

一种新的车辆半主动悬架控制器设计

陈 龙¹, 李德超², 周孔亢¹

(11 江苏大学; 21 上海汽车电子工程中心)

摘 要: 以模糊控制原理为基础, 融合自适应方法, 将模糊系统辨识和模糊控制结合起来, 提出了一种新的自适应模糊半主动悬架控制器, 可以在线自适应调整模糊控制的有关参数, 提高了模糊控制器的控制效果, 增强了适应性和鲁棒性, 且具有一定的工程应用价值。

关键词: 半主动悬架; 自适应; 控制器; 模糊控制

中图分类号: U 463 33

文献标识码: A

文章编号: 100226819(2002)0320054204

模糊控制是当今控制领域中令人瞩目的新的控制方法和技术, 它通过把专家的经验和要求总结成若干规则, 采用简便、快速、灵活的手段, 来完成那些用经典和现代控制手段难以实现的自动化和智能化的目标, 因而在多个领域中得到越来越广泛的应用。由于常规模糊控制器的控制规则是根据现场操作人员或专家的经验总结出来的, 其语言控制规则和合成推理往往是固定的, 从而使其应用有一定的局限性。车辆悬架的振动控制是非常复杂的动态系统, 它既包含非线性, 又包含一些未知变化特性, 它既有模糊性, 又有随机性, 使用常规的模糊控制是无法获得理想的平顺性指标的。本文以简单模糊控制器为基础, 融合自适应方法, 即将模糊系统辨识和模糊控制结合起来, 采用模糊推理和 IF- THEN 产生式规则, 通过隶属度传递处理控制知识, 以振动加速度和加速度变化率作为评价函数, 在模糊控制器内引入了一个“软反馈”, 不断改善控制器的控制性能, 构成了参数自适应模糊控制系统, 使控制性能明显改善。

1 控制算法

1.1 模糊控制算法

模糊控制器组成及原理在许多文献中均有介绍^[1], 这里不再重述。

本文的半主动悬架系统中, 模糊控制器的输入为两个, 即车身加速度 \ddot{x}_2 的偏差 e 及其变化率 \dot{e} , u 为控制器控制输出量, 它将改变半主动悬架主要部件——可调阻尼器的阻尼值。隶属度函数的论域按照半主动悬架系统的物理意义进行划分。模糊控制

器的设计主要包括语言控制规则、隶属函数、控制器输入输出规范化的比例因子等 3 部分。本文采用三角形的隶属函数表示控制规则条件部分的模糊数, 用棒形的隶属函数来表示结论部分的模糊数。根据规范化的变量 e_n , \dot{e}_n , u_n 和实际变量间关系求得 u_n 后, 模糊控制器的输出值由下式计算

$$u(k) = u(k-1) + K_{su} u_n(k) \quad (1)$$

K_{su} ——控制器规范化的比例因子。

根据大量实践经验和有关文献可总结出车辆半主动悬架系统模糊控制规则, 共 49 条^[2]。

1.2 自适应控制算法

自适应控制器是同时执行系统辨识和控制任务的, 是在简单模糊控制器的基础上, 增加了性能测量、控制量校正、控制规则修正等 3 个功能块而构成的一种模糊控制器。

在模糊控制中, 以“偏差”和“偏差变化”作为两个参量, 用以衡量输出特性的偏离情况。因此可以根据这两个参数的采样值 $e(nT)$ 和 $\dot{e}(nT)$ 计算出输出特性所需要的控制量 $p(nT)$, 将性能测量所得到的输出响应校正量 $P(nT)$ 转化为对过程的输入校正量, 并施加于过程。

考虑有一定滞后的系统, 如果用 $e(nT - mT)$ 、 $\dot{e}(nT - mT)$ 、 $u(nT - mT)$ 分别表示以往的偏差、偏差变化和控制量, 而修正后的控制量是 $u(nT - mT) + r(nT)$, 则原来的控制规则为:

$$\text{if } e = E(nT - mT) \text{ and } \dot{e} = \dot{E}(nT - mT) \text{ then } u = U(nT - mT) \quad (2)$$

现在的控制规则应为:

$$\text{if } e = E(nT - mT) \text{ and } \dot{e} = \dot{E}(nT - mT) \text{ then } u = V(nT - mT) \quad (3)$$

为简化结构, 提高控制实时性, 采用相同的隶属函数, 由于控制对象不同, 因而规则表不可能相同, 表 1 为自适应过程规则表。

收稿日期: 2001209218

基金项目: 国家教委博士点基金项目资助项目(98029902); 江苏省自然科学基金资助项目(2001199)

