

DOI: 10.3901/JME.2014.08.174

不同温度水体空化水动力脉动特性的试验研究*

时素果^{1,2} 王国玉¹ 胡常莉¹ 高德明¹

(1. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081;

2. 北京机电工程研究所 北京 100074)

摘要: 为研究热力学效应对空化水动力脉动特性的影响, 采用试验的方法研究温度为 279 K、298 K 和 318 K 时绕水翼的非定常空化流动特性。试验在闭式水洞中进行, 采用高速摄影的方法观察不同温度下绕水翼的空穴形态, 采用测力系统测量水翼受到的升阻力, 并对升力信号进行频谱分析, 得到水翼升力在非定常空化阶段的频率特征。结果表明, 相同空化数条件下, 随着温度的升高, 平均升阻力系数降低, 升力系数波动程度降低; 温度对升阻力系数的影响随着空化数的升高而降低。在不同的空化发展阶段下, 温度对升力系数影响的规律不同, 空化形成和片状空化阶段, 温度对升力系数影响较小; 云状空化阶段, 温度对升力系数影响较大。之所以出现上述规律是因为在同一空化数下, 随着温度的升高, 空化区域减小; 而空化区域越大, 温度对空化流动的影响则越大。

关键词: 热力学效应; 温度; 空化; 动力特性; 频率

中图分类号: TV131

Experimental Study on Hydrodynamic Characteristics of Cavitating Flows around Hydrofoil under Different Water Temperatures

SHI Suguo^{1,2} WANG Guoyu¹ HU Changli¹ GAO Deming¹

(1. School of Mechanical and Vehicular, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

2. Beijing Electro-Mechanical Engineering Institute, Beijing 100074)

Abstract: In order to study the influence of the thermal effect on hydrodynamic characteristics of cavitating flows, the unsteady cavitating flows around a Clark-y hydrofoil under 279 K, 298 K and 318 K conditions are respectively investigated experimentally. Experiments are carried out in a rectangular test section of a cavitation tunnel. A high-speed video camera is used to visualize the unsteady cavitating flow patterns, and the lift and drag coefficients are measured by dynamics force measurement system. The spectral analysis of the measured data is conducted and the spectrum characteristic of the lift force around the hydrofoil is obtained. The results show that when the water temperature is increased, the average values of lift and drag coefficients decrease as well as the lift fluctuation tends to be mild by keeping the cavitation number consistent. The influence on the lift and drag coefficients by temperatures becomes weaken with increases of the cavitation number. The fluctuating scale of the lift coefficient is correlated to the unsteady cavity closely. The temperature has little effect on the frequency of lift when it is cavitation inception or sheet. But when cloud cavity appears, the temperature greatly affects on the frequency based on lift. To interpret the conclusions above, it is inferred that when cavitation number is constant, the cavitation region decreases with the increasing of temperature. Moreover, the influence of the temperature is more distinct when the cavitation region is larger.

Key words: thermal effect; temperature; cavitation; dynamic characteristics; frequency

0 前言

当液体内部的局部压强降低到液体的当地饱和蒸汽压时, 在液体内部或液固交界面上就会产生蒸汽, 这种现象称为空化^[1]。空化发展到一定阶段

会伴随着空泡群的破灭和脱落, 引起强烈的噪声、振动和空蚀^[2]。空穴的非定常状态会引起水力机械运行的非稳定性, 并造成叶片的疲劳破坏。尤其在诱导轮中, 由于叶片之间的相互作用, 叶片流道内空穴呈非对称结构, 造成诱导轮叶片非稳定载荷作用^[3-4]。在非定常空化流场中, 空穴结构和升阻力在不同的空化阶段会表现出不同的规律, 流场的脉动特征也不断变化。KJELDSSEN 等^[5]对 NACA-0015 水翼进行了试验研究, 并对试验结果进行了频谱分

* 国家自然科学基金资助项目(50979004, 51239005)。20130508 收到初稿, 20130923 收到修改稿

析, 提出了在小空化数的情况下, 功率谱在较低频率处出现强峰, 且不随着空化数和攻角变化。FUJII 等^[6]总结了不同水洞中 NACA-0015 水翼空穴脱落现象, 通过对升力信号的频谱分析, 得到了系统不稳定性对水翼空化动力特性的影响。张博等^[7]研究了绕水翼不同空化阶段的升阻力以及频率特性, 结果表明, 随着空化强度的增加, 空穴脱落频率越来越明显, 且在云状空化阶段, 空穴脱落频率不变。以上研究的流动介质均为常温水, 其热力学效应不明显, 均未考虑热力学效应。

虽然早在 1974 年 HORD^[8]就在 NASA 采用 LN₂(液态氮)和 LH₂(液态氢)研究了绕 2-D 轴对称体的空化现象, 但只得到了几组压力和温度测点值, 有关空化热力学效应影响的系统研究无论在试验方法还是进行的试验研究工作都处在刚刚起步阶段。FRANC 等^[9]采用低温物质 R114 作为流动介质, 观测了诱导轮里的空化现象, 并发现, 随着温度的升高, 泵内产生的空穴长度减小, 泵的空化性能改善。ITO 等^[10]采用低温液氮和高温水体作为流动介质, 结果表明, 在不同介质的空化流动中, 空泡的形态和几何尺度发生了明显的变化。GUSTAVSSON 等^[11]采用氟石作为流动介质研究表明, 采用这种介质较水体产生的空泡变小, 结构更加精细, 空化的热力学效应影响增强。CERVONE 等^[12]采用最高温度为 348 K 水体作为流动介质, 进行不同空化数条件下诱导轮和绕水翼的空化试验, 但是由于水洞堵塞效应较强, 得到的空穴形态和压力系数随时间的波动并不理想。但是由于试验设备及方法的限制, 热力学效应对空化流动的水动力脉动特性的影响方面, 国内外均未有系统的研究。

