

文章编号: 1673-9469 (2019) 02-0097-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.02.022

基于 MATLAB 的汽车悬架系统仿真研究

李洁, 刘耿硕

(邯郸学院机电学院, 河北邯郸 056005)

摘要: 悬架作为汽车的关键零件之一, 直接决定着汽车乘坐的舒适性和行驶安全性。为了建立汽车悬架系统有效的控制器, 实现对悬架系统的有效控制, 进而提升车身的稳定性和安全性, 以主动悬架为研究对象, 建立了两自由度 1/4 悬架模型, 通过受力分析建立了合适的数学模型。并且基于 MATLAB/Simulink 构建了仿真模型, 通过选择车身加速度这个最有效的标准作为控制目标, 设计了 PID 控制器并进行了仿真模拟调控。最后采用试凑法整定参数, 经过多次仿真模拟和对比实验结果, 得出了 PID 控制器参数的最佳整定值。

关键词: 主动悬架; MATLAB; 车身加速度; PID 控制器

中图分类号: U463.33

文献标识码: A

Simulation Research of Automobile Suspension System Based on MATLAB

LI Jie, LIU Gengshuo

(School of Mechanical and Electric Engineering, Handan University, Handan 056005, China)

Abstract: As one of the key parts of the automobile, suspension can directly determine the ride comfort and driving safety. In order to establish the effective controller of the automobile suspension system, realize the effective control of the suspension system, and thereby improve the stability and safety of the car body, this paper takes the active suspension as the research object, establishes a two-degree of freedom one-fourth suspension model, and a suitable mathematical model is established by force analysis. In addition, based on MATLAB/Simulink, a simulation model was——is established. By selecting the most effective standard of vehicle body acceleration as the control target, a PID controller was built to carry out simulation regulation. Finally, the parameters are adjusted by trial and error method, and the optimal tuning results of PID controller parameters are obtained through multiple simulation.

Key words: Active suspension; MATLAB; Body acceleration; PID control

悬架是车轮与车身之间的连接部件, 是传递车辆的车架与车桥之间作用力和力矩的连接装置总称, 悬架一般由弹性元件、减震及传动装置三部分构成^[1-3]。悬架有两方面作用, 其一是起连接作用, 二是通过弹性元件与阻尼元件的相互作用, 来减少不平路面的影响, 使车辆在遇到不平衡路面时仍能保证平稳性和舒适性^[4-5]。当汽车在不平整路面行驶时, 车辆自身受到的冲击力由轮胎上的悬架装置传

到车身, 正是因为悬架系统发挥作用, 汽车才会在不平整路面行驶时仍能保持平稳。

在已有的车辆模型分析中, 主动悬架的减震效果是最好的, 被动悬架的性能相对最差^[6-9]。因此, 本文以 1/4 主动悬架为研究对象, 首先在简化分析悬架系统后, 构建两自由度 1/4 主动悬架系统物理模型。其次通过简化路面输入, 提出了悬架性能的评价标准。由于车身加速度是反映悬架性能最直接

收稿日期: 2019-04-23

基金项目: 河北省科技厅项目 (18212110); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目 (1721202044-4); 邯郸学院课题 (2018101)

作者简介: 李洁 (1982-), 女, 河北邯郸人, 硕士, 讲师, 从事工业技术控制, 非线性控制理论, 混沌系统的研究。

也是最有效的方式,所以本文采用车身加速度作为悬架性能的评价指标,设计了PID控制器并整定其参数。最后,通过仿真对比评价目标的控制效果,得出了,和三个参数的最佳结果。该研究为设计和制造汽车悬架系统有效的控制器,实现对悬架系统的有效控制提供了重要的理论参考。

1 悬架系统动力学模型的建立

在进行悬架系统模型等效时,并不是模型越全面越好,全面的模型会使结果更复杂,不能抓住研究的重点。因此,本文采用两自由度 1/4 主动悬架模型,这是最直接的等效模型。通过简化得到主动悬架模型如图 1 所示^[10-12]。其中, M_1 表示轮胎与选件之间器件的质量, M_2 表示悬置质量, x_0 表示路面激励, x_1 表示非悬置质量质心的垂直位移, x_2 表示悬置质量质心的垂直位移, k_1 和 k_2 分别表示轮胎和悬架弹簧的等效刚度, c_2 表示悬架等效阻尼, F_k 表示作动器的控制力。

