



21世纪高等学校教材
普通高等教育“十一五”汽车类专业(方向)规划教材

QI CHE LI LUN

汽车理论

主 编 张文春
副主编 纪峻岭 冯 樱



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等学校教材

普通高等教育“十一五”汽车类专业（方向）规划教材

汽车理论

主 编 张文春
副主编 纪峻岭 冯 樱
参 编 徐延海 常 绿
主 审 巢凯年



机械工业出版社

本书从路面与轮胎的相互作用出发,以汽车整车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,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,本书结合汽车使用性能,介绍了近年来汽车新技术的发展,如自动变速、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,本书可作为普通高等学校面向应用型人才培养的本科汽车专业的专业教材,也可作为高职高专的教材,还可供工厂、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,
2005.7
21 世纪高等学校教材. 普通高等教育“十一五”汽车
类专业(方向)规划教材
ISBN 7-111-16849-6

I. 汽... II. 张... III. 汽车—理论—高等学校—
教材 IV. U461

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 073106 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:赵爱宁、冯春生 责任编辑:邓海平 版式设计:张世琴
责任校对:王欣 封面设计:王伟光 责任印制:洪汉军
北京瑞德印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行
2005 年 7 月第 1 版第 1 次印刷
787mm×1092mm/16·12.25 印张·295 千字
定价:18.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
封面无防伪标均为盗版

普通高等教育汽车类专业（方向）
教材编审委员会

主任：北京理工大学
副主任：黑龙江工程学院
湖北汽车工业学院
扬州大学
西华大学
机械工业出版社

委员：吉林大学
吉林大学
北京航空航天大学
同济大学
上海交通大学
上海大学
哈尔滨理工大学
武汉理工大学
山东理工大学
山东交通学院
燕山大学
长沙理工大学
青岛理工大学
河南科技大学
南京工程学院
淮阴工学院

秘书：机械工业出版社
机械工业出版社

林逸
齐晓杰
陶健民
陈靖芯
黄海波
邓海平
方泳龙
刘玉梅
高峰
陈永革
喻凡
何忱予
徐雳
张国方
邹广德
李祥贵
韩宗奇
张新
卢燕
张文春
贺曙新
刘远伟
赵爱宁
冯春生

序

汽车被称为“改变世界的机器”。由于汽车工业具有很强的产业关联度，因而被视为一个国家经济发展水平的重要标志。近10年来，我国汽车工业快速而稳步发展，汽车产量年均增长15%，是同期世界汽车产量增长量的10倍。汽车工业正在成为拉动我国经济增长的发动机。汽车工业的繁荣，使汽车及其相关产业的人才需求量大幅度增长。与此相应地，作为人才培养主要基地的汽车工业高等教育也得到了长足发展。据不完全统计，迄今全国开办汽车类专业的高等院校已达百余所。

从未来发展趋势看，打造我国自主品牌、开发核心技术是我国汽车工业的必然选择，但当前我国汽车工业还处在以技术引进、加工制造为主的阶段，这就要求在人才培养时既要具有前瞻性，又要与我国实际情况相结合。要在注重培养具有自主开发能力的研究型人才的同时，大力培养知识、能力、素质结构具有鲜明的“理论基础扎实，专业知识面广，实践能力强，综合素质高，有较强的科技运用、推广、转换能力”特点的应用型人才。这也意味着对我国高等教育的办学体制、机制、模式和人才培养理念等提出了全新的要求。

为了满足新形势下对汽车类高等工程技术人才培养的需求，在中国机械工业教育协会机械工程及自动化学科教学委员会车辆工程学科组的领导下，成立了教材编审委员会，组织制定了多个系列的普通高等教育规划教材。其中，为了解决高等教育应用型人才培养中教材短缺、滞后等问题，组织编写了“普通高等教育‘十一五’汽车类专业（方向）规划教材”。

