

应用型本科汽车类专业“十二五”规划教材

# 汽车理论

张文春 主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

应用型本科汽车类专业“十二五”规划教材

# 汽车理论

主 编 张文春

参 编 冯 樱 常 绿 郝建国



机械工业出版社

本书为应用型本科汽车类专业“十二五”规划教材编审委员会指导、机械工业出版社负责规划编写的系列教材。

本书从路面与轮胎的相互作用出发,以汽车整机及其部件的受力分析为基础,建立有关的动力学方程,研究汽车的使用性能:动力性、燃油经济性、制动性、操纵稳定性和行驶平顺性等。书中分析了各使用性能的评价指标和评价方法,讨论了汽车及其部件的结构参数对使用性能的影响,并结合最新的国家标准介绍了使用性能的试验方法。另外,结合汽车使用性能,本书介绍了近年来汽车新技术的发展,如自动变速器、ABS、VSC和ESP等。本书为汽车设计、试验和使用提供了必要的专业基础。

根据面向21世纪人才培养规格,按照分层次办学的指导思想,本书可作为地方普通高等学校应用型本科汽车类专业的专业教材,也可供工厂、研究单位从事汽车设计、使用、试验的工程技术人员及其他大专院校师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

汽车理论/张文春主编. —北京:机械工业出版社,2014.2  
应用型本科汽车类专业“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-111-45427-4

I. ①汽… II. ①张… III. ①汽车工程—高等学校—教材 IV. ①U461

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第001699号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:赵海青 责任编辑:赵海青

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹 肖琳

封面设计:路恩中 责任印制:李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2014年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14.75印张·356千字

0001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-45427-4

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前 言

为适应近年来我国汽车工业及汽车运用市场的高速发展，满足对汽车类高等工程技术人才培养的需求，机械工业出版社于2011年12月在上海主持召开了全国“汽车类专业应用型本科示范教材”开发研讨会，全国20多所院校参加了会议。会议确定编写应用型本科汽车类专业“汽车理论”课程的教材。

本书主要是供应用型本科汽车类专业使用的教材。基于上述，本书的特点是以受力分析为基础，先讨论轮胎与地面的相互作用，即汽车的工作环境；再论述汽车的使用性能，以便使学生通过本门课程的学习，较好地掌握分析汽车性能的方法，即更加注重实践性、应用性和技术性。

编者认为，《汽车理论》和《汽车系统动力学》两门课应有较为明确的分工，《汽车系统动力学》和《汽车理论》的共同点都是要把汽车放在所处的环境中进行研究，但《汽车系统动力学》主要是对系统在真实环境下建立动态数学模型，进行动态分析；而《汽车理论》的动态分析应相对简单一些，重点介绍汽车的基本使用性能和使用性能的分析方法。因此，本书对汽车操纵稳定性的叙述先介绍汽车转向的运动学及受力分析，接着介绍汽车稳态转向特性和表征稳态转向的有关参数，最后介绍汽车转向的动态模型和评价方法；对汽车平顺性的介绍重点在基本概念、基本理论和试验方法。本教材在编写顺序上更加有利于学习和理解。

本书注重理论联系实际，突出基本理论、基本概念，在详细分析汽车使用性能评价指标、评价方法和影响因素的同时，还讨论了汽车使用性能的试验方法和国家最新公布的试验法规和试验标准。

为进一步加强学生分析问题能力的训练，在动力性、制动性、操纵稳定性和行驶平顺性等章节增加了适量例题。

本书由河南科技大学张文春任主编并编写绪论和第七章，郝建国编写第五、六章，湖北汽车工业学院冯樱教授编写第一、二章，淮阴工学院常绿副教授编写第三、四章。

本书主要作为应用型本科汽车类专业的教材，也可供有关的工程技术人员及其他院校师生参考。

由于我们的水平有限，书中一定有错漏之处，欢迎使用该书的师生和广大读者批评指正，并希望通过电子邮件（zwc@haust.edu.cn）与我们联系。

编 者

# 汽车服务工程方向教材编审委员会

主任：上海建桥学院	陈永革
副主任：武汉科技大学	赵英勋
长春工业大学	刘兰俊
北京运华天地科技有限公司	廖 明
委员：江汉大学	李素华
黑龙江工程学院	于春鹏
吉林农业大学发展学院	吴 明
金陵科技学院	付香梅
浙江师范大学	曹红兵
黑龙江东方学院	贾冬开
九江学院	丁志华
九江学院	代红梅
九江学院	徐玉红
上海建桥学院	裘文才
同济大学	陈昌明
同济大学	陈传灿
上海大学	何忱予

