doi:10.11887/j.cn.201703009 http://journal.nudt.edu.cn

水下应用栅格翼动态展开参数预示方法*

鲍文春,权晓波,李 岩,程少华,王占莹
(北京宇航系统工程研究所,北京 100076)

摘 要:基于水下应用栅格翼动态展开过程动力学模型,根据展开特征角度定常水动力方法,拟合获得展开全程受到的流体力矩,并引入考虑相对速度影响的修正因子,形成水下应用栅格翼动态展开过程参数工程预示方法,以典型展开时序点航行体运动参数为设计输入,对栅格翼展开过程运动参数进行预示。通过与水下应用栅格翼非定常流场仿真计算数据以及水下航行体弹射试验数据对比,验证了上述预示方法的正确性及工程适用性,为水下应用栅格翼方案设计的优化及展开不同步性分析提供设计参考。

关键词:栅格翼;动态展开;预示方法
中图分类号:V211.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2017)03-052-06

Parameters prediction method of underwater grid fins during the procedure of dynamic expansion

BAO Wenchun, *QUAN Xiaobo*, *LI Yan*, *CHENG Shaohua*, *WANG Zhanying*
(Beijing Institute of Space System Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Based on the kinetic model of underwater grid fins during the procedure of dynamic expansion, a prediction method was developed, which took the motion parameters at typical expansion points as the design input. The hydrodynamic moment used in the kinetic model was fitted by the values obtained in steady hydrodynamic conditions with specific expansion angles. A modified factor in consideration of the relative velocity was included as well. By comparing with the results obtained by unsteady numerical simulations and the underwater vehicle experiment data, the prediction method is verified, which can provide a design reference for the optimum proposal of the underwater grid fins and the analysis of non-synchronization expansion.

Key words: grid fin; dynamic expansion; prediction method

栅格翼是由很多薄的翼片镶嵌在边框内组成的升力体系统。近年来,栅格翼作为一种新型承力结构凭借其尺寸较小、可折叠安装、升力面积大、强度-重量比高等优点被广泛应用于航天及武器型号研制之中[1]。借鉴栅格翼在改善气动力方面的优势,拟将栅格翼技术应用于水下航行体水下发射技术中。受发射方案及发射筒空间的限制,栅格翼在发射筒内须处于折叠状态[2],航行体出筒后,栅格翼在展开机构及本身的水动力矩作用下自动打开,在航行体水中运动阶段起到稳定和控制的作用[3]。由于水的密度约为空气密度的800倍,栅格翼展开过程中角速度不断增加,因此栅格翼展开到位后将引起较强的冲击,对展开角速度进行预示是栅格翼动态强度设计的先决条件。水下应用栅格翼在展开结构作用下完成初始展开动作,然后在自身流体动力作用下持续展开动作。由于水下垂直发射航行体水中作用时间较短,因此水下应用栅格翼展开用时是水下栅格翼方案的关键设计指标之一。完成特定展开方案下栅格翼展开过程参数预示,将为分析栅格翼动态强度设计、栅格翼展开机构设计,以及展开时序等的合理性及可行性奠定基础,同时也是航行体上多片栅格翼展开不同步性分析的重要依据。

目前,针对水下应用栅格翼动态展开问题相关的可参考文献较少,理论研究也需要进一步完善。

1 栅格翼动态展开动力学模型

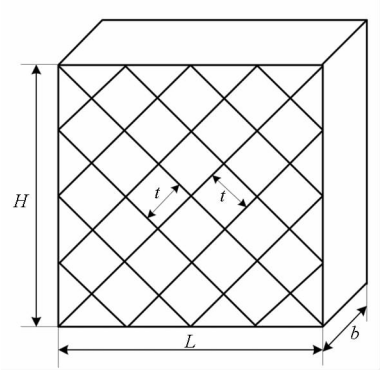
本节首先选取一定外形尺寸的栅格翼,建立其展开过程动力学模型。利用定常计算结果得到展开过程期间栅格翼受到的流体力矩,求解动态

