

张舟钧禹,戴巨川,凌启辉,等.油气悬挂式履带车辆联合仿真建模与响应分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(2):64-72. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.02.009

ZHANG Z J Y, DAI J C, LING Q H, et al. Joint Simulation Modeling and Response Analysis of Hydro-Pneumatic Suspension Tracked Vehicle[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(2): 64-72. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.02.009

油气悬挂式履带车辆联合仿真建模与 响应分析

张舟钧禹,戴巨川*,凌启辉,覃凌云,张帆

(湖南科技大学 机电工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:为分析油气悬挂式履带车辆行驶过程中的动态特征,基于 RecurDyn 和 MATLAB/Simulink 搭建悬挂行走系统联合仿真模型.采用 RecurDyn 完成悬挂行走系统几何模型的构建及装配,在 Simulink 中实现油气悬挂弹性力和阻尼力的求解,通过数据交互的方式实现二者的联合求解.开展随机路面激励下的响应特性分析,分别观测负重轮加速度、油气悬挂受力、车体质心位移和加速度等响应曲线.结果表明:1号和6号负重轮上的加速度较大,且1号油气悬挂上的受力要明显大于其他油气悬挂;车体会从启动时的低频振动过渡到运行状态下的高频振动.研究结果可为悬挂行走系统的优化设计提供重要的参考依据.

关键词:履带车辆;油气悬挂;联合仿真;响应特性分析

中图分类号:TJ811 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2023)02-0064-09

Joint Simulation Modeling and Response Analysis of Hydro-Pneumatic Suspension Tracked Vehicle

ZHANG Zhoujunyu, DAI Juchuan, LING Qihui, QIN Lingyun, ZHANG Fan

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Based on RecurDyn and MATLAB/Simulink, a joint simulation model of suspension walking system is established to analyze the dynamic characteristics of hydro-pneumatic suspension tracked vehicle. In RecurDyn, the geometric model of suspension walking system is constructed and assembled. The elastic force and damping force of hydro-pneumatic suspension are solved in Simulink. The joint solution of the two is realized through data interaction. Then, the response characteristics under random road excitation are analyzed, and the response curves, such as acceleration of wheel, force of hydro-pneumatic suspension, displacement of tracked body mass center and its acceleration are observed respectively. The results show that the accelerations on the No. 1 and No. 6 wheels are larger, and the force on the No. 1 hydro-pneumatic suspension is larger than that on other hydro-pneumatic suspensions. The tracked body will start in a low frequency vibration, and then transition to high frequency vibration of running state. The research results can provide reference for the optimization design of suspension walking system.

Keywords: tracked vehicle; hydro-pneumatic suspension; joint simulation; response characteristic analysis

履带车辆是军事和民用工程领域广泛使用、不可或缺的一类车辆。例如,在军事领域,履带车辆集火力、防护和机动为一体,是陆军的中坚突击力量。在空地一体化立体作战环境下,履带车辆仍然担负着非常重要的任务。与传统机械悬挂式履带装甲车辆相比,新型油气悬挂式履带车辆具有更强的承载能力和更高的车身调节能力,其悬挂装置可以吸收、储存更多的振动冲击能量和提供更好的舒适性。

长期以来,为了更好地获得履带车辆悬挂减振系统的性能特性,很多学者对此进行了大量的研究工作。蔡芷兰^[1]利用 LMS 仿真软件建立履带车辆的虚拟样机模型,对履带车辆的行动部分进行动力学仿真,分析履带张紧力及履带振动的影响因素;黄雪涛等^[2]利用 ADAMS/ATV 软件,研究地面-履带-负重轮系统的耦合作用关系,分析履带预张紧力、地面形貌和车辆行驶速度等因素对车辆动态特性的影响;马星国等^[3]基于多体动力学软件 RecurDyn 建立单轮动力学模型,研究油气悬挂与液压缓冲器对车辆行驶过程中的缓冲、吸振性能的影响;徐国英等^[4]基于 RecurDyn 建立履带车辆模型,研究路面不平度对车体的影响,并通过试验验证模型的可靠性;蔡文斌等^[5]对履带车辆托带轮的受力进行分析,并对其进行了优化;卞美卉等^[6]建立履带车辆模型,分析履带预张紧力对车辆平顺性的影响;代健健等^[7]建立复合悬挂弹性特性数学模型,分析复合悬挂设计中的静载荷分配和温升带来的车姿变化对特性的影响;何健等^[8]建立履带车辆的动力学模型,提出一种改进的土壤承压模型,并在此基础上进行履带车辆行驶振动特性的仿真研究;YAO 等^[9]在考虑土壤时变特性的基础上,提出一种履带-土壤力学特性参数实时估计方法,分析履带在时变特性地面上的通过性;孟磊等^[10]研究履带对车体振动的影响;韩寿松等^[11]建立 1/2 车辆的悬架系统物理模型;WANG 等^[12]利用多体系统传递矩阵法对履带车辆进行数学建模,并对履带张紧力进行分析。

