

基于电流变阻尼器的履带式车辆悬架振动控制*

赵霞 张永发

(北京理工大学理学院力学系, 北京 100081)

摘要 提出一种基于电流变阻尼器的半主动悬架系统,建立了某履带式车辆悬架的1/4车体动力学模型,在此基础上给出了悬架系统的运动方程和状态方程,分析了某种剪切模式电流变阻尼器的阻尼力并作为悬架系统半主动控制的制动器.将随机最优控制理论应用到车辆悬架的控制中,以车身加速度、悬架动行程和轮胎动位移的加权二次型最小为控制性能指标,设计了线性二次型高斯(LQG)控制器,通过被动悬架与LQG控制悬架的仿真比较,在轮胎动位移基本相同的情况下,LQG控制能有效的降低车身加速度,充分利用悬架的工作空间,提高车辆的舒适性和安全性.

关键词 履带式车辆, 电流变阻尼器, 半主动悬架, LQG控制

引言

车辆的半主动悬架系统能够抑制车身的加速度,改善车辆行驶的平顺性.相比主动悬架,结构简单、能耗小,在控制性能上接近主动悬架,具有广泛的应用前景^[1].电流变阻尼器作为半主动悬架的控制器件,可以通过外加电场的变化实现阻尼力的连续调节,响应迅速^[2],为车辆振动的实时控制提供了可能.对于一些履带式车辆,行驶路面条件恶劣,半主动悬挂系统能够改善驾驶人员乘坐舒适性,提高车辆的行驶速度,从而提高车辆的机动性和战斗力,极具现实意义^[3].

本文在研究电流变阻尼器工作原理的基础上,针对履带式车辆的结构参数,建立了半主动悬架的1/4车体振动控制模型,由于车辆振动是典型的随机响应,所以利用随机线性二次最优理论,对LQG控制器进行了设计,构成了一个简单的线性反馈闭环控制系统,在工程实际中易于实现.对在车辆悬架设计中主要的控制指标:车身加速度(BA)、悬架动行程(SWS)、轮胎动位移(DTD)进行了仿真分析.

1 半主动悬架控制模型

对于坦克、自行火炮等一些典型的履带式车辆的行驶系统,履带是一条“无限轨道”,对地面的高

频激励有滤波作用,因而它们具有较强的越野能力,建模时可以不计履带的影响.从力学角度上说,履带式车辆是一个复杂的动力学系统,在研究车辆平顺性和稳定性控制时,本文采用了二自由度的1/4车体模型.此模型包括了悬架系统的主要运动特征,其等效的半主动悬架控制模型如图1所示,其中 m_s 是折算到单轮上的簧上质量, m_u 是单个负重轮的质量, k_s 和 k_t 分别为悬架弹簧和轮胎的刚度系数, F_d 是电流变阻尼器提供的阻尼力; z_s 和 z_u 分别代表车体和车轮在垂直方向的位移; z_r 是路面激励,则悬架系统的动力学方程为

$$\begin{cases} m_s \ddot{z}_s + k_s(z_s - z_u) - F_d = 0 \\ m_u \ddot{z}_u - k_s(z_s - z_u) + k_t(z_u - z_r) + F_d = 0 \end{cases} \quad (1)$$

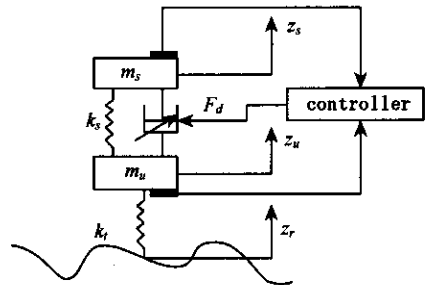


图1 1/4车悬架动力学模型

Fig. 1 The dynamic model of 1/4 vehicle suspension

这里,采用一个滤波白噪声作为路面的输入模

型即

$$\dot{z}_r(t) = -2\pi f_0 z_r(t) + 2\pi \sqrt{G_0 U_0} \omega(t) \quad (2)$$

其中

G_0 是路面不平度系数; U_0 是车速; f_0 是下截止频率; $\omega(t)$ 是均值为零的高斯白噪声. 选取状态变量 $X = [\dot{z}_s \quad \dot{z}_u \quad z_s \quad z_u \quad z_r]$, 高斯白噪声输入矩阵 $W(t) = [\omega(t)]$, 控制输入矩阵 $U(t) = [F_d]$, 则系统的状态空间方程为

