

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.05.009

弹性车轮动刚度与随机振动疲劳仿真分析

王俊杰, 邱显焱

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 在城市轨道交通中, 弹性车轮作为列车的主要承载部件, 在减振降噪方面发挥着极大的作用。为了进一步探究某型弹性车轮相对于刚性车轮在减振降噪方面的优势, 在弹性车轮建模方法和对弹性车轮中橡胶材料本构模型研究的基础上, 利用 Hypermesh 软件建立了弹性车轮和刚性车轮的有限元模型, 基于 Optistruct 模块对弹性车轮和刚性车轮的动刚度进行仿真分析, 得出了两者在相同测试点的速度、加速度频率响应曲线, 结果表明弹性车轮在高频率区间内具有显著的减振效果。另外在 Ansys 软件中对该型弹性车轮在随机振动条件下的疲劳寿命进行了预测, 通过分析车轮的等效应力分布云图和疲劳寿命分布云图, 对弹性车轮应力集中部位进行尺寸改进, 结果表明改进后弹性车轮的疲劳寿命显著提高。

关键词: 弹性车轮; 动刚度; 有限元分析; 随机振动; 疲劳寿命分析

中图分类号: U270

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)05-0062-08

引文格式: 王俊杰, 邱显焱. 弹性车轮动刚度与随机振动疲劳仿真分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(5): 62-69.

A Fatigue Simulation Analysis of Dynamic Stiffness and Random Vibration of Resilient Wheels

WANG Junjie, QIU Xianyan

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Due to the fact that in urban rail transit, elastic wheels, as the main load-bearing components of trains, play a great role in vibration reduction and noise reduction; in view of a further inquiry into the advantages of a certain type of elastic wheel in vibration reduction and noise reduction compared to rigid wheels, and on the basis of the elastic wheel modelling method and the study of the ontological model of rubber materials in the elastic wheels, a finite element model of elastic wheels and rigid wheels has thus been established by using Hypermesh software. Based on the Optistruct module, a simulation analysis has been made of the dynamic stiffness of elastic and rigid wheels, thus obtaining the speed and acceleration frequency response curves of both at the same test point. The results show that elastic wheels have significant vibration reduction effects in the high-frequency range. In addition, a prediction has been made of the fatigue life of this type of elastic wheel under random vibration conditions by using Ansys software. After an analysis of the equivalent stress distribution cloud map and fatigue life distribution cloud map of the wheel, dimensional improvements are made to the stress concentration areas of the elastic wheel, with the results showing that

收稿日期: 2023-05-30

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2021JJ50045)

作者简介: 王俊杰, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为城轨压剪复合弹性车轮的动态特性分析及减振降噪,

E-mail: 2315928325@qq.com

通信作者: 邱显焱, 男, 湖南工业大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为复杂机械系统振动机理及控制研究,

E-mail: qiuxianyan@hut.edu.cn

the fatigue life of the improved elastic wheel is characterized with a significant improvement.

Keywords: elastic wheels; dynamic stiffness; finite element analysis; random vibration; fatigue life analysis

1 研究背景

目前国内外城市轨道交通车辆所采用的主要形式有地铁、智轨、轻轨、有轨电车等。随着城市中大量高架桥、隧道、城市地面线路的出现,城市中噪声问题日益严重。如何解决城市轨道交通中的噪声问题,以及对减振降噪机理的研究,显得尤为重要^[1]。其中产生轮轨冲击噪声的来源,如轮轨表面的不平整、车轮的擦伤、钢轨的波磨、焊接接头等,还有轨道和车辆零部件带来的疲劳强度问题,如扣件断裂、钢弹簧断裂等^[2],都是影响车辆正常运行的因素。弹性车轮作为在城市轨道交通中主要的承载部件,在解决城市轨道交通噪声问题上发挥着重要的作用。为保证城市轨道交通车辆的正常运行,满足其安全服役要求,需要对弹性车轮刚度和模态进行分析,并对其中弹性车轮的结构进行优化。

近年来,国内外学者在弹性车轮减振特性上作了大量的研究工作,杨阳^[3]建立了压剪复合型弹性车轮有限元模型,分析了弹性车轮的刚度和应力水平。唐昭等^[4]通过有限元方法,利用超塑性合金结构的阻尼效应,探究了复式降噪块装置对某S型辐板地铁车轮的减振降噪效果。侯传伦^[5]、张乐^[6]等分别针对自主设计的不同形式的弹性车轮,建立了相应的有限元模型,参照UIC-510-5标准进行了静强度和疲劳强度校核。Ren Z. S.^[7]在车辆/轨道耦合动力学模型基础上,研究了三维扁疤轮轨冲击特征。吕元颖等^[8]对有轨电车弹性车轮进行了模态分析,结果表明弹性车轮的模态相对于刚性车轮有明显的降低。以上研究结果表明,弹性车轮在城市轨道交通中得到了广泛的应用,相比于刚性车轮有着显著的优势,但对压剪复合型弹性车轮动刚度特性以及在随机振动条件下的疲劳寿命的相关研究相对较少。

