

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.01.017

喷雾机药罐液体纵向晃动等效力学模型建立与应用

陈雨 路力权 张军昌 陈军 胡宸玮 曹佳宇

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对高地隙自走式喷雾机在复杂工况下,药罐液体发生的纵向晃动对整机平顺性及作业质量影响难以探明的问题,基于液体晃动动力学特性及机械模型等效准则,建立了可描述药罐液体纵向晃动的弹簧-质量-阻尼等效力学模型,并利用力学等价原则,对模型参数进行了求解。应用 Fluent 流体仿真软件建立罐内液体晃动仿真模型,并通过台架实验验证了其仿真结果能够反映真实的液体晃动冲击作用。应用 Matlab/Simulink 软件,建立等效力学数值解析模型,结合 Fluent 仿真结果对比分析了充液比为 0.1、0.5、0.9 时液体纵向晃动作用在容器壁的力矩变化规律,验证了所建等效模型的准确性。将所构建的等效力学模型应用于喷雾机垂向动力学特性分析,得到药液晃动和药液质量变化对整机行驶平顺性有较大影响且充液比为 0.8 时整机行驶平顺性较差的结论。

关键词: 喷雾机; 液体晃动; 等效力学模型; Fluent

中图分类号: S49; U461.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)01-0173-10

OSID:



Construction and Application of Equivalent Mechanical Model of Liquid Longitudinal Sloshing in Sprayer Tank

CHEN Yu LU Liqun ZHANG Junchang CHEN Jun HU Chenwei CAO Jiayu

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aiming at the problem that the influence of the vertical sloshing of the liquid in the medicine tank on the smoothness and operation quality of the whole machine is difficult to detect under the complex working conditions of the self-propelled sprayer with high ground clearance, based on the dynamic characteristics of the liquid sloshing and the equivalent criterion of the mechanical model, a spring - mass - damping equivalent mechanical model can describe the longitudinal sloshing of the liquid in the medicine tank, and the model parameters were solved by using the principle of mechanical equivalence. Fluent fluid simulation software was used to establish the liquid sloshing simulation model in the tank, and the simulation results were verified by bench experiments to reflect the real liquid sloshing impact. Using Matlab/Simulink software, a numerical analytical model of equivalent mechanics was established. Combined with the simulation results of Fluent, the changing law of the moment of liquid longitudinal sloshing acting on the container wall was compared and analyzed when the liquid filling ratio was 0.1, 0.5, and 0.9, and the established equivalent model was verified. The constructed equivalent mechanics model was applied to the analysis of the vertical dynamic characteristics of the sprayer, and it was concluded that the sloshing of the liquid medicine and the change of the quality of the liquid medicine had a great influence on the driving smoothness of the whole machine, and the driving smoothness of the whole machine was poor when the filling ratio was 0.8. The research results can provide an implementation approach for further research on the optimization of the chassis structure and the analysis of smoothness and stability under different operating conditions and time-varying liquid quality of the sprayer.

Key words: sprayer; liquid sloshing; equivalent mechanics model; Fluent

收稿日期: 2022-03-24 修回日期: 2022-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(32001428)和中国博士后科学基金项目(2018M643744)

作者简介: 陈雨(1989—),男,副教授,博士,主要从事智能农业装备设计与控制研究,E-mail: jdxy73@nwfau.edu.cn

通信作者: 张军昌(1972—),男,副教授,主要从事现代农业装备研究,E-mail: zhangjc@nwfau.edu.cn

0 引言

高地隙自走式喷雾机具有高效、环保等优势,得到了广泛应用^[1-3]。但喷雾机运行工况复杂,地隙高,轮距相对于车身高度偏窄^[4-5],作业时药液易发生晃动。液体易于流动的特性和喷雾机运行状态的改变使得药液在外力作用下冲击药罐壁面,产生变化的动态负载,致使作用于整机的力矩增加,极大地降低了整机稳定性与作业质量。因此,研究药罐内液体晃动的动力学特性,对于抑制整机侧倾与俯仰运动,提高喷雾机稳定性与喷药效果具有实际意义^[6]。

目前,车辆罐体内液体晃动动力学的研究方法主要有流体动力学法^[7-8]、数值解析法^[9]、等效力学模型法^[10]等。其中,等效力学模型法是指通过力学模型近似描述液体晃动,将流体力学问题转化为机械运动问题。由于其更容易纳入到系统稳定性分析、控制器设计以及系统模拟中,因此得到了广泛的研究。例如 KOLAEI 等^[11]将非满载罐体液体晃动等效力学模型与半挂液罐车五自由度动力学模型进行耦合分析,确定了液罐车侧倾稳定特性。NOKHBATOLFOGHAI 等^[12]、李金辉等^[13]将液体晃动弹簧-质量模型整车多体动力学模型结合,分析了液体晃动对整车稳定性的影响。NICOLSEN 等^[14]和 GROSSI 等^[15]通过集成基于拉格朗日连续介质的液体晃动模型和卡车多体系统模型,研究了液体晃动对罐车动力学特性的影响。郑雪莲等^[16-17]、孙文财等^[18]和赵伟强等^[19]将液罐内液体晃动等效为单摆力学模型,分析不同工况条件下变充液比罐内液体晃动所带来的冲击效应对于罐式半挂车整车侧倾稳定性的影响,并以此提出了基于差动制动的液罐车防侧翻控制策略。

综上所述,液体晃动等效力学模型在罐式道路运输车辆的稳定性分析与控制研究中已广泛应用。与罐体车辆相比,喷雾机质心高,药罐以圆柱和椭圆圆柱为主,药液与底盘质量比大且作业时药液质量时变,对于果园喷雾机^[20-22]及中小型植保机^[23-25],受限于罐体体积,药罐内未放置防波板,药液晃动对其整车稳定性和安全性影响更大。研究构建可准确描述喷雾机液体纵向晃动过程的等效力学模型,可探明整机平顺性及稳定性等影响因素,进而为开展喷雾机底盘结构改进、悬架设计、罐体形状和防晃装置优化、整机平顺稳定控制等提供依据。基于此,本文以喷雾机药液纵向晃动为例,基于液体晃动力学特性及机械模型等效准则,研究建立药罐液体纵向晃动等效力学模型,并通过仿真与实验方法验证模

型的准确性。在此基础上,建立 1/2 喷雾机四自由度垂向动力学模型,分析讨论液体晃动与药液时变对喷雾机行驶平顺性能的影响。

1 液体纵向晃动等效力学模型建立

1.1 液体纵向晃动特性分析

高地隙自走式喷雾机药罐形状多为圆柱体或椭圆圆柱体,其纵向截面为矩形。建立罐内液体晃动坐标系如图 1 所示。取自由液面中心为坐标原点 o , x 为喷雾机前进方向, z 为垂直方向。图中, $2a$ 为罐体长度, H 为自由液面高度, Ω 为罐内流体域。

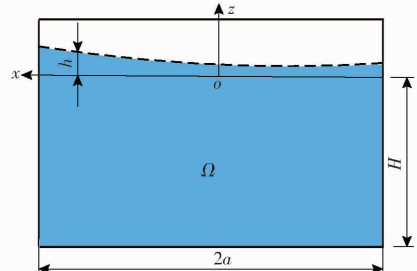


图 1 罐体纵向晃动坐标系

Fig. 1 Coordinate system of tank longitudinal shaking

当外界激励较小时,罐内液体处于小幅晃动。在如图 1 所示的平面坐标系 oxz 中,设 $h(x, z, t)$ 为自由液面波高函数,引入流体相对速度势函数 $\Phi(x, z, t)$,由于小幅晃动下流体可看作是无旋的,则有

$$\frac{\partial^2 \Phi(x, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi(x, z, t)}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

