

Matlab 环境下车辆的开环操纵稳定性仿真*

吕红明^{1,2}, 陈 南¹, 王 琪²

(1. 东南大学 机械工程系, 江苏 南京 210096 2. 盐城工学院 机械工程系, 江苏 盐城 224003)

摘 要:应用 Matlab 软件的语言和图形功能, 在频域和时域内对二自由度车辆多状态变量进行了动力学仿真。仿真结果表明, 低速时, 车辆动态特性呈过阻尼状态; 高速时, 呈欠阻尼状态, 各状态量响应在工作频带内出现谐振, 恶化了车辆的操纵稳定性。

关键词:操纵稳定性; 车辆; 动力学; 仿真; Matlab

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1671-532X(2004)01-0021-04

操纵稳定性是车辆的重要性能之一, 关于人-车-路的闭环评价^[1~2]表明, 车辆操纵稳定性必须考虑多状态量的响应。其中车辆质心横摆率、侧偏角和侧向加速度是描述其动力学稳定性的最佳状态量。一般车辆操纵稳定性对这些状态量的频率特性要求是 (1) 有足够宽的通频带 (2) 在有效通频带内, 幅频特性宜平坦 (3) 在有效通频带内, 相位超前和滞后都应尽量小。对瞬态响应要求 (1) 上升时间快 (2) 超调量小 (3) 稳定时间短。另外, 还要求稳态响应尽量保持适度的不足转向特性^[3]。

Matlab 语言提供了强大的图形绘制功能^[4], 用户只需设计有限个指令的 m 文件, 在 m 文件中指定绘图方式, 并提供充足的绘图数据, 即可得出所需的图形。Matlab 还对绘出的图形提供了各种修饰方法, 使绘出的图形更美观。

为了直观地表示车辆在不同的速度下的开环操纵稳定性, 本文应用 Matlab 软件对二自由度车辆的操纵稳定性进行了仿真, 并作了详细的分析。

1 二自由度车辆运动的数学模型

本文采用线性二自由度运动模型^[5], 如图 1 所示。

车辆状态量为质心横摆率 r 和侧偏角 β , 本文还研究与它们相关的侧向加速度 $a_y = V(\dot{\beta} +$

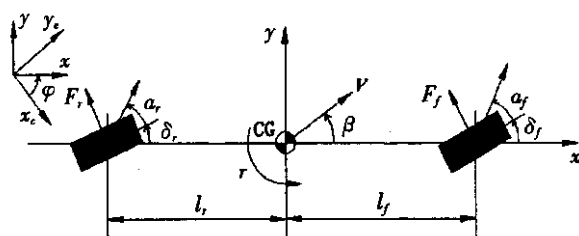


图 1 二自由度车辆运动模型

Fig. 1 The 2DOF bicycle model

$r)$ 。根据牛顿第二定律, 得到车辆的运动方程如下:

$$\begin{cases} M(\dot{\beta} + r) = (k_f + k_r)\beta + \frac{l_f k_f - l_r k_r}{V}r - k_f \delta_f \\ I_z \dot{r} = (l_f k_f - l_r k_r)\beta + \frac{l_f^2 k_f - l_r^2 k_r}{V}r - \alpha k_f \delta_f \end{cases} \quad (1)$$

式中, M 为车辆质量; I_z 为车辆绕 Z 轴的转动惯量; V 为车辆纵向行驶速度; l_f 、 l_r 分别为前后轮到车身之心的距离; k_f 、 k_r 分别为前后轮侧偏刚度; δ_f 为前轮转向角。

根据上述车辆运动方程, 得到前轮转向角到车辆质心横摆率、侧偏角的和侧向加速度的传递函数, 分别如下:

$$G_{\delta_f \rightarrow r, \beta}(S) = VK_f \cdot [-\alpha MV_S + (K_{lfr} + \alpha K_{fr})] \Delta \quad (2)$$

* 收稿日期 2003-10-27

[基金项目] Ford-中国研究与发展基金项目(50122153); 江苏高校自然科学基金项目(03KJD520246)。

作者简介: 吕红明(1975-), 男, 江苏大丰市人, 盐城工学院机械工程系讲师, 东南大学在读硕士生。

$$G_{\delta_f-\beta}(S) = -K_f \cdot [V I_z s - (\alpha M V^2 + \alpha K_{1fr} + K_{2fr})] \Delta \quad (3)$$

$$G_{\delta_f-\alpha_y}(S) = V K_f \cdot [-V I_z s^2 + (\alpha K_{1fr} + K_{2fr})s + (K_{1fr} + \alpha K_{fr}) \cdot V] \Delta \quad (4)$$

其中:

$$\Delta = I_z M V^2 s^2 - (I_z K_{fr} + M K_{2fr}) \cdot V s + (K_{fr} K_{2fr} - K_{1fr}^2 - K_{1fr} M V^2),$$

$$K_{fr} = K_f + K_r, K_{1fr} = -l_f K_f + l_r K_r,$$

$$K_{2fr} = l_f K_f + l_r K_r.$$

本文所用模型参数为: $M = 3018 \text{ kg}$, $I_z = 10437 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $l_f = 1.84 \text{ m}$, $l_r = 1.88 \text{ m}$, $k_f = 46328 \text{ N/rad}$, $k_r = 76690 \text{ N/rad}$, $V = 0 \sim 30 \text{ m/s}$.

