

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.01.013

外挂武器对无人直升机纵向气动特性影响研究

龙海斌 吴裕平 胡 偶
(中国直升机设计研究所,景德镇,333001)

摘要: 针对外挂武器对无人直升机纵向气动特性影响的问题,采用雷诺时均 Navier-Stokes (Reynolds average Navier-Stokes, RANS) 方法对加装武器系统前后,不同前飞速度、武器安装角和挂载状态下的气动特性进行了数值计算。然后将大速度前飞状态时的气动特性与加装外挂武器之前的风洞试验结果进行了对比分析。结果表明,采用悬臂梁外挂方式加装武器对阻力有显著影响,前飞速度和武器发射安装角变化对纵向气动特性几乎没有影响。外挂武器安装位置和数量变化对无人直升机的纵向气动特性影响很小。研究结果可为武装无人直升机选择合适的武器外挂和发射方式提供参考。

关键词: 无人直升机; 外挂; 武器; 纵向气动特性

中图分类号: V211.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2019)01-0083-07

Influence of External Store Weapon on Longitudinal Aerodynamic Characteristics of Unmanned Helicopter

LONG Haibin, WU Yuping, HU Ou
(China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen, 333001, China)

Abstract: To study the influence of external store weapons on longitudinal aerodynamic characteristics of unmanned helicopter, the aerodynamic characteristics before and after installing the external store weapon are calculated by Reynolds average Navier-Stokes (RANS) method with different flight speeds, weapon installation angles and loading conditions. Then the aerodynamic characteristics of high speed flight state are compared with the wind tunnel test results that before installing the external store weapon. The results show that the influence of external store weapons with cantilever beam on the drag is relatively large, the changes of flight speed and weapon angle have little influence on aerodynamic characteristics, and the influence of loading conditions on the longitudinal aerodynamic characteristics of unmanned helicopter is small. The results can provide a reference for the choice of suitable mode of weapons external store and launch for armed unmanned helicopter.

Key words: unmanned helicopter; external store; weapon; longitudinal aerodynamic characteristics

无人直升机具有可垂直起降、定点悬停和易于对目标实施近距离精确侦察/定位与指示等一系列优点,因此在军民领域得到广泛应用。随着战场环境的变化与军事技术的进步,近年来军事上对武装无人直升机需求越来越多。美国已经推出了“火力侦察兵”武装无人直升机,其在机身两侧采用外挂

的方式加装了导弹、火箭弹等武器。目前国内外开展了一些关于外挂物对机翼、飞机及直升机气动特性影响方面的研究。赵维义^[1]通过风洞试验研究了不同迎角、风速等条件下外挂救生绞车对直升机气动特性的影响。刘运孝^[2]通过歼 X 飞机多次风洞试验和其他试验以及计算的结果分析了外挂物

收稿日期: 2017-12-15; **修订日期:** 2018-09-30

通信作者: 龙海斌,男,工程师, E-mail: lhb20012@126.com。

引用格式: 龙海斌,吴裕平,胡偶. 外挂武器对无人直升机纵向气动特性影响研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(1): 83-89. LONG Haibin, WU Yuping, HU Ou. Influence of External Store Weapon on Longitudinal Aerodynamic Characteristics of Unmanned Helicopter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(1): 83-89.

对飞机气动特性的影响。任庆祝等^[3]采用多天平测量技术对螺旋桨和全机的气动力数据进行了测量,分析了滑流对螺旋桨飞机气动特性的影响。张召明^[4]和 Adrezin 等^[5]分别采用动力相似法和缩比模型对飞机和直升机外挂物投放过程的气动特性进行了研究。夏良^[6]定性分析了外挂武器对直升机、平尾和垂尾气动力的影响。Tynan 等^[7]分析了外挂物对直升机设计因素的影响。陈劲松^[8]采用奇点分布法计算了挂架和外挂物对无人机薄翼的气动干扰。程晓亮等^[9]采用非结构网格、多参考系和滑移网格边界条件,对某螺旋桨模型的滑流轨迹和机翼在滑流作用下的气动特性进行了计算。对比分析了螺旋桨不同转速下滑流对机翼的影响。Kozlovsky 等^[10]对 Mi-26 直升机吊运平行六面体外挂物时的减阻方法进行了研究。聂光成等^[11]提出一种理论和实验相结合的方法来定量评估外挂武器对载机气动系数和飞行性能的影响。Peterson^[12]分析了外挂油箱对 AH-64 和 UH-60 直升机的力学影响。Sviridenko 等^[13]研究了平行六面体外挂物对直升机的干扰。童中翔等^[14]分析了现役某型战机外挂 ZC-1 航空侦察吊舱对载机升力系数、阻力系数等的影响,并得出了一种计算外挂对载机的气动特性影响的工程算法。吴刚^[15]采用基于动量源的计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)方法研究了吊挂物重量和迎风面积以及飞行速度对重型直升机流场的影响。Patterson 等^[16]对降低外挂物对直升机可控性影响进行了研究。