为了系统地研究热力学效应对空化水动力脉动特性的影响, 本文采用试验的方法分析了不同温度的水体绕水翼的空化流动特性。试验在空化水洞中完成, 采用测力装置测量了翼型所受的升阻力, 并采用高速摄像技术观测了不同温度下不同空化阶段的空穴形态, 基于上述结果分析了温度对空化水动力特性的影响。

1 试验装置和方法

1.1 试验水洞

试验在一闭式空化水洞进行, 图 1 是空化水洞示意图。试验段尺寸为 70 mm×190 mm×700 mm。整个系统主要由蓄水池、稳流除气罐、电动机及调速系统、轴流泵、真空发生装置、试验段及管路组成。驱动轴流泵位于试验段下方 5 m 处, 以防止驱动泵的空化。试验段上游的稳流除气罐用来分离水

流中可能包含的游离型气泡。在罐的出口与试验段之间安装有一直角导流栅和一直线导流栅以减小水流的湍流度。罐上部的密闭空腔与一真空泵相连以控制系统中的压力。由电动机驱动轴流泵得到所需的循环流动。加热器安装在贮水池底部, 并在试验段进口安装温度传感器。其中温度传感器型号为 WZPK, 温度范围为 0~773 K, 允许误差为 $\pm(0.15 \text{ K} + 0.002 \text{ K})$ 。图 2 是水翼在试验段安放位置示意图。试验时, 通过其上下部及前侧面的透明有机玻璃窗, 可观测水翼周围的流场形态。

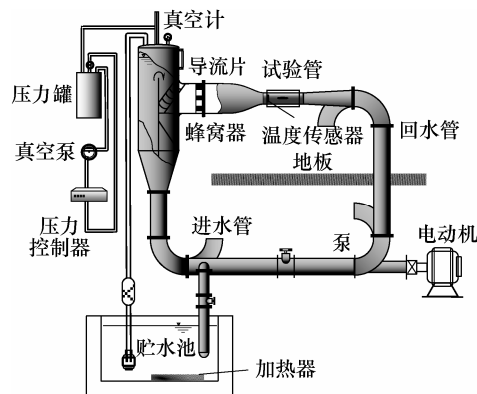


图 1 空化水洞示意图

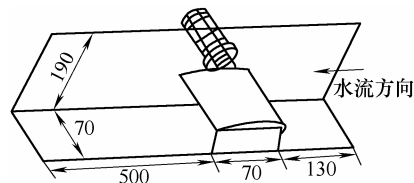


图 2 试验段几何尺寸及水翼安放位置

1.2 数据采集和高速全流场显示系统

图 3 是数据采集和高速全流场显示系统布置示意图。试验选用动态应变仪与粘贴好的箔式中温电阻应变片组成测量电桥, 测量翼型所受的升力和阻力。翼型升力方向固定了一种微型压电式加速度计, 用于测量翼型在升力方向的振动信号, 其最高采样频率为 25 kHz, 可以很好地监测空化流动中的高频信号。电压信号通过 16 通道的 A/D 数字转换器放大和滤波, 采集到计算机中。

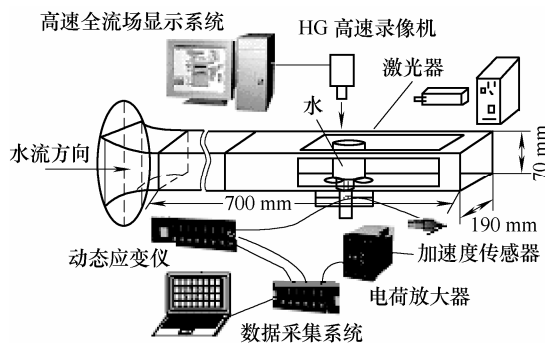


图 3 试验装置布置图

1.3 量纲一参数的定义

空化数 σ_∞ 、雷诺数 Re 、升阻力系数 C_l 和 C_d ，斯特劳哈数 Sr 的定义为

$$\sigma_\infty = \frac{p_\infty - p_v(T_\infty)}{0.5\rho_l u_\infty^2} \quad (1)$$

$$Re = \frac{U_\infty L_c}{\nu_l} \quad (2)$$

$$C_l = \frac{F_y}{0.5\rho_l u_\infty^2 L_c} \quad (3)$$

$$C_d = \frac{F_x}{0.5\rho_l u_\infty^2 L_c} \quad (4)$$

$$Sr = \frac{fL_c}{u_\infty} \quad (5)$$

式中， p_∞ 、 u_∞ 、 $p_v(T_\infty)$ 和 ρ_l 分别为距试验段上游入口 210 mm 处参考断面上的平均静压强、断面平均速度、无穷远来流温度下的汽化压强和水的密度。 F_x 和 F_y 是水翼所受到的阻力和升力， L_c 是水翼弦长， ν_l 是水的运动黏度。