本系列教材在学科体系上适应普通高等院校培养应用型人才的需求；在内容上注重介绍新技术和新工艺，强调实用性和工程概念，减少理论推导；在教学上强调加强实践环节。此外，本系列教材将力求做到：

1) 全面性。目前本系列教材包括汽车设计与制造、汽车运用与维修、汽车服务工程、物流工程等专业方向，今后还将扩展专业领域，更全面地涵盖汽车类专业方向。

2) 完整性。对于每一个专业方向，今后还将继续根据行业变化对教学提出的要求填平补齐，使之更加完善。

3) 优质性。在教材编审委员会的领导下, 继续优化每一本教材的规划、编审、出版和修订过程, 让教材的生产过程逐步实现优质和高效。

4) 服务性。根据需要, 为教材配备 CAI 课件和教学辅助教材, 召开新教材讲习班, 在相应网站开设研讨专栏等。

相信本系列教材的出版将对我国汽车类专业的高等教育产生积极的影响, 为我国汽车行业应用型人才培养模式作出有益的探索。由于我国汽车工业还处于快速发展阶段, 对人才不断提出新的要求, 这也就决定了高等教育的人才培养模式和教材建设也处于不断变革之中。我们衷心希望更多的高等院校加入本系列教材建设的队伍中来, 使教材体系更加完善, 以更好地为高等教育培养汽车专业人才服务。

中国汽车工程学会 常务理事
中国机械工业教育协会 林逸
车辆工程学科 副主任

前 言

本书是根据全国普通高等教育汽车类专业（方向）教材编审委员会确定的教材规划编写的。

本书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的学习，较好地掌握分析汽车性能的方法。2004年4月在扬州大学召开的车辆工程专业教学指导组会议上组织讨论并确定了教材编写大纲。

在编写过程中，编者注重理论联系实际，突出基本理论、基本概念，在详细分析各使用性能评价指标、评价方法和影响因素的同时，还讨论了这些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。

编者认为，《汽车理论》和《汽车系统动力学》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和汽车平顺性的介绍重点在基本概念、基本理论和试验方法。

本书由河南科技大学张文春任主编并编写绪论和第七章，黑龙江工程学院纪峻岭编写第五章、湖北汽车工业学院冯樱编写第二章并任副主编，西华大学徐延海编写第一、第六章，淮阴工学院常绿编写第三、第四章。编写过程中，得到河南科技大学曹付义、郭占正等同志的热心帮助。

初稿完成后，由西华大学巢凯年教授负责主审；机械工业出版社在青岛召开了高等教育汽车类专业（方向）教材审稿及研讨会。会上，中国机械工业教育协会机械工程及自动化学科教学委员会车辆工程学科组的两位副组长——清华大学夏群生教授、北京理工大学王文清教授审阅了本书，提出了许多宝贵意见，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，且时间仓促，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@mail.haust.edu.cn）与我们联系。