上述工作从不同角度对履带车辆进行了研究,但由于油气悬挂式履带车辆的复杂性,很多性能如随机路面激励下的悬挂行走系统响应特性等有待进一步深入研究。本文基于多体动力学软件 RecurDyn 和仿真工具 Simulink,构建油气悬挂式履带车辆联合仿真模型,分析其在随机路面激励下的响应特性,获得对油气悬挂式履带车辆悬挂行走系统更深刻的理解和认识。

1 履带车辆行走系统 RecurDyn 模型

1.1 行走系统组成

图 1 为在 RecurDyn 软件中建立的履带车辆行走系统组成示意图。系统下部为行走部分(主要包括履带推进装置和悬挂装置),上部为车体部分。履带推进装置是由主动轮、负重轮、托带轮、履带、诱导轮及张紧机构等部件组成。其中,主动轮的作用是将动力装置传递来的转矩传递给履带,驱动履带车辆向前运动,即将发动机输出的扭矩转换为履带车辆在地面行驶时所需要的牵引力,使车辆具备在各种极端路面上行驶以及越过天然和人工障碍的能力。车体主要用于安装车辆

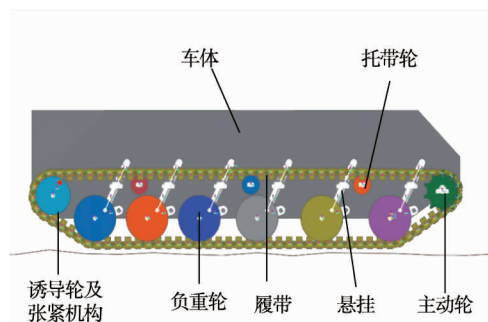


图 1 行走系统组成

其他行动部件以及设备,承受车辆行驶时来自地面的冲击载荷和车辆自身设备的载荷。在车体和行走部分之间有油气悬挂减振系统,以可压缩的气体作为气体弹簧和减振元件。

1.2 行走系统模型

1.2.1 几何模型的建立

履带车辆的驱动方式设置为前驱式,车辆总重约为 21 t,履带中心距为 2.7 m,车辆每侧包含 1 个主动轮、1 个诱导轮、6 个负重轮和 3 个托带轮。主动轮与履带板采用 RecurDyn 软件专用模块进行建模,即在 Track/HM 子系统中采用 Sporocket 模块对主动轮进行建模。设置履带板为双销式履带板,利用 Track/HM 子系统 Double Link 模块对履带板进行建模。对于行走系统中的其他零部件,首先在 Solidworks 软件中建立相应的几何模型,再将其导入 RecurDyn 中,利用 RecurDyn 中专业的履带建模工具包 Track/HM 完成行走系统的装配。在建立车身模型时,为了提高仿真的速度,在保证车身质量、转动惯量及质心位置等参数

不变的前提下对车身的几何外形进行适当的简化.各部件的几何模型如图2所示.

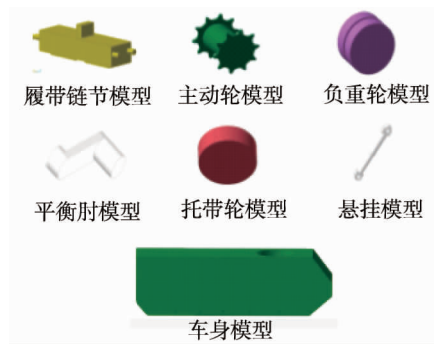


图2 部件几何模型

1.2.2 运动副的添加

为了获得各个部件之间的运动关系,需要对部件添加运动副.换句话说,通过给履带车辆添加运动副,可使其成为一个各部件间能够协调运动的整体.履带车辆各部件间的约束关系如表1所示.

表1 履带车辆各部件间的约束关系

部件名称	约束关系	数量	部件名称	约束关系	数量
主动轮-车身	旋转副	2	负重轮-平衡肘	旋转副	12
诱导轮-曲柄	旋转副	2	托带轮-车身	旋转副	6
曲柄-车身	旋转副	2	油气悬挂活塞杆-油气悬挂缸筒	圆柱副	12
平衡肘-车身	旋转副	12	油气悬挂缸筒-车身	旋转副	12

2 油气悬挂 Simulink 模型构建

2.1 油气悬挂原理

图3为一种简化的油气悬挂原理示意图.油气悬挂主要由浮动活塞、活塞和缸筒等组成.整个悬挂内部形成4个腔,即蓄能器气压腔2、蓄能器液压腔1、悬挂液压腔3和悬挂液压腔8.浮动活塞上设有阻尼孔5,使悬挂液压腔3与悬挂液压腔8相通.

油气悬挂利用液压油传递力,用高压氮气作为弹性介质.蓄能器中含有一个体积可变的高压气体密闭气室,其余空间则充满液体,并通过阻尼孔使悬挂液压腔3与悬挂液压腔8相连.当悬挂行程改变时,油液通过单向阀7进出蓄能器,改变气室占有体积,气体压强随之变化,起到储存和释放能量的作用,使油气悬挂具有刚度和阻尼特性^[13].