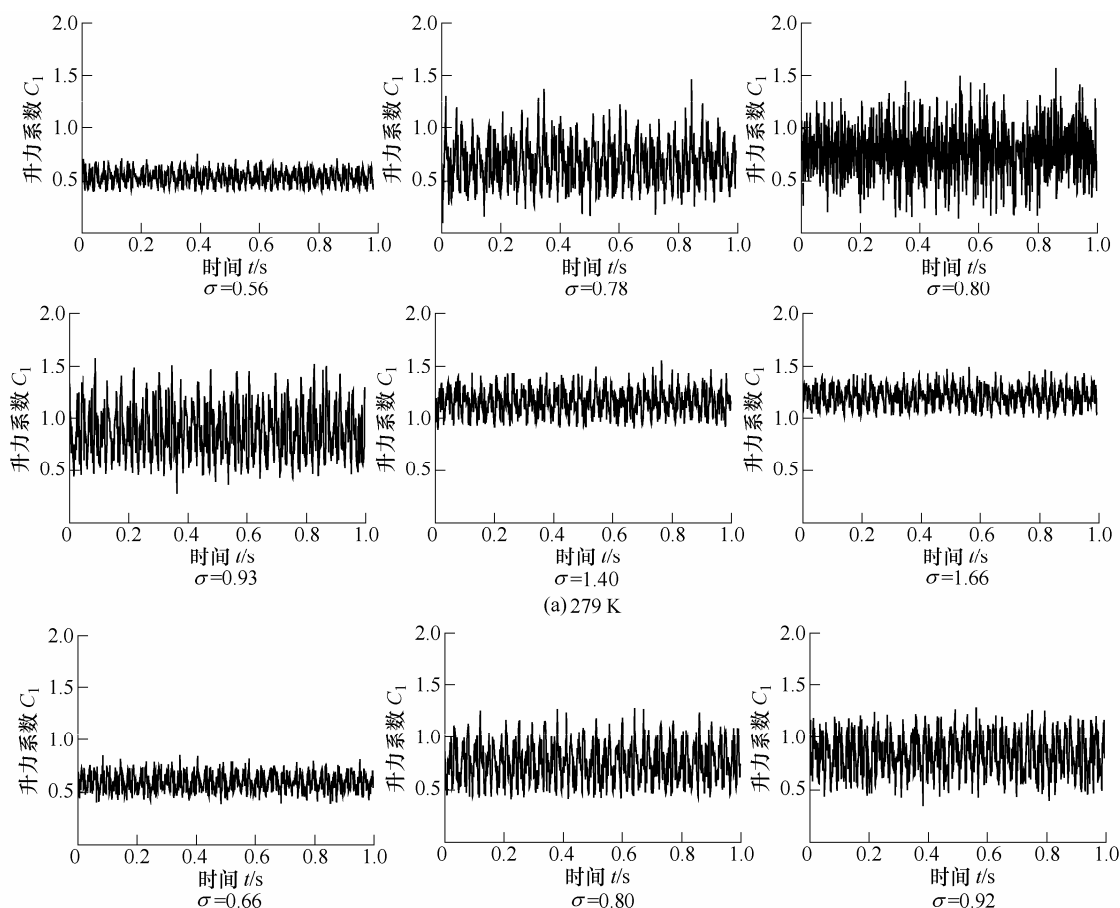
2 试验结果分析与讨论

试验中，对 279 K、298 K 和 318 K 三种温度下绕水翼空化流场的动力特性和空穴形态进行了分析。在以下讨论的结果中，水翼的攻角 $\alpha = 8^\circ$ ，雷

诺数为 1.56×10^5 ，采用加热器来改变流场的水温，采用真空泵改变水翼上游的压力来调整空化数。

试验中分别测量了不同温度不同空化数下，水翼所受的升阻力，试验采样频率为 1 kHz，样本长度为 1 s。升阻力变化规律一致，由于阻力系数数量级较小，升力系数较大，三种温度下区别较为明显，故以升力系数为例讨论温度对空化动力脉动特性的影响。图 4 是试验测得的不同温度不同空化数下水翼升力系数随时间的变化图，图 5 给出了相同工况下升力系数的波动范围。结合图 4 和图 5 可知，三种温度下升力系数变化规律一致，随着空化数的降低，升力系数平均值降低，但升力系数的波动范围先增大，到云状空化阶段时，波动范围增至最大，之后减小，进入超空化阶段后继续减小。同时还发现，在云状空化阶段，一些低频的变化开始明显出现在升力系数的变化图中，此时对应的升力信号的波动幅值增加得更加显著，表明空穴对水翼的作用加强，同时升力信号变化的周期性逐渐增强。

对比三种温度下升力系数变化图发现，升力系数的波动幅度随着温度的升高而降低，但是波动的周期却变化不大。在不同的空化发展阶段下，温度对升力系数影响的规律不同。升力系数较大时，温度对升力系数影响较小；升力系数较小时，温度对升力系数影响较大。



