特约来稿

车辆稳态回转对轮胎热-力耦合响应的影响研究

孟照宏[1,2],史彩霞[1],周 磊[1],翟明荣[2],于成龙[2],庄 磊[2]
(1.青岛双星轮胎工业有限公司,山东 青岛 266400;2.青岛轮云设计研究院有限责任公司,山东 青岛 266400)

摘要:研究车辆稳态回转对轮胎热-力耦合响应的影响。结果表明:车辆操纵稳定性测试前采用稳态回转暖胎时,定回转半径、不定车身侧向加速度工况下较定车身侧向加速度、不定回转半径工况下的轮胎整体温升梯度和幅值波动大;车辆稳态回转时,轮胎温度变化对车身侧向加速度波动非常敏感,左转向车辆车身侧向加速度增大与右侧轮胎分配负荷呈正相关变化,在复合侧偏侧倾作用下,能够加剧轮胎温升;暖胎引起轮胎温度的变化改变轮胎侧偏和纵滑等力学特性响应,造成非线性滑移区滞回幅值不稳定,易导致车辆操纵稳定性测试数据的重复性变差,进而对车辆动力学仿真验证和模型调整带来困难。本研究结果可为整车测试提供指导。

关键词:车辆;轮胎;稳态回转;热-力耦合响应;动力学仿真;温度场分布;有限单元法
中图分类号:TQ336.1^{+}1;O241.82 **文章编号**:1000-890X(2023)04-0243-08
文献标志码:A **DOI**:10.12136/j.issn.1000-890X.2023.04.0243

OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

轮胎与地面接触的力学响应与温度直接相关,车辆动力学测试前,暖胎将轮胎带入较好的温度范围,可以保证车辆更加安全稳定和测试数据具有良好的重复性。根据车辆操纵稳定性测试标准[1],测试员需要在试验前以规定车速行驶10 km或以侧向加速度3 m·s^{-2}的相应车速沿半径为15 m的圆周行驶500 m(左转与右转各进行一次)。实际上,不同轮胎厂家的轮胎在胶料配方和结构上的差异造成暖胎后轮胎内部和胎面与接地区域的温度不一致,导致车辆动力学响应出现较大差异,而且测试操纵过程中车辆中心沿定半径圆周行驶轨迹不同及侧向加速度波动同样会导致轮胎温升不同,造成测试数据的重复性较差[2]。

在热-动力学研究方面,R. D. ROSA等[3]针对轮胎接地区域温度难于检测的问题,提出了轮胎热-动力学分析模型(ThermoTyre模型),以预测轮胎接地区域的局部温度分布。陈平等[4-6]对UniTire模型进行了不同温度工况下的扩展,研究了车辆操纵稳定工况下轮胎热-力耦合响应。但由于轮胎动力学模型没有包含详细的轮胎胶料和结构信息,无法获取轮胎内部温度分布响应。

在轮胎滞后生热研究方面,国内外专家学者自20世纪80年代开始了滞后生热(滚动阻力)数值计算研究,如J. D. CLARK等[7-15]针对轮胎胶料、结构和假定工况等变化引起滚动阻力变化进行了研究,但没有对车辆运行下轮胎的复合信息进行提取并作为边界条件探究其对轮胎热-力耦合作用的影响。

针对以上问题,本工作参考文献[16-17],在VI-CarRealTime车辆动力学软件中基于英国ABD公司的SPMM试验台测试数据构建车辆动力学模型,并将美国MTS公司六分力试验台辨识得到的Magic Formula轮胎模型特性集成到整车模型中,结合车辆室外操纵稳定性测试结果,验证车辆动力学模型;参考文献[10,18-20],在Abaqus有限元软件中构建带复杂花纹的轮胎有限元模型,并采

作者简介:孟照宏(1987—),男,山东青岛人,青岛双星轮胎工业有限公司工程师,硕士,主要从事车辆和轮胎动力学特性的研究。
E-mail:mengzhaohong0703@163.com
引用本文:孟照宏,史彩霞,周磊,等.车辆稳态回转对轮胎热-力耦合响应的影响研究[J].橡胶工业,2023,70(4):243-250.
Citation: MENG Zhaohong, SHI Caixia, ZHOU Lei, et al. Study on influence of vehicle steady-state cornering on thermal-mechanical coupling response of tires[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(4): 243-250.