2.2 油气悬挂刚度特性 Simulink 模型

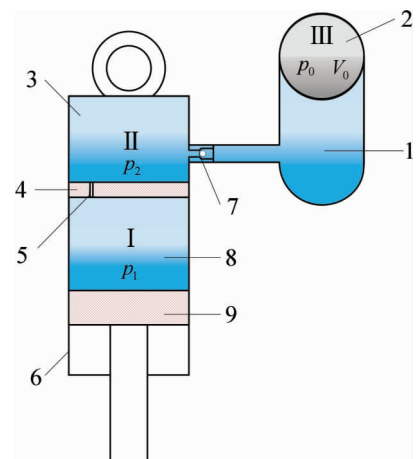
油气悬挂的刚度特性体现在油气悬挂的弹性力上.假设悬挂主活塞面积为 A ,初始状态蓄能器的体积为 V_0 ,蓄能器初始气压为 p_0 ,气柱高度为 h_0 ($h_0 = V_0/A$).若不计蓄能器至液压缸之间的压力损失,当活塞受到活塞杆传递的力并对油液进行挤压,蓄能器内的压力升高,体积缩小,此时气压为 p ,体积为 V ,气体受压缩时压力和容积间存在如下关系^[13]:

$$p_0 V_0^m = p V^m = c. \quad (1)$$

式中: m 为气体的多变指数,其大小取决于热交换和工作的外界条件; c 为常数.

当活塞从初始位置移动 x 后, $\Delta V = xA$,又由于 $V_0 = h_0 A$,结合式(1)可以得到:

$$p = p_0 \left(1 - \frac{x}{h_0}\right)^{-m}. \quad (2)$$



1-蓄能器液压腔;2-蓄能器气压腔;3-悬挂液压腔;4-浮动活塞;5-阻尼孔;6-缸筒;7-单向阀;8-悬挂液压腔;9-活塞

图3 油气悬挂原理

则油气悬挂输出的弹性力可以表示为^[13]

$$F_s = (p - p_a)A = \left[p_0 \left(1 - \frac{x}{h_0} \right)^{-m} - p_a \right] A. \quad (3)$$

式中: p_a 为标准大气压力.

依据式(3),在 Simulink 中建立的仿真模型如图 4 所示,油气悬挂仿真参数如表 2 所示,得到的弹性力仿真曲线如图 5 所示.由图 5 可知:悬挂的弹性力与悬挂行程之间呈非线性关系,在悬挂 0~0.1 m 这一段行程,悬挂的弹性力的变化较缓慢,在 0.1~0.2 m 这一段行程,悬挂的弹性力由 0.67×10^5 N 变化到 1.5×10^5 N,呈急剧增长的趋势.

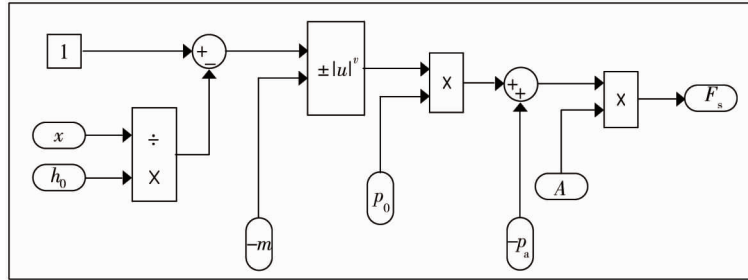


图 4 油气悬挂弹性力仿真模型

表 2 油气悬挂仿真参数^[14]

名称	数值	单位
油液密度	850	kg/m ³
流量系数	0.6	
气体多变指数	1.25	
蓄能器初始充气压力	7e-6	Pa
活塞杆行程	0.25	m
常通节流孔等效面积	3e-5	m ²
单向节流阀等效面积	3e-5	m ²
活塞面积	0.003 8	m ²
标准大气压力	101.325	kPa

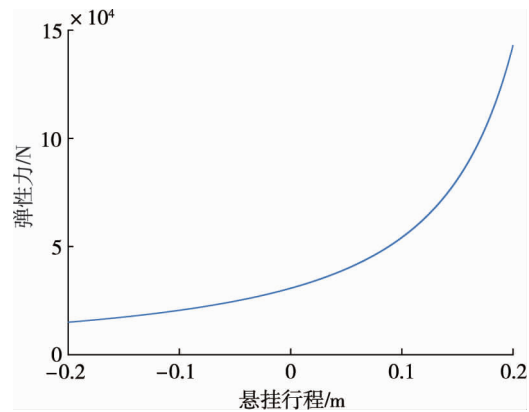


图 5 油气悬挂弹性力曲线

2.3 油气悬挂阻尼特性 Simulink 模型

油气悬挂的阻尼特性可由其阻尼力体现,主要由两部分组成:(1)油液通过节流孔和单向阀产生的阻尼力;(2)油缸密封圈产生的摩擦力.相比较而言,密封圈上的摩擦力要小得多.在忽略油缸密封圈摩擦力的条件下,油气悬挂阻尼力的表达式可写为^[15]

$$F_c = -\frac{\rho}{2} \frac{A_h^3 \dot{x}^2}{\{C_d A_{01} + C_d A_{02} [0.5 - 0.5 \text{sign}(\dot{x})]\}^2} \text{sign}(\dot{x}). \quad (4)$$

