汽车轮胎侧偏力学发展综述

赵桂范[1] ,崔胜民[1] ,杜星文[2]

(1. 哈尔滨工业大学 汽车工程系 ,山东 威海　264209 ;2. 哈尔滨工业大学 复合材料研究所 ,黑龙江 哈尔滨　150001)

摘要 :论述国内外汽车轮胎侧偏力学研究的发展状况。分别介绍了研究稳态轮胎侧偏特性的一般理论模型、纵滑与侧滑联合工况下的模型和半经验模型 ,并简要介绍了非稳态侧偏特性研究的发展过程以及所建各种模型的主要特点。轮胎稳态侧偏特性的研究取得了较好的结果 ,但非稳态模型尚需进一步完善。

关键词 :轮胎;侧偏特性;稳态;非稳态

中图分类号 :TQ336. 1 +1　　**文献标识码** :A　　**文章编号** :1006-8171(2000) 03-0131-04

汽车的操纵稳定性是现代汽车重要的性能之一 ,而轮胎侧偏特性是决定汽车操纵性 ,影响行驶稳定性和前轮摆振以及侧向振动等的最主要因素。1888 年由英国登录普发明的充气轮胎在 1930 年由德国 Fromn 和法国 Broulhiet 分别发现了它的侧偏现象[1]。所谓侧偏现象是指轮胎的前进方向与车轮本身的旋转平面成一定角度。轮胎侧偏特性就是研究在垂直载荷作用下侧向力及回正力矩与侧偏角的关系。

国内外的学者们在研究轮胎的侧偏特性过程中 ,建立了各种各样的轮胎模型 ,从理论和实验两方面研究轮胎稳态和非稳态的侧偏特性 ,并且得出了许多具有理论意义和应用价值的数学模型 ,从而为轮胎力学和现代汽车动力学的研究发展奠定了基础。

1　轮胎稳态侧偏力学

1. 1　轮胎侧偏特性的一般理论模型

汽车在正常驾驶条件和良好路面上行驶时 ,汽车的横摆频率一般低于 2 Hz ,此时轮胎的状态称为稳态。它是研究轮胎侧偏特性的基础 ,几十年来这方面的研究成果很多。

本世纪 40 年代德国的 Fromn 在对飞机轮胎的研究中 ,将轮胎的胎体简化为“梁 ”,第1次推导出了简单的轮胎侧偏模型 ,通过胎冠的侧向变形解释了稳态侧偏角与侧向力的关系。

1954 年 ,德国的 Fiala 在 Fromn 简单模型的基础上 ,把轮胎的带束层或缓冲层简化为受到侧向集中力作用的弹性支撑“梁 ”,在侧向力作用下 ,带束层或缓冲层发生侧向平移变形和弯曲变形 ,从而得到了侧向力、回正力矩、侧偏角以及外倾角之间的关系。实验证明 ,这个模型的侧偏力值精度较好 ,回正力矩值的误差则较大[2]。

与 Fiala 的模型不同 , Frank 在 1965 年曾考虑了更为复杂的胎体变形 ,他将胎体简化成弹性支撑上无限长的梁的一部分 ,并且考虑了胎体变形时受拉以及受分布载荷作用而弯曲的特点 ,用数值计算的方法计算了胎体变形。

1966 年 , Pacejka 对轮胎的静态和动态特性进行了理论和实验研究 ,并引入了带有胎冠微元的受拉伸弦模型 ,该模型用很多弹性支撑的受拉伸平行弦来表示胎体 ,它们通过横向帘线连接在一起。对于斜交轮胎 ,Boehm 建立了圆环模型 ,通过胎体轨迹与接触区的差别来计算胎冠变形。但由于这些模型过于复杂 ,很难在实际中应用[3]。

60 年代末 , Willumeit 提出了“胎带-胎侧-轮辋 ”模型[4] ,胎带简化成无质量的圆环 ,连接着可变形的胎冠 ,胎侧简化成连接轮辋和胎带的膜 ,得出了车轮载荷、侧向力、回正力矩、外倾力矩、切向力、侧偏角和侧向变形之间的关系 ,

---

作者简介 :赵桂范(1962-) ,女 ,吉林松原人 ,哈尔滨工业大学汽车工程系副教授 ,现正在攻读博士学位 ,从事轮胎侧偏力学研究。

是一个较成功的模型。

80 年代中期,Sharp 提出了轮辐式模型,他认为,轮胎是由一些完全相同的径向轮辐组成,这些轮辐与轮毂连接在一起,且具有弹性。轮辐的周期性变形会导致滞后损失。假定没有滑移,通过运动学关系求得进入接地区后轮辐的周向和侧向变形。给定轮辐的弹性特性,就可以计算出作用在轮辐顶部的力和后面轮辐上的力。最后,对接地区内的力和力矩求和,即可以得到要计算的力和力矩。该模型的优点是参数少,缺点是精度不够高[4]。

