

6-3-2020

Dynamic Simulation for Tethered Trailer Vehicle

Chen Ning

College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

Hongchao Ma

College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Dynamic Simulation for Tethered Trailer Vehicle

Abstract

Abstract: Tethered trailer vehicle is a non professional tractor that drags an unpowered vehicle with hemp rope. This conduct has many problems: poor operating stability, and high incidence of traffic accident. A nonlinear dynamic model for longitudinal, lateral, and yaw motions was developed. The model considers nonlinearity through a modified Dugoff's tire friction model, and is seven-degree-of-freedom. *A new nonlinear tethered tractor-trailer combination model was created to simulate critical parameters which would cause unstable state. Then, a trailer front-wheel steering feedback control strategy was derived with the goal of improving stability and trajectory tracking feature of the tractor-trailer system.* The comparison of the simulation results for tension of the hemp rope, trajectory feature, and handling stability clearly demonstrates the efficacy of feedback control for the tethered tractor-trailer combination.

Keywords

nonlinear vehicle model, rope-dragged tractor model, feedback control, simulation

Recommended Citation

Chen Ning, Ma Hongchao. Dynamic Simulation for Tethered Trailer Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(5): 950-956.

绳系拖挂车辆的动力学仿真

陈宁, 马洪超

(南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

摘要: 绳系拖挂车辆是指由非专业拖车用绳子牵引一辆故障车。这种拖挂方式操纵稳定性差, 前后车连接刚性差, 轨迹跟随性差, 易引起交通事故。为了研究绳系拖挂车辆系统的操纵稳定性, 选择 Dugoff 非线性轮胎模型, 考虑牵引车的纵向、侧向和横摆运动, 建立了七自由度车辆动力学模型及绳系拖挂系统模型。基于 Matlab/Simulink 分析了牵引绳长度对整个车辆系统的影响, 针对绳系拖挂车辆系统, 提出了挂车前轮自动转向的反馈控制策略, 以提高稳定性和轨迹跟随性。仿真结果显示: 所提出的挂车前轮转向反馈控制不仅提高了绳系拖挂车辆的稳定性, 也改善了挂车的轨迹跟随性。

关键词: 非线性车辆模型; 绳系拖挂车辆模型; 反馈控制; 仿真

中图分类号: U463.42

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 05-0950-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201705003

Dynamic Simulation for Tethered Trailer Vehicle

Chen Ning, Ma Hongchao

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Tethered trailer vehicle is a non professional tractor that drags an unpowered vehicle with hemp rope. This conduct has many problems: poor operating stability, and high incidence of traffic accident. A nonlinear dynamic model for longitudinal, lateral, and yaw motions was developed. The model considers nonlinearity through a modified Dugoff's tire friction model, and is seven-degree-of-freedom. A new nonlinear tethered tractor-trailer combination model was created to simulate critical parameters which would cause unstable state. Then, a trailer front-wheel steering feedback control strategy was derived with the goal of improving stability and trajectory tracking feature of the tractor-trailer system. The comparison of the simulation results for tension of the hemp rope, trajectory feature, and handling stability clearly demonstrates the efficacy of feedback control for the tethered tractor-trailer combination.

Key words: nonlinear vehicle model; rope-dragged tractor model; feedback control; simulation

引言

绳系拖挂车辆就是一辆非专业拖拉车辆用绳牵引一辆故障车辆, 虽然这是一种日常生活中比较

常见的临时现象, 但是这种拖挂方式却存在有许多问题, 如操纵稳定性差、前后车跟轨迹随性差等。在绳系拖挂车辆牵引运动时往往需要两车的驾驶员高度集中注意力并相互配合, 驾驶员要及时地做出判断并正确地操作车辆的转向运动。

早在二十世纪 30 年代, 德国的 L.Hubert 和 O.Dietz 开始了拖挂车横向稳定性研究。二十世纪 60 年代, F.D.Hales, J.R.Ellis, I.Schmid 等人从理



收稿日期: 2015-05-11 修回日期: 2015-09-14;
基金项目: 国家自然科学基金(11272159), 江苏省研究生创新工程(SJLX15_0406);
作者简介: 陈宁(1963-), 男, 江苏宜兴, 博士, 教授, 博导, 研究方向为车辆动力学与控制, 非线性振动; 马洪超(1991-), 男, 江苏徐州, 硕士, 研究方向为车辆动力学与控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 950 •