用韩国AD Solution公司的VTire分析软件构建轮胎高速滚动生热温度场计算环境，结合德国ZF公司滚动阻力试验台，验证了有限元模型的热-力耦合特性。基于验证结果，对车辆暖胎环节中稳态回转工况下轮胎动态性能指标进行提取，构建轮胎热-力耦合有限元仿真边界条件，以预测轮胎在各种负荷和复合侧偏侧倾下的热-力耦合响应，从而揭示轮胎热-力耦合作用下力学响应发生变化的机理，可为整车测试和车辆动力学模型的应用提供参考。

1 预测模型

1.1 车辆动力学模型

以2019款奇瑞艾瑞泽GX Pro 1.5T CVT轿车为研究对象，在中国汽车工程研究院股份有限公司(CAERI)以SPMM试验台对车辆悬架性能和转动惯量等指标进行测量，结合本公司采用六分力试验台辨识得到的Magic Formula轮胎模型，在VI-CarRealTime软件中构建车辆动力学模型，建模流程如图1所示。

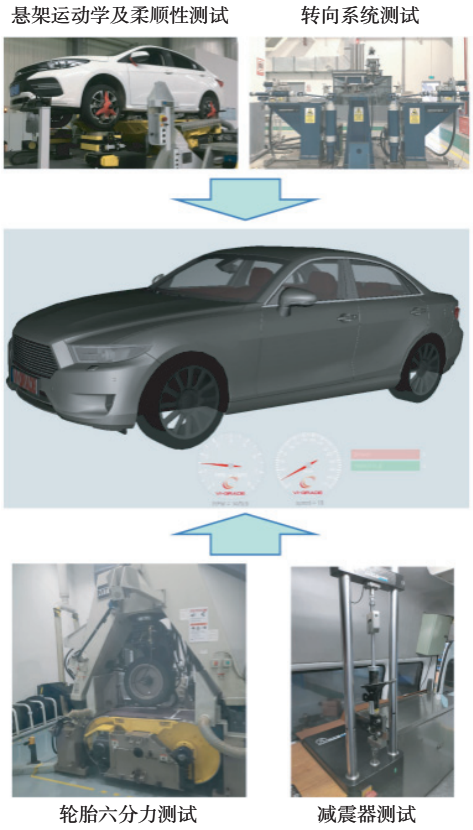


图1 车辆动力学模型构建流程

Fig. 1 Construction procedures of vehicle dynamic model

车辆几何信息详见文献[21]，动力学模型部分参数如表1所示。

1.2 轮胎热-力耦合模型

1.2.1 胶料性能测试与表征

采用美国Instron公司的5966型高低温材料拉伸试验机[见图2(a)]和德国Gabo公司的Eplexor® 150N型动态力学性能分析(DMA)仪[见图2(b)]对去除Mullins效应的轮胎胶料进行超-粘弹特性测试与表征；采用瑞士梅特勒-托利多公司的差示扫描量热(DSC)仪[见图2(c)]对胶料的热物理性能进行测试和过程数据表征。文献[20]给出了具体的测试方法和部分胶料本构辨识参数。

1.2.2 热-力耦合模型

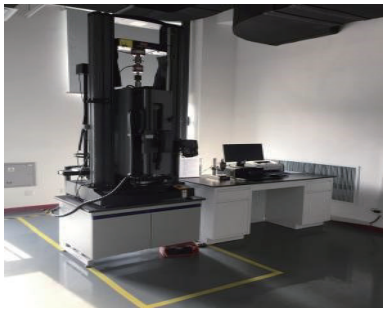
基于本课题组研究成果[19-20]，对带复杂胎面花纹的配套轮胎(205/50ZR17 93W DSU02规格)进行有限元建模，建模流程如图3所示。文献[20]给出了具体的建模操作信息。

表1 车辆动力学模型部分参数

Tab. 1 Some parameters of vehicle dynamics model

项 目	轮位			
	FL	FR	RL	RR
轮胎分配负荷/kg	468	468	320.5	320.5
车轮前束角/轮胎侧向力×10^6/[(°)·N^{-1}]	74.650	−67.970	5.339	−15.520
轮心侧向位移/轮胎侧向力×10^4/[(°)·mm^{-1}]	1.706	1.746	15.520	15.600
车轮前束角/轮胎纵向力×10^5/[(°)·N^{-1}]	−4.012	−3.775	7.319	7.074
轮心纵向位移/轮胎侧向力×10^4/[(°)·mm^{-1}]	26.270	29.930	2.821	2.919
车轮前束角/轮胎回正力矩×10^4/[(°)·$(N·m)^{-1}$]	30.430	30.370	6.742	6.926
车轮前束角/(°)	−0.062	−0.074	0.266	0.166
车轮主销内倾角/(°)	−1.073	−1.007	−1.361	−1.681

