

文章编号: 1002-0411(2000)01-006-08

基于 1/2 车辆模型的主动悬架预见控制方法研究

刘少军 李 艳

(中南工业大学机电工程学院 长沙 410083)

摘 要: 本文针对一个 1/2 车辆模型, 分别应用完全预见控制方法和部分预见控制方法进行汽车主动悬架控制系统的设计. 数字仿真结果表明, 两方案在改善汽车性能及降低制造和使用成本方面各有其优势.

关键词: 主动悬架, 完全预见控制, 部分预见控制

中图分类号: TP13

文献标识码: B

1 引言

悬架是现代汽车的重要总成之一, 改善悬架系统的性能, 对提高汽车产品质量具有极其重要的意义. 与传统的被动悬架不同, 主动悬架能根据检测到的车辆和环境状态, 主动及时的调整和产生所需悬架控制力, 使悬架处于最优的减振状态. 因而, 主动悬架及其控制已愈来愈受到各国汽车工程界的重视.

目前已报道的有关主动悬架控制方法的研究几乎涉及到现代控制理论的所有分支. 各种控制方式均有实用价值且各具特点. 而乘用车由于空间和能耗量等限制, 要求主动悬架在非常短的时间内对应一些突然的路面变化而产生足够大的控制力是相当困难的. 而如果采用预见控制方法, 提前检测到这个路面的干扰, 从而提前考虑相应的对策, 则有可能弥补系统响应速度不足和避免造成瞬时峰值流量要求太大的状况. 因而, 就在实际车辆主动悬架上的应用而言, 作者认为预见控制方式将独具优势. 对于车辆主动悬架的预见控制, 人们已作过一系列的研究^[1]. 他们对不同的车辆模型构成过多种预见控制方案, 也求得了一些理论解. 据报道日本三菱自工曾在实验室阶段进行过实验车研究^[2], 但未见实际应用, 而在文献[3]中, 本文作者曾针对一个 1/4 模型而建立一个预见控制系统, 并通过实验验证了预见控制方式可取得非常理想的效果, 证实了预见控制在车辆主动悬架上应用的可行性和发展前景.

预见控制能否实施的关键在于预见信息如何获得. 根据预见信息的获取及利用方法不同, 可分为对四轮全进行预见的完全预见方式和利用前轮信息对后轮进行预见控制的部分预见方式. 本文以在日本 SOARER 车上应用的主动悬架系统为研究对象, 针对 1/2 车辆模型, 分别采用完全预见和部分预见控制两种控制方案, 设计了主动悬架预见控制系统. 并通过大量仿真试验, 对两种控制方案进行比较.

2 主动悬架模型的建立

2.1 系统构成

本文所研究的悬架系统如图 1 所示, 这是一个 1/2 车辆模型(考虑一个前轮和一个后轮).

