

液压鹅颈挂车转弯建模与轨迹动态仿真研究

程博¹ 杨育¹ 刘伯林¹ 申世杰²

1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆, 400030

2. 中国第二重型机械集团, 德阳, 618000

摘要: 液压鹅颈挂车是装运大件产品的新型运输车辆, 为确保大件产品公路运输的安全, 针对液压鹅颈挂车运输过程中弯道通过能力差的问题, 在分析液压鹅颈挂车的装载静态结构属性和车组动态转弯过程的基础上, 构建了液压鹅颈挂车的转弯模型, 提出了关键物理量坐标的迭代算法并实现了液压鹅颈挂车弯道轨迹的动态模拟仿真, 为其在运输过程中顺利通过复杂弯道提供了工程指导。

关键词: 液压鹅颈挂车; 大件运输; 公路运输; 动态仿真

中图分类号: U492.336.5

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.04.022

Modeling and Dynamic Simulation of Hydraulic Gooseneck Trailer's Track on Crooked Road

Cheng Bo¹ Yang Yu¹ Liu Bolin¹ Shen Shijie²

1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing, 400030

2. China National Erzhong Group Co., Deyang, Sichuan, 618000

Abstract: To ensure the transportation safety of OS/OW products, the problem of the poor passing capability of hydraulic gooseneck trailer in turning should be solved. After analysis of the hydraulic gooseneck trailer's static structure and dynamic turning characteristics, we deduced an iterative formula of the model's key points coordinates. Based on that, the computer codes were wrote to actualize the dynamic computer simulation of the hydraulic gooseneck trailer's turning process, which can provide guidance for the hydraulic gooseneck trailer to pass the crooked road smoothly during transport process.

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

0 引言

大件运输承运的货物, 如大型变压器、轧机牌坊、重型燃机等装备, 常常关系到国家重点项目的建设, 价值高昂, 对运输过程的安全性要求极高。液压鹅颈挂车是运载大件产品的一种新型运输车辆, 它是在液压平板全挂车的前端加上液压动力鹅颈, 与牵引车组合, 使液压平板全挂车由传统的全挂牵引形式转变成半挂牵引形式。这种组合使得液压鹅颈挂车既具有半挂车的转向控制方便的优点, 又具有全挂车承载能力大的特点。

在运输过程中, 牵引车和液压鹅颈挂车的组合长度可达 40m, 加装大件货物后, 宽度可达 5m 左右, 因此, 道路弯道成为液压鹅颈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[1-2]对普通汽车转弯过程的数学建模的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; 文献[4]研究了车体振动对转向架动力学性能的耦合影响; 文献[5-6]对大型钢耦合车辆动力学系统进行了计算机仿真研究; 文献[7-9]对汽车转向轮侧滑及其影响因素进行了全面的研究; 文献[10-13]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。

由于液压鹅颈挂车转弯过程中涉及因素众多, 因此, 针对牵引车、液压鹅颈、全挂车和货物之间相对运动关系复杂这一问题, 本文通过简化研究对象, 对影响液压鹅颈挂车转弯过程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。

收稿日期: 2011-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71071173); 重庆市科技攻关计划资助项目(2010GGB108); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090191110004)

1 液压鹅颈挂车转弯路径建模

建模前先作如下假设：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；②将牵引车和鹅颈挂车的车体均看成刚体。

定义 1 $A_0、B_0、C_0、D_0$ 分别为牵引车转向轴中点、牵引车后桥中点、牵引车鞍座中心、液压全挂车锁死轴中点。

液压鹅颈挂车的模型可以简化为图 1 中的两根没有质量的铰接刚性杆 $A_0B_0、C_0D_0$ 。

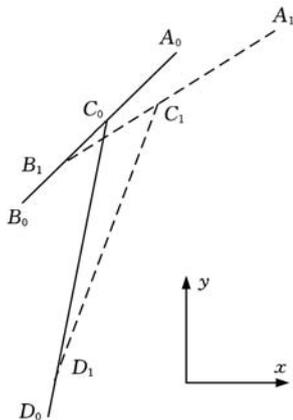


图 1 液压鹅颈挂车模型

定义 2 线段 $A_0B_0、D_0C_0$ 与 y 轴正方向夹角分别为 $\alpha_{q0}、\alpha_{h0}$ ；前挂车的转向轮胎相对于 A_0B_0 的转角记为 α_{z0} ，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 α_{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， D_0 点沿 C_0D_0 方向移动到 D_1 点，如图 2 所示。

