DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.009

新型小径向/轴向刚度比的橡胶节点设计

倪延强，邵海城，杨静怡，樊令举，刘志国
（中车青岛四方车辆研究所有限公司，山东 青岛 266031）

摘　要：为满足高速动车组电机悬挂要求，文章设计了一种新型小径向/轴向刚度比（径向刚度与轴向刚度比值）的橡胶节点，并通过有限元仿真分析、静刚度试验、疲劳试验及装车试验进行了验证。结果表明，这种结构的橡胶节点符合技术要求，且其预压缩简单有效，刚度范围可调，抗疲劳性能良好，具有良好的高温耐受性，满足电机运行环境的要求。

关键词：橡胶节点；径向/轴向刚度比；有限元；疲劳；高速动车组

中图分类号：U266.2；U260.331^{+}.5　**文献标识码：**A　**文章编号：**1000-128X（2024）01-0071-06

0　引言

随着机车车辆运行速度的不断提高，人们对其安全性和舒适性的要求也越来越高。减振弹性元件可有效提升机车车辆安全性和舒适性，尤其是橡胶减振弹性元件，能有效地隔离激振源和高频振动，缓冲振动[1]。橡胶节点种类多样，是橡胶减振弹性元件的典型代表，可实现柔性连接，缓冲振动，防止振动通过构架传递到车体，能在复杂环境下工作，其内部结构可调，可满足多工况下的刚度匹配要求，因此在机车车辆上得到广泛应用[2-3]。

国内外橡胶节点产品的径向/轴向刚度比的设计范围一般可为2~15，目前，针对小径向/轴向刚度比橡胶节点的研究较少，大部分产品的径向/轴向刚度比在7以上[4]。在一些特定工作场合，往往需要使用具有更小径向/轴向刚度比的橡胶节点产品。

本文将设计一种高速动车组用新型电机悬挂橡胶节点，实现小径向/轴向刚度比，并通过有限元仿真分析、试验和装车运用对其进行可靠性验证，为小径向/轴向刚度比橡胶节点的设计提供一种新的思路。

1　技术要求

本文所研究的橡胶节点用于高速动车组转向架构架和牵引电机之间的连接。牵引电机通过4个相同的橡胶节点悬挂在转向架构架上，一方面用于减少牵引电机正常工作时传递到车体上的振动，避免产生共振[5]；另一方面也避免将车辆不同运行条件下产生的3个方向的振动直接传递给牵引电机，延长牵引电机使用寿命，保障其平稳正常运行。

该橡胶节点的主要设计参数如表1所示，基本尺寸如图1所示。

表1　橡胶节点的主要设计参数

Table 1　Main design parameters of the rubber bushing

参数项目	参数值
径向刚度/(kN·mm^{-1})	30（1±20%）
轴向刚度/(kN·mm^{-1})	10（1±20%）
径向/轴向刚度比	3

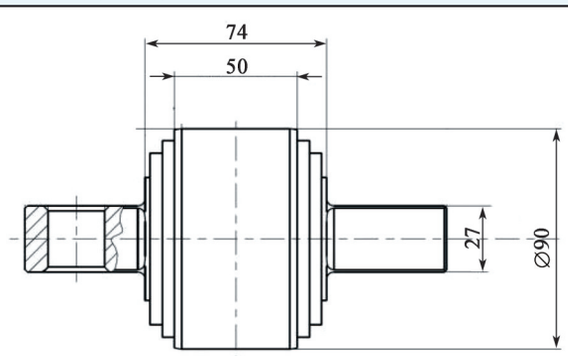


图1　橡胶节点的基本尺寸

Fig. 1　Basic dimensions of the rubber bushing

作者简介：倪延强（1990—），男，硕士，主要从事轨道交通车辆减振系统研究；E-mail: niyanqiang@163.com

引用格式：倪延强, 邵海城, 杨静怡, 等. 新型小径向/轴向刚度比的橡胶节点设计[J]. 机车电传动, 2024(1): 71-76.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.009.