式中: ρ 为油液密度; A_h 为浮动活塞面积; \dot{x} 为悬挂运动速度; C_d 为流量系数(一般取 0.6~0.8); A_{01} 为节流孔的有效过流面积; A_{02} 为单向阀的有效过流面积; $\text{sign}(\dot{x})$ 为符号函数,

依据上述分析,在 Simulink 中建立的油气悬挂阻尼力仿真模型如图 6 所示,同时得到的仿真阻尼力曲线如图 7 所示.由图 7 可知:悬挂的阻尼力与悬挂活塞杆速度之间呈非线性关系.活塞杆速度为正意味着处于拉伸行程,反之为压缩行程.很明显,压缩行程中的阻尼力比拉伸行程中的阻尼力要小.在压缩行程中,阻尼力较小,有利于悬挂充分发挥其弹性力,减小振动;在拉伸行程中,阻尼力较大,有利于悬挂快速地响应地面障碍,衰减来自地面的冲击.

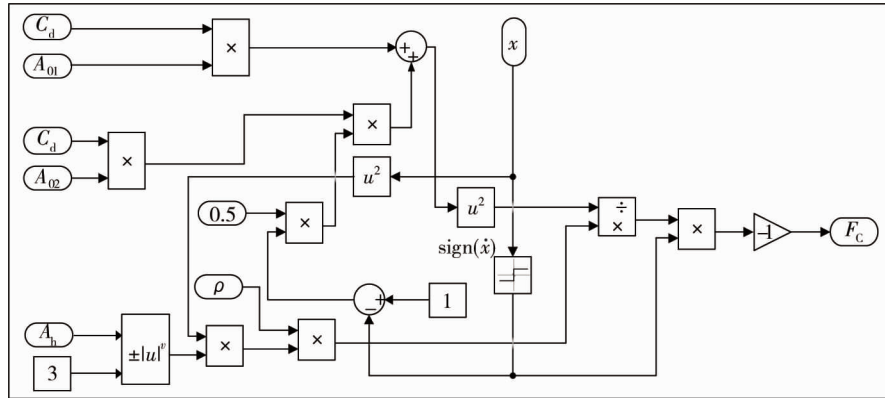


图6 油气悬挂阻尼力仿真模型

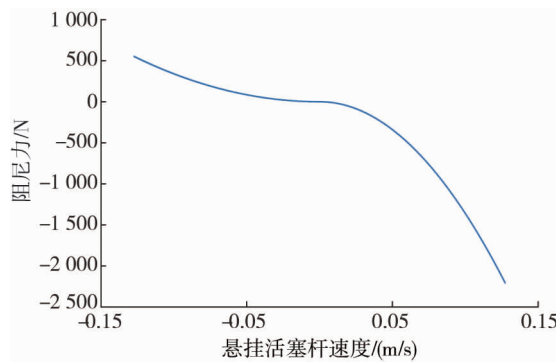


图7 油气悬挂阻尼力曲线

3 联合仿真模型构建

为了得到油气悬挂式履带车辆行驶过程中的动态响应特性,通过 RecurDyn 和 MATLAB/Simulink 之间的数据交换技术,建立联合仿真系统模型.在 RecurDyn 中完成悬挂行走系统几何模型导入后,可以实现多体动力学求解.求解中需要用到的油气悬挂弹性力和阻尼力由 Simulink 提供给 RecurDyn,同时,RecurDyn 计算并输出油气悬挂的速度和位移反馈给 Simulink.通过 RecurDyn 和 Simulink 之间的数据交互,实现联合仿真求解,联合仿真模型的输入与输出如图 8 所示.

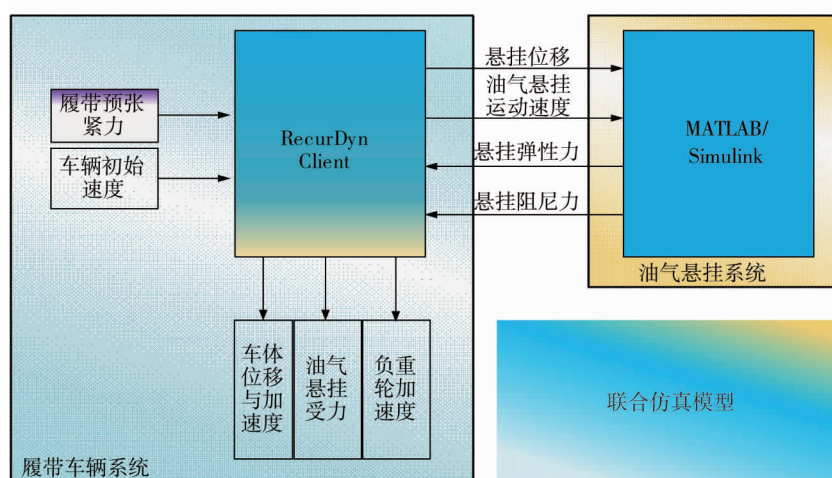


图8 联合仿真模型输入与输出

在具体仿真过程中,履带车辆模型有 2 个输入变量,分别为高速履带车辆的初速度和履带的预张紧力,这 2 个变量在 RecurDyn 中赋初值,用以启动履带车辆的运动.另外,履带车辆共有 12 个 PIN 接口,用于接收 Simulink 输出的 12 个油气悬挂弹性力和阻尼力(两者以相加形式合并),RecurDyn 软件 POUT 接

口同步输出 24 个变量(履带车辆悬挂速度和位移).RecurDyn 软件中各接口模型如图 9 所示.

