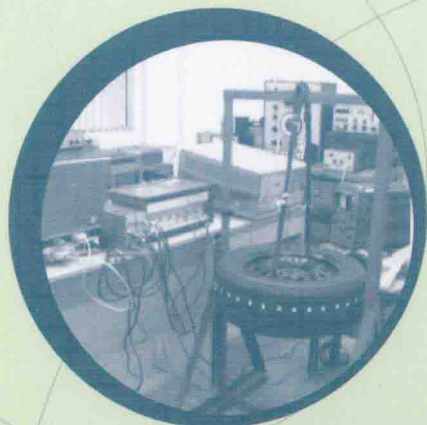
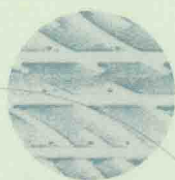


子午线轮胎有限元分析 理论及其应用

The finite element analysis theory and
application in radial tire

程 钢 赵国群 著



化学工业出版社

子午线轮胎有限元分析 理论及其应用

The finite element analysis theory and
application in radial tire

程 钢 赵国群 著



化学工业出版社

· 北 京 ·

轮胎标签法的实施,对轮胎产品质量提出了更高的要求。有限元方法作为一种数值分析方法,在工程领域的应用呈现越来越多的趋势。轮胎设计逐步迈入自动化设计和智能设计阶段。

本书以轮胎结构性能分析为主线,对轮胎有限元分析的理论基础和基本原理进行了阐述,介绍了轮胎材料性能、接地性能和模态实验以及二维和三维轮胎静态、滚动、加速、制动、振动模态等轮胎性能有限元分析方法。

本书可作为高等院校材料加工类和机械类专业本科或研究生教学的教材和参考书,同时也可供相关工程技术人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

子午线轮胎有限元分析理论及其应用/程钢,赵国群
著. —北京:化学工业出版社,2015.4
ISBN 978-7-122-23189-5

I. ①子… II. ①程…②赵… III. ①子午线轮胎-有
限元分析 IV. ①TQ336.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第043928号

责任编辑:尤彩霞
责任校对:陶燕华

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:北京京华虎彩印刷有限公司
850mm×1168mm 1/32 印张6½ 字数170千字
2015年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686)

售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:30.00元

版权所有 违者必究

汽车工业已经成为我国国民经济的重要行业,轮胎作为汽车的重要组成部分之一,它直接与地面接触,支撑着负载的车辆重量,传递汽车的牵引力、制动力和侧向力,通过减轻和吸收车辆在行驶时来自路面的振动和冲击,保证汽车有良好的乘坐舒适性和行驶平顺性。子午线轮胎以滚动阻力低、节省燃料、高速安全、生热低、耐磨、耐刺、耐用、减震、舒适、操纵稳定性好等优点成为轮胎的发展方向。由于子午线轮胎结构的复杂性和材料的多样性,轮胎力学性能分析作为轮胎理论研究的一个重要组成部分吸引着科研技术人员在这一领域不断地进行研究。

由于高性能计算机、计算技术和应用软件的发展,轮胎设计逐步迈入自动化设计和智能设计阶段,轮廓设计已由最初的自然平衡轮廓理论,发展到考虑轮胎滚动条件的最佳滚动轮廓理论等新的动态结构设计理论。目前市场要求日益严格,并向多样化和综合化方向发展,汽车开发的一体化思想正在汽车和轮胎行业逐步确立。

本书以笔者及科研团队多年来在教育部博士点基金等项目资助下所取得的研究成果和工作实践为基础,重点介绍了轮胎有限元分析的基本理论和方法,特别强调了子午线轮胎力学性能有限元分析及试验方法。主要包括轮胎橡胶材料力学性能试验研究、子午线轮胎接地性能试验研究、子午线轮胎振动模态试验研究、子午线轮胎二维及三维非线性有限元分析、滚动轮胎特性有限元分析、子午线轮胎振动模态有限元分析等内容。