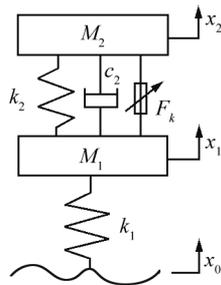


图 1 两自由度 1/4 主动悬架模型

Fig.1 The 1/4 of two degrees of freedom active suspension model

通过对系统受力分析,可得简化后的主动悬架系统的动力学模型方程:

$$M_1 \ddot{x}_1 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1(x_1 - x_0) - k_2(x_2 - x_1) + F_k = 0 \quad (1)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) - F_k = 0 \quad (2)$$

其中 \ddot{x}_1 , \ddot{x}_2 分别表示非悬置质量和悬置质量的质心加速,由式(1)和(2)可得:

$$\ddot{x}_1 = \frac{1}{M_1} [c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) - k_1(x_1 - x_0) - F_k] \quad (3)$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{1}{M_2} [-c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) + F_k] \quad (4)$$

上式中,当控制器的控制力 $F_k = 0$ 时,系统为被动悬架。

2 主动悬架系统的 Simulink 模型建立

为模拟汽车在路面行驶状况,还需设置路面输入。由于路面信息的多样性,现实的路面状况是很难确定下来的^[13-15]。本文采用阶跃信号模拟路面输入,其相当于真实情况下汽车在平整路面行驶中上一个 0.1 m 高的阶梯,然后继续在平稳路面行驶。

在已建立的主动悬架模型中,根据以上分析与建立的运动方程,首先建立了开环系统的仿真模型,如图 2 所示。

当系统在一个幅度为 0.1 m 的阶跃扰动输入信号作用下,得到系统所对应的开环响应图形,如图 3 所示。

从这个 0.1 m 阶跃扰动的开环响应图中,我们可以看到,当汽车经过的道路上有 0.1 m 高的凸起,汽车车身将产生约 50 s 的震荡。由于大的振幅和较长稳定时间,会使汽车中的乘客产生不适感。显然,

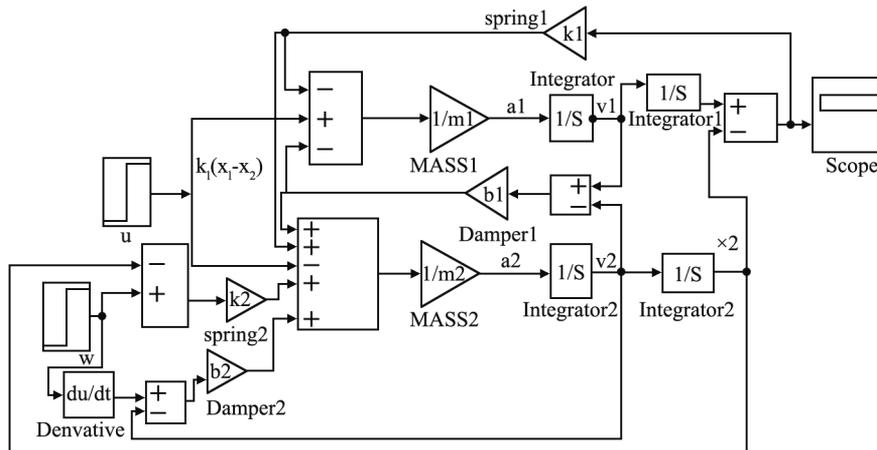


图 2 主动悬架系统的开环仿真模型

Fig.2 Simulation model of open loop of active suspension

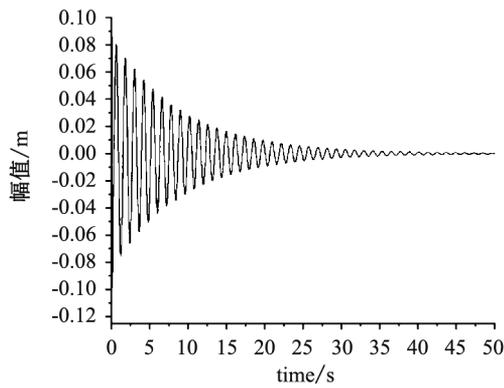


图 3 阶跃扰动的开环响应

Fig.3 Open-loop response of step disturbance

这种震荡不符合人体舒适性的要求，本文通过在系统中增加一个反馈控制器，来尝试改善系统的性能。

3 主动悬架 PID 控制器的设计

为了平衡车身震动，控制车身加速度，应该对 F_k 进行控制。车身加速度理想值为零，可以将输出设为 0，比较实际加速度与理想加速度的差值，即车身加速度作为比较信号。在 PID 控制器设计过程中将车身加速度与目标加速度的差值信号输入至 PID 控制器，以控制作动器的作用力，图 4 是加了反馈控制器的 PID 仿真模型。

