

EVTOL 螺旋桨地面效应数值研究

张冰波¹ 何森¹ 王裕贤² 朱建勇^{2*}

1 空装北京局驻保定地区军事代表室 2 沈阳航空航天大学航空发动机学院

DOI:10.12238/etd.v5i5.9127

[摘要] 本文分别对0.5、1.0、3.0、5.0、10.0倍螺旋桨直径地面高度下地面效应开展了数值仿真,分析地面效应对螺旋桨的气动特性(包括拉力、扭矩和功率等参数)和流场特性的影响。模拟结果表明:螺旋桨地面效应源于滑流冲击地面形成的压力气垫。随着地面高度的降低,螺旋桨拉力和扭矩是不断增大的,但扭矩的增加量不明显。当地面高度超过螺旋桨十倍直径时,滑流已经不会再冲击地面,地面效应消失。

[关键词] 螺旋桨; 地面效应; 数值模拟; 气动特性; 流场特性

中图分类号: U664.33 **文献标识码:** A

Numerical simulation of ground effect of propeller of electric vertical take-off and landing vehicle

Bingbo Zhang¹ Miao He¹ Yuxian Wang² Jianyong Zhu^{2*}

1 Office of Air Force Representative in Baoding District 2 School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University

[Abstract] The numerical simulation of ground effect at 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 and 10.0 times the ground height of propeller diameter is carried out, respectively, the influence of ground effect on the aerodynamic characteristics (including thrust, torque, power and other parameters) and flow field characteristics of propeller are analyzed. The simulation results show that the ground effect results form the pressure cushion formed by the slipstream of propeller striking the ground during takeoff and landing process. Therefore, with the decrease of the ground height, both thrust and torque are constantly increasing, while the increment of the torque is not obvious. When the ground height is more than ten times diameter of the propeller, the slipstream no longer hits the ground, the ground effect disappears.

[Key words] propeller; Ground effect; Numerical simulation; Aerodynamic characteristics; Flow field characteristic

引言

EVTOL是电动垂直起降飞行器(Electric Vertical Take-off and Landing)的缩写,它是一种电动的、不需要跑道的、可垂直起降的飞机。地面效应对飞行器工作产生重要影响,当运动物体贴近地面运行时,地面表面会对物体产生的空气动力干扰,这种现象被称为地面效应(Ground effect)^[1]。地面效应对螺旋桨无机身情况下拉力、扭矩和效率有影响^[2]。旋翼的各种系数随着地面高度的变化呈现出极限环变化^[3]。桨尖涡和尾迹会随着地面的高度变化^[4]。不同地面高度以及不同参数直升机和环境参数下可以算出直升机所需要的功率^[5]。建立了一种可靠的拥有良好收敛性的自由尾迹模型^[6]。在近地0.4直径高度时,旋翼的角振的峰值出现了突变变化^[7],斜面下直升机悬停在0.4倍旋翼直径高度会因为地面效应导致直升机旋翼旋转不稳定性增加^[8]。本文将对EVTOL螺旋桨进行数值仿真模拟,研究不同工况下地面效应对EVTOL螺旋桨的气动特性和流场特性的影响。

1 EVTOL螺旋桨设计指标及气动外形

本文所研究的螺旋桨为两叶片螺旋桨,螺旋桨旋转直径为1.18m,轮毂半径0.1m,设置转速为2650rpm。具体三维模型见图1所示。

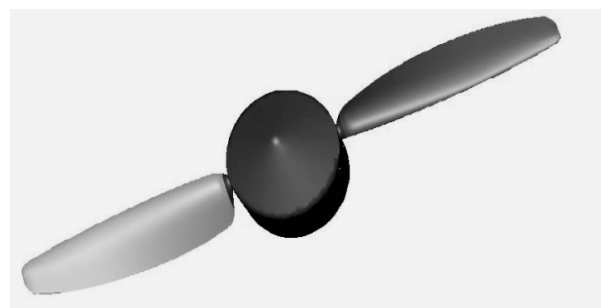


图1 螺旋桨模型

2 地面效应数值仿真

2.1 数值计算模型及网格划分

网格利用的软件ICEMCFD划分, 计算域大部分采取结构网格, 特别是桨叶表面及四周, 在不同结构网格的过渡区域, 部分采用非结构网格划, 整个流场共用了500万个网格。

在Fluent中完成数值计算, 定义螺旋桨在不同网格划分下的模型的边界条件, 分别是0.5、1、3、5以及10倍的螺旋桨直径的离地高度的网格。设置湍流模型为SSTk- ω 。螺旋桨的转速为2650转, 速度入口为5m/s。旋转方向为绕X轴旋转, 并对拉力、扭矩进行监控记录, 设置好时间步长dt=0.000125786s, 导出迹线图以及螺旋桨压力分布图, 研究不同高度下地面效应对螺旋桨的各个气动参数以及流场特性的影响。

2.2 计算结果与分析

2.2.1 螺旋桨拉力和扭矩

下表为地面高度为0.5、1.0、3.0、5.0和10.0螺旋桨直径的螺旋桨拉力和扭矩(由表可以得出, 悬停螺旋桨以及平坦地面时相位角对于螺旋桨的气动特性影响很小)。

