

水上飞机在波浪上运动响应特性试验研究

黄淼^{1,2,*}, 吴彬¹, 蒋荣¹, 焦俊¹

(1. 中国特种飞行器研究所, 湖北 荆门 448000; 2. 高速水动力航空科技重点实验室, 湖北 荆门 448000)

摘要:开展水上飞机带动力模型规则波试验,对试验装置、采集方式进行了设计,解决了常规采集方式存在信号阶跃式突变的技术难题。通过试验得到了模型在波浪上运动时纵摇、升沉和过载响应曲线随遭遇频率、波长的变化规律。结果表明:纵摇和升沉运动响应曲线具有单峰值的特点,在波长为1.5~3.5倍机身长度时达到峰值,过载响应曲线具有双峰值,第一谐振波长在1.5~3.5倍机身长度范围内,第二谐振波长为0.5倍机身长度。根据模型运动响应特性,对飞机在涌浪上的运动响应进行了分析,对飞机在涌浪上起降使用环境的选择提出了参考意见。

关键词:水上飞机;波浪试验;纵摇运动;升沉运动;过载响应

中图分类号:V271.5

文献标识码:A

Experimental study on motion response of a seaplane on waves

Huang Miao^{1,2}, Wu Bin¹, Jiang Rong¹, Jiao Jun¹

(1. China Special Vehicle Research Institute, Jingmen Hubei 448000, China; 2. Key Aviation Scientific and Technological Laboratory of High-Speed Hydrodynamic, Jingmen Hubei 448000, China)

Abstract: With newly designed test devices and data acquisition mode, a powdered-model-regular-wave experiment of a seaplane is conducted. The changes of the experimental method can effectively eliminate the negative impacts of the step-type signal mutation. Based on the test results, the pitching, heaving motion and overload response variation laws with encounter frequency and wavelength are obtained. The results show that the pitching and heaving motion response curve has a single peak, and the corresponding resonant wavelength varies from 1.5 to 3.5 times the hull length; the overload response curve has double peaks, and the first resonant wavelength varies from 1.5 to 3.5 times the hull length, while the second resonant wavelength is about 0.5 times the hull length. Based on these motion properties, the motion response of the full scale seaplane to waves is analyzed, and also some suggestions about the selection of the operational environmental condition are offered.

Keywords: seaplane; wave experiment; pitching motion; heaving motion; overload response

0 引言

水上飞机的耐波性是飞机在波浪上运动时的滑行稳定性、快速性、过载特性等水动力性能的综合体现,具有一定的抗浪能力是飞机在相应等级海况下安全起飞和降落的先决条件,对于任何水上飞机都必须开展全面的耐波性研究,以确定飞机能够安全使用的海况等级。

美国在20世纪50、60年代对水上飞机、高速滑行体的耐波性进行了大量的研究,Elmo J. Mottard开展静水和波浪对比试验,研究了波浪对水上飞机阻力的影响^[1],R. M. Hopkins对飞机在规则波中的起飞和着陆距离进行了分析^[2],Gerard Fridsma开展了规则波和不规则波试验,系统地研究了斜升角、船体长宽比、波高、试验速度对高速滑行体在波浪中运动响应的影响^[3-4]。到20世纪末,维护海洋权利的

收稿日期: 2014-09-12; 修订日期: 2015-02-06

* 通信作者 E-mail: 409267382@qq.com

引用格式: Huang M., Wu B., Jiang R., et al. Experimental study on motion response of a seaplane on waves. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(3): 41-46. 黄淼, 吴彬, 蒋荣, 等. 水上飞机在波浪上运动响应特性试验研究. *实验流体力学*, 2015, 29(3): 41-46.

