

摇摆环境轮式牵引车辆行驶偏移特性仿真分析*

温琦 陈志 王志 聂莹 陈文科

(中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

【摘要】 为研究轮式牵引车辆在舰船摇摆环境下的侧偏及侧滑情况,首先通过倾翻试验台对一辆轮式牵引车的侧向性能进行了测试,同时建立了该牵引车的多体动力学模型,并通过 Virtual. Lab Motion 仿真软件分析了舰船的横摇、纵摇和垂荡等摇摆运动对牵引车行驶偏移特性的影响规律,最后对驾驶员人为因素的影响及美国现役 A/S32A-32 型舰载牵引车的偏移特性等进行了分析对比,验证了该型牵引车设计的合理性。

关键词: 轮式牵引车 舰船摇摆 多体动力学模型 行驶偏移特性 仿真分析

中图分类号: V351.34 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)06-0028-05

Driving Deviation Properties Simulation and Analysis
of Wheeled Tractors under Ship Sway

Wen Qi Chen Zhi Wang Zhi Nie Ying Chen Wenke

(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract

In order to study the cornering and sideslip properties of wheeled tractors under ship sway, a ship-based wheeled tractor's lateral characteristics were tested on a large tilt table. The effects of different ship sways including roll, pitch and heave on the wheeled tractors' driving deviation properties were analyzed based on the simulation software Virtual. Lab Motion. Finally the effects of the pilot's human factors on the wheeled tractors' driving deviation properties and deviation characteristics of American active ship-based tractor A/S32A-32 were analyzed.

Key words Wheeled tractors, Ship sway, Multibody simulation model, Driving deviation properties, Simulation analysis

引言

在常规牵引车辆及工程机械领域,牵引特性往往是设计人员关心的首要问题,而对车辆的行驶偏移特性则研究较少。但在舰船摇摆环境下,侧偏或侧滑可能会影响到正常作业,本文通过一辆牵引力 6.0 kN 的轮式牵引车研究摇摆运动对牵引车行驶偏移特性的影响规律。由于无法在实际使用环境或大型摇摆试验平台上进行试验,本文通过牵引车在倾翻试验台上的侧向性能试验,结合基于 Virtual. Lab Motion 仿真软件的多体动力学建模及仿真,分析各种舰船摇摆运动和驾驶员的人为因素等

对牵引车行驶偏移特性的影响规律。

1 舰载牵引车侧向性能测试

1.1 轮胎侧偏特性

轮胎是连接车辆与路面的唯一部件,车辆的各种运动包括加速、制动及转向等,都是通过滚动的轮胎作用于地面完成的,故研究轮式牵引车辆的行驶偏移特性主要是研究轮胎的侧偏特性。

地面作用于轮胎接地印迹处的力可分解为纵向力、侧向力、正向力和侧倾力矩、滚动阻矩、回正力矩。根据各分力的作用方向,轮胎的动态特性主要分为纵滑特性、侧偏特性和垂直振动特性。

收稿日期: 2010-07-18 修回日期: 2010-09-06

* 国防科研项目

作者简介: 温琦,博士生,主要从事特种车辆研究, E-mail: wenjianqi@126.com

对轮胎的侧偏特性主要是研究轮胎的角刚度（侧偏刚度）、侧向力、回正力矩以及它们与正向力、摩擦因数等的关系，是对轮胎侧偏现象的定量描述。轮胎的侧偏现象是指轮胎速度方向并非永远位于旋转平面内，侧向力会使其与旋转平面形成一定角度，从而产生侧偏角^[1~2]。轮胎的侧偏特性是决定汽车操纵稳定性的关键因素，在汽车等高速车辆领域研究应用较多，本文通过借鉴汽车领域轮胎侧向性能方面的研究成果，对摇摆环境轮式牵引车辆的行驶偏移特性进行分析。

1.2 性能测试

1.2.1 侧滑试验及侧向变形测量

侧滑与侧偏由侧向力产生，与绕牵引车纵轴的倾斜与摇摆相关，故在侧滑试验中将牵引车纵向放置在倾翻试验台上，由吊装带和支撑座保护，然后逐渐提高试验台的侧倾角，观察牵引车的侧滑情况。

