

大迎角下发动机尾吊布局公务机动力影响研究



张文琦,宋敏华,王浩

中国航空研究院,北京 100029

摘要:本文针对高速公务机尾吊动力的气动干扰问题,利用基于雷诺平均N-S方程的高可信度求解方法,对该种动力布局形式的动力影响进行了研究。通过对短舱通气及施加进排气条件两种不同状态的全机气动特性仿真对比,研究了发动机尾吊布局动力效应对全机起降状态气动特性的影响。结果表明,该种动力布局形式对机翼及平尾气流分离、全机的失速特性影响较小,发动机吸气效应可增大机翼后上部的气流流速,从而使全机升力曲线发生平移,纵/横/航向静稳定性增强。

关键词:计算流体力学;尾吊动力;动力效应;涡扇公务机

中图分类号:V211.3

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.06.002

发动机尾吊布局是当前高速公务机典型布局形式之一,采用该种动力布局形式的飞机发动机和机身之间距离较近,机身、机翼对发动机附近流场品质存在显著影响,此外,发动机安装与动力效应对飞机机翼、尾翼等气动部件,以及机身后体也存在明显干扰,从而影响飞机全机构型的气动特性,因此动力影响是飞机全机构型精细气动设计必须考虑的因素之一。

从20世纪80年代开始,美国国家航空航天局(NASA)兰利中心^[1]和航空宇宙技术研究所(NAL)^[2-3]对发动机的动力影响效应进行了试验和数值研究。21世纪初,国内李杰^[4-5]采用多块网格技术与边界层方程/欧拉方程耦合求解技术开展了翼吊式双发民机机体/动力装置的数值模拟,贾洪印等^[6-7]研究了进排气效应对机翼气动载荷的影响,并分析了发动机进排气效应对翼吊式和尾吊式两种典型民机构型气动特性的影响,乔磊等^[8]研究了喷流影响下大涵道比翼吊发动机挂架气动干扰的流动机理和挂架外形对大涵道比翼吊发动机喷流气动干扰的影响。聂雪媛^[9]研究了考虑弹性变形的发动机动力效应对民机全机气动特性的影响。党亚斌等^[10]研究了发动机安装效应对尾吊式民机推力预测的影响。高翔^[11]等研究了排气系统干扰阻力,建立了排气系统阻力增量的确定方法。周翰玮^[12]针对背撑发动机布置

的翼身融合布局民机,研究了包括喷流短舱及通气短舱的影响,短舱高度、展向位置、弦向位置等参数影响。杜玺^[13]等开展了考虑动力影响的自然层流短舱气动设计并进行了试验验证。顾文婷^[14]针对该类布局的民机研究了机体对发动机周围流场的干扰和安装效应对有效推力的影响。

目前,针对动力影响效应的研究大部分都针对巡航构型,而在起降阶段,尤其是起飞时,发动机功率大,进气道的捕获面积比大,相较于通气短舱,进排气效应显著,加剧了发动机和机体之间的流动干扰,因此,开展起降阶段的大迎角下动力影响效应研究具有重要的意义。本文考虑发动机进排气的影

1 数值方法

1.1 控制方程及其离散

本文的流动数值模拟基于积分形式的N-S方程,其形式为

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} Q dV + \iint_{\partial\Omega} \mathbf{F}(\mathbf{Q}) \cdot \mathbf{n} dS = \iint_{\partial\Omega} \mathbf{G}(\mathbf{Q}) \cdot \mathbf{n} dS \quad (1)$$

式中: Ω 为控制体, $\partial\Omega$ 是控制体的边界, $\mathbf{Q}=(\rho, \rho u, \rho v, \rho w, pE)$ 为流动的守恒变量, $\mathbf{n}$ 是网格面的外法线矢量, dS 表示面积分的微元。计算采用雷诺平均方法,采用的湍流模型为SA

收稿日期:2022-01-18;退修日期:2022-02-10;录用日期:2022-04-01

引用格式:Zhang Wenqi, Song Minhua, Wang Hao. Study on powered effects of a business jet with tail-mounted engines at high angle of attack[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(06):8-13. 张文琦,宋敏华,王浩. 大迎角下发动机尾吊布局公务机动力影响研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(06):8-13.