基于以上研究,本文在已有压剪复合型弹性车轮结构的基础上进行了改进,自主设计了一款新的压剪复合型弹性车轮,主要区别是新设计的弹性车轮中的V型橡胶块和弹性车轮金属之间的接触面积更大,橡胶块的受力更为均匀。为探究新设计弹性车轮的结构特性和减振性能,利用仿真软件对其进行了模态分析和动刚度分析。最后,利用该弹性车轮在随机振动下的疲劳寿命进行分析,对其结构进行了进一步改进。

2 弹性车轮有限元模型

2.1 弹性车轮设计概述

弹性车轮的主要结构为在轮辋和轮芯之间加入橡胶块或者橡胶圈以达到减振目的,根据橡胶元件的受力情况又分为压缩型、剪切型和压剪复合型弹性车轮,如图1所示^[9]。列车在实际的行驶过程中,在不同的工况条件下,如直线工况和弯道工况,车轮会受到不同方向作用力的影响,所以压剪复合型弹性车轮相较于其他两种弹性车轮有更多的优势。本文根据弹性车轮在各种应用环境和减振降噪的要求,新设计了一款压剪复合型弹性车轮,该弹性车轮的主要部件包括轮辋、轮芯、橡胶层和安装环。其是基于图1c所示的某型压剪复合型弹性车轮的结构进行设计的。相比于传统压剪复合型弹性车轮,改进后的橡胶块与轮辋和轮芯的接触面积更大,在保证橡胶性能相同的情况下,获得更大的径向刚度,能承受更大的径向载荷。

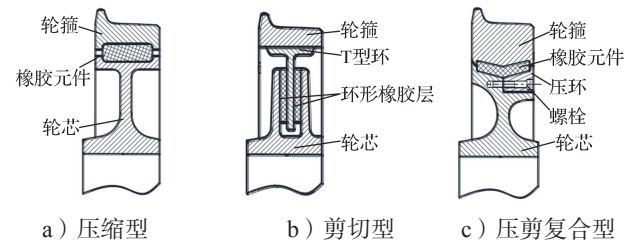


图1 弹性车轮的三种形式

Fig. 1 Three forms of resilient wheels

2.2 橡胶材料本构模型

在弹性车轮的有限元分析中,在不失精度的前提下可对有限元模型进行简化。橡胶材料由随机取向的长分子链组成,称为点的连接处交联。橡胶为各向同性材料,在静态变形的情况下,橡胶表现出超弹性行为。因此,可以采用应变能量密度函数 W 来描述各向同性超弹性材料的力学性能。对于各项同性材料,应变能量密度函数 W 可以用应变不变量 I 的多项式表示,如式(1)所示。

$$W = W(I_1, I_2, I_3). \quad (1)$$

如果采用主伸张率 λ 表示,可以表示为

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3). \quad (2)$$

式(1)~(2)中: I_1 、 I_2 、 I_3 也称Green应变不变量,其中,

$$I_1(C) = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = C_1 + C_2 + C_3, \quad (3)$$

$$I_2(C) = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 = C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_3 C_1, \quad (4)$$

$$I_3(C) = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = C_1 C_2 C_3. \quad (5)$$

式(3)~(5)中: C 为格林变形张量, 自然状态下 $C=I$ 。

对于体积不可压缩材料, $I_3=1$ 。在自然状态下, $I_1=I_2=3$ 。因此通常把 $\sum$ 看成 I_1-3 和 I_2-3 的函数, 并假设在自然状态 $\sum$ 为 0。 $\sum$ 多项式可取为

$$\sum = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} c_{mn} (I_1-3)^m (I_2-3)^n c_{\infty} = 0. \quad (6)$$

式中: c_{mn} 为常数项系数; c_{∞} 为修正系数。

通常用的是式(6)的特殊情况。若取式(6)的前两项, 即 m, n 分别取 0 和 1 的情况, 得到如下 Mooney-Rivlin 模型

$$\sum = c_1 (I_1-3) + c_2 (I_2-3). \quad (7)$$

式中 c_1, c_2 为材料常数。

其中, $c_1=c_{10}$ 和 $c_2=c_{01}$ 均为实验数据的回归系数, 无明确物理意义。式(7)给出的应力-应变关系如下:

对于单轴拉伸和压缩, 有

$$\frac{\sigma}{\lambda - \lambda^{-2}} = 2c_{10} + \frac{1}{\lambda} 2c_{01}. \quad (8)$$

