DOI: 10.3901/JME.2019.04.102

气动激励下车体与悬吊设备耦合振动行为研究*

汪群生¹ 曾京¹ 魏来¹ 董浩² 郑彪¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;

2. 成都大学机械工程学院 成都 610106)

摘要: 基于 Simiu 风谱的功率谱密度函数, 建立自相关模型(AR 模型), 模拟随高速列车移动的点的随机脉动风速时程, 分析得到随机风作用在高速列车车体上的气动激励。建立考虑车体弹性振动和多个车下悬吊设备的刚柔耦合动力学模型, 分析不同环境风速下气动激励对车体和悬吊设备振动行为的影响。研究表明, 气动激励对车体和悬吊设备的横向和垂向振动特性明显, 随着风速的增大, 车体和设备振动加剧, 但是对于车体横向振动来说, 车辆运行速度低于 150 km/h, 各风速下的差异不明显; 合理选取车下悬吊系统的悬挂参数可以有效地降低车体和设备的振动, 当环境平均风速 5 m/s 时, 车体横向采用 8 Hz 的悬挂频率比 1 Hz 的降低约 26.5% 的振动; 考虑气动激励的车下悬吊系统振动行为研究可以更加真实地反映车体和悬吊设备的耦合振动关系, 为设计更优异性能的车下悬吊系统提供参考价值。

关键词: 气动激励; 弹性车体; 车下悬吊设备; 参数匹配; 车体减振

中图分类号: U271

Study on Vibration Behavior of Carbody and Suspended Equipment with Aerodynamic Loads

WANG Qunsheng¹ ZENG Jing¹ WEI Lai¹ DONG Hao² ZHENG Biao¹

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2. Department of Mechanical Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106)

Abstract: Based on the power spectral density function of Simiu wind, the autocorrelation model was established to calculate a fluctuating wins of a moving point shifting with high-speed trains, thus getting the random aerodynamic loads on high-speed carbody. Considering the carbody flexible vibration and multiple underframe suspended equipment, a rigid-flexible coupling vehicle system dynamics model was built to analysis the influence of aerodynamic loads on vibration behavior of carbody and suspended equipment under different wind speed. The results show that the effect of aerodynamic loads on carbody and suspended equipment vibration is significant. With the increase of vehicle running speed, the vibration of carbody and suspended equipment is intensified. However, carbody lateral vibration is not obvious when the running speed is less than 150 km/h. Reasonable underframe suspended parameters can effectively reduce the vibration of carbody and the equipment. When the wind speed is 5 m/s, the lateral vibration of carbody with 8 Hz suspended frequency is 26.5% lower than that with 1 Hz. The study considering the effect of aerodynamic loads can more realistically reflect the vibration behavior of the carbody and the equipment, which can provide reference value for carbody underframe suspended system with better performance.

Key words: aerodynamic loads; flexible carbody; suspended equipment; parameter matching; carbody vibration reduction

0 前言

高速列车将牵引变压器、牵引变流器和换气装置等附属设备悬挂安装在车体下部的设备舱, 形成了有别于普通车辆的车下悬吊系统, 其诞生的主要

原因是高速列车轻量化的设计准则和动力分散式的牵引方式^[1-4]。车下悬吊系统的存在一般不会对车辆运行安全性产生影响, 但是合理的悬吊匹配参数可以有效降低车体的振动, 从而提高旅客的乘坐舒适性, 这也成为国内外学者的重点研究方向之一^[5-10]。

吴会超等^[5]为了考虑高速动车组车体的弹性振动, 将其等效成等截面的欧拉伯努利梁, 建立了车体与设备的垂向耦合振动模型, 比较分析了弹性和刚性悬挂的差异, 并从参数匹配的角度阐明了合理

* 国家自然科学基金(U1334206, 51205325)、“十三五”国家科技支撑计划(2015BAG12B01-03)和国家重点研发计划(2016YFB1200501)资助项目。20180314 收到初稿, 20181209 收到修改稿

