

文章编号:1005-0523(2014)04-0011-05

惯容悬挂元件对铁路车辆垂向振动的影响

张剑, 沈钢

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要:惯容是一种新型的悬挂元件,其具有两个独立、自由的端点。介绍了惯容的概念以及一种机械结构的实现方式。在Matlab/Simulink中建立了含有惯容悬挂元件的铁路车辆垂向动力学仿真模型。对该模型施加脉冲和随机两种轨道不平顺激励,选取一定范围的惯容系数,分析其对车体垂向振动的影响。在随机激励下,分析了二系垂向刚度和阻尼系数变化时,惯容系数对车体垂向平稳性的影响。分析结果表明:当惯容系数取值在一定范围内时,其对车体垂向振动具有明显的抑制作用。

关键词:被动悬挂;惯容;减振;铁路车辆

中图分类号:U271.91

文献标志码:A

高速列车的投入运营在提高铁路运输竞争力的同时,也面临着诸多挑战。其中之一是要求车辆在较高的速度上仍然满足运行平稳性的要求,使乘客感到舒适。

设计较为合理的铁路车辆悬挂系统是提高车辆运行平稳性的有效途径之一。就悬挂系统是否有能量输入而言,大致可分为3类:传统被动悬挂、主动悬挂和半主动悬挂。主动悬挂和半主动悬挂是在传统被动悬挂的基础上发展而来,相比被动悬挂具有一定的优势,能够在一定程度上改善车辆的运行平稳性,但其也有缺点,如成本较高,结构复杂,提高了对可靠性的要求^[1]。

2002年,英国剑桥大学Malcolm C. Smith教授开创性地提出了惯容的概念,实现了“电容—电感—电阻”电子网络系统与“惯容—弹簧—阻尼”机械网络系统之间严格地对应。随后Smith教授给出了惯容的物理实现装置,并将惯容运用到车辆悬架系统中,分析其对车辆性能的影响^[2-3]。2005年,由英国剑桥大学设计的一种将惯容、弹簧和阻尼三元件并联的新型悬架成功应用于F1赛车比赛中,有效地改善了赛车的操控性和轮胎接地性。2009年,台湾大学王富正教授将“惯容”引入到铁路车辆悬挂系统中,并分析了该悬挂元件对车辆运行稳定性以及舒适性的影响^[4-6]。2011年,Jason Zheng Jiang等人^[7]研究了含有惯容的铁路车辆悬挂元件的布置形式,并系统分析了不同布置形式的悬挂系统对铁路车辆横向及垂向动力学性能的影响。

本文在传统的铁路车辆被动悬挂系统中加入惯容新型悬挂元件,通过建立铁路车辆垂向动力学模型,探讨其对铁路车辆垂向振动的影响。

1 惯容简介

惯容又称为惯性质量蓄能器或惯性蓄能器,同弹簧和阻尼器一样,惯容具有两个独立、自由的端点,是一种真正的两端点装置^[2]。理想惯容器两端所受到的力与两端的相对加速度成正比,即

$$F = b(a_2 - a_1) \quad (1)$$

式中: F 为作用在惯容两端的力; b 为惯容系数; kg ; a_i 为端点 i 的加速度。

惯容元件可以采用不同的机械方式来实现,常见的有齿轮齿条惯容器、滚珠丝杠惯容器。图1为滚珠

收稿日期:2014-04-28

作者简介:张剑(1989—),男,硕士研究生,研究方向为车辆动力学;沈钢(1963—),教授,博导,研究方向为车辆动力学。

丝杠惯容器的结构图,当等大反向的力 F 沿轴向作用于两吊耳中心时,吊耳A相对于吊耳B作直线运动,产生相对位移,螺母和丝杠将直线运动转化为丝杠的旋转运动,丝杠驱动飞轮旋转,由此实现对飞轮惯性的封装,且惯容系数 b 满足^[8]:

$$b = I \left(\frac{2\pi}{P} \right)^2 \quad (2)$$

式中: I 为飞轮的转动惯量; P 为丝杠的螺距。有关惯容的其它物理实现方式,详见参考文献[9]。

2 铁路车辆垂向动力学模型

本文以铁路客车为研究对象,建立该客车的垂向动力学模型,如图2所示。该模型的二系悬挂中,与弹簧和阻尼并联的即为惯容,其示意图用一个矩形表示。模型中包含了车体、构架和轮对。现考虑车体浮沉和点头两个自由度(z_c, θ_c),两个构架浮沉和点头各两个自由度($z_{if}, \theta_{if}, z_{tr}, \theta_{tr}$),总共6个自由度,不考虑轮对的运动自由度,该模型各参数说明及参数值见表1。选取每一刚体静平衡位置处为坐标系的原点,坐标系的 z 轴以向上为正,并且假设惯容、弹簧和阻尼均为线性元件,不考虑其非线性因素,则车体的垂向运动方程如下:

$$m_c \ddot{z}_c + b(\ddot{z}_c - l_c \ddot{\theta}_c - \ddot{z}_{if}) + c_{zs}(\dot{z}_c - l_c \dot{\theta}_c - \dot{z}_{if}) + k_{zs}(z_c - l_c \theta_c - z_{if}) + \quad (3)$$

$$b(\ddot{z}_c + l_c \ddot{\theta}_c - \ddot{z}_{tr}) + c_{zs}(\dot{z}_c + l_c \dot{\theta}_c - \dot{z}_{tr}) + k_{zs}(z_c + l_c \theta_c - z_{tr}) = 0$$

$$J_c \ddot{\theta}_c - b(\ddot{z}_c - l_c \ddot{\theta}_c - \ddot{z}_{if})l_c - c_{zs}(\dot{z}_c - l_c \dot{\theta}_c - \dot{z}_{if})l_c - k_{zs}(z_c - l_c \theta_c - z_{if})l_c + \quad (4)$$

$$b(\ddot{z}_c + l_c \ddot{\theta}_c - \ddot{z}_{tr})l_c + c_{zs}(\dot{z}_c + l_c \dot{\theta}_c - \dot{z}_{tr})l_c + k_{zs}(z_c + l_c \theta_c - z_{tr})l_c = 0$$

同样可以列出两构架的垂向运动方程,此处不再一一列出。

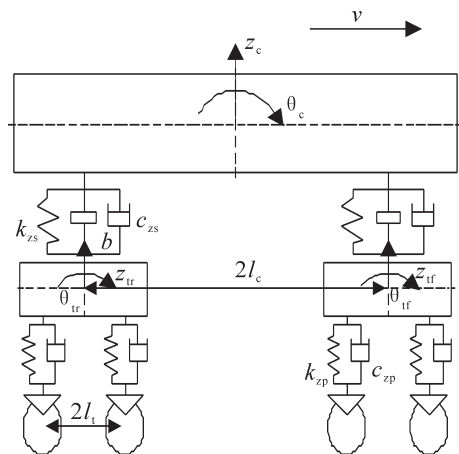


图2 含有惯容的铁路车辆垂向动力学模型

Fig. 2 The vertical dynamic model of railway vehicle with inerters

3 外界激励下惯容器减振分析

为了分析惯容悬挂元件对车辆垂向振动的影响,在 Matlab/Simulink 中建立如图2所示的仿真模型^[10],仿真速度为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。采用脉冲激励和随机激励两种激励方式,并选取惯容系数在 $0 \sim 4000$ 之间,分析不同惯容系数对车体垂向振动的影响。

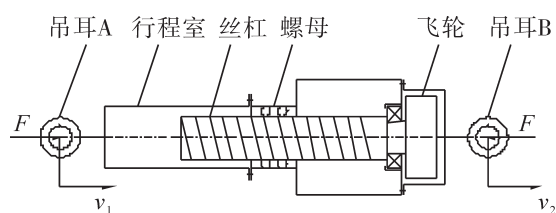


图1 滚珠丝杠惯容器结构图

Fig. 1 Structure diagram of ball screw inerter

表1 铁路客车垂向模型参数含义及数值

Tab. 1 Parameters and values for vertical model of passenger trains

参数名称	单位	数值
车体质量 m_c	kg	38 000
车体点头转动惯量 J_c	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	2.31×10^6
构架质量 m_i	kg	2 500
构架点头转动惯量 J_i	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	2 000
二系悬挂刚度 k_{zs}	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	1.2×10^6
二系悬挂阻尼 c_{zs}	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	2×10^4
一系悬挂刚度 k_{zp}	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	5×10^6
一系悬挂阻尼 c_{zp}	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	3.58×10^4
惯容系数 b	kg	—
转向架定距之半 l_c	m	9.5
轴距之半 l_i	m	1.25

