

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407206

基于轮胎周向频率的鲁棒间接式胎压监测算法*

徐迎港¹ 储琦² 梁国旗³ 张伟² 门昌伟²

(1. 清华大学车辆与运载学院 北京 100083; 2. 北京汽车研究总院有限公司 北京 101300;

3. 北京汽车集团有限公司 北京 101300)

摘要:针对目前间接式胎压监测(iTPMS)在识别汽车四轮同时欠压时准确度低且易误识别的问题和发动机的震动导致的误识别问题,为提高系统对欠压轮胎识别的准确率,研究轮胎受到道路激励所产生的轮速频谱特征,提出了一种基于轮速传感器和车载硬件的间接式胎压监测算法。首先通过信号去噪、齿轮误差过滤对轮速信号进行了预处理,剔除了轮速漏齿和多齿的问题,使用最小二乘法(RLS)对齿圈进行了误差校正,然后结合轮胎的振动特性分析,使用傅里叶变换方法(FFT)得到轮速的频谱特征,使用带通滤波器(BSP)和陷波滤波器(NF)得到指定范围内的轮速频谱特征,并剔除发动机转动的影响,利用最终得到的共振频率尖峰判断轮胎气压的状态,欠压轮胎的峰值频率会正常胎压的峰值轮胎频率低2~3 Hz,基于此特征给出轮胎气压的结果。实车测试结果表明,该算法可以剔除发动机转动对轮速的影响,既可以保证在单轮、两轮和三轮欠压的识别准确性,也可以准确识别四轮同时欠压的情况,可识别工况增加约18%,对发动机转速在一定范围内对轮胎共振产生影响的工况识别精度提高约25%,相比于传统间接式胎压监测可以更准确和及时得告知驾驶员避免轮胎爆胎风险。

关键词: 车辆工程;间接式胎压监测;车身稳定性控制系统;信号处理;频谱分析

中图分类号: U463.34;TN972.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.2010

Robust indirect tire pressure monitoring method based on torsional resonance frequency

Xu Yinggang¹ Chu Qi² Liang Guoqi³ Zhang Wei² Men Changwei²

(1. School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Automotive Research

Institute Co., Ltd., Beijing 101300, China; 3. Beijing Automotive Group Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: To address the current issues of low accuracy and misidentification in indirect tire pressure monitoring systems (iTPMS) when detecting underinflation in all four wheels simultaneously, as well as the misidentification caused by engine vibrations, a study was conducted on the wheel speed spectral characteristics generated by road excitation. An indirect tire pressure monitoring algorithm based on wheel speed sensors and onboard hardware is proposed to improve the accuracy of underinflated tire identification. First, the wheel speed signal is preprocessed through signal denoising and gear error filtering to eliminate the issues of gear skipping and multi-tooth interference. The gear ring error is corrected using the recursive least squares (RLS) method. Then, combined with the analysis of tire vibration characteristics, the fast fourier transform (FFT) method is used to obtain the spectral characteristics of the wheel speed. Band-pass filters (BSP) and notch filters (NF) are applied to acquire the wheel speed spectral characteristics within a specified range, eliminating the influence of engine rotation. The tire pressure status is determined by the resulting resonance frequency peaks, where the peak frequency of an underinflated tire is 2~3 Hz lower than that of a normally inflated tire. Based on this characteristic, the tire pressure result is provided. Real vehicle test results indicate that this algorithm can eliminate the impact of engine rotation on wheel speed, ensuring the identification accuracy of single, dual, and triple underinflated wheels, as well as accurately identifying simultaneous underinflation in all four wheels. The condition recognition capability increases by approximately 18%, and the accuracy of identifying conditions where engine speed affects tire resonance improves by about 25%. Compared to traditional indirect tire pressure

收稿日期: 2024-01-15 Received Date: 2024-01-15

* 基金项目: 国家自然科学基金(52172370, 52102440)项目资助

monitoring, this algorithm can more accurately and promptly inform the driver to avoid the risk of tire blowouts.

Keywords: vehicle engineering; indirect tire pressure monitoring; body stability control system; signal processing; spectrum analysis

0 引言

轮胎压力是汽车行驶过程中的重要指标,汽车行驶过程中如果轮胎气压不足会导致安全隐患以及其他危害,轮胎爆胎是公路汽车高发事故的主要原因之一,根据美国公路交通安全局的数据,每年车轮爆胎引起的交通事故近 8 000 起,大约有 400 余人死亡、1 000 余人受伤^[1]。在 Szczucka Lasota 2019 年的研究中,轮胎压力对降低燃油消耗的影响最大,随着压力增加 0.1 MPa,燃油消耗量平均降低 5.15 L/100 km,所以胎压监测系统有助于在胎压值降低时,快速报警提醒驾驶员及时应对,从而减少燃油损失,提高行驶经济性^[2]。另一方面智能驾驶快速发展,在其控制底层的转向控制中也需要考虑轮胎压力的影响^[3]。

间接式汽车轮胎气压监测系统(indirect tire pressure monitoring system, iTPMS)分为半径法和频率法,两种方法都可以更简单、低成本地获取轮胎气压值,燕山大学韩宗奇等研究汽车在转弯过程中的滚动半径法胎压监测方法,推导了转弯半径对轮胎半径计算的影响^[4]。燕山大学彭加耕等^[5]基于刷子轮胎模型对轮胎纵向力和滑转率进行建模,提出了可以对高速工况下间接式胎压监测完成补偿的方法,韩国现代汽车公司 Kang^[6]使用了 AR 回归算法对轮胎共振频率进行分析,从而判断轮胎气压状态。

现有方法中半径法可以快速准确识别 3 个及以下轮胎欠压的工况,而 AR 回归方法也具备一定能力识别某些四轮同时欠压的工况,但由于轮胎的周向频率图种尖峰较多,因此存在汽车四轮同时欠压时识别精度不高,且容易受到发动机震动影响,识别到错误频率的问题。为提高识别准确率,本文首先结合信号去噪、RLS 滤波和重采样等方法对轮速信号进行预处理,进而对轮速信号进行傅里叶变换,得到轮速频谱图,并使用带通滤波器得到 30~60 Hz 的频谱图,然后利用陷波滤波器剔除发动机影响,最后使用重心法和最大值法融合得到最终结果,实现鲁棒观测,结合实车上验证了该方法的准确性和有效性。

