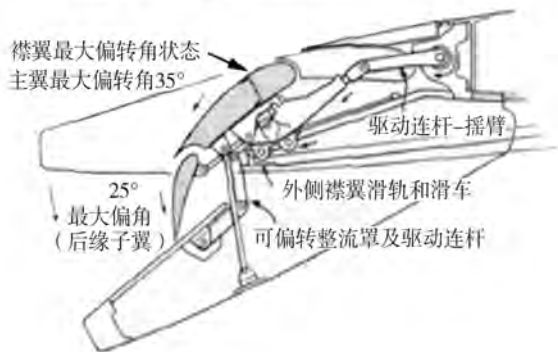
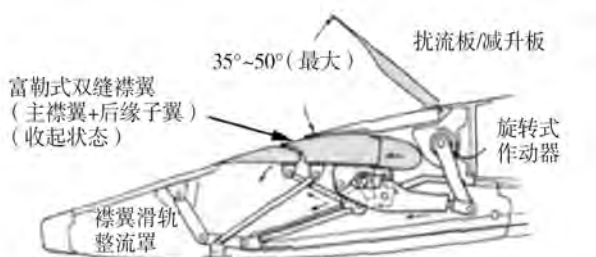
(c) 相对于上一代飞机的改进情况

图 3 波音 737NG 飞机增升装置设计

A320 飞机采用富勒式单缝襟翼(内外两段) + 前缘缝翼(5 段)设计。A321 改为富勒式双缝襟翼(主翼 + 后部子翼) + 前缘缝翼(5 段)。A321 增升系统有效提升了 C_{L0} 和 C_{Lmax} , 保证飞机性能。A320 和 A321 飞机增升装置设计见图 4。



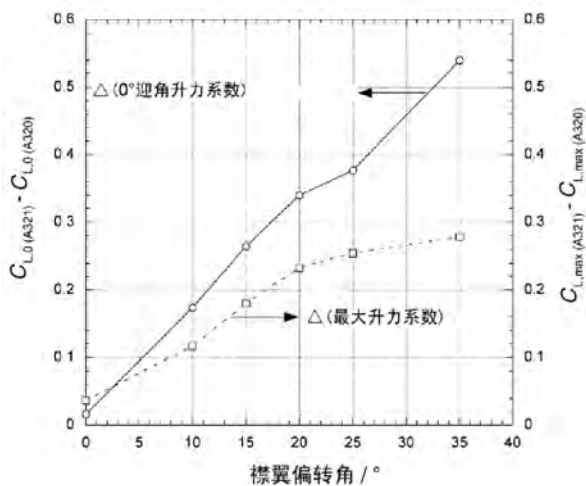
(a) A320



(b) A321



(c) A320/A321 前缘缝翼



(d) C_{L0} 和 C_{Lmax} 增大情况

图 4 A320 和 A321 飞机增升装置设计

A320 和 A321 飞机的单缝襟翼和双缝襟翼前部 (弦向) 有较大部分处于固定后缘和扰流板下方, 具有富勒式襟翼的一些特征和特性, 因此称之为富勒

式单缝-双缝襟翼。A321XLR 最新改型飞机的内侧襟翼改为单缝式, 简单化设计的目的是减重和降低维护成本。设计上借助 CFD 技术获得最佳设计方案, 并借鉴了 A350 的设计。