关于外挂武器(External store weapon, ESW)对无人直升机纵向气动特性的影响方面的研究比较少,因此采用求解 Navier-Stokes 方程的 CFD 方法,开展加装在机身两侧的外挂武器对某型无人直升机算例样机(以下简称“某型机”,加装外挂武器时简称“某型机 J”)纵向气动特性数值模拟研究,并与加装外挂武器之前的风洞试验数据进行了对比分析,研究了不同飞行速度、发射安装角和武器挂载状态变化对对无人直升机纵向气动特性的影响。

1 计算模型与网格划分

1.1 计算模型

某型机采用与美国“火力侦察兵”类似的武器外挂方式加装武器装备,如图 1 所示。弯管梁加装在机身两侧,挂梁端部挂有“八”字形的挂架,导弹通过导发架安装在挂架上。

计算模型包含机身、主桨毂、稳瞄、尾梁、垂尾、平尾等部件。风洞试验没有考虑主旋翼与尾桨的旋转运动对整个流场的影响,而且在大速度前飞时



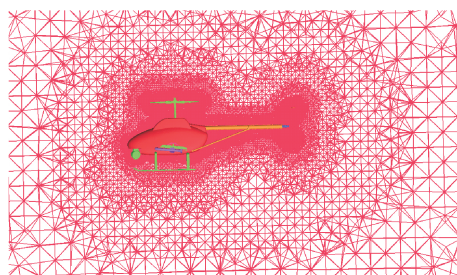
图 1 “火力侦察兵”外挂武器示意图

Fig. 1 External store weapon of “Fire Scout”

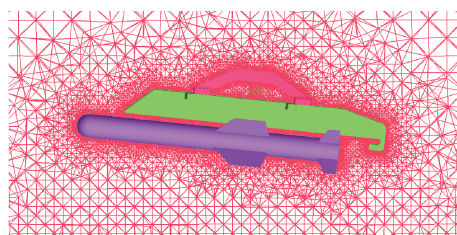
外挂武器基本上在旋翼下洗流场之外,因此只考虑了静止的主桨毂与尾桨毂的影响。

1.2 网格划分

对某型机和外挂武器的部分几何进行了修理,去掉了部分对气动特性影响比较小的部件。之后采用八叉树(Octree)方法对流体域进行网格划分,该方法首先生成独立的体网格,然后进行网格调整,将网格映射到面、线和点上,几何模型表面的局部细节部分可以按需求进行捕捉或者忽略。在网格划分过程中对直升机机身、武器装备流动和尾流区域进行了加密处理。其中导弹和导发架之间的缝隙比较小,而且空气流动比较复杂,对这些区域也进行了加密处理。网格划分如图 2 所示。



(a) Unstructured grids of helicopter



(b) Unstructured grids of weapon

图 2 网格划分示意图

Fig. 2 Unstructured grids

2 计算方法

流体控制方程为 Navier-Stokes 方程,其积分守恒形式如下

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \mathbf{W} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\mathbf{F}_c - \mathbf{F}_v) dS = 0 \quad (1)$$

式中: W 为守恒变量, F_c 和 F_v 分别为对流通量和黏性通量, 具体形式见文献[17]。

采用有限体积方法(Finite volume method, FVM)求解式(1), 对流项采用 Roe-FDS 格式求解, 并通过解的线性重构获得二阶精度, 黏性项采用二阶中心型格式离散。时间离散采用隐式时间推进技术。

