

舰船运动对机舰耦合流场的影响研究

李海峰¹, 李通², 顾征², 刘戈², 汪成豪²

¹海军装备部, 北京

²中国船舶集团有限公司系统工程研究院, 北京

收稿日期: 2024年3月10日; 录用日期: 2024年6月4日; 发布日期: 2024年7月12日

摘要

机舰耦合流场是一个复杂紊乱的非定常流场, 存在着涡-涡干扰现象。在真实海况下, 舰船的六自由度摇摆运动会进一步恶化飞行甲板上方的流场环境, 因此有必要探究舰船的摇摆运动对飞行甲板上方机舰耦合流场的影响。现基于简化护卫舰和双桨旋翼的耦合模型, 通过CFD方法对舰船纵摇状态下的机舰耦合流场进行了数值模拟研究, 定性分析了耦合流场结构的发展变化, 同时对旋翼拉力进行了定量分析。随着舰船的纵摇运动, 摆动的机库尾涡会和桨尖涡混合在一起, 垂向气流也在不断变化, 旋翼拉力、压强和速度都出现了近似周期性的变化, 和纵摇运动的周期一致。相比于舰船的静止状态, 当甲板上扬至水平位置附近时, 旋翼拉力最大, 增加约14%, 当甲板下沉至水平位置附近时, 旋翼拉力最小, 减少约12%, 因此直升机要具有足够的操纵量, 及时改变总距以保证直升机在该状况下的安全性。

关键词

计算流体力学, 数值模拟, 非定常, 机舰耦合流场, 纵摇

Research on the Influence of Ship Motion on Ship/Helicopter Coupled Flow Field

Haifeng Li¹, Tong Li², Zheng Xie², Ge Liu², Chenghao Wang²

¹Naval Equipment Department, Beijing

²Systems Engineering Research Institute, CSSC, Beijing

Received: Mar. 10th, 2024; accepted: Jun. 4th, 2024; published: Jul. 12th, 2024

Abstract

The ship/helicopter coupled flow field is a complex and chaotic unsteady flow field, where exist vortex-vortex interference phenomenon. Under real sea conditions, the six-degree-of-freedom

swing motion of the ship will further worsen the flow field environment above the flight deck, so it is necessary to explore the influence of the ship's motion on the coupled flow field above the flight deck. Based on the simplified coupling model of frigate and rotor, the coupled flow field between the ship and the aircraft in the pitching state is numerically simulated by CFD method, and the development and change of the coupled flow field structure are qualitatively analyzed, and the rotor thrust is quantitatively analyzed. With the ship's pitching motion, the hangar wake vortex will be mixed with the blade tip vortex, and the vertical airflow will also change constantly. The rotor thrust, pressure and velocity all change approximately periodically, which is consistent with the period of pitching motion. Compared with the static state of the ship, when the deck rises to the horizontal position, the rotor thrust is the largest, increasing by about 14%, and when the deck sinks to the horizontal position, the rotor thrust is the smallest, decreasing by about 12%. Therefore, the helicopter should ensure that the helicopter has enough operating margin, and timely adjust the collective pitch to enhance the helicopter's take-off and landing safety in this situation.

Keywords

Computational Fluid Dynamics, Numerical Simulation, Unsteady, Ship/Helicopter Coupled Flow Field, Pitching

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

舰船的飞行甲板是舰载直升机的主要操作平台,但受无规则的海风、舰船六自由度运动和上层建筑尾流等多因素影响,舰面流场实际上是极其复杂的耦合流场,再加上直升机进行起降操作时,旋翼桨尖涡与舰船尾流相互掺混,大大增加了流场的随机性和紊流度,这会危及飞行员的生命安全,所以有必要对舰船飞行甲板上方的空气流场特性,特别是真实海况下的机舰耦合流场特性进行深入的研究。

早期在研究舰船甲板上方空气流场时主要采用实船测量[1]和风洞试验[2]两种手段,但是这两种方法成本比较高,需要耗费很大的人力物力,且试验周期长,不能很好地满足现代舰船研究的要求。随着近年来计算机技术的迅猛发展,计算流体力学(CFD)数值模拟手段得到逐步完善与发展,并在国内外被广泛应用到舰船上方空气流场的研究中。2009年洪伟宏等人[3]研究了上层建筑形式及布局对舰船空气流场的影响,发现减少上层建筑尺寸可以较明显地改善上层建筑附近区域的舰船空气流场特性;郜冶等人在美国 CVN 级航母上进行了风向变化对甲板涡结构特征影响的研究[4]。宗昆等人[5]使用“作用盘方法”和“运动嵌套网格”方法对舰载直升机起降区空气流场进行了对比研究。国外学者早期用 Cobalt 对美国 LHA 两栖攻击舰周围的非定常流场进行了数值模拟计算,发现计算结果和实验数据比较吻合[6]。Thorner 等人采用隐式大涡模拟(ILES)方法,在 14 种不同风角下对两种不同的皇家海军舰艇的流场进行了数值模拟计算[7]。近两年, Watson 等人对英国新航母伊丽莎白女王号(HMS Queen Elizabeth)上的非定常气流进行了数值计算和实验建模研究。结果表明,在斜风状态下,该航母的双舰岛结构会导致飞行甲板上产生更加复杂的气流[8]。为了开发一个舰船尾流验证数据库,国外提供了高度简化的护卫舰(SFS)几何模型[9][10]。图 1 中给出了 SFS 的更新版本 SFS2,在原始 SFS 的基础上加长了上层建筑并增加了三角形舰艏。后来,许多学者对这两种简化舰船模型周围的流场进行了一系列风洞实验以及数值模拟研究[11]-[18],发现机库后方存在回流区,同时产生了不稳定的分离剪切层。如果舰载直升机在起降过程中陷入回流区,

