

doi: 10.7690/bgzdh.2024.10.007

## 轮胎充气过程胎压自动预估方法

张宏超<sup>1,2</sup>, 李淑慧<sup>2</sup>, 孙云龙<sup>2</sup>, 何欣航<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074; 2. 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

**摘要:** 针对越野汽车轮胎充气过程胎压动态复杂变化情况, 提出一种轮胎充气过程胎压实时预估方法。主要由数据采集与预处理模块、预标定轮胎气阻模块及轮胎胎压预估模块组成; 根据测压工况轮胎胎压值估算出轮胎气阻值; 在此基础上, 轮胎胎压预估模块利用气动原理循环预估轮胎胎压; 并通过轮胎中央充放气系统平台进行验证。结果表明: 该算法预估的均方根误差不超过 0.084 3 MPa, 极大提高了胎压预估的精度。

**关键词:** 中央充放气系统; 胎压预估; 气阻; 气动原理

**中图分类号:** U463.34 **文献标志码:** A

## Automatic Prediction Method for Tire Pressure in Tire Inflation Process

Zhang Hongchao<sup>1,2</sup>, Li Shuhui<sup>2</sup>, Sun Yunlong<sup>2</sup>, He Xinhang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

**Abstract:** In view of the complex dynamic changes of tire pressure during the inflation process of off-road vehicle tires, a real-time prediction method of tire pressure during the inflation process was proposed. The method mainly comprise a data acquisition and preprocessing module, a pre-calibration tire air resistance module and a tire pressure estimation module, wherein a tire air resistance value is estimate according to a tire pressure value of a pressure measuring working condition; and on that basis, the tire pressure estimation module circularly estimates the tire pressure by using a pneumatic principle. Through the verification of the tire central inflation and deflation system platform, the results show that the root mean square error of the algorithm is not more than 0.084 3 MPa, which greatly improves the accuracy of tire pressure prediction.

**Keywords:** central inflation and deflation system; tire pressure estimation; air resistance; pneumatic principle

### 0 引言

轮胎中央充放气系统因能实现停止或者行驶状态下给越野汽车轮胎充气、放气、测压和保压功能, 已成为越野汽车不可或缺的一部分。如何实时稳定预估越野汽车行驶过程中轮胎的胎压一直是中央充放气系统的难题<sup>[1-2]</sup>。目前, 充气过程中获知轮胎胎压的方案主要有 2 种: 1) 胎压检测系统 (tire pressure monitoring system, TPMS)<sup>[3-4]</sup>。根据获取轮胎胎压的方式不同可分为直接式 TPMS<sup>[5-6]</sup>、间接式 TPMS<sup>[6-9]</sup>和混合式 TPMS<sup>[10]</sup>。由于采用无线传输, 直接式 TPMS 存在传输数据不稳定、易受干扰的问题<sup>[11]</sup>。间接式 TPMS 通过测量轮胎转速或扭转刚度来检测轮胎内部气压<sup>[8-12]</sup>。例如, Kim 等<sup>[12]</sup>基于轮胎压力和轮胎刚度的线性关系, 设计自适应拓展卡尔曼滤波算法估计轮胎的刚度, 进而间接实时检测轮胎的胎压。虽然间接式 TPMS 比较便宜, 但当 2 个轮胎同时缺气或者车速超过 1 000 km/h 时, 无法准确判断轮胎的胎压情况。混合式 TPMS 是近年来新兴的一种胎压检测系统。例如, Formentin 等<sup>[10]</sup>

在汽车上只安装了一个压力传感器, 利用混合信号处理和估计技术来检测 4 个轮胎压力水平。相比之下, 混合式 TPMS 的相关研究较少, 且都集中应用于民用汽车。另一种是采用充-测-充-测循环的工作方式获取轮胎的胎压, 即充一段时间后再执行测压动作从而获知轮胎胎压。采用充-测-充-测循环的工作方式虽然能获知轮胎胎压, 但是需要中断充气过程, 导致充气效率降低, 而且获知的轮胎胎压也只是间隔较远的离散点。虽然上述方案可以利用传感器直接或者间接地检测出轮胎的胎压, 但无法做到实时预估轮胎的胎压。