目前对湍流进行数值模拟的方法主要有雷诺时均方法、大涡模拟(Large eddy simulation, LES)方法等, 其中雷诺时均方法需要的网格量比较少, 计算过程耗费的 CPU 和内存资源也比较少, 在工程计算领域应用广泛^[18-19], 计算结果的准确度和可靠性相对比较高。而经过雷诺平均之后的 N-S 方程并不封闭, 需要对方程中的雷诺应力项提出一定的湍流模式, 从而使方程封闭。在本次 CFD 计算过程中采用 S-A 一方程湍流模型, 该模型增加了一个附加的输运方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{v} v_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_v} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \rho \bar{v}) \frac{\partial v}{\partial x_j} \right] + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial v}{\partial x_j} \right)^2 \right\} - Y_v \quad (2)$$

式中: \bar{v} 在近壁面以外的区域都等于湍流黏性 μ_t ; G_v 为湍流黏性产生项; Y_v 为湍流黏性耗散项; σ_v, C_{b2} 为常数; μ 为分子黏性。

求解过程中流体域外边界设置为压强远场边界条件, 来流速度为 55.6 m/s (200 km/h) 以计算大

速度前飞状态下的纵向气动特性。

3 计算结果与分析

3.1 全机气动特性对比分析

根据 CFD 计算结果, 某型机加装外挂武器前后的全机纵向气动特性如图 3 所示(图中 Exp 表示某型机缩比模型风洞试验数据, Without ESW 表示某型机全尺寸 CFD 计算结果, With ESW 表示某型机 J 的全尺寸 CFD 计算结果)。分析图 3(a)可以看出, 由于加装外挂武器, 某型机 J 的迎风面积比某型机增大 9.06%, 但是在 0° 迎角时某型机 J 阻力比某型机增大 15.7%, 说明加装的外挂武器引起了比较大的阻力增大。在负迎角范围内, 某型机与某型机 J 阻力的 CFD 计算值与风洞试验数据的变化趋势基本上一致。而在正迎角范围内, CFD 计算值和风洞试验值有一定的差别。这是由于某型机的机身尾部与尾梁相接处迎风面积突然缩小, 流动分离比较严重, 采用的 CFD 计算方法对大分离流动模拟能力有限, 但计算准确度可以满足工程应用要求。分析图 3(b)可以发现, 在小迎角范围内某型机升力计算值与风洞试验值基本相等, 而在大迎角范围内计算值比风洞试验值大。在大部分迎角范围内, 某型机 J 的升力比某型机大, 说明外挂武器产生了额外的升力。根据图 3(c)可以看出某型机俯仰力矩的 CFD 计算值比风洞试验值小, 同时某型机 J 的俯仰力矩比某型机小, 但是三者的俯仰力矩线斜率基本上一致。

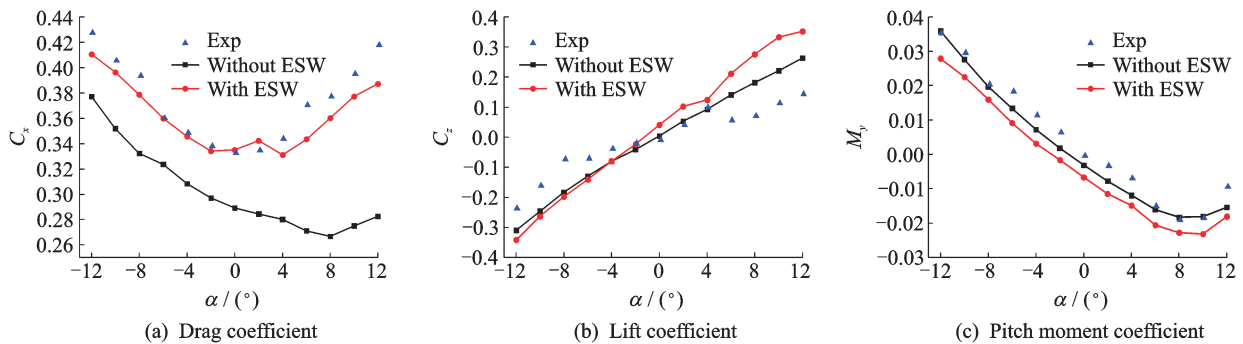


图3 全机纵向气动特性对比图

Fig. 3 Longitudinal aerodynamic characteristics of helicopter

某型机加装外挂武器前后的流线图如图 4 所示, 从图中可以看出, 由于采用弯管梁的方式加装外挂武器, 因此加装的外挂武器对直升机机身两侧的流场影响比较小。由于某型无人直升机算例样机采用的高置 T 型平尾, 因此外挂武器装备对平尾的气动特性影响也比较小。

