

文章编号:1006-1355(2021)01-0145-05+154

高速列车非线性空气悬架自适应反步控制研究

李 硕, 马 顺, 李艳山, 王 宇, 陈晓龙

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266580)

摘要: 悬架系统是高速列车的重要组成部分之一。针对高速列车空气悬架的非线性特性,以空气弹簧的实验为基础,依据实验数据建立非线性模型。进而在所建模型的基础上考虑系统参数的不确定性以及外部扰动进行自适应反步控制。仿真结果表明:建立的控制器的非线性模型中不仅能够克服参数不确定性的问题,使系统具有更强的鲁棒性,还可以解决系统扰动带来的影响,使车体在不同速度的运行中,都能够保持较低的振动,从而提高高速列车运行的平顺性和舒适性。

关键词: 振动与波;空气悬架;非线性;外部扰动;自适应反步控制

中图分类号: U270.1⁺.6; TP273

文献标志码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2021.01.027

Study on Adaptive Backstepping Control of Nonlinear Air Suspension in High-speed Trains

LI Shuo, MA Shun, LI Yanshan, WANG Yu, CHEN Xiaolong

(CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266580, Shandong China)

Abstract: Suspension system is an important part of high-speed trains. Aiming at the nonlinear characteristics of the air suspension of high-speed trains, a nonlinear model is established based on the experimental data of the air spring. Then, the system parameter uncertainty and external disturbance are considered to carry out the adaptive backstepping control. Simulation results show that the established controller can not only overcome the problem of parameter uncertainty in the nonlinear model, but also make the system more robust. What's more, it can reduce the influence of system disturbance, so that the vehicle body can keep low vibration in the operation at different speeds, and the smoothness and comfort of the high-speed train operation is improved.

Key words: vibration and wave; air suspension; nonlinear; external disturbance; adaptive backstepping control

高速列车的悬架系统对列车的平稳运行发挥着非常重要的作用^[1-3]。传统的列车悬架系统由一系悬架组成,不存在控制系统,平稳性相对较差。高速列车在一系悬架的基础上增加二系空气悬挂,使得列车舒适性大大增加,空气悬架的应用对于提高高速列车的平顺性和舒适性具有巨大的作用。

目前对于高速列车悬架系统的研究,主要集中在悬架系统控制算法以及悬架结构和参数优化方面。如邓力等^[4]针对传统半主动控制的缺陷,提出了开闭环优化控制算法,大大提高了列车横向运动的稳定性。曹青松等^[5]考虑了列车在运行过程中的干

扰,利用标准正交基函数进行预测控制。闫红卫等^[6]比较了连续型和开关型天棚阻尼控制的优缺点,提出了适用于不同场合的控制方式。于日伟等^[7]建立的耦合系统包括座椅、车体和转向架,并提出悬挂参数联合优化方法。崔庆霞等^[8]和陈志辉等^[9]通过准零刚度隔振方法,在二系悬挂结构中加入一对横向线性弹簧,使车体的垂向振动明显减小。

以上学者在研究过程中,忽略了悬架系统非线性对于控制效果的影响。由于二系悬架为空气悬架,存在着许多非线性因素,这些非线性因素在一定的载荷激励和频域范围内表现十分突出,对控制效果具有非常大的影响,且线性控制策略并不适合于非线性系统^[10]。因此本文着重研究二系空气悬架的非线性特性,并通过仿真分析了不同速度以及干扰下的车体的振动情况,为后续高速列车的平顺性控制研究奠定了基础。

收稿日期:2020-04-03

作者简介: 李硕(1993-),男,河北省保定市人,硕士研究生,主要研究方向为车辆悬架动力学建模与控制。

E-mail: 994897898@qq.com

1 建立模型

1.1 系统模型的建立

二系悬挂的核心是空气弹簧,而空气弹簧具有典型的非线性特性^[1],采用一般的线性控制方式会产生比较大的控制偏差。因此本文通过研究空气弹簧的非线性进而对整个悬架系统进行非线性控制。本文选用前进牌1884N型橡胶空气弹簧,并在文献[12]的研究基础上,利用其实验得出的数据,进行空气悬架的控制研究。本文选取高速列车2自由度非线性空气悬架作为研究对象,并假设车轮在轨道运行过程中不脱离轨道面,其模型简图见图1。

