

湿滑路面轮胎摩擦性能的研究进展

张丽霞¹, 冯 停¹, 刘 影², 潘福全¹, 张 辉¹

(1. 青岛理工大学 汽车与交通学院, 山东 青岛 266520; 2. 潍坊学院 机电与车辆工程学院, 山东 潍坊 261061)

摘要:介绍轮胎滑水现象产生的机理和主要影响因素, 从试验和理论两方面综述轮胎摩擦性能的研究进展, 并总结了抗滑水轮胎的现状与技术新发展。指出今后应建立完善的轮胎滑水模型、向复杂花纹轮胎转变并降低设计成本等轮胎摩擦性能研究的重点。

关键词:轮胎; 摩擦性能; 滑水性能; 湿滑路面

中图分类号: TQ333.1⁺1

文献标志码: B

文章编号: 1006-8171 (2018) 00-0000-05

轮胎作为车辆与地面的唯一连接部件, 起着支撑整车质量、传递车辆与路面之间相互作用力(摩擦力、牵引力、制动力)的作用。而轮胎与地面二者产生相互作用力才能够保障车辆正常行驶, 其中摩擦力在车辆起步、行驶、加减速、侧倾、转弯、制动等几乎所有过程中都起稳定性的作用。随着车速提高, 人们愈加关注车辆的操纵稳定性。特别是车辆在湿滑路面行驶时, 由于积水的存在, 摩擦因数迅速减小, 对轮胎的摩擦性能和抗滑水性能提出更高的要求, 以减少交通事故。

1 轮胎的滑水现象与摩擦性能

1.1 轮胎滑水现象产生的机理

车辆在积水路面上行驶时, 由于路面的润滑作用, 随着车速的不断提高, 水膜向上的动水压力会不断增大, 一旦动水压力大于垂直向下的载荷, 水膜就会将轮胎整个托离地面, 出现滑水现象, 同时车辆操纵失灵。图1所示为轮胎发生滑水的全过程。随着车速的提高, 轮胎沟槽中的进水量大于排水量, 楔形水膜将逐步减小轮胎与路面的接触面积直至二者完全分离。此刻轮胎与路面的接触区域分为4个标志区域(I—矛盾区、II—厚水

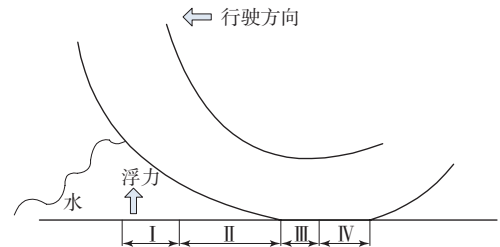


图1 轮胎滑水现象机理示意

膜区、III—薄水膜区、IV—接地区), 一般动水压力小于载荷时, 轮胎不会出现滑水现象或出现不完全滑水现象, 此时4个区域都存在; 但随着车速逐渐提高, 动水压力增大, I 和 II 区域逐渐侵占 III 和 IV 区域, 直到 IV 区域消失, 此时出现滑水现象^[1]。

此外, 即使没有发生滑水现象, 由于水的润滑, 轮胎与地面的附着力会急剧减小, 车辆也极易发生侧翻、甩尾等湿滑现象。因此滑水和湿滑路面都会增大车辆的危险系数。

1.2 轮胎滑水的主要影响因素

目前, 评价轮胎滑水特性的主要依据是滑水的临界速度。韩秀枝等^[2]将滑水的临界速度分为3类: 一是加速度为零时的最大速度; 二是轮胎几乎没有接触力时的速度; 三是滑移率达到一定数值时的速度。而滑水的临界速度主要与轮胎花纹的沟槽形状、积水深度及轮胎的充气压力、负荷和磨损程度有关。

研究发现, 轮胎花纹沟槽形状对滑水速度的影响也有差别。T. Okano等^[3]用实车试验方法, 研究了花纹沟槽与滑水速度之间的关系, 结果表明, 随着花纹沟槽宽度的增大, 发生滑水的临界速度