被测对象为三轮结构牵引车，后轮驱动，前轮转向，试验过程中后轮为驻车制动状态，前轮分别放置在正中和左转 55°（极限转向角）两个位置，测得的临界侧滑角分别为 30.3°和 17.9°，达到临界侧滑角后，可观察到前轮在钢板上缓慢侧向滑移，前轮处吊装带逐渐绷紧。假设轮胎的各向摩擦因数相等，根据试验结果可以计算出轮胎与试验台的摩擦因数为 0.58。另外从测试结果可知，在小角度摇摆情况下，轮胎会发生侧向变形从而产生侧偏，但不会发生侧滑。

采用与侧滑试验相同的方法，在牵引车车身左侧前、后轮处分别安装百分表，测量不同侧倾角下前、后轮胎的侧向变形量，通过侧倾角可计算出侧向力，从而得到侧向变形量与侧向力的关系曲线如图 1 所示。观察图 1 可知，前后轮随侧向力的增大，角刚度减小，而且后轮的这种非线性趋势更强。

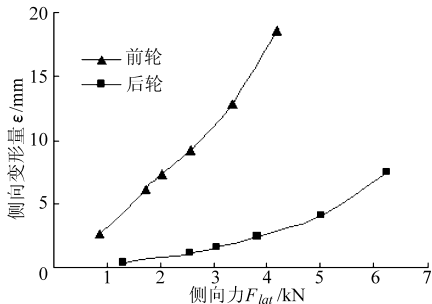


图 1 轮胎侧向变形量与侧向力关系曲线
Fig. 1 Lateral deflection vs lateral force

1.2.2 12°侧倾角下的行驶偏移试验

倾翻试验台的侧倾角固定在 12°，牵引车仍纵向放置，然后驾驶牵引车从初始位置向前行驶一段距离，在行驶过程中前轮始终处于正中位置，不允许

转向，车速约为 0.25 m/s，最后测量最终位置的侧偏状况，结果如图 2 所示。从测试结果可知行驶偏移是很明显的，牵引车前进距离约 2 m，前轮侧向偏移达 300 mm。

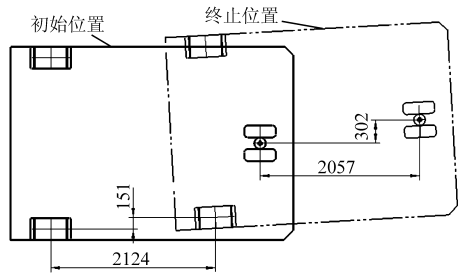


图 2 12°侧倾角下的行驶偏移试验结果
Fig. 2 Test of driving deviation on the 12° slope

2 多体动力学建模

2.1 仿真软件及建模过程

多体动力学建模采用比利时 LMS 公司的 Virtual. Lab 仿真软件平台，版本为 8B - SL2，该软件是一套用于模拟和优化机械系统中结构、多体动力学、声学、振动与噪声、耐久性及相关性等多方面属性的集成软件包。Virtual. Lab Motion 为多体动力学仿真分析模块，它可以通过对机械系统的仿真建模预测系统内位移、速度、加速度以及力等设计中所关心的物理量。

多体动力学建模及仿真分析的主要步骤为几何建模、运动学建模、动力学建模、求解及结果分析，其中的动力学建模（主要是轮胎力的建模）是整个建模过程的关键环节。本文省略了其他部分的建模过程，仅介绍模型中与行驶偏移特性直接相关的轮胎侧向力的数学模型及主要轮胎模型参数的确定。

2.2 轮胎侧向力数学模型

轮胎是典型的非线性部件，行为非常复杂，因此建立能够精确描述轮胎力学特性的数学模型成为很多领域的关键环节^[3~4]。轮胎模型主要包括轮胎正向力、纵向力和侧向力的数学模型，侧向力是正向力和侧偏角的函数，决定三次多项式边界条件为

$$\left\{ \begin{aligned} &\alpha = 0, F_{lat} = 0 \\ &\alpha = 0, \frac{dF_{lat}}{d\alpha} = C_{\alpha} \\ &\alpha = \alpha_n, F_{lat} = F_{lat, max} \\ &\alpha = \alpha_n, \frac{dF_{lat}}{d\alpha} = 0 \end{aligned} \right.$$