迫切需求对水上飞机的耐波性提出了更高的要求,在执行任务时需要飞机能在 4、5 级海况(有义波高达到 2.5~4m)起降,日本、俄罗斯等国家研制了性能优良的水陆两栖飞机,如日本 US-2 水陆两栖飞机的抗浪能力达到 3m。我国于 20 世纪 80 年代研制了水轰五飞机,而后对水上飞机的研究较少,但是一些学者对高速滑行体的耐波性进行了相关研究,朱鑫等在考虑瞬时波面对各水动力系数及波浪载荷的影响下,给出了高速滑行体在迎浪运动中的时域解和频域解^[5-6],苏玉民等提出了一种基于六自由度运动模型的滑行艇水动力性能预报方法,实现其在波浪中自由运动的水动力性能预报^[7],王硕等应用基于 VOF RANS 求解器对高速滑行艇在规则波浪中的迎浪运动进行数值计算^[8],邹劲等利用切片法计算了三体滑行艇在迎浪规则波中的纵摇和升沉幅值响应函数^[9]。

国外在研究水上飞机的耐波性时往往采用不带动力的模型进行试验,研究在水动力和气动力作用下飞机在波浪上的运动响应,但是对于螺旋桨式水上飞机,螺旋桨的拉力对飞机形成低头力矩,使飞机纵倾角减小、船体与水面接触面积增大,从而增强飞机的运动响应,因此采用带动力的模型试验能更真实地反应出飞机在波浪上的运动特性;国内对耐波性的研究主要集中在数值计算方面,由于飞机与波浪相互作用的非线性特性,其计算精度有待检验。此外,国内在耐波性气动/水动设计、大傅汝德数条件下的波浪试验技术、飞机耐波性分析等方面与国外的差距较大。针对我国水上飞机耐波性研究技术瓶颈,本文采用某型螺旋桨式水上飞机带动力模型开展规则波试验,着重在试验设计、试验数据处理与分析等方面开展研究工作,对飞机在规则波上的运动响应特性进行分析。

1 试验设计

1.1 波浪试验的特点

飞机是六自由度运动系统,当飞机在波浪上运动时,其纵向运动稳定性、过载特性和快速性是影响飞机抗浪能力的重要因素,因此在实验室进行飞机模型波浪试验时,将模型限制为三自由度,分别为沿 X 轴的平移、沿 Z 轴的平移(升沉运动)和绕 Y 轴的转动(纵摇运动),坐标系的定义如图 1 所示。

规则波试验时,拖车系统带动模型匀速运动,模型运动响应有如下特点:

(1) 由于波浪水面非常规则,模型与波浪接触面积的大小、接触面积相对船体的位置具有明显的周期

性,因此模型运动响应也具有周期性变化的特点。

(2) 当波长大于机身长度时,飞机从波谷向波峰运动时由于机身与波浪的撞击作用,水阻力急剧增大,甚至会大于螺旋桨的拉力,试验模型在瞬时减速运动,当飞机越过波峰向波谷运动时水阻力减小,试验模型在螺旋桨拉力的作用下加速运动,而拖车系统一直保持匀速运动,在这种情况下模型相对于拖车系统在航向会出现前后窜动。

1.2 试验装置

设计的试验装置如图 1 所示,整个试验装置安装在大功率高速拖车上,为保障模型能进行自由纵摇运动、升沉运动和航向平移,设计了小滑车和升沉杆组合装置,小滑车能在与拖车系统固结的适航杆上在一定范围内沿航向平移且没有侧滑运动,升沉杆穿过小滑车能在竖直方向上自由运动,升沉杆下端的连接杆与模型在重心位置铰接,导航杆穿过模型艏部导航片限制模型的偏航运动。在模型的内部安装有陀螺仪和过载传感器,测量模型的纵倾角以及机身艏部和艉部的过载,安装在拖车系统顶部的拉线式位移计测量模型的升沉。由于试验过程中模型会前后窜动,在适航杆上安装有两个拉线式阻力仪,利用细软钢索和弹簧将阻力仪和小滑车连接,并使弹簧具有一定的预拉力,这样设计的优点是能保证前后阻力仪时刻都处于受力状态,当模型前后窜动时其受力值会连续变化,采集信号不会出现阶跃式的突变。