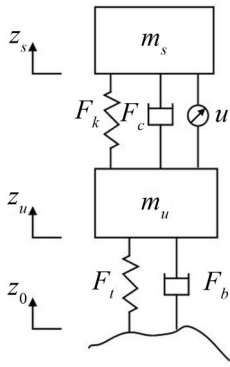


图1 悬架系统模型

根据牛顿第二定律,其运动学方程可描述为

$$\begin{cases} m_s \ddot{z}_s + F_k + F_c - u - F_s = 0 \\ m_u \ddot{z}_u - F_k - F_c + F_t + F_b + u + F_s = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned} F_k &= k_1(z_s - z_u) + k_2(z_s - z_u)^2 + k_3(z_s - z_u)^3 \\ F_c &= bc_1(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \\ F_t &= k_t(z_u - z_0) \\ F_b &= k_b(\dot{z}_u - \dot{z}_0) \end{aligned}$$

式中: m_s 为车体质量; m_u 为转向架质量; F_k 为二系空气悬架刚度, k_1, k_2, k_3 为空气弹簧的刚度系数; F_c 为二系空气悬架阻尼; bc_1 为空气弹簧的阻尼系数; u 为主动悬架的控制力; F_s 为系统受到不确定的外部扰动,因为受到的外部扰动不可能无限大,因此该外部扰动是有界的; F_t 为一系悬架刚度系数; F_b 为一系悬架阻尼系数; z_s 为车体的位移; z_u 为转向架的位移; z_0 为轨道激励输入。

1.2 路面激励模型的建立

本文所采用的路面输入为德国轨道高低不平顺功率谱密度^[7],其表达式如下所示:

$$\ddot{z}_0 = -v(\Omega_c + \Omega_r)\dot{z}_0 - v^2\Omega_c\Omega_r z_0 + \sqrt{2\pi A_r\Omega_c^2 v^3} \quad (2)$$

式中: z_0 为高速轨道路面不平顺输入, v 为列车行驶速度, Ω_c, Ω_r 为截断空间频率, A_r 为轨道粗糙度系数。

2 自适应反步控制器设计

2.1 控制器设计

选取 $x_1 = z_s, x_2 = \dot{z}_s, x_3 = z_u, x_4 = \dot{z}_u$ 为系统的状态变量。考虑到列车在运行过程中乘客的上下走动,因此车体的质量也会出现相应的变化。现定义不确定的参数 $\theta = m_s$,同时考虑可能的外部扰动,建立如下的状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{\theta}(-F_k - F_c + u + F_s) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{m_u}(F_k + F_c - F_t - F_b - u - F_s) \end{cases} \quad (3)$$

式中:参数 θ 有界,即 $\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}$; F_s 有界,即 $F_s \leq D$;且:

$$\begin{aligned} F_k &= k_1(x_1 - x_3) + k_2(x_1 - x_3)^2 + k_3(x_1 - x_3)^3 \\ F_c &= bc_1(x_2 - x_4) \\ F_t &= k_t(x_3 - z_0) \\ F_b &= k_b(x_4 - \dot{z}_0) \end{aligned}$$

针对上述状态空间方程设计控制器,取跟踪误差为

$$e_1 = x_1 - x_{1r} \quad (4)$$

式中: x_{1r} 为参考轨迹信号,当跟踪误差尽可能的小,会达到控制的目标。对上式进行求导可得:

$$\dot{e}_1 = x_2 - \dot{x}_{1r} \quad (5)$$

选择 x_2 作为误差动态的虚拟控制输入,其理想函数为 α ,则两者之间的误差为

$$e_2 = x_2 - \alpha \quad (6)$$

则公式(5)可以重新写为

$$\dot{e}_1 = e_2 + \alpha - \dot{x}_{1r} \quad (7)$$

因此,该控制器的目标是设计一个虚拟控制率 α ,使得跟踪轨迹误差 e_1 尽可能的小,选择第一个Lyapunov函数为

$$V_1 = \frac{1}{2}e_1^2 \quad (8)$$

对上式进行求导可得:

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1(e_2 + \alpha - \dot{x}_{1r}) \quad (9)$$

选择如下的虚拟控制率:

$$\alpha = \dot{x}_{1r} - t_1 e_1 \quad (10)$$

式中: t_1 为一个正常数。则式(9)可以改写为

$$\dot{V}_1 = -t_1 e_1^2 + e_1 e_2 \quad (11)$$

从上式可以看出,当 $e_2 \rightarrow 0$ 时,那么 $\dot{V}_1 = -t_1 e_1^2 \leq 0$,就可以保证 e_1 是渐进趋近于零的。

