

【工程与技术】

多轴重型半挂车弯道制动行驶稳定性仿真分析

贾会星, 杨章林, 姚 芳

(滁州职业技术学院 机械与汽车工程学院, 安徽 滁州 239000)

摘 要:利用 Trucksim 软件建立了五轴重型牵引车和单轴半挂车组成的重型半挂车模型, 对五轴重型牵引车设置了双前轴转向和单前轴转向两种转向模式, 对重型半挂车整车制动设置了各轴制动采用防抱死制动系统(ABS)控制和不采用 ABS 控制两种制动模式, 并对其进行弯道制动行驶仿真分析。仿真结果表明, 多轴重型半挂车在弯道制动行驶时, 采用 ABS 制动控制显著优于未采用 ABS 制动控制, 采用双前轴转向略优于采用单前轴转向。因此, 多轴重型半挂车在弯道制动行驶时, 牵引车采用双前轴转向, 制动采用 ABS 控制可获得最佳的行驶稳定性。

关键词:多轴重型半挂车; 行驶稳定性; 双前轴转向; 防抱死制动系统; 仿真分析

中图分类号: U 469.2 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.issn.2097-4973.2026.04.010

0 引言

多轴重型半挂车装载质量大, 运输效率高, 在公路运输中应用广泛。但由于其载重质量大, 牵引车和挂车之间的铰接紧急制动时容易发生折叠, 车辆在弯道制动行驶时容易失稳侧翻, 故对其弯道制动行驶工况进行研究有重要的意义。因实车试验难度大, 成本高, 危险性高, 故对多轴重型半挂车的弯道制动行驶稳定性的研究多采用软件仿真进行。

卜凡合等提出了一种基于差速制动控制的重型半挂车主动防侧翻策略, 采用线性二次型最优控制理论设计了防侧翻控制器, 并融合了基于逻辑门限值的滑移率控制, 以防止制动时车轮发生抱死, 其所提出的控制方法有效改善了车辆转弯时的侧向稳定性^[1]。赵夜城利用 AMESim、Matlab/Simulink 和 Trucksim 搭建了多轴重型半挂车协同制动控制策略的联合仿真模型, 仿真结果表明, 该协同制动控制策略可减小牵引车车轮与半挂车车轮纵向速度差值以及车轮转速差值, 降低制动过程中半挂车对牵引车产生的冲击, 缩短整车制动时间和制动距离^[2]。董禄等以车辆横向载荷转移率为控制系统的触发输入, 针对货车高速行驶时的紧急转向工况, 采用差动制动方式, 结合车辆侧翻特性, 提出一种基于变论域理论的模糊 PID 控制方法, 通过输出相应车轮制动力调节车辆的侧向加速度, 来抑制车辆侧翻趋势^[3]。吴桐等以电子机械制动为载体, 研究了转向制动工况下的汽车制动力分配策略, 以最大纵向力为依据计算制动力分配系数, 实现了制动力优化分配, 根据汽车行驶工况、载荷状态和路面附着条件, 动态调节制动力分配比例, 提升了转向制动工况汽车的循迹能力^[4]。汤海浪结合 Simulink 和 Adams/Car 中的车辆模型, 以提高汽车稳定性为目标, 研究了汽车主动前轮转向和防抱死制动系统(ABS)的协同控制策略, 设计了模糊控制转向控制器与

收稿日期: 2025-07-31

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重点项目(2022AH052657); 安徽省高校中青年教师培养行动项目(DTR2024079)