旋翼气动力会受到涡流的扰动，可能会导致飞行事故。

虽然已经有了大量的关于舰面流场的数值模拟研究，但基于舰船摇摆状态下的舰面流场研究较少。2012年赵永振计算了舰船在艏摇运动状态下[19]，飞行甲板上的非定常空气流动，但是计算周期较短，没有给出流场变化的周期性。李通等人[20]在2021年进行了舰船纵摇突变对舰面流场的影响研究，通过CFD方法得到了简谐运动下舰面流场的周期性，在改变纵摇的周期和振幅后，周期性流动会再次建立。然而对于摇摆状态下的机舰耦合流场研究还是比较欠缺，因此，本文基于护卫舰的简化模型SFS以及双桨叶旋翼模型，在顶风来流、纵摇状态下对甲板上的机舰耦合流场进行数值模拟计算，从而对运动甲板上的机舰耦合流场特性有进一步的认识。

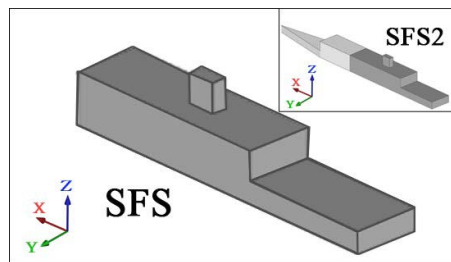


Figure 1. Schematic of SFS/SFS2
图 1. SFS/SFS2 几何模型示意图

2. 数值方法

由于舰船的速度较慢，其甲板上的流动为低速流动，但是旋翼在高速旋转状态下，桨尖附近的速度超过 0.3 马赫，属于可压缩流，所以给出可压流动的控制方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \mathbf{W} dV + \oint_{\partial V} [\mathbf{F} - \mathbf{G}] \cdot d\mathbf{A} = \int_V \mathbf{H} dV \quad (1)$$

其中， \mathbf{W} 、 \mathbf{F} 和 \mathbf{G} 分别为守恒变量、对流通量和黏性通量， \mathbf{H} 包含体积力等源项。

本文使用计算流体力学软件 Fluent 对流场进行非定常数值计算，采用雷诺平均方法中的 SST $k-\omega$ 湍流模型来封闭方程。选取密度基耦合隐式求解器，通量格式为 Roe-FDS 格式，时间推进为双时间步迭代法。对于桨叶旋转的实现，采用滑移网格方法该方法将计算域划分为旋转域和静止域，二者交界面处通过用两个重合的滑移面关联，来实现两个流场域的信息交互。对于纵摇运动的实现，采用动网格方法，在定义边界运动时，利用 Fluent 自带的 UDF (User Defined Function) 功能对运动区域的运动方式进行指定，网格更新采用弹簧光顺法和网格重构法。

在弹簧光顺方法中，网格被理想化为节点间相互连接的弹簧，根据胡克定律可以得到网格节点的弹簧力：

$$\mathbf{F}_i = \sum_j^{n_i} k_{ij} (\Delta \mathbf{x}_j - \Delta \mathbf{x}_i) \quad (2)$$

其中 $\Delta \mathbf{x}_i$ 和 $\Delta \mathbf{x}_j$ 分别为节点 i 与节点 j 在形变作用下发生的位移， n_i 为与节点 i 相连的节点数量， k_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的弹簧刚度，定义如下：

$$k_{ij} = k_{fac} / \sqrt{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|} \quad (3)$$

其中 k_{fac} 为弹簧因子，在本文中取 0.5。

当处于平衡状态时，与节点 i 相连接的所有弹簧力的合力为 0，可以得到如下迭代计算：

$$\Delta \mathbf{x}_i^{m+1} = \left(\sum_j^{n_j} k_{ij} \Delta \mathbf{x}_j^m \right) / \sum_j^{n_j} k_{ij} \quad (4)$$

其中 m 为迭代数，在本文中取 30。当迭代计算收敛后，节点 i 的位置通过下式更新：

$$\mathbf{x}_i^{n+1} = \mathbf{x}_i^n + \Delta \mathbf{x}_i^{\text{converged}} \quad (5)$$

3. 几何模型与网格

本文的计算模型如图 2 所示，其中舰船模型为 SFS2，双桨叶旋翼直径为 10.5 米，采用 NACA0012 翼型。旋翼悬停于 SFS2 甲板中心上方 10 米高度，旋翼桨距角为 8° ，转速为 300 r/min。流场域划分如图 3 所示，蓝色区域为远场域，红色区域为运动区域，包裹着舰船做纵摇运动，黄色区域为旋翼尾流区域，绿色区域旋翼区域，包裹着桨叶旋转。计算网格如图 4 所示，使用非结构网格生成流场域，总的网格单元数大约 930 万，其中舰船周围和旋翼下方尾迹区进行了加密处理。