3.2 前飞速度变化的影响

在执行任务过程中无人直升机会在不同的速

度下飞行, 前飞速度的变化对外挂武器的气动干扰有一定的影响。分别计算了 55.6, 40, 25 m/s 前飞时加装外挂武器前后的无人直升机气动特性, 计算结果如图 5 所示。由图 5(a)可以看出, 前飞速度变化时, 某型机 J 的气动阻力系数变化量比某型机大。随着前飞速度的不断降低, 阻力系数有所增大。分析图 5(b)可以看出, 前飞速度变化对加装外挂武器前后的无人直升机纵向气动特性影响比

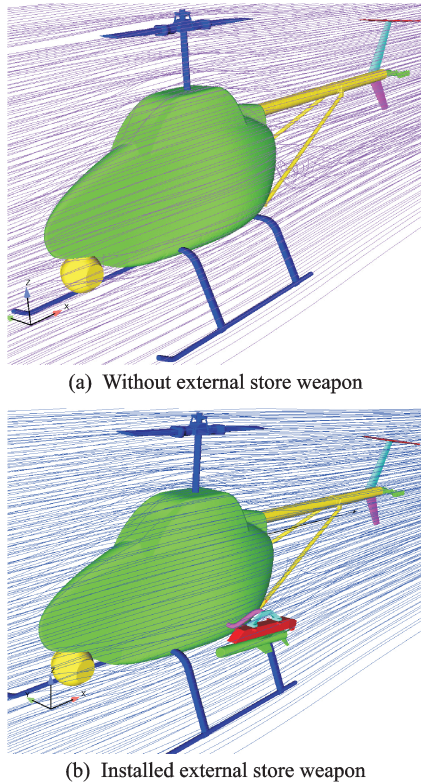


图 4 全机流场对比图

Fig. 4 Streamline of helicopters

较小。根据图 5(c)可以看出,某型机和某型机 J 的俯仰力矩线基本上不受前飞速度变化的影响。

3.3 发射安装角变化的影响

在无人直升机研制初期需要选定外挂武器的发射安装角,其中不同的发射安装角变化对全机气动特性的影响如图 6 所示。由图 6(a)可以看出负迎角范围内 6° 发射安装角时的阻力相对比较大,在正迎角范围内 9° 发射安装角时的阻力相对比较大,而 0° 安装发射角时的阻力最小。由于发射安装角相当于给定了导弹的初始迎角,因此导弹、导发架和挂架的初始迎角随安装发射角的变化而变化。由图 6(b)可以看出不同导弹发射安装角时某型机 J 的俯仰力矩线斜率大都在 -0.13/rad 左右,基本上不受发射安装角变化的影响。根据图 6(c)可以看出某型机 J 的俯仰力矩线斜率大约为 -0.13/rad,基本上不受发射安装角变化的影响。

不同安装角时的表面压力分布图如图 7 所示,分析图中的压力分布可以看出,导弹的发射安装角变化时,外挂武器装备的表面压力分布基本上不变。挂梁与机身结合处的压力分布变化也非常小,因此对机身周围的流动影响很小。随着导弹发射安装角的不断增大,导弹挂架的来流方向的高压区域面积不断减小,在一定范围内降低了气动阻力。图 8 为不同安装角时的流线分布。由图中的流线分布可以看出,随着导弹发射安装角的增大,导发架和导弹的尾部区域的流动越来越复杂,流动分离越来越严重。

