

# 汽车操纵稳定性 主动控制的仿真研究

刘春辉◎著

**SIMULATION RESEARCH ON ACTIVE  
CONTROL OF VEHICLE HANDLING AND  
STABILITY**



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 汽车操纵稳定性 主动控制的仿真研究

刘春辉 著

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

---

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车操纵稳定性主动控制的仿真研究 / 刘春辉著. —北京: 北京理工大学出版社, 2019.11

ISBN 978-7-5682-7362-6

I. ①汽… II. ①刘… III. ①汽车-操纵稳定性-系统仿真-研究  
IV. ①U461.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 256529 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)  
(010) 82562903 (教材售后服务热线)  
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 9.25

字 数 / 130 千字

版 次 / 2019 年 11 月第 1 版 2019 年 11 月第 1 次印刷

定 价 / 48.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 封 雪

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

本专著的出版得到“安徽科技学院人才引进项目”(项目编号：**RCYJ201902**)和“安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目”(项目编号：**gxyqZD2019059**)资助。



# 前 言

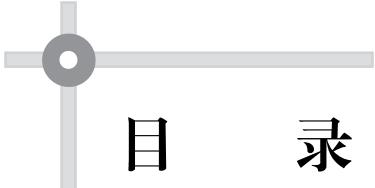
本专著对汽车操纵稳定性的主动控制进行了仿真研究。操纵稳定性包含的内容十分广泛，本专著仅针对提高操纵稳定性的电子控制系统，如四轮转向系统和动力学控制系统（稳定性程序）展开分析，并将上述电子控制系统应用到半挂汽车列车上，仿真分析了其优越性。

本专著内容共分 5 章：

第 1 章对四轮转向系统和动力学控制系统做了介绍，并简要介绍了半挂汽车列车的型号和分类。第 2 章建立了二自由度、三自由度前轮转向和四轮转向汽车的动力学模型以及前轮转向和四轮转向半挂汽车列车的动力学模型，介绍了二次多项式平方轮胎模型、魔术公式轮胎模型和 Gim 轮胎模型。第 3 章对仿真软件 MATLAB 做了介绍，并对不同比例系数四轮转向汽车的时域、频域响应以及四轮转向汽车的非线性模型做了分析。第 4 章对车辆的直接横摆力矩控制做了分析，包括模糊控制和不确定轮胎刚度下的鲁棒控制。第 5 章对半挂汽车列车横向稳定的主动控制做了分析，包括四轮转向系统、多种形式的直接横摆力矩控制等。

本专著的出版得到作者单位安徽科技学院各级领导和同事的大力支持，在此表示衷心的感谢！

本专著是作者根据多年相关科研经历写成的，由于作者水平有限，疏漏错误之处请大家批评指正。



# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 4WS 汽车概述	1
1.3 ESP 概述	3
1.4 半挂汽车列车概述	4
1.5 研究内容	5
第 2 章 汽车动力学模型的建立	6
2.1 前轮转向汽车线性二自由度动力学模型	6
2.2 前轮转向汽车三自由度动力学模型	11
2.3 四轮转向汽车线性二自由度动力学模型	12
2.4 四轮转向汽车三自由度动力学模型	13
2.5 2WS、4WS 半挂汽车列车动力学模型	14
2.6 轮胎模型	17
2.6.1 二次多项式平方轮胎模型	17
2.6.2 魔术公式	17
2.6.3 Gim 轮胎模型	18
第 3 章 汽车操纵稳定性的仿真分析	20
3.1 仿真工具介绍	20
3.2 四轮转向汽车操纵稳定性的研究	34
3.2.1 后轮转角的设计	34
3.2.2 时域响应	35
3.2.3 频域响应	40