第一作者简介: 贾会星(1978—), 男, 安徽来安人, 教授, 硕士, 主要从事汽车行驶稳定性研究。

E-mail: jiahuixing_0@163.com

比例-积分-微分(PID)制动控制器的协同策略,并进行了仿真研究,结果表明在主动转向-制动联合工况下,该协同控制策略能够有效降低车辆制动距离,提高汽车行驶稳定性^[5]。张羽等以某四轮转向商用车为研究对象,以横向载荷转移率为侧翻评价指标,建立了“四轮转向+差动制动”的防侧翻综合控制策略,利用 Trucksim 和 Matlab 进行了转向盘角阶跃输入工况和鱼钩工况的仿真试验,结果表明该策略改善了车辆的侧向稳定性和道路跟随能力^[6]。吴志成等建立了包含轮胎魔术公式的双前轴转向三轴汽车二自由度运动微分方程,研究了双前轴转向三轴汽车的双前轴转向角比值对车辆操纵稳定性的影响,对比了双前轴转向角比值对几种轴距和质心位置不同的车辆稳态和瞬态响应的影响,得到了稳态横摆角速度增益、反应时间和超调量等操纵稳定性指标随双前轴转向角比值变化的规律,研究结果表明根据车辆设计参数改变双前轴转向角比值可以改善车辆操纵稳定性^[7]。王印等以某多轴商用车为研究对象,探讨了一种电动转向器及电动推杆的匹配计算方法,并基于 CATIA/DMU 模块对转向系统杆系机构进行运动仿真分析,通过准确把握两个转向前轴转向梯形及传动系统的运动规律,优化了双前轴电动转向系统布置,保证了双前轴的轴协调运动^[8]。王成志等根据 Ackermann 定理,以最大绝对误差为目标函数作数学优化,以最大绝对误差及最小传动角的等值线图可视化技术为辅助,对双前轴转向车辆转向杆系,进行了优化分析^[9]。以上研究多以车辆制动力的分配策略为目标,研究其控制策略对车辆转向行驶稳定性的影响,其使用的仿真模型以传统单前轴转向为主,对双前轴转向的研究偏重于转向系统的结构优化和参数设计。目前双前轴转向在多轴牵引车上已经广泛应用,对于多轴重型汽车而言,车辆行驶失稳多发生在转向和制动工况,特别是在弯道转向并同时制动时尤为显著,但目前对多轴重型汽车同时涉及双前轴转向和制动力控制的研究较少。

本文拟通过重型汽车动力学仿真软件 Trucksim 对多轴重型半挂车弯道制动行驶时的稳定性进行仿真分析,研究多轴重型半挂车弯道制动行驶时采用双前轴转向和单前轴转向,以及重型半挂车整车各轴制动时车轮是否采用 ABS 控制对弯道制动行驶时的稳定性和安全性的影响。

1 仿真模型的建立

研究对象选择 Trucksim 软件中的五轴重型牵引车 5A Tractor,该车第一轴为转向从动轴,第二轴为从动轴可设置为转向轴或非转向轴,第三、四、五轴为驱动轴,从动轴每侧为单轮,驱动轴单侧为双轮,半挂车选择单轴双轮的厢式挂车,具体外形结构如图 1 所示。



图 1 多轴重型半挂车模型

牵引车部分簧载质量为 6 310 kg,车身横摆惯量为 $19\,665\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,车身侧翻惯量为 $6\,879\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,车身俯仰惯量为 $21\,711\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,第一、二车轴非簧载质量为 275 kg,第一、二车轴轮距为 2 070 mm,第三、四、五车轴非簧载质量为 760 kg,第三、四、五车轴轮距(内侧)为 1 863 mm,第三、四、五车轴双胎距为 310 mm,第一、二车轴轴距为 1 100 mm,第一、三车轴轴距为 4 900 mm,第一、四车轴轴距为 6 000 mm,第一、五车轴轴距为 7 100 mm,第一、二车轴侧倾/横摆惯量为 $400\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,第三、四、五车轴侧倾/横摆惯量为 $295\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,第一、二车轴左右车轮旋转惯量为 $10\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,第三、四、五车轴左右车轮旋转惯量为 $20\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,重心距地面的距离为 485 mm,重心距第一车轴的距离为 1 400 mm,轮胎宽度为 265 mm,轮胎自由半径为

