

Analysis of Steering Characteristics of Semi-Trailer Based on 3rd Axle Self-Steering

Dongcheng Huang¹, Zhiling Chen²

¹Jiangsu Tianjia Vehicle Technology Co., Ltd., Jiangdu Jiangsu

²Foton Motor Inc., Beijing

Email: huangdongcheng@jstianjia.com

Received: Jan. 30th, 2017; accepted: Feb. 13th, 2017; published: Feb. 16th, 2017

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The modeling coordinate was defined and the vehicle parameters were presented. The several maneuverability cases were conducted with the two virtual prototypes, including 360-degree turning, 90-degree turning, step steering and ramp steering at the low-speed. The effect of self-steering axle on vehicle maneuverability and path-following was analyzed. The results show that, not only the side slip of semi-trailer is lightened, but also the maneuverability and path-following performance of tractor-semitrailer are improved if assembled a self-steering axle.

Keywords

Tractor-Semitrailer, Self-Steering Axle, Maneuverability, Handling Stability

基于第3轴随动转向的半挂汽车转向特性分析

黄冬成¹, 陈治领²

¹江苏天嘉车辆技术有限公司, 江苏 江都

²北汽福田汽车股份有限公司, 北京

Email: huangdongcheng@jstianjia.com

摘要

建立的半挂汽车列车模型, 进行转向机动性分析, 包括低速 360° 转弯、低速 90° 转弯、低速角阶跃转向和斜坡脉冲转向试验, 分析随动桥对整车转向机动性和半挂车轨迹跟随性能的影响。仿真结果表明: 随动桥有利于减小半挂车向转向内侧的侧滑, 有助于提高半挂汽车列车的转向机动性和半挂车第三轴的轨迹跟随能力。

关键词

半挂车, 随动转向桥, 转向机动性, 操纵稳定性

1. 引言

为满足道路和轴荷等法规要求, 现代半挂汽车列车的半挂车多采用多轴式。由于几何尺寸不匹配和转向不协调, 多轴半挂汽车列车转向时轮胎的侧向滑动较大, 这对轮胎和路面都将产生极为不利的影响。轮胎磨损构成了半挂汽车列车运输成本的重要部分, 半挂车轮胎的正常使用寿命是 5~10 万公里, 而在非正常磨损下寿命仅为 1~2 万公里, 三轴半挂车的第三轴轮胎磨损尤为严重[1]。

随动转向桥是提高半挂汽车列车转向机动性和减轻轮胎磨损的一种有效技术路线, 能够提高半挂汽车列车转向的顺畅性和平稳性, 并能有效降低半挂汽车列车因轮胎磨损造成的运输成本[2]。目前国外主要对主动式随动桥的控制策略进行研究[3], 针对被动式随动桥的研究较少。而国内主要关注半挂汽车列车侧倾稳定性、操纵稳定性、转向制动稳定性和平顺性等方面的研究, 对随动转向半挂汽车列车的运动特性研究很少。

本研究探讨该随动桥的基本结构和转向原理, 研究其改善半挂汽车列车低速转向机动性的效果, 分析不同转向条件下随动桥的工作性能, 进行随动桥的半挂汽车列车操纵稳定性分析。

2. 问题的基本特征

随动转向半挂汽车列车在行驶过程中, 前转向桥向右转向, 如图 1 所示。为保证前桥和随动桥的瞬时转向轴线相交同一点 O , 半挂车第三轴车轮应向左转过一定角度。

建立的半挂汽车列车模型, 进行低速满载转向机动性分析, 研究半挂车第三轴质心相对牵引座中心轨迹跟随性能的变化, 以及转弯半径、偏移距、转弯轨道宽和折叠角等机动性指标的变化。半挂汽车列车高速行驶时, 随动桥锁止与否对整车操纵稳定性具有直接的影响, 对随动桥和未锁止的整车模型分别进行角脉冲转向和单移线转向运动仿真。

为评价随动桥对整车机动性的影响, 国外通常采用低速 360° 和 90° 转弯试验。对于低速 360° 转弯试验, 不同国家要求汽车列车满足的通道圆内外径不同, 本研究规定通道圆内外径分别满足 8.95 m 和 11.25 m, 并且各国标准采纳的最低试验车速也不同[4]。针对随动桥实验规定为: 车速 5 km/h 时, 采用 12.5 m 的通道圆外径; 车速 25 km/h 时, 采用 25 m 的通道圆外径。

