

汽车轮胎学

庄继德 著

北京理工大学出版社



汽车轮胎学

庄继德 著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书把汽车轮胎作为研究对象,从系统的观点对轮胎的工程化过程进行全面论述,其中包括:轮胎的正确选择和合理使用;轮胎的性能特征(滚动阻力与附着性能,侧偏特性,振动与噪声特性,耐久性与磨耗特性)及其影响因素,以及轮胎的设计基础(结构特征,材料使用,应力分析,花纹选型)等。

本书对汽车轮胎从结构、理论、设计、试验、使用等全面进行研究,既反映了国外在这些方面的最新发展,又总结了作者多年来的科研成果。

本书可供从事汽车轮胎生产、使用和研究工作的技术人员参考,也可作为高等院校车辆类专业师生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

汽车轮胎学/庄继德著. —北京:北京理工大学出版社,
1995

ISBN 7-81045-067-0

I. 汽… II. 庄… III. 汽车轮胎 N. ①TQ336.1
②U463.341

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 17935 号

北京理工大学出版社出版发行
(北京市海淀区白石桥路 7 号)
邮政编码 100081 电话(010)68912824
各地新华书店经售
北京房山先锋印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 16.5 印张 421 千字
1996 年 2 月第一版 1997 年 9 月第二次印刷
印数:2001—3500 册 定价:26.00 元

※ 图书印装有误,可随时与我社退换 ※

前 言

轮胎在汽车各部件中占有十分重要的地位,这是因为:①轮胎在汽车中的使用量大;②轮胎约占每辆汽车能源消耗的 20%;③制造轮胎需要橡胶、石油等重要资源;④轮胎对汽车各项行驶性能的影响极大。所以对汽车轮胎若能合理地选择、正确地使用,并改善其结构,进行优化设计和简化制造过程,则能降低汽车的成本,节约大量的稀有资源,并大大地提高汽车的行驶性能。由此可见,对汽车轮胎从结构、理论、设计、试验、使用等全面进行研究既有重要的理论意义,也对国民经济有重要的实用价值。

由于轮胎的生产和使用涉及到化工与机械两大行业。通常,搞化工的很少研究汽车,而从事汽车技术的又不太熟悉化工。因此使汽车轮胎的研究与开发不可避免地受到一定的影响。

另外,轮胎作为具有粘弹性性质的复合材料构件,研究起来难度很大,需要多学科的知识 and 一定的理论基础。这就使得对汽车轮胎的研究不够普遍,甚至还没有得到足够的重视。

目前在大专院校的汽车专业教材中对轮胎都不作专门介绍。至今在我国虽有少量介绍汽车轮胎制造与试验以及阐述轮胎力学与热学的书籍出版,但多数已出版的有关轮胎方面的书籍均属于保养与修理之类,而从理论到实际,系统地、全面地论述汽车轮胎的专门著作,在国外很少见,在国内也还没有。

有鉴于此,本书专门把汽车轮胎作为研究对象,从系统的观点,对轮胎的工程化过程进行全面论述,既包括轮胎的结构、理论与设计基础,又介绍了轮胎的试验与正确使用方法。其中尤以轮胎

的滚动理论和力学特性作为核心内容。

本书博采不同学派的观点,搜集了美、俄、德、日等国大量的科研资料,而且融会贯通,经过系统整理后,加上作者的研究心得,提出了汽车轮胎学这门分支学科的基本框架,并在吸取外国经验的基础上建立了自己的体系。

本书反映了国外的最新研究成果,并部分地总结了作者几十年来在汽车轮胎方面的研究工作。本书也是国家自然科学基金重点资助项目《地面仿生机械的理论与关键技术研究》的一部分。

本书在内容上力图深入浅出,既有理论上的深度,又考虑实际的应用价值。本书既可作为高等院校师生的教学用书,又可作为汽车轮胎生产和研究工作者的参考书。对广大汽车使用者来说,本书也可作为一本工具书,在使用轮胎时参考。