# 交通运输方向教材编审委员会

主任：长安大学	陈焕江
副主任：浙江师范大学	曹红兵
鲁东大学	宋进桂
山东交通学院	戴汝泉
委员：沈阳理工大学	赵海波
上海建桥学院	朱 列
吉林农业大学	吴 明
黑龙江工程学院	于春鹏
鲁东大学	陈 燕
山东交通学院	李景芝

强调学生综合素质和专业核心能力的培养。

- 内容组织和体现形式符合学生认知和技能养成规律，体现以应用为主线。
- 体现行业需求、职业要求和岗位规范，尤其是要注意紧跟技术更新。
- 注重对学生分析能力、判断能力、创新能力和沟通能力的综合能力培养。
- 配套开发了课程设计指导和实训教学指导书，配备多媒体教学课件，打造立体化教材。

本套教材附赠多媒体课件、练习题答案等教学资料供任课老师采用，可在机械工业出版社教材服务网（[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)）免费下载或拨打编辑热线获取（010-88379353）。

虽然本套教材的各参编院校在应用型本科人才培养和教学改革方面进行了有益的探索，但限于认识水平和工作经历，教材中难免仍有许多不足之处，恳请各位专家、同行和广大使用本套教材的师生给予批评指正。

**应用型本科汽车类专业“十二五”规划教材编委会**

# 前 言

为适应近年来我国汽车工业及汽车运用市场的高速发展，满足对汽车类高等工程技术人才培养的需求，机械工业出版社于2011年12月在上海主持召开了全国“汽车类专业应用型本科示范教材”开发研讨会，全国20多所院校参加了会议。会议确定编写应用型本科汽车类专业“汽车理论”课程的教材。

本书主要是供应用型本科汽车类专业使用的教材。基于上述，本书的特点是以受力分析为基础，先讨论轮胎与地面的相互作用，即汽车的工作环境；再论述汽车的使用性能，以便使学生通过本门课程的学习，较好地掌握分析汽车性能的方法，即更加注重实践性、应用性和技术性。

编者认为，《汽车理论》和《汽车系统动力学》两门课应有较为明确的分工，《汽车系统动力学》和《汽车理论》的共同点都是要把汽车放在所处的环境中进行研究，但《汽车系统动力学》主要是对系统在真实环境下建立动态数学模型，进行动态分析；而《汽车理论》的动态分析应相对简单一些，重点介绍汽车的基本使用性能和使用性能的分析方法。因此，本书对汽车操纵稳定性的叙述先介绍汽车转向的运动学及受力分析，接着介绍汽车稳态转向特性和表征稳态转向的有关参数，最后介绍汽车转向的动态模型和评价方法；对汽车平顺性的介绍重点在基本概念、基本理论和试验方法。本教材在编写顺序上更加有利于学习和理解。

本书注重理论联系实际，突出基本理论、基本概念，在详细分析汽车使用性能评价指标、评价方法和影响因素的同时，还讨论了汽车使用性能的试验方法和国家最新公布的试验法规和试验标准。

为进一步加强学生分析问题能力的训练，在动力性、制动性、操纵稳定性和行驶平顺性等章节增加了适量例题。

本书由河南科技大学张文春任主编并编写绪论和第七章，郝建国编写第五、六章，湖北汽车工业学院冯樱教授编写第一、二章，淮阴工学院常绿副教授编写第三、四章。

本书主要作为应用型本科汽车类专业的教材，也可供有关的工程技术人员及其他院校师生参考。

由于我们的水平有限，书中一定有错漏之处，欢迎使用该书的师生和广大读者批评指正，并希望通过电子邮件（zwc@haust.edu.cn）与我们联系。

编 者



强调学生综合素质和专业核心能力的培养。

- 内容组织和体现形式符合学生认知和技能养成规律，体现以应用为主线。
- 体现行业需求、职业要求和岗位规范，尤其是要注意紧跟技术更新。
- 注重对学生分析能力、判断能力、创新能力和沟通能力的综合能力培养。
- 配套开发了课程设计指导和实训教学指导书，配备多媒体教学课件，打造立体化教材。

