

基于 CFD 的螺旋桨拉力确定方法

王定奇, 屈霁云, 刘雨

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 针对螺旋桨拉力确定问题, 以某型螺旋桨飞机为研究对象建立 3 维实体模型, 采用 CFD 方法进行数值计算。利用分区拼接网格对螺旋桨及飞机短舱复杂组合体进行分块处理; 在此基础上基于滑移网格方法, 采用雷诺平均 NS(RANS)湍流模型, 针对不同高度、来流速度及桨叶角进行仿真计算。根据计算结果分析螺旋桨飞机流场特性, 并以螺旋桨拉力为重点, 总结了螺旋桨工作特性随飞行 Ma 和飞行高度的变化规律。结果表明: 螺旋桨拉力随飞行 Ma 的增大而减小, 随着桨叶角的增大而增大, 可为后续涡轮螺旋桨发动机总净推力的确定方法提供技术支撑。

关键词: 涡轮螺旋桨发动机; 螺旋桨飞机; 数值计算; 拼接网格; 拉力; 飞行试验

中图分类号: V221.44

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.03.004

Determination Method of Propeller Thrust Based on CFD

WANG Ding-qi, QU Ji-yun, LIU Yu

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: Aiming at the problem of propeller thrust determination, a three-dimensional solid model was established with a certain propeller plane as the research object, and CFD method was used for numerical calculation. The block of the complex combination of propeller and nacelle was carried out by subarea patched-grid. On this basis, the Reynolds Mean NS (RANS) turbulence model was used to simulate the different height, flow velocity and blade angle based on the sliding grid method. Based on the calculation results, the characteristics of propeller plane flow field were analyzed, and the variation of propeller working characteristics with flight Ma and flight height was summarized with the emphasis of propeller thrust. The results show that the propeller thrust decreases with the increase of flight Ma and increases with the increase of blade angle, which can provide technical support for the determination method of turboprop total net thrust.

Key words: turboprop; propeller plane; numerical calculation; patched-grid; thrust; flight test

0 引言

涡轮螺旋桨发动机是将转动功率转化为拉力或推力的动力装置, 具有油耗低、效率高的优势; 其巡航速度与涡扇发动机的相当, 燃油消耗率降低 20%, 对机场跑道要求低, 起飞着陆性能好, 广泛应用于各类运输机和预警机等。随着国内军机和民机研制工作的开展, 对涡桨发动机及螺旋桨性能提出了试飞需求^[1]。确定螺旋桨拉力一般采用直接法或间接法。国外曾尝试借助发动机安装节系统和总压测量法来直接获得螺旋桨拉力^[2], 但误差较大, 效果并不理想; 而利用发动机-螺旋桨模型间接获得的拉力只适用于孤立

螺旋桨, 无法评定螺旋桨飞机表征拉力。当前国内螺旋桨拉力确定试验技术还处在探索阶段, GJB 243A《航空燃气涡轮动力装置飞行试验要求》^[3]中只对涡轮螺旋桨发动机的输出功率及响应提出明确的设计考核要求, 而没有对螺旋桨的飞行拉力提出测试要求。

随着计算技术的发展, 计算流体力学逐渐被引入螺旋桨流场的数值计算中。国外学者将等效盘模型^[4]应用于螺旋桨的数值模拟, 但计算中螺旋桨近似为作动盘, 仅能得到平均计算结果, 无法考虑叶片的外形及其流场细节; 为得到精确的流场细节, 采用结构/非结构嵌套网格对螺旋桨进行非定常 Euler 数值模

收稿日期: 2019-04-18

基金项目: 航空动力基础科研项目资助

作者简介: 王定奇(1992), 男, 在职硕士研究生, 主要从事航空发动机总体设计与数值仿真工作; E-mail: 470773071@qq.com。

引用格式: 王定奇, 屈霁云, 刘雨. 基于 CFD 的螺旋桨拉力确定方法 [J]. 航空发动机, 2020, 46(3): 20-24. WANG Dingqi, QU Jiyun, LIU Yu. Determination method of propeller thrust based on CFD [J]. Aeroengine, 2020, 46(3): 20-24.