Citation：NI Yanqiang, SHAO Haicheng, YANG Jingyi, et al. Design of a new type of rubber bushing with small radial-to-axial stiffness ratio[J]. Electric drive for locomotives, 2024(1): 71-76.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.009.

由表1可知橡胶节点的径向刚度和轴向刚度比值为3，橡胶节点属于小径向/轴向刚度比结构的橡胶节点，且该节点外圆直径尺寸为90 mm，装配面长度为50 mm，内部空间较小，结构设计要求难度较大。

2 结构设计

2.1 常规橡胶节点的结构

常规的橡胶节点采用芯轴、外套和通过橡胶硫化连接的结构，中间的橡胶层结构通常为平轴结构或凸轴结构（如图2、图3所示），且橡胶层一般采用等长度、等厚度或等刚度的设计。在这样的结构下，其径向/轴向刚度比一般比较大，平轴结构的径向/轴向刚度比一般在15:1以上，而凸轴结构的径向/轴向刚度比往往也在7:1以上[6]。因此上述常规结构无法满足技术要求。

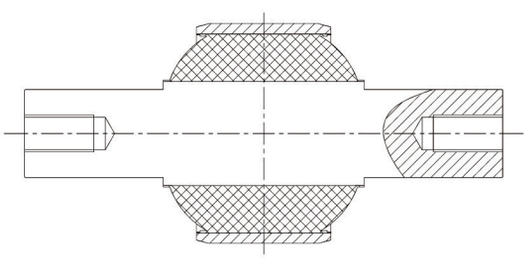


图2 平轴结构橡胶节点

Fig. 2 The rubber bushing with flat shaft structure

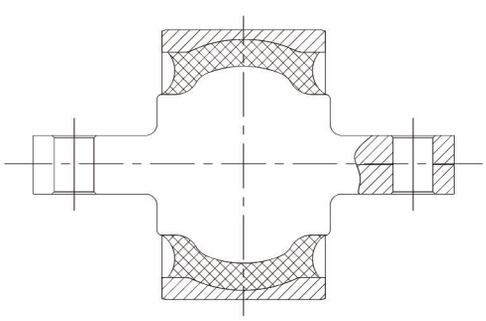


图3 凸轴结构橡胶节点

Fig. 3 The rubber bushing with convex shaft structure

2.2 新型橡胶节点的结构

橡胶材料的压缩模量远大于剪切模量[1]。常规结构的橡胶节点在承受轴向载荷时，橡胶主要承受剪切力，很少承受压缩力；而在承受径向载荷时，橡胶主要承受压缩力。因此，2.1节所述的两种橡胶节点具有较大的径向/轴向刚度比。如果可以改变产品的内部结构，使其在承受径向载荷时，橡胶也承受一定的剪切力；在承受轴向载荷时，橡胶也承受一定的压缩力，就可以实现减小径向/轴向刚度比的目的。

根据以上原理，结合工艺可实现性，本文提出了一种轴向组合式橡胶节点，产品结构如图4和图5所示。

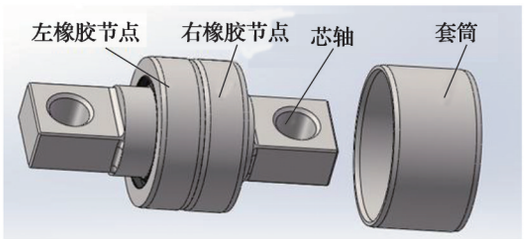
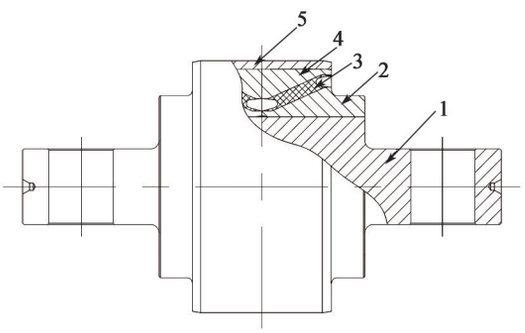