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + \Gamma W(t) \quad (3)$$

将车身加速度、悬架动行程和轮胎动变形作为输出变量, 则输出方程

$$Y = CX + DU$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_s}{m_u} & -\frac{k_t - k_s}{m_u} & \frac{k_t}{m_u} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2\pi f_0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_s} & -\frac{1}{m_u} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\Gamma = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 2\pi \sqrt{G_0 U_0}]^T$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_s} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

2 电流变阻尼器

电流变液体是一种新型智能材料, 外加电场后, 其屈服应力随所加电场强度的不同而变化, 具有响应快、便于控制和低能耗等优点^[4]. 电流变阻尼器利用电流变液体作为阻尼器的工作液, 它可以根据系统的状态变量对系统进行实时控制, 是振动控制的理想阻尼元件. 本文的电流变阻尼器模型采用的是剪切模式的筒式电流变阻尼器结构^[5], 其压缩行程和复原行程的阻尼力分别为

$$F_y = Av^2 + Cv + KE^2 \quad (4)$$

$$F_f = Cv + KE^2 \quad (5)$$

其中

$$A = \frac{\rho \pi^3 d_g^6}{128 \epsilon^2 A_0^2},$$

$$C = \frac{3\eta L (d_h^2 - d_g^2)^2}{4dh^3},$$

$$K = \frac{\pi L \alpha (d_h^2 - d_g^2)}{2h}$$

ρ 、 η 和 α 为电流变液体的密度、塑性粘度和结构参数; ϵ 、 A_0 分别是底阀座小孔的流量系数和通流面积; d_h 、 d_g 、 h 和 l 分别代表阻尼器的内筒直径、活塞杆直径、极板间隙和长度; v 为阻尼器两端相对速度; E 为外加电场强度.

在工程设计中, (4) 式第一项计算值相当小, 可以忽略不计, 所以阻尼器输出力

$$F = Cv + KE^2 \quad (6)$$

由上式可知, 电流变阻尼器的阻尼力有两部分组成: 与阻尼器速度相关的粘性阻尼和与电场相关的电致阻尼, 阻尼器的可控部分是其电致阻尼力, 调节电场改变阻尼力实现对悬架系统的半主动控制.

3 LQG 控制算法

车辆悬架设计主要的性能指标有代表乘坐舒适性的车身加速度 \ddot{z}_s 、与悬架设计和布置相关的悬架动行程 $z_s - z_u$ 和反映轮胎接地性的轮胎动位移 $z_u - z_r$, 所以半主动悬架的性能指标函数为

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [q_1 \ddot{z}_s^2 + q_2 (z_s - z_u)^2 + q_3 (z_u - z_r)^2] dt \quad (7)$$

其中 q_1 、 q_2 、 q_3 为加权系数.

将(7)式写成矩阵形式

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (X^T Q X + U^T R U + 2X^T N U) dt \quad (8)$$

其中

$$Q = C^T M C^T, R = D^T M D, N = C^T M D$$

$$M = \text{diag}[q_1 \quad q_2 \quad q_3]$$
 为加权系数矩阵

则 LQG 控制律

$$F_d(t) = -KX \quad (9)$$

其中, K 为控制反馈增益矩阵, 可由下面的 Riccati 方程求出

$$AK + KA^T + Q - KBR^{-1}B^TK + \Gamma W \Gamma^T = 0 \quad (10)$$

另一方面, 考虑到电流变阻尼器是半主动执行元件, 对悬架系统实行半主动控制, 所以要在 LQG

主动控制方法(9)基础上增加约束条件

$$F_d(t) = \begin{cases} F_d(t) & F_d(t)(\dot{z}_u - \dot{z}_s) \geq 0 \\ 0 & F_d(t)(\dot{z}_u - \dot{z}_s) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

4 仿真分析

利用 MATLAB 的 SIMULINK 工具箱进行仿真,车速为 20 m/s,路面输入为滤波白噪声,路面不平度系数为 $5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{cycle}$,下截止频率为 0.1 Hz. 针对某履带式车辆参数进行仿真计算^[6], $m_s = 7537.72 \text{ kg}$, $m_u = 201.74 \text{ kg}$, $k_s = 362600 \text{ N/m}$, $k_t = 6597421 \text{ N/m}$, 悬架系统的控制是典型的状态调节器问题,加权矩阵 $M = \text{diag}[1 \ 100 \ 1000]$.