论方面研究了挂车的横向摆动。二十世纪 80 年代, 密歇根大学汽车研究中心完善地研究了拖挂车的操纵稳定性和制动性, 模拟分析和研究成果水平都已经上升到相当高的程度^[1]。湖南大学郭正康在上世纪 90 年代开展过全挂汽车列车的稳态转向特性试验^[2], 研究分析了全挂汽车列车在直行驱动和刹车时的纵向稳定性, 转向制动的方向稳定性。随着计算机科学的进步, 拖挂车辆的操纵稳定性和轨迹跟踪特性都得到了深入的研究。杨秀建等人研究半挂汽车列车在极限操纵工况下的平衡点分岔、相轨迹和 Hopf 分岔特性以及与载运工况的关系, 研究发现牵引车后轴侧滑而导致折叠是半挂汽车列车主要的横向失稳形式^[3]。张平霞等人针对多轴汽车利用 ADAMS 建立了 5 轴汽车的动力学模型, 利用 Simulink 建立了控制策略^[4]。Ren Yuan-yuan 等利用操稳图研究了半挂汽车列车的操纵稳定性, 研究发现, 具有两个非转向轴的牵引车不易受转向车速和载货量的影响^[5]。

拖挂车动力学模型方面, Shahram Azadi 等建立了一个罐车耦合模型, 并在模型基础上研究了关键参数对铰接式油罐车辆侧倾响应的影响^[6]。Erlcan kayacan 等建立了关于拖挂车辆系统的完全非线性的车辆模型, 并应用于自动转向领域^[7]。Jae Young Kang 等建立了一个新式的雪犁车仿真模型, 它不仅包含传统的扫雪车模型, 还拖挂一个可转向的犁^[8], 采用挂车主动转向的控制策略来改善前后车的轨迹跟踪特性, 取得了良好的效果。

本文对绳系拖挂车辆进行动力学建模与仿真, 分析绳牵引方式的缺陷, 提出挂车前轮转向反馈控制的控制策略, 改善绳系拖挂车辆的轨迹跟踪特性。该项研究也可用于其它移动设备的牵引控制。

1 车辆动力学建模与仿真

1.1 车辆动力学模型

考虑车辆模型如图 1 所示。该模型具有 7 个运动自由度, 包括车辆横向运动、纵向运动和横摆运

动, 以用 4 个车轮分别绕车轴的动力学转动。理想化假设各轮胎有相同的力学特性, 两前轮转角相同并且和方向盘转角构成比例关系。忽略传动系统各部件的阻尼, 传动系只起到扭矩传递的作用, 而且忽略扭转、摆振、车身变形等因素的影响。

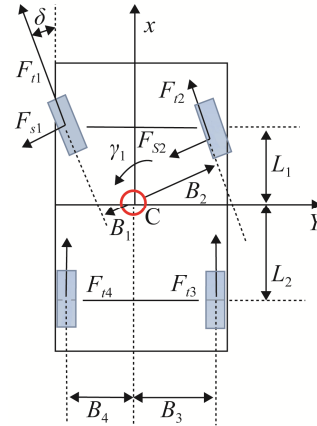


图 1 七自由度车辆模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 7-DOF model of vehicle

由车辆模型受力模型示意图, 可以得到车辆坐标系下沿纵向 X 轴和侧向 Y 轴两方向的车辆动力学方程:

$$m(\dot{v}_x - v_y \cdot r) = F_{11} \cdot \cos \delta - F_{s1} \cdot \sin \delta + F_{t2} \cdot \cos \delta - F_{s2} \cdot \sin \delta + F_{t3} + F_{t4} \quad (1)$$

$$m(\dot{v}_y + v_x \cdot r) = F_{s1} \cdot \cos \delta + F_{t1} \cdot \sin \delta + F_{s2} \cdot \cos \delta + F_{t2} \cdot \sin \delta + F_{s3} + F_{s4} \quad (2)$$

车辆绕其质心的横摆运动方程:

$$I_z \cdot \dot{\gamma} = B_1(F_{s1} \cdot \sin \delta - F_{t1} \cdot \cos \delta) + B_2(F_{s2} \cdot \sin \delta + F_{t2} \cdot \cos \delta) + B_3F_{t3} - B_4F_{t4} + L_1(F_{t1} \cdot \sin \delta + F_{s1} \cdot \cos \delta + F_{t2} \cdot \sin \delta + F_{s2} \cdot \cos \delta) - L_2(F_{s3} + F_{s4}) \quad (3)$$

车辆各轮胎的转动方程

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{I_w} \left[T_i - R_i F_{ti} - d_i F_{zi} - \frac{1}{2} T_{bki} \right] \quad (4)$$