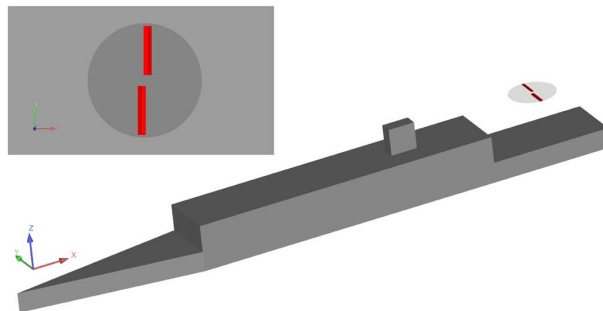


Figure 2. Schematic of rotor-ship coupled model
图 2. 旋翼 - 舰船耦合模型示意图

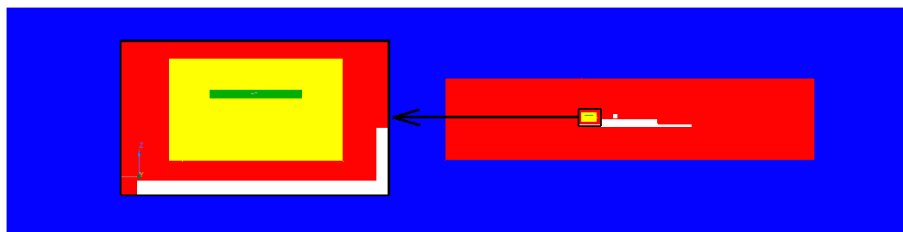


Figure 3. Schematic of flow field
图 3. 流场域划分示意图

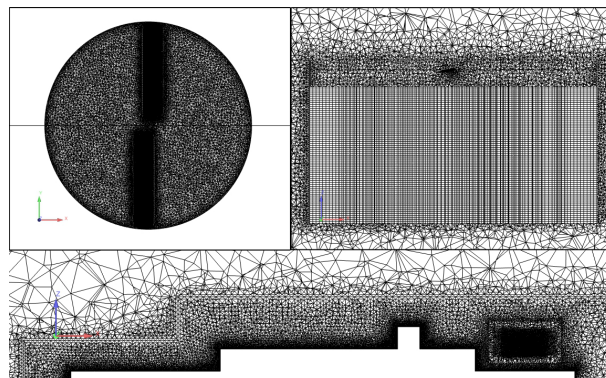


Figure 4. Schematic of grid
图 4. 计算网格示意图

4. 结果分析

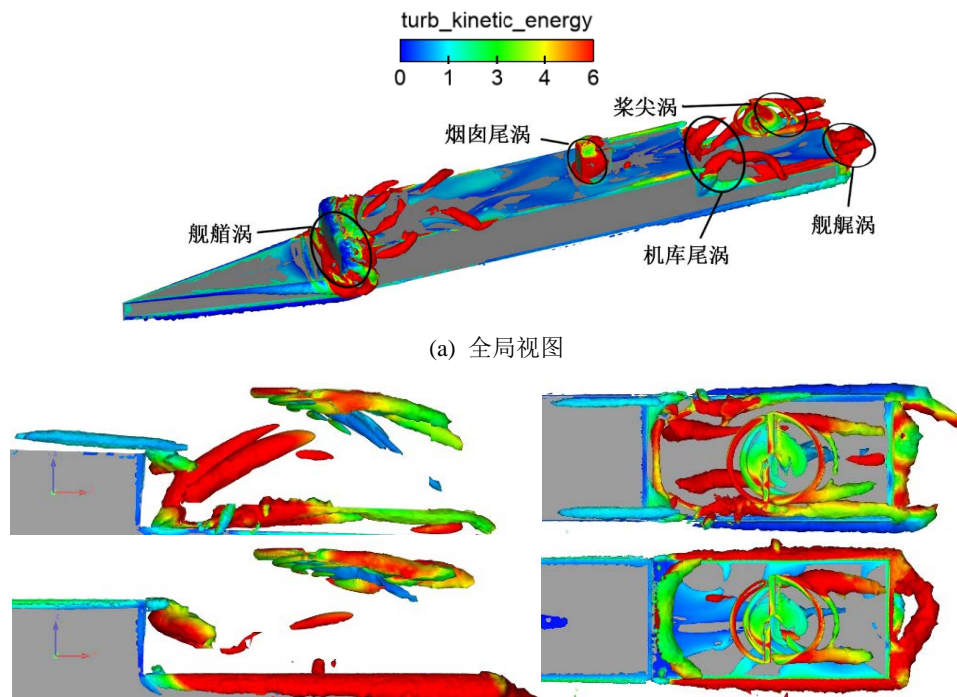
在真实海况下，由于海浪的随机性，舰船的摇摆情况比较复杂，一般为不规则的运动，但是已有学者将舰船摇摆运动假设为简谐运动，进行直升机/舰组合风限图计算方法的研究[21] [22]，因此本文为舰船纵摇建立简谐运动模型，其运动方程为：

$$\omega = A \cos(2\pi t/T + \theta) \quad (6)$$

其中 ω 表示舰船绕 Y 轴转动的角速度，单位为弧度/秒， t 和 T 分别表示任意时刻和纵摇周期，单位为秒， θ 为初相。本文中 $A = 0.1$ ， $T = 2$ 秒， $\theta = 0$ ，则纵摇周期为 2 秒，最大纵摇角度约为 2° ，绕舰船中心做周期性纵摇运动。在 0° 风向角，20 m/s 的均匀来流条件下，对纵摇状态下的机舰耦合流场计算了 8 个周期。

4.1. 纵摇对耦合流场结构的影响

当旋翼在机库后方的甲板上进行起降作业时，会陷入机库尾涡和旋翼桨尖涡的混合涡流区，对旋翼气动力产生不利的影响。图 5 给出了一个纵摇周期中甲板上方涡结构分布图，包括机库尾涡，舷涡、舰艏涡和旋翼的桨尖涡，用 λ_2 等值面显示。图中用湍动能大小着色，红色区域为强湍动能区域，表示速度脉动较大。从上往下分别为 $T/4$ ， $T/2$ ， $3T/4$ ， T 时刻，表示甲板从下沉到上扬再到水平位置的过程。从图中可以明显地看到旋翼脱落出一圈又一圈的桨尖涡，在来流的影响下，向斜后方发展。随着舰船的纵摇运动，甲板上下浮沉，导致机库尾涡也出现了上下摇摆，同时，旋翼桨尖涡的发展也有所不同。在甲板末端下沉到最低位置时，即 $T/4$ 时刻，机库尾涡发展较充分，且上扬至旋翼下方，有可能出现涡-涡干扰，影响到旋翼气动力。在 $T/2$ 和 $3T/4$ 时刻，旋翼下方的涡结构较少，特别是 $T/2$ 时刻，机库尾涡对旋翼的影响较小。在 T 时刻，桨尖涡的发展比较充分，向下脱落至机库高度，和旋翼下方的充分发展的机库尾涡混合在一起，使得旋翼下方的流场相当紊乱。舰载直升机如果在 T 时刻进行降落，很可能会陷入混合涡中，导致旋翼拉力不足，影响飞行员正常操纵，严重情况下会导致安全事故。