图4 轴向组合式橡胶节点分解示意图

Fig. 4 Decomposition diagram of the axial combined rubber bushing



1—芯轴；2—内套；3—橡胶；4—外套；5—套筒。

图5 轴向组合式橡胶节点结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of the axial combined rubber bushing

轴向组合式橡胶节点主要包括左右2个小橡胶节点、芯轴和套筒，其中左右2个小橡胶节点是由金属外套、金属内套和橡胶体硫化连接而成。左右2个小橡胶节点分别从芯轴的两端压入，其金属内套与芯轴之间通过过盈配合的方式组合在一起，金属外套的一端通过“背靠背”的方式紧紧贴在一起，最后该组合结构件与金属套筒之间通过过盈配合的方式紧密组合在一起，形成轴向组合式橡胶节点。

2.3 新型橡胶节点的橡胶预压缩

橡胶有不耐拉而耐压的特性，橡胶节点在生产时往往需要进行一定量的预压缩，以避免其在硫化阶段产生初始拉应力，以及避免在工作中因承受载荷而产生更大的拉应力，从而提高橡胶疲劳强度和使用寿命[7]。由图4、图5可知，轴向组合式橡胶节点的内部橡胶与节点的径向及轴向之间均呈斜角，因此，通过调整左、右橡胶节点金属外套相对芯轴的轴向位置，就可以调节橡胶预压缩量的大小。如图6所示，通过轴向方向的预压缩即可实现橡胶径向预压缩，且该种预压缩方式简捷有

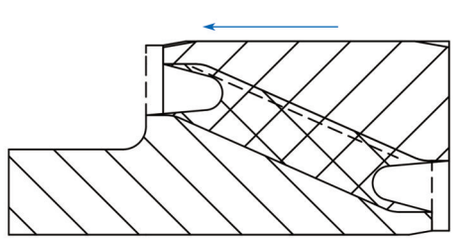


图6 橡胶节点预压缩示意图

Fig. 6 Precompression schematic diagram of the rubber bushing

效。图6中，实线为组装前的自由状态，箭头方向为预压缩方向，虚线为组装后的产品状态。

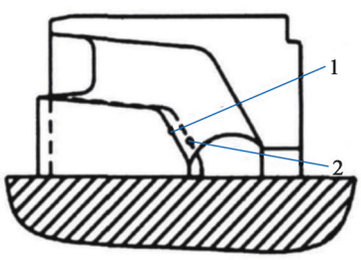
2.4　新型橡胶节点的结构优点

2.4.1　径向/轴向刚度比的可调节性

该橡胶节点可通过调节左、右2个橡胶节点橡胶层相对于轴向方向的斜面角度和预压缩量，改变各部分橡胶层所受压缩力和剪切力的比，进而实现不同的径向/轴向刚度比。此外，通过调整橡胶层径向方向的厚度，也可以改变橡胶节点的径向/轴向刚度比。

2.4.2　橡胶层预压缩的均一性

该橡胶节点的橡胶层厚度均一，倾斜角度一致，可实现橡胶层在预压缩阶段整体压缩的均一性，相较于多弧度或分段式橡胶层（如图7）[8]，这种方式更有助于保证橡胶层整体应力均匀，进而提高使用寿命。



1—组装前；2—组装后。

图7　多弧度橡胶层橡胶节点预压缩示意图

Fig. 7　Precompression schematic diagram of the rubber bushing with multi-radian rubber layer

