

飞机牵引车主动悬架模型参考自适应控制

赵立军^{1,2}, 魏庆福¹, 谭慧¹

(1. 哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院, 264209, 威海; 2. 吉林大学机械科学与工程学院, 130025 长春)

摘要: 为提高飞机牵引车的平顺性和操纵稳定性,以主动悬架为研究对象,建立飞机牵引车1/4车体模型,提出一种模型参考自适应控制方法.引入广义天棚阻尼控制力并利用最优控制理论得到参考模型,该参考模型在行驶平顺性和操纵稳定性方面均优于被动悬架.采用李雅普诺夫稳定性理论求解自适应控制律,使被控模型跟踪参考模型的动力学状态.仿真结果表明,模型参考自适应控制能够改善悬架系统的性能,其性能指标与参考模型一致,而且对悬架系统参数变化具有一定的适应能力.

关键词: 主动悬架;天棚阻尼控制;最优控制理论;参考模型;自适应控制

中图分类号: TH273

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)11-0065-06

Model reference adaptive control for aircraft tractor active suspension

ZHAO Li-jun^{1,2}, WEI Qing-fu¹, TAN Hui¹

(1. School of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China;
2. School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, 130025 Changchun, China)

Abstract: To improve the comfort and handling stability of aircraft tractor, a quarter body model of aircraft tractor is built, and a model reference adaptive control algorithm is applied to the active suspension of the vehicle. General skyhook control force is added to the car body, and the reference model is obtained by optimal control theory, which is better than passive suspension no matter in ride comfort and handling stability. Using Lyapunov stability theory to solve adaptive adjustment rules can make the dynamics of controlled model approach the dynamics of reference model. The simulation results show that model reference adaptive control can obviously improve the performance of the suspension system, and this algorithm has self-adaptability to the changes in the suspension parameters.

Key words: active suspension; skyhook damping control; theory of optimal control; reference model; adaptive control

悬架系统是汽车的重要组成部分,对汽车的行驶平顺性和操纵稳定性起着至关重要的作用^[1].被动悬架由于参数固定,只能在特定的工况下发挥其最佳性能,不能适应现代汽车的发展要求,即使进行了悬架的优化设计,实际效果仍不理想.目前,采用先进控制策略,能够改变悬架刚度和阻尼的主动悬架越来越受到人们的重视,主动悬架成为改善车辆性能的重要途径之一^[2].

汽车悬架系统的参数是时变的,经典的控制理论在处理此类问题上遇到了困难.文献[3]在麦弗逊悬架中采用了 H_∞ 理论鲁棒控制,但算法复杂,计算量大.文献[4]设计了悬架系统的模糊控制器,并将其与PID控制对比,但模糊控制器的设计依赖于大量的先验知识.自适应控制是通过测量输入/输出信息,实时地掌握被控对象和系统误差的动态特性,并能根据其变化情况及时地调节控制量;因此,在参数未知或参数时变的情况下仍能取得很好的控制效果^[5].自校正自适应控制相比于模型参考自适应控制的主要问题在于自校正控制需要辨识大量的结构参数,计算复杂,实时性不好^[6];因此,本文采用模型参考自适应控制

收稿日期: 2011-12-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875054).

作者简介: 赵立军(1975—),男,副教授,博士后.

通信作者: 赵立军, zhaolijun@hitwh.edu.cn.

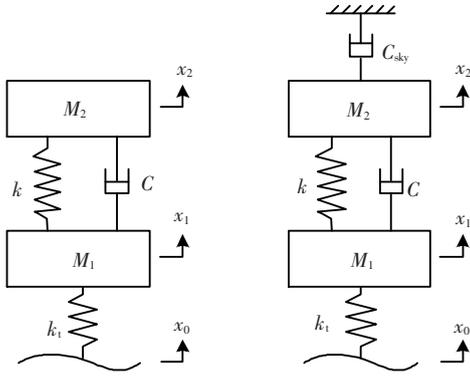
方法进行研究.

