

doi: 10.7690/bgzd.2014.11.008

某防爆车半主动座椅悬架的天棚控制动力学研究

李成西, 谈乐斌, 潘孝斌, 魏然

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为更好地提高某防爆车座椅的平稳性, 对比研究了线性被动悬架、天棚控制下的半主动悬架的动力学性能。在建立 2 种悬架的动力学模型和天棚控制系统的基础上, 利用 Adams 与 Matlab/Simulink 联合仿真, 获得座椅的库仑阻尼力 (F_R) 时域响应曲线、悬架系统的单位阶跃时域响应曲线、座椅相对于车身的相对位移时域响应曲线。对比结果表明: 相对于线性被动悬架系统, 天棚控制下的悬架系统在振幅上有了很大的改善, 悬架处于稳定状态时被拉伸的长度减小, 大大提高了整个悬架的平顺性; 同时, 整个系统的超调量也减小, 调节时间相应地缩短了一些, 并增加了整个悬架系统的稳定性。

关键词: 防爆车; 天棚控制; 半主动悬架; 动力学研究

中图分类号: TJ810.3 **文献标志码:** A

Dynamics Simulation of Anti-Explosion Car's Semi-Active Seat Suspension Using Sky-Hook Control Method

Li Chengxi, Tan Lebin, Pan Xiaobin, Wei Ran

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the seat's stationarity of the anti-explosion car's cab, the dynamic performance of anti-explosion vehicle traditional linear suspension and semi-active suspension using sky-hook control is studied. On the basis of founding dynamical equation of the two suspensions and founding the system controlled by using sky-hook method, the joint simulation by using Adams and Matlab/Simulink is built. From the simulation, we can gain F_R of time domain, the suspension system's unit step of time domain, seat's displacement relative to chassis of time domain. The comparisons suggest that semi-active suspension using sky-hook control has some improvement on the amplitude of the vertical direction. The length stretched of the semi-active suspension has some reductions when the semi-active suspension is in a stable state. It improved much comfort of all the suspension's system. Also the overshoot of the total system gains some decreases. The setting time is also cut down. The stability of the semi-active suspension's system achieved some improvements.

Keywords: anti-explosion vehicle; sky-hook control; semi-active suspension; dynamics simulation

0 引言

悬架是现代汽车的重要组成部分之一, 其种类各式各样, 例如车身与轮胎之间的连接悬架, 座椅与车身之间连接的悬架等。对于现代的汽车来说, 悬架可以提高汽车行驶的平顺性、乘坐舒适性及操纵稳定性等多种使用性能, 因此优良性能的悬架对现代汽车设计有着重要意义。

当前悬架也有主被动之分。被动悬架的刚度与阻尼是固定不变的, 已经不再适应高机动越野车辆的发展。而由于主动悬架对能量的消耗比较大, 也制约了它在工程方面的应用。目前, 有一种介于被动悬架和主动悬架之间的半主动悬架, 由于其构造简单、性能相对于主动悬架非常接近, 因而得以迅速发展。目前, 大部分的半主动悬架都是通过对减

振器阻尼的改变来调节悬架的相应性能。防爆车驾驶室半主动座椅悬架通过调节天棚阻尼的大小, 从而改变座椅的受力情况。与其他形式悬架相比, 半主动悬架具有响应滞后小、可调节范围大、消耗功率小等优点。基于此, 笔者选择所需车辆状态信号数量少、易测量及运算简便的天棚控制方法, 对防爆车驾驶室座椅线性被动悬架、天棚控制半主动悬架^[1]的动力学进行仿真研究。

1 线性被动悬架模型的建立

1.1 物理模型的建立

线性被动悬架是过去汽车行业最常用的悬架之一, 相比较于现在的主动半主动悬架虽然有不足之处, 但对汽车的发展有着不可忽视的作用。图 1 为某防爆车驾驶室座椅线性被动悬架模型。

收稿日期: 2014-06-23; 修回日期: 2014-07-28

作者简介: 李成西(1989—), 男, 江苏人, 硕士研究生, 从事某防爆车驾驶室座椅的安全性分析研究。

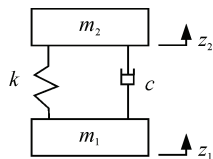


图 1 线性被动悬架模型

根据牛顿第二定律，上述某防爆车座椅线性被动悬架的运动微分方程可以表示为：

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 = -k(z_1 - z_2) - c(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \\ m_2 \ddot{z}_2 = k(z_1 - z_2) + c(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \end{cases} \quad (1)$$