一方程模型,对流项空间离散采用Roe格式,时间离散采用隐式格式。固壁边界采用无滑移绝热边界,远场边界基于当地黎曼不变量求解,两个当地一维黎曼不变量确定远场边界的法向速度和声速。

1.2 发动机进气及排气边界

(1) 发动机进气边界压力出口边界

发动机在工作状态下,利用压力出口边界模拟发动机进气截面处的流动条件。对于亚声速压力出口边界,一般模拟进气截面的静压。本文将发动机进气截面边界条件设置为当地流动静压与自由流静压之比,其数值在计算过程中可根据实时流量监测自动调节,直至流量达到预设目标,且由程序外插得到当地流场的 ρ 、 u 、 v 、 w 。

(2) 发动机排气边界-压力入口边界

对发动机排气效应采用在发动机内外涵道出口截面设置压力入口边界来模拟当地物理场,在边界处指定当地总压、总温与自由流总压总温之比以及流动方向,外推当地气流的黎曼不变量。

2 数值方法验证

本文对数值模拟方法的验证采用NAL的“NAL-AERO-02-01”TPS风洞试验模型的典型工况开展,计算状态见表1,模型迎角、侧滑角均为 0° 。

表1 计算状态

Table 1 Computational conditions

参数	状态1	状态2	状态3
Ma	0.601	0.701	0.801
MFR	0.599	0.522	0.443
FPR	1.444	1.345	1.182
FTR	1.132	1.105	1.067
CPR	1.212	0.992	0.786
CTR	0.611	0.618	0.668

表1中,MFR为捕获面积比,FPR、FTR分别为风洞实测外涵道出口总压比、总温比,CPR、CTR分别为风洞实测内涵道出口总压比、总温比。

计算采用多块结构网格,网格的远场大小是模型平均气动弦长的120倍,边界层网格近物面第一层厚度为 10^{-6} m量级,网格尺度增长比例为1.1。总网格量约为750万,子午面的网格分布如图1所示。图2是三种不同工作状态下表面压力分布的计算结果与风洞试验结果的对比,计算得到的短舱表面压力分布与风洞试验数据吻合良好。因此,本文采取的数值计算方法基本可信。

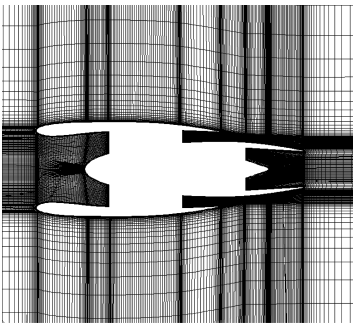
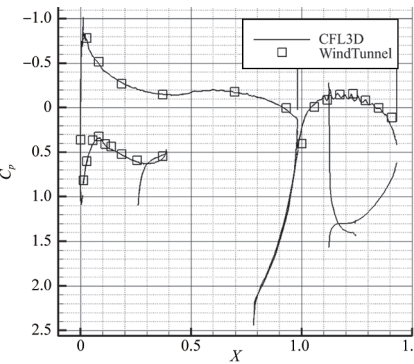
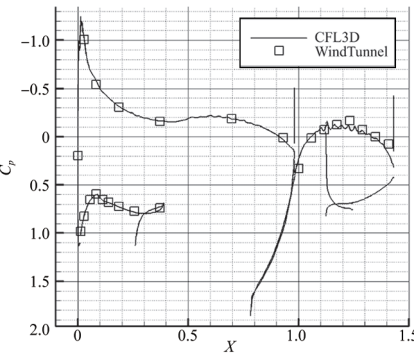


图1 子午面平面网格

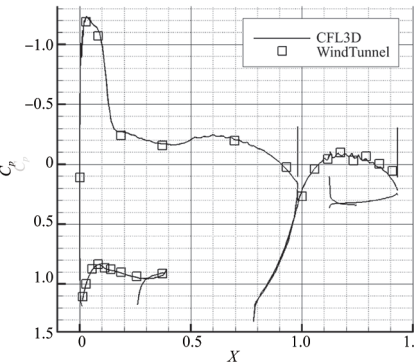
Fig.1 Surface mesh in the meridian plane