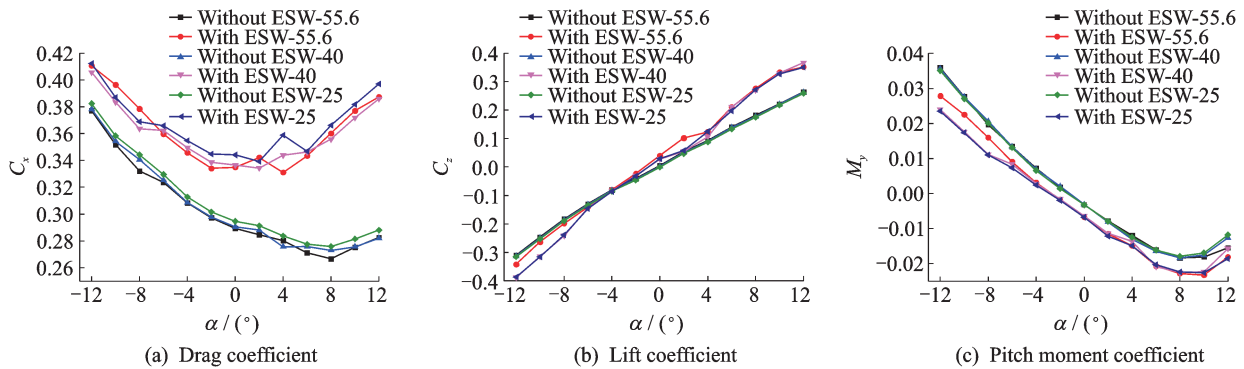


图 5 前飞速度变化时全机纵向气动特性图

Fig. 5 Longitudinal aerodynamic characteristics of helicopter in different flight speeds

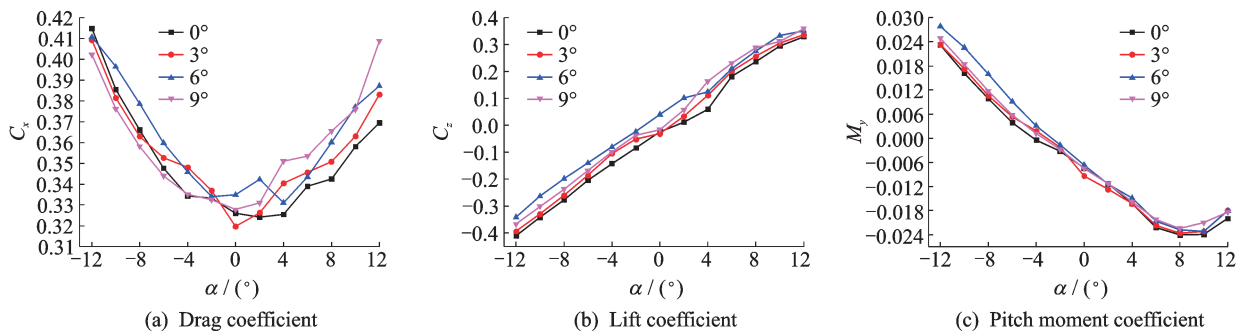


图 6 发射安装角变化时全机纵向气动特性图

Fig. 6 Longitudinal aerodynamic characteristics of helicopter with different weapon installation angles

