

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201808007



闭环空气悬架系统的车身 高度与姿态控制

李海燕, 张锋, 汪涵, 罗顺安

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对传统车身高度调节方法导致的闭环空气悬架系统较大俯仰角问题, 提出两种不同车身步进控制算法, 得到各个空气弹簧的目标高度. 利用比例-积分-微分(PID)控制器对电磁阀的电流信号占空比进行调节. 将提出的两种控制算法在 MATLAB/Simulink 进行实现, 并与 AMESim 平台上建立的空气悬架模型进行联合仿真. 仿真结果表明: 两种算法都能减小车身高度控制过程中造成的俯仰角, 且第二种步进控制方法的效果更优.

关键词: 空气悬架; 步进控制; 车高控制; 姿态控制; AMESim

中图分类号: U 463.33

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)02-0141-07

Height and Leveling Control of Closed-Loop Air Suspension System

LI Haiyan, ZHANG Feng, WANG Han, LUO Shun'an

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To deal with the problem about a large pitch angle caused by using the conventional height adjustment method in a closed-loop air suspension system, two different step control algorithms were presented to determine the target height of every air spring, and then a proportional-integral-derivative (PID) controller was used to adjust the duty ratio of valves' electric current signals. The proposed algorithms were implemented in the MATLAB/Simulink and then co-simulated with the air suspension model built on the AMESim platform. The simulation results indicate that both of two algorithms have an obvious effect on the reduction of pitch angle, and the second step control algorithm performs better.

Keywords: air suspension; step control; height control; leveling control; AMESim

空气弹簧具有质量轻、噪声小、固有频率低、自带阻尼、高度可调等一系列优点, 因此被广泛应用于汽车行业中, 同时, 电子控制空气悬架(ECAS)车高调节的控制理论和控制性能的仿真分析也是国内外学者关注的焦点. Sankaranarayanan 等^[1]提出一种适应汽车载荷的车身高度变化系统. Hirose 等^[2]在丰田车上实现车身高度、空气弹簧和阻尼的集成控制, 实验证明该方法不仅提高汽车的操纵稳定性还改善乘客的乘坐舒适性. Taniguchi 等^[3]提出使用机械系统动力学自动分析(ADAMS)对车身高度自适应仿真模拟. 于微波等^[4]采用模糊控制调节空气悬架车身高度, 实验表明模糊控制方法具有良好

收稿日期: 2018-08-08

通信作者: 张锋(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事齿轮动力学、振动主动控制、压电智能材料的研究. E-mail: alwaysqing@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405169); 福建省自然科学基金面上资助项目(2015J01636); 华侨大学研究生科研创新基金资助项目(17013080014)

系统进行的稳定性. Sun 等^[5]提出一种混合逻辑动态控制方法调节 ECAS 的车身高度和姿态, 实验表明该方法具有一定的控制作用. 闭环控制空气系统为了节省成本和减小布置空间, 往往采用较小的压缩机和储气罐^[6-7], 因此, 不能同时对 4 个空气弹簧同时进行充气. 传统的控制方法是先对前轮两个空气弹簧进行充气, 当实际高度到达目标高度时, 再对后轮两个空气弹簧进行充气^[8-9], 但是这会导致在车高调节过程中产生较大的俯仰角. Kim 等^[10]采用滑模控制算法实现车身高度的控制, 并且采用步进控制对车身高度调整过程中俯仰角的变化进行控制. ECAS 系统涉及到机、电、气等多种领域^[11-13], 目前针对 ECAS 的建模大都采用 MATLAB 等数学软件进行, 对于 ECAS 系统中存在的充放气时滞后性^[14]、气流流动等明显的非线性特性都不能较好地模拟. 本文在 AMESim 软件上搭建空气悬架的模型^[15-16], 针对车高控制过程中产生较大的俯仰角问题, 提出两种步进控制方法, 以得到每一步的各个空气弹簧的目标高度.

