

文章编号:1000-582X(2012)02-118-05

长货跨装挂车公路弯道路径建模与动态仿真

程 博,杨 育,罗 雄,李 斐

(重庆大学 机械传动国家重点实验室 重庆 400044)

摘 要:为确保大件产品公路运输的安全,针对长货跨装挂车运输过程中弯道通过能力差的问题,在分析长货跨装挂车的装载静态结构属性和车组动态转弯过程的基础上,构建了长货跨装挂车的路径转弯模型,提出了关键物理量坐标的迭代算法并实现了长货跨装挂车转弯路径的动态模拟仿真,为其在运输过程中顺利通过复杂弯道提供工程指导。

关键词:公路运输;动态仿真;长货跨装挂车;大件运输

中图分类号:U492.3+36.5

文献标志码:A

Modeling and dynamic simulation of pole trailer's track on crooked road

CHENG Bo, YANG Yu, LUO Xiong, LI Fei

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To ensure the transportation safety of oversize/overweight(OS/OW) products, the problem of the poor passing capability of pole trailer in turning should be solved. After analysis of the pole trailer's static structure and dynamic turning characteristics, we deduce the iterative formula of the model's key points coordinates. The dynamic computer simulation system of the pole trailer's turning process is developed, which can provide guidance for the pole trailer to pass the crooked road smoothly during transport process.

Key words: highway transportation; dynamic simulation; pole trailer; OS/OW transportation

大件运输承运的货物,如大型化工合成塔,石化加氢反应器,核电蒸发器等设备常常关系到国家重点项目的建设,价值昂贵,运费可达数百上千万。长货跨装挂车是公路大件运输中运送超长货物的一种常见形式,一般在两辆液压平板全挂车(以下简称挂车)上加装转动支盘,再在转盘上跨装一件具有一定刚性的货物,货物长度可达上百米。运输过程中,道路弯道成为长货跨装挂车通过的主要障碍之一,为确保其运输安全,在拟定运输方案过程中,不仅需要

准确地衡量长货跨装挂车通过待选路线的每一弯道的通行能力,也需要针对选定路线提出最佳的通行方案。

文献[1]和[2]对普通汽车转弯过程的数学建模相关因素进行了研究,并且建立了数学模型;文献[3]对公路大件运输中车辆转弯时,车组及货物的外形干涉因素进行了研究,并且通过机器人技术建立了三维仿真模型,保证了空客公司的 A380 客机大型组件的顺利运输;TERESA M 和 INDY M 等研

收稿日期:2011-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71071173);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090191110004);中央高校基本科研业务费科研专项自然科学基金类面上项目(CDJZR10110012);重庆市科技攻关计划资助项目(2010GGB108);重庆市科技攻关计划资助项目(2011GGC351)

作者简介:程博(1984-),男,重庆大学博士研究生,主要从事大件运输路径优化、运输方案智能优化方向的研究,(Tel)023-67497050;(E-mail)kingboone@163.com。

杨育(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-67497050;(E-mail)yuyang@cqu.edu.cn。

究了大件运输车辆公路路由规则和许可协议;文献[6]研究了车体振动对转向架动力学性能的耦合影响;文献[7]与文献[8]对大型钢耦合车辆动力学系统进行了计算机仿真研究。王安顺等对汽车转向轮侧滑及其影响因素进行了全面的研究^[9-11];林熊熊等人分别针对半挂汽车列车和全挂汽车列车的弯路运动轨迹进行了建模和仿真研究^[12-15]。

目前对大件运输车组转弯的研究主要集中在半挂车和全挂车,对于最复杂的长货跨装挂车尚待进一步研究。

由于长货跨装挂车转弯过程中涉及因素众多,因此,针对前后两辆挂车、转盘、长货之间相对运动关系非常复杂的问题,笔者通过对长货跨装挂车进行建模,简化研究对象,对影响其转弯的关键物理量进行深入研究,采用数学微分和解析几何的方法进行数学建模,在得出关键物理量迭代算法的基础上,实现了计算机动态模拟仿真,较好地解决了这一问题,进一步完善了国内在该领域的研究。

