



两栖车辆水上动态性能 数值模拟方法 及其应用

LIANGQI CHELIANG SHUISHANG DONGTAI XINGNENG
SHUZH MONI FANGFA JIQI YINGYONG

◆ 王涛 徐国英 郭齐胜 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

两栖车辆水上动态性能 数值模拟方法及其应用

王 涛 徐国英 郭齐胜 著

國防工業出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

两栖车辆水上动态性能数值模拟方法及其应用 / 徐国英, 王涛, 郭齐胜著. —北京: 国防工业出版社, 2009. 9

ISBN 978 - 7 - 118 - 06456 - 8

I. 两... II. ①徐...②王...③郭... III. 水陆两用车 - 水上运动 - 动态特性 - 数值模拟 IV. TJ819

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 115786 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 7 1/4 字数 200 千字

2009 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

水陆两栖车辆(以下简称两栖车辆)是一种既具有陆上机动能力,又具有水上航行能力,同时具有自行实施由陆入水、由水登陆能力的特种车辆,是不需要进行长时间技术准备就可以依靠自身浮渡能力通过水障碍的轮式或履带式车辆。这意味着两栖车辆可以在没有架桥等特殊作业的条件下自行克服水障碍,连续通过江河、水网、海峡等特殊地形,承担其他装备难以独立完成的任务。在军事上,两栖车辆的这种特殊能力使其具备攻击隐蔽性好、突然性强的独特威力,是强渡江河、抢滩登陆作战的重要装备。

为满足登陆作战需要,两栖装备需要较高水上航速和在水上自然环境中的较强生存能力。就水上提速而言,不仅需要功率更大的动力装置,还需要设计更加合理的形体结构。就提高水上自然环境中的生存能力而言,需要良好的机动性能和抗风浪能力。要满足这些需求,单纯的车辆动力学知识和传统车辆的设计经验已经不够,以水动力学理论为基础的两栖车辆水上性能研究才是解决这些问题的根本。

要在短期内建立起针对两栖车辆水上性能的理论体系并非易事。以船舶为例,船舶理论是在大量理论分析、大量船型、大量试验基础上发展起来的,类似的研究手段很难在短期内获得收益,且需要大量的财力、人力支持。有鉴于此,有必要采用

新的手段和方法来发展两栖车辆理论。

数值模拟作为计算机技术和数值算法发展的产物已逐渐成为科学研究的一个重要研究手段,是继实验研究和理论研究之后研究事物规律的第三种方法。本书介绍了以两栖车辆的水上动态性能(快速性、耐波性、操纵性)为对象进行数值模拟的实施方法及关键技术,并结合具体实例进行了应用分析,以期促进数值模拟方法在两栖车辆水上性能研究中的应用与发展。同时也希望能帮助两栖车辆方面的科研和工程人员尽快掌握水上动态性能仿真研究方法,提升工程应用能力,了解前沿、把握机遇。

本书反映的是作者及其科研梯队的最新研究成果,难免存在不成熟和欠妥当之处,望读者不吝赐教,多提宝贵意见。

作者

2008年12月

目 录

第一章 两栖车辆水上性能概述	1
1.1 水上静态性能	1
1.1.1 浮性	1
1.1.2 稳性	2
1.1.3 抗沉性	2
1.2 水上动态性能	4
1.2.1 快速性	4
1.2.2 耐波性	6
1.2.3 操纵性	8
1.3 两栖车辆的通过性	8
1.4 水上动态性能数值模拟方法概述	9
第二章 两栖车辆水上运动数学模型	13
2.1 两栖车辆水上运动分析	13
2.2 基于纳维-斯托克斯方程的水上运动数学模型	16
2.2.1 两栖车辆水上运动方程	16
2.2.2 外流场的基本方程	18
2.2.3 定解条件	21
2.2.4 两相流的数学模型	23
2.3 基于水动力方程的水上运动数学模型	24
2.3.1 两栖车辆水上运动方程	24
2.3.2 外力项	24