为此, 在已有实验平台的基础上, 笔者提出一种中央充放气系统胎压自动预估方法。该实验平台是由已发表的专利<sup>[13-14]</sup>搭建而成, 主要由数据采集及预处理模块、预标定轮胎气阻模块及轮胎胎压预估模块组成。在数据采集及预处理模块, 控制箱总成发布充-测-充-测循环的工作指令, 利用轮胎上游传感器测量其所在位置的压强值。考虑到测压工况轮胎胎压值等于轮胎上游传感器所在位置的压强

收稿日期: 2024-06-23; 修回日期: 2024-07-24

第一作者: 张宏超(1978—), 男, 河南人, 硕士。

值，在预标定轮胎气阻模块利用气动原理推算出轮胎的气阻。在此基础上，轮胎胎压预估模块利用气动原理循环预估胎压直至轮胎充气结束。最后，利用采集的轮胎上游传感器胎压数据验证了笔者所提算法的预估性能。

笔者考虑的越野汽车与常规汽车不同，其应用场景要求不能一直发送无线信号，且要克服现有胎压检测系统电池寿命有限的问题。此外，由于越野汽车的轮胎采用特殊材质制作，安装在越野车轮胎内部的胎压检测装置常会出现发送信号无法接受的问题。为此，轮胎胎压的预估十分必要。

## 1 问题描述

### 1.1 轮胎中央充放气系统架构

如图 1 所示，笔者采用的轮胎中央充放气系统主要包括气源、控制箱总成、轮胎上游传感器、轮胎阀以及轮胎。其中，气源由增压机、气泵及气瓶组成，控制箱总成分别由控制电磁阀、气源与增压机的电磁开关及电磁阀组件等组成。此外，从气瓶出来的供气管路进气口与控制箱总成中的电磁阀组件相连，而后与轮胎阀相连，轮胎上游传感器串联在电磁阀组件与轮胎阀之间的气路上，轮胎阀安装在轮胎气门嘴上，与轮胎相连。控制箱总成中的 DSP 芯片控制气泵将空气压缩进入气瓶。当 DSP 芯片给气源电磁开关发出控制命令后，压缩后的空气可从气瓶流出进入控制箱总成。同时，当控制箱总成中的电磁开关收到 DSP 芯片发出的充气指令时，将打开电磁开关，使气瓶中的压缩气体进入电磁阀组件，从电磁阀组件出来的气体经轮胎上游传感器进入轮胎阀并流入轮胎内部。与现有的胎压检测系统不同，本架构未采用胎压检测系统，只能利用轮胎上游传感器测量的压强值预估轮胎胎压。

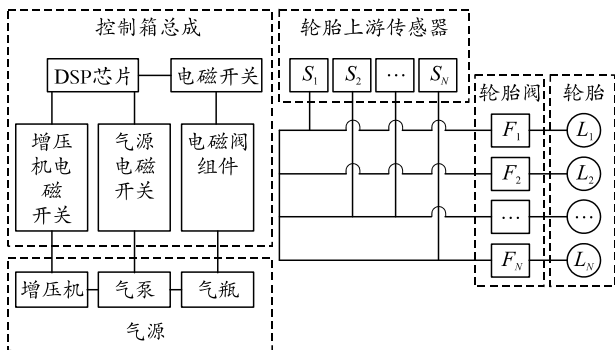


图 1 轮胎中央充放气系统架构

### 1.2 轮胎胎压基础理论

根据气压传动原理<sup>[15-16]</sup>，轮胎的胎压主要与轮

胎的温度、容积、空气质量有关，且存在如下关系：

$$M_k = 3.482 \times 10^{-3} P_k V_k / T_k \quad (1)$$

式中  $M_k$ ,  $P_k$ ,  $V_k$ ,  $T_k$  分别为  $k$  时刻轮胎的空气质量、轮胎胎压、轮胎体积以及轮胎温度。此外，轮胎上游传感器所处位置的压强与轮胎胎压之间的压强差与气阻和空气流量相关，且满足如下表达式：

$$R_k = \Delta P_k / Q_M^k = (P_{上}^k - P_{轮}^k) / Q_M^k \quad (2)$$

式中： $R_k$  为轮胎的气阻； $\Delta P_k$  为  $k$  时刻轮胎上游传感器位置处的压强  $P_{上}^k$  与轮胎胎压  $P_{轮}^k$  的差值； $Q_M^k$  为  $k$  时刻的空气流量。