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51505244); 中国博士后科学基金支持项目 (2016M590626); 青岛市博士后应用研究项目 (2015224)

作者简介: 张丽霞 (1978—), 女, 湖北天门人, 青岛理工大学副教授, 工学博士, 主要研究方向是汽车系统动力学和控制及轮胎摩擦。

E-mail: zlxzhanglixia@163.com

提高。周海超等^[4]利用正交试验方法,发现了花纹沟槽的形状参数与滑水性能之间的影响关系,结果显示,在原有花纹沟槽旁再设一个支管即可改善滑水性能并且能减小轮胎噪声。

积水深度对滑水速度也有影响,周海超等^[5]研究了不同积水深度对滑水速度的影响,轮胎依次穿过不同深度的积水路面,结果表明积水深度越小,水膜产生的升力也越小,同时花纹沟槽越能及时将水排出,车辆越不易发生滑水现象。余治国等^[6]采用动量定理推导方法,分别在深、浅两种积水深度下建立了动力滑水的临界速度公式,最终发现,当积水比较深时,充气压力几乎对临界滑水速度没有影响;当积水比较浅时,充气压力成为临界滑水速度的直接决定因素。

G. P. Ong等^[7]研究发现,轮胎滑水临界速度与其负荷和充气压力呈正相关关系,与水膜厚度呈负相关关系,研究表明,水膜是滑水临界速度的主要影响因素,充气压力次之,负荷再次之。

1.3 轮胎滑水的摩擦性能研究

车辆在积水路面行驶时,由于水膜的存在,轮胎与地面的附着力会明显减小,特别当车辆加速、拐弯时更容易发生轮胎滑水现象,严重影响车辆的操纵稳定性和制动性,因此应该致力于提高轮胎的摩擦性能。目前,对轮胎摩擦性能的研究主要从试验和理论两个方向进行。

1.3.1 试验研究

近年来,研究者们做了大量有水路面轮胎的滑水试验,主要分为试验场和模拟装置试验。早期主要通过最直接的试验场试验法来获取数据。最初,E. N. Harrin^[8]从飞机起飞或降落方面着手研究轮胎滑水现象,结果表明,飞机在有水路面上行驶时,轮胎的制动和转弯工况均随着速度的提高而变差。后来发现由于室外复杂环境因素的干扰,再加上车辆驾驶人员的主观意识及技术水平不一,得出的试验数据太过离散。

为了得到精确的数据,研究人员开始开发相关的模拟装置。庄晔^[9]搭建了轮胎橡胶块摩擦试验台,创新推出动摩擦试验方法,通过多次试验测得在不同转速、温度、湿度、压力等外界因素下,橡胶块的摩擦性能数据,然后通过计算机软件拟合数据得到对应的摩擦性能参数。孟令智^[10]以

AW-2D型专用路面摩擦因数试验车在沥青路面进行轮胎抗湿滑性能试验,过滤掉噪声后整理出轮胎或路面的摩擦特性转化数据。彭旭东等^[11]研究了车辆在冰雪路面行驶时的力学特性,试验时将轮胎固定,让冰槽来回移动模拟轮胎行驶过程。研究表明,冬季适当降低轮胎充气压力有利于车辆的操纵稳定性。

试验场试验易于操作,可以得到原始数据,但是费用太高,再加上主观因素的影响,其试验结果精度低;模拟装置试验大大节约了试验成本,排除了主观因素的困扰,可以得出较客观的结果,但是不能兼顾外界条件的变化,试验过程太过简化。

1.3.2 理论研究

为了在节约成本的同时得到可靠的数据,学者们开始从理论方面着手研究。

早在19世纪30年代,R. N. J. Saale^[12]就开始了滑水性能的理论研究,他以流体润滑理论为依据,在不考虑水惯性力的前提下研究滑水的临界速度。随后,C. S. Martin^[13]在考虑水的惯性力、忽略水的粘弹性以及横向紊流的条件下开创了一种全新的方法来研究滑水特性。A. L. Browne^[14]用二维平面思维看待滑水特性,建立的N-S方程主要用来解决轮胎与积水的横向紊流问题。该试验打破常规,尝试用纵向速度为变量来表示积水深度的二阶多项式,重要的是其推导的流体方程具有自发连续性。

