

两栖装甲车辆由陆入水过程中车体稳定性分析

宋超¹, 罗建华², 贾亦卓¹, 刘洪甜¹, 纪兵¹

(1. 陆军装甲兵学院 兵器与控制系, 北京 100072; 2. 陆军装甲兵学院 演训中心, 北京 100072)

摘要: 对两栖装甲车辆水动力学模型的构建以及基于水上航行耐波稳定性的横摇运动进行了探索; 首先建立了两栖装甲车辆由陆入水的动力学模型, 并进行了仿真分析; 而后将模型试验与融入遗传算法的系统辨识思想相结合, 构建了对于两栖装甲车辆摇荡运动的判别模型; 最后通过对车辆在水上的横摇运动试验设计及侧体方案布置, 对判别模型的应用效果进行了验证; 通过研究发现, 水动力学模型能够对两栖装甲车辆由陆入水时的车体稳定性情况进行准确描述, 基于遗传算法的系统辨识方法能够分段辨识两栖装甲车辆的横摇运动, 为车辆水上航行稳定性的研究提供了借鉴。

关键词: 动力学模型; 两栖装甲车辆; 系统辨识; 横摇运动

Stability Analysis of Amphibious Armored Vehicles Entering the Water from Land

Song Chao¹, Luo Jianhua², Jia Yizhuo¹, Liu Hongtian¹, Ji Bing¹

(1. Department of Weapons and Control, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China;

2. Military Exercise and Training Center, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: The integration of the amphibious armored vehicle hydrodynamic model and the roll motion based on the stability of sea navigation wave resistance were explored. First, the dynamic model of amphibious armored vehicles entering the water from land was established, and simulation analysis was carried out. Then, the model test was combined with the idea of integrated genetic algorithm system identification, and the identification model for the amphibious armored vehicle swaying motion was identified. The experimental design of the rolling motion of the vehicle on the water and the layout of the side body scheme verified the application effect of the discrimination model. Through research, it is found that the hydrodynamic model can accurately describe the stability of the amphibious armored vehicle when it enters the water from the land. The system identification method based on genetic algorithm can distinguish the rolling motion of the amphibious armored vehicle, which is the stability of the vehicle on water's research provides direction.

Keywords: dynamic model; amphibious armored vehicle; system identification; roll motion

0 引言

两栖车辆由陆入水指的是车辆运用自身的陆上行驶能力经陆上或者登陆舰艇驶入水面的过程^[1], 车辆入水过程中经过的岸边大多为坡道形式, 入水角指的是战斗总质量条件之下, 经由岸坡顺利入水过程中能够克服的最大坡道角。水面耐波性与姿态稳定性是研究船舶、两栖车辆水面航行稳定性的两个主要方面, 耐波性的研究与摇荡运动密切相关^[2], 要对两栖装甲车辆在水面上的航行摇荡运动进行探索与研究, 必须要考虑水对车辆的作用效果, 水运动模型的建立就很有必要, 其中尤以从陆入水的运动模型参考价值最高。本文既是以水陆两栖装甲车辆作为研究对象,

构建车辆水动力学模型, 并运用系统辨识与模型试验的思想, 构建基于耐波性的横摇运动数学模型, 通过相应的仿真分析进行结果辨识, 旨在为水陆两栖装甲车辆在由陆入水过程中的车体稳定性研究提供一定的参考与借鉴。

1 两栖装甲车辆由陆入水动力学模型的构建与可靠性验证

车辆行经河流、湖泊、海滩等岸边大多为坡道形式, 因而坡道入水是最常见的情况, 本文通过水运动模型的构建对两栖装甲车辆从陆地经坡道入水进行仿真分析。

1.1 两栖装甲车辆由陆入水动力学模型的构建

一般情况下, 两栖装甲车大多情况下前进入水, 最初因浸水的原因会有浮力的作用, 因而车辆对坡道的法向压力与浮力的大小呈现负相关的变化, 车辆的前行过程伴随着所受牵引力的持续降低, 而阻力持续增大, 直到阻力增加至与牵引力相等之前, 车辆若浮起则说明入水成功。为表征车辆的动力学以及其空间瞬时位姿, 本文建立了如图1所示的体坐标系 $o-xyz$ 与惯性坐标系 $O-XYZ$, 其中体坐标系与车体固连, 原点 o 同车辆重心 G 对应, 横轴