从 1.1 节不难看出，与现有胎压检测系统不同，笔者采用轮胎上游传感器来检测轮胎的胎压，而非在轮胎内部安装传感器的方式测量轮胎胎压。该方式有如下优点：1) 克服了传统胎压检测系统供电电池寿命有限的难题；2) 操作方便，且成本较低。但是，可用的数据只有轮胎上游传感器所在位置测量的压强值。根据气动原理，只有当气路处于稳态时（不充气也不放气，即测压模式时），轮胎上游传感器所在位置的压强值等于轮胎内部的胎压。虽然可以采用传统充-测-充-测循环的工作方式获取轮胎的胎压，但该方式需要不停地中断充气过程，充气效率较低，且获取的真实胎压值为间断的数据。为此，笔者想用充-测-充-测循环的工作方式下有限的胎压数据来预估轮胎真实胎压，但同时图 1 所示的充气架构也给胎压预估提出了巨大挑战。

## 2 一种中央充放气系统胎压自动预估方法

笔者所提算法主要分为数据采集及预处理、预标定轮胎气阻和轮胎胎压预估 3 个模块。数据采集及预处理模块采用充-测-充-测循环的工作方式，并利用轮胎上游传感器实时采集该工况下轮胎上游传感器测量其所在位置的压强值。在此基础上，预标定轮胎气阻模块估算出轮胎的气阻，并将其用于轮胎胎压预估模块自动估算胎压。

### 2.1 数据采集及预处理

数据采集及预处理模块通过给控制箱总成发布充-测-充-测循环的工作指令，同时利用轮胎上游传感器测量其所在位置的压强值。根据气压传动原理<sup>[15-16]</sup>，当轮胎处于稳态（即不充放气或测压状态）时，轮胎内的胎压值与轮胎上游传感器处的压强值相等。即图 1 所示的系统架构工作于充-测-充-测循环的方式时，测压状态下的气路为稳定状态，轮胎



于 0, 所以可得  $(1 - T_{K-1} / (3.482 * 10^{-3} * V_{K-1} \bar{R}_K)) < 1$  成立。此外, 因为轮胎充-测-充-测过程中轮胎上游的传感器压强值  $P_{\text{上}}^K$  与轮胎的胎压  $P_{\text{轮}}^K$  满足关系  $P_{\text{上}}^K \geq P_{\text{轮}}^K$ , 所以利用式(5)得:

$$P_{\text{上}}^K M_{\text{轮}}^{K-1} \geq P_{\text{轮}}^{K-1} M_{\text{轮}}^K \quad (13)$$

利用式(9)得:

$$\left(1 - \frac{T_K}{3.482 * 10^{-3} * V_K \bar{R}_{K+1}}\right) = \frac{M_{\text{轮}}^{K+1}}{M_{\text{轮}}^K} - \frac{P_{\text{上}}^{K+1}}{\bar{R}_{K+1} M_{\text{轮}}^K} \quad (14)$$

因此, 将式(3)一(5)、(13)带入式(14)得:

$$\left(1 - \frac{T_K}{3.482 * 10^{-3} * V_K \bar{R}_{K+1}}\right) = \frac{M_{\text{轮}}^{K+1}}{M_{\text{轮}}^K} - \frac{P_{\text{上}}^{K+1}}{\bar{R}_{K+1} M_{\text{轮}}^K} = \frac{P_{\text{上}}^{K+1} M_{\text{轮}}^K - P_{\text{轮}}^K M_{\text{轮}}^{K+1}}{M_{\text{轮}}^K (P_{\text{上}}^{K+1} - P_{\text{轮}}^K)} \geq 0 \quad (15)$$