拟,取得了较好的效果^[5-6]。国内张立东等^[7]采用结构型网格分块生成技术,构造了具有复杂流动的结构网格生成方法;许何勇等^[8]采用基于非结构重叠网格方法研究了螺旋桨与机身的气动干扰;洪俊武^[9]进行多重拼接网格技术应用研究,表明该方法可以在不降低精度的情况下,减小网格数量,提高计算速度。

本文针对当前未解决的螺旋桨拉力确定问题,采用CFD对螺旋桨飞机的复杂流场进行数值模拟,定量的确定螺旋桨的拉力特性^[10]。

1 螺旋桨发动机受力分析

本文所研究动力装置采用“前置牵引式螺旋桨”形式,参考SAE-AIR 4065A(2012)^[11]动力装置总净推力 $F_{overall}$ 计算表达式,如图1所示,分别取上、下游无穷远截面,取向右为受力正方向,则控制体受力为

$$F_{overall}=W_{10}(V_0+w)-W_{10}V_0+W_9V_\infty-W_0V_0 \quad (1)$$

式中: V_0 为远前方来流速度; W_{10} 为螺旋桨滑流截面流量; w 为流体增加的速度; W_9 为核心机产生的流量; V_∞ 为核心机产生的排气速度。

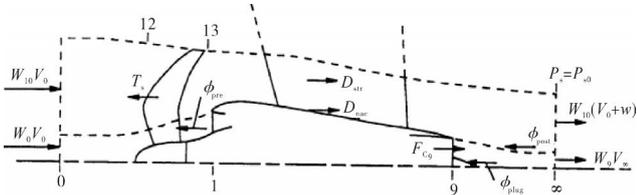


图1 牵引式涡桨发动机安装控制体

对于外部控制体,考虑定常流动状态,则有

$$T_5-D_{str}-D_{nac}-\phi_{pre}+\phi_{post}=W_{10}(V_0+w)-W_{10}V_0 \quad (2)$$

对于内部控制体,从9截面至下游无穷远截面,则有

$$(P_{S9}-P_{S0})A_9+\phi_{plug}-\phi_{post}=-W_9V_9+W_9V_\infty \quad (3)$$

将式(3)变化后,可得

$$W_9V_\infty=W_9V_9+(P_{S9}+P_{S0})A_9+\phi_{plug}-\phi_{post} \quad (4)$$

因此,总净推力变化为

$$F_{overall,n}=T_5-(D_{str}+D_{nac})-\phi_{pre}+W_9V_9+(P_{S9}-P_{S0})A_9+\phi_{plug}-W_0V_0 \quad (5)$$

式中: T_5 为螺旋桨装机条件下测量的拉力,下称“表征拉力”; $(D_{str}+D_{nac})$ 为短舱和吊挂的阻力项; ϕ_{pre} 为内部流管附加阻力; ϕ_{post} 为后锥体阻力; $W_9V_9+(P_{S9}-P_{S0})A_9+\phi_{plug}-W_0V_0$ 为带中心体时内部流管净推力。

从式(5)中可见,螺旋桨发动机的总净推力由表征拉力、短舱和吊挂阻力、内流管附加阻力、内流管净

推力4部分组成。由于飞行试验中无法直接测量螺旋桨上的拉力,而间接测量的误差较大,目前无法准确获取安装条件下的螺旋桨表征拉力,也无法直接测量中心体及短舱阻力。而内部流管附加阻力和内部流管净推力,可以通过在发动机上加装测量耙测量截面上的总温和总压,结合大气条件和发动机喷管特性计算得到,故此2项本文无需研究。

根据SAE-AIR 4065A中的推/阻力划分体系,计算重点为螺旋桨的表征拉力。选取常用的飞行参数,调整计算的初始条件,得到一系列拉力系数与前进比和桨叶角的工作特性线,建立完备的数据库以备飞行试验中调用。

2 数值计算方法

2.1 控制方程

由于螺旋桨做旋转运动,使得流过螺旋桨的气流是非定常的。整个计算域选用非定常、可压N-S方程,其控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho Q dV + \int_{\Omega} F \cdot n dS = 0 \quad (6)$$

式中: $Q=[\rho, \rho u, \rho v, \rho w, e]^T$; ρ, u, v, w, e 分别为大气密度、 x, y, z 轴方向的流体速度和单位质量流体的总能; Ω 为控制体; F 为黏性通量; n 为垂直于单元体外表面的法线单位矢量。

对控制体中网格单元进行积分

$$V_i \frac{\partial Q_i}{\partial t} + \sum (F_{ij} \cdot n_{ij}) S_{ij} = 0 \quad (7)$$