2 编制 m 文件和生成所需图形

变量的取值范围为速度 $V = 0 \sim 30 \text{ m/s}$ 、频率 $\omega = 0 \sim 20 \text{ rad/s}$ 和时间 $t = 0 \sim 8 \text{ s}$, 各步长分别为 1 m/s 、 1 rad/s 和 0.1 s 其中 V 的步长决定了绘制曲线的条数, ω 和 t 的步长分别决定每条频率响应和阶跃响应曲线的光滑程度。在 Matlab 中, mesh() 函数的调用格式为 mesh(x, y, z, c), 该函数可以根据 x、y 和 z 坐标矩阵绘制网格曲面, c 为颜色矩阵, 表示在不同高度下的颜色范围, 缺省值 $c = z$ 。用 step(G, t) 绘制函数 $G(j\omega)$ 在 t 时刻的阶跃响应图。另外, 需要说明的是, Matlab 6.0 支持希腊字母坐标标注符号, 但不能将希腊字母作数据

变量。

根据式(2)~(4)在 Matlab 的 m-file 编辑器中编制 m 文件(略)。m 文件运行后, 得到图 2~4 所示的表征车辆操纵稳定性的各状态量三维响应图。

3 二自由度车辆的开环操纵稳定性

3.1 频域特性

车辆的质心横摆率 r 、侧偏角 β 和侧向加速度 a_y 对前轮转向角 δ_f 的幅频和相频响应如图 2 和图 3 所示。为了便于观察, 图 3 相对于图 2 作了适当的坐标旋转变换。

图 2 的坐标含义为: 横坐标 V 表示车速, ω 表示前轮转向频率, 纵坐标分别为各状态量的幅值响应。各幅频响应图表明, 响应与前轮转向角频率及车辆行驶速度有关, 特别是谐振峰值与车辆速度有关。在低速区, 横摆率和侧向加速度响应在频域内平稳, 无明显谐振, 侧偏角响应在某一速度恒为零, 与频率无关, 低于此速时, 响应幅值随频率递减, 在高于此速的低速区, 响应也比较平稳; 在高速区, 各响应都出现谐振, 谐振频率随速度变化不大, 但谐振峰值随速度增加而升高; 在高速高频区, 响应比较平稳, 速度影响较小。零频率的横摆率幅频响应(即稳态增益)表明车辆为不足转向。

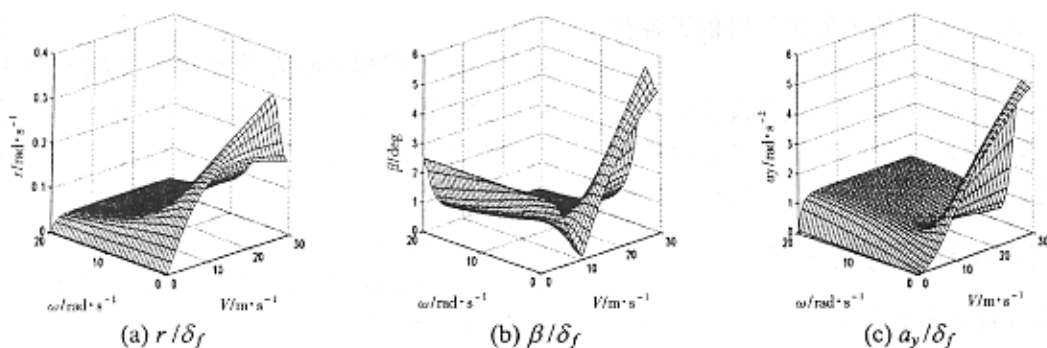


图 2 幅频响应图

Fig. 2 Magnitude - frequency responses

图 3 的横坐标的含义与图 2 相同, 纵坐标分别表示各状态量的相位响应。各相频响应图表明, 相位响应与前轮转向角频率及车速有关, 横摆率相

位在低速区随频率增加从 0° 缓慢降低, 在高速低频区, 随频率增加从 0° 逐渐增加, 在谐振频率处, 达到最大值, 在高速低频区, 随频率增加而降低,

最终稳定在 -90° ;侧偏角相位在低速区 ,随频率从 0° 缓慢降低 ,零频率相位从 0° 变为 180° 表明侧偏角从低速区的正值变化为高速区的负值 ,在高速区 ,随着频率增加 ,侧偏角相位从 180° 逐渐降低 ,最终稳定在 0° ;侧向加速度相位在低速区 ,随

频率增加从 0° 迅速增加 ,达到 90° ,在高速低频区 ,随频率增加从 0° 逐渐降低 ,在谐振频率处 ,达到最小值 ,在高速高频区 ,随频率增加而增加 ,最终稳定在 0° 。