对 e_2 进行求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{\alpha} \\ &= \frac{1}{\theta}(-F_k - F_c + u + F_s) - \dot{\alpha} \end{aligned} \quad (12)$$

定义 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ 为系统的估计误差, $\hat{\theta}$ 为参数 θ 的估计值, 选择第二个 Lyapunov 函数为

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\theta}^2 = \\ &e_1 e_2 - t_1 e_1^2 + e_2 \dot{e}_2 + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} = \\ &-t_1 e_1^2 + e_2 \left[\frac{1}{\theta} (-F_k - F_c + u + F_s) - \dot{\alpha} \right] + \\ &e_1 e_2 + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} \end{aligned} \quad (13)$$

为了消除系统外部扰动对系统的影响, 采用滑模控制的等效控制和切换控制的思想, 选择的控制律为

$$u = F_k + F_c + \hat{\theta}(\dot{\alpha} - t_2 e_2 - e_1) - D \cdot \text{sign}(e_2) \quad (14)$$

式中: t_2 为正实数, 那么有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -t_1 e_1^2 + e_1 e_2 + e_2 \frac{\hat{\theta}}{\theta} (\dot{\alpha} - t_2 e_2 - e_1) + \\ &\frac{e_2}{\theta} (F_s - D \cdot \text{sign}(e_2)) - e_2 \dot{\alpha} + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} = \\ &-t_1 e_1^2 - t_2 e_2^2 + e_2 \frac{\hat{\theta}}{\theta} (\dot{\alpha} - t_2 e_2 - e_1) + \frac{1}{\theta} (F_s \cdot e_2 - D \cdot |e_2|) + \\ &\frac{1}{\gamma} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} \leq -t_1 e_1^2 - t_2 e_2^2 + e_2 \frac{\hat{\theta}}{\theta} (\dot{\alpha} - t_2 e_2 - e_1) + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} \end{aligned} \quad (15)$$

取系统的自适应率为

$$\dot{\hat{\theta}} = -e_2 \gamma (\dot{\alpha} - t_2 e_2 - e_1) \quad (16)$$

则式(15)可以改写为

$$\dot{V}_2 \leq -t_1 e_1^2 - t_2 e_2^2 \leq 0 \quad (17)$$

由系统 Lyapunov 定律可知, 随着 $t \rightarrow 0$, $V_2 \rightarrow 0$, 则 e_1 与 e_2 也将趋近于 0, 则系统可以达到预定的目标。

为了削弱系统抖振带来的危害, 采用饱和函数代替符号函数的做法^[13], 令控制律为

$$u = F_k + F_c + \hat{\theta}(\dot{\alpha} - t_2 e_2 - e_1) - D \cdot \text{sat}(e_2) \quad (18)$$

$$\text{式中: } \text{sat} = \begin{cases} 1 & \text{if } e_2 \geq 0.0001 \\ 10000 \cdot e_2 & \text{if } -0.0001 < e_2 < 0.0001 \\ -1 & \text{if } e_2 \leq -0.0001 \end{cases}$$

则同样可以得到式(17)的证明。

2.2 系统零动态响应

为了找到系统的零动态响应, 令 $e_1 = 0$, $\dot{e}_1 = 0$ 。因此可以得到:

$$u = \ddot{x}_1 \theta + F_k + F_c - F_s \quad (19)$$

将上式(19)代入到 \dot{x}_4 中, 可以得到:

$$\dot{x} = Ax + \omega \quad (20)$$

$$\text{其中: } x = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_t}{m_u} & -\frac{k_b}{m_u} \end{bmatrix},$$

$$\omega = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_t}{m_u} z_0 + \frac{k_b}{m_u} \dot{z}_0 - \frac{\theta}{m_u} \ddot{x}_{1r} \end{bmatrix}。$$