本套教材附赠多媒体课件、练习题答案等教学资料供任课老师采用，可在机械工业出版社教材服务网（[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)）免费下载或拨打编辑热线获取（010-88379353）。

虽然本套教材的各参编院校在应用型本科人才培养和教学改革方面进行了有益的探索，但限于认识水平和工作经历，教材中难免仍有许多不足之处，恳请各位专家、同行和广大使用本套教材的师生给予批评指正。

**应用型本科汽车类专业“十二五”规划教材编委会**

# 目 录

丛书序		
前言		
绪论	1	
第一章 地面—轮胎力学	5	
第一节 作用在轮胎上的力和力矩	5	
第二节 松软路面的物理机械特性	6	
第三节 轮胎的纵向力学特性	10	
第四节 轮胎的侧偏特性	16	
习题	22	
第二章 汽车动力性	23	
第一节 汽车动力性的评价指标	23	
第二节 汽车受力分析	24	
第三节 动力性的评价方法——驱动力-行驶阻力平衡图	36	
第四节 汽车的功率平衡	41	
第五节 电动汽车的动力性计算	43	
第六节 影响汽车动力性的主要因素	47	
第七节 汽车动力性试验	50	
习题	54	
第三章 汽车的燃油经济性	55	
第一节 汽车燃油经济性及其评价指标	55	
第二节 汽车燃油经济性的计算	60	
第三节 影响汽车燃油经济性的因素	67	
第四节 汽车燃油经济性试验	75	
习题	80	
第四章 汽车发动机功率和传动系统		
传动比的选择	82	
第一节 发动机的主要性能指标和功率的确定	82	
第二节 传动系统最小传动比的选择	87	
第三节 传动系统最大传动比的确定	89	
第四节 传动系统档数与各档传动比的选择	90	
第五节 利用燃油经济性-加速时间曲线确定动力装置参数	97	
第六节 汽车动力性能参数选择案例	100	
第七节 汽车自动换档规律的确定	104	
习题	109	
第五章 汽车的制动性	111	
第一节 制动性的评价指标	111	
第二节 制动时车轮的受力	114	
第三节 汽车的制动效能及其恒定性	118	
第四节 制动时汽车的方向稳定性	126	
第五节 前、后制动器制动力的比例关系	131	
第六节 汽车防抱死制动系统 (ABS) 和制动器辅助系统 (BAS) 及其他控制系统	146	
第七节 汽车驻车制动性	150	
第八节 汽车制动性试验	151	
习题	158	
第六章 汽车的操纵稳定性	160	
第一节 概述	160	
第二节 汽车转向运动学和动力学	163	
第三节 汽车的稳态转向	166	
第四节 前轮角阶跃输入下汽车的瞬态响应	175	
第五节 汽车横向行驶时的稳定性	182	
第六节 汽车操纵稳定性的试验	193	
习题	198	
第七章 汽车行驶平顺性	200	
第一节 路面的统计特性	201	
第二节 汽车振动系统的简化	205	
第三节 单质量系统的振动	207	
第四节 “人体-座椅”系统参数对振动的影响	214	
第五节 人体对振动的反应以及平顺性的评价	216	
第六节 影响汽车平顺性的结构因素	221	
第七节 汽车平顺性试验和数据处理	222	
习题	225	
参考文献	226	

# 绪 论

## 一、教学目标

### 知识目标

- 了解学习汽车理论的目的
- 了解汽车使用性能的大致分类

### 素质要求

- 学会查阅资料

## 二、教学指导

### 资料准备

- 教材、相关参考资料、教学 PPT

## 三、教学活动

- 组织学生讨论

“汽车理论”课程的主要目的：研究汽车及其机构以及汽车列车的运动学与动力学，研究汽车的使用性能，为汽车设计、评价、试验、研究和运用提供理论基础。

汽车的使用性能是评价汽车的基础，下面分类介绍汽车的主要使用性能，其中有些使用性能在各章中还要评述，此处只做扼要介绍。

和其他产品类似，汽车的使用性能也大致可分为三类：对自然环境条件的适应性、技术经济性以及劳动保护性能。

## 一、对自然环境条件的适应性

这类性能与是否能保证运输要求有关，主要有动力性、通过性、操纵性、机动性、对道路结构的破坏程度等。

### 1. 动力性

动力性是指汽车在良好路面上直线行驶时由汽车受到的纵向外力决定的、所能达到的平均行驶速度。汽车的动力性用最高车速、加速时间和最大爬坡度来衡量（详见第二章）。

### 2. 通过性

通过性是指汽车能以足够高的平均速度通过各种坏路和无路地带（如松软地面、凹凸不平地面等）及各种障碍（如陡坡、侧坡、壕沟、台阶、灌木丛、水障等）的能力。通过性大致可从两方面来考虑：