(a) 全局视图

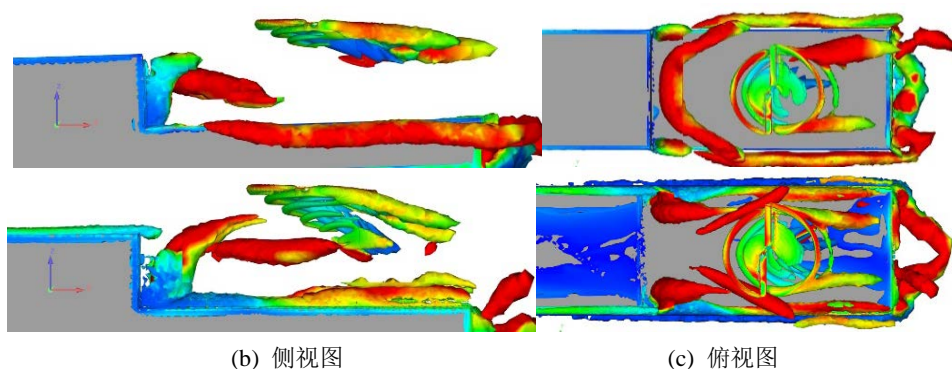


Figure 5. Distribution of vortex structure (from top to bottom: T/4, T/2, 3T/4, T)
图 5. 运动甲板上方混合涡结构分布图(从上往下分别为 T/4, T/2, 3T/4, T)

为了更直观地描述旋翼周围的流动情况,图 6 给出了运动甲板上方的空间流线图,用垂向速度着色。流线在经过旋翼时向下偏折,形成诱导下洗流,随着甲板的上扬,流线末端逐渐向上偏折,在 T 时刻,由于甲板的下沉,使得流线的下洗效果明显,碰撞在甲板表面。在整个纵摇过程中,通过桨盘的流线束也是在不断摆动,对甲板后方区域的流场产生了明显的扰动。

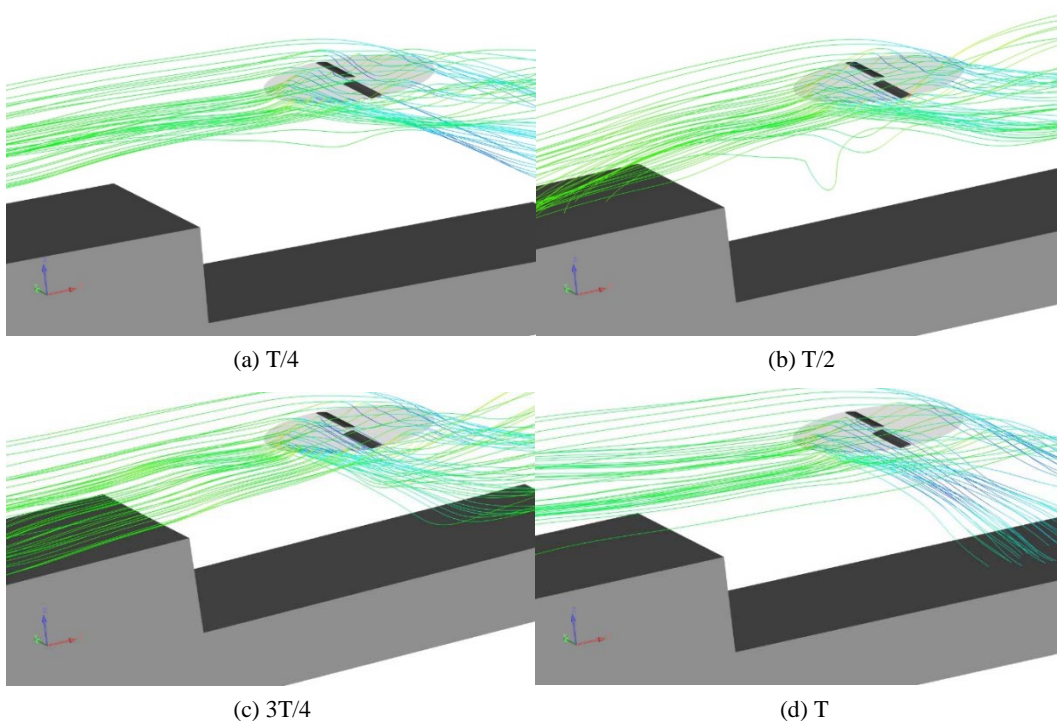


Figure 6. The spatial streamline over deck
图 6. 运动甲板上方空间流线图

图 7 给出了一个纵摇周期里耦合流场中的涡量云图,其中红色表示涡量大的区域。在舰船的运动过程中,旋翼下方的桨尖涡和甲板两侧的舷涡具有较大的涡量,其次是机库尾涡。可以观察到,在纵向截面上,当甲板下沉速度最大时,即 T 时刻,甲板上方的下洗区域进一步扩大,而流场中的涡量以速度分量导数的形式存在,当旋翼处于甲板加速下沉带来的额外下洗区域时,会直接影响旋翼桨尖涡的生成发展,导致其桨尖涡充分向下发展,和机库尾涡混合在一起,产生明显的“涡-涡干扰”现象。

图 8 给出了运动甲板上的垂向速度云图，在舰船的纵摇过程中，甲板的上下浮沉会造成其上方垂向气流的明显变化，当旋翼周围的垂向气流不稳定时，会造成旋翼拉力的不稳定，导致旋翼抖动。在横向截面中，可以注意到在 $T/2$ 时刻，随着甲板的上翘，甲板上方出现了上洗区域，该上洗流在桨叶附近会增加来流迎角，进而增加旋翼拉力。然而在 T 时刻，旋翼下方的下洗区域较大，由于甲板的阻碍，在甲板上方形成了“正八”形的下洗区域，延伸至甲板表面。大区域的下洗流会减小桨叶的有效迎角，使得拉力降低，这种状态下直升机可能会掉高度，这需要引起飞行员的注意。