其中： k 为座椅弹簧刚度； c 为弹簧阻尼系数； m_1 、 m_2 分别为车身和座椅与人的质量； z_1 、 z_2 分别为车身和座椅垂直方向的位移； \dot{z}_1 、 \dot{z}_2 为车身和座椅垂直方向的速度； \ddot{z}_1 、 \ddot{z}_2 分别为车身和座椅垂直方向的加速度。

输入信号为 1 kg 炸药在某防爆车底盘正下方爆炸时所带来的车身的加速度如图 2。利用 Adams 与 Matlab 对其进行联合仿真，建立如图 3 的方框图。这里输入为端为外加的阻尼力。输出为座椅相对于车身的位移。

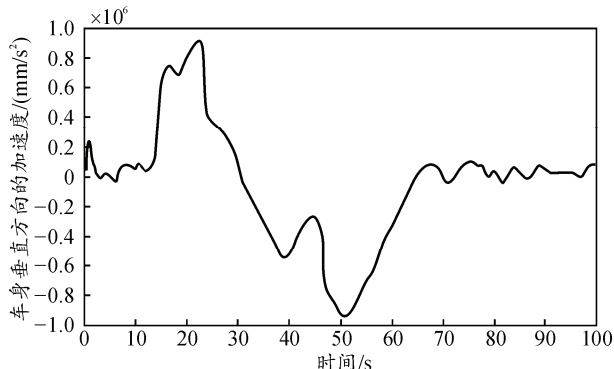


图 2 某防爆车车身加速度时域

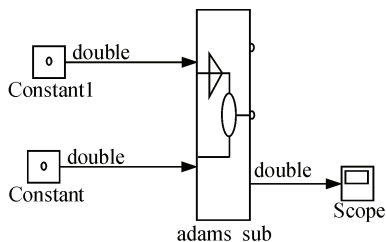


图 3 被动悬架 Adams 与 Matlab 联合仿真模型

1.2 Adams 与 Matlab 联合仿真模型的建立

首先在 Adams 中建立座椅悬架的机械系统 adams_sub^[2]，其中含有 2 个输入端和 3 个输出端。输入端均为对座椅悬架加载的库伦阻力 F_R ，输出端由上到下分别为：某防爆车车身垂直方向的速度、驾驶室座椅垂直方向的速度、座椅与车身的相对位

移。然后由 Adams 输出 Matlab 中的机械系统，围绕座椅悬架的机械系统将输入端设置为 0，此时的仿真等同于座椅线性被动悬架的仿真。由于此次仿真只需要对车身与座椅的相对位移进行输出并分析，因此只需要对第 3 个输出端加入 1 个示波器进行数据采集。最后生成 Adams 与 Matlab 的联合仿真方框图如图 3。

2 天棚控制半主动悬架模型的建立

2.1 天棚控制方法的理论

“天棚”阻尼控制理论是一种悬架系统主动控制策略，是由 D.Karnopp 在 1974 年通过改变系统中天棚阻尼的大小来改变执行元件出力大小的一种控制理论。它的优越性主要在于系统阻尼的可控性高，具有一定的鲁棒性。根据天棚阻尼等效的原则^[1]，在 $\dot{z}_2 > 0$ 时，图 4 所示半主动悬架中的阻力 F_{MR} 和 F_d 的关系应该尽量满足 $F_{MR} \operatorname{sgn}(\dot{z} - \dot{z}) = F_d$ ，由于 $F_d = -C_{sky} \dot{z}_2$ ，所以当 \dot{z}_2 的方向和 $(\dot{z}_2 - \dot{z}_1)$ 的方向相同时， F_{MR} 的值应该等同于 F_d 的值。当 \dot{z}_2 的方向和 $(\dot{z}_2 - \dot{z}_1)$ 的方向相反时，为了使两者之间的差异尽可能的变小，因此将 F_{MR} 无限地趋向于 0，即 $F_d = 0$ 。最终 F_d 的取值可以表达为

$$F_d = \begin{cases} -C_{sky} \dot{z}_2, \dot{z}_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) \geq 0 \\ 0, \dot{z}_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中： F_d 为天棚阻尼力； C_{sky} 为天棚阻尼力阻尼系数； \dot{z}_1 、 \dot{z}_2 分别为车底盘与座椅垂直速度。当 $\dot{z}_2 < 0$ 时，则相反。