3. 整车建模及参数

在 Catia 中建立整车三维模型, 如图 2 所示。主要整车参数如表 1 和表 2。该牵引车的驱动形式为

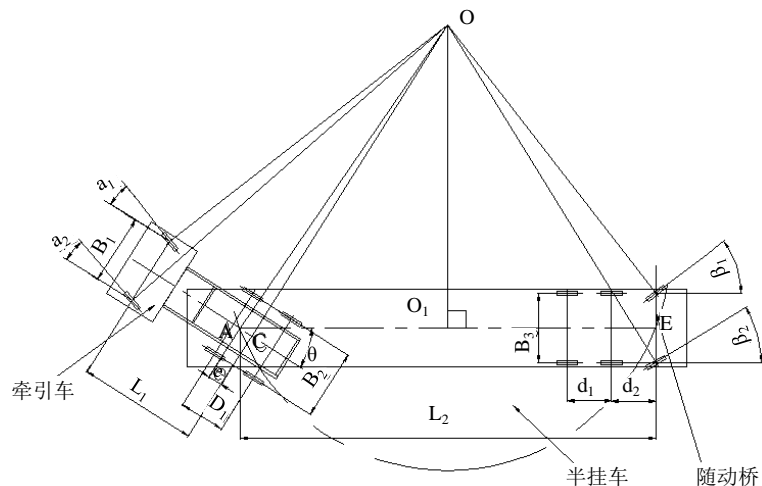


Figure 1. The curve turning model of tractor-semitrailer
图 1. 半挂汽车列车的弯道转向运动模型

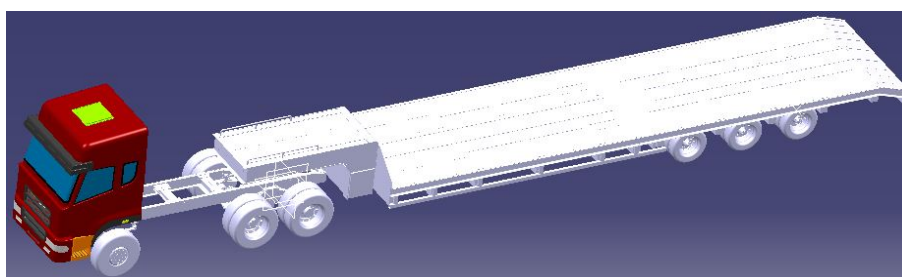


Figure 2. 3D model of tractor-semitrailer
图 2. 半挂汽车列车三维模型

Table 1. The main parameters of tractor
表 1. 牵引车主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
驱动形式	6 × 4	轴数	3
外形尺寸/mm	7100 × 2490 × 3575	总质量/kg	24,980
整备质量/kg	8755	额定载质量/kg	28,000
前轮距/mm	1950	后轮距/mm	1860
前轴荷/kg	6980	并装双轴轴荷/kg	9000
轮胎规格	11R20	轴距/mm	3380 × 1350
轮胎数	10	弹簧片数	9/13
前悬/mm	1470	后悬/mm	730
最高车速/km/h	90	发动机重量/kg	875
主销后倾角/°	4	主销内倾角/°	4
前束/mm	5	外倾角/°	1
发动机型号	WP10.340E32	变速箱型号	12JS160TA
后 1 桥主减速比	4.875	后 2 桥主减速比	4.875

Table 2. Main parameters of trailer**表 2.** 半挂车主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
外形尺寸/mm	16,000 × 3000 × 1790	总质量/kg	38,250
整备质量/kg	10,250	额定载质量/kg	28,000
轮胎规格	8.25R15	轴距/mm	10,860 × 1360 × 1360
轮胎数	12	弹簧片数	4/4/4
并装三轴轴荷/kg	23,590	轮距/mm	2250
前悬/mm	1615	后悬/mm	1935

6 × 4 型, 在 ADAMS/Car 的模型中, 半挂汽车列车由众多子系统共同组成, 部分子系统模板可通过修改已有模板参数来建立。但适合本车型牵引车平衡悬架、半挂车悬架、钢板弹簧和随动桥的模板需要根据实际结构进行搭建。采用固定在车辆上的直角坐标系对半挂汽车列车进行整车建模, 坐标系原点定义为牵引车第三轴轴线与整车纵向对称面的交点, 建模时所有模板的硬点和标记点坐标均参考该点。

通过建立生成各个模板对应的子系统, 修改子系统的特性参数, 将所有车辆子系统和试验台装配, 建立对比分析整车模型; 参考相关文献和标准, 填写仿真设置对话框, 进行整车仿真分析; 进入仿真后处理界面, 构建仿真需要的分析曲线。

4. 低速 360° 转弯转向机动性分析

偏移距指标反映了车辆保持车道的行驶能力, 可用来评价车辆在移线过程中与周围环境发生碰撞风险的几率。图 3 和图 4 为 360° 转弯试验中牵引车前轴和半挂车第三轴质心的轨迹, 通过取曲线上若干数据点, 利用作图法, 可求得普通半挂汽车列车的最大偏移距为 1295 mm, 随动转向半挂汽车列车的最大偏移距为 1110 mm, 最大偏移距约减少 14.3%。

考虑到牵引车外廓最外点和半挂车最内点不易表达, 采用转弯轨道宽(牵引车前桥外轮和半挂车第三轴内轮转弯半径差)代替通过宽度来评价半挂汽车列车转向对道路宽度的要求。同理可作牵引车前桥外轮和半挂车第三轴内轮的运动轨迹, 求得普通半挂汽车列车的最大转弯轨道宽为 3801 mm, 随动转向半挂汽车列车的最大转弯轨道宽为 3516 mm, 故最大转弯轨道宽约减小 7.5%。

随动桥的初始运动轨迹会略向外偏移, 这是由于随动桥和前桥为逆相位转向运动, 随动桥相对于第五轮有向外运动的趋势, 但偏移量不大, 不会对整车的机动性造成过多影响。

由图 5 和图 6 可求, 普通半挂汽车列车中第五轮中心和和半挂车第三轴质心的最大轨迹偏差为 1291 mm, 随动转向半挂汽车列车中第五轮中心和和半挂车随动桥质心的最大轨迹偏差为 1016 mm, 最大轨迹偏差约减小 21.3%, 故随动桥能显著提高半挂车第三轴的轨迹跟随能力。

