

测试·分析

基于回归分析的机车车辆用橡胶关节 径向刚度检测方法

梁健瑶,王喜利,邓梦君,林 胜,翟继芹,杨 方,苏志敏

(株洲时代新材料科技股份有限公司,湖南 株洲 412007)

摘要:通过数据分析发现,机车车辆用整体式橡胶关节径向刚度(有套筒工装)与轴向刚度(无套筒工装)之间和有/无套筒工装的径向刚度之间具有线性相关性,通过回归分析获得整体式橡胶关节径向刚度与轴向刚度之间和有/无套筒工装径向刚度之间的回归方程。径向预压式橡胶关节及轴向预压式橡胶关节径向刚度与压装刚度也具有线性相关性,可通过回归方程以橡胶关节压装刚度计算其径向刚度。本回归分析方法可以提高橡胶关节径向刚度的检测效率,拟合偏差在±5%以内。

关键词:机车车辆;橡胶关节;径向刚度;刚度检测;回归分析;线性相关

中图分类号:TQ336.4⁺2;TQ330.7⁺2

文献标志码:A

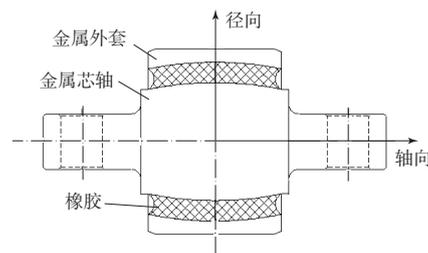
文章编号:1000-890X(2021)07-0538-08

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2021.07.0538



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

橡胶关节,又名橡胶节点、橡胶球铰,是一种典型的橡胶、金属复合弹性元件,其结构有整体式(见图1)、径向预压式(见图2)和轴向预压式(见图3),包括金属芯轴、金属外套和橡胶3部分^[1-6]。其具有抗冲击、可吸收高频振动和噪声的特点,主要用于机械装置中的柔性连接、牵引及减振场所^[7-11]。



(a) 结构示意图

1 橡胶关节径向刚度检测现状

1.1 整体式

检测整体式橡胶关节径向刚度^[12-17]时,为了模拟其实际应用工况,避免直接加载时金属外套变形(见图4)影响检测结果,一般情况下,橡胶关节需压入套筒工装(见图5),以保持金属外套不变形。检测结束后,将橡胶关节从套筒工装中压出。

套筒工装的径向过盈压入和压出,导致橡胶关节径向刚度检测效率低,同时造成橡胶关节表面出现损伤现象(见图6),常常致使橡胶关节



(b) 实物照片

图1 整体式橡胶关节
Fig. 1 Integral rubber joint

报废。

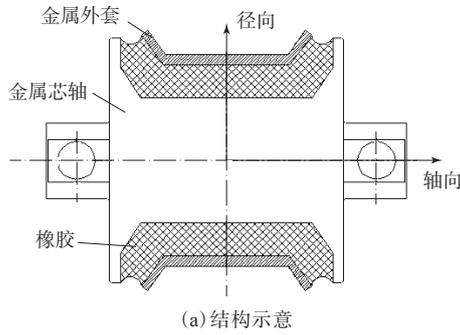
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11572275)

作者简介:梁健瑶(1984—),男,广西贵港人,株洲时代新材料科技股份有限公司工程师,硕士,主要从事质量管理和控制工作。

E-mail:liangjianyao@csrzc.com

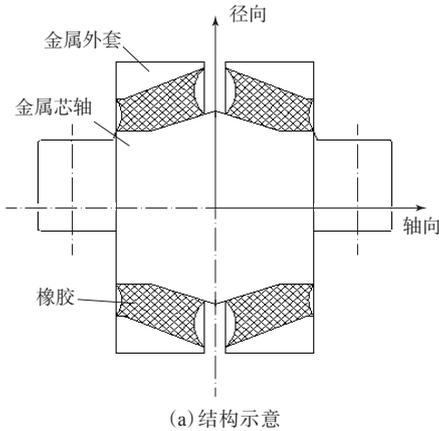
引用本文:梁健瑶,王喜利,邓梦君,等.基于回归分析的机车车辆用橡胶关节径向刚度检测方法[J].橡胶工业,2021,68(7):538-545.