(a) 状态1



(b) 状态2



(c) 状态3

图2 三种状态下压力分布计算值与试验值的对比

Fig.2 Pressure distribution comparison between computation and experiment under three conditions

3 某高速涡扇公务机动力影响研究

3.1 计算网格

全机构型网格拓扑及表面网格分布如图3、图4所示,计算采用多块结构网格,总网格量约为2900万个空间六面体单元。

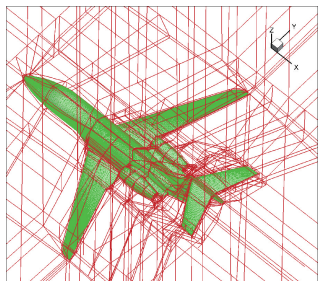


图3 全机构型网格拓扑

Fig.3 Topology of full aircraft structural mesh

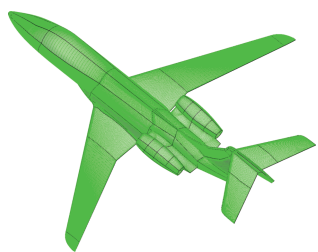


图4 全机表面网格

Fig.4 Surface mesh of full aircraft

3.2 计算结果与分析

为评估尾吊动力效应对全机低速大迎角气动特性的影响,本文分别对不同迎角、侧滑角状态的通气短舱/带动力全机构型开展了数值模拟仿真。计算马赫数 $Ma=0.2$,高度为海平面高度。

图5~图8分别是 $12^\circ\sim 15^\circ$ 迎角下,带动力和不带动力状态的表面极限流线与压力分布云图。动力效应对机翼、平尾表面的流动形态影响较小,分离特性基本一致。图9是在短舱中截面处的马赫数分布特征,相对于无动力情形,考虑发动机进排气后,短舱入口的流速明显增大,机翼后上部流动也因为发动机吸气出现了明显的加速。图10是有/无动力条件下升力系数对比曲线。相同速度条件下,起飞/着陆时全机受发动机不同功率状态影响,两种状态的升力系数曲线在失速前发生了显著平移,而不同功率状态动力对升力线斜率及失速迎角则没有显著影响。如图11所示,在带动力后,飞机的俯仰力矩系数斜率增大,增强了飞机纵向静稳定性,可能会增加全机配平阻力。

迎角在 12° 和 14° 下的横航向稳定性分别如图12、图13

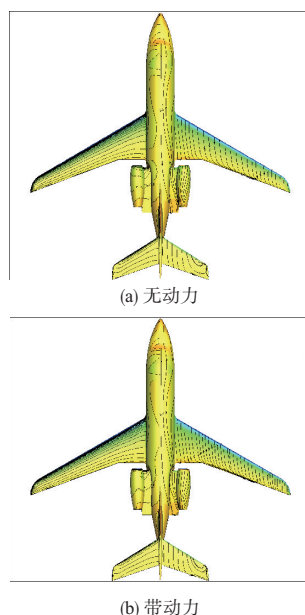


图5 有无动力时表面压力与流线对比($\alpha=12^\circ$)

Fig.5 Comparison between surface pressure and streamlines with and without power ($\alpha=12^\circ$)

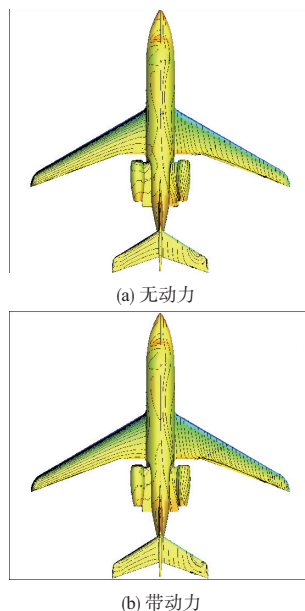


图6 有无动力时表面压力与流线对比($\alpha=13^\circ$)

Fig.6 Comparison between surface pressure and streamlines with and without power ($\alpha=13^\circ$)