## 2 汽车操纵稳定性主动控制的仿真研究

3.3	高维 4WS 车辆的降维研究	49
3.4	最优控制 4WS	62
<b>第 4 章</b>	<b>汽车操纵稳定性 DYC 的仿真分析</b>	<b>65</b>
4.1	DYC 的鲁棒最优控制	65
4.2	DYC 的 Fuzzy-PID 控制	75
4.3	4WS 汽车 DYC 的模糊 PID 控制	82
4.4	ABS/ASR/ESP 集成控制	86
<b>第 5 章</b>	<b>半挂汽车列车横向稳定性的主动控制</b>	<b>93</b>
5.1	FWS 半挂汽车列车运动仿真分析	93
5.2	4WS 半挂汽车列车运动仿真分析	98
5.2.1	比例系数 4WS 的运动仿真分析	98
5.2.2	最优控制的 4WS	100
5.3	横向稳定性最优控制	105
5.4	鲁棒最优保	107
5.4.1	鲁棒最优保性能控制器设计	107
5.4.2	4WS 半挂汽车列车鲁棒最优保性能控制	113
5.5	鲁棒 $H_{\infty}$ 最优控制	116
5.5.1	鲁棒 $H_{\infty}$ 最优控制	116
5.5.2	4WS 鲁棒 $H_{\infty}$ 最优控制	119
5.6	半挂汽车列车 DYC 的 Fuzzy 控制	122
5.6.1	Fuzzy 控制	122
5.6.2	4WS Fuzzy 控制	125
5.6.3	Fuzzy PID 控制	128
5.6.4	4WS Fuzzy PID 控制	132
	参考文献	135

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景

在我国，乘用车已广泛进入普通家庭，汽车保有量迅速增加，2016年的保有量已达到1.94亿辆；汽车的高保有量势必导致交通拥堵，增加交通事故发生的概率；汽车行驶时的高速度，在增加交通事故发生概率的同时，也使得交通事故致死率增高，所以如何提高汽车的行驶安全性引起了人们的广泛关注。

汽车安全性有被动和主动之分。被动安全系统主要指交通事故发生时的保护装置（如安全带、安全气囊等）。主动安全系统主要指交通事故发生前的预防装置 [如四轮转向（4WS）、防抱死制动系统（ABS）、驱动力控制系统（TCS）、车辆稳定性控制系统（ESP 或者 VSC）等]。主动安全系统主要针对高车速下的操纵稳定性进行设计开发，各控制系统的有效工作区域见图1-1。

从图1-1中可以看出主动安全控制系统的有效工作区域不同：4WS工作在线性轮胎区域，TCS工作在极限大驱动力附近区域，ABS工作在极限大制动力附近区域，VSC工作在极限大侧偏力附近区域。