式(13)和(15)中的等号只有当轮胎充气达到稳态时, 轮胎上游传感器测的任意时刻  $k$  的胎压值  $P_{\text{上}}^k$  才能等于轮胎内部的胎压值  $P_{\text{轮}}^k$ 。由于气阻为恒定值, 故  $R_k = R_{k-1}$ 。为方便计算省略了分母中含  $\bar{R}_k = \bar{R}_{k-1}$  的 3 次以上的项, 式(12)可进一步简化为:

$$M_{\text{轮}}^K = \frac{P_{\text{上}}^K}{\bar{R}_K} + \left(1 - \frac{T_{K-1}}{3.482 * 10^{-3} * V_{K-1} \bar{R}_K}\right) \frac{P_{\text{上}}^{K-1}}{\bar{R}_{K-1}} \quad (16)$$

结合式(5)和(16)得:

$$\frac{P_{\text{上}}^K}{\bar{R}_K} + \left(1 - \frac{T_{K-1}}{3.482 * 10^{-3} * V_{K-1} \bar{R}_K}\right) \frac{P_{\text{上}}^{K-1}}{\bar{R}_{K-1}} = 3.482 * 10^{-3} * V_{K+1} P_{\text{轮}}^{K+1} / T_{K+1} \quad (17)$$

考虑到轮胎在  $K$  时刻的压强值  $P_{\text{轮}}^{K+1}$  和轮胎空气质量值  $M_{\text{轮}}^K$  未知, 且轮胎充气过程为一个平缓变化的过程, 轮胎最近邻时刻的空气质量之间变化很小。故采用  $K+1$  时刻轮胎的空气质量值  $M_{\text{轮}}^{K+1}$  来替代  $K$  时刻轮胎的空气质量是合理的。笔者采用  $K+1$  时刻轮胎的空气质量值  $M_{\text{轮}}^{K+1}$  来代替, 如式(17)等式右边所示。这样更加简单、方便, 且计算量较小。此外, 由于气阻为恒定值, 故  $R_k = R_{k-1}$ 。假定从  $k$  时刻到  $K$  时刻为第  $i$  个充测循环的工作周期, 故可将式(17)写成如下的二次方程:

$$a_K \bar{R}_K^2 - b_K \bar{R}_K + c_K = 0 \quad (18)$$

式中:  $a_K = (3.482 * 10^{-3} V_{K+1})^2 P_{\text{轮}}^{K+1} / T_{K+1}$ ;  $b_K = -3.482 * 10^{-3} V_K (P_{\text{上}}^K + P_{\text{上}}^{K-1})$ ;  $c_K = T_{K-1} P_{\text{上}}^{K-1}$ 。

利用二次方程的求解方法得出相应的等价气阻  $R_{i,K}$ :

$$R_{i,K} = \bar{R}_K = (-b_K + \sqrt{b_K^2 - 4a_K c_K}) / (2a_K) \quad (19)$$

假设控制箱总成共执行了  $N$  个充-测-充-测循环的工作周期, 根据轮胎上游传感器测压计算出相应周期的等价气阻值  $R_{i,K}$ 。于是, 等价的气阻标定值  $\hat{R}$  为所有充-测-充-测循环工作周期等价气阻的平均值:

$$\hat{R} = \sum_{i=1}^N R_{i,K} / N \quad (20)$$

### 2.3 轮胎胎压预估

轮胎胎压预估模块主要是基于式(20)循环预估轮胎胎压, 具体执行过程阐述如下: 根据等价的气阻标定值  $\hat{R}$ , 利用式(3)一(5)反求解出轮胎的压强值  $P_{\text{轮}}^k$ :

$$\frac{P_{\text{上}}^k - P_{\text{轮}}^k}{\hat{R}} = (M_{\text{轮}}^k - M_{\text{轮}}^{k-1}) / \Delta T$$

$$\Downarrow$$

$$\frac{P_{\text{上}}^k - M_{\text{轮}}^k * T_k / (3.482 * 10^{-3}) / V_k}{\hat{R}} = \frac{M_{\text{轮}}^k - M_{\text{轮}}^{k-1}}{\Delta T} \quad (21)$$