Citation: LIANG Jianyao, WANG Xili, DENG Mengjun, et al. Radial stiffness measuring method of rubber joint for rolling stock based on regression analysis[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(7): 538-545.



(b) 实物照片

图2 径向预压式橡胶关节
Fig. 2 Radial preloaded rubber joint



(b) 实物照片

图3 轴向预压式橡胶关节
Fig. 3 Axial preloaded rubber joint

1.2 径向预压式

检测径向预压式橡胶关节径向刚度时,需要先使用压装工装(见图7)以及螺栓使其径向抱

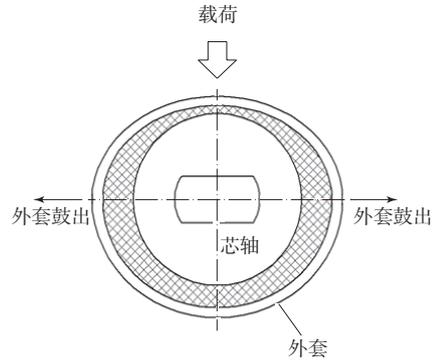
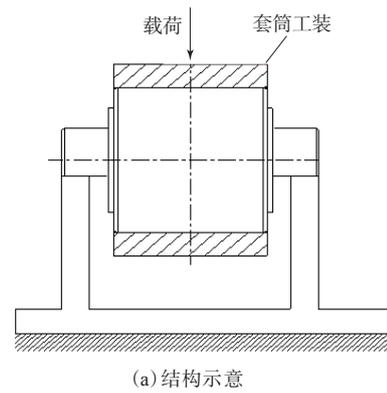


图4 直接加载时整体式橡胶关节外套变形
Fig. 4 Deformation of integral rubber joint sleeve under direct loading



(b) 实物照片

图5 整体式橡胶关节径向刚度检测套筒工装
Fig. 5 Sleeve tooling for measuring radial stiffness of integral rubber joint

紧,才能模拟实际使用工况,进行径向刚度检测(见图8)。该方法用螺栓紧固,装、拆效率低。

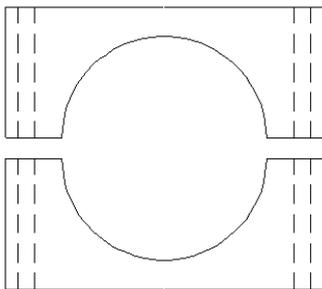
1.3 轴向预压式

检测轴向预压式橡胶关节径向刚度时,需要将橡胶关节压入套筒工装(见图5),或者当金属外套壁较厚时(检测时不变形)使用压装工装

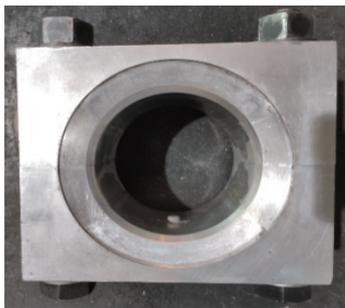


图6 整体式橡胶关节的表面损伤

Fig. 6 Surface damage of integral rubber joint



(a) 结构示意图



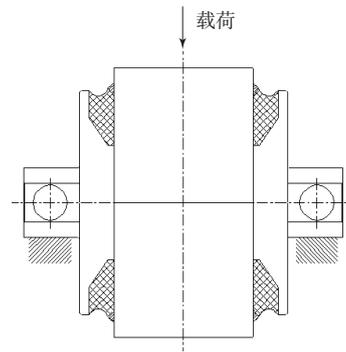
(b) 实物照片

图7 径向预压式橡胶关节径向刚度检测压装工装

Fig. 7 Press tooling for measuring radial stiffness of radial preloaded rubber joint