编 者
于河南洛阳

目 录

序	
前言	
绪论	1
第一章 地面—轮胎力学	5
第一节 概述	5
第二节 软路面的物理机械特性	5
第三节 作用在轮胎上的力和力矩	9
第四节 轮胎的纵向力学特性	10
第五节 轮胎的侧偏特性	16
思考题与习题	21
第二章 汽车动力性	22
第一节 汽车动力性的评价指标	22
第二节 汽车受力分析	22
第三节 动力性的评价方法——驱动力—行驶阻力平衡图	32
第四节 汽车的功率平衡	38
第五节 影响汽车动力性的主要因素	39
第六节 汽车动力性试验	42
思考题与习题	44
第三章 汽车的燃油经济性	46
第一节 汽车燃油经济性的评价指标	46
第二节 汽车燃油经济性的计算	50
第三节 影响汽车燃油经济性的因素	56
第四节 汽车燃油经济性试验	64
思考题与习题	69
第四章 汽车发动机功率和传动系传动比的选择	70
第一节 发动机的主要性能指标和功率的确定	70
第二节 最小传动比的选择	73
第三节 传动系最大传动比的确定	76
第四节 传动系挡数与各挡传动比的选择	77
第五节 利用燃油经济性—加速时间曲线确定动力装置参数	83
思考题与习题	86
第五章 汽车的制动性	88
第一节 制动性的评价指标	88
第二节 制动时车轮的受力	89
第三节 汽车的制动效能及其恒定性	93
第四节 制动时汽车的方向稳定性	98
第五节 前、后制动器制动力的比例关系	103
第六节 汽车自动防抱死系统 (ABS) 和制动辅助系统 (BAS)	115
第七节 汽车驻车制动性	119
第八节 汽车制动性试验	120
思考题与习题	125
第六章 汽车的操纵稳定性	127
第一节 概述	127
第二节 前轮角阶跃输入下汽车的稳态响应	130
第三节 前轮角阶跃输入下汽车的瞬态响应	140
第四节 汽车行驶时的侧翻和侧滑	145
第五节 汽车操纵稳定性的试验	154
思考题与习题	159
第七章 汽车行驶平顺性	160
第一节 路面的统计特性	160
第二节 汽车振动系统的简化	163
第三节 单质量系统的振动	165
第四节 “人体—座椅”系统参数对振动的影响	172
第五节 人体对振动的反应以及平顺性的评价	174
第六节 影响汽车平顺性的结构因素	177
第七节 汽车平顺性试验和数据处理	179
思考题与习题	181
参考文献	183

绪 论

汽车理论这门课的主要目的是：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。汽车的动力性能用最高车速、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。通过性大致可从二方面来考虑：

(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，影响汽车的正常作业。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，汽车列车就无法作业；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；当车辆前端或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。与几何通过性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 h 、纵向通过角 β 、接近角 γ_1 、离去角 γ_2 、最小转向半径 R_H 等，见图 0-1、图 0-2。

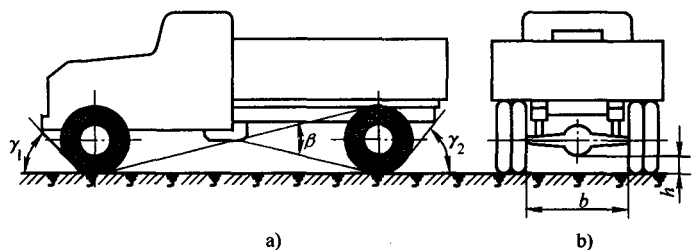


图 0-1 汽车的通过性参数

h —最小离地间隙 b —两侧轮胎内缘参数
 γ_1 —接近角 γ_2 —离去角 β —纵向通过角

3. 操纵性

操纵性是指汽车能否按驾驶

员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员须经常纠正行驶方向，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（旧称方向盘）转至极限位置时从转向中心到前外轮接地中心的距离（见图 0-2）。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 0-2 中， A 为最小转弯半径时的最大转弯宽度， a 、 b 为突伸距。

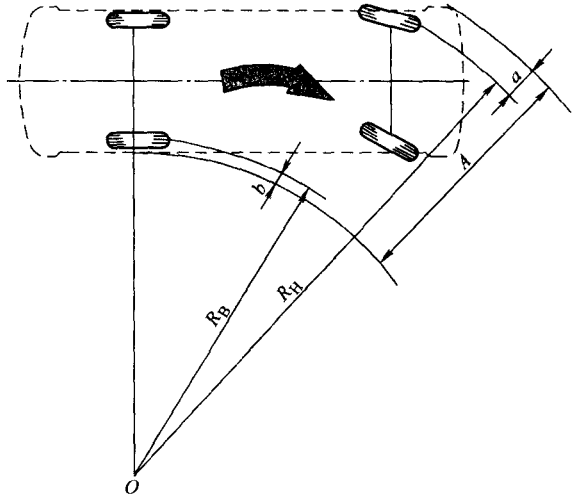


图 0-2 转向半径

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。而燃油经济性可用百公里油耗、折旧费、维修费等衡量，折旧、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保养方便性等。维护保养方便性好，则用于技术保养、零部件拆装的工时少。