3.1 脉冲激励

对该垂向动力学模型施加一脉冲激励作为轨道垂向不平顺激励,激励函数如下:

$$z_v = 0.002 \sin(4\pi t) \quad 0 \leq t \leq 0.5 \quad (5)$$

式中, z_v 为轨道垂向不平顺值, m。

图3(a)为在无惯容和有惯容条件下车体垂向振动加速度的时域响应。从图3(a)中可以看出,当加入惯容元件后,车体垂向振动加速度峰值明显减小,说明惯容对车辆的垂向振动起到了明显的抑制作用。图3(b)为不同惯容系数对车体垂向加速度峰值的影响,从图3(b)中可以看出,惯容系数越大,车体垂向加速度峰值越小。因此,可以考虑适当增大惯容系数来降低脉冲激励下的加速度峰值。

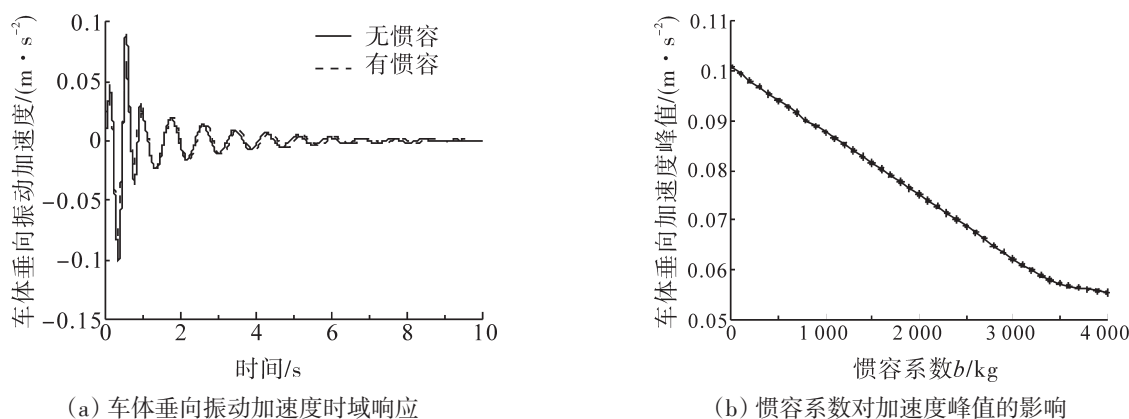


图3 脉冲激励下车体垂向振动加速度比较

Fig. 3 Comparison of vertical vibration acceleration of carbody under impulse excitation

3.2 随机激励

选取一段轨道垂向随机不平顺作为该系统的外界激励,其空间历程如图4所示。为考察车体的垂向振动特性,在车体中心处、前端转向架及后端转向架处建立观测点。

车体中部垂向加速度均方根值(rms)如图5所示。从图5中可以清楚的看出,车体中心处的垂向加速度均方根值(rms)有先减小后增大的趋势,并且会有一个极小值出现。当惯容系数 b 小于2 800左右时,车体的垂向振动明显减弱,此时惯容对车体的垂向振动起到抑制作用。而当惯容系数 b 大于2 800时,车体的垂向振动没有减弱,反而加强,此时惯容不能抑制车体的垂向振动。下面以 $b=1\ 350$ 为例,具体分析惯容对车体不同位置处振动的影响,详见表2和表3。