以及螺栓使其轴向合拢(见图9),才能模拟实际使用工况,进行径向刚度检测。该方法橡胶关节在压入套筒工装时易造成表面损伤,同时用螺栓紧固,装、拆效率低。

在大批量橡胶关节径向刚度的检测中,上述方法存在的检测效率和成本问题尤为突出。鉴于此,本工作提出基于回归分析的机车车辆用橡胶关节径向刚度新检测方法。



(a) 结构示意图



(b) 实物照片

图8 径向预压式橡胶关节径向刚度检测

Fig. 8 Measuring of radial stiffness of radial preloaded rubber joint



图9 轴向预压式橡胶关节使用压装工装轴向合拢

Fig. 9 Axial closing of axial preloaded rubber joint with press tooling

2 橡胶关节径向刚度新检测方法

2.1 整体式橡胶关节

2.1.1 用轴向刚度计算径向刚度

2.1.1.1 方法一

收集整体式橡胶关节使用套筒工装情况下的径向刚度与不使用套筒工装情况下的轴向刚度

(见图10)数据,数据通常要求多于25组(见表1)。

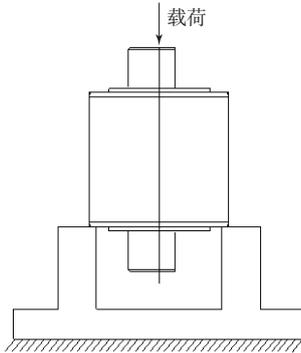


图10 整体式橡胶关节轴向刚度检测示意

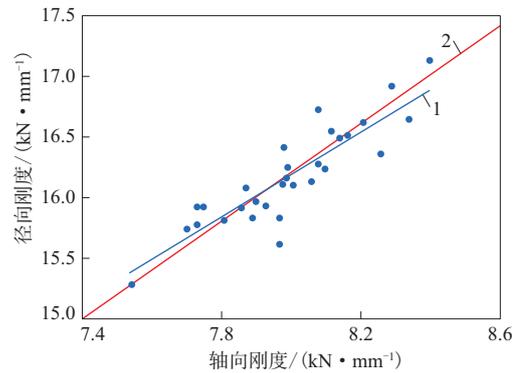
Fig. 10 Measuring of axial stiffness of integral rubber joint

表1 整体式橡胶关节的径向刚度和轴向刚度

Tab. 1 Radial stiffness and axial stiffness of integral rubber joints $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$

序号	径向刚度 (有套筒)	轴向刚度 (无套筒)	序号	径向刚度 (有套筒)	轴向刚度 (无套筒)
1	15.82	7.89	16	17.12	8.40
2	16.08	8.01	17	16.23	7.99
3	15.61	7.97	18	16.60	8.21
4	15.90	7.86	19	16.40	7.98
5	16.50	8.14	20	15.81	7.81
6	15.92	7.73	21	16.91	8.29
7	15.88	7.73	22	16.28	8.08
8	15.96	7.90	23	16.35	8.26
9	15.73	7.70	24	15.92	7.93
10	15.91	7.75	25	16.64	8.34
11	16.72	8.08	26	16.11	7.98
12	16.54	8.12	27	16.07	7.87
13	15.78	7.73	28	16.23	8.10
14	16.13	8.06	29	15.29	7.54
15	15.83	7.97	30	16.48	8.16

进行整体式橡胶关节径向刚度(此处指有套筒工装径向刚度)与轴向刚度(此处指无套筒工装轴向刚度)的相关性及回归分析^[18],得到橡胶关节径向刚度与轴向刚度的Pearson相关因数为0.882, P 值为0,小于0.05,可以判断橡胶关节径向刚度与轴向刚度线性相关,如图11所示。



1—拟合线;2—比率线。

图11 整体式橡胶关节径向刚度与轴向刚度的散点及拟合线和比率线

Fig. 11 Scatters and fitting line and ratio line of radial stiffness and axial stiffness of integral rubber joints

采用最小二乘法求得整体式橡胶关节径向刚度与轴向刚度的线性回归方程,得到 $y = 2.247 + 1.742x_1$ (y 为径向刚度, x_1 为轴向刚度)。使用方差分析法对回归方程的显著性进行检验,评估残差标准差是否能够被接受,使用 t 值检验法对回归系数的显著性进行检验,使用图形法进行残差诊断(残差的正态概率曲线符合正态分布,残差对于观测顺序、拟合值以及自变量散点整体呈水平矩形分布,无“喇叭口”、“弯曲”、递增或递减),最终判定该回归方程与相关刚度数据拟合较好,回归方程可以使用。