1 空气悬架系统建模

车高控制的空气悬架系统分为开环空气悬架系统和闭环空气悬架系统, 文中所研究的是闭环空气悬架系统, 其车高调节系统, 如图 1 所示. 该系统主要包括储气罐、压缩机、空气弹簧和电磁阀等. 图 1 中: $Z_{s,i}$ ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为 4 个车辆悬架角的位移; $m_{s,i}$ ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为 4 个车辆悬架角的质量; $m_{u,i}$ ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为 4 个轮胎的质量; $Z_{u,i}$ ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为 4 个轮胎的位移; P_p 为充放气换向阀到空气弹簧电磁阀之间管道的压力; P_H 为充气源的压力; P_L 为放气源的压力; ∂_s 为换向阀的开启大小, 当 $\partial_s > 0$ 时, 充气电磁阀打开, 当 $\partial_s < 0$ 时, 放气电磁阀打开; $\partial_{s,i}$ ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为 4 个空气弹簧电磁阀的开启大小.

为便于实验研究, 文中做出 4 点假设: 1) 各个电磁阀的特性相同; 2) 气体为理想气体, 其流动过程中产生的动能可以忽略不计; 3) 空气弹簧在车身高度变化过程中, 其有效面积的变化可忽略不计, 因此可简化为一个可变容积的气室和一个可移动缸体的组合; 4) 研究的是空气悬架高度控制, 因此将轮胎看成一个刚体, 可忽略轮胎的变形. 综合以上假设, 可得到空气悬架在车高调节过程中的动态方程为

$$\dot{P}_{s,i} = \frac{nRT}{V_{s,i}} \left(\partial_{s,i} q_{s,i} - \frac{P_{s,i} A_{s,i} \dot{z}_{s,i}}{RT} \right), \quad (1)$$

$$\dot{P}_p = \frac{nRT}{V_p} \left(\partial_s q_p - \sum_{i=1}^4 \partial_{s,i} q_{s,i} \right), \quad (2)$$

$$\ddot{z} = \frac{1}{M_s} (F_{s,1} + F_{s,2} + F_{s,3} + F_{s,4}), \quad (3)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{b}{I_\theta} (F_{s,1} - F_{s,2} + F_{s,3} - F_{s,4}), \quad (4)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{I_\varphi} (F_{s,1} L_a + F_{s,2} L_a - F_{s,3} L_b - F_{s,4} L_b). \quad (5)$$

式(1)~(5)中: q_p 为通过充放气电磁阀进入到充放气换向阀到空气弹簧电磁阀之间管道的流量; b 为左右车轮的距离; L_a 为车辆质心到前轴的距离; L_b 为车辆质心到后轴的距离; $V_{s,i}$ ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为空气弹簧的体积; $P_{s,i}$ ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为 4 个空气弹簧的压力; $q_{s,i}$ ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为进入 4 个空气弹簧的气体的流量; $F_{s,i}$ ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为 4 个空气弹簧的垂直力. 各个空气弹簧的体积为

$$V_{s,i} = A_{s,i} (z_{as0,i} + z_{as,i}), \quad (6)$$

式(6)中: $A_{s,i}$ 为空气弹簧的有效面积, 其变化忽略不计; $z_{as0,i}$ 为空气弹簧的初始高度; $z_{as,i}$ 为空气弹簧的变化高度, $z_{as,i} = (z_{s,i} - z_{u,i})$, $z_{u,i}$ 为车轮的垂直位移. 通过电磁阀的流量(f_q)为

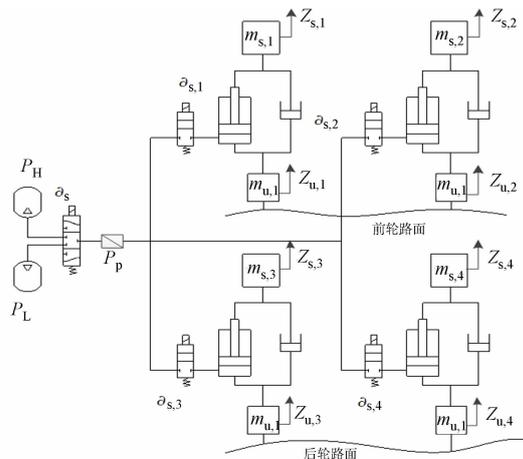


图 1 车高调节原理图

Fig. 1 Vehicle height adjustment schematic

$$f_q(P_u, P_d) = \begin{cases} s \frac{P_u}{\sqrt{RT}} \sqrt{n \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n+1}{n}}}, & 0 < \frac{P_d}{P_u} \leq b, \\ s \sqrt{\frac{2}{RT}} \sqrt{P_d(P_d - P_u)}, & b < \frac{P_d}{P_u} < 1. \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: s 为电磁阀的有效面积; b 为临界压力比.