选取悬吊参数对抑制车体弹性振动的优势。罗光兵等^[6]利用有限元 ANSYS 和多体动力学软件 SIMPACK 建立了三维刚柔耦合动力学模型, 仿真结果表明设备采用弹性悬吊可以有效降低车体的弹性振动, 尤其是对振动能量贡献最大的一阶垂向弯曲振动, 并且合理的悬吊参数选取是很有必要的, 此外, 通过与滚动振动动力学试验台的试验结果进行对比, 验证了模型的正确性。石怀龙等^[7-9]为了研究车体与车下设备的耦合振动关系, 在建立刚柔耦合动力学模型时将车下悬吊设备考虑成动力吸振器, 分析了不同悬挂参数下车体振动和平稳性指标的变化规律, 并与台架试验的结果进行比较, 验证了模型的准确性, 并建议将大质量的设备安装在车体中部, 设备悬挂频率接近车体的垂弯模态频率, 可获取良好的车体减振效果。宫岛等^[10]从模态参数匹配的角度, 分析了车下悬吊设备悬吊方式对车体整备模态参数的影响, 提出了车下设备隔振橡胶件参数的设计方法, 并研究了整备状态下车体与车下设备悬挂模态参数之间的匹配关系。

以上研究成果主要是将车下悬吊设备考虑成动力吸振器, 从悬挂参数匹配的角度研究了车下悬吊设备对车体减振效果的影响, 合理的悬挂参数可以有效降低车体的弹性振动, 但是也会加剧悬吊设备本身的振动。虽然车下悬吊设备在一定范围内的振动加剧不会影响旅客舒适度, 但是例如牵引变压器、牵引变流器等电气设备还需要为列车的运行提供牵引力等功能, 设备振动的加剧会影响车辆的正常运行, 因此, 关于悬吊设备的振动研究需要得到更多的关注。

车辆系统动力学性能受到运行环境的影响显著, 主要包括有气动激励、轨道不平顺和线路环境(包括桥梁、隧道等), 对于高速动车组车辆来说, 运行速度越高, 气动激励的影响越大。国内外的研究人员主要关注点在于气动激励下列车的运行安全性^[11-15], 计算分析的风速一般大于 7 级风速(即风速达到 13.9~17.2 m/s), 京沪高铁运营中也规定了, 当环境风速超过 7 级时, 列车需要降速运行乃至停车, 一般认为高速列车可以安全行驶通过 7 级以下风速。虽然 7 级以下风速不会对车辆运行安全性带来明显的影响, 但是仍然会恶化旅客乘坐舒适度, 加剧车体和车下悬吊设备的振动, 甚至会出现车下悬吊元件的疲劳断裂等故障。因此, 很有必要对气动激励下车体与悬挂设备的耦合振动进行深入的研究和分析, 而国内外鲜有相关的公开研究成果。

鉴于此, 本文基于国内某型高速动车组的刚柔

耦合动力学模型, 考虑车辆典型运行环境下的气动激励, 分析了车体与车下悬吊设备的耦合振动行为, 为研究车体减振与车下悬吊系统提供一定的参考。

1 气动激励计算分析

为了研究高速列车在不同风速下的安全性能, 通常采用 CFD 的数值方法计算得到各风速下的气动阻力参数, 结合多体系统动力学软件进行脱轨系数、轮重减载率等安全性系数分析, 得到列车在风载下的运行安全域, 但是, 该方法不适用于低速风下的车辆振动行为研究。

国内外针对随机风功率谱密度的表达方式进行了大量研究, 基于不同的实测数据, 提出了不同形式的风谱, 其中以 Davenport 谱、Simiu 谱和 Von Karman 谱的应用居多。美国学者 SIMIU^[16]在 1974 年提出的随高度变化的水平随机风谱, 由于其更接近实测风谱, 被越来越多的人采用, 本文主要根据该风谱, 计算得到所需的气动激励, 其功率谱密度可以表示为

$$S(z, n) = \frac{4fu_*^2}{n(1+f^2)^{4/3}} \quad (1)$$

式中, $f = \frac{zn}{U(z)}$, 称为莫宁坐标; n 是频率; z 是风速测量点离地面的高度; $U(z)$ 是平均风速; u_* 是空气流通摩擦速度。