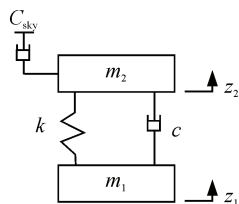


图 4 天棚控制半主动悬架模型

2.2 物理模型的建立

天棚阻尼控制是悬架控制中最为常用的方法之一。主动悬架/半主动悬架的经典控制逻辑中就包含天棚控制方法，它将悬架中弹簧的垂直振动速度进行反馈对悬架作控制。其中防爆车驾驶室座椅天棚控制半主动悬架物理模型如图 4 所示，它是通过改变悬架中天棚阻尼的大小，从而改变座椅悬架系统的整体受力情况，最终改变整个系统的相关特性，如座椅的平顺性能、振动幅值、超调量等。

由图 4 悬架的物理模型，根据牛顿第二定律可以得出座椅悬架的运动微分方程为：

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 = -k(z_1 - z_2) - c(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \\ m_2 \ddot{z}_2 = k(z_1 - z_2) + c(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - C_{sky} \dot{z}_2 \end{cases}$$

其中： m_1 为车身的 1/4 质量； m_2 为座椅与人的质量； k 为悬架刚度； c 为阻尼器阻力系数； z_1 、 z_2 分别为车身和座椅垂直方向的位移； \dot{z}_1 、 \dot{z}_2 为车身和座椅垂直方向的速度； C_{sky} 为天棚阻尼力系数。

2.3 Adams 与 Matlab 联合仿真模型的建立

首先在 Adams 中建立座椅悬架的机械系统 Adams_sub，其中含有 2 个输入端和 3 个输出端。输入端均为对座椅悬架加载的库伦阻力 F_R ，输出端由上到下分别为：某防爆车车身垂直方向的速度、

驾驶室座椅垂直方向的速度、座椅与车身的相对位移。然后由 Adams 输出 Matlab 中的机械系统^[2]，围绕座椅悬架的机械系统建立天棚控制法则：

当 $v_s > 0$ 时， $v_s(v_s - v_f) > 0$ 时，座椅与车身的相对位移会增加，此时就要加阻尼力 F_R ，减小它的幅值， $v_s(v_s - v_f) \leq 0$ 时，此时悬架被压缩，不需要阻尼力，所以阻尼力为 0。

当 $v_s \leq 0$ 时， $v_s(v_s - v_f) \geq 0$ 时，此时悬架被压缩，不需要阻尼力，所以阻尼力为 0。 $v_s(v_s - v_f) < 0$ 时，座椅与车身的相对位移会增加，此时就要加阻尼力 F_R ^[3]。

最终建立 Adams 与 Matlab 的联合仿真方框图如图 5。

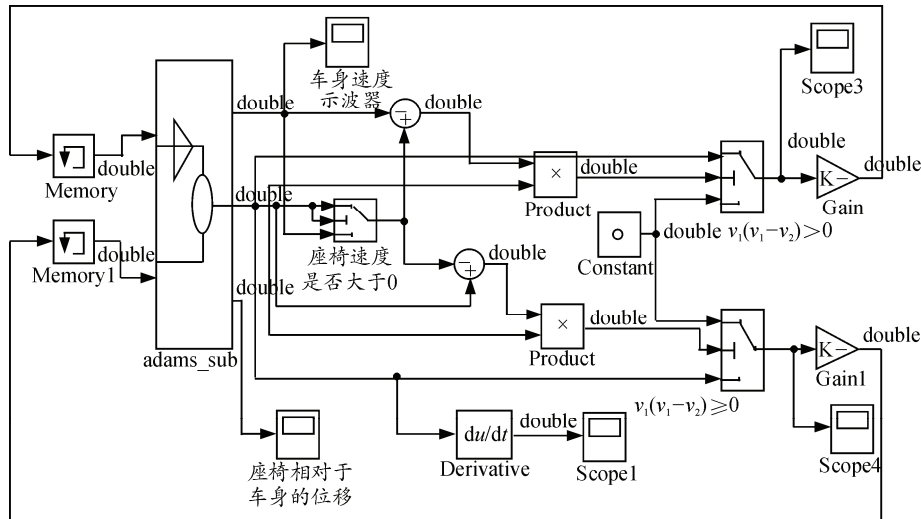


图 5 Adams 与 Matlab 天棚控制联合仿真模型

3 某防爆车座椅悬架模型的动力学仿真

3.1 座椅线性被动悬架模型的动力学仿真

根据厂方给定的相关参数：车身质量 m_1 为 8 000 kg，座椅和质量 m_2 为 10 kg，悬架的总刚度 K 为 1 500 N/mm，阻尼系数 c 为 1 000 N·s/m，建立 Adams 机械系统，通过 Adams 与 Matlab 联合建立的座椅线性被动悬架的联合仿真。通过联合仿真得到车身与座椅的相对位移图如图 6。