液体粒子在罐体内表面处的法向速度满足

$$\left. \frac{\partial \Phi(x, z, t)}{\partial x} \right|_{x=\pm a} = 0 \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi(x, z, t)}{\partial z} \right|_{z=-h} = 0 \quad (3)$$

同时,自由液面上的液体粒子在 z 方向上的运动应满足

$$\left. \frac{\partial \Phi(x, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{\partial h(x, t)}{\partial t} \quad (4)$$

当罐体受到沿 x 轴方向的外界激励 $\ddot{F}_x(t)$ 时,可用相对速度势函数描述非惯性坐标系下液体的运动^[26],其满足的 Bernoulli 方程为

$$\frac{p(x, z, t)}{\rho} + \frac{\partial \Phi(x, z, t)}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi(x, z, t)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi(x, z, t)}{\partial z} \right)^2 \right] + x \ddot{F}_x(t) + gz = 0 \quad (5)$$

式中 ρ ——流体密度, kg/m^3

p ——液体压力, N

g ——重力加速度, m/s^2

去掉式(5)非线性项,可得

$$\frac{p(x, z, t)}{\rho} + \frac{\partial \Phi(x, z, t)}{\partial t} + x \ddot{F}_x(t) + gz = 0 \quad (6)$$

则罐内液体产生的总压力可写为

$$p(x, z, t) = -\rho \frac{\partial \Phi(x, z, t)}{\partial t} - \rho x \ddot{F}_x(t) - \rho gz \quad (7)$$

在自由表面上,液体满足的动力学条件为

$$\left. \frac{\partial \Phi(x, z, t)}{\partial t} \right|_{z=0} + x \ddot{F}_x(t) + gh(x, t) = 0 \quad (8)$$

式(1)~(4)、(8)构成了罐内液体受迫晃动的完整动力学方程。

在罐内液体小幅晃动时,其一阶模态起主导作用。基于此,在对液体晃动的控制方程求解时不考虑其多阶模态的叠加,仅考虑一阶模态,此时可将液体的速度势函数 $\Phi(x, z, t)$ 展开为

$$\Phi(x, z, t) = \dot{q}_1(t) \sin \frac{\pi x}{2a} \cosh \left(\frac{\pi}{2a} (z + H) \right) \quad (9)$$

式中 $\dot{q}_1(t)$ ——坐标对时间的导数

显然,式(9)满足式(1)~(3),将其代入式(4)、(8)中得

$$\dot{q}_1(t) \frac{\pi}{2a} \sin \frac{\pi x}{2a} \sinh \frac{\pi H}{2a} = \frac{\partial h(x, t)}{\partial t} \quad (10)$$

$$\ddot{q}_1(t) \sin \frac{\pi x}{2a} \cosh \frac{\pi H}{2a} + x \ddot{F}_x(t) + gh(x, t) = 0 \quad (11)$$

根据液体晃动初始状态,令 $h(x, 0) = 0, q_1(0) = 0, \dot{q}_1(0) = 0$,对式(10)两边积分,解得

$$h(x, t) = q_1(t) \frac{\pi}{2a} \sin \frac{\pi x}{2a} \sinh \frac{\pi H}{2a} \quad (12)$$

再将式(12)回代至式(11)中得

$$(\ddot{q}_1(t) + \omega_1^2 q_1(t)) \sin \frac{\pi x}{2a} \cosh \frac{\pi H}{2a} = -x \ddot{F}_x(t) \quad (13)$$

式中 ω_1 ——罐内液体一阶晃动自然频率

将式(13)右端的 $-x$ 展开为三角级数,得到

$$\ddot{q}_1(t) + \omega_1^2 q_1(t) = \frac{-2 \ddot{F}_x(t)}{a \left(\frac{\pi}{2a} \right)^2 \cosh \frac{\pi H}{2a}} \quad (14)$$

由 Duhamel 积分得到 $t = 0$ 条件下的方程(14)的解为

$$q_1(t) = \frac{-2 \int_0^t \ddot{F}_x(\tau) \sin(\omega_1(t - \tau)) d\tau}{a \omega_1 \left(\frac{\pi}{2a} \right)^2 \cosh \frac{\pi H}{2a}} \quad (15)$$

由式(15)可得液体的流动压力为

$$p(x, z, t) = \frac{\ddot{F}_x(t) - \omega_1 \int_0^t \ddot{F}_x(\tau) \sin(\omega_1(t - \tau)) d\tau}{a \left(\frac{\pi}{2a} \right)^2 \cosh \frac{\pi H}{2a}} \cdot 2\rho \sin \frac{\pi x}{2a} \cosh \frac{(z + H)\pi}{2a} - \rho x \ddot{F}_x(t) \quad (16)$$

对于二维矩形容器中原始液体系统,当受到外界的激励 $\ddot{F}_x(t)$ 时,液体对容器壁面在水平方向上的冲击作用产生的力与力矩为

$$F_L = \int_{-H}^0 (p(x, z, t) |_{x=a} - p(x, z, t) |_{x=-a}) dz \quad (17)$$

$$M_L = \int_{-H}^0 (p(x, z, t) |_{x=a} - p(x, z, t) |_{x=-a}) \cdot (z + H) dz + \int_{-a}^a p(x, z, t) |_{z=-H} dx \quad (18)$$

1.2 等效力学模型构建与参数求解

目前,使用较多的等效模型为单摆模型和弹簧-质量-阻尼模型^[27]。这两种模型都可以较为准确地描述罐内液体往复冲击的非线性运动,而后者在低频小幅的振动下对液体运动的描述更为精确。因此,基于液体纵向晃动特性分析,建立如图 2 所示等效力学模型。图中, G 为液体质心, h_g 为质心高度; m_0 为固定质量块质量, h_0 为固定质量块高度; m_k 、 k_k 、 c_k 分别为等效质量块质量、等效弹簧刚度以及等效阻尼系数, h_k 为等效质量块高度, φ 为车身俯仰角。

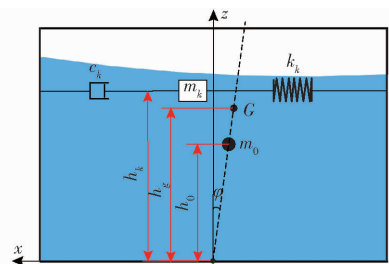


图 2 纵向弹簧-质量-阻尼等效模型

Fig. 2 Longitudinal spring - mass - damp equivalent model

设罐体受到沿 x 轴的激励为 $\ddot{G}_x(t)$ 时, m_k 偏离平衡位置的位移为 x_k ,则第 k 阶等效质量块 m_k 的运动微分方程可表示为

$$m_k \frac{d^2 x_k}{dt^2} + c_k \frac{dx_k}{dt} + k_k x_k + m_k \ddot{G}_x(t) = 0 \quad (19)$$

进而,根据系统动力学理论,该系统对罐壁在水平方向上产生的力与力矩为^[20]

$$F_e = -m_0 \ddot{G}_x(t) - \sum_{k=1}^{\infty} m_k \omega_k \int_0^t \ddot{G}_x(\tau) \sin \omega_k(t - \tau) d\tau \quad (20)$$

$$M_e = -m_0 \ddot{G}_x(t) h_0 -$$

$$\sum_{j=1}^{\infty} m_k \omega_k h_k \int_0^t \ddot{G}_x(\tau) \sin \omega_k(t - \tau) d\tau \quad (21)$$

式中 ω_k —— k 阶液体晃动固有频率

根据前文对液体晃动过程的分析,在求解模型参数时同样只分析其一阶振动模态。根据力学相似原则,罐内实际液体冲击产生的力与力矩与等效模型产生的力与力矩相等,进而根据方程两边时间函