从风谱的功率谱密度函数得到风速信号的方法是计算得到自相关模型(即 AR 模型), 其可以有效地模拟具有时间相关性、空间相关性的节点脉动风速时程^[17-19]。根据 Wiener-Khinchine 定理, 功率谱和自相关函数是傅里叶变换对, 对功率谱密度函数求反傅里叶变化, 可以得到自相关序列; 再利用 Levinson 递归算法求解 Yule-Walker 方程, 进一步可以求出 AR 模型的参数。

以五阶 AR 模型为例, 其随机风速时域信号可表示为

$$v_w(n) = -\sum_{i=1}^5 a_i v_w(n-i) + u(n) \quad (2)$$

式中, $u(n)$ 是一个方差为 σ^2 的白噪音序列, AR 模型的 Yule-Walker 方程是

$$\begin{pmatrix} R_x(0) & R_x(1) & R_x(2) & \cdots & R_x(5) \\ R_x(1) & R_x(0) & R_x(1) & \cdots & R_x(4) \\ R_x(2) & R_x(1) & R_x(0) & \cdots & R_x(3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_x(5) & R_x(4) & R_x(3) & \cdots & R_x(0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma^2 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, $R_x(i)$ 是 $v(n)$ 的自相关函数。在这里, 取 $z=5$ m, $U(z)=10$ m/s, $u_*=1$ m/s, 可以得到随机风速的时间历程, 如图 1 所示。

图 1 随机风速时间历程(平均风速 10m/s)

如图 2 所示, 列车运行速度 v_0 , 从左到右运行, 环境风速 $v_w(t)$ 由下往上, 与列车运行方向的夹角为 α , 称为风向角, $v(t)$ 是列车运行速度与环境风速的合成风速, 与列车运行方向夹角是 $\beta(t)$ 。根据三者之间的几何关系可得

$$v(t) = \sqrt{v_0^2 + v_w(t)^2 - 2v_0 \cdot v_w(t) \cdot \cos \alpha} \quad (4)$$

$$\beta(t) = \arctan \left(\frac{v_w(t) \sin \alpha}{v_0 - v_w(t) \cos \alpha} \right) \quad (5)$$

作用在列车上的气动激励可以描述为 3 个方向的力(阻力 F_x 、侧力 F_y 、升力 F_z)和 3 个方向的力矩(倾覆力矩 M_x 、点头力矩 M_y 和摇头力矩 M_z)。根据准静态理论, 气动激励可以描述为

$$\begin{cases} F(t) = \frac{1}{2} \rho A c_{F_i}(\beta) v(t) \\ M(t) = \frac{1}{2} \rho A h c_{M_i}(\beta) v(t) \end{cases} \quad i = x, y, z \quad (6)$$

式中, ρ 是空气密度; A 是投影面积; h 是轨面到气动载荷作用中心的高度; c_F 和 c_M 分别是气动力和气动力矩系数^[20]。根据图 2 中风速的时域信号, 代入式(6), 可以计算得到各方向上气动激励的时间历程, 如图 3 所示是车辆运行 200 km/h 下侧力的时域信号。

图 2 速度矢量合成图(平均风速 10 m/s)

2 刚柔耦合动力学模型

理论上研究车体与车下悬吊设备的耦合振动特

图 3 车辆运行速度 200 km/h 下的气动激励-侧力 F_y

性, 一般将车体考虑成均质的欧拉梁, 建立垂向的振动模型, 但是该简化模型仅能为车体振动研究提供一定的理论依据, 不能真实反应出车体的实际振动情况。为此, 本文基于国内某高速动车组, 根据车下悬吊设备的实际悬吊参数, 建立了考虑车体弹性的三维刚柔耦合车辆动力学模型。该模型由 1 个弹性车体、2 个拖车转向架和 6 个主要车下悬吊设备组成, 车下设备包括有变压器、变流器、污物箱等, 这些设备弹性地悬挂在车体底架上。此外, 在动力学建模过程中考虑了非线性的轮轨接触几何关系和车辆悬挂系统(如抗蛇行减振器刚度和阻尼特性等)。