520 mm, 轮胎刚度为 980 N/mm, 牵引车铰接点距离第一轴为 6 000 mm, 铰接点距离地面高度为 1 100 mm。

挂车部分簧载质量为 6 000 kg, 车身横摆惯量为 $54\ 000\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 车身侧翻惯量为 $10\ 140\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 车身俯仰惯量为 $54\ 000\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 挂车车轴非簧载质量为 665 kg, 车轴轮距(内侧)为 1 863 mm, 双胎距为 310 mm, 左右车轮旋转惯量为 $20\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 轮胎宽度为 265 mm, 轮胎自由半径为 520 mm, 轮胎刚度为 980 N/mm, 铰接点距离地面高度为 1 100 mm, 挂车质心距离铰接点为 5 221 mm, 挂车质心距离地面高度为 1 935 mm, 挂车长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 10 000 mm $\times$ 2 438 mm $\times$ 2 950 mm; 挂车装载货物质量为 18 340 kg, 货物质心距离铰接点为 6 000 mm, 货物质心距离地面高度为 2 300 mm。

2 仿真工况的设置

仿真过程采用 Truksim 中弯道制动行驶工况模型, 多轴重型半挂车在半径为 152.4 m, 路面附着系数为 0.85 的圆形车道中以 70 km/h 的初始速度进行稳态转向行驶, 2 s 后直接将制动压力调整最大, 进行紧急制动, 直至多轴重型半挂车停车。仿真中重型汽车行驶路径如图 2 所示。

仿真中, 对五轴重型牵引车设置双前轴转向和单前轴转向两种模式, 对重型半挂车整车制动方式设置成各轴制动采用 ABS 控制和不采用 ABS 控制两种模式, 得到四种仿真模型: 单前轴转向, 制动采用 ABS 控制; 单前轴转向, 制动不采用 ABS 控制; 双前轴转向, 制动采用 ABS 控制; 双前轴转向, 制动不采用 ABS 控制。

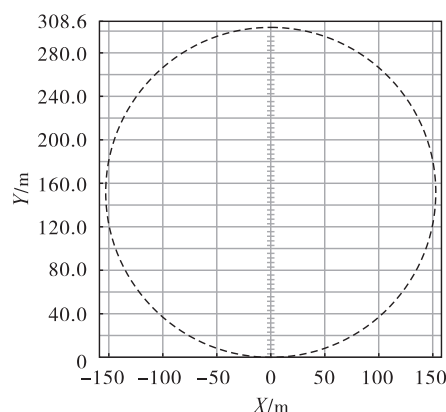


图 2 多轴重型汽车行驶路径

3 仿真结果分析

以弯道制动行驶时的多轴重型半挂车的车身侧倾角、车身横摆角、车身横摆角速度、车身质心侧向加速度、整车对目标路径的横向偏移量为指标, 分析四种仿真模型弯道制动行驶工况的稳定性^[10]。

3.1 车身侧倾角仿真分析

图 3(a)(b)分别为多轴重型半挂车制动时的牵引车和挂车的车身侧倾角随时间的变化情况, 可以看出, 牵引车的车身侧倾角稍小于挂车的车身侧倾角, 牵引车的车身侧倾角为 $-1^\circ\sim 3.4^\circ$, 挂车的车身侧倾角为 $-1.3^\circ\sim 5.2^\circ$ 。