2.4.3　二次加工偏差和成本的减少

常规橡胶节点的橡胶预压缩工艺一般是采用金属外套整体强制挤压法，该方法会使金属外套出现椭圆度或锥度，导致产品外径尺寸不均匀[9]，且在外套厚度较小时尤为常见。因此必须进行二次机加工，而二次加工要求外套厚度预留一定的加工裕量，且椭圆度和锥度越大，要求的裕量越大。这会降低加工效率，增加加工成本。

轴向组合式橡胶节点在组装过程中即可实现橡胶层预压缩，且为轴向预压缩，不需要采用金属外套径向预压缩工艺，因此金属外套变形非常小，外套加工预留裕量小，可有效提高二次加工效率且降低成本。

3　分析验证

3.1　有限元仿真分析

采用通用非线性有限元分析软件针对橡胶节点结构进行有限元仿真分析的模型如图8所示。计算分析采用SI单位（mm, N, MPa），有限元模型中采用C3D8R单元模拟金属单元，采用C3D8H单元模拟节点中的橡胶单元，橡胶材料采用Mooney-Rivlin本构模型[10-11]。边界条件根据实际运用情况确定，使得在尽量模拟实际工况的前提下，对原物理模型进行适当简化。

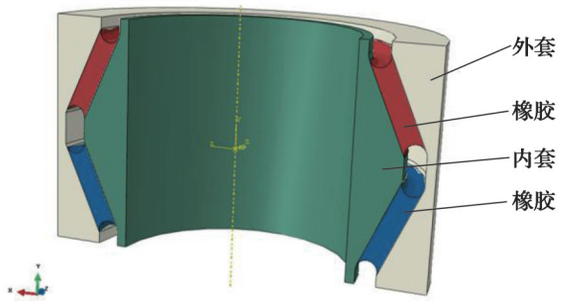


图8　有限元仿真分析模型

Fig. 8　Finite element simulation analysis model

对外套施加20 kN的y向载荷和30 kN的x向载荷，求解橡胶节点的径向刚度和轴向刚度，以及橡胶和金属外套所受应力。有限元刚度计算曲线如图9和图10所示，选用线性回归方程拟合，刚度求解结果如表2所示，最大载荷下的橡胶和内外套应力云图如图11和图12所示，在径向载荷与轴向载荷作用下的最大橡胶拉应力和内外套最大应力如表3所示。