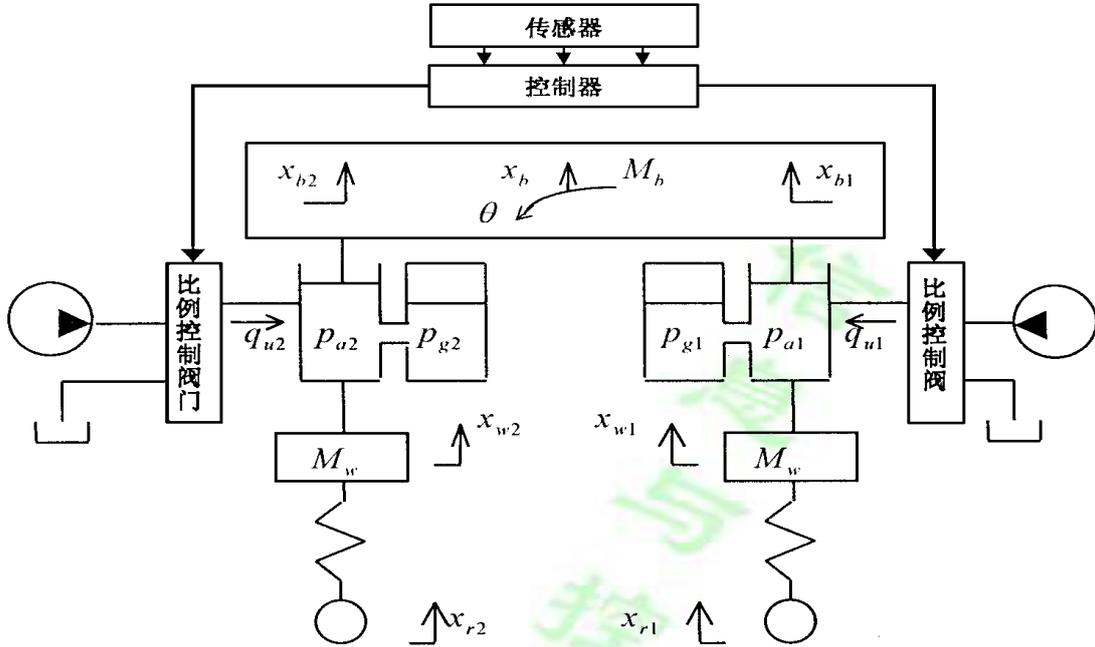


图1 汽车主动悬架系统(1/2 车体模型)

图中执行机构是丰田 SOARER 车主动悬架系统中实用的油气缸装置, 在随后的数字仿真分析中, 所采用的亦是该系统的一些实际参数. 系统中传感器检测路面信息和车辆状态, 并传输到控制器. 由控制器发出控制指令, 来控制阀门的开关, 使进出油气缸的流量被控制, 从而改变油气缸中油腔压力, 获得所需的控制力, 达到控制车体振动的目的^[4,5].

2.2 系统的数学模型

假设初始平衡状态下有:

$$p_{a10}A_{CP} = p_{a20}A_{CP} = M_b g/2$$

$$p_{a10} = p_{g10} = p_{a20} = p_{g20} = P_0$$

对图1 主动悬架系统进行受力分析, 建立其数学模型如下:

(a) 车体运动方程式为:

$$M_b \ddot{x}_b = [p_{a1}A_{CP} - C_a(\dot{x}_{b1} - \dot{x}_{w1})] + [p_{a2}A_{CP} - C_a(\dot{x}_{b2} - \dot{x}_{w2})] - M_b g$$

$$J \ddot{\theta} = [p_{a1}A_{CP} - C_a(\dot{x}_{b1} - \dot{x}_{w1})] \cdot L - [p_{a2}A_{CP} - C_a(\dot{x}_{b2} - \dot{x}_{w2})] \cdot L + M_b g e \sin \theta$$

(b) 车轮运动方程式为:

$$M_w \ddot{x}_{w1} = C_a(\dot{x}_{b1} - \dot{x}_{w1}) - p_{a1}A_{CP} + M_b g/2 - K_t(x_{w1} - x_{r1})$$

$$M_w \ddot{x}_{w2} = C_a(\dot{x}_{b2} - \dot{x}_{w2}) - p_{a2}A_{CP} + M_b g/2 - K_t(x_{w2} - x_{r2})$$

(c) 油气缸的油压与流量的关系:

$$\dot{p}_{a1} = \frac{K}{V_{pc}} [-q_{a01} - A_{CP}(\dot{x}_{b1} - \dot{x}_{w1})] + \frac{K}{V_{pc}} q_{w1}$$

$$\dot{p}_{a2} = \frac{K}{V_{pc}} [-q_{a02} - A_{CP}(\dot{x}_{b2} - \dot{x}_{w2})] + \frac{K}{V_{pc}} q_{w2}$$

(d) 油气缸的气体室状态方程式:

$$D_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_t}{M_w} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_t}{M_w} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

进一步将式(1)离散化可得:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Dd(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (2)$$

3 控制系统设计

3.1 完全预见控制

完全预见控制, 即对四轮全进行预见控制. 控制系统结构图如图 2 所示. 这种控制系统在车的前部设置有特定的预见传感器(如日本三菱自工曾在车辆上安装的超音波的预见传感器)以测试前方道路状态,^[2]然后将这些信息送至控制器. 控制器根据这些信息计算出控制指令, 并将相应信号送至四个轮中的每一个悬架执行机构.