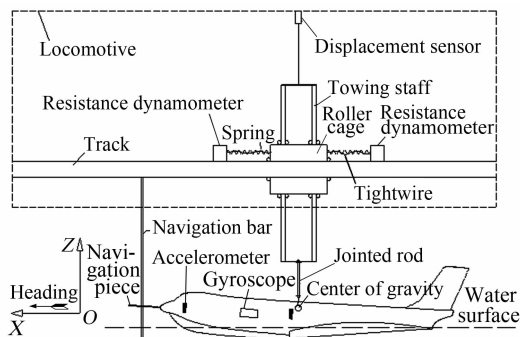


图 1 波浪试验装置图
Fig. 1 Sketch of wave tester

1.3 相似条件

水上飞机在水面上运动时同时受到水阻力和气动阻力的作用,在离水起飞前的运动阶段,水阻力起主要作用。水阻力主要包括粘性阻力和兴波阻力(飞机运动引起的水面兴波致使水流压力分布的改变所产生的水阻力),对于高速滑行体,在水阻力中兴波阻力占主要部分,对于给定的水上飞机船体外形,兴波阻力系数仅与傅汝德数 Fr 有关^[10],傅汝德数的计算公式为

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

要保证实机与模型之间的兴波阻力相似,则需保证实机和模型的傅汝德数相等,即:

$$\frac{v_s}{\sqrt{gL_s}} = \frac{v_m}{\sqrt{gL_m}} \quad (2)$$

可以得到模型试验速度与实机之间的速度对应关系为:

$$v_m = v_s \sqrt{L_m/L_s} = \frac{v_s}{\sqrt{\lambda}} \quad (3)$$

式中 $\lambda = \frac{L_s}{L_m}$ 为实机尺寸与模型尺寸的比例, v 为速度,下标 s 和 m 分别代表实机和模型。满足式(2)的函数关系则称为傅汝德数相似(或重力相似)。

根据式(3)和雷诺数的计算公式可以得到试验模型与实机之间雷诺数的关系为:

$$Re_m = \frac{Re_s}{\sqrt{\lambda^3}} \quad (4)$$

可知采用傅汝德数相似的水动力试验模型和实机之间的雷诺数并不相等,由于 λ 的影响,模型的雷诺数一般比实机的雷诺数低 1 个量级左右。雷诺数主要影响粘性力。在水阻力中,粘性力所占比例在 5%~10% 左右;对于气动阻力,根据参考文献[11],对采用大相对厚度翼型的运输类飞机,当雷诺数相差 1 个量级时,翼型气动力系数差异最大值在 15% 左右。进行试验时最大试验速度为起飞速度的 60%,由于气动力与速度的平方成正比,因此相对水动力而言气动力占比较小,故本文未考虑雷诺数差异对粘性力的影响。

1.4 试验状态

试验状态包括模型和波浪的技术状态,模型的技术状态是依据飞机的重量、重心位置、惯性矩,根据缩比规则换算得到的,在模型安装前应将模型调整到某一技术状态。波浪状态包括波长、波高 2 个参数,在选择波长、波高时要保证所选的波长符合海浪统计特性。

图 2 所示的是国际船模试验池会议推荐的标准双参数海浪谱(简称 ITTC 双参数谱)和我国沿海海浪谱在同一有义波高下的频率分布曲线,二者的形态极为相似,频率分布也较为接近,基本上都处在 0.3~2.0 rad/s 的范围内。在选择波长时,要保证经过换算后飞机的频率要比 0.3~2.0 rad/s 范围稍大,根据深水规则波频率与波长的对应关系,以及基于傅

汝德数相似耐波性试验模型与飞机之间的比例关系^[12],可以推导出飞机的频率与试验波长的关系式,如公式(5)所示。

$$\omega_s = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda L_b}} \quad (\text{rad/s}) \quad (5)$$