数的系数相等可求得等效模型各参数,结果为

$$\frac{m_1}{M} = \frac{2 \left(\frac{H}{a}\right)^2 \tanh \frac{\pi H}{2a}}{\left(\frac{\pi H}{2a}\right)^3} \quad (22)$$

式中 M ——罐内液体总质量,kg
 m_1 ——等效移动质量块质量,kg

$$\frac{h_1}{H} = 1 + \frac{2 - \cosh \frac{\pi H}{2a}}{\frac{\pi H}{2a} \sinh \frac{\pi H}{2a}} \quad (23)$$

式中 h_1 ——等效移动质量块高度,m

$$\frac{m_0}{M} = 1 - \frac{m_1}{M} \quad (24)$$

$$\frac{h_0}{H} = \frac{\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \left(\frac{a}{H}\right)^2 - 2 \left(\frac{H}{a}\right)^2 \frac{2 + \frac{\pi H}{2a} \sinh \frac{\pi H}{2a} - \cosh \frac{\pi H}{2a}}{\left(\frac{\pi H}{2a}\right)^4 \cosh \frac{\pi H}{2a}}}{1 - \frac{2 \left(\frac{H}{a}\right)^2 \tanh \frac{\pi H}{2a}}{\left(\frac{\pi H}{2a}\right)^3}} \quad (25)$$

$$k_1 = \frac{2Mg}{H} \left(\frac{H}{a}\right)^2 \left(\frac{2a \tanh \frac{\pi H}{2a}}{\pi H}\right)^2 \quad (26)$$

本研究中喷雾机药罐截面半径 600 mm,长 1 000 mm。为分析不同充液比下液体晃动冲击作用,根据其几何尺寸及式(22)~(26),以 0.1 为变化步长,分别求得充液比 0.1~0.9 时纵向等效力学模型各参数如表 1、2 所示。

表 1 纵向等效模型等效质量和高度

Tab. 1 Equivalent mass and height of longitudinal equivalent model

充液比	m_1/kg	h_1/m	m_0/kg	h_0/m
0.1	14.080 1	0.178	0.119 9	0.40
0.2	37.719 2	0.180	0.280 8	0.45
0.3	53.724 8	0.187	15.175 2	0.50
0.4	72.319 9	0.189	32.680 1	0.53
0.5	88.062 3	0.193	50.037 7	0.59
0.6	100.306 2	0.198	70.693 8	0.64
0.7	110.007 8	0.151	94.492 2	0.72
0.8	115.870 1	0.121	119.129 9	0.75
0.9	107.203 5	0.020	131.796 5	0.78

1.3 等效力学数值解析模型建立

纵向等效模型在求解过程中采用数值解析法,通过力学等价原则求解得到模型参数。为后续进一步验证模型的准确性,需结合求得的参数及液体晃动力矩表达式建立等效力学数值解析模型。

根据式(19)~(21)求得在药罐沿纵向晃动时

表 2 纵向等效模型等效刚度和等效阻尼系数

Tab. 2 Equivalent damping and equivalent stiffness of longitudinal equivalent model

充液比	$k_1/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_1/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$
0.1	57.73	5.06
0.2	301.75	12.44
0.3	644.70	12.84
0.4	1 149.89	13.02
0.5	1 637.96	15.85
0.6	2 196.71	23.07
0.7	2 772.20	26.40
0.8	3 313.88	41.71
0.9	3 323.81	112.56

药液产生的作用力矩为

$$M_L = -m_0 h_0 \dot{v}_0 - \sum_{k=1}^n m_k h_k (\dot{v}_0 + \ddot{x}_k) + \sum_{k=1}^n m_k g x_k \quad (27)$$

式中 \dot{v}_0 ——沿 x 轴外部激励, m/s^2

n ——液体晃动模态阶数,取 1

结合式(27)在 Matlab/Simulink 平台中搭建数值仿真模型,如图 3 所示。

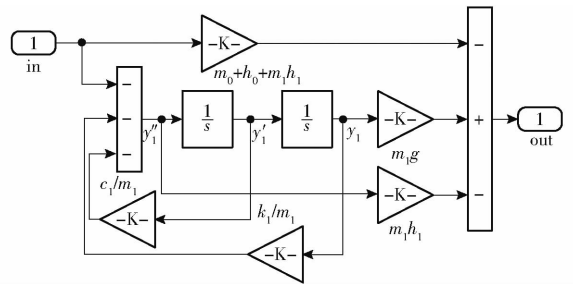


图 3 Simulink 等效力学模型系统

Fig. 3 Simulink equivalent mechanics model system

2 等效模型有效性验证

将等效数值解析模型在 Matlab/Simulink 中的仿真结果与液体晃动在 Fluent 中的仿真结果进行对比,以验证所建等效模型的准确性。

2.1 Fluent 仿真模型建立与验证

在 Fluent 流体模拟软件中对罐内药液晃动产生的冲击作用进行模拟。按照喷雾机药罐实际尺寸建立药罐模型并标定罐内液体区域如图 4 所示。设置充液比变化范围为 0.1~0.9,变化步长为 0.1。

根据液体受迫晃动的作用特点设置仿真求解器为基于压力的瞬态流动求解器,罐内同时存在水与空气的情况下,设置其物理模型为 VOF 多相流模型,湍流模型为标准 $k-\varepsilon$ 模型^[22-23]。通过用户自定义函数 UDF (Userdefined function) 实现对药罐初始激励的加载^[24]。仿真时间步长 0.01 s,仿真步数 500 步。

设计并制作了液体晃动实验台架以验证 Fluent

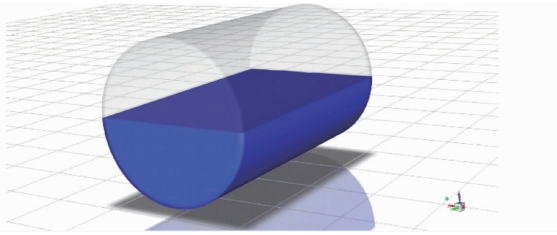


图 4 Fluent 仿真液罐模型

Fig. 4 Fluent simulation liquid tank model

仿真的准确性,如图 5 所示,在该平台上可对按照喷雾机药罐等比例制作的小型液罐进行一定频率和幅值的简谐激励。

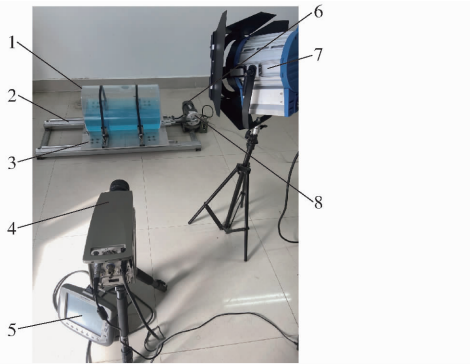


图 5 模拟液体晃动实验台架

Fig. 5 Experimental bench for simulating liquid shaking

- 1. 液罐 2. 滑块导轨 3. 液罐承托板及固定托 4. 高速摄像机
- 5. 控制器显示单元 6. 调速电机 7. 摄影灯 8. 曲柄偏心轮

由于液罐模型为圆柱形,难以直接测得液晃实验中罐内液体对罐壁产生的冲击力,因此,本实验通过在液体晃动过程中监测液面状态的变化,将其与 Fluent 仿真中的实时液面状态进行对比,以验证其仿真结果的有效性。液面监测采用 OLYMPUS 公司 i-SPEED TR 高速摄像机,分辨率为 1 280 像素 × 1 024 像素,最高帧率达 10 000 f/s,适用于绝大多数测试,同时该摄像机配合独特的控制器显示元件 (Control and display unit, CDU) 来使用。

