航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Mar. 25 2019 Vol. 30 No.03 8-12

涡桨飞机发动机短舱气动改进设计研究

李星辉*，许瑞飞，张彦军，钱瑞战，雷武涛
航空工业第一飞机设计研究院，陕西 西安 710089

摘　要：本文通过数值计算方法，从上下安装位置和局部外形两个方面着手改进短舱，给出两个改进方案，兼顾高速气动特性和低速气动特性两个方面，全面改善飞机气动特性，降低了短舱对机翼气动特性的不利影响，并且总结出短舱的安装位置和外形分别对机翼高低速气动特性的影响规律，为涡桨飞机翼吊短舱的气动设计提供有利经验。

关键词：涡桨飞机；翼吊短舱；气动；优化；数值计算

中图分类号：V211　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.03.002

涡桨飞机以其低油耗低成本的良好经济性成为支线航空产业的重要力量，近年来重新得到重视[1]。翼吊短舱布局在涡桨飞机上应用广泛，这种布局具有很大优点，如发动机进气口不受机身或机翼尾流的干扰[2]，可以使发动机获得较高的进气效率，保证螺旋桨的高气动效率，螺旋桨引起的滑流对机翼带来增升效果[3]，自身重量(质量)也对机翼起到减载作用，并且有利于系统布置和发动机换装，因此，该布局在涡桨飞机上广泛应用，如支线客机ATR-72和Dash8-Q400都采用了这种短舱布局形式。但是翼吊短舱布局的缺点也是显而易见的。短舱直接与机翼相接，直接破坏了飞机翼缘外形和完整性；短舱增加了飞机迎风面积和表面积，显著增加了飞行阻力；短舱体积较大且距机翼非常近，不同于涡喷发动机通过挂架与机翼相连，这对机翼的气动力造成极大干扰，使得机翼附近的流场更加复杂。导致飞机在高速巡航阶段升阻比下降，低速起降阶段最大升力系数减小、失速迎角降低。由此可见，仅考虑结构形式和外形光顺而形成的短舱外形可能会严重影响飞机的气动特性。在飞机研发阶段中翼吊短舱外形和吊装位置需要精细的气动设计，将其不利影响最小化[4-6]。

民用涡桨飞机多数是20世纪80年代前完成研制的，设计手段相对落后，针对翼吊发动机短舱的优化设计多是针对喷气飞机[7,8]，少有针对涡桨飞机的翼吊短舱进行的气动影响研究。本文利用广泛应用于工程设计的基于雷诺平均(RANS)的纳维-斯托克斯(N-S)方程求解器进行数值模拟，对涡桨飞机翼吊短舱的外形与安装位置进行气动优化设计，从高速气动特性和低速气动特性两个方面分析总结翼吊短舱的安装位置和外形对飞机气动特性的影响，总结短舱气动优化的经验和方法。

1 数值方法

计算流体力学方法是飞机气动设计阶段的常用手段。基于雷诺平均的N-S方程求解器能够准确模拟定常流动下飞机的气动力和流场细节，已在工程设计中被广泛应用[9,10]。本文的数值方法即采用基于雷诺平均的三维积分N-S方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint Q\mathrm{d}V + \iint f\cdot \boldsymbol{n}\mathrm{d}S = 0 \tag{1}$$

式中：V为控制体体积，S为控制体表面，Q为守恒量，f为通过控制体表面S的无黏通量和黏性通量之和，$\boldsymbol{n}$为控制体表面的外法向单位矢量。以有限体积法构造空间半离散格式，无黏通量采用二阶Roe迎风差分格式离散，黏性项采用中心差分格式离散，计算采用SST湍流模型。

收稿日期：2019-01-22；退修日期：2019-02-08；录用日期：2019-02-25
*通信作者. Tel.：029-86832602　　E-mail：lxh2005011598@163.com
引用格式：Li Xinghui，Xu Ruifei，Zhang Yanjun，et al.Aerodynamic optimization design of turboprop engine nacelle[J].Aeronautical Science & Technology，2019，30(03)：8-12. 李星辉，许瑞飞，张彦军，等. 涡桨飞机发动机短舱气动改进设计研究[J]. 航空科学技术，2019，30(03)：8-12.

