

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.01.008

空气弹簧系统建模及其高度控制策略*

李子璇¹, 邬明宇², 周福强^{1*}, 危银涛²

(1. 北京信息科技大学 现代测控技术教育部重点实验室, 北京 100192;

2. 清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 现有的空气弹簧系统建模复杂, 并且在空气弹簧系统进行高度控制的过程中容易产生振荡, 针对这些问题, 提出了一种热力学空气弹簧建模方法, 以及基于比例-积分-微分(PID)的空气弹簧高度控制策略。首先, 以空气弹簧系统为研究对象, 采用了热力学分析方法, 建立了以温度、压强为自变量的高精度非线性空气弹簧系统模型; 然后, 设计了空气弹簧高度的 PID 控制策略, 并对上述系统模型进行了验证, 即以质量流量 G 为 PID 控制系统的输入量, 以车辆垂向模型反馈的车身高度等状态量作为控制系统的输出量; 最后, 采用 MATLAB/Simulink, 在不同工况下分别对无 PID 控制和有 PID 控制的策略进行了仿真对比分析。研究表明: 所建立的空气弹簧系统模型可以有效地反映空气弹簧系统的动力学特性, 相比于无 PID 控制器的情况, 采用 PID 控制器的 RMSE 改善率最高可以达到 34.1%; 其控制精度得到了提高, 减小了高度控制过程中产生的振荡, 在实际应用中具有重要意义。

关键词: 空气弹簧; 热力学分析; 高度控制; 空气悬架; 比例-积分-微分控制

中图分类号: TH135; U463.334.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4551(2022)01-0053-06

Modeling of air spring and its height control strategy

LI Zi-xuan¹, WU Ming-yu², ZHOU Fu-qiang¹, WEI Yin-tao²

(1. Key Laboratory of Modern Measurement & Control Technology (Ministry of Education), Beijing

Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. State Key Laboratory of

Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The modeling of the existing air spring system is complex, and it is easy to produce oscillation in the process of height control of the air spring system. In view of these problems, a thermodynamic air spring modeling method and an air spring high degree control strategy based on proportional-integral-differential (PID) were proposed. Firstly, the air spring system was taken as the research object, and the method of thermodynamic analysis was adopted to establish a high-precision nonlinear empty spring model with temperature and pressure as independent variables. Then, the PID control strategy of air spring height was designed, and the above system model was verified: the mass flow G was taken as the input of the PID control system, and the vertical model feedback of the vehicle body height and other state variables were taken as the output of the control system. Finally, the no PID control strategy and PID control strategy were simulated and compared by MATLAB/Simulink under different working conditions. The results show that the established thermodynamic empty spring model can effectively reflect the dynamic characteristics of the empty spring system, and the improvement rate of RMSE in the control process is up to 34.1% compared with the PID controller, which improves the control accuracy, reduces the oscillation in the height control process, which is of great significance in practical application.

Key words: air spring; thermodynamic analysis; height control; air suspension; proportional-integral-derivative (PID) control

收稿日期: 2021-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51761135124, 11672148); 汽车安全与节能国家重点实验室基金资助项目(ZZ2019-021); 清华大学 Z05 专项基金资助项目(2018Z05JZY014)

作者简介: 李子璇(1996-), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事空气悬架高度控制方面的研究。E-mail: Liz960227@126.com

通信联系人: 周福强, 男, 博士, 硕士生导师。E-mail: fuqiangzhou@126.com

0 引 言

作为车辆底盘系统的重要组成部分,悬架系统连接着车架和车桥,并传递两者之间的力和力矩^[1]。悬架系统在汽车行驶的过程中扮演着重要角色,它影响着车辆行驶的安全性、乘客乘坐的舒适性和驾驶员操纵的稳定性^[2]。

近年来,空气悬架逐渐成为悬架系统一种新的发展方向,并且已经在大客车和重型载货车上得到了广泛的应用。而空气弹簧的高度控制也逐渐成为一个热点问题,因此受到了业界的广泛关注。

