

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.08.015

宽温域乘用车空气弹簧动力学建模与控制*

周恩临^{1,3}, 何梦圆¹, 赵启航¹, 何智成¹, 黄晋²(1. 湖南大学机械与运载工程学院, 长沙 410082; 2. 清华大学车辆与运载学院, 北京 100084;
3. 湖南工程学院机械工程学院, 湘潭 411104)

[摘要] 目前,空气悬架在不同的车型上的装配比例越来越高,然而,整车性能的空气悬架匹配主要基于定常温下开展,很少考虑宽温域下空气悬架的控制性能。针对宽温域服役范围内乘用车的空气悬架高度控制问题,本文从空气弹簧的静态特性入手,提出了一种宽温域空气弹簧的表征模型,并模拟乘用车在非运动状态下悬架系统高度控制进行了仿真与试验,实现了车辆在宽温域下的服役性能提升。首先,通过不同温度的试验数据建立了宽温域空气弹簧模型,充分考虑了温度对橡胶以及气体的影响。其次,提出了一种基于在线线性二次调节器法(LQR)的空气悬架控制算法,该模型考虑了温度对气囊参数的影响规律。最后,在宽温域条件下验证控制器的鲁棒性。仿真与试验结果表明,考虑宽温域服役的新型控制器能够实现车身高度达到目标高度并且避免出现振荡,具有良好的稳定性和鲁棒性。

关键词: 空气悬架; 宽温域; 在线线性二次调节器法; 高度控制

Modeling and Control of Air Spring Dynamics in Wide Temperature Range Passenger Vehicle

Zhou Enlin^{1,3}, He Mengyuan¹, Zhao Qihang¹, He Zhicheng¹ & Huang Jin²1. School of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082;
2. School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084;
3. College of Mechanical Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104

[Abstract] At present, the assembly ratio of air suspension in different vehicle models is increasing, however, the air suspension matching of vehicle performance is mainly carried out based on the constant ambient temperature, and the control performance of air suspension in wide temperature range is rarely considered. For the problem of air suspension height control of passenger cars in wide temperature range, this paper proposes a wide temperature range air spring characterization model from the static characteristics of air springs, and simulates the height control of the suspension system of passenger cars in the non-motion state to carry out simulation and experiments, so as to realize the improvement of the service performance of the vehicle in the wide temperature range. Firstly, a wide temperature domain air spring model is established by wide temperature domain test data, which fully considers the influence of temperature on rubber and on gas. Secondly, an air suspension control algorithm based on the online linear quadratic regulator method (LQR) is proposed, which takes into account of the influence of temperature on airbag parameters. Finally, the robustness of the controller is verified under wide temperature domain conditions. Simulation and experiments show that the controller can control the body height to reach the target height and avoid oscillations under wide temperature range, with good stability and robustness.

Keywords: air suspension; wide temperature domain; online linear quadratic regulator method; height control

* 国家自然科学基金(52202467)和国家重点研发计划项目(2022YFB3403202)资助。

原稿收到日期为2024年01月23日,修改稿收到日期为2024年03月05日。

通信作者:何智成,教授,博士,E-mail:hezicheng0815@163.com。

前言

随着新能源汽车的飞速发展,新能源汽车的悬架性能需求也在发生改变。由于新能源汽车电池带来的质量增加,需要更硬的弹簧刚度或更大的压缩行程以支撑底盘。传统螺旋弹簧在刚度匹配与舒适性设计方面局限性很大,而空气悬架的刚度曲线可以自由设计,不仅能给车提供合适的刚度,同时提高了舒适度^[1-2],因此在新能源汽车中的应用越来越广泛。然而由于我国南北跨纬度广,容易产生高寒和极热等特殊环境,导致空气悬架实际服役的温度范围宽。在宽温域服役条件下,空气悬架中橡胶部件的刚度特性会随着温度的变化而发生大范围的波动,给整车的性能带来了较大的变化。因此,有必要对空气悬架在宽温域服役条件下的汽车悬架控制进行研究,进而保障车辆在宽温域下的有效服役性能。

要实现空气悬架的控制,首先要完成空气弹簧高精度建模^[3]。目前常用的空气弹簧建模方法包括等效力学模型^[4]、几何建模方法^[5]、热力学方法^[6]等,其中,气囊的结构^[7]、有效面积及其变化率^[8]、气囊有效容积变化率^[9]等参数影响较大。Fox等^[10]提出了由绝热气体体积、考虑橡胶和活塞之间摩擦的摩擦元件以及速度相关的阻尼项组成的半经验空气弹簧数学模型,但所建立模型并不适用于囊式的空气弹簧。Lee^[11]基于热力学对空气弹簧进行建模,对模型进行分析得出弹簧刚度与空气弹簧体积的关系,发现传热以及空气质量与有效面积密切相关。随后Bruni等^[12]在此基础上对模型进行改进,着重考虑了空气气囊、附加气室以及惯性力。纵观上述研究发现^[6-13],在特定的温度下,空气悬架建模方法相对成熟,然而还未考虑温度对橡胶气囊结构影响因素。

在空气悬架的控制方面,也有很多的学者开展了相关的研究。Liang等^[14]提出了一种最优控制方法来建立半车悬架的非线性动力学模型并进行了仿真验证。殷春芳^[15]研究了高度调节过程中的“过充”、“过放”和振荡等问题,针对性提出并仿真验证了基于有限时间的控制方法。然而,上述学者的控制策略主要是针对恒温条件下整车的平顺性和操纵稳定性开展的研究,并没有考虑空气悬架在不同温度服役时所产生的刚度区间变化问题以及对汽车性能的影响。

由于我国南北温差较大,考虑极限温度范围内的空气弹簧的建模与控制具有重要的实际意义。空

气悬架系统根据空簧囊体结构分为膜式、囊式和复合型空气弹簧。由于囊式空气弹簧质量轻、结构简单、价格便宜,在车辆中应用广泛,考虑到宽温域环境服役下,温度对于橡胶的影响较大,其结构能更加明确表征空气悬架系统在各典型温度环境下的状态,因此本文中选取囊式空气弹簧中经典的双曲囊弹簧作为研究对象。

本文充分考虑温度对空气弹簧的影响,进行了宽温域空气弹簧的零件力学特性试验及动力学建模。从空气弹簧静态力学特性研究入手,选取乘用车调节空气悬架的静态调节典型工况——车身高度调节,提出一种基于在线线性二次调节器法(LQR)的空气悬架控制算法,最后通过仿真与台架试验来验证本文建立的宽温域模型和控制策略的效果。

1 宽温域空气悬架系统模型

空气悬架控制器的设计依赖其数学模型,该数学模型可体现系统实际行为特征。为能够准确掌握配置空气悬架车辆车身高度调节系统的运动规律,对宽温域的空气悬架进行建模。由于本文选取的双曲囊弹簧作为研究对象,在宽温域下等效作用面积和体积变化大,因此,本节基于试验数据考虑温度对橡胶囊体的影响,并将温度对囊体的影响因素转换为“等效作用面积”(此处气囊的“等效作用面积”并非气囊实际横截面积),实现整个空气悬架系统模型的建立。