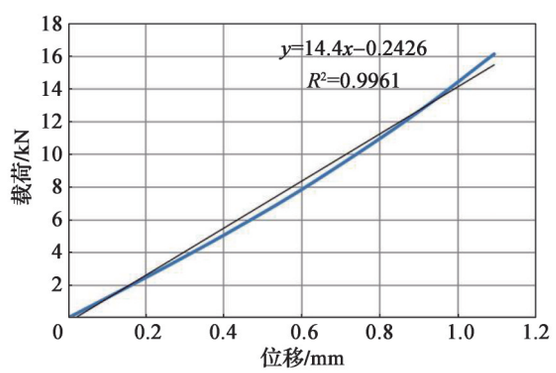


图9　径向有限元刚度计算曲线

Fig. 9　Calculation curve of the radial finite element stiffness

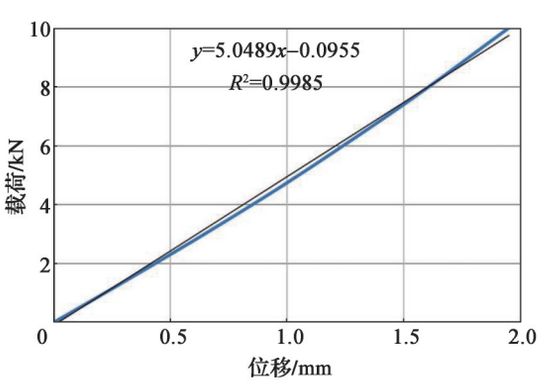


图10　轴向有限元刚度计算曲线

Fig. 10　Calculation curve of the axial finite element stiffness

表2　橡胶节点的主刚度求解参数

Table 2　Principal stiffness solution results of the rubber bushing　　kN/mm

项目	技术指标	计算结果
径向刚度	30（1±20%）	28.8
轴向刚度	10（1±20%）	10.1

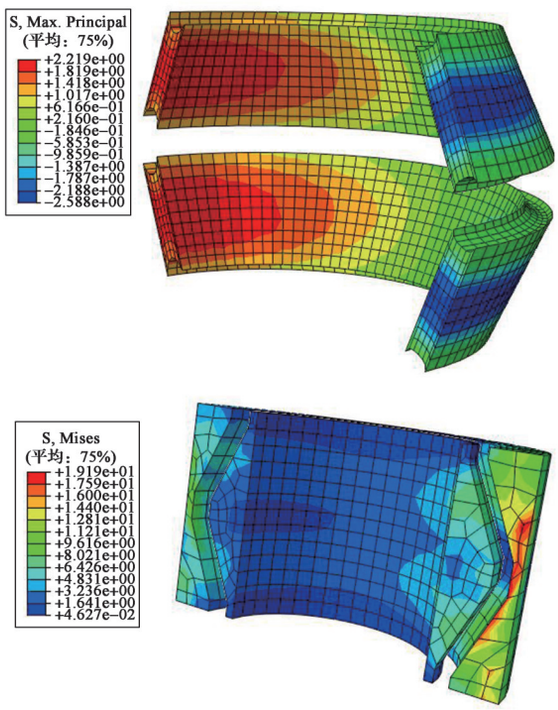


图11 径向最大载荷30 kN下的橡胶应力及外套和内套应力云图

Fig. 11 Outer/inner stress nephogram and rubber stress under the maximum radial load of 30 kN

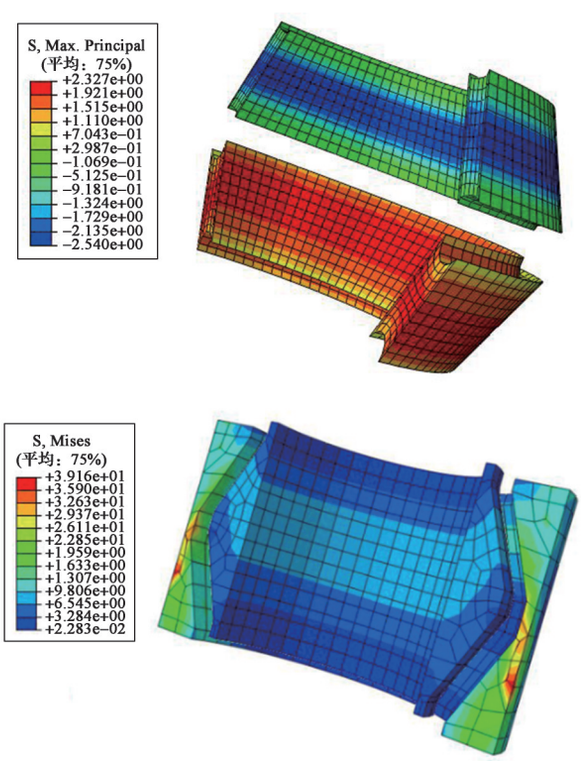


图12 轴向最大载荷20 kN下的橡胶应力及外套和内套应力云图

Fig. 12 Outer/inner stress nephogram and rubber stress under the maximum axial load of 20 kN

由径向和轴向橡胶应力云图以及内外套应力云图可知，在最大载荷下该结构的橡胶应力保持在较低水平，金属外套和内套的应力水平也较低。由表3可知，

表3 橡胶和内外套应力计算结果

Table 3 Stress calculation results of rubber and inner and outer sleeve MPa

项目	橡胶最大拉应力	内外套最大应力
径向	2.22	19.19
轴向	2.32	39.16

径向最大载荷下的橡胶最大拉应力为2.22 MPa，轴向最大载荷下的橡胶最大拉应力为2.32 MPa，均小于橡胶拉伸强度和橡胶与金属粘接强度。径向最大载荷下的金属外套最大应力为19.19 MPa，轴向最大载荷下的金属外套最大应力为39.16 MPa，均远小于金属材料的屈服强度。橡胶材料选择天然橡胶，外套和内套材料选择Q345E钢可满足设计需求。