（1）汽车支承通过性 在潮湿和松软地面上，汽车易发生下陷、车轮严重打滑等现象，影响汽车的正常行驶。在潮湿松软地面上附着性差、滚动阻力大。当汽车的附着力小于其牵引载荷与滚动阻力之和时，汽车列车就无法行驶；当附着力小于滚动阻力时，空车也无法通过。汽车在潮湿松软地面上的通过性又称支承通过性。目前，常采用牵引系数、牵引效率及燃油利用指数来评价。

（2）汽车几何通过性 由于汽车与地面间隙不足而被地面托住、无法通过的情况，称为间隙失效。当车辆中间底部的零件碰到地面而被顶住时，称为顶起失效；当车辆前端和尾部触及地面而不能通过时，则分别称为触头失效和托尾失效。与间隙失效有关的汽车整车几何尺寸，称为汽车通过性的几何参数。这些参数包括最小离地间隙、纵向通过角、接近角、

离去角、最小转向半径等，如图1、图2所示。

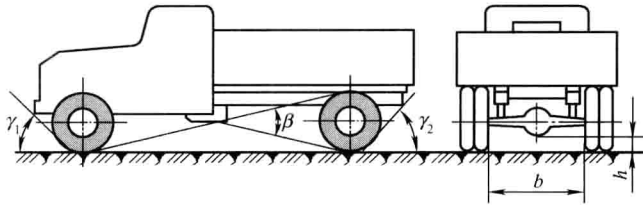


图1 汽车的通过性参数

$h$ —最小离地间隙  $b$ —两侧轮胎内缘参数  
 $\gamma_1$ —接近角  $\gamma_2$ —离去角  $\beta$ —纵向通过角

### 3. 操纵性

操纵性是指汽车能否按驾驶人的意图沿给定方向行驶的性能。它可用直线行驶性和最小转向半径来衡量。

直线行驶性可用不加操纵情况下直线行驶一定距离后汽车偏离原定方向的偏移量来衡量。汽车直线行驶性较差时驾驶人须经常纠正行驶方向，易产生过度疲劳；转向机构因此也易磨损。

最小转向半径是指转向盘转至极限位置时从转向中心到前外轮接地中心的距离（图2）。它是机动性的主要指标，对通过性有很大意义。因为它在很大程度上表征了汽车能够通过狭窄弯曲地带或绕开不可越过的障碍物的能力。图2中， $A$ 为最小转弯半径时的最大转弯宽度， $a$ 、 $b$ 为突伸距。