1.1 空气弹簧等效作用面积模型理论

根据气囊力与气压平衡关系可知,空簧内充气气压与气囊等效面积的乘积为空气压缩力,不同的等效面积下达到平衡时气压也会变化。本节将根据试验所得的静刚度数据建立与作用面积和体积之间的关系。对空簧囊体进行分析,其垂向力如图1所示。在静止状态根据气囊内外力平衡条件,其外部垂向力与气囊内空气压缩力、气囊结构力相平衡。

图中 F_w 是橡胶气囊外部垂向力, F_A 为橡胶气囊内部压缩空气力, F_f 为气囊囊体变形所产生的结构力,由于气囊囊体变形力相对于囊内气体压缩力影响较小,此处可忽略。根据空气悬架平衡位置时外部载荷 F_w 对空簧垂向位移(即高度) h 求导,可得空簧垂向静刚度的表达式^[16]为

$$K_A = \left[p_0 \left(\frac{V_0}{V_e} \right)^k - p_{dq} \right] \frac{dA_e}{dh} - kA_e p_0 \frac{V_0^k}{V_e^{k+1}} \cdot \frac{dV_e}{dh} \quad (1)$$

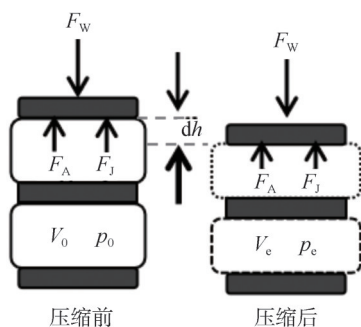


图1 空气气囊受力图

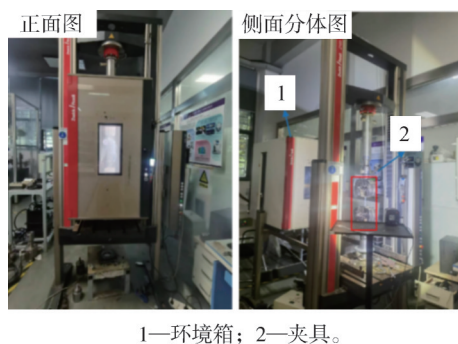
式中: $\frac{dA_e}{dh}$ 为有效作用面积变化率; $\frac{dV_c}{dh}$ 为体积变化率; p_c 为气囊内部气体压力; p_0 为气体初始压力; V_c 为空气弹簧的容积。

根据式(1)可得,空气弹簧压缩空气刚度非线性特性与空气弹簧有效面积相关。在不同的温度下,其刚度特性受温度影响较大,而刚度表达式中的有效面积参数无法直接测量,因此采用试验得到的空气弹簧刚度特性数据对宽温域下空气弹簧有效面积进行计算。

1.2 空气弹簧静态特性试验

首先根据我国南北气候差异以及车辆冬标、夏标的环境温度设定配备空气弹簧的车辆服役环境温度范围为 $[-40\text{ }^\circ\text{C}, 40\text{ }^\circ\text{C}]$ 。为了得到空气弹簧在各种温度环境下的力学特性曲线,须开展双曲囊空气弹簧在各种典型温度下零部件静弹性特性试验。

本试验所用设备为ZwickRoell电子万能试验机,该试验装置与试验情况如图2所示。试验条件为在特定的气囊压力下,空气弹簧从固定高度向下压缩60 mm。该试验机的工作最大载荷为100 kN,温箱温度控制范围 $[-80\text{ }^\circ\text{C}, 250\text{ }^\circ\text{C}]$,温度相对误差 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$,试验速度范围0.000 1~1 500 mm/min,可以满足本气囊试验要求。



1—环境箱; 2—夹具。

图2 ZwickRoell环境箱万能试验机

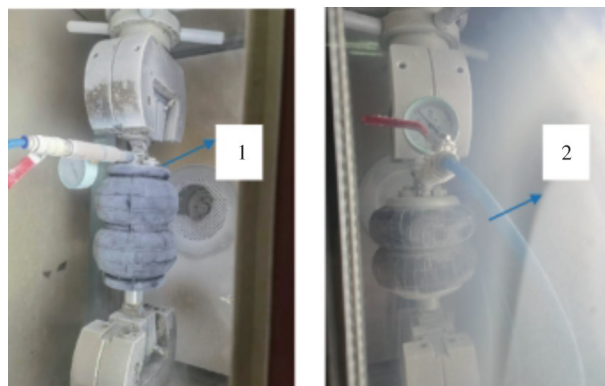
为了实现不同温度下空气弹簧的压缩试验,本试验环境箱温度分别设置 -40 、 -10 、 0 、 15 和 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 5组温度进行不同温度下弹簧试验,且每组温度下此静态变压试验均对气囊设置0.2~0.6 MPa共5组不同压力,总计进行25组次相应试验。为保证本试验结果不受空气弹簧个体制造因素及单次试验条件影响,选取2组同规格不同批次空气气囊作为试验对象,且保证每组试验用气囊重复3次不同温度气压下相应试验,试验结果取均值,每轮试验均在温度变化前后做了气压测试,并实时补气,保证低温造成的压降不影响结果。试验对象如图3所示。



1—不同批次同规格气囊对比; 2—试验中气囊更换。

图3 不同批次同规格试验用空气气囊对比

本试验低温下(以 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 为例)气囊压缩前后变化图如图4所示。

1— $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 空簧最高位置; 2— $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 空簧最低位置图4 环境箱 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 时空气弹簧等温变压试验对比

记录每组典型温度下,初始气压0.2至0.6 MPa时试验前后气压变化情况。根据宽温域范围空气弹簧5组不同温度下的试验结果分为两组:极限温度下 $[-40\text{ }^\circ\text{C}, 40\text{ }^\circ\text{C}]$ 和典型温度下 $[-10\text{ }^\circ\text{C}, 0\text{ }^\circ\text{C}, 15\text{ }^\circ\text{C}]$ 分别进行对比,并绘制空气悬架等温等压特性试验弹簧力与位移关系图以及空气弹簧静刚度与位移关