3.2 试验验证

根据电机悬挂橡胶节点的特性和适用环境，对轴向组合式橡胶节点结构进行试验验证，主要试验项目包含：外观及尺寸检查，材料性能检验，粘接性能试验，静刚度试验，热老化试验，高低温试验，常温疲劳试验，高温疲劳试验。

3.2.1 静刚度性能验证

径向和轴向刚度试验曲线如图13和图14所示，刚度计算方法依据TB/T 2843—2015《机车车辆用橡胶弹性元件通用技术条件》要求和实际工况要求，径向加

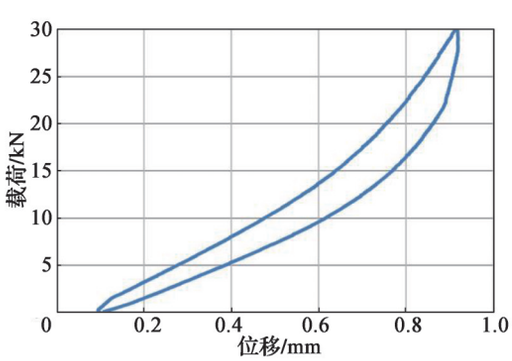


图13 径向刚度试验曲线

Fig. 13 Test curve of radial stiffness

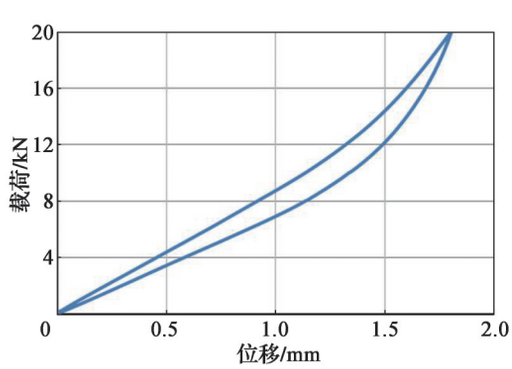


图14 轴向刚度试验曲线

Fig. 14 Test curve of axial stiffness

载 30 kN，取 1 kN 和 20 kN 的载荷−位移数值计算径向刚度，轴向加载 20 kN，取 1 kN 和 16 kN 的载荷−位移数值计算轴向刚度，得出的静态刚度试验验证结果如表 4 所示。结果表明，该橡胶节点可满足静态刚度要求，径向/轴向刚度比为 2.93，符合设计要求。

表 4　橡胶节点的主刚度试验结果

Table 4　Principal stiffness test results of the rubber bushing

kN/mm

项目	技术指标	试验结果
径向刚度	30（1±20%）	29.6
轴向刚度	10（1±20%）	10.1

3.2.2　疲劳性能验证

电机悬挂橡胶节点运用环境相对恶劣，需长时间适应电机运行所产生的高温，而高温环境对橡胶节点的刚度和疲劳性能均有不利影响。通过配方设计和工艺调整可保证该橡胶节点在高温下的运用。为进一步验证产品的可靠性，除 14 天的常规静态热老化试验外，还分别进行了常温（23 ℃）和高温（70 ℃）动态疲劳试验，疲劳试验条件如表 5 所示，疲劳试验结果如表 6 和表 7 所示。

表 5　电机悬挂橡胶节点疲劳试验条件

Table 5　Fatigue test conditions of the rubber bushing for suspended motor

项点	载荷	频率/Hz	次数/(×10^{4}次)
常温轴向	0 ~ 8 kN	2 ~ 5	200
常温径向	0 ~ 10 kN	2 ~ 5	200
常温扭转	0 ~ 2 °	2 ~ 5	200
常温偏转	0 ~ 2 °	2 ~ 5	200
70 ℃轴向	0 ~ 8 kN	2 ~ 5	300
70 ℃径向	0 ~ 10 kN	2 ~ 5	300