1 参考模型的求解

模型参考自适应控制的控制效果主要取决于参考模型的性能和自适应控制算法的优劣^[7],因此寻找性能良好的参考模型是实施此类控制的关键步骤.

1.1 悬架模型的建立

由于飞机牵引车采用独立悬架,悬架质量分配系数 $\varepsilon \approx 1$,可以认为前后轴上的车身振动基本不存在联系;因此两自由度的1/4车体就可以比较准确地描述车身的运动情况,其简化模型如图1(a)所示.天棚阻尼控制能够很好地改善簧载质量的运动特性,广泛应用于悬架系统的研究中,作为其他控制策略的参照对象^[8].为了找到性能更好的参考模型,可以考虑在惯性空间和簧载质量之间引入一控制力,即天棚控制力,如图1(b)所示,其中的天棚控制力采用最优控制算法求得.一般来讲,传统的天棚阻尼控制能够明显地抑制簧载质量的振动,但通常也会恶化车轮的接地性能,为了消除此现象,此处不再拘泥于传统天棚阻尼力的符号与簧载质量速度的符号相反($F = -C_{sky}\dot{x}_2$)的问题,这里用广义的控制力 F_d 代替天棚阻尼力.



(a) 被动悬架 (b) 天棚阻尼悬架

图1 1/4车体简化模型

根据牛顿第二定律,参考模型的悬架系统动力学方程为

$$\begin{cases} M_2\ddot{x}_2 = k(x_1 - x_2) + C(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + F_d, \\ M_1\ddot{x}_1 = k_1(x_0 - x_1) - k(x_1 - x_2) - C(\dot{x}_1 - \dot{x}_2). \end{cases}$$

取状态变量和输出向量分别为

$$\begin{aligned} X &= [\dot{x}_1 \quad \dot{x}_2 \quad x_2 - x_1 \quad x_1 - x_0]^T, \\ Y &= [\ddot{x}_2 \quad x_2 - x_1 \quad x_1 - x_0]^T. \end{aligned}$$

建立悬架系统的状态方程:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BF_d + Ew(t), \\ Y = CX + DF_d. \end{cases}$$

式中: $w(t)$ 为路面输入,

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -C & C & k & -k_1 \\ M_1 & M_1 & M_1 & M_1 \\ C & -C & -k & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M_2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \\ C &= \begin{bmatrix} C & -C & -k & 0 \\ M_2 & M_2 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 \\ M_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

1.2 悬架系统的可控性与可观性

利用最优控制算法求解天棚控制力,必须进行可控性与可观性的分析.

天棚控制力 F_d 对系统状态的可控性判别矩阵为

$$Q_c = [B : AB : A^2B : A^3B];$$

天棚控制力 F_d 对输出的可控性判别矩阵为

$$Q'_c = [CB : CAB : CA^2B : CA^3B : D];$$

悬架系统的可观性矩阵为

$$Q_o = [C; CA; CA^2; CA^3].$$

飞机牵引车的基本参数如表1所示.

假设飞机牵引车的载荷为10 t,将表1中的有关参数代入 A, B, C 和 D ,计算得 $\text{Rank } Q_c = 4$, Q_c 为满秩矩阵; $\text{Rank } Q'_c = 3 =$ 输出变量数, Q'_c 为满秩矩阵; $\text{Rank } Q_o = 4$,故 Q_o 也为满秩矩阵.所以最优控制的天棚控制悬架系统既是可控的也是可观的.

表1 飞机牵引车基本参数

参数	整备质量/t	最大载荷/t	质量分配系数	悬架刚度/(kN·m ⁻¹)	非簧载质量/kg	轮胎刚度/(kN·m ⁻¹)	轮胎允许变形/mm	阻尼系数/(kN·s·m ⁻¹)
参数值	12	28	1:1.22	400	100	3 000	20	10

1.3 最优天棚控制力的计算

天棚阻尼悬架系统的最优控制问题可以描述为:在初始条件和悬架系统参数给定的情况下,寻找一个最优的天棚控制力 F_d ,使悬架系统的工作

性能指标达到极值.可以认为天棚控制悬架的最优控制器为一个终了时间 $t \rightarrow \infty$ 的线性调节器,这样得出的最优反馈规律是线性定常的,要求解的黎卡提方程也是代数方程^[9].