1 间接式胎压监测原理及轮速处理方法

目前大部分国家都把胎压监测功能强制纳入汽车生产标准中,美国和欧洲分别在 2007 年、2012 年对汽车 TPMS 做出要求,而中国自 2017 年要求所有 2019 年上市 M1 类车型必须具备 I 类或 II 类胎压监测功能^[7]。其

中 II 类胎压监测即间接式胎压监测,相比于直接式胎压监测,该方法具有成本低、能耗低、无需更换原件等优势。

半径法是目前比较主流的方案,其对轮速数据进行处理,通过比较轮速脉冲数据分析轮胎是否欠压^[8]。当轮胎气压降低时,滚动半径也会减小,如图 1 所示,对比 4 个车轮的轮速,可以分析得到 1~3 个轮欠压的情况。但是当 4 个轮胎同时欠压时,该方法无法判断轮胎是否欠压。

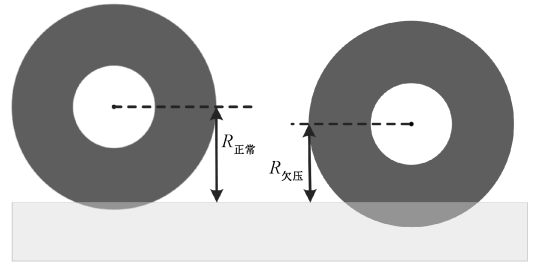


图 1 正常轮胎与欠压轮胎的半径对比

Fig. 1 Radius between normal and under-inflated tires

国际上大部分研发胎压监测技术的公司,如 Bosch 和 Continental,都在脉冲间隔分析轮速的基础上加入了频谱分析,通过傅里叶变换得到轮速信号的频谱,找出最大共振频率。根据实验数据,当汽车轮胎下降时,轮胎刚度也会下降,随之共振频率也下降,利用轮胎前后最大共振峰频率的不同,可以分析出轮胎是否欠压,这种方法可以检测 4 个轮胎同时欠压情况^[9],但在工程应用上易受到各种因素影响,如发动机振动频率、悬架频率、轮胎垂向振动频率等。

轮速信号是间接式胎压监测系统的主要信号之一,来自 CAN 信号的原始轮速非常粗糙,经过处理之后才能使用,处理过程如图 2 所示。

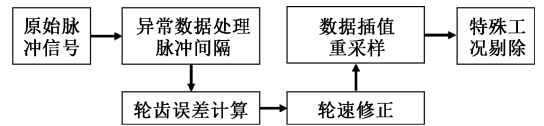


图 2 轮速信号处理流程

Fig. 2 Process flow chart of wheel speed signal

1.1 轮齿信号转换脉冲间隔

在传统车辆上 ABS 或 ESC 使用的轮速信号来自安装在车轮上的霍尔传感器,当齿轮的齿通过霍尔传感器时,由于电磁感应效应,它产生的电压与磁通量的变化成正比。霍尔传感器原理如图 3 所示。

通过采集信号上升沿和下降沿的时间间隔,可以得

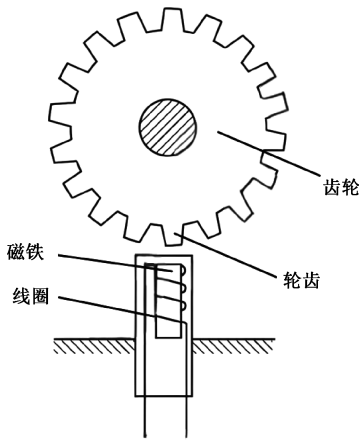


图 3 霍尔传感器原理

Fig. 3 Principle of Hall sensor

到每个轮齿经过永磁铁的时间。由于没有直接的机械接触,所以可能出现误识别、漏齿、多齿等数据,会导致轮速计算出现极大的毛刺。综上,本文提出了一种通用原子数处理方法,其处理流程如图 4 所示。

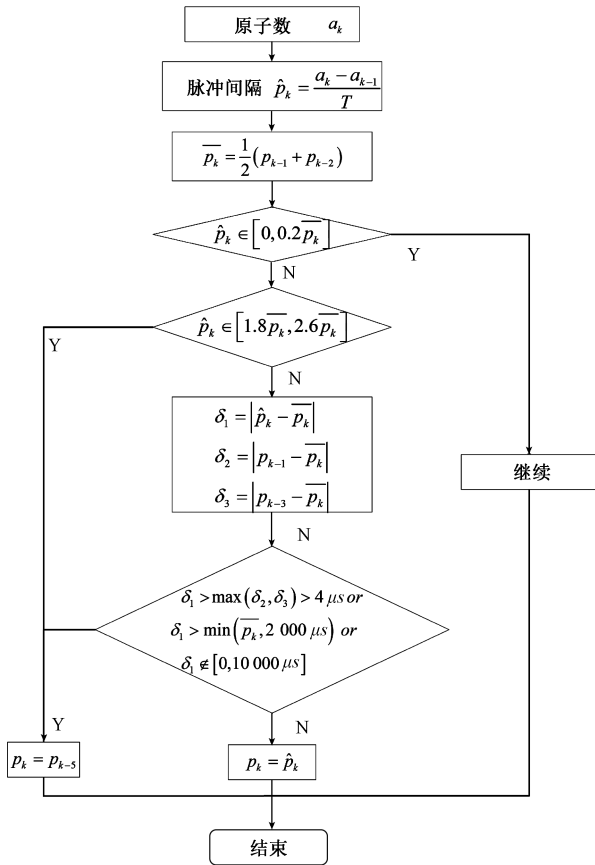


图 4 原子数处理方法流程

Fig. 4 Flow chart of atomic number processing method

其中 a_k 是来自输入捕获单元的齿圈原子数, p_k 是两个相邻齿之间的脉冲间隔, 与旋转角速度成反比, \hat{p}_k 是

原始数据。轮齿误识别的情况可以分为 3 种, 下面对其详细分析: 首先是多识别了一颗轮齿, 在这种情况下, \hat{p}_k 异常小, 直接被认为是无效的。其次, 轮速传感器漏识别了一个齿, 导致 \hat{p}_k 大约是正常值的两倍, 这种情况也会被过滤出来。第 3 种是误差数据与上一时刻的数据相比异常大。对于第 2 种和第 3 种情况, 直接使用前 5 个时刻的平均轮速作为替代, 这样做还可以避免加速或减速导致的轮速异常变化。