空气弹簧的精确控制需要精确的动力学模型^[3-5]。李雪冰等人^[6]运用虚功原理,推导出了空气弹簧充气结构的有限元方程,提出了空气弹簧多变过程的有限元分析模型。孙丽琴等人^[7]提出了一种带连接管路附加气室的空气弹簧有限元模型。徐兴等人^[8]提出了一种全主动的电控空气弹簧充放气的动态数学模型,并对该模型进行了特性仿真分析。宋宇等人^[9]运用拉格朗日方程方法,建立了空气弹簧多刚体模型。BERG M 等人^[10]提出了一种基于实验数据的空气弹簧辨识模型。

但是以上这些动力学模型需要依靠数据的拟合或经验来确定参数,因此前期需要大量的实验数据,其拟合过程也较为复杂;同时,这些动力学模型不能够准确地反映空气弹簧气室的充放气过程。

对空气弹簧的高度进行控制,需要满足响应速度快、控制精度高等特性。江洪等人^[11]以及 PRABU K 等人^[12]提出了一种空气弹簧高度的 PID 控制策略。KIM H 等人^[13]运用滑膜自适应控制技术,对空气弹簧的车身高度进行了控制,并对空气弹簧系统进行了仿真。徐兴等人^[14]结合空气弹簧的动力学模型,分析了空气弹簧系统振荡现象的来源,并提出了一种变速积分式 PID 控制策略。GAO Z 等人^[15]运用静态车辆高度调整平衡位置的状态观测算法,提出了一种模糊控制策略。MA X 等人^[16]针对整车提出了一种模型预测控制策略。CHEN Y 等人^[17]提出了一种线性二次最优控制策略。SHAN H Y 等人^[18]及 LI H 等人^[19]提出了一种基于模糊神经网络的算法。

另外,在对空气弹簧的高度进行控制方面,反演控制^[20]、 H_∞ 控制^[21]等也都得到了应用。这些控制方法大都取得了较好的控制效果,但控制策略比较复杂,不便于实际的应用。

针对以上问题,笔者运用热力学分析的方法,结合牛顿力学、流体力学等,建立不依赖于多方变化规律,

充分考虑各种能量变化的空气弹簧非线性模型,并建立四分之一车辆模型;在上述控制模型的基础上运用 PID 控制理论,通过 MATLAB/Simulink 联合仿真,以验证模型和控制策略的有效性。

1 空气弹簧系统模型的建立

1.1 气路系统原理

某汽车空气弹簧系统的气路结构图如图 1 所示。

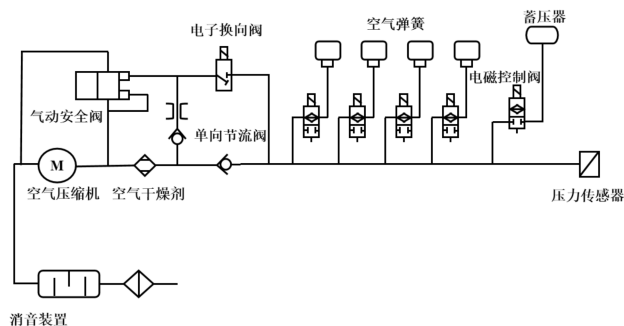


图 1 空气弹簧系统气路结构图

空气弹簧包括:空气压缩机、蓄压器、空气弹簧、电磁控制阀等主要部分。

空气弹簧的充放气过程是一个封闭回路,通过电磁阀来进行充放气的切换。当车身需要升高时,打开高压气源控制阀以及空气弹簧电磁阀,蓄压器内高压气源流入气室中,空气弹簧充气;当车身需要降低时,空气弹簧电磁阀打开,气室内的气体流出,空气弹簧放气。

空气弹簧系统利用控制电磁阀以及气源控制阀,来控制空气弹簧的充、放气,以此来形成闭环空气弹簧系统。

笔者以四分之一车辆空气弹簧系统作为研究对象,可以很好地反映车辆的垂向振动。

四分之一车辆系统基本结构如图 2 所示。

1.2 气路模型的建立

采用热力学方法进行分析时,不需要多变指数,且采用的是确定的空气比热容比 1.4,不需要复杂的过程来确定参数。采用热力学第一定律,可以清楚地反映出不同物理过程对应的能量变化。