式中: v_x 是车辆沿车辆坐标 x 轴的纵向速度; v_y 是车辆沿车辆坐标 y 轴的侧向速度; δ 是前轮转角; $F_{ti}, F_{si}(i=1, 2, 3, 4)$ 分别是各车轮上的纵向力和侧向力; T_i 是各车轮驱动力偶矩, 非驱动轮该项为 0;

T_{bki} 是各车轮制动力偶矩; B_1, B_2, B_3, B_4 为各车轮至 x 轴的距离; L_1, L_2 是车辆质心到前、后轴的距离。

1.2 车辆非线性轮胎模型

轮胎承受车辆的垂直载荷与地面的附着作用力, 汽车运动需借助轮胎与地面摩擦产生的相互作用力, 发动机输出的转矩也要通过轮胎与地面的摩擦转化为驱动力, 因此轮胎模型对于客观描述车辆动力学特征有重要影响。

H.Dugoff 等人提出的一种描述轮胎纵向滑动侧偏特性的轮胎模型^[9], 模型把轮胎与路面的接触区域近似看作矩形, 再根据车辆的运动状态、接触区域的弹性形变, 通过计算得到纵向滑移率和车轮侧偏角的变化量。然后根据车轮侧偏角 α 、轮胎的纵向滑移率 i_s 和轮胎垂直载荷 F_z , 就能够计算得到车轮的纵向力 F_l 及车轮的侧向力 F_s 。此轮胎模型中还涉及到车轮中心速度的影响, 有利于对轮胎旋转动力的描述, 本文中的车辆轮胎模型选用 Dugoff 轮胎模型, 轮胎侧向力计算公式为:

$$F_s = \frac{C_\alpha \times \tan \alpha}{1 - i_s} \times f(s) \quad (5)$$

$$f(s) = \begin{cases} 2(1-s), & s < 1 \\ 1, & s \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$s = \frac{\mu F_{zi}(1 - i_s)}{2\sqrt{c_i^2 \times i_s^2 + c_\alpha^2 \times \tan^2 \alpha}} \quad (7)$$

$$\mu = \mu_0(1 - E_r \times v \times \sqrt{i_s^2 + \tan^2 \alpha}) \quad (8)$$

式(7)中: 下标 $i=1, 2, 3, 4$ 分别为各车轮编号; C_i , C_α 分别为轮胎侧偏刚度和纵向刚度; i_s 为轮胎纵向滑移率; s 为轮胎动态参数; μ_0 为轮胎与地面之间的附着系数; F_{zi} 为各轮胎垂直载荷; E_r 为粘性附着系数。

1.3 车辆动力学仿真分析

根据前述推导公式, 选择相关车辆参数(见表 1), 在 Matlab/Simulink 中建立单车仿真模型, 仿真过程中车辆行驶于平直地面, 忽略空气动力学的影响, 前轮角阶跃输入角度为 0.1 rad, 仿真可得车辆质心侧偏角和横摆角速度的时域响应。

表 1 车辆参数

Tab. 1 The parameters of the vehicle.

参数名称	参数值
汽车质心到各轮的侧向距离 $B_1, B_2, B_3, B_4/m$	0.9
汽车质心到前、后轮轴的纵向距离 $L_1, L_2/m$	1.2, 1.3
汽车总质量 m/kg	1 500
车绕 z 轴的转动惯量 $I_z/kg \cdot m^2$	3 000
前牵引挂钩到前车轮轴的距离 h_1/m	0.8
后牵引挂钩到后车轮轴的距离 h_2/m	0.7
轮胎的纵向刚度 $c_l/(kn/rad)$	50
轮胎的侧片刚度 $c_\alpha/(kn/rad)$	30
行驶时轮胎的有效半径/m	0.3
前轮胎垂直载荷 $F_{z1}, F_{z2}/n$	3 825.9
后轮胎垂直载荷 $F_{z3}, F_{z4}/n$	3 535.6
轮胎与地面之间的附着系数 μ_0	0.85
粘性附着系数 E_r	0.015
车轮旋转惯量 $I_w/kg \cdot m^2$	2.1
传动系统传动比 $i_g i_0$	30
传动系传动效率 η_t	0.85
车辆质心高度 H/m	0.5
牵引绳参数 k_1, k_2	$10^4, 10^7$

分析图 2 和图 3 可知, 前轮转角阶跃输入激励下的牵引车始终能保持在稳定状态, 其质心侧偏角和横摆角速度都在合理范围。由此可知, 本文所建立的 7 自由度车辆动力学模型可以很好地描述车辆的实际运行状况。