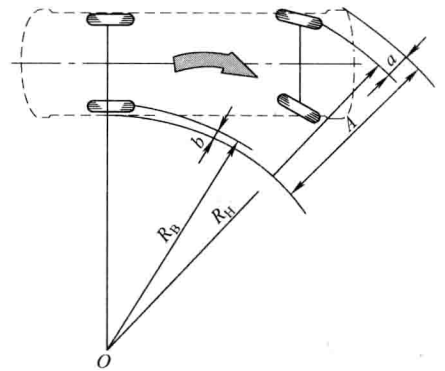


图2 转向半径

## 二、技术经济性

汽车的技术经济性主要用生产率和燃油经济性来表示。而后者可用百公里油耗、折旧费、维修费等衡量，折旧费、维修费等又与可靠性和耐用性有关。

### 1. 生产率

汽车的生产率用单位时间内完成的运输吨公里数来表示。生产率的大小与汽车的行驶速度、装载质量和道路条件等有关。

### 2. 油耗

油耗包括燃油消耗和机油消耗。燃油消耗用满载时每公里所耗油量来表示。机油消耗量常用占燃油消耗量的百分比来表示。

### 3. 可靠性与耐用性

汽车的可靠性用在一定行驶路程内发生的零部件损坏及故障的性质、严重程度、次数等来衡量。耐用性用主要零部件需更换（或修理）时已使用的时间来衡量。

汽车的可靠性与耐用性好，不仅可保证正常出车，提高生产率，而且可减少维修费用，延长使用寿命；延长使用寿命又可减少折旧费。

影响汽车技术经济性的还有维护方便性等。维护方便性好，则用于技术维护、零部件拆

装的工时少。

### 三、劳动保护性

劳动保护性是指驾驶人工作的安全性和使驾驶人的身体健康不受损害的性能。它主要包括汽车的舒适性、稳定性、制动性等。

#### 1. 舒适性

随着经济发展和社会文明进步,人们越来越关心自身工作和生活环境的质量,因而汽车舒适性问题就自然地被人们所关注。同时,从提高工作效率和降低事故发生率的要求出发,汽车乘坐及工作环境也必须具有一定的舒适性。

汽车舒适性是指为乘员提供舒适、愉快的乘坐环境和方便安全的操作条件的性能。汽车舒适性包括:汽车平顺性、汽车噪声、汽车空气调节性能、汽车乘坐环境及驾驶操作性能等。它是现代高速、高效率汽车的一个主要性能。

汽车平顺性是指保持汽车在行驶过程中乘员所处的振动环境具有一定舒适度的性能。对于载货汽车还包括保持货物完好的性能。汽车行驶时,由于路面不平等因素激起汽车的振动,振动影响人的舒适、工作效率和身体健康,并影响所运货物的完好;振动还在汽车上产生动载荷,加速零件磨损,导致疲劳失效。因此减少汽车振动是汽车平顺性研究的主要问题(详见第七章)。

汽车噪声造成环境污染,影响乘员舒适。随着环保要求日趋严格,研究汽车主要噪声源特性、传递途径、降噪措施已成为汽车理论不可缺少的内容。噪声主要用分贝值等来衡量。

汽车空气调节性能是指对车内空气的温度、湿度、粉尘浓度实现控制调节,使车室内空气经常保持使乘员舒适状态的性能。汽车空调是改善工作条件、提高工作效率的重要手段。

汽车乘坐环境及驾驶操作性能是指乘坐空间大小、座椅及操纵件的布置、车内装饰、仪表信号设备的易辨认性等。

随着现代文明的进程,汽车越来越多地介入了社会的各个方面,成为与人们工作和生活紧密相关的、大众化的产品,汽车作为“流动房间”的功能日趋完善。与汽车其他性能不同,汽车舒适性各方面的评价都与人体主观感觉直接相关。

#### 2. 稳定性

稳定性是指汽车在行驶过程中,具有抵抗改变其行驶方向的各种外界干扰,并保持稳定行驶而不失去控制,甚至翻车或侧滑的能力。稳定性好坏直接影响操纵性,因此通常统称为操纵稳定性(详见第六章)。

汽车稳定性的丧失表现为汽车的翻倾或滑移。随着翻倾或滑移的方向不同可分为纵向与横向稳定性。由于侧向力(重力的侧向分力、侧向风形成的侧向力等)的作用而发生横向稳定性破坏的可能性较大,也更为危险。图3为汽车在横向坡道上转向时的受力图。

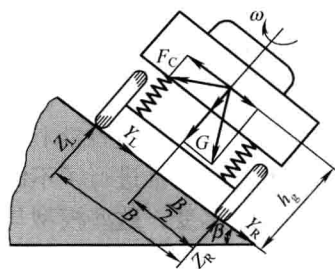


图3 汽车在横向坡道上转向时的受力图

#### 3. 制动性

汽车的制动性是指在给定的坡道上能制动住以及在较短的距离内能制动至停车且维持行驶方向稳定的性能。如果制动性好,则汽车在较大坡度的道路上行驶以及在平地上进行高速

行驶时皆较安全（详见第五章）。

#### 4. 驾驶室的牢固程度

如果驾驶室的强度和刚度好，则当汽车发生翻倾事故时，仍能保证驾驶人的人身安全。因此，有些国家对驾驶室的强度和刚度都提出一定要求，驾驶室需进行撞击试验和翻车试验。

不同类型的汽车其使用性能要求是不同的，如越野车对通过性要求较高，而轿车则对最高车速等动力性要求甚高。上述各种使用性能是评价汽车的一般要求。在设计、使用和试验中，必须根据汽车的用途、工作环境等具体情况，分清主次，全面地进行衡量。