式中 L_b 为试验波长,根据 ω_s 的范围可以计算出试验波长的范围。

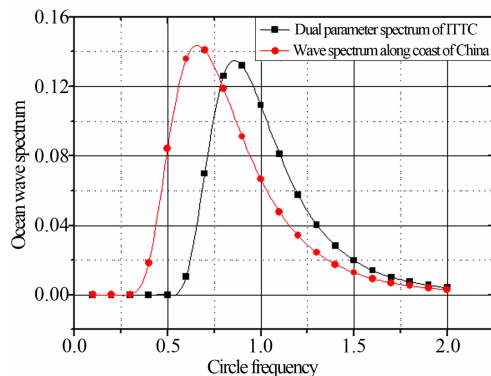


图2 海浪谱频率分布曲线

Fig. 2 Ocean wave spectrum curves

2 试验数据处理

耐波性试验理想的采集信号是低频的,但是采集到的信号受到电机中电流信号产生的磁场、拖车系统振动的干扰,因此需要进行一定的处理。本文采用低通滤波和经验模态分解的方法对试验数据进行处理^[13],然后读取各运动响应幅值,并按式(6)进行处理

$$y(\omega) = \frac{\bar{y}}{\bar{h}} \quad (6)$$

式中: \bar{y} 和 \bar{h} 分别为运动幅值和波幅, $y(\omega)$ 表征的是单位波高引起的模型运动响应。

当波长较短、试验速度较大时,船体与波峰的撞击作用较为剧烈,使得模型跳离水面并飞过 1~2 个波峰后才会与水面撞击,这就是跳波现象。跳波发生后模型的遭遇频率发生了改变,本文用频率换算的方法进行处理,即增大跳波点的波长(假想波长),模型跳过几个波峰,则假想波长增大为原来波长的几倍,这样将高频转换到接近实际的低频部分来处理。由于假想波波倾角及波面的上升速度也比原来的要小,当模型下沉速度一定时,转换后模型与波峰撞击时的垂直相对速度较转换前变小,因此转换后过载响应偏大,而纵摇和升沉响应稍偏小。考虑到整个试验过程仅出现一次跳波现象,转换后并不影响运动响应的规律性,因此可以忽略转换后的影响。

3 模型运动响应分析

3.1 模型纵摇运动响应分析

模型以一定速度在波浪上运动时,运动响应在某一波长条件下会出现最大值,这时的波长和遭遇频率分别称为谐振波长和谐振频率。图 3 是纵摇运动响应曲线随遭遇频率变化曲线,有如下规律:

(1) 不同速度下的谐振遭遇频率基本在 $1 \sim 1.5 \text{ Hz}$ 范围内,谐振频率随速度的增大而减小,在过渡滑行阶段,谐振频率随速度的变化率较大,而在滑行阶段变化率较小。

(2) 纵摇谐振波长随速度变化线性增加,不同速度条件下谐振波长基本处在 $1.5 \sim 3.5$ 倍机身长度范围内。

(3) 当模型在谐振波长上运动时,纵倾幅值比模型在其它波长上运动时的纵倾幅值大的多。

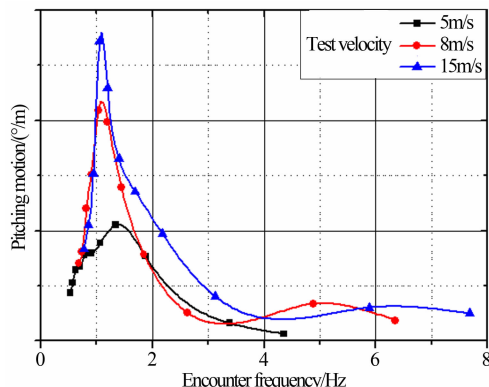


图 3 纵摇运动响应变化曲线

Fig. 3 Pitching motion transfer function curve

3.2 模型升沉运动响应分析

图 4 是升沉运动响应曲线随遭遇频率变化曲线,升沉运动随遭遇频率的变化规律与纵摇运动随遭遇频率的变化规律相似,有如下变化规律:

(1) 不同速度下的谐振遭遇频率基本在 $0.8 \sim 1.2 \text{ Hz}$ 范围内,升沉谐振频率随速度的增大而增大,在过渡滑行阶段,谐振频率随速度的变化率较大,而在滑行阶段变化率较小。