系图,结果如图5(a)~图5(d)所示。为了更进一步说明温度与弹簧静态力学试验的关系,选取气囊初

始充气压力为0.2、0.6 MPa的2组气压下空气悬架在不同温度下的静刚度对比,如图5(e)所示。

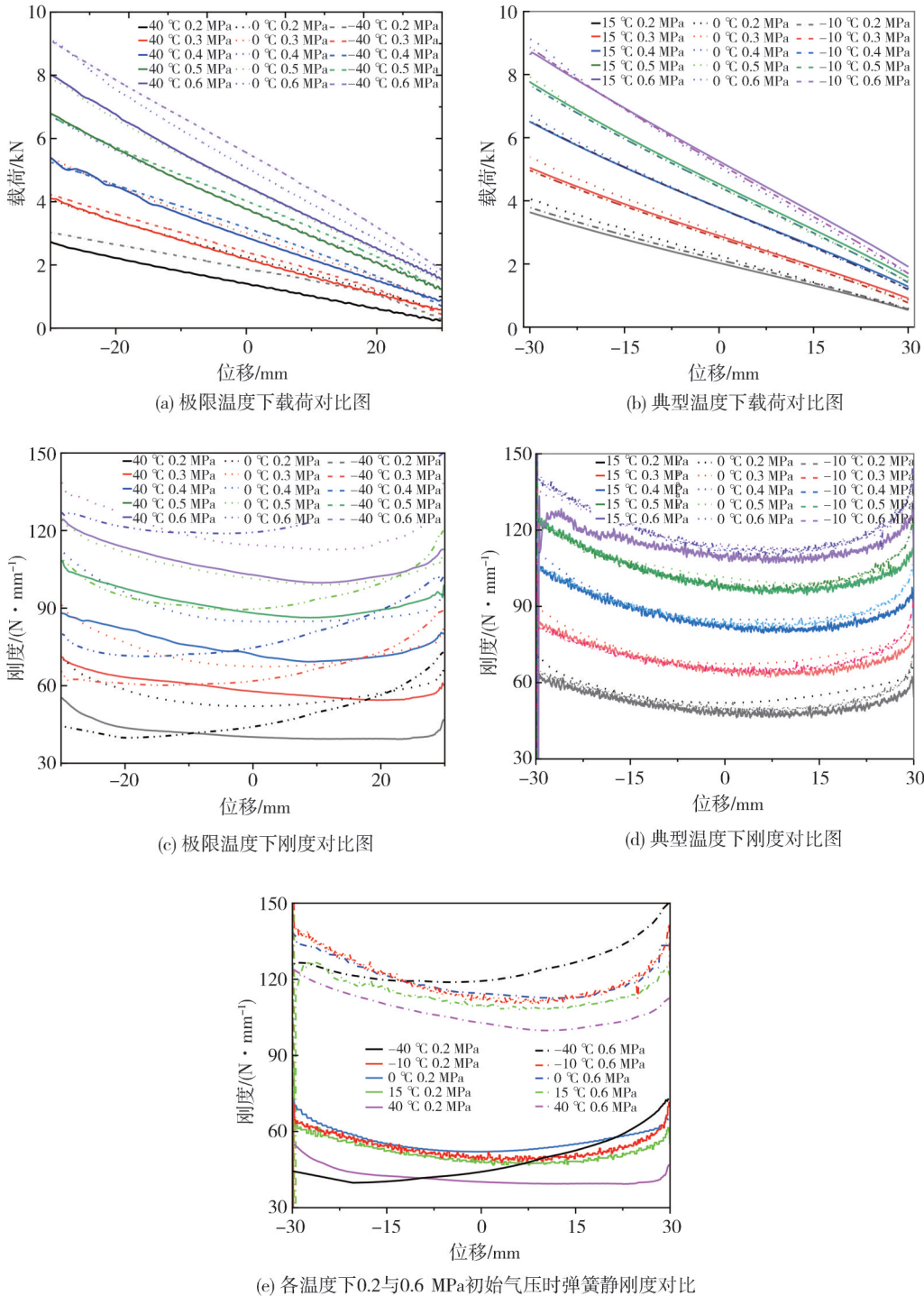


图5 空气弹簧宽温域静态特性试验

从图5(a)和图5(b)载荷对比可以看出,极限温度组中气囊载荷变化较大,而典型温度组气囊载荷较为接近,尤其是-40℃时气囊载荷较高,而在40℃时载荷较低;图5(c)和图5(d)分别为与载荷相对应

的极限温度组和典型温度组气囊刚度情况,图中同样呈现出在极限组不同温度下刚度差异较大,在典型温度组则刚度存在差异但走势一致。如图5(c)中气囊在0与40℃时垂向静刚度变化趋势一致,随位

移变化呈两边高中间低的情况。从图5(e)可知,在相同气压条件下,除 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时弹簧刚度特性随位移变化呈上升趋势外,其他温度下其垂向静刚度走势一致,刚度值则有较大差异。图5表明,空气悬架力学特性随温度变化,其刚度及载荷均有较大变化。

基于空气弹簧静态特性试验数据,通过式(1)计算可得到多组不同温度下空气弹簧随气压及气囊压缩量变化时的空气弹簧“等效作用面积”数值, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的等效作用面积如图6所示。

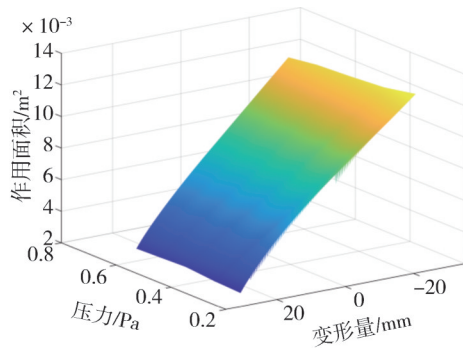


图6 温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作用面积

本节根据宽温域下空气气囊静弹性特性试验数据计算出了宽温域空气弹簧“等效面积和体积”模型,由此完成了空气悬架整个系统的模型建立,为后续宽温域空气悬架控制系统模型的建立提供了依据。

2 1/4 空气悬架宽温域服役下升降控制

相对于传统的空气悬架车身高度调节控制,本文充分考虑了温度对空簧的影响,建立了基于空气悬架主动控制的热力学模型,并将温度作为模型参数输入给控制器。本文控制模型由基于单轮(车轮)的1/4空气悬架组成,为实现单轮车高的调节与控制,先进行单轮车高调节控制器的设计。在本节中,首先建立单轮空气悬架数学模型,并进行联合仿真平台的搭建,最后设计并分析单轮车高调节控制器在宽温域下的鲁棒性。

2.1 1/4 空气悬架数学模型与仿真平台搭建

单轮空气悬架模型类似于普通螺旋弹簧悬架模型,不同之处在于空气悬架将空气弹簧作为弹性元件。为了建立2自由度空气悬架数学模型,可以将

空气悬架的簧上质量和簧下质量简化为分别具有质量为 m_s 和 m_u 的质量块。如图7所示,设定垂向向上为正方向,根据牛顿运动力学,在空簧的平衡位置可得到空簧簧上质量与簧下质量的动力学方程:

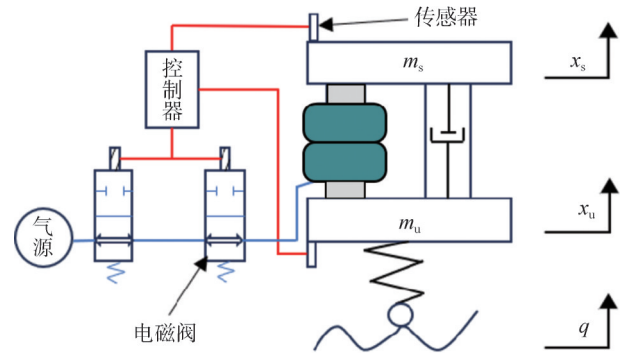


图7 1/4空气悬架2自由度模型

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + c(\dot{x}_s - \dot{x}_u) - A_c(p_0 - p_a) + m_s g = 0 \\ m_u \ddot{x}_u + c(\dot{x}_u - \dot{x}_s) + A_c(p_0 - p_a) + m_u g + k_i(x_u - x_r) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_s 为单轮模型中簧上质量的位移; x_u 为单轮模型簧下质量的位移; x_r 为路面激励位移,此处是0; p_0 为空簧气囊内绝对压强; p_a 为外界大气压强; A_c 为空簧垂向力的等效作用面积。

为进行基于流体、机械、控制、电磁的综合仿真分析,须构建基于空气弹簧的多物理场控制系统模型。结合前面的单轮空气悬架数学模型,建立2自由度1/4空气悬架车高调节模型,如图8所示。

该模型包含电磁阀、储气罐、气泵、质量块等子模块,同时包含空气弹簧模型。此外,该模型还包含了与控制器模型的联合接口模块,即建立了物理模型与控制器的联合仿真模型。该物理模型通过位移、速度传感器,将空气气囊的气压、温度传感器的实时温度信息传递给控制器模型,而控制器模型通过控制电流从而控制空气弹簧内的气体质量流量的流入和流出,以实现车高的控制。下面将进行相关子模块的建模。

为控制电流,控制器将计算出的理想充气量及当前电磁阀可通过的最大充气量,通过对比得出当前电流大小。假定电磁阀为节流孔,可得:

$$\begin{cases} Q_m = \mu p_u A \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_u}} \left[\left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \\ i_q = \frac{q_m}{Q_m} \times I_w \end{cases} \quad (3)$$

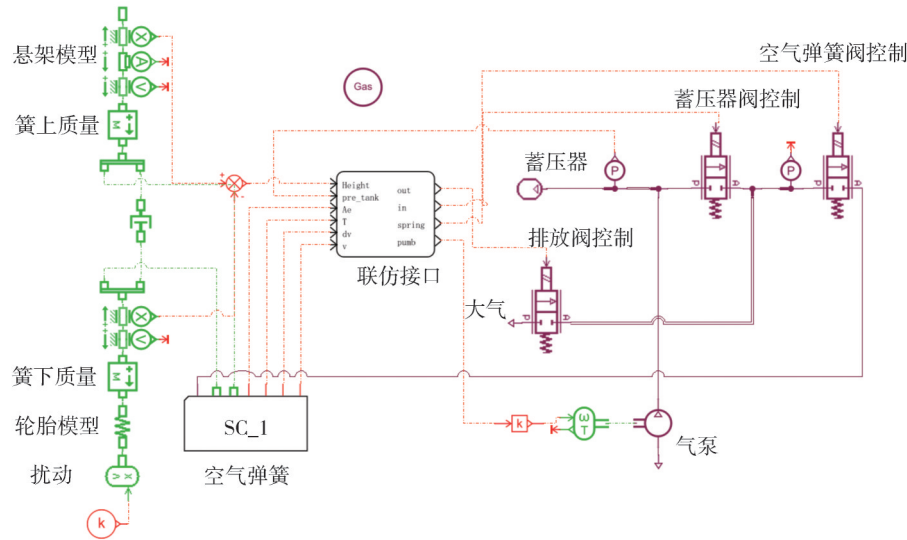


图8 1/4空气悬架一维模型

式中： q_m 为控制器计算的理想充气量； Q_m 为当前电磁阀可通过的最大充气量。

当车高上升时，储气罐通过管路释放高压气体进入空气弹簧。电磁阀上游绝对压力为储气罐压力，而储气罐内的气压则在此过程产生不同程度的波动。因此，将储气罐内部气体状态变化视为定体积充放气的绝热过程，建立储气罐的热力学模型如下。

$$kRT_1 \frac{dm}{dt} = V_1 \frac{dp_1}{dt} \quad (4)$$

式中： k 为绝热指数； R 为气体常数； T_1 为储气罐内气体的实际温度； dm 为流出或者流入储气罐的气体质量； t 为时间； V_1 为储气罐的体积； p_1 为储气罐内气体的绝对压强。

此外气路内不同截面气压也不相同，车身高度控制系统中动态响应与气体在气路中的流体特性相关。对于空气悬架，流动的气体是可压缩的气体，根据可压缩流动的伯努利方程，可得下式：

$$\frac{(u_1^2 - u_2^2)}{2} + \frac{k}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = 0 \quad (5)$$

式中： u_1 、 u_2 为两截面气体的流速； p_1 、 p_2 为两截面的绝对压强，其中截面与管路侧面垂直。当空簧气囊充气时，储气罐以及气泵速度设为0；当空簧气囊排气时，外界环境的大气速度设为0。

建立完子模块模型后，设置仿真参数，仿真参数如表1所示。

表1 1/4空气悬架模型参数

参数名称	符号	数值	单位
簧上质量	m_s	400	kg
簧下质量	m_u	75	kg
电磁阀额定电流	I_w	12	mA
电磁阀开度有效面积	A_w	1.132	mm ²
轮胎径向刚度	K_t	250	kN·m ⁻¹
储气罐压强	p_1	14	bar
大气压力	p_0	1.013	bar

2.2 1/4空气弹簧压力梯度方程建立

空气弹簧是车高升降调节控制系统中的核心部件。为实现车高的上升对空簧气囊进行充放气控制，此过程同时会改变空簧气囊内的气体质量及气囊体积，并且伴随着焓的变化同时对外部做功。因此，空簧气囊的充放气是变质量变体积变温度的非线性动态过程。根据热力学原理，在气囊充放气时，对空簧气囊内的气体进行分析，假设储气罐内的气压、体积、温度等参数不变，根据以上假设可得：

$$dQ_1 + h_2 dm_2 = dU + dW_1 + h_1 dm_1 \quad (6)$$

式中： dQ_1 为空簧内气体通过橡胶囊体与外界大气的传热量； h_1 和 h_2 分别表示从空簧气囊流出的焓和流进空气弹簧气囊的焓； dm_1 和 dm_2 分别表示流出空簧气囊的气体质量和流入空簧气囊的气体质量； dU_1 为空簧内气体的内能变化值； dW_1 为气囊内气体因体积变化所作的功。

根据前面假设，车身升降调节的时间通常较短，因此视为绝热过程。空气弹簧充放气时会对外做

功,这个过程的能量变化可表示为

$$\begin{cases} dW_1 = p_0 dV_0 \\ dU_1 = c_v d(T_0 m_0) \end{cases} \quad (7)$$

式中: p_0 、 V_0 、 m_0 、 T_0 分别表示空簧气囊内的绝对压强、气囊容积、气体质量和气体温度; c_v 为定容比热,表示在物体体积不变的情况下,单位质量的某种物质温度升高单位温度时所需吸收的热量。