1.2 基于 RLS 的轮齿误差估计

汽车上所使用齿轮的每个轮齿长度并不是完全一致, 因为所有的齿轮都存在一定的生产加工误差, 并且长时间使用之后也存在磨损、变形等情况, 所以每个轮齿都和标准轮齿之间存在一定的角度误差, 如图 5 所示。此外, 由于轮齿的误差会导致轮速信号产生周期性的误差, 从而使频域信号产生周期性的噪声峰值^[10], 因此需要对轮齿误差进行修正。

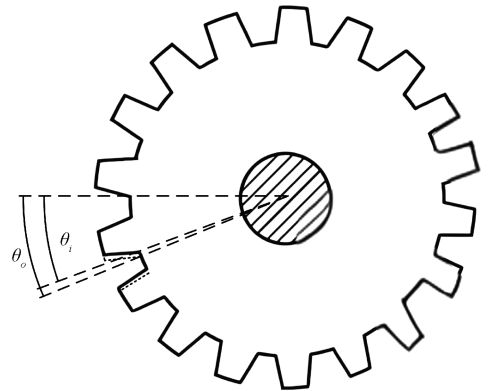


图 5 机械误差示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mechanical error

首先, 利用脉冲信号和齿轮角度可以计算轮角速度, 即:

$$\omega_i = \frac{\theta_i}{\Delta t_i} = \left(\Delta\theta_i + \frac{2\pi}{N} \right) \cdot \frac{1}{\Delta t_i} \quad (1)$$

角度误差 $\Delta\theta$ 是引起轮速信号误差的主要因素, 其数学表达式为:

$$\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_0, i = 1, \dots, N \quad (2)$$

其中, $\theta_0 = \frac{2\pi}{N}$ 是没有有机加工误差下每个齿对应的角度, 即理想的齿角度, N 是齿圈的齿数, θ_i 是实际角度值:

$$\theta_i = \omega(k)p(k) \quad (3)$$

其中, $\omega(k)$ 是时间 k 的角速度, 不能直接测量, 因此, 用旋转的平均角速度作为估计, 即:

$$\omega(k) \approx \overline{\omega(k)} = \frac{2\pi}{\sum_{i=k-N+1}^k p_i} \quad (4)$$

考虑到实时性,可以使用自适应递归算法来估计式(4)中的误差。

$$\Delta \hat{\theta}(k) = A \cdot \Delta \hat{\theta}(k-1) - \Delta \theta(k) \quad (5)$$

其中, $\Delta \hat{\theta}(k)$ 是第 k 个轮齿中的误差估计,状态矩阵 $A = I$ 。

选择 RLS 算法作为滤波器,对每颗牙齿进行单独的迭代估计,即:

$$K(k) = \frac{P(k-1)}{\lambda + AP(k-1)A^T} \quad (6)$$

$$\Delta \hat{\theta}(k) = \Delta \hat{\theta}(k-1) - K(k)\Delta \tilde{\theta}(k) \quad (7)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda}(I - K(k)A)P(k-1) \quad (8)$$

其中, P 是递归因子, $P(0) = I$, λ 是遗忘因子。极端的传感器误判或数据错误会导致齿圈相位不匹配,需要重新开始误差估计的迭代。因此,遗忘因子 λ 需要定期重置,以保证收敛速度^[11]。

此外,齿圈上所有齿的加工误差之和为 0,即:

$$\sum_{i=1}^N \hat{\theta}_i = 0 \quad (9)$$

可以通过修改式(4)中的矩阵作为约束来定义,但考虑到计算量的增加和估计精度的小幅提升,滤波算法没有采用这个约束,后续实验证明精度完全满足没有这个约束的要求。

修正后的脉冲间隔为:

$$p_{k,a} = p_k - \frac{\Delta \hat{\theta}_i(k-1)}{\omega(k)} \quad (10)$$

然后计算的轮速为:

$$v_k = \frac{2\pi R}{p_{k,a}} \quad (11)$$

1.3 轮速重采样方法

轮速传感器是事件触发类型的数据,这就决定了轮速数据的时间间隔是随轮速变化而变化的,是非均匀采样,若要提取其频域特征,则需要等待数据都是均匀时间间隔的,因此需要将数据重采样得到时间均匀的数据。这里采用的方法是插值法^[12],计算量小的同时,也能保证数据真实性。

轮胎周向固有频率一般在 30~60 Hz,考虑到程序运行周期为 10 ms,结合采样定理,重采样频率取 500 Hz,即每秒采样 500 个点。然后,使用线性插值法进行插值,令 $(x_k, y_k), (x_{k+1}, y_{k+1})$ 表示两个相邻的数据点,那么插值的点可以表示为:

$$g(x_k) = y_k, g(x_{k+1}) = y_{k+1} \quad (12)$$

图 6 展示了插值法的原理,由两点确定一条直线,可以计算出上述两点之间的直线方程为:

$$g(x) = \frac{x - x_{k+1}}{x - x_k}(y_k - y_{k+1}) \quad (13)$$

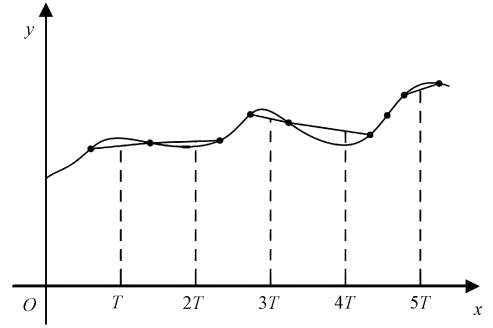


图 6 插值法原理

Fig. 6 Principle of interpolation method

2 轮胎模型与频域分析

2.1 轮胎模型

轮胎可以假设为在路面激励下产生压缩和扭转变形的弹性元件,其振动模型如图 7 所示。

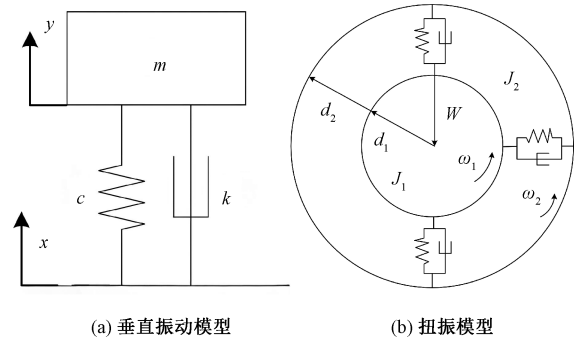


图 7 轮胎振动模型

Fig. 7 Tire vibration model

压缩和扭曲都会对实际轮胎角速度产生影响,并且可以通过图 7(a) 中的简化模型表示二阶振动模型图 7(b),其中 m 是车轮的等效质量, k 和 c 是等效刚度和阻尼^[13]。轮胎变形会影响轮角速度,以压缩为例:

$$\omega(t) = \frac{v(t)}{R_e} + e(t) \quad (14)$$

其中, R_e 是有效滚动半径, $R_e = R_0 + \delta_r(t)$, R_0 是静载荷下的半径, $\delta_r(t)$ 是压缩引起的滚动半径变化, $e(t)$ 表示噪音。对式(14)取一阶泰勒近似,则:

$$\omega(t) \approx \frac{v(t)}{R_0} \left(1 - \frac{\delta_r(t)}{R_0} \right) + e(t) = \omega_0(t) \left(1 - \frac{1}{R_0} \delta_r(t) \right) + e(t) \quad (15)$$

其中, ω_0 是没有轮胎变形的角速度,近似误差与采

样频率成正比。

轮胎的周向震动二阶振动模型表示为:

$$\ddot{y}(t) + 2\gamma\dot{y}(t) + f_0^2 y(t) = F(t) \quad (16)$$

$$\gamma = \frac{c}{2m}, f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (17)$$

对式(16)进行拉普拉斯变换:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\gamma s + f_0^2} \quad (18)$$

将 $s = i2\pi f$ 代入上式,并通过求 $|H(s)|^2$ 最值,可得共振频率为:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{f_0^2 - 2\gamma^2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{c^2}{2m^2}} \quad (19)$$

2.2 轮速频谱分析

随着轮胎压力的下降,垂直压缩和扭转的刚度 k 变小,并且共振峰的位置下降,这是 ITPMS 的关键,式(19)可用于表达轮胎的垂直和周向振动。本文使用了快速离散傅里叶变换方法 (fast Fourier transformation, FFT) 对轮速数据进行频域分析^[14],由于该算法应用在汽车的嵌入式系统中,数据会实时发送并存储在控制器中,受限于存储器大小,算法中只能取一段数据做傅里叶变换^[15],期望数据长度尽量小,并且可以最大程度反映原数据的频谱特性,数据长度对频谱精度影响较为重要。基于上述理论,频域分析的伪算法如算法 1 所示。

算法 1: 计算 f_{res}

输入: 来自轮速传感器的原子数

输出: 共振峰值 f_{res}

1: 初始化: $p_{k,i}, q_{k,i} \leftarrow 0$, 所需频谱范围 $[f_1, f_2]$, 采样频率 F , 采样持续时间 T

2: 基于图 2, $p_{k,i} = \text{dnoising}(a_k)$

3: $\omega_k = \text{RLS}(p_{k,i})$

4: 插值

5: for $n = f_1 T$ to $f_2 T$ do

6: $x[n] = x[n] + \omega_k e^{-(2\pi/FT)kn}$

7: end for

8: if $k = F \times T$ then

9: $f_{res} = \max(\text{Filter}(X))$

10: $X, k \leftarrow 0$

11: end if

最后,使用均值滤波器或一阶滤波器对频谱曲线处理^[16],以避免由于采样频率低而导致的噪声和失真,这对结果的准确性和一致性至关重要。该算法适用于 10 s 长度的数据,单步计算复杂度比较大,而较长的数据边际增益小,不利于计算。

然而,车轮速度的功率谱的形状也受到噪音的影响,包括转向系统振动,驱动,制动系统振动,车身振动和其他系统噪声,表 1 列出了车辆最重要动态部件的频率范

围。由于轮胎扭转振动发生在 40~50 Hz 的范围内,因此可以使用具有适当截止频率的带通滤波器隔离轮胎共振频率周围的频率范围。在本文中,经过处理的轮速频谱数据最低和最高截止频率设置为 30 和 60 Hz。

表 1 车辆最重要动力学部件的频率范围

车辆部件	频率范围/Hz
整车运动	0~10
发动机	10~100
轮胎垂向震动	0~30
轮胎周向震动	40~50

2.3 陷波滤波器去除发动机干扰

汽车发动机转动产生的周期性冲击对轮速频谱影响较大,在最终轮速频谱图中可以看到明显峰值,超出轮胎自己的正常峰值,因此有必要剔除发动机转动对轮速的影响。发动机旋转两圈,其活塞会运动 4 次,对传动系统冲击 4 次的扭振的频率计算公式如式(20)所示。^[17]

$$F_{eng} = n_{eng} \times \frac{4}{2} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sec}} \quad (20)$$

其中, F_{eng} 是发动机扭转震动频率, n_{eng} 为发动机转速。

陷波滤波器是一种阻带比较狭窄的带阻滤波器的,且滤波器必须是比二阶更高的才能达到陷波效果^[18],一般的二阶陷波滤波器可以表示为:

$$G(s) = \frac{s^2 + 2 \times \xi_2 \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2 \times \xi_1 \omega_n s + \omega_n^2} \quad (21)$$

其中, ω_n 为陷波频率, ξ_1, ξ_2 为陷波系数,与陷波深度 $depth$ 和陷波宽度有关 Δf , 即:

$$\xi_1 = \frac{\sqrt{16\pi^2(\Delta f)^2 + 4} + 1}{\omega_n^2 - 4depth^2 + 2}, \xi_2 = depth\xi_1 \quad (22)$$