1968年,W. B. Horne^[15]分析了滑水现象的试验数据,最终获得了与飞机轮胎滑水相似的结论,并提出了著名的经验公式,得到轮胎出现滑水现象时的危险速度与轮胎充气压力的平方根呈正比的关系。

因为滑水现象的复杂性,直到20世纪90年代H. Groggier等^[16]才首次开启了用数值分析法模拟轮胎滑水过程的研究,运用独特的数学视角,将结构分析的法则与流体动力学相结合来解决滑水问题,得到光面和纵向花纹轮胎的临界滑水速度和周边的压力场。

2001年,B. N. J. Persson^[17]在前人的研究基础上,用粘弹性力学理论解释了导致阴雨天轮胎摩擦因数大幅减小的原因,并且结合自相关函数和平衡能量原理,提出轮胎在发生粘弹性变形时求

解摩擦因数的一套方法。

2004年,季天剑等^[18]以弹性流体动力润滑理论为基础,推导出雷诺公式、水膜厚度公式和边界条件等,用柔度矩阵表示位移的变化,从而得到水膜厚度随位移变化的方程,为轮胎模型的建立提供精确数据。

2006年,朱永刚等^[19]将滑水过程转换为轮胎胎面单元与粗糙路面间的动、挤压膜过程,从而建立了胎面单元粘性滑水问题的数学模型并对其进行数值求解。研究得出,当主要考虑路面粗糙度对滑水性能的影响时,湿滑路面上轮胎的牵引性能与路面粗糙度呈正比关系。

2013年,M. T. Do等^[20]在汲取前人研究成果的基础上,分析发现水膜厚度与轮胎摩擦因数之间具有一定的数学关系,并提出了指数模型。

仿真模型的建立是随着计算机编程发展起来的,应用在轮胎滑水上较理论研究晚些。1997年,M. Zmindak等^[21]用Adina软件模拟试验过程,研究发现,稳态分析得到的流体压力分布和上浮力特征可以为轮胎设计提供重要信息。

2000年,Y. Nakajima等^[22]总结了H. Groggier的研究成果,建立了带有复杂花纹的动态轮胎模型,同时解决了轮胎与水流之间的耦合难题。

2006年,J. R. Cho等^[23]通过有限体积法和有限元法研究复杂花纹轮胎在湿路面上的水滑特性,应用有限元软件建立带有三维花纹的轮胎模型,并且用耦合方法解决了胎面与周围流体之间的复杂接触问题。

2008年,C. W. Oh等^[24]在已有研究成果的基础上,提出采用有限差分法求解轮胎周围水膜的应力分布,并将水膜应力分布与轮胎有限元模型相结合,反复迭代,进行轮胎变形分析,得到收敛的水膜应力分布和上浮力。

2012年,王长健^[25]利用Abaqus有限元软件建立了轮胎有限元模型,分析具有复杂花纹结构的半钢子午线轮胎的滑水性能。该研究通过拉格朗日法模拟轮胎的变形和运动,用欧拉法模拟水流运动,分别探讨了不同胎面结构、轮胎材料以及水膜厚度三方面因素对轮胎滑水性能的影响。

2016年,杨军等^[26]利用分形理论的IFS插值方法,结合有限元软件Abaqus和计算流体动力学软

件Fluent建立了轮胎在有水路面上高速行驶的模型,以轮胎的附着系数为抗滑指标进行研究。结果显示,轮胎与路面间的附着系数随行驶速度和水膜厚度的增大而减小。

到目前为止,对轮胎发生的滑水现象已抽象出多种数学和物理模型并尝试求解,但构建的模型只是基于单一理论,如仅利用流体动力润滑理论,其局限性在于无法解决轮胎材料变形和液膜厚度间相互影响的问题,今后在研究轮胎滑水的模型建立和求解方法时应该综合应用粘弹性力学、流体动力学、流体动力润滑理论、弹性力学和接触力学等相关学科的基本知识。