要提高悬架系统的性能, 满足车辆平顺性和操纵稳定性的要求, 一般需要考虑 3 个方面^[10]: 1) 车身加速度, 它是车辆乘坐舒适性和货物完好的重要保证; 2) 悬架动行程, 它主要影响车辆在行驶过程中的车身姿态; 3) 轮胎动变形, 它对车辆的操纵稳定性起关键作用. 另外, 控制系统所消耗的能量越小越好. 因此, 若取最优控制的性能指标为二次函数积分型, 则性能指标可具体描述为

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [q_1 \dot{x}_2^2 + q_2 (x_2 - x_1)^2 + q_3 (x_1 - x_0)^2 + r F_d^2] dt = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (X^T C^T Q C X + 2 X^T C^T Q D F_d + F_d^T (r + D^T Q D) F_d) dt. \quad (1)$$

其中: Q 为对角系数矩阵. 性能指标 (1) 的物理意义是: 第一个分量为车身加速度指标, 它的积分越小表示车辆平顺性越好; 第二项和第三项为误差指标, 表示在 $0 \rightarrow \infty$ 整个时间范围内, 悬架实际状态与平衡状态之间的误差总和, 这一积分越小, 表示控制误差越小, 性能越好; 第四项的积分越小, 说明系统消耗的能量越少. 根据多目标优化理论^[11] 确定出 $q_1 = 7.1 \times 10^6, q_2 = 10^8, q_3 = 1.6 \times 10^9, r = 1$.

由最优控制理论可知, 若控制力

$$F_d = -KX = -R_d^{-1} (N_d^T + B^T L) X,$$

则性能指标 J 最小, 其中的 L 由黎卡提方程

$$LA + A^T L - LBR_d^{-1} B^T L + Q_d = 0$$

解得.

其中, $Q_d = C^T Q C, R_d = r + D^T Q D, N_d = C^T Q D$.

求解黎卡提方程得到最优反馈矩阵为

$$K = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4] = [35 \quad 15 \quad 049 \quad 50 \quad 917 \quad 25 \quad 458],$$

利用最优反馈增益矩阵, 最优控制力 F_d 可写成如下形式:

$$F_d = -KX = -[k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4] \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ x_2 - x_1 \\ x_1 - x_0 \end{bmatrix} =$$

$$-[k_1 \dot{x}_1 + k_2 \dot{x}_2 + k_3 (x_2 - x_1) + k_4 (x_1 - x_0)].$$

2 路面模型的建立

对于车辆振动输入的路面不平度, 主要采用路面功率谱密度描述其统计特性. ISO/TC108/SC2N67 文件中提出路面功率谱密度用式 (2) 作为拟合表达式:

$$G_q(n) = G_q(n_0) (n/n_0)^{-W}. \quad (2)$$

式中: n 为空间频率 (m^{-1}), 表示每米长度中包括几

个波长; n_0 为参考空间频率, $n_0 = 0.1 m^{-1}$; $G_q(n_0)$ 为参考空间频率 n_0 下的路面功率谱密度值, 称为路面不平度系数, 单位为 $m^2/m^{-1} = m^3$; W 为频率指数, 决定路面功率谱密度的频率结构^[12].

当用速度功率谱密度描述路面不平度时, 其表达式为 $G_q(n) = (2\pi n_0)^2 G_q(n_0)$, 它在整个频率范围内为一常数, 即“白噪声”. 为了便于在状态空间中分析问题, 将其转化为时域形式为

$$G_q(f) = (2\pi f)^2 G_q(n_0) = 4\pi^2 G_q(n_0) n_0^2 v. \quad (3)$$

式中, v 为车速. 由式 (3) 就可以建立起随机路面的轮廓.

3 天棚控制悬架性能分析

假设飞机牵引车在 A 级路面上以 $5 m \cdot s^{-1}$ 的速度行驶, 则随机路面输入如图 2 所示, 被动悬架和天棚控制悬架的车身加速度、悬架动行程、轮胎动变形的变化情况如图 3~5 所示.