本书由程钢副教授和赵国群教授撰写。同时,山东大学模具工程技术研究中心的管延锦教授等及工程力学系王卫东副教授等有关同志也参与并完成了许多具体的研究工作。

本书可作为高等院校材料加工类和机械类专业本科或研究生教学的教材和参考书，同时也可供相关工程技术人员学习使用。

由于笔者水平所限，书中难免存在各种疏漏和不当之处，恳请读者不吝指教。

著者

2015 年 2 月

第1章 绪论

1

1.1 引言	1
1.2 子午线轮胎的结构及变形特征	2
1.2.1 帘线排列角度	2
1.2.2 胎圈	3
1.2.3 胎侧	3
1.2.4 带束层与垫胶	4
1.2.5 变形特征	4
1.3 子午线轮胎损坏形式和损坏原因	5
1.4 子午线轮胎的优点	6
1.5 现代轮胎产品及发展趋势	7
1.6 子午线轮胎力学性能的研究现状	9
参考文献	15

第2章 有限元分析的基本理论及方法

23

2.1 引言	23
2.2 轮胎结构力学分析中的非线性特性	24
2.2.1 轮胎的材料非线性	24
2.2.2 轮胎的几何非线性	24
2.2.3 轮胎的接触非线性	26
2.3 材料模型	27
2.3.1 橡胶材料	28
2.3.2 帘线-橡胶复合材料	29
2.4 接触模型	37

2.5 关于复合材料力学性能研究中的几个问题	38
2.6 本章小结	38
参考文献	38

第3章 轮胎性能试验研究

40

3.1 引言	40
3.2 轮胎橡胶材料力学性能试验研究	41
3.2.1 试验条件	41
3.2.2 试验结果及分析	42
3.3 子午线轮胎接地性能试验研究	51
3.3.1 试验装置及试验方法	52
3.3.2 试验结果分析	54
3.4 本章小结	60
参考文献	61

第4章 子午线轮胎静态接地性能有限元分析

63

4.1 引言	63
4.2 子午线轮胎轴对称非线性有限元分析	64
4.2.1 轴对称有限元模型	64
4.2.2 充气压力的影响	65
4.2.3 离心力的影响	69
4.3 子午线轮胎三维非线性有限元分析	71
4.3.1 轮胎静态接地有限元模型	72
4.3.2 轮胎垂直接地性能有限元分析	73
4.4 轮胎静态侧倾性能有限元分析	104
4.4.1 轮胎受力变形的情况	104
4.4.2 轮胎侧倾垂直刚度	104
4.4.3 轮胎接地地区应力分布	106
4.4.4 轮胎接地地区摩擦应力分布	108

4.5 试验结果与有限元分析结果的对比	110
4.6 本章小结	112
参考文献	114

第5章 子午线轮胎滚动性能有限元分析 117

5.1 引言	117
5.2 滚动轮胎有限元模型	118
5.3 自由滚动状态有限元分析	119
5.4 驱动/制动状态下滚动轮胎的纵滑特性	123
5.4.1 接地地区法向应力分布	123
5.4.2 接地地区摩擦应力分布	124
5.4.3 带束层帘线受力状况	124
5.5 带束层帘线角度对滚动轮胎纵滑特性的影响	127
5.5.1 自由滚动状态	127
5.5.2 驱动/制动状态	129
5.6 滚动侧倾状态有限元分析	134
5.6.1 侧倾自由滚动状态	135
5.6.2 滚动侧倾驱动/制动状态有限元分析	144
5.6.3 滚动轮胎侧倾侧偏复合状态有限元分析	163
5.7 本章小结	167
参考文献	168

第6章 子午线轮胎振动特性研究 172

6.1 引言	172
6.2 子午线轮胎振动特性有限元分析	172
6.2.1 轮胎模态分析有限元模型	173
6.2.2 轮胎的固有频率和振型	174
6.3 轮胎模态试验	179
6.3.1 基本原理	179