令 $dm_2=q_m$,将式(7)代入式(6)并通过定容比热 c_v 与定压比热 c_p 的关系可得空气弹簧压力梯度方程:

$$V_0 \dot{p}_0 = kRT_0 q_m - kp_0 \dot{V}_0 \quad (8)$$

当充入气体时,根据气体流体质量可得知当前空簧内的绝对压力。空簧的绝对压力乘以等效作用面积为空簧的垂向力,根据式(2)的动力学方程即可实现相应控制。

2.3 1/4空气悬架高度调节系统控制策略

基于空气悬架系统模型,本节进一步进行空气悬架控制器的设计。在传统的PID控制时,其控制策略是直接通过控制误差对系统进行调节;而在宽温域空气悬架的车身高度调节中,若仍采用PID控制须反复进行参数的标定,过程非常繁琐且不能很好地适应宽温域工况,会出现“过充”或“过放”现象。相比之下,LQR控制是一种基于最优控制原理的控制算法,适用于一些高精度、高要求的控制问题,并且本文建立了空气悬架的热力学模型,能够基于系统模型,直接进行温度的反馈,将温度作为模型参数输入到控制器中。因此将进行1/4空气悬架高度调节控制器中的在线LQR控制器的设计,其控制策略框架见图9。

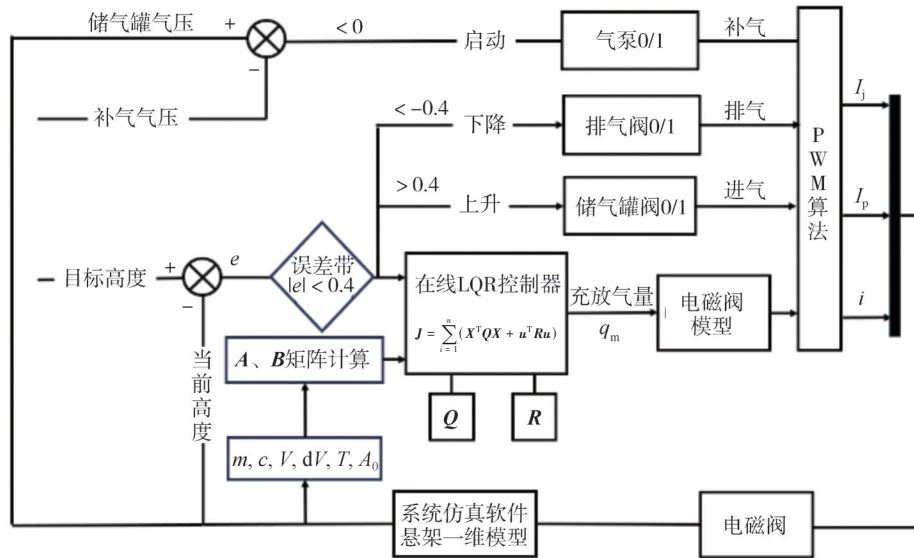


图9 1/4空气悬架控制策略框架

在1/4悬架车身高度调节模型中,主要考查的是空簧的充放气特性、空簧上下两侧的位移以及加速度,因此1/4悬架车高升降模型的状态变量定义为:簧上质量的位移 x_s ,簧上质量的速度 \dot{x}_s ,簧下质量的位移 x_u ,簧下质量的速度 \dot{x}_u ,空弹气囊内气体压力 p_0 ,即

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T = [x_s \ x_u \ \dot{x}_s \ \dot{x}_u \ p]^T \quad (9)$$

根据式(2)建立的2自由度1/4空气悬架模型以及式(8)空气弹簧压力梯度方程,可以推导出1/4悬架状态方程:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{其中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\left(\frac{cm_u + cm_s}{m_s \cdot m_u}\right) & \frac{A_e m_u + A_e m_s}{m_s \cdot m_u} \\ 0 & 0 & -\frac{k\Delta V}{V} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{kRT}{V} \end{bmatrix}; \mathbf{C} = [1]$$

使用欧拉法将连续系统进行离散化处理,欧拉法利用了泰勒展开式,将状态导数表示为式(11)。将式(11)代入式(10)状态空间方程,可得到式(12)离散化状态空间方程。

$$\dot{x} = \frac{x(k+1) - x(k)}{T} \tag{11}$$

$$\begin{cases} x(k+1) = A_z x(k) + B_z u(k) \\ y(k) = C_z x(k) \end{cases} \tag{12}$$

其中: $A_z = I + TA$; $B_z = TB$; $C_z = C$

式中: I 为单位对角矩阵; T 为控制周期。

空气悬架的车高升降调节系统实质是最优控制问题,可以采用优化理论来求解,目标函数可以定义为控制过程累计的跟踪高度偏差与累计的控制输入加权:

$$J = \sum_{k=1}^N (X^T Q X + u^T R u) \tag{13}$$

状态加权矩阵 Q 和控制加权矩阵 R 均为对角矩阵, R 是正定矩阵, Q 为半正定矩阵; 当 Q 矩阵里面的元素值较大时, 表示希望高度误差能迅速趋近于零; 当 R 矩阵里面的元素值变大时, 意味着希望控制的输出量尽可能稳定, 避免电磁阀频繁关闭。对该目标函数进行优化求解, 获得最优的控制规律 u 是关

于状态变量 X 的线性函数:

$$u = -\left[(R + B^T P B)^{-1} B^T P A \right] X = -KX \tag{14}$$

式中 P 是式(14)中的黎卡提方程解, 表示为

$$P = A^T P A - A^T P B (R + B^T P B)^{-1} B^T P A + Q \tag{15}$$

2.4 1/4空气悬架宽温域服役下仿真分析

为验证设计的在线LQR控制器的稳定性和鲁棒性, 本节在联合仿真平台上进行车身高度的抬升与下降仿真验证。设置仿真的整体时长为15 s, 步长为0.01 s, 高度误差带范围设为0.4 mm, 宽温域的温度区间范围为-40到40 °C, 由于温度区间较大, 采用极限温度以及典型温度进行仿真研究。车型相关参数如表1所示, 采用PID与LQR算法进行车高升降的控制, 并对比两种控制算法的鲁棒性和稳定性。

首先开展不同温度下空气悬架上升20 mm的仿真测试, 仿真时长15 s, 步长0.01 s。系统状态误差加权矩阵 Q 和控制加权矩阵 R 见式(16), 车身高高度响应和车身加速度变化如图10所示。