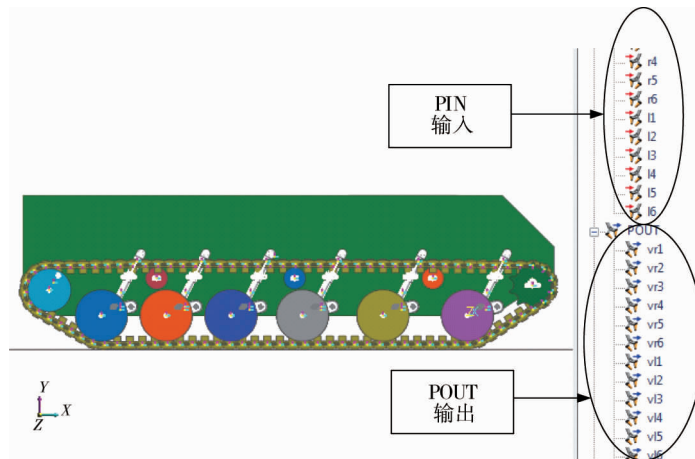


图 9 联合仿真接口

联合仿真时,另一个关键问题是需要设置合理的路面模型,这对履带车辆来说是一种激励信号.在 RecurDyn 软件中,可以自己建立地面模型,也可以通过直接导入的方法输入地面模型文件.通常,建立地面模型的方法有 3 种:(1)通过轮廓线建立;(2)通过样条曲线建立;(3)通过实体面建立.本文采用构建轮廓线的方法建立路面模型,其关键是获得路面的不平度信息.用式(5)拟合路面功率谱密度^[14]:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w}. \tag{5}$$

式中: n 为空间频率,是一个区间 (n_1, n_2) ; n_0 为参考空间频率; $G_q(n_0)$ 为参考空间频率下的路面谱值; W 为频率指数(一般取值为 2).

采用谐波叠加法对式(5)进行变换,得到随机路面高程数据 $q(s)$ 的表达式^[16]如式(6)所示.

$$q(s) = \sum_{i=1}^j \sqrt{2G_q(n_0)\Delta n_i} \sin(2\pi n_{mid}s + \theta_i). \tag{6}$$

式中: s 为路面长度; j 为空间频率所划分的区间数; $\Delta n_i = (n_2 - n_1)/j$ 为空间频率划分的区间长度; n_{mid} 为中心频率, $n_{mid} = n_1 + (\Delta n_i/2)$; θ_i 为 $[0, 2\pi]$ 内的随机数.

建立地面模型时,根据式(6)在 MATLAB 中产生随机路面高程数据,将其导入 RecurDyn 中建立轮廓线,进而通过轮廓线合成建立随机路面,得到的随机路面模型如图 10 所示.

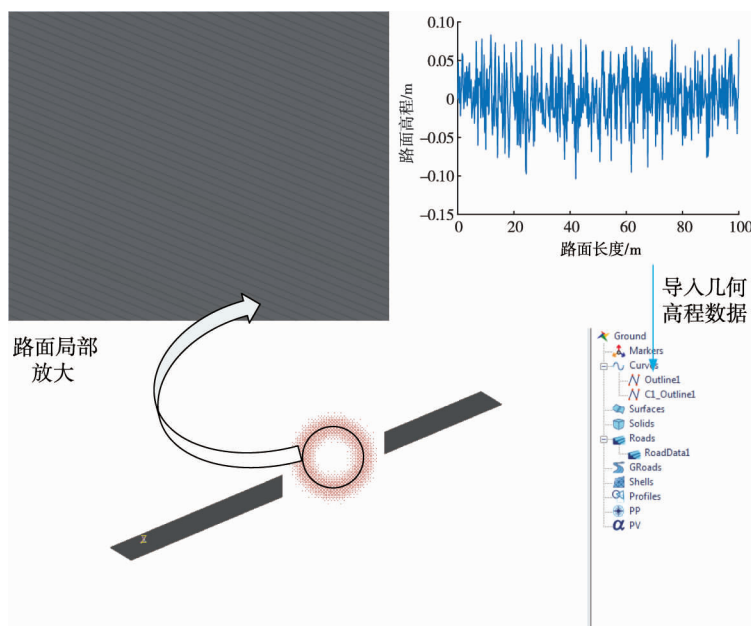


图 10 RecurDyn 路面模型

4 随机路面激励下的响应特性分析

为了便于对履带车辆各负重轮、悬挂上所受的动载荷情况及其响应进行分析,对每侧6个负重轮(悬挂)依次进行编号(图11),即将离主动轮最近的负重轮命名为1号负重轮,其余以此类推,油气悬挂命名类似.仿真中速度方向以图9中 x 轴正方向和 y 轴正方向为正.