6.3.2 轮胎模态测试与分析系统	181
6.3.3 轮胎模态试验结果	185
6.4 结果对比	193
6.5 本章小结	194
参考文献	195

第1章

绪论

1.1

引言

1885年,英国商人汤姆生(R. W. Thomson)首次发明了空气轮胎;1888年邓录普(J. B. Dunlop)发明了充气轮胎,并取得了专利,开创了轮胎制造技术新纪元;后来威尔奇(C. K. Welch)发明了有钢丝圈结构的轮胎,同时开始采用内胎;1890年邓录普和威尔奇两家公司联合生产带钢丝圈的充气轮胎,并由自行车胎发展到汽车轮胎;1893年首次采用棉帘布制造轮胎,大大提高了轮胎的使用寿命和行驶性能。中国于1931年在上海开始生产汽车轮胎。子午线轮胎发明于1913年,但直到1947年法国米其林公司才首先发明了全钢子午线轮胎,并于1953年开始工业化生产;1954年意大利倍耐力公司研制出半钢子午线轮胎,从此揭开了轮胎革命的序幕。在轮胎的发展历程中,其结构大致可分为两种:斜交轮胎结构和子午轮胎结构。与此相适应,作为轮胎结构设计理论基础的轮胎力学也可分为斜交轮胎结构力学和子午线轮胎结构力学两类。由于子午线轮胎的性能更加依赖于合理的结构设计,轮胎的结构力学理论模型得到了进一步发展,这些理论模型应用于轮胎的结构设计已充分显示出了力学分析在改进轮胎产品质量中的重要作用,使人们认识到结构与材料设计具有同等重要的地位。到20世纪

80 年代中期,有限元分析技术在轮胎断面轮廓设计中的应用使轮胎断面轮廓设计突破了自然平衡轮廓的束缚,人们开始寻求自然平衡轮廓以外的最佳轮廓,从而掀起了有限元技术在轮胎结构设计中的应用热潮,这不仅加快了轮胎新产品的开发速度,还促进了轮胎产品的多样化。

1.2 子午线轮胎的结构及变形特征

子午线轮胎和斜交轮胎的主要区别在于其结构的差异^[1,2],如图 1-1 所示。子午线轮胎的胎体帘线弓形地从一个胎圈到另一个胎圈呈子午(地球仪上经线)方向排列,而带束层帘线角度接近周向紧紧束住胎体。根据胎体帘线材料的不同,子午线轮胎又分为全钢丝子午线轮胎和半钢丝子午线轮胎(即纤维子午线轮胎)。

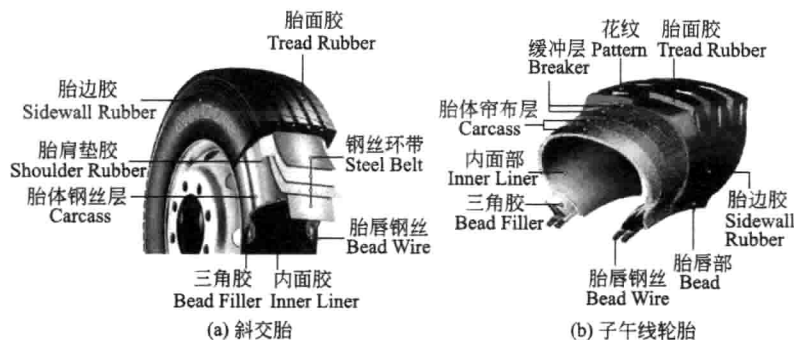


图 1-1 轮胎结构图

1.2.1 帘线排列角度

子午线轮胎由帘布层和带束层两种骨架结构组成,子午线轮胎的胎体帘线呈子午线方向排列,即与胎圈成 90° ;而带束层则呈 $70^\circ \sim 80^\circ$,由接近周向排列的帘线所构成(几乎与胎面中心线平行)。带束层起带束作用,限制胎体的周向变形,带束层的排列角

度类似于地球仪上的纬线方向。一般子午线轮胎采用一层钢丝帘布或多层纤维帘布组成胎体,依靠橡胶发生周向联系,帘线承受着较大的应力,帘线胶必须具有较高的定伸度和耐屈挠、耐老化性能,胎里油皮胶较厚,防止跳线、露线。斜面交轮胎的胎体帘线排列角度一般在 $48^{\circ}\sim 55^{\circ}$,各层交叉排列,斜交轮胎的缓冲层位于胎面胶与胎体层之间,起缓冲作用。

