

# 空气弹簧自由边界模拟控制策略研究

侯京锋, 刘玥, 马平昌, 邓哲

(北京强度环境研究所 北京, 100076)

**摘要** 针对空气弹簧水平多点支撑自由边界模拟系统存在的过约束、难收敛和非线性控制问题,首先,采用自由度解耦控制方式,在削弱系统内力的基础上,将空间自由度的控制目标分解为每一个控制通道的控制目标,解决了系统过约束问题;其次,利用改进积分分离(proportion integration differentiation,简称PID)控制算法克服系统超调,解决了系统震荡收敛问题;最后,采用经验数据对空气弹簧刚度进行实时二维插值补偿,解决了系统非线性问题。实测结果表明,该控制系统设计合理,系统运行过程平稳,通道间同步性较好,控制策略满足模态试验边界的模拟要求。

**关键词** 空气弹簧;自由边界模拟;系统控制;刚度补偿

**中图分类号** TP273

## 引言

运载火箭的工作状态为自由状态,其全箭模态试验要求具有自由边界条件。实际工程中,达到完全自由的约束状态非常困难,因此试验中通常采用柔软支撑,如橡皮绳悬挂、弹簧悬挂、气垫支撑及空气弹簧支撑进行自由边界模拟<sup>[1-2]</sup>。其中:橡皮绳悬挂、弹簧悬挂属于上悬挂方案,需要有可供悬挂的承载机构,对厂房要求较高,特别是质量较大的带药固体火箭,厂房内试验存在较大的危险性;气垫支撑、空气弹簧支撑属于下部支撑方案,对厂房无要求,在可承载的地面上即可开展。利用空气弹簧进行自由边界模拟,在车辆及飞机领域比较常见<sup>[3-5]</sup>,但针对有一定危险性的带药火箭,目前尚无类似的应用记录。此类产品往往只能在临时厂房进行试验,需要利用支撑系统平稳地将产品浮起并保持位置,以实现自由边界模拟。固态火箭长细比较大,头尾质量分布差别大,需要较多的支撑点,支撑系统存在较强的过约束。

空气弹簧托举负载的位置控制系统,目前主要应用于汽车悬架高度控制,根据车辆当前行驶速度、车身高度等信息以及路面不平整所引起的座椅乘坐性能,按照一定策略控制减振器阻尼力、空气弹簧刚度和车身的静高度,从而满足行驶的平顺性、稳定性和通过性要求<sup>[6]</sup>。针对车辆悬架高度的控制方式主要有前馈控制、PID控制、预测控制及末端预测控

制。Huang等<sup>[7]</sup>研究了客车空气悬架控制策略,发现与空气弹簧并联的减振器阻尼越小,系统的振荡越明显。李仲兴等<sup>[8]</sup>研究了阻尼对车身高度控制效果的影响,通过遗传算法对PID参数进行整定,结果表明阻尼增大时,比例与微分系数需适度增大。全箭模态试验自由边界模拟系统具有边界阻尼小、结构过约束强以及系统极易失稳等特点,无法满足系统的控制需要。

笔者采用自由度解耦的控制方法,削弱了干扰系统可靠运行的系统内力,分解出自由边界模拟系统中单个空气弹簧的控制指令。在每个空气弹簧的独立闭环控制中,利用改进积分分离控制算法克服系统超调,解决系统难以收敛的问题。基于标定数据对空气弹簧刚度进行实时二维插值,补偿系统的非线性,最终实现系统总体控制过程的平稳性与同步性,满足了模态试验边界的模拟要求。

## 1 系统介绍

本研究采用多截面空气弹簧支承产品,用以模拟模态试验所需的自由边界条件。测控系统由控制器、执行机构和传感器组成。控制器基于NI cDAQ集成定制开发,实现数据采集、闭环解算、控制输出与安全报警,核心执行机构为SMC调压阀,压力传感器与位移传感器均配套优于0.25%FS等级的产品。指标要求自由边界模拟的位控同步精度优于