收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2020-05-14。

基金项目: 军内科研项目(2015ZB10)。

作者简介: 宋超(1982-), 男, 山东莱阳人, 硕士, 讲师, 主要从事武器系统运用及安全性分析方向的研究。

罗建华(1965-), 男, 湖南长沙人, 博士, 教授, 主要从事装备试验验证方向的研究。

同车辆正前方相对应, z 轴同车辆正下方相对应; 惯性坐标系则和地面固连, 它和初始位置时车辆的体坐标系相对应。

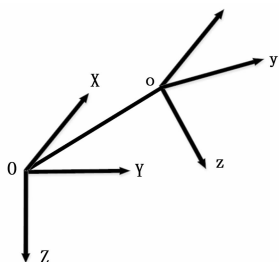


图 1 坐标系的建立

依据浮力力矩与重力力矩的相异, 可以将装甲车辆的入水划分为两个阶段。在第一阶段中, 浮力力矩总是小于重力力矩, 此时车辆的整体负重均在坡道之上, 还未发生转动, 因此时车辆入水的速度缓慢, 故水的阻力可以忽略不计。从浮力角度来看, 依据阿基米德原理, 浮力总是与车辆所排开水体积的重量相等, 由于车辆前行使得排水体积不断增加, 因而浮力亦持续增加。从地面支撑力角度来看, 地面作用在履带上的法向支撑力呈现梯形分布变化, 随着浮力的增加, 地面支撑力呈现不断减小的变化, 与浮力浮心位置的不断变化类似, 地面支撑力的作用点位置也在不断变化。车辆受到的牵引力同发动机传输至主动轮的力矩相关, 随着车辆行驶路面从干土到湿土的变化, 相应的附着系数变小。基于此, 在这个阶段对于两栖装甲车辆水动力模型的构建, 如式 (1) 所示:

$$\left[\begin{aligned} \sum F_x &= F_T - F_{BUG} + (F_G - Q)\sin\alpha - F_{WAV}\sin\beta = \delta \frac{F_G}{g} \frac{dv_x}{dt} \\ \sum F_y &= 0 \\ \sum F_z &= (F_G - Q)\cos\alpha - F_{WAV}\cos\beta - F_N = \delta \frac{F_G}{g} \frac{dv_z}{dt} \end{aligned} \right] \quad (1)$$

其中: Q 表示浮力 F_{WAV} 为波浪力, β 为车首滑板与坐标平面的夹角。

在第二阶段当中, 浮力所对应的力矩开始比重力所对应的力矩要大, 车辆开始发生转动, 此时的地面支撑力方向是与地面垂直的。由于受到浮力力矩的作用, 装甲车辆履带的前段已经不再与地面接触, 仅相邻位置的一部分履带与地面接触并承受着装甲车辆的重量, 这致使牵引力变为阶段一中牵引力的一部分。基于此, 在第二阶段对于两栖装甲车辆水动力模型的构建, 如式 (2) 所示:

$$\left[\begin{aligned} \sum F_x &= (F_T - F_{BUG})\cos\theta + F_N\sin\theta + \\ &(F_G - Q)\sin(\alpha - \theta) - F_{WAV}\sin\beta = \delta \frac{F_G}{g} \frac{dv_x}{dt} \\ \sum F_y &= 0 \\ \sum F_z &= (F_G - Q)\cos(\alpha - \theta) - F_N\cos\theta + \\ &(F_T - F_{BUG})\sin\theta - F_{WAV}\cos\beta = \delta \frac{F_G}{g} \frac{dv_z}{dt} \end{aligned} \right] \quad (2)$$