在利用有限元软件分析时,设计者可对复杂情况加以控制,如只改变轮胎的胎面花纹结构而其他因素保持不变来研究轮胎的滑水性能。该过程具有可重复性,从而极大地提高了工作效率。有限元分析最大的挑战在于正确处理轮胎胎面与周围水膜间的相互作用关系。在有限元分析中,这两种属性不同的材料是用不同的理论来定义的,通常轮胎用拉格朗日公式的单元法定义,而水膜用欧拉公式的体积法定义,都需要专门的软件才能解决。

2 轮胎抗湿滑技术的新发展

2.1 抗滑水轮胎的现状

目前,只有少数轮胎制造公司拥有抗滑水轮胎的核心技术,如德国大陆公司和法国米其林公司等。1994年大陆公司率先制造出不对称胎面花纹的Aqua Contact轮胎^[27],通过使用有向花纹与加大沟槽区面积来解决轮胎的抗滑水问题。该轮胎的湿路面制动性能提高约5%,但噪声和磨损增大。后来,费尔斯通公司开发出FT70C抗滑水轮胎,研发采用了计算机的UNIT技术,从选择材料到半成品再到成品的制造全过程都由智能化的计算机检测和控制^[27]。近期,固特异公司和大陆公司及日本横滨橡胶公司各自研发出更先进的抗滑水轮胎,既体现出绿色发展、抗滑水等优势,又能减小噪声与磨损,全面提高了轮胎的行驶性能。

2.2 抗滑水轮胎的发展

2.2.1 胶种选择和配方调整

对轮胎抗湿滑特性影响最大的是附着力,而

影响附着力的主要因素是橡胶,胶种的选择和并用对提高轮胎的抗湿滑性能至关重要。目前,功能性轮胎开始大量选用高新技术材料,并全程用电脑进行整体设计,在其内部植入处理器微机和感应元件^[28],代表性的产品有绿色轮胎、低磨损轮胎、环保轮胎和安全轮胎等。Aqua Contact CZ99 轮胎胎面选用防滑复合物提高路面附着力,从而改善了车辆的行驶稳定性。此外,选用低玻璃化温度的聚合物可以转移轮胎摩擦产生的能量,从而改善轮胎的附着力、阻力、噪声等,全面提高轮胎的综合性能。

为了提高橡胶材料在雨雪等恶劣天气的附着系数,显著改善轮胎的抗湿滑性能,目前主要从胶料配方方面进行研究^[29]。

方法一是对橡胶进行充油处理,即在丁苯橡胶和天然橡胶等内充入20~50份油,同时添加70份左右的炭黑。

方法二是在添加炭黑的基础上增加25份左右的白炭黑,二者之间的配合比例为20:40~30:30,可提高抗滑水性能,同时协调平衡轮胎的耐磨性与滚动阻力之间的矛盾。

方法三是找到影响橡胶伸缩性、耐磨性、硬度、弹性及耐高、低温性等各种性能的制衡点。从轮胎的整体性能分析,在改善附着力的同时必须考虑其滞后损失,不能一味追求一个性能的提高,要统筹兼顾。

2.2.2 胎面花纹

车辆行驶时,轮胎从接地边缘向中心逐渐开始变形,使附着力增大。如果只满足于在干硬路面上行驶,几条纵向花纹或者光面轮胎就能提供足够的附着力。但是,车辆行驶的路面与路况是复杂的,需要复杂的花纹类型来适应各种路况的要求。

数据显示,1/3的事故是由于轮胎在湿滑路面滑水导致的^[30]。因此,提高轮胎花纹的排水性能刻不容缓。对于普通轮胎,车速高于50 km·h⁻¹后附着力即迅速下降,车速到100 km·h⁻¹就发生滑水现象。花纹磨损严重的轮胎发生滑水的车速更低,花纹深度剩余2 mm以内,车辆基本丧失制动能力。季天剑等^[31]研究发现,随着车速提高,出现动力滑水的水膜厚度逐渐变小,车速达到