式中  $k-1$  时刻轮胎的质量  $M_{\text{轮}}^{k-1}$  和轮胎上游的压强  $P_{\text{上}}^k$  已知。根据预标定的等价气阻  $\hat{R}$  可求轮胎内的空气质量  $M_{\text{轮}}^k$ :

$$M_{\text{轮}}^k = \frac{P_{\text{上}}^k + M_{\text{轮}}^{k-1} \times \hat{R} / \Delta T}{1 / \Delta T + T_k / (3.482 \times 10^{-3} \times V_k)} \quad (22)$$

在轮胎初始胎压已知的情况下, 结合预标定的等价轮胎气阻  $\hat{R}$ , 可循环利用式(5)、(19)、(22)实时预估出轮胎胎压。

### 2.4 中央充放气系统胎压自动预估方法

基于以上公式推导, 得到中央充放气系统胎压自动预估方法伪代码及流程, 如图 2 所示。

输入: 采用充-测-充-测循环的工作方式来测量轮胎上游传感器所在位置的压强值  $P_{\text{上}}^k$  以及初始的轮胎胎压值  $P_{\text{轮}}^0$ , 根据式(20)预标定轮胎的等价气阻  $\hat{R}$ ;

**While** 时刻  $k$  需要充气为真时根据预标定的等价气阻  $\hat{R}$ , 实时利用式(3)一(5)、式(18)一(20)反求解出轮胎的压强值  $P_{\text{轮}}^k$ ;

根据求解轮胎的压强  $P_{\text{轮}}^k$  和式(22)计算胎内的空气质量  $M_{\text{轮}}^k$ ;

**End**

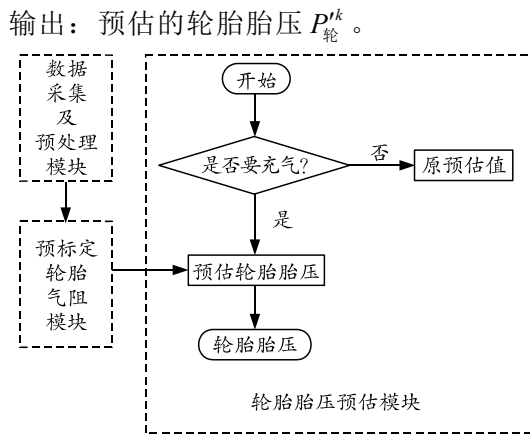


图 2 轮胎胎压预估

### 3 实验场景验证

#### 3.1 实验平台

为验证笔者所提算法的有效性，以某型 6×6 越野汽车为例，搭建如图 3 所示的中央充放气系统。

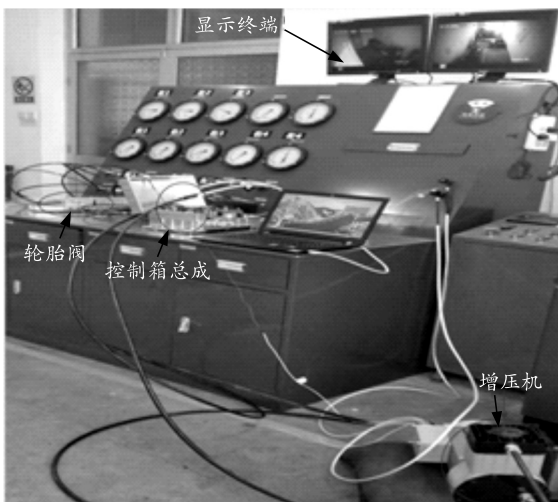


图 3 中央充放气系统

图中系统，单片机的型号为 DSPIC30F5011H，空压机的型号为 HTA-100H，增压机的型号为 JZY1000D。显示终端用于监控空气压缩设和充当储气作用的 7 个 250 L 的气瓶。其中，6 个气瓶充当越野汽车轮胎，1 个气瓶充当气源，实验环境温度为 20 ℃。针对上述实验平台，中央充放气系统处于测压状态时，轮胎上游传感器测量的压强值等于轮胎的胎压值。此外，需要事先采用充-测-充-测循环的工作方式来测量轮胎上游传感器所在位置的压强值，之后根据采集的数据预估轮胎的气阻。在此基础上，基于估算的气阻就可以实时预估轮胎的胎压。