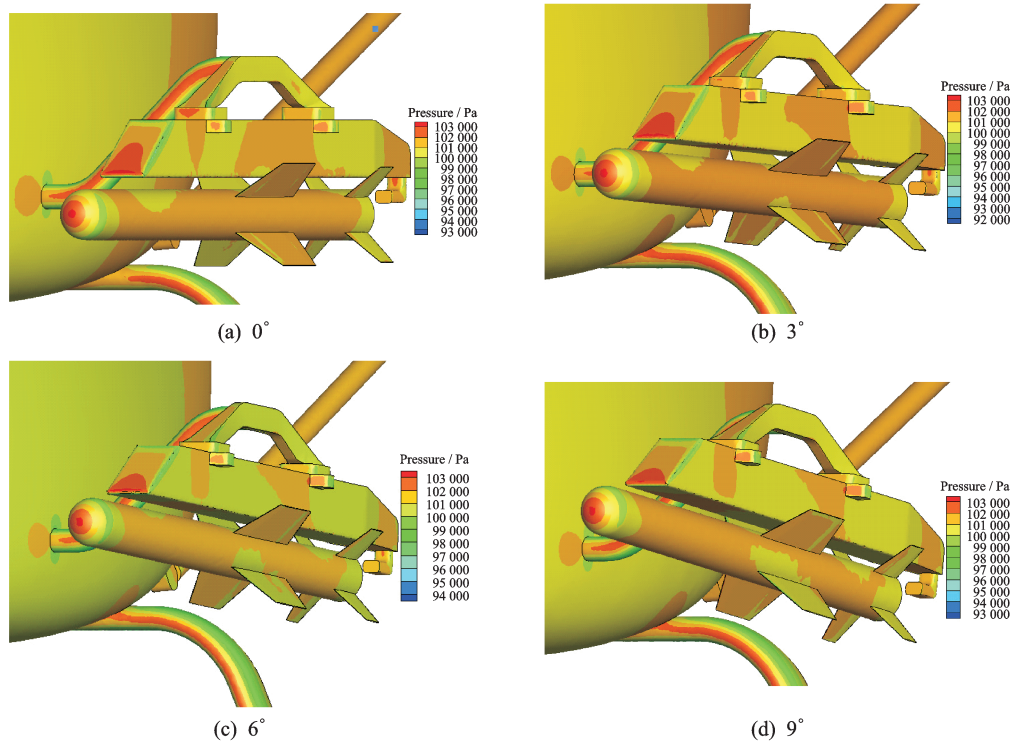


图7 发射安装角变化时表面压力分布图

Fig. 7 Surface pressure of different weapon installation angles

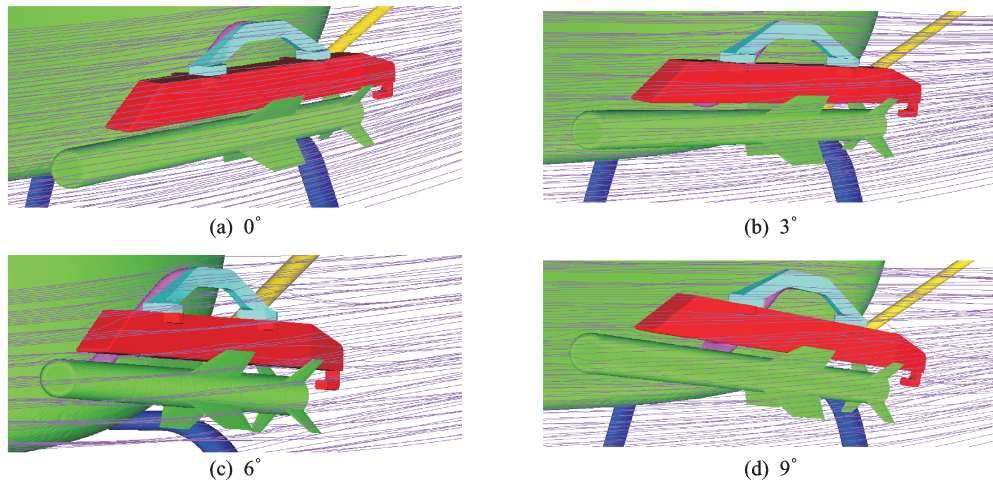


图8 发射安装角变化时流线分布图

Fig. 8 Streamline of different weapon installation angles

3.4 挂载状态变化的影响

外挂武器的挂载状态变化对某型机J的阻力、俯仰力矩和偏航力矩的影响如图9所示。图中挂两弹表示某型机J机身两侧各挂载一枚导弹；挂右弹表示机身右侧挂载一枚导弹，左侧的导弹已经发射完成；挂左弹则正好相反；无挂载表示两枚导弹发射完之后的状态。由图9(a)可以看出在负迎角范围内无挂载状态的阻力最大，而在正迎角范围内挂两弹状态的阻力相对比较大，而无挂载状态的阻力最小，其中挂右弹与挂左弹时全机的阻力基本上

一致。从图9(b)可以发现导弹挂载状态变化对全机俯仰力矩影响很小，各挂载状态的俯仰力矩线斜率基本上相等。根据图9(c)可以发现导弹挂载状态变化对全机俯仰力矩影响很小，各挂载状态的俯仰力矩线斜率基本上相等。

导弹发射前后外挂武器装备表面压力分布及流线对比图如图10,11所示，从图中可以看出，导弹发射之后，导发架尾部在来流方向上的压力有所增大；导弹发射之后，流过外挂武器装备的气流紊乱程度也有所降低。