表1 螺旋桨CFD模拟数据

地面高度(d)	0.5d	1.0d	3.0d	5.0d	10.0d
螺旋桨拉力(N)	326.55	314.59	312.04	311.28	309.61
螺旋桨扭矩(N·m)	21.64	21.52	21.36	21.31	21.2
功率(kW)	6.005	5.972	5.927	5.913	5.883

由此表可以看出在0.5d和1.0d之间拉力差距相对比较大, 后面的3.0d、5.0d、以及10.0d之间相差的拉力不是很大, 螺旋桨的扭矩的变化不是很明显。

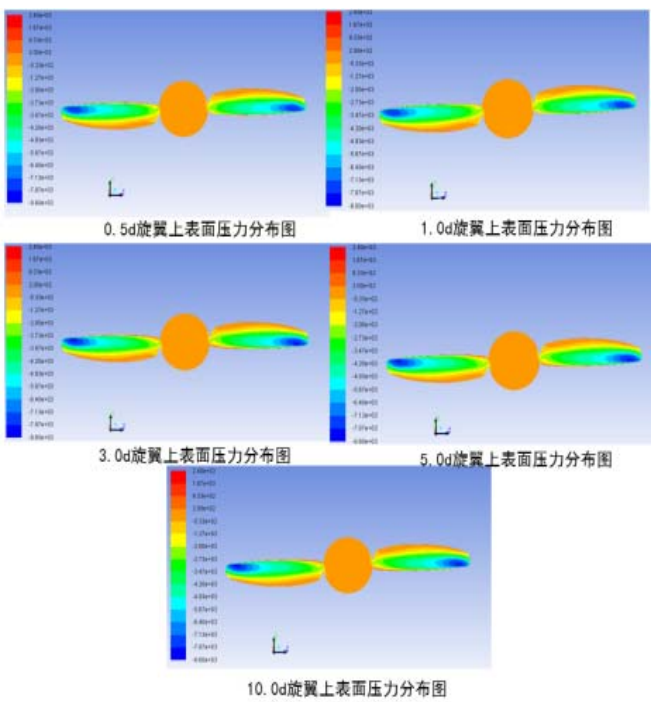


图2 螺旋桨叶片上表面压力分布

2.2.2 螺旋桨叶片上表面压力分布

图2为不同地面高度下螺旋桨叶片前表面压力分布图(本文中以垂直朝向地面方向为正方向)。图中的红色区域代表压力区域, 蓝色区域代表吸力区域, 在同一高度的螺旋桨中, 叶片中的上表面压力分布不尽相同, 在轮毂区域呈现出黄色的低压的吸力。从叶片迎风至背风面的过程中, 云图的颜色从蓝色往棕色过渡, 表明叶片吸力在不断的缩小, 高吸力存在于迎风区域。

2.2.3 螺旋桨叶片下表面压力分布

图3为不同地面高度下螺旋桨下表面压力分布图。在叶片表面逆时针旋转的迎风面至另一端面压力逐渐上升, 云图由黄色往红色转化。轮毂呈现的是很低的吸力和压力, 在轮毂和叶片连接处都是蓝色, 表现出较高的吸力。随着地面高度的增大, 螺旋桨的高压力区域在逐渐缩小, 特别是在0.5d至3.0d变化的过程中棕色压力区域明显缩小, 而轮毂区域压力没有明显变化。

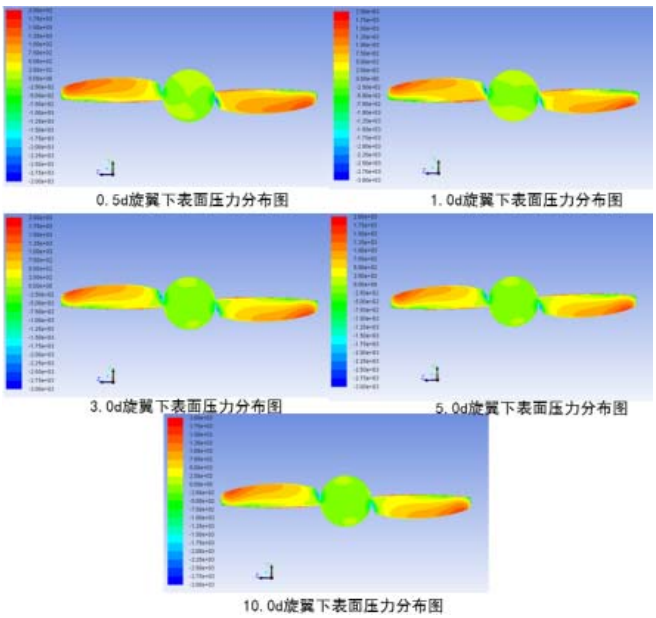


图3 螺旋桨叶片下表面压力分布

2.2.4 不同地面高度下螺旋桨与地面之间的速度流场

图4是不同地面高度下螺旋桨与地面之间的速度流场图。从同一高度下的螺旋桨速度流场图的气体速度分布来看, 在螺旋桨底下的较靠近螺旋桨底部的气体的速度在40m/s左右。在轮毂底下的气流的速度较低。整个流场的气体螺旋桨往地面方向流动, 稍微远离叶片速度就开始骤降。比较不同高度下的速度流场图, 在0.5d至5.0d的高度下, 气流都可以打击至地面, 10.0d的高度下气流几乎没有流动到地面。