A220、MC-21 和 C919 飞机采用与 A320 近似的增升装置设计^[11]。

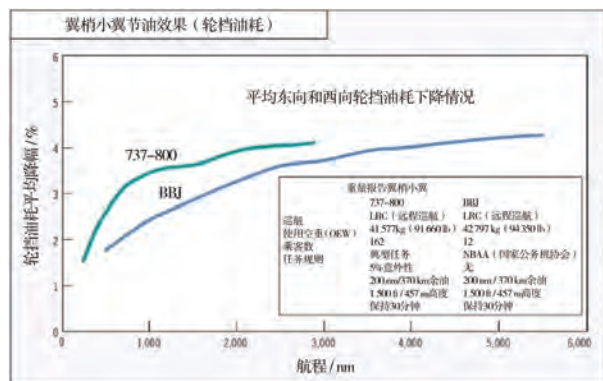
3 翼梢小翼

窄体客机机翼普遍安装翼梢小翼来减小诱导阻力, 提高气动效率。翼梢小翼作用机理: 1) 端板效应, 阻挡机翼下表面扰流, 削弱翼尖涡强度, 增大机翼有效展长/展弦比; 2) 耗散主翼翼尖涡效应; 3) 增大机翼升力及前向推力, 改变机翼展向升力分布, 增大升力, 小翼升力有前向推力分量; 4) 推迟翼尖气流过早分离, 提高失速迎角。加装翼梢小翼后, 机翼载荷分布发生变化, 机翼相关结构要进行加强。

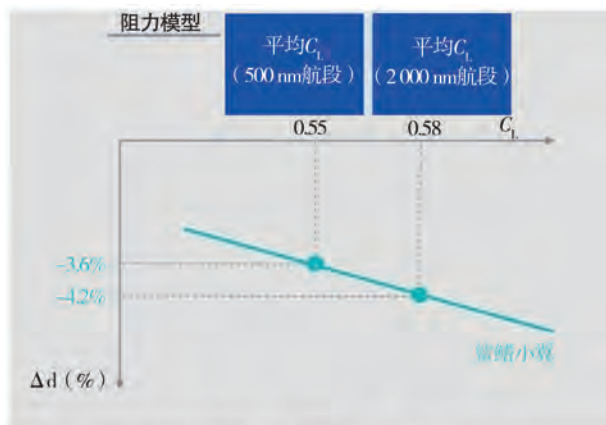
A320 飞机最初装比较特殊的尺寸, 是相对较小的翼梢端板, 与翼梢小翼相比, 翼梢端板在非设计状态仍有较好地减阻效果, 侧风进场时不会失速。

波音 737NG 和 A320neo 采用尺寸较大的融合式翼梢小翼, 减阻效果约 3% ~ 4%^[12-13]。波音 737max 飞机采用与 MDXX 飞机 (原麦道公司 1990 年代的设计方案) 相近的双羽小翼, 小翼有上下两片, 下翼片尺寸小、外倾角大。与融合式翼梢小翼相比, 双羽小翼上下翼片气动力更好平衡, 展向分布改善, 再加上自然层流技术的采用, 减阻约 1.5% ~ 1.8%。

波音公司和空中客车公司的相关资料, 给出了翼梢小翼的减阻效果数据, 见图 5。



(a) 波音 737NG



相对于安装翼梢端板（WTD）的情况阻力减小大约4%
空客公司进行的两轮飞行试验得到的数据（2006和2008年）

(b) A320

图5 融合式翼梢小翼减阻效果

波音 737 双羽翼梢小翼、融合式翼梢小翼改善机翼展向升力分布的效果见图6。

4 CFD 技术应用

CFD 技术在现代飞机气动设计方面发挥越来越大的作用,CFD 技术水平的高低可以说对民用飞机产品气动性能有决定性的影响。美国和欧洲的 CFD 技术一直处于世界领先水平。波音公司、空中

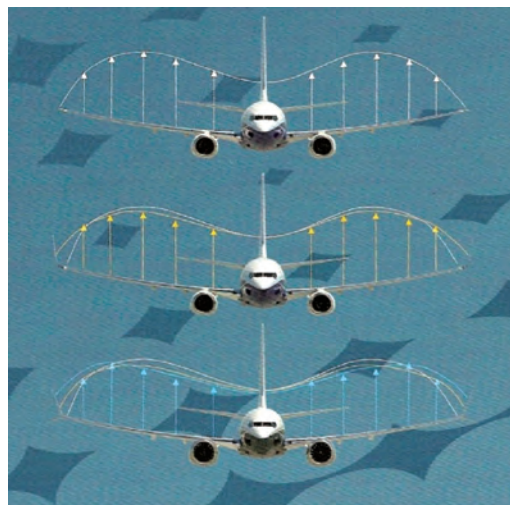


图6 翼梢小翼改善机翼展向升力分布

客车公司两大巨头在民用客机 CFD 气动设计领域行业领先,庞巴迪、巴航工业的 CFD 技术水平也较高^[14-19]。

1980 年代,波音 737Classic 飞机改装大涵道比涡扇发动机,开发近距离耦合发动机短舱安装设计解决方案。通过 CFD 技术,成功揭示出气动机理。短舱-吊挂与机翼之间的干扰阻力是由于短舱-吊挂改变了机翼展向载荷分布因而产生诱导阻力和涡阻力造成的。通过 CFD 技术优化短舱-吊挂外形设计,