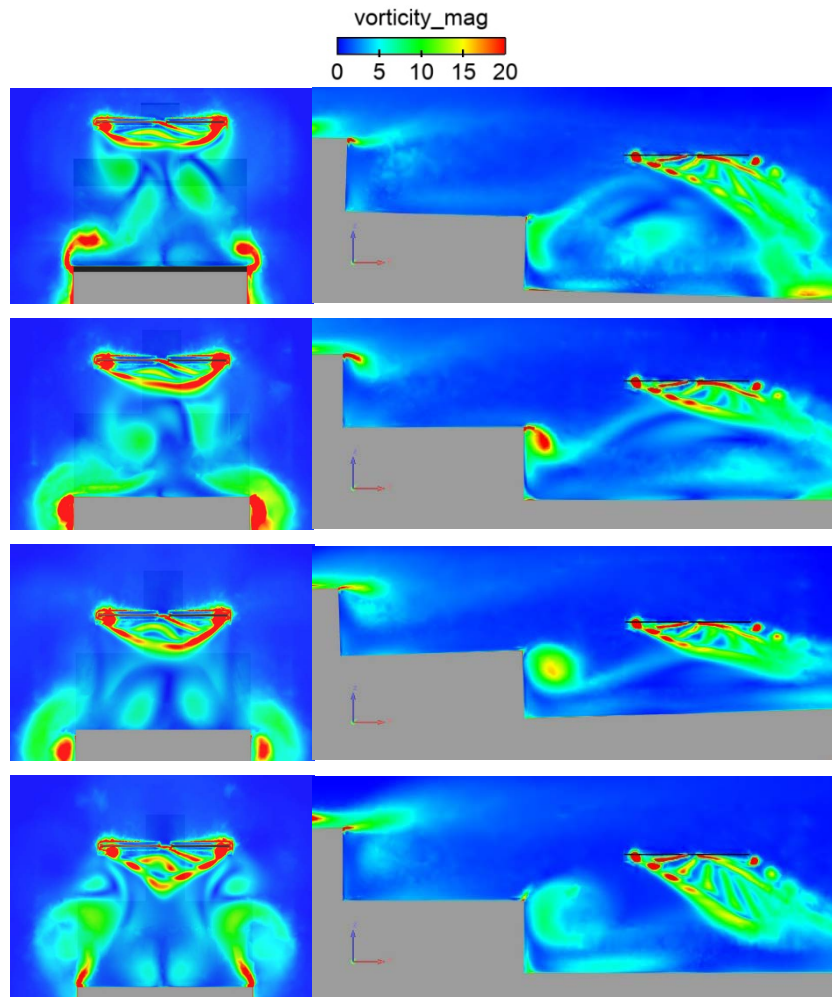
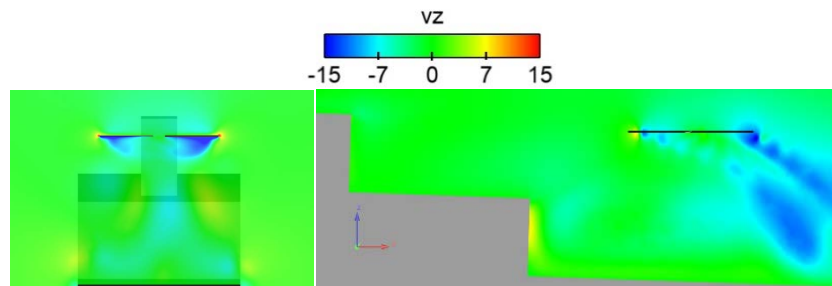


Figure 7. The contour of vorticity over deck (from top to bottom: $T/4$, $T/2$, $3T/4$, T)

图 7. 运动甲板上方涡量云图(从上往下分别为 $T/4$, $T/2$, $3T/4$, T)