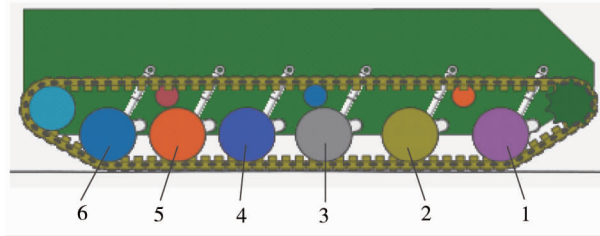


图11 负重轮编号

图12为在车速为25 km/h条件下的负重轮加速度曲线,仿真路面模型按铺面路特征施加.图12a和图12b分别为1号~3号和4号~6号负重轮上的加速度曲线(y 方向).由图12a可知:在仿真启动阶段,各负重轮上的加速度较小,这是由于车辆刚刚启动,路面激励尚未充分作用在履带上.随着履带车辆的继续行驶,各负重轮上的加速度增加.其中,1号负重轮上的加速度最大(在仿真时段内按均方根计算),2号和3号负重轮上的加速度要明显小于1号负重轮.由图12b可知:在启动阶段,4号~6号负重轮上的加速度仍然是最小的,随着履带车辆的继续行驶,6号负重轮上的加速度明显大于4号和5号负重轮的加速度(在仿真时段内按均方根计算).造成1号负重轮上的加速度较大的原因是1号负重轮位于车首,首先受到路面激励,且与主动轮相对较近,因而所受冲击较大.造成6号负重轮上的加速度较大的原因是6号负重轮靠近诱导轮,受张紧力的影响明显.仿真时也发现,2号与3号负重轮上的加速度要大于4号和5号负重轮上的加速度.另外,仿真过程中会时不时出现瞬时大冲击现象(加速度瞬时值大),例如,1号负重轮上出现的瞬时最大加速度可达 300 m/s^2 .

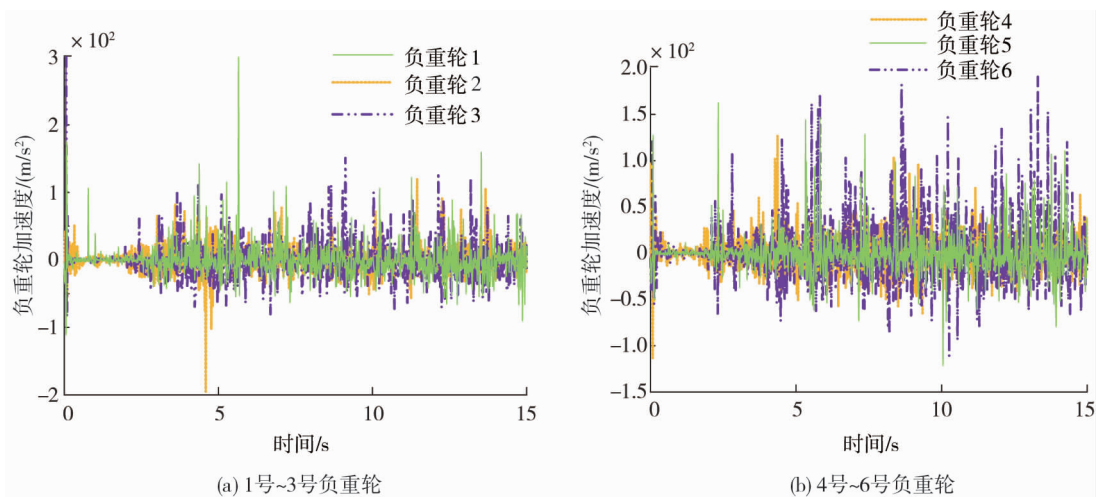


图12 负重轮加速度

图13为在相同仿真条件下的油气悬挂受力时域响应曲线.图13a和图13b分别为1号~3号和4号~6号油气悬挂的受力时域响应曲线.由图13a可知:1号油气悬挂上的受力要明显大于2号和3号油气悬挂;各油气悬挂上的受力是时变的,每一个油气悬挂上的受力变化曲线都不同.在仿真启动阶段,悬挂上的受力有一个突变,这是因为在仿真启动时突然施加路面激励的原因造成的.对比图12与图13不难发现:仿真启动时,加速度存在突变现象,同时,也存在主动轮和履带的瞬间啮合冲击.由图13b可知:6号油气悬挂上的受力要大于4号和5号油气悬挂,但相差并不大,且4号和5号油气悬挂

上的受力变化曲线较为接近.总的来看,1号油气悬挂上的受力较大,2号~5号油气悬挂上的受力相对较小且较为接近.

