

轨道交通车辆层状弹簧结构参数对其垂向刚度的影响^{*}陈清化¹ 龙焱坤² 程海涛² 张波³(1. 湖南铁路科技职业技术学院, 412006, 株洲; 2. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 412007, 株洲;
3. 中车株洲电力机车有限公司, 株洲 412001 // 第一作者, 讲师)

摘要 针对层状弹簧结构参数对其垂向刚度性能影响的问题, 基于层状弹簧设计及生产应用经验, 利用有限元仿真分析和试验相结合的方法, 分析研究了橡胶层外径、橡胶层内径以及胶层厚度等层状弹簧关键结构参数对垂向刚度影响的规律, 确定了层状弹簧垂向刚度理论计算公式, 并进行了验证分析。结果表明: 层状弹簧橡胶层外径对垂向刚度影响效果最为显著, 起正向影响作用, 影响灵敏度值约为 5.5~7.7; 橡胶层内径为负向影响, 影响灵敏度值约为 -1.7~-2.5; 胶层厚度为负向影响, 影响灵敏度值约为 -2.1~-2.5; 胶层数与垂向刚度呈反比影响关系。同时验证了理论计算公式的准确性。

关键词 轨道交通; 车辆; 层状弹簧; 垂向刚度; 结构参数
中图分类号 U270.331⁺4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.09.015

Influence of Structure Parameters on Vertical Stiffness of Rail Transit Vehicle Layered Spring

CHEN Qinghua, LONG Yaokun, CHENG Haitao, ZHANG Bo

Abstract In view of the influence of structure parameters on vertical stiffness performance of layered spring, based on product design and production application experience, using a combination of finite element simulation analysis and product testing, the influencing pattern of key structure parameters of layered spring, including outer diameter of rubber layer, inner diameter of rubber layer, and thickness of rubber layer, on vertical stiffness is analyzed and studied. The theoretical calculation formula of layered spring vertical stiffness is concluded and verified. Results show that the outer diameter of layered spring rubber layer has the most significant effect on vertical stiffness, coming with a positive effect, with a sensitivity value of about 5.5~7.7; and the inner diameter of rubber layer comes with a negative effect, and sensitivity value of about -1.7~-2.5; thickness of the adhesive layer is negatively affected, with the

sensitivity value of about -2.1~-2.5, and the number of adhesive layers is inversely proportional to the vertical stiffness. Accuracy of the theoretical calculation formula is verified.

Key words rail transit; vehicle; layered spring; vertical stiffness; structure parameters

First-author's address Hunan Vocational College of Railway Technology, 412006, Zhuzhou, China

0 引言

近年来, 随着轨道交通车辆需求的快速增长, 各主机厂对车辆部件的交付进度、成本和质量都提出了新的要求。层状弹簧作为二系悬挂的重要减振部件, 相较其它结构形式橡胶弹簧的受载变形小、制造工艺复杂, 其垂向刚度特性对车辆无气动力学的影响显著。层状弹簧因其垂向变形小、所需安装空间小等优点在地铁及磁浮车辆上有较广泛应用。研究层状弹簧结构参数对其性能的影响规律对于层状弹簧的设计开发、结构优化以及质量保证具有积极的促进作用。

目前, 国内外关于层状弹簧的研究成果较少, 有部分学者进行过相关的研究工作。文献[1]运用超弹性模型计算橡胶弹性元件的静态特性, 确定了有限元仿真计算在橡胶弹簧刚度性能计算中的可行性和优越性。文献[2]采用 Mooney Rivlin 本构模型金属橡胶件的静态刚度进行了大量的有限元分析计算, 研究确定了材料系数对于金属橡胶件静态刚度计算影响规律。文献[3]研究介绍锥形弹簧作为一系弹簧应用的技术特点及其在轻轨车辆中使用情况。文献[4]研究半沙漏式辅助弹簧的橡胶胶层厚度及受载方式对该产品在低温下的刚度性能恢复能力有重要影响。文献[5]进行了一系列橡