(2) 升沉谐振波长随速度呈阶跃式变化,在航行阶段,谐振波长在 2.5 倍机身长度附近,滑行阶段谐振波长基本为 3.5 倍机身长度,在过渡滑行阶段谐振波长随速度增加而迅速增大。

(3) 模型在谐振波长上运动时,升沉幅值比在其它波长上运动时升沉幅值要大的多。

通过比较可知,在同一速度下纵摇运动和升沉运动的谐振波长并不是同时出现的,在低速时纵摇运动谐振波长比升沉运动谐振波长稍短,而在高速时,二

者的谐振波长基本相等。

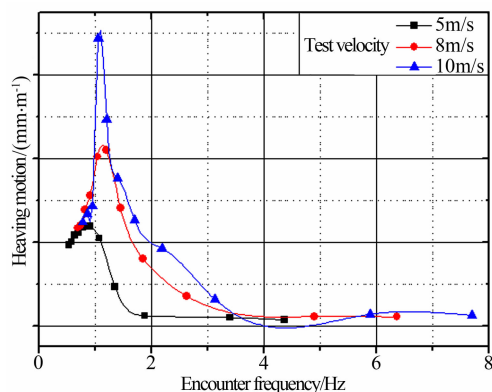


图 4 升沉运动响应变化曲线

Fig. 4 Heaving motion transfer function curve

3.3 模型过载响应分析

图 5 和 6 分别是机身艏部、艉部过载响应曲线随遭遇频率变化曲线。与纵摇和升沉运动响应曲线不同的是,过载响应随遭遇频率变化曲线的最大特点是具有 2 个峰值。

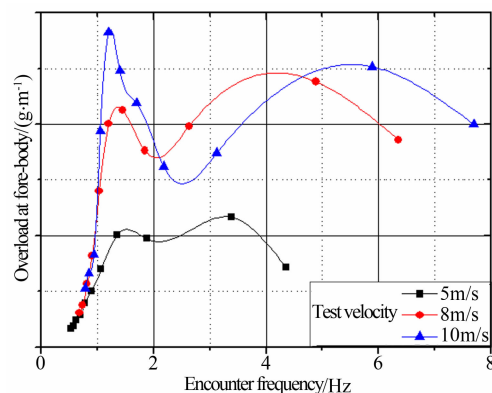


图 5 艏部过载响应变化曲线

Fig. 5 Overload transfer function curve at fore-body

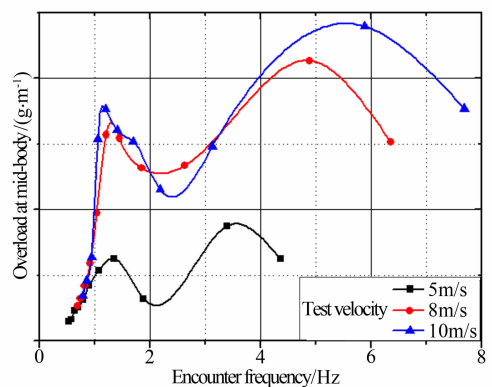


图 6 艉部过载响应变化曲线

Fig. 6 Overload transfer function curve at mid-body

(1) 机身艏部、艉部过载第一谐振频率基本处在 $1.1 \sim 1.5 \text{ Hz}$ 范围内,与纵摇和升沉的谐振频率接近,第一谐振频率随速度的增大而减小;第二谐振频率基本处在 $3.5 \sim 6 \text{ Hz}$ 范围内,第二谐振频率随速度的增大而增大。

(2) 在整个速度范围内机身艏部、舳部过载第一谐振波长基本处在 1.5~3.5 倍机身长度范围内,第一谐振波长随速度的增大而增大,且近似呈线性关系;第二谐振波长约为 0.5 倍机身长度,基本不随速度变化而改变。