检测整体式橡胶关节轴向刚度和径向刚度,以验证回归方程。利用上述回归方程,可计算得到橡胶关节径向刚度计算值与实测值之间的偏差,具体如表2所示。

2.1.1.2 方法二

在整体式橡胶关节硬度无穷小的情况下,其径向刚度与轴向刚度理论上同时为0。方法一中所述的回归方程拟合效果在一定范围内尚可,但方程直线未经过原点(0,0)。造成该现象的原因是因为数据收集的样本未能覆盖所有刚度范围,实际

表2 整体式橡胶关节径向刚度计算值偏差对比

Tab. 2 Comparison of calculated value deviations of radial stiffness of integral rubber joints

径向刚度实测值/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	轴向刚度实测值/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	回归方程径向刚度计 算值/($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	回归方程径向刚度 计算值偏差/%	径轴比方程径向刚度 计算值/($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	径轴比方程径向刚 度计算值偏差/%	橡胶邵尔A 型硬度/度
16.51	8.33	16.76	1.51	16.85	2.06	56
21.31	10.92	21.27	-0.19	22.09	3.66	59
17.17	8.33	16.76	-2.39	16.85	-1.86	—
17.99	8.95	17.84	-0.83	18.11	0.67	—

应用中没有较低刚度的橡胶关节,在数据量有限的情况下,回归拟合存在偏差。

从表1可以得出,整体式橡胶关节轴向刚度均值为7.986,径向刚度均值为16.158。在图11散点的基础上增加(0,0)到(7.986,16.158)的直线段并延长,可得到径向刚度与轴向刚度的比率线,如图11中直线2所示。该直线斜率(径向刚度均值/轴向刚度均值,即径向刚度与轴向刚度的比率,简称径轴比)为2.023。该径轴比方程为 $y=2.023x_1$,截距为0。

以检测的整体式橡胶关节轴向刚度和径向刚度验证径轴比方程。利用径轴比方程($y=2.023x_1$)计算得到径向刚度,并与回归方程($y=2.247+1.742x_1$)计算的径向刚度对比,两种方法的计算值与实测值之间的偏差均小于5%,偏差程度相当,具体如表2所示。

因此,整体式橡胶关节径向刚度与轴向刚度之间存在线性相关性;在数据收集过程中,应尽可能选择不同批次的样本,样本刚度覆盖范围尽可能大,这样有利于提高回归拟合精度;若获得的径向刚度与轴向刚度实测值数据少(例如少于10组),回归拟合效果可能较差,此时推荐使用径轴比方程计算橡胶关节的径向刚度。由表2可知,在结构和工艺不变的情况下,回归方程对橡胶关节橡胶硬度的波动不敏感,适用于不同橡胶硬度的橡胶关节。

2.1.2 用无套筒工装径向刚度计算有套筒工装径向刚度

将载荷直接加载到整体式橡胶关节的金属外套上,由于金属外套变形(见图4),此时获得的径向刚度与有套筒工装径向刚度有偏差,数据如表3所示。

进行整体式橡胶关节有/无套筒工装径向刚度的相关及回归分析,获得回归方程为 $y=2.603+0.212x_2$ (x_2 为无套筒工装径向刚度),橡胶关节有/无套筒工装径向刚度散点及拟合线如图12所示。

检测有/无套筒工装整体式橡胶关节径向刚度,利用上述回归方程进行验证,计算得到橡胶关节有套筒工装径向刚度计算值与实测值之间的偏差,如表4所示。

表3 整体式橡胶关节有/无套筒工装径向刚度
Tab.3 Radial stiffness of integral rubber joints with or without sleeve tooling $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$

序号	径向刚度 (无套筒)	径向刚度 (有套筒)	序号	径向刚度 (无套筒)	径向刚度 (有套筒)
1	18.66	6.83	14	21.31	7.05
2	18.38	6.65	15	20.94	7.03
3	18.87	6.89	16	16.66	5.88
4	20.82	7.16	17	20.45	6.79
5	19.53	6.45	18	16.88	6.12
6	19.46	6.94	19	19.54	6.85
7	20.63	6.68	20	20.25	7.08
8	19.48	6.82	21	21.20	6.85
9	17.71	6.42	22	20.35	6.79
10	18.41	6.21	23	16.63	5.98
11	18.29	6.67	24	18.24	6.61
12	18.62	6.34	25	20.91	7.19
13	20.76	6.94			