* **收稿日期**:2015-12-25
基金项目:教育部重点实验室基金资助项目(11172325,90716015)
作者简介:鲍文春(1988—),女,吉林榆树人,工程师,硕士,E-mail:baowenchun@126.com

展开过程控制方程组,获得栅格翼动态展开角速度等参数变化规律。形成适用于栅格翼动态展开过程参数工程预示方法。

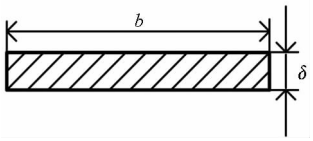
1.1　栅格翼外形参数

根据已有文献中栅格翼结构特征[4],选择如图 1 所示的斜置蜂窝状栅格翼进行研究,栅格翼翼形剖面为矩形,具体尺寸参数如表 1 所示。



(a) 基本外形

(a) Basic configuration



(b) 翼形剖面

(b) Grid fin profile

图 1　栅格翼几何外形示意图

Fig. 1　Schematic of the configuration of the grid fin

表 1　栅格翼结构尺寸

Tab. 1　Structure size of the grid fin　　mm

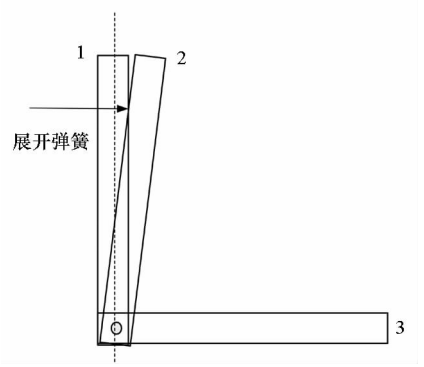
翼高 H	翼展 L	翼弦 b	格间距 t	翼片厚度 δ
210	220	25	30	2

1.2　栅格翼展开过程控制方程组

图 2 给出了水下应用栅格翼展开过程示意图,其中 V_0 代表栅格翼展开时航行体运动速度。栅格翼在筒内折叠安装在模型尾部区域(位置 1),出筒后栅格翼解锁在助展弹簧和水动外力的作用下展开至与弹体垂直的设计位置(位置 3)。根据栅格翼展开过程受力特性将展开过程分为两个阶段进行分析。

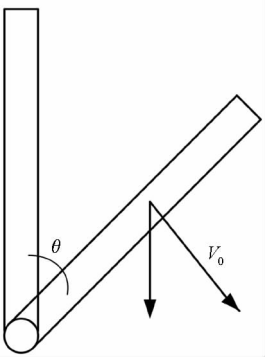
阶段 1:栅格翼解锁至边框上沿突出弹体表面(位置 1 ~ 位置 2,此时 $\theta \leqslant 5°$),此过程栅格翼运动速度较低,翼片前后面压差较小,栅格翼受到的流体力矩较小,此过程栅格翼主要在展开弹簧、转轴摩擦力等的作用下开始绕转轴运动;

阶段 2:栅格翼边框突出弹体至展开到位过程(位置 2 ~ 位置 3,此时 $\theta \leqslant 5°$),此过程栅格翼在水动外力矩的作用下加速展开。



(a) 栅格翼在展开弹簧作用下初始展开

(a) Initial expansion by the spring mechanism



(b) 栅格翼在水动力作用下继续展开

(b) Further expansion by the hydrodynamic force

图 2　栅格翼展开过程示意图

Fig. 2　Schematic of the expansion process

根据栅格翼展开过程受力分析并参考相关文献资料[2,5],可以建立栅格翼绕转轴展开过程运动方程:

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\begin{cases}(M_{簧}-M_{摩擦力矩})/(Jz+\lambda_{66}), & \text{位置 1 ~ 位置 2}\\ (M_{水外力矩}-M_{摩擦力矩})/(Jz+\lambda_{66}), & \text{位置 2 ~ 位置 3}\end{cases} \tag{1}$$