式中: V_i 为单元 i 的体积,下标“ i, j ”为单元 i 与单元 j ; F_{ij}, n_{ij}, S_{ij} 分别为网格单元 i, j 的通量,其外法线单位矢量及面积; $F_{ij} \cdot n_{ij}$ 为通量,由2部分构成

$$F_{ij} \cdot n_{ij} = F_{ij}^E + F_{ij}^F \quad (8)$$

式中: F_{ij}^E 为无黏通量; F_{ij}^F 为黏性通量。

2.2 计算方法及湍流模型

在流场求解中,采用有限体积法对控制方程进行空间离散,黏性项采用中心差分格式离散,无黏项采用2阶Rose迎风偏置通量差分方法离散。时间推进采用隐式近似因子分解法,且采用了多重网格加速收敛算法^[12-15]。螺旋桨周围的流场受到轴向和周向气动力,选择适用于强旋转效应和速度梯度RNG $k-\epsilon$ 湍流模型。

3 螺旋桨飞机表征拉力确定

3.1 计算模型及网格

半模计算区域选择长 250 m、宽 100 m 和高 60 m 的长方体作为计算控制域，模型在计算域中的位置如图 2 所示。

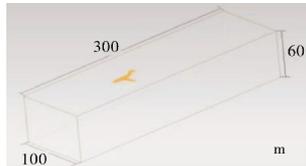


图 2 整体计算域

计算模型为某型上单翼 4 发螺旋桨飞机, 6 叶螺旋桨, 机翼的参考面积约为 50 m², 定义螺旋桨的旋转方向为顺航向逆时针, 模型如图 3 所示。螺旋桨采用结构化网格划分, 单个旋转区域网格量为 300 万; 飞机机身、机翼、短舱采用非结构化网格划分, 靠近机身区域进行网格加密, 远离机身区域计算网格逐渐稀疏, 固壁面均采用 7 层网格进行加密, 第 1 层网格高度为 1 mm, 增长率为 1.2, 飞机半模网格量为 450 万, 网格总数量约为 1100 万, 模型整体网格分布如图 4 所示。

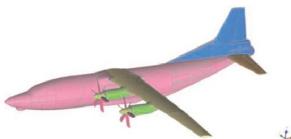


图 3 飞机 3 维模型

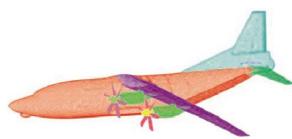


图 4 模型网格分布

由于机身、机翼、短舱处网格静止不动, 而螺旋桨处网格相对于机体高速旋转, 故网格分为旋转域网格和静止域网格 2 部分。螺旋桨处旋转网格用圆盘包裹, 圆盘的直径为螺旋桨直径的 1.4 倍, 前后距离为桨帽长度的 1.5 倍, 如图 5 所示。计算时设置滑移网格的旋转来模拟螺旋桨的旋转效果, 螺旋桨与短舱交接处网格如图 6 所示。

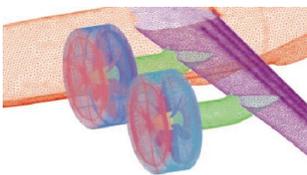


图 5 旋转域表面网格分布

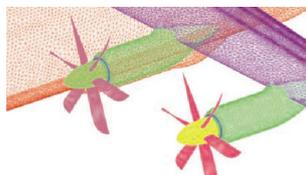


图 6 螺旋桨与短舱交界处网格分布

3.2 流场分析

为了研究螺旋桨滑流对方机翼表面流场的影响, 分别沿机翼展向截取 5 个平面(其中 $y/b=0.25$ 和 0.55 截面同为螺旋桨正后方截面, 仅保留 0.55 截面图像), 如图 7 所示。桨叶角为 30° , 前进比为 $0.3Ma$,