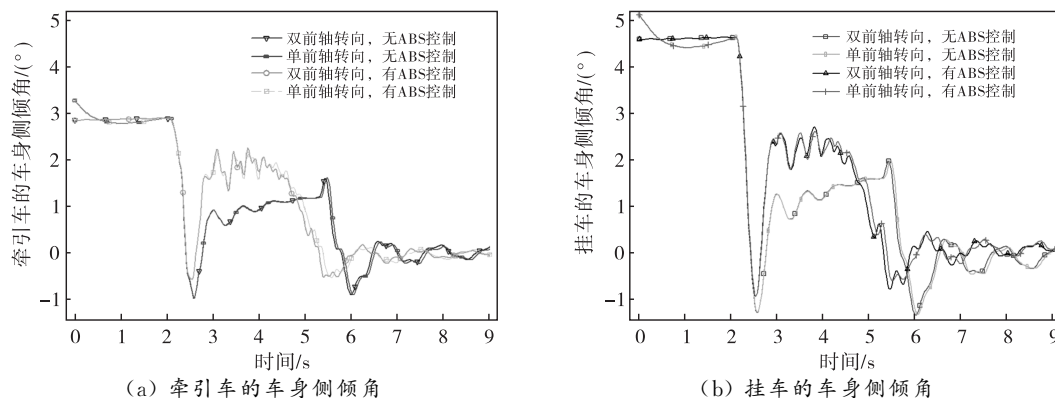


图 3 多轴重型半挂车的车身侧倾角随时间的变化情况

制动时未采用 ABS 控制的牵引车车身侧倾角较小, 为 $-1^\circ\sim 1.7^\circ$; 采用 ABS 控制的车身侧倾角较大,

为 $-0.5^{\circ}\sim 2.2^{\circ}$,两者变化的范围大致相同;未采用ABS控制的车身侧倾角数值反向振荡稍大些(侧倾角的负值部分绝对值较大,动态反应在车身上,车身反向摇摆稍大),制动时采用ABS控制的车身侧倾角反向振荡稍小。

挂车车身侧倾角的变化与牵引车相似,制动时未采用ABS控制的车身侧倾角较小,为 $-1.2^{\circ}\sim 2^{\circ}$;采用ABS控制的车身侧倾角较大,为 $-0.9^{\circ}\sim 2.8^{\circ}$ 。采用ABS控制的车身侧倾角变化范围稍大些,但不显著;未采用ABS控制的车身侧倾角数值反向振荡稍大些,制动时采用ABS控制的车身侧倾角反向振荡稍小。

采用双前轴转向与采用单前轴转向的牵引车和挂车车身侧倾角差异极小,可忽略。从数值上看,四种仿真模型的车身侧倾角差异很小,对比效果不显著,无法通过车身侧倾角来比较四种仿真模型在弯道制动时车身稳定性的优劣。

3.2 车身横摆角仿真分析

图4(a)(b)分别为多轴重型半挂车在弯道制动行驶过程中牵引车和挂车的车身横摆角随时间的变化情况,可以看出,四种仿真模型的牵引车车身横摆角变化差异较大,挂车的车身横摆角差异较小。

牵引车制动时未采用ABS控制的车身横摆角数值由2s时的 14.0° ,增长到3.4s时的 19.5° ,然后逐步下降并稳定在 12.5° ;采用ABS控制的车身横摆角数值由2s时的 14.0° ,逐步增长到3.4s时的 20.0° ,并随时间延长继续增长,双前轴转向的车身5.4s后稳定在 35.0° ,单前轴转向的车身5.4s后稳定在 37.0° 。

四种仿真模型的挂车车身横摆角的变化没有牵引车那么显著。2s后制动时,未采用ABS控制的车身横摆角稍大些,车身横摆角数值由2s时的 10.0° ,逐步增长,双前轴转向的车身5.4s后稳定在 25.0° ;采用ABS控制的车身横摆角稍小些,车身横摆角数值由2s时的 10.0° ,逐步增长,5.4s后稳定在 23.5° 。

考虑到多轴重型半挂车是在弯道行驶,为保持整车的行驶姿态,车身会有一定的横摆角度,仿真过程是从2s开始制动,图4(a)中未采用ABS控制的牵引车车身横摆角比2s前要小,而图4(b)中未采用ABS控制的挂车车身横摆角比2s前要大,说明未采用ABS控制的多轴重型半挂车的牵引车和挂车之间产生了反向折叠。