其中,ω 为栅格翼展开角速度,$M_{簧}$ 为展开弹簧驱动力矩,与弹簧刚度 K,助展弹簧作用力臂 l 和弹簧压缩量 Δx 相关:

$$M_{簧}=K\times\Delta x\times l \tag{2}$$

根据试验设计的展开机构,实际应用中 $M_{簧}$ 可以通过以下方程计算:

$$M_{簧}=17\times(18-182\theta)\times 0.182=55.69-563.1\theta \tag{3}$$

其中,θ 为栅格翼展开角度,θ 在 0° ~ 5°范围内 $M_{簧}$ 存在,θ 大于 5°时展开弹簧与栅格翼不发生作用,$M_{簧}=0$。$M_{摩擦力矩}$ 为栅格翼转轴摩擦力矩,根据出筒时弹翼运动速度、转轴半径和相应材料

摩擦系数,运动过程中的摩擦力矩可表示为:

$$M_{\text{摩擦力矩}} = \frac{1}{2}\rho V^2 S \times f \times R \tag{4}$$

其中,V 为弹翼组合体运动速度,S 为参考面积,f 为摩擦因子,R 为转轴半径,均可以根据设计方案直接获得。$M_{\text{水外力矩}}$为栅格翼所受的水动外力矩。水动展开力矩可以通过定常计算方法得到不同展开角度下的力矩系数;实际展开过程中,由于栅格翼的转动,栅格翼实际相对水流速度将减小,见图 2。考虑栅格翼转动引起的运动速度影响,展开过程分析中需要对定常状态计算得到的外力矩进行修正。定常状态展开下的力矩可以用 $M_{Z\theta}$表示,考虑展开过程中的相对速度 $V' = V_0 - \omega R\sin\theta$,引入力矩修正系数如式(5)所示。

$$K_\theta = \left(\frac{V_0 - \omega R\sin\theta}{V_0}\right)^2 \tag{5}$$

因此,展开过程分析中水动外力矩通过式(6)计算:

$$M_{\text{水外力矩}} = K_\theta M_{z\theta} \tag{6}$$

式(1)中的 Jz 为栅格翼绕转轴的转动惯量,可通过栅格翼具体结构计算获得;λ_{66}为栅格翼附加转动惯量,可由基于雷诺平均纳维 - 斯托克斯(Reynolds Average Navier-Stokes, RANS)方程的全黏流的附加质量计算[6]获得。

综上所述,可以得到栅格翼展开过程动力学控制模型为:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \begin{cases} (M_{\text{簧}} - M_{\text{摩擦力矩}})/(Jz + \lambda_{66}) \\ (M_{\text{水外力矩}} - M_{\text{摩擦力矩}})/(Jz + \lambda_{66}) \end{cases} \\ M_{\text{簧}} = K \times \Delta x \times l \\ M_{\text{摩擦力矩}} = \dfrac{1}{2}\rho V^2 S \times f \times R \\ M_{\text{水外力矩}} = K_\theta M_{Z\theta} \\ K_\theta = \left(\dfrac{V_0 - \omega R\sin\theta}{V_0}\right)^2 \end{cases} \tag{7}$$

2 基于定常力系数求解栅格翼展开控制方程组

栅格展开过程动力学控制方程组中仅展开过程中的水动外力矩为未知量,为此建立栅格翼展开特征角度定常力计算数值仿真模型,获得栅格翼不同展开特征角度位置时刻受到的流体力矩,进而拟合获得展开全过程的流体力矩变化规律。选取栅格翼相对弹轴展开 30°、45°、60°及 90°特征阶段为研究对象,建立相应的定常力计算模型并计算获得展开特征角度时的定常流体力矩。建模过程中,需要考虑弹体壁面对流场结构及栅格翼受力的影响。

在对航行体及栅格翼组合体进行网格划分时,为了提高计算的精度,保证栅格翼及航行体壁面附近的网格精度,对整个计算域采用分区结构化网格的形式[7],栅格翼及航行体壁面附近的网格尺寸约为 0.5 ~ 1 mm,总网格数约为 800 万,图 3给出了栅格翼展开 60°时展开流体力矩数值计算模型网格划分情况。