三、劳动保护性

劳动保护性是指驾驶员工作的安全性和使驾驶员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，人们愈来愈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。

汽车平顺性就是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，研究汽车上主要噪声源特性、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“活动房间”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 0-3 为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，仍能保证驾驶员的人身安全。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。

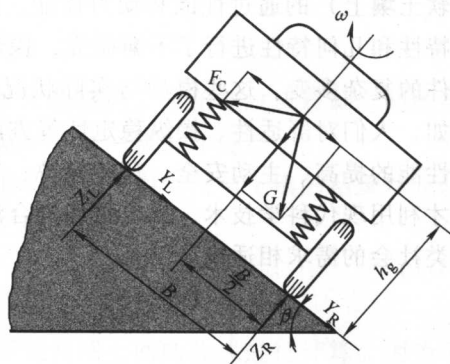


图 0-3 汽车在横向坡道上转向时的受力图

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，那么20世纪后期直到现在，汽车的发展主要是提高性能以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和新型式出现而有所发展。例如，由于铰接式汽车的出现，促使对这种具有特殊结构型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，自动变速、无级变速及自动防抱理论与实践得到了发展。又如在发动机控制领域，开发研制出了一系列执行器，利用高的演算精度和复合判断机能实现了多自由度控制系统，从而构成了最大限度地发挥整车运动性能的复合控制系统。

汽车理论是一门正在发展中的学科，无论理论上还是在试验方面都仍需要做大量的工作，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办法，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

第一节 概 述

轮胎是连接汽车车身与道路的惟一部件，其基本职能是支承车辆重量、传递驱动和制动力矩，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，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。

汽车运动依赖于轮胎所受的力，例如，纵向制动或驱动力、侧偏力和侧倾力、回正力矩及翻转力矩等，所有这些都是滑转率、侧偏角、侧倾角、垂直载荷、道路摩擦系数和汽车运动速度的函数。轮胎模型一般分为两种，一种是物理模型（理论模型），即通过对轮胎结构和形变机制的数学描述，建立剪切力和回正力矩与相应参数的函数关系。另一种是与理论模型相对照的经验公式或半经验公式，它是通过对大量的轮胎力特性的实验数据进行回归分析，从而将轮胎的力学特性通过含有拟合参数的公式有效地表达出来。

第二节 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；反之则称为软路面。在轮胎与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，轮胎花纹或履刺之间的空间内充满着泥土。当车辆发挥驱动力时，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

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

式中， A 为驱动轮胎的接地面积， c 为土壤的粘聚系数。

对于摩擦性土壤，如干沙等，土壤的最大剪力则不能利用上面的公式进行计算。因为干沙等没有任何的粘聚性，它是松散的。如果摩擦性土壤的沙粒之间相互挤压，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，当轮胎花纹间的沙粒相对静止，沙体发生剪切时，剪切面间的沙粒间便有摩擦力产生。这时最大土壤剪力是按照库仑摩擦定律与负荷成正比的增加，即

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

式中， ϕ 为摩擦角； W 为车轮的负荷。

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，即地面对驱动轮的最大切向反作用力为

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

也就是说，对于既有塑性又有摩擦性的土壤，其最大切应力由两部分组成，即单位面积的粘聚力 C_0 和单位面积的内摩擦力 $q \tan \phi$ ，可写为

$$\tau_{\max} = C_0 + q \tan \phi \quad (1-4)$$

式中， τ_{\max} 为切应力； q 为法向应力， $q = W/A$ ； ϕ 为摩擦角。对于干砂土， $C_0 = 0$ ；对于塑性土壤等， $\phi = 0$ 。因此对于内摩擦角 $\phi = 0$ 的土壤，提高法向的压力并不能增加土壤的抗剪强度，只有在内摩擦角较大的土壤，提高法向的压力才能使土壤的抗切强度有较大的提高。