对式(2)所描述的系统, 定义误差变量

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (3)$$

上式中 $r(k)$ 为目标值, 恒设定为 0. 将式(2)、(3)进行一阶差分后, 可构成如下误差系统^[6]:

$$\begin{bmatrix} e(k+1) \\ \Delta x(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Im & -CA \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(k) \\ \Delta x(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -CB \\ B \end{bmatrix} \Delta u(k) + \begin{bmatrix} -CD \\ D \end{bmatrix} \Delta d(k) \quad (4)$$

或表示为:

$$x_0(k+1) = \Phi x_0(k) + G \Delta u(k) + G_d \Delta d(k)$$

进一步, 设干扰变化可以预测到前面的 M_d 步, 并定义:

$$x_d(k) = \begin{bmatrix} \Delta d(k+1) \\ \Delta d(k+2) \\ \vdots \\ \Delta d(k+M_d) \end{bmatrix}$$

$$\Delta d(k+i) = 0 \quad i = M_d + 1, M_d + 2, \dots$$

于是系统(4)可以被扩展为:

$$\begin{bmatrix} x_0(k+1) \\ x_d(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi & G_{pd} \\ 0 & A_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(k) \\ x_d(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u(k)$$

对上述扩大误差系统, 应用最优调节器理论, 寻找一个最优控制信号 $u(t)$, 使得评价指标

$$J = \sum_{k=-MR+1}^{\infty} \begin{bmatrix} x_0^T(k) & x_d^T(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(k) \\ x_d(k) \end{bmatrix} + \Delta u^T(k) H \Delta u(k)$$

取最小值, 可求得最优解:^[6]

$$\Delta u(k) = F_0 x_0(k) + \sum_{j=1}^{M_d} F_d(j) \Delta d(k+j)$$

$$= F_e e(k) + F_x x(k) + \sum_{j=1}^{M_d} F_d(j) \Delta d(k+j) \quad (5)$$

这里有:

$$\begin{aligned} F_0 &= - [H + G^T P G]^{-1} G^T P \Phi \\ F_d(j) &= - [H + G^T P G]^{-1} G^T (\zeta)^j P G_d \\ j &= 0, 1, 2, \dots, M_d \\ P &= Q + \Phi^T P \Phi - \Phi^T P G [H + G^T P G]^{-1} G^T P \Phi \\ \zeta &= \Phi + G F_0 \end{aligned}$$

式中 Q, H 为加权矩阵. 进一步对式(5)进行 Z 变换可得:

$$u(k) = F_e \frac{1}{1 - z^{-1}} e(k) + F_x x(k) + F_{pd}(z) d(k)$$

式中

$$\begin{aligned} F_0 &= [F_e \quad F_x] \\ F_{pd}(z) &= F_d(0) + F_d(1)Z + \dots + F_d(M_d)z^{M_d} \end{aligned}$$