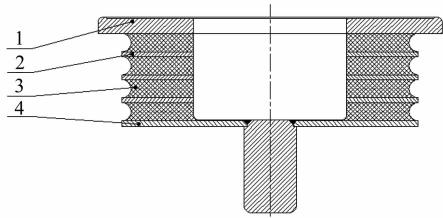
^{*} 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ7053); 湖南省教育厅资助科研项目(19C1221); 湖南铁路科技职业技术学院重点课题资助项目(HNTKY-KT2020-1)

胶弹簧关于橡胶的疲劳研究工作,并提出多种影响橡胶疲劳损伤的参量。文献[6]针对叠层橡胶弹簧失稳问题,研究通过优化结构参数减小横向偏移量,提高了叠层橡胶弹簧垂向稳定性。文献[7]采用理论推导、仿真分析及试验验证研究分析了橡胶弹簧的隔振特性与激励频率、隔振系统质量、橡胶弹簧刚度和阻尼之间的关系。文献[8]研究得出了轴箱层叠橡胶弹簧刚度随温度的变化情况。文献[9]研究得出非线性橡胶弹簧减振系统的数值分析及设计方法能够准确设计非线性减振系统的动力学特征。文献[10]研究了低温和频率对于橡胶弹簧元件刚度的影响。目前学者们的研究均没有涉及层状弹簧结构参数对垂向刚度性能影响方面。

目前,层状弹簧的设计开发主要采用借鉴参考类似产品的结构和有限元仿真分析方式进行,对于结构参数与其性能的相关性并未有相关的研究成果,不清楚层状弹簧各结构参数对于其刚度性能的影响规律。层状弹簧一次开发命中率不高,而时间和人力成本较高。为能够准确、高效服务轨道交通车辆产业发展,针对层状弹簧结构参数与垂向刚度性能相关规律进行研究,同时也为其它类似橡胶产品的设计开发及改进优化提供参考。

1 基于关键结构参数的层状弹簧性能定性分析

层状弹簧结构主要由金属和橡胶硫化而成(见图1),提供承载和辅助减振作用,在空气弹簧无气时,起主要承载和减振作用。



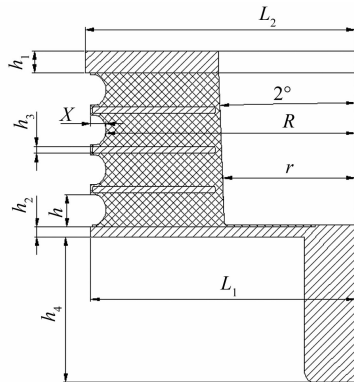
注：1——顶板；2——隔板；3——橡胶；4——底板。

图1 层状弹簧结构示意图

层状弹簧主要靠橡胶的变形来实现减振功能,其性能特性主要由橡胶材料特性、结构设计及生产工艺决定,其中结构参数设计的影响较为关键。层状弹簧主要结构参数如图2所示。

为研究结构参数对层状弹簧垂向刚度性能的影响,考虑变更层状弹簧结构参数的多样性、复杂性以及高昂的采购和试制成本,利用有限元仿真分

析和试验相结合的方法研究结构参数对于层状弹簧垂向刚度特性的影响规律。



注： h 为橡胶胶层厚度； R 为橡胶胶层外径； r 为橡胶胶层内径； X 为圆周外侧内凹面凹进深度； 2° 为内侧锥角(该参数主要为方便产品生产硫化时模具拔模)； L_1 为金属部件底板外径； L_2 为金属部件顶板外径； h_1 为顶板厚度； h_2 为金属部件底板厚度； h_3 为隔板厚度； h_4 为底板高度。

图2 层状弹簧结构参数示意图

首先,通过对随机样品一(四层橡胶结构层状弹簧)进行垂向加载试验;然后,利用有限元软件Abaqus6.14进行仿真分析,计算模型采用轴对称模型,载荷与边界条件如图3所示。固定模型的底板底面,模拟车辆真实加载情况。在顶板的顶面施加垂下压力(转化为位移加载)。橡胶网格采用CAX4H单元,其他金属部件网格均采用CAX4R单元,网格模型如图4所示。模型垂向加载计算结果如图5~7所示。通过比较仿真结果与试验结果的差异,修正仿真计算过程中橡胶材料参数,降低有限元仿真分析的误差,减小橡胶材料参数和仿真分析方法对于后续验证的影响。