3 总结

本文对于国内的螺旋桨地面效应的研究进行了概述, 基于网格划分以及滑移网格的精确建模方法, 对不同的地面高度对螺旋桨的气动特性影响进行分析, 对螺旋桨的拉力、扭矩以及叶片的压力分布等特性进行了研究与分析, 获得了比较详细完整的实验结果。

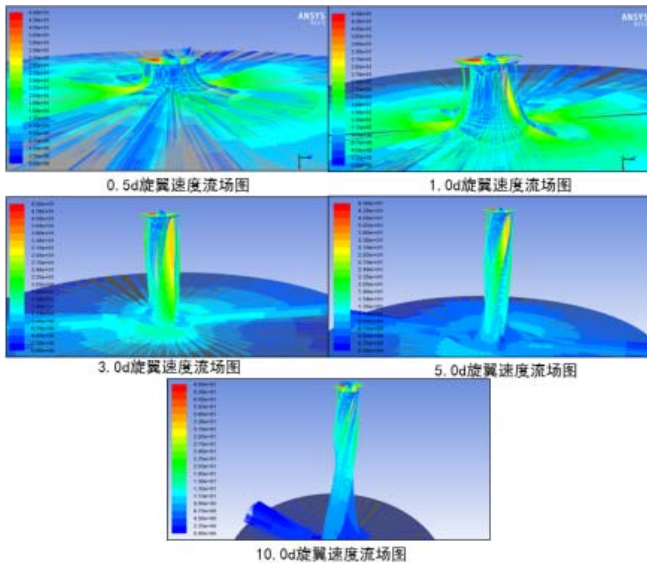


图4 不同地面高度下螺旋桨与地面之间的速度流场图

(1) 地面高度从10. d依次降至0. 5d时螺旋桨拉力分别提升了1. 67N、0. 76N、2. 55N和11. 96N。每个高度的拉力相对于上一个地面高度的变化百分值分别为0. 54%、0. 24%、0. 82%和3. 8%。而螺旋桨扭矩分别提升了0. 11N·m、0. 05N·m、0. 16N·m和0. 12N·m。每个高度的扭矩相对于上一个地面高度变化的百分比分别为0. 52%、0. 23%、0. 75%和0. 56%。螺旋桨的功率提升了0. 03kW、0. 014kW、0. 045kW和0. 033kW, 每个高度的功率相对于上一个地面高度变化的百分比分别为0. 52%、0. 23%、0. 75%和0. 56%。

(2) 在地面高度逐渐降低的过程中, 螺旋桨拉力的增量是在不断增大的, 而螺旋桨的扭矩和功率是呈现线性的增加, 并且增量不是很大, 叶片下表面的高压区域在不断扩大, 而上表面高压区域在缩小, 这表明了螺旋桨地面效应带来的拉力提升主要是由下表面提供的。

(3) 地面效应对于悬停螺旋桨的影响主要体现在拉力方面,

对扭矩和功率没有明显的影响。并且在低于一倍螺旋桨高度的时候, 地面效应对螺旋桨拉力提升有明显影响。并建议加强叶片增大的高压区域的强度。

(4) 在0. 5d至1. 0d的地面高度下, 地面高度对螺旋桨滑流的减弱很明显, 扰流有很大一部分打击在地面上无法流至螺旋桨上方。

[参考文献]

[1]陈利.一种新型地效靶机的设计与控制[D].南京航空航天大学,2015.

[2]黄建萍,陈文轩.悬停状态地面效应对旋翼和机身气动特性影响[J].直升机技术,2005(3):1-5.

[3]何辉.螺旋桨飞机超低空流场数值模拟方法研究[D].西北工业大学,2007.

[4]叶靓,招启军,徐国华.基于非结构嵌套网格方法的旋翼地面效应数值模拟[J].航空学报,2009,30(5):780-786.

[5]张西.基于试飞的直升机悬停状态地面效应[J].南京航空航天大学学报,2010,42(2):166-169.

[6]辛冀,李攀,陈仁良.地面效应中悬停旋翼的自由尾迹计算[J].航空学报,2012,33(12):2161-2170.

[7]辛冀,陈仁良,李攀.地面效应中垂直起降状态旋翼的气动特性计算[J].南京航空航天大学学报,2014,46(3):433-442.

[8]朱明勇,招启军,王博.基于CFD和混合配平算法的直升机旋翼地面效应模拟[J].航空学报,2016,37(8):2539-2551.

作者简介:

张冰波(1982--),男,汉族,河北元氏人,硕士研究生,高级工程师,研究方向: 机械工程。

通讯作者:

朱建勇(1987--),男,汉族,山东东营人,博士,副教授,研究方向: 旋转流体机械空气动力学。