如图 7 所示, 在 360° 转弯试验中, 折叠角从 5.3 s 开始不断增加, 牵引车和半挂车的折叠角在 25 s 左右达到稳定状态, 普通半挂汽车列车的稳定折叠角为 14.7°, 随动转向半挂汽车列车的稳定折叠角为 12.7°, 稳定折叠角约减小 13.6%。图 8 为 360° 转弯试验中半挂车的横摆角速度响应曲线, 可知随动转向半挂车的横摆角速度小于普通半挂车, 则随动转向半挂车的瞬时转弯半径大, 其行驶轨迹更靠近牵引车的轨迹。综上表明随动转向半挂车第三轴向转向内侧的侧滑较小, 其质心轨迹与牵引车轨迹重合度更高。

5. 低速 90° 转弯转向机动性分析

低速 90° 转弯也是用来评价半挂汽车列车机动性的一项重要试验, 行驶车速常取 10 km/h。根据半挂汽车列车转弯的偏移距和通道宽度等参量, 可用于评价半挂汽车列车实际直角转弯道路的机动性。

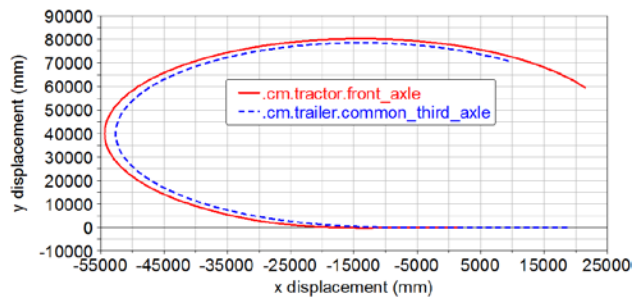


Figure 3. CG trajectory of front axle and trailer third axle of common tractor-semitrailer axle of self-steering tractor-semitrailer

图 3. 半挂汽车列车前轴和半挂车第三轴质心轨迹



Figure 4. CG trajectory of front axle and trailer third axle of common tractor-semitrailer axle of self-steering tractor-semitrailer

图 4. 随动转向半挂汽车列车前轴和半挂车第三轴质心轨迹

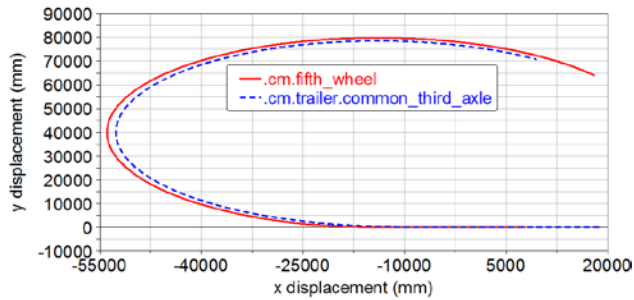


Figure 5. Path-following of common tractor-semitrailer in 360-degree turning test in 360-degree turning test

图 5. 普通半挂汽车列车 360°转弯跟随轨迹



Figure 6. Path-following of self-steering tractor-semitrailer in 360-degree turning test in 360-degree turning test

图 6. 随动转向半挂汽车列车 360°转弯跟随轨迹

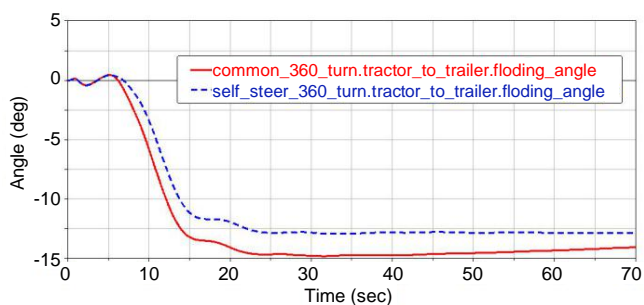


Figure 7. The folding angle change of tractor-semitrailer in 360-degree turning test semi-trailer in 360-degree turning test

图 7. 半挂汽车列车 360°转弯折叠角变化

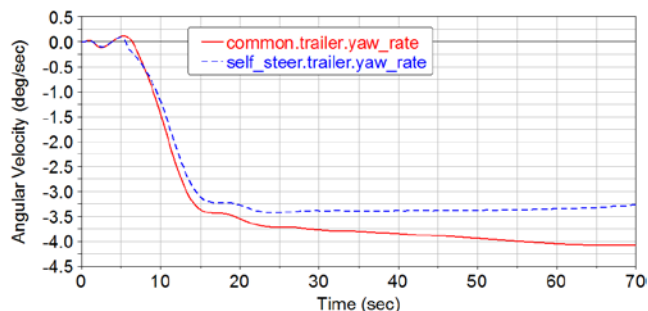


Figure 8. The yaw rate of common and self-steering in 360-degree turning test semi-trailer in 360-degree turning test

图 8. 360°转弯普通半挂车和随动转向半挂车横摆角速度响应

如图 9 和图 10, 在 90°转弯试验中, 普通半挂汽车列车的最大偏移距为 3578 mm, 随动转向半挂汽车列车的最大偏移距为 3160 mm, 偏移距约减少 11.6%, 故随动桥有利于提高半挂汽车列车通过狭窄道路的能力和降低转弯对道路条件的要求。