±1 mm,支撑截面载荷偏差不大于15%,边界频率低于产品1阶频率的1/5。

## 2 控制流程

测控系统通过闭环控制实现试件的平稳浮起与落下,且在位置保持过程中不对模态试验构成干扰。控制流程大致分为充压阶段和位控阶段两部分。

### 2.1 充压阶段

充压阶段通过闭环控制气路调压阀,使压力缓慢上升至目标压力,本阶段主反馈为空气弹簧内气压。为防止产品在充压阶段局部浮起,仅充压至理论浮起压力值的95%~98%,待所有通道进入压力控制误差带后,转换为位移控制模式。

考虑到真实的产品往往通过防冲击的衬垫放置于承载机构上,在压控阶段,衬垫自身会产生变形而使位移反馈发生变化,故在正式进入位控前,可将位移传感器清零。

### 2.2 位控阶段

位控阶段指切换至位控模式,系统按内置的上升谱进行浮起的过程。位移指令如图1所示。浮起初期,位控模式控制输出的初值需继承压控模式的最后一刻值。因为充压阶段未充压至理论值的100%,故在位控闭环初期,位移反馈存在滞后。由于积分的累积效应,在后期容易引起超调,故指令在5 mm位置稍作停留,再向最终目标上浮,这有利于通道之间的同步。

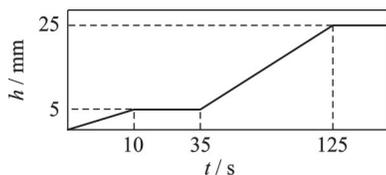


图1 位移指令

Fig.1 Displacement command

本阶段执行机构为气路比例阀,主反馈为与空气弹簧并联的激光位移传感器测量值。位控上浮结束后,进入位控保持阶段。该阶段通过对位移信号进行低通滤波后,再参与位控闭环,防止控制系统对激振引起的位移波动进行纠正,从而避免了对正常试验的干扰。当自由边界模拟完成后,可进行模态试验。

## 3 控制策略设计

$N$ 个独立的执行机构所构成的系统,最多可以实现 $N$ 个自由度控制。基于削弱内力的目的,首先将 $N$ 自由度控制目标分解为每个执行机构的控制目标,从而实现各自通道的独立闭环控制。对于通道闭环,采用优化积分项的改进型PID算法和刚度补偿策略,以改善空气弹簧小阻尼、大惯性的基本特性和刚度非线性,最后对总体策略进行有效性验证。控制策略基本原理如图2所示。

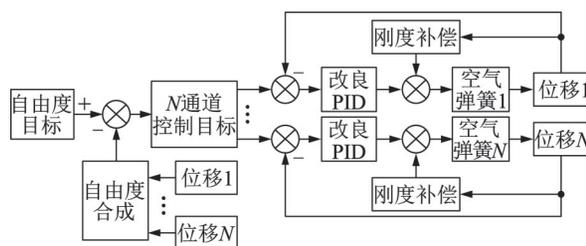


图2 控制策略基本原理

Fig.2 Principle of control strategy

### 3.1 自由度解耦

由于实弹水平状态往往采用多点支承,且单点设计承载余量有限,2个截面不足以托起试件,所以托举系统是一个过约束系统。以5只空气弹簧组成的边界模拟系统为例,空气弹簧布局示意图如图3所示。试件全长为 $L$ ,每个支撑截面与试件头部的距离为 $L_i (i=1, 2, 3)$ ,试件质心与试件头部的距离为 $L_m$ 。设每个弹簧偏离目标位置的高度值依次为 $\Delta h_1 \sim \Delta h_5$ ,试件位姿向量为 $[z \ \alpha \ \beta]$ 。其中: $z$ 为 $z$ 向平动量; $\alpha$ 为俯仰角度,沿 $y$ 轴转动; $\beta$ 为横滚角度,沿 $x$ 轴转动。