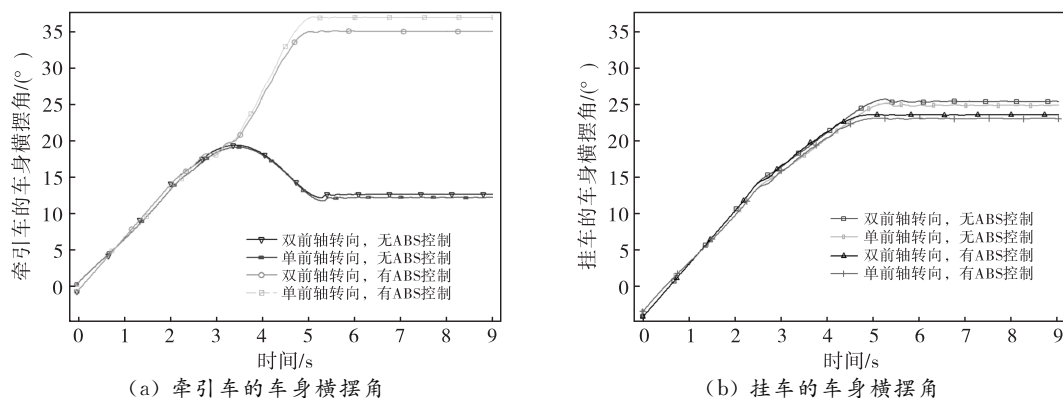


图4 多轴重型半挂车的车身横摆角随时间的变化情况

3.3 车身横摆角速度仿真分析

图5(a)(b)分别为多轴重型半挂车的牵引车和挂车的车身横摆角速度。重型半挂车在弯道制动行驶过程中,四种仿真模型的牵引车车身横摆角速度变化差异较大,挂车的车身横摆角速度变化差异较小。

牵引车制动时未采用ABS控制的车身横摆角速度数值由2s时的 $7.5^{\circ}/s$,减小到4.6s时的 $-5.1^{\circ}/s$,然后逐步上升至5.4s时的 $5.0^{\circ}/s$,随后下降并在0上下衰减振荡直至停车;采用ABS控制的车身横摆角速度数值在2s时为 $7.5^{\circ}/s$,2~3.5s时数值在 $0\sim 10.0^{\circ}/s$ 振荡,3.5~4.8s时数值在 $5.0\sim 15.0^{\circ}/s$ 振荡,5.1s时振荡到最小值 $-2.5^{\circ}/s$,此后开始在0上下衰减振荡直至停车。未采用ABS控制的车身横摆

角速度反向增大,而采用 ABS 控制的车身横摆角速度正向增大[图 5(a)]。

挂车制动时未采用 ABS 控制的车身横摆角速度数值由 2 s 时的 $7.5^{\circ}/\text{s}$,增大到 2.2 s 时的 $9.0^{\circ}/\text{s}$,然后逐步下降,5.3 s 时达到最小值 $-4.5^{\circ}/\text{s}$,此后开始在 0 上下衰减振荡直至停车;采用 ABS 控制的车身横摆角速度数值由 2 s 时的约 7.5° ,增大到 2.2 s 时的 $9.0^{\circ}/\text{s}$,然后逐步振荡下降,5.2 s 时达到最小值,为 $-1.0^{\circ}/\text{s}$,此后开始在 0 上下衰减振荡直至停车。由图 5(b)可知,未采用 ABS 控制的车身横摆角速度反向振荡幅度显著大于采用 ABS 控制的车身横摆角速度,采用 ABS 控制的车身横摆角速度振荡频率高但幅值小。

虽然制动时采用 ABS 控制的车身横摆角速度数值较大,但产生车身横摆角速度振荡幅值较小。图 5 显示未采用 ABS 控制的牵引车和挂车的车身横摆角速度均产生了较大的反向振荡(其负值部分绝对值较大)。