## 1.2 4WS 汽车概述

图1-2、图1-3为4WS汽车的实际应用。4WS汽车有两种转向规律：同向和异向，分别见图1-4和图1-5。



## 2 汽车操纵稳定性主动控制的仿真研究

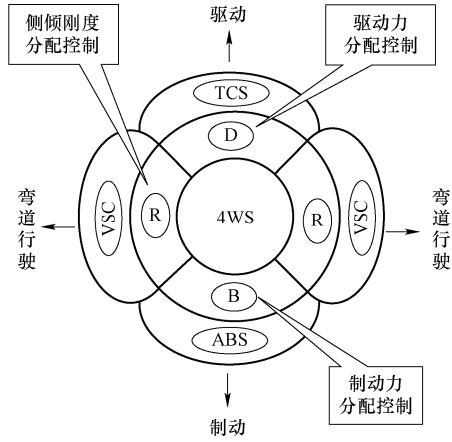


图 1-1 主动安全控制系统的工作区域

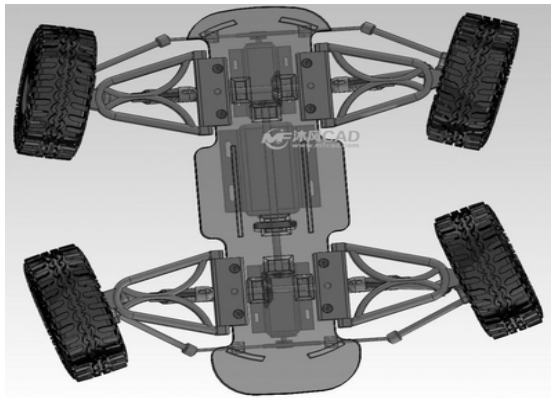


图 1-2 四轮转向汽车示意图



图 1-3 四轮转向汽车

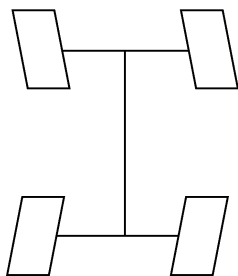


图 1-4 异向偏转

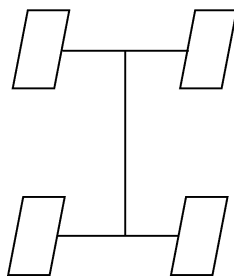


图 1-5 同向偏转

4WS 电控系统包括传感器、ECU 和执行器（后轮转向执行机构）三大部分，见图 1-6。转弯时，传感器的信号发送给 ECU，ECU 若判断需要后轮参与转向，就会发出指令给执行器，执行器就会使后轮偏转相应的角度。

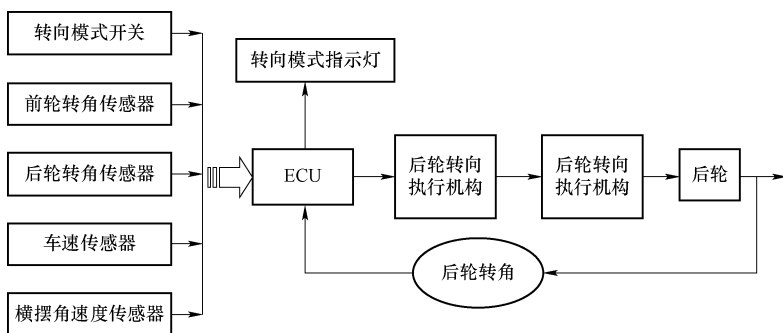


图 1-6 4WS 电控系统组成

### 1.3 ESP 概述

ESP 的组成及工作过程见图 1-7。

ESP 由收集车辆运动信息的传感器、判断车辆实际运行状态和理想运行状态偏差的 ECU 和调整车辆运行状态的执行器组成。若 ECU 判断车辆实际运行状态偏离了理想运行状态，就会控制制动系统，产生横摆力矩  $M$ ，使车辆恢复到理想状态。