与仿真实验中初始条件给予的速度激励不同,在液晃模拟实验中给予罐体的是位移激励

$$S_x = 0.02\pi \sin(8\pi t) \quad (28)$$

根据式(28),调节电机转速及偏心轮偏心距。将获得的高速摄像结果与 Fluent 实时液面状态对比,图 6 为充液比 $\alpha = 0.5$ 条件下,不同时刻对比结果,左侧为实验结果,右侧为仿真结果。

由图 6 可知,在相同时刻下, Fluent 仿真结果与模拟液晃实验结果高度相似。为量化两者液面匹配程度,借用 Matlab 中的 grabit 插件分别提取一个运动周期内不同时刻的液面曲线,如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,在同一时刻下两者的液面

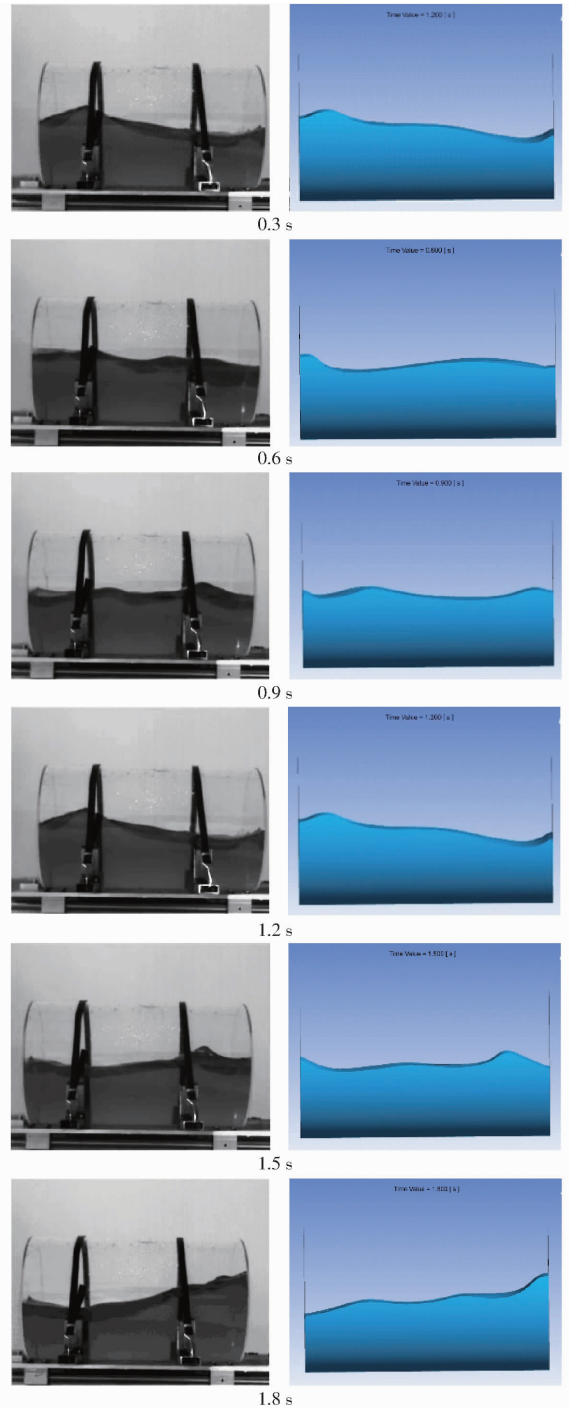


图 6 不同时刻实验结果与仿真结果对比

Fig. 6 Comparison of experimental results and simulation results

曲线在变化趋势上基本一致,但在液面上水波高度的峰值存在略微差异。而从直观曲线中难以评价两种结果的液面曲线是否具有较高的拟合度。因此,在评价 Fluent 结果与高速摄像结果曲线的拟合度时,用 correl 函数来表示,即

$$\text{correl}(y_1, y_2) = \frac{\sum (y_1 - \bar{y}_1)(y_2 - \bar{y}_2)}{\sqrt{\sum (y_1 - \bar{y}_1)^2 \sum (y_2 - \bar{y}_2)^2}} \quad (29)$$

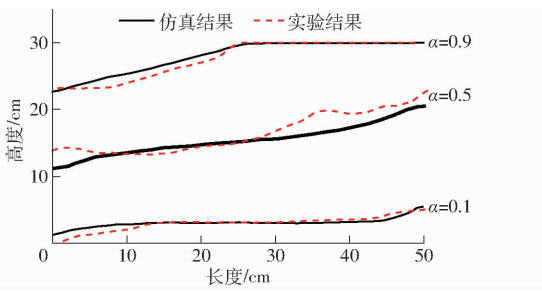


图7 实验与仿真结果液面曲线

Fig. 7 Comparison of liquid level curves between experimental and simulation results

根据式(29)计算两种结果下液面曲线的相关系数,结果如表3所示。

表3 不同充液比下各时刻的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient results at each moment under different liquid filling conditions

充液比	监测时刻/s					
	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
0.1	0.91	0.88	0.89	0.88	0.11	0.86
0.2	0.87	0.91	0.14	0.87	0.88	0.91
0.3	0.90	0.87	0.55	0.88	0.57	0.86
0.4	0.89	0.85	0.42	0.88	0.89	0.93
0.5	0.91	0.18	0.85	0.97	0.74	0.88
0.6	0.90	0.29	0.91	0.93	0.88	0.86
0.7	0.95	0.97	0.87	0.48	0.34	0.96
0.8	0.90	0.54	0.96	0.89	0.90	0.92
0.9	0.99	0.86	0.95	0.91	0.94	0.63

结合 correl 函数定义,两组数据相关系数越接近1时,其相关性越强,且呈现正相关。从表3可知,Fluent 仿真液面结果与高速摄像结果两种曲线的相关系数在不同充液比时,不同时刻下基本处于

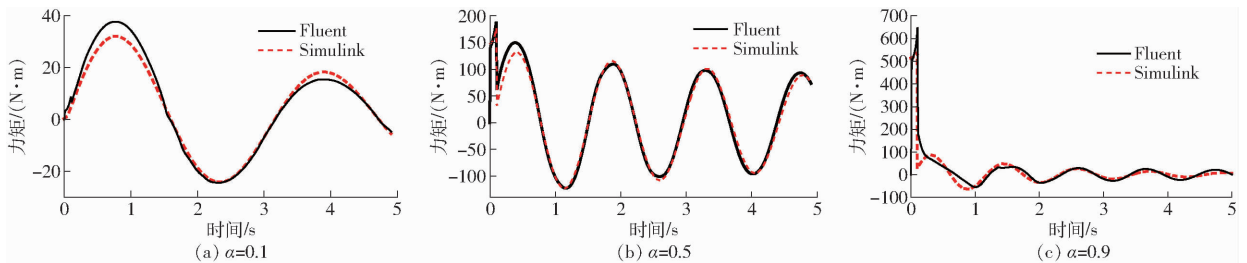


图8 阶跃激励下仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of results under step excitation