注：FL，FR，RL，RR代表车辆轮位，分别为左前轮胎、右前轮胎、左后轮胎、右后轮胎；角和力的方向遵从英国ABD公司试验台测试规定。



(a) 高低温材料拉伸试验机

(b) DMA仪

(c) DSC仪

图2　轮胎胶料性能测试仪器

Fig. 2　Instruments for tire compound property tests

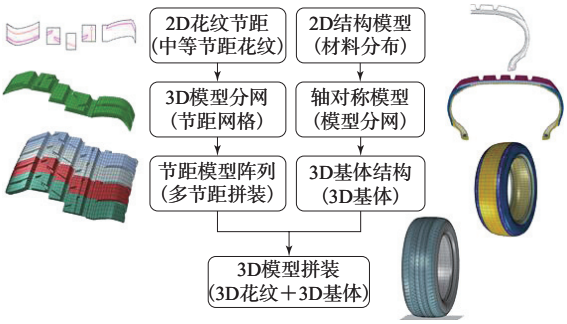


图3　轮胎热-力耦合有限元模型构建流程

Fig.3　Construction procedures of tire thermal-mechanical coupling finite element model

2　模型验证

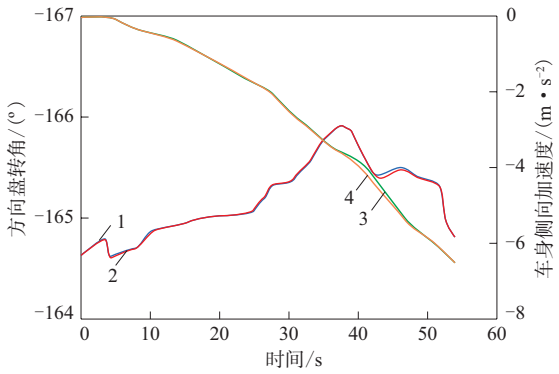
参考文献[1]试验方法，在CAERI大足试验基地分别进行定方向盘转角稳态回转、转向盘转角阶跃和中心区转向测试，以验证车辆动力学模型的仿真精度，试验条件如表2所示。图4和5示出与本工

表2　车辆操纵稳定性试验条件

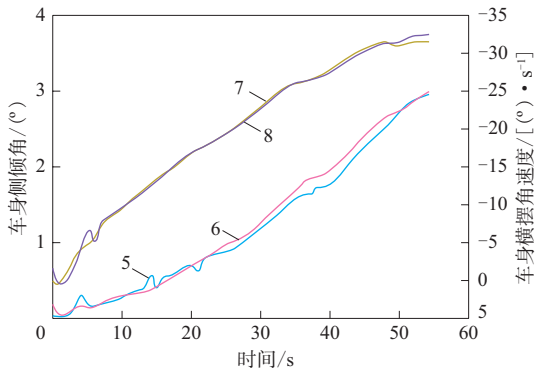
Tab. 2　Vehicle handling stability test conditions

项　　目	车身侧向加速度	速度/(km·h^{-1})	负荷状态
定方向盘转角稳态回转	达到最大侧向加速度	变化[1)]	半载
转向盘转角阶跃	0.4g[2)]	100	半载

注：1) 车辆在行驶方向上一直处于小加速度加速状态，直到车辆侧向加速度达到最大或6.5 m·s^{-2}或车辆失稳；2) g为重力加速度(9.81 m·s^{-2})。试验轮胎充气压力均为220 kPa。



(a) 方向盘转角和车身侧向加速度的仿真与测试曲线

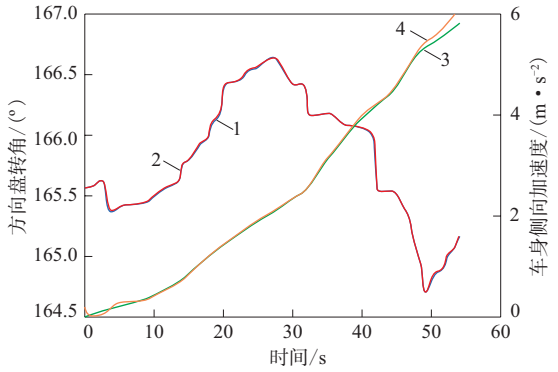


(b) 车身侧倾角和车身横摆角速度的仿真与测试曲线

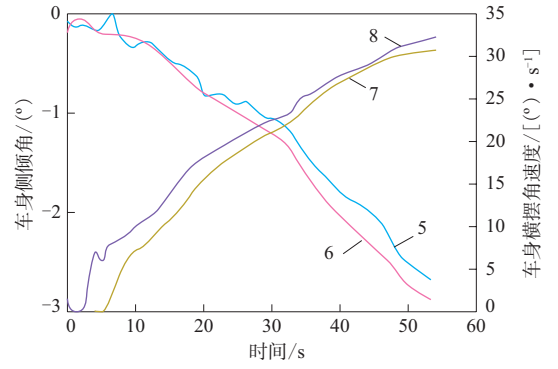
1—方向盘转角测试；2—方向盘转角仿真；3—车身侧向加速度测试；4—车身侧向加速度仿真；5—车身侧倾角测试；6—车身侧倾角仿真；7—车身横摆角速度测试；8—车身横摆角速度仿真。