式中 α ——轮胎侧偏角 $F_{lat, max}$ ——最大侧向力
 α_n ——饱和侧偏角 C_{α} ——角刚度

侧偏角定义为车轮速度方向与轮胎旋转平面方向的夹角。侧偏角总是锐角，其符号由轮胎中心侧

向速度的符号决定,数学表达式为

$$\begin{cases} S = \frac{v_{lat}}{v_{eps} + |v_{lat}|} \\ \alpha = \arctan\left(\left|\frac{v_{lat}}{\max(v, v_{eps})}\right|\right) S \end{cases} \quad (1)$$

式中 v_{lat} ——轮胎中心侧向速度
 v ——车辆前进速度
 v_{eps} ——经验常数,约等于 0.025 m/s
 v_{eps} 为重力加速度除以 400,引入该值和比例因子 S 是为了防止车辆接近停止时式中分母为零,同时为了改善在较小侧向速度下方程的刚性。

饱和侧偏角 α_n 经验公式为

$$\alpha_n = 2.5 \frac{F_{norm}}{C_\alpha} \quad (2)$$

式中 F_{norm} ——正向力
 $F_{lat,max}$ 为名义摩擦因数乘以正向力,即

$$F_{lat,max} = \mu F_{norm} \quad (3)$$

2.3 轮胎模型参数的确定

滚动轮胎的数学模型中涉及到 5 个重要的性能参数,这些参数的准确性直接影响着模型的准确程度。由于舰载牵引车高度的限制及承载的需要,其前后轮均选用了实心轮胎,从力学特性角度讲,实心轮胎的刚度比充气轮胎非线性程度更强。为提高仿真精度,对牵引车轮胎的垂向刚度和角刚度都进行了实际测试^[5]。表 1 中列出了这些参数的典型取值范围及牵引车多体动力学模型中的具体设置值。

表 1 滚动轮胎参数设置

Tab.1 Typical values and settings for tires

参 数	取值范围	参数设置
垂向刚度	1 500 ~ 3 000 (汽车)	根据实测曲线设置
/N·cm ⁻¹	1 500 ~ 10 000 (卡车)	
垂向阻尼系数	10 ~ 35 (汽车)	150 (估算值)
/N·s·cm ⁻¹	17 ~ 150 (卡车)	
(10% 临界阻尼)		
角刚度	350 ~ 900 (汽车)	670 (前轮实测均值)
/N·(°) ⁻¹	900 ~ 3 500 (卡车)	3 800 (后轮实测均值)
滚动阻力因数	0.005 ~ 0.04	0.02 (经验值)
摩擦因数	0.8 ~ 1.0 (干路面)	0.8 (技术指标)
	0.5 ~ 0.8 (湿路面)	

3 仿真分析

3.1 舰船摇摆环境分析

在海面上停泊或航行的舰船,由于波浪的扰动,几乎总是会出现摇摆运动,它是波浪的强迫摇摆和舰船本身固有摇摆相结合的复合运动,摇摆的强度取决于波面角的陡度、波浪的周期、舰船本身的摇摆周期以及舰船尺度和波长的比例关系等。舰船的摇

摆运动可用刚体在空间 6 个自由度的运动来描述,3 个沿坐标轴的直线振荡——垂荡、横荡和纵荡,3 个绕坐标轴的转动振荡——横摇、纵摇和艏摇。在这 6 种运动中,只有横摇、纵摇和垂荡具有恢复力(矩),称得上完全的振荡运动,且危害也比较大,是本文的主要研究对象^[6]。

风是形成海浪的最常见的原因,大气中气流的运动是极不规则的,由此而产生的波浪自然也是极不规则的。但研究表明不规则的海浪可由大量均匀微小的规则波迭加而成,同时舰船在不规则波中的运动也可由舰船对大量均匀微小的规则波的响应的迭加来描述,因此,理想化的简单规则波是描述和分析不规则海浪及舰船运动的基础^[6]。本文即通过理想化的正弦波动来分析各种舰船摇摆运动对牵引车行驶偏移特性的影响。

3.2 横摇行驶偏移特性仿真分析

3.2.1 车速对行驶偏移特性的影响

牵引车沿舰船 x 轴即纵轴方向行驶,此时舰船横摇对牵引车行驶偏移影响最为显著。根据牵引车技术指标设定横摇幅值为 $\pm 6.25^\circ$,周期 10 s,摇摆中心在甲板表面及牵引车宽度方向中心面上,前轮转向固定,车速分别为 0.25、0.50 及 1.00 m/s 时牵引车重心相对甲板的行驶轨迹如图 3 所示。