图 2 是被动控制模型和 LQG 控制模型车身的加速度时间响应对比曲线,从图中可以看出与被动悬架相比,LQG 控制的半主动悬架系统的加速度整体上均有减少,乘坐的舒适性得到了明显的提高,相似的结果也可以从图 5 中看出,图 5 代表车身的垂直位移.

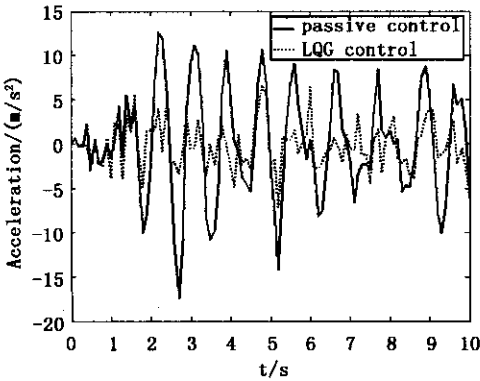


图 2 车身垂直加速度

Fig. 2 The vertical acceleration of the car body

图 3 是悬架系统的动行程响应,比较发现,被动悬架不仅动行程的幅值大而且上下波动大,而 LQG 控制的悬架动行程被很好的控制在 0.1m 的范围内,悬架的许用空间得到充分利用. 图 4 是轮胎的动位移,可以看出轮胎的动位移基本相同,控制后的动位移只是略有减少,这和 LQG 控制器中选取的加权系数有关.

图 6 和图 7 分别为控制的阻尼力曲线和路面输入. 在实际的半主动控制中,当悬架的相对速度与控制力符号相反时,就要将阻尼器阀口充分打开,使阻尼器的消耗力非常小而已,(11)式为零只是理论上的,并且当阻尼器不能提供足够大的控制所需阻尼

力时,要调节阻尼器使之输出最大的阻尼力.