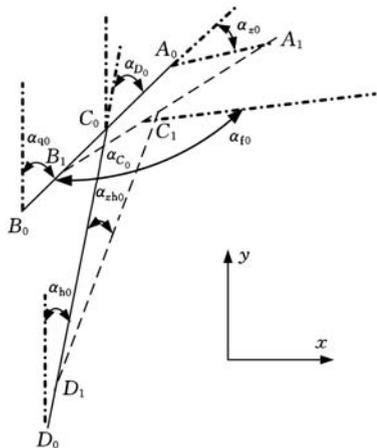


图 2 液压鹅颈挂车转弯模型

虚线 $A_1B_1、C_1D_1$ 为模型的当前位置，点划线 A_0A_1 为 A_0 点在 Δt 时间内的运动轨迹。在工程实践中，大件车组通过复杂弯道的速度约为

0.2m/s。该模型中的时间增量 Δt 取值范围可以限定为 $[0.01, 0.05]$ s。 Δt 取值越小，基于该模型的模拟结果精度越高，模拟时间越长；反之，模拟精度越低，模拟时间越短。

2 液压鹅颈挂车转弯路径算法

已知 $A_0、B_0、C_0、D_0$ 的坐标以及 $\alpha_{q0}、\alpha_{h0}$ 的值。设线段 $A_0B_0、B_0C_0、A_0C_0、D_0C_0$ 的长度分别为 $L_q、L_C、L_{C_2}$ 和 L_h ，则可以得到 A_1 点和 B_1 点的坐标以及 α_{q1} 值。

A_1 点坐标轨迹为

$$\begin{aligned} X_{A_1} &= X_0 + v_0 \Delta t \sin(\alpha_{q0} + \alpha_{z0}) \\ Y_{A_1} &= Y_0 + v_0 \Delta t \cos(\alpha_{q0} + \alpha_{z0}) \\ \alpha_{q1} &= \alpha_{q0} + \arcsin\left(\frac{v_0 \Delta t \sin \alpha_{z0}}{L_q}\right) \end{aligned}$$

A_{i+1} 点坐标轨迹为

$$\begin{aligned} X_{A_{i+1}} &= X_i + v_i \Delta t \sin(\alpha_{qi} + \alpha_{zi}) \\ Y_{A_{i+1}} &= Y_i + v_i \Delta t \cos(\alpha_{qi} + \alpha_{zi}) \\ \alpha_{qi+1} &= \alpha_{qi} + \arcsin\left(\frac{v_i \Delta t \sin \alpha_{zi}}{L_q}\right) \end{aligned}$$

其中， $i = 1, 2, \dots$ 。

B_0 点坐标轨迹为

$$\begin{aligned} X_{B_0} &= X_{A_0} - L_q \sin \alpha_{q0} \\ Y_{B_0} &= Y_{A_0} - L_q \cos \alpha_{q0} \end{aligned}$$

B_i 点坐标轨迹为

$$\begin{aligned} X_{B_i} &= X_{A_i} - L_q \sin \alpha_{qi} \\ Y_{B_i} &= Y_{A_i} - L_q \cos \alpha_{qi} \end{aligned}$$

C_0 点坐标轨迹为

$$\begin{aligned} X_{C_0} &= X_{A_0} - L_{C_2} \sin \alpha_{q0} \\ Y_{C_0} &= Y_{A_0} - L_{C_2} \cos \alpha_{q0} \end{aligned}$$

C_i 点坐标轨迹为

$$\begin{aligned} X_{C_i} &= X_{A_i} - L_{C_2} \sin \alpha_{qi} \\ Y_{C_i} &= Y_{A_i} - L_{C_2} \cos \alpha_{qi} \end{aligned}$$

D_0 点坐标轨迹为

$$\begin{aligned} X_{D_0} &= X_{C_0} - L_h \sin \alpha_{h0} \\ Y_{D_0} &= Y_{C_0} - L_h \cos \alpha_{h0} \end{aligned}$$