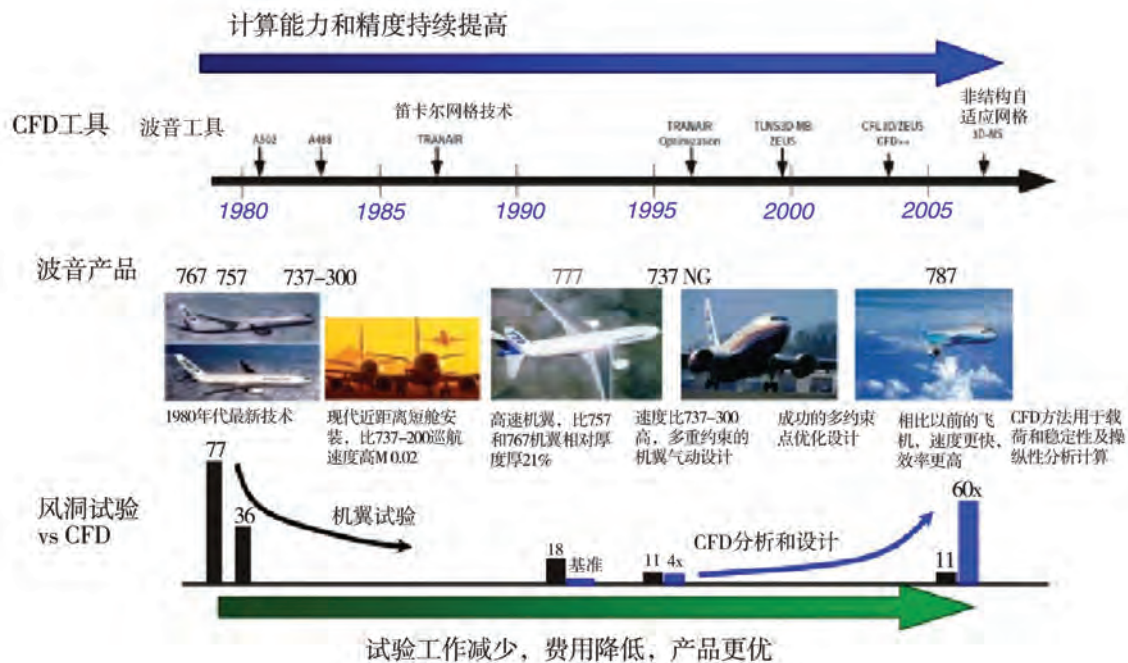
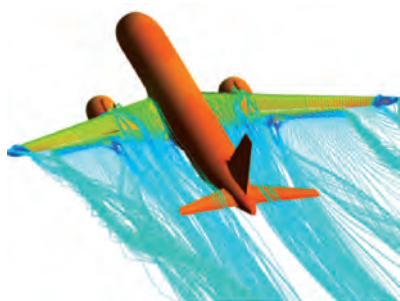


图7 波音公司客机 CFD 技术发展应用

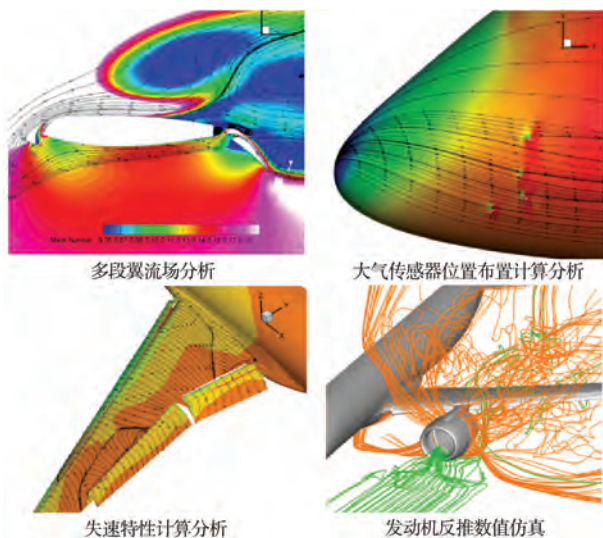
有效消除不利影响和降低阻力,取得了非常满意的结果。如果采用传统的风洞试验技术,耗时很长耗费巨大且不一定能取得满意结果。此后,波音公司的波音 777、737NG 和 787 不断扩大 CFD 技术的应用范围。波音公司 CFD 技术应用情况见图 7。