本书沟通了化工与机械两个行业,希望能有助于我国轮胎生产与汽车工业的发展。

由于本书的内容涉及面较广,尤其是轮胎理论与轮胎生产紧密相关,限于作者水平,难免有错误或不当之处,恳切地希望读者批评指正。

目 录

绪 论	1
第一章 轮胎的结构	6
第一节 轮胎的历史	6
第二节 轮胎的结构特征	8
第三节 轮胎各部分的名称和性质	13
第四节 胎面花纹的种类和特点	17
第五节 轮胎的分类和规格	20
第六节 轮胎的轮辋形状	24
第七节 轮胎的发展趋势	28
第二章 轮胎的使用材料 and 基本制造过程	42
第一节 帘布、帆布和钢丝	42
第二节 生胶和橡胶配合剂	48
第三节 胶料的主要性能	52
第四节 对轮胎各部件所用胶料的性能要求	54
第五节 轮胎的基本制造过程	59
第三章 轮胎的结构力学	67
第一节 轮胎的结构力学特征	67
第二节 橡胶的大变形特性	69
第三节 作用在帘布层上的应力	72
第四节 带束(缓冲层)的弹性常数	76
第五节 斜交轮胎的自然断面形状理论	78
第六节 影响轮胎断面形状的因素	84
第七节 子午线轮胎的结构力学	86
第八节 轮胎内的应力关系	92
第九节 胎体弹簧常数的计算	98
第十节 胎面的弹性常数	102

第四章 轮胎的基本特性	105
第一节 轮胎的模型化	105
第二节 轮胎及其各部分的弹性	109
第三节 轮胎刚度和转动惯量确定	115
第四节 负荷特性和包络特性	121
第五节 承载能力和推荐载荷	125
第六节 接地形状和接地压力分布	131
第七节 湿牵引性和滑水现象	143
第八节 滚动半径和旋转速率	147
第九节 胎侧压曲和波状变形	150
第五章 轮胎的滚动阻力	156
第一节 橡胶和帘线的粘弹性特性	156
第二节 轮胎滚动阻力的发生机理	158
第三节 轮胎能量损失的有限单元法计算	167
第四节 轮胎受力平衡和滚动阻力系数	173
第五节 轮胎滚动阻力的一般性质	180
第六节 轮胎滚动阻力的预估	187
第七节 滚动阻力系数的测试方法	194
第六章 轮胎与路面间的摩擦和附着	200
第一节 橡胶和橡胶块的摩擦特性	200
第二节 胎面橡胶与路面摩擦机理的简单说明	207
第三节 轮胎与硬路面的附着机理	209
第四节 附着力和附着系数的分析法	219
第五节 滑动摩擦系数的测定方法和一般性质	225
第六节 轮胎与路面附着的现代理论	232
第七章 轮胎的侧偏特性理论	237
第一节 侧偏力、回正力矩与侧偏角的关系	237
第二节 纯侧偏特性的分析法	249
第三节 制动、驱动时的侧偏特性	253
第四节 侧向力的半经验公式	260
第五节 侧偏动特性	262
第六节 方向盘转角阶跃输入下的侧向力响应	267

第七节	侧偏特性的试验方法	269
第八章	轮胎的振动特性	273
第一节	轮胎的刚度特性	273
第二节	轮胎的固有频率	285
第三节	轮胎的振动传递特性	299
第四节	轮胎的越过突起特性	308
第五节	轮胎不均匀度引起的振动	313
第六节	轮胎在实际路面行驶时的振动特性	320
第九章	轮胎的噪声	323
第一节	轮胎噪声的分类和发生机理	323
第二节	轮胎噪声的评价和测试方法	330
第三节	轮胎噪声的一般性质和影响因素	342
第四节	横沟花纹的噪声发生机理和低噪声化	351
第五节	间接噪声发生的原因和防止对策	361
第十章	轮胎的磨耗特性	372
第一节	轮胎的耐久性和胎面磨耗	372
第二节	胎面磨耗的发生机理和一般性质	377
第三节	橡胶耐磨程度的指标和轮胎的磨耗特性	382
第四节	轮胎磨耗的解析研究	384
第五节	车轮定位和轮胎的偏磨耗	396
第六节	轮胎的滑动印痕	400
第十一章	轮胎在松软地面上的滚动理论	405
第一节	土壤的基本物理机械特性	405
第二节	轮胎变形、土壤沉陷和滚动阻力	412
第三节	轮胎下土壤颗粒的运动特性和滑转下陷	424
第四节	载荷与土壤沉陷关系的预测	427
第五节	土壤的剪切特性和轮胎在松软地面上附着力的确定	432
第六节	轮胎在土壤上的受力分析和滚动阻力系数的数值解析	438
第七节	轮胎与土壤接触面内的应力分布	443
第八节	弹性轮胎在土壤上的挂钩牵引力计算	451
第九节	在软土壤上的驱动轮胎效率	458
第十节	轮胎在松软地面上滚动时的失效分析	461