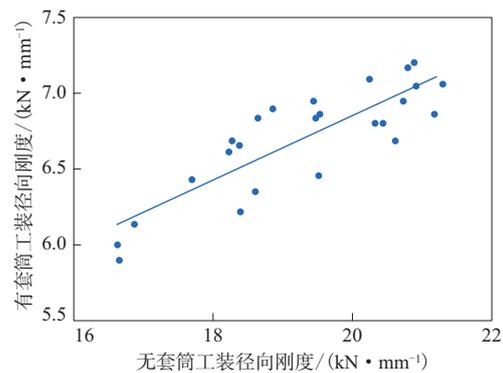


图12 整体式橡胶关节有/无套筒工装径向刚度散点及拟合线
Fig.12 Scatters and fitting line of radial stiffness of integral rubber joints with or without sleeve tooling

表4 整体式橡胶关节有套筒工装径向刚度计算值与实测值对比

Tab.4 Comparison of calculated values and measured values of radial stiffness of integral rubber joints with sleeve tooling

径向刚度实测值/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)		径向刚度(有套筒) 计算值/ $(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	径向刚度(有套筒) 计算值偏差/%
无套筒	有套筒		
19.01	6.52	6.63	1.69
20.53	7.15	7.00	-2.10

2.2 径向预压式橡胶关节(用压装刚度计算径向刚度)

径向预压式橡胶关节不使用螺栓紧固,直接加载使压装工装径向合拢抱紧(见图13),此过程的橡胶关节刚度称为压装刚度,计算荷载在10~20 kN之间的橡胶关节压装刚度。橡胶关节径向合拢抱紧过程的载荷-位移曲线如图14所示。

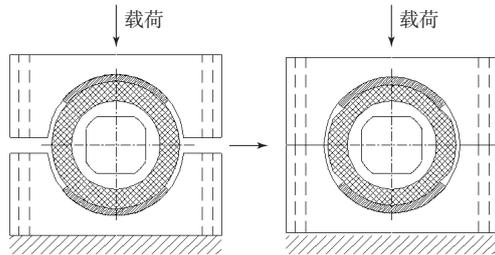


图13 加载使径向预压式橡胶关节压装工装径向合拢抱紧
Fig. 13 Radial closing and holding of press tooling of radial preloaded rubber joint under loading

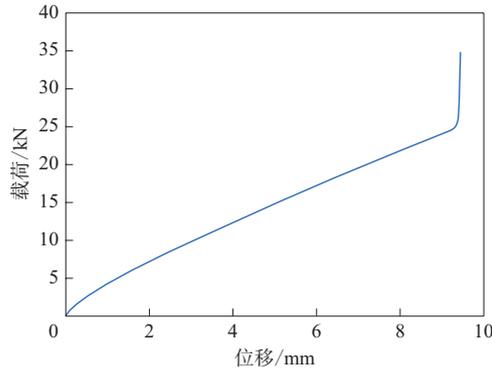


图14 径向预压式橡胶关节径向压装抱紧过程的
载荷-位移曲线
Fig. 14 Load-displacement curve of radial preloaded rubber joint in radial pressing and holding process

再按常规方法检测螺栓拧紧后径向预压式橡胶关节径向刚度(数据多于25组),橡胶关节压装刚度与径向刚度散点及拟合线如图15所示,分析后获得橡胶关节用压装刚度计算径向刚度的回归方程为 $y=3.570+3.753x_3$ (x_3 为压装刚度)。

检测橡胶关节压装刚度和径向刚度,对回归方程 $y=3.570+3.753x_3$ 进行验证,橡胶关节径向刚度计算值与实测值之间偏差如表5所示。

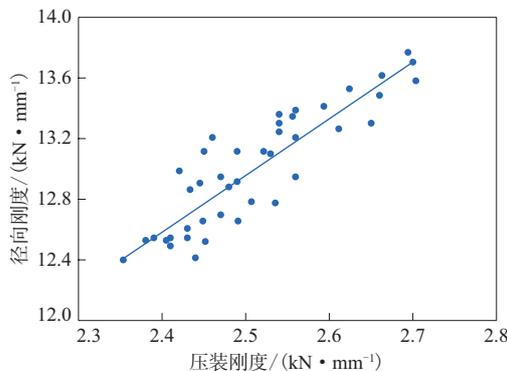


图15 径向预压式橡胶关节径向刚度与压装刚度的散点及拟合线
Fig. 15 Scatters and fitting line of radial stiffness and press fitting stiffness of radial preloaded rubber joints