进入空气弹簧的流量($q_{s,i}$)和气源到空气弹簧管道的流量(q_p)分别为

$$q_{s,i} = \begin{cases} f_q(P_p, P_{s,i}), & \frac{P_p}{P_{s,i}} > 1, \\ -f_q(P_{s,i}, P_p), & \frac{P_p}{P_{s,i}} \leq 1; \end{cases} \quad q_p = \begin{cases} f_q(P_H, P_p), & \partial_s > 0, \\ -f_q(P_p, P_L), & \partial_s < 0. \end{cases} \quad (8)$$

2 控制器的设计

2.1 车高控制器

当实际高度值大于目标高度值时,系统就对空气弹簧进行放气;当实际高度值小于目标高度值时,系统就对空气弹簧进行充气,电磁阀将会频繁动作,车身高度也不稳定,这对电磁阀的使用寿命和汽车的操纵稳定性和乘坐舒适性有极大的不利.因此,为了解决车身高度在控制过程中的超调现象和电磁阀频繁动作问题,采用鲁棒性较好的比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制对车身高度对电磁阀控制电流信号的占空比进行控制.该 PID 控制的原理图,如图 2 所示.

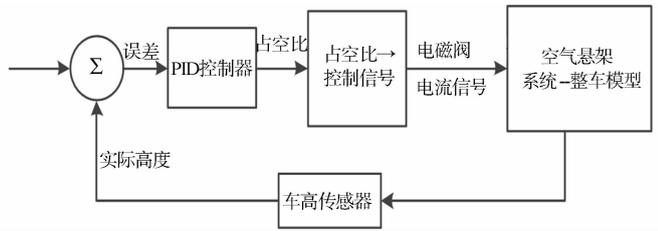


图 2 车身高度 PID 控制原理图

Fig. 2 Vehicle height PID control schematic

设各个空气弹簧电磁阀占空比为 $\delta_{s,i}$ ($i = 1, 2, 3, 4$), 充气换向阀的电流信号占空比为 δ_s , 其中, $\delta_s > 0$ 表示充气电磁阀打开, $\delta_s < 0$ 表示放气电磁阀打开. 该 PID 的控制算法为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) + K_d \dot{e}(t). \quad (9)$$

式(9)中: $u(t)$ 是 PID 控制器输出的占空比信号; $e(t)$ 为目标高度与实际高度的差值; K_p, K_i, K_d 分别是 PID 控制器的比例系数、积分系数和微分系数.

2.2 车身俯仰角控制器

为了节省闭环控制空气悬架系统成本和减小尺寸,使用的是较小功率的压缩机和较小容量的储气罐.因此,在汽车高度上升中,一次只能对两个空气弹簧进行充气.很多地方采用先对前轮两个空气弹簧进行充气,使其到达目标高度后,再对后轮进行充气的方法,但这样会导致在高度控制过程中产生较大的俯仰角,大大降低汽车的操纵稳定性和乘坐舒适性.文中采用两种步进控制,如图 3 所示.

第一种步进控制方法是先对后轮升高 Δt ,等到后轮高度达到目标高度时,再对前轮升高 Δt ,等到前轮达到目标高度时,再对后轮升高 Δt ,一直循环进行,直至前轮和后轮都到达目标高度 T .此时理论的俯仰角幅值(θ)为

$$0 \leq \theta \leq \frac{\Delta t}{L_a + L_b}. \quad (10)$$

定义状态逻辑变量 a_i ($i = 1, \dots, 6$) 和与第 j 步目标高度有关的逻辑变量 b_i ($i = 1, \dots, 6$), 它们的值分别为