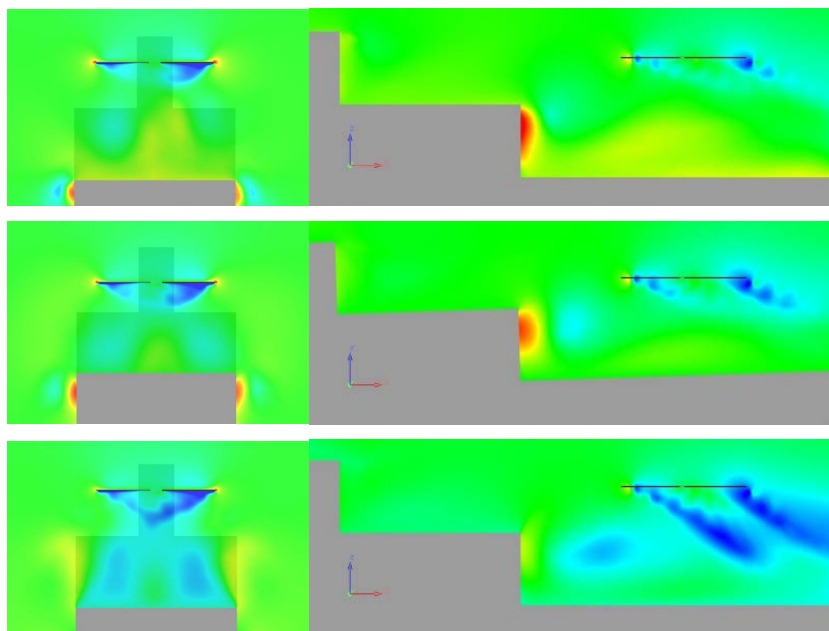


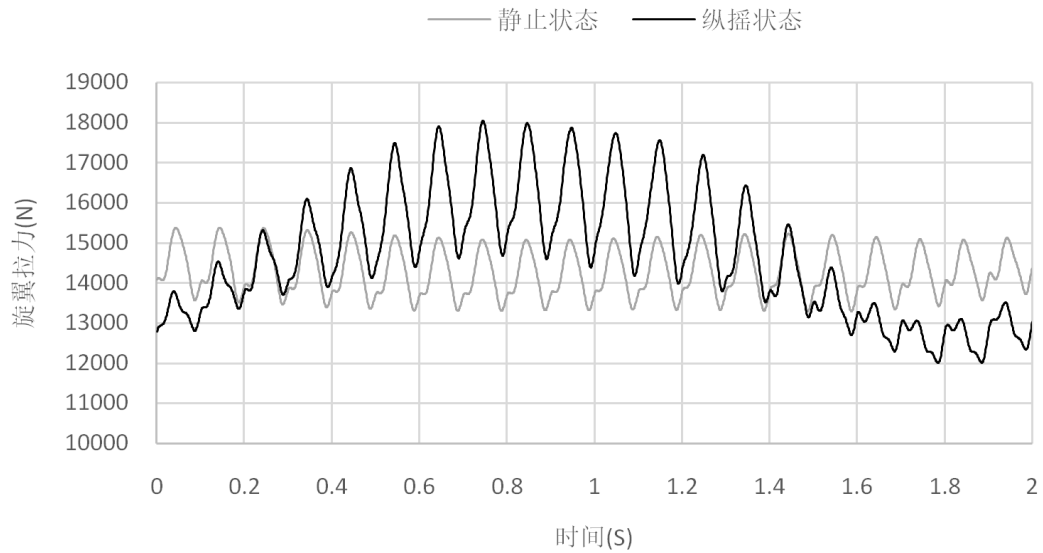
Figure 8. The contour of vertical velocity over deck (from top to bottom: $T/4$, $T/2$, $3T/4$, T)
图 8. 运动甲板上方垂向速度云图(从上往下分别为 $T/4$, $T/2$, $3T/4$, T)

4.2. 纵摇对耦合流场影响的定量分析

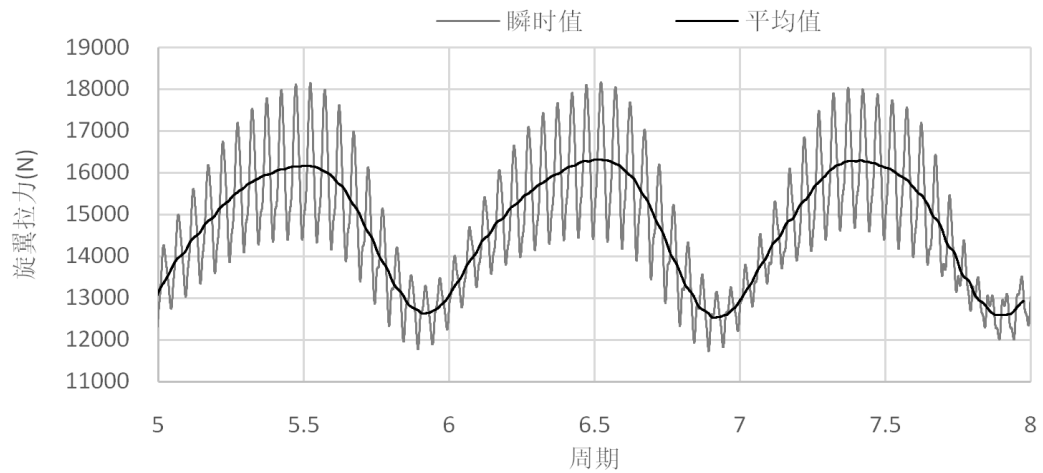
为了进一步研究分析纵摇运动对耦合流场参数的影响,还进行了耦合流场的定量分析。首先针对旋翼气动力的影响,给出了纵摇运动中旋翼拉力变化曲线图,如图 9 所示,其中选取了最后三个周期的流场进行分析。为了得到纵摇运动对旋翼拉力带来的影响,图 9(a)给出了舰船在静止状态和纵摇状态下旋翼拉力的对比,其中选取第 8 个纵摇周期中的拉力变化。在有来流的情况下,旋翼的前行桨叶和后行桨叶由于来流速度不同导致受力不同,因此在没有考虑桨叶挥舞、变距和摆振运动的情况下,旋翼旋转一圈得到的拉力会有明显的波动,如图中所示出现了许多局部峰值。对于两种状态,旋翼旋转一圈为 0.2 秒,在 0.2 秒中拉力都出现了两个峰值,符合双桨叶的拉力变化特性。可以看到静止状态下的旋翼拉力变化趋势呈直线分布,平均值在 14,300 N 左右,而纵摇状态下的旋翼拉力变化趋势呈正弦波分布,是简谐运动导致的,其平均值的最大值在 $T/2$ 附近,约为 16,300 N,在 T 时刻附近,旋翼拉力降到了最小,约为 12,600 N,峰值相差 3700 N,拉力降低了约 23%,会影响舰载直升机在甲板上的悬停和起降作业,需要飞行员及时采取相应措施,调整总距,以防止直升机突然掉高度,撞击甲板,造成飞行事故。在悬停过程中,当舰船从静止状态开始纵摇时,旋翼平均拉力会从约 14,300 N 的基础上先增加约 14%,在 $T/2$ 时刻左右达到最大值,之后又减少约 12%,达到最小值,直升机要具有足够的操纵量,及时改变总距,才能保证直升机在该状况下的稳定性。

图 9(b)给出了最后三个纵摇周期中旋翼拉力的瞬时值和平均值变化图。从纵摇的整体来看,随着舰船周期性的摇摆,旋翼拉力也呈现出近似周期性的变化,其周期为 2 秒,和纵摇周期一致。通过和之前的定性结果对比分析,可以得到一致的结论,旋翼拉力在 $T/2$ 时刻附近最大,在 T 时刻附近最小。当甲板处于下沉阶段时,旋翼会陷入混合涡以及强下洗区域,导致旋翼拉力较低。