图14为与图13相对应的油气悬挂受力频域响应曲线.图14a和图14b分别为1号~3号和4号~6号油气悬挂的受力频域响应曲线.由图14a可知:1号和2号油气悬挂最大振幅对应的频率基本相同,都在2.5 Hz附近,但是1号悬挂的最大振幅要大于2号悬挂;3号悬挂最大振幅对应的频率在18 Hz左右,高于1号和2号悬挂,但3号悬挂的最大振幅比1号和2号悬挂要低.由图14b可知:6号和5号悬挂最大振幅对应的频率在2.5 Hz附近,6号悬挂的最大振幅更大;4号悬挂最大振幅对应的频率与3号悬挂相似,在18 Hz附近,最大振幅在数值上与3号悬挂也较为接近.总的来看,位于车首的1号、2号悬挂与位于车尾的5号、6号悬挂的共振频率相近,都在2.5 Hz附近;位于车体中部的3号与4号悬挂的共振频率相近,都在18 Hz附近.由此表明:车体首尾端的共振频率小,但最大振幅相对于车体中部大;车体中部共振频率大,最大振幅相对于车体首尾端要小.

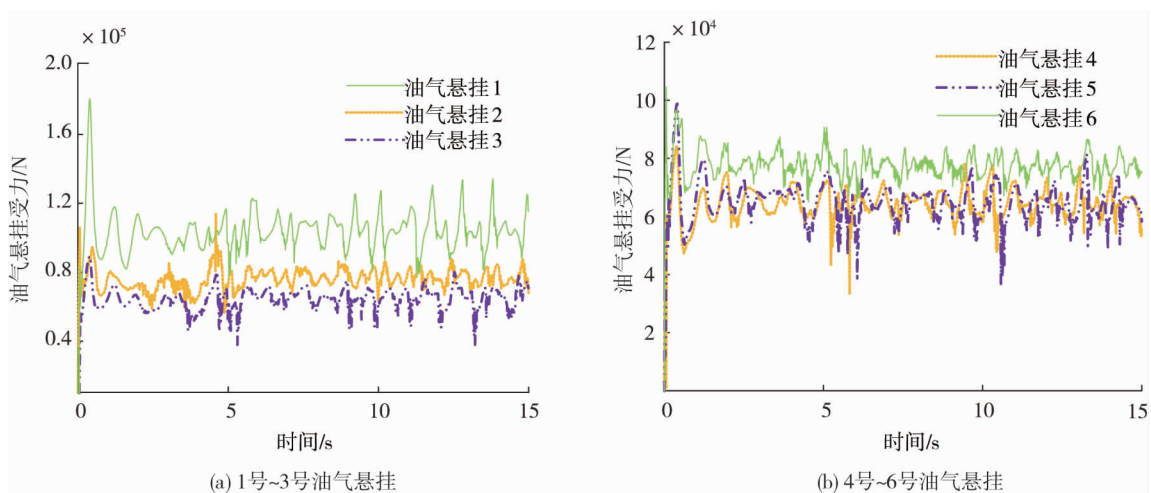


图13 油气悬挂受力时域响应曲线

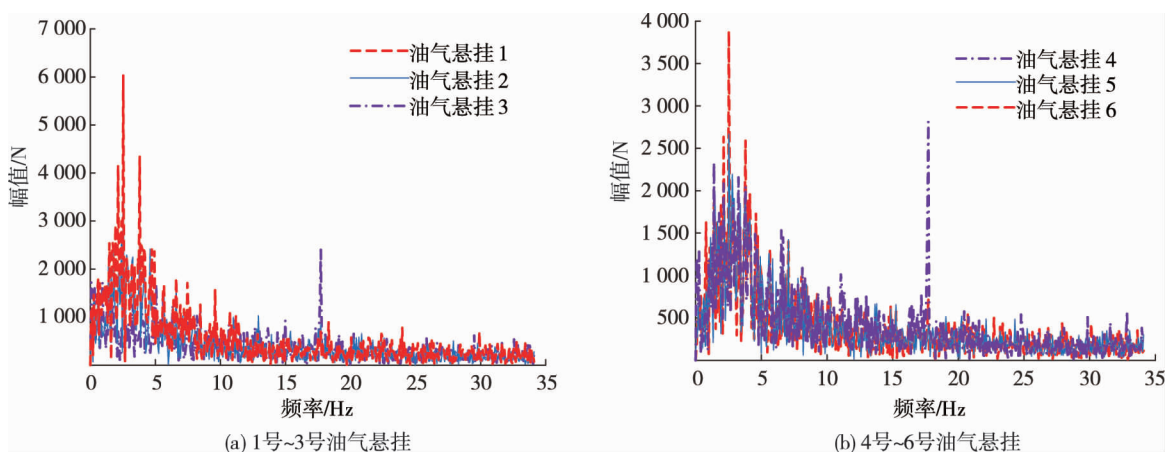


图14 油气悬挂受力频域响应曲线

图15为在相同仿真条件下的车体质心位移和加速度响应曲线.由图15a可知:在仿真启动初始阶段,车体质心的变化较大,从接近0.7 m下降到0.43 m,之后逐步稳定在0.50~0.55 m范围内.由图15b可知:初始启动时,最大质心加速度约为 9 m/s^2 ,之后逐步减小到在一定范围内波动.值得注意的是,仿真初始阶段质心加速度的变化频率较低,而后续变化频率明显加快,这意味车体会从启动时的低频振动过渡到运行状态下的高频振动.相比较而言,车体质心加速度曲线的变化频率明显比质心位移的变化频率快,这是因为加速度是位移对时间的二阶导数.