图4　定方向盘转角稳态回转仿真与测试曲线(左转)

Fig. 4　Simulation and test curves under constant steering wheel angle condition (turn left)



(a)方向盘转角和车身侧向加速度的仿真与测试曲线



(b)车身侧倾角和车身横摆角速度的仿真与测试曲线

注同图4。

图5 定方向盘转角稳态回转仿真与测试曲线(右转)

Fig. 5 Simulation and test curves under constant steering wheel angle condition (turn right)

作密切相关的定方向盘转角稳态回转(左转、右转)仿真与测试曲线。

对车辆动力学测试和仿真输出指标分别进行插值计算,并采用式(1)计算各指标的响应精度,结果如表3所示。

$$R_{sq}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_{1i}-P_{2i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(P_{2i}-P_2)^2} \tag{1}$$

式中:R_{sq}为拟合优度,越接近1越好;i为1,2,…,n,n为测试点总数;P_{1i}为第i点处的仿真值;P_{2i}为第i点处的测试值;P_2为测试数据的平均值。

从图4和5及表3可以看出,车辆操纵稳定性仿真中,方向盘转角对各工况下车身侧向加速度的响应精度达到90%以上,车辆姿态响应精度达到85%以上,各工况平均仿真响应精度达到90%以上。与右转稳态回转工况相比,左转稳态回转工况下响应精度更高,因此本工作选取车辆左转工况下的轮胎信息作为轮胎有限元仿真输入边界条件。

表3 车辆动力学仿真输出指标响应精度

Tab. 3 Response precisions of output indexes of vehicle dynamic simulation %

项 目	转向	
	左转	右转
定方向盘转角稳态回转响应精度		
车身侧向加速度	96.381 5	95.197 3
车身横摆角速度	98.327 2	95.651 8
车身侧倾角	90.841 6	88.349 2
转向盘转角阶跃响应精度		
车身侧向加速度	92.666 1	90.444 7
车身横摆角速度	87.789 3	92.244 9
平均响应精度	93.201 1	92.377 6

参考文献[22]试验方法,在滚动阻力试验台上进行滚动阻力测试,以验证轮胎有限元模型和耗散能算法精度,具体过程参考文献[20]。结果表明,滚动阻力仿真精度为94.09%,自由滚动半径精度为99.19%。

综上所述,除个别车辆姿态响应外,车辆动力学模型仿真结果与轮胎热-力耦合模型仿真结果及测试结果相差不大,表明车辆动力学模型、轮胎滞后生热算法可以用于车辆轮胎定位指标提取及其稳态温度场的预测。

3 轮胎热-力耦合仿真方案设计

基于车辆动力学模型和轮胎热-力耦合模型验证结果,对稳态回转工况分别设计以下仿真方案。

(1)定车辆稳态回转半径、不定车身侧向加速度工况:设定车辆稳态回转半径为15.0 m,车身侧向加速度分别为1,2,3,4和5 m·s^{-2}时,对应方案编号分别为1#,2#,3#,4#和5#。

(2)定车身侧向加速度、不定车辆稳态回转半径工况:设定车身侧向加速度为3 m·s^{-2},车辆稳态回转半径分别为10.0,12.5,15.0,17.5和20.0 m时,对应方案编号分别为6#,7#,8#,9#和10#。

通过优化调整,以离心加速度求解得到的车辆质心速度作为输入初值,得到车辆在不同方案下的稳态响应,并将提取到的轮胎负荷与车轮力矩、4个轮胎(四轮)定位信息(部分信息见表4)作为轮胎热-力耦合计算的边界条件,分别计算各方

表4　部分工况的轮胎负荷与四轮定位信息(左转)

Tab. 4　Tire loads and four wheel positioning informations under some conditions(turn left)