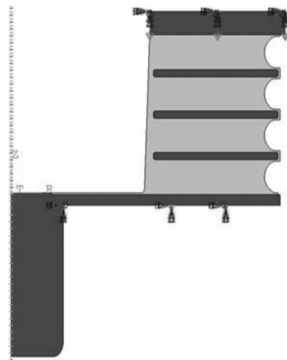


图3 四层橡胶结构层状弹簧载荷与边界条件

利用有限元仿真分析方法对多种结构层状弹簧金属部件结构参数的单独变化进行仿真分析。结果显示金属部件尺寸变化对于其垂向刚度性能几乎无影响,而橡胶参数变化则导致其垂向刚度

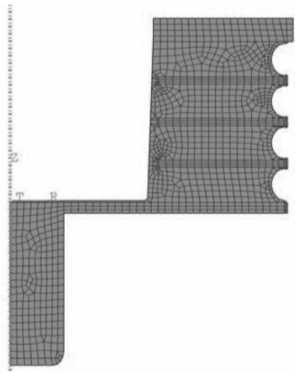


图 4 四层橡胶结构层状弹簧有限元网格

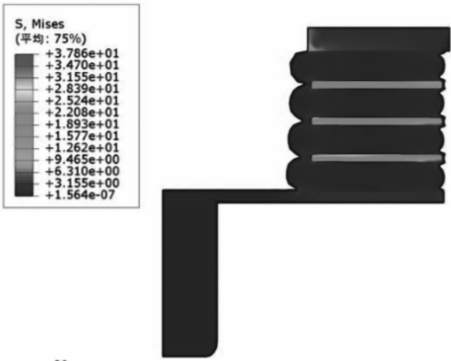


图 5 四层橡胶结构层状弹簧模型的 Mises 应力云图

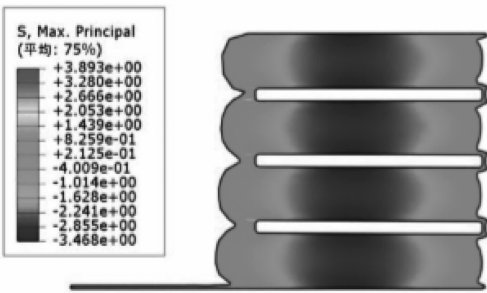


图 6 四层橡胶结构层状弹簧橡胶层主应力云图

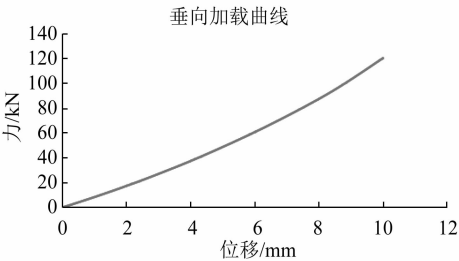


图 7 四层橡胶结构层状弹簧模型垂向加载曲线

性能产生波动。由此可以确定,橡胶参数为影响层状弹簧垂向刚度性能的关键结构参数。下文主要对关键结构参数变化对层状弹簧垂向刚度性能的影响进行研究。

对 4 层橡胶结构(样品一)和 3 层橡胶结构(样品二)这 2 种典型层状弹簧样品的结构参数的变化进行研究。因辅助弹簧承载的载荷较大,同时考虑橡胶的散热性差等因素,轨道交通车辆用层状弹簧的胶层一般设计为多层橡胶,并通过金属隔板(隔板通常选用 65Mn 材料,顶板和底板材料通常选用 Q235B)隔开的方式,避免出现单层橡胶很厚的情况。考虑产品的疲劳寿命和耐环境影响,橡胶胶层采用等应变设计。各层橡胶胶层厚度一致,橡胶材料(胶料硬度为 55 Shore A)通常添加多种成分。初始设计参数如表 1 所示。在初始参数基础上改变两种样品橡胶的结构参数,变化范围为 0~10%,变化步长为 2%。