频率法可以识别四轮同时欠压的工况,所以相比于半径法间接式胎压监测仅能 3 个及以下轮胎半径及以下的情况,无法识别 4 个轮胎同时欠压的工况,而根据来自美国国家公路交通安全局发布的一组数据,27% 的轿车和 32% 的货车、皮卡车和运动型多功能车至少有一个轮胎充气不足,8% 的轻型卡车和 3% 的轿车的 4 个轮胎均充气不足。因所以四轮同时欠压^[19],在轮胎欠压的情况里面占比 18.6%。所以频率法可以拓展识别工况约 18%。

3 试验场地与试验车辆

为验证本文提出的轮胎监测方法的有效性和可靠

性,基于中兴 K1 样车进行实车测试,中兴 K1 为一辆 5 座轻型燃油车,发动机为直列四缸发动机,配备 5 档变速器,前后轮胎推荐标准气压值为 215 MPa,整车质量为 1 615 kg,前轮悬架使用麦佛逊独立悬架,后轮使用普通的扭力梁半独立悬架,轮速传感器的轮齿数为 48,样车的详细参数如表 2 所示。

表 2 中兴 K1 车辆关键参数

Table 2 Key parameters of ZTE K1 vehicle

中兴 K1	
参数	数值
前轮轮胎	215/60 R17
后轮轮胎	215/60 R17
整备质量	1 615 kg
传感器轮齿数	48
前悬架	麦佛逊独立悬架
后悬架	扭力梁半独立悬架

ABS 系统控制器使用的芯片类型为 MPC5741 芯片,标准的汽车级汽车底盘芯片,主频设置为 130 MHz。同时该 ABS 平台配备有信号处理模块,可以将轮速信号处理成可以被 5741 芯片识别的方波信号,中兴车辆外观如图 8(a) 所示。



图 8 试验车辆与实验

Fig. 8 Experimental vehicle and experiment

本次试验场地为湖北襄阳市东风汽车试验场,试验场地址位于襄阳市襄州区富康大道与奔驰大道交会口,同时这里也是国家汽车质量监督检验中心。所有试验均在 ABS 试验道路上测试,该道路约 5 km,同时具备掉头条件,可以完成较长时间的道路测试。

4 试验与结果分析

4.1 轮速信号预处理结果

经过轮速识别算法后,将轮速信号中的大部分毛刺去除,得到初始的脉冲间隔信号。处理结果如图 9 所示,以左前轮为例,来自传感器信号包含大量误识别的情况,原始脉冲间隔就可以看到大量毛刺,经过轮速识别之后,将间隔突然很大和间隔突然极小的情况剔除之后,脉冲

间隔变得平稳,符合实际工况。图 9 中由于有 60 000 左右数据,数据量较大,处理后脉冲曲线重叠将原始脉冲间隔曲线覆盖,对 20 000~2 400 左右的脉冲数放大观察,可以从图 9 的小图上看到两曲线的实际情况。

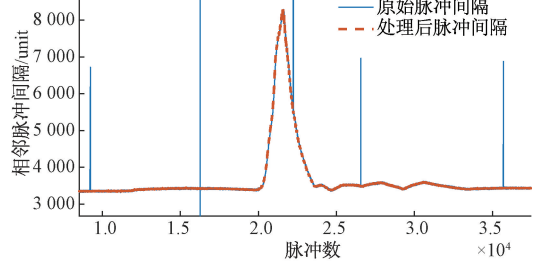


图 9 原始轮齿信号的误识别情况

Fig. 9 Misidentification of the original gear tooth signal

图 9 中 20 000~2 400 的脉冲数和 58 000~60 000 的脉冲数,脉冲间隔变大,说明车辆减速,因此曲线上出现尖峰,这与图 13 重采样后的轮速曲线中,轮速出现两次下跌,两图的数据一一对应。

轮齿误差的收敛情况如图 10 所示,连续的错误识别可以导致环形齿轮的相位错位,导致 RLS 滤波器重新启动迭代收敛过程,反映在尖锐毛刺的外观中。可以看出,过滤器具有良好的收敛性和快速收敛速度。齿圈误差 1 为某一次计算后收敛的情况,齿圈误差 2 为齿圈误差 1 的 10 次之后收敛情况,图 11 展示两次齿圈误差的差值,可以看到两者之间误差较小,数量级为 10^{-4} ,基本可以保证快速收敛并保持数据准确性。

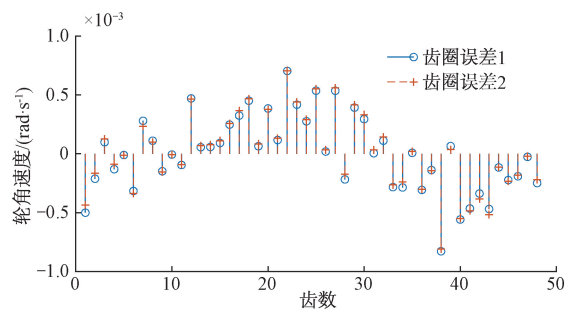


图 10 收敛后齿轮误差和 10 圈后齿圈误差

Fig. 10 Gear error after convergence and ring gear error after 10 turns

经过轮齿误差补偿之后的轮速如图 12 所示,由图可知,经过补偿的轮速表现出较好的稳定性和较少的毛刺,同时过滤掉了因为齿轮误差产生的周期性毛刺。

修正过后的轮速是事件均匀的,而不是时间均匀的,这种信号不能直接拿来作频域分析,所以需要重新采样,得到时间均匀的信号。重采样的方法已经在上文里面提到,重采样之后的结果如图 13 所示,图像出现拉伸是因