1 长货跨装挂车转弯路径建模

假设 1 不考虑车辆侧滑和跑偏,忽略转向机构的响应时间、车辆本身各种机械偏差以及转盘、货物装载误差的影响。

假设 2 转盘位于挂车几何中心,转盘圆心下方正对挂车锁死轴中点(最常见情况)。

定义 1 A_0 、 B_0 、 C_0 、 D_0 分别为前挂车转向轴中点、前挂车转盘中心、后挂车转盘中心、后挂车转向轴中点。

长货跨装挂车的模型可以简化为图 1 中的三根没有质量的首尾相接刚性杆 A_0B_0 、 B_0C_0 、 D_0C_0 。

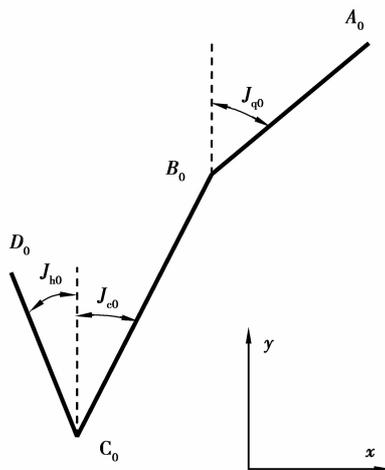


图 1 长货跨装挂车模型

定义 2 线段 A_0B_0 、 B_0C_0 、 D_0C_0 与 y 轴正方向夹角分别为 J_{q0} 、 J_{c0} 、 J_{h0} ;

A_0 点的运动方向为前挂车的转向轮胎相对于 A_0B_0 的转角,记为 J_{z0} , D_0 点的运动方向为后挂车的转向轮胎相对于 D_0C_0 的转角记为 J_{w0} ,且统一规定顺时针为正方向,此时为模型的初始状态。设前挂车的前进速度值为 v_0 ,则在 Δt 时间内, A_0 点沿与 A_0B_0 夹角为 J_{z0} 的方向移动到 A_1 点, B_0 点沿线段 B_0A_0 方向移动到 B_1 点, C_0 点沿 C_0D_0 方向移动到 C_1 点, D_0 点沿与 C_0D_0 夹角为 J_{z0} 的方向移动到 D_1 点,如图 2 所示。粗虚线 A_1B_1 、 C_1B_1 和 C_1D_1 为模型的当前位置,虚线 A_0A_1 和 D_0D_1 分别为 A_0 点和 D_0 点在 Δt 时间内的运动轨迹。

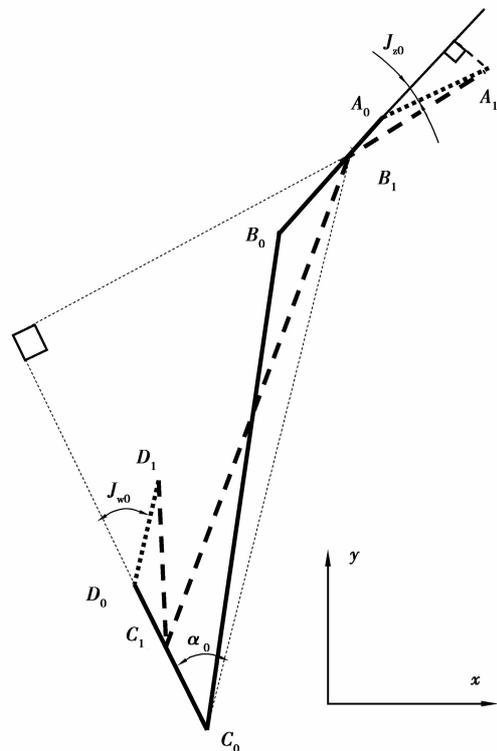


图 2 长货跨装挂车转弯模型

2 长货跨装挂车转弯路径算法

假设 3 已知 A_0 、 B_0 、 C_0 的坐标以及 J_{q0} 、 J_{c0} 、 J_{z0} 的值。

设线段 A_0B_0 、 B_0C_0 、 D_0C_0 的长度分别为 L_q 、 L_c 和 L_h ,则可以得到 A_1 点和 B_1 点的坐标以及 J_{q1} 值。

点 A_1 的坐标

$$\left. \begin{aligned} X_{A1} &= X_{A0} + v_0 \cdot \Delta t \cdot \sin(J_{q0} + J_{z0}), \\ Y_{A1} &= Y_{A0} + v_0 \cdot \Delta t \cdot \cos(J_{q0} + J_{z0}). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