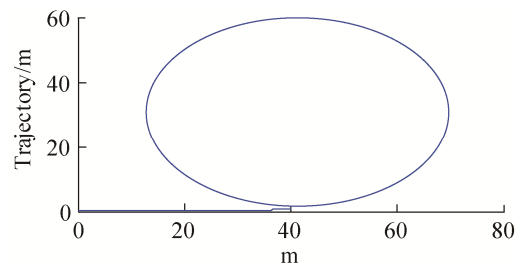


图 2 角阶跃输入下牵引车运动轨迹

Fig. 2 Trajectory of tractor with the angle step input

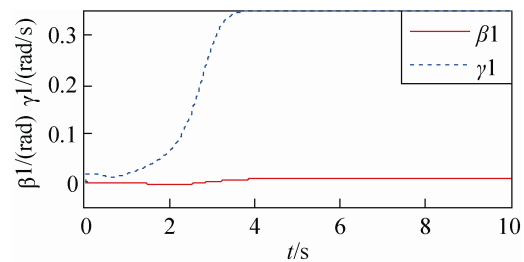


图 3 角阶跃输入下的质心侧偏角和横摆角速度

Fig. 3 The sideslip angle and yaw rate with the angle step input

2 绳系拖挂车辆的仿真分析

常见情况下, 绳系挂车是失去动力的故障车, 故只考虑其前轮可转向但各车轮无驱动力。绳系拖挂车辆的模型如图 4 所示。

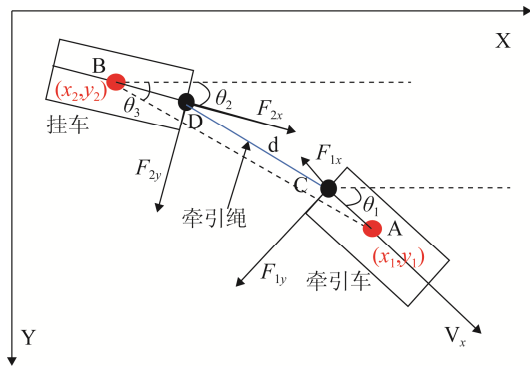


图 4 绳系拖挂车辆模型
Fig. 4 The model of rope trailer vehicle

由牵引车和挂车的质心点 A, B 的坐标点可得牵引绳连接点处的坐标点 C, D 为:

$$\begin{cases} (x_3, y_3) = (x_1 - (l_2 + h_2) \cos \theta_1, \\ \quad y_1 - (l_2 + h_2) \sin \theta_1) \\ (x_4, y_4) = (x_2 + (l_1 + h_1) \cos \theta_2, \\ \quad y_2 + (l_1 + h_1) \sin \theta_2) \end{cases} \quad (9)$$

牵引绳实际长度 d 为:

$$d = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2} \quad (10)$$

考虑牵引绳的应力应变关系是非线性的, 在进行仿真时, 不考虑绳子的强度, 拟合其受力变形试验曲线, 得牵引绳的牵引力与伸长量的近似关系:

$$T = \begin{cases} k_1 \Delta + k_2 \Delta^3 & \Delta \geq 0 \\ 0 & \Delta < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: Δ 为牵引绳的伸长量, $\Delta = d - s$; k_1 和 k_2 为绳子的刚度参数; s 为牵引绳长度。求出牵引绳在大地坐标系的单位方向向量, 计算得到牵引绳分别作用于牵引车和挂车的拉力为:

$$F_{1x} = \frac{-T_s}{d} [(x_3 - x_4) \cos \theta_1 + (y_3 - y_4) \sin \theta_1] \quad (12)$$

$$F_{1y} = \frac{-T_s}{d} [(x_3 - x_4) \sin \theta_1 - (y_3 - y_4) \cos \theta_1] \quad (13)$$

$$F_{2x} = \frac{T_s}{d} [(x_3 - x_4) \cos \theta_2 + (y_3 - y_4) \sin \theta_2] \quad (14)$$

$$F_{2y} = \frac{T_s}{d} [(x_3 - x_4) (-\sin \theta_2) + (y_3 - y_4) \cos \theta_2] \quad (15)$$

式中: F_{1x} , F_{1y} 为牵引绳对牵引车拉力在车辆坐标系下沿 x , y 轴的分量; F_{2x} , F_{2y} 为牵引绳对拖车拉力在车辆坐标系下沿 x , y 轴的分量。