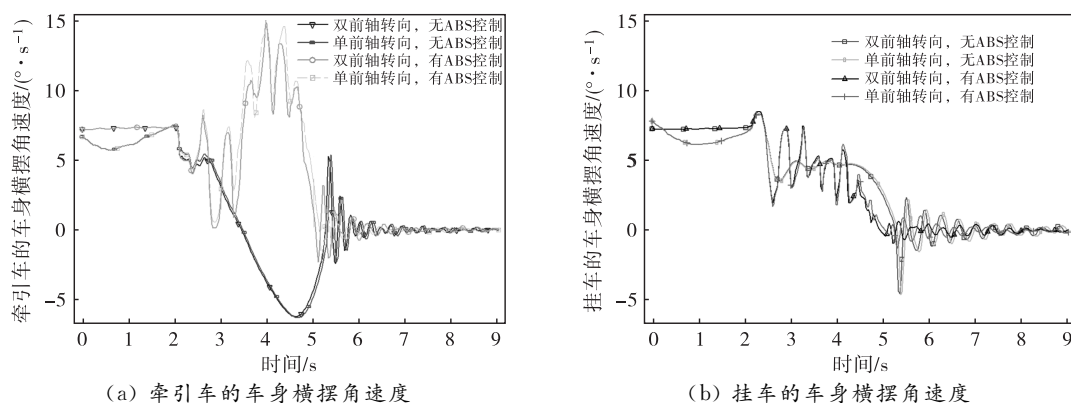


图 5 多轴重型半挂车的车身横摆角速度

3.4 车身质心侧向加速度仿真分析

图 6(a)(b)分别为多轴重型半挂车的牵引车和挂车的车身质心侧向加速度,可以看出多轴重型半挂车在弯道制动行驶过程中,采用 ABS 控制的车身质心侧向加速度振荡较大,未采用 ABS 控制的车身质心侧向加速度振荡较小。

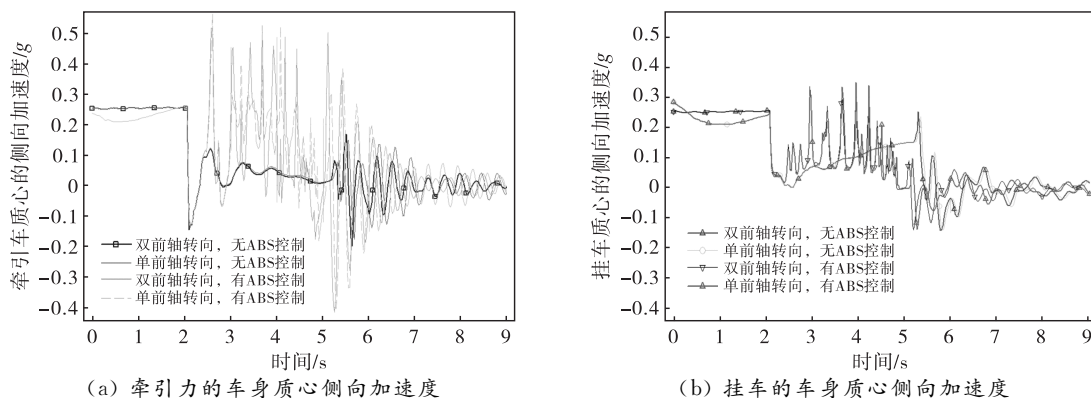


图 6 多轴重型半挂车的车身质心侧向加速度

对于牵引车而言,制动时未采用 ABS 控制的车身质心侧向加速度数值由 2 s 时的约 $0.26g$,减小到 2.1 s 时的约 $-0.15g$,然后沿着 0 上下振荡,其中在 5.6 s 时达到数值最小值 $-0.20g$,随后振荡幅度逐步减小直至停车;采用 ABS 控制的车身质心侧向加速度由 2 s 时的 $0.26g$,减小到 2.1 s 时的 $-0.15g$,然后沿着 0 上下振荡,在 2.6 s 时达到数值最大值,单前轴转向车身质心侧向加速度约 $0.56g$,双前轴转向车身向心侧向加速度约 $0.51g$,在 5.2 s 时达到数值最小值,单前轴转向车身质心侧向加速度为 $-0.40g$,双前轴转向的车身质心侧向加速度为 $-0.41g$,随后振荡数值逐步减小直至停车。由图 6(a)可知,对于牵引车而言,未采用 ABS 控制的车身质心侧向加速度要显著优于采用 ABS 控制的车身质心侧向加速度;双前轴