J_{q1} 的值

$$J_{q1} = J_{q0} + \arcsin\left(\frac{v_0 \cdot \Delta t \cdot \sin J_{z0}}{L_q}\right). \quad (2)$$

点 B_1 的坐标

$$\left. \begin{aligned} X_{B_1} &= X_{A_1} - L_q \cdot \sin J_{q_1}, \\ Y_{B_1} &= Y_{A_1} - L_q \cdot \cos J_{q_1}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

点 C_1 坐标的求法:

线段 C_0B_1 长度

$$C_0B_1 = \sqrt{(X_{B_1} - X_{C_0})^2 + (Y_{B_1} - Y_{C_0})^2} \quad (4)$$

定义 3 α_0 为线段 C_0D_0 与 C_0B_0 的夹角。

在图 2 的情况下,则

$$\alpha_0 = \arctan\left(\frac{X_{B_1} - X_{C_0}}{Y_{B_1} - Y_{C_0}}\right) - J_{h_0} \quad (5)$$

C_0C_1 的长度为

$$C_0C_1 = C_0B_1 \times \cos\alpha_0 - \sqrt{L_c^2 - (C_0B_1 \times \cos\alpha_0)^2} \quad (6)$$

则 C_1 点的坐标为

$$\left. \begin{aligned} X_{C_1} &= X_{C_0} + \sin J_{h_0} \times C_0C_1, \\ Y_{C_1} &= Y_{C_0} + \cos J_{h_0} \times C_0C_1. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

D_1 点的坐标求法:

线段 D_0D_1 长度

$$D_0D_1 = (L_h - C_0C_1) \times \cos(\pi - J_{u_0}) + \sqrt{L_h^2 - [(L_h - C_0C_1) \times \sin J_{u_0}]^2} \quad (8)$$

D_1 点坐标

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= X_{D_1} + D_0D_1 \times \sin(J_{h_0} + J_{u_0}), \\ Y_1 &= Y_{C_1} + D_0D_1 \times \cos(J_{h_0} + J_{u_0}). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

根据以上基本算法,并且考虑到坐标系中点的相对位置的一些特殊情况,可以推导出 A_i 点、 B_i 点、 C_i 点、 D_i 点的坐标以及 J_{q_i} 、 J_{c_i} 、 J_{h_i} 值的迭代公式。

A_i 点

$$\left\{ \begin{aligned} X_{A_i} &= X_{A_{i-1}} + v_i \cdot \Delta t \cdot \sin(J_{q_{i-1}} + J_{z_{i-1}}), \\ Y_{A_i} &= Y_{A_{i-1}} + v_i \cdot \Delta t \cdot \cos(J_{q_{i-1}} + J_{z_{i-1}}), \end{aligned} \right. \quad i \geq 1. \quad (10)$$

$$J_{q_i} = \begin{cases} J_{q_0}, & i = 0; \\ J_{q_{i-1}} + \arcsin\left(\frac{v_{i-1} \cdot \Delta t \cdot \sin J_{z_{i-1}}}{L_q}\right), & i \geq 1. \end{cases} \quad (11)$$

B_i 点

$$\left. \begin{aligned} X_{B_i} &= X_{A_i} - L_q \cdot \sin J_{q_i}, & i \geq 1, \\ Y_{B_i} &= Y_{A_i} - L_q \cdot \cos J_{q_i}, & i \geq 1. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

J_{c_i} ($i \geq 1$) 的算法

If $X_{B_i} \geq X_{C_i}$ then

If $Y_{B_i} > Y_{C_i}$ then

$$J_{C_i} = \arctan\left(\frac{X_{B_i} - X_{C_i}}{Y_{B_i} - Y_{C_i}}\right). \quad (13)$$

Else if $Y_{B_i} = Y_{C_i}$ then

$$J_{C_i} = \frac{\pi}{2}, \quad (14)$$

Else

$$J_{C_i} = \pi + \arctan\left(\frac{X_{B_i} - X_{C_i}}{Y_{B_i} - Y_{C_i}}\right), \quad (15)$$