笔者以气室内的气体作为控制体,对气体状态方程进行微分:

$$p_1 \dot{V}_1 + \dot{p}_1 V_1 = \dot{m}_1 R T_1 + m_1 R \dot{T}_1 = G R T_1 + m_1 R \dot{T}_1 \quad (1)$$

式中: p_1 —气室内绝对压强; V_1 —气室内体积; m_1 —气室内质量; T_1 —气室内温度; R —气室内气体状态常数; G — m_1 的变化率,即外界输入气体的质量流量,充

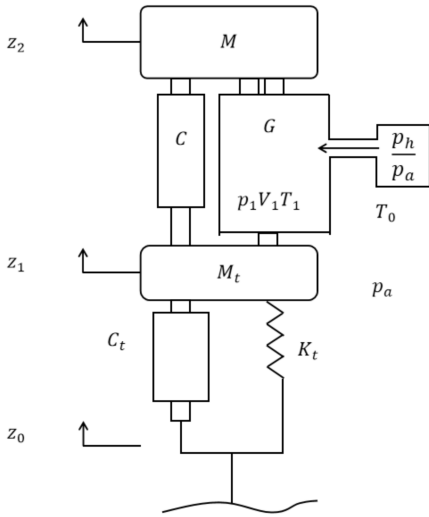


图2 四分之一车辆二自由度模型

M —悬挂质量; M_t —非悬挂质量; C —减振器阻尼系数; C_t —轮胎的等效阻尼; K_t —轮胎的等效刚度; G —外界输入控制体的质量流量; p_1 —气室内绝对压强; p_a —大气压; p_h —高压气源气压; T_0 —大气温度; T_1 —气室内温度; V_1 —气室内体积; z_2 —悬挂质量位移; z_1 —非悬挂质量位移; z_0 —路面激励位移

气时为正,放气时为负,无控制指令时为0。

根据热力学第一定律:

$$dQ + dW + dH = dU \quad (2)$$

式中: dQ —外界传递给气室的热量; dW —外界对气室内气体所做的功; dH —外界输入气体质量所带来的能量; dU —气室内气体内能的增加量。

其中:

$$\begin{cases} dQ = K_h(T_0 - T_1) dt \\ dW = -p_1 dV_1 \\ dH = dm_1 C_p T_{1c} \\ dU = dm_1 C_v T_1 + m_1 C_v dT_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_h —气室的导热系数; C_p —空气的定压比热容; T_{1c} —气室与管路连接处的温度; C_v —空气的定容比热容。

将式(3)代入式(2)中,并除以 dt 可得:

$$K_h(T_0 - T_1) - p_1 \dot{V}_1 + GC_p T_{1c} = GC_v T_1 + m_1 C_v \dot{T}_1 \quad (4)$$

结合公式(1),假设 $T_1 = T_{1c}$,便可以得到空气弹簧的微分方程:

$$\begin{cases} \dot{p}_1 = [K_h(\gamma - 1)(T_0 - T_1) - \gamma p_1 \dot{V}_1 + \gamma RT_1 G]/V_1 \\ T_1 = (\gamma - 1)[K_h(T_0 - T_1) - p_1 \dot{V}_1 + T_1 GR]/(m_1 R) \\ F_{AS} = (p_1 - p_a)A \end{cases} \quad (5)$$

式中: F_{AS} —气囊产生的作用力; A —空簧气室作用力与气室内相对压强的比值; γ —空气的比热容比; R —理想气体常数。

由于气室的几何性质也会影响动力学特性,气室体积与有效面积对高度的变化规律为:

$$\begin{cases} V_1 = V_{10} + V_h(z_2 - z_1) \\ A = A_0 + A_h(z_2 - z_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: V_{10} —初始状态下气室的体积; A_0 —初始状态下气室的有效面积; V_h —体积随高度的变化率; A_h —有效面积随高度的变化率。