第三章 基于纳维-斯托克斯方程的两栖车辆水上

运动数值模拟	33
3.1 基于 N-S 方程的数值模拟	33
3.1.1 湍流模型	33
3.1.2 方程的数值解法	37
3.1.3 网格划分	42
3.1.4 边界层的处理	46
3.1.5 自由面模拟	51
3.2 流场与车体的动力耦合	55
3.2.1 基于动网格的流固动力耦合	55
3.2.2 动力耦合修正算法	61
3.3 基于 N-S 方程与造波机理论的规则波模拟	66
3.3.1 数值波浪水池	66
3.3.2 数值造波	68
3.3.3 数值消波	69
3.3.4 波形验证	71
3.4 典型运动的处理	73
3.4.1 静水直航	73
3.4.2 自由衰减	78
3.4.3 强迫运动	79
3.4.4 迎浪直航	79
3.5 并行运算	81
3.5.1 并行计算平台的分类	82
3.5.2 并行计算的两种模型	84
3.5.3 开发工具	87
3.5.4 并行性能分析指标	88
3.5.5 并行计算中的网格划分	90
3.5.6 计算实例分析	95
3.6 算例	97

第四章 基于水动力方程的两栖车辆水上运动数值

模拟	102
4.1 龙格-库塔法的基本原理	104
4.2 水动力学系数的计算	109
4.2.1 船舶领域确定水动力系数的常用方法	109
4.2.2 加速度系数估算方法	111
4.2.3 基于有限体积法的强迫运动数值模拟	118
4.2.4 加速度与速度一阶项系数的计算	122
4.2.5 速度二阶项的计算	124
4.3 水静力的计算	124
4.3.1 方式一——符拉索夫(Фласов)曲线法	124
4.3.2 方式二——几何解析法	124
4.3.3 方式三——空间离散法	129
4.3.4 方式四——基于体积分数的方法	134
4.3.5 四种方式的对比	135
4.4 推进器与转向机构的系数计算	136
4.4.1 推进器的系数	136
4.4.2 转向机构的系数	136
4.5 基于波面方程的波浪力系数计算	138
4.5.1 平面行进波	138
4.5.2 随机海浪长峰波	138
4.5.3 随机海浪短峰波	140
4.6 算例	142

第五章 两栖车辆水上动态性能数值模拟的可信度

分析	144
5.1 模型与实车试验	144
5.1.1 模型试验	144
5.1.2 实车试验	152
5.2 数值模拟可信度验证	157

5.2.1	基于相似度的可信度验证	157
5.2.2	宏观量对比	159
5.2.3	微观量对比	162
5.3	误差源分析	162
5.4	数值模拟可信度改进	163
5.4.1	湍流模型对比	163
5.4.2	湍流模型参数辨识	169
5.4.3	网格无关性分析	172
第六章	两栖车辆水上动态性能的数值模拟分析	180
6.1	两栖车辆快速性及影响因素分析	180
6.1.1	快速性分析	180
6.1.2	航态对快速性的影响	181
6.1.3	车首形状对快速性的影响	183
6.1.4	车尾形状对快速性的影响	186
6.1.5	履带的影响	190
6.1.6	裙板的影响	194
6.1.7	来流湍流度的影响	198
6.1.8	首尾倾角对快速性的影响	199
6.1.9	水翼对快速性的影响	202
6.1.10	车体尾部形状对推力的影响	206
6.2	两栖车辆耐波性及影响因素分析	212
6.2.1	耐波性分析	212
6.2.2	航速、航向对耐波性的影响	216
6.2.3	波长对耐波性的影响	222
6.3	两栖车辆操纵性及影响因素分析	223
6.3.1	操纵性分析	223
6.3.2	水流对操纵性的影响	225
6.3.3	航速对操纵性的影响	225
6.3.4	侧边舵位置对操纵性的影响	227

第七章 两栖车辆水上性能分析软件的开发	229
7.1 系统功能	229
7.2 系统框架	230
7.3 程序开发	231
参考文献	235

第一章 两栖车辆水上性能概述

从力学角度讲,船舶力学通常分为船舶静力学和船舶水动力学,按照这一原则,船舶水上性能可分为水上静态性能和水上动态性能。水上静态性能研究浮性、稳性、抗沉性和入水计算。水上动态性能研究快速性、耐波性、操纵性。

两栖车辆本质上是一种特殊的水面航行器,因此其水上性能分类和定义与水面船舶相似,所不同的是,两栖车辆存在由陆入水和由水上陆的过程,即所谓的通过性。下面按照力学特性分类,介绍各种特性的定义。