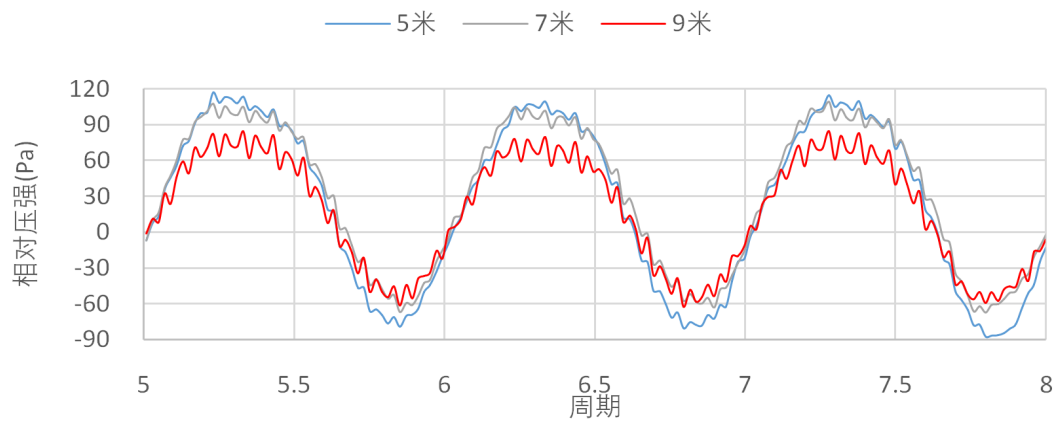
在甲板中心正上方 5 米、7 米和 9 米高度处取三个观测点,探究纵摇运动对该位置处压强和速度的影响,并给出了其变化曲线图(图 10、图 11)。在相对压强变化图中可以看出,随着舰船周期性的摇摆,旋翼-舰船耦合流场中不同高度位置的压强变化趋势和大小基本相似,也都呈现出近似周期性的变化,其周期和纵摇周期一致,且与拉力的变化趋势相似,在 $3T/4$ 到 T 时刻之间,旋翼下方压强降到了最小,导致旋翼拉力最小。



(a) 两种状态下的拉力对比



(b) 3个纵摇周期中的拉力变化

Figure 9. Variations of rotor thrust**图 9.** 旋翼拉力变化图**Figure 10.** Variations of relative pressure**图 10.** 相对压强变化图

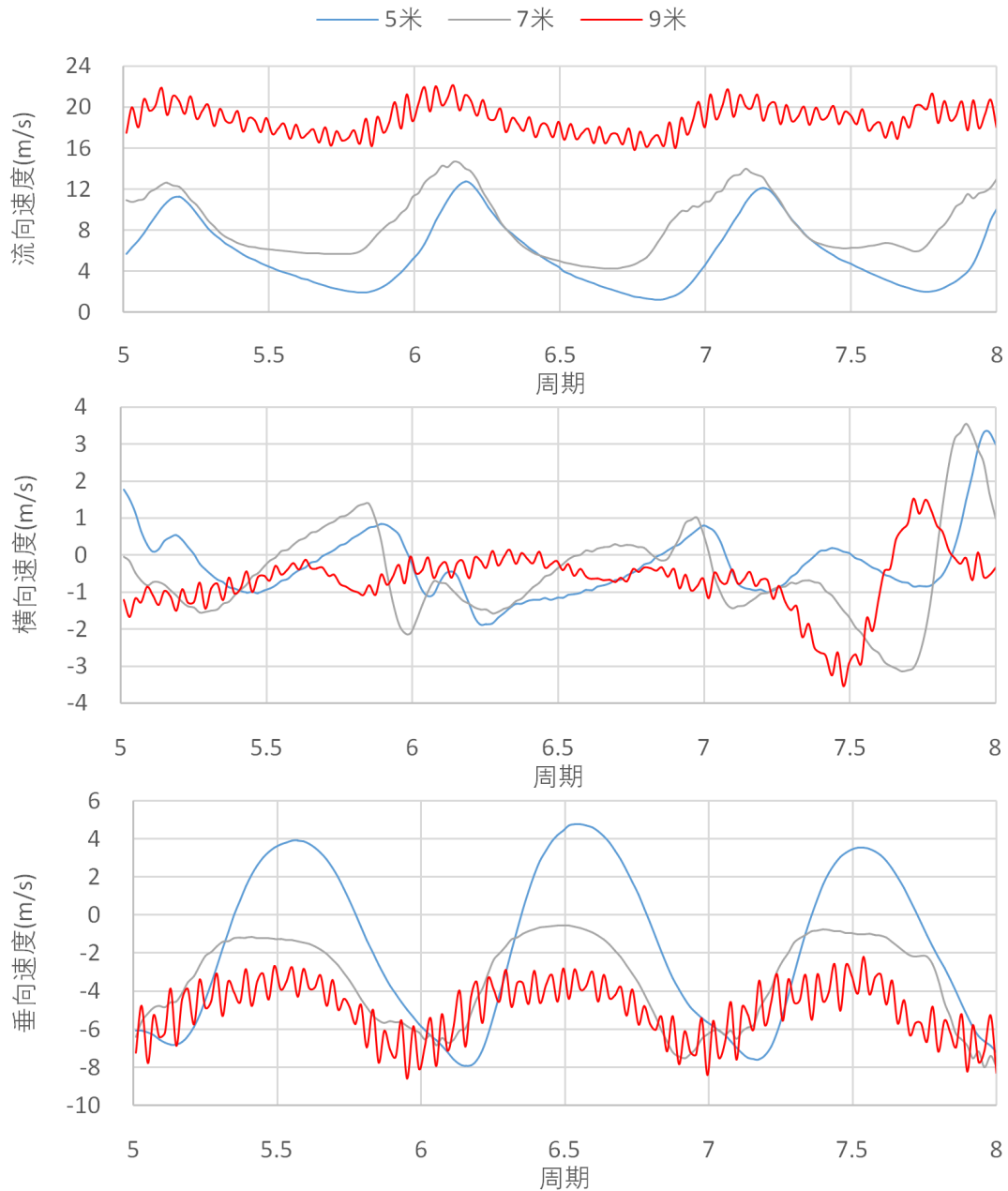


Figure 11. Variations of velocity components

图 11. 速度分量变化图

三个高度处的流向速度和垂向速度基本都呈现出周期性变化,和纵摇周期一致,但是不同高度处的速度大小有所不同。对于流向速度,9米高度处的位置离旋翼最近,流动比较紊乱,其垂向速度波动比较明显,且速度最大,变化范围最小。对于垂向速度,9米高度处的垂向速度波动也比较明显,一直处于旋翼的下洗流中,变化范围最小。5米高度处的位置离甲板最近,受到纵摇运动的影响最大,导致其垂向速度的变化范围最大,伴随着上洗流和下洗流的交替变化。而各位置的横向速度比较紊乱,没有呈现出周期性变化。