$$\left. \begin{aligned} [a_1 = 1] &\leftrightarrow [z_{s,r} < T_{R,j}], & [a_2 = 1] &\leftrightarrow [z_{s,f} < T_{F,j}], \\ [a_3 = 1] &\leftrightarrow [T_{F,j} < T_{R,j}], & [a_4 = 1] &\leftrightarrow [T_{R,j} < T_{F,j}], \\ [a_5 = 1] &\leftrightarrow [T_{R,j} < T1], & [a_6 = 1] &\leftrightarrow [T_{F,j} < T1]. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} [b_1 = 1] &\leftrightarrow [T_{R,j} = T_{R,(j-1)}], [b_2 = 1] \leftrightarrow [T_{R,j} = T_{R,(j-1)} + \Delta t], [b_3 = 1] \leftrightarrow [T_{R,j} = T], \\ [b_4 = 1] &\leftrightarrow [T_{F,j} = T_{F,(j-1)}], [b_5 = 1] \leftrightarrow [T_{F,j} = T_{F,(j-1)} + \Delta t], [b_6 = 1] \leftrightarrow [T_{F,j} = T]. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

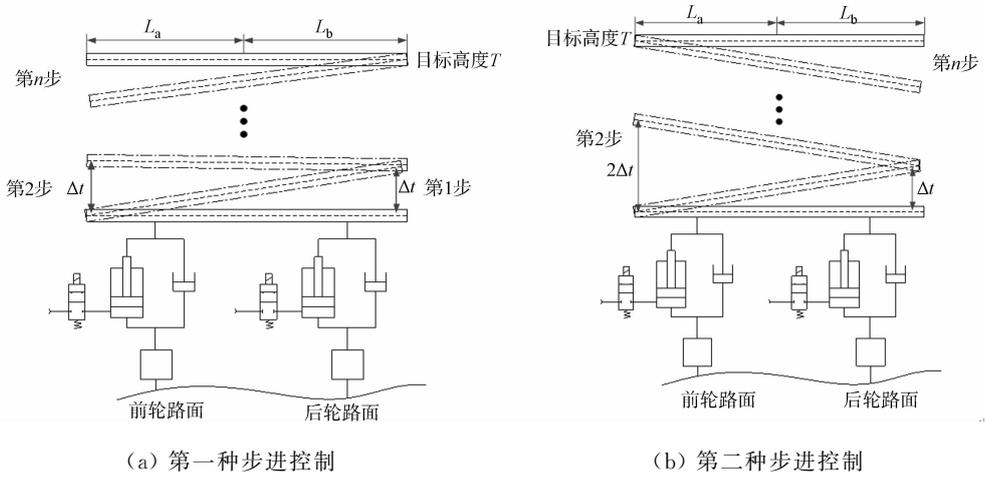


图3 不同步进控制原理图

Fig. 3 Different step control principle schematic

式(11), (12)中: $T_{F,j}$ 为第 j 步前轮的目标高度; $T_{R,j}$ 为第 j 步后轮的目标高度; $z_{s,f}$ 为前轮悬架实际高度的算术平均和, $z_{s,f} = \frac{1}{2}(z_{s,1} + z_{s,2})$; $z_{s,r}$ 为后轮悬架实际高度的算术平均和, $z_{s,r} = \frac{1}{2}(z_{s,3} + z_{s,4})$; $T1$ 为目标高度与步长 Δt 的差值, $T1 = T - \Delta t$.

定义辅助逻辑变量 $a_7 = b_2 \vee b_3$, $a_8 = b_5 \vee b_6$, 则可得到与电磁阀控制有关的逻辑变量值: $b_1 = a_7$, $b_2 = \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_2 \wedge \bar{a}_3 \wedge \bar{a}_4 \wedge a_5$, $b_3 = \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_2 \wedge \bar{a}_3 \wedge \bar{a}_4 \wedge \bar{a}_5$, $b_4 = a_8$, $b_5 = \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_2 \wedge a_3 \wedge \bar{a}_4 \wedge a_6$, $b_6 = \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_2 \wedge a_3 \wedge \bar{a}_4 \wedge \bar{a}_6$. 第二种步进控制方法先对后轮升高 Δt , 等到后轮高度到达目标高度时, 再对前轮升高 $2\Delta t$, 等到后轮到达目标高度时, 再对前轮升高 Δt , 一直循环进行, 直至前轮和后轮都到达目标高度. 理论俯仰角为

$$-\frac{\Delta t}{L_a + L_b} \leq \theta \leq \frac{\Delta t}{L_a + L_b}. \quad (13)$$