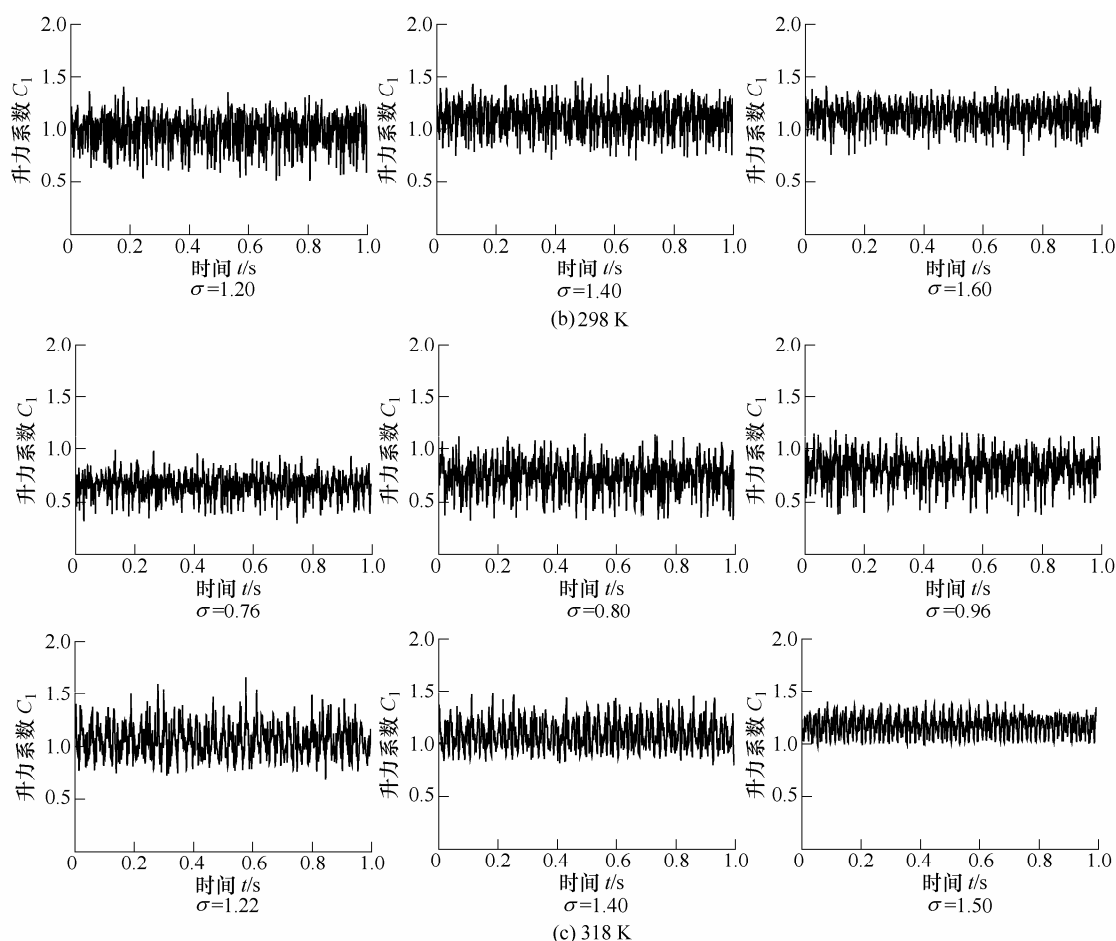


图 4 三种温度下各空化阶段的升力系数随时间变化图

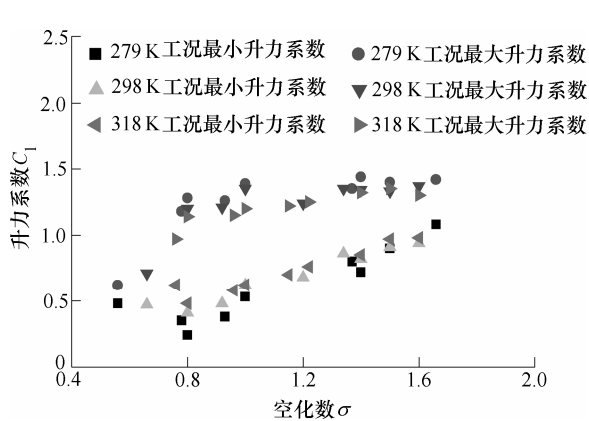


图 5 三种温度下各空化阶段升力系数的波动范围

图 6 给出了三种温度下水翼平均升阻力系数随空化数变化曲线。由图 6 可知, 三种温度下, 升阻力系数随空化数变化的规律一致。升力系数随着空化数的增大而增大; 随着空化数的增大, 阻力系数先增大再减小。进一步对比不同温度下的升阻力系数发现, 随着温度的升高, 平均升阻力系数降低, 且随着空化数的增加, 平均升阻力系数减小程度降低。为了更好地分析温度对升力的脉动特性的影响, 采用快速傅里叶变换将空化流动中升力信号的时域特性转换为频域特性进行分析。