从上式可以看出, 此 2 阶系统的所有特征根都具有负实部, 具有 Hurwitz 判据特征, 因此该系统的零动态是渐近稳定的。

3 仿真实验

3.1 模型参数选取

由于外部扰动信号有范围, 因此本文假设为

$$F_s = 50 \cdot \sin(8\pi t) \quad 1.5 \leq t \leq 1.75 \quad (21)$$

空气弹簧参数选取参照前文所述文献[12], 选取参数为 0.8 MPa 下的空气弹簧试验拟合系数, 其他系统参数选择参照文献[14], 具体数值如表 1 所示。轨道激励参数选取如表 2 所示, 低干扰谱采用的速度为 300 km/h, 高干扰谱采用 200 km/h。控制器参数选取如表 3 所示, 且控制器设计过程中的参考轨迹信号设置为 0, 即车体的参考信号为不振动, 利用 MATLAB/Simulink 对系统进行控制仿真。

表 1 悬架系统参数选择

参数	数值	参数	数值
θ_{\min}/kg	175 000	m_u/kg	2 100
θ_{\max}/kg	185 000	$b_{c1}/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	3 500
$k_1/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	102.111	$k_2/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	911.286
$k_3/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	5 951.281	$k_4/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	6 000
$k_r/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1 200 000		

表 2 轨道激励参数选择

轨道级别	A_v	Ω_c	Ω_r	v
	$\text{m}^2 \cdot \text{rad}/\text{m}$	rad/m	rad/m	km/h
低干扰	4.032×10^{-7}	0.824 6	0.020 6	300
高干扰	10.8×10^{-7}	0.824 6	0.020 6	200

表 3 控制器参数选择

参数	数值	参数	数值
γ	6×10^{10}	t_l	20
t_2	5	D	50

3.2 低干扰 300 km/h 路面激励响应

低轨道路面激励模型如图 2 所示, 仿真时间为 10 秒。

图 3 所示为车体的垂直振动位移仿真结果, 图 4 所示为车体的垂直振动加速度仿真结果, 图 5 所示为车体质量的变化曲线, 图 6 所示为车体的垂直振动位移功率谱密度曲线, 图 7 所示为车体的垂直振动加速度功率谱密度曲线仿真结果。

悬架系统的作用在于降低车体上乘客的振动, 提高列车在运行过程中的平顺性和舒适性。通过图 3 以及图 4 可以看出, 在低干扰 300 km/h 的路面激励下, 综合考虑了车体质量的变化以及外部扰动的影