End if

Else

If $Y_{B_i} > Y_{C_i}$ then

$$J_{C_i} = \arctan\left(\frac{X_{B_i} - X_{C_i}}{Y_{B_i} - Y_{C_i}}\right), \quad (16)$$

Else if $Y_{B_i} = Y_{C_i}$ then

$$J_{C_i} = -\frac{\pi}{2}. \quad (17)$$

Else

$$J_{C_i} = -\left[\pi - \arctan\left(\frac{X_{B_i} - X_{C_i}}{Y_{B_i} - Y_{C_i}}\right)\right]. \quad (18)$$

End if

End if

C_i 点的坐标算法

$$J_{h_i}, i \geq 1.$$

根据点 C_i 和点 D_i 的坐标,与 J_{C_i} 的算法一致。线段 C_iB_{i+1} 长度

$$C_iB_{i+1} = \sqrt{(X_{B_{i+1}} - X_{C_i})^2 + (Y_{B_{i+1}} - Y_{C_i})^2} \quad (19)$$

线段 C_iC_{i+1} 与线段 C_iB_{i+1} 的夹角 α_i : 设 β_i 为线段 C_iB_{i+1} 与 y 轴正方向的夹角,则根据点 C_i 和点 B_{i+1} 的坐标,参考 J_{c_i} 的算法,可以得到 β_i 的算法。

则

$$\alpha_i = \beta_i - J_{h_i}, i \geq 0. \quad (20)$$

以下迭代公式在 $i \geq 0$ 条件下均适用。

线段 C_iC_{i+1} 长度

$$C_iC_{i+1} = C_iB_{i+1} \times \cos\alpha_i - \sqrt{L_c^2 - (C_iB_{i+1} \times \cos\alpha_i)^2} \quad (21)$$

C_{i+1} 点坐标

$$\left. \begin{aligned} X_{C_{i+1}} &= X_{C_i} + \sin J_{h_i} \times C_iC_{i+1}, \\ Y_{C_{i+1}} &= Y_{C_i} + \cos J_{h_i} \times C_iC_{i+1}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

D_i 点的坐标算法

$$D_iD_{i+1} = (L_h - C_iC_{i+1}) \times \cos(\pi - J_{u_i}) + \sqrt{L_h^2 - [(L_h - C_iC_{i+1}) \times \sin J_{u_i}]^2} \quad (23)$$

D_{i+1} 点坐标

$$\left. \begin{aligned} X_{D_{i+1}} &= X_{D_i} + D_iD_{i+1} \times \sin(J_{h_i} + J_{u_i}), \\ Y_{D_{i+1}} &= Y_{C_i} + D_iD_{i+1} \times \cos(J_{h_i} + J_{u_i}). \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

3 长货跨装挂车转弯动态仿真

3.1 动态仿真过程中的其它物理量关系

在得出 A 点、 B 点、 C 点和 D 点在任意时刻坐标的基础上,根据挂车轮廓以及超长货物轮廓与 A 、 B 、 C 、 D 的固定关系,可以推导出前挂车轮廓顶点 E 点和 F 点、后挂车轮廓顶点 O 点和 H 点以及货物轮

廓顶点 M 点、 N 点、 P 点在任意时刻的坐标,如俯视图图 3 所示,其中实线分别是前后挂车轮廓,虚线是货物轮廓;点 Q 是前后转盘中心连线的中点, L 是货物轮廓的几何中心与 Q 点的距离,用来确定货物相对于车辆的位置, Q 点在前时取正号,在后时取负号。

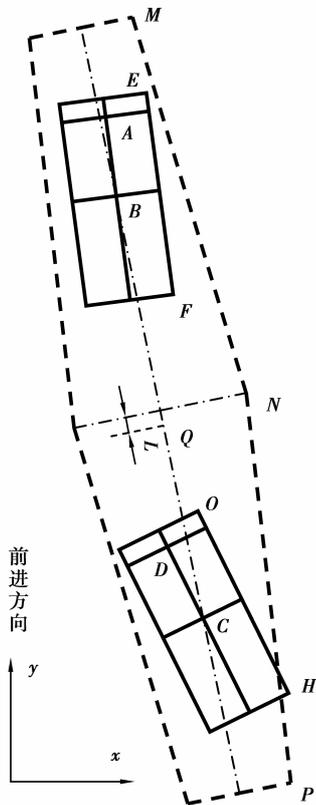


图 3 长货跨装挂车轮廓关键点示意图

以点 N 为例

$$L_{CN} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \times B_{HZ}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \times L_{BC} + L\right)^2} \quad (25)$$

$$\gamma_N = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{L_{BC} + 2L}{B_{HZ}}\right) \quad (26)$$

$$\begin{aligned} X_{Ni} &= X_{Gi} + L_{CN} \times \sin(\gamma_N + J_{Gi}), \\ Y_{Ni} &= Y_{Gi} + L_{CN} \times \cos(\gamma_N + J_{Gi}). \end{aligned} \quad (27)$$