如图 11 和图 12 所示, 普通半挂汽车列车中第五轮和和半挂车第三轴的最大轨迹偏差为 2460 mm, 而随动转向半挂汽车列车中第五轮和和半挂车第三轴的最大轨迹偏差为 1926 mm, 最大轨迹偏差约减小 21.7%。如图 13 所示, 90°转弯试验中, 随动转向半挂车的横摆角速度稳定值小于普通半挂车, 即随动转向半挂车的稳态转弯半径变大。故随动转向能提高半挂车的轨迹跟随能力, 减轻半挂车轮胎的侧滑磨损和提高轮胎的使用寿命。

如图 14 所示, 在 90°转弯仿真中, 折叠角从 6.3 s 开始逐渐增加到最大值, 然后逐渐恢复到零值, 符合半挂汽车列车 90°转弯的实际运动规律。普通半挂汽车列车的折叠角最大值为 27.8°, 随动转向半挂汽车列车的折叠角最大值为 23.9°, 折叠角最大值约减小 14.0%, 但随动转向半挂汽车列车达到最大折叠角的时间要略滞后普通半挂汽车列车。

6. 低速角阶跃转向分析

360°和 90°转向均为定路径试验, 为评价随动转向半挂汽车列车的瞬态和稳态响应特性, 国内外学者常进行低速前轮角阶跃转向运动仿真。本文采用转向盘角阶跃转向运动仿真, 机动性评价指标包括转弯轨道宽、稳态转弯半径、偏移距、横摆角速度响应和折叠角等。在仿真试验中, 系统首先驱动整车模型等速直线行驶, 然后在较短的时间使转向盘急速转动到某值, 保持该转向角度使汽车逐渐过渡到等速圆周运动。在 2~2.4 s 半挂汽车列车转向盘转角从 0°阶跃至 100°, 固定转向盘至仿真结束。

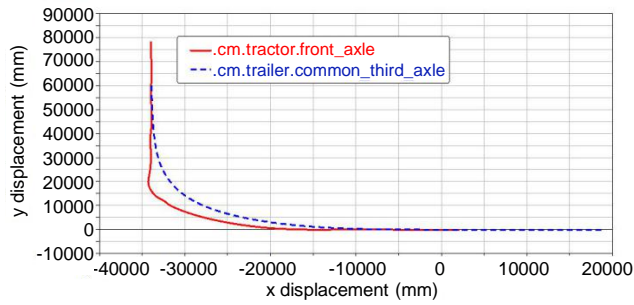


Figure 9. CG trajectory of front axle and trailer third axle of common tractor-semitrailer third axle of self-steering tractor-semitrailer
图 9. 普通半挂汽车列车前轴和半挂车第三轴质心轨迹

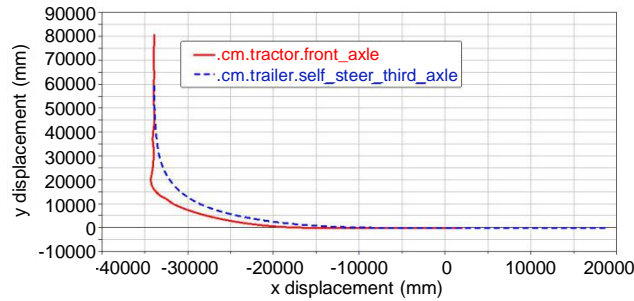


Figure 10. CG trajectory of front axle and trailer third axle of common tractor-semitrailer third axle of self-steering tractor-semitrailer
图 10. 随动转向半挂汽车列车前轴和半挂车第三轴质心轨迹

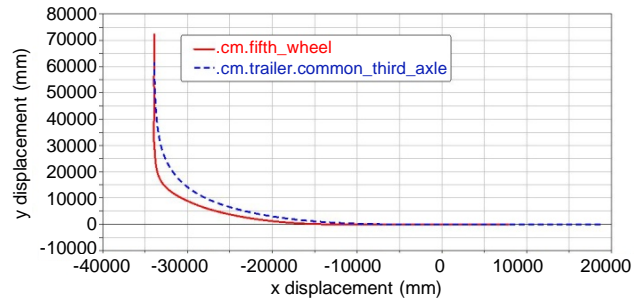


Figure 11. Path-following of common tractor-semitrailer in 90-degree turning test in 90-degree turning test
图 11. 普通半挂汽车列车 90°转弯轨迹跟随轨迹

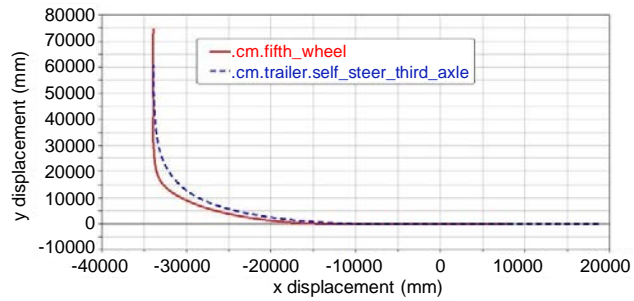


Figure 12. Path-following of self-steering truck in 90-degree turning test in 90-degree turning test
图 12. 90°转弯中随动转向半挂汽车列车轨迹跟随轨迹



Figure 13. The yaw rate of common and self-steering semi-trailer in 90-degree turning test