定义与第 j 步状态逻辑变量 a_9, a_{10} 和与前后轮目标高度有关的逻辑变量 $d_i (i=1, \dots, 7)$, 有

$$\left. \begin{aligned} [a_9 = 1] &\leftrightarrow [T_{R,j} < T2], & [a_{10} = 1] &\leftrightarrow [T_{F,j} < T2], \\ [d_1 = 1] &\leftrightarrow [T_{R,j} = T_{R,(j-1)}], & [d_2 = 1] &\leftrightarrow [T_{R,j} = T_{R,(j-1)} + \Delta t], \\ [d_3 = 1] &\leftrightarrow [T_{R,j} = T + 2\Delta t], & [d_4 = 1] &\leftrightarrow [T_{R,j} = T], \\ [d_5 = 1] &\leftrightarrow [T_{F,j} = T_{F,(j-1)}], & [d_6 = 1] &\leftrightarrow [T_{F,j} = T_{F,(j-1)} + 2\Delta t], \\ [d_7 = 1] &\leftrightarrow [T_{F,j} = T]. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

定义辅助逻辑变量 $a_{11} = d_2 \vee d_3 \vee d_4$, $a_{12} = d_7 \vee d_8$, 则可得到与电磁阀控制有关的逻辑变量值为

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= a_{11}, & b_2 &= \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_2 \wedge \bar{a}_3 \wedge \bar{a}_4 \wedge a_9, & b_3 &= \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_2 \wedge a_3 \wedge \bar{a}_4 \wedge a_9, \\ b_4 &= \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_2 \wedge a_3 \wedge \bar{a}_4 \wedge \bar{a}_9, & b_5 &= a_{12}, & b_6 &= \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_2 \wedge \bar{a}_3 \wedge a_4 \wedge a_{10}, \\ b_7 &= \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_2 \wedge \bar{a}_3 \wedge a_4 \wedge \bar{a}_{10}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真实验

为了更好地模拟空气悬架充放气的动态过程, 采用 AMESim 对汽车悬架进行建模分析. 在搭建模型时, 选择一个可变容积气室和可移动缸体表示一个空气弹簧^[17]. 空气弹簧在仿真时忽略其横截面积的变化, 其位移通过可移动缸体的缸体位移来表示, 压强通过可变移动缸体的压强表示, 空气弹簧的初始压强用一个恒压源表示. 充放气电磁阀由换向阀表示, 当控制器输出的电流超过正的电磁阀接通电流时, 气源变为充气源; 否则, 气源变为放气源. 空气弹簧的充放气状态则由空气弹簧电磁阀决定. 将以上几个部分连接, 即可组成空气悬架系统.

汽车的质心的垂直位移 (z), 俯仰角和侧倾角 (ϕ) 用 AMESim 平台输出的悬架位移 $z_{s,i} (i=1, 2, 3, 4)$ 可表示为

$$\left. \begin{aligned} z &= \frac{L_b(z_{s,1} + z_{s,2}) + L_a(z_{s,3} + z_{s,4})}{L_a + L_b}, \\ \theta &= \frac{-z_{s,1} - z_{s,2} + z_{s,3} + z_{s,4}}{2(L_a + L_b)}, \\ \phi &= \frac{z_{s,1} - z_{s,2} + z_{s,3} - z_{s,4}}{4b}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式(16)中,俯仰角为前倾时取正值;侧倾角为右倾时取正值。