表5 径向预压式橡胶关节径向刚度计算值与实测值对比

Tab.5 Comparison of calculated values and measured values of radial stiffness of radial preloaded rubber joints

径向刚度实测值/ (kN·mm ⁻¹)	压装刚度实测值/ (kN·mm ⁻¹)	径向刚度计算值/ (kN·mm ⁻¹)	径向刚度计算 值偏差/%
13.39	2.53	13.07	-2.40
13.12	2.59	13.29	1.30

2.3 轴向预压式橡胶关节(用压装刚度计算径向刚度)

轴向加载可使轴向预压式橡胶关节外套合拢(见图16),此过程的橡胶关节刚度也为压装刚度,计算荷载在4~9 kN之间的橡胶关节压装刚度。橡胶关节载荷-位移曲线如图17所示。

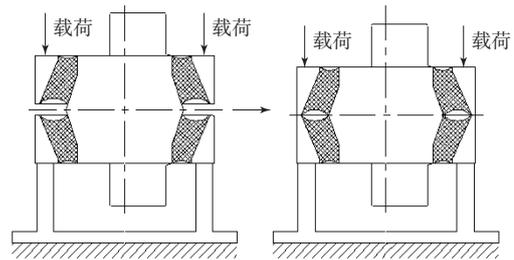


图16 轴向加载使轴向预压式橡胶关节外套合拢
Fig. 16 Closing of axial preloaded rubber joint sleeve under axial loading

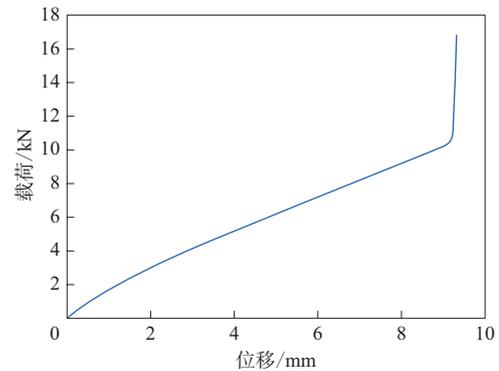


图17 轴向预压式橡胶关节轴向加载合拢过程
载荷-位移曲线
Fig. 17 Load-displacement curve of axial preloaded rubber joint in axial loading and closing process

再使用套筒工装按常规方法检测轴向预压式橡胶关节径向刚度(数据多于25组)。橡胶关节压装刚度与径向刚度散点及拟合线如图18所示,分析后获得回归方程为 $y=-31.54+61.02x_3$ 。

检测橡胶关节压装刚度和径向刚度,对回归方程($y=-31.54+61.02x_3$)进行验证,橡胶关节径向刚度计算值与实测值之间偏差如表6所示。

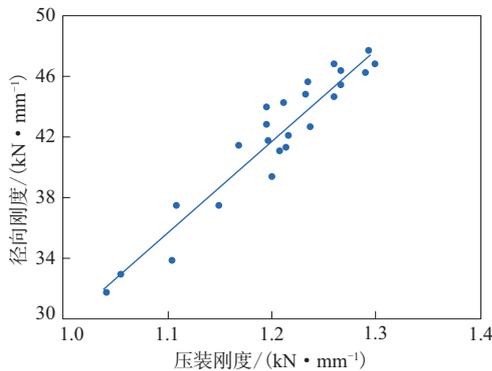


图18 轴向预压式橡胶关节径向刚度与压装刚度的散点及拟合线

Fig. 18 Scatters and fitting line of radial stiffness and press fitting stiffness of axial preloaded rubber joints

表6 轴向预压式橡胶关节径向刚度计算值与实测值对比
Tab. 6 Comparison of calculated values and measured values of radial stiffness of axial preloaded rubber joints

径向刚度实测值/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	压装刚度实测值/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	径向刚度计算值/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	径向刚度计算 值偏差/%
42.00	1.23	43.51	3.60
39.19	1.14	38.02	-3.00