图 13. 90°转弯中普通半挂车和随动转向半挂车横摆角速度响应

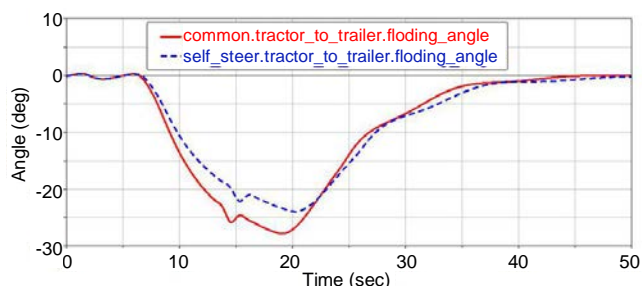


Figure 14. The folding angle change of tractor-semitrailer in 90-degree turning test

图 14. 90°转弯中半挂汽车列车折叠角变化

由图 15 和图 16 可知, 普通半挂车第三轴质心与第五轮中心轨迹偏差最大值为 984 mm, 而随动转向半挂车第三轴质心与第五轮中心轨迹偏差最大值为 814 mm, 轨迹偏差约减小 17.3%, 故安装随动转向桥后, 半挂车第三轴的跟随性能得到明显改善。

在角阶跃转向开始时, 随动桥的运动轨迹相对于零线会略向外偏移, 偏移量最大值为 36 mm, 偏移量较小, 不会对整车的转向运动产生较大影响, 随动转向半挂汽车列车会逐渐进入等速圆周行驶。如图 17 所示, 安装随动桥后半挂车的横摆角速度稳定值较小, 表明随动转向半挂车的转弯半径变大, 半挂车向内侧偏移量较小, 且初始转向时刻横摆角速度与稳定横摆角速度的方向相反。

图 18 和图 19 为牵引车前轴和半挂车第三轴质心轨迹, 普通半挂汽车列车的最大偏移距为 1121 mm, 随动转向半挂汽车列车的最大偏移距为 957, 最大偏移距约减小 14.6%。同理根据转弯轨道宽的定义, 可求普通半挂汽车列车最大转弯轨道宽为 3215 mm, 随动转向半挂汽车列车最大转弯轨道宽为 2912 mm, 最大转弯轨道宽约减小 9.4%, 故在转向过程中随动转向半挂汽车列车需要较小的通道圆半径, 其转向机动性相对较高。

在角阶跃转向试验中, 相对于随动转向半挂汽车列车, 同一时刻普通半挂汽车列车的折叠角更大, 表明半挂车向牵引车转向内侧的偏移量大, 轮胎侧滑和磨损严重。在半挂汽车列车进入稳定状态后, 普通半挂汽车列车和随动转向半挂汽车列车的折叠角分别为 10.3°和 9.4°, 安装随动桥后折叠角约降低 8.7%, 如图 20 所示。

7. 斜坡脉冲转向分析

斜坡脉冲转向仿真试验控制转向盘以设定的斜率持续转向, 通过求解出一些重要的试验结果, 如横摆角速度、转向盘转角、车身侧倾角和侧向加速度等, 进而研究汽车的时域过渡特性。本文利用斜坡脉

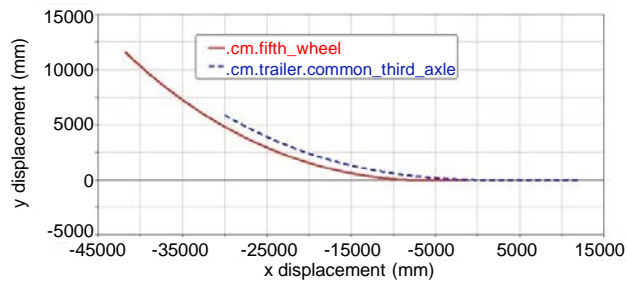


Figure 15. Path-following of common tractor-semitrailer in step turning test
图 15. 角阶跃转向试验中普通半挂汽车列车跟随轨迹图

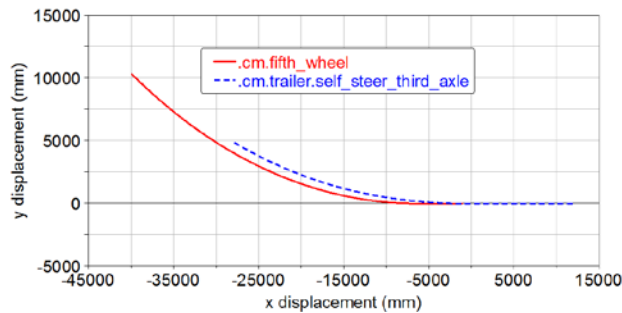


Figure 16. Path-following of self-steering tractor-semitrailer in step turning test
图 16. 角阶跃转向试验中随动转向半挂汽车列车跟随轨迹

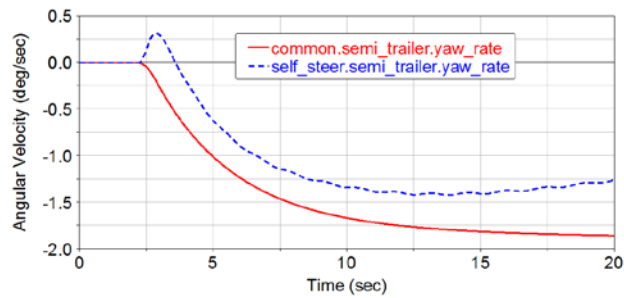


Figure 17. The yaw rate of common semi-trailer and self-steering semi-trailer in step turning test
图 17. 角阶跃转向试验中普通半挂车和随动转向半挂车的横摆角速度响应