将在 AMESim 平台上建好的空气悬架模型和在 Simulink 平台上写好的控制算法进行联合仿真,在 AMESim 平台上的联合仿真结构,如图 4 所示。

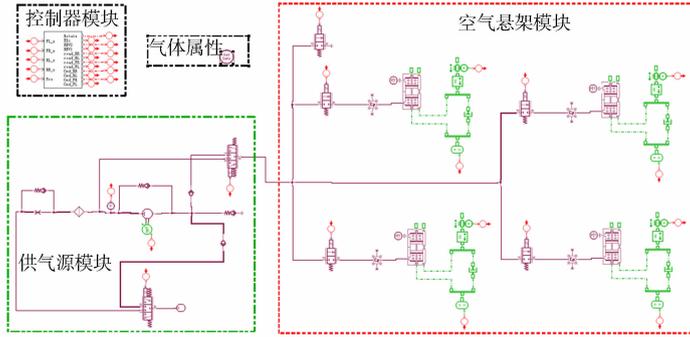


图 4 联合仿真结构

Fig. 4 Co-simulation structure

仿真时空气悬架系统的参数取值,如表 1 所示。

表 1 联合仿真主要参数

Tab. 1 Main co-simulation parameters

参数	数值	参数	数值	参数	数值
汽车簧载质量/kg	1 760	单组悬架减振器阻尼系数/ $N \cdot (m \cdot s)^{-1}$	8 000	汽车前轴距离/mm	1 062
汽车后轴距/mm	1 638	汽车轮距/mm	1 555	空气弹簧气缸直径/mm	100
空气弹簧初始压力/Pa	50 000	空气弹簧电磁阀有效面积/ mm^2	20	空气弹簧电磁阀流动系数	0.05
换向阀有效面积/ mm^2	20	换向阀流动系数	0.08	储气罐容积/L	6
储气罐初始压力/Pa	100 000	压缩机工作时转速/ $r \cdot min^{-1}$	2 300		

3.2 仿真结果分析

为验证两种步进控制方法下的控制效果,假设汽车以速度为 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 在 C 级路面上行驶,按照表 1 进行参数设置. 然后,利用 MATLAB/Simulink 软件对 AMESim 平台建立的闭环空气悬架进行联合仿真. 设置目标高度为 0.1 m ,分别采用第一种步进控制和第二种步进控制方法,步长 Δt 分别为 $0.10, 0.05, 0.03 \text{ m}$,可得到不同步进控制的质心高度,俯仰角,分别如图 5,6 所示。