(3) 机身艏部、舳部过载的比较。在第一谐振频率附近,机身舳部过载明显比艏部过载要小,舳部过载基本在艏部过载的 70% 左右,而在第二谐振频率附近,机身舳部过载比艏部过载稍小,舳部过载为艏部过载的 90% 左右。

造成这种差异的原因是机身过载第一谐振频率与纵摇和升沉谐振频率非常接近,此时模型纵摇运动和升沉运动非常剧烈,其角加速度和垂向加速度很大,引起机身艏部过载与舳部过载差异较大。而在第二谐振频率附近,模型纵摇运动和升沉运动较为温和,机身角加速度很小,因而机身艏部和舳部过载差异较小。

过载响应呈现双峰值的原因在于模型在不同波长上的运动特点完全不同。过载第一谐振频率较低(长波),此时模型运动状态表现为机身艏部间歇性穿浪滑行,与波峰遭遇的瞬间冲击载荷较大,其作用区域靠近艏部,模型受到很大的纵摇加速度和垂向加速度,此时出现过载峰值完全是由于模型剧烈的纵摇和升沉运动引起的。过载第二谐振频率较高(短波),模型运动状态表现为机身断阶连续性的穿浪滑行,即断阶刚经历一个波峰便迅速与下一波峰遭遇,高速时还会发生跳波现象,冲击载荷很大且作用点在机身断阶处,靠近重心位置,模型受到很大的垂向加速度而纵摇角加速度较小,因而模型出现了过载峰值而并未出现纵摇和升沉峰值。

4 飞机耐波性分析

海面上的波浪十分复杂,根据形态的不同可以将海浪分为风浪和涌浪,风浪是在风直接作用下产生的,形态极为不规则,而涌浪是从其它风区传递过来的,形态和排列较为规则,可近似视为规则波。当飞机在涌浪上运动时,其运动响应特性与试验模型在规则波上的运动响应特性类似,但是由于缩尺效应的影响,实机与模型之间运动响应剧烈程度不同,在数值上有表 1 所示的比例关系。

由此可以分析出飞机在涌浪上迎浪运动时,需要注意以下 2 点:

(1) 为了避免出现剧烈的纵摇和升沉运动,飞机应避免在波长为 1.5~3.5 倍机身长度的涌浪上起

降。剧烈的纵摇和升沉运动对滑行稳定性有非常不利的影响:一是过大的纵摇幅值会使飞机的纵倾角超过稳定区域边界,此外,剧烈的、周期性的纵摇运动容易引发海豚运动^[14];二是过大的升沉幅值会引起飞机在高速时出现跳跃等不稳定的运动。

表 1 试验模型与实机运动响应比例关系
Table 1 Motion response ratio relation between test model and full scale plane

	Test model	Full scale plane
Pitching motion	1	λ^{-1}
Heaving motion	1	1
Overload	1	λ^{-1}

(2) 飞机较为理想的使用环境是在超长涌浪(4 倍机身长度以上)上起降,原因在于:一是此时飞机的纵摇、升沉和过载响应均较低,对飞机的运动稳定性和机体结构的不利影响小;二是涌浪的波长较长,飞机在滑水过程中遭遇 2~3 个涌浪便能离水起飞。

飞机在涌浪上滑水起飞时运动响应在稳定上下边界之内才能保证飞机稳定滑行,而飞机的运动响应受到波长和波高的影响,以上分析了涌浪的波长对飞机运动响应的影响规律,根据参考文献[15],当滑行体进入滑行状态后,纵摇运动和升沉运动约与波高的 0.7~0.85 次方成正比,属于弱非线性关系,而过载则与波高呈强非线性关系。因此在实际使用时还应参考涌浪波高的大小,不能超过飞机的设计抗浪指标。

5 结 论

通过水上飞机模型波浪试验,得到了试验模型纵摇、升沉和过载响应特性曲线,得到了如下结论:

(1) 纵摇和升沉运动响应曲线呈现单峰值特点,在波长为 1.5~3.5 倍机身长度时,由于机身艏部间歇性的穿浪滑行,纵摇和升沉运动响应非常剧烈,并达到峰值;