所示,无动力条件下该飞机在横/航向均为静稳定,动力效应使得全机横/航向静稳定性均得到有效增强。

4 结论

本文通过对有、无动力条件下某高速涡扇公务机典型状态的计算流体力学(CFD)仿真,研究了尾吊动力对该布

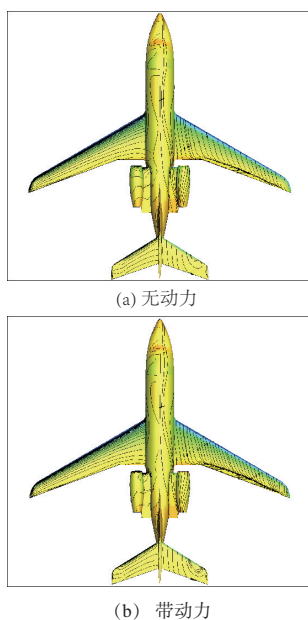

 图7 有无动力时表面压力与流线对比($\alpha=14^\circ$)

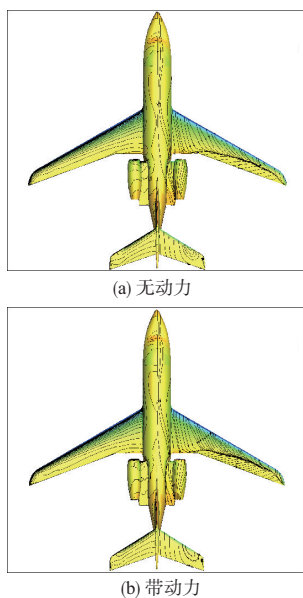
 Fig.7 Comparison between surface pressure and streamlines with and without power ($\alpha=14^\circ$)

 图8 有无动力时表面压力与流线对比($\alpha=15^\circ$)

 Fig.8 Comparison between surface pressure and streamlines with and without power ($\alpha=15^\circ$)

局飞机的低速大迎角气动特性影响,形成如下结论:(1) 在短舱和机翼相距较远时,动力效应对机翼表面的流动形态影响较小,机翼表面的流动形态和分离特性受发动机动力影响较弱;(2) 发动机进排气效应能有效增大全机的升力系数,但对失速迎角影响不大;(3) 带动力后,全机的纵向和横航向的稳定性增加。

AST

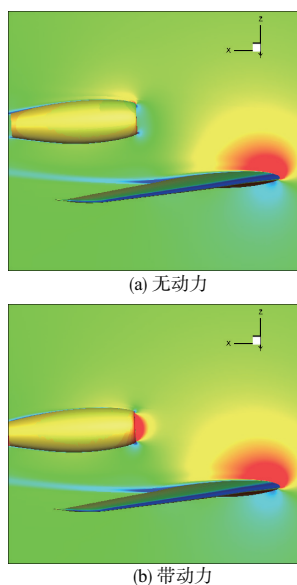

 图9 有无动力时马赫数分布对比($\alpha=15^\circ$)

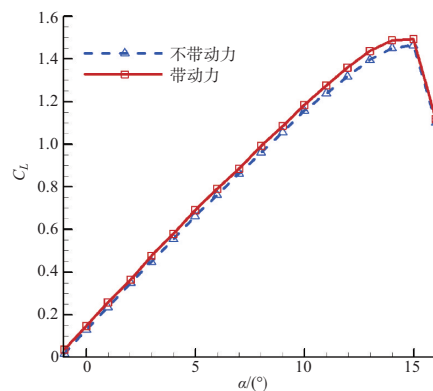
 Fig.9 Comparison between Mach number with and without power ($\alpha=15^\circ$)