根据上文的公式推导并在 Matlab/Simulink 中建立仿真模型(见图 5)。便于建模, 牵引车和挂车采用相同的车辆结构参数(见表 1)。影响绳系拖挂稳定性的因素主要由 3 个方面: 车辆参数、车速和牵引绳参数, 而牵引绳的参数包括绳长和刚度参数。参考国内外的研究文献, 牵引绳长度对拖挂车稳定性的影响任是研究空白, 故本文选择不同长短的牵引绳长模型进行仿真比较。参照实际生活中的牵引绳长度, 绳长分别取 3 m 和 5 m, 在牵引车前轮角阶跃输入为 0.02 rad, 挂车前轮无主动转向时, 分析牵引绳的张力、牵引车与拖车的轨迹跟随性、两车的质心侧偏角和横摆角速度变化曲线。

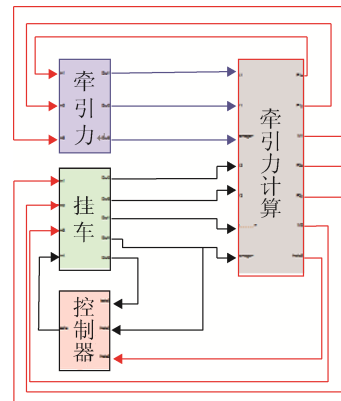


图 5 绳系拖挂车辆仿真模块图
Fig. 5 Simulation block diagram of the rope trailer

图 6 和图 7 对比显示在牵引绳绳长为 3 m 时两车的纵向速度很快趋于一致, 在牵引绳长为 5 m 的条件下, 在起始阶段由于牵引绳的张弛影响使得两车纵向速度会交替变化, 表明此时整个拖挂系统还没有进入稳定状态。图 8 和图 9 表明在绳长 3 m 时, 在起始阶段整个拖挂系统会有小幅的振动, 之后牵引车和拖车都是趋于稳定的。两车的轨迹跟随误差保持稳定。当绳长增加到 5 m 时, 整个拖挂系统的振动问题凸显, 其振幅和频率都有大幅的增加; 两车的轨迹跟随误差也明显增大; 牵引绳张力也成倍

提高; 两车的质心侧偏角差值有小幅增大; 横摆角速度并没有明显增加, 稳定时两车的横摆角速度差值基本保持不变。以上分析表面牵引绳长度对绳系

拖挂车辆的操作稳定性影响很大, 绳长的增加会导致拖车的轨迹跟踪性能降低, 牵引绳张力增大, 可能导致一定的危险。

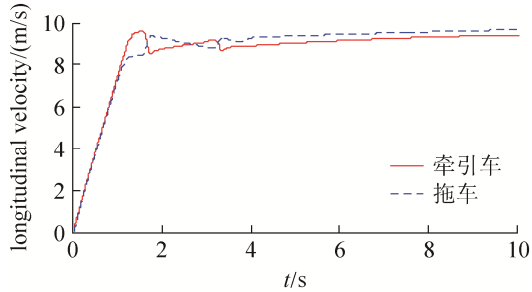


图 6 绳长 3 m 时的纵向速度

Fig. 6 The longitudinal velocity when the length of rope is 3 m

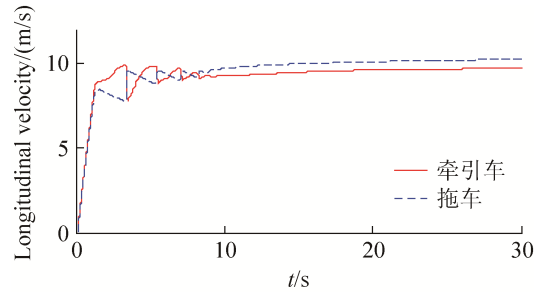
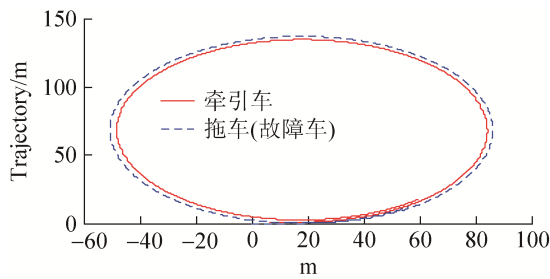