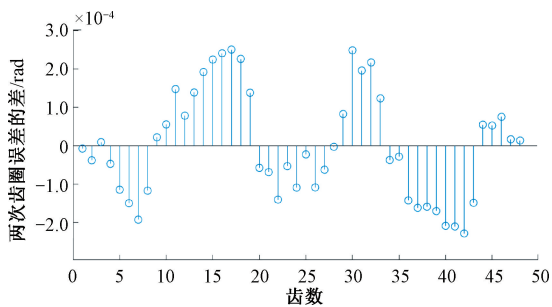


图 11 两次轮齿误差之间的差值

Fig. 11 Difference between two tooth errors

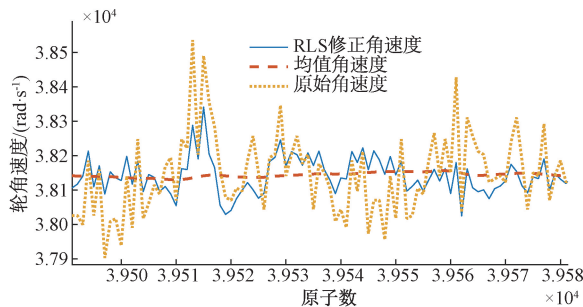


图 12 经过 RLS 修正后的轮角速度

Fig. 12 Wheel angular velocity after RLS correction

为数据由事件均匀变成时间均匀,同时在低速的时候,两个信号之间时间间隔更长,重采样后时间均匀,所以看到中间的一块低速曲线变窄,而两边匀速行驶的区域变化不大。

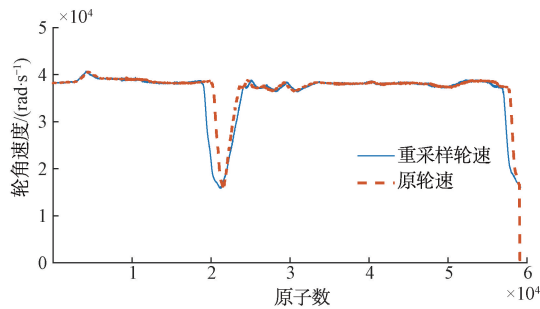


图 13 重采样后轮速数据

Fig. 13 Wheel speed data after resampling

4.2 垂向震动分析

轮胎的垂直和周向振动都可以反映轮胎压力的变化,不过相比之下,轮胎周向共振频率更高,不受低频噪声的影响,但形状扁平,采样时间较长,计算量大,共振峰不清晰可能导致功能失效^[20],难以区分正确结果。此外,由于垂直振动的共振频率较低,容易受到低频噪声的影响,但共振峰的形状尖锐清晰,更重要的是低频噪声引起的误差更容易与正确的数据区分开来,因此选择垂直

振动作为标准。左前轮频谱和滤波频谱计算结果如图 14 所示,其中采样频率设置为 500 Hz,采用时间为 60 s,相关频率范围为 10~26 Hz。在滤波后的频谱中可以清楚地看出,低压轮胎的共振频率比刚度大的标准压力轮胎小,相差约 0.3~1 Hz。

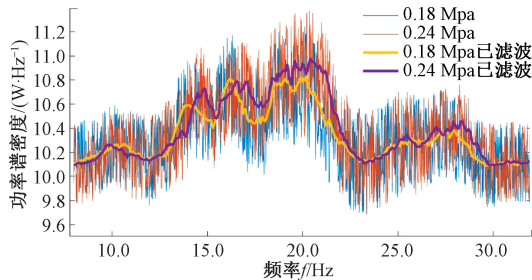


图 14 功率谱和滤波器曲线

Fig. 14 Power spectrum and filter curve

由于路面激励水平不同,振幅也存在一定的差异,当路面不平度较高时,轮速波动较大,振幅也较大,反之则更加平稳一些。

为进一步分析采样时间长短和道路激励对频谱精度的影响,进行了多组实验,结果如表 3 所示。

表 3 汽车胎压与共振峰频率结果

Table 3 Results of car tire pressure and formant frequency

共振频率/Hz	
0.18 MPa	0.24 MPa
17.3	20.5
15.2	20.4
16.4	20.1
16.3	19.1
19.2	16.4

显然,部分数据受到了低频信号的影响,这些集合的响应峰值被低频系统噪声完全覆盖,超出了合理范围。然而,其余数据符合预期趋势。值得注意的是,iTPMS 所收集到的轮速信号中,当地面对轮胎激励不足时,如果路面过于平稳,轮速波动小,频谱特性图中无法反映轮胎的垂向共振峰特征。

4.3 周向震动分析

轮胎周向震动频率在 30~60 Hz 之间,一般标准乘用车推荐气压下周向频率为 45 Hz,在欠压 25% 以上时,周向频率会降低 1~2 Hz,根据这个原理,如果可以利用轮速较为准确识别周向频率,就可以判断出轮胎是否欠压。

为验证方法有效性,进行了多组试验,要涵盖驾驶员日常行驶的各种工况,包括不同车速、不同挡位和不同发动机转速。

其中频域数据 1 的试验条件为,车上人数为 2 人;挡

位为手动 3 档,发动机转速保持 2 000 转左右;在襄阳汽车试验场中试验,道路条件为均一高附直线道路,长度约 5 km;全程驾驶员保持 50 km/h 匀速行驶。频域数据 2 的试验条件为,车上人数为 2 人;挡位为手动 5 档,发动机转速保持 1 800 转左右;在襄阳汽车试验场中试验,道路条件为均一高附直线道路,全程驾驶员保持 80 km/h 匀速行驶,因道路长度有限,所以在道路尽头减速掉头,反向继续匀速驾驶;总驾驶时间在 10 min 左右。发动机转速信息如图 15 所示。

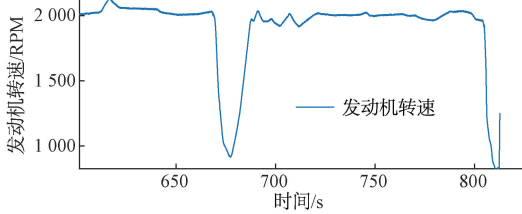


图 15 发动机转速曲线

Fig. 15 Power spectrum and filter curve

由于发动机转动频率时常处在 30~60 Hz,所以需要 对发动机进行陷波滤波处理。首先使用带通滤波器将 30 Hz 以下和 60 Hz 以上的信号除掉,滤除效果如图 16 所示,可以明显看到,发动机的轮速频谱特性图在去除 30 Hz 以下及 60 Hz 以上的信号之后,共振峰特征更加明显。

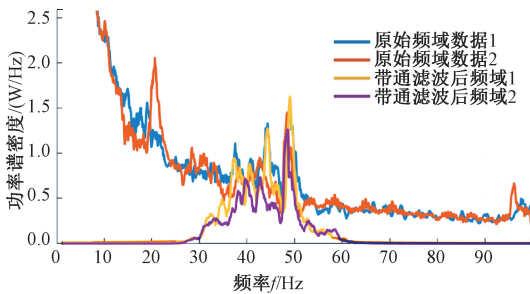


图 16 经过带通滤波(30~60 Hz)处理的频谱信号

Fig. 16 Signal processed by bandpass filtering (30~60 Hz)