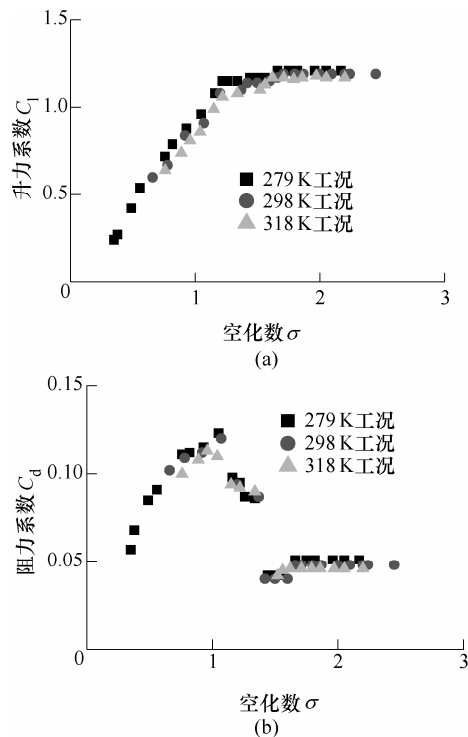


图 6 三种温度下水翼平均升阻力系数随空化数变化曲线

图 7 给出了不同温度下空化数为 1.4 和 0.8 时基于升力系数的频谱图, 横坐标为基于翼型升力系数的斯特劳哈数, 纵坐标是功率谱密度。由图 7 可

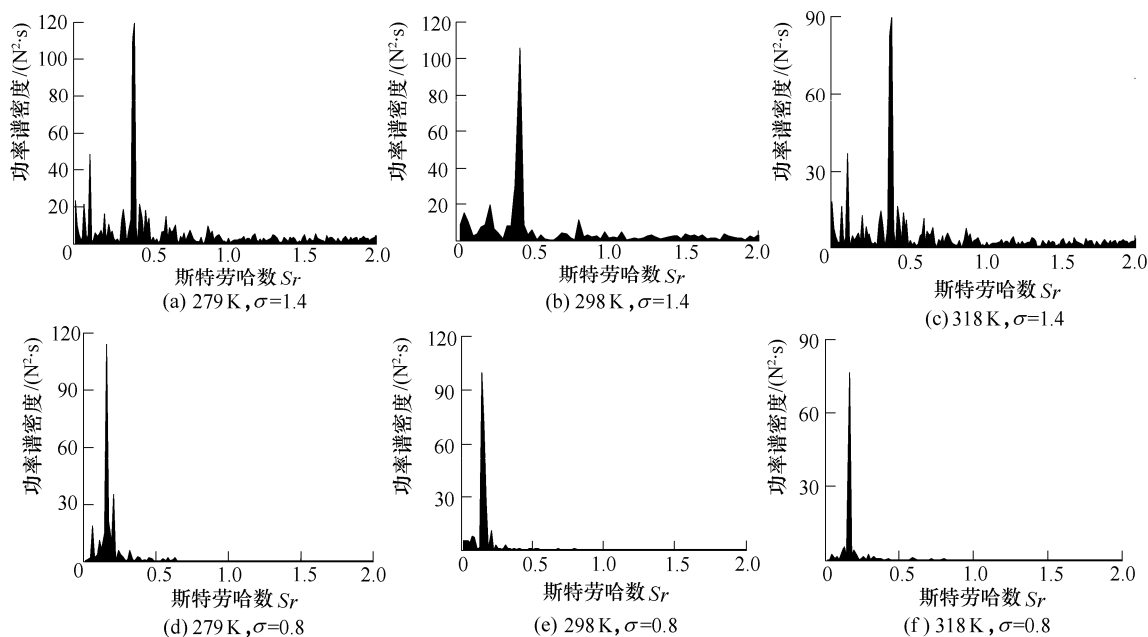


图 7 不同温度下空化数为 1.4 和 0.8 时基于升力系数的频谱分析

知, 279 K、298 K 和 318 K 下空化数为 1.4 时, 基于升力系数的斯特劳哈数分别为 0.42、0.42 和 0.40。在云状空化阶段, 279 K、298 K 和 318 K 下空化数为 0.8 时基于升力系数的斯特劳哈数基本一致, 约为 0.16。仔细对比图 7 中不同温度下的频谱分析可知, 温度对基于升力系数的斯特劳哈数影响较小, 进而由于空穴脱落所引起的压力脉动频率在现有的温度范围也应该变化不明显^[13]。

图 8 给出了不同温度下各空化阶段对应的升力系数频谱图。从图 8 可以看出, 在 $\sigma < 1.6$ 左右时, 主频峰值较小, 升力系数波动的周期性不明显。在 $1.1 < \sigma < 1.6$ 时, 升力变化的周期性较明显, 且随着空化数的增大, 主频亦逐渐增大。在 $0.7 < \sigma < 1.1$ 时, 升力系数变化的周期更为明显, 这从功率谱密度较大可看出, 升力系数变化的频率基本上为 17.8 Hz, 且变化频率不随空化数的变化而变化。 $\sigma < 0.7$ 时, 升力系数周期性越来越不明显。对比三种水温下升力系数随时间变化规律, 进一步验证了温度对升力系数频率影响不大。

由于水翼所受升阻力和空穴形态密切相关, 为了解释温度对升阻力的影响, 图 9 给出了三种温度下空化数为 0.8 时云状空化阶段空穴形态随时间变化图, 在云状空化阶段, 三种温度下空穴形态变化规律一致, 空穴的前部附着在壁面上, 而其尾部呈不稳定状态。通过对大量的高速录像进行观察与分析, 发现空化云是一种具有明显准周期特征的空化流动现象, 它的变化发展主要经历四个阶段, 空穴生成-发展-脱落-溃灭, 具体过程描述与文献[14]中的一致。