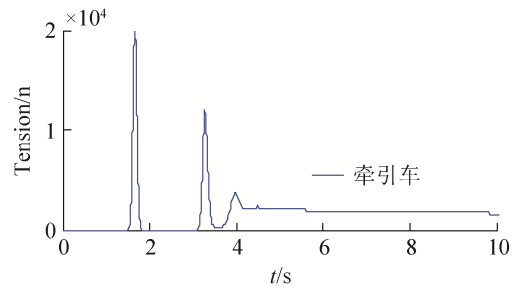
图 7 绳长 5 m 时的纵向速度

Fig. 7 The longitudinal velocity when the length of rope is 5 m



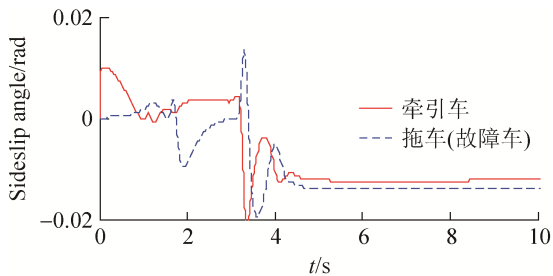
(a) 拖挂系统的运动轨迹

(a) The moving trail of trailer system



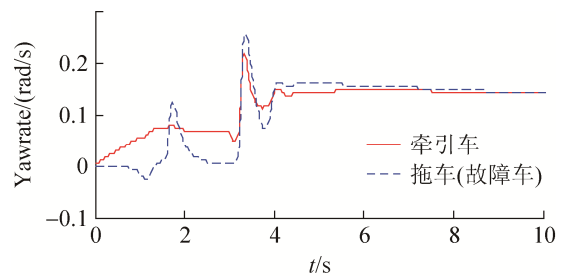
(b) 牵引绳张力

(b) The tension of the traction rope



(c) 拖挂系统的质心侧偏角

(c) The sideslip angle of the trailer system

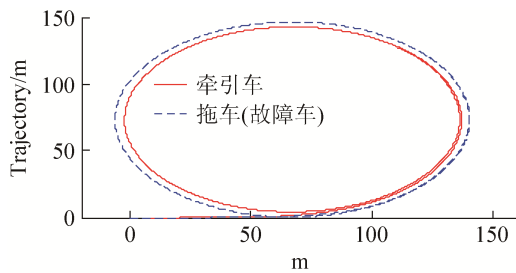


(d) 横摆角速度

(d) The yaw rate

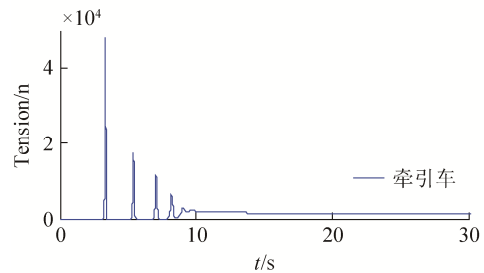
图 8 绳长 3 m 时的车辆响应曲线

Fig. 8 The response curve of the vehicle when the rope length is 3 m



(a) 拖挂系统的运动轨迹

(a) The moving trail of trailer system



(b) 牵引绳张力

(b) The tension of the traction rope

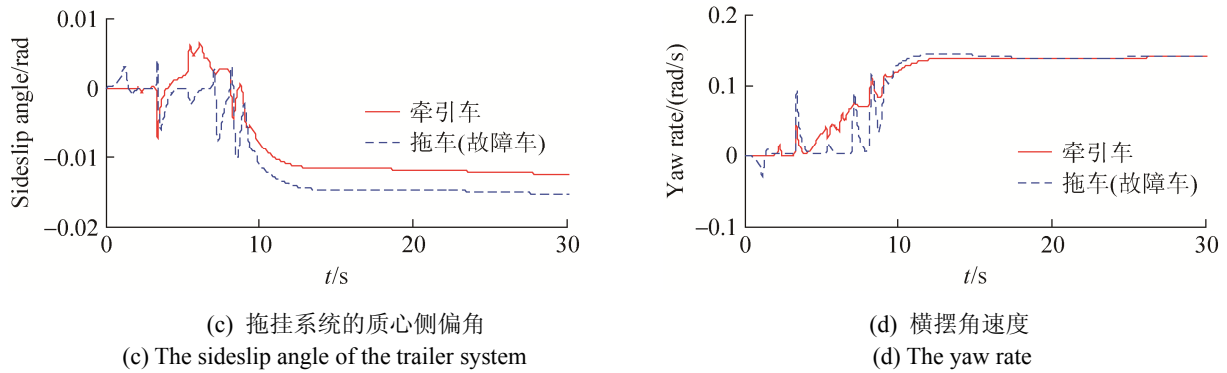


图 9 绳长 5 m 时的车辆响应曲线
Fig. 9 The response curve of the vehicle when the rope length is 5 m