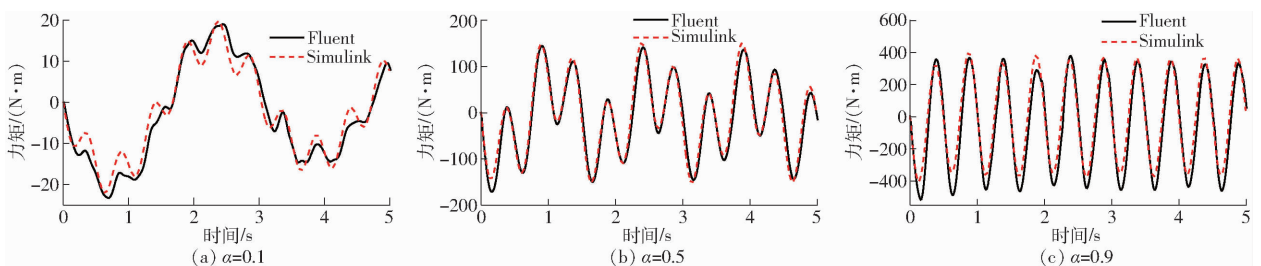


图9 简谐激励下仿真结果对比

Fig. 9 Comparison of results under simple excitation

0.85 以上,说明 Fluent 仿真能够在一定误差范围内反映液体晃动的真实状态,可进一步提高等效模型验证的合理性。同时相关系数计算结果中亦存在小于0.6,甚至小于0.2的情形,由于进行液晃实验时,液体晃动产生的惯性力带给电机一定的运动阻力,因此,实际的晃动激励可能与期望的原始激励存在一定偏差,造成实验的运动周期相对 Fluent 仿真存在一定滞后。此外,由于高速摄像过程中液罐处于运动状态,因此存在拍摄角度差异,同时在进行液面曲线提取过程中亦存在一定误差。

2.2 等效模型准确性验证

根据图3数值解析仿真模型在 Matlab/Simulink 中进行仿真,其中各模块初始值设置为表1、2中的等效模型参数。选择 Fixed-step 固定步长模式的 ode5 求解器,设置仿真步长为 0.001 s,仿真步数为 5000 步。通过 step 模块与 sinewave 模块给予系统一定初始激励,在此激励的作用下将力学系统产生的作用力矩结果记录并导出。同时,使用 Fluent 流体模拟软件对罐内药液晃动产生的力矩进行仿真模拟。

为提高仿真实验验证的精确性,结合喷雾机实际作业工况,选择将阶跃和简谐两种初始激励条件下的仿真结果进行对比。其中,阶跃激励为

$$a_x = \begin{cases} 5 \text{ m/s}^2 & (0 \leq t < 0.1 \text{ s}) \\ 0 & (t \geq 0.1 \text{ s}) \end{cases} \quad (30)$$

简谐激励为

$$v_x = 0.16\pi \cos(8\pi t) \quad (31)$$

图8为阶跃激励下仿真结果对比,图9为简谐激励下仿真结果对比。

由图 8、9 可知,在不同初始激励条件下 Matlab/Simulink 仿真中等效模型数值分析与 Fluent 流体仿真的药液晃动作用力矩随时间变化规律基本一致,说明所建立的纵向等效力学模型的准确性与合理性。通过分析图中的曲线误差可以得出,在药罐近乎空载即充液比为 0.1 时,两者误差略大。由于药罐接近空载时,罐内液体晃动的非线性特性较强,两者仿真结果存在一定的误差。此外,在阶跃激励条件下,最大误差出现在激励结束的时刻,由于仿真实验中阶跃激励施加时间短暂,此时系统处于非稳定状态,出现响应滞后的情形,增大了误差。

3 等效模型应用

3.1 1/2 喷雾机垂向动力学模型建立

基于上述建立的等效力学模型与车辆动力学模型耦合,建立综合药罐液体晃动和不考虑药罐液体晃动的 1/2 喷雾机垂向四自由度动力学模型,通过仿真对比,探明罐内药液晃动对喷雾机行驶过程中整机行驶平顺性的影响。

以“地面-轮胎-悬架-车身”构成的系统为对象,建立不考虑药罐液体晃动的 1/2 喷雾机四自由度垂向动力学模型,如图 10 所示。传统模型建立过程中,假设喷雾机车身与药罐为刚体,不考虑罐体内液体晃动和车辆姿态引起的轮胎载荷转移的影响。图中 z_b 为质心垂向位移; z_F 、 z_R 为前后簧载质量的垂向位移; z_{tF} 、 z_{tR} 为前后轮胎垂向位移; z_{wF} 、 z_{wR} 为路面位移激励; m_{sc} 为半车簧载质量,此时的簧载质量可看作是将罐内液体及车架视为同一刚体的简化结果; I_{sc} 为车身转动惯量; k_{sF} 、 c_{sF} 、 k_{sR} 、 c_{sR} 分别为前后悬架等效刚度与等效阻尼系数; k_{tF} 、 k_{tR} 为车轮等效刚度; l_f 、 l_r 为车身质心至前后轴在地面的投影距离。

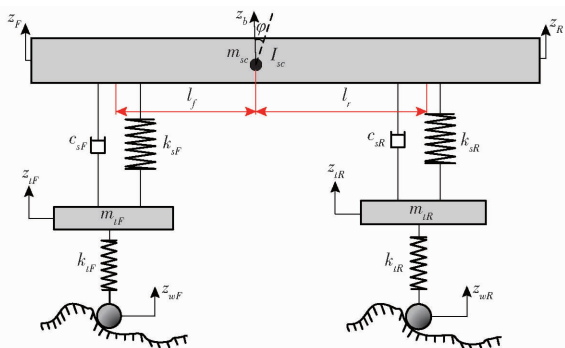


图 10 不含液体晃动的喷雾机半车动力学模型

Fig. 10 Dynamics model of sprayer half-car without liquid sloshing

结合图 10,根据车身质心处的垂向位移 z_b 和俯仰角 φ ,动力学方程可表示为

$$m_{sc} \ddot{z}_b = c_{sF} (\dot{z}_{tF} - \dot{z}_F) + k_{sF} (z_{tF} - z_F) + c_{sR} (\dot{z}_{tR} - \dot{z}_R) + k_{sR} (z_{tR} - z_R) \quad (32)$$

$$I_{sc} \ddot{\varphi} = l_f [c_{sF} (\dot{z}_{tF} - \dot{z}_F) + k_{sF} (z_{tF} - z_F)] - l_r [c_{sR} (\dot{z}_{tR} - \dot{z}_R) + k_{sR} (z_{tR} - z_R)] \quad (33)$$

$$m_{tF} \ddot{z}_{wF} = k_{tF} (z_{wF} - z_{tF}) + k_{sF} (z_{tF} - z_F) + c_{sF} (\dot{z}_{tF} - \dot{z}_F) \quad (34)$$

$$m_{tR} \ddot{z}_{wR} = k_{tR} (z_{wR} - z_{tR}) + k_{sR} (z_{tR} - z_R) + c_{sR} (\dot{z}_{tR} - \dot{z}_R) \quad (35)$$

当俯仰角 φ 较小时,近似有

$$z_F = z_b + l_f \varphi \quad (36)$$

$$z_R = z_b - l_r \varphi \quad (37)$$

结合式(27)、(32)~(37),建立综合液体纵向晃动的 1/2 喷雾机非线性垂向动力学模型,如图 11 所示。

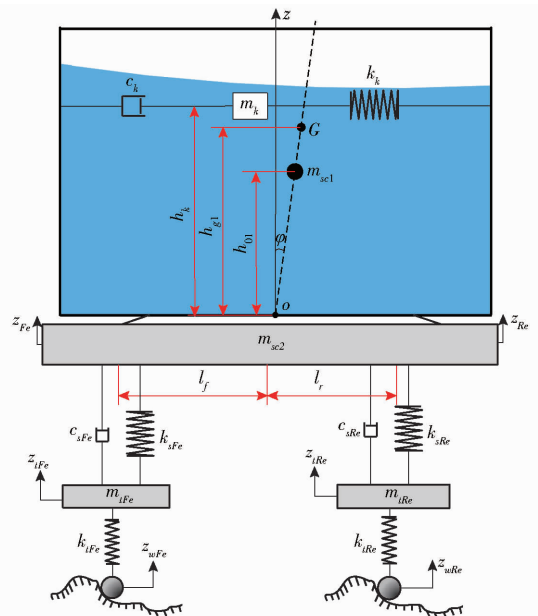


图 11 含液体晃动的喷雾机半车动力学模型

Fig. 11 Dynamic model of sprayer half-car with liquid sloshing

图 11 中 m_{sc1} 为罐内液体质量, m_{sc2} 为车架质量, 且有 $m_{sc1} + m_{sc2} = m_{sc}$ 。此时,由于要分析液体晃动的影响,故将液体与车架质量分开考虑。动力学方程表示为