为了对该系统的稳定性和平顺性进行研究与分析，对上述座椅线性被动悬架的动力学时域方程进行拉氏变换，得到如下拉氏方程：

$$\begin{cases} m_1 s^2 F(s) = -k(F(s) - G(s)) - c(sF(s) - sG(s)) \\ m_2 s^2 G(s) = k(F(s) - G(s)) + c(sF(s) - sG(s)) \end{cases} \quad (3)$$

则座椅相对于车身的传递函数可表示如下式：

$$\frac{G(s)}{F(s)} = \frac{k + cs}{m_2 s^2 + k + cs} = \frac{s + 1500}{0.01s^2 + s + 1500} \quad (4)$$

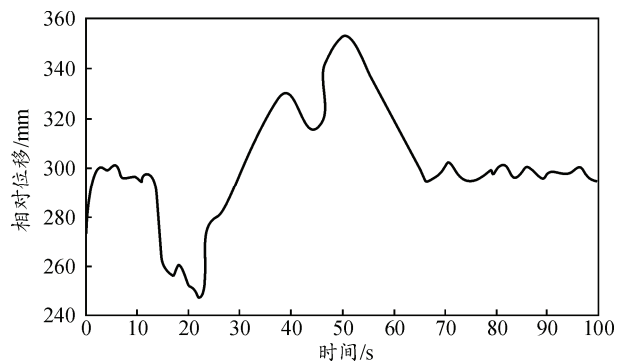


图 6 被动悬架座椅与车身的相对位移时域

由上述传递函数可以得到相应的方框图和 bode 图和单位阶跃响应曲线分别如图 7~图 9^[4]。

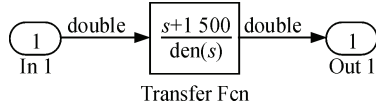
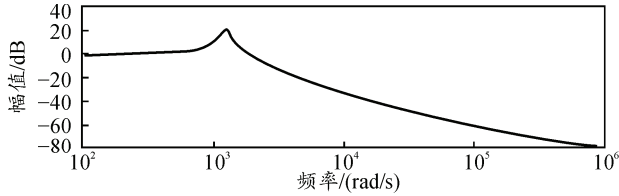
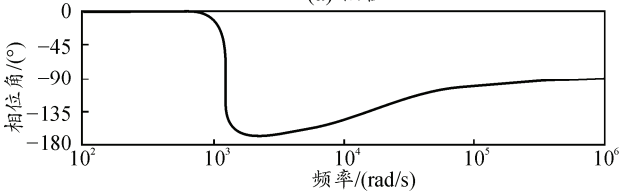


图 7 被动悬架传递函数方框图



(a) 幅值



(b) 相位角

图 8 被动悬架 bode 图

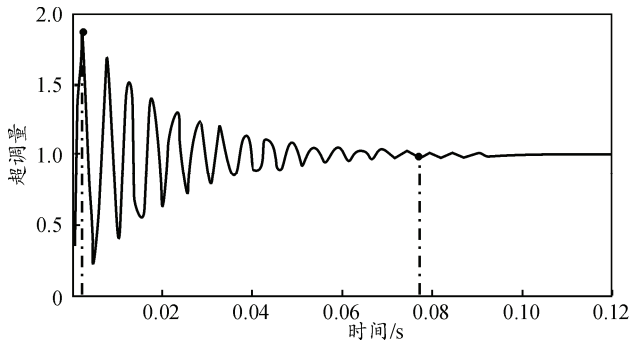


图 9 被动悬架单位阶跃时域响应曲线

上述 bode 图显示该系统虽然相角没有达到 -180° ，但是由于相角裕度：

$$P_M = 180^\circ + \phi(\omega_{gc}) > 0 \quad (5)$$

根据 bode 稳定判据可以断定此系统稳定。

其中由单位阶跃响应时域曲线可以得到相应的系统稳定性能指标：相应峰值时间 $t_p = 0.00257 \text{ s}$ ，超调量 $M_p = 88\%$ ，调节时间 $t_s = 0.0772 \text{ s}$ 。