120 km·h⁻¹时只需2 mm厚的水膜就会出现动力滑水现象。

根据王吉忠^[1]的研究,横滨公司的A. V. S. EXCELEAD轮胎加宽了胎面沟槽,可以加快轮胎排水,这是由于宽沟槽增大了排水空间,减小了水流阻力。

目前,抗湿滑、低磨损、低噪声的胎面逐渐成为主流。但是,从安全行驶第一的角度来看,抗湿滑是轮胎必备的第一要素。

2.2.3 轮胎结构

轮胎结构从根本上决定了其抗湿滑特性、耐磨性和噪声等性能。A. V. S. EXCELEAD轮胎结构采用钢丝和芳纶纤维混合叠层带束层及无接头锦纶冠带层^[1],带束层的强包络性能可有效减震,而且芳纶纤维质量小,有利于轮胎轻量化。此外,锦纶冠带层既可以加强轮胎冠部,又起到缓和主排水沟槽因为离心力产生变形的作用。再者,子午线轮胎用钢丝带束层代替斜交轮胎的锦纶缓冲层,由于钢丝帘线的强度大,能使接地压力均匀分布在整个胎面,大大改善了轮胎的抗湿滑性和耐磨性。

3 结论与展望

轮胎与湿滑路面的摩擦学是一门包含弹性力学、材料力学、汽车理论和流体润滑等多个学科的统一综合学科。根据轮胎的滑水机理,滑水的临界速度是轮胎发生滑水现象的主要参数,其受胎面花纹、积水深度、轮胎充气压力和负荷等因素的影响。目前,在理论研究和仿真分析方面已取得了很大的进步,未来可以尝试从以下几个方面进一步加强研究。

(1) 建立完善的轮胎滑水模型。建立轮胎数学模型的过程必须以大量试验、基础力学理论分析以及有限元模拟为基础,势必要建立囊括胎面特征与性能的数学模型,为今后轮胎各方面优化设计提供更精确的理论依据;在建立轮胎仿真模型时,应考虑各层帘布层结构之间的相互作用力与负荷的关系,尽可能接近真实的轮胎结构,模拟真实的滑水现象。

(2) 将轮胎-路面合为一体来考虑两者之间的相互作用,同时关注外界环境(温度、水膜厚度)

变化对轮胎滑水的影响。

③ 改善轮胎花纹设计, 向复杂花纹轮胎转变, 并降低设计成本。

④ 通过试验, 考虑边界润滑条件建立分析湿滑路面上轮胎摩擦特性的定律。

随着计算机技术的快速发展和实车试验测试, 轮胎的摩擦性能有了很大的改善, 而通过研究轮胎抗滑水性能将进一步改善轮胎的摩擦性能。

参考文献:

- [1] 王吉忠. 抗滑水轮胎技术的新发展[J]. 汽车技术, 1997, 4 (1) : 1-5.
- [2] 韩秀枝, 何雪涛, 杨卫民. 轮胎水滑特性的研究进展[J]. 轮胎工业, 2010, 30 (7) : 387-391.
- [3] Okano T, Keisha M. A New Computational Procedure to Predict Transient Hydroplaning Performance of a Tire[J]. Tire Science and Technology, 2001, 29 (1) : 2-22.
- [4] 周海超, 梁晨, 杨建, 等. 提升轮胎抗滑水性能的仿生方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51 (8) : 125-136.
- [5] 周海超, 陈磊, 翟辉辉, 等. 基于CFD的轮胎滑水及其性能影响因素分析[J]. 重庆交通大学学报, 2017, 36 (1) : 110-116.
- [6] 余治国, 李曙林, 朱青云. 机轮动力滑水机理分析[J]. 空军工程大学学报, 2004, 5 (5) : 9-11.
- [7] Ong G P, Fwa T F. Mechanistic Interpretation of Braking Distance Specifications and Pavement Friction Requirements[J]. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 2010 (1) : 145-157.
- [8] Harrin E N. Low Tire Friction and Cornering Force on a Wet Surface[J]. Technical Report Archive & Image Library, 1958:NACA TN 4406.
- [9] 庄晔. 轮胎动摩擦特性研究及其对车辆操纵稳定性的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [10] 孟令智. 基于路面抗滑测试结果的汽车轮胎路面摩擦特性转换研究及仿真[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [11] 彭旭东, 谢友柏. 冰雪路面汽车轮胎的摩擦学机理研究[J]. 汽车技术, 1998, 29 (4) : 10-13.
- [12] Saale R N J. Laboratory Investigation into the Slip-perkiness of Roads[J]. Chemistry and Industry, 1939 (55) : 3-7.
- [13] Martin C S. Hydrodynamics of Tire Hydroplaning[R]. Washington D C:NASA, 1966.
- [14] Browne A L. Tire Deformation during Dynamic Hydroplaning[J]. Tire Science and Technology, 1975, 3 (1) : 16-28.
- [15] Horne W B. Tire Hydroplaning and Its Effects on Tire Traction[J]. Highway Research Record, 1968, 214:24-33.
- [16] Groggier H, Weiss M. Calculation of the Hydroplaning of a Deformable Smooth-shaped and Longitudinally-grooved Tire[J]. Tire Science Technology, 1997, 25 (4) : 265-287.
- [17] Persson B N J. Theory of Rubber Friction and Contact Mechanics[J]. Journal of Mechanics, 2001, 115 (8) : 3840-3861.
- [18] 季天剑, 黄晓明, 刘清泉. 部分滑水对路面附着系数的影响[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3 (4) : 10-12.
- [19] 朱永刚, 刘小君, 王伟, 等. 考虑动压与路面粗糙度时轮胎湿牵引性能研究[J]. 汽车工程, 2007, 29 (7) : 616-619.
- [20] Do M T, Erez V, Beaudru Y, et al. Modeling of the Connection Road Surface Micro Texture/Water Depth/Friction[J]. Wear, 2013, 302 (1/2) : 1426-1435.
- [21] Zmindak M, Grajciar I. Simulation of the Aquaplane Problem[J]. Computers & Structures, 1997, 64 (5/6) : 1155-1164.
- [22] Nakajima Y, Seta E. Hydroplaning Analysis by FEM and FVM, Effect of Tire Rolling and Tire Pattern on Hydroplaning[J]. International Journal of Automatic Technology, 2000, 1 (1) : 26-34.
- [23] Cho J R, Lee H W, Yoo W S. A Wet-road Braking Distance Estimate Utilizing the Hydroplaning Analysis of Patterned Tire[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 69 (7) : 1423-1445.
- [24] Oh C W, Kim T W, Jeong H Y, et al. Hydroplaning Simulation for a Straight-grooved Tire by Using FDM, FEM and an Asymptotic Method[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008 (22) : 34-40.
- [25] 王长健. 复杂花纹子午线轮胎滑水仿真分析与研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [26] 杨军, 王昊鹏, 吴琦. 潮湿沥青路面抗滑性能数值模拟[J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2016, 36 (3) : 25-32.
- [27] 吴桂忠. 世界轮胎生产技术现状与发展趋势[J]. 轮胎工业, 2006, 26 (8) : 451-456.
- [28] 于清溪. 2000年橡胶工业高新技术展望[J]. 橡胶技术与装备, 2000, 26 (2) : 28-35.
- [29] 于清溪. 轮胎摩擦特性探讨[J]. 橡胶技术与装备, 2012, 39 (3) : 7-20.
- [30] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [31] 季天剑, 高玉峰, 陈荣生. 轿车轮胎动力滑水分析[J]. 交通运输过程学报, 2010, 10 (5) : 57-60.

收稿日期: 2017-06-16

Research Progress on Friction of Tire on Wet Road
ZHANG Hui

ZHANG Lixia, FENG Ting, LIU Ying, PAN Fuquan,