$$I_{sc} \ddot{\varphi} = l_f [c_{sFe} (\dot{z}_{tFe} - \dot{z}_{Fe}) + k_{sFe} (z_{tFe} - z_{Fe})] - l_r [c_{sRe} (\dot{z}_{tRe} - \dot{z}_{Re}) + k_{sRe} (z_{tRe} - z_{Re})] + (l_f - l_r) M_L \quad (38)$$

$$m_{tFe} \ddot{z}_{wFe} = k_{tFe} (z_{wFe} - z_{tFe}) + k_{sFe} (z_{tFe} - z_{Fe}) + c_{sFe} (\dot{z}_{tFe} - \dot{z}_{Fe}) + l_f M_L \quad (39)$$

$$m_{tRe} \ddot{z}_{wRe} = k_{tRe} (z_{wRe} - z_{tRe}) + k_{sRe} (z_{tRe} - z_{Re}) + c_{sRe} (\dot{z}_{tRe} - \dot{z}_{Re}) - l_r M_L \quad (40)$$

3.2 Simulink 动力学仿真

为探究罐内液体晃动对喷雾机行驶稳定性的影

响,结合式(32)~(40)在 Matlab/Simulink 中搭建动力学仿真模型,如图 12 所示。

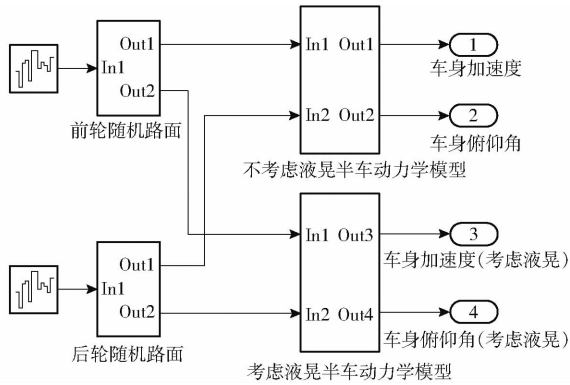


图 12 Simulink 半车动力学仿真模型

Fig. 12 Simulink half-car dynamics simulation model

仿真参数根据本团队已设计的小型喷雾机设置,半车车架质量 m_{sc2} 为 10.3 kg,前后非簧载质量 m_{tF} 、 m_{tR} 为 15.8 kg,悬架等效刚度 k_{sF} 、 k_{sR} 为 16 000 N/m,悬架等效阻尼系数 c_{sF} 、 c_{sR} 为 500 N·s/m,车轮等效刚度 k_{tF} 、 k_{tR} 为 20 000 N/m,前车轴与质心投影距离 l_f 为 0.75 m,后车轴与质心投影距离 l_r 为 0.5 m,喷雾机行驶速度 v 为 1.4 m/s,其中,仿真过程中随着罐内充液比的不同,半车簧载质量 m_{sc1} 、液体质量 m_{sc2} 、车身转动惯量 I_{sc} 如表 4 所示。

表 4 喷雾机仿真参数

Tab. 4 Simulation parameters of sprayer

充液比	半车簧载质量 m_{sc1}/kg	罐内液体质量 m_{sc2}/kg	车身转动惯量 $I_{sc}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$
0(空载)	103.7	0	89.7
0.1	117.9	14.2	90.8
0.2	141.7	38.0	95.9
0.3	172.6	68.9	101.8
0.4	208.7	105.0	108.1
0.5	241.8	138.1	113.4
0.6	274.7	171.0	118.2
0.7	308.2	204.5	122.8
0.8	338.7	235.0	126.8
0.9	342.7	239.0	127.3
1(满载)	356.9	253.2	129.3

仿真中以生成的随机路面为初始激励信号。结合喷雾机实际作业路况,选择仿真的路面激励模型为 E 级路面^[28-29]。采用一阶滤波带白噪声法建立路面激励时域模型

$$\dot{w}(t) = -2\pi n_{a0}vw(t) + 2\pi n_{a0}\sqrt{G_w(n_0)}vq(t) \quad (41)$$

式中 $w(t)$ ——路面位移输入, m

$\dot{w}(t)$ ——路面不平度垂直速度, m/s

$q(t)$ ——限带白噪声

v ——喷雾机行驶车速, m/s

n_{a0} ——路面空间截止频率, Hz

考虑前后车轮的路面激励存在一定的时间延迟,结合前后轴距及喷雾机行驶速度,生成车轮随机路面激励信号如图 13 所示。

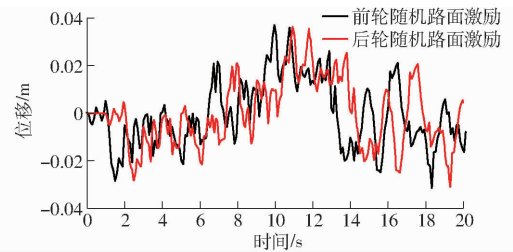


图 13 前后车轮随机路面激励

Fig. 13 Random road input for front and rear wheels

将喷雾机车身加速度与俯仰角速度作为信号输出,并以此作为评价指标,对比有无液体晃动时的仿真结果,如图 14 所示。

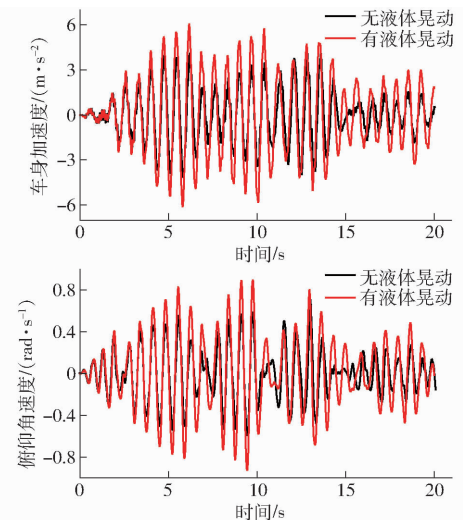


图 14 有无液体晃动时仿真结果对比

Fig. 14 Comparison of simulation results

由图 14 可知,当喷雾机在随机农田路面行驶时,由于药罐内液体晃动力作用,其车身加速度与俯仰角速度增大,降低了喷雾机行驶的平顺性。说明喷雾机行驶作业时,若将药罐药液视为刚体,忽略液体晃动的冲击作用时,难以准确分析喷雾机整机运动状态及车身姿态的变化。因此,本文所建立的液体纵向晃动等效力学模型可准确分析喷雾机整机行驶平顺性、稳定性。

为进一步分析喷雾机药液质量时变下液体晃动对整机性能影响,本文对不同充液比条件下的喷雾机垂向动力学特性进行对比分析。图 15 所示为充液比 0.1、0.5、0.9 下,喷雾机车身加速度与俯仰角速度的变化情况,并将不同充液比下两评价指标的最大值与均方根进行对比分析,如表 5 所示。