5. 结论

机舰耦合流场是一个复杂紊乱的非定常流场,在真实海况下舰船的六自由度摇摆运动会进一步影响

飞行甲板上方的流场环境,从而威胁到舰载直升机在甲板上的安全性。本文基于 CFD 数值模拟方法,采用 SFS2 舰船模型和双桨旋翼模型,建立旋翼-舰船耦合模型,对周期性纵摇状态下的机舰耦合流场进行了数值模拟研究,得到以下结论:

1) 舰船的纵摇运动会造成摆动的机库尾涡会和旋翼桨尖涡会混合在一起,形成“涡-涡”干扰的复杂流场,同时会对甲板上方的垂向气流以及涡结构造成明显的影响。

2) 当旋翼悬停于简谐纵摇运动的甲板上,其拉力变化趋势呈正弦波分布,平均值的最大值在 T/2 附近。随着甲板的下沉,在 T 时刻附近,旋翼拉力在 T 时刻附近降到了最小,降低了约 23%。当舰船从静止状态开始纵摇时,旋翼拉力会先增加约 14%,之后又减少约 12%。因此直升机要具有足够的操纵量,及时改变总距,才能保证直升机在该状态下的稳定性。

3) 随着舰船周期性的摇摆,旋翼下方不同高度处的压强和速度分量(除横向速度)也呈现出近似周期性的变化,和纵摇周期一致,流动在靠近旋翼的地方会出现明显的波动。

参考文献

- [1] 顾蕴松, 明晓. 舰船飞行甲板真实流场特性试验研究[J]. 航空学报, 2001, 22(6): 500-504.
- [2] 赵维义, 王占勇. 舰船空气尾流场对直升机着舰的影响研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2007, 22(4): 435-438.
- [3] 洪伟宏, 姜治芳, 王涛. 上层建筑形式及布局对舰船空气流场的影响[J]. 中国舰船研究, 2009, 4(2): 53-58.
- [4] 郗治, 刘长猛, 贺征. 风向变化产生的航母甲板涡结构特征研究[J]. 空气动力学学报, 2013, 31(3): 310-315.
- [5] 宗昆, 宗伟, 李海旭, 等. 舰载直升机起降区空气流场模拟方法研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(2): 124-130.
- [6] Polsky, S. (2002) A Computational Study of Unsteady Ship Airwake. 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, 14-17 January 2002, 1-10. <https://doi.org/10.2514/6.2002-1022>
- [7] Thornber, B., Starr, M. and Drikakis, D. (2010) Implicit Large Eddy Simulation of Ship Airwakes. *The Aeronautical Journal*, **114**, 715-736. <https://doi.org/10.1017/s000192400004218>
- [8] Watson, N.A., Kelly, M.F., Owen, I., Hodge, S.J. and White, M.D. (2019) Computational and Experimental Modelling Study of the Unsteady Airflow over the Aircraft Carrier HMS Queen Elizabeth. *Ocean Engineering*, **172**, 562-574. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.024>
- [9] Forrest, J.S. and Owen, I. (2010) An Investigation of Ship Airwakes Using Detached-Eddy Simulation. *Computers & Fluids*, **39**, 656-673. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2009.11.002>
- [10] Wilkinson, C., Zan, S., Gilbert, N., et al. (1998) Modelling and Simulation of Ship Air Wakes for Helicopter Operations: A collaborative Venture. *RTO Meeting proceedings*, Amsterdam, 5-8 October 1998, 1-8.
- [11] Cheney, B.T. and Zan, S.J. (1999) CFD Code Validation Data and Flow Topology for the Technical Co-Operation Program AER-TP2 Simple Frigate Shape. Technical Report.
- [12] Zan, S.J. (2001) Surface Flow Topology for a Simple Frigate Shape. *Canadian Aeronautics and Space Journal*, **47**, 33-43.
- [13] Mora, R.B. (2014) Experimental Investigation of the Flow on a Simple Frigate Shape (SFS). *The Scientific World Journal*, **2014**, Article 818132. <https://doi.org/10.1155/2014/818132>
- [14] Reddy, K.R., Toffoletto, R. and Jones, K.R.W. (2000) Numerical Simulation of Ship Airwake. *Computers & Fluids*, **29**, 451-465. [https://doi.org/10.1016/s0045-7930\(99\)00033-x](https://doi.org/10.1016/s0045-7930(99)00033-x)
- [15] Zhang, J., Minelli, G., Rao, A.N., Basara, B., Bensow, R. and Krajnović, S. (2018) Comparison of PANS and LES of the Flow Past a Generic Ship. *Ocean Engineering*, **165**, 221-236. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.07.023>
- [16] Yuan, W., Wall, A. and Lee, R. (2018) Combined Numerical and Experimental Simulations of Unsteady Ship Airwakes. *Computers & Fluids*, **172**, 29-53. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.06.006>
- [17] 操戈, 程捷, 毕晓波, 等. 基于 DES 的舰船空气尾流场特性分析[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(3): 48-54.
- [18] Zhao, R., Rong, J.-L., Li, H.-X. and Zhao, P.-C. (2015) Entropy-Based Detached-Eddy Simulation of the Airwake over a Simple Frigate Shape. *Advances in Mechanical Engineering*, **7**, 1-13. <https://doi.org/10.1177/1687814015616930>
- [19] 赵永振. 大型舰船定常与非定常气流场数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [20] 李通, 王逸斌, 赵宁. 舰船纵摇突变对舰面流场的影响[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(3): 80-89.
- [21] 王存仁, 朱玉兵. 直升机-舰组合风限图计算方法研究[J]. 飞行力学, 1996(1): 36-40.
- [22] 章晓冬, 侯志强, 胡国才, 等. 某型舰载直升机着舰风限图的计算[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(10): 30-33.