采用本文中的胎压预估算法需事先在初始实验阶段通过不断充-测-充-测的工作模式采集一些离

散的胎压数据，根据采集的初始数据计算出轮胎的气阻。之后，在下次充-测-充-测的过程中，会根据预估的气阻去实时预估轮胎胎压，这是一种实时的胎压预估过程。

需特殊说明的是，实际轮胎因承受载荷，内腔的容积会有所改变，承受不同载荷的轮胎容积也会不同。笔者是针对含内支撑式安全轮胎的越野车进行分析，由于内支撑式安全轮胎含支撑体，越野车内腔的容积受载荷的影响较小，内腔容积的变化近似可以忽略不计，这也为采用 6 个气瓶充当越野汽车轮胎提供了合理的依据。

#### 3.2 实验结果及分析

考虑到中央充放气系统的气路比较复杂，为验证所提算法的普适性，笔者将利用图 3 所示的台架分别给 2 个和 3 个轮胎充气，并记录任意一路轮胎上游传感器处于充-测-充-测循环工作方式下的压强值。根据给轮胎上游传感器测量的压强值，针对给 2 个和 3 个轮胎充气的情形分别得出如图 4 和 5 所示的结果。

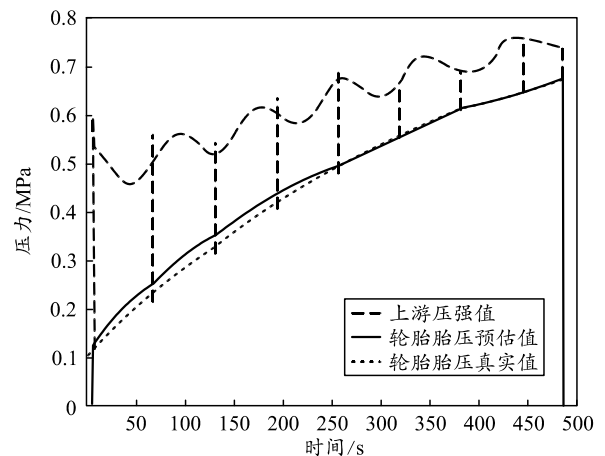


图 4 2 个轮胎胎压预估

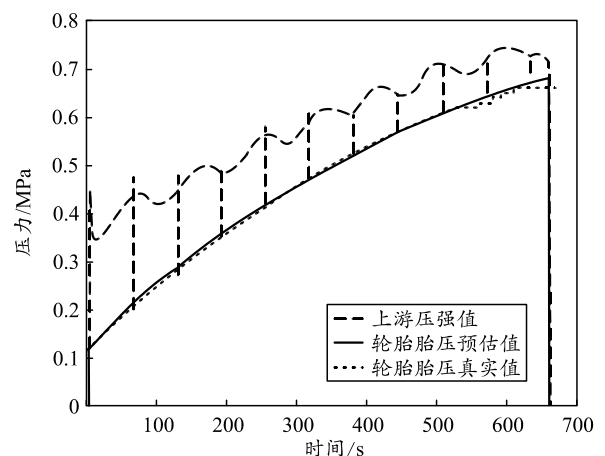


图 5 3 个轮胎胎压预估

从上图可以看出, 笔者所提算法预估的结果都比较贴近真实的胎压数据。与充-测-充-测循环工作方式得出的轮胎胎压数据相比, 笔者所提算法能实时预估出整个充气阶段的胎压值; 此外, 与图 4 和 5 相对应的轮胎胎压预估误差分别为 0.084 3 和 0.078 1 MPa。可见, 笔者所提预估算法是有效的, 且具有较高的估计精度。需特殊说明的是, 由于每个轮胎上游都安装有轮胎上游压力传感器, 所以采用笔者的预估算法对轮胎胎压进行预估的原理是相同的, 都可以得到一样的预估测试结果。笔者为节省空间省略了其他轮胎胎压的预估结果。