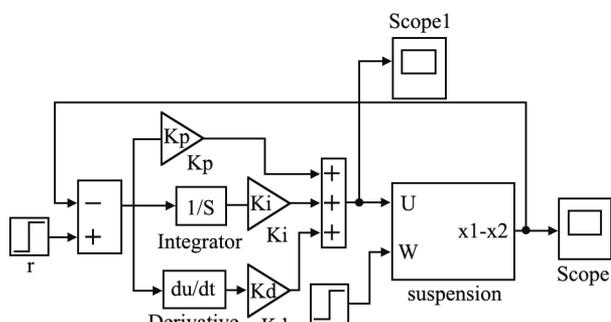


图 4 主动悬架的闭环仿真模型

Fig.4 Closed loop simulation model of active suspension

在图 4 中，悬架内部也有较为完善的数学模型，上图的 Suspension 为悬架控制的模块，该模块中是悬架系统的模块。

在整定过程中， K_p 、 K_i 、 K_d 三个参数的整定对结果起到了至关重要的作用，在整定的过程中，当比例、积分和微分三个参数发生变化时，系统在一定时间内的控制效果和性能变化做出相应的改变，具体变化情况如表 1 所示。

表 1 PID 调节参数与系统时域指标的关系

Tab.1 Relationship between PID adjustment parameters and system time-domain indicators

参数	上升时间	超调量	过度过程时间	静态误差
K_p	变小	变大	微小变化	变小
K_i	变小	变大	变大	消除
K_d	微小变化	变小	变小	微小变化

我们可以按照表 1 找出三个变量之间的基本变化规律，进行 PID 参数的预估与整定。但其中参数的对应关系不是绝对的，只是在一定范围变化时会满足的相对规律。

首先将 K_i 和 K_d 的值设置为 0，然后设置 K_p 参数，当参数 $K_p=180$ 时车身加速度仿真结果如图 5(a) 所示。增大 K_p 的值，观察波形的变换，当参数为 $K_i=0$ ， $K_d=0$ ， $K_p=18000$ 时，仿真结果如图 5(b) 所示。在图 5(b) 中，系统稳定时间仍较长，进一步调节 K_p 的值，当参数设置为 $K_i=0$ ， $K_d=0$ ， $K_p=2500000$ ，仿真结果如图 5(c) 所示。图 5(c) 的仿真波形稳定时间较短，较为符合预期效果。但由于单一的比例调节无法消除误差，所以要进一步进行积分环节的调节。我们在参数 $K_p=2500000$ 的基础之上先把 K_p 下降到 80%，然后逐渐增大 K_i 的值，首先我们将 K_i

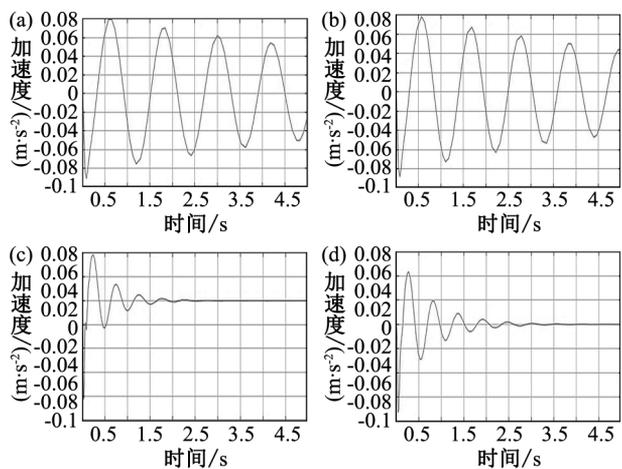


图 5 改变参数后的车身加速度仿真结果

(a) $K_p=180$ 的比例调节车身加速度；(b) $K_p=18000$ 的比例调节车身加速度；(c) $K_p=2500000$ 的比例调节车身加速度，(d) $K_i=10$ 积分调节车身加速度。

Fig.5 Simulation results of automobile body acceleration after changing parameters. Proportional adjustment of automobile body acceleration in different adjustment parameters.

(a) $K_p=180$ ；(b) $K_p=18000$ ；(c) $K_p=2500000$ ，(d) Integral adjustment of body acceleration automobile body acceleration when the K_i is 10.