对于简单剪切, 有

$$\tau/\gamma = 2c_{10} + 2c_{01}. \quad (9)$$

式中: τ 为剪应力; γ 为对应不变量 I_1 的剪应变, $\gamma^2=I_1-3$ 。

显然, 式(8)可表示一条斜率为 $2c_{01}$ 、截距为 $2c_{10}$ 的直线。拉伸实验数据通常与式(8)一致。简单剪切实验中 τ 与 γ 的比值呈非线性, 式(9)与此是相违背的。

在简单剪切中, 小应变的杨氏模量 E 和剪切模量 G 满足如下关系式:

$$E=6(c_{10}+c_{01}) \approx G. \quad (10)$$

在橡胶材料有限元分析模型中, 对橡胶块的分析工具采用 Mooney-Rivlin 模型来描述橡胶材料, 橡胶压缩量为 $1.2 \text{ mm}^{[10]}$, 通过有限元分析计算对比, 确定更接近天然橡胶和硫化橡胶材料的材料参数。根据 UIC 810-1、UIC 812-1 和 ISO 683-1 标准, 确定弹性车轮用钢的性能参数如表 1 所示。

表 1 有限元模型中材料参数设置

Table 1 Setting of material parameters in the finite element model

位置	材料	弹性模量 / MPa	泊松比	Mooney-Rivlin 参数 C_{10}	Mooney-Rivlin 参数 C_{01}
轮辋	B5	2.1×10^5	0.3	—	—
轮芯	C2	2.1×10^5	0.3	—	—
橡胶块	—	—	—	1.271	0.318

2.3 弹性车轮建模

用 SolidWorks 软件对弹性车轮进行三维建模, 如图 2 所示。

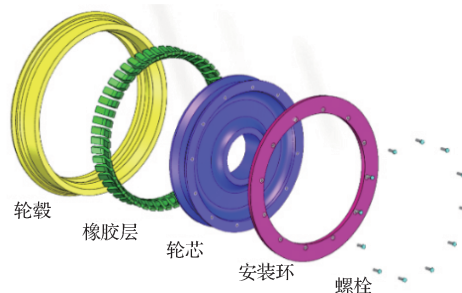


图 2 弹性车轮组成

Fig. 2 Resilient wheel composition

为后面有限元模型的建立做准备, 得到较高精度的计算结果, 在前处理软件 Hypermesh 中, 可先对车轮各个部件的网格进行单独划分。在网格划分时, 先对部件的截面进行网格的细化和尺寸大小的修改, 在截面生成平面二维网格, 通过零部件的形状定义网格生成路径, 最后沿着路径生成三维网格。这样可提高网格质量, 加快划分网格的速度。

通常对于线性有限元和边界元模型来说, 如果选取的单元是线性单元, 这个单元的长度 L 应满足:

$$L \leq \frac{c}{6f_{\max}}. \quad (11)$$

式中: c 为声音在某流体介质中的传播速度; $f_{\max}$ 为频率计算范围内的最大值。

考虑车轮的实际形状和尺寸要求, 将网格边长最大值设置为 6 mm 。

在 Hypermesh 软件中, 采用六面体单元 SOLID185 对弹性车轮模型的轮箍和轮芯进行网格划分, 用三维 20 节点实体单元 SOLID186 对模型的橡胶层进行网格划分, 一共将弹性车轮离散为 285 864 个网格、343 188 个节点, 如图 3 所示。

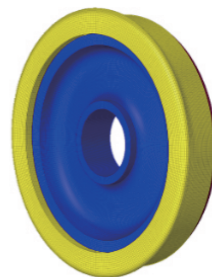


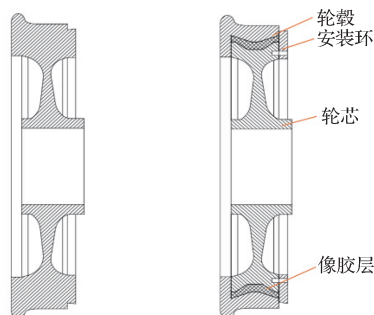
图 3 弹性车轮网格划分

Fig. 3 Resilient wheel meshing

2.4 刚性车轮建模

在刚性车轮的有限元模型建立过程中, 采用与弹性车轮相同的建模方法, 二者的主要区别在于刚性车

轮的轮箍和轮芯之间没有橡胶层, 如图4所示。刚性车轮的网格划分如图5所示。



a) 刚性车轮 b) 弹性车轮

图4 弹性车轮与刚性车轮结构

Fig. 4 Resilient and rigid wheel construction



图5 刚性车轮网格划分

Fig. 5 Rigid wheel meshing

3 弹性车轮模态分析

弹性车轮的数值模态分析可以描述为如下广义特征值问题:

$$(\mathbf{K} + \lambda_i \mathbf{M}) \mathbf{x}_i = 0. \quad (12)$$

$$\lambda_i = -\omega_i^2. \quad (13)$$

式(12)~(13)中: $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵, 且为对称矩阵; $\mathbf{M}$ 为质量矩阵, 且为对称矩阵; λ_i 为特征值; $\mathbf{x}_i$ 为特征向量; ω_i 为特征频率; i 为特征值个数。