3 结论

对机车车辆3类橡胶关节的径向刚度检测方法进行了研究。通过数据分析发现,整体式橡胶关节径向刚度与轴向刚度之间存在线性相关性;整体式橡胶关节有/无套筒工装情况下的径向刚度之间存在线性相关性;径向预压式橡胶关节和轴向预压式橡胶关节压装刚度与径向刚度之间存在线性相关性。通过回归分析获得橡胶关节各项刚度之间的回归方程,利用回归方程可简化检测方法:对橡胶关节只进行最简单项点的刚度检测,即可通过回归方程计算橡胶关节的径向刚度,拟合偏差在 $\pm 5\%$ 以内;同时,整体式橡胶关节和轴向预压式橡胶关节径向刚度检测不使用套筒工装,径向和轴向预压式橡胶关节径向刚度检测不使用螺栓紧固,提升了检测效率,可避免橡胶关节样品损伤报废,降低鉴定成本,大批量检测橡胶关节时效果显著。

对于整体式橡胶关节径向刚度与轴向刚度之间的拟合,在数据较少时(少于10组),推荐使用径轴比方程来建立关系。

在结构和工艺不变的情况下,回归方程对橡胶关节橡胶硬度的波动不敏感,不同橡胶硬度的

橡胶关节均适用。

回归分析方法可推广至橡胶关节的其他刚度,如扭转刚度和偏转刚度检测;也可推广至金属橡胶件,如橡胶弹簧和轨道减振器等刚度检测,用于建立静刚度与动刚度之间的关系;甚至可用于建立橡胶试样与橡胶产品性能之间的关系。回归方程的建立可获得性能检测的新方法,即用简单的方法获取目标检测项点结果。

参考文献:

- [1] 董永,柳禄洪,黄友剑,等.某型直线电机转向架用一系橡胶牵引节点优化设计[J].机车电传动,2019(2):103-106.
DONG Y, LIU L Y, HUANG Y J, et al. Optimum design of primary rubber traction joints for a linear motor bogie[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(2):103-106.
- [2] 黄五羊,易培芳,林柏兵.HXD1D型客运机车橡胶关节新型压装工艺研究[J].技术与市场,2017,24(4):31-33.
HUANG W Y, YI P F, LIN B B. Research on new press fit technology of rubber joint of HXD1D passenger locomotive[J]. Technology and Market, 2017, 24(4):31-33.
- [3] 李密,郭平波,王玮,等.轴箱转臂定位节点温变特性对车辆动力学性能的影响[J].噪声与振动控制,2018,38(4):111-115.
LI M, WU P B, WANG W, et al. Influence of temperature varying characteristic of axle-box tumbler rubber nodes on vehicle's dynamics performance[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(4):111-115.
- [4] 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,2020,67(5):323-329.
PAN F, PENG L Q, LIN D W, et al. Influence of low temperature and frequency on stiffness of rubber elastic components[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(5):323-329.
- [5] 蔡鹏飞.空心轴橡胶关节外壁折弯工艺分析及工装优化设计[J].技术与市场,2020,27(5):25-26.
CAI P F. Bending process analysis and tooling optimization design of hollow shaft rubber joint outer wall[J]. Technology and Market, 2020, 27(5):25-26.
- [6] 彭立群,林达文,王叶青,等.低温对橡胶弹性元件传递率和固有频率的影响[J].铁道机车车辆,2018,38(6):55-60.
PENG L Q, LIN D W, WANG Y Q, et al. Influence of low temperature on the transmission rate and natural frequency of rubber elastic components[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(6):55-60.
- [7] 曹广如.橡胶减振球铰制造工艺研究与应用[D].长沙:国防科学技术大学,2016.
CAO G R. Research and application of manufacturing technology of rubber damping ball hinge[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- [8] 王旭,彭畅,张宝安,等.橡胶节点对全主动液压减振器的影响[J].液压与气动,2017(11):36-40.
WANG X, PENG C, ZHANG B A, et al. Influence of rubber joint