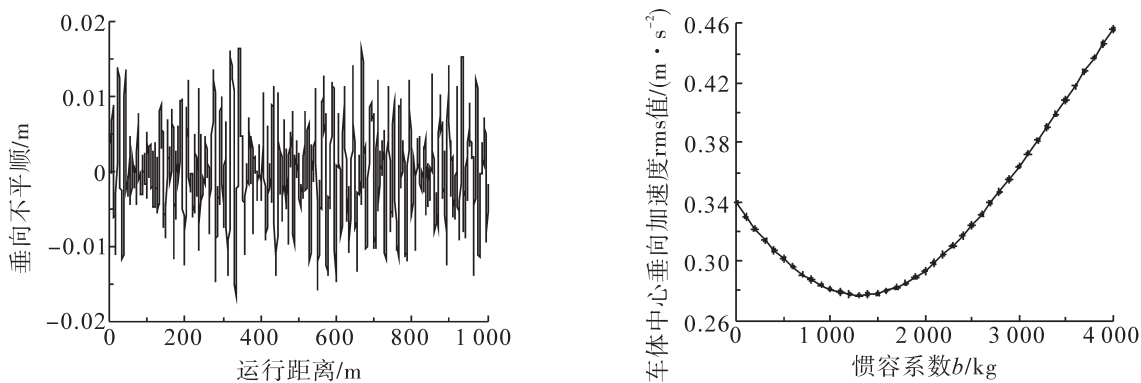


图4 轨道垂向不平顺空间历程

Fig. 4 Space history of vertical track irregularity

图5 惯容系数对车体中部加速度 rms 值的影响

Fig. 5 Impacts of inerter coefficient on rms value of carbody central acceleration

表2 无惯容和有惯容条件下车体的垂向振动加速度 rms 值的比较

Tab. 2 Comparison of rms value of carbody vertical acceleration with inerters or no inerters

车体垂向加速度观测点位置	无惯容 ($b=0$)	有惯容 ($b=1\ 350$)	提高量/%
前端 rms 值	0.617 2	0.487 9	20.95
中部 rms 值	0.339 0	0.277 4	18.17
后端 rms 值	0.655 7	0.510 5	22.14

表3 无惯容和有惯容条件下车体垂向平稳性指标的比较

Tab. 3 Comparison of vertical stability index of carbody with inerters or no inerters

车体不同位置处平稳性指标	无惯容 ($b=0$)	有惯容 ($b=1\ 350$)
前端平稳性指标	2.951 1	2.670 9
中部平稳性指标	2.460 5	2.244 3
后端平稳性指标	3.015 3	2.723 0

由表2中的数据可以看出,在有惯容的情形下,车体前端、中部和后端的垂向加速度 rms 值分别提高了 20.95%, 18.17% 和 22.14%。由表3中的数据可知,车体不同位置处的垂向平稳性指标也得到明显改善。由此可见,在此情况下 ($b=1\ 350$), 惯容对车辆垂向减振作用非常明显。

为了研究在不同条件下惯容系数对车体垂向振动的影响,取二系垂向刚度、阻尼系数可变,分析在此条件下车体的垂向振动情况,仿真结果如图6所示。进一步的计算表明,二系垂向刚度越大,惯容对车体的减振作用越明显,但此时所需的惯容系数也较大;二系阻尼系数越大,惯容对车体的减振作用越不明显。

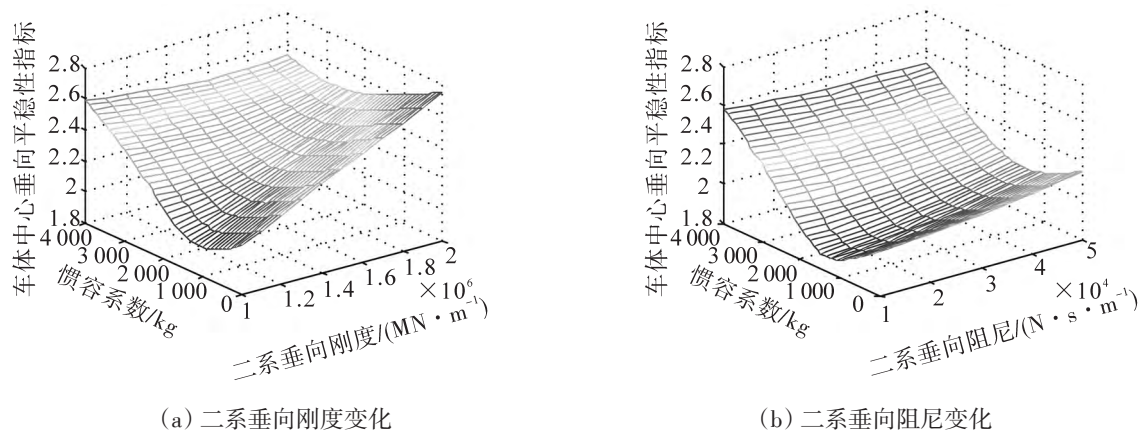


图6 二系垂向刚度、阻尼变化时惯容系数对车辆垂向振动的影响

Fig. 6 Impact of inerter coefficient on vehicle vertical vibration with the variation of vertical stiffness and secondary suspension damping