图10 两种状态下升力系数对比

Fig.10 Lift coefficient comparison under the two conditions

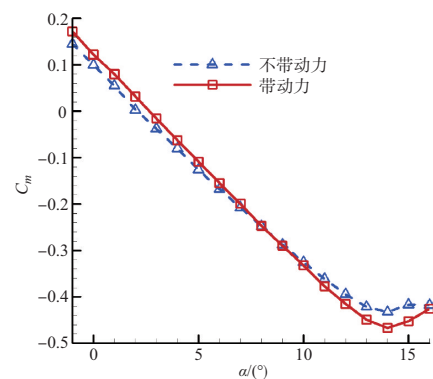
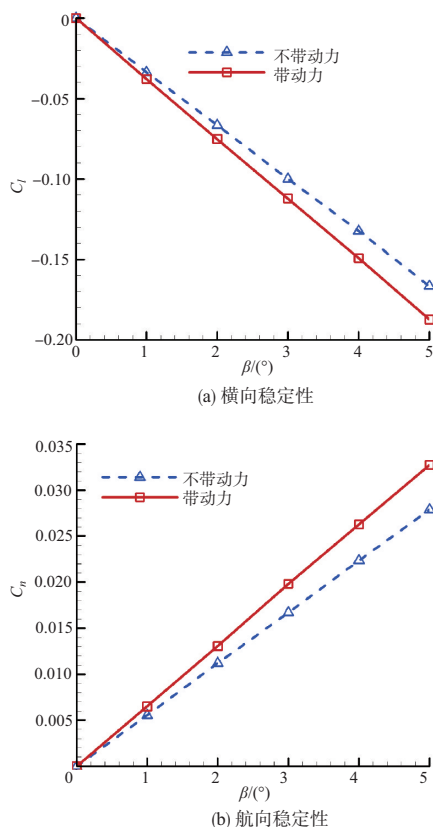


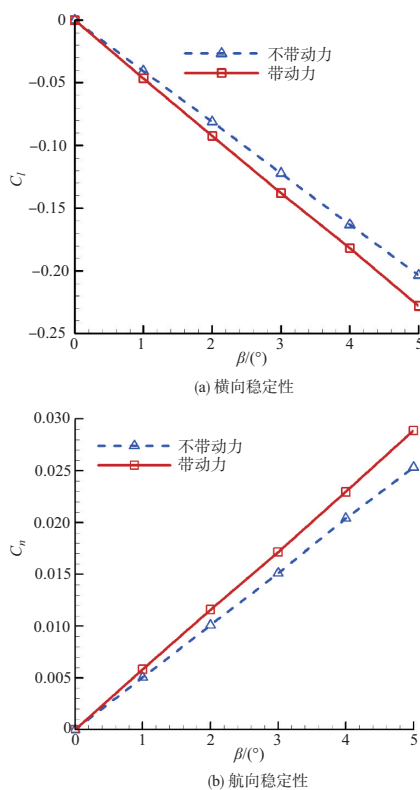
图11 两种状态下力矩系数对比

Fig.11 Moment coefficient comparison under the two conditions

图12 迎角 12° 时的横、航向稳定性Fig.12 Lateral and heading stability at $\alpha=12^\circ$

参考文献

- [1] Henderson W P, Patterson J C. Propulsion installation characteristics for turbofan transports[R]. AIAA 83-0087, 1983.
- [2] Hirose N, Asai K, Ikawa K. Transonic 3D Euler analysis of flows around fan-jet engine and Turbine Powered Simulator (TPS)[R]. NAL-TR-1045, 1989.
- [3] Hirose N, Asai K, Ikaw A K, et al. 3D Euler flow analysis of an jet engine and turbine powered simulator with experimental comparison in transonic speed[R]. AIAA Paper 89-1835, 1989.
- [4] 李杰, 鄂秦, 李凤蔚. 动力发动机内外流场数值模拟[J]. 计算物理, 1997, 14(4/5): 458-459.
Li Jie, E Qin, Li Fengwei. Flow simulations for powered Engines using Euler equations[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1997, 14(4/5): 458-459. (in Chinese)
- [5] 李杰, 鄂秦, 李凤蔚. 翼吊式双发飞机机体/动力装置一体化数值分析[J]. 力学学报, 2000, 32(2): 233-238.
Li Jie, E Qin, Li Fengwei. Numerical simulation of transonic flow over wing-mounted twin-engine transport aircraft[J]. Acta Mechanica Sinica, 2000, 32(2): 233-238. (in Chinese)

图13 迎角 14° 时的横、航向稳定性Fig.13 Lateral and heading stability at the $\alpha=14^\circ$