上面介绍的是最大切应力，因固体的机械性能是用应力—应变关系确定的。由于土壤性质比较复杂，目前还只能用半经验的方法来描述这种应力—应变关系，以供选择设计参数和预测车辆性能之用。对于未受扰动的脆性土壤（压实的沙、淤泥、土壤和冻结的雪），切应力与变形的关系曲线如图 1-1 中的曲线 1，在最大切应力 τ_{\max} 时出现“驼峰”，然后维持一定的剩余切应力。对于疏松土壤，

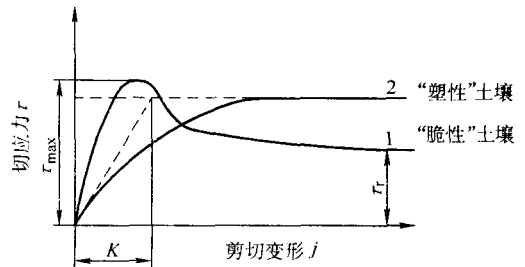


图 1-1 土壤的剪切应力与剪切变形的关系曲线

如松散沙子、湿透的粘土、干雪和大多数受过扰动的土壤，切应力与变形的关系曲线表现为逐渐接近最大切应力而无“驼峰”（图 1-1 中的曲线 2）。此曲线可用下式表示

$$\tau = (C_0 + q \tan \phi) \left[1 - \exp\left(-\frac{j}{k}\right) \right] = \tau_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{j}{k}\right) \right] \quad (1-5)$$

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

车辆在松软的路面上行驶时，轮胎对土壤的压实和推移将产生压实阻力和推土阻力，而充气轮胎的变形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撑压力，则充气轮胎像刚性车轮一样的滚动；反之，如果土壤比较结实，胎面接地部分将被压成平面。所以要确定充气轮胎的压实阻力，首先应确定是按照刚性车轮还是弹性车轮在土壤上滚动。

轮胎刚度可认为由两部分组成：胎体刚度 p_c 和充气压力 p_i 。胎体刚度由轮胎的结构以及材料特性所决定。因此充气压力对轮胎的刚度有很大的影响，从而影响轮胎的滚动特性。当充气压力增加到一个临界压力 p_{cr} 时，轮胎的变形将非常的小，可近似的看作刚性车轮。