第十二章	特殊用途轮胎	465
第一节	冰雪路用轮胎	466
第二节	非公路用轮胎和高越野专用轮胎	474
第三节	竞赛用轮胎	482
第四节	农耕用轮胎	485
第五节	沙漠用仿生轮胎	488
第十三章	轮胎的选择和使用	498
第一节	轮胎的使用要求	498
第二节	功能成本分析在轮胎选择中的应用	505
第三节	正确使用轮胎对提高行驶里程的影响	511
主要参考文献		515

绪 论

汽车轮胎学是关于轮胎结构、理论、设计与应用的一门学问。下面仅就这门学科的研究内容、发展历史和学科性质及特点作简单说明。

一、研究内容

众所周知,汽车轮胎的基本职能是支承车辆重量,传递驱动和制动力矩,提供吸振与包络能力以及保证转向稳定性等。此外,轮胎还必须具有诸如抗磨性、低滚动阻力、耐久性、安全性等性能特点。

轮胎工程师必须把汽车轮胎的这些基本职能与特征和轮胎的基本设计、影响轮胎内主要应力关系的因素、轮胎的性能,以及归根到底和轮胎的使用标准相联系。把轮胎工程师在设计与应用过程中碰到的无数个互相联系的参数进行分类,即可得到轮胎设计与应用过程如图(0-1)所示。

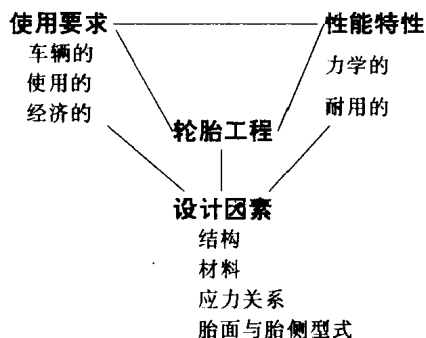


图 0-1 轮胎设计与应用过程

轮胎设计与应用的实时程序为

- (1) 阐明轮胎具体的使用要求；
- (2) 确定最能满足这些要求的轮胎主要性能；
- (3) 设计和开发轮胎。这种轮胎不仅要能达到预期的性能要求，而且应价格合理和制造可行；
- (4) 制订轮胎使用和保养的规范或标准。

根据以上所述，本学科的研究内容分为三个部分。

第一部分专门研究如何正确选择和合理使用轮胎，以使轮胎能承受更多的有效负载和更快、更安全、更经济地完成作业任务。这里要特别研究车辆、使用和经济三方面对轮胎分别提出的不同要求，以及满足这些要求的措施。

第二部分专门论述轮胎的性能特征及其影响因素，以及各种性能与轮胎设计参数和应用工况、使用条件等的关系。轮胎性能又分成力学性能和耐用性能，并且力学性能与轮胎的基本职能紧密相联。例如轮胎的主要职能为支承重量，于是就要研究轮胎的承载能力、额定载荷、负荷挠曲特性以及轮胎在地面上的压力分布等。由于轮胎要传递牵引力和制动力，所以要研究轮胎与路面的摩擦和附着机理、轮胎在各种工况下的滚动阻力以及在湿路面上的滑水现象等。为保证轮胎的转向稳定性，研究轮胎的侧偏特性是必不可少的。另外在减振方面，要研究轮胎的振动特性，包络能力，驻波现象以及由于振动引起的轮胎噪声等。总之，这部分的研究内容是汽车轮胎学的核心与重点。