1.1 水上静态性能

1.1.1 浮性

浮性是车辆在一定载荷情况下具有漂浮在水面并保持平衡位置的能力,它是两栖车辆的基本性能之一。

车辆静浮于水面,受到本身的重力和静水压力所形成的浮力作用。重力是车辆各部分质量形成的垂直向下的合力,作用点称为车辆的重心。而静水压力作用在车辆浸水表面的每一点上,这些静水压力都是垂直于车辆表面的,其大小与浸水深度成正比。由于车辆处于平衡状态,其静水压力的水平分力互相抵消,其垂直分力则形成一个垂直向上的合力,称为浮力;其作用点也就是车辆排水体积的形心,称为浮心。

根据阿基米德原理,物体在水中所受到的浮力等于该物体所

排开的水的重量。因此,车辆所受到的浮力就等于其排开的水的重量(通常称为排水量)。

车辆静浮于水面的平衡条件是:重力与浮力的大小相等且方向相反;重心和浮心在同一条铅垂线上。

1.1.2 稳性

车辆在水中处于平衡状态,在外力作用下不致倾斜到危险倾角,当取消外力后能自行回复到原平稳位置的性能称为稳性。

稳性是两栖车辆的重要航行性能。在稳性研究中,通常有如下几种分类。

一、横稳性和纵稳性

平行于中横剖面内倾斜(简称横倾)的稳性称为横稳性;平行于中纵剖面内倾斜(简称纵倾)的稳性称为纵稳性。

二、静稳性和动稳性

若在外力矩作用下,车辆倾斜过程中的角速度很小并趋向于零,直至恢复力矩与外力矩相等达到平衡,这类稳性称为静稳性;若外力矩是突然作用于车辆上,并在车辆倾斜时有明显的角速度,这时只有当外力矩所做的功完全由恢复力矩所做的功抵消时,倾斜的角速度才变为零而使车辆达到平衡状态,这类稳性称为动稳性。

三、初稳性和大倾角稳性

初稳性是指倾角小于 10° 或车体上甲板边缘开始入水前的稳性;大倾角稳性是指倾角大于 10° 或车体上甲板边缘开始入水后的稳性。把稳性划分为这两部分的原因是,在研究小倾角稳性时可以引入某些假设,从而使浮态的计算简化,而且还能较明确获得影响初稳性的各种因素间的规律。此外,大角度倾斜一般是在横倾时产生,所以大倾角稳性也称为大倾角横稳性。

1.1.3 抗沉性

与船舶抗沉性类似,两栖车辆的抗沉性也应当看作是从属于

生存力的车辆性能,具有恢复战斗性能等更为广泛的含义。因此,两栖车辆的抗沉性可定义为:两栖车辆受损进水;或因其他原因水进入车内时,车辆仍能保持足够的浮性和稳性而不致沉没和倾覆,并能在野战条件下迅速恢复战斗性能的能力。

由于车内大量进水关系到乘员和车辆的安全,因此抗沉性是两栖车辆的重要性能之一,在车辆设计阶段就应予以考虑。可能造成车内大量进水的情况有如下几种。

由于战斗或使用中造成车体破损;在波浪中航行时水大量涌入;由于乘员违反车辆入水前的航行准备或驾驶规则而引起大量进水等。

战斗或使用中的车体破损是指,被武器打击穿孔、裂缝或其他形式的破损。破损的形状、尺寸大小各不相同,破损部位可能是水线以下或水线以上。水线以下部位穿孔或裂缝是最危险的,通常破损时间不长,水就会大量流进车内。因此必须采取有效措施,以防车辆沉没。接近吃水线,且在水上部位的破损同样也是危险的。因为在波浪中航行时,即使纵倾或横倾角度不太大,水也会通过破损部位进入车内。破损部位大大高于吃水线时,危险性较小,只有波浪中大纵倾或大横倾航行时,以及车辆剧烈摇摆时,水才会流过破损部位进入车内。

如果乘员违反车辆入水前的航行准备,没有拧紧车体底部的螺栓或未按规定关闭车上的门窗时,水就会大量进入车内。如果乘员违反车辆驾驶规则,当车辆从陡岸入水或从陡坡出水中途滑下时,特别是车辆突然没入水中,而且大大没过设计吃水线时,大量的水将会进入车内。

由于多数两栖车辆都未将车体分隔成数个水密隔舱,水的自由表面会大大降低车辆的稳性,而且水的积聚也会造成车辆的很大倾斜,特别是大的横倾有导致倾覆的危险。此外,车内大量进水还容易引起车辆各系统、装置的损坏。