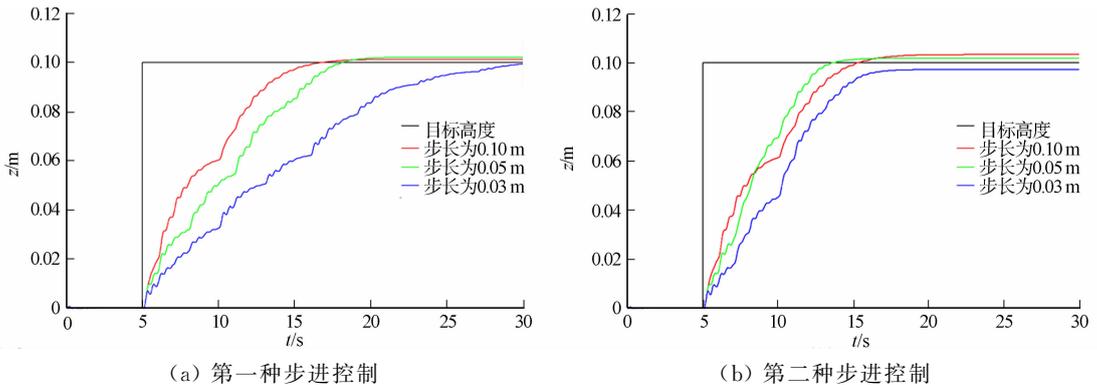


图 5 不同步进控制质心高度

Fig. 5 Vehicle height under different step control

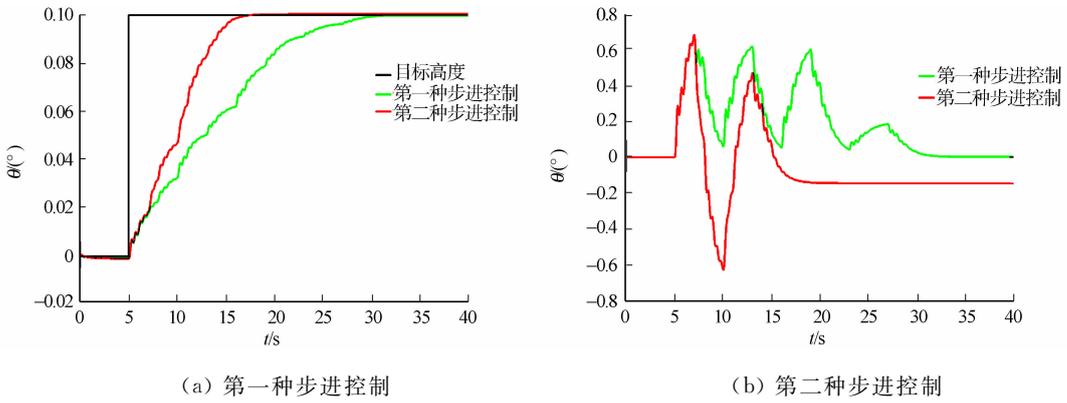


图6 不同步进控制的俯仰角

Fig. 6 Pitch angle under different step control

由图5,6可知:在步进控制时, Δt 越小,控制精度越高,车高控制过程中造成的俯仰角数值也小,但是相对应的,达到目标高度需要的时间也越久,相对步长为0.1 m.即传统的方法先使汽车后轮的空气悬架高度上升到目标高度时,再对另一端空气弹簧进行充气,使其高度上升,步进控制后的车身高度达到目标高度所需的时间变长,但高度调节过程中俯仰角的幅值却大大下降.在文中仿真实验中,传统控制俯仰角幅值为 2.24° ,进行第一种步进控制时,步长设置为0.05 m,俯仰角幅值降为 1.21° ,步长设置为0.03 m,俯仰角幅值降为 0.68° .仿真实验证明,两种步进控制对于车高调节过程中俯仰角的控制有一定作用.

两种步进控制的质心高度及俯仰角对比图,如图7,8所示.图7,8中:步长 Δt 为0.03 m.由图7,8可知:在步长相同的情况下,第一种步进控制和第二种步进控制的俯仰角幅值相差不大,大致为 0.60° ;第一种步进控制俯仰角在车高调节过程中全为正,第二种步进控制俯仰角有正有负;第二种步进控制到达目标高度的时间为第18 s,第一种步进控制则为32 s,时间明显长于第一种步进控制时间.综上分析,应选择步长 Δt 为0.03 m的第二种步进控制作为控制俯仰角的控制方法.

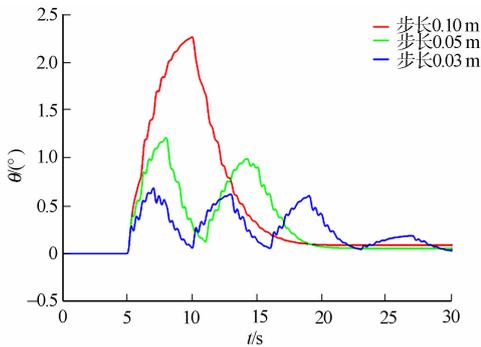


图7 两种步进控制的质心高度对比
Fig. 7 Comparison of centroid heights under control of two methods

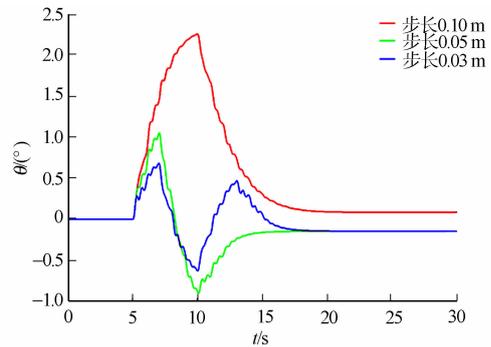


图8 两种步进控制的俯仰角对比
Fig. 8 Comparison of pitch angle under control of two methods

4 结论

针对带有较小压缩机和储气罐的闭环空气悬架系统传统车身高度调节存在的俯仰角过大问题,提出两种车身俯仰角步进控制方法,通过建立带有空气悬架的整车模型的两个非线性数学模型,然后在AMESim平台上建立空气悬架模型.将Simulink编写好的控制算法与搭建好的空气悬架模型进行联合仿真.