在刚柔耦合动力学模型建立过程中, 弹性车体的获取是最重要的一部分。由于有限元中大量的自由度会导致动力学求解时间的严重损耗, 为避免该问题的出现, 在有限元软件中采用矩阵缩减方法(即 Guyan 法)对车体模型进行处理, 获得子结构模型。子结构模型中包括有动力学计算所需的质量矩阵、刚度矩阵和几何文件信息, 将子结构模型计算得到的车体前几阶主要弹性振动模态与整车的结果进行比较, 如表 1 所示, 二者之间的差异较小, 可以满足动力学的计算需求。然后通过与动力学软件的接口程序生成弹性车体, 三维刚柔耦合车辆系统动力学模型如图 4 所示。

表 1 完整模型与子结构模型模态对比分析

模态类型	完整模型/Hz	子结构模型/Hz	差异(%)
菱形变形	10.249	10.376	1.224
一阶垂弯	11.067	11.255	1.670
呼吸模态	13.819	13.961	1.018
一阶扭转	15.679	15.813	0.847

根据第 1 节中介绍的气动激励的计算方法, 得到车辆在不同运行速度和不同环境风速下的气动激励, 施加到动力学模型中, 计算分析高速列车车下悬吊系统在气动激励下的振动行为, 在计算过程中忽略了阻力 F_x 对车辆的作用。

图4 刚柔耦合车辆系统动力学模型

3 悬吊系统振动行为分析

本节主要分析了高速列车的车下悬吊系统在气动激励下的振动行为,通过车体和车下悬吊设备的振动加速度方均根值来描述随机振动行为,此外,在仿真分析过程中,采用实测的武广高铁线路不平顺作为轮轨输入。由于车下悬吊设备的种类很多,由于篇幅的限制,本文主要选取常见的电气元件—变压器为研究对象。

3.1 弹性车体振动行为分析

如图5所示是五种环境风速下高速动车组车体横向和垂向的振动加速度方均根值与运行速度的关系,振动选取的位置是变压器上方车体地板面。从图中可以看出,气动激励对车体的振动影响显著,随着环境风速的增大,车体的横向和垂向振动明显恶化了。

如图5a所示,随着车辆运行速度的增加,风速对车体横向振动越来越明显,当车辆速度是50 km/h时,车体在风速0 m/s和10 m/s下的振动RMS值差值是 0.046 m/s^2 ,当速度增加到400 km/h时,该差值达到了 0.221 m/s^2 ,远大于车体在无风状态下的振动。此外,从图中可以看出,车辆运行速度在150 km/h以下,环境风速对车体的横向振动影响较小,当速度大于150 km/h后,风速对车体横向振动的影响逐渐增大,并在400 km/h下达到了最大。

如图5b所示,环境风速对车体垂向振动的影响规律与横向的类似,随着车辆运行速度增大,风速的影响逐渐明显。对比风速0 m/s和10 m/s下车体的垂向振动,在50 km/h下二者的差值是 0.101 m/s^2 ,当速度为400 km/h,该差值增加到 0.283 m/s^2 。随着速度增大,轨道激励引起车体垂向振动增加了 0.145 m/s^2 ,该值小于气动激励引起的振动,仅为400 km/h下环境风速0 m/s与10 m/s差值的一半。

3.2 车下悬吊设备振动行为分析

如图6所示是车下悬吊设备在气动激励下振动加速度方均根值的变化规律,随着环境风速的增大,气动激励加剧了悬吊设备的横向和垂向振动。

图5 变压器上方车体的振动加速度方均根值

图6 车下悬吊设备振动加速度方均根值(变压器)