不同的车辆类型和车辆的不同使用条件,对车辆的抗沉性应有不同的要求。为了保证车辆的抗沉性要求,通常采取如下措施:

设计大的浮力储备;采用高效的排水工具;将车体分隔成一定数量的水密隔舱;采用完全密封的车体结构;在完全密封的车体内建立高于大气压力的超压;采用轻质或多孔材料制成车体构件或用这些材料填充自由体积。

显然,两栖车辆的抗沉性取决于许多结构性因素和使用方面的要求,然而浮力储备和排水设备是各种类型车辆的共性要求,也是最主要的问题。

1.2 水上动态性能

1.2.1 快速性

快速性是两栖车辆在发动机功率一定的条件下,保持一定速度航行的能力。快速性是两栖车辆的重要性能指标。它可以决定克服某一水障碍所需的航行时间,快速性越好的车辆,越过该水障碍所需的航行时间越短。为获得良好的快速性,就需要提高车辆的航行速度。但是,航行速度越大,机件的负荷越大,在其他条件相同的情况下,快速性主要取决于水阻力、推进效率和发动机功率。

大多数两栖车辆的发动机功率是根据陆上行驶的最高速度确定的。因此,在这种情况下,其水上航行速度主要与水阻力和推进效率有关。车辆保持某一稳定的速度航行,是发动机、推进器和一定的车体外形三者相互匹配的结果。其中发动机是能量的提供者,车体则是能量的接受者,而推进器担负着转换器的角色,通过推进器的运转,使发动机的能量转换成车辆前进的动力。所以,在两栖车辆设计中,必须把这三者作为一个系统去平衡协调,其中一个条件变动了,另外两个条件也要相应变动。

两栖车辆在水上以某一稳定速度航行时,作用在车辆上的力有推力、水阻力、空气阻力、惯性阻力。为便于分析,将水阻力 R 移到车辆重心处,并分解为水平方向的水阻力 R_x ,垂直方向的升

力 R_x , 以及力图使车辆形成向车首或车尾倾斜的力矩 $M = R \cdot a$ 。

如果推进器的推力作用线不通过车辆重心, 这时也会产生推力力矩。当车辆重心高于推进器的推力作用线时, 推力力矩将会使车辆产生尾倾; 相反时, 则会产生首倾。空气阻力 R_{aa} 也能对车辆施加倾斜力矩, 车辆航速改变时, 还会有加速(或减速)时的惯性阻力 R_j 作用到车上。因此, 在车辆一般运动情况下, 推进器的推力将等于各项阻力的总和为

$$P = R_x + R_j + R_{aa} \quad (1-1)$$

水阻力包括摩擦阻力和剩余阻力, 剩余阻力包括兴波阻力和压差阻力。此外水阻力也可分成兴波阻力和黏性阻力, 黏性阻力包括压差阻力和摩擦阻力。兴波阻力是指由于波浪而引起压力分布改变所产生的阻力; 压差阻力是指由于水的黏性而引起的车体前后压力不对称而产生的阻力; 摩擦阻力指车体在水上运动时受到的切应力, 即车体与水之间的摩擦力。

一般认为黏性阻力与速度的平方成正比, 因此可以将总阻力除以速度平方进行观察, 图 1-1 显示了拖模试验中几种车型这部分阻力的变化。

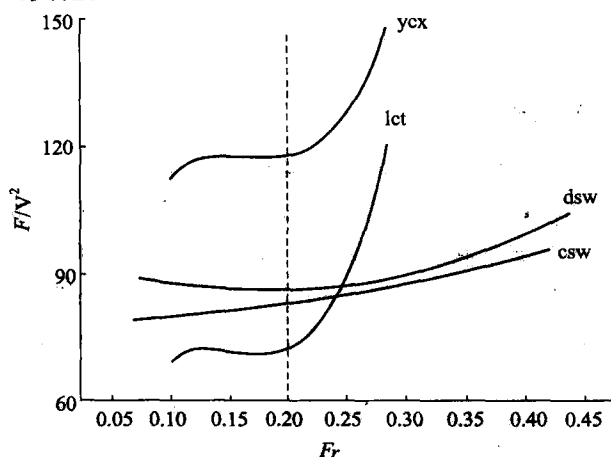


图 1-1 各车型阻力成分

可以看出,当弗汝德数较低($Fr < 0.2$)时曲线变化很平稳,也就说明此时阻力成分几乎都是黏性阻力,而当 Fr 继续增大时曲线有明显上升趋势,这是兴波阻力的比重逐渐增大的迹象。