轮位	2#方案轮胎				3#/8#方案轮胎				9#方案轮胎			
	负荷/kg	速度/(km·h^{-1})	车轮前束角/(°)	车轮侧倾角/(°)	负荷/kg	速度/(km·h^{-1})	车轮前束角/(°)	车轮侧倾角/(°)	负荷/kg	速度/(km·h^{-1})	车轮前束角/(°)	车轮侧倾角/(°)
FL	397.34	18.67	−0.69	1.03	354.64	22.87	−1.25	1.51	353.70	24.91	−1.34	1.68
FR	551.72	20.72	−1.10	−0.46	597.33	25.37	−1.56	0.07	596.85	27.23	−1.48	0.08
RL	287.84	18.37	−0.55	2.20	268.58	22.52	−0.96	2.70	269.52	24.65	−0.96	2.70
RR	348.99	20.46	−0.87	−0.77	366.24	25.07	−1.23	−0.24	367.19	27.00	−1.25	−0.24

注:车轮束角或倾角方向参考VI-CarRealTime软件轮胎接地中心点笛卡尔坐标系(ISO-W坐标系)。

案轮胎的稳态回转温度场响应。

4　结果与讨论

本工作所研究配套车辆的前后悬挂系统分别为麦弗逊式独立悬挂系统和扭力梁式非独立悬挂系统,与后车轮相比,前车轮随主销摆动发生较大的负荷和姿态变化,由此引起的轮胎热-力耦合响应具有很大区别。本工作选取轮胎3个易失效观测点(1#带束层右端点、右胎圈最高温度点和胎冠中心最高温度点)进行温度分布分析,各观测点温度场预测结果分别如表5和图6—8所示。

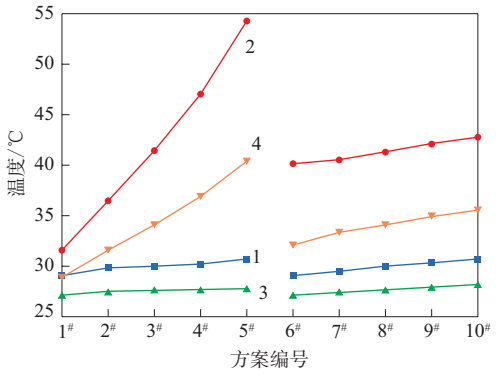
从表5和图6—8中可以得出:车辆稳态回转暖胎(左转)时,与定车身侧向加速度、不定回转半径工况相比,定回转半径(15.0 m)、不定车身侧向加

表5　不同方案轮胎易失效观测点温度场预测结果(左转)

Tab. 5　Temperature field prediction results of failure prone observation points of different scheme tires(turn left)　　℃

方案编号	1#带束层右端点温度[1)]				右胎圈最高温度[1)]				胎冠中心最高温度[2)]			
	FL	FR	RL	RR	FL	FR	RL	RR	FL	FR	RL	RR
1#	29.20	31.60	27.20	29.00	30.90	36.80	27.40	30.40	27.10	27.80	26.60	27.00
2#	29.90	36.50	27.60	31.60	30.60	46.10	27.50	34.30	28.20	30.10	27.60	28.60
3#	30.00	41.40	27.70	34.10	29.80	56.40	27.50	38.60	30.10	32.70	28.80	30.50
4#	30.20	47.00	27.80	36.90	29.60	69.10	27.60	43.80	33.10	36.20	30.60	33.10
5#	30.80	54.40	27.80	40.40	30.10	85.40	27.90	50.70	36.90	41.10	32.90	36.40
6#	29.20	40.20	27.10	32.20	29.40	54.90	26.90	35.60	28.20	32.50	27.80	29.20
7#	29.60	40.60	27.40	33.30	29.50	55.20	27.20	37.20	29.20	32.50	28.40	30.00
8#	30.00	41.40	27.70	34.10	29.80	56.40	27.50	38.60	30.10	32.70	28.80	30.50
9#	30.40	42.20	28.00	34.90	30.10	57.90	27.70	39.80	30.90	33.10	29.20	31.10
10#	30.70	42.90	28.20	35.60	30.30	59.20	27.90	40.80	31.50	33.40	29.60	31.50

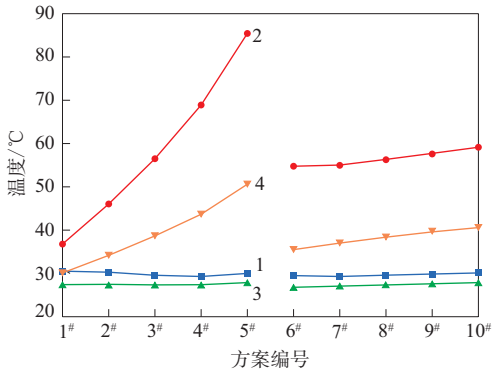
注:1)“右”为轮胎行进方向结构断面右侧区域;2)胎冠中心指胎面胶与基部胶交界线与轮胎纵向行驶中心面交点。