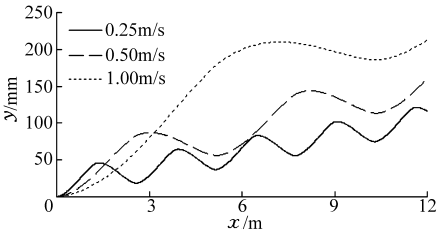


图 3 不同车速牵引车重心行驶轨迹
Fig.3 Tractor's trajectory with different speeds

从图 3 可知,车速越小相对侧偏速度越大,但车速越大同周期下侧向位移越大。另外,由于牵引车前轮的角刚度小于后轮,所以前后轮不同程度的侧偏会引起牵引车行驶方向的改变,且车速越大行驶方向改变越快,行驶偏移也就越严重。

3.2.2 摇摆中心位置对行驶偏移特性的影响

以上述车速 0.50 m/s 工况为基准(工况 1),把摇摆中心水平左移 10 m(工况 2),然后再垂直下移 10 m(工况 3),3 种工况下牵引车重心相对甲板的行驶轨迹如图 4 所示。

结合图 4 的仿真结果分析可知,摇摆中心水平移动会增加正向力波动范围,但对侧向力即行驶偏移影响不大,摇摆中心垂直移动会增加轮胎所受水平惯性力,从而影响牵引车的侧向力及行驶偏移行为。

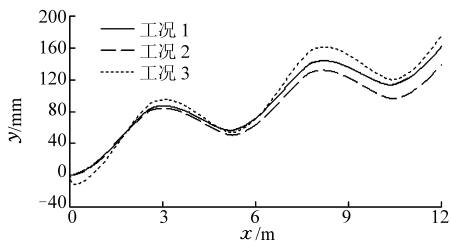


图4 不同摇心位置牵引车重心行驶轨迹

Fig. 4 Tractor's trajectory with different sway centers

3.2.3 不同横摇幅值下行驶偏移特性的比较

仍以上述工况 1 为基准,分别把横摇幅值减小到 4° 和 2° ,仿真结果如图 5 所示。侧向力主要由侧倾产生的重力分力组成,所以横摇幅值对侧向力及行驶偏移的影响也最为明显。

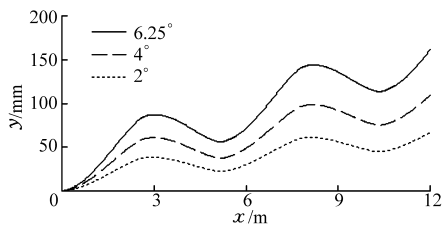


图5 不同横摇幅值牵引车重心行驶轨迹

Fig. 5 Tractor's trajectory with different amplitudes

3.2.4 不同周期下行驶偏移特性的比较

仍以上述工况 1 为基准,分别把横摇周期增加到 20 s 和 30 s,仿真结果如图 6 所示。与图 3 中车速对行驶偏移的影响相似,周期越长,单周期内侧向位移及行驶方向的改变越大,行驶偏移也更严重。

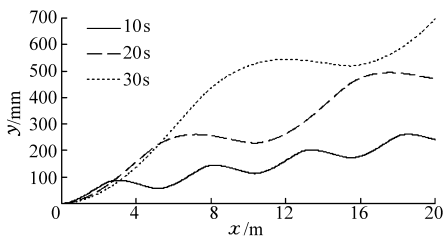


图6 不同横摇周期牵引车重心行驶轨迹

Fig. 6 Tractor's trajectory with different cycles

3.3 复合摇摆运动行驶偏移特性仿真分析

仍以上述工况 1 为基准,然后在横摇运动基础上复合幅值 2° 、周期 15 s 的纵摇运动(工况 2),工况 3 则在工况 1 基础上复合幅值 3 m、周期 15 s 的垂荡运动,3 种工况下仿真结果如图 7 所示。纵摇主要影响轮胎的纵向力,故对行驶偏移影响很小,垂荡会改变轮胎的正向力波动范围,从而改变侧向力与侧偏角的关系曲线,它会加快某些周期内的侧向速度及行驶方向改变,从而加快牵引车行驶偏移。