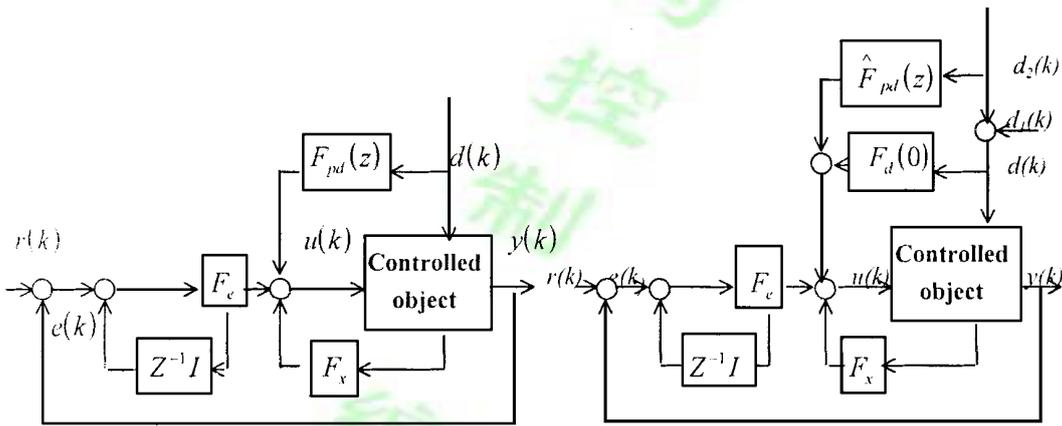


图 2 完全预见控制结构图

图 3 部分预见控制结构图

3.2 部分预见控制

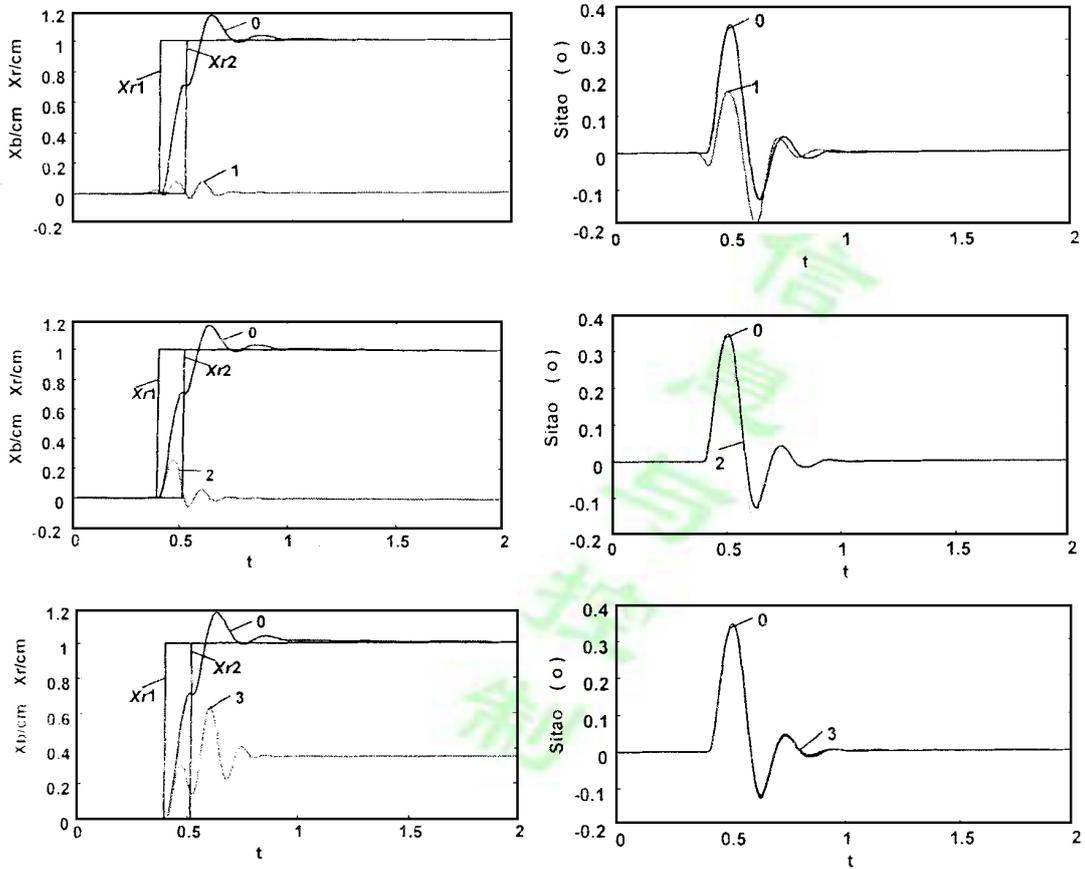
部分预见控制, 即利用前轮信息对后轮进行预见控制. 控制系统结构图如图 3 所示. 在这种控制方式中, 两个前轮采用的仅为反馈控制, 但通过前轮部分各种传感器所获得的信息, 都被作为预见信息而送至控制器. 在决定后轮的控制指令时, 不仅考虑当时后轮传感器得到的各种信息, 而且考虑前轮各传感器所获得的信息. 因此, 在后轮的执行机构上, 执行的是反馈加前向反馈的双作用控制.

对式(2)所描述的系统, 设干扰信号:

$$d(k) = [d_1^T(k) \quad d_2^T(k)]^T \text{ 而且有 } d_1(k): s_1 \times 1; d_2(k): s_2 \times 1$$

进一步, 设干扰信号 $d_2(k)$ 可预见 M_d 步, $d_1(k)$ 无预见. 即:

$$x_{d1}(k) = \begin{bmatrix} \Delta d_2(k+1) \\ \Delta d_2(k+2) \\ \vdots \\ \Delta d_2(k+M_d) \end{bmatrix}$$



0- 被动控制; 1- 完全预见控制; 2- 部分预见控制; 3- 最优控制

图 4 阶梯路面上的车体质心位移 x_b 和车体俯仰角 θ 的仿真结果

(x_{r1} 、 x_{r2} 为前后轮的路面输入)

$$\Delta d_2(k+i) = 0 \quad i = M_d + 1, M_d + 2, \dots$$

$$\Delta d_1(k+i) = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

于是可得扩展误差系统:

$$\begin{bmatrix} x_{o1}(k+1) \\ x_{d1}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & G_{pd1} \\ 0 & A_{d1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{o1}(k) \\ x_{d1}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u(k)$$