其中: θ 为车辆绕 y 轴的转角。

1.2 两栖装甲车辆从陆入水动力学模型的可靠性验证

基于上述构建的两栖装甲车辆水动力学方程模型, 在 Matlab 软件当中对车辆体坐标轴上的加速度、速度及惯性坐标轴上的位置的变化波动情况, 如图 2 所示。

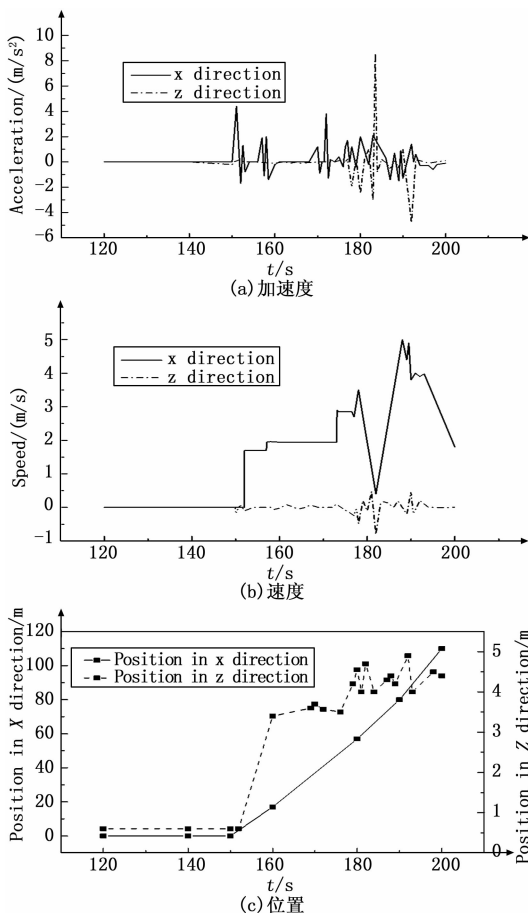


图 2 车辆水动力学模型的分析

从图 2 可以看出, 在两栖装甲车辆从坡道向水中行驶的过程当中, 起初不论是加速度、速度还是位置的变化均比较平缓, 当行驶至坡道以及从坡道入水的阶段, 因车辆所受浮力、牵引力及其地面支撑力等的变化增大, 因而导致装甲车辆相应的加速度、速度以及位置同样发生比较显著的变化, 当装甲车辆稳定入水之后, 各个参数的变化均居于平稳, 说明此次仿真分析的效果较好。

2 两栖装甲车辆航行稳定性的系统辨识及可靠性验证

2.1 两栖装甲车辆航行稳定性的系统辨识方法

针对水面上航行稳定性的研究主要涉及两方面: 其一在于水面航行的耐波性, 其二在于姿态稳定性^[3-4]。理论分析法、数值分析法以及模型试验法是研究航行稳定性常用的手段, 其中理论分析方法在垂荡以及纵摇问题的计算当中有效且适用, 然而理论分析法计算误差较大, 在横摇运动计算当中的效果不是很明显; 模型试验法的应用中计算结果准确度高, 然而对试验过程的误差控制以及仪器设备

的要求等方面有诸多限制，相比之下，数值分析法通过离散方法反复迭代实现求解，随着计算机硬件性能的快速提升，已成为一种很重要的研究手段。

利用数学建模或数值分析对问题产生机理以及解决进行研究，在自然科学领域以及实际工程应用等方面是经常使用的方法，通过对样本数据信息的采集完成数学建模已在很多领域实现应用。系统辨识是一种通过在预设模型类型当中依据优化目标，从中选择可以实现对被辨识系统动态特征模型进行最佳拟合的方法^[5-6]。其具体的实现过程为，首先选择同被辨识系统相关的数学模型；然后添加恰当选取的试验信号，并对相应的输入与输出数据进行记录，或直接采用相应的运行数据进行辨识；进而完成对于参数的辨识，选定能够更好拟合统计数据的模型；通过有效性检验的方法对所选的模型进行考核，判断最终需要辨识的相应对象能否代表该系统的相应特性；若相应的检验通过，那么对于系统的辨识则完成，否则需选择另类模型重复至有效为止。