(2) 过载响应曲线呈现双峰值的特点,第一谐振峰是由于剧烈的纵摇和升沉运动引起的,谐振波长在 1.5~3.5 倍机身长度范围内;第二谐振峰由飞机在短波上运动时断阶连续性的穿浪滑行引起,谐振波长在 0.5 倍机身长度附近;

(3) 飞机在涌浪上运动时首要选择在超长涌浪上起降,应避免在中长涌浪上起降。

参考文献:

[1] Elmo J Mottard. A brief investigation of the effect of waves on the take-off resistance of a seaplane[R]. NASA TN D-165, 1959.

- [2] Hopkins R M. A study of the effects of regular waves on the landing and take-off distance of a seaplane[R]. AD 648848, 1966.
- [3] Gerard Fridsma. A systematic study of the rough water performance of planning boats[R]. AD 708694, 1969.
- [4] Gerard Fridsma. A systematic study of the rough-water performance of planning boats (Irregular Wave-Part II)[R]. AD 728788, 1971.
- [5] 朱鑫, 段文洋, 陈云赛, 等. 滑行艇规则波中迎浪运动响应的时域解[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(9): 1094-1099.
Zhu Xin, Duan Wenyang, Chen Yunsai, et al. The time domain solution to motion response of a planning craft in regular head wave[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(9): 1094-1099.
- [6] 朱鑫, 段文洋, 马山, 等. 棱柱型滑行艇在规则波中迎浪运动响应的频域解[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(11): 1326-1333.
Zhu Xin, Duan Wenyang, Ma Shan, et al. The frequency domain solution for the motion simulation of the prismatic planning craft in regular head waves[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(11): 1326-1333.
- [7] 苏玉民, 赵金鑫, 陈庆童, 等. 滑行艇在规则波中的数值模拟[J]. 船舶力学, 2013, 17(6): 583-591.
Su Yumin, Zhao Jinxin, Chen Qingtong, et al. Numerical simulation of the planning vessel in regular waves[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(6): 583-591.
- [8] 王硕, 苏玉民, 庞永杰, 等. 高速滑行艇在规则波中的纵向运动数值研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(1): 45-52.
Wang Shuo, Su Yumin, Pang Yongjie, et al. Numerical study on longitudinal motions of a high-speed planning craft in regular waves[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(1): 45-52.
- [9] 邹劲, 杨静雷, 蒋一, 等. 三体滑行艇在规则波中的数值预报[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(3): 12-15.
Zou Jin, Yang Jinglei, Jiang Yi, et al. Numerical prediction on the motion of trimaran-planing boats on regular waves[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(3): 12-15.
- [10] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理(上册)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007: 157.
- [11] 张培红, 周乃春, 邓有奇, 等. 雷诺数对飞机气动特性的影响研究[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(6): 693-698.
Zhang Peihong, Zhou Naichun, Deng Youqi, et al. The effects of Reynolds number on airplane aerodynamic characteristics[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(6): 693-698.
- [12] 吴秀恒. 船舶操纵性与耐波性[M]. 第二版. 北京: 人民交通出版社, 1998: 147, 190.
- [13] 许勇, 欧勇鹏, 董文才. 基于低通滤波和经验模态分解的舰船耐波性试验信号分析方法研究[J]. 船舶力学, 2009, 13(5): 712-717.
Xu Yong, Ou Yongpeng, Dong Wencai. Study on the measured signal analysis method based on low-pass filtering and EMD for ship seakeeping test[J]. Journal of Ship Mechanics, 2009, 13(5): 712-717.
- [14] Smith A G, White H G. A review of porpoising instability of seaplane[R]. R & M No. 2852, 1954.
- [15] 董祖舜. 快艇动力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991: 70.

作者简介:



黄 森(1985-),男,湖北鹤峰人,工程师。研究方向:水上飞机耐波性研究。通信地址:湖北省荆门市东宝区航空路8号水动力研究中心(448000)。E-mail: 409267382@qq.com

(编辑:张巧芸)