2 计算模型与网格

为了简化计算模型，本文选择翼身组合体加短舱的外形，并且不考虑横航向的气动力，模型只取半模以减小计算量。本文的计算网格采用点对点的多块结构化网格，近壁面网格进行“O”形网格加密，适应本文的流动问题和计算方法。计算网格如图1所示。并且不同短舱外形使用的计算网格拓扑相同，保证了除短舱局部外的计算网格不变，最大程度地减小了网格差异对计算结果的影响。

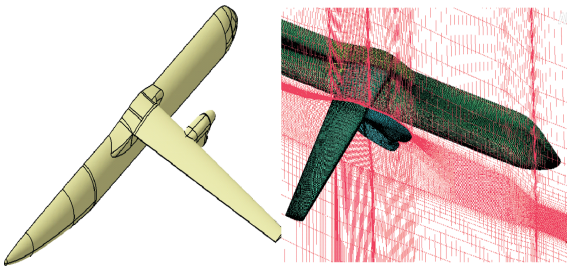


图1 计算模型与网格

Fig. 1 Calculation model and mesh

3 短舱气动优化与计算分析

3.1 初始短舱的气动影响

某涡桨飞机采用翼吊发动机，将短舱布置于机翼下方，短舱尺寸较大（如图2所示），通过上述数值方法获得短舱对翼身组合体的气动影响量，见表1。可见短舱使得低速失速迎角减小2°，最大升力系数减小0.14，巡航升阻比减小11%。可见短舱对机翼气动力的影响很大，需要气动优化来减小其不利影响。

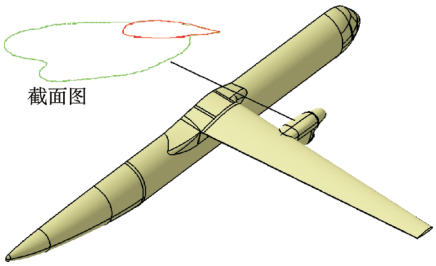


图2 机翼与短舱截面示意图

Fig. 2 Sketch map of wing and nacelle section

表1 初始短舱的气动影响量

Table 1 Aerodynamic impact of the original nacelle

	失速迎角（Ma=0.2）	最大升力系数（Ma=0.2）	巡航升阻比（Ma=0.5）
影响量	–2°	–0.14	–11.6%

3.2 优化设计思路

受飞机总体设计方案的限制，短舱的气动优化仅限于一定范围内的上下安装位置变化和外形改动。因此，本文设计了两种气动优化方案。

方案1：短舱下沉+局部修形方案。短舱下沉，尽量使短舱离开机翼，减少短舱对机翼的气动干扰，并对短舱和机翼连接处进行光顺。

方案2：短舱修形方案。短舱的上下安装位置不变，仅对短舱和机翼连接处进行外形修形，避免了短舱下沉造成的外露面积增大。

3.3 方案1计算结果

发动机的拉力轴线下沉一段距离并对短舱与机翼连接处进行修形，得到方案1的短舱外形，如图3所示。

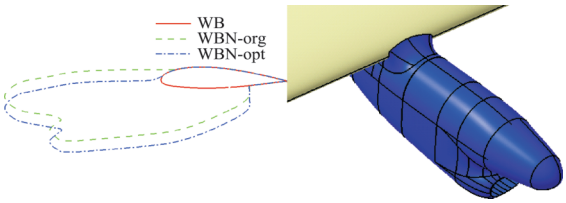


图3 方案1短舱的安装位置及外形示意图

Fig. 3 Position and sketch map of optimized model 1

表2给出了方案1的计算结果与初始短舱外形对翼身组合体的气动影响量对比。图4给出方案1与初始短舱的高低速气动力曲线对比。相比于初始短舱，方案1短舱使带短舱的翼身组合体的低速升力系数提高0.1，失速迎角提高2°，低速气动力改善效果显著，但是高速极曲线右移，巡航升阻比下降了1.1%，高速气动力更加恶化。

短舱下移后距离机翼更远，对机翼的前缘上洗效应减弱，图5取Ma=0.2，α=15°时的短舱两侧的机翼剖面压力系数曲线，对比可知，短舱下移后机翼的前缘低压峰值减小。图6对比了Ma=0.2，α=16°的上翼面的表面流线，可以看到短舱下移后短舱后机翼上翼面的流线展向扩散效果减弱。这些现象都使得局部气流更加稳定，利于提高失速迎角。经过短舱与机翼连接处的修形后，气流经过短舱上面与侧面后的交汇更加和缓，碰撞与剪切效应减弱，气流能量损耗减少，因此，上翼面失速发展也更加和缓，有利于推迟失速。