作者简介: 陈 龙, 教授, 院长, 镇江市 江苏大学京江学院, 212013

表 1 性能测量规则表

Table 1 Rule table of performance detemination

E^a	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	3	3	3	2	0	0	0
NM	3	3	2	1	- 1	0	0
NS	3	2	1	0	- 1	- 1	- 2
ZE	2	2	1	0	- 1	- 2	- 2
PS	0	1	1	0	- 2	- 2	- 3
PM	0	0	0	0	- 2	- 3	- 3
PB	0	0	0	0	- 3	- 3	- 3

2 仿真研究

2.1 车辆半主动悬架控制模型

选取二自由度半主动悬架为研究对象, 其中阻尼可调, 文献[2] 给出了半主动悬架的 1ö4 模型, 车辆行驶时, 路面激励可近似处理为一个完整的白噪声 W 。

取状态向量 $X = [x_1 - x_0, x_2 - x_1, \overset{a}{x}_1, \overset{a}{x}_2]^T$, 同时取 $U_0 = F(t)$, $Y = \overset{b}{x}_2$, 路面激励速度为 $\overset{a}{x}_0(t) = W$, 根据牛顿定律, 则悬架系统的控制方程为

$$\begin{cases} \dot{X}^a = AX + BU_0 + GW \\ Y = CX + DU_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & - 1 & 1 \\ - k_1\ddot{ö}n_1 & k\ddot{ö}n_1 & - c\ddot{ö}n_1 & c\ddot{ö}n_1 \\ 0 & - k\ddot{ö}n_2 & c\ddot{ö}n_2 & - c\ddot{ö}n_2 \end{bmatrix}$$
$$B = [0 \ 0 \ 1\ddot{ö}n_1 \ - 1\ddot{ö}n_2]^T$$
$$G = [- 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad D = [- 1\ddot{ö}n_2]$$
$$C = [0 \ - k\ddot{ö}n_2 \ c\ddot{ö}n_2 \ - c\ddot{ö}n_2]$$

2.2 仿真计算

基于已建立的模型, 仿真采用四阶 Rungekutta 法, 计算步长为 0.01。表 2 为计算所采用的两自由度车辆模型部分物理参数。

表 2 两自由度车辆部分物理参数

Table 2 Two2degree of freedom physical parameter of some vehicle suspension

参数	簧载质量 $m_1\ddot{ö}kg$	非簧载质量 $m_2\ddot{ö}kg$	悬架刚度 $k\ddot{ö}N\ m^{-1}$	悬架阻尼 $c\ddot{ö}N\ s\ m^{-1}$	轮胎刚度 $k_1\ddot{ö}N\ m^{-1}$
	1 092	148	77 000	3440	539 000

图 1 为仿真曲线。很显然, 自适应模糊控制半主动悬架的性能优于被动悬架。

3 控制器分析与设计

3.1 硬件设计

半主动悬架控制系统结构原理如文献[2]。

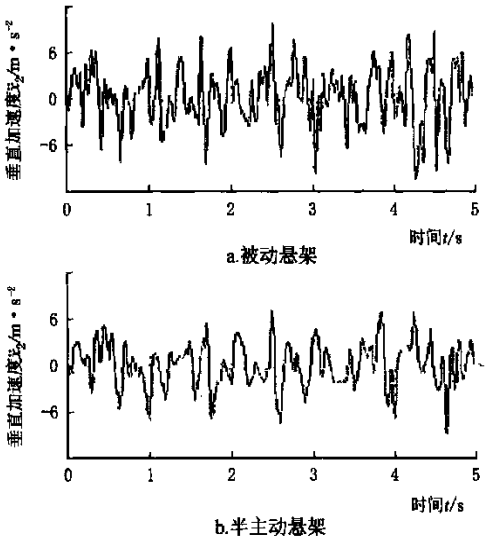


图 1 加速度仿真曲线

Fig. 1 Simulation curves of vehicle acceleration

控制器硬件主要包括: 以 8031CPU 为核心的单片机扩展模块(包括看门狗电路)、放大及滤波模块、采样保持与数模转换模块、与上位机的通讯接口模块、输出驱动模块。压电式加速度传感器采集的加速度信号通过电荷放大器进行放大, 再次放大后进行滤波, 通过采样保持和 A/D 转换把模拟信号转换为数字信号, 数字信号输入单片机进行自适应模糊处理, 产生控制信号驱动步进电机转动一定的角度来实现阻尼的调节, 从而改善悬架性能。

3.1.1 放大、滤波模块

这里简要介绍一下滤波电路。根据《对人体的振动和对人激励评价指南》ISO 2631 标准, 采用总加权加速度均方根值作为评价平顺性指标时, 选用频率范围 1~ 80 Hz, 采用二阶 Butterworth 滤波器, 原理如图 2。电路传递函数为