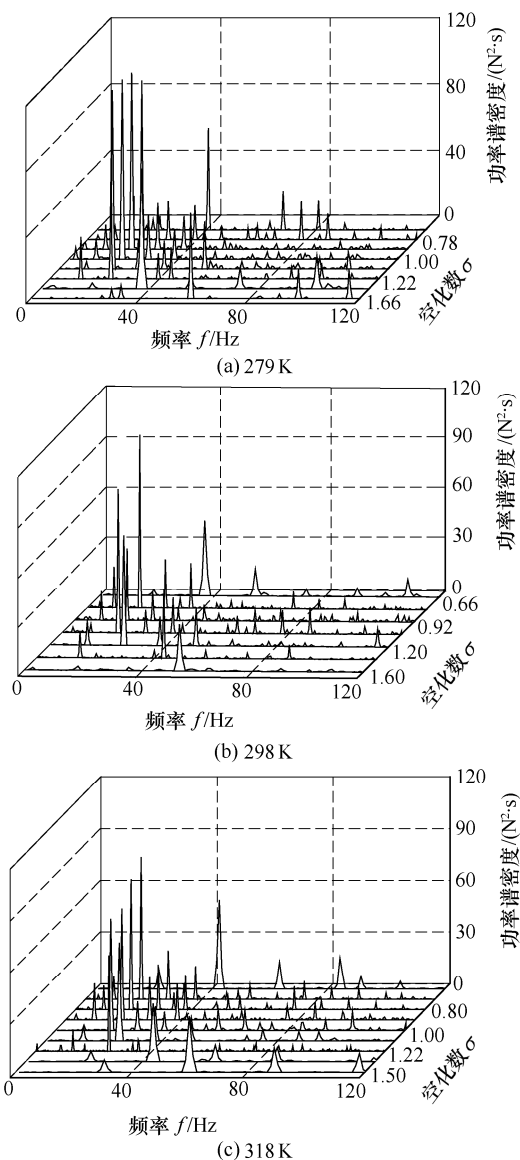


图 8 不同温度下各空化阶段的频率随空化数变化的曲线

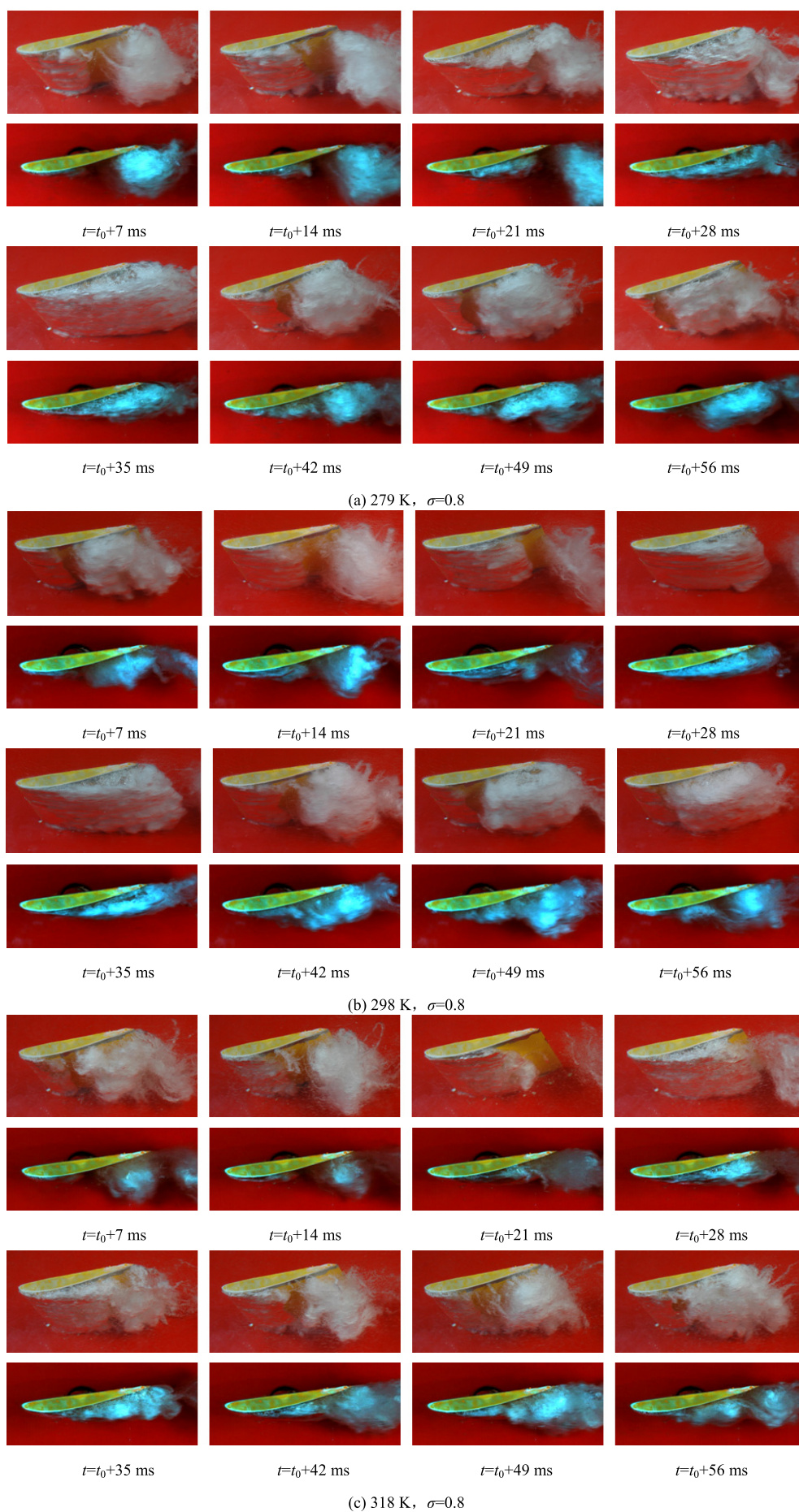


图9 三种水温下云状空化阶段空穴形态随时间变化图

由图 9 比较三种温度下的空穴形态随时间演变过程发现,随着温度的升高,空穴区域和空穴长度减小。在相同的时刻,空化区域的长度增长较为缓慢,水翼尾部的空化漩涡尺寸较小,脱落的空泡团尺度较小,漩涡运动也比较迟缓,空穴脱落周期显著性降低,造成升力系数波动范围降低。但同时也可看出,在三种温度下空泡脱落周期变化较小,说明温度对空穴脱落周期影响较小,与升力系数变化频率一致。空化区域越大,温度对空穴可影响的范围增加,温度对空化形态影响越大。结合升力系数随时间变化图可知,在升力系数最大时,对应于空穴形态最小时刻,由空穴形态图上总结出,此时温度对空化影响较小;而升力系数最小时,处于空穴长度最大,覆盖整个翼型吸力面时刻,温度影响较大。

总体来说,在不同的温度下,水的物质属性有着显著的区别,尤其是液/汽密度比和饱和蒸汽压,水的物质属性具体可见文献[15]。在高温时,液/汽密度比较小,产生相同尺寸的空穴,需要更多的液体变成蒸汽。由文献[15]可知,当空化产生时,需要吸收蒸发潜热,导致周围液体温度降低,当地饱和蒸汽压降低。当温度升高时,单位温降下饱和蒸汽压变化梯度较大,当地饱和蒸汽压降低较大,水汽传输过程需要更低的流场压力,因此它们的空穴形态也必然有很大的区别。

3 结论

本文采用试验的方法研究了不同温度下绕水翼的非定常空化流动,分析了温度对空化非稳定演变过程中水动力脉动特性的影响,得到了以下两点结论。

(1) 在相同的空化发展阶段,随着温度的升高,平均升阻力系数降低,升力系数波动程度降低,但温度对升力系数变化频率影响不大。温度对升阻力系数的影响随着空化数的升高而降低。

(2) 在不同的空化发展阶段,温度对升力系数影响的规律不同。空化形成和片状空化阶段,温度对升力系数影响较小;云状空化阶段,温度对升力系数影响较大。

参 考 文 献

- [1] 李向宾,王国玉,张敏弟,等. 绕水翼超空化流动形态与速度分布[J]. 力学学报, 2008, 40(3): 315-322.
LI Xiangbin, WANG Guoyu, ZHANG Mindi, et al. Characteristics of supercavitating flows around a hydrofoil[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 40(3): 315-322.
- [2] KAWANAMI Y, KATO H. Mechanism and control of cloud cavitation[J]. Journal of Fluids Engineering, 1997, 119(8): 788-794.
- [3] CALLENAERE M, FRANC J P, MICHEL J M. The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet[J]. Journal of Fluids Mechanics, 2001, 444: 223-256.
- [4] TSUJIMOTO Y, YOSHIDA, MAEKAWA Y, et al. Observations of oscillating cavitation of an inducer[J]. Journal of Fluids Engineering, 1997, 119: 775-781.
- [5] KJELDSSEN M, ARMDT R E A, EFFERTZ M. Spectral characteristics of sheet/cloud cavitation[J]. Journal of Fluids Engineering, 2000, 122(3): 481-487.