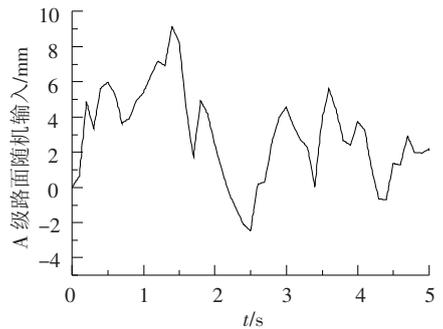


图 2 速度为 $5 m \cdot s^{-1}$ 时 A 级路面的随机输入

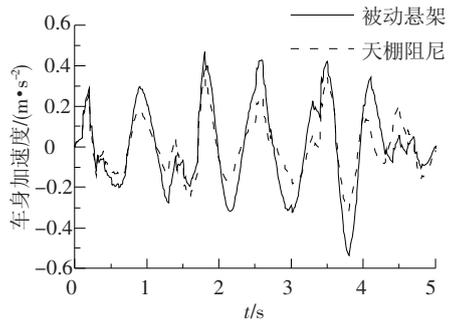


图 3 车身加速度变化曲线

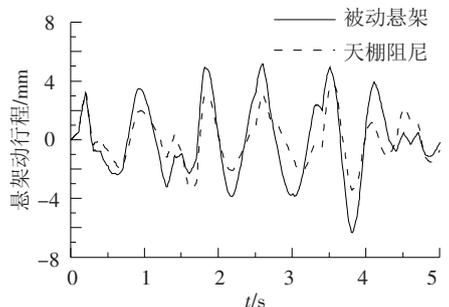


图 4 悬架动行程变化曲线

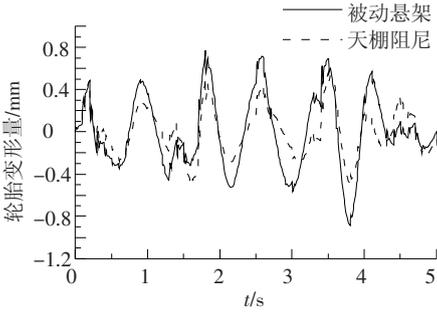


图5 轮胎变形量变化曲线

从图中可以看到,经过最优控制而设计出的天棚控制悬架相较于被动悬架,在车身加速度、悬架动行程和轮胎变形量方面都有一定程度的减小.为了更精确地描述被动悬架和天棚控制悬架的性能,将它们的均方根值列于表2中,由表2可以发现,天棚控制悬架在提高悬架性能方面效果非常明显.

表2 被动悬架与天棚控制悬架性能指标对比

悬架类型	车身加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	悬架动行程/ m	轮胎变形量/ m
被动悬架	2.21×10^{-1}	2.66×10^{-3}	3.65×10^{-4}
天棚控制悬架	1.48×10^{-1}	1.76×10^{-3}	2.42×10^{-4}
减小量/%	33.03	33.83	33.70

4 自适应控制系统设计

自适应控制主动悬架的简化模型如图6所示.

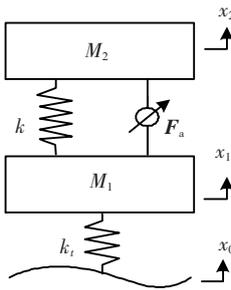


图6 1/4 车体自适应控制主动悬架模型

取簧载质量的位移和速度为状态变量,非簧载质量的位移和速度为输入向量, F_a 和 F_d 分别为自适应悬架和天棚阻尼悬架的控制量.则被控悬架和参考模型的状态方程可分别表示为

$$\dot{X}_p = A_p X_p + B_p F_a + C_p y_r, \quad (4)$$

$$\dot{X}_m = A_m X_m + B_m F_d + C_m y_r. \quad (5)$$

式中, A_p 和 A_m 为 2×2 矩阵, B_p 和 B_m 为 2×1 矩阵, C_p 和 C_m 为 2×2 矩阵.