遗传算法基于概率对基因配置进行优化，其具有潜在的并行性，快速随机的搜索能力，使用评价函数的搜索过程简单，能够对离散问题进行处理，且具有全局优化性，与此同时也具有收敛速度慢，易出现早熟现象以及对初始种群具有依赖性等缺点^[7-8]。关于遗传算法的实现，常规的系统辨识方法因过度借助最小二乘法，导致易于陷入局部最优解，通过以全局收敛算法代之以提供理想初值或直接获取参数优化解是一个可行的解决方法，遗传算法恰好满足这一要求。遗传算法基础下的系统辨识方法能够通过寻优对比的方式对于不能或者难以获得解析解的非线性数学模型进行求解，而线性数学模型同非线性数学模型的差别在于有无对高阶次项进行考虑，相比之下，非线性数学模型所具有的精度更高^[9-10]。引入系统辨识的思想来拟定两栖装甲车辆相关运动的数学模型的种类，对于试验数据进行寻求优化的计算，从而确定两栖装甲车辆运动数学模型当中的待辨识系数，最后得以实现完整两栖装甲车辆运动数学模型的确定，其中的寻优计算借助遗传算法来实现^[11-12]。

2.2 系统辨识方法的可靠性验证

对于线性方程计算值和本文辨识方法所得预报值以及试验测量值相对误差率的对比分析，以及某次辨识结果部分误差的分析，如图 3 所示。图 3 中，Relative error rate-1 为线性计算的相对误差率，Relative error rate-2 为预报值的相对误差率。

从图中可以看出，运用本文辨识方法所得的辨识值曲线与试验测量值更加贴近，本文辨识方法所得预报值曲线的相对误差率比线性方程所得的计算值要小。这说明本文采用辨识方法可靠，相应数学方程的选择是正确的。

基于此，将模型试验及系统辨识进行融合，本文通过将试验数据代入两栖装甲车辆的水运动模型方程当中，运用反复迭代对方程进行求解的方法，对装甲车辆的摇荡运

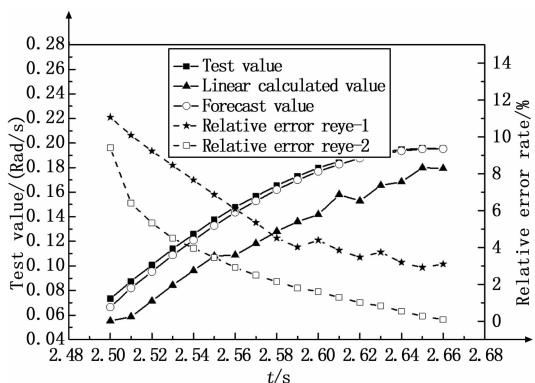


图 3 系统辨识方法的可靠性验证

动进行探索研究^[13-14]。

3 两栖装甲车辆由陆入水摇荡试验设计及结果分析

3.1 摇荡试验设计及模型建立

基于两栖装甲车辆侧体与主体之间间距较大的前提，导致横摇过程当中侧体产生浮力所对应的复原力矩也较大，同时车体相对车长方向的惯性力矩表现为更大。由此可见，侧体同主体之间的间距是对该两栖装甲车辆稳定性探索的关键方向^[15]。为此，对于车辆由陆入水过程中产生横摇的试验设计为：首先将车模平稳放置于水池岸上靠近水面的陆地位置，使车长方向与岸边垂直，进而打开计算机终端的 MTi 测量用软件；然后使车模行进至水中，并施加初始的横倾角 θ ，保持角度在 $2 \sim 7^\circ$ 之间，等车模稳定之后开始施加外力，使得车模向左或向右倾斜，在外力释放的同时采用软件进行数据采集，任由车模自由横摇，等到下次再行平稳之后则不再对数据进行采集。对于测量软件当中的六自由度相关数据进行读取，通过对于前后侧体到主体距离的改变，对于具体方案的布置，如表 1 所示。