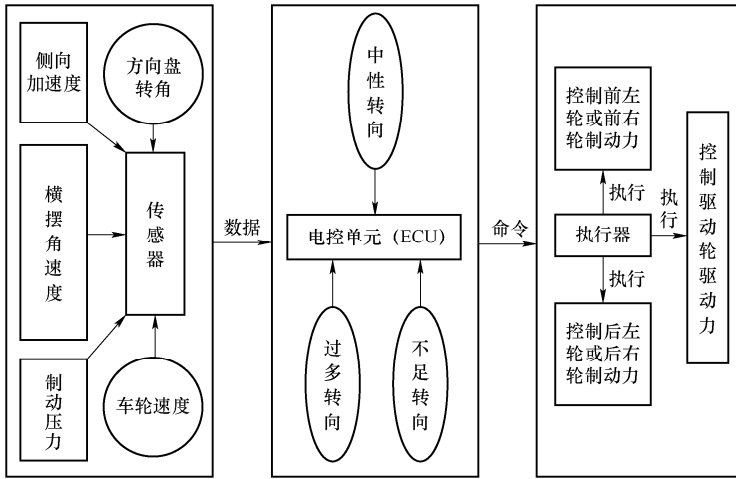


图 1-7 ESP 的组成及工作过程图

## 1.4 半挂汽车列车概述

半挂汽车列车由牵引车和半挂车组成，其模型见图 1-8。

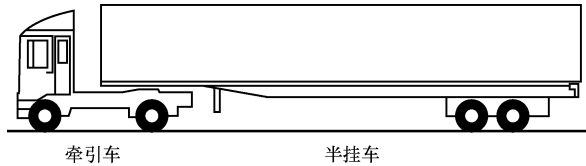


图 1-8 半挂汽车列车模型图

半挂车型号如图 1-9 所示，按车型分类见图 1-10。

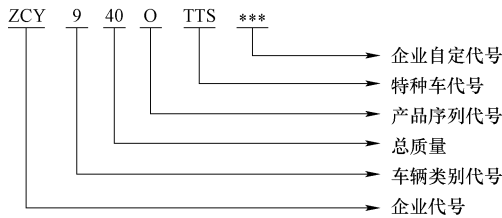


图 1-9 半挂车型号

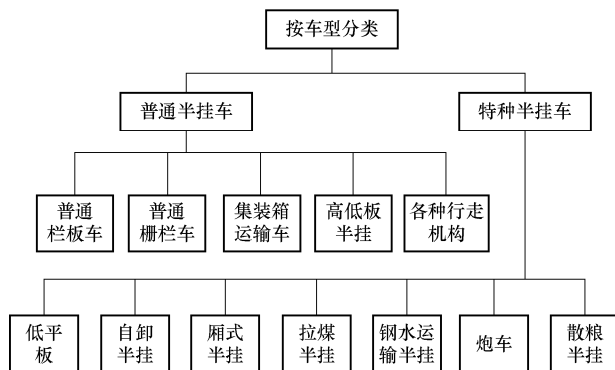


图 1-10 半挂车分类

## 1.5 研究内容

汽车和半挂汽车列车主动安全的内容很多，本书主要针对如何提高车辆的操纵稳定性展开研究，具体内容如下：

- (1) 建立线性二自由度 4WS 汽车动力学模型。
- (2) 多种类 4WS 汽车时域和频域的仿真分析。
- (3) 非线性 4WS 汽车的分岔与失稳分析。
- (4) 基于鲁棒理论和模糊理论的直接横摆力矩控制 (DYC)。
- (5) 半挂汽车列车横向稳定性的主动控制研究。