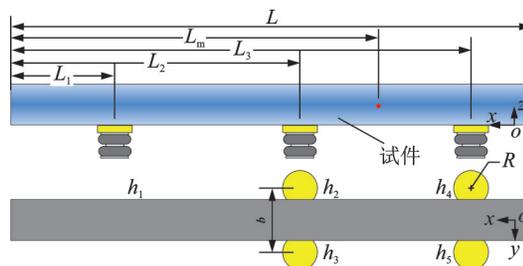


图3 空气弹簧布局示意图

Fig.3 Air spring layout diagram

被试产品位姿可通过自由度合成矩阵获得。根据当前的布局,5只垂向空气弹簧仅能实现垂向平动、沿 $x$ 轴转动及沿 $y$ 轴转动3个自由度。通过求解

合成矩阵的伪逆矩阵,可得自由度分解矩阵为

$$\begin{bmatrix} z \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{L_1-L_m} & \frac{1}{L_2-L_m} & \frac{1}{L_2-L_m} & \frac{1}{L_3-L_m} & \frac{1}{L_3-L_m} \\ 0 & -\frac{2}{b} & \frac{2}{b} & -\frac{2}{b} & \frac{2}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \\ \Delta h_4 \\ \Delta h_5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

系统按照三自由度方式控制时,自由度分解矩阵不惟一,这种解的不惟一性使得系统有其他的运动趋势,是系统产生内力耦合的原因之一<sup>[9]</sup>。为了使系统的5个驱动量有确定解,在三自由度控制回路中增设2个扭曲自由度的控制回路。2个扭曲自由度定义为

$$\begin{bmatrix} T_{N1} \\ T_{N2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & -0.2 & -0.2 & 0.2 \\ -0.2 & 0.2 & 0.2 & -0.2 & -0.2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \\ \Delta h_4 \\ \Delta h_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $T_{N1}$ 为沿 $x$ 轴的扭曲自由度信号,可使产品沿 $x$ 轴产生拧麻花运动趋势; $T_{N2}$ 为沿 $y$ 轴的扭曲自由度信号,可使产品产生中部隆起的运动趋势。

假定模拟试件全长为10 m,同一截面空气簧中心距 $b$ 为0.4 m, $L_1, L_2, L_3$ 和 $L_m$ 依次为2, 6, 9, 7 m。

增加这2个扭曲自由度后,自由度合成矩阵为

$$H_h = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{L_1-L_m} & \frac{1}{L_2-L_m} & \frac{1}{L_2-L_m} & \frac{1}{L_3-L_m} & \frac{1}{L_3-L_m} \\ 0 & -\frac{2}{b} & \frac{2}{b} & -\frac{2}{b} & \frac{2}{b} \\ 0 & 0.2 & -0.2 & -0.2 & 0.2 \\ -0.2 & 0.2 & 0.2 & -0.2 & -0.2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ -0.2 & -1.0 & -1.0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & -5.0 & 5.0 & -5.0 & 5.0 \\ 0 & 0.2 & -0.2 & -0.2 & 0.2 \\ -0.2 & 0.2 & 0.2 & -0.2 & -0.2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于5个驱动量对应5个约束方程,方程组的解惟一,将 $H_h$ 阵求逆,可得自由度分解矩阵 $H_f$ 为

$$H_f = \begin{bmatrix} -1.79 & -1.43 & 0 & 0 & -5.36 \\ 1.25 & 0 & -0.05 & 1.25 & 1.25 \\ 1.25 & 0 & 0.05 & -1.25 & 1.25 \\ 2.14 & 0.71 & -0.05 & -1.25 & 1.43 \\ 2.14 & 0.71 & 0.05 & 1.25 & 1.43 \end{bmatrix} \quad (4)$$