- [6] FUJII A, KAWAKAMI D T, TSUJIMOTO Y. Effect of hydrofoil shapes on partial and transitional cavity oscillations[J]. Journal of Fluids Engineering, 2007, 129: 669-672.
- [7] 张博,王国玉,黄彪,等. 绕水翼空化非定常的动力特性[J]. 机械工程学报, 2010, 46(6): 164-169.
ZHANG Bo, WANG Guoyu, HUANG Biao, et al. Unsteady dynamic of cavitating flows around a hydrofoil[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(6): 164-169.
- [8] HORD J. Cavitation in liquid cryogenics[R]. II-Hydrofoil, NASA-CR-2156, 1973.
- [9] FRANC J, REBATTET R C, COULON C A. An experimental investigation of thermal effects in a cavitating inducer[J]. Transactions of the ASME, 2004, 126: 716-723.
- [10] ITO Y, SAWASAKI K, TANI N, et al. Blowdown cryogenic cavitation tunnel and CFD treatment for flow visualization around a foil[J]. Journal of Thermal Science, 2005, 14: 346-351.
- [11] GUSTAVSSON J P R, DENNING K C, SEGAL C. Hydrofoil cavitation under strong thermodynamic effect[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130: 091303-1-091303-5.
- [12] CERVONE A, RAPPOSELLI E, D'AGOSTIMO L. Thermal cavitation experiments on a NACA0015 hydrofoil[J]. Journal of Fluids Engineering, 2006, 128: 326-331.
- [13] EMILIO R, ANGELO C, RENZO T, et al. Thermal effect on cavitation instabilities in helical inducers[C/CD]// The 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Fort Lauderdale, Florida, July 11-14, 2004, AIAA, 2004-4021.
- [14] 张博,王国玉,黄彪,等. 云状空化非定常脱落机理的数值与实验研究[J]. 力学学报, 2009, 41(5): 651-659.

ZHANG Bo, WANG Guoyu, HUANG Biao, et al.

558-608.

Numerical and experimental studies on unsteady shedding mechanics of cloud cavitation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41(5): 651-659.