虽然橡胶材料的杨氏模量和剪切模量与钢相比非常小, 但橡胶在支撑弹性车轮结构中起着重要作用。分别计算轮箍和轮芯的频率和振型, 并于整个车轮的模态进行对比, 如图6所示。

影响橡胶弹性车轮刚度特性的主要部件是轮箍和轮芯部分, 橡胶由于其本身较软只起到连接和支撑作用。因此, 分别计算轮箍和轮芯的模态频率和振型, 并与整个车轮的模态进行对比。在自由模态下, 车轮各部件的1~6阶频率基本为0。将有限元分析计算得到轮箍(R7~R14)、轮芯(C7~C13)和整轮(W7~W13)的振型和频率进行分组, 其对应的频率结果见表2, 与之对应的振型分组, 如图6a~l所示。

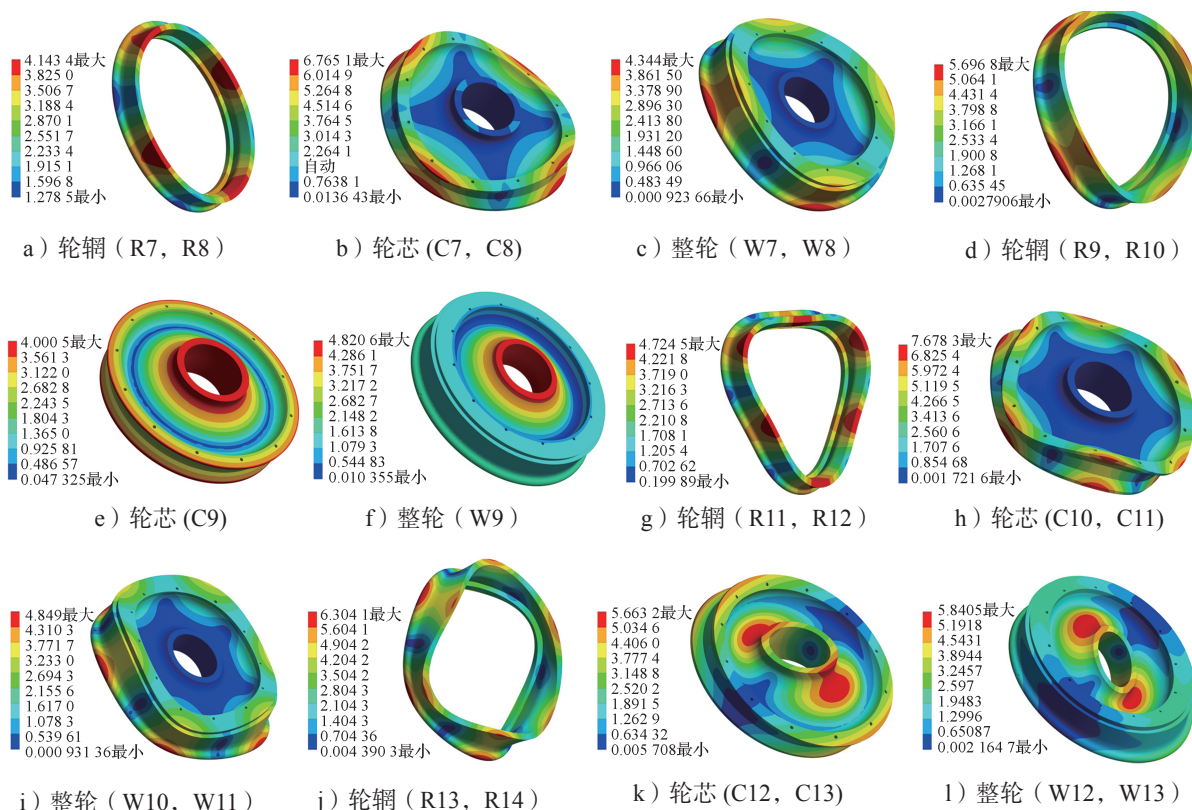


图6 轮箍、轮芯和车轮整体模态振型

Fig. 6 Core, rim and overall wheel modal vibration modes

表 2 轮辋 (R)、轮芯 (C) 和车轮整体 (W) 模态结果

Table 2 Modal results of the rim (R), core (C) and overall wheel (W)

各部分模态阶数	频率 /Hz	各部分模态阶数	频率 /Hz
R7, R8	253.5	R11, R12	698.8
C7, C8	543.4	C10, D11	1 336.7
W7, W8	607.8	W10, W11	1 536.4
R9, R10	357.1	R13, R14	1 060.4
C9	1 107.8	C12, C13	1 535.8
W9	1 029.8	W12, W13	1 539.1