受到发动机震动的影响,当挡位和汽车车速在某些工况下,恰好使得发动机的震动频率影响在 30~60 Hz,尤其是在 50 Hz 左右,此时的频谱特性图中会出现一些异常打的峰值,如图 16 中 50 Hz 处的异常峰值,因此使用陷波滤波器,计算发动机在该时段的平均频率,并将之去除,去除效果如图 17 所示,可以看到发动机频率的影响较大,剔除后的轮速频谱特性更能反映轮胎的特性。

对经过滤波、限频、陷波处理过的轮速频谱信号进行分析,研究轮胎受到气压的影响。从图 18 可以看出在轮

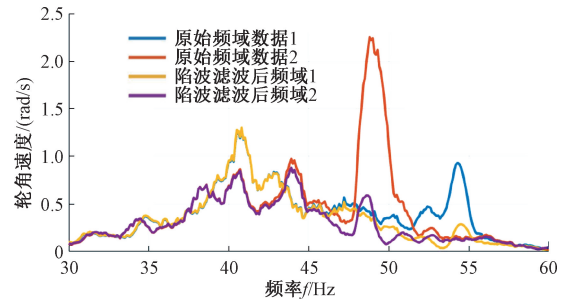


图 17 剔除发动机信号影响的频谱信号对比

Fig. 17 Comparison of spectral signals excluding engine signal effects

胎欠压情况下,轮胎数据的频域峰值明显向左移动,且峰值降低。使用计算机进行识别时,需要加入最大峰值识别功能,传统方法有两种,一种是使用最大位置法,即根据该频谱图的最高点,寻找该共振峰的位置。这种方法容易被噪声和毛刺干扰,另一种方法是利用重心法,找出整个频谱图的重心位置来确定峰值位置,但这种方法区别度准确度低,本文结合两种方法进行计算。

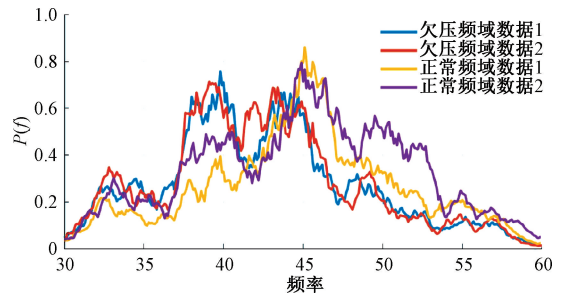


图 18 陷波滤波处理过正常胎压与欠压数据对比

Fig. 18 Comparison of normal tire pressure and under pressure data processed by notch filter

经过多次实验,在左前轮欠压 75%左右时,得到的共振峰频率为 42~43 Hz,在正常胎压时,得到的频域为 44~44.5 Hz 左右,根据两者之间 2~3 Hz 的差值,可以判断当下轮胎的压力状态是否欠压。

表 4 列举了本次试验的 12 组数据,其中 3 组胎压为 0.24 MPa,胎压正常,9 组为 0.18 MPa,轮胎欠压。其中使用陷波滤波器正确识别了 11 组胎压,而不使用陷波滤波器时正确识别了 8 组。第 7 组数据两种方法都识别失败,因为发动机共振频率与胎压频率完全重合影响较大。在第 3、8、9 组数据中,发动机转速为 1 500 r/min 左右,引起的共振峰频率为 50 Hz 左右,因此不使用陷波滤波器的情况下,都会识别出 50 Hz 的结果,如图 17 所示,结果识别错误。在本次试验中,使用陷波滤波器和不使用陷波滤波器的正确率分别为 91.67% 和 66.67%,准确率提高了 25%。

表4 发动机转速与胎压识别结果

Table 4 Engine speed and tire pressure identification results

序号	发动机平均 转速/RPM	胎压/ MPa	发动机频率 是否有影响	陷波前 识别欠压	陷波后 识别欠压
1	1 602	0.18	是	是	是
2	1 991	0.18	否	是	是
3	1 531	0.18	是	否	是
4	2 550	0.18	否	是	是
5	1 607	0.24	是	否	否
6	2 008	0.24	否	否	否
7	1 497	0.24	是	是	是
8	1 540	0.18	是	否	是
9	1 502	0.18	是	否	是
10	1 440	0.18	是	否	否
11	1 809	0.18	否	是	是
12	2 003	0.18	否	是	是

5 结 论

本文提出了一种从轮速传感器输出到特征峰值提取和胎压检测的完整轮速信号处理方法,算法部署在ABS控制器上进行,无需额外的计算平台,该方法能够实时监测轮胎压力并初步确定轮胎刚度的变化并通过实车测试进行了验证,可识别工况增加了约18%。本文提出的方法加入了频率截至算法和发动机频率剔除算法,可以剔除发动机转速在1 200~1 500 r/min时对轮速频率的影响,提高了四轮同时欠压时的识别准确率约25%。

目前国际上各种主流的胎压监测方法,都很难精准检测出四轮同时欠压的情况,未来针对这种情况的高精度监测算法还需要继续研究,此外汽车载荷对四轮胎压也有一定影响,均匀分布和不均匀分布的载荷如何影响胎压监测系统也将会是一个重点研究方向。

参考文献

- [1] 胡超芳,曹磊,赵凌雪,等. 基于预测控制的无人驾驶车辆爆胎转向控制[J]. 天津大学学报, 2019, 52(5): 468-474.
HU CH F, CAO L, ZHAO L X, et al. Model predictive control-based steering control of unmanned ground vehicle with tire blowout [J]. Journal of Tianjin University, 2019, 52(5): 468-474.
- [2] SZCZUCKA-LASOTA B. Influence of tire pressure on fuel consumption in trucks with installed tire pressure monitoring system (TPMS) [J]. Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska, 2019 (103): 167-181.
- [3] 罗锲铭. 基于频率法的间接式轮胎压力监测系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2014.
LUO Q M. The research of indirect tire pressure monitor system based on the frequency method [D]. Wuhan;

Wuhan University of Technology, 2014.