实际控制时,仅输入 $z$ 向平动的指令信号,将2个转动自由度和2个扭曲自由度的控制指令设为0即可。

### 3.2 通道闭环控制

系统中每个空气弹簧独立闭环控制,供气支路的最终执行机构为比例压力阀。比例压力阀的线性度较好,在开环模式下,其自身压力控制误差小于5%。但是,比例压力阀的压力反馈值仅为比例阀出口压力值,与空气弹簧内部压力存在偏差,故最终位移控制采用PID闭环与经验补偿相结合的方式,并且位控需要继承压力控制的控制输出值,即

$$U_o = u_{pid} + u_m + u_p \quad (5)$$

其中: $U_o$ 为位控控制输出值; $u_{pid}$ 为位控PID计算值; $u_m$ 为修正补偿控制量; $u_p$ 为继承压力控制量。

由于压力闭环只能使各个空气弹簧处于临界的理论压力状态,所以在位控启动段存在天然滞后。另外,空气弹簧系统存在一定惯性,控制过程中若发生较大超调可引起一定程度的震荡,且系统几乎无阻尼,震荡收敛过程缓慢,因此控制策略需使系统尽量不发生超差。由于系统滞后性特点与典型的温度被控对象相似<sup>[10]</sup>,故借鉴温度控制策略,对经典PID算法进行改良,采用抗积分饱和与积分分离技术,可以对空气弹簧位移控制系统中由滞后和惯性引起的超调进行有效抑制。

#### 3.2.1 抗积分饱和

抗积分饱和的思路就是在计算控制输出 $u(n)$ 时,首先判断上一时刻控制器的输出量 $u(n-1)$ 是否已经超出限制范围,若 $u(n-1) \geq u_{max}$ ,则只累加负偏差;若 $u(n-1) < u_{min}$ ,则只累加正偏差。

#### 3.2.2 积分分离

在PID算法中积分环节主要用于消除系统静差。本系统为了保证在积分分离的情况下,控制过程可进入之前设定的误差带,在误差带外设定了一个小的积分扰动。积分分离算法为

$$u(n) = u(n-1) + K_p \left[ \Delta e(n) + \beta \frac{T_s}{T_i} e(n) + \frac{T_D}{T_s} [\Delta e(n) - \Delta e(n-1)] \right] \quad (6)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & (|e(n)| < A) \\ \epsilon & (|e(n)| > B) \\ 1 & (A < |e(n)| < B) \end{cases} \quad (7)$$

当误差 $|e(n)|$ 较大时,控制系统使用一个较小的积分系数;当误差 $|e(n)|$ 处于误差带时,控制系统使用一个正常的积分系数;当误差 $|e(n)|$ 非常小、处于可接受的容差带时,暂停积分。在实际位控应用时, $A=0.5\text{ mm}$ , $B=2\text{ mm}$ , $\epsilon=0.1$ 。

### 3.2.3 刚度补偿

空气弹簧是一种刚度可变的非线性隔振元件<sup>[11]</sup>,对于模态试验边界模拟,产品上浮与下降过程相对缓慢,其加速度可以忽略。上浮过程中空气弹簧所产生的向上托举力与被试产品的重力完全平衡,但空气弹簧在上浮过程中等效支承面积会缩小。单个空气弹簧工作范围如图4所示。

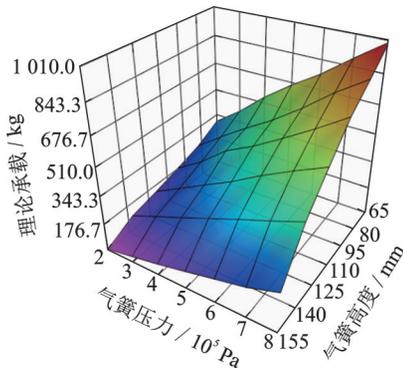


图4 空气弹簧工作范围

Fig.4 Air spring capability boundary

由图4可以看出,同一气压、不同高度下,空气弹簧承载力差别较大,变化趋势呈单调非线性。对于任意气压、任意高度下的经验承载值,可通过二维线性插值近似获得,该值进行加权后即式为(5)中的 $u_m$ 项。至此,已获得位置控制闭环中的前2项。