3 控制策略研究

从上节的仿真结果显示, 在转弯过程中, 如果挂车的前轮不主动转向, 则挂车与牵引车之间将产生相互干涉而导致两车的操纵稳定性下降, 前后的车轨迹跟踪性降低, 进而引起牵引绳的断裂或其他安全性问题。挂车如何主动转向? 本文设想了 2 种转向方案: (1) 挂车中有一位驾驶员根据牵引车和挂车之间的方向偏差调整挂车前轮方向, 因此可引入驾驶员预瞄数学模型; (2) 挂车前轮有自动转向功能, 其根据牵引力与挂车的方向偏差自动调整前轮转向。这 2 种控制方式除偏差量选择不同, 其基本原理是相同的, 都属于反馈控制, 限于篇幅, 下面只讨论挂车自动转向方案。

自动转向控制策略基于控制理论中的反馈控制原理, 采用安装在挂车牵引点的双向力传感器获得牵引绳的张力与牵引车正前方的方向偏差量, 从而给方向盘一定转动角度, 整个过程是随着车辆运动和路径变化不断调整连续过程, 其数学模型只包含二个方程, 即方向偏差量计算方程和前轮转向角。反馈方程, 见式(16):

$$\delta_f(t) = K_m \Delta \phi (t - T_s) \quad (16)$$

式中: T_s 为机械机构的延迟时间; K_m 为增益系数; $\Delta \phi$ 为牵引力与车辆正前方的偏差角。对式(16)两侧进行拉普拉斯变换:

$$\delta_f(s) = \frac{K_m \Delta \phi}{e^{T_s s}} \quad (17)$$

式中: $e^{T_s s}$ 展为 Taylor 级数, 考虑到时间时滞量 T_s

是小量, 取级数前二项则可得:

$$(1 + T_s s) \delta_f(s) = K_m \Delta \phi \quad (18)$$

对式(18)进行拉普拉斯逆变换得挂车前轮转向控制律:

$$\dot{\delta}_f(t) = -\frac{1}{T_s} \delta_f(t) + \frac{1}{T_s} K_m \Delta \phi \quad (19)$$

则挂车前轮主动转向的反馈控制方程为:

$$\begin{cases} \Delta \phi = \theta_3 - \theta_2 - \beta_2 \\ \dot{\delta}_f(t) = -\frac{1}{T_s} \delta_f(t) + \frac{1}{T_s} K_m \Delta \phi \end{cases} \quad (20)$$

3.1 基于反馈控制的整车仿真

图 10 显示当绳长为 5 m 时, 牵引车和拖挂车轨迹跟随误差很大, 为对比本节驾驶员反馈控制策略的控制效果, 仿真车辆的结构参数取相同值(表 1)。

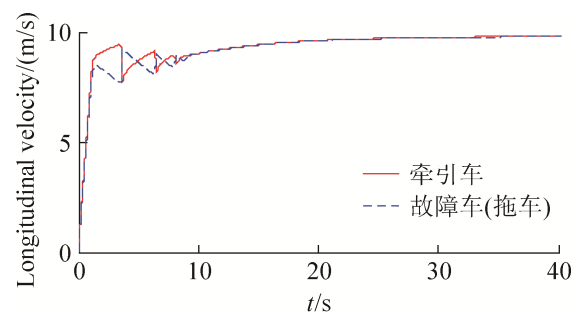


图 10 绳长 5 m 时, 基于反馈控制的车辆纵向速度曲线
Fig. 10 The longitudinal velocity curve of the vehicle based on feedback control when the rope length is 5 m

对比图 10~11 可知, 在应用前轮转向反馈控制后, 绳系拖挂车的轨迹跟随性明显改善, 两车运动轨迹一致。牵引车与挂车的质心侧偏角和横摆角速

度的变化特征基本相同，且数值相差不大。牵引绳张力的最终稳定值不变，且起始阶段的波动频率下降。验证了挂车前轮主动转向反馈控制策略有效性。

4 结论

建立了七自由度的绳系拖挂车辆动力学仿真模型，基于 Matlab/simulink 软件分析了牵引绳长度对拖车操纵稳定性的影响；考虑绳系拖挂车辆的实际情况，借鉴驾驶员单点预瞄模型，提出了挂车前轮主动转向的反馈控制策略，仿真分析验证了其对改善绳系拖挂车辆轨迹跟随特性性的有效性。由此可总结如下结论：