现采用参数可调的被控对象状态反馈控制器

F_1 、参考模型控制向量增益 F_2 和前馈控制器 K 来形成可调系统,其中 $F_1 \in \mathbf{R}^{1 \times 2}$, $F_2 \in \mathbf{R}^{1 \times 1}$, $K \in \mathbf{R}^{1 \times 2}$.如图7所示.

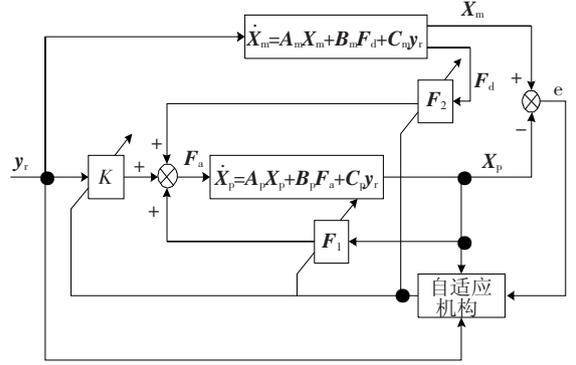


图7 模型参考自适应控制结构图

由图7可知,

$$F_a = F_1 X_p + F_2 F_d + K y_r. \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)得

$$\dot{X}_p = (A_p + B_p F_1) X_p + B_p F_2 F_d + (B_p K + C_p) y_r. \quad (7)$$

当调节 F_1 、 F_2 和 K ,使 X_p 与 X_m 一致时,被控对象与参考模型匹配,从而有

$$\begin{cases} A_p + B_p F_1^* = A_m, \\ B_p F_2^* = B_m, \\ B_p K^* + C_p = C_m. \end{cases} \quad (8)$$

式中: F_1^* 、 F_2^* 和 K^* 分别表示完全匹配时 F_1 、 F_2 和 K 的取值,是希望的稳态取值.为了获得自适应控制规律,定义广义状态误差为^[13]

$$e = X_m - X_p, \quad (9)$$

对式(9)求导,并将式(5)和式(7)代入得

$$\dot{e} = A_m e + (A_m - A_p - B_p F_1) X_p + (B_m - B_p F_2) F_d + (C_m - B_p K - C_p) y_r. \quad (10)$$

由式(8)将式(10)中的 A_p 、 B_p 和 C_p 消去得

$$\begin{aligned} \dot{e} = & A_m e + B_m (F_2^*)^{-1} (F_1^* - F_1) X_p + \\ & B_m (F_2^*)^{-1} (F_2^* - F_2) F_d + \\ & B_m (F_2^*)^{-1} (K^* - K) y_r. \end{aligned} \quad (11)$$

令式(11)中的

$$F_1^* - F_1 = \tilde{F}_1, F_2^* - F_2 = \tilde{F}_2, K^* - K = \tilde{K},$$

则式(11)可写成

$$\dot{e} = A_m e + B_m (F_2^*)^{-1} \tilde{F}_1 X_p + B_m (F_2^*)^{-1} \tilde{F}_2 F_d + B_m (F_2^*)^{-1} \tilde{K} y_r. \quad (12)$$

选取李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2} [e^T P e + \text{tr}(\tilde{F}_1^T R_1^{-1} \tilde{F}_1) + \text{tr}(\tilde{F}_2^T R_2^{-1} \tilde{F}_2) + \text{tr}(\tilde{K}^T R_3^{-1} \tilde{K})]. \quad (13)$$

式中, \mathbf{P} 和 \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 、 \mathbf{R}_3 均为正定对称矩阵, tr 为数学符号迹 (trace)。