3.4 考虑人为因素的影响

通过上述仿真分析可知,牵引车在横摇情况下产生行驶偏移的同时行驶方向也会发生改变,从而使行驶偏移越来越严重。如果考虑驾驶员的人为因

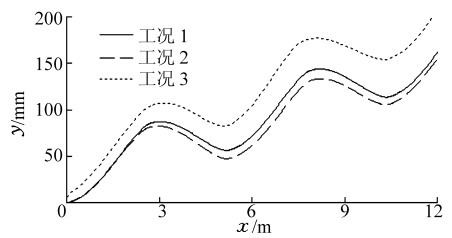


图7 复合摇摆运动牵引车重心行驶轨迹

Fig. 7 Tractor's trajectory with mixed sway motions

素,即设定在驾驶员的操作下牵引车前轮会始终朝向正前方(舰船纵轴方向),然后重复 3.2.1 节中 3 种工况下的仿真试验,结果如图 8 所示。

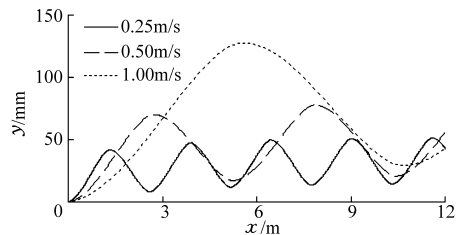


图8 考虑人为因素的牵引车重心行驶轨迹

Fig. 8 Tractor's trajectory considering human factors

将图 8 与图 3 进行比较,可知驾驶员的转向操作可以明显改善牵引车的行驶偏移现象。

3.5 对比分析

美国现役 A/S32A-32 型舰载牵引车的功能与本文的研究对象相近,该牵引车同样为三轮结构,但其前轮为自由脚轮,通过分别控制两个后驱动轮的转速来控制行驶方向^[7-9]。这种转向方式的优点是转向灵活,可以实现零半径转向。为与其行驶偏移特性进行比较,仍以工况 1 为基准,对两种转向方式分别进行仿真试验,仿真结果对比如图 9 所示。可知前轮为自由轮的转向方式行驶偏移更为严重。

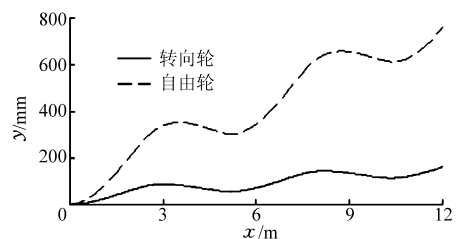


图9 与美国牵引车重心行驶轨迹的对比

Fig. 9 Comparison with American tractor

4 结束语

舰船的摇摆特别是横摇会产生侧向力从而使牵引车产生行驶偏移,从仿真结果来看,牵引车在一定范围的摇摆环境下产生的行驶偏移及侧向速度并不大,不会影响牵引车的作业安全,而且驾驶员的操作会明显改善牵引车的侧偏行为。选择侧偏特性更为接近的前后轮胎,可以减小侧偏同时减轻驾驶员控制转向的工作强度。

参 考 文 献

1 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春:吉林科学技术出版社,1991.

2 袁忠诚. 轮胎稳态模型研究[D]. 长春:吉林大学,2006.
Yuan Zhongcheng. Study of steady state tire model[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)

3 刘大维,刘伟,陈焕明,等. 基于多体模型的重型车辆对路面动载特性[J]. 农业机械学报,2009,40(11):7~12.
Liu Dawei, Liu Wei, Chen Huanming, et al. Dynamic load characteristics of heavy vehicle based on multi-body dynamic model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(11):7~12. (in Chinese)

4 Ossama Mokhiamar, Masato Abe. Simultaneous optimal distribution of lateral and longitudinal tire forces for the model following control[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2004,126(4):753~763.

5 王健,余贵珍,张为,等. 基于滑模观测和模糊推理的车辆侧翻实时预警技术[J]. 农业机械学报,2010,41(6):1~6.
Wang Jian, Yu Guizhen, Zhang Wei, et al. Real-time rollover prediction for vehicle based on principles of sliding mode and fuzzy inference system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6):1~6. (in Chinese)

6 彭英声. 舰船耐波性基础[M]. 北京:国防工业出版社,1989:1~29.

7 Nonresident training course-Airman, Navedtra 14014 [G]. Naval Education and Training Professional Development and Technology Center, 2003.

8 Nonresident training course-Aviation Boatswain's Mate H, Navedtra 14311 [G]. Naval Education and Training Professional Development and Technology Center, 2001.

9 MIL-D-81504. Dolly, Aircraft Spotting, Mod SD-1C[S]. 1989.