1990 年,郭孔辉[1]建立了轮胎侧偏特性的一般理论模型。该模型并不关心胎体像个梁还是像个弦,而是从胎体的一般变形模式和垂直载荷分布的一般形式出发推导出侧向力和回正力矩的一般表达式。该模型考虑了胎体的侧向弯曲变形,讨论了胎体弹性对轮胎侧向力和回正力矩的影响。利用该模型的理论结果可以解释一些至今尚难理解的重要现象,并为了解轮胎结构参数与汽车操纵稳定性之间的关系提供了更明确的概念和基本改进方向。

1994 年,北京农业工程大学崔胜民、余群[5]应用圆柱薄壳理论和复合材料结构力学理论,建立了可以计算不同结构轮胎在不同工况下侧偏特性的理论模型,并通过试验验证了模型的正确性。

1.2 轮胎纵滑与侧滑联合工况下的理论和半经验模型

汽车经常在制动或驱动工况下行驶,为研究汽车在制动或驱动工况下的操纵稳定性能,必须研究在制动-驱动工况下的轮胎侧偏特性。

1961 年,Bergman 首先对制动时轮胎的转向特性进行了理论研究,引入了相互作用弹簧的概念,将每个弹簧单元视为径向、纵向、侧向相互作用的三个基础弹簧,使得制动力成为侧向力的一个参数,它的变化引起侧向力的变化。Nordeen 和 Cortese(1963 年),Krempel(1965 年)以及 Henker(1968 年)的研究也表明侧向力和回正力矩同制动力和驱动力有一定关系。

1970 年,Dugoff 将轮胎与道路间的摩擦因数表示成胎面滑移速度、滑移速度为零时的摩擦因数和摩擦降低因素的函数[3]。

1981～1982 年,日本学者酒井秀男[6]在考虑了侧偏角、滑移率、外倾角、载荷、气压、速度、温度和转鼓曲率等因素的情况下,进行了橡胶摩擦与轮胎变形的试验研究,而后用数值积分的形式计算轮胎的六分力。

1990 年,Gwanghun H G 和 Nikravesh P E[7,8]分别在纯滑移(包括纵向滑移、纯侧偏、纯外倾)和复合滑移(外倾、侧偏和纵向滑移同时存在)的情况下建立了轮胎模型。以 Bergman 的交互作用弹簧概念为基础,充气轮胎被认为是由一系列三维变形微元组成的,这些微元可以在径向、纵向和侧向传递力。每一个轮胎微元用 3 个弹簧微元来表示,其对称轴相互垂直。径向弹簧在车轮平面内,且沿径向指向车轮中心;纵向弹簧在车轮平面内,且与轮辋同心;侧向弹簧垂直于车轮平面。这 3 个弹簧具有相互作用的函数关系。

该模型具有参数少、适合各种路面、确定纵向和横向摩擦因数时采用了摩擦椭圆模型的特点,该模型对力的计算与实验结果符合良好,但回正力矩幅值则误差较大。这种误差可能是由于接触区形状和压力分布的假设引起的,因为回正力矩对这些因素更为敏感。

1995 年,郭孔辉[9]推导了轮胎载荷分布和侧向力模型之间的关系,并根据实测的斜交轮胎和子午线轮胎的载荷分布建立了各自的侧向力模型,通过实验方法研究了载荷分布特别是载荷分布末端斜率随纵向力变化的定性、定量关系,对轮胎的理论模型和半经验模型的建立起到很好的指导作用。

1.3 轮胎侧偏特性的半经验模型

在对整车操纵稳定性进行仿真时,如果直接采用纯理论模型,由于模型的简化,计算结果容易出现较大的误差;如果使用一定条件下取得的试验数据,虽有其方便之处,但由于试验条件的限制和路面附着因数的多变性,不可能用有限的试验曲线来表达轮胎在各种路面和各种垂直载荷下的全面特性。