空客公司 A320、A330/340、A380、A350 等飞机项目上的 CFD 技术应用水平持续提高,有力支撑这些飞机实现气动性能行业领先。

我国 C919 飞机研制的各个阶段都广泛采用 CFD 技术,通过全国协作技术攻关,CFD 技术达到较高水平,保证了飞机设计目标的实现。C919 飞机 CFD 技术应用情况见图 8^[20]。



(a) 精细化计算



(b) 全机高速构型 CFD 计算

图 8 C919 飞机 CFD 计算和优化

5 结论

本文初步梳理和简要总结了单通道窄体客机的气动力设计技术,给出多种机型的气动力设计实例,并进行简单对比分析。

参考文献:

- [1] OBERT E. Aerodynamic design of transport aircraft [M]. Amsterdam: IOS Press, 2009.
- [2] HUREZ A. Recent progress on powerplant / airframe integration at aerospaciale matra airbus [EB/OL]. (2013-04-30) [2020-06-16]. http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2000/PAPERS/ICA0283.PDF.
- [3] EARLY K. Propulsion airframe integration design, analysis and challenges going into the 21st century [EB/OL]. (2013-04-30) [2020-06-16]. http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2000/PAPERS/ICA6103.PDF.
- [4] LI J, GAO Z H, HUANG J T, et al. Aerodynamic design optimization of nacelle/pylon position on an aircraft [EB/OL]. (2013-04-30) [2020-06-16]. <https://core.ac.uk/download/pdf/82731907.pdf>.
- [5] SAvELYEV A A, MIKHAYLOV S V, ZLENKO N A. Aerodynamic inlet design for civil aircraft nacelle [EB/OL]. (2014-12-08) [2020-06-16]. http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0308_paper.pdf.
- [6] BOPPE C W. Aerodynamic analysis for aircraft with nacelles, pylons, and winglets at transonic speeds [EB/OL]. (1987-09-10) [2020-06-16]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19870009105.pdf>.
- [7] REUTHER J J, ALONSO J J, MARTINS J R R A, et al. A coupled aero-structural optimization method for complete aircraft configurations [EB/OL]. (1999-12-10) [2020-06-16]. <http://aero-comlab.stanford.edu/Papers/martins.aiaa.99-.pdf>.
- [8] ROHL P J, MAVRIS D N, SCHRAGE D P. Combined aerodynamic and structural optimization of a high-speed civil transport wing [EB/OL]. (1995-05-20) [2020-06-16]. <https://pdfs.semanticscholar.org/1ed2/812042d0536e34e6bb6e53e3748bc45d8b5a.pdf>.
- [9] RUDOLPH P K C. High-lift systems on commercial subsonic airliners (NASA CR 4746) [EB/OL]. (1996-10-12) [2020-06-16]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19960052267.pdf>.
- [10] DAM C P V. The aerodynamic design of multi-element high-lift systems for transport airplanes [EB/OL]. (2002-01-12) [2020-06-16]. https://cafe.foundation/v2/pdf_tech/High.Lift/Elsevier.Prog.AS.HighLift.vDam.02.pdf.
- [11] 陈迎春, 李亚林, 叶军科. C919 飞机增升装置工程应用技术研究进展[J]. 航空工程进展, 2010(1):1-5.
- [12] Boeing Company. Blended winglet for improved airplane