对式 (13) 求导, 并将式 (12) 代入, 得

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & \frac{1}{2} [e^T (\mathbf{A}_m^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_m) e] + e^T \mathbf{P} \mathbf{B}_m (\mathbf{F}_2^*)^{-1} \tilde{\mathbf{F}}_1 \mathbf{X}_p + \\ & e^T \mathbf{P} \mathbf{B}_m (\mathbf{F}_2^*)^{-1} \tilde{\mathbf{F}}_2 \mathbf{F}_d + e^T \mathbf{P} \mathbf{B}_m (\mathbf{F}_2^*)^{-1} \tilde{\mathbf{K}} y_r + \\ & \frac{1}{2} \text{tr} (\dot{\tilde{\mathbf{F}}}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \tilde{\mathbf{F}}_1 + \tilde{\mathbf{F}}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{F}}}_1) + \frac{1}{2} \text{tr} (\dot{\tilde{\mathbf{F}}}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \tilde{\mathbf{F}}_2 + \\ & \tilde{\mathbf{F}}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{F}}}_2) + \frac{1}{2} \text{tr} (\dot{\tilde{\mathbf{K}}}^T \mathbf{R}_3^{-1} \tilde{\mathbf{K}} + \tilde{\mathbf{K}}^T \mathbf{R}_3^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{K}}}). \quad (14) \end{aligned}$$

式 (14) 右边第二项、第三项和第四项为标量。因为 \mathbf{A}_m 为稳定矩阵, 由线性定常系统渐近稳定定理, 可选正定对称矩阵 \mathbf{Q} , 使

$$\mathbf{A}_m^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_m = -\mathbf{Q}$$

成立。

根据矩阵迹的性质, 式 (14) 可写成

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & -\frac{1}{2} e^T \mathbf{Q} e + \text{tr} (\mathbf{X}_p e^T \mathbf{P} \mathbf{B}_m (\mathbf{F}_2^*)^{-1} \tilde{\mathbf{F}}_1 + \\ & \dot{\tilde{\mathbf{F}}}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \tilde{\mathbf{F}}_1) + \text{tr} (\mathbf{F}_d e^T \mathbf{P} \mathbf{B}_m (\mathbf{F}_2^*)^{-1} \tilde{\mathbf{F}}_2 + \\ & \dot{\tilde{\mathbf{F}}}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \tilde{\mathbf{F}}_2) + \text{tr} (y_r e^T \mathbf{P} \mathbf{B}_m (\mathbf{F}_2^*)^{-1} \tilde{\mathbf{K}} + \\ & \dot{\tilde{\mathbf{K}}}^T \mathbf{R}_3^{-1} \tilde{\mathbf{K}}). \end{aligned}$$

令其右端第二项、第三项和第四项为零, 则得

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{F}}}_1 = -\mathbf{R}_1 [\mathbf{B}_m (\mathbf{F}_2^*)^{-1}]^T \mathbf{P} e \mathbf{X}_p^T, \\ \dot{\tilde{\mathbf{F}}}_2 = -\mathbf{R}_2 [\mathbf{B}_m (\mathbf{F}_2^*)^{-1}]^T \mathbf{P} e \mathbf{F}_d^T, \\ \dot{\tilde{\mathbf{K}}} = -\mathbf{R}_3 [\mathbf{B}_m (\mathbf{F}_2^*)^{-1}]^T \mathbf{P} e y_r^T. \end{cases}$$

根据 $\tilde{\mathbf{F}}_1$ 、 $\tilde{\mathbf{F}}_2$ 和 $\tilde{\mathbf{K}}$ 的定义, 并考虑 \mathbf{F}_1^* 、 \mathbf{F}_2^* 和 \mathbf{K}^* 不变, 从而有

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{F}}_1 = -\dot{\tilde{\mathbf{F}}}_1 = \mathbf{R}_1 [\mathbf{B}_m (\mathbf{F}_2^*)^{-1}]^T \mathbf{P} e \mathbf{X}_p^T, \\ \dot{\mathbf{F}}_2 = -\dot{\tilde{\mathbf{F}}}_2 = \mathbf{R}_2 [\mathbf{B}_m (\mathbf{F}_2^*)^{-1}]^T \mathbf{P} e \mathbf{F}_d^T, \\ \dot{\mathbf{K}} = -\dot{\tilde{\mathbf{K}}} = \mathbf{R}_3 [\mathbf{B}_m (\mathbf{F}_2^*)^{-1}]^T \mathbf{P} e y_r^T. \end{cases} \quad (15)$$