(1) 牵引绳长度对绳系拖挂车辆的稳定性有很大影响，绳长增加会明显降低两车的操作稳定性，但考虑刹车距离和驾驶员反应时滞等现实情况，绳长也不宜很短 4~5 m 是较合适的长度，得到的仿真结果较好。

(2) 拖挂车(故障车)的主动转向对整个绳系拖挂系统的轨迹跟随性有关键性的影响，挂车前轮主动转向控制策略可以明显改善拖挂车辆的轨迹跟踪特性。

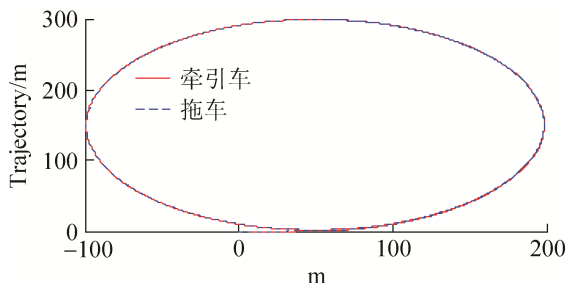
(3) 鉴于本文采用 Dugoff 轮胎模型，引入挂车前轮主动转向反馈控制策略后，整个绳系拖挂车辆系统，特别是挂车，在车辆速度增加到某一值后，会出现明显的间歇振动问题，具体引发间歇振动的原因还有待深入探究。

参考文献:

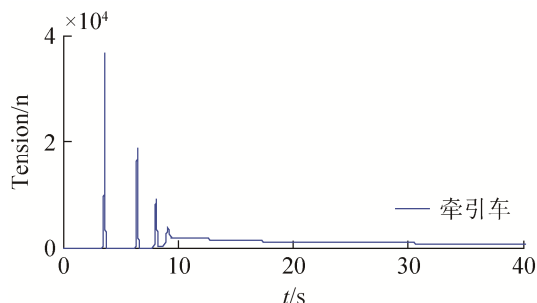
[1] 许洪国, 刘宏飞, 于增亮. 汽车列车横向稳定性研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23(2): 141-146, 150. (Xu Hongguo, Liu Hongfei, Yu Zengliang. Research on the Lateral stability of road rain [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(2): 141-146, 150.)

[2] 郭正康. 全挂汽车列车制动性能的研究 [J]. 汽车技术, 1990(8): 29-34.(Guo Zhengkang. Study on braking performance of the trailer train [J]. Automobile Technology, 1990(8): 29-34.)

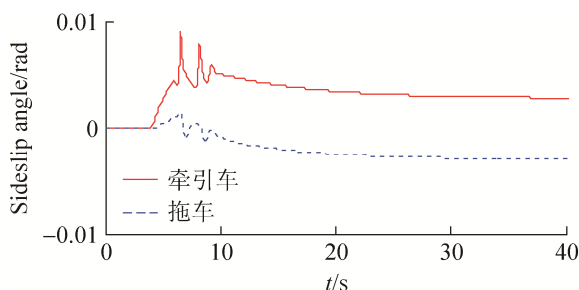
[3] 杨秀建, 康南, 李西涛. 半挂汽车列车横向失稳的非线性动力学机制 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 79-89. (Yang Xiujian, Kang Nan, Li Xitao Nonlinear Dynamics and Lateral Stability of tractor Semi-trailer Vehicle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 79-89.)



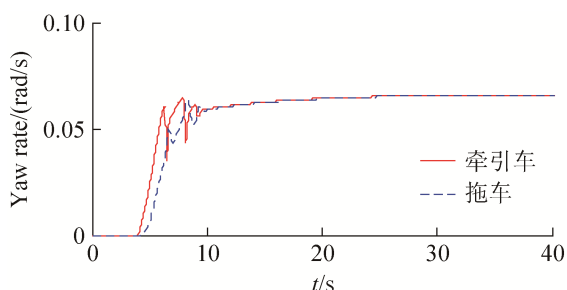
(a) 牵引车和拖车轨迹轨迹
(a) The moving trail of of tractor and trailer



(b) 牵引绳张力
(b) The tension of the traction rope



(c) 牵引车、拖车质心侧偏角
(c) The sideslip angle of tractor and Trailer



(d) 牵引车、拖车横摆角速度

图 11 绳长 5 m 时，基于反馈控制的整车响应曲线
Fig. 11 The response curve of the vehicle based on feedback control when the rope length is 5 m