图 6 和表 2 所示结果表明, 由于弹性车轮的结构是对称的, 3 个钢部件在相邻的特征频率处具有两种模态振型。由于轮芯部分刚度值最高, 因此在同一频率水平下, 轮芯与整个车轮具有相似的模态振型。由于轮芯部分刚度值最高, 因此在同一频率水平下, 轮芯与整个车轮具有相似的模态振型。轮芯在整个车轮结构中刚度最大, 所以轮芯的刚度对车轮整体的刚度影响最大, 轮芯的振型和固有频率与车轮整体的振型和固有频率相近, 但车轮其它部件与车轮整体的振型和固有频率还是有较大差异。虽然橡胶层在结构上连接了轮辋和轮芯部分, 对轮辋部分起到了支撑作用, 但对车轮整体的振型和固有频率影响很小。

4 动刚度仿真分析

利用 HyperMesh 软件中的 Optistruct 后处理模块完成单元类型设置、材料属性、边界条件施加、求解设置和最终计算, 如图 7 所示, 对弹性车轮的动刚度进行了仿真分析。在弹性车轮和刚性车轮结构截面的相同位置上选取 4 个测试点 A~D, 测试点位置如图 8 所示, 分别代表弹性车轮和刚性车轮的不同位置。模拟弹性车轮在直线工况下行驶时 4 个测试点频率响应情况, 在直线工况下车轮受到的径向载荷如式 (14) 所示:

$$F_z = 1.25Qg. \quad (14)$$

式中: F_z 为径向载荷; Q 为列车轮质量, 在此处 Q 取 7 t; g 为重力加速度。

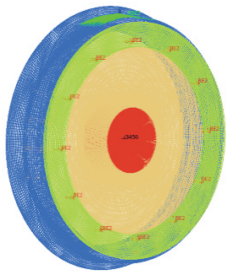


图 7 边界条件施加
Fig. 7 Imposed boundary conditions

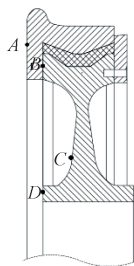
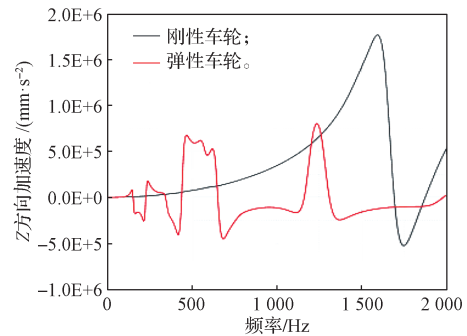
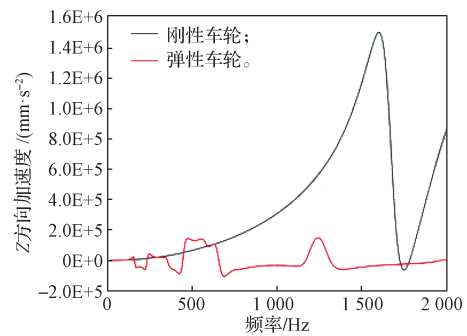


图 8 4 个测试点位置
Fig. 8 Four test point locations

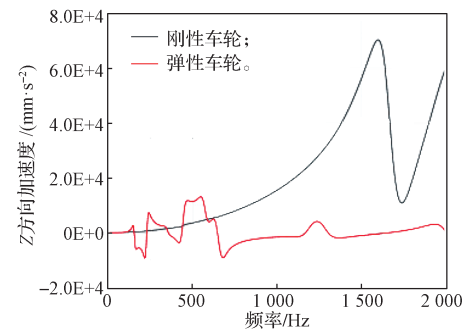
扫频范围为 0~2 000 Hz^[11], 用该软件分析了弹性车轮和刚性车轮 4 个不同位置测试点在垂直方向的加速度随频率的变化曲线, 如图 9 所示。



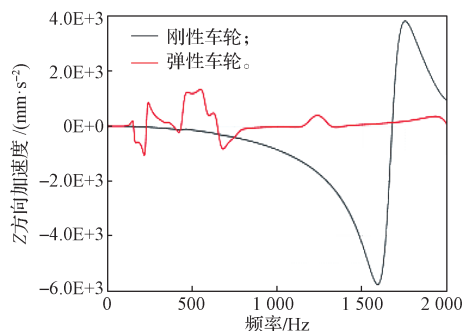
a) A 点加速度对比



b) B 点加速度对比



c) C 点加速度对比



d) D 点加速度对比

图 9 刚性车轮与弹性车轮测试点垂直方向加速度对比

Fig. 9 Vertical acceleration compasiron between rigid and resilient wheel test points