表 6　电机悬挂橡胶节点常温疲劳试验结果

Table 6　Fatigue test results of the rubber bushing for suspended motor at room temperature

项目	径向刚度/(kN·mm^{-1})	径向刚度变化率/%	轴向刚度/(kN·mm^{-1})	轴向刚度变化率/%
试验前	27.8		11.3	
试验后	26.6	-4.3	10.5	-7.1

表 7　电机悬挂橡胶节点高温疲劳试验结果

Table 7　Fatigue test results of the rubber bushing for suspended motor at high temperature

项目	径向刚度/(kN·mm^{-1})	径向刚度变化率/%	轴向刚度/(kN·mm^{-1})	轴向刚度变化率/%
试验前	28.5		11.6	
试验后	34.1	19.6	13.7	18.1

疲劳试验后，节点外观良好，橡胶表面未见异常裂口，橡胶与金属件之间未见开胶等现象。由表 6 和表 7 可知，常温 23 ℃下疲劳试验后橡胶节点径向刚度和轴向刚度均降低，高温 70 ℃下疲劳试验后橡胶节点径向刚度和轴向刚度均出现较大幅度增加。这主要是因为在常温疲劳试验中，由于橡胶应力损伤导致刚度呈现下降趋势；而在高温疲劳试验中，温度成为刚度变化的主要影响因素，高温空气环境使橡胶发生热氧老化反应，橡胶分子链进一步发生交联反应[12]，橡胶硬度增加，而硬度直接影响橡胶力学性能，从而导致刚度增加。

试验前后刚度变化率均小于 20%，验证了该轴向组合式橡胶节点的可靠性。

3.3　装车运用

目前，该结构电机悬挂橡胶节点已装车运行 100 万 km，产品外观良好，性能稳定，满足装车要求，服役产品实物图片和实际装车图片如图 15 所示。



图 15　服役产品实物图片和实际装车图片

Fig. 15　Actual pictures of service products and actual loading

4　结论

本文设计的轴向组合式电机悬挂橡胶节点能在较小的几何空间内实现小的径向/轴向刚度比，且该结构具有橡胶预压缩简便、刚度范围可调和二次加工成本低等特点。

通过疲劳试验和运用经验证明该结构橡胶节点具有良好的抗疲劳性能和承载能力，满足技术要求，是一种值得推广的橡胶节点结构，可广泛应用于城轨列车、高速列车和工程机械领域。

参考文献：

[1]　龚积球 . 橡胶件的工程设计及应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
GONG Jiqiu. Engineering design and applicattion with rubber components[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2003.

[2]　刘丽, 张卫华, 黄光速, 等 . 高速列车用橡胶减振垫研制及试验研究[J]. 现代制造工程, 2015(12): 86-92.
LIU Li, ZHANG Weihua, HUANG Guangsu, et al. Development and experimental study of a rubber damping pad on the high-speed train[J]. Modern manufacturing engineering, 2015(12): 86-92.

[3] 张亚新, 黄友剑, 程海涛. 轨道交通橡胶元件研发领域中关键技术的应用与发展[J]. 铁道机车车辆, 2013, 33(增刊1): 10-14.
ZHANG Yaxin, HUANG Youjian, CHENG Haitao. Application and development of key techniques of rubber component in research field of rail transit[J]. Railway locomotive & car, 2013, 33(Suppl 1): 10-14.

[4] 张春良, 袁贵根, 张亚新, 等. 轴向组合式小径向/轴向刚度比橡胶球铰结构介绍[J]. 铁道车辆, 2010, 48(3): 20-23.
ZHANG Chunliang, YUAN Guigen, ZHANG Yaxin, et al. Description of the axial composite rubber ball joint structure with small radial/axial stiffness ratio[J]. Rolling stock, 2010, 48(3): 20-23.