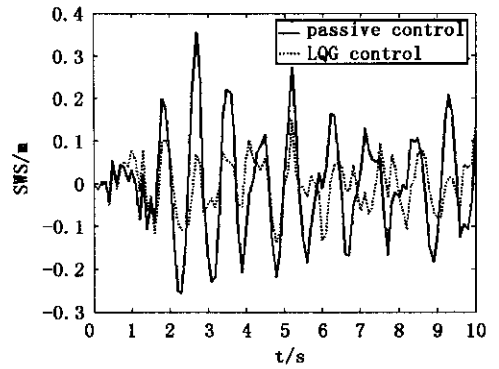


图 3 悬架动行程响应

Fig. 3 The suspension working space

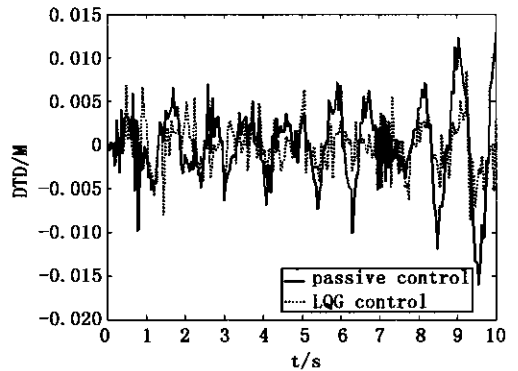


图 4 轮胎动位移

Fig. 4 The dynamic tyre displacement

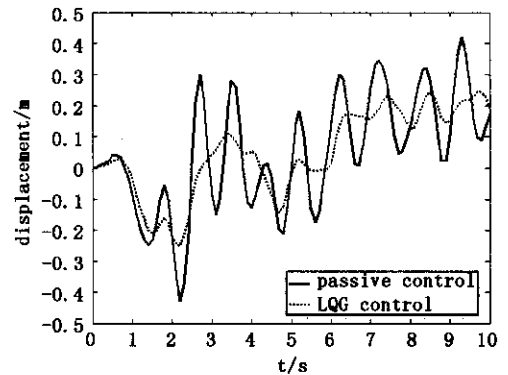


图 5 车身垂直位移

Fig. 5 The vertical displacement of the car body

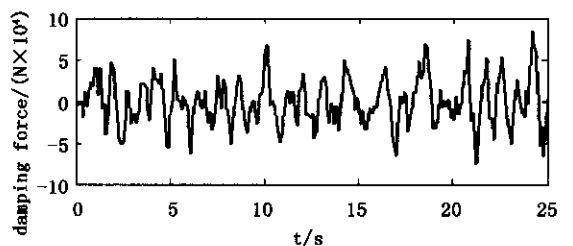


图 6 LQG 控制阻尼力

Fig. 6 The damping force of the LQG control

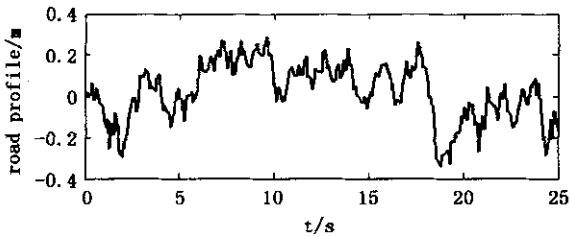


图 7 随机路面输入

Fig.7 The random road profile

5 结论

本文在电流变阻尼器的基础上,对履带式车辆悬架进行了随机最优半主动控制研究,设计了 LQG 控制器,通过选取性能指标中的加权系数,解决各个控制量之间的矛盾,使车辆悬架设计中的主要性能指标的均方根值最小.通过仿真结果分析,控制后的车身加速度、悬架动行程和轮胎动位移都得到不同程度的减小,车辆的舒适性和安全性得到了改善.

参 考 文 献

- 1 Elbeheiry EM, Karnopp DC. Optimal control of vehicle random vibration with constrained suspension deflection. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 189(5):547~564
- 2 Choi SB, Kim WK. Vibration control of semi-active suspension featuring ER fluid dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 234(3):537~546
- 3 丁法乾. 履带式装甲车辆悬挂系统动力学. 北京:国防工业出版社,2004(Ding Faqian. Dynamics of Tracked Armored Vehicle Suspension System. Beijing: Publishing House of National Defense Industry, 2004(in Chinese))
- 4 Wei Chenguan, Fu Zhao. Electrorheological fluid and its application in vibration control. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1994, 3(1):91~98
- 5 高晶敏. 电流变液体减振器及其控制系统研究 [博士论文]. 北京:北京理工大学,1999(Gao Jingmin. Electrorheological fluid shock absorber and its control system. [Ph D Thesis]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1999(in Chinese))
- 6 管继富,顾亮,侯朝桢. 履带式车辆半主动悬挂的自适应控制. 兵工学报,2004, 25(4):389~393(Guan Jifu, Gu Liang, Hou Chaozhen. Adaptive control for semi-active suspension on tracked vehicle. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(4):389~393(in Chinese))

VIBRATION CONTROL OF TRACKED VEHICLE WITH ER DAMPER^{*}

Zhao Xia Zhang Yongfa

(Department of Mechanics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract A semi-active control of vehicle suspension system with ER damper is presented. A quarter tracked vehicle model with ER damper is constructed. Its motion equation and state space form for the suspension system are derived. The shear mode ER damper is analyzed and is used as actuator for the system. The linear quadratic Gaussian stochastic optimal control theory is applied to the control system. Weighted quadratic performance index related to the body acceleration, the suspension working space and the tyre dynamic displacement is used to design the LQG controller. Simulation results show that, compared with the passive one, the LQG control can reduce the vertical acceleration effectively and the suspension working space can be fully used with the same tyre dynamic displacement. The ride comfort performance and handling stability are both improved.

Key words tracked vehicle, ER damper, semi-active suspension, LQG control