第三部分是轮胎的设计基础，即研究如何把轮胎结构和材料与预测的应力环境相平衡，使得设计的轮胎能以最低的价格、高效率地制造出来。因为设计方案可以有好几个，而且方案中的某些因素可能互相矛盾，因此要在设计过程中相互协调以求得轮胎特性的最佳平衡。

在这部分主要研究轮胎的结构特征，造型原则，轮胎所用材料及其性能分析，轮胎的几何尺寸确定和内部应力关系的解析等。除此之外，还专门介绍了轮胎的基本制造过程。

因为第三部分内容属于轮胎的设计基础,而了解这些基础知识是讨论轮胎性能与应用的必要前提。因此本书在内容安排上将第一、二、三部分的顺序作了颠倒,这样将有助于对整个内容的解释和理解。

二、发展历史

汽车轮胎学这门学科的理论基础是“轮胎滚动理论”或“轮胎力学”。

尽管在 1845 年已经出现了原始形式的充气轮胎,但轮胎经历一个世纪的漫长岁月,发展缓慢,这主要是由于缺乏理论的指导。而近半个世纪来,由于对轮胎滚动理论的逐步深入研究,促使了轮胎生产和应用的飞速发展。

如前所述,研究轮胎的力学特性是汽车轮胎学的核心内容和重点,故“轮胎力学”的形成和发展历史实际上也就是“汽车轮胎学”的形成和发展历史。如果离开“轮胎力学”这个理论基础,“汽车轮胎学”也形成不了一门学科。

轮胎的力学特性是决定汽车运动特性的重要因素。因此,关于轮胎力学特性的研究是和汽车的研究同时开始的。半个多世纪以来各国学者都在这方面进行了坚持不懈的探索,取得了丰硕的成果。

1935 年德国的 R. Schuster, P. Weichsler 首次发现充气轮胎在与路面接触部分的弹性滑动。1954 年 E. Fiala 对轮胎的侧偏特性进行了理论分析和试验研究。1967 年 F. Böhm 提出了有关轮胎的振动理论。德国学者们的这些研究成果,至今不失其有重要的理论价值。

俄国的 E. A. Чудаков 在 1948 年出版了《汽车车轮滚动》一书,并且发表了很多关于轮胎滚动理论方面的论文,他至今被认为是轮胎力学的开拓者和奠基人之一。B. И. Кнороз 也是轮胎研究方面的先驱者,他在 1960 年、1975 年先后发表了《汽车轮胎工作》和

《轮胎与车轮》两本专著。此外,俄国著名教授 В. А. Петров, В. А. Петрошов, Ю. В. Пираковский, Р. В. Вирабов, Н. Н. Яценко 等在研究轮胎滚动阻力以及与路面的附着机理方面都有卓越的贡献。1988 年 Б. Л. Бухин 出版的《轮胎力学导论》一书和 1989 年 М. А. Ливин, Н. А. Фураев 的专著《可变形车轮滚动理论》都是有关轮胎力学研究方面的宝贵文献。

日本的赤坂是研究轮胎的著名学者,他对轮胎的结构力学进行了系统的研究。酒井秀男在轮胎力学方面也发表过一系列有价值的论文,特别对制动、驱动特性和侧偏特性的理论研究颇有建树,他在 1987 年出版的《轮胎工学—从入门到应用》一书中提出了《轮胎力学》的基本框架。其它如福岡、纪幸等日本学者关于振动的研究和迎恒夫等关于噪声的研究,都是现代轮胎力学研究的热点。

加拿大和美国等学者,如 M. G. Bekker 从 30 年代开始就研究轮胎的力学特性。WOOD 和 GOUGH 以及 Day, Gehman 等在轮胎的设计理论方面也进行了一系列基础性的研究工作。