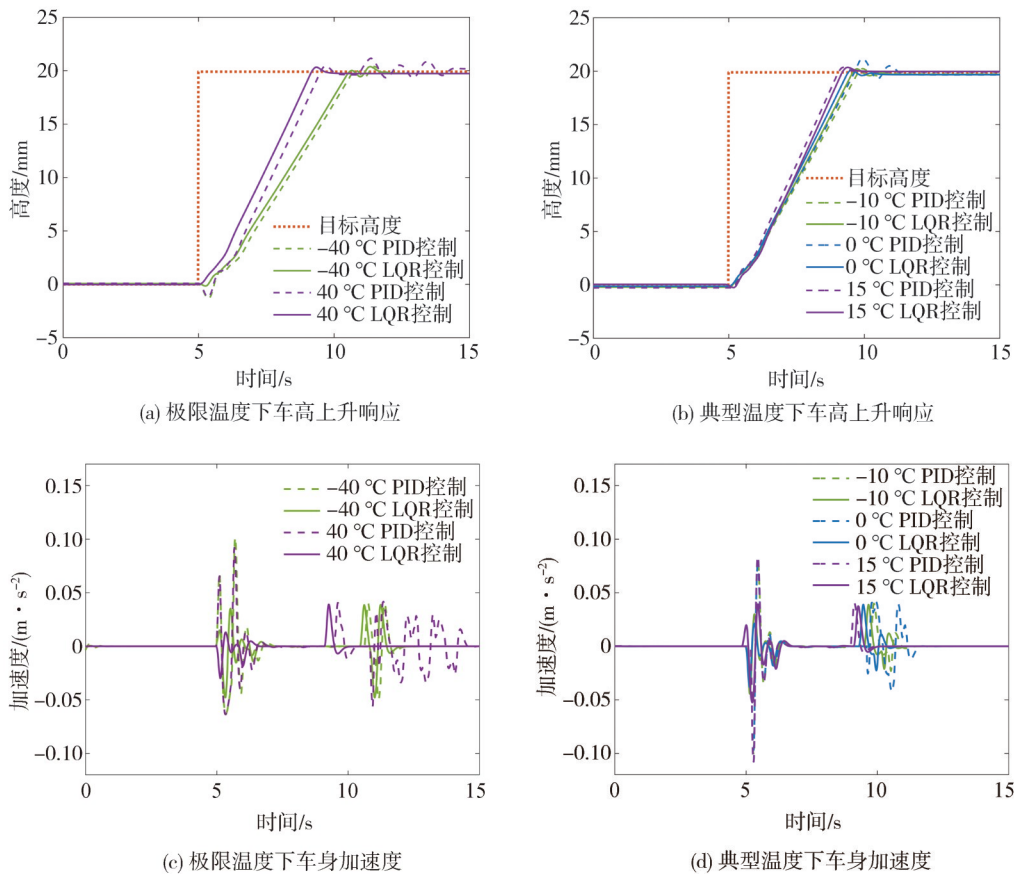


图10 1/4空气悬架不同温度下上升图

$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; R = \text{diag}(1) \quad (16)$$

从图10中可以看出,在宽温域下,无论是PID控制器还是LQR控制器都能使单轮车身高度达到目标高度。然而,考虑温度的LQR控制器相比于PID控制器在同一温度下达到稳态的时间更短,并且上升过程中最大加速度也更小。具体而言,在极限温度为40℃时,PID控制器在目标高度附近反复振荡后才最终达到稳态。相比之下,在线LQR控制器在此温度下能更快地达到稳态。在典型温度下,LQR控制器表现出对温度变化有更好的适应能力,在不同温度下达到稳态的时间基本不变,而PID控制器则随温度的变化达到稳态的时间发生较大幅度的改

变,并且在0℃附近发生了振荡,因此在宽温域下LQR控制器具有更好的鲁棒性和稳定性。

其次在开展下降仿真试验,将车身目标高度在第5s设置为下降20mm,设置仿真时长为15s,步长0.01s,系统状态误差加权矩阵与升高一致。

车身高度下降控制以及车身加速度变化的结果如图11所示,可以发现在下降过程中在线LQR能在不同温度下更快地到达稳态且车身加速度更小,同时对温度的适应能力更强。以典型温度为例,如图11(b)和图11(d)所示,LQR控制器达到稳态的时间随温度的变化改变程度小于PID控制器,LQR控制器受温度影响更小,因此其性能相对PID控制器更优。

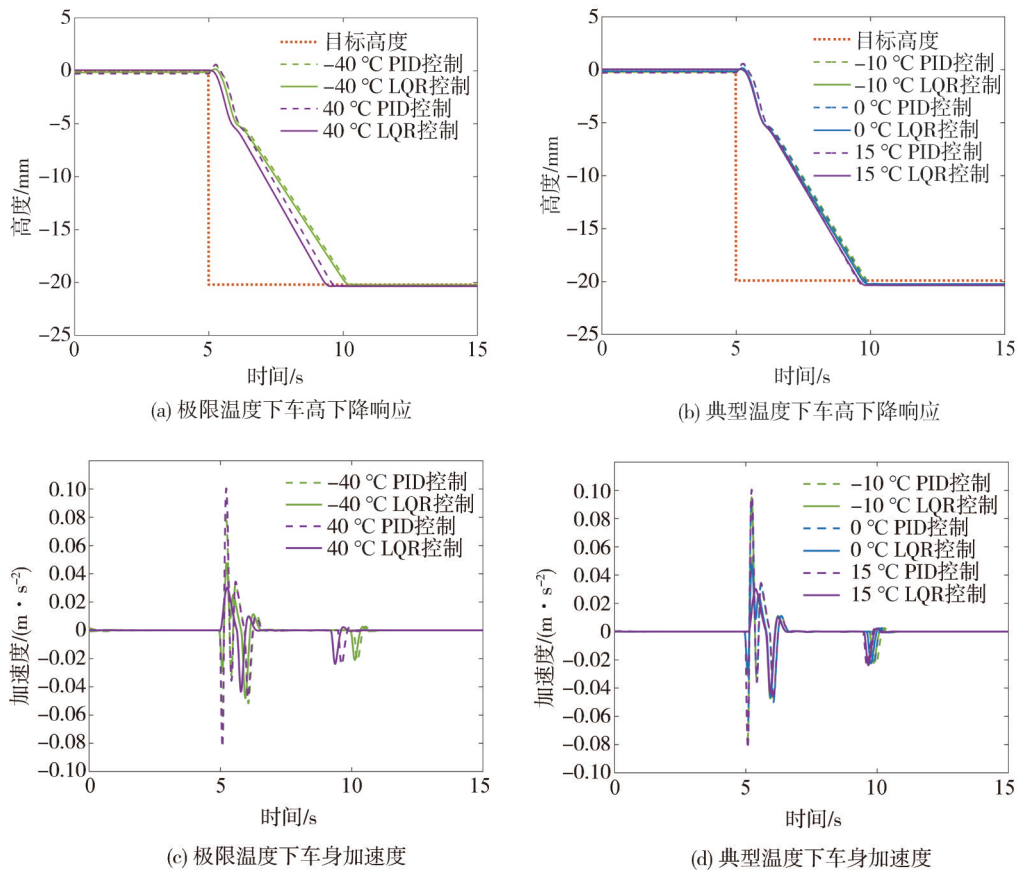


图11 1/4空气悬架不同温度下下降图

综合图10和图11,在空气弹簧升降过程中,两种控制算法均能在宽温域的工况下达到目标高度。在典型温度和极限温度下,随着温度的上升,两种控制算法控制车身高度调节的时间都变短,此现象说明温度对空气弹簧的控制存在较大影响。具体而