由图 15 可知,随着药液质量的增大,液体晃动

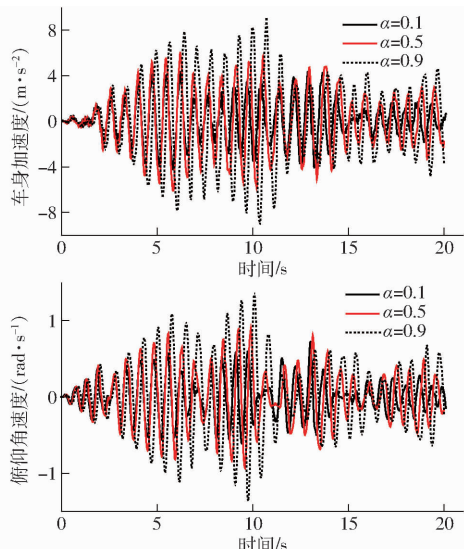


图 15 不同充液比下仿真结果对比

Fig. 15 Comparison of simulation results at different filling ratios

对喷雾机行驶作业的影响逐渐增大,且整车在路面激励下响应的滞后效应越明显。由表 5 可知,在相同质量下,若忽略液体晃动影响,将其视为簧载车身质量的一部分时,整车的俯仰角与车身加速度显著降低。对比是否考虑液晃影响下的数据结果,充液质量越大,两者的结果差值越大,进一步说明了液体晃动对整车行驶性能的影响。此外,当充液比为 0.8 时,整车的俯仰角与车身加速度达到最大值,此时的喷雾机行驶平顺性较差。由于空载与满载(即充液比为 0 和 1)时,不存在罐内液体晃动作用,因此,表 5 中上述两种特殊情况下是否考虑液体晃动的仿真结果相同。通过以上分析,本文所建立的药罐液体晃动等效模型,在揭示液体晃动作用对喷雾机行驶稳定性影响的同时,也能反映药液时变因素对其所造成的影响,为进一步研究喷雾机不同作业工况和药液质量时变下底盘结构优化及平顺稳定分析提供实施途径和参考方案。

表 5 不同充液比仿真结果对比

Tab. 5 Comparison of simulation results of each filling ratio

充液比	最大俯仰角/rad		最大加速度/(m·s ⁻²)		俯仰角均方根/rad		加速度均方根/(m·s ⁻²)	
	不考虑	考虑	不考虑	考虑	不考虑	考虑	不考虑	考虑
	液体晃动	液体晃动	液体晃动	液体晃动	液体晃动	液体晃动	液体晃动	液体晃动
0(空载)	0.70		4.19		0.24		1.73	
0.1	0.66	0.72	4.08	4.26	0.22	0.25	1.51	1.78
0.2	0.60	0.74	4.00	4.49	0.21	0.26	1.42	1.86
0.3	0.59	0.76	3.76	4.85	0.20	0.28	1.20	1.99
0.4	0.53	0.79	3.22	5.38	0.19	0.31	0.98	2.23
0.5	0.50	0.90	2.88	6.08	0.18	0.36	0.87	2.58
0.6	0.48	1.12	2.78	7.39	0.18	0.43	0.83	3.09
0.7	0.48	1.36	2.48	9.17	0.18	0.50	0.82	3.60
0.8	0.47	1.69	2.28	11.55	0.18	0.59	0.79	4.27
0.9	0.47	1.37	2.26	9.16	0.18	0.49	0.79	3.56
1(满载)	0.46		2.15		0.18		0.77	

4 结论

(1)建立了喷雾机药罐内液体纵向晃动的弹簧-质量-阻尼等效力学模型,并对模型参数进行了求解。应用 Fluent 建立了罐内液体晃动仿真模型,设计并进行了模拟液体晃动实验,实验结果表明,实际晃动液面曲线与 Fluent 仿真液面曲线相关系数大于 0.85,说明了基于 Fluent 的液体晃动仿真模型的准确性。

(2)应用 Matlab/Simulink 软件,建立等效力学数值解析模型,结合 Fluent 流体仿真结果,对比分析了充液比为 0.1、0.5、0.9 时液体纵向晃动作用在容

器壁的力矩变化规律。对比结果表明,所建立的等效力学模型力矩变化与 Fluent 中的力矩变化过程一致,验证了所建立的液体纵向晃动等效力学模型的正确性。

(3)建立了综合药罐液体晃动和不考虑药罐液体晃动的半车喷雾机四自由度垂向动力学模型,通过仿真对比分析表明,药罐内液体晃动使车身加速度与俯仰角速度增大,降低了喷雾机行驶的正平顺性。通过分析不同充液比条件下的喷雾机垂向动力学特性表明,当充液比为 0.8 时,整车行驶平顺性较差,在进行转场或喷药作业时应尽量避免充液比为 0.8 的情况。

参 考 文 献

[1] 孙文峰,何跃,付天鹏,等. 喷杆式喷雾机水平折叠喷杆设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):116-127,194.

- SUN Wenfeng, HE Yue, FU Tianpeng, et al. Design and test of horizontal folding spray boom of sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 116 - 127, 194. (in Chinese)
- [2] 郑加强, 徐幼林. 环境友好型农药喷施机械研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 1 - 16.
ZHENG Jiaqiang, XU Youlin. Development and prospect in environment-friendly pesticide sprayers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 1 - 16. (in Chinese)
- [3] 崔飞龙, 薛新宇, 乐飞翔, 等. 大型喷杆喷雾机钟摆式主被动悬架自适应鲁棒控制研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 130 - 141.
CUI Longfei, XUE Xinyu, LE Feixiang, et al. Adaptive robust control of active and passive pendulum suspension for large boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 130 - 141. (in Chinese)
- [4] 景亮, 张亚飞, 沈跃, 等. 四轮独立驱动高地隙无人喷雾机轨迹跟踪自适应控制[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 408 - 416.
JING Liang, ZHANG Yafei, SHEN Yue, et al. Adaptive trajectory tracking control of 4WID high clearance unmanned sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 408 - 416. (in Chinese)
- [5] 沈跃, 何思伟, 刘慧, 等. 高地隙喷雾机自转向电动底盘控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 385 - 392, 402.
SHEN Yue, HE Siwei, LIU Hui, et al. Modeling and control of self-steering electric chassis structure of high clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 385 - 392, 402. (in Chinese)
- [6] 王麒淦, 冯静安, 余希胜, 等. 高地隙喷雾机车液耦合作业平顺性优化[J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 140 - 150.
WANG Qigan, FENG Jing'an, YU Xisheng, et al. Optimization of operation ride comfort for locomotive-liquid-road coupling of high-clearance sprayer[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(16): 140 - 150. (in Chinese)
- [7] RAHMATI-ALAEI A, SHARAVI M, ZAKARIA M S. Hunting stability analysis of partially filled tank wagon on curved track using coupled CFD - MBD method[J]. Multibody System Dynamics, 2020, 50(1): 45 - 69.
- [8] 王琼瑶, RAKHEJA S, 上官文斌. 带弹性膜的部分充液罐车罐体内液体横向晃动的瞬态响应分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(5): 98 - 105.
WANG Qiongyao, RAKHEJA S, SHANGGUAN Wenbin. Liquid slosh in a partially filled liquid tank truck with an elastic membrane[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(5): 98 - 105. (in Chinese)
- [9] HARA K, WATANABE M. Application of the DAE approach to the nonlinear sloshing problem[J]. Nonlinear Dynamics, 2020, 99: 2065 - 2081.
- [10] SUN Y, ZHOU D, WANG J D. An equivalent mechanical model for fluid sloshing in a rigid cylindrical tank equipped with a rigid annular baffle[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 72: 569 - 587.
- [11] KOLAEI A, RAKHEJA S, RICHARD M J. Coupled multimodal fluid-vehicle model for analysis of anti-slosh effectiveness of longitudinal baffles in a partially-filled tank vehicle[J]. Journal of Fluids and Structures, 2017, 70: 519 - 536.
- [12] NOKHBATOLFOGHAI A, NOORIAN M A, HADDADPOUR H. Dynamic response of tank trains to random track irregularities[J]. Meccanica, 2018, 53: 2687 - 2703.
- [13] 李金辉, 卢剑伟, 姜俊昭, 等. 液体晃动对槽罐车摆振系统动力学响应的影响分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(2): 135 - 141.
LI Jinhui, LU Jianwei, JIANG Junzhao, et al. Effects of liquid sloshing on dynamic responses of a tank truck shimmy system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 135 - 141. (in Chinese)
- [14] NICOLSEN B, WANG L, SHABANA A. Nonlinear finite element analysis of liquid sloshing in complex vehicle motion scenarios[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 405: 208 - 233.
- [15] GROSSI E, SHABANA A. ANCF analysis of the crude oil sloshing in railroad vehicle systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 433: 493 - 516.
- [16] 郑雪莲, 李显生, 任圆圆, 等. 非满载罐体液体冲击等效机械模型参数确定[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(6): 53 - 58.
ZHENG Xuelian, LI Xiansheng, REN Yuanyuan, et al. Parameter values of equivalent mechanical model for liquid sloshing in partially-filled tanks[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2013, 40(6): 53 - 58. (in Chinese)
- [17] 郑雪莲, 李显生, 任圆圆, 等. 非满载汽车罐车液体冲击等效机械模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(6): 1488 - 1493.
ZHENG Xuelian, LI Xiansheng, REN Yuanyuan, et al. Equivalent mechanical model for liquid sloshing in partially-filled tank vehicle[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2013, 43(6): 1488 - 1493. (in Chinese)
- [18] 孙文财, 李伟建, 张景海, 等. 罐式半挂车侧倾稳定性动态耦合仿真[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(3): 980 - 986.
SUN Wencai, LI Weijian, ZHANG Jinghai, et al. Dynamic coupling simulation on roll stability of tank semi-trailer[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2020, 50(3): 980 - 986. (in Chinese)
- [19] 赵伟强, 封冉, 宗长富. 基于等效晃动模型的液罐车防侧翻控制策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(1): 30 - 35.
ZHAO Weiqiang, FENG Ran, ZONG Changfu. Anti-rollover control strategy of tank trucks based on equivalent sloshing model[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2018, 48(1): 30 - 35. (in Chinese)
- [20] 李建平, 边永亮, 霍鹏, 等. 喷雾机风送式环形喷管喷雾装置设计与试验优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 79 - 88.
LI Jianping, BIAN Yongliang, HUO Peng, et al. Design and experimental optimization of spray device for air-fed annular nozzle of sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 79 - 88. (in Chinese)