#### 4 结论

针对越野汽车充气过程中轮胎胎压难以实时预估的问题, 提出一种中央充放气系统胎压自动预估方法。该方法主要由数据采集及预处理模块、预标定轮胎气阻模块及轮胎胎压预估模块组成; 利用轮胎上游传感器充-测-充-测过程测量其所在位置的压强值; 考虑到测压工况轮胎胎压值等于轮胎上游传感器所在位置的压强值, 预标定轮胎气阻模块利用气动原理推算出轮胎的气阻。在此基础上, 轮胎胎压预估模块利用气动原理循环预估轮胎胎压。最后, 通过实际的轮胎中央充放气系统平台验证了笔者所提算法的有效性, 该方法具有价格低廉、操作简单、实用性强以及充气效率高的优点。

笔者是在恒温、静态、无外界干扰、以气瓶替代实车轮胎等前提条件下进行实验验证, 为了未来在实车上应用, 笔者将进一步结合轮胎承受载荷、轮胎内腔容积、环境温度以及轮胎滚动升温温度与轮胎胎压之间的关系, 通过建立轮胎充放气气路的动力学方程, 兼顾计算量和成本的限制, 深入分析轮胎中央充放气系统的胎压实时预估方法。

#### 参考文献:

- [1] 张占理. 中央轮胎充放气系统及在轮式车辆上的应用[J]. 车辆与动力技术, 2001(1): 1-7.
- [2] 许翔, 李玉兰, 刘刚, 等. 高原环境对军用越野汽车的影响及对策研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(9): 85-89.
- [3] ALGARIN C R, PINTO J, GIRALDO E. Tire pressure monitoring system using an android application[J]. International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology, 2020, 10(5): 1867.
- [4] YI Z R, YANG B, ZHANG W M, et al. Battery-less tire pressure real-time monitoring system driven by an ultralow frequency piezoelectric rotational energy harvester[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 3192-3201.
- [5] 冯秋佳. 基于 HART 通信协议的汽车胎压自动检测系统设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(11): 88-92.
- [6] 李金俊. 一种实时胎压检测系统[J]. 液压气动与密封, 2018, 38(12): 44-46.
- [7] ROBERT S, GUNTHER P, THOMAS R. Comparative analysis of tire evaluation methods for an indirect tire pressure monitoring system (iTPMS)[J]. Sae International Journal of Passenger Cars Mechanical Systems, 2015, 8(1): 1501-1519.
- [8] MARTON Z, FODOR D. New hybrid wavelet and CNN-based indirect tire-pressure monitoring system for autonomous vehicles[J]. Hungarian Journal of Industry and Chemistry, 2020, 48(1): 123-130.
- [9] SILVA A, SANCHEZ J R, GRANADOS G E, et al. Comparative analysis in indirect tire pressure monitoring systems in vehicles[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(5): 54-59.
- [10] FORMENTIN S, ONESTO L, COLOMBO T, et al. h-TPMS: a hybrid tire pressure monitoring system for road vehicles[J]. Mechatronics, 2021, 74(4): 102492.
- [11] GRY S. An experimental test bench for the tire pressure monitoring system discussion of measurement and communication issues[J]. International Journal of Electronics and Telecommunications, 2019, 65(1): 51-56.
- [12] KIM G W. New Indirect tire pressure monitoring system enabled by adaptive extended Kalman filtering of vehicle suspension systems[J]. Electronics, 2021, 10: 1-19.
- [13] 中国北方车辆研究所. 一种组合式油气封装置: CN201910482509. 7[P]. 2019-10-08.
- [14] 中国北方车辆研究所. 一种中央充放气系统的气路结构: CN200910176833. 2[P]. 2011-04-20.
- [15] 成大先, 王德夫, 姬奎生, 等. 机械设计手册(单行本). 气压传动[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 22-31.
- [16] HAN W, PROKOP G, ROSCHER T. Model-based development of iTPMS [M]. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020: 3-5.
- [17] 解来卿, 高树新, 何建清. 军用车辆安全轮胎防护性试验评价[J]. 装甲兵工程学院学报, 2008, 22(2): 46-49.