言,在每一次升降过程中,LQR控制器的垂直加速度最大值明显小于PID控制器,且在上升的过程中,PID控制器在0和40℃时在到达目标值时出现频繁充放气现象,不能很好地适应温度的变化,鲁棒性欠佳。综上所述,考虑了热力学的LQR控制器在宽温

域下的鲁棒性更好。

3 宽温域的空气弹簧特性试验验证

通过仿真分析发现空气弹簧对温度具有一定的敏感性,在“极限温度”或“典型温度”下控制策略仿真结果的准确性均可通过台架试验结果验证,因此设计不同温度条件下的空气悬架系统台架试验。但受制于试验条件的影响,暂未找到合适的试验条件进行“极限温度”的试验,为验证在宽温域服役下空气悬架模型及悬架控制策略的性能,同时保证试验的可靠性以及经济性,悬架台架试验最终选择在冷藏车内进行并选取使用频率较高的“典型温度”(即15、0和-10℃)来验证结果。

在台架试验中,搭建了1/4空气悬架硬件在环测试平台。该平台通过模拟实际情况下悬架系统的响应及高度控制,实现对宽温域控制策略稳定性与鲁棒性的研究。1/4悬架台架系统主要由4大部分构成:空气弹簧及气动部件、信号采集单元、dSPACE控制单元、驱动单元。在台架试验过程中,宽温域悬架控制算法的模型被编译为与dSPACE兼容的工程。给定悬架的目标高度,信号采集系统获取各传感器信号,将当前高度以及其他相关信号传递至dSPACE系统形成闭环,依据宽温域悬架控制算法生

成相应的控制信号。

在本研究中进行了包括不同温度下悬架台架试验,如图12所示。其中冷藏车工作时温度可在环境气温至-20℃内任意调节,本次台架试验主要验证两种控制器在不同温度下的对比,根据冷藏车温度调节范围选择典型温度,分别为15、0和-10℃来验证宽温域试验下空簧控制器的状态。

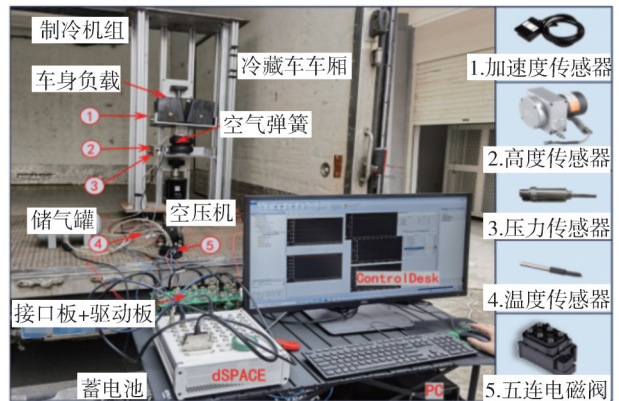


图12 1/4空气弹簧台架硬件连接图

数据采集部分用于采集各种传感器信号并将信号传递到dSPACE,同时传递dSPACE发出的PWM驱动信号到驱动板,还要具备为各传感器供电的功能,具体信号传递拓扑如图13所示。

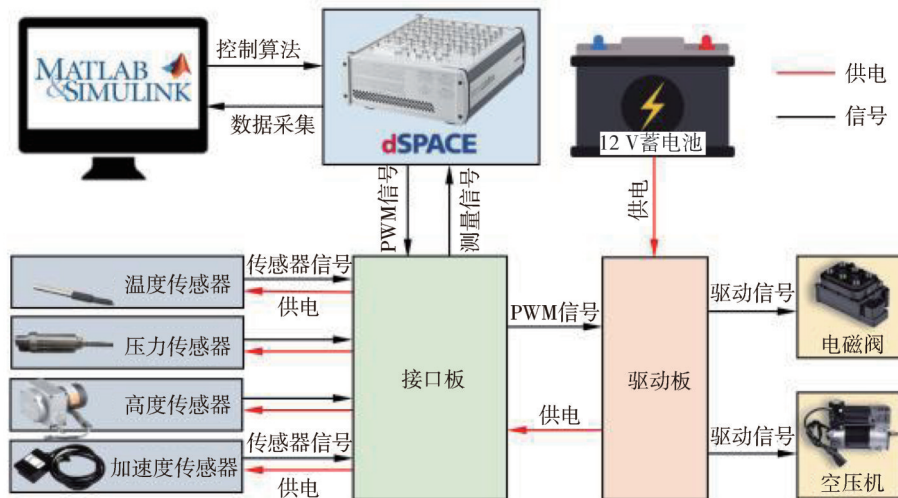


图13 信号传递拓扑示意图

以上述的1/4空气悬架台架为基础,进行不同温度下的高度闭环充气试验。本次试验主要测试在静态高度下不同温度时的稳态响应,以空气弹簧高度165mm为0值,上下调节幅度为±30mm,如图14

所示。

为验证设计的在线LQR控制器的稳定性和鲁棒性,采用PID控制器和本文建立的LQR控制器进行不同温度下的对比分析。本次试验分别在典型温

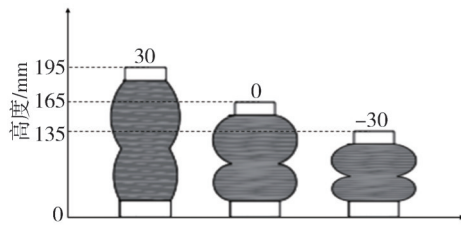
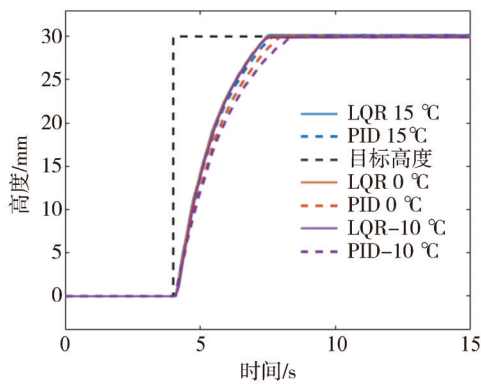
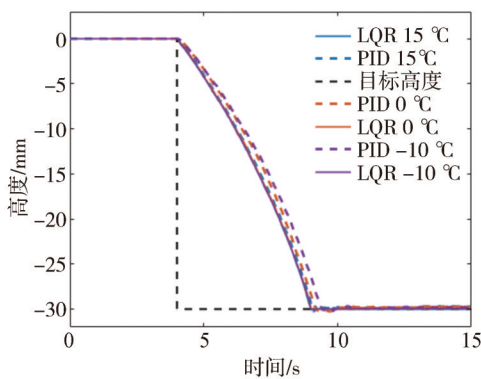