轮位:1—FL;2—FR;3—RL;4—RR。

图6　1#带束层右端点温度变化(左转)

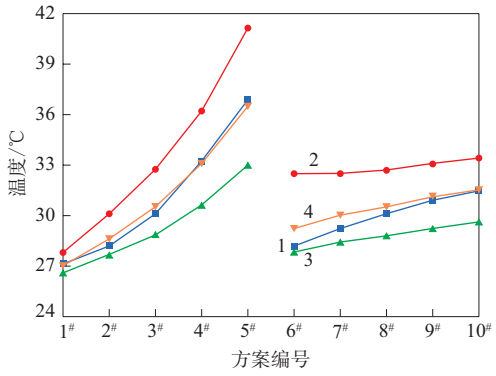
Fig. 6　Temperature changes at right endpoint of 1# belt layer(turn left)



注同图6。

图7　右胎圈最高温度变化(左转)

Fig. 7　Maximum temperature changes at right bead(turn left)



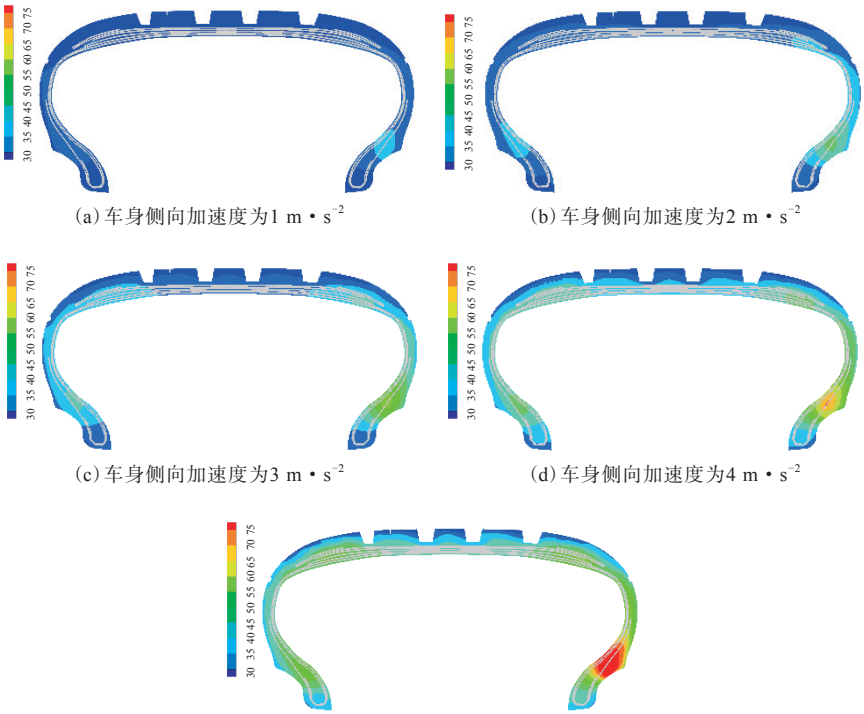
注同图6。

图8 胎冠中心最高温度变化(左转)

Fig. 8 Maximum temperature changes at center of tire crown(turn left)

速度工况引起的轮胎整体温升梯度和幅值明显增大,表明轮胎内部温度变化对车身侧向加速度的响应波动非常敏感;车身侧向加速度的增大引起车辆纵向行驶中心平面右倾,右侧车轮分配负荷比例大幅提升,在复合侧偏侧倾作用下,轮胎温升加剧,如图9所示。这种现象从侧面验证了GB/T 6323—2014《汽车操纵稳定性试验方法》推荐采用回转半径为15.0 m的圆周、定车身侧向加速度工况暖胎的原因。

研究[4,6,22-23]表明,温度变化是轮胎热-力耦合理论的核心,轮胎侧偏刚度、纵滑刚度随温度升高而减小,非线性滑移区出现滞回幅值波动,使得车



(a) 车身侧向加速度为1 m·s^{-2} (b) 车身侧向加速度为2 m·s^{-2}

(c) 车身侧向加速度为3 m·s^{-2} (d) 车身侧向加速度为4 m·s^{-2}

(e) 车身侧向加速度为5 m·s^{-2}

图9 不同车身侧向加速度下暖胎后的轮胎温度场分布云图(右前轮)

Fig. 9 Distribution nephograms of tire temperature fields after warming up under different vehicle body lateral accelerations(FR)