图 6a 表示气动激励对设备横向的振动规律, 车辆运行 100 km/h 速度级下, 设备振动 RMS 值在环境风速 0 m/s 与 10 m/s 下的差值是 0.060 m/s^2 , 当速度达到 300 km/h 时, 二者的差值达到了 0.226 m/s^2 , 大于无风下车辆在 400 km/h 下的振动量级。对于设备垂向振动来说, 可以从图 6b 中得到与横向振动类似的结论, 在此不再赘述。

4 悬吊参数优化匹配

从第 3 节的分析中可以看出, 气动激励对车下悬吊系统的横向和垂向振动均有明显的影响, 并且随着环境风速的增大而逐渐增大。为此, 本文以车下悬吊系统的横向振动为例, 分析了合理的车下匹配参数对降低车体和设备振动的影响。

如图 7 所示是车辆运行速度 300 km/h 下, 车体和设备横向振动与悬挂频率的变化关系。从图 7a 中可以看出, 随着横向悬挂频率的增大, 车体横向振动变化规律呈现为开口向上的抛物线形式, 车体振动在三种不同气动激励下均存在最小值, 该最优

图 7 悬挂频率对车下悬吊系统振动的影响

悬挂频率的范围大致是 6~10 Hz, 随着环境风速的增大, 该最优频率存在一定的变化。对比分析悬挂频率 1 Hz 和 8 Hz 下的车体振动, 随着风速的增大, 车体横向振动分别减小了 42.7%、26.5%和 27.7%, 效果显著。

如图 7b 所示, 随着悬挂频率的增大, 设备横向振动先减小后增大再减小至平稳状态, 设备振动存在横向最大值, 频率范围大致是 5~8 Hz。出现该现象的主要原因是在车下悬吊系统中, 车下悬吊设备的作用类似于动力减振系统中的吸振器, 通过增加悬吊设备的振动来降低车体的振动, 在该频率范围内车体的振动存在最优值, 那么设备的振动将会加剧。

5 结论

(1) 本文基于 Simiu 风谱获取了低风速下的随机气动激励, 分析了气动激励下车下悬吊系统的振动行为。结果表明, 随着环境风速和车辆运行速度的提高, 气动激励对车体和悬吊设备横向和垂向的振动影响逐渐增大; 对于车体的横向振动来说, 车辆运行速度低于 150 km/h 时, 气动激励的影响较小, 车体横向振动增加缓慢, 当速度大于 150 km/h 后, 车体横向振动增加明显。

(2) 通过合理选取悬挂匹配参数可以有效降低车体振动。随着横向悬挂频率的增大, 车体横向振动先减小后增大, 存在最小值, 而设备振动先较小后增大最后平稳变化, 存在最大值。在悬挂频率 1 Hz 和 8 Hz 下, 随着风速的增大, 车体横向振动分别减小了 42.7%、26.5%和 27.7%。

(3) 常规的动力学计算一般仅考虑轨道激励对车辆振动行为的影响, 但是本文研究中发现, 气动激励对车下悬吊系统耦合振动影响明显, 并且高速列车在运营中受到的气动激励是变化的, 增加考虑气动激励的影响因素, 可以为设计更优异性能的车下悬吊系统提供参考价值。

参 考 文 献

- [1] TOMIOKA K, TAKIGAMI T. Reduction of bending vibration in railway carbody using carbody-bogie dynamic interaction[J]. Vehicle System Dynamic, 2010, 48(Suppl.1): 467-486
- [2] ZHOU J, GOODALL R, et al. Influence of carbody vertical flexibility on ride quality of passenger railway vehicles[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(5): 461-471.