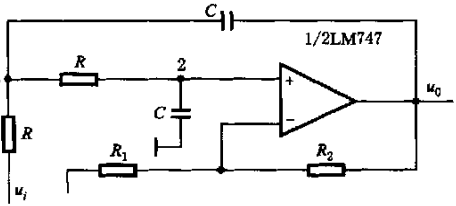


图 2 滤波电路

Fig. 1 Filter circuit

$$A_s = \frac{U_{oS}}{U_i(S)} = \frac{A_{uf} \frac{1}{C^2 R^2}}{S^2 + \frac{3 - A_{uf}}{CR} S + \frac{1}{C^2 R^2}} \quad (7)$$

$$\text{式中 } A_{uf} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}, \text{ 令 } X_u = \frac{1}{CR}$$

$$Q = \frac{CR X_u}{3 - A_{uf}}, S = jX$$

则幅频特性和相频特性为

$$A(X) = \frac{A_{uf}}{\sqrt{(1 - \frac{X^2}{X_w^2})^2 + \frac{X^2}{X_w^2 Q^2}}} \tag{8}$$

$$U(X) = - \arctg \frac{\frac{X}{Q X_w}}{1 - \frac{X^2}{X_w^2}} \tag{9}$$

由Butterworth 滤波器特性, 3dB 时的截止频率为 80 Hz, 取 $R = 10\text{ k}$, 则 $C = 0.20\text{ LF}$, 取 $Q = \frac{\sqrt{2}}{2}$, 则 $A_{uf} = 3 - \frac{1}{Q}$, 取 $R_2 = 10\text{ k}$, $R_1 = 5.86\text{ k}$.

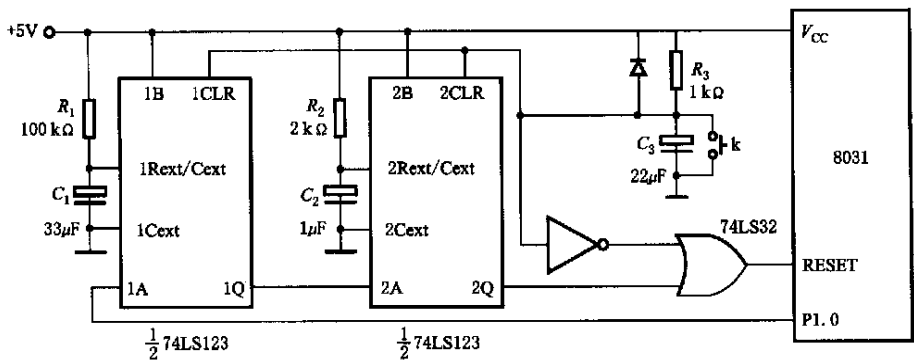


图 3 单稳态“看门狗”电路

Fig 3 Circuit of monostability watchdog

单稳 1# 的输出脉冲宽度为 1.4 s, 若在此期间内 1A 端再有点脉冲输入, 则 1Q 端高电平就会在此刻重新实现 1.4 s 的延时。只要在 1A 端连续不断地输入间隔小于 1.4 s 的负脉冲, 则 1Q 输出将始终维持在高电平上, 这时 2A 保持高电压, 2# 单稳不动作, 2Q 端始终维持在低电压。

3.2 软件设计

对MCS251 系列单片机的软件设计以汇编语言为主, C51 为辅的设计方法, 即对较复杂的函数由 C51 实现后, 再转换为汇编语言代码, 然后经过优化处理后作为子程序加入, 并完成了 8031 与上位机的通讯功能, 软件设计采用模块化结构, 按功能建立子程序, 在程序设计中, 从采样到控制量输出之间的代码段尽可能精减, 以减少计算时延对控制效果不利影响。控制系统软件主要包括初始化、看门狗、数据转换、自适应模糊处理、步进电机驱动等几个模块。主程序流程如图 4, 图 5 为单稳态“看门狗”程序框图。

根据自适应模糊控制算法, 模糊处理的关键在于取大取小过程, 这是算法的核心, 定位过程实际是寻找需修正规则位置的过程, 利用简单的求数组最大值位置的算法即可实现。取小流程如图 6, 其中 $E(7)$ 为误差 e 模糊化后得到的向量, $E^a(7)$ 为误差变

3.1.2 8031 扩展系统及看门狗电路

8031 内部无程序存储器, 数据存储器也不能满足要求, 这里扩展了 32 k 的 RAM (62256) 和 64 k 的 EPROM (27512), 实际系统中 PC 受到干扰而失控, 引起程序乱飞, 也可能会陷入“死循环”。看门狗技术就是不断监视程序运行时间, 若发现时间超过已知的循环设定时间, 则认为系统陷入了“死循环”, 然后强迫程序返回到 0000H 入口, 重新开始执行。图 3 为 74LS123 双可再触发单稳态谐振振荡器设计的看门狗电路。