设为10,此时 $K_p=2\ 000\ 000$,仿真结果如图5(d)所示。

进一步调节参数 K_i 的值,当参数 $K_i=200$, $K_p=1\ 500\ 000$ 时,得到系统的仿真结果如图6(a)所示。经过多次逐步试凑参数,最终得出了PID控制器的参数的最佳整定结果,即: $K_p=1\ 800\ 000$, $K_i=4\ 000$, $K_d=450\ 000$,仿真结果如图6(b)所示。此时超调量小于给定输入的4%,而车身稳定时间为2.5 s,小于3 s,超调量和稳定时间均满足系统的要求。

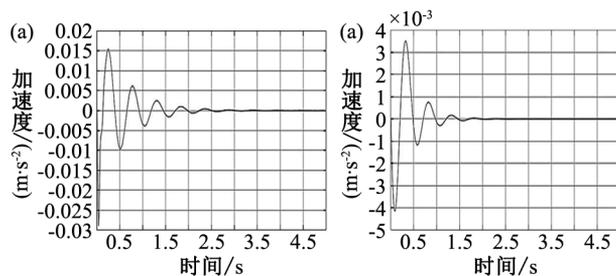


图6(a) $K_i=200$, $K_p=1\ 500\ 000$ 时车身加速度;(b)整定后PID控制器对应的车身加速度。

Fig.6(a) The simulation results of automobile body acceleration when K_i and K_p are 200 and 1500000 respectively; (b) The acceleration of automobile body corresponding to the final PID controller after tuning.

4 结论

通过简化分析悬架系统,构建了两自由度1/4主动悬架物理模型。采用车身加速度作为悬架性能的评价指标,设计了PID控制器,利用MATLAB模拟仿真对比了不同参数时对评价目标的控制效果,仿真结果表明当参数 $K_p=1\ 800\ 000$, $K_i=4\ 000$, $K_d=450\ 000$ 时,系统的超调量小于给定输入的4%,而车身稳定时间为2.5 s,超调量和稳定时间达到了最佳结果,从而验证了所设计控制器的正确性。

参考文献:

[1] 孟杰,陈庆樟,张凯.基于粒子群算法的汽车悬架

- PID控制仿真[J].计算机仿真,2013,30(4):155-158.
- [2] 汤瑞清,郭利.基于虚拟样机技术的汽车悬架转向系的研究[J].机械设计与制造工程,2016,45(12):13-16.
- [3] 宋玉玲.汽车主动悬架控制方法的仿真研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [4] 张朋.车辆座椅主动悬架控制策略及Simulink仿真研究[D].锦州:辽宁工业大学,2016.
- [5] 倪彰,王凯,鹿麟祥,等.纯电动汽车悬架系统设计与平顺性分析[J].科学技术与工程,2015,15(12):244-249.
- [6] 华艳秋,郭晓晓,张亮修,等.汽车空气悬架非线性混沌分析[J].公路交通科技,2017,34(4):123-129.
- [7] 王迪,吴光强.基于部件特性的麦弗逊式悬架动力学建模研究[D].长春:吉林大学,2016.
- [8] 汤望,海辰光.用于平顺性仿真的七自由度非线性模型[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2014,29(4):18-22.
- [9] 田丰福,杨金玉.基于模糊神经PID控制的汽车主动悬架平顺性分析与测试[J].实验室研究与探索,2017,36(5):44-47.
- [10] 刘少波,陈庆樟.基于PID控制的电动汽车电机制动ABS研究[J].现代制造工程,2017,(10):41-46.
- [11] 么鸣涛,曹锋,阙瑞义,等.考虑汽车悬架刚度的模糊PID控制[J].北京理工大学学报,2016,36(9):929-934.
- [12] 柴牧,董恩国,李振兴.汽车主动悬架的模糊PID控制策略[J].机械设计,2013,30(5):1-4.
- [13] 段婷婷,王春燕,赵万忠,等.电动轮汽车驱动系统的滑模PID控制[J].江苏大学学报:自然科学版,2015,36(3):260-264.
- [14] 张慧杰,郭志平,司景萍,等.汽车悬架整车动力学模型的参数辨识[J].振动与冲击,2013,32(23):145-150.
- [15] 张智,施晓芬,李俊文.汽车悬架系统的运动仿真及优化设计[J].机械设计,2015,32(9):30-33.

(责任编辑 李新)