研究汽车理论的最终目的是使设计制造出的汽车具有良好的使用性能。例如，为了提高汽车的燃油经济性，世界各汽车制造商大力开发研制有关节能技术。在整车上，美国通用汽车公司采用减小外形尺寸来减轻整车质量；而福特汽车公司则通过提高铝等轻合金以及塑料等氧化树脂材料的使用率，达到减轻汽车质量的目的。在整车布置上，采用发动机前置前轴驱动方式或发动机后置后轴驱动方式等，通过直接传动驱动轴，以提高传动效率，同时减小传动系统的质量；为了减小发动机的空间和质量，采用V形4缸机、V形6缸机。奔驰、奥迪开发的直列5缸机，日本大发开发的直列3缸机等都是针对节能问题而开发的技术措施。由此降低比质量（单位输出功率的整车质量），有效地改善了燃油经济性。再如，随着社会经济的发展，汽车保有量急剧增加，交通事故也大幅度增加，为提高汽车行驶的安全性，各汽车公司纷纷研究汽车的积极安全措施，开发安全带、安全气囊等被动安全装置。

如果说，20世纪前期是发明了汽车的基本结构，而20世纪后期直到现在，汽车的发展主要是提高性能与人类社会的要求相协调。汽车理论学科也就随着汽车结构的改进而有所发展。例如，由于铰接式汽车的出现，促使对这种具有特殊结构形式的汽车的运动学和动力学进行研究。随着汽车行驶速度的提高，以及对安全性、舒适性等问题的重视，对振动、操纵的动态稳定性进行了研究；随着电子计算机和电子技术的发展，围绕提高汽车使用性能的新型结构不断出现。例如，为了提高汽车的动力性和经济性，无级变速器和自动变速器已形成了市场；为了提高制动效能，防抱死制动系统（ABS）已被各汽车生产厂家采用。又如在发动机控制领域，开发研制出了电控喷油装置（EFI）、废气再循环（ERG）、电控点火装置（ESA）等一系列执行器，利用高的演算精度和复合判断机能实现了对发动机的多自由度控制，从而构成了最大限度地提高发动机的动力性和经济性。

汽车理论是一门正在发展中的学科，无论理论上或是在试验方面都还需要做大量的工作，还需要从各方面进行探讨和研究。例如：为了提高汽车在各种路面上（尤其是在潮湿松软土壤上）的通过性能和动力性能，多年来许多专家对有关车辆行驶的地面（土壤）物理特性和几何特性进行了不懈研究，探讨建立了土壤-车辆系统的诸多数学模型。但因环境条件的复杂多变，这些模型与实际状况还有一定差异，尚不能完全用于车辆的设计计算。再如，人们对舒适性、操纵稳定性等方面的研究取得了很大进展，但社会的进步使人们对汽车性能的提高、主动安全、环境保护、节能和舒适性问题更加关注，就要求汽车专业技术人员利用现代科学技术，提出更加符合汽车实际使用状况的理论和方法，使汽车产品更加与人类社会的需求相适应。

# 第一章 地面 - 轮胎力学

## 一、教学目标

### 知识目标

- 掌握作用在轮胎上的力和力矩
- 理解松软路面的物理机械特性
- 掌握轮胎的纵向力学特性
- 掌握轮胎的侧偏特性

### 素质要求

- 学会查阅资料

## 二、教学指导

### 资料准备

- 教材、相关参考资料、教学 PPT

## 三、教学活动

- 组织学生讨论

轮胎是连接汽车车身与道路的唯一部件，其基本职能是支承车辆质量、传递驱动力矩和制动力矩、吸振以及保证转向稳定性。轮胎力学是研究轮胎受力、变形和运动响应之间关系的一门学问，它的主要任务是建立精确实用的数学模型，以描述轮胎的力学特性。

## 第一节 作用在轮胎上的力和力矩

### 一、轮胎坐标系

为了分析作用在轮胎上的各种力和力矩，建立图 1-1 所示在平直路面上行驶的汽车轮胎的坐标系。轮胎胎面与路面的接触区域称为接地印迹。轮胎的中心面为垂直于轮胎的旋转轴线的平面。轮胎的中心面与路面的交线为  $x$  轴，规定向前为正，轮胎的旋转轴在路面上的投影线为  $y$  轴，规定当面向轮胎的前进方向时指向左方为正。其中  $x$  轴和  $y$  轴的交点为轮胎接地印迹中心，并以此作为原点，因此通过原点与路面垂直的轴为  $z$  轴，规定向上为正。