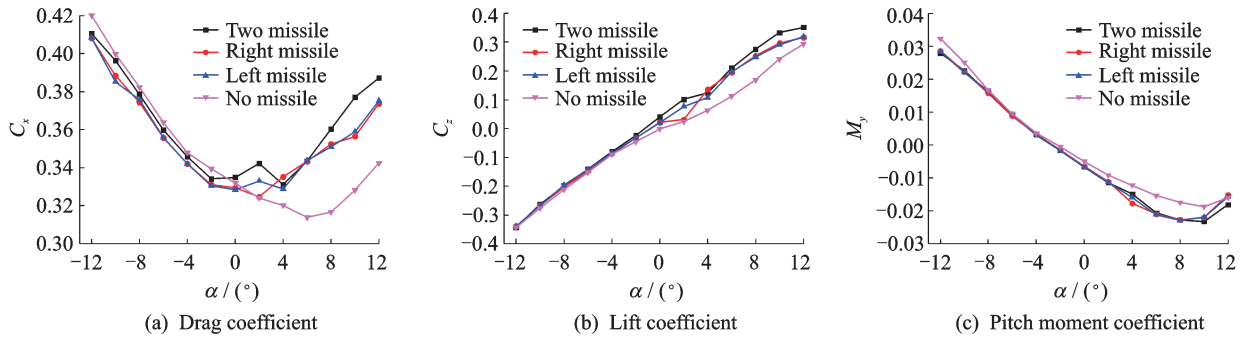


图 9 不同挂载状态时气动特性对比图

Fig. 9 Longitudinal aerodynamic characteristics of helicopter in different loading states

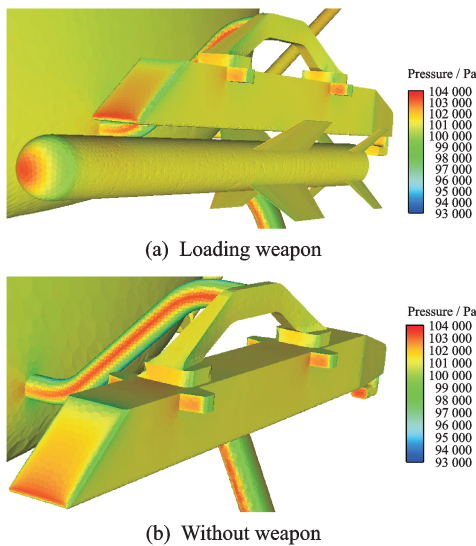


图 10 挂载状态变化时表面压力对比图

Fig. 10 Surface pressure of different loading states

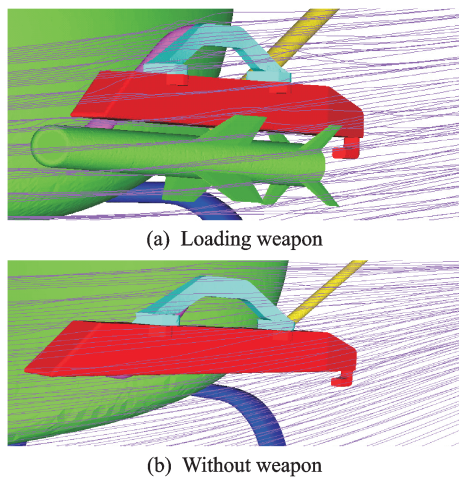


图 11 挂载状态变化时流线对比图

Fig. 11 Streamline of different loading states

4 结 论

通过对某型无人直升机算例样机加装外挂武器前后的纵向气动特性进行 CFD 计算,并经过对比分析,得出如下结论:

(1)通过弯管梁的方式在机身两侧加装外挂武器之后全机阻力增长比较大,但是对升力和全机俯仰力矩影响比较小。在本文分析的前飞速度范围内,前飞速度变化对外挂武器的气动干扰的影响比较小。

(2)在 $0^\circ \sim 9^\circ$ 导弹发射安装角范围内,加装外挂武器之后的全机阻力、升力和俯仰力矩基本上不变,武器发射安装角变化对无人直升机的气动特性影响比较小。

(3)加装外挂武器装备前无人直升机的纵向气动特性与加装武器之后有一定的差别,但是挂载导弹位置和数量变化时,无人直升机的纵向气动特性变化比较小。

参考文献:

[1] 赵维义. 救生绞车对直升机机身气动性能的影响研究[J]. 飞行力学, 2006, 24(3): 26-29.
ZHAO Weiyi. Research for effects of a lifesaving whim system on helicopter fuselage aerodynamic characteristics[J]. Flight Dynamics, 2006, 24(3): 26-29.

[2] 刘运孝. 外挂物在飞机上悬挂的气动相关性研究[J]. 飞行力学, 1985(4): 50-63.
LIU Yunxiao. Study on the aerodynamic correlation of external store on aircraft [J]. Flight Dynamics, 1985 (4): 50-63.