- [4] HAN Z Q, JU X K, WANG L Q, et al. Monitoring method of indirect TPMS in case of running on curving path [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(6): 143-149.
- [5] 彭加耕,王宇岱,韩宗奇,等. 高速工况下间接式胎压监测的影响因素研究与优化[J]. 汽车技术, 2020,(9): 45-51.
PENG J G, WANG Y D, HAN Z Q, et al. Research and optimization on influencing factors on indirect tire pressure monitoring in high speed driving conditions [J]. Automotive Technology, 2020,(9): 45-51.
- [6] KANG J. Robust estimation method of tire torsional resonance frequency to detect decrease in tire inflation pressure[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(7): 2358-2374.
- [7] 苏静. 基于轮速特征分析的胎压估计算法研究[D]. 长春:吉林大学, 2017.
SU J. Research on tire pressure estimation algorithm based on wheel speed feature analysis [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [8] 罗新帅. 基于轮胎滚动半径和频域特征的间接式胎压监测算法研究[D]. 长春:吉林大学, 2021.
LUO X SH. Research on indirect tire pressure monitoring algorithm based on tire rolling radius and frequency domain features [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [9] 单经纬. 基于频域特征分析的间接式胎压监测算法研究[D]. 长春:吉林大学, 2016.
SHAN J W. The research of indirect tire pressure monitoring algorithm based on frequency domain feature analysis [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [10] 许耀东,曹永洁. 影像法测量齿轮径向跳动不确定度及误差处理[J]. 自动化与仪器仪表, 2013,(4): 197-200.
XU Y D, CAO Y J. Measurement uncertainty and error handling of gear radial runout using image method [J]. Automation and Instrumentation, 2013,(4): 197-200.
- [11] ZHAO J, SU J, ZHU B, et al. An indirect TPMS algorithm based on tire resonance frequency estimated by AR model [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2016, 9(2016-01-0459): 99-106.
- [12] 罗云松,黄慕宇,贾韬. 重采样在微博机器人识别中的应用研究[J]. 中文信息学报, 2021, 35(12): 133-148.
LUO Y S, HUANG M Y, JIA T. Research on the application of resampling in weibo robot recognition [J].

Chinese Journal of Information Science, 2021, 35 (12): 133-148.

- [13] 钟响. 间接式轮胎压力监测系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
ZHONG X. Research on indirect tire pressure monitoring system [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [14] 李仁庆. 动载荷下汽车胎压变化规律试验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
LI R Q. Experimental study on the changing rules of automobile tire pressure under dynamic load [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [15] 常俊杰, 万陶磊, 钟海鹰. 短空间二维傅里叶变换对铝板的损伤定量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(6): 102-108.
CHANG J J, WAN T L, ZHONG H Y. Quantitative study of damage to aluminum plates by short-space two-dimensional Fourier transform[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34 (6): 102-108.
- [16] ZHOU F Q, W SH H, WEI Y T, et al. Indirect tire pressure monitoring system based on tire vertical stiffness[C]. 2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). Qingdao, China: IEEE, 2015: 100-104.
- [17] 宗培亮. 一种消除发动机干扰的方法、装置、设备及存储介质: CN113682281A[P]. 2021-11-23.
ZONG P L. A method, device, equipment and storage medium for eliminating engine interference: CN113682281A[P]. 2021-11-23.
- [18] HAN Z. FFT/IFFT method for wheel speed sensor signal processing when car runs at high speed[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(16): 155.
- [19] SUENDER R, PROKOP G, ROSCHER T. Comparative analysis of tire evaluation methods for an indirect tire pressure monitoring system (iTTPMS) [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2015, 8(2015-01-1519): 110-118.
- [20] WANG X, CHEN Z, CAO W, et al. Artificial neural network-based method for identifying under-inflated tire in indirect TPMS [J]. IEEE Access, 2020, 8: 213799-213805.

作者简介



徐迎港(通信作者), 2017 年于清华大学获得学士学位, 现为清华大学车辆与运载学院在读博士生, 主要研究方向为底盘动力学域控、分布式驱动控制和整车动力学控制算法。

E-mail: xuyg17@foxmail.com

Xu Yinggang(Corresponding author) received his B. Sc. degree from Tsinghua University in 2017. He is currently a Ph. D. candidate in the Chassis Dynamics Control Research Group of the School of Vehicles and Transportation, Tsinghua University. His main research interests include chassis dynamics domain control, distributed drive control and vehicle dynamics control.



储琦, 2010 年于东北大学获得学士学位, 现工作于北京汽车研究总院有限公司, 主要研究方向为电动汽车整车控制技术。

E-mail: xchuqi@bjev.com.cn



Chu Qi received a B. Sc. degree from Northeastern University in 2010. He is currently working at Beijing Automotive Technology Center. His main research interests include the vehicle control technology.

梁国旗, 1993 年于清华大学获得学士学位, 2008 年于北京大学获得硕士学位, 现工作于北京汽车集团有限公司, 主要研究方向为电动汽车整车控制技术。

E-mail: lianguoqi@baicgroup.com.cn



Liang Guoqi received a B. Sc. degree from Tsinghua University in 1993 and received a M. Sc. degree from Peking University in 2008. He is currently working at Beijing Automotive Group. His main research interest includes the vehicle control technology.

张伟, 2017 年于北京理工大学获得学士学位, 2019 年于北京理工大学获得硕士学位, 现工作于北京汽车研究总院有限公司, 主要研究方向为电动汽车动力学控制技术。

E-mail: zhangwei04@bjev.com.cn

Zhang Wei received a B. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2017 and received a M. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2019. He is currently working at Beijing Automotive Technology Center. His main research interest includes the dynamics control technology of electric vehicles.



门昌伟, 2011 年于中北大学获得学士学位, 2015 年于北京交通大学获得硕士学位, 现工作于北京汽车研究总院, 主要研究方向为纯电动汽车动力学控制技术。

E-mail: menchangwei@bjev.com.cn

Men Changwei received a B. Sc. degree from North University of China in 2011 and received a M. Sc. degree from Beijing Jiaotong University in 2015. He is currently working at Beijing Automotive Technology Center. His main research interest includes the dynamics control technology of electric vehicles.