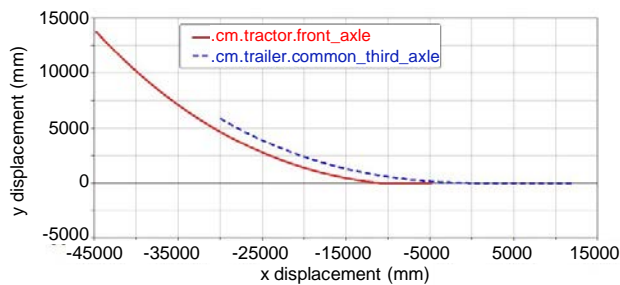


Figure 18. CG trajectory of front axle and trailer third axle of common tractor-semitrailer
图 18. 普通半挂汽车列车牵引车前轴和半挂车第三轴质心轨迹



Figure 19. CG trajectory of front axle and trailer third axle of common tractor-semitrailer

图 19. 随动转向半挂汽车列车牵引车前轴和随动桥质心轨迹

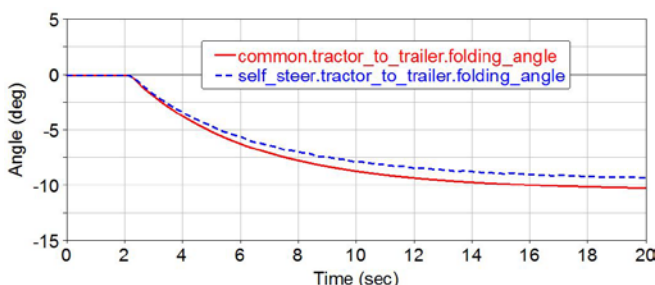


Figure 20. The folding angle change of tractor-semitrailer in step test

图 20. 角阶跃转向试验中半挂汽车列车折叠角变化

冲转向模拟转向盘转角持续增加, 进而研究随动桥轨迹跟随性能的变化。设定转向盘初始值为 0° , 5 s~15 s 转向盘转角以斜率为 15 的加速度递增, 最后转向盘转角为 225° 。

经计算 20 s 时普通半挂车第三轴质心和第五轮中心的轨迹偏差为 859 mm, 如图 21 所示, 而随动转向半挂车第三轴质心和第五轮中心的轨迹偏差为 627 mm, 如图 22 所示, 两者的轨迹线偏差更小, 轨迹偏差约减小 27.0%, 故在连续改变转向盘转向角度时, 随动桥的转角也相应增加, 能显著改善半挂车的轨迹跟随能力。

为了更显著观察随动桥改善半挂车第三轴的跟随性能的效果, 将半挂车刚性桥和随动桥质心轨迹置于同一图中, 由图 23 可知随动桥轨迹更加偏向第五轮轨迹, 减小了半挂车向牵引车转向方向内侧偏移。即在牵引车持续增加转向角的过程中, 随动桥能调整车轮转角来响应牵引车的转向运动。同时随动桥也会影响牵引车的运动, 图 24 为牵引车前桥外轮的轨迹, 可知安装随动桥后牵引车前桥外轮的转弯半径更小, 故半挂车第三轴采用随动桥可减小整车的转弯半径。

如图 25 所示, 在前桥连续转向运动中, 半挂汽车列车的折叠角从第 5.3 s 开始不断增加, 且同一时刻随动转向半挂汽车列车的折叠角较小, 第 20 s 时随动转向半挂汽车列车和普通半挂汽车列车的折叠角分别为 13.8° 和 15.6° , 折叠角约减小 11.5%, 即在前桥连续转向时, 随动桥可减小半挂车向牵引车转向内侧的偏移量, 减轻滑磨对半挂车第三轴轮胎的损害。

8. 高速行驶的半挂汽车列车的操稳性

随动桥的转向激励与车速相关, 车速越高产生的随动转角越大, 这对高速行驶的半挂汽车列车的操稳性影响可能更大, 故进行车速为 55 km/h 和 65 km/h 的单移线转向试验。图 26 和图 27 为部分仿真结果, 将仿真结果汇总成表 3, 其中峰值最大变化为未锁止时的各参量峰值相对于锁止时各参量增加的百分比。

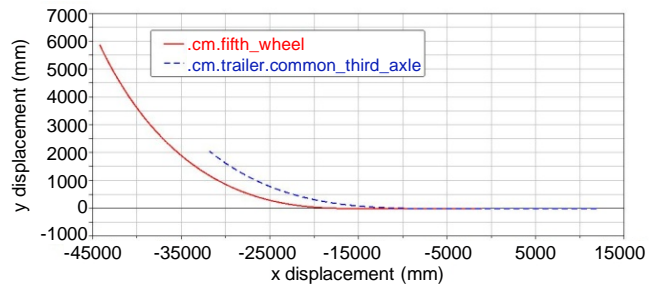


Figure 21. Path-following of common tractor-semitrailer in ramp turning test in ramp turning test

图 21. 普通半挂汽车列车跟随轨迹图斜坡脉冲仿真

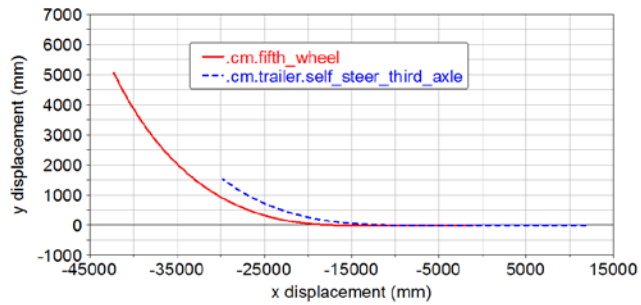


Figure 22. Path-following of self-steering tractor-semitrailer in ramp turning test in ramp turning test