- on active hydraulic shock absorber[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017(11):36-40.
- [9] 黄建松,张昕,王震,等.橡胶节点在制动夹钳单元中的应用与改进[C].和谐共赢 创新发展——旅客列车制动技术交流会论文集.北京:中国铁道学会车辆委员会,2017:6.
HUANG J S, ZHANG X, WANG Z, et al. Application and improvement of rubber joint in brake clamp unit[C]. Harmonious win-win and innovative development—symposium on passenger train braking technology. Beijing:Rolling Stock Committee of China Railway Society, 2017:6.
- [10] AIDA K I,王冰玥.可以降低车体垂向振动的抗蛇行减振器位移型橡胶节点的开发[J].国外铁道车辆,2018,55(3):28-33.
AIDA K I, WANG B Y. Development of the displacement-dependent rubber bush for yaw damper to prevent carbody vertical vibration[J]. Foreign Rolling Stock, 2018, 55(3):28-33.
- [11] 赵光贤,王迪钧,魏邦柱.橡胶工业手册(修订版)第七分册生活橡胶制品[M].北京:化学工业出版社,1989.
- [12] 中国铁道科学研究院标准计量研究所.机车车辆用橡胶弹性元件通用技术条件:TB/T 2843—2015[S].北京:中国铁道出版社,2016:8-12.
CARS Standard and Metrology Research Insitution. General technical requirement for rolling stock rubber to metal parts:TB/T 2843—2015[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016:8-12.
- [13] 王进,张志强,彭立群,等.轴向橡胶垫静刚度试验的探讨[J].橡胶科技市场,2008,6(21):28-29.
WANG J, ZHANG Z Q, PENG L Q, et al. Study on static stiffness test of axis rubber cushion[J]. China Rubber Science and Technology Market, 2008, 6(21):28-29.
- [14] 刘建勋,卜继玲.轨道车辆转向架橡胶弹性元件应用技术[M].北京:中国铁道出版社,2012:234-235.
LIU J X, BU J L. Application technology of rubber elastic elements for rail vehicle bogies[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012:234-235.
- [15] 李心,王永冠,左斌,等.试验工装对橡胶球铰径向刚度检测的影响[J].特种橡胶制品,2013,34(5):48-51.
LI X, WANG Y G, ZUO B, et al. Influence of test tooling on radial stiffness detection of rubber ball hinge[J]. Special Purpose Rubber Products, 2013, 34(5):48-51.
- [16] 刘晓倩,潘锋,林达文,等.铁道车辆用橡胶球铰试验设计与研究[J].特种橡胶制品,2018,39(2):56-60.
LIU X Q, PAN F, LIN D W, et al. Experimental design and Research on rubber spherical hinge for railway vehicles[J]. Special Purpose Rubber Products, 2018, 39(2):56-60.
- [17] 王叶青.典型橡胶弹性元件的性能分析及其实验工装设计[D].株洲:湖南工业大学,2012.
WANG Y Q. Performance analysis and experimental tooling design of typical rubber elastic components[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2012.
- [18] 马逢时,周晖,刘传冰.六西格玛管理统计指南:MINITAB使用指导[M].北京:中国人民大学出版社,2018:291-312.
MA F S, ZHOU W, LIU C B. Six sigma management statistics guide: MINITAB use guide[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2018:291-312.

收稿日期:2021-01-27

Radial Stiffness Measuring Method of Rubber Joint for Rolling Stock Based on Regression Analysis

LIANG Jianyao, WANG Xili, DENG Mengjun, LIN Sheng, ZHAI Jiqin, YANG Fang, SU Zhimin

(Zhuzhou Times New Materials Technology Co., Ltd, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Through data analysis, it was found that there were linear correlations between the radial stiffness (with sleeve tooling) and the axial stiffness (without sleeve tooling) of the integral rubber joint for rolling stock, and between the radial stiffness with sleeve tooling and the radial stiffness without sleeve tooling of the integral rubber joint. Through regression analysis, the regression equations between the radial stiffness and the axial stiffness of the integral rubber joint, and the radial stiffness (with sleeve tooling) and the radial stiffness (without sleeve tooling) of the integral rubber joint were obtained. The radial stiffness and press fitting stiffness of the radial preloaded rubber joint and axial preloaded rubber joint were also linearly related, and the radial stiffness of the rubber joint could be calculated by the press fitting stiffness through the regression equations. This regression analysis method could improve the measuring efficiency of the radial stiffness of the rubber joint, and the fitting deviation was within $\pm 5\%$.

Key words: rolling stock; rubber joint; radial stiffness; stiffness measurement; regression analysis; linear correlation