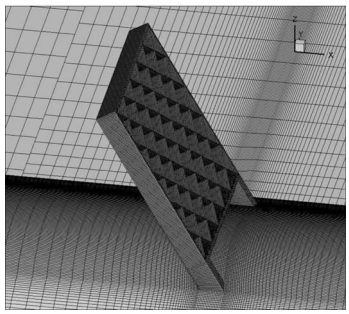


图 3 栅格翼展开 60°角计算域内网格划分情况

Fig. 3 Calculation mesh as the expansion angle is 60°

根据相关参考文献[8 - 10],依据航行体栅格翼设计展开时序下的水下外压条件及航行体运动速度条件,可以计算获得栅格翼展开过程特征角度定常水动力矩。求解过程中,取力矩参考点为栅格翼相对转轴的中心点。考虑到计算结果的通用性,以展开力矩系数的形式对栅格翼展开过程中的流体力矩进行分析,展开力矩系数定义为:

$$C_{M_Z} = \frac{M_Z}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 SL} \tag{8}$$

其中,M_Z 为栅格翼受到的流体力矩,S 为参考面积,L 为参考长度,ρ 为水的密度,V_∞ 为栅格翼展开时航行体运动速度。

图 4 为计算获得的栅格翼展开不同角度时受到的流体力矩系数。可见栅格翼展开过程中受到的流体力矩随展开角度逐渐增加,栅格翼展开 90°时,展开力矩系数最大,约为 0.000 95。

图 4 表明栅格翼展开过程中受到的流体力矩与展开角度相关,通过对展开过程的理论分析,将展开力矩拟合成展开角度的函数,且有如下拟合公式:

$$\begin{cases} C_{M_Z}\theta = K \times \sin\theta \\ C_{M_{Z\min}} = 0 \\ C_{M_{Z\max}} = C_{M_Z}90° \end{cases} \tag{9}$$

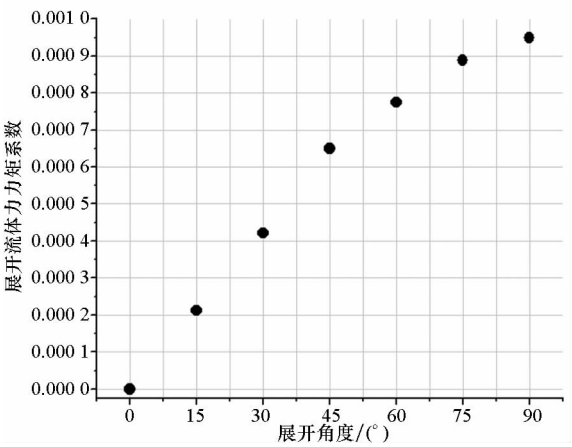


图 4　展开力矩随展开角度变化规律

Fig. 4　Variation of the expansion moment with expansion angles

代入初始边界条件及展开到位边界条件,可获得如下的拟合公式:

$$C_{M_Z}\theta = \frac{M_Z}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 SL}$$

$$= C_{M_Z}90° \times \sin\theta = 4.25 \times 10^{-4} \times \sin\theta \quad (10)$$

图 5 中给出了拟合结果与特征角度计算结果的对比。从图中可以看出,应用拟合公式计算值与数值仿真得到的定常力系数符合较好,可以将拟合得到的力矩作为栅格翼动态展开过程中受到的流体作用力矩。