[5] 刘海军. 高速列车牵引变压器系统隔振仿真计算[J]. 科学技术创新, 2018(26): 30-31.
LIU Haijun. Vibration isolation simulation of traction transformer system of high-speed train[J]. Scientific and technological innovation, 2018(26): 30-31.

[6] 潘文彬, 李永涛, 张春良, 等. 锯齿啮合橡胶关节结构介绍[J]. 铁道机车车辆, 2014, 34(3): 32-34.
PAN Wenbin, LI Yongtao, ZHANG Chunliang, et al. Introduction of serration meshed rubber bushing[J]. Railway locomotive & car, 2014, 34(3): 32-34.

[7] 尹素仙, 肖世武, 黄友剑, 等. 预压缩对橡胶球铰疲劳寿命的影响[J]. 机械强度, 2012, 34(3): 384-388.
YIN Suxian, XIAO Shiwu, HUANG Youjian, et al. Effect of pre-compression on fatigue life of rubber bushing[J]. Journal of mechanical strength, 2012, 34(3): 384-388.

[8] 荣继刚, 黄友剑, 唐先贺, 等. 预压量对橡胶球铰综合性能的影响[J]. 特种橡胶制品, 2006, 27(2): 36-39.
RONG Jigang, HUANG Youjian, TANG Xianhe, et al. Effect of pre-compression on comprehensive performance of rubber bushing[J]. Special purpose rubber products, 2006, 27(2): 36-39.

[9] 孟兆荣, 李儒剑, 朱闰平, 等. 一种牵引杆球铰椭圆度的改善方法[J]. 橡胶工业, 2012, 59(11): 683-686.
MENG Zhaorong, LI Rujian, ZHU Runping, et al. Method of improving ellipticity of traction link bush[J]. China rubber industry, 2012, 59(11): 683-686.

[10] 刘山尖, 孙伟星, 董兴建. 基于有限元模型的橡胶减振元件性能研究及失效分析[J]. 机电设备, 2014, 31(5): 41-44.
LIU Shanjian, SUN Weixing, DONG Xingjian. Performance study and failure analysis of rubber isolator based on FE model[J]. Mechanical and electrical equipment, 2014, 31(5): 41-44.

[11] 张良, 李忠华, 马新强. 橡胶Mooney-Rivlin超弹性本构模型的参数特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(增刊1): 427-430.
ZHANG Liang, LI Zhonghua, MA Xinqiang. Study on parameter characteristics of rubber Mooney-Rivlin model[J]. Noise and vibration control, 2018, 38(Suppl 1): 427-430.

[12] 丁玲, 李志辉, 杨慧, 等. 天然橡胶的老化机理[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(5): 76-83.
DING Ling, LI Zhihui, YANG Hui, et al. Aging mechanism of natural rubber[J]. Polymer materials science & engineering, 2018, 34(5): 76-83.

Design of a new type of rubber bushing with small radial-to-axial stiffness ratio

NI Yanqiang, SHAO Haicheng, YANG Jingyi, FAN Lingju, LIU Zhiguo

(CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266031, China)

Abstract: A new type of motor rubber bushing with small radial-to-axial stiffness ratio for high-speed EMUs was designed to meet the installation requirements of motor suspension for a certain high-speed train unit. Through finite element simulation analysis, static stiffness test, fatigue test and running verification, the results show that rubber bushing with this structure can meet the technical requirements, and the pre-compression of rubber is simple and effective, the stiffness range is adjustable, the fatigue performance is good, and it can meet the high temperature tolerance of the motor operating environment.

Keywords: rubber bushing; radial-to-axial stiffness ratio; finite element; fatigue; high speed train

收稿日期：2021-12-07；修回日期：2022-11-24