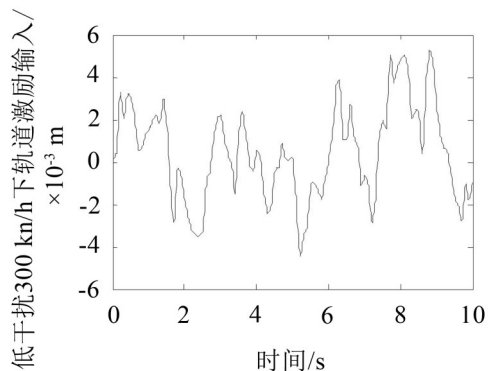


图2 路面激励输入

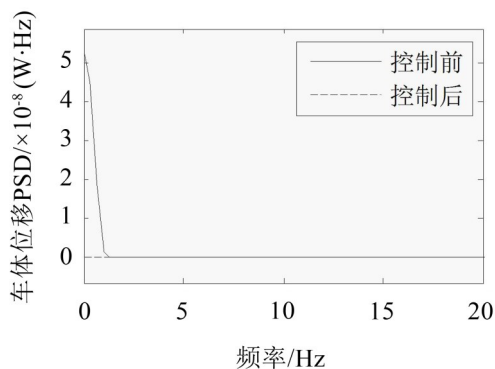


图6 车体位移PSD

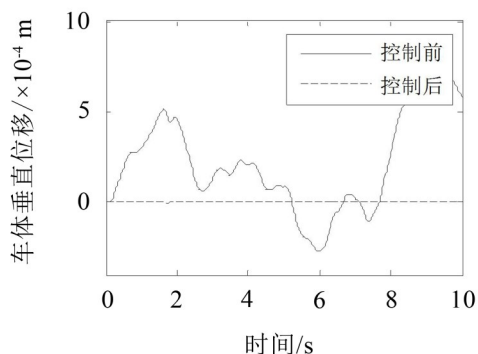


图3 车体垂直位移响应

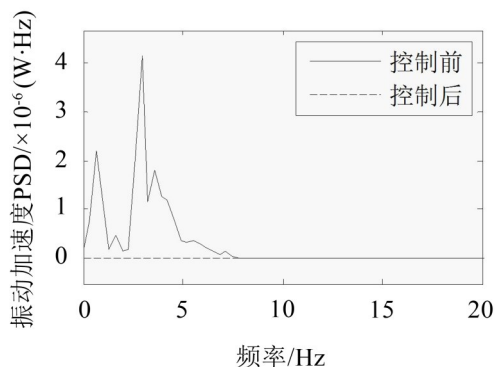


图7 车体垂直振动加速度PSD

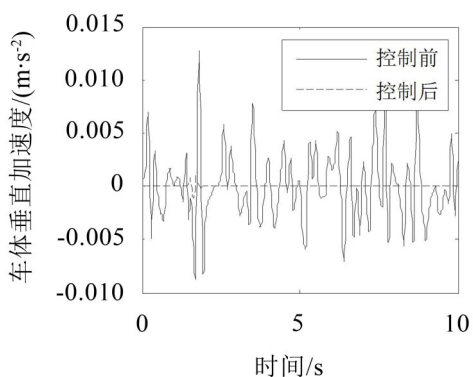


图4 车体垂直振动加速度响应

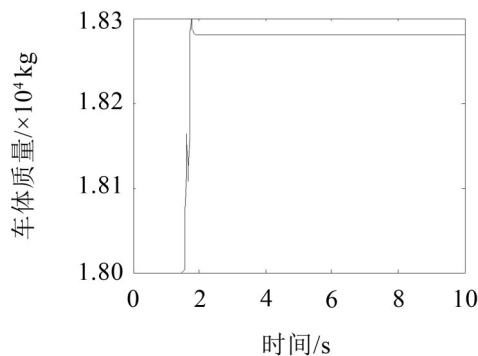


图5 车体质量变化

3.3 高干扰200 km/h路面激励响应

低轨道路面激励模型如图8所示。仿真时间为10秒。图9所示为车体的垂直振动位移仿真结果，图10所示为车体的垂直振动加速度仿真结果，图11所示为车体质量的变化曲线，图12所示为车体的垂直振动位移功率谱密度曲线，图13所示为车体的垂直振动加速度功率谱密度曲线仿真曲线。

通过分析图9至图13可以发现，控制器不仅在低干扰300 km/h的情况下具有非常好的控制效果，在高干扰200 km/h的路面激励下依然能够保持非常好的控制效果。该控制器使得悬架系统发挥了更加明显的作用，不仅能够使得系统抗外部扰动的性能更强，还可以减小车体在运行过程中的位移以及振动。由此验证了控制器的有效性。

4 结语

本文在非线性空气悬架的试验基础上，利用所得到的试验数据建立2自由度高速列车模型，进而针对该模型进行控制研究。在控制器设计时，既考虑到车体由于乘客数量的变化而出现的范围波动，即参数的不确定性的情况，又兼顾了高速列车在运行过程中可能出现的扰动，因此所设计的自适应反步控制器不仅能够解决系统非线性带来的影响，而且能够解决系统参数的不确定性影响，还可以依靠切换控制的思想来解决系统外部扰动带来的影响。

响，所设计的控制器能够非常好地降低车体的垂直振动和位移，同时图6和图7的频域仿真结果验证了时域的仿真结果，说明所设计的控制器的有效性，突出了控制器在降低车辆位移和振动的巨大作用。