转向和单前轴转向对车身质心侧向加速度的影响效果不显著。

挂车制动时未采用 ABS 控制的车身质心侧向加速度数值由 2 s 时的 $0.26g$, 减小到 2.6 s 时的 $0.01g$, 然后开始缓慢上升, 至 5.2 s 时达 $1.50g$, 5.3 s 上升至 $2.60g$, 然后振荡下降, 5.8 s 时达最小值, 为 $-0.13g$, 随后沿着 0 线上下振荡, 数值逐步减小直至停车; 采用 ABS 控制的车身质心侧向加速度数值由 2 s 时的, 为 $0.26g$, 减小到 2.4 s 时的 $0.03g$, 随后数值振荡上升, 3.9 s 时增至最大值, 为 $0.35g$, 随后振荡下降, 5.2 s 时至最小值 $-0.13g$, 随后沿着 0 线上下振荡, 数值逐步减小直至停车。由图 6(b) 可知, 挂车未采用 ABS 控制的车身质心侧向加速度要显著优于采用 ABS 控制的车身质心侧向加速度; 双前轴转向和单前轴转向对车身质心侧向加速度的效果不显著。

3.5 行驶路径与偏移目标路径的横向偏移量仿真分析

图 7 为多轴重型半挂车在弯道制动过程中的实际行驶路径与偏移目标路径的横向偏移量。采用 ABS 制动控制双前轴转向时, 车身的最大横向偏移量约为 1.35 m , 停车后车身的横向偏移量约为 0.42 m ; 采用 ABS 控制单前轴转向时, 车身的最大横向偏移量约为 1.95 m , 停车后车身的横向偏移量约为 0.96 m 。

未采用 ABS 制动控制双前轴转向时, 车身的最大横向偏移量约为 4.25 m ; 未采用 ABS 制动控制单前轴转向时, 车身的最大横向偏移量约为 5.01 m 。可见采用 ABS 制动控制双前轴转向的多轴重型半挂车在弯道制动行驶时, 其保持车道行驶的效果最好, 其效果如图 8 所示。重型半挂车在弯道制动行驶时, 对于目标车道的保持性能: 采用 ABS 制动控制的多轴重型半挂车显著优于未采用 ABS 制动控制的, 采用双前轴转向的多轴重型半挂车显著优于单前轴转向的。

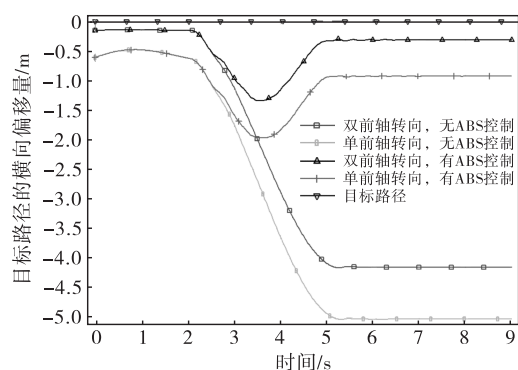


图7 多轴重型半挂车目标路径的横向偏移量

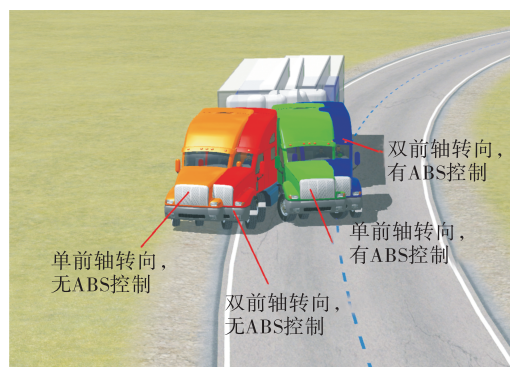


图8 仿真动画演示

4 结论

多轴重型半挂车在弯道制动行驶时, 牵引车采用双前轴转向和采用单前轴转向其车身侧倾角、车身横摆角、车身横摆角速度、车身质心侧向加速度等参数的差异不显著, 采用双前轴转向的车身侧倾角、车身横摆角、车身横摆角速度、车身质心侧向加速度略优于采用单前轴转向。