4 结论

1) 介绍了惯容这一新型悬挂元件以及一种机械结构的实现装置。建立了含有惯容悬挂元件的铁路客车垂向动力学模型,给出了车体垂向运动方程,并在 Matlab/Simulink 中建立了该车辆垂向振动的仿真模型。

2) 以脉冲和随机两种轨道不平顺作为外界激励,选取不同的惯容系数,分析其对车体垂向振动的影响。在脉冲激励下,当惯容系数在给定的范围内时,惯容系数越大,加速度峰值越小。在随机激励下,当惯容系数小于某一数值时,车体的垂向振动受到抑制,但当惯容系数大于某一数值时,车体的垂向振动不再受到抑制,反而得到加强,此时惯容不能发挥应有的减振功能。

3) 研究了二系垂向刚度和阻尼系数变化时,惯容系数对车体垂向平稳性的影响。结果表明,二系垂向刚度越大,惯容对车体的减振作用越明显,但此时所需的惯容系数也较大;二系阻尼系数越大,惯容对车体

的减振作用越不明显。

4) 对比脉冲激励和随机激励的分析结果可以发现,对于不同的外界激励,使惯容发挥最佳减振效果的系数值是不一样的,这也是被动悬挂系统缺点的体现,但惯容对铁路车辆减振的作用还是显著的。因此,可以考虑参考现有惯容元件的结构,设计适合铁路车辆悬挂系统的惯容元件并应用于悬挂系统中,从而提高铁路车辆的运行平稳性。

参考文献:

- [1] 胡用生. 现代轨道车辆动力学[M]. 北京:中国铁道出版社, 2009: 223-224.
- [2] MALCOLM C S. Synthesis of mechanical networks: the inerter [J]. IEEE Transactions on automatic control, 2002, 47(10): 1648-1662.
- [3] MALCOLM C S, FU CHENG WANG. Performance benefits in passive vehicle suspensions employing inerters [J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 42(4): 235-257.
- [4] FU CHENG WANG, MIN KAI LIAO, BO HUAI LIAO. The performance improvements of train suspension systems with mechanical networks employing inerters [J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(7): 805-830.
- [5] FU CHENG WANG, MIN KAI LIAO. The lateral stability of train suspension systems employing inerters [J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(5): 619-643.
- [6] FU CHENG WANG, MIN RUEI HSIEH, HSUEH JU CHEN. A full-train with inerters: stability and performance[C]//22nd IAVSD conference, UK, 2011.
- [7] JASON ZHENG JIANG, ALEJANDRA Z, MATAMOROS, R M G. Passive suspensions incorporating inerters for railway vehicles [J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50: 263-276.
- [8] 张孝良. 理想天棚阻尼的被动实现及其在车辆悬架中的应用[D]. 江苏:江苏大学, 2012: 23-25.
- [9] 聂佳梅, 张孝良, 江浩斌,等. 惯容器模型结构探索[J]. 机械设计与研究, 2012, 28(1): 29-32.
- [10] 颜秋, 刘永明. 基于 matlab/simulink 的车辆建模与故障分析[J]. 华东交通大学学报, 2012, 29(5): 13-17.

Effects of Inerter Suspension Components on Vertical Vibration of Railway Vehicles

Zhang Jian, Shen Gang

(Institute of Railway and Urban Mass Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The inerter, as a new suspension component, has two independent and free terminals. This paper introduces the inerter as well as its realization by a mechanical structure. The vertical dynamic simulation model of the railway vehicle with inerter suspension components is firstly established by using Matlab/Simulink. Then by applying the pulse and random track irregularities excitation to the proposed model, this paper studies effects of the inerter on vehicle vertical vibration through selecting inerter coefficient within a range. Under the condition of random excitation, effects of inerter coefficient on the vertical stability index of carbody are analyzed with the change of vertical stiffness and secondary suspension damping. The analysis results show that the vertical vibration of carbody can be reduced obviously when the inerter coefficient is selected within a certain range.

Key words: passive suspension; inerter; vibration reduction; railway vehicle