1.2.2 胎圈

子午线轮胎的胎圈是一个特殊的结构,由硬度较高的三角胶条构成,形成胎圈向胎侧的刚度过渡。为提高胎圈的刚度和耐磨性,往往采用了胎圈包布,有的还在胎圈外侧贴有钢丝或纤维增强层。

由于子午线轮胎胎圈部位的应力较大,容易磨坏胎圈部而造成子口空、子口裂。为了改善这一状况,全钢子午线轮胎一般采用:①复合三角胶芯;②钢丝包布;③高硬度、高定伸子口包胶;④U形、圆形断面钢丝圈。

胎圈中钢丝圈结构以圆断面结构强度最高,六角形结构次之,再依次为U形断面、矩形断面。高质量的子午线轮胎都采用圆断面钢丝圈,而斜六角形钢丝圈多用于无内胎轮胎。钢丝圈由直径1mm以上的镀铜或镀黄铜钢丝缠绕而成,国际上趋向于钢丝直径变粗,或者由两种以上不同粗细的钢丝构成。

1.2.3 胎侧

胎侧是子午线轮胎的主要变形区,由于子午线结构的特点,再加上胎侧帘布层数少,所以胎侧较柔软,曲挠变形较大,其胎侧胶不仅起到与斜交胎胎侧胶同样的保护胎体的作用,同时还需承受较大的机械变形,所以胎侧胶要具有较强的耐屈挠、龟裂和抗老化性能,以及耐撕裂和耐机械划伤能力。为提高胎侧的侧向刚度和耐磨性能,子午线轮胎的胎侧胶的厚度比斜交胎厚,胎面比一般斜交胎的胎面宽。

由于子午线轮胎径向变形较大，胎侧部位橡胶（包括帘布胶和胎侧胶）受到两向（径向和周向）伸张力，而在胎肩部位和胎圈部位又受到两向压缩力，在胎侧部位产生复杂变形。子午线轮胎胎侧部位橡胶受到的最大应力要比斜交胎高出 1 倍以上，由此容易引起胎侧胶裂口。

1.2.4 带束层与垫胶

子午线轮胎的带束层，由多层高强力的钢丝帘线相互成 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 交叉组成，它起到“箍紧”胎体，增强胎冠的作用，以保证轮胎具有一定的外形尺寸，并承受内压引起的负荷和行驶时产生的应力；其钢丝帘布间的胶层具有较高的硬度和定伸强度，以及良好的钢丝黏合性能；为实现带束层的平缓过渡和避免胎肩部位的脱空现象，除采用中间厚两边薄的“中间胶”外，其缓冲层边缘贴有封口胶条和垫胶。载货子午线轮胎的带束层一般为 3~4 层。由于带束层帘线角度较大，在圆周方向上几乎不伸张，子午线轮胎的胎冠部比斜交轮胎强硬而坚固，所以带束层承受较大的内压应力以及路面冲击应力。为了提高带束层质量，除了采用足够强度的钢丝层以外，还必须将带束层断面形状布置得尽可能平坦，因此在帘布层与带束层两边缘之间增加三角形胎肩垫胶。为了缓和路面的冲击，紧靠胎面的带束层，有的采用高伸长钢丝（伸长率为 5%），这对于改善冠部脱空，提高翻新率是有益的。

1.2.5 变形特征

由于应力分布不同，子午线轮胎与斜交轮胎的变形状况有很大的差别。轮胎标准中通常规定同一规格的子午线轮胎与斜交轮胎充气外缘尺寸相同，如 9.00-20 斜交轮胎和 9.00R20 子午线轮胎在 7in [1 英寸(in)=0.0254m] 标准轮辋上充气，断面宽都是 258mm，充气外直径都是 1018mm。