轮胎的半经验模型较好地解决了纯理论模型工程应用的局限性和试验数据片面性之间的

矛盾。1954 年,Fiala 由简化的轮胎理论模型导出了无量纲解析式;1961 和 1968 年日本普利司通轮胎厂发表了对理论表达式的试验修正表达式[1]。

1985 年郭孔辉[1]以 Fiala 的理论为基础,通过试验建立了侧偏力和回正力矩的半经验模型,弥补了普利司通轮胎厂的试验公式的某些不足,并于 1986 年根据新的实验数据进行了改进。对半经验建模的准则和几种流行模型进行了讨论和比较,并推荐了一个统一的半经验模型,该模型在车辆动力学仿真中具有较高的精度,使用方便,得到了一些实验验证。

1988 年,Szostak 等人采用如下形式的半经验模型来描述侧向力特性[10]:

$$F = \mu F_z \frac{a_1\alpha^3 + a_2\alpha^2 + \frac{C\alpha}{\mu F_z}}{a_1\alpha^3 + a_3\alpha^2 + a_4\alpha + 1} \qquad (1)$$

式中,C 为轮胎的侧偏刚度,也就是曲线在原点的斜率。通过合理选择 $a_1 \sim a_4$ 四个参数,可以使曲线逼近实测的侧向力曲线。但模型存在的最大缺点是待定参数多。

1987 年,Pacejka[10]等人通过大量的实验建立了著名的"magic formula"模型。该模型可以分别在纯滑移、纯侧偏或纯制动、纯驱动条件下表示力和力矩特性,准确而方便地描述稳态下轮胎的力和力矩特性,是一个很具有实际应用价值的模型。公式为:

$$Y(X) = D\sin\{C\arctan[BX - E(BX - \arctan BX)]\} \qquad (2)$$

式中,X 和 Y 分别表示输入和输出,B,C,D 和 E 都有一定的物理和几何意义。

1991 年,Pacejka 等人又对"magic formula"模型进行了改进。

2　轮胎非稳态侧偏力学的发展过程与现状

汽车行驶时轮胎实际表现为非稳态,尤其是汽车在急剧转向、响应突然横风和躲避障碍、前轮摆振以及曲线运动时,轮胎处于典型的非稳态侧偏状态,其侧向运动输入是时间的函数。它的运动输入在汽车运动模拟、汽车操纵运动仿真和汽车动态响应等方面更具理论和实际应用价值。

60 年代末和 70 年代初,Pacejka 开始对滚动轮胎的侧偏动力学特性进行研究,利用受拉伸的弦模型,根据轮胎的滚动速度和滑移速度推导出轮胎非稳态时侧向力与回正力矩的频率响应函数,该模型在轮胎和车辆动力学研究中得到了应用[11]。但该模型没有考虑胎面的侧向弹性,且不能直接反映轮胎结构参数对轮胎特性的影响。

1978 年,日本酒井秀男[6]通过实验得出了轮胎侧向力与回正力矩的频率响应函数,但该模型理论上欠严密,不能精确地反映出其物理实质。

1985 年,Boehm 基于轮胎受力与运动之间的关系建立了一个模型[4]。它把接触区分成一个个小的微元,同时也考虑了接触区曲率的影响。这个模型被用来模拟瞬态响应和计算时间历程。1991 年,他和同事们对轮胎的高频响应进行了比较广泛的研究,并为适应不同的用途,分别建立了 3 个不同的模型。

1989 年,孙逢春[12]以 Willumeit 的"胎带-胎侧-轮辋"模型为基础,将其推广到动态范围。该模型分别对时变侧偏角和定常载荷以及时变载荷和定常侧偏角条件下的轮胎特性做了实验和理论上的研究,并建立了近似的非线性模型,分析了轮胎在接触区的非线性特性。

1990 年,Loeb 和 Guenther[13]等人研究了轮胎的侧向刚度、转向刚度和松弛长度的关系。在文中,推导出了在阶越输入和正弦输入的情况下,用系统时间常数和稳态增益因数表示侧偏力的阶越响应特性的模型。

1991 年,Heydinger[14]等人对轮胎的滞后特性在车辆瞬态响应模拟中的重要性进行了研究,重点放在轮胎的滞后特性对横摆角速度的影响。在原来的稳态模型中,考虑动态特性和非线性因素,将一阶微分方程变为二阶。该二阶模型将轮胎的滞后效应从侧偏角引入,把滞后侧偏角(由于轮胎的滞后效应,轮胎的实际侧偏角要小于转向盘的输入角,轮胎的实际侧偏角称为滞后侧偏角)作为模型的输入。

1995 年,刘青、郭孔辉[15]以"弦"胎体理论

为基础,考虑胎面宽度的影响,直接根据轮胎接地印痕变形的几何关系和轮胎着地点瞬时位置的数学关系,得到了轮胎侧向与纵向瞬时变形的关系表达式。

1996 年,郭孔辉、刘青[16]在研究小幅运动时建立了考虑胎体复杂变形和胎面宽度影响的非稳态侧偏特性理论模型(频域模型和时域仿真模型)。模型中胎体变形包括侧向平移、弯曲和扭转变形,胎面的弹性包括了侧向和纵向弹性。