制动时, 采用 ABS 控制和未采用 ABS 控制其车身侧倾角、车身横摆角、车身横摆角速度、车身质心侧向加速度等参数的差异显著。制动时, 采用 ABS 控制的车身侧倾角、车身横摆角、车身横摆角速度虽然数值比未采用 ABS 控制稍大, 但其反向振荡较小; 制动时, 未采用 ABS 制动控制的车身质心侧向加速度数值的大小和振荡情况要显著优于采用 ABS 控制。

多轴重型半挂车在弯道制动行驶时, 对于目标路径的保持情况而言, 制动时采用 ABS 控制的多轴重型半挂车显著优于未采用 ABS 控制; 采用双前轴转向多轴重型半挂车要优于采用单前轴转向。

总体而言, 通过对四种模式多轴重型半挂车仿真模型分析, 多轴重型半挂车在弯道制动行驶时, 采用 ABS 控制的多轴重型半挂车要显著优于未采用 ABS 控制, 采用双前轴转向的多轴重型半挂车要略优于采用单前轴转向。故对于本文研究的四种多轴重型半挂车在弯道制动行驶仿真模型, 转向采用双前轴转

向,制动采用 ABS 控制可获得最佳的行驶稳定性。

参考文献:

- [1] 卜凡合,汪选要. 重型半挂车主动防侧翻控制策略研究[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2024,24(6):129-136.
- [2] 赵夜城. 重型半挂车制动系统建模及协同控制策略研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2022.
- [3] 董禄,李擎,罗鹏,等. 微型货车主动性防侧翻控制研究[J]. 机械设计与制造,2025(2):169-174.
- [4] 吴桐,荣劲,王军年,等. 面向转向制动工况的制动力动态分配策略[J]. 汽车工程,2024,46(10):1755-1765.
- [5] 汤海浪. 汽车主动转向-制动协同控制策略研究[J]. 汽车实用技术,2024,49(14):75-78.
- [6] 张羽,肖松,王保华. 基于差动制动的四轮转向商用车防侧翻控制[J]. 湖北汽车工业学院学报,2022,36(1):7-11.
- [7] 吴志成,陈聪. 双前桥转向三轴汽车的操纵稳定性[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2016,37(6):640-644.
- [8] 王印,马相飞,郭志龙,等. 商用车双前轴电动转向系统的设计与匹配 [J]. 汽车实用技术,2024,49(17):65-69.
- [9] 王成志,王云超. 双前轴转向机构的运动分析及优化设计[J]. 汽车安全与节能学报,2019,10(3):300-307.
- [10] 贾会星. 重型汽车转向制动稳定性的仿真研究[J]. 滨州学院学报,2020,36(6):59-62.

Simulation analysis of braking driving stability of multi-axle heavy semi-trailers on curves roads

JIA Huixing, YANG Zhanglin, YAO Fang

(College of Mechanical and Automotive Engineering, Chuzhou Polytechnic,
Chuzhou 239000, China)

Abstract: A heavy semi-trailer model consisting of a five-axle heavy-duty tractor and a single-axle semi-trailer was established using Trucksim software. Two steering modes were configured for the five-axle heavy-duty tractor: dual front axle steering and single front axle steering. For the heavy semi-trailer, two braking modes were implemented: anti-lock braking system (ABS) control and non-ABS control, followed by simulation analysis of braking performance in curves. The results showed that during curved braking, the multi-axle heavy semi-trailer significantly outperformed without ABS control when ABS was employed, and dual front axle steering slightly surpassed single front axle steering. Therefore, for multi-axle heavy semi-trailers in curved braking scenarios, adopting dual front axle steering and ABS braking control yields the best driving stability.

Keywords: multi-axle heavy-duty semi-trailer; driving stability; dual front axle steering; ABS; simulation analysis

(责任编辑:王新亮)

引用格式 贾会星,杨章林,姚芳. 多轴重型半挂车弯道制动行驶稳定性仿真分析[J]. 山东航空学院学报,2026,43(4):88-94.
Jia Huixing, Yang Zhanglin, Yao Fang. Simulation analysis of braking driving stability of multi-axle heavy semi-trailers on curves roads[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics, 2026, 43(4): 88-94.