同样应用最优调节器理论可得最优解:

$$\Delta u(k) = F_e e(k) + F_x \Delta x(k) + F_d(0) [\Delta d_1^T(k) \quad \Delta d_2^T(k)]^T + \sum_{j=1}^{M_d} F_d(j) [0 \quad \Delta d_2^T(k+j)]^T$$

进一步对上式进行 Z 变换可得:

$$u(k) = F_e \frac{1}{1-z^{-1}} e(k) + F_x x(k) + F_d(0) d(k) + \hat{F}_{pd}(z) d_2(k)$$

式中

$$\hat{F}_{pd}(z) = [F_d(1)z + F_d(2)z^2 + \dots + F_d(M_d)z^{M_d}] [0 \quad I_{s_2}]^T$$

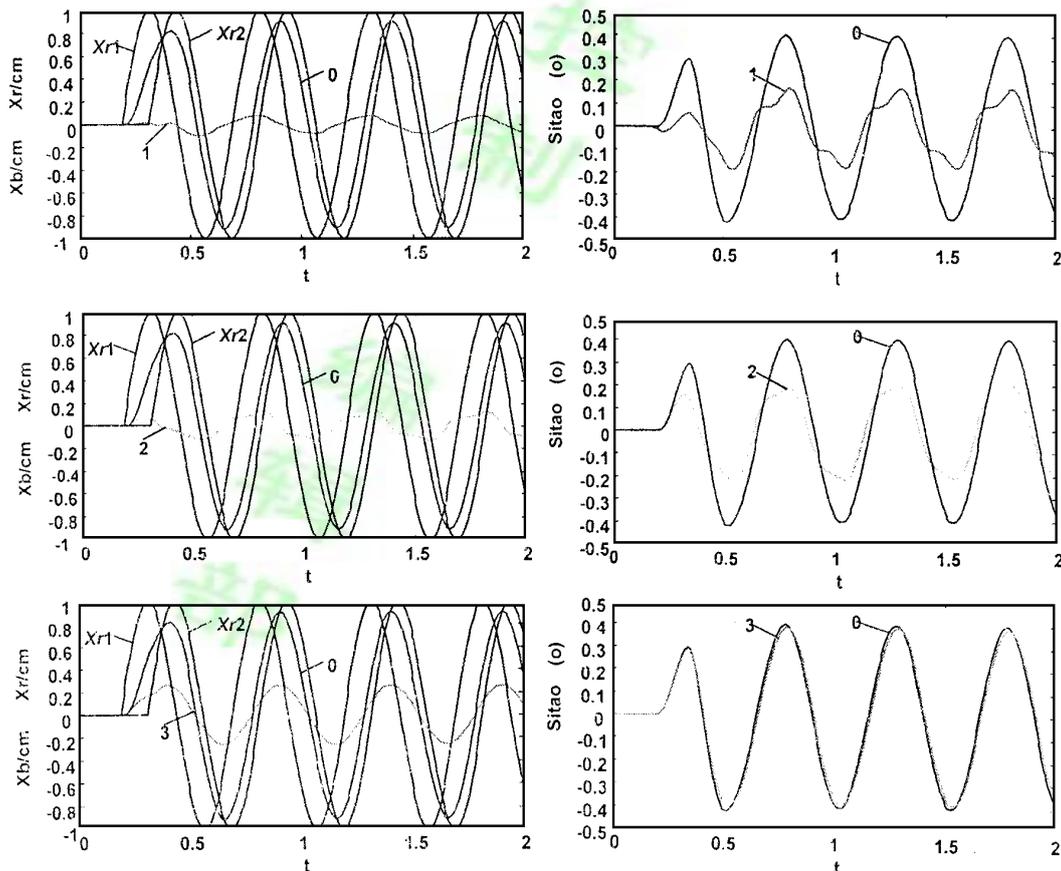
4 仿真研究

基于上述已推导的数学模型, 本文利用美国 Math Works 公司开发的控制系统仿真软件包“Matlab4.0+ Toolbox”编制了仿真程序^[7]. 在研究中采样时间取为 $T_s = 0.005s$, 车速为 $V = 20m/s$, 预见步数设为 $M_d = 20$, 也就是说车辆前方 2m 处的道路情况可以被预先检测到.

为调查系统对不同路面的响应特性, 以谐波状、阶梯状两种典型路面输出为对象进行研究. 并且, 对于每一种路面干扰, 都分别对具有完全预见控制、部分预见控制、最优控制和被动控制作用的系统的响应进行了计算分析.