3.2 座椅天棚控制半主动悬架模型的动力学仿真

根据厂方给定的相关参数：车身质量 m_1 为 8000 kg ，座椅质量 m_2 为 10 kg ，悬架的总刚度 K 为 1500 N/mm ，阻尼系数 c 为 $1000 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ ，天棚阻尼系数 C_{sky} 为 $10000 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ 建立 Adams 机械系统，通过 Adams 与 Matlab 联合建立天棚控制半主动悬架的联合仿真。通过联合仿真可以得到阻尼力 F_R 在座椅速度的 2 种不同情况下的时域响应，以及此时车身与座椅在天棚控制下的相对位移时域响应分别如图 10~图 12。

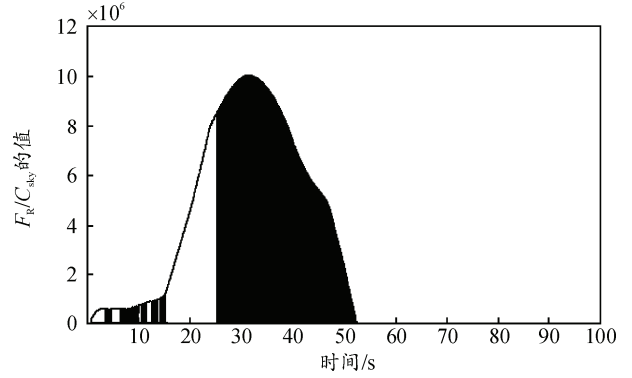


图 10 $V_{\text{座椅}} > 0$ 时 F_R/C_{sky} 值的时域相应图

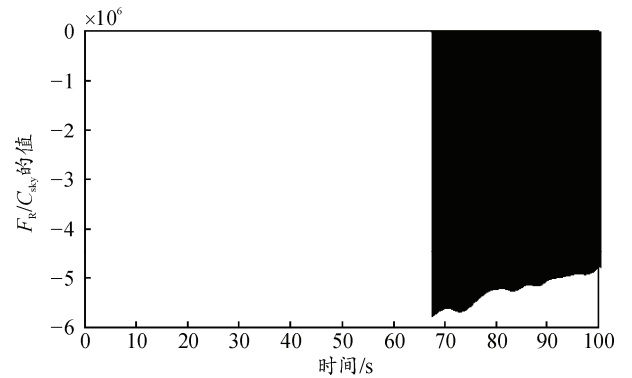


图 11 $V_{\text{座椅}} < 0$ 时 F_R/C_{sky} 值的时域相应图

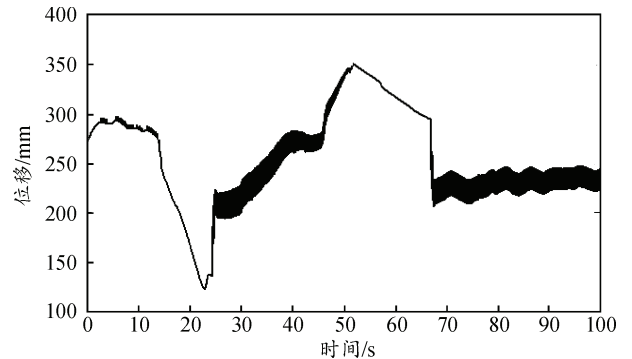


图 12 天棚控制下座椅与车身相对位移时域图

同样对上述座椅天棚控制半主动悬架^[5-6]的动力学时域方程进行拉氏变换，得到如下拉氏方程：

$$\begin{cases} m_1 s^2 F(s) = -k(F(s) - G(s)) - c(sF(s) - sG(s)) \\ m_2 s^2 G(s) = k(F(s) - G(s)) + c(sF(s) - sG(s)) - C_{sky} s G(s) \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{G(s)}{F(s)} = \frac{k + cs}{m_2 s^2 + k + cs + C_{sky} s} = \frac{s + 1500}{0.01s^2 + 11s + 1500} \quad (7)$$

从公式可以看到 C_{sky} 越大， $G(s)/F(s)$ 越小，越符合理想情况，但是随着 C_{sky} 的增大，车身的跳动会加剧，影响操纵稳定性。根据经验值将 $C_{sky} = 1000 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ 时，悬架的平顺性和操纵稳定性都能得到