荷兰的 Pacejka 也是研究轮胎特性的著名学者,他在建立轮胎模型方面做了大量的工作,并取得了高水平的成果。

在我国,关于轮胎特性方面的研究,最近几年在一些高等学校和科研院所也有了很大的发展。

回顾历史,各国学者在建立轮胎力学方面积极探索;环视当今,轮胎力学的研究蓬勃发展。例如,俄国学者 В. А. Петров 不久前提出了轮胎滚动的现代理论;美国的 Donald Whicker 等研究人员提出了轮胎滚动时能量损失的有限元计算方法。日本的酒井秀男提出了轮胎动特性的计算机模拟等。不难预测,在轮胎力学的研究方面还将不断开拓出许多新的领域。

当然,“轮胎力学”并不能包括“汽车轮胎学”的全部内容。不过随着“轮胎力学”研究的深入开展,“汽车轮胎学”也将进一步得到充实和发展。

三、性质与特点

汽车轮胎学是专门研究轮胎工程的一门综合性分支学科,它有别于轮胎力学。因为除了轮胎力学特性外,它还研究轮胎的结构设计与应用问题。另外,也有别于轮胎设计,因为它只涉及到结构型式和设计参数选择等一些共性问题,并不具体讨论轮胎的设计过程和方法。在轮胎应用方面,汽车轮胎学也只是通过对轮胎力学特性和耐久性等的理论研究,来揭示合理使用汽车轮胎的途径和必须遵循的一些规律,并不详细研究汽车轮胎具体的使用和保养作业。

汽车轮胎学具有跨专业的交叉性质,特别是跨化工与机械两大行业。可是以往从事轮胎工业生产者多数无暇对汽车进行深入研究,而从事汽车行业的工程技术人员又往往对化工生产不太熟悉。因此,为推动汽车轮胎学的发展,有必要使两者相互渗透。

轮胎离不开车辆,如果把汽车看作一个系统,那么轮胎只是系统中的一个单元。另外,轮胎也离不开地面。轮胎—地面系统只是地面车辆系统中的一个子系统,所以必须用系统的观点和系统分析的方法来研究汽车轮胎学。

汽车轮胎学也是一个新兴的学科领域,在这个领域内尚有很多问题不太清楚。例如,关于轮胎和路面的附着机理与磨损机理至今还不十分明白。

总之,汽车轮胎学是一门发展中的工程学科,它的进一步发展还得依靠实践。50年代初期俄国的学者 Гаспаляниц 和德国的学者 Fiala 先后发现了轮胎的侧偏现象,后来不少人进行了理论和试验研究,从而推动了轮胎侧偏特性理论和汽车操纵稳定性理论的发展,大大改善了轮胎与车辆的转向特性,这就是一个很好的例子。目前,国内外都有一些学者正热衷于把仿生技术引进到汽车轮胎上来,提出所谓“仿生轮胎”的概念。如果此种设想能够实现,那将导致汽车轮胎生产的一场重大革命,我们期待着这个日子的到来。

第一章 轮胎的结构

第一节 轮胎的历史

作为充气轮胎的原型是 1845 年由苏格兰人汤姆逊 (R. W. THOMSON) 发明的, 当时虽经申请获得专利, 但离开实用化还相当远。此后, 在 1888 年, 和汤姆逊同样是苏格兰人的邓录普 (J. B. DUNLOP), 对此多方加以改良, 使大体上接近于实用的轮胎制作成功。但因在胎体内使用的帆布其纵线和横线相互交叉接触, 故每逢轮胎滚动时, 由于在接地部产生变形, 使得纵线和横线相互磨擦, 并在短时间内被磨断, 因而耐久性很差。往后, 到 1915 年, 由于出现了帘线相互交叉贴合的胶帘布, 代替垂直交织的普通帆布, 其间层为橡胶隔离, 可防止相互摩擦, 从而导致耐久性飞速提高。

再往后, 在轮胎用材料方面, 由于采用了棉纱经药品再处理后形成的纤维化强力人造丝来代替当时一直使用的棉线, 因而耐久性又大幅度提高。另外, 作为帘线陆续采用了尼龙、的确良、钢丝, 最近还试用了钢丝绳、炭素纤维等。再就橡胶而言, 代替天然橡胶的各种合成橡胶的生产, 改善增强剂和橡胶性质的药品类的开发, 以及生产技术的提高等都大大地有助于轮胎耐久性和其它性能的提高。