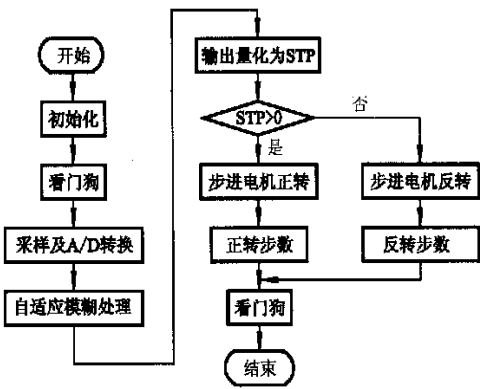


图 4 主程序框图

Fig 4 The flow chart of main programme

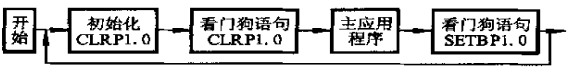


图 5 单稳态“看门狗”程序框图

Fig 5 The flow chart of monostability watchdog

化率 e^a 模糊化后得到的向量, $E - E^a(49)$ 为通过取小过程得到的隶属度矩阵。

3.3 控制系统实验

为提高系统的性能, 优化系统的结构, 对包括电源模块、放大、滤波模块、单片机扩展模块、步进电机

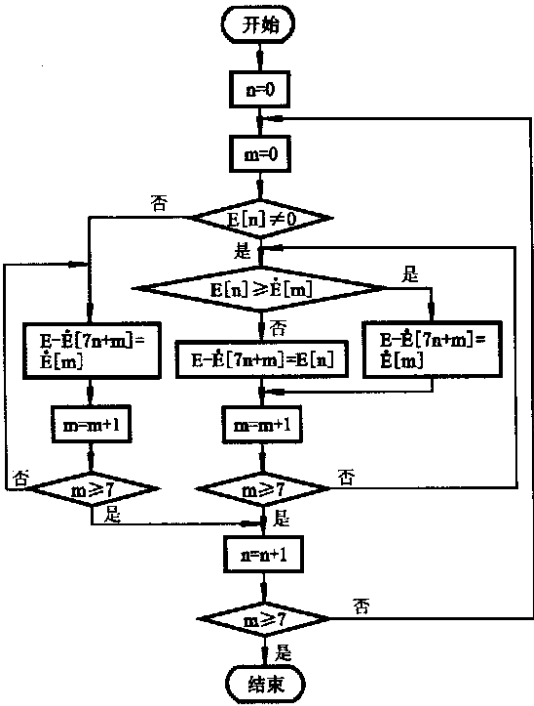


图 6 取小过程流程图

Fig 6 The flow chart of minimum seeking programme

模块、数模转换模块分别进行了测试,适当修改和功能整合后,又进行了整体测试。

在上述基础上,进行了台架试验,比较控制前后簧载质量加速度响应的标准差,结果表明,施加控

制的减振效果明显优于未施加控制的,同时,控制系统工作稳定,满足控制要求。多次试验,结论相似^[2]。

4 结 论

本文提出的自适应模糊半主动悬架控制器,以模糊控制原理为基础,使控制器的设计非常简单,实时性好,可以在线自适应调整模糊控制的有关参数,大大提高了半主动悬架控制系统的鲁棒性,对控制系统的动态性能有明显改善。用汇编语言实现的自适应模糊控制程序,实验证明控制有效,作必要的修改后,其内核可应用到其它自适应模糊控制场合。

[参 考 文 献]

[1] 李友善,李 军 模糊控制理论在过程控制中的应用[M] 北京:国防工业出版社,1992
[2] 李德超 车辆半主动悬架系统自适应模糊控制的研究[D] 镇江:江苏理工大学,2001
[3] Wu Zhiqiao, Masaharu Mizumoto. PD type fuzzy controller and parameters adaptive method[J] Fuzzy Sets and Systems, 1996, 78: 23~ 25
[4] 陈 龙,李德超,薛念文等 基于模糊控制理论的自适应模糊控制半主动悬架研究[J] 农业工程学报,2001, 17(6): 9~ 12
[5] 陈 龙,周孔亢,薛念文等 农用运输车车架载荷研究[J] 农业工程学报,2001, 17(3): 71~ 74

Design of a New Controller for Vehicle Semi-active Suspension

Chen Long¹, LiDechao², Zhou Kongkang¹

(1. Jingjiang College, Jiangsu University, Zhengjing 212013, China;

2. Shanghai Center of Automobile Electronic Engineering, Shanghai 200050, China)

Abstract: Based on the fuzzy control principle and adaptive scheme, combining the fuzzy system identification with the fuzzy control, a new kind of controller for vehicle semiactive suspension is proposed, which makes the controller performance better by readjusting the fuzzy control rules online, and the controller realtime performance is improved also by mending the algorithm. As compared with general parameter adaptation, it has strong adaptation and robustness. The controller realtime performance is improved. It will be of a certain application value to engineering application.

Key words: semiactive suspension; selfadaptation; controller; fuzzy control