图 4 所示是在幅值为 1 的阶跃路面激励下, 各控制系统的响应. 即车体质心位移 x_b , 车体俯仰角 θ 的变化波形. 可见, 当突然遇到 1cm 的台阶时, 采用完全预见控制, 车体最大位移为 0.1cm, 采用部分预见控制为 0.26cm, 而最优控制为 0.64cm. 在抑制车体俯仰角方面, 完全预见控制可降低 43.4%, 部分预见控制可降低 12.6%, 而最优控制无任何改善.

图 5 所示是在干扰频率为 2Hz, 振幅为 1cm 的正弦波状路面输入下, 各控制系统的响应. 从图中可以看到, 采用完全预见控制, 车体振幅与路面激励幅值之比 x_b/x_r 仅为 9.1%, 部分预



0- 被动控制; 1- 完全预见控制; 2- 部分预见控制; 3- 最优控制

图 5 谐波路面上的车体质心位移 x_b 和车体俯仰角 θ 的仿真结果

(x_{r1} 、 x_{r2} 为前后轮的路面输入)

见控制为 12.8%, 最优控制为 28.5%; 尤其在抑制车体俯仰角方面, 最优控制几乎无任何改善, 而完全预见控制可将俯仰角 θ 降低 55.9%, 部分预见控制可降低 48.2%。

对于不同幅值和不同频率的路面干扰进行了类似的仿真研究, 所得结论基本一致。总而言之, 完全预见控制具有最好的控制效果, 其次是部分预见控制, 最优控制效果最差。

5 结束语

本文对汽车主动悬架的预见控制进行研究, 针对一个 1/2 车体模型和实际车辆上使用的主动悬架系统, 分别设计了完全预见控制和部分预见控制系统, 并对系统的控制效果作了大量的数字仿真研究。研究表明, 完全预见方式能取得最好的控制效果。应当说, 这是预料之中的。但完全预见方式要求装备特制的预见传感器, 虽然在目前的技术水平下, 这并非不可能, 但考虑到实用车的制造成本和车辆应用环境对传感器工作条件和寿命的要求, 在实车中实施仍有相当多问题待解决。而部分预见方式虽然其控制效果与完全预见方式相比稍逊一筹, 但与最优调节器控制方式相比却有大幅提高, 对于一些突变的干扰尤其如此。由于本文中预见控制方式是利用前轮信息作为后轮的预见信号, 与最优控制等方式相比只是软件上的一些修改, 无须另做任何硬件上的改造和投资, 制造和使用成本几乎没有增加。因此, 在目前条件下, 不失为一种控制性能高且经济可行的控制方式。

参 考 文 献

- 1 Masayoshi T, Fung D H. Design of Digital Feedforward/preview Controllers for Processes with Predetermined Feedback Controllers. *Trans of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1980, 102: 218~ 225
- 2 森田ほか. ベレビユへ制御による乗り心地向上. 日本机械学会机械力学. 计测制御讲演论文集, 1992, A
- 3 刘少军, 钟 掘, 郭淑娟. 最优预见控制设计及在汽车主动悬架控制中的应用. *中南工业大学学报*, 1997, (2), 174~ 176
- 4 刘少军. 由高速 ON/OFF 阀操作的主动悬架系统控制方法研究. *汽车工程*, 1996, (4), 199~ 206
- 5 刘少军. 基于高速开关阀技术的液压主动隔振系统及控制策略研究. 中南工业大学博士论文, 1997
- 6 土谷武士, 江上正, デジタル 预见制御, (日)产业图书, 1992
- 7 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计——MATLAB 语言及应用. 清华大学出版社, 1996

STUDY OF ANTICIPATED CONTROL METHOD PERTINENT TO ACTIVE SUSPENSION BASED ON A HALF-CAR MODEL

LIU Shao-jun/LI Yan

(Electromechanical Engineering College, Central South University of Technology, Changsha 410083)

Abstract: In this paper, full control method and partial anticipated control method are respectively taken into the design of active suspension system for a half-car model. Numerical simulation results show that the full anticipated control method can provide better system performance, but the partial anticipated control method is advantageous due to its lower cost.

Keywords: active suspension, full anticipated control, partial anticipated control

作者简介

刘少军(1955), 工学博士, 教授. 1992 年赴日本名古屋大学留学. 留学期间开始对汽车主动悬架系统及控制方式进行研究. 目前的主要研究方向为机电控制技术和汽车电子技术.