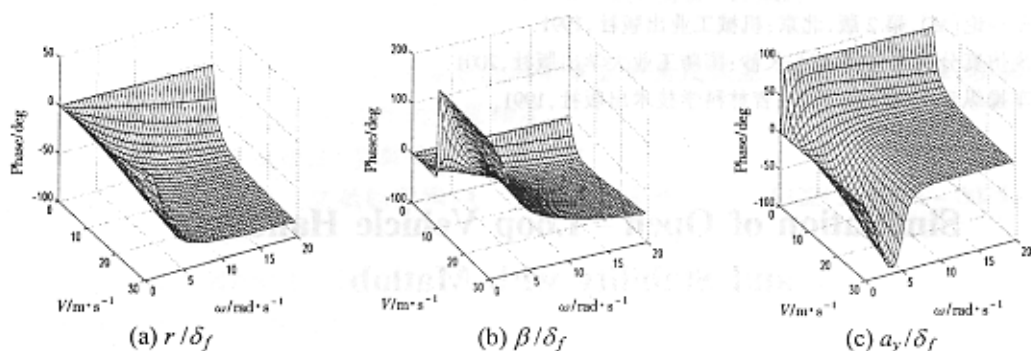


图3 相频响应图

Fig.3 Phase-frequency responses

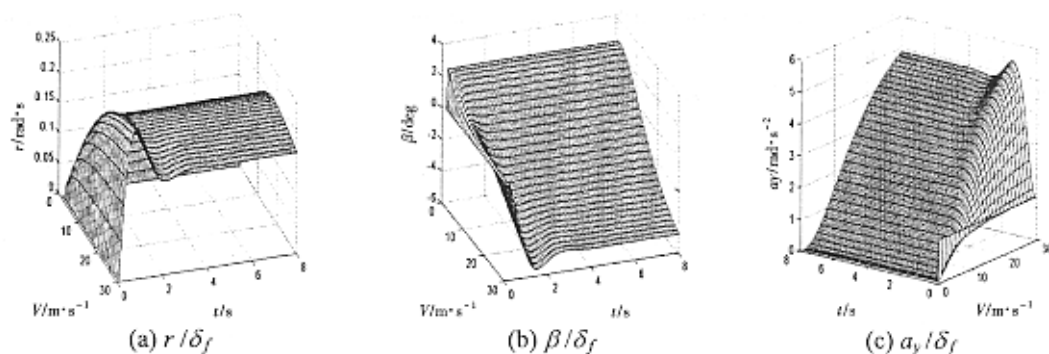


图4 阶跃响应图

Fig.4 Step responses

3.2 时域特性

车辆质心横摆率、侧偏角、侧向加速度的阶跃响应如图2所示,阶跃信号为 5° 前轮转向角。

图4中的横坐标 t 表示时间历程。在图4b中,侧偏角 β 在低速时为正值,随着速度增加,侧偏角减小,在高速时变为负值。在仿真的速度范围内,存在瞬态和稳态恒为零的速度,和前面频率特性分析一致。

各阶跃响应还表明,在低速区,各响应均比较平稳,呈过阻尼状态,无振荡;当速度增加时,响应

超调量逐渐增加,在高速区,均出现振荡,呈欠阻尼状态,振荡随速度增加而加剧。通过以上分析,车辆操纵在高速时会出现谐振,瞬态操纵稳定性变差。

4 结论

本文应用 Matlab 软件对二自由度车辆进行了开环操纵稳定性仿真,将抽象的理论转变为直观可视、易于理解的图形,为车辆操纵稳定性分析提供了一种有效的途径。车辆从低速到高速时,质

心横摆率、侧偏角和侧向加速度响应会发生明显的变化,高速时,各状态量响应在工作频带内出现谐振,恶化了车辆的操纵稳定性。如果能在高速

范围内改善车辆各状态量响应的频域和时域性能,将有助于改善车辆的操纵稳定性。

参考文献:

- [1] 郭孔辉.人-车-路闭环操纵系统主动安全性的综合评价与优化设计[J].汽车技术,1993(4):4-12.
- [2] 孔繁森,郭孔辉,孙光升,等.人-车-路闭环系统操纵稳定性的模糊评价及其仿真[J].机械工程学报,2002,38(11):75-79.
- [3] 余志生.汽车理论[M].第2版.北京:机械工业出版社,1991.
- [4] 黄文梅.系统仿真分析与设计[M].长沙:国防工业大学出版社,2001.
- [5] 郭孔辉.汽车操纵动力学[M].长春:吉林科学技术出版社,1991.

Simulation of Open – Loop Vehicle Handling and Stability with Matlab

LÜ Hong-ming^{1,2}, CHEN Nan¹, WANG Qi²

(1. Mechanical Department of Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China
2. Mechanical Department of Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, China)

Abstract This paper presents a multi – variable dynamic simulation of two degree – of – freedom vehicle applying the program and function of graphic with Matlab. Simulation shows that when at low speed, vehicle dynamic characteristics is in over – damping state and when at high speed, in under – damping state. Each state variable response appears resonance in working frequency domain, which deteriorates the vehicle handling and stability.

Keywords Handling and Stability; Vehicle; Dynamics; Simulation; Matlab