一般斜交轮胎在充气时要求外直径收缩，以提高胎面耐磨性，

所以斜交轮胎的原始模型尺寸的外直径比充气尺寸大，而断面宽要比充气尺寸小。但是子午线轮胎由于有周向不伸张的带束层紧箍着胎体，所以原始模型尺寸与充气尺寸相近。

子午线轮胎在承受负荷时的变形大于斜交轮胎。载重斜交轮胎在标准负荷及相应气压下的压缩系数为9%~11%，而子午线轮胎的压缩系数为12%~14%。在承受负荷时，由于子午线轮胎下沉量大，所以其断面宽度大于斜交轮胎的宽度，而静半径小于斜交轮胎的静半径。但是，恰恰因为子午线轮胎具有不易伸长的带束层存在，所以圆周方向变形小。虽然径向变形大，但变形恢复也快，行驶时好像坦克车履带一样平铺在地上，相对于路面滑移小，因此子午线轮胎比斜交轮胎的滚动半径大。

1.3 子午线轮胎损坏形式和损坏原因

子午线轮胎的损坏形式主要有肩裂、肩空、磨子口、子口部脱层或剥离等。

肩裂就是在轮胎胎肩部位出现周向裂口，分为肩外裂和肩内裂两种情况。在肩部胎侧胶出现的由外向里的周向裂口称作肩外裂；由带束层端点处先产生脱胶裂口，并逐渐向里（胎体方向）、向外（胎侧方向）发展，叫作肩内裂。造成肩外裂的原因除了制造工艺不当外，还有胎肩部位设计不合理，应力集中在胎肩或上胎侧；肩内裂在排除制造工艺的原因外，主要是由于轮胎在使用中，胎肩部位变形较大，承受的应力也较大，在带束层端点处易形成应力集中，裁断后的带束层端点帘线与胶的附着力较低，经反复的曲挠变形，在带束层端点处易产生帘线与胶的蜂窝状裂口，并逐渐扩展，导致整个端点剥离裂开，形成胎肩内周向裂口，向内向胎体扩展，向外向里扩展，致使轮胎肩部周向破裂损坏，极易产生裂废或爆胎。

轮胎胎肩部脱胶、带束层与带束层或带束层与胎身帘布之间脱

层、起鼓的现象称做肩空。造成肩空的原因很多，胶料配方和制造工艺都有影响，在使用中除维护不当外，主要是由于胎肩部位的应力集中引起的。轮胎胎肩部位最厚，行驶时承受的应力较大，生热较多，又不易扩散，胎肩部位温度的升高，使轮胎的橡胶和帘线的物理性能下降，各层间附着力降低，导致轮胎肩部脱层和肩空。

磨子口是指轮胎子口部位单边或双边、局部或整圈被轮毂磨损。轻者损坏包布，重者磨断帘线，磨出钢圈钢丝，造成子口部位爆破损坏。轮胎磨子口的主要原因是轮胎胎侧结构、材料分布不合理，子口部位的刚度不足，从而在子口部位形成应力集中。

轮胎子口部脱层或剥离是指反包胎体帘布层与胎侧或内衬层之间脱开，或帘布层端点接头裂缝（接头脱开或搭接过厚）。产生这种现象的原因主要是胎体部位反复曲挠引起的循环应力和大变形引起的。轮胎在这个部位是由橡胶的自粘性黏合在一起，反复曲挠引起的应力易使其脱开，且由于橡胶的黏弹性和滞后效应产生温升，使其各种物理性能下降，各层间及帘线与胶的附着力降低。

1.4 子午线轮胎的优点

由于子午线轮胎在结构上与斜交轮胎的不同，使其具有以下比斜交轮胎更优越的性能。

① 使用寿命长 子午线轮胎胎面刚度大，周向变形小，可用较硬质橡胶作为胎面材料，因此耐磨性好，并且轮胎接地面积较大，单位接地压力较小，载荷分布较均匀，在路面上的滑移量较小，使轮胎的行驶里程比斜交轮胎增加 50% 左右。

② 滚动阻力小、节省燃料 由于子午线轮胎帘布层数少，层间摩擦力小，故其滚动阻力较斜交胎小 25%~30%，这不但能提高汽车的动力性，还能提高燃料经济性，实际使用中，节油率可达 6%~8%，随车速的提高，节油效果有所提高。