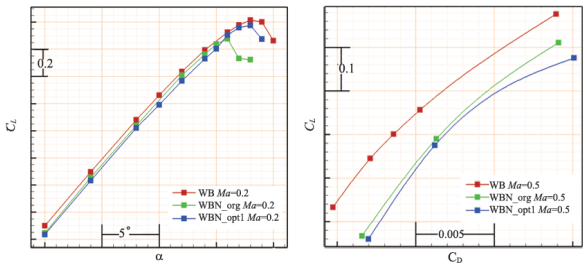
但是，短舱下沉造成短舱外露面积增加，因此，翼身组合体的形阻增加，并且如图7给出的Ma=0.5，α=2°时的下翼面后缘表面流线和短舱尾缘空间流线的对比所见，短舱下沉造成下翼面后缘的流动分离加剧，因此，压差阻力也有所增加，所以巡航状态的阻力系数增加，升阻比减小。

综上可见，方案1的短舱使得翼身组合体的低速气动特性有所改善，但高速气动特性恶化。并且由此可见，短舱的上下位置对翼身组合体的气动特性有很大影响，短舱下沉后有利于延缓失速，提高低速气动特性，但是增加了表面积和迎风面积，加剧了下翼面后缘分离，对高速气动特性有不利影响。

表2 方案1短舱的气动影响量

Table 2 Aerodynamic impact of optimized model 1

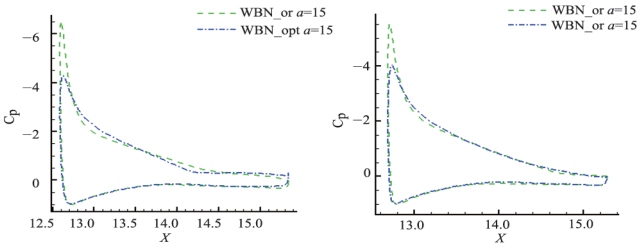
	初始短舱影响量	方案1短舱影响量	气动优化收益
失速迎角(Ma=0.2)	−2°	0°	2°
最大升力系数(Ma=0.2)	−0.14	−0.04	0.1
巡航升阻比(Ma=0.5)	−11.6%	−12.7%	−1.1%



(a) 升力系数曲线(Ma=0.2) (b) 升阻极曲线(Ma=0.5)

图4 方案1与原短舱的气动力对比

Fig. 4 Aerodynamic comparison of the original nacelle and optimized model 1



(a) 短舱内侧 (b) 短舱外侧

图5 方案1与原始短舱的机翼截面压力曲线对比

Fig. 5 Pressure coefficient lines comparison of the original nacelle and optimized model 1 section

3.4 方案2计算结果

鉴于短舱下沉对机翼的低速气动特性产生明显的不利影响，方案2保持短舱上下安装位置不变，仅对短舱上部及短舱与机翼交接处进行外形优化，将短舱“肩部”倒圆(图8)，短舱的上零纵线尽量压低。

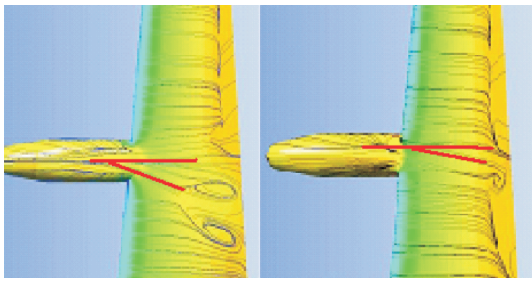


图6 方案1与原始短舱的上翼面表面流线 (Ma=0.2,α=16°)

Fig. 6 Streamlines of the original nacelle and optimized model 1(Ma=0.2, α=16°)

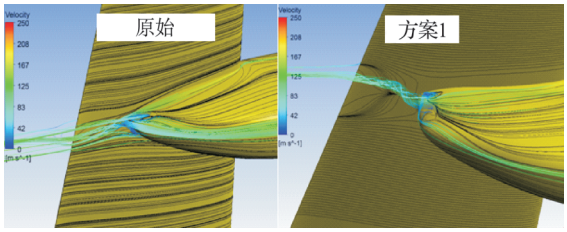


图7 方案1与原始短舱的下翼面后缘空间流线对比 (Ma=0.5,α=2°)

Fig. 7 Space streamlines of the original nacelle and optimized model 1(Ma=0.5,α=2°)