图 22. 随动转向半挂汽车列车跟随轨迹图斜坡脉冲仿真

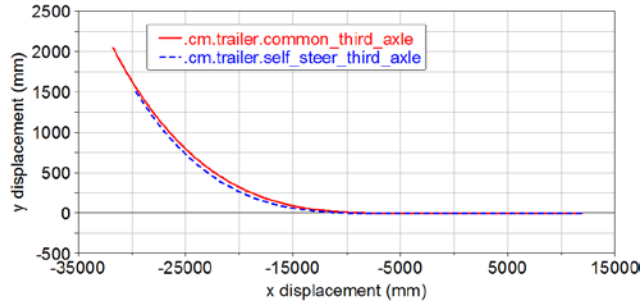


Figure 23. The trace coordinates of rigid axle and self-steering axle tractor front axle

图 23. 半挂车刚性桥和随动桥质心轨迹坐标

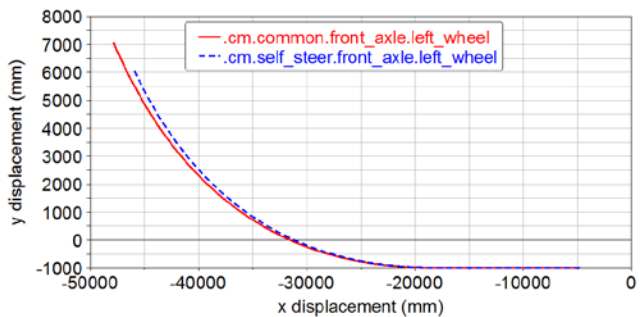


Figure 24. The trace coordinates of left wheel of and self-steering axle tractor front axle

图 24. 牵引车前桥外轮轨迹坐标



Figure 25. The folding angle change of tractor-semitrailer in ramp turning test

图 25. 斜坡脉冲转向半挂汽车列车折叠角变化

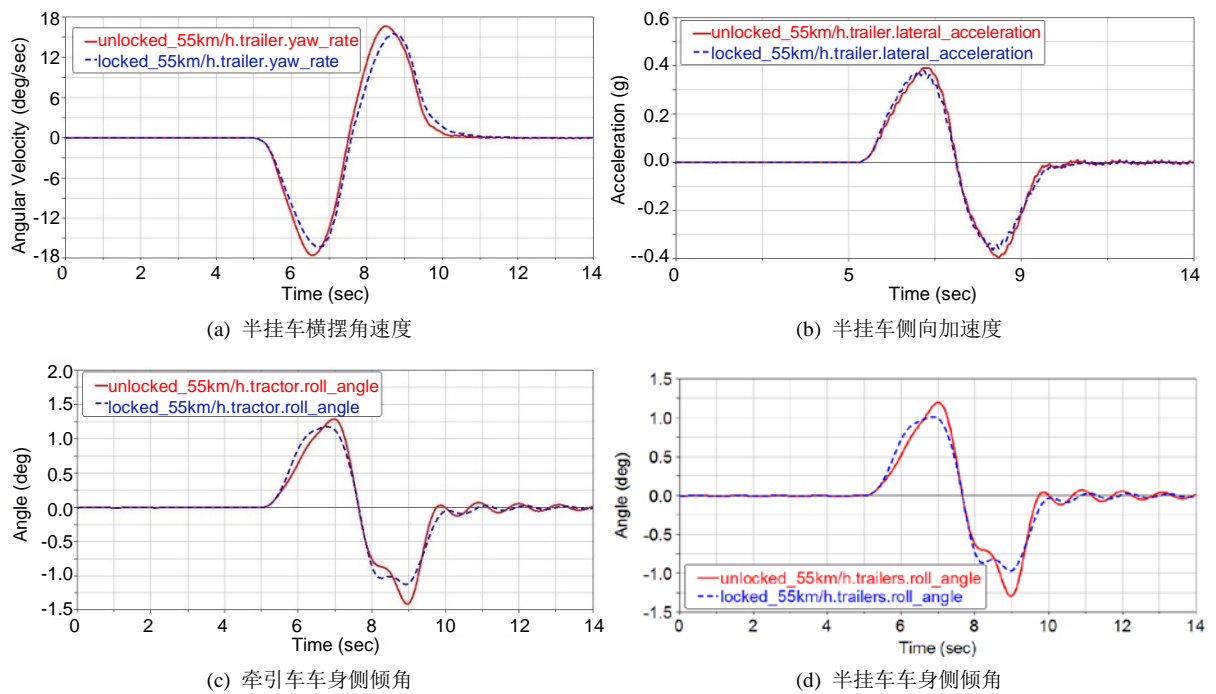


Figure 26. The handing stability parameters comparison when vehicle velocity is 55 km/h

图 26. 55 km/h 时整车操纵稳定性参量对比

Table 3. The influence of self-steering axle working condition on handing stability