- [15] UTTURKAR Y, WU J, WANG G, et al. Recent progress in modeling of cryogenic cavitation for liquid rocket propulsion[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41:

作者简介: 时素果, 女, 1982 年出生, 博士。主要研究方向为考虑热力学效应的空化流动。

E-mail: shisuguo@126.com

王国玉, 男, 1961 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为流体机械与流体动力学。

E-mail: wangguoyu@bit.edu.cn

第 3 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

机器人仿生视觉眼球运动控制机理与验证

作者: 李恒宇

毕业学校: 上海大学

指导教师: 罗 均 谢少荣

机器人代替人类在地面、水下以及空中进行作业是科技服务人类的典型体现。近年来, 机器人应用的领域不断扩大, 机器人研究的重点也逐步转向能在未知、复杂、动态环境中独立完成给定任务的自主式移动机器人的研究。机器人在作业时, 准确获取和理解环境信息是机器人完成任务的关键。人类感知客观世界 80% 以上的信息是通过眼睛获得, 对机器人而言, “眼睛”也是一个重要的感知设备。在机器人共性技术研究中, 仿生技术日益受到关注, 机器人迫切需要类人眼灵活的机器人视觉系统。随着眼球解剖学和生理神经学的发展, 为眼球运动控制建模提供了大量的数据和理论基础。因此, 眼球运动神经控制机理的研究及其在机器人视觉系统中的应用成为研究的热点。

本文从两个角度对眼球运动视觉系统进行仿生: 一是“形”似, 即根据眼球解剖学结构、运动空间及法则, 基于球面并联机构研制符合眼球运动行为学特点的仿生眼机构; 二是“神”似, 即根据眼球运动的神经回路建立其数学控制模型, 从而获得眼球运动的控制机理并作为视觉系统的控制算法来控制眼球机构, 进而实现类人眼的前庭动眼反射、平滑追踪及异向运动等功能。本文对单双目眼球运动的神经控制机理、系统建模、眼球结构与优化、控制系统设计和试验验证等关键技术展开深入研究, 研制一种具有标准视频、数据接口的嵌入式机器人仿生视觉系统, 具体研究内容如下。

本文在眼球结构和生理神经学的基础上, 从控制学的角度对眼球运动的神经机制进行探索, 主要包括眼球运动相关的神经回路和重要神经核的功能以及视觉信息的传递与处理机制的研究, 并在此基础上对一些复杂的神经回路进行了等效简化, 建立适合机器人仿生视觉建模的单双目眼球运动的神经回路, 为眼球运动的数学建模提供了理论基础。

论文研究了影响眼球运动的一些重要器官, 并对小脑绒毛区域进行了功能建模, 探索了单双目眼球运动神经回路和前庭-小脑绒毛神经回路的信息处理机制, 并在此基础上建立了包含急停式与摆动式的单双目前庭动眼反射数学模型; 根据头部、眼球以及目标运动关系, 建立了单双目眼球前庭动眼反射、平滑追踪运动以及其复合眼球运动控制模型。试验结果表明, 所建数学模型根据不同的输入分别实现前庭动眼反射、平滑追踪、双目异向运动以及眼球的复合运动。

在生理学试验相同的条件下对单目眼球运动控制模型进行了仿真试验, 仿真试验的结果与生理学试验结果以及眼球运动的行为学特征完全一致, 表明了本文建立的单目眼球运动控制系统模型是正确的, 体现了眼球运动的本质。同时对双目眼球运动控制系统数学模型进行仿真试验, 重点验证了双目神经回路中视交叉部分的作用。由于本文所建立的控制系统最终目标是应用到机器人系统当中, 因此模拟机器人作业的不同环境对单双目眼球运动模型进行仿真, 仿真结果表明该眼球运动系统不仅可应用于机器人仿生视觉系统中, 还具有鲁棒性。

根据眼球结构与运动特点, 确定了眼球的工作空间, 建立了眼球结构的近似模型, 在此基础上提出了眼球机构的设计要求。然后根据仿生眼的设计要求, 基于球面并联机构提出一种新型的仿生眼执行机构。根据仿生眼工作空间及运动特点, 本文提出将目标工作空间内最差性能指标作为优化对象, 并选取球面并联机构的结构参数。利用 Solidworks 和 LabView 对仿生眼机构进行了仿真试验, 并求出了仿生眼的工作空间, 仿真试验结果表明研制的仿生眼机构在工作空间内具有良好的性能。

研制了机器人仿生视觉软硬件控制系统, 并针对眼球运动的特点设计了相应的试验测试平台, 在试验平台上进行了一系列的功能性验证试验和系统性能测试试验, 如眼球前庭动眼反射、平滑追踪运动、眼球复合运动以及双目异向运动的功能性验证。试验结果表明所建立的单双目仿生眼具有良好的性能, 可以实现类似人眼的运动验证, 同时, 也验证了基于球面并联机构的仿生眼符合眼球运动的特点且具有较高的灵活度和精度。

扩展了机器人仿生视觉的应用深度, 建立了基于仿生单目眼球运动机理的水下云台抗颠簸控制系统, 用于补偿由水流引起的水下云台姿态变化; 建立基于眼球复合运动的无人机低空自主跟踪系统, 用于实时补偿飞行器姿态变化和跟踪目标的动态变化; 提出了基于双目异向运动的超小型无人旋翼机野外定点着陆的方法, 用于消除其在着陆过程中存在的盲区, 从而减小摔机的损失。