D_i 点坐标轨迹的计算过程如下：

$$\begin{aligned} L_{C_{i+1}C_i} &= \sqrt{(X_{C_{i+1}} - X_{C_i})^2 + (Y_{C_{i+1}} - Y_{C_i})^2} \\ \alpha_{fi} &= \arccos\left(\frac{L_{C_{i+1}C_i}^2 + L_{B_{i+1}C_i}^2 - L_C^2}{2L_{C_{i+1}C_i}L_{B_{i+1}C_i}}\right) \\ \alpha_{D_i} &= \alpha_{qi} - \alpha_{hi} \\ \alpha_{C_i} &= \alpha_{fi} - \alpha_{D_i} \\ L_{D_{i+1}C_i} &= L_{C_{i+1}C_i} \cos \alpha_{C_i} - \\ &\quad \sqrt{-L_{C_{i+1}C_i}^2 \sin^2 \alpha_{C_i} + L_{D_{i+1}C_{i+1}}^2} \\ \alpha_{zhi} &= \arccos\left(\frac{L_{D_{i+1}C_i}^2 + L_{C_{i+1}D_{i+1}}^2 - L_{C_{i+1}C_i}^2}{2L_{D_{i+1}C_i}L_{D_{i+1}C_{i+1}}}\right) \\ \alpha_{hi+1} &= \alpha_{hi} + \alpha_{zhi} \\ X_{D_{i+1}} &= X_{C_{i+1}} - L_h \sin \alpha_{hi+1} \end{aligned}$$

$$Y_{D_{i+1}} = Y_{C_{i+1}} - L_h \cos \alpha_{h_{i+1}}$$

3 液压鹅颈挂车转弯动态仿真

3.1 仿真参数的输入

在上文所建模型和算法的基础上,采用 Access数据库存储牵引车、液压鹅颈、全挂车的数据,采用 VB6.0 编程语言编写代码,实现了液压鹅颈挂车转弯的计算机动态模拟仿真。

通过输入窗口输入以下参数:①液压鹅颈参数,仿真程序初始化时根据所输入的液压鹅颈型号从数据库中调取液压鹅颈长度、宽度、前销位置等参数;②全挂车型号,用于从数据库提取全挂车车宽、轴距等参数;③挂车的轴线数及锁死轴数;④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;⑤弯道地图(经过预处理的 CAD 图)。

货物为某大件运输公司承运的丙烯反应塔(长 25m,前端宽 3.6m,后端宽 4.6m)。承载车为 11 轴线 2 纵列轴线板挂车,牵引车为奔驰 3354 机车。

排障要求如下(见图 3):

- (1)东西向公路以北建筑不可拆除;
- (2)丁字路口东南角阴影部分可以拆除;
- (3)南北向公路西侧的障碍物主要是电杆和树,其中,电杆不可以拆除,树可以拆除。

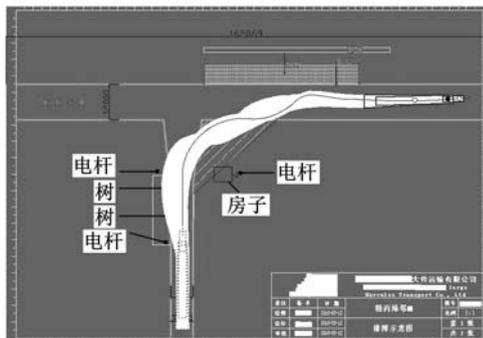


图 4 计算机动态仿真界面(1)

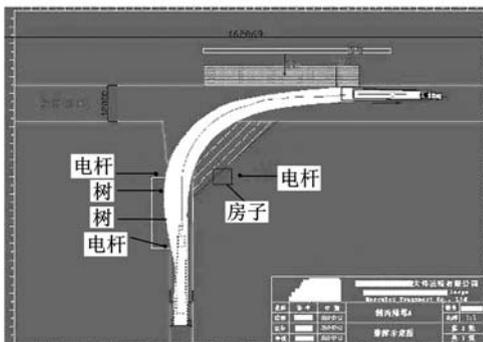


图 5 计算机动态仿真界面(2)

(2)第二次仿真(图 5)。牵引车直行,越过北侧电杆后,右转向角度为 1°,缓慢增加至 10°;牵引车后端离开阴影部分后,将牵引车调至与东西路平行。

行车速度均为 0.6km/h。

图 4 与图 5 中,虚线表示牵引车、承载车组及货物的初始位置,在仿真过程中,运输车组所过之处,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,深色曲线表示牵引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,驾驶员可以沿标注好的轨迹一次性地操控牵引车拖挂液压鹅颈挂车及货物顺利地通过弯道。

4 结论

针对液压鹅颈挂车转弯过程运动关系复杂、弯道通过能力差的问题,建立了液压鹅颈挂车转弯模型,给出了牵引车、液压鹅颈、全挂车和货物关键物理量的迭代算法,利用计算机语言编程实现了液压鹅颈挂车转弯过程的动态仿真。

本研究课题作为某重型机械集团的公路大件运输方案设计系统的一个子功能模块,已在企业的实际运输过程中经过多次实践检验,结果表明,基于该模型和算法的仿真程序运行结果与运输实际情况误差很小,具有较高的工程指导意义。

(下转第 503 页)