- [3] 郝建华, 曾京, 郭平波. 铁路车辆垂向减振与悬挂系统参数优化[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(4): 10-14.
HAO Jianhua, ZENG Jing, WU Pingbo. Vertical vibration isolation and suspension parameter optimization of railway vehicle[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(4): 10-14.
- [4] 汪群生, 曾京, 罗光兵等. 车轮磨耗下车下悬吊系统振动特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(10): 113-118.
WANG Qunsheng, ZENG Jing, LUO Guangbing, et al. Study on vibration behavior of carbody underneath suspended systems under wheel profile wear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(10): 113-118.
- [5] 吴会超, 郭平波, 曾京, 等. 车下设备对车体振动的影响[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(5): 50-56.
WU Huichao, WU Pingbo, ZENG Jing, et al. Influence of equipment under car on carbody vibration[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(5): 50-56.
- [6] 罗光兵, 曾京, 罗仁. 车下设备悬吊方式对车体振动的影响[J]. 铁道学报, 2015, 37(5): 9-14.
LUO Guangbing, ZENG Jing, LUO Ren. The influence of underframe equipment suspended types on carbody vibrations[J]. Journal of China Railway Society, 2015, 37(5): 9-14.
- [7] 石怀龙, 郭平波, 罗仁. 高速动车组弹性车体和设备耦合振动特性[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 693-699.
SHI Huailong, WU Pingbo, LUO Ren. Coupled vibration characteristics of flexible car body and equipment of EMU[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 693-699.
- [8] SHI Huailong, LUO Ren, WU Pingbo, et al. Application of DVA theory in vibration reduction of carbody with suspended equipment for high speed EMU[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(7): 1425-1438.
- [9] 石怀龙, 罗仁, 郭平波, 等. 基于动力吸振原理的动车组车下设备悬挂参数设计[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 155-161.
SHI Huailong, LUO Ren, WU Pingbo, et al. Suspension parameters designing of equipment for electric multiple units based on dynamic vibration absorber theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 155-161.
- [10] 宫岛, 周劲松, 孙文静, 等. 高速列车车下设备模态匹配研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(8): 180-185.
GONG Dao, ZHAO Jingsong, SUN Wenjing, et al. Modes matching between suspended devices and car body for a high-speed railway vehicle[J]. Journal of Shock and Vibration, 2014, 33(8): 180-185.
- [11] 于梦阁, 张继业, 张卫华. 桥梁上高速列车的强横风运行安全性[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 104-111.
YU Mengge, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Running safety of high-speed trains on bridges under strong crosswinds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 104-111.
- [12] BAKER C J. The simulation of unsteady aerodynamic cross wind forces on trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98: 88-99.
- [13] 崔涛, 张卫华. 高速列车侧风安全域计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(5): 42-48.
CUI Tao, ZHANG Weihua. Calculation method of cross wind security domain for high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5): 42-48.
- [14] 高广军, 苗秀娟. 强横风下青藏线客车在不同高度桥梁上的气动性能分析[J]. 中南大学学报, 2010, 41(2): 376-380.
GAO Guangjun, MIAO Xiujuan. Aerodynamic performance of passenger train on different height of bridge of Qinghai-Tibet railway line under strong cross wind[J]. Journal of Central South University, 2010, 41(2): 376-380.
- [15] 于梦阁, 张继业, 张卫华. 随机风速下高速列车的运行安全可靠[J]. 力学学报, 2013, 45(4): 483-492.
YU Mengge, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Operational safety reliability of high-speed trains under stochastic winds[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(4): 483-492.
- [16] SIMIU E. Wind spectra and dynamic along wind response[J]. Journal of the Structure Division, 1974, 100(9): 1897-1910.
- [17] 钟春. 阵风风谱的风洞模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
ZHONG Chun. Studies on simulation of gust spectrum in the wind tunnel[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004.
- [18] ZHANG Zihua, LI Junhua and PING Zhuge. Failure analysis of large-scale wind power structure under simulated typhoon[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(1): 1-10.
- [19] 舒新玲, 周岱. 风速时程 AR 模型及其快速实现[J]. 空间结构, 2003, 9(4): 27-32.
SHU Xinling, ZHOU Dai. AR model of wind speed time series and its rapid implementation[J]. Spatial Structures, 2003, 9(4): 27-32.
- [20] CEN (European Committee for Standardization), EN 14067-6:2010. Railway applications aerodynamics-part 6:

Requirements and test procedures for cross wind assessment [S]. Brussels: CEN-CENELEC Management Centre, 2010.