从图 9 所示对比结果可以看出, 弹性车轮相对于刚性车轮, 弹性车轮的 4 个测试点在不同频率下的加

速度幅值总体低于刚性车轮的加速度幅值,尤其是在高频段区间里,弹性车轮的加速度幅值相对于刚性车轮显著降低,这是由于橡胶块的减振作用,使各测点的振动被减弱了。国内测试结果发现,轮轨轮动噪声的主要频率范围为 500~1 250 Hz,从图中可以看出在此区间内弹性车轮相对于刚性车轮,弹性车轮的加速度幅值总体水平明显降低,说明弹性车轮在减振方面有着显著的优势。

另外,通过对比弹性车轮 4 个测试点在垂直方向的速度和加速度曲线,如图 10 所示,发现弹性车轮边缘部分的速度和加速度幅值达到最大值,且明显高于核心部分,这也意味着振动被橡胶减弱了,振动传递到轴上明显降低^[12]。橡胶在减少高频振动方面有显著效果。

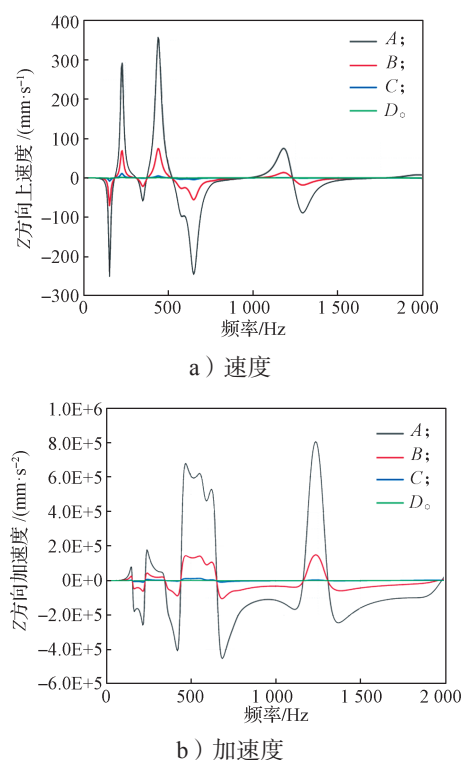


图 10 弹性车轮 4 个测试点垂直方向速度和加速度对比
Fig. 10 Vertical velocity and acceleration comparison at four test points of resilient wheels

由于橡胶的刚度比钢部件小,轮辋和轮心部件的刚度决定了弹性车轮的模态和频率。虽然橡胶对整个结构的模态没有影响,但橡胶的刚度对结构的动刚度起着重要作用。在动刚度分析中,橡胶具有显著的减振作用。

5 随机振动疲劳寿命分析及结构改进

5.1 随机振动疲劳分析

随机振动分析适用于在可变频率范围内发生非

确定性载荷的情况,例如在道路上行驶的卡车所经历的振动或飞行中飞机机翼上的载荷。对于随机振动分析,功率谱密度曲线或 PSD 用作分析的输入以确定结构响应^[13]。

随机振动分析是一种线性动态分析,用于研究结构对随机振动的响应。随机振动分析的结果本质上是统计的,这些结果具有高斯分布,当求解器返回 1 个 σ 或 1 个标准差值,这意味着 68.27% 的随机响应落在 $1-\sigma$ 值和 0 之间,通过将结果放大 2 或 3 倍来增加此概率,以获得 2 或 3 个 σ 值,95.45% 的随机响应将落在 $2-\sigma$ 值和 0 之间,99.73% 的随机响应将落在 $3-\sigma$ 值和 0 之间。

一般来说,有两种方法用于计算承受循环载荷结构的疲劳寿命:应力寿命法和应变寿命法。应力寿命法通常用于负载的高循环疲劳循环,这种情况下,与材料的极限强度相比,应力通常较低。另一方面,应变寿命法通常用于加载循环次数较少的低周疲劳,通常塑性变形伴随着低周疲劳发生。Ansys Mechanical Fatigue Tool 支持频域疲劳分析,以进行随机振动和谐波分析,此计算使用应力寿命方法,因为基于频率的疲劳分析不支持应变寿命方法。

Ansys Mechanical Fatigue Tool 支持 3 种随机振动疲劳循环计数方法, Narrowband formulation、Steinberg formulation 和 Wirsching formulation, Narrowband formulation 仅用于窄频率范围; Steinberg formulation 用于宽频率范围内的多个频率,它在电子行业中使用最多,是 3 种方法中最准确的方法,因此是使用最多的方法; Wirsching formulation 特定用于石油和天然气行业标准。本仿真主要采用 Steinberg 公式方法,该公式利用了所有 3 个应力水平 ($1-\sigma$ 、 $2-\sigma$ 和 $3-\sigma$) 及其发生率, Steinberg 公式假设高斯分布,其中 68.27% 的循环发生在 $1-\sigma$ 应力处, 27.18% 的循环发生在 $2-\sigma$ 应力处, 4.28% 的循环发生在 $3-\sigma$ 应力处。