## 4 控制效果

本研究搭建了如图5所示的组合钢梁结构,进行验证试验。组合钢梁的质心位置与真实产品满足一定的相似性。



图5 组合钢梁结构

Fig.5 Composite steel beams

自头部至尾部设计7个承载截面,定义小端为第1个截面,其中第4、第5截面为单空气弹簧支承,其余5个截面为双空气弹簧并联支承,空气弹簧均选用130118J-2。测试系统如图6所示。

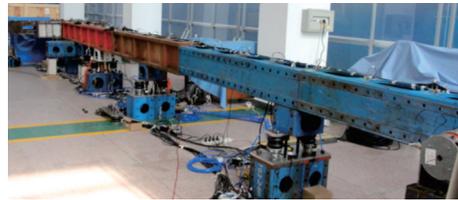


图6 测试系统

Fig.6 Test system

### 4.1 平稳浮起过程

单次试验的浮起过程分为充压过程与位控上浮过程。位控上浮过程如图7所示。在1000采样点附近充压过程结束,处于临界状态的各个空气弹簧位移略有变化,该现象与产品安装偏差有关。然后,转入位控模式进行上浮,在5 mm以内的上浮初期,由于安装偏差导致理论临界浮起值与实际临界值存在差异,个别通道率先浮起,且由于跷跷板效应,其对应通道则被压下(位移减小),最终表现为各个通道同步性一般,最大偏差可达5.8 mm。在经过5 mm位置处的等待后,各个通道的上浮一致性非常好,同步偏差优于1 mm,且上浮过程结束时未发生超调。在位移保持段,7个截面的载荷偏差均优于 $\pm 10\%$ ,满足指标要求。

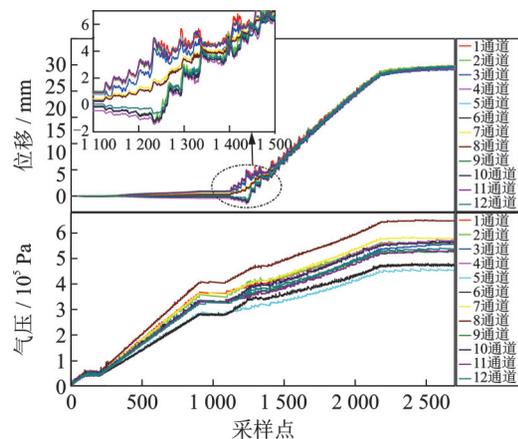


图7 位控上浮过程

Fig.7 Position rising process

由图7可以看出,在压控末期,奇数列位移反馈值整体高于偶数列,这说明模拟试件整体不居中,产品整体向偶数列偏移,造成实际奇偶两列质量分布差异,在位控浮起初期奇数列率先浮起。在产品上

浮过程初期,存在明显的位移爬行现象,这与气路调压阀的控制颗粒度有关。正式试验时,所使用的空气弹簧容积较大,气路调压阀单次微调的气量占空气弹簧总容积较小,对位移爬行现象的影响也较小。

当位移达到5 mm以上时,模拟试件已经完全从限位机构上浮起,此时重力与空气弹簧所提供的向上合力为一对平衡力,但在模拟试件继续上浮过程中,空气弹簧内部压力持续上升。可见,随着空气弹簧变高,其等效承载面积在减小。