- LIU Aodi, DU Xuehui, WANG Na, et al. Blockchain-based access control mechanism for big data[J]. Journal of Software, 2019, 30(9): 2636 – 2654. (in Chinese)
- [24] XIAO Y, ZHANG N, LOU W J, et al. A survey of distributed consensus protocols for blockchain networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2020, 22(2): 1432 – 1465.
- [25] WANG Y H, CAI S B, LIN C L, et al. Study of blockchains's consensus mechanism based on credit[J]. IEEE Access, 2019, 7: 10224 – 10231.
- [26] WAN S H, LI M J, LIU G Y, et al. Recent advances in consensus protocols for blockchain: a survey[J]. Wireless Networks, 2020, 26(8): 5579 – 5593.
- [27] 乔蕊, 曹琰, 王清贤. 基于联盟链的物联网动态数据溯源机制[J]. 软件学报, 2019, 30(6): 1614 – 1631.
QIAO Rui, CAO Yan, WANG Qingxian. Traceability mechanism of dynamic data in internet of things based on consortium blockchain[J]. Journal of Software, 2019, 30(6): 1614 – 1631. (in Chinese)
- [28] 邵奇峰, 张召, 朱燕超, 等. 企业级区块链技术综述[J]. 软件学报, 2019, 30(9): 2571 – 2592.
SHAO Qifeng, ZHANG Zhao, ZHU Yanchao, et al. Survey of enterprise blockchains[J]. Journal of Software, 2019, 30(9): 2571 – 2592. (in Chinese)
- [29] VAIDYA B, MAKRAKIS D, MOUFTAH H T. Authentication and authorization mechanisms for substation automation in smart grid network[J]. Network IEEE, 2013, 27(1): 5 – 11.
- [30] TOUCEDA D S, CAMARA J M S, ZEDADALLY S, et al. Attribute-based authorization for structured peer-to-peer (p2p) networks[J]. Computer Standards & Interfaces, 2015, 42: 71 – 83.
- [31] 李风华, 陈天柱, 王震, 等. 复杂网络环境下跨网访问控制机制[J]. 通信学报, 2018, 39(2): 1 – 10.
LI Fenghua, CHEN Tianzhu, WANG Zhen, et al. Cross-network access control mechanism for complex network environment [J]. Journal on Communications, 2018, 39(2): 1 – 10. (in Chinese)
- [32] 王于丁, 杨家海. 一种基于角色和属性的云计算数据访问控制模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(11): 1150 – 1158.
WANG Yuding, YANG Jiahai. Data access control model based on data's role and attributes for cloud computing[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(11): 1150 – 1158. (in Chinese)

(上接第 182 页)

- [21] 姜红花, 牛成强, 刘理民, 等. 果园多风管风送喷雾机风量调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 298 – 307.
JIANG Honghua, NIU Chengqiang, LIU Limin, et al. Design and experiment of air volume control system of orchard multi-pipe air sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 298 – 307. (in Chinese)
- [22] 郑永军, 陈炳太, 吕昊墩, 等. 中国果园植保机械化技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 110 – 124.
ZHENG Yongjun, CHEN Bingtai, LÜ Haotong, et al. Research progress of orchard plant protection mechanization technology and equipment in China[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 110 – 124. (in Chinese)
- [23] 王伟伟, 谢进杰, 陈黎卿, 等. 3YZ – 80A 型履带自走式玉米行间喷雾机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 106 – 114.
WANG Weiwei, XIE Jinjie, CHEN Liqing, et al. Design and experiment of 3YZ – 80A crawler self-propelled corn interrow sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 106 – 114. (in Chinese)
- [24] 刘慧, 龙友能, 何思伟, 等. 四轮独立电驱动高地隙喷雾机辅助转向系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 30 – 37.
LIU Hui, LONG Youneng, HE Siwei, et al. Design and experiment of the auxiliary steering system for a four-wheel independent electrically driven high clearance sprayer[J]. Transactions of CSAE, 2021, 37(13): 30 – 37. (in Chinese)
- [25] 刘国海, 李持衡, 沈跃, 等. 同步转向高地隙喷雾机模糊自适应轨迹跟踪预测控制[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 389 – 399.
LIU Guohai, LI Chiheng, SHEN Yue, et al. Trajectory tracking and fuzzy adaptive model predictive control of high clearance synchronous-steering sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 389 – 399. (in Chinese)
- [26] 李遇春. 液体晃动动力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [27] 王照林, 刘延柱. 充液系统动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [28] 陈雨. 高地隙喷雾机独立式立轴空气悬架设计方法与特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
CHEN Yu. Research on design methods and characteristics of independent strut type air suspension system for high clearance sprayer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [29] 陈雨, 陈随英, 杜岳峰, 等. 基于摩擦阻尼的高地隙农机底盘悬架减振特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 51 – 57.
CHEN Yu, CHEN Suiying, DU Yuefeng, et al. Damping characteristics of chassis suspension system of high clearance agricultural machinery based on friction damper[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 51 – 57. (in Chinese)