[3] 任庆祝, 赵晓霞, 刘毅, 等. 螺旋桨飞机滑流对全机气动特性影响的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(15): 214-217.
REN Qingzhu, ZHAO Xiaoxia, LIU Yi, et al. The experimental investigation of slipstream effect on propeller-driven airplane[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(15): 214-217.

[4] 张召明. 飞机外挂物投放低速风洞试验技术研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(3): 318-321.
ZHANG Zhaoming. Experimental research of jettison of aircraft external store in low speed wind tunnel[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2003, 35(3): 318-321.

- [5] ADREZIN R, GATES A, WEI F S, et al. Scaled model jettison tests of external stores during helicopter autorotation[C]//Proceedings of American Helicopter Society 56th Annual Forum. Virginia Beach, USA:[s.n.], 2000.
- [6] 夏良. 武器外挂和发射对直升机稳定性及运动参数的影响分析[J]. 飞行力学, 1990(3):33-41.
XIA Liang. Analysis the effect of carrying and launching weapon on the stability and motion parameter of helicopter [J]. Flight Dynamics, 1990(3):33-41.
- [7] TYNAN R J, BUCHMILLER G A. The influence of external loading on the design of a helicopter [C]//Proceedings of American Helicopter Society 22th Annual Forum. New York, USA:[s.n.], 1966.
- [8] 陈劲松. 某无人机薄翼-挂架-外挂低速空气动力干扰数值计算[J]. 南京航空航天大学学报, 1980, 12(4):42-58.
CHEN Jinsong. Numerical calculation of low speed aerodynamic interference of thin wing-pylon-store combination for a certain[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1980, 12(4):42-58.
- [9] 程晓亮, 李杰. 螺旋桨滑流对机翼气动特性影响的方法研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(14):3229-3235.
CHENG Xiaoliang, LI Jie. Unsteady computational method for the propeller/wing interaction[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(14):3229-3235.
- [10] KOZLOVSKY V B, SUMOVSKY N A, BARABASH S A, et al. Flight research of Mi-26 helicopter transportation of external parallelepiped cargo with stabilizing and aerodynamic drag reduction means [C]//Proceedings of American Helicopter Society 49th Annual Forum. Missouri, USA:[s.n.], 1993.
- [11] 聂光成, 魏贤智, 王勇. 外挂武器对载机飞行性能影响研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(2):24-27.
NIE Guangshu, WEI Xianzhi, WANG Yong. Analysis of the effect of external stores on aircraft flight performance[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2003, 4(2):24-27.
- [12] PETERSON A L. External fuel tanks for helicopters: The ultimate mission enhancer? The rest of the story [C]//Proceedings of American Helicopter Society 51th Annual Forum. Fort Worth, USA:[s.n.], 1995.
- [13] SVIRIDENKO A N, VOLODKO A M. Static stability and controllability of helicopter with an external load [C]//33th European Rotorcraft Forum. Kazan, Russia:[s.n.], 2007.
- [14] 童中翔, 董小龙. 外挂对载机气动特性的影响研究[J]. 飞行力学, 2005, 23(2):32-34.
TONG Zhongxiang, DONG Xiaolong. Study on influence of external stores on aerodynamic characteristics of the fighter plane[J]. Flight Dynamics, 2005, 23(2):32-34.
- [15] 吴刚. 基于CFD方法的重型直升机吊挂流场及飞行特性分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
WU Gang. Analysis on flowfield and flight characteristics of heavy helicopter with slung load based upon CFD Method [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [16] PATTERSON B W, ENNS R, KING C, et al. Design and flight test of a hybrid external load stabilization system for an H-6 helicopter testbed [C]//Proceedings of American Helicopter Society 71th Annual Forum. Virginia Beach, USA:[s.n.], 2015.
- [17] BLAZEK J. Computational fluid dynamics: Principles and applications[M]. Amsterdam:Elsevier, 2001.
- [18] 雷乾勇, 朱清华. 风扇翼翼型气动特性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(4):509-515.
LEI Qianyong, ZHU Qinghua. Aerodynamic characteristics of fanwing airfoil based on CFD method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(4):509-515.
- [19] 杜思亮, 芦志明, 唐正飞. 开口壁式涵道螺旋桨气动特性数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(2):173-182.
DU Siliang, LU Zhiming, TANG Zhengfei. Numerical simulation on aerodynamic characteristics of air leakage ducted propeller[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(2):173-182.

(编辑:孙静)