某瞬态下各界面 Ma 对比如图 8 所示。从图中可见, 螺旋桨旋转时桨叶脱出的涡系使得机翼表面 Ma 变化较大, 越靠近螺旋桨后方, 影响越明显。

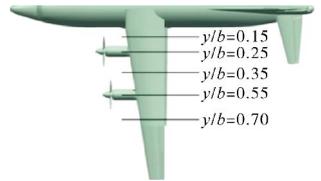


图 7 机翼展向站位截面分布

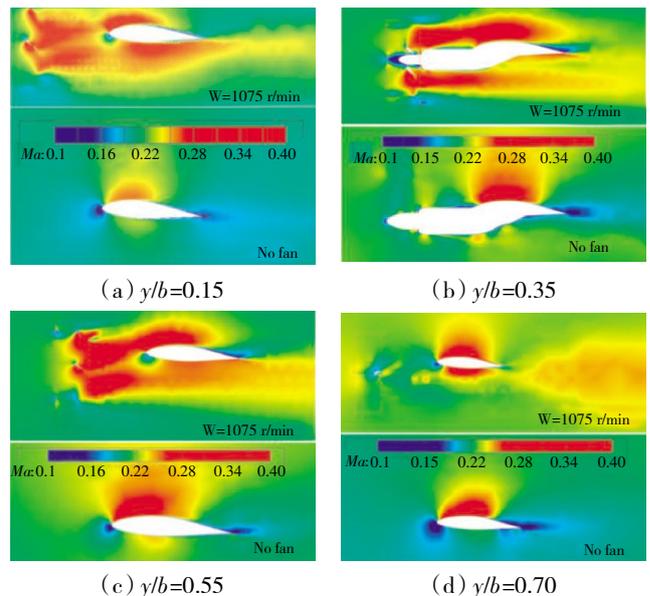


图 8 滑流对机翼展向不同截面 Ma 的影响对比

3.3 计算结果

分别对高度为 4 和 8 km 下的螺旋桨流场进行数值计算, 其拉力系数曲线如图 9 所示。从图中可见, 总体系数偏差在 1.5% 以内, 在工程应用的精度范围内, 表明高度对螺旋桨性拉力性能的影响可以忽略。

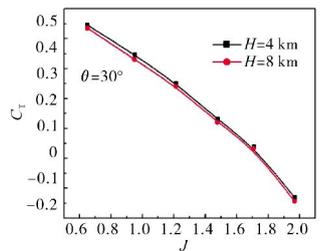


图 9 拉力系数随高度变化

在飞行试验中加载的扭矩装量装置可获得不同飞行条件下螺旋桨的输入功率。在整机流场数值计算中, 设置其边界条件与飞行试验的相同, 计算出装机螺旋桨的功率系数。取其中某 2 个特征点进行误差对比, 结果见表 1。从表中可见, 误差在 5% 以内, 满足精度要求, 验证了计算方法的正确性。

螺旋桨拉力系数和功率系数特性如图 10、11 所示。从图中可见, 螺旋桨拉力系数和功率系数都是随着前进比的增大而减小。桨叶角越大所对应的前进比越大, 30° 桨叶角在前进比为 1.5 时拉力系数为 0, 说明此时螺旋桨不产生轴向拉力; 而桨叶角增大至

45°,在工作范围内拉力均大于0。

表1 功率系数偏差

| 桨叶角 θ / (°) | 功率系数 | | 误差 / % |
|--------------------|-------|--------|--------|
| | CFD | Flight | |
| 30 | 0.455 | 0.476 | 4.17 |
| 35 | 0.504 | 0.527 | 4.60 |

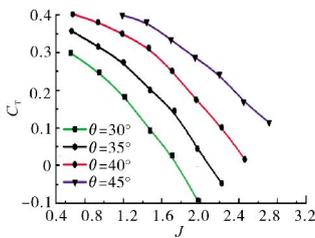


图10 拉力系数特性

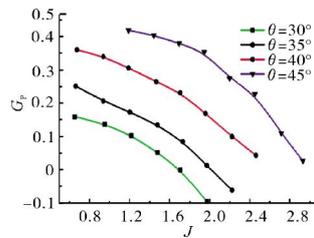


图11 功率系数特性

4 飞行试验中的应用

将数值计算出的螺旋桨特性数据整合成如图10和11所示的特性图。在飞行试验中,通过飞行中的扭矩、转速、总压和总温等参数,换算为飞行速度和高度。参考SAE-AIR-4065A中推荐“ θ ”和“ J ”方法。如果桨叶角可测或测量满足工程精度,可直接使用“ θ ”法:利用前进比和桨叶角在拉力特性图中插值得到安装条件下螺旋桨的拉力系数,反算得到表征拉力。若桨叶角的测量误差较大,难以满足精度要求,则采用“ J ”法:通过桨轴上的测扭装置获得扭矩及转速,可以得到轴功率。在功率特性图中利用前进比和功率系数插值得到桨叶角,然后在拉力系数图中插值得到拉力系数,反算得到表征拉力。

5 结论

针对螺旋桨拉力确定问题,本文以某型螺旋桨飞机为研究对象,建立3维模型;基于分区拼接网格对螺旋桨和飞机进行拼接,并进行数值计算;选取飞行试验中常用的工况点,分析螺旋桨特性参数及飞机表面的流场变化规律。得到以下结论:

(1)整机流场计算获得的功率特性与飞行中测扭装置获取的功率特性对比,误差在5%以内,满足工程应用精度要求。

(2)螺旋桨滑流对机翼表面流场分布影响明显,可以加速机翼上表面的流体流动,有效改善了机翼的升力。

(3)通过CFD方法获取螺旋桨发动机的特性,为后续螺旋桨发动机性能试飞提供参考。

(4)后续通过对发动机外表面积分,获得短舱阻力,结合数值计算的表征拉力,及飞行试验中获取的附加前体力和排气推力,最终确定螺旋桨发动机的总净推力。

参考文献:

- [1] 刘沛清.空气螺旋桨理论及应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006:59-66.
LIU Peiqing. Theory and application of air propeller [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006: 59-66. (in Chinese)
- [2] 郭海东, 牛宏伟, 张永峰, 等. 航空螺旋桨载荷校准试验技术研究[J]. 机械研究与应用, 2016, 29(6): 47-49.
GUO Haidong, NIU Hongwei, ZHANG Yongfeng, et al. Research on load calibration test technology for aero-propeller [J]. Mechanical Research & Application, 2016, 29(6): 47-49. (in Chinese)
- [3] 国防科学技术工业委员会. 航空燃气涡轮动力装置飞行试验要求: GJB243A-2004[S].北京:中国航空第一集团公司,2004:42-43.
National Defense Science and Technology Industry Committee. Aviation gas turbine power unit flight test requirements: GJB243A-2004 [S]. Beijing: Aviation Industry Corporation of China, 2004: 42-43. (in Chinese)
- [4] Chandrasekaran B, Bartlett G. Method for calculating effects of a propfan on aircraft aerodynamics at subsonic speeds [J]. Journal of Applied Spectroscopy, 2013, 37(5): 1286-1289.
- [5] Zhenfeng X. Unsteady numerical simulation of interaction effects of propeller and wing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(7): 1195-1201.
- [6] 麻蓉, 高飞飞, 颜洪. 螺旋桨飞机滑流非定常数值模拟研究 [J]. 航空计算技术, 2016, 46(1): 27-30.
MA Rong, GAO Feifei, YAN Hong. Research on unsteady numerical simulation of propeller aircraft slipstream [J]. Aeronautical Computing Technique, 2016, 46(1): 27-30. (in Chinese)
- [7] 乔宇航, 马东立, 李陟. 螺旋桨/机翼相互干扰的非定常数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2015, 30(6): 1366-1373.
QIAO Yuhang, MA Dongli, LI Zhi. Unsteady numerical simulation of propeller/wing interaction [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(6): 1366-1373. (in Chinese)
- [8] 张立东, 李椿萱. 结构型网格分块生成技术 [J]. 计算物理, 2016, 18(4): 325-328.
ZHANG Lidong, LI Chunxuan. A multi-blok structured grid generation technique [J]. Computing Physics, 2016, 18(4): 325-328. (in Chinese)
- [9] 段中喆, 刘沛清, 屈秋林. 某轻载螺旋桨滑流区单位流场特性数值研究 [J]. 控制工程, 2012, 19(5): 836-840.
DUAN Zhongzhe, LIU Peiqing, QU Qiulin. Numerical research on 3-D flow field characteristics within the slip stream of a low loaded propeller [J]. Control Engineering of China, 2012, 19(5): 836-840. (in Chinese)
- [10] 洪俊武, 梁孝平, 王光学, 等. 多重拼接网格技术应用研究 [J]. 空

- 气动力学学报,2007(1):45-54.
- HONG Junwu, LIANG Xiaoping, WANG Guangxue. The research of application for cross-multigrid technology [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007(1):45-54. (in Chinese)
- [11] SAE. Propeller/profan in-flight thrust Determination [R]. SAE-2012-4065A.
- [12] 杨帆, 杨永. 短舱及离散精度对螺旋桨桨叶载荷分布的影响[J]. 航空计算技术, 2012, 42(2): 24-26.
- YANG Fan, YANG Yong. Influence of nacelle and discrete Precision on propeller blade load distribution[J]. Aeronautical Computing Technique, 2012, 42(2): 24-26. (in Chinese)
- [13] 许和勇, 叶正寅. 螺旋桨非定常滑流数值模拟[J]. 航空动力学报, 2011, 26(1): 148-153.
- XU Heyong, YE Zhengyin. Numerical study of propeller slipstream based on unstructured dynamic overset grids [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26 (1): 148-153. (in Chinese)
- [14] 杨小川, 王运涛, 王光学, 等. 螺旋桨非定常滑流的高效数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2014, 32(3): 289-294.
- YANG Xiaochuan, WANG Yuntao, WANG Guangxue, et al. Numerical simulation of unsteady propeller slipstream [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2014, 32(3): 289-294. (in Chinese)
- [15] Hugh S R. Aerodynamic modeling of the wing propeller interaction for a tail-sitter unmanned air vehicle [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 45(1): 198-210.

(编辑: 刘 亮)