1.3 四分之一车辆模型的建立

直接控制车身高度的质量流量 G 与气路连接管路模型密切相关。管道内流体的流动如图3所示。

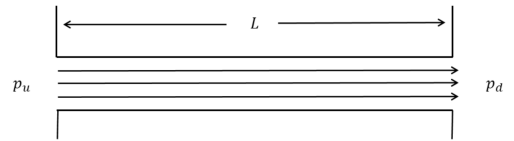


图3 管道简化模型图

图3中,气流从上流高压 p_u 处流向下流低压 p_d 处。

连接空气弹簧和蓄压器管路的流动特性非常复杂,笔者将其简化为一个等效的节流孔,用公式表示为:

$$G = (p_u - p_d)C_1 \quad (7)$$

式中: C_1 —节流孔等效系数。

根据四分之一二自由度车辆模型,笔者建立了动力学方程如下:

$$\begin{cases} M\ddot{z}_2 + C(\ddot{z}_2 - \ddot{z}_1) + Mg - (p_1 - p_a)A = 0 \\ M_t\ddot{z}_1 + C_t(\dot{z}_1 - \dot{z}_0) + K_t(z_1 - z_0) = C(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + Mg - (p_1 - p_a)A \end{cases} \quad (8)$$

式中: M_t —非悬挂质量; C —减振器阻尼系数; C_t —轮胎的等效阻尼; K_t —等效刚度; M —簧下质量; z_0 —路面激励。

笔者结合公式(5~8),假设充放气过程中,气室内的气体很快到达均一状态;并且考虑到现实问题,假设车高调节过程中温度与大气温度近似相等。

经过简化其动力学模型,可以得到四分之一车辆模型的动力学方程为:

$$x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T = (z_2 - z_1, z_1 - z_0, \dot{z}_2, \dot{z}_1, p_1)^T \quad (9)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3 - x_4 \\ \dot{x}_2 = x_4 - q \\ \dot{x}_3 = -C(x_3 - x_4)/M - [Mg - (x_5 - p_a)A]/M \\ \dot{x}_4 = [Mg - (x_5 - p_a)A]/M_t + C(x_3 - x_4)/M_t - K_t x_2/M_t - C_t(x_4 - q)/M_t \\ \dot{x}_5 = -\gamma \dot{V}_1 x_5/V_1 + \gamma RTG/V_2 \end{cases} \quad (10)$$

2 空气弹簧高度 PID 控制策略

2.1 PID 控制

PID 控制策略具有结构简单、稳定性高、易于操作等优点。在控制对象较为复杂的情况下可以采用 PID 控制策略。

PID 控制器系统原理框图如图 4 所示。

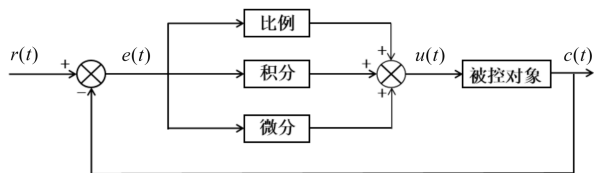


图 4 PID 控制器系统原理框图

图 4 中,误差信号 $e(t)$ 为给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 的差值,用公式表示为:

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (11)$$

笔者对误差信号 $e(t)$ 分别进行比例(P)、积分(I)和微分(D)的组合控制,控制器的输出量作为被控对象的输入量。

其基本控制规律为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (12)$$

式中: K_p —比例系数; T_i —积分时间常数; T_D —微分时间常数。

2.2 控制策略

空气弹簧的闭环控制基本逻辑图如图 5 所示。

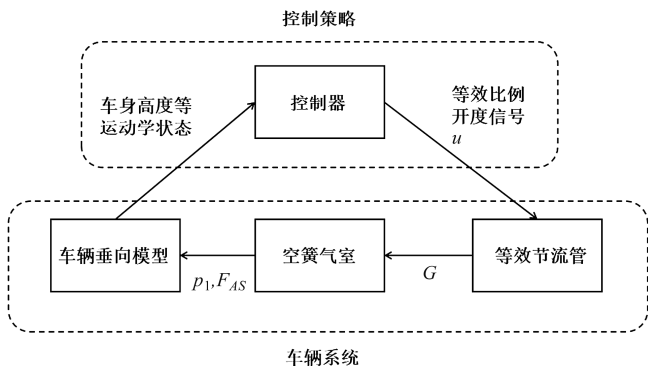


图 5 空气弹簧闭环控制基本逻辑图

图 5 中,笔者以节流电磁阀的等效比例开度信号 u 作为系统的输入量,车辆垂向模型反馈的车身高度等状态量作为系统的输出量,改变气室内气体的体积,以此来对车身高度进行控制;

由等效节流管模型转化为气流质量流量 G ,通过电磁阀间接实现对 G 的控制。 u 取值 0 或 1,当 $u = 0$

时,相当于电磁阀关闭, $G = 0$;当 $u = 1$ 时,相当于电磁阀打开, $G = \Delta P \cdot C$ 。

u 可以通过改变调制波占空比来实现,短时间的脉冲会影响电磁阀使用寿命;输出控制量时设置一个死区,可以减小电磁阀的损耗。

3 仿真与结果分析

为了验证四分之一车辆模型和控制策略的有效性,笔者利用 MATLAB/Simulink 仿真平台建立空气弹簧动力学模型,并对其进行联合仿真。

仿真输入参数和 PID 控制参数如表 1 所示。

表 1 仿真车辆输入参数和 PID 控制参数

参数/单位	数值
M/kg	550
M_t/kg	40
$K_t/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1.9×10^5
$C_t/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	20
$C/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	6 000
A_0/m^2	1.09×10^{-2}
V_{10}/m^3	2.30×10^{-3}
V_h/m^2	1.09×10^{-2}
P_h/Pa	1×10^6
A_h/m	-0.743×10^{-3}
充气 PID 参数	200/1/7
放气 PID 参数	400/1/5

仿真过程是针对车辆行驶于 C 级路面时,对其进行高度调节。在初始高度的基础上,笔者设置先升高 20 mm,再下降 20 mm,再下降 20 mm,最后再升高 20 mm 的控制操作。

采用路面滤波白噪声模型,可以得到随机路面的激励曲线。车速选择为 50 km/h 时,仿真曲线如图 6 所示。

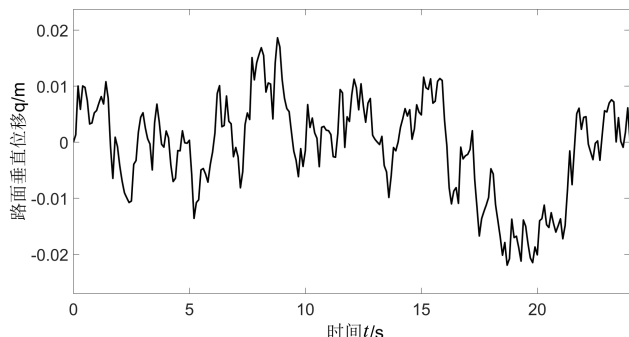
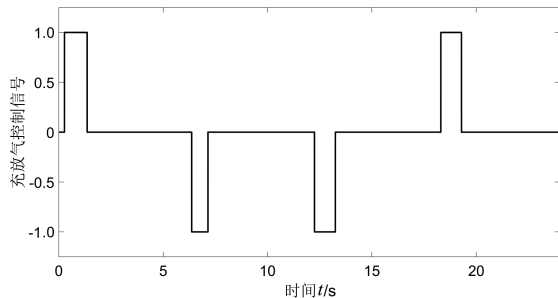
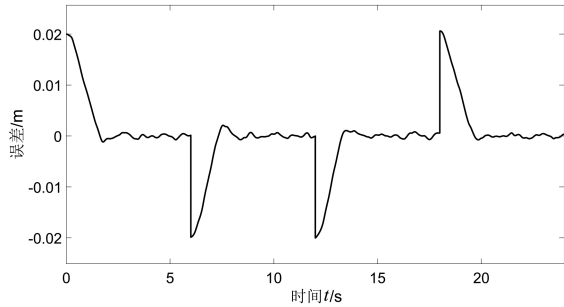