除了轮胎用材料外, 差不多与此同时, 轮胎的其它部件也得到进一步改进。1890 年至 1900 年出现了胎面带花纹的轮胎, 而在这以前, 则只有平滑的轮胎。由于胎面具有花纹, 大大提高了轮胎在

泥泞道路上和潮湿道路上工作的安全性。

大约到了 1925 年,轮胎胎圈具有了一定的几何形状,并且胎圈凸出部分嵌进轮辋边缘相应的凹陷部分。但这种固着方法不安全,因此以后对胎圈结构又作了改进,出现了迄今仍在使用的直角胎圈轮胎。

从 30 年代开始轮胎结构进一步朝着专门化的方向发展,因而出现了一系列新型轮胎。众所周知,“超低压轮胎”(1930 年)是一种最早的特殊结构轮胎。由于它的轮廓增大,气压降低,提高了与地面的附着能力。

第二次世界大战期间又出现了调压轮胎,降低轮胎内的气压时,能大大地提高汽车在松软地面上的行驶性能。

自从发明充气轮胎那时起,就开始探索提高汽车行驶安全性的方法。因为轮胎被刺穿和迅速漏气时,有可能发生事故。但是这方面的发明尽管很多,却很久未能创制出“安全”轮胎。直到 1948 年,才出现了第一批无内胎轮胎的工业样品,这种轮胎被刺穿时也不会造成危险。

1950 年至 1960 年,出现了一些能大大提高汽车在无路地区行驶性能的轮胎:拱形轮胎、调压宽断面轮胎和椭圆形轮胎。在同一时期内,还生产了代替标准载重汽车上并装普通双胎的宽断面轮胎。

至于现在较为普及的子午线结构的轮胎是 1913 年在英国申请专利的,但限于当时的技术水平,未达到实用化的程度。然而,在 1946 年法国的米西林公司申请了具有钢制带束(缓冲层)的子午线轮胎的专利,第二年取得实用化成功,至 1965 年已大致获得 70% 的法国轮胎市场。

从斜交轮胎转向子午线轮胎是从欧洲开始,接着传到日本、美国。在日本,虽然在专利和技术方面迟缓了一些,但现在日本 80% 以上的轿车轮胎已经子午线化。这种动向的最主要理由是:除了乘坐舒适性(平顺性)外,其它性能如耐久性、耐磨耗性、耐发热性、操

纵性、滚动阻力等,子午线轮胎都比斜交轮胎优越很多,而且这种轮胎平顺性不好的最大缺点,由于汽车悬架系统的改善,也有可能很大程度上得到弥补。

可是,生产子午线轮胎要变更设备,这样需要大量投资。故在美国,曾有一段较短的时期,谋求利用旧有的设备,生产一种介于子午线轮胎与斜交轮胎之间的“半子午线”轮胎,现在则普遍称它为带束斜交轮胎。不过这种轮胎的优点不多,到现在生产量还非常有限,没有达到完全实用化的程度,可这段经历反倒成了在美国汽车用轮胎子午线化迟缓的一个原因。

由于载重车、公共汽车用轮胎都是大型的,成型方法较轿车轮胎困难,故在日本,其子午线化的过程较轿车用轮胎迟缓,但考虑到子午线轮胎的诸多优越性能以及交通噪声已成问题等现状,日本正大力促使在近期内把载重车,公共汽车用轮胎的子午线化成为主流。

在我国虽自1964年已开始试制9.00—20子午线轮胎,但由于投资和技术等方面的原因,轮胎的子午线化较其它工业发达国家慢了一点。但近十几年来由于改革开放,轮胎工业也有了很大发展,在我国子午线轮胎的生产已遍地开花。最近,中国化学工业部还把子午线轮胎的制造和质量攻关作为重大研究课题,可以预计在不久的将来我国轿车轮胎的子午线化必将跟上先进国家的步伐。

第二节 轮胎的结构特征

一、斜帘布层轮胎

斜帘布层轮胎别名叫交叉帘布层轮胎,简称斜交轮胎,其名称是来源于作为轮胎最主要部分的胎体结构。因为用制作工艺来说明此种胎体结构较容易理解,故首先简单地对成型工程(用人工贴