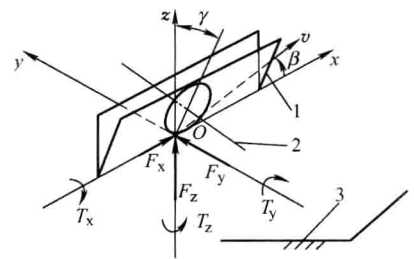


图 1-1 轮胎坐标系及其六分力  
1—轮胎平面 2—轮胎旋转轴线 3—地面

### 二、作用在轮胎上的力和力矩

地面通过接地印迹作用在轮胎上的应力既有垂直于路面的正应力，也有沿着地面的切向应力，切向应力又可分为沿  $x$  方向的纵向应力和沿  $y$  方向的侧向应力。如果将印迹上各点的应力向印迹中心（轮胎坐标系原点）简化，可得到沿轮胎坐标系的作用在轮胎上的力和力矩。

在轮胎坐标系中，地面作用在轮胎上的主要力和力矩包括：地面切向反作用力沿  $x$  轴的分

量——纵向力  $F_x$ ；地面切向反作用力沿  $y$  轴的分量——侧向力  $F_y$ ；地面法向反作用力  $F_z$ ；地面反作用力绕  $x$  轴的力矩——翻转力矩  $T_x$ ；地面反作用力绕  $y$  轴的力矩——滚动阻力矩  $T_y$  以及地面反作用力绕  $z$  轴的力矩——回正力矩  $T_z$ 。正负符号均按照坐标系的规定。

纵向力  $F_x$  按照作用方向或作用形式的不同可称为驱动力或制动力。驱动力来源于汽车发动机。发动机产生的有效转矩经过传动系统传到驱动轮上，因此地面作用有反作用力——驱动力在车轮上。驱动力是维持汽车行驶的外力，它与汽车的行驶方向相一致。而制动力为阻碍汽车行驶的作用在车轮上的纵向力，制动力的方向与汽车的行驶方向相反。

侧向力  $F_y$  是地面作用在车轮上的切向力沿  $y$  的分量。汽车作曲线行驶时会受到离心力的作用，为了维持汽车的曲线运动，路面作用在车轮上有与离心力相平衡的侧向力。

地面的法向反作用力  $F_z$  反映了各个车轮所承受的轴荷大小。一般来说，作用在各个车轮上的地面法向反作用力的大小与汽车的纵向加速度、侧向加速度以及汽车的总体布置有关，同时地面的法向反作用力的大小也将影响汽车的纵向力和侧向力的大小。

翻转力矩  $T_x$  也称为侧倾力矩，它的大小说明了汽车将发生翻转趋势的大小。特别是汽车在作曲线行驶时，由于离心力的存在而形成翻转力矩可能使汽车发生侧倾现象。

滚动阻力矩  $T_y$  描述了阻碍轮胎滚动的力矩的大小。滚动阻力矩与路面的状态、轮胎的结构以及行驶的车速等有关。

回正力矩  $T_z$  是在汽车作曲线行驶时使车轮恢复到直线行驶位置的力矩。汽车在曲线行驶状态下，轮胎将发生侧偏现象，因此将产生作用于轮胎上绕  $z$  轴的力矩。

随着现代车辆速度的不断提高，车辆的主动安全性、行驶动力性和乘坐舒适性在车辆性能中占有越来越重要的位置，而轮胎力学特性是影响车辆动力学特性的重要特性之一，因此改善汽车性能的重点取决于更好的调节和控制各个分力的大小。

## 第二节 松软路面的物理机械特性

在轮胎与路面的相互作用过程中，如果路面的变形与轮胎产生的变形相比可以忽略，则将此种路面称为硬路面；反之则称为松软路面。在轮胎与松软路面的相互作用过程中，轮胎和路面均产生变形。

### 一、松软路面给车辆的土壤推力

当车辆在松软土壤上行驶时，在接地面积（印迹） $A$  范围内，轮胎花纹之间的空间内充满着泥土。当车辆发挥最大驱动力时，土壤的剪切就沿着这一接地印迹产生。

对于粘性土壤而言，最大剪切力即路面给驱动轮的切向反作用力仅与土壤的粘聚性及轮胎的接地面积有关，而与轮胎给地面的垂直载荷无关。即土壤推力为

$$F_x = Ac \quad (1-1)$$

式中  $A$  ——驱动轮胎的接地面积；

$c$  ——土壤的粘聚系数。

对于摩擦性土壤，如干砂等，土壤的推力则不能利用式（1-1）进行计算。因为干砂等没有任何的粘聚性，它是松散的。如果摩擦性土壤的颗粒之间相互挤压，则在颗粒间就会产生摩擦而使它们难于相互移动。因此在法向力的作用下，当轮胎花纹间的砂粒相对于静止砂