#### 4.2 位移保持过程

待位移到达目标位置且稳定时,开启位移反馈低通滤波,以防止模态试验时位移闭环干扰激励响应。

为了验证外部激励不会导致位控发散,在试件处于位控保持阶段时,利用人为实现产品在俯仰和横滚方向上的晃动。俯仰方向手晃结果如图8所示。

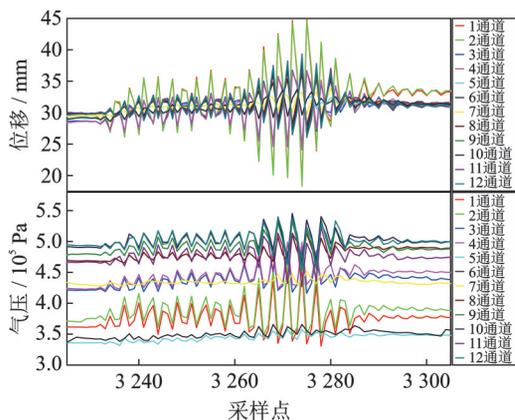


图8 俯仰方向手晃结果

Fig.8 Sway results in the pitch direction

由图8可以看出,处于头部位置的1,2通道距离质心最远,其晃动量最大;距离质心最近的5,6,7通道晃动量较小。

横滚方向手晃结果如图9所示。可以看出,由于7,8通道为2个单空气弹簧支撑截面,空气弹簧布置在轴线正下方,故横滚时位移和压力波动不明显。

控制系统采样频率为4 Hz,所记录的位移、压力时域波动不够精细,俯仰方向头部位移测点最大波动可达15 mm。根据自然衰减情况分析,俯仰方向的支承频率大约为1.4 Hz,横滚方向的支承频率大约为1 Hz。

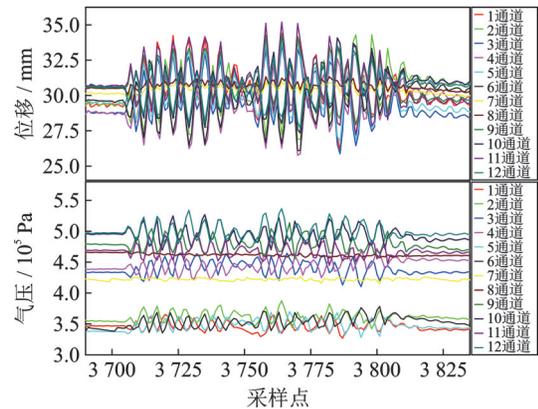


图9 横滚方向手晃结果

Fig.9 Sway results in the roll direction

手晃结束后,被试产品波动自由衰减并回到稳态。多次测试验证表明,没有导致位控发散,说明该系统的抗干扰能力较强。考虑到模态试验时外部激励产生的晃动不会超过5 mm,故控制系统比较可靠。

## 5 意外测试

相比于传统的悬吊试件的边界模拟方案,空气弹簧托举方案存在可靠性差距,同时由于实弹试验的危险性较高,故对空气弹簧自由边界模拟系统的意外情况进行测试,从而为完善控制系统应急处理机制提供参考。

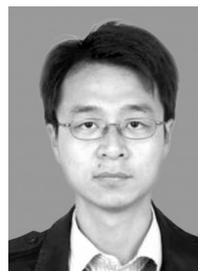
分别在模拟试件上浮25 mm和5 mm后,按下控制系统急停键,所有空气弹簧瞬间放气,模拟件下落至限位上,模拟件最大冲击分别为2.2 g和3.5 g。可见,模拟件从较高处下落反而冲击较小,这种现象与空气弹簧高度减小时等效承载面积增大有关。同时,当前冲击量级较大也与限位机构没有缓冲垫相关。对控制系统而言,试件处于不同高度时的急停策略需进行差异性设计。

## 6 结束语

本研究利用空气弹簧支承系统进行自由边界模拟,通过自由度解耦的控制策略克服系统过约束。在单通道位移控制策略中,在改良积分分离PID的基础上引入空气弹簧刚度补偿量,并在控制效果与安全性上进行实测。结果表明,控制流程合理,抗外部干扰能力较强,位控同步性与截面载荷分布满足模态试验边界的模拟要求。