表 1 两种层状弹簧样品的橡胶胶层基本参数表

样品	厚度/mm	外径/mm	内径/mm
样品一	19	146	77
样品二	14	78	36

针对样品一和样品二的胶层厚度 h 变化、胶层外径 R 变化和胶层内径 r 变化,利用有限元仿真分析计算得到多组不同变化参数对应产品垂向刚度值。然后利用公式(1)分别计算出不同结构层状弹簧垂向刚度基于各结构参数的相对灵敏度值。

$$T_i = \frac{\Delta k_i / k_i}{\Delta d_i / d_i} \tag{1}$$

式中:

- d_i ——第 i 个结构设计参数;
- Δd_i ——第 i 个结构参数的变化值;
- k_i ——第 i 个参数对应的垂向刚度值;
- Δk_i ——第 i 个参数变化后对应的垂向刚度变化值。

两种层状弹簧样品的结构参数灵敏度计算结果如图 8~9 所示。

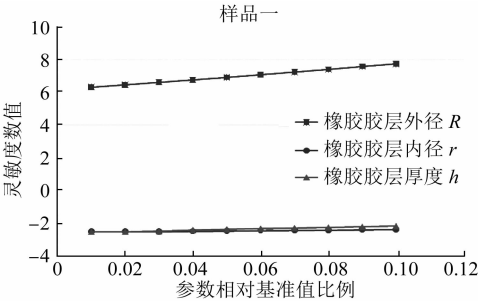


图 8 层状弹簧样品一各结构参数灵敏度分析图

两种不同结构不同胶层数量的层状弹簧结构参数变化率对应的垂向刚度变化率结果虽不完全相等,但所呈现的变化趋势一样。增大 R ,层状弹簧

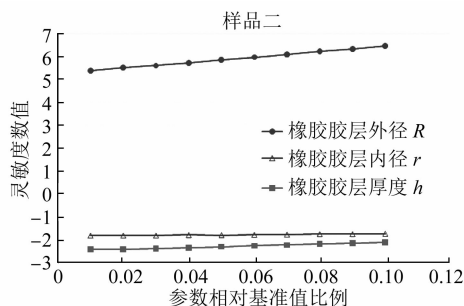


图9 层状弹簧样品二各结构参数灵敏度分析图

对应的垂向刚度会增大,此为正向影响,影响的灵敏度值约为5.5~7.7,影响程度较大;增大 r ,层状弹簧对应的垂向刚度会减小,此为负向影响,影响的灵敏度值约-1.7~-2.5,影响程度较为明显;增大 h ,层状弹簧对应的垂向刚度会减小,此为负向影响,影响的灵敏度值约-2.1~-2.5,影响程度较为明显。

样品一和样品二的胶层厚度、胶层内径、胶层外径均不变的情况下,改变胶层层数 n ,通过有限元仿真可得样品垂向刚度 K 随 n 的变化趋势如图10所示。

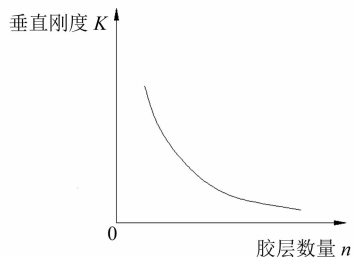


图10 层状弹簧垂向刚度与胶层数量关系图

综上所述:层状弹簧的结构参数 R 、 r 、 h 、 n 为影响层状弹簧垂向刚度性能的关键结构参数。这些参数对层状弹簧的垂向刚度有较为明显的影响,其中参数 R 对垂向刚度的影响程度最大。

2 基于关键结构参数的层状弹簧性能定量分析

上述研究得到了关键结构参数对于层状弹簧性能定性影响规律,为更好指导层状弹簧的设计和优化,需研究层状弹簧关键结构参数对其性能的定量影响规律。层状弹簧的使用环境较为复杂,橡胶材料中需要添加耐环境作用的特殊原料。通过调整橡胶材料的成分含量改变橡胶的硬度,而橡胶材料的硬度特性与橡胶的弹性模量 E 存在一定的复杂非线性关系。针对橡胶材料硬度的变化,最终都