1) 提出的两种步进控制算法相比于传统控制算法,俯仰角的幅值有降低,且步长越小,控制精度越高,造成的俯仰角幅值越小,但相应的到达目标高度的时间也越长.

2) 在相同步长情况下,两种步进控制算法在车高调节过程中造成的俯仰角幅值基本相同,但第二

种步进控制中实际高度到达目标高度的时间比第一种步进控制时间短。

参考文献:

- [1] SANKARANARAYANAN V, EMEKLI M E, GILVENC B A, *et al.* Semiactive suspension control of a light commercial Vehicle[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2008, 13(5): 598-604. DOI: 10. 1109/ICCAS. 2007. 4406971.
- [2] HIROSE M, MATSUSHIGE S, BUMA S, *et al.* Toyota electronic modulated air suspension system for the 1986 soarer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1988, 35(2): 193-200. DOI: 10. 1109/41. 192649.
- [3] TANIGUCHI S, YORIFUJI T, HAMADA T. Analysis and optimization of front suspension characteristics based on ADAMS[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2013, 32(3): 43-47. DOI: 10. 1111/j. 1365-2230. 1994. tb02689. x
- [4] 于微波, 张立柱, 李楠. 基于汽车空气悬架系统的车高模糊控制研究[J]. 仪器仪表用户, 2006, 13(2): 6-8. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-1041. 2006. 02. 004.
- [5] SUN Xiaoqiang, CAI Yingfeng, CHAO Chunyuan, *et al.* Vehicle height and leveling control of electronically controlled air suspension using mixed logical dynamical approach[J]. Science China Technological Sciences, 2016, 59(12): 1-11. DOI: 10. 1007/s11431-015-0984-y.
- [6] 江洪, 钱宽, 邱亚东, 等. 气路闭环空气悬架系统能量损耗建模及分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(23): 3239-3244. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-132X. 2014. 23. 022.
- [7] 何二宝, 杜群贵. 闭环空气悬架系统车高调节建模与能耗分析[J]. 机械设计与制造, 2012(5): 45-47. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-3997. 2012. 05. 017.
- [8] 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. DOI: 10. 11817/j. issn. 1672-7207. 2017. 01. 036.
- [9] 杨阳阳. 气路闭环空气悬架系统车身高度调节系统研究[J]. 现代经济信息, 2016(12): 349-350. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-828X. 2016. 18. 289.
- [10] KIM H, LEE H. Fault-tolerant control algorithm for a four-corner closed-loop air suspension system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4866-4879. DOI: 10. 1109/TIE. 2011. 2123852.
- [11] 林添良, 杨杰, 刘强, 等. 新型液压挖掘机回转驱动系统仿真[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 247-252. DOI: 10. 11830/issn. 1000-5013. 2013. 03. 0247.
- [12] 宋意, 杨建红, 房怀英, 等. 立轴冲击式破碎机除尘的数值模拟与仿真分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 14-19. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201704048.
- [13] 陈黎卿, 林建飞, 汤池潜, 等. 电控空气悬架系统参数的多目标优化[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(3): 462-468. DOI: 10. 13433/j. cnki. 1003-8728. 2017. 0322.
- [14] 严天一, 李聪聪, CHO X H, 等. 基于模型的电控空气悬架系统控制策略与实车试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 385-389. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 05. 049.
- [15] 李元鹏, 郭疆, 孙继明. 基于 AMESim 的整车主动悬架建模仿真研究[J]. 液压气动与密封, 2017, 37(7): 16-19. DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-0813. 2017. 07. 005.
- [16] 张昆, 习文辉, 邓文华, 等. 基于 CarSim-Simulink 联合仿真的整车半主动悬架模糊控制仿真研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2015(1): 39-44. DOI: 10. 16112/j. cnki. 53-1223/n. 2015. 01. 008.
- [17] 戚壮, 李芾, 黄运华, 等. 基于 AMESim 平台的轨道车辆空气弹簧系统气动力学仿真模型研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 79-86. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4632. 2013. 03. 13.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 崔长彩)