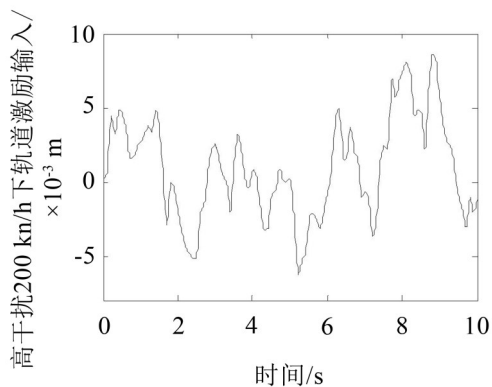


图8 路面激励输入

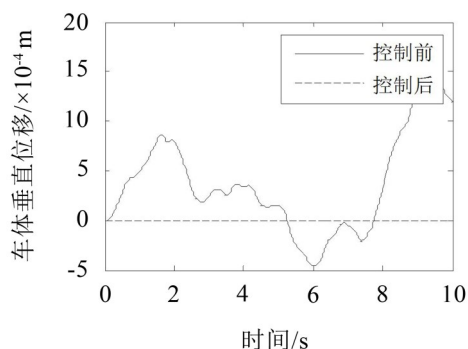


图9 车体垂直位移响应

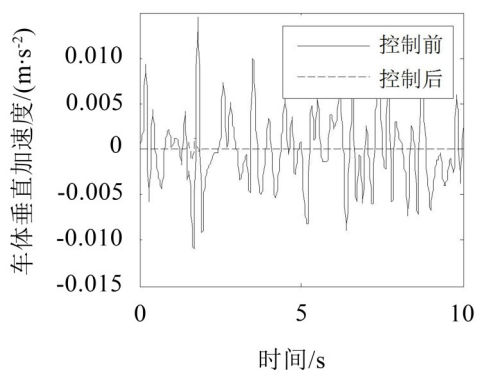


图10 车体垂直振动加速度响应

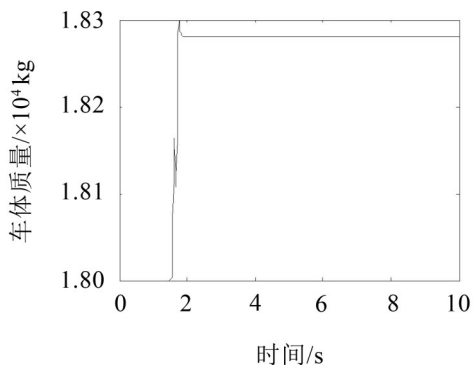


图11 车体质量变化

仿真结果显示控制器可以有效地提升悬架性能,证明了控制器的稳定性,从而满足了悬架系统的控制性能要求,使其能应对不确定参数和扰动对系统的

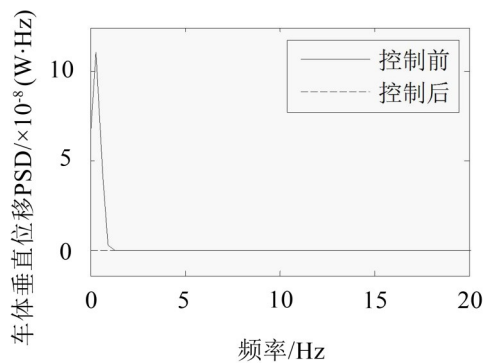


图12 车体位移PSD

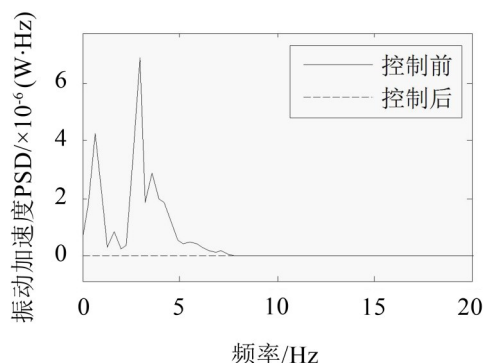


图13 车体垂直振动加速度PSD

影响,达到控制悬架系统增强高速列车的平顺性和乘坐舒适性的目的。

参考文献:

- [1] WANG W L, ZHOU Z R, YU D S, et al. Rail vehicle dynamic response to a nonlinear physical 'in-service' model of its secondary suspension hydraulic dampers[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 95(Oct.): 138-157.
- [2] NGUYEN S D, CHOI S B, NGUYEN Q H. A new fuzzy-disturbance observer-enhanced sliding controller for vibration control of a train-car suspension with magneto-rheological dampers[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 105(MAY15): 447-466.
- [3] D. LEBEL, C. SOIZE, C. FUNFSCHILLING, G. PERRIN. Bayesian calibration of mechanical parameters of high-speed train suspensions[J]. Procedia Engineering, 2017, 199 (sep): 1234-1239.
- [4] 邓力,陈春俊,杨伟芳. 高速列车横向半主动悬挂开闭环优化控制研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 119-123.
- [5] 曹青松,王明翔,陶晶. 列车主动悬挂预测控制算法研究[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(1): 21-25.
- [6] 闫红卫,张政. 基于天棚阻尼二系悬挂系统的半主动控制策略研究[J]. 科技创新与应用, 2019(10): 103-104.
- [7] 于日伟,周长城,赵雷. 高速列车转向架-车体-座椅垂向耦合振动机理及悬挂参数联合优化[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 57-67.

(下转第 154 页)