通过以上分析我们得到这样的结论,当弗汝德数比较小时,黏性阻力是主要成分,约占80%;当弗汝德数增大时,兴波阻力比例上升。摩擦阻力始终在10%以下,这是因为两栖车辆的湿水面积与长宽比都较小的缘故。

由于大多数车辆水线以上的迎风面都不大,而且水上航速也不高,因此空气阻力只占全部阻力的很小一部分。但对于那些装载汽车及其他货物的登陆运输车辆来说,其迎风面积可能很大,这时它的空气阻力就不容忽视。与陆上车辆不同的是,风力负荷对车辆的航行稳性有比较大的影响,甚至不大的风力作用都会引起车辆的航向摆动。

惯性阻力 R_i 主要与车辆的总质量 W 、车体和行动部分所带动的周围水所引起的附加质量 w 以及车辆的加速度 j 有关。其中附加质量与车体的形状、尺寸以及它们浸在水中的尺寸有关,而且与推进器的结构也有关。有些车辆的惯性阻力很大,甚至在加速时会消耗推进器的很大一部分推力。其大小为

$$R_i = (W + w)j \quad (1-2)$$

1.2.2 耐波性

车辆在风浪海况下航行时的摇摆性能,反映车辆的抗风浪能力。车辆的横摇、纵摇及升沉等运动统称为车辆摇摆,研究耐波性的目的在于掌握车辆摇摆等规律,采取措施改善车辆摇摆性能。

车辆在静水中或在波浪中航行时,由于受风、浪等外力作用,所作往复运动或升沉运动,称为摇摆。车辆摇摆主要有以下三种运动状况(图1-2)。

横摇:车辆绕纵轴,由横向惯性力矩与恢复力矩交互作用所产生的周期性往复运动(图1-2(a));

纵摇:车辆绕横轴,由纵向惯性力矩与恢复力矩交互作用所

产生的周期性往复运动(图1-2(b));

垂荡:即升沉运动,车辆沿Z轴,由垂向运动惯性与浮力的交互作用所产生的上下运动(图1-2(c))。

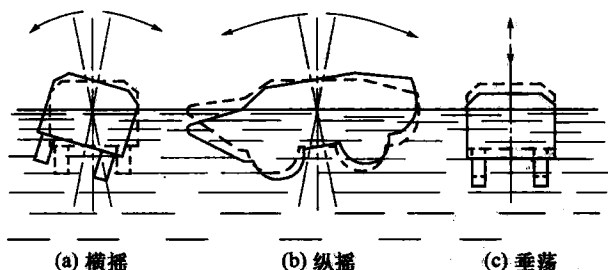


图1-2 摇摆类型

通常,车辆的摇摆总是上述各种摇摆情况的组合,而横摇又是最主要的。车辆摇摆情况是一种有害的性能,它会引起许多不良的后果,主要有:

(1) 车辆剧烈横摇会增大横倾角。如果车辆由于波浪作用引起横摇,同时又受到任何其他横向力的作用,例如强烈的阵风、火炮横向射击、炮弹在车辆附近爆炸以及其他突加的外力作用,这时将会引起车辆的剧烈横摇,甚至可能导致倾覆。

(2) 车辆在航行中的摇摆会使阻力增加,推进器工作变坏,从而降低航行速度,增加燃料消耗。

(3) 车辆摇摆会使顶甲板上浪浸水,造成车内进水,或水浸入观察镜,影响乘员观察。

(4) 车辆摇摆会降低武器瞄准和射击的准确性。

(5) 由于摇摆产生的惯性力,使车辆结构受到动力载荷,机件可能导致损坏。

(6) 车辆的长时间摇摆对乘员生理状态会产生有害影响。当垂直加速度达到 $0.12\text{m/s}^2 \sim 0.4\text{m/s}^2$, 而摇摆的角加速度达到 $2^\circ/\text{s}^2 \sim 3^\circ/\text{s}^2$ 时,开始出现晕眩。当垂直加速度达到 1m/s^2 或更大时,上述症状变得剧烈,对战斗力有很大影响。