- [6] 贾洪印, 邓有奇, 马明生, 等. 民用大飞机动力影响数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(6): 725-730.
Jia Hongyin, Deng Youqi, Ma Mingsheng, et al. Numerical investigation of the powered effects on civil aircraft [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(6): 725-730. (in Chinese)
- [7] 贾洪印, 马明生, 吴晓军, 等. 发动机进排气效应对民机构型气动特性影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(8): 1900-1910.
Jia Hongyin, Ma Mingsheng, Wu Xiaojun, et al. Study on aerodynamic characteristics of different types of civil aircrafts with engine air intake and exhaust[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(8): 1900-1910. (in Chinese)
- [8] 乔磊, 白俊强, 华俊, 等. 大涵道比翼吊发动机喷流气动干扰研究[J]. 空气动力学学报, 2014, 32(4): 433-438.
Qiao Lei, Bai Junqiang, Hua Jun, et al. Interference effects of wing-mounted high bypass ratio nacelle with engine power[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2014, 32(4): 433-438. (in Chinese)
- [9] 聂雪媛, 刘中玉, 黄程德, 等. CFD/CSD 方法分析动力效应对民机气动特性影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(7): 1631-1638.
Nie Xueyuan, Liu Zhongyu, Huang Chengde, et al. Analysis of

- civil aircraft aerodynamic characteristics with powered effects based on CFD/CSD method[J]. Journal of Aerospace Power, 2017,32(7):1631-1638. (in Chinese)
- [10] 党亚斌, 刘凯礼, 谭兆光, 等. 民用飞机尾吊发动机安装效应对推力影响研究[J]. 推进技术, 2018,39(8):1712-1719.
Dang Yabin, Liu Kaili, Tan Zhaoguang, et al. Numerical study of engine installed effect on a tail-mounted civil aircraft thrust characteristic[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39 (8): 1712-1719. (in Chinese)
- [11] 高翔, 李密, 于洋. 翼吊短舱构型运输机排气系统干扰阻力确定方法研究[J]. 航空科学技术, 2018, 29(6):24-30.
Gao Xiang, Li Mi, Yu Yang. Determination method of exhaust system interference drag of wing nacelle configuration transportor [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (6):24-30. (in Chinese)
- [12] 周翰玮, 陈勇, 谭兆光, 等. 翼身融合布局飞机机体-发动机气动干扰效应[J]. 航空学报, 2019, 40(9): 623063.
Zhou Hanwei, Chen Yong, Tan Zhaoguang, et al. Fuselage-engine aerodynamic interference effects of blended-wing body aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. 2019, 40 (9): 623063.(in Chinese)
- [13] 杜玺, 闫海津, 吴宇昂, 等. 跨声速自然层流短舱气动设计和风洞试验研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(9): 63-72.
Du Xi, Yan Haijin, Wu Yu'ang, et al. Aerodynamic design and wind tunnel test of a transonic natural laminar flow nacelle[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(9): 63-72. (in Chinese)
- [14] 顾文婷, 陈迎春, 陈真利, 等. 翼身融合民机背撑发动机安装效应对推力影响研究[J]. 推进技术, 2020,41(2):260-267.
Gu Wenting, Chen Yingchun, Chen Zhenli, et al. Investigation of engine installed effect on thrust of blended wing body transport with podded engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(2):260-267. (in Chinese)

Study on Powered Effects of a Business Jet with Tail-Mounted Engines at High Angle of Attack

Zhang Wenqi, Song Minhua, Wang Hao

Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China

Abstract: Aiming at the aerodynamic interaction of a high-speed business jet with tail-mounted engines, high fidelity simulation method based on Reynolds-averaged Navier-Stokes equation is employed to study the powered effects of this kind of engine layout in this paper. By the simulation and comparison of the full aircraft's aerodynamic characteristics under the circumstance of flow-through nacelle and air intake and jet exhaust conditions exerted, the influence of the tail-mounted engines' powered effects on the aerodynamic characteristics of the full aircraft under take-off and landing conditions is researched. The results show that this type of engine layout has little influence on the flow separation on wing and horizontal tail, as well as the stall characteristics of the full aircraft. The engine's suction effect can increase the flow velocity over the rear of wing, thus shifting the lift curve of the full aircraft and strengthening the longitudinal/transverse/heading static stability.

Key Words: computational fluid dynamics; tail-mounted engine; powered effects; turbofan business jet