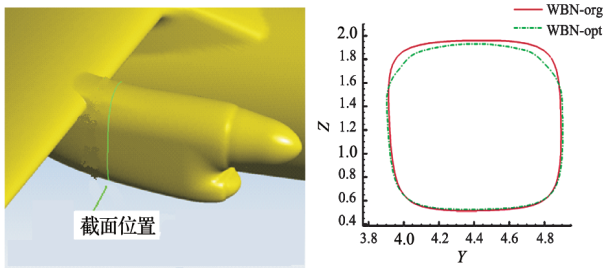


图8 方案2与原短舱的截面外形对比

Fig. 8 Section lines comparison of the original nacelle and optimized model 2

经过这样的修形后，如表3和图9所示，与初始短舱相比，方案2的低速失速迎角提高了1°，最大升力系数也提高了0.09，巡航升阻比提高0.9%，高低速气动特性均有所提高。

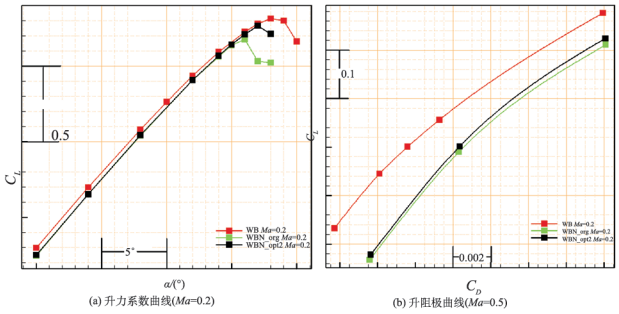
从图10的Ma=0.2，α=15°的空间流线对比可以看到，流经短舱上面和侧面的流线在短舱肩部交汇时的碰撞摩擦有所缓和，因此低速最大升力系数和失速迎角都有所提升，但收益不如方案1的明显。图11给出了Ma=0.5，α=2°时的上翼面流线对比，方案2的短舱使得上翼面后缘的分离区基本消失，因此高速状态的升阻比有所提高。

综上可见，通过短舱的局部修形可以同时改善机翼的

表3 方案2短舱的气动影响量

Table 3 Aerodynamic impact of optimized model 2

	初始短舱影响量	方案2短舱影响量	气动优化收益
失速迎角(*Ma*=0.2)	−2°	−1°	1°
最大升力系数(*Ma*=0.2)	−0.14	−0.05	0.09
巡航升阻比(*Ma*=0.5)	−11.6%	−10.7%	0.9%



(a) 升力系数曲线(*Ma*=0.2)　(b) 升阻极曲线(*Ma*=0.5)

图9 方案2与原短舱的气动力对比

Fig. 9 Aerodynamic comparision of the original nacelle and optimized model 2

高低速气动特性，兼顾了高速和低速的气动特性，但低速气动力的改善不如下沉短舱安装位置的效果明显。

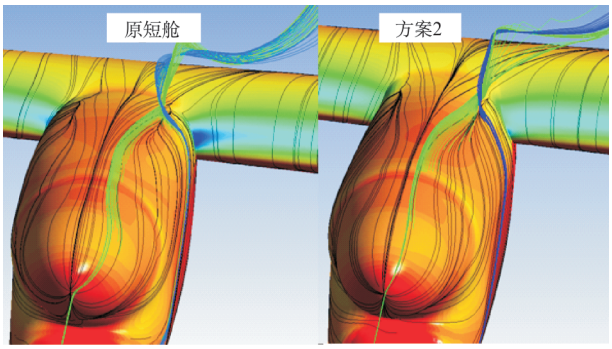


图10 方案2与原短舱的气动力对比（*Ma*=0.2,*α*=15°）

Fig. 10 Space streamlines of the original nacelle and optimized model 2 (*Ma*=0.2,*α*=15°)

4 结论

通过上述分析，可以得出以下结论：

(1)短舱的存在减小了翼身组合体的低速失速迎角和最大升力系数，降低了巡航升阻比，对翼身组合体的高低速气动特性造成了严重的不利影响。

(2)短舱下沉可以有效减小低速时机翼前缘上洗效应，削弱气流的展向流动，延缓失速，提高低速失速迎角与最大升力系数，但增大了表面积和迎风面积，恶化了机翼后缘的分离，降低了巡航升阻比，对高速气动特性不利。