表 3. 随动桥锁止与否对整车操纵性的影响

评价参量	锁止			未锁止			峰值最大变化(%)		
	55 km/h	60 km/h	65 km/h	55 km/h	60 km/h	65 km/h	55 km/h	60 km/h	65 km/h
半挂车横摆角速度($^{\circ}/s$)	16.2	17.6	19.2	17.5	19.9	24.4	8.0	13.1	27.1
半挂车侧向加速度(g)	0.35	0.40	0.45	0.39	0.45	0.52	11.4	12.5	15.5
牵引车车身侧倾角($^{\circ}$)	1.12	1.26	1.38	1.41	1.75	2.02	25.9	38.9	46.4
半挂车车身侧倾角($^{\circ}$)	0.97	1.13	1.29	1.29	1.66	1.96	33.0	46.9	51.9

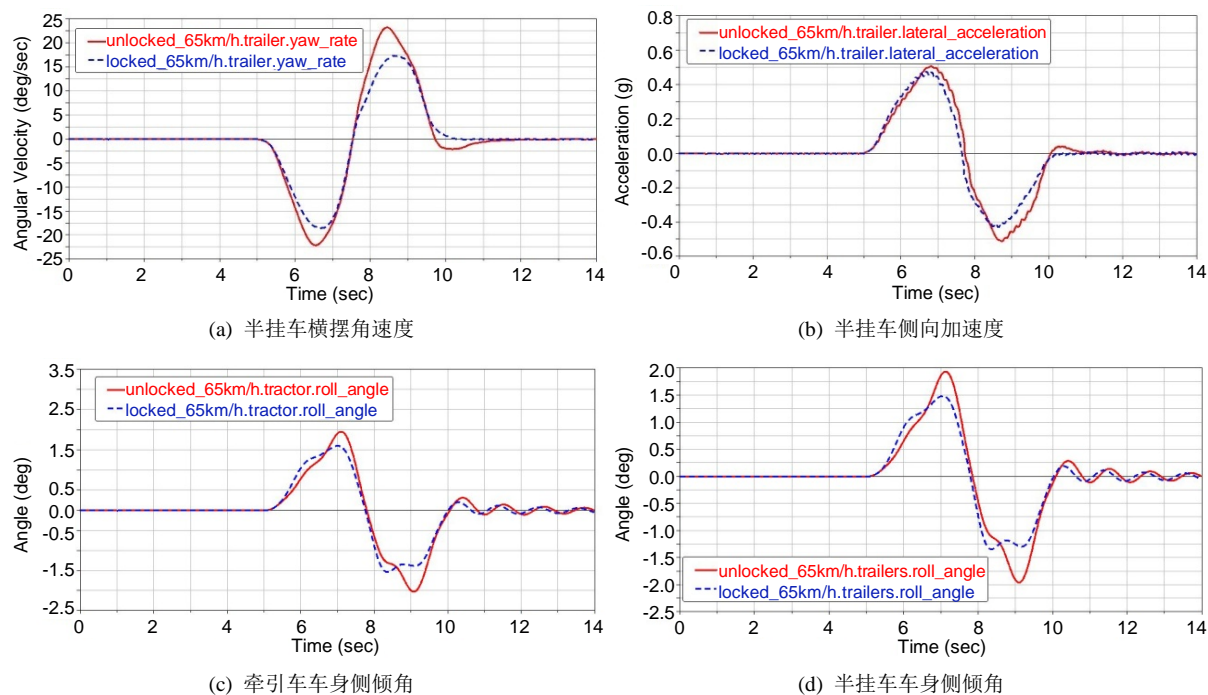


Figure 27. The handling stability parameters comparison when vehicle velocity is 65 km/h

图 27. 65 km/h 时整车操纵稳定性参数对比

相对于随动桥锁止的半挂汽车列车, 随着车速的增加, 半挂车横摆角速度、半挂车侧向加速度、牵引车车身侧倾角和半挂车车身侧倾角峰值增加的百分比越大。并且各个参量的峰值变化也不是线性增加, 如随着车速递增, 半挂车的横摆角速度峰值增量分别为 8.0%、13.1% 和 27.1%。高速行驶时, 随动桥可引起半挂汽车列车车身侧倾角较大的变化, 当速度为 65 km/h 时, 相对于随动桥未锁止的情况, 牵引车和半挂车的车身侧倾角峰值分别高出 46.4% 和 51.9%。综上所述, 高速行驶下, 随动桥不锁止对半挂汽车列车的操纵稳定性影响较大, 速度越高影响越显著, 且导致半挂汽车列车发生严重的失稳的车速阈值较小。

9. 小结

对搭建的两个整车模型进行转向机动性仿真试验, 包括低速 360°转弯、低速 90°转弯、低速角阶跃转向和斜坡脉冲转向运动, 分别从轨迹跟随、偏移距、转弯轨道宽、横摆角速度响应和折叠角等指标分析其机动性。不同转向运动仿真表明, 随动桥有助于提高半挂汽车列车的机动性, 减小低速转向所需场地和半挂车第三轴向转向内侧的偏移。

参考文献 (References)

- [1] 李西涛. 半挂汽车列车操纵稳定性分析与评价研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [2] 杨海琴. 基于 ADAMS 的多轴汽车操纵稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [3] Prati, A., Besselink, I.J. and Nijmeijer, H. (2014) A Trailer Steering Strategy for the B-Double Combination. *13th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology*, San Luis.
- [4] GB/T25979-2010. 重型商用汽车列车和铰接客车横向稳定性试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ojtt@hanspub.org