3 结论

(1)综上所述,国内外学者已进行了很多研究,但是这些研究仍有不足之处,一些影响轮胎侧偏特性的因素在模型中没有反映出来,没有将影响轮胎侧偏特性的因素:载荷、气压、路况、温度、侧倾角以及轮胎的材料、结构、尺寸、花纹、质量等诸多因素有机地统一在模型中。

(2)轮胎侧偏特性的研究从理论和实验两方面展开,由于轮胎存在材料非线性和几何非线性,作用的边界条件又非常复杂,仅仅依赖于理论研究是很难进行的,因此轮胎侧偏特性的理论模型、半经验模型都离不开试验研究。随着试验设备的改进、试验手段的提高,轮胎侧偏特性模型的精度将得到进一步的提高。

(3)轮胎力学的研究近些年来得到了很大的发展,稳态方面已经取得了令人满意的结果,在建立高速、高频、瞬态、变工况特性模型方面尚有欠缺。

参考文献:

[1] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 吉林:吉林科学技术出版社,1991. 65-73.

[2] 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996. 102-104.

[3] 赵又群,郭孔辉. 稳态轮胎偏滑力学的发展与展望[J]. 汽车技术,1997(3):1-5.

[4] 孙逢春,李德圣,李晓雷. 轮胎侧偏力学的新发展[J]. 汽车工程,1995,17(2):65-73.

[5] 崔胜民. 轮胎侧偏特性和汽车操纵稳定性的模拟计算研究[D]:[博士学位论文]. 北京:北京农业工程大学,1994.

[6] 酒井秀男. タイヤ工学[M]. 东京:づうこづり出版,1987. 224-278.

[7] Gwanghun G, Nikravesh P E. An analytical model of pneumatic tires for vehicle dynamic simulations. Part 1:pure slips[J]. Int. J. of Vehicle Design,1990(11):6-13.

[8] Gwanghun G, Nikravesh P E. An analytical model of pneumatic tires for vehicle dynamic simulations[J]. Part 2:pure slips. Int. J. of Vehicle Design,1991(12):2-6.

[9] 郭孔辉,隋 军. 轮胎垂直载荷分布与侧向力模型及纵向力之间的关系[J]. 汽车研究与开发,1995(1):22-25.

[10] Pacejka H B, Rgbert B. Tyre modeling for use in vehicle dynamics studies[Z]. SAE paper 870421.

[11] 孙逢春,李德圣,李晓雷. 轮胎侧偏动力模型的非线性分析[J]. 汽车工程,1993,15(5):257-262.

[12] 刘 青,郭孔辉. 轮胎侧偏特性研究的特点及发展[J]. 汽车技术,1997(10):1-8.

[13] Loeb J S, Guenther D A, Chen H F. Lateral stiffness, cornering stiffness and relaxation length of the pneumatic tire[J]. SAE Transactions,1990(6):147-155.

[14] Heydinger GJ, Riley G W, Chistos J P. The importance of tire lag on simulated transient vehicle response[J]. SAE Transactions,1991(6):362-374.

[15] 刘 青,郭孔辉. 根据"弦"胎体理论建立轮胎非稳态侧偏模型[J]. 吉林工业大学学报,1996(1):1-9.

[16] 郭孔辉,刘 青. 考虑胎体复杂变形的轮胎非稳态侧偏特性理论模型[J]. 汽车工程,1997,19(2):65-71.

收稿日期:1999-09-30

河北轮胎有限责任公司外贸工作受表彰

中图分类号:TQ336.1 文献标识码:D

最近,河北省对外贸易经济合作厅作出了关于表彰 1998 年出口创汇和对外经济合作先进单位的决定。在受表彰的 17 家自营进出口生产企业中,河北轮胎有限责任公司以完成进出口总额 1 072 万美元位居第 9 位,同时被授予"河北省 1998 年出口创汇先进单位"荣誉称号。

1998 年该公司克服了亚洲金融危机和国家政策调整带来的影响,利用海关保税仓库优势,积极开拓市场,大力开展进料加工业务,全年共进口 NR 2 100 t,出口轮胎 26.3 万套,出口交货值 8 356 万元,降低了采购成本,充分发挥了原材料在外、市场在外的优越性。

(河北轮胎有限责任公司 郝章程供稿)