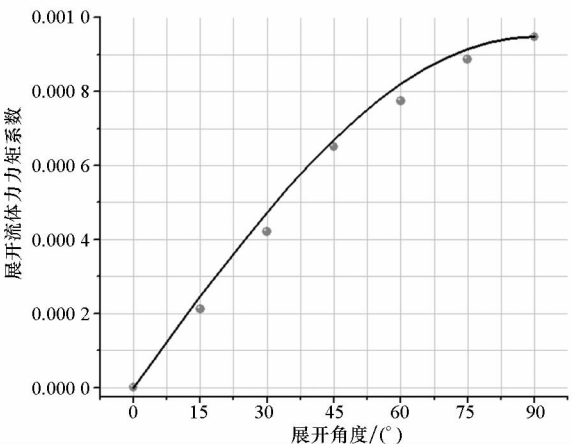


图 5　拟合结果与计算值对比情况

Fig. 5　Comparison of the fitting and numerical results

将展开流体力矩代入栅格翼展开过程动力学控制方程组(7),可以计算得到展开角度及角速度的变化规律,如图 6、图 7 所示。根据计算结果,展开到位时刻的角速度为 47.84 rad/s,展开到位所用时间为 107.7 ms。

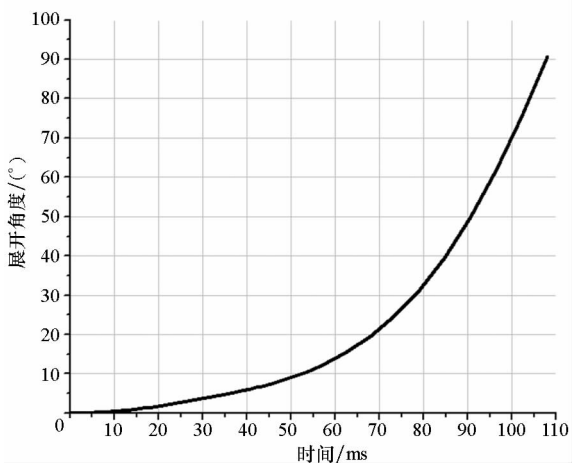


图 6　栅格翼展开角度计算结果

Fig. 6　Results of the calculated expansion angles

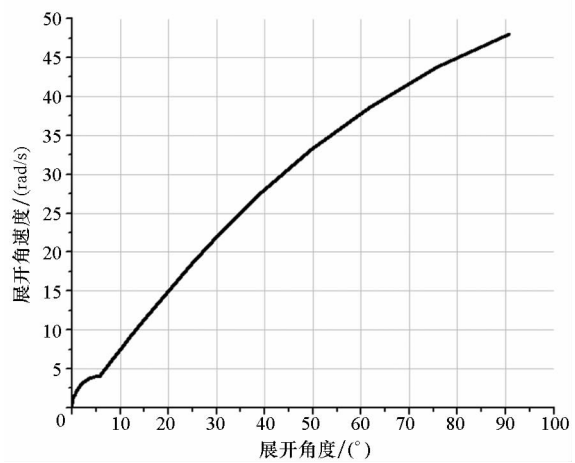


图 7　栅格翼展开角速度计算结果

Fig. 7　Results of the calculated expansion angular velocity

3　栅格翼动态展开参数工程预示方法验证

为了验证上述求解栅格翼展开过程动态参数预示方法,将计算结果分别与非定常数值模拟结果以及缩比模型航行体水下弹射试验结果进行对比,验证工程预示方法的正确性及适用性。

3.1　数值水洞非定常计算结果对比

依据水下栅格翼结构参数及展开机构设计结果,通过对商用数值计算软件 Fluent 的二次开发,可以对栅格翼水下展开过程进行数值模拟。在数值仿真求解时,采用流场与运动耦合的求解方式,即每个时间步内,先计算得到栅格翼受到的流体水动力矩,将力矩计算结果与展开机构的作用力矩叠加,获得栅格翼受到的展开作用力矩,进而求得栅格翼当前时刻的运动参数,并采用动网格技术实现对运动过程的描述及计算网格的更新。

图 8 中给出了应用工程拟合公式和采用数值仿真得到的展开角度随展开时间的变化情况,展

开角速度随展开角度变化情况见图 9。对比结果表明,应用本文方法获得的展开过程参数数值及变化规律与非定常数值试验获得的参数变化规律符合较好。验证了本文所建立的栅格翼展开过程参数预示方法的正确性。