③ 承载能力大 子午线轮胎的帘线径向排列，可充分利用帘

线的强度，比斜交轮胎承载能力提高约 14%。

④ 附着性能好 由于胎体弹性好、接地面积大，胎面滑移少，有利于提高汽车的动力性。

⑤ 减振性能好 子午线胎胎体较斜交胎柔软，弹性好，具有良好的缓冲性能，不仅能改善汽车行驶的平顺性、乘坐舒适性，而且还可延长汽车机件的使用寿命。

⑥ 胎温低，散热快 由于子午线轮胎帘布层数少，因此比斜交胎摩擦力小，散热快，温升低，有利于提高车速。

⑦ 胎面不易穿刺，不易爆胎 子午线轮胎的带束层非常强韧，使轮胎被钉子等扎穿的情况大致可减少一半，加上帘线强度得到充分利用，使其在恶劣的使用条件下也不易发生爆破。

1.5

现代轮胎产品及发展趋势

随着交通运输事业的飞速发展，汽车行驶速度越来越高，各种车辆日趋高级化和高性能化，这就对汽车轮胎提出日益严格的要求，从而促使汽车轮胎向“绿色”和高性能化发展^[3]。随着计算机技术的飞速发展，采用非线性有限元技术分析和模拟轮胎应力场、应变场和温度场，从而为轮胎的结构设计、材料设计和制造工艺提供量化的科学依据成为可能。20 世纪 80 年代以来，发达国家在这方面做了大量的研究工作，采用有限元法计算轮胎充气轮廓，分析此状态下轮胎断面的应力、应变分布，轮胎与地面的静态接触问题以及轮胎的固有频率等。在计算轮胎应力、应变场的基础上，还提出了各种各样的轮胎设计理论^[4-16]。目前，一些发达国家的轮胎工程设计已从经验设计发展到以多学科为指导的电子计算机辅助轮胎设计，从而大大提高了轮胎结构设计的科学性和预见性。世界各大轮胎公司都在投入大量人力物力发展新的轮胎设计理论和技术，在此基础上不断推出设计思想新颖的各种主导产品，代表了当代轮胎工业的发展方向。

有代表性的新型轮胎主要有以下几种。

(1) 智能轮胎

轮胎内安置了计算机芯片，或将计算机芯片与轮胎相连接，能自动监控并调节轮胎的行驶温度和气压，使其在任何情况下都能保持最佳的运行状态。另外，一种智能化更高的轮胎尚在探索中，如行驶在积水路面，能探测水深并改变花纹，以防打滑；若遇结冰路面，会自动变软，增强抓地力。

(2) 绿色轮胎

这是一种超低滚动阻力的新型轮胎，性能优、能耗小、符合全球的环保热潮。据报道，若全世界推广此种轮胎，每年可节油 8100 万吨，减少二氧化碳排放量 390 亿升。

(3) 超高里程轮胎

这种轮胎具有胶料滞后损失小、钢丝帘线耐腐蚀、胎肩花纹抗偏磨、翻新性高等优点，可与汽车等寿，可终身使用。

(4) 超轻量轮胎

轮胎骨架全部采用化纤材料，大幅度减轻了轮胎自重，降低了滚动阻力和噪声，提高了与干、湿路面的附着性。由于不用钢质材料，还便于轮胎翻新。

(5) 零气压轮胎

这种轮胎胎侧坚固，配备气压监控装置，漏气后仍能安全行驶很长一段里程。米其林公司的 MXV4ZP 轮胎，可在零气压，并保持车辆机动性和操纵性状态下，以 80km 的时速行驶 200km。

(6) 防水滑轮胎

这种轮胎的特征是便于迅速排水，胎面上至少有一条纵向深而宽的花纹沟槽，形成形态奇特的双胎冠轮廓，从而大大提高了汽车在湿滑路面上行驶的安全性。

(7) 仿生轮胎

利用仿生学原理设计和制造轮胎，如模拟骆驼及驼足特殊的越沙能力，研制具有较高沙地通过能力的仿驼足轮胎；轮胎仿人足设计技术：人足巧妙的结构及其机能可以为汽车轮胎仿生设计提供启