(3)短舱肩部局部“倒圆”修形，使经过短舱的气流剪切碰撞的现象减弱，降低了能量损耗，利于流动稳定，减小流动分离，可以同时提高高速和低速的气动特性，但低速特性的改善不如下沉短舱位置的效果明显。

参考文献

[1] 周辉华.国外涡桨发动机的发展[J].航空科学技术,2013(1):18-22.
Zhou Huihua. The development prospect of turbo-propeller engines[J]. Aeronautical Science & Technology, 2013(1): 18-22.(in Chinese)

[2] 党铁红.翼吊布局民用飞机发动机安装设计[J].民用飞机设计与研究,2008(2):8-14.
Dang Tiehong. Wing mounted nacelle installation and design of civil aviation[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2008 (2): 8-14.(in Chinese)

[3] 蒋晓莉,杨士普.螺旋桨飞机滑流机理分析[J].民用飞机设计与研究,2009,9(4):34-38.
Jiang Xiaoli, Yang Shipu. Mechanism analysis of propeller slipstream [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2009, 9(4): 34-38.(in Chinese)

[4] 张宇飞,陈海昕,符松,等.一种实用的运输类飞机机翼/发动机短舱一体化优化设计方法[J].航空学报,2012,33(11):1993-2001.
Zhang Yufei, Chen Haixin, Fu Song, et al. A practical optimization design method for transport aircraft wing/nacelle integration[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(11):1993-2001.(in Chinese)

[5] 邱亚松,白俊强,黄琳,等.翼吊发动机短舱对增升装置气动特性影响研究[J].航空计算技术,2010,40(6):86-89.
Qiu Yasong, Bai Junqiang, Huang Lin,et al. Study on influence of wing mounted engine nacelle on aerodynamic performance of high lift system[J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40(6):86-89.(in Chinese)

[6] 邱亚松,白俊强,黄琳,等.翼吊发动机短舱对三维增升装置的影响及改善措施研究[J].空气动力学学报,2012,30(1):7-13.
Qiu Yasong, Bai Junqiang, Huang Lin, et al. Study on influence of wing-mounted nacelle on high-lift system and improvement measure[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(1): 7-13.(in

Chinese)

[7] 陈科甲,白俊强,朱军.发动机短舱对翼身组合体跨声速气动特性影响研究[J].航空计算技术,2010,40(1):63-66.
Chen Kejia, Bai Junqiang, Zhu Jun. Research on transonic aerodynamic performance impact of the engine nacelle[J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40(1): 63-66. (in Chinese)

[8] 雷熙薇,桑为民,段卓毅,等.运输机短舱挂架纵向位置优选数值研究[J].空气动力学学报,2011,29(5):658-663.
Lei Xiwei,Sang Weimin,Duan Zhuoyi, et al. Study on longitudinal optimum location of transport aircraft nacelle and pylons[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011,29(5): 658-663.(in Chinese)

[9] 马玉敏,张彦军. 高雷诺数下机翼表面层流段长度对减阻量的影响[J].航空工程进展, 2014,5(4):448-454.
Ma Yumin, Zhang Yanjun. Effect of laminar flow extent on wing surface on drag reduction at High Reynolds numbers[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014,5(4): 448-454.(in Chinese)

[10] 蒋彪,李杰.民机翼梢小翼气动特性数值模拟分析研[J].航空计算技术,2011, 41(1): 38-43.
Jiang Biao, Li Jie. Aerodynamic analysis of civil aircraft equipped with winglet on numerical simulation[J]. Aeronautical Computing Technique, 2011,41(1):38-43.(in Chinese)

作者简介

李星辉(1986—) 女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机气动设计。

Tel: 029-86832602 E-mail: lxh2005011598@163.com

Aerodynamic Optimization Design of Turboprop Engine Nacelle

Li Xinghui*, Xu Ruifei, Zhang Yanjun, Qian Ruizhan, Lei Wutao

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: In this paper, the nacelle position and configuration were optimized to improve the aerodynamic characteristics of the aircraft. Two different optimized nacelles are shown in the paper to indicate the nacelle aerodynamic impact to the wing. Meanwhile the aerodynamic characteristics of high speed and low-speed and mechanism of the wing-mounted engine nacelle were studied.

Key Words: turboprop; wing-mounted nacelle; aerodynamic; optimization; CFD

Received: 2019-01-22; **Revised:** 2019-02-08; **Accepted:** 2019-02-25

***Corresponding author.Tel. :** 029-86832602 **E-mail:** lxh2005011598@163.com