## 第2章 汽车动力学模型的建立

### 2.1 前轮转向汽车线性二自由度动力学模型

建立汽车动力学模型是进行操纵稳定性仿真和分析的基础。汽车动力学模型中，轮胎占有很重要的地位，所以要首先明确轮胎坐标系和车辆坐标系，见图 2-1。

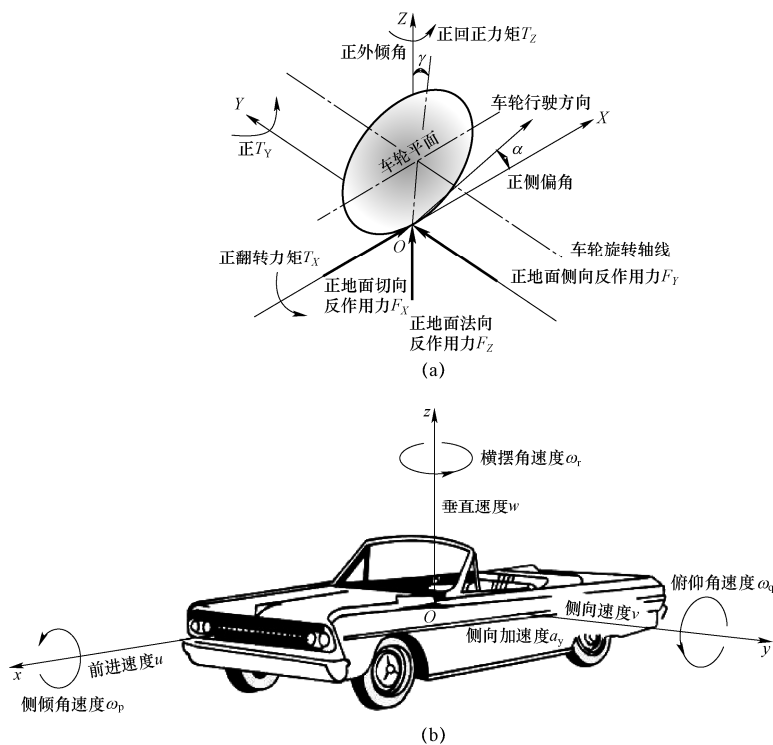


图 2-1 轮胎和车辆坐标系  
(a) 轮胎坐标系；(b) 车辆坐标系

轮胎具有侧偏现象，这是其重要特性，见图 2-2。

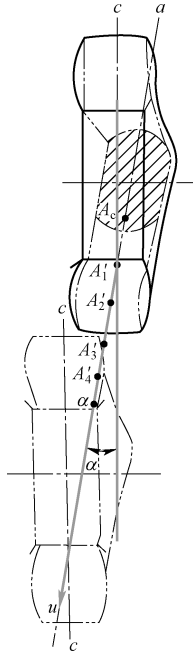


图 2-2 轮胎的侧偏现象

图 2-3 为轮胎侧偏角正负的判定，可以看出，侧偏力为正时，产生负的侧偏角，反之亦然。

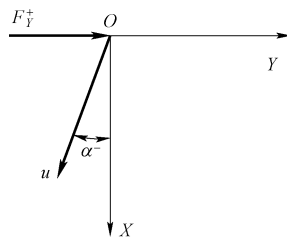


图 2-3 轮胎侧偏角正负的判定

轮胎侧偏角和侧偏力之间是复杂的非线性关系，只有在侧偏角比较小（小于  $5^\circ$ ）时，才为线性关系，见图 2-4。

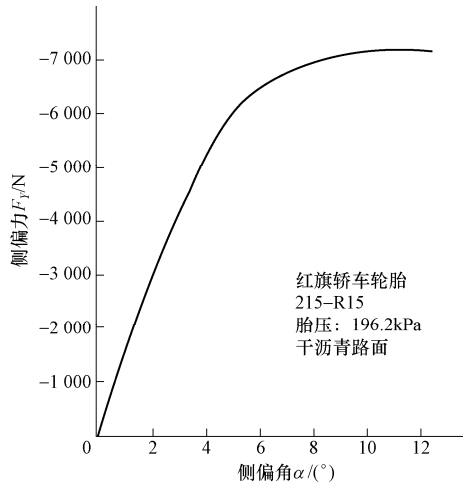


图 2-4 轮胎的侧偏力与侧偏角之间的关系曲线

通过合理假设可得到一个线性二自由度（侧向运动和横摆运动）的汽车模型，如图 2-5（a）所示，该模型能反映汽车操纵稳定性的基本特性。

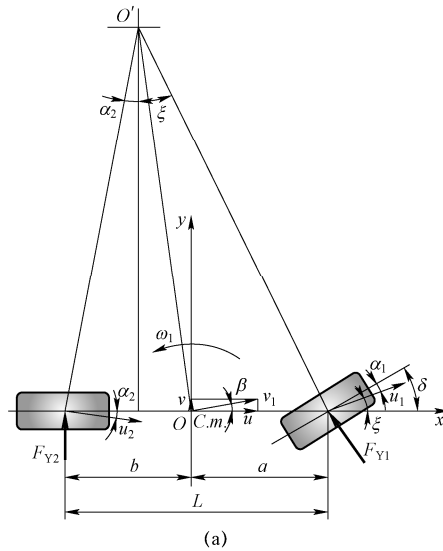


图 2-5 二自由度汽车模型和汽车运动分析示意图

(a) 二自由度汽车模型

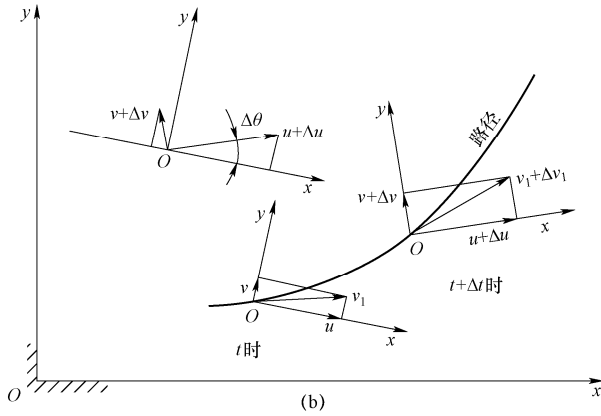


图 2-5 二自由度汽车模型和汽车运动分析示意图 (续)  