满意的效果^[3,7]。由半主动座椅悬架在天棚控制下的传递函数可以得到方框图、bode图以及单位阶跃时域响应曲线图分别如图13~图15。

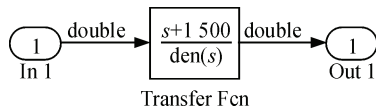


图 13 半主动天棚控制悬架的传递函数方框图

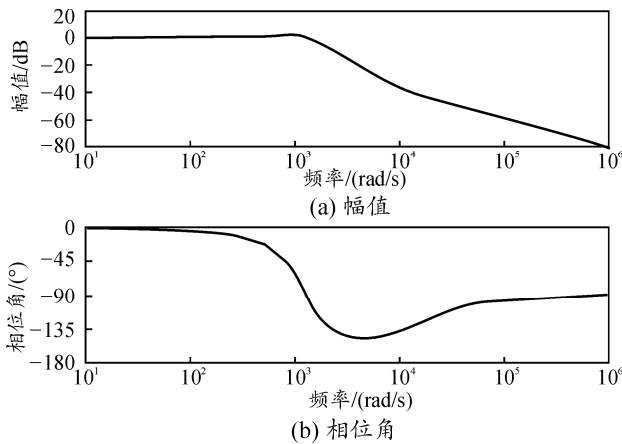


图 14 半主动天棚控制悬架的 bode 图

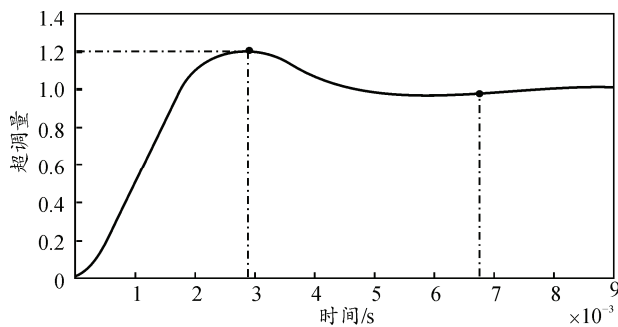


图 15 半主动天棚控制悬架的单位阶跃时域相应

由上述 bode 图可知，虽然相角没有达到 -180° ，但是由于相角裕度：

$$P_M = 180^\circ + \phi(w_{gc}) > 0 \quad (8)$$

根据 bode 稳定判据可以断定此系统稳定。其中由单位阶跃响应时域曲线可以得到相应的系统稳定性能指标：相应峰值时间 $t_p=0.00289\text{ s}$ ，超调量 $M_p=20.6\%$ ，调节时间 $t_s=0.00675\text{ s}$ 。

4 结果分析与对比

对上述仿真结果图进行分析，如 bode 图 8、图 14 给出了被动悬架和半主动天棚控制悬架相应的

幅频、相频图。图 9、图 15 分别给出了相应的单位阶跃时域相应曲线图。图 6、图 12 给出了相应的座椅与车身的相对位移时域图。图 9、图 10 分别给出了天棚控制半主动悬架的阻尼力 F_R/C_{sky} 值的时域相应图。

从相对位移时域图 6、图 12 可以看出：天棚控制的半主动悬架对垂直方向振动幅值有了一定的改善，悬架处于稳定状态时被拉伸的长度减小约 16%，大大提高了整个悬架系统的平顺性。从 bode 图 8、图 13 中可以看出天棚控制的半主动悬架更加平稳。从图 9、图 15 的单位阶跃时域相应曲线可以得到：天棚控制半主动悬架系统相比较于线性被动悬架，不仅在超调量上降低了 67.4%，而且在系统的调节时间上也降低了 0.07045 s，大约降低了 91.26%，大大提高了整个系统的稳定性。

5 结论

在天棚方法控制下的座椅悬架有效地改善了整个座椅系统的抗振性，大大地提高了整个座椅系统的稳定性和平顺性，但其调节量并不是很大；因此，提高车身的抗跳动性能是半主动天棚控制悬架能够广泛应用的基础。

参考文献：

- [1] 周云山. 汽车电控系统理论与设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999: 184-190.
- [2] 张志涌. 精通 Matlab[M]. R2011a 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 490-510.
- [3] Du H P, Sze K Y, Lam J. Semi-active H infinite control of vehicle suspension with magneto-rheological dampers[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 283(3-5): 981-996.
- [4] 陈桂明. 应用 Matlab 建模与仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 131-133.
- [5] Valasek M, Kortum W, Sika Z, et al. Development of semi-active road-friendly truck suspensions[J]. Control Engineering Practice, 1998, 6(6): 735-744.
- [6] Massimo C, Mario M, Carlo N. Semi-active suspension control using 'fast' model-predictive techniques[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(6): 1034-1046.
- [7] Chen H Y, Huang S J. New model-free adaptive sliding controller for active suspension system[J]. International Journal of Systems Science, 2008, 39(1): 57-69.