- performance [EB/OL]. (2002-01-20) [2020-06-16]. http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_17/winglets.pdf.
- [13] Winglet. Winglet of Boeing 737s [EB/OL]. (2010-04-20) [2020-06-16]. <http://www.b737.org.uk/winglets.html>.
- [14] JAMESON A. Airplane design with aerodynamic shape optimization [EB/OL]. (2010-06-06) [2020-06-16]. <http://aero-comlab.stanford.edu/Papers/AirplaneDesignShanghai.pdf>.
- [15] Beihang. Impact of computational aerodynamics on aircraft design [EB/OL]. (2012-06-24) [2020-06-16]. <http://aircraftdesign.nuaa.edu.cn/aca/Slide/33-Impact%20of%20CFD%20on%20Aircraft%20Design.pdf>.
- [16] JOHNSON F T, TINOCO E N, YU N J. Thirty years of development and application of CFD at Boeing commercial airplanes, Seattle [EB/OL]. (2003-03-04) [2020-06-16]. <http://calmarresearch.com/NF/STG/AGPS/media/aiaa-2003-3439.pdf>.
- [17] MOITRA A, RANJAN R, KHARE A, et al. Viscous flow analysis of a twin-engine commercial transport aircraft in high lift landing configuration [EB/OL]. (1994-09-04) [2020-01-12]. https://www.princeton.edu/~skshah/papers/777_paper.pdf.
- [18] DOUGLAS N, BALL D N. Contributions of CFD to the 787 and future needs [EB/OL]. (2008-10-10) [2020-06-16]. <https://hpcuserforum.com/presentations/Germany/Boeing%20Ball%20IDC%20pdf.pdf>.
- [19] GREGG R (BCA Chief Aerodynamicist). CFD and aircraft design [EB/OL]. (2014-11-20) [2020-06-16]. http://aero-comlab.stanford.edu/jameson/aj80th/Gregg_AJ80_Nov20_2014.pdf.
- [20] 上海超算科技有限公司(SSCT). C919 大型飞机数值仿真 [EB/OL]. (2019-01-22) [2020-06-16]. <http://www.ssctech.net/newsitem/278335749>.

作者简介

赵长辉 男,本科,研究员级高级工程师,主要研究方向:飞机总体设计。E-mail: zch-sac@163.com

宋凯 男,本科,高级工程师,主要研究方向:飞机总体设计。E-mail: song.kai@sacc.com.cn

王猛 男,本科,高级工程师,主要研究方向:飞机总体设计。E-mail: wx330502wm@sina.com

赵婷 女,本科,高级工程师,主要研究方向:飞机总体设计。E-mail: zhao.ting@sacc.com.cn

任璐璐 女,本科,工程师,主要研究方向:飞机总体设计。E-mail: ren.lulu@sacc.com.cn

Aerodynamics design of single-aisle narrow body airliner

ZHAO Changhui * SONG Kai WANG Meng ZHAO Ting REN Lulu

(AVIC SAC Commercial Aircraft Company Ltd, Engineering R&D Division, Shenyang 110169, China)

Abstract: Aerodynamics design is one of critical technologies for single-aisle narrow body airliner (SANBA), which has a significant impact on aircraft performance. Aerodynamics design technologies of SANBA were summarized and analyzed preliminarily. The main methods are case study of typical aircraft and statistical analysis and comparison of relevant data, including wing aerodynamic design, high lift device, winglets, CFD technologies, etc. In the part of wing aerodynamic design and analysis, the importance and requirements of the design were summarized firstly; then, the aerodynamic design examples of typical aircraft wing and the statistical data of main parameters were given, including airfoil, plane shape and aircraft performance parameters; the design and research topics of the aerodynamic design for the inner part of the wing-wing root area, the integrated design of the nacelle-hang-wing were listed and analyzed. In the lift device, design difficulties and problems were analyzed firstly, and then the high lift device design of Boeing 737 and A320 generations was statistically analyzed, including the type and the main parameters of leading edge and trailing edge lifting device. In the winglet section, the drag reduction data of fusion winglet and double-feathered winglet and the improved spanwise lift distribution were presented. Finally, the development and application of CFD technology in Boeing, Airbus and China were briefly introduced.

Keywords: single-aisle narrow body airliner; aerodynamics design; high lift system; CFD

* Corresponding author. E-mail: zch-sac@163.com