若 $p_i + p_c > p_{cr}$ ，则轮胎维持圆形，如刚性轮一样滚动。

若 $p_i + p_c < p_{cr}$ ，部分的轮胎胎面将变成平面，则可认为是弹性的。

因此可利用临界压力 p_{cr} 的大小与轮胎充气压力 p_i 的关系来判断在软路面上滚动的轮胎

是作为刚性还是弹性的区分界限。

充气轮胎在不同的土壤条件下的滚动情况如图 1-2 所示，分别为刚性轮胎在松软路面上的滚动和充气轮胎在松软路面上的滚动。

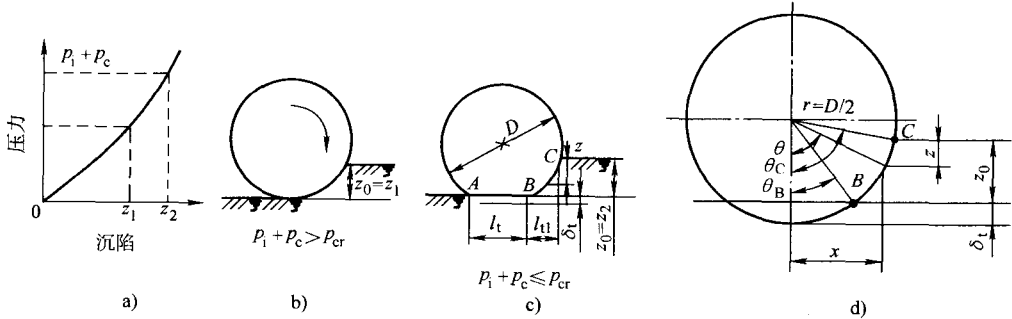


图 1-2 充气轮胎在不同的土壤条件下的滚动描述

下面分别考虑刚性车轮和弹性车轮在车轮滚动时的土壤阻力。

1. 刚性车轮滚动时的土壤阻力

若将一块表示充气轮胎或履带接地面积的平板用均匀负荷压入土壤，则其静止沉陷量 z 和单位面积压力 q 之间的关系为

$$q = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \tag{1-6}$$

$$q = \frac{W}{A}$$

式中， W 为轴重； A 为接地面积； k_c 为土壤的粘聚变形模数； k_ϕ 为土壤的摩擦变形模数； b 为承载面积的短边长，即轮胎接地印迹椭圆的短轴； n 为沉陷指数。 k_c 、 k_ϕ 、 n 的值可以通过有关的仪器测量得到。

图 1-3 所示为刚性车轮在松软路面上滚动时的受力图。假设松软土壤对滚动的刚性从动轮的反作用力是径向的，则可得到作用于车轴上的压实土壤阻力 F_{rc} 为

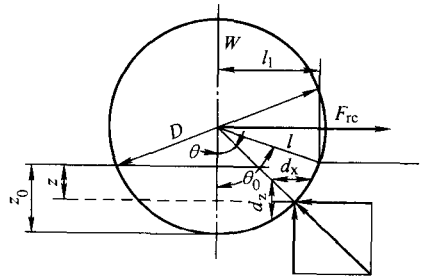


图 1-3 刚性车轮滚动时的受力图

$$F_{rc} = \frac{1}{(3-n)^{\frac{2n+2}{2n+1}} (n+1) (k_c + bk_\phi)^{\frac{1}{2n+1}} \left(\frac{3W}{\sqrt{D}} \right)^{\frac{2n+2}{2n+1}}} \tag{1-7}$$

式中， D 轮胎直径；从上式可见增加车轮直径 D 比增加车轮宽度 b 对减小压实阻力更有效。

对于松软地面上的车轮滚动，车轮的前缘将推动前面的土壤形成隆起的前缘波。这一阻力称为推土阻力 F_{rb} 。一般可考虑推土阻力为

$$F_{rb} = b(cz_0 k_{pc} + 0.5z_0^2 \gamma_s k_{pr}) \tag{1-8}$$

式中， z_0 为土壤沉陷量； c 为粘聚系数； γ_s 为土壤单位体积重量； $k_{pc} = (N_c - \tan\phi) \cos^2\phi$ ；

$k_{pr} = \left(\frac{2N_r}{\tan\phi} + 1 \right) \cos^2\phi$; N_c , N_r 分别为土壤承载能力系数; ϕ 为土壤摩擦角。

从式 (1-8) 可以看出, 大直径的窄轮胎要比小直径的宽轮胎的推土阻力小, 故刚性车轮滚动时的土壤阻力为

$$F_r = F_{rc} + F_{rb} \quad (1-9)$$

上式用于粘性土壤比较准确, 但不适合于干砂类的土壤。

2. 充气轮胎的土壤阻力

相对于刚性车轮, 充气轮胎在松软的地面上会遇到压实阻力、推土阻力以及轮胎弹滞损耗阻力。

因为 $p_i + p_c < p_{cr}$, 部分的轮胎胎面将变成平面, 其接地压力为 $(p_i + p_c)$, 则可得到弹性轮胎滚动时的土壤压实阻力

$$F_{rc} = \frac{[b(p_i + p_c)]^{\frac{n+1}{n}}}{(n+1)(k_c + bk_\phi)^{\frac{1}{n}}} \quad (1-10)$$