其中: L_{CN} 为线段 CN 的长度; B_{HZ} 为长货中部宽度; L_{BC} 为线段 BC 的长度; L 为货物轮廓的几何中心与 Q 点的距离; γ_N 为即 $\angle NCB$ 。

3.2 仿真参数的输入

在模型和算法的基础上,采用 VB6.0 编程语言编写代码,采用 Access 数据库储存车辆的数据,实现了长货挂车转弯的计算机动态模拟仿真。

通过输入窗口(图 4)输入车辆参数,包括挂车类型选择、选择挂车型号(用于从数据库提取车宽、轴距等参数)、前后挂车的轴线数;输入货物参数,包

括货物长度、货物前端宽、后端宽、中部宽、货中心线与挂车中心线距(即 L)、转盘距;选择弯道地图。



图 4 仿真参数输入界面

3.3 仿真过程与结果

进入仿真界面,开始仿真后,通过键盘动态控制前挂车的转向和速度以及后挂车的转向,仿真过程及结果如图 5(产生干涉)、图 6(顺利通过)所示。

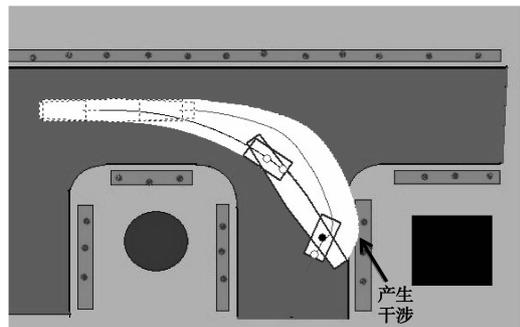


图 5 产生干涉时计算机动态仿真界面

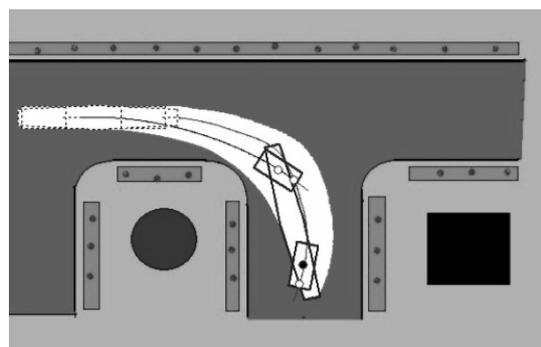


图 6 顺利通过时计算机动态仿真界面

仿真结果的界面背景是图片格式的地图,虚线表示挂车及货物的初始位置,在仿真过程中,挂车及货物所过之处,背景颜色均变为白色,可以很容易看出是否与道路外缘、绿化树、建筑物等产生干涉,两条曲线分别表示前后挂车转向轴中点的运动轨迹,根据其记录下来的坐标可以在实际道路上标出,挂车操作人员可以沿运动轨迹一次性地操作前后挂车

及货物顺利地通过弯道。

如果多次仿真后均无法使车辆顺利通过,可以考虑以下解决方案:1)进一步优化长货挂车参数配置,如减少挂车轴线数,或者缩短前后两转盘位置。2)清障。即根据多次仿真结果中产生干涉最小的方案清除影响车组通过的障碍物,尽量减少清障成本。

4 结 论

针对长货跨装挂车转弯过程运动关系复杂,弯道通过能力差的问题,建立了长货跨装挂车转弯模型,给出了挂车和长货关键物理量的迭代算法,利用计算机语言编程实现了长货跨装挂车转弯过程的动态仿真。

此外,在本算法的基础上,可以考虑转盘不在锁死轴正上方的情况以及半挂车和全挂车组成长货运输车组的情况,对该算法进一步改进,以获得更通用、更精确的仿真结果。

参考文献:

- [1] ALEXANDER J C, MADDOCKS J H. On the maneuvering of vehicles[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2005, 38(1): 38-51.
- [2] 王阳阳,张代胜,孙海涛. 重型汽车双前桥转向运动学仿真模拟[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2005, 28(5):505-507.
WANG YANG-YANG, ZHANG DAI-SHENG, SUN HAI-TAO. Kinematic simulation of double-front-axle steering of heavy autocars [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2005, 28(5):505-507.
- [3] LAMIRAUX F, LAUMOND J P, VANGEEM C, et al. Trailer-truck trajectory optimization for airbus A380 component transportation [J]. IEEE Robotics and Automation, 2005, 12(1):14-21.
- [4] TERESA M, BLAZQUEZ C, LUECK S, et al. Enterprise-wide data integration and analysis for oversize/overweight permitting [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2002, 16(1): 11-22.
- [5] GINDY M, PREZIOSO A. Assessment of road and bridge data for the development of an automated oversize/overweight vehicle routing and permitting system [M]. Rhode Island: University of Rhode Island, 2007: 87.
- [6] 程海涛,王成国,钱立新. 考虑车体柔性的货车动力学仿真[J]. 铁道学报, 2004, 22(6):40-45.
CHENG HAI-TAO, WANG CHENG-GUO, QIAN LI-XIN. Dynamics simulation of freight car considering the car body's flexible property[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 22(6):40-45.
- [7] 朴明伟,丁彦闯,李繁,等. 大型钢耦合车辆动力学系统仿真研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(5): 875-881.
PIAO MING-WEI, DING YAN-CHUANG, LI FAN, et al. Large-scale rigid-flexible-coupling vehicle dynamical system simulation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(5): 875-881.
- [8] NEGRUT D, RAMPALLI R, OTTARSSON G, et al. On an implementation of the HHT method in the context of index 3 differential algebraic equations of multi-body dynamics [J]. ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2007, 2(1):73-85.
- [9] 张琪昌,李小涛,田瑞兰. 汽车转向轮摆振的稳定性及分岔行为分析[J]. 振动与冲击, 2008, 27(1): 84-88.
ZHANG QI-CHANG, LI XIAO-TAO, TIAN RUI-LAN. Study on stability and bifurcation behavior of a car turning wheel shimmy[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(1):84-88.
- [10] 林逸,李胜. 非独立悬架汽车转向轮自激型摆振的分岔特性分析[J]. 机械工程学报, 2004, 40(12):187-190.
LIN YI, LI SHENG. Study on the bifurcation character of steering wheel self-excited shimmy of motor vehicle with dependent suspension[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(12):187-190.
- [11] 王安顺,张景,施树明,等. 汽车转向轮侧滑及其影响因素的研究[J]. 中国公路学报, 1998, 11(S1): 122-128.
WANG AN-SHUN, ZHANG JING, SHI SHUN-MING, et al. Research on the side slipping of the vehicle's steering wheel and the influencing factors[J]. China Journal of Highway and Transport, 1998, 11(S1): 122-128.
- [12] 唐岚,黄海波,邱小平. 汽车列车转向轮迹重合控制原理研究[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(10):63-66.
TANG LAN, HUANG HAI-BO, QIU XIAO-PING. The control principle of overlap traced the track of the road train [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27(10): 63-66.
- [13] 林熊熊. 全挂汽车列车弯路运动轨迹计算机仿真[J]. 汽车工程, 1998(5):292-295.
LIN XIONG-XIONG. Computer simulation of trailer road train's track on the crooked road[J]. Automotive Engineering, 1998(5): 292-295.
- [14] 林熊熊. 半挂汽车列车弯路运动轨迹计算机仿真[J]. 汽车工程, 1997(1): 60-65.
LIN XIONG-XIONG. Computer simulation of semi-trailer road train's track on the crooked road [J]. Automotive Engineering, 1997(1): 60-65.
- [15] 胡宁. 半挂汽车列车转向运动学分析[J]. 汽车研究与开发, 1998(2): 23-26.
HU NING. Kinematics analysis of semi-trailer road train's turning process [J]. Automobile R&D, 1998(2):23-26.