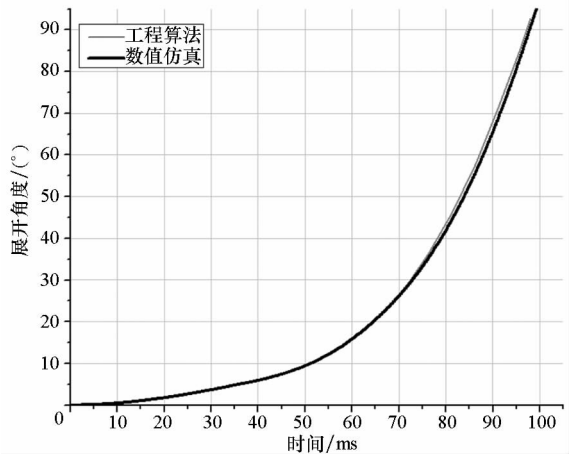


图 8 展开时间对比情况

Fig. 8 Comparison of the expansion time

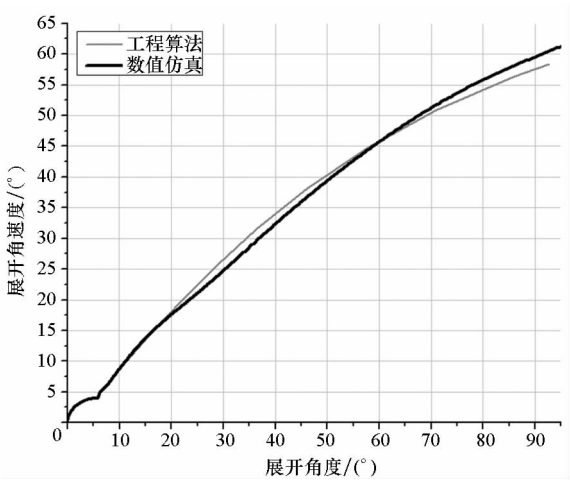


图 9 展开角速度对比情况

Fig. 9 Comparison of the expansion angular velocity

本文建立的栅格翼展开过程动力学模型以相对速度的方式对栅格翼展开期间非定常效应进行了修正;水下应用栅格翼在展开机构及流体力矩作用下展开,其中水动力矩起主要作用,而本文基于展开特征角度定常水动力矩计算结果,拟合获得了精度较高的栅格翼展开全程水动力矩数学表述,再将其代入展开过程动力学模型,因此求解获得的展开过程参数与非定常仿真求解结果吻合较好。

非定常数值仿真计算获得的栅格翼展开到位时刻的角速度为 53.64 rad/s,展开到位所用时间为 110.0 ms。以动态展开过程计算结果为准,两种算法得到的栅格翼展开到位时间相对误差为 -2.1%,展开到位时刻角速度相对误差为 -10.8%。

与栅格翼非定常展开数值模拟相比,本文所建立的动态展开参数预示方法省去了繁复耗时的水下流场与运动耦合数值仿真计算,可以快速获得展开过程参数变化规律及展开用时等特征点参数,为水下应用栅格翼展开结构设计及展开时序设计提供设计参考。

3.2 带栅格翼航行体水下弹射试验结果对比

通过弹翼组合体水下弹射试验,得到的单片栅格翼展开用时统计情况见表 2。弹射试验得到的栅格翼展开用时约为 122 ms,略大于本文建立的基于定常流体力求解模型计算结果,计算结果与试验数据分析结果的相对误差约为 -11.7%。