可用 E 值来进行反映。Gent在1981年基于橡胶的不可压缩性特征提出过橡胶隔震支座竖向刚度计算理论,文献[11]对该理论进行了简化,简化公式为:

$$K = E_{cb}A/h \quad (2)$$

式中:

K ——垂向刚度;

A ——受载截面积;

E_{cb} 为——修正弹性模量,其数值主要与橡胶弹性模量 E 相关。

而层状弹簧与橡胶隔振支座存在结构和功能上的差异,橡胶的配方及性能要求也不相同。层状弹簧橡胶的修正弹性模量与橡胶弹性的关系为:

$$E_{cb} = \mu E \quad (3)$$

μ 与橡胶块受载面积和自由面积比值等参数有关,其关系式为:

$$\mu = 1 + mS^2 \quad (4)$$

式中:

S ——单层橡胶面积比,计算公式如公式(5);

m ——与橡胶形状和橡胶截面有关的修正参数。

$$S = (R - r)/2h \quad (5)$$

在进行轨道交通车辆用层状弹簧橡胶的厚度设计时,考虑到散热要求不易设计太厚,根据设计及生产应用经验总结, S 通常设计范围在1到2之间。

由公式(2)—公式(4)可得层状弹簧垂向刚度理论计算公式:

$$k = \frac{\pi E (R^2 - r^2) (1 + mS^2)}{nh} \quad (6)$$

根据上述公式,对样品多种变形结构进行有限元仿真分析,得到多组样品结构参数与计算刚度的数据,对仿真数据取均方差值得到 m 的近似取值。当 $1.00 < S^2 \leq 2.56$ 时, m 约为1.7;当 $2.56 < S^2 < 4.00$ 时, m 约为1.5。

上述计算结果主要是针对某种普遍应用于轨道交通车辆层状弹簧的橡胶材料得出的结果,该类橡胶通常应用于轨道交通车辆用层状弹簧的橡胶硬度控制在50~70 Shore A之间。公式(6)为关键结构参数与层状弹簧垂向刚度的定量关系式,其为非线性定量关系。

3 验证分析

选取某轨道交通车辆用层状弹簧为研究对象,

其技术要求 AW0(空载) 60 kN 时垂向静态刚度为 10 000 N/mm,AW2(满载) 100 kN 时垂向静态刚度为 12 000 N/mm,公差均为±20%。基于层状弹簧空间尺寸要求,结合公式(6)设计了一种结构,计算刚度为 12 643 N/mm。考虑同时符合空载和满载要求,可调整刚度到 11 000 N/mm 左右。调整过程中,避免增大层状弹簧的尺寸。结合 R 、 r 和 h 的变

化对性能的定性影响规律,利用其规律进行结构参数调整,将 R 减小 8.4%、 r 减小 9.3%,同时将 h 减少 5.9%,根据其结构计算单层橡胶的 S 值为 1.73,所得层状弹簧结构计算刚度为 11 230 N/mm。对改进后的结构进行有限元仿真计算。不同载荷下有限元仿真计算与公式计算的层状弹簧结构刚度对比如表 2 所示。

表 2 不同载荷下有限元仿真计算与公式计算的层状弹簧结构刚度对比表

载荷/ kN	标准要求刚度/ (N/mm)	公式计算刚度/ (N/mm)	有限元仿真计算刚度/ (N/mm)	公式计算结果与 标准要求的偏差	有限元仿真计算结果与 标准要求的偏差
60	10 000	11 230	9 545	12.3%	-4.6%
100	12 000	11 230	12 900	-6.0%	7.5%

对该层状弹簧结构进行样品试制,并参考 TB/T 2841-2010 标准^[12]中的试验方法进行常温下静态加载试验,得到垂向加载试验曲线。汇总 3 种不同方法得出的载荷位移曲线如图 11 所示。