另外, 轮胎变形 δ_i 引起的弹滞损失, 将构成充气轮胎滚动时的弹滞损耗阻力 F_n , 其值可以由试验来确定。图 1-4 为 9.00—20 轮胎在硬支承路面上受径向载荷时的变形曲线。图中 OCA 为加载变形曲线, 面积 $OCABO$ 为加载过程中对轮胎作的功; ADE 为卸载变形曲线, 面积 $ADEBA$ 为卸载过程中轮胎恢复变形时放出的功。由图可知, 两曲线并不重合, 两面积之差 $OCADEO$ 即为加载与卸载过程之能量损失。这种损失称为弹性物质的迟滞损失, 简称弹滞损失。单位负荷的弹滞损耗阻力可表示为

$$f_n = \frac{F_n}{W} = \frac{u_a}{p_i^\alpha} \quad (1-11)$$

式中, α 为经验系数, u_a 为汽车行驶速度。

故可得

$$F_n = W \frac{u_a}{p_i^\alpha} \quad (1-12)$$

充气轮胎的推土阻力按照刚性轮胎的推土阻力公式来估算。因此充气轮胎滚动时的土壤阻力为

$$F_r = F_{rc} + F_{rb} + F_n \quad (1-13)$$

三、挂钩牵引力

作用在车辆上的土壤推力 (F_x) 与土壤阻力 (F_r) 之差称为挂钩牵引力。它表示了土壤的强度, 即用来使车辆进行加速、上坡以及克服道路不平的阻力等的能力。因此可以利用挂钩牵引力进行车辆的动力性等的设计。

从上面在松软路面上滚动的轮胎上的受力分析可知, 挂钩牵引力可表示为

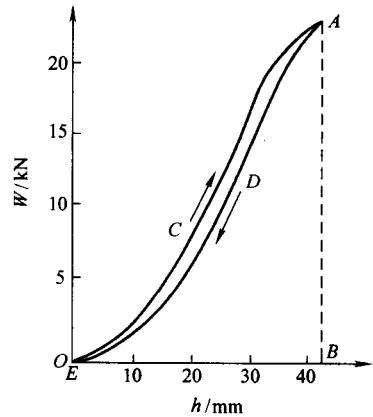


图 1-4 9.00—20 轮胎的径向变形曲线

$$F_d = F_x - F_r \quad (1-14)$$

第三节 作用在轮胎上的力和力矩

一、轮胎坐标系

作用在轮胎上的力和力矩非常的复杂，为了分析作用在轮胎上的力和力矩，建立如图 1-5 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 轴的交点为轮胎节点印迹中心，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。

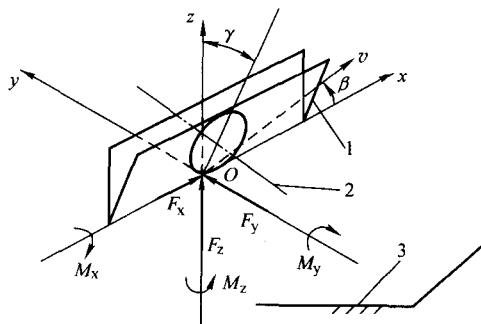


图 1-5 轮胎坐标系及其六分力
1—轮胎平面 2—轮胎旋转轴线 3—地面

二、轮胎六分力

车辆通过轮胎与路面发生力的作用。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（切应力），而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 M_x ；地面反作用力绕 y 轴的力矩——滚动阻力矩 M_y 以及地面反作用力绕 z 轴的力矩——回正力矩 M_z 。正负符号均按照坐标系的规定。

纵向力按照作用方向的不同或作用形式的不一样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。

侧向力是地面作用在车轮上的切向力沿 y 轴的分量。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力，即侧向力。

地面的法向反作用力具体的反映了各个车轮所承受的轴重大小。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使得汽车发生侧倾现象。

滚动阻力矩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