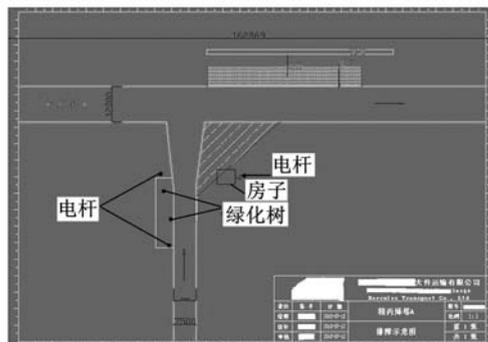


图 3 弯道及排障示意图

3.2 仿真过程与结果

进入仿真界面,开始仿真后,通过键盘动态控制牵引车转向轴的转向和速度,仿真结果如图 4、图 5 所示。图 4 中,两棵树均须拆除,南侧电杆不需拆除,北侧电杆与车组间余量较小,不符合行车安全。图 5 中,只需拆除南侧的树,且两电杆与车组间余量较大,满足行车安全要求。

具体仿真过程如下:

- (1)第一次仿真(图 4)。牵引车直行,越过北侧电杆后,右转向角度为 10°;牵引车扫过阴影部分后,左转向 20°;牵引车调至与东西路平行。

4 结论

(1)采用薄板单元和梁单元相结合的方法建立客车骨架有限元模型,计算结果准确、可靠。

(2)通过整车骨架在弯曲和弯扭工况下的强度分析,了解该车各个部位强度的分布,再结合灵敏度分析的结果,获知了对整车减重效果明显、对刚度影响不大的构件。

(3)综合应用轻量化技术的研究成果,并结合企业实际,提出了某半承载式客车车身骨架的轻量化优化方案。通过优化前、后整车自由模态、弯曲挠度、扭转刚度及应力分布的结果比对,验证了该轻量化方案的可行性。

参考文献:

- [1] 赵韩,钱德猛.基于 ANSYS 的汽车结构轻量化设计[J].农业机械学报,2005,36(6):12-15.
- [2] 谭继锦,张代胜,熊良平,等.某型大客车车身骨架轻量化设计[J].汽车工程,2006,28(4):394-397.
- [3] 高玉华,张代胜,李华香,等.客车车身骨架板梁混合有限元模型与轻量化研究[J].农业机械学报,2007,38(9):46-50.
- [4] Valente F, Li X, Messina A, et al. A New Methodology for Improving Accuracy of Structural Analysis of Car Body Parts[R]. SAE Paper 982336.
- [5] 赵韩,姜康,曹文钢,等.半承载式客车车身结构有限元分析[J].汽车工程,2007,29(4):346-350.
- [6] 张代胜,张林涛,谭继锦,等.基于刚度灵敏度分析的客车车身轻量化研究[J].汽车工程,2008,30(8):718-720.
- [7] Naesung L, Byungwoo L, Kazuhiro S. Optimal Sub-assembly Partitioning of Space Frame Structures for In-process Dimensional Adjustability and Stiffness [J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2006, 128(3):527-535.
- [8] 王书亭,刘啸,吴义忠,等.基于灵敏度分析的车架轻量化及疲劳寿命估算[J].中国机械工程,2011,22(16):2001-2006.
- [9] 那景新,何洪军,闫亚坤.基于构件内力优化的车身结构轻量化设计[J].吉林大学学报(工学版),2010,40(6):1492-1496.

(编辑 陈 勇)

(上接第 487 页)

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.
- [3] Lamiroux F, Laumond J P, van Geem C, et al. Trailer-truck Trajectory Optimization for Airbus A380 Component Transportation[J]. IEEE Robotics and Automation, 2005, 12(1):14-21.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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,1997,19(1):60-65.
- [13] 胡宁.半挂汽车列车转向运动学分析[J].汽车研究与开发,1998,5(2):23-26.

(编辑 卢湘帆)

作者简介:龙江启,男,1974年生。温州大学机电工程学院讲师、博士。主要研究方向为汽车现代设计方法、车身结构轻量化设计。发表论文20余篇。兰凤崇,男,1959年生。华南理工大学机械与汽车工程学院教授、博士研究生导师。王金轮,男,1984年生。华南理工大学机械与汽车工程学院博士研究生。周斯加,男,1981年生。温州大学机电工程学院讲师、博士。

作者简介:程博,男,1984年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士研究生。主要研究方向为大件运输路径优化,运输方案智能优化。杨育,男,1971年生。重庆大学机械传动国家重点实验室教授、博士研究生导师。刘柏林,男,1987年生。重庆大学机械传动国家重点实验室硕士研究生。申世杰,男,1970年生。中国第二重型机械集团高级工程师。