对于随机振动的疲劳分析,疲劳寿命总是以秒为单位报告,并且疲劳损伤是按暴露持续时间报告的,暴露时间不影响疲劳寿命,但会影响疲劳损伤。

在本仿真中,使用一个 PSD 输入,它的恒定值为 0.02 G^2/Hz ,范围为 1~2 000 Hz,量级为单位 1 的垂向加速度载荷激励。可以看到,对于 $1-\sigma$,获得的最大等效应力值为 4.730 30 MPa,其中约 68.27% 的循环发生,如图 11a 所示; $2-\sigma$ 获得的最大等效应力值为 9.460 5 MPa,其中约 27.18% 的循环发生,如图 11b 所示;最后对于 $3-\sigma$,获得的最大等效应力值为 14.191 0 MPa,其中约 4.28% 的循

环发生,如图 11c 所示。

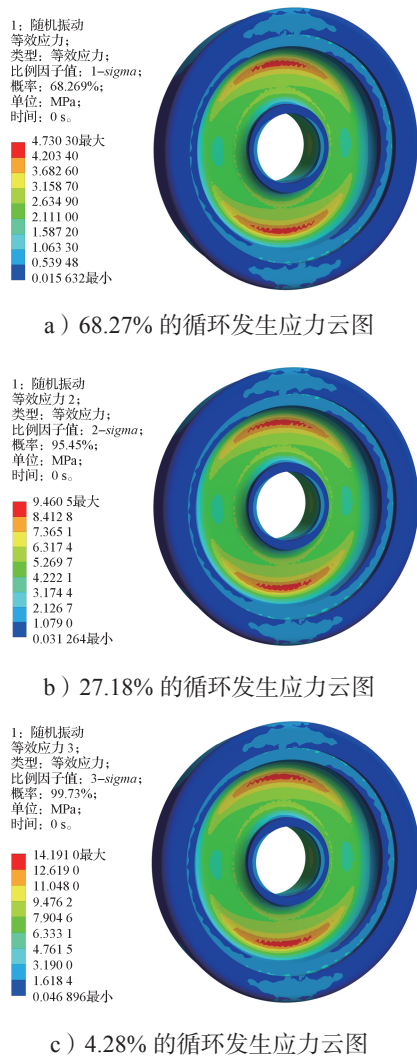


图 11 弹性车轮的等效应力云图

Fig. 11 Equivalent stress cloud of a resilient wheels

通过观察图 12 所示的插入疲劳工具检查疲劳结果可以得知,本文所设计的弹性车轮的预期寿命约为 972 650 s。

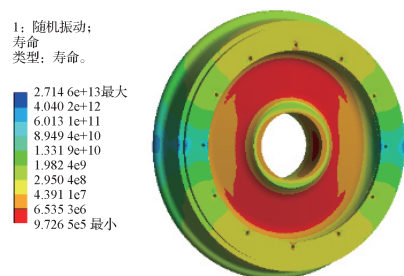


图 12 弹性车轮的疲劳寿命分布云图

Fig. 12 Cloud diagram of fatigue life distribution of resilient wheels

4.2 结构改进设计

从图 11 所示弹性车轮在随机振动下的等效应力

云图和图 12 所示的疲劳寿命分布云图可以看出,最小寿命位置和应力集中区域为轮芯腹板尺寸薄弱区域,该位置弯角较大,厚度较薄,容易产生变型。因此对轮芯中间局部进行加厚应减小弯曲角度的处理。图 13 为弹性车轮优化改进后的振动疲劳寿命分布云图,由图可知结构的最小疲劳寿命达到 1 300 900 s,相对于改进前的最小疲劳寿命提高了约 25%,达到了结构改进的目的。

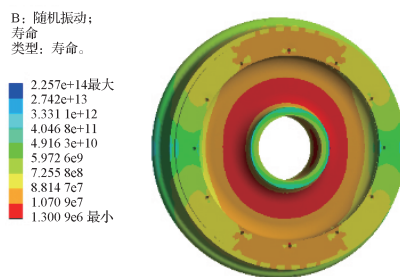


图 13 弹性车轮改进后的疲劳寿命分布云图

Fig. 13 Cloud map of fatigue life distribution after an improved optimization of resilient wheels

5 结语

在原有压剪复合型弹性车轮的基础上改进了橡胶块结构,新设计了一款压剪复合型弹性车轮。根据相关学者的测试结果发现,国内轮轨轮动噪声主要频率为 500~1 250 Hz,本文通过利用 Hypermesh 软件进行仿真分析,对比弹性车轮与刚性车轮在相同 4 个测试点的速度与加速度频率响应曲线,结果表明弹性车轮 4 个测试点总的加速度幅值在高频段明显低于刚性车轮,表明弹性车轮在此频率区间及更高频率区间都有着良好的减振效果,进一步证明了弹性车轮在降低轮轨噪声方面有着显著的优势。另外,通过 Ansys 软件对弹性车轮在随机振动状态下的疲劳寿命进行了分析^[14],得出弹性车轮薄弱部位并对其进行结构改进,可提高弹性车轮的疲劳寿命约 25%。