(b) 汽车运动分析示意图

图 2-5 (b) 所示为汽车运动分析示意图。进行运动学分析可得汽车二自由度运动微分方程式为

$$\begin{cases} m\dot{v} + \frac{(c_{af} + c_{ar})v}{u} + mur - \frac{(bc_{ar} - ac_{af})r}{u} - c_{af}\delta = 0 \\ I\dot{r} - \frac{(bc_{ar} - ac_{af})v}{u} + \frac{(a^2c_{af} + b^2c_{ar})r}{u} - ac_{af}\delta = 0 \end{cases} \quad (2-1)$$

各式中参数含义见表 2-1。

表 2-1 二自由度汽车参数含义

参数	含义
$m$	汽车质量
$r$	横摆角速度
$\beta$	质心侧偏角
$I$	车辆绕 Z 轴的转动惯量
$F_{yf}$	地面对前轮的侧向反作用力
$F_{yr}$	地面对后轮的侧向反作用力
$a$	质心到前轴的距离
$b$	质心到后轴的距离
$u$	前进速度



续表

参数	含义
$c_{\alpha f}$	前轮侧偏刚度
$c_{\alpha r}$	后轮侧偏刚度
$\delta$	前轮转角
$v$	侧向速度

在前轮角阶跃输入下，汽车进入稳态行驶有三种响应，分别为中性、不足和过多转向，见图 2-6 (a)；若分析瞬态响应，其特点见图 2-6 (b)。

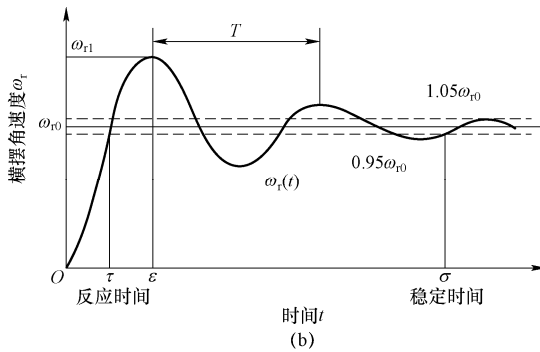
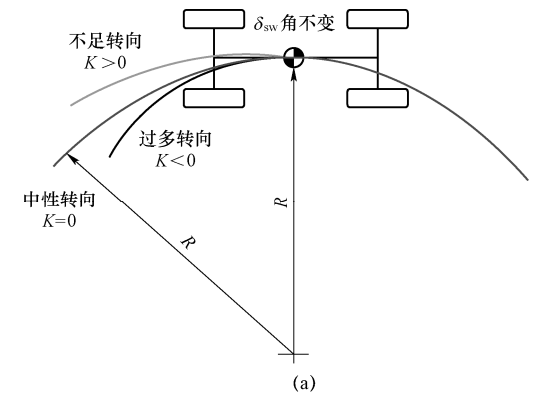


图 2-6 汽车的稳态响应及瞬态响应

(a) 汽车的稳态响应类型；(b) 汽车的瞬态响应