辆响应的极值和响应灵敏度发生变化,因此不同暖胎工况引起车辆操稳测试数据出现波动性,在车辆模型验证过程中需要花费较多精力调校轮胎模型因子(或测试数据)。

5 结论

本工作对车辆动力学模型和轮胎热-力耦合模型进行了模型构建和仿真验证。基于验证结果,将车辆在不同稳态回转工况下提取到的轮胎负荷与车轮力矩、四轮定位信息作为轮胎热-力耦合计算的边界条件,揭示了轮胎热-力耦合作用下力学响应变化对车辆动力学测试数据稳定性的影响机理,得到以下结论。

(1) 车辆操纵稳定性测试前采用稳态回转暖

胎时，定回转半径、不定车身侧向加速度工况下较定侧向加速度、不定回转半径工况下的轮胎整体温升梯度和幅值波动大。

(2) 车辆稳态回转时，轮胎温度变化对车身侧向加速度波动非常敏感；左转向车辆车身侧向加速度的增大与右侧轮胎分配负荷呈正相关变化，在复合侧偏侧倾作用下，能够加剧轮胎温升。

(3) 暖胎引起轮胎温度的变化改变了其侧偏、纵滑等力学特性响应，造成非线性滑移区滞回幅值不稳定，易导致车辆操纵稳定性数据的重复性变差，进而对车辆动力学仿真验证和模型调整带来困难。

此外，不同轮胎厂家对同一车型进行配套轮胎开发时，胶料不同会造成暖胎后轮胎内部温度出现差异，这也是操纵稳定性测试中引起数据重复性变差的原因之一。

参考文献：

[1] 全国汽车标准化技术委员会. 汽车操纵稳定性试验方法：GB/T 6323—2014[S]. 北京：中国标准出版社，2014.

[2] 李玲，施树明，王宪彬，等. 滚动阻力对车辆运动稳定性的影响分析[J]. 汽车工程，2017，39(4)：440-446.
LI L，SHI S M，WANG X B，et al. Analyses on the effects of rolling resistance on the motion stability of vehicle[J]. Automotive Engineering，2017，39(4)：440-446.

[3] ROSA R D，STAZIO F D，GIORDANO D，et al.Thermotyre：Tyre temperature distribution during handling manoeuvres[J]. Vehicle System Dynamics，2008，46(9)：831-844.

[4] 陈平. 轮胎热机耦合力学特性及建模研究[D]. 长春：吉林大学，2018.
CHEN P. Research on tire thermo-mechanical coupling mechanical characteristics and modeling[D]. Changchun：Jilin University，2018.

[5] 卢磊. 考虑磨损和温度影响的UniTire轮胎模型及应用验证[D]. 长春：吉林大学，2020.
LU L. UniTire tire model considering the effects of wear and temperature and its application verification[D]. Changchun：Jilin University，2020.

[6] LU L，LU D，WU H D，et al. Research and modeling of tire cornering characteristics considering temperature based on UniTire model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，Part D：Journal of Automobile Engineering，2022，236(4)：497-511.

[7] CLARK J D，SCHURING D J. Load，speed and inflation pressure effects on rolling loss distribution in automobile tires[J]. Tire Science and Technology，1988，16(2)：78-95.

[8] 危银涛，刘宇艳，杜星文，等. 子午线轮胎滚动阻力与温度场非线性有限元分析[J]. 轮胎工业，1998，18(6)：330-335.
WEI Y T，LIU Y Y，DU X W，et al. Non-linear FEA of rolling resistance and temperature profile of radial tire[J]. Tire Industry，1998，18(6)：330-335.

[9] GIBERT J M，ANANTHASAYANAM B，JOSEPH P F，et al. Deformation index-based modeling of transient，thermo-mechanical rolling resistance for a nonpneumatic tire[J]. Tire Science and Technology，2013，41(2)：82-108.

[10] CHO J R，LEE H W，JEONG W B，et al. Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire[J]. International Journal of Solids and Structures，2013，50(1)：86-96.

[11] 王国林，安登峰，吴旭，等. 轿车轮胎花纹参数对滚动阻力的影响分析[J]. 橡胶工业，2019，66(2)：83-88.
WANG G L，AN D F，WU X，et al. Effect of tread pattern parameters on rolling resistance of PCR tire[J]. China Rubber Industry，2019，66(2)：83-88.

[12] 周梦雨，李凡珠，杨海波，等. 基于非线性黏弹性本构模型的轮胎滚动和生热[J]. 高分子材料科学与工程，2020，36(3)：73-78.
ZHOU M Y，LI F Z，YANG H B，et al. Tire rolling and heat generation based on nonlinear viscoelastic model of parallel rheological framework[J]. Polymer Materials Science & Engineering，2020，36(3)：73-78.