图14 空气弹簧高度示意图

度下的15、0和 -10°C 这3个温度下进行悬架高度上升和下降30 mm的调节试验,对比PID与LQR算法的控制性能。试验结果如图15所示。



(a) 典型温度下高度上升30 mm响应



(b) 典型温度下高度下降30 mm响应

图15 1/4悬架典型温度下高度调节响应图

图15为车高响应曲线。由图可知在不同温度下,虽然PID控制器和LQR控制器均能将悬架调整到目标高度,但LQR控制器达到稳态的速度更快,且超调量和稳态误差也更小。尤其是在环境温度 -10°C 时,PID控制在达到收敛位置时出现了明显的波动。随着环境温度下降,PID控制器调整速度相较于 15°C 时变慢,而LQR控制器达到稳态的速度几乎不变,且在高度下降30 mm调节过程中,PID控制

器出现超调及反复振荡现象。相比之下,LQR控制器在各个温度下均能更快地达到稳态。因此,综合考虑宽温域下的鲁棒性和稳定性,LQR控制器明显优于传统的PID控制器,它能够更快速且稳定地到达稳态,对温度变化具有更好的适应能力,提高了车身高度控制的性能。由于LQR控制器的高精度控制依赖于高精度的系统模型,高精度的系统模型依赖于宽温域下对空气弹簧机理的分析,该试验结果与前文的模拟试验结果一致,所以也间接验证宽温域下空气弹簧模型的准确性。

4 结论

针对宽温域空气悬架控制问题,本文中建立了宽温域空气弹簧模型,并提出了一种基于在线LQR的控制算法,并采用仿真和试验验证了该模型和控制策略的有效性,得出了以下结论。

(1) 本文采用的宽温域空气弹簧模型通过对气体建立热力学气体方程及将温度对囊体的影响因素转换为等效作用面积的方式,不仅考虑了温度对气体的影响,还考虑了温度对橡胶材料的影响,实现了高精度宽温域空气弹簧的建模。

(2) 本文采用的在线LQR控制算法,将温度作为一个模型参数输入给控制器,对温度变化具有更好的适应性,因此在宽温域服役条件下比传统的PID控制算法具有更好的鲁棒性和稳定性。

(3) 本文采用在线LQR控制算法进行试验验证。结果证明,建立的宽温域空气弹簧的模型精度较高,并且所采用的控制算法具有较好的鲁棒性,有效避免了空气弹簧发生“过充”与“过放”现象。

参考文献

- [1] CHEN Y, HOU Y, PETERSON A, et al. Failure mode and effects analysis of dual levelling valve air spring suspensions on truck dynamics [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2019, 57(4): 617-635.
- [2] SUN X, CAI Y, CHEN L, et al. Vehicle height and posture control of the electronic air suspension system using the hybrid system approach [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2016, 54(3): 1-25.
- [3] 鲍卫宁, 陈立平, 张云清, 等. 汽车耦合空气弹簧悬架系统动力学模型的研究 [J]. *汽车工程*, 2008, 30(3): 4.
BAO Weining, CHEN Liping, ZHANG Yunqing, et al. Study on the dynamic model of automobile coupled air spring suspension system [J]. *Automotive Engineering*, 2008, 30(3): 4.
- [4] ODA N, NISHIMURA S. Vibration of air suspension bogies and

- their design [J]. *Jsme International Journal*, 2008, 13(55): 43-50.
- [5] WONG P K, XIE Z, ZHAO J, et al. Analysis of automotive rolling lobe air spring under alternative factors with finite element model [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(12): 5069-5081.
- [6] QI Z, LI F, YU D. A three-dimensional coupled dynamics model of the air spring of a high-speed electric multiple unit train [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2017, 231(1): 3-18.
- [7] 马永明, 冀相安, 傅顺军, 等. 利用 MSC. Marc 分析气囊结构参数对空气弹簧垂向特性的影响 [J]. *船舶工程*, 2008, 30(0z1): 80-83, 43.
MA Yongming, JI Xiang'an, FU Shunjun, et al. Using MSC. Marc to analyze the effect of airbag structural parameters on the sagging characteristics of air springs [J]. *Marine Engineering*, 2008, 30(0z1): 80-83, 43.
- [8] SORLI M, QUAGLIA G. Analysis of vehicular air suspension [J]. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 1999.
- [9] 郑明军, 陈潇凯, 林逸. 空气弹簧力学模型与特性影响因素分析 [J]. *农业机械学报*, 2008, 39(5): 5.
ZHENG Mingjun, CHEN Xiaokai, LIN Yi. Mechanical modeling of air springs and analysis of factors affecting their characteristics [J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2008, 39(5): 5.
- [10] FOX M N, ROEBUCK R L, CEBON D. Modelling rolling-lobe air springs [J]. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 2007.
- [11] LEE S J. Development and analysis of an air spring model [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2010, 11(4).
- [12] BRUNI S, VINOLAS J, BERG M, et al. Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2011, 49(7): 1021-1072.
- [13] 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): 5.
LI Xuebing, CAO Jinfeng, GUI Yintao. Finite element simulation of multivariable processes in air springs [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(2): 5.
- [14] LIANG Y J, LI N, GAO D X, et al. Optimal vibration control for nonlinear systems of tracked vehicle half-car suspensions [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2017.
- [15] 殷春芳. 电控空气悬架车高调节系统鲁棒抗干扰控制研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
YIN Chunfang. Study on robust anti-interference control of vehicle height adjustment system of electronically controlled air suspension [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [16] 陈俊杰, 张盛蓬, 刘昊. 复杂轮廓膜式空气弹簧非线性结构参数统一模型 [J]. *振动与冲击*, 2023, 42(23).
CHEN Junjie, ZHANG Shengpeng, LIU Hao. Unified model of nonlinear structural parameters for rolling lobe air spring with complex contour [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(23).

(上接第1510页)

- GAO Y K, XU C M, FANG J G. Study on the programed load spectrum of the body fatigue bench test [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(4): 92-98.
- [17] KANG D, HEO S, KIM H. Virtual road profile modeling using equivalent damage method for VPG simulation [C]. *SAE Paper 2009-01-0814*.
- [18] RUPP A, MASIERI A, DORNBUSCH T. Durability transfer concept for the monitoring of the load and stress condition on vehicle [J]. *Journal of Psychosomatic Research*, 1999, 46(3): 275-281.
- [19] 龙海强, 胡玉梅, 刘波, 等. 基于随机载荷的白车身焊点疲劳寿命预测 [J]. *汽车工程*, 2016, 38(8): 1006-1010.
- LONG H Q, HU Y M, LIU B, et al. Fatigue life prediction for the spot welds of body-in-white based on random loadings [J]. *Automotive Engineering*, 2016, 38(8): 1006-1010.
- [20] 冯海星, 刘海立, 张松波, 等. 模态综合法在车身结构动力学计算中的应用 [J]. *汽车工程*, 2012, 34(9): 811-815.
- FENG H X, LIU H L, ZHANG S B, et al. Application of component mode synthesis on dynamic analysis of automotive body structure [J]. *Automotive Engineering*, 2012, 34(9): 811-815.