作者简介: 汪群生, 男, 1990 年出生, 博士。主要研究方向为车辆系统动力学。

E-mail: wangqunsheng@126.com

曾京(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主

要研究方向为车辆系统动力学。

E-mail: zeng@swjtu.edu.cn

魏来, 男, 1989 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为车辆系统动力学。

E-mail: 707101305@qq.com

董浩, 男, 1985 年出生, 博士, 硕士研究生导师。主要研究方向为车辆系统稳定性。

E-mail: fusiji@my.swjtu.edu.cn

郑彪, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆系统动力学。

E-mail: 4049145@qq.com

第 8 届上银优秀机械博士论文奖——铜奖

聚合物微结构成形的介观尺度效应及其本构建模

作 者: 邓宇君

毕业学校: 上海交通大学

指导教师: 林忠钦 傅铭旺

具有表面微细功能结构的聚合物薄膜在微光学器件、微生物化学反应系统、微机电系统等领域的应用与日俱增。这一类聚合物薄膜产品的表面微细功能特征尺寸多在 $10\sim 500\ \mu\text{m}$, 其成形加工属于典型介观尺度制造范畴。随着成形特征尺寸降低至介观尺度, 聚合物材料力学性能呈现出强化行为。传统的聚合物材料本构模型, 无法准确预测聚合物材料介观尺度变形行为, 难以指导聚合物表面微细功能结构加工的工艺设计和优化。

围绕聚合物介观尺度效应问题, 本文开展了不同厚度的聚合物薄膜微弯曲实验, 研究了介观尺度下聚合物材料的尺度效应规律, 并为了描述介观尺度下聚合物的变形行为建立了应变梯度弹粘塑性本构模型; 建立考虑考虑尺度效应的聚合物变形仿真分析的有限元模型; 实验分析了聚合物表面微细压印成形中的尺度效应现象, 探索了聚合物表面复杂结构大面积微细辊压成形的可行性。本文的研究成果主要集中在以下几个方面。

(1) 介观尺度下聚合物材料尺度效应研究及本构建模: 通过四点微弯曲实验平台, 研究了不同膜厚条件下聚合物材料的弯曲性能, 结果表明随着膜厚的减薄, 弹性弯曲刚度和无量纲弯曲弯矩都表现出强化行为。为了精确预测介观尺度下聚合物材料的变形行为, 将偶应力和旋转梯度这对功共轭变量引入弹粘塑性本构模型中, 建立了考虑介观尺度效应的应变梯度弹粘塑性本构模型。通过实验和理论值得对比分析, 验证了应变梯度弹粘塑性本构模型预测聚合物介观尺度效应的可行性和精确性。

(2) 基于应变梯度弹粘塑性模型的聚合物成形仿真建模: 研究了应变梯度弹粘塑性本构模型的增量数值化方法, 结合自定义单元, 形成了考虑聚合物尺度效应的仿真建模方法。并建立了考虑尺度效应的聚合物四点微弯曲仿真分析模型, 验证了自定义有限单元预测微弯曲中聚合物介观尺度效应的准确性, 揭示了介观尺度下聚合物材料力学性能的强化机理。

(3) 聚合物表面微细压印成形工艺研究: 通过仿真分析方法, 研究了旋转梯度的引入对聚合物微细压印成形仿真分析精度的影响。本文基于微细辊压成形系统, 实验研究了辊压工艺参数对聚合物表面复杂结构成形质量的影响规律, 仿真分析了微细辊压成形中聚合物材料流动特点, 为聚合物复杂结构微细辊压工艺尺度效应研究奠定了基础。