表 1 各侧体的方案布置

车身侧面布置图	a	b	c	d	e	f
车身前部与车身的距离/m	1.5	0.9	0.4	0.9	0.4	0.4
车身后部与车身的距离/m	1.5	1.5	1.5	0.9	0.9	0.4

常规装甲车辆由陆入水产生横摇运动的自由衰减线性微分方程如式 (3) 所示。因横摇当中车辆的侧体到主体之间的间距比较大，产生的力矩比较大，仅线性阻尼并不能准确表征车辆所受的力，为此将非线性阻尼项引入其中，相应的横摇数学模型，如式 (4) 所示：

$$I_x \ddot{\theta} + 2N_x \dot{\theta} + k_x \theta = 0 \tag{3}$$

其中： $I_x \ddot{\theta}$ 为惯性力矩项， I_x 为总惯性矩， $2N_x \dot{\theta}$ 对应的是线性阻尼力矩项， N_x 是相应的阻尼力矩系数， $k_x \theta$ 为复原力矩项。

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{j+1} &= \left(1 - \frac{2N_x \Delta t}{I_x}\right) \dot{\theta}_j - \frac{\Delta t d}{I_x} |\dot{\theta}_j| \dot{\theta}_j - \\ &\frac{\Delta t e \dot{\theta}_j^3}{I_x} - \frac{\Delta t k_x \theta_j}{I_x} - \frac{\Delta t p \theta_j}{I_x} |\theta_j| \end{aligned} \tag{4}$$

其中： $\dot{\theta}_{j+1}$ 为 $j+1$ 时刻的实测值， θ 为横摇角， d, e, p 均

为待定系数。

本文中的辨识属于对多参数的辨识问题, 将横摇运动的输出量当成辨识的设计变量, 以式 (5) 表示, 将其相应的上下限作为约束的条件。对于所提方法的可靠性检验, 通过运用线性数学模型基础下的计算值以及非线性数学模型基础下的预报值和试验值之间所具有的误差进行比较来完成检验, 假如预报值和试验值之间相对应的误差值处于比较小的水平, 那就说明本文所提出的方法以及构建的相应数学模型可靠而且适用。基于二阶系统方程的对下一时刻值具有预报功能的公式表达, 如式 (6) 所示。任取得的其中一次试验数据依据横摇运动的辨识方法进行相应的辨识分析, 通过将结果代入上式, 进而对所得曲线与运用公式计算所得曲线以及同试验曲线的对比, 可对建立数学模型的可靠性进行验证。

$$X^T = \{N/I_x, d/I_x, e/I_x, k/I_x, p/I_x\} \quad (5)$$

其中: X^T 表示输出量, 公式中其他各项表示相应的输出项。

$$\dot{\theta}_{j+1} = \left(1 - \frac{c\Delta t}{m}\right)\dot{\theta}_j - \frac{k\Delta t}{m}\theta_j \quad (6)$$

其中: c 表示阻尼力矩, m 表示惯性力矩, k 表示恢复力矩。

3.2 摇荡试验结果分析

在针对侧体布置的方案 a 当中, 初始横摇角度随着时间的变化关系曲线, 如图 4 所示。

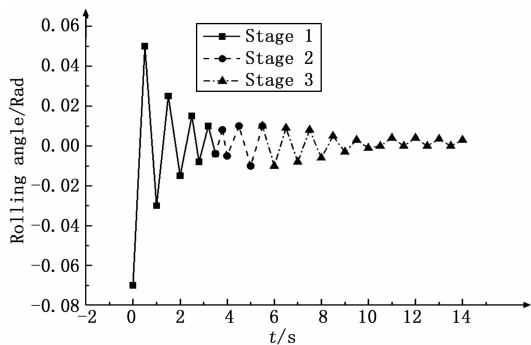


图 4 车辆初始横摇角度随时间的变化

从图 4 中可以看出, 该两栖装甲车辆的横摇过程共历经 3 个阶段, 其中第一阶段为从开始到 3.32 s, 这个阶段的横摇幅值呈现迅速衰减的变化; 第二阶段为从 3.32 s 到 5.25 s, 这个阶段的横摇幅值出现了反增变化; 第三阶段对应 5.25 s 以后, 这个阶段的横摇幅值逐渐衰减至 0。将本文提出的辨识方法应用其中, 引入线性阻尼成分, 对这 3 个阶段分别进行辨识, 相应的结果, 如图 5 所示。