图 6 C 级路面车速 50 km/h 激励曲线

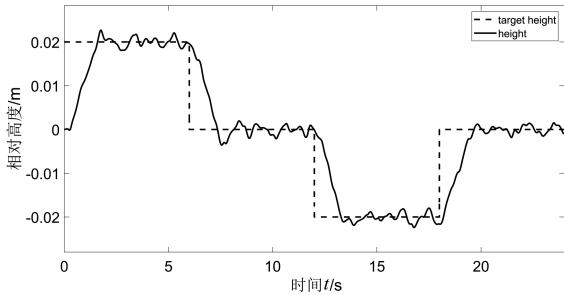
车辆高度控制过程中的仿真情况如图 7 所示。



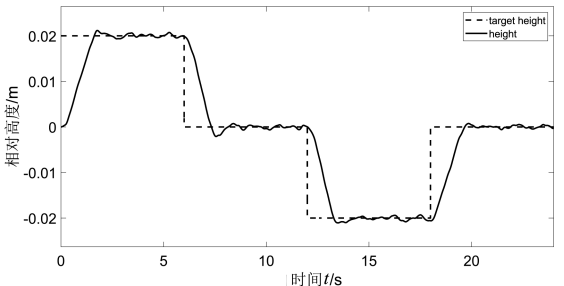
(a) PID动态控制充放气信号



(b) 高度控制误差情况



(c) 无控制动态高度情况



(d) PID控制动态高度控制情况

图7 车辆高度控制仿真情况

在动态高度控制仿真中,相比于无PID控制和有PID控制的结果,车身平衡位置稳定后的高度误差均方根值(RMSE)为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N [err(k)]^2}{N}} \quad (13)$$

式中: N —工况结束后车身平衡位置稳定时间段采样点个数; $err(k)$ —第 k 个采样点对应高度与目标高度的偏差。

不同工况下,无PID控制和PID控制的RMSE值如表2所示。

表2 车身位置稳定后高度 RMSE

仿真工况	悬架类型	RMSE/mm
第一次上升	无PID控制	5.1
	PID控制	4.6
第一次下降	无PID控制	2.7
	PID控制	2.4
第二次下降	无PID控制	4.1
	PID控制	2.7
第二次上升	无PID控制	2.8
	PID控制	1.9

表2结果表明:

在第一次上升、第一次下降、第二次下降和第二次上升4种工况下, RMSE的改善率分别为9.8%、11.1%、34.1%和32.1%;

通过对比可知:采用PID控制策略的高度误差均方根值更小,控制精度有所提升;相比于无PID控制器的情况,采用PID控制器RMSE改善率最高可以达到34.1%。该结果表明,其控制精度得到了提高。

4 结束语

通过采用热力学分析的方法,笔者建立了不需要依靠数据拟合或经验确定的空气弹簧模型,在PID控制方法的基础上设计了车身高度调节控制器,并对控制器的控制效果进行了仿真分析。

主要结论如下:

(1)所建立的以温度、压强为自变量的高精度非线性空气弹簧模型,可以准确地描述空气弹簧的非线性动力学特性;由于热力学是自然界普遍存在的规律,在空簧模型方程中所使用的自变量是通用的,该结果具有普适性;

(2)由无PID控制和有PID控制的对比结果可知,相比于无PID控制器的情况,采用PID控制器RMSE改善率最高可以达到34.1%;其控制精度得到了提高,在实际应用中具有重要意义。

在下一阶段的研究过程中,笔者将继续对热力学空气弹簧模型进行优化,对节流孔部分进行细致分析,以得到更加完备的空气弹簧气室模型;同时,在控制方面,将模糊PID控制与变速PID/PWM控制策略应用到热力学分析的空气弹簧气室模型上,以对其控制策略进行更加深入的研究。