体发生剪切时, 剪切面间的砂粒间便有摩擦力产生。这时最大土壤推力  $F_x$ , 即地面对驱动轮的切向反作用力是按照库仑摩擦定律与车轮负荷  $W$  成正比的增加, 即

$$F_x = W \tan \varphi \quad (1-2)$$

式中  $\varphi$  ——摩擦角。

大多数的土壤既不是纯粘性的, 也不是纯摩擦性的, 而是这两种性质的粒状物质的混合物。因此最大土壤推力为

$$F_x = Ac + W \tan \varphi \quad (1-3)$$

将式 (1-3) 两边除以面积  $A$ , 则得最大剪应力  $\tau_{\max}$  与剪切面法向压力  $q$  的关系式为

$$\tau_{\max} = c + q \tan \varphi \quad (1-4)$$

式中,  $q = \frac{W}{A}$ ; 对于摩擦性土壤,  $c = 0$ ; 对于粘性土壤,  $\varphi = 0$ 。因此对于粘性土壤, 增加

法向压力并不能提高土壤的抗剪强度, 只有内摩擦角较大的土壤, 增加法向压力才能使土壤抗剪强度有较大的提高。

对于未受扰动的脆性土壤 (压实的砂、淤泥、土壤和冻结的雪), 剪切应力与变形的关系曲线如图 1-2 中的曲线 1 所示, 在最大剪切应力  $\tau_{\max}$  时出现“驼峰”, 然后维持一定的剩余剪切应力。对于疏松土壤, 如松散的砂子、湿透的粘土、干雪和大多数受过扰动的土壤, 剪切应力与变形的关系曲线表现为逐渐接近最大剪切应力而无“驼峰” (图 1-2 中的曲线 2)。此曲线可用下式表示:

$$\tau = (c + q \tan \varphi) [1 - \exp(-j/k)] = \tau_{\max} [1 - \exp(-j/k)] \quad (1-5)$$

式中  $j$  ——剪切变形;

$k$  ——曲线 2 在原点处的切线与曲线 2 水平段延长线的交点至纵坐标轴的距离。

$k$  可作为最大剪应力时相应的土壤变形量的一个度量值, 其值决定于土壤的坚实度, 对松砂,  $k$  约为 2.5cm; 对压实无摩擦的粘土,  $k$  约为 0.6cm。

在车辆的行驶过程中, 由于土壤在提供推力时发生剪切变形, 故车辆驱动轮的接地面相对于地面有向后的滑动, 称为滑转。滑转既影响平均车速也影响燃料的消耗, 因此在具体研究土壤的推力时需要考虑到滑转以及剪切变形的影响, 再根据土壤的剪切特性来确定土壤推力的大小。

## 二、车辆在松软路面上的土壤阻力

车辆在松软路面上行驶时, 轮胎对土壤的压实和推移将产生压实阻力和推土阻力; 充气轮胎的变形还将引起弹滞损耗阻力。

随着土壤坚实度和轮胎充气压力的不同, 轮胎将出现两种滚动状态: 若土壤很松软, 轮胎充气压力及胎体刚度产生的压力之和大于土壤对轮胎圆周最低点的支承压力, 则充气轮胎像刚性车轮一样地滚动; 反之, 如果土壤比较结实, 胎面接地部分将被压成平面, 充气轮胎表现为弹性车轮。而轮胎对土壤的压实阻力与轮胎的滚动状态密切相关, 所以要确定充气轮胎的压实阻力, 首先应确定轮胎是刚性车轮还是弹性车轮。

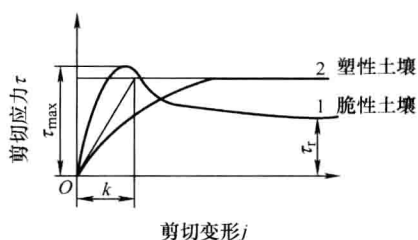


图 1-2 土壤的剪切应力与剪切变形的关系曲线