综上,从试验角度进一步验证了本文建立的栅格翼动态展开过程参数预示方法具有工程应用价值。

表 2 航行体水下试验栅格翼展开用时情况

Tab. 2 Expansion time measured in the underwater vehicle experiments

试验序号	展开用时/ms
1	126
2	118
平均值	122

4 结论

本文对水下应用栅格翼动态展开过程进行研究,建立了栅格翼动态展开过程动力学模型,基于定常力计算模型,求解获得栅格翼展开特征角度定常流体力矩,通过对展开过程受力特性的分析拟合,获得展开全程流体力矩随展开角度变化的规律,实现对水下应用栅格翼展开全程动力学模型的求解,获得水下应用栅格翼展开全程参数变化规律,形成了栅格翼动态展开过程参数工程预示方法。通过与水下应用栅格翼非定常流场仿真计算数据以及水下航行体弹射试验数据对比,验证了本文所建立的工程预示方法的正确性及适用性,为水下应用栅格翼方案设计的优化及栅格翼动态强度设计提供了设计参考。

参考文献(References)

[1] 黎汉华, 石玉红. 栅格翼国内外研究现状及发展趋势[J]. 导弹航天与运载技术, 2008(6): 27 - 30.
LI Hanhua, SHI Yuhong. Current status and development

trend of grid fin [J]. Missle and Space Vehicle, 2008(6): 27 – 30. (in Chinese)

[2] 雷歌, 邓飞, 刘权, 等. 水下航行器折叠翼展开机构设计与动力学仿真[J]. 鱼雷技术, 2013, 21(2): 81 – 85.
LEI Ge, DENG Fei, LIU Quan, et al. Design and dynamic simulation of folding wing expansion mechanism for underwater vehicle [J]. Torpedo Technology, 2013, 21(2): 81 – 85. (in Chinese)

[3] 黄涛, 吴磊, 鲁传敬, 等. 栅格翼和雷体组合体的空泡水动力计算与分析[J]. 水动力学研究与进展, 2006, 21(2): 239 – 243.
HUANG Tao, WU Lei, LU Chuanjing, et al. Cavitaing grid gin hydrodynamics for missile applications [J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 21(2): 239 – 243. (in Chinese)

[4] 朱国祥, 韩茹宗, 罗金玲, 等. 飞航导弹栅格翼数值与试验研究[C]//第一届近代试验空气动力学会议论文集, 2007: 351 – 354.
ZHU Guoxiang, HAN Ruzong, LUO Jinling, et al. Numerical simulation and wind tunnel investigation for grid fin of winged missiles [C]//Proceedings of the First Modern Experimental Aerodynamics Conference, 2007: 351 – 354. (in Chinese)

[5] 李晓晖, 李怀念, 吴俊全. 火箭弹折叠翼展开过程的计算与试验研究[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(12): 82 – 84.
LI Xiaohui, LI Huainian, WU Junquan. Calculation and experimental research on the expansion of rocket folding fin[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(12): 82 – 84. (in Chinese)

[6] 傅慧萍, 李杰. 附加质量 CFD 计算方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(2): 148 – 152.
FU Huiping, LI Jie. Numerical studies of added mass based on the CFD method [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(2): 148 – 152. (in Chinese)

[7] 吴晓军, 马明生, 邓有奇, 等. 结构/非结构混合网格数值模拟栅格翼[J]. 空气动力学学报, 2009, 27(4): 419 – 424.
WU Xiaojun, MA Mingsheng, DENG Youqi, et al. Navier-Stokes computations of a grid fin missile on hybrid structured-unstructured grids [J]. ACTA Aerodynamica Sinica, 2009, 27(4): 419 – 424. (in Chinese)

[8] 俞建阳. 带栅格翼的水下航行体三维流场数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
YU Jianyang. Three-dimensional numerical simulation of underwater vehicle with grid fins [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)

[9] 姚琰, 毛鸿羽. 栅格翼流体动力性能数值模拟[J]. 战术导弹技术, 2004(2): 13 – 17.
YAO Yan, MAO Hongyu. Numerical simulation of hydrodynamic characteristics for grid fins [J]. Tactical Missile Technology, 2004(2): 13 – 17. (in Chinese)

[10] 黄涛. 栅格翼空泡流的数值模拟计算[D]. 上海:上海交通大学, 2004.
HUANG Tao. Numerical simulations of the cavity flow in grid fin [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2004. (in Chinese)