由图 11 对比可以得出,有限元仿真分析结果曲线与试验加载曲线重合度较高,理论公式计算的曲线与试验加载曲线有较好的重合度。不同载荷下试验、有限元仿真计算、公式计算的层状弹簧结构刚度对比如表 3 所示。

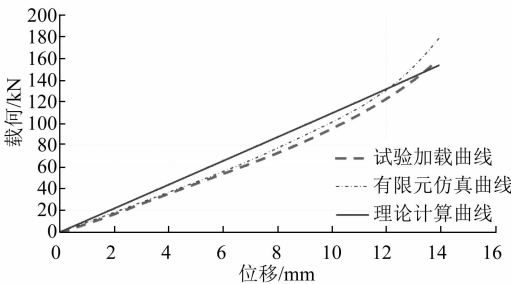


图 11 层状弹簧位移载荷曲线对比图

表 3 不同载荷下试验、有限元仿真计算、公式计算的层状弹簧结构刚度对比表

载荷/ kN	标准刚度/ (N/mm)	试验刚度/ (N/mm)	试验结果与 标准要求偏差/%	有限元仿真 计算刚度/(N/mm)	公式计算刚度/ (N/mm)	有限元仿真计算结果 与试验结果偏差/%	公式计算结果 与试验结果偏差/%
60	10 000	9 799	-2.0	9 545	11 230	-2.6	14.6
100	12000	12 251	2.1	12 900	11 230	5.3	-8.3

由对比分析结果可以得出,在空载 60 kN 和满载 100 kN 时,采用理论公式计算的层状弹簧垂向刚度与试验验证结果偏差较小,在橡胶产品垂向刚度允许的偏差(±20%)范围内。基于理论公式计算和关键结构参数对性能定性影响规律,设计调整的层状弹簧结构可以满足技术要求。

综上所述,理论公式计算的垂向刚度值与试验结果较为接近,理论公式计算结合关键结构参数对层状弹簧垂向刚度性能的影响规律,可用于层状弹簧的设计开发指导以及既有层状弹簧结构垂向刚度的校核,有利于节省层状弹簧的设计开发进度及成本。

4 结论

1) 层状弹簧橡胶胶层外径 R 、橡胶胶层内径 r 、橡胶胶层厚度 h 以及橡胶层数 n 为影响层状弹簧垂向刚度性能的关键结构参数,这些参数对层状弹簧

的垂向刚度有较直接的影响。其中, R 对垂向刚度的影响规律为正向影响,其它参数均为负向影响,影响速率最大的是 R 。

2) 通过有限元仿真分析和试验数据总结出的垂向刚度理论公式的计算值与产品试验结果较为接近。理论公式计算结合关键结构参数对层状弹簧垂向刚度性能的影响规律,可用于层状弹簧的设计开发指导以及既有层状弹簧结构垂向刚度的校核。

3) 研究方法和结果有利于改善层状弹簧设计及优化过程进度和成本,有利于提高层状弹簧设计效率和优化改进效率。

参考文献

[1] WANG L R, LU Z H. Modeling method of constitutive law of rubber hperelasticity based on finite element simulations[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2003, 76(1): 271-285.

况下,对现有 9 号道岔进行提速,则可缩短列车的过岔时间,进而提升折返能力。经仿真计算,在满足相应规范条件下,如果将站后折返的道岔临界速度由 35 km/h 提升到 40 km/h,则可在不增加任何工程改造的情况下,将图 3 所示站型的站后折返能力提高 7.1% 以上,即每小时增加 2 对列车。对于上海轨道交通 9 号线三期工程,经专家核定后,将其道岔临界限速由 35 km/h 提升到 40 km/h。

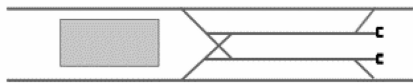


图 3 常见站后折返站型配线

4.2 优化折返轨换端时间

当列车折返能力的主要瓶颈点为折返轨作业时,优化折返轨换端可直接缩小列车的折返间隔。可考虑采取的方法如下:

1) 升级信号系统为全自动运行系统,实现自动换端、自动折返。

2) 对于不具备自动折返功能的线路,可采用双司机换端,在驾驶室另一端再登乘一名司机,待系统换端成功后立即驶出折返轨。

3) 采用退行方式驶出折返轨,该功能需得到信号系统厂商支持,列车以特定速度反向运行。上海轨道交通 14 号线支持以退行方式驶出折返轨。

对于方法 2,实施难度较低,但需要极大增加人力成本;对于方法 3,在现场亦有应用,但不是所有信号系统厂商产品均支持列车以此模式运行;对于方法 1,信号系统改造成本较大,但是实际实施后能力改善最为明显,由列车进入折返轨停稳至起动,实际换端时间小于 12 s。

5 结语

本文分析了制约城市轨道交通运能提升的若干因素,介绍了提升正线列车追踪能力及列车在终端站的连续折返能力的部分策略,并给出了相应的仿真数据。城市轨道交通场景多、情况复杂,很难使用统一的方法或手段对所有线路实现运能优化。所以应该秉持一线一方案、一站一方案,甚至一站多方案的研究策略。理论上有许多线路优化技术手段,且理论计算结果较好,但实际操作难度大、工程投资较高。故应结合工程投资等研究能力优化综合模型,结合优化效果、可实施性、费用概算等综合评估优化手段的优缺点。

参考文献

- [1] 殷峻. 上海轨道交通超大网络运能精细化管理研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019(6): 7.
- [2] 李世琦. 轨道交通全自动无人运行探讨[J]. 中国设备工程, 2019(16): 206.
- [3] 马能艺. 城市轨道交通全自动运行的模式选择[J]. 城市轨道交通研究, 2020(增刊 2): 20.
- [4] 吴智利. 城市轨道交通线路通过能力影响因素分析及平台应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [5] IEEE. Standard for Communications Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements: IEEE 1474.4-2011[S]. New York City: IEEE, 2011.
- [6] 刘婧婧, 曲睿. 湿轨可保证紧急制动率值对信号系统安全制动距离的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2016(7): 151.
- [7] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通列车运行速度限制与匹配技术规范: T/CAMET 040015—2019[S]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2019.
- [8] 王潇骁, 虞翔, 刘循. 道岔限速对站后折返站型折返能力影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019(8): 132.

(收稿日期: 2021-03-26)

(上接第 68 页)

- [2] 左亮, 肖维雄. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型材料系数对轴向刚度影响分析[J]. 弹性体, 2008(3): 54.
- [3] 柳禄决, 荣继刚, 冯万盛. 锥形弹簧的特点及在城市轻轨车辆中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2011(12): 101.
- [4] 陈灿辉, 陈文海, 陈平, 等. 半沙漏橡胶弹簧低温性能研究[J]. 橡胶工业, 2011(11): 687.
- [5] AT-BACHIR M, MARS W V, VERRON E. Energy release rate of small cracks in hyperplastic materials[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2012, 47: 22.
- [6] 荣继刚, 黄友剑, 周炜. 环式叠层型橡胶弹簧稳定性及优化设计技术研究[J]. 铁道机车车辆, 2013(增刊 1): 19.
- [7] 黄雪涛, 李战芬, 王海霞, 等. 橡胶弹簧隔振特性及其影响因

素研究[J]. 中北大学学报, 2018(2): 150.

- [8] 谭富星, 石怀龙, 王玮, 等. 转向架橡胶件动态参数的高低温特性[J]. 交通运输工程学报, 2019(4): 104.
- [9] 李水利, 周建民. 非线性橡胶弹簧减振系统的数值分析与设计方法[J]. 现代制造工程, 2019(12): 123.
- [10] 潘锋, 彭立群, 林达文, 等. 低温和频率对橡胶弹性元件刚度性能的影响[J]. 橡胶工业, 2019(5): 323.
- [11] 刘文光, 三山刚史, 冯德民, 等. 橡胶隔震支座竖向刚度简化计算法[J]. 地震工程与工程振动, 2001(4): 111.
- [12] 中华人民共和国铁道部. 铁道车辆空气弹簧 TB/T 2841—2010[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.

(收稿日期: 2020-07-11)