图 5 中, $(N/I_x)_in$ 表示线性方程的计算值, η 为 (N/I_x) 和 $(N/I_x)_in$ 的比值, 表示线性阻尼。从图中可以看出, 第一阶段的 η 值是最大的, 而第二阶段的 η 值最小, 在第三阶段, η 值介于前述两者之间。对于第二阶段当中的横摇幅值反增可以将其认为是受迫振动和自由衰减运动相互交叠之后的结果, 因前述运动状态中阻力方向的相异, 故叠加后的阻尼反而比自由衰减情况下的要小。由此可见, 装甲车

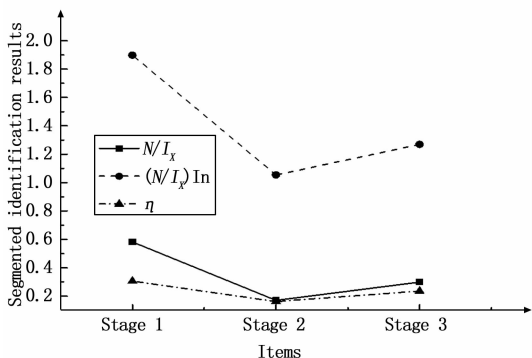
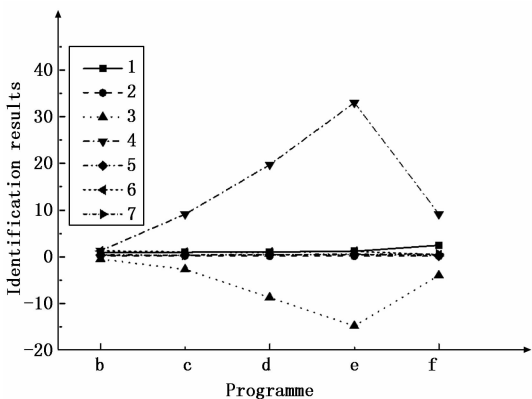


图 5 车辆侧体方案 a 的辨识结果

辆主侧体之间因摇荡引起的水波同车体的相互作用是横摇运动当中非线性阻尼产生的一个重要原因。

针对两栖装甲车辆侧体布置的方案 b 至方案 f 的辨识结果, 如图 6 所示。



1 为 k/I_x ; 2 为 d/I_x ; 3 为 e/I_x ; 4 为 p/I_x ; 5 为 N/I_x ;
6 为 $(N/I_x)_in$; 7 为 η

图 6 方案 b 至方案 f 的辨识结果

对图中数据变化进行分析, 综合侧体布置方案 a 中的横摇幅值变化, 发现除了方案 a 与方案 b 均出现比较明显的横摇幅值反增情况外, 其他方案下的这种变化均较小。同时与方案 c 相比之下, 方案 b 的周期更短, 表现出的衰减以及阻尼比均更小, 这可能与车辆侧体与主体之间间距的不同有关。针对侧体方案 a 与 b 当中横摇幅值反增显著的情形, 应该是由两个方案当中相应的横摇周期短加之横摇幅值衰减剧烈引起的, 当幅值经迅速衰减与零接近以后, 车辆主体与侧体间的波浪对车体的影响导致了横摇幅值反增现象的出现。相比之下, 其他几种侧体布置方案因侧体和主体之间间距的减小, 导致横摇运动所对应的周期变大以及横摇幅值所产生的衰减相应减慢, 兴波作用于车体时车体依然具有比较高度的横摇幅值, 因而幅值反增的情况并没有非常显著。另外方案 a、b 和其他相比, 同样横摇角度前提下的周期比较短而且角速度大, 较大的间距促使线速度也较大, 故兴波的幅值比之其他方案要大, 有可能这亦为引起幅值反增的一个因素。