由于悬架系统的参数是时变的, 因此 \mathbf{F}_2^* 和 $(\mathbf{F}_2^*)^{-1}$ 的值无法确定。但是考虑到正定矩阵 \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 和 \mathbf{R}_3 的选择具有一定的随意性, 所以记

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}_1 = \mathbf{R}_1 ((\mathbf{F}_2^*)^{-1})^T, \quad \bar{\mathbf{R}}_2 = \mathbf{R}_2 ((\mathbf{F}_2^*)^{-1})^T, \\ \bar{\mathbf{R}}_3 = \mathbf{R}_3 ((\mathbf{F}_2^*)^{-1})^T. \end{aligned}$$

这里的 $\bar{\mathbf{R}}_1$ 、 $\bar{\mathbf{R}}_2$ 和 $\bar{\mathbf{R}}_3$ 由试验确定。式 (15) 变为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{F}}_1 = \bar{\mathbf{R}}_1 \mathbf{B}_m^T \mathbf{P} e \mathbf{X}_p^T, \\ \dot{\mathbf{F}}_2 = \bar{\mathbf{R}}_2 \mathbf{B}_m^T \mathbf{P} e \mathbf{F}_d^T, \\ \dot{\mathbf{K}} = \bar{\mathbf{R}}_3 \mathbf{B}_m^T \mathbf{P} e y_r^T. \end{cases} \quad (16)$$

式 (16) 即为自适应控制系统的参数调节规律。此时李雅普诺夫函数的导数变为

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2} e^T \mathbf{Q} e < 0.$$

所以自适应控制律式 (16) 在输入连续时, 自适应控制系统是全局渐近稳定的^[14]。

5 仿真结果分析

根据上面建立的路面模型和推导的自适应控制律, 并结合飞机牵引车的基本参数, 利用 Simulink 建立仿真模型。其中非簧载质量的位移输入和速度输入如图 8 和图 9 所示。调整 $\bar{\mathbf{R}}_1$ 、 $\bar{\mathbf{R}}_2$ 和 $\bar{\mathbf{R}}_3$ 的值, 得到多组被控悬架簧载质量的位移和速度跟踪参考模型的曲线, 当 $\bar{\mathbf{R}}_1 = 10^{16}$ 、 $\bar{\mathbf{R}}_2 = 10^9$ 、 $\bar{\mathbf{R}}_3 = 10^9$ 时, 仿真曲线如图 10 和图 11 所示。从图中可以看出, 被控模型能够准确、及时地跟踪被控模型的状态, 被控模型的性能指标与参考模型一致。