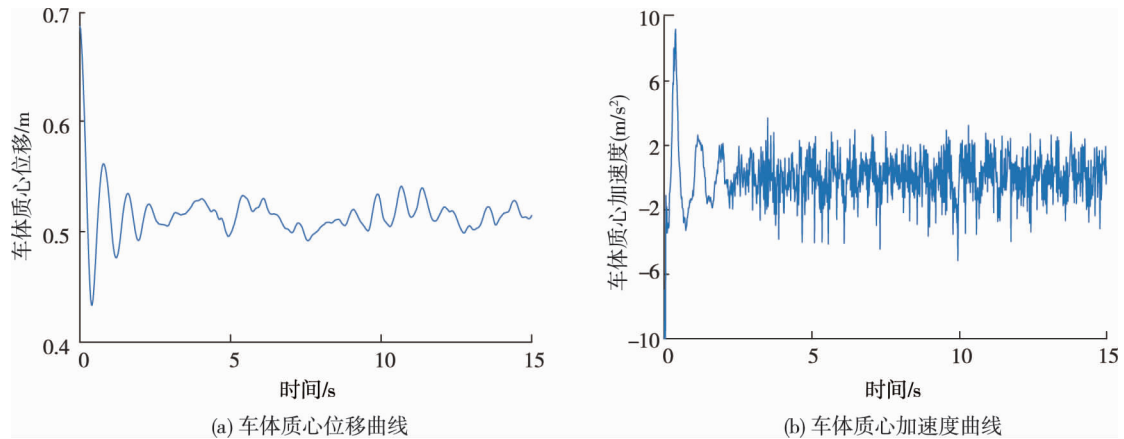


图15 车体质心位移和加速度曲线

5 结论

1) 基于 MATLAB/Simulink 与 RecurDyn 仿真软件平台, 构建油气悬挂式履带车辆动力学模型, 实现联合仿真求解。

2) 1 号和 6 号负重轮上的加速度较大; 1 号油气悬挂上的受力要明显大于 2 号和 3 号油气悬挂, 6 号油气悬挂上的受力要大于 4 号和 5 号油气悬挂; 车体会从启动时的低频振动过渡到运行状态下的高频振动。

3) 采用联合仿真的方式可以获得油气悬挂式履带车辆更符合实际的行驶状态特征, 为悬挂行走系统优化设计提供重要依据。但本文采用的路面模型为理论模型, 与实际路面有一定差异, 可能会丢失一些重要的频率特征, 此外, 所采用的车辆模型为刚体模型, 仿真中不会产生变形, 与实际情况有一定的差异。

参考文献:

- [1] 蔡芷兰. 履带车辆多体动力学建模仿真与履带横向振动特性分析[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- [2] 黄雪涛, 顾亮, 吕唯唯. ATV 的履带车辆动态特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(4): 118-121.
- [3] 马星国, 张刃, 尤小梅, 等. 履带车辆单轮悬挂系统建模及仿真研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(20): 81-85.
- [4] 徐国英, 王闯, 姚希民, 等. 基于 RecurDyn 软件坦克悬挂系统动力学仿真[J]. 机械研究与应用, 2015, 28(3): 43-45.
- [5] 蔡文斌, 雷强顺, 王永丽, 等. 高速履带车辆托带轮受力分析及优化[J]. 车辆与动力技术, 2018(1): 11-16.
- [6] 卞美卉, 张洋, 杜志岐. 履带车辆履带预张紧力对平顺性的影响与仿真[J]. 车辆与动力技术, 2019(1): 34-37.
- [7] 代健健, 毛明, 陈轶杰, 等. 扭杆油气复合悬挂特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(2): 163-167.
- [8] 何健, 吴大林, 马吉胜, 等. 基于改进土壤承压模型的履带车辆行驶振动特性仿真研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(12): 57-62.
- [9] YAO Y, CHENG K, ZHOU Z J, et al. A novel method for estimating the track-soil parameters based on Kalman and improved strong tracking filters [J]. ISA Transactions, 2015, 59: 450-456.
- [10] 孟磊, 李晓雷, 邱实, 等. 履带对履带车辆车体振动影响的分析[J]. 车辆与动力技术, 2015(4): 1-5.
- [11] 韩寿松, 晁智强, 刘相波, 等. 履带车辆半主动油气悬架最佳阻尼匹配[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(31): 80-86.
- [12] WANG P P, RUI X T, YU H L. Study on dynamic track tension control for high-speed tracked vehicles [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 132: 277-292.
- [13] 董明明, 王梦瑶, 梁迎港. 装甲车辆悬挂系统设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.
- [14] 樊冰村, 毛明, 蔡文斌, 等. 装甲车辆油气弹簧减振阀阻尼特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(1): 1-7.
- [15] 刘洋, 雷强顺, 汪国胜. 悬挂系统原理与设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2015.
- [16] 余志生. 汽车理论[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.