为了了解车轮在实际路面行驶过程中的疲劳特性,初步了解弹性车轮的使用寿命,对车轮在随机振动条件下进行了疲劳寿命分析预测仿真。用功率谱密度函数作为车轮在实际路面上可能受到的激励,但车轮在实际运行过程中的疲劳寿命受诸多因素影响,通过该方法对车轮的疲劳寿命进行预测只能提供量级上的参考,对车轮疲劳寿命薄弱部位进行预判。在实际测量过程中,需结合更多的疲劳试验对车轮的疲劳寿命进行更精准的分析,更为完善的实验步骤和分析过程将成为进一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 周 信. 地铁弹性车轮的减振降噪及动态特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
ZHOU Xin. Study on Vibration and Noise Reduction and Dynamic Characteristics of Metro Resilient Wheel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [2] LING L, LI W, SHANG H X, et al. Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Rail Corrugation on the Behaviour of Rail Fastenings [J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(9): 1211–1231.
- [3] 杨 阳. 压剪复合弹性车轮作用下轮轨动态特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
YANG Yang. Study on Wheel/Rail Dynamic Characteristics Under Compression-Shear Composite Resilient Wheel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [4] 唐 昭, 张学飞, 王瑞乾. 复式降噪块地铁车轮减振降噪特性 [J]. 应用声学, 2020, 39(5): 709–715.
TANG Zhao, ZHANG Xuefei, WANG Ruiqian. The Characteristics of Vibration and Noise Reduction of Metro Wheel with Compound Noise Reduction Block [J]. Journal of Applied Acoustics, 2020, 39(5): 709–715.
- [5] 侯传伦, 戚 援, 王 慎, 等. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的橡胶弹性车轮刚度特性分析 [J]. 内燃机与配件, 2018(11): 38–40.
HOU Chuanlun, QI Yuan, WANG Shen, et al. Stiffness Characteristic Analysis of Rubber Resilient Wheel Based on Mooney-Rivlin Model and Yeoh Model [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018(11): 38–40.
- [6] 张 乐. 弹性车轮结构刚度和强度研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
ZHANG Le. Research on Structural Stiffness and Strength of Resilient Wheel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [7] REN Z S. An Investigation on Wheel/Rail Impact Dynamics with a Three-Dimensional Flat Model [J]. Vehicle System Dynamics, 2019, 57(3): 369–388.
- [8] 吕元颖, 张济民. 基于有限元的有轨电车弹性车轮模态分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23 (增刊1): 104–107.
LÜ Yuanying, ZHANG Jimin. Modal Analysis of Elastic Wheels of Tram Based on Finite Element Method [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(S1): 104–107.
- [9] 高艳艳, 邵 敏. 弹性车轮的结构特点及应用研究 [J]. 内燃机与配件, 2020(23): 45–46.
GAO Yanyan, SHAO Min. Structural Characteristics and Application Research of Resilient Wheel [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020(23): 45–46.
- [10] 黄孝卿, 陈 刚, 刘 智, 等. 地铁用弹性车轮应力分析及其多轴疲劳评估 [J]. 机械强度, 2022, 44(5): 1232–1237.
HUANG Xiaoqing, CHEN Gang, LIU Zhi, et al. Stresses Analysis and Multi-Axial Fatigue Evaluation of Resilient Wheel [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(5): 1232–1237.
- [11] 邬奇睿, 祁孟孟, 周 信, 等. 弹性车轮对地铁直线段轨道减振特性研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 395–405.
WU Qirui, QI Mengyu, ZHOU Xin, et al. Research on Vibration Reduction Characteristics of Straight Section of Metro Track with Damping Wheel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(22): 395–405.
- [12] 王佳诺, 王 奇, 韩 健, 等. 考虑弹性轮对的车辆-轨道耦合动力学建模及减振特性研究 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(8): 235–244.
WANG Jianuo, WANG Qi, HAN Jian, et al. Study on Dynamic Modeling and Damping Characteristics of Vehicle-Track Coupling Considering Resilient Wheelset [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(8): 235–244.
- [13] 刘云涛. 基于轮轨弹塑性接触模型的钢轨疲劳裂纹分析及钢轨疲劳寿命预测 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
LIU Yuntao. Rail Fatigue Crack Analysis and Rail Fatigue Life Prediction Based on Wheel-Rail Elastic-Plastic Contact Model [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [14] 丛 韬, 陈 刚, 吴 斯, 等. 动车组车轮辍裂损伤容限和剩余寿命评估 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(12): 1740–1747.
CONG Tao, CHEN Gang, WU Si, et al. Damage Tolerance and Remain Fatigue Life Evaluation of Shattered Rim of EMU Wheels [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(12): 1740–1747.

(责任编辑: 申 剑)