[13] YDREFORS L，HJORT M，KHARRAZI S，et al. Rolling resistance and its relation to operating conditions：A literature review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，Part D：Journal of Automobile Engineering，2021，235(12)：2931-2948.

[14] ALI R，DHILLON R，GINDY M E，et al. Prediction of rolling resistance and steering characteristics using finite element analysis truck tyre model[J]. International Journal of Vehicle Systems Modelling & Testing，2013，8(2)：179-201.

[15] 朱成伟. 汽车轮胎稳态滚动阻力建模及实验分析[D]. 长春：吉林大学，2021.
ZHU C W. Modeling and experimental analysis of steady-state rolling resistance of automobile tires[D]. Changchun：Jilin University，2021.

[16] PARSHETTI V. Sensitivity study and optimization of magic formula tire parameters for vehicle handling and steering targets[D]. Sweden：Chalmers University of Technology，2021.

[17] TEY J Y，RAHIZAR R. Handling performance optimisation for formula vehicle using multi-objectives evolutionary algorithms[J].

Vehicle System Dynamics，2020，58(12)：1823-1838.

[18] CHO J R，KIM K W，YOO W S，et al. Mesh generation considering detailed tread blocks for reliable 3D tire analysis[J]. Advances in Engineering Software，2004，35(2)：105-113.

[19] 孟照宏，史彩霞，翟明荣. 轮胎转向残余回正力矩的有限元分析及关键影响因素研究[J]. 橡胶工业，2021，68(11)：822-826.
MENG Z H，SHI C X，ZHAI M R，et al. Finite element analysis of tire PRAT and study on key influencing factors[J]. China Rubber Industry，2021，68(11)：822-826.

[20] 史彩霞，孟照宏，苏明，等. 复杂花纹轿车子午线轮胎带束层结构对轮胎高速温度场的影响研究[J]. 橡胶工业，2022，69(8)：578-585.
SHI C X，MENG Z H，SU M，et al. Study on influence of belt structure on high-speed temperature field of PCR tire with complex pattern[J]. China Rubber Industry，2022，69(8)：578-585.

[21] 汽车之家. 奇瑞汽车-艾瑞泽GX 2019款 Pro 1.5T CVT劲色版国 VI[DB/OL]. [2022-04-10]. https：//car.autohome.com.cn/config/spec/40170.html#pvareaid=3454541.

[22] 李雪莉，张元伟，邱海漩. 基于轮胎稳态和瞬态特性的车辆响应研究[J]. 橡胶工业，2020，67(7)：495-501.
LI X L，ZHANG Y W，QIU H X. Study on vehicle response based on steady and transient characteristics of tire[J]. China Rubber Industry，2020，67(7)：495-501.

[23] 王锫学. 复杂工况下的热力耦合问题高精度计算方法研究[D]. 长沙：湖南大学，2021.
WANG K X. Research on high precision calculation method of thermal-mechanical coupling problem under complex working conditions[D]. Changsha：Hunan University，2021.

收稿日期：2022-12-05

Study on Influence of Vehicle Steady-state Cornering on Thermal-Mechanical Coupling Response of Tires

MENG Zhaohong[1,2]，*SHI Caixia*[1]，*ZHOU Lei*[1]，*ZHAI Mingrong*[2]，*YU Chenglong*[2]，*ZHUANG Lei*[2]

（1. Qingdao Doublestar Tire Industry Co.，Ltd，Qingdao 266400，China；2. Qingdao Lunyun Design and Research Institute Co.，Ltd，Qingdao 266400，China）

Abstract：The influence of vehicle steady-state cornering on the thermal-mechanical coupling response of the tires was studied. The results showed that when the tires were warmed up by means of steady-state cornering before the vehicle handling stability test，the tire temperature gradient and amplitude fluctuation under the conditions of constant cornering radius and variable lateral acceleration of the vehicle body were larger than those under the conditions of constant lateral acceleration and variable cornering radius. During the vehicle steady-state cornering，the tire temperature change was very sensitive to the lateral acceleration fluctuation of the vehicle body. When the vehicle turned left，the increase of lateral acceleration was positively correlated with the load distribution of the right tire. Under the action of sideslip combined with camber condition，the tire temperature rise could be aggravated. The tire temperature change caused by warming up altered the response of mechanical properties such as tire sideslip and longitudinal slip，causing unstable hysteresis amplitude in the nonlinear slip zone，which easily lead to poor repeatability of vehicle handling stability test result，and thus brought difficulties to vehicle dynamic simulation verification and model adjustment. The results of this study could provide guidance for vehicle tests.

Key words：vehicle；tire；steady-state cornering；thermal-mechanical coupling response；dynamic simulation；temperature field distribution；finite element method