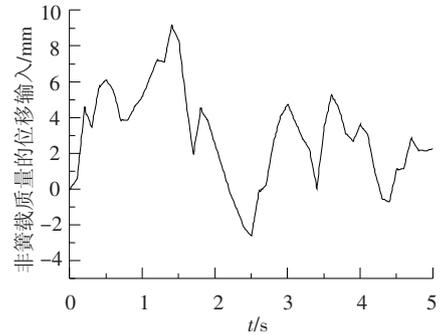


图 8 非簧载质量的位移输入

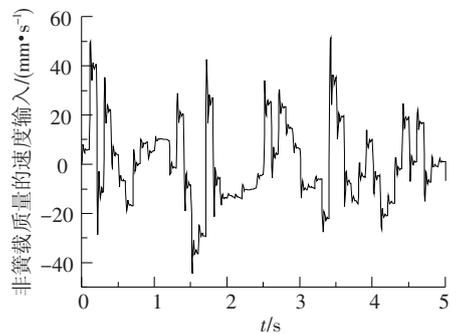


图 9 非簧载质量的速度输入

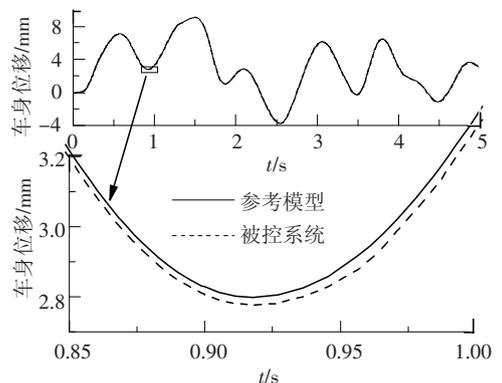


图 10 自适应悬架和参考模型的车身位移曲线

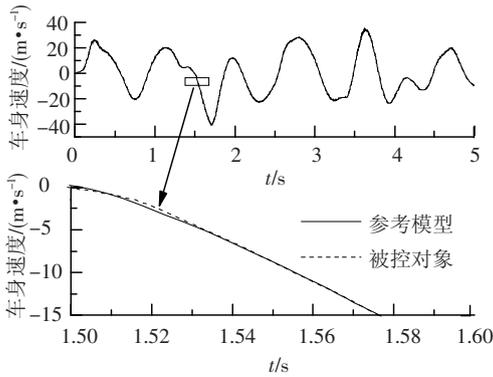


图 11 自适应悬架和参考模型的车身速度曲线

6 结 论

1) 用最优控制算法求得的广义天棚阻尼力,能够在一定程度上改善悬架系统的性能指标,在改善车辆平顺性的同时,不仅不会恶化轮胎的接地性能,反而提高了车辆的操纵稳定性。

2) 运用所推导的自适应控制律,能够使被控悬架准确、及时地跟踪参考模型的动力学状态,即给定一个参考模型,选择合适的正定对称矩阵 \mathbf{R}_i , 自适应控制系统可以达到与参考模型一致的运动特性。

参考文献:

- [1] 杨建伟,孙守光,刘海波. 汽车半主动磁流变悬架的自适应相对控制研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(9): 1951-1955.
- [2] 姜立标,王薇,谢东,等. 汽车半主动空气悬架自适应模糊神经网络控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(12): 1747-1750.
- [3] FALLAH M S, BHAT R, XIE Wenzhang. H_∞ robust control of semi-active Macpherson suspension system: new applied design[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(3): 339-360.
- [4] CHANQIZI N, ZARE A, SHEH N S, et al. Comparison of PID and fuzzy controller for automobile suspension system[C]//Applied Mechanics and Materials. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 2011: 671-676.

- [5] NIKHAMHANG I, SANO A. Stability-assured robust adaptive control of semi-active suspension systems[C]//2008 American Control Conference. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2008: 2358-2364.
- [6] 金耀. 自适应单神经元智能控制策略及其在汽车主动悬架中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007: 7-8.
- [7] GUIDO K, SEBASTIAN S, BORIS L. Reference model based adaptive control of a hybrid suspension system[C]//6th IFAC Symposium Advances in Automotive Control. Laxenburg: IFAC Secretariat, 2010: 312-317.
- [8] SONG Xubin. Cost-effective skyhook control for semi-active vehicle suspension applications[J]. Open Mechanical Engineering Journal, 2009(3): 17-25.
- [9] 王进华. 二次型最优控制问题中的权矩阵与最优控制律[J]. 控制与决策, 2007, 22(8): 943-950.
- [10] BALAZS N, PETER G. Control design for road-friendly suspension systems using an optimal weighting of LQ theorem[J]. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 2010, 38(2): 61-66.
- [11] 李瑜婷,赵治国,章桐. 基于 ADAMS 的双横臂悬架性能多目标优化研究[J]. 中国制造业信息化, 2009, 38(17): 30-34.
- [12] BI Fengrong, HU J, SONG Baoan. Application of non-Gaussian closure method in automotive chassis non-linear vibration analysis[J]. Forschung Im Ingenieurwesen, 2011, 75(10): 153-163.
- [13] FATEH M M, ZIRKOHI M M. Adaptive impedance control of a hydraulic suspension system using particle swarm optimization[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(12): 1951-1965.
- [14] ZUO L, SLOTINE J J E, NAYFEH S A. Model reaching adaptive control for vibration isolation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(4): 611-617.

(编辑 杨波)