参考文献 (References):

- [1] 喻凡. 车辆动力学及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

- [2] 何二宝,杜群贵,冯元元. 电控空气悬架车身高度调节的模糊 PID 控制[J]. 机床与液压,2012,40(5):86-88.
- [3] LI X B, HE Y, LIU W Q, et al. Research on the vertical stiffness of a rolling lobe air spring[J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Parts F: Journal of Rail & Rapid Transit**,2016,230(4):1172-1183.
- [4] 高红星,池茂儒,朱旻昊,等. 空气弹簧模型研究[J]. 机械工程学报,2015,51(4):108-115.
- [5] ZHU H, YANG J, ZHANG Y. et al. Nonlinear dynamic model of air spring with a damper for vehicle ride comfort [J]. **Nonlinear Dynamics**,2017,89(2):1545-1568.
- [6] 李雪冰,曹金凤,危银涛. 空气弹簧多变过程的有限元模拟[J]. 工程力学,2019,36(2):224-228.
- [7] 孙丽琴,李仲兴,沈旭峰. 带附加气室空气弹簧动态特性仿真与试验研究[J]. 机械设计与制造,2013(9):158-161.
- [8] 徐 兴,陈照章,黄俊明,等. 电控空气悬架充放气的动态建模及特性仿真[J]. 系统仿真学报,2011,23(6):1225-1228.
- [9] 宋 宇. 空气悬架车辆车身高度 PID 控制的仿真研究[J]. 湖北汽车工业学院学报,2007(2):1-4.
- [10] BERG M. A three-dimensional air spring model with friction and orifice damping[J]. **Vehicle System Dynamics**, 1999,33(1):528-539.
- [11] 江 洪,杨勇福,王玉杰,等. 气路闭环互联空气悬架车高控制与能耗特性试验[J]. 中南大学学报:自然科学版,2017,48(1):270-276.
- [12] PRABU K, JANCIRANI J, JOHN D, et al. Vibration control of air suspension system using PID controller[J]. **Journal of Microengineering**,2013,15(1):132-138.
- [13] KIM H, LEE H. Height and leveling control of automotive air suspension system using sliding mode approach [J]. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**,2011,60(5):2027-2041.
- [14] 徐 兴,陈照章,李仲兴,等. ECAS 客车车身高度调节建模及其控制研究[J]. 汽车技术,2009(11):42-46.
- [15] GAO Z, CHEN S, ZHAO Y, et al. Height adjustment of vehicles based on a static equilibrium position state observation algorithm[J]. **Energies**,2018,11(2):455.
- [16] MA X, WONG P K, ZHAO J, et al. Design and testing of a nonlinear model predictive controller for ride height control of automotive semi-active air suspension systems [J]. **IEEE Access**,2018(6):63777-63793.
- [17] CHEN Y, HE J, KING M J, et al. Stiffness-damping matching method of an ECAS system based on LQG control [J]. **Journal of Central South University**,2014,21(1):439-446.
- [18] SHAN H Y. Vehicle height control of automotive air suspension system using fuzzy neural network approach [J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2015, 727-728: 781-784.
- [19] LI H, TANG C, YANG D, et al. Simulation of Semi-Active Air Suspension Based on Neural Network-Adaptive Control Algorithm [C]. International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Portugal: [s. n.],2009.
- [20] ZHAO R, XIE W, WANG P K, et al. Adaptive vehicle posture and height synchronization control of active air suspension systems with multiple uncertainties [J]. **Nonlinear Dynamics**,2020,99(3):2109-2127.
- [21] PORUMAMILLA H, KELKAR A Mixed-Sensitivity H_{∞} Control and μ Analysis of Active Automobile Suspension [C]. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Portugal:[s. n.],2004.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

李子璇,邬明宇,周福强,等. 空气弹簧系统建模及其高度控制策略[J]. 机电工程,2022,39(1):53-58.

LI Zi-xuan, WU Ming-yu, ZHOU Fu-qiang, et al. Modeling of air spring and its height control strategy [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022,39(1):53-58.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>