## 参 考 文 献

- [1] 张永亮,侯京锋,苏里,等.基于油气支承自由边界模拟的全箭模态试验技术研究[J].导弹与航天运载技术,2020(4):107-111.  
ZHANG Yongliang, HOU Jingfeng, SU Li, et al. Study on integrated launch vehicle modal test techniques based on hydraulic support system[J]. Missiles and Space Vehicles, 2020(4): 107-111.(in Chinese)
- [2] LIU K C, KENNEY T, MAGHAMI P, et al. Jitter test program and on-orbit mitigation strategies for solar dynamic observatory [C]//The 20th International Symposium on Space Flight Dynamics. Annapolis: NASA, 2007: 20080012648.
- [3] 李方泽,李德葆,徐培民,等.大型矿用承载车架的模态试验与结构修改模拟分析[J].汽车工程,1991(4):214-222,256.  
LI Fangze, LI Debao, XU Peimin, et al. Modal analysis and structural modification simulation of the frame of a heavy-duty mine-haul truck[J]. Automotive Engineering, 1991(4): 214-222, 256.(in Chinese)
- [4] 臧立彬,刘海,武一民,等.串联式重型混动汽车动力总成弹性体模态试验识别研究[J].机械设计与研究,2017,33(1):147-151.  
ZANG Libin, LIU Hai, WU Yimin, et al. Research of powertrain elastomer modal identification for heavy parallel-series hybrid electric vehicle [J]. Machine Design & Research, 2017, 33(1): 147-151.(in Chinese)
- [5] 戚东元.轿车内饰车身模态分析及试验研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [6] 崔晓利,杨岳,陈龙,等.半主动悬架及其控制系统的设计与研究[J].中国机械工程,2007,18(8):998-1000.  
CUI Xiaoli, YANG Yue, CHEN Long, et al. Design and research of semi-active suspension and its control system [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(8): 998-1000.(in Chinese)
- [7] HUANG T, GUO Y C, ZONG C F, et al. Research on vehicle height adjustment control of electronically controlled air suspension [C]//SAE 2015 Commercial Vehicle Engineering Congress. [S.l.]: SAE, 2015: 7.
- [8] 李仲兴,于文浩.阻尼对车身高度控制效果的影响分析[J].重庆理工大学学报(自然科学),2016,30(4):11-15.  
LI Zhongxing, YU Wenhao. Influence analysis of damping on body height control effect [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2016, 30(4): 11-15.(in Chinese)
- [9] 关广丰,王海涛,熊伟,等.6自由度液压振动台运动学分析及控制策略[J].振动、测试与诊断,2011,31(1):89-93.  
GUAN Guangfeng, WANG Haitao, XIONG Wei, et al. Kinematic analysis and control strategy of 6-DOF hydraulic vibration table [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(1): 89-93.(in Chinese)
- [10] 董伟,郭昌耀,赵轻领.基于PID与误差补偿的炉温控制系统设计[J].自动化与仪器仪表,2017(1):29-31.  
DONG Wei, GUO Changyao, ZHAO Qingling. Design for furnace temperature control system based on PID and error compensation [J]. Automation & Instrumentation, 2017(1): 29-31.(in Chinese)
- [11] 徐国敏,周炜,何琳,等.新型长方体形囊式空气弹簧垂向动态特性研究[J].振动与冲击,2018,37(7):247-253,266.  
XU Guomin, ZHOU Wei, HE Lin, et al. Vertical dynamic characteristics of cuboid type air springs [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(7): 247-253, 266.(in Chinese)



**第一作者简介:**侯京锋,男,1984年10月生,硕士、高级工程师。主要研究方向为试验系统集成、液压、机电系统控制技术。曾发表《基于油气支承自由边界模拟的全箭模态试验技术研究》(《导弹与航天运载技术》2020年第5卷第4期)等论文。

E-mail:realknow@163.com