

地铁车辆轮径差限值的研究

郭燕辉

(北京市地铁运营有限公司, 100044, 北京//高级工程师)

摘要 轮径差限值是地铁车辆运用及维护中重要的检查指标,对车辆运营的安全性及车辆维护成本等有较大影响,车轮磨损产生的轮径差变化会对车辆的牵引系统及制动系统性能,以及动力学性能等产生较大的影响。分析新造地铁车辆及运用状态下车辆的轮径差限值发现,用户对新造车辆的轮径差要求基本一致,差别不大。分析了牵引系统和制动系统采用车控模式和架控模式时对地铁车辆的轮径差要求。分析结果表明:架控模式下,同一辆车的前后转向架的较大轮径差对车辆动力学性能影响不大,对牵引系统和制动系统性能基本无影响。建议运营单位可逐步放宽对架控模式下同一辆车前后转向架的最大轮径差限值要求,并对车辆状态进行监控和分析,以最终确定同一辆车前后转向架的轮径差限值要求。

关键词 地铁;车辆;轮径差

中图分类号 U270.331⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.04.010

Research on Wheel Diameter Difference Limit Value of Metro Vehicle

GUO Yanhui

Abstract The wheel diameter difference limit value is an important inspection index for metro vehicle operation and maintenance, having profound influence on vehicle operation safety and vehicle maintenance cost. The wheel diameter difference change caused by wheel wear will have large impact on vehicle traction system, braking system and dynamics performance. After analyzing the wheel diameter difference limit value of newly built metro vehicles and vehicles in operation, it is discovered that users have practically the same requirements for wheel diameter difference of newly built vehicles. The wheel diameter difference requirements under vehicle control mode and frame control mode of traction system and braking system are analyzed, and results show that under frame control mode, the larger wheel diameter difference of front and rear bogies in one vehicle has little impact on vehicle dynamics performance and basically no impact on traction system and braking system performance. It is suggested that the operation units can gradually release requirements on maximum wheel diameter differ-

ence limit value of front and rear bogies of the same vehicle under frame control mode, while monitoring and analyzing the vehicle status to finally determine the wheel diameter difference limit requirements for the front and rear bogies of the same vehicle.

Key words metro; vehicle; wheel diameter difference

Author's address Beijing Subway Operation Co., Ltd., 100044, Beijing, China

受车轮机械加工精度影响,地铁车辆出厂时,车轮不可避免地存在轮径差。车辆轮径差主要包括同一轮对轮径差、同一转向架轮径差和同一辆车轮径差等3类。随着车辆运用时间的增加,上述3类轮径差也会不断变化,进而会对车辆的牵引系统及制动系统性能,以及动力学性能等产生较大的影响。

目前,关于轨道交通车辆轮径差的影响已有大量的研究。文献[1]对交流传动城市轨道交通动车轮径允差进行了研究;文献[2]进行了地铁车辆轮径差对牵引系统的影响及相应保护措施的相关研究;文献[3]开展了组合轮径差对地铁车辆动力学性能影响的研究;文献[4]研究了轮径差引起地铁车辆轮对磨损,对不同类型轮径差下轮对的蠕滑力、磨耗功及轮轨接触关系进行了仿真分析。

文献[1-4]的研究主要集中在轮径差对车辆特性方面的影响,而未对地铁车辆新造及运用过程中的轮径差限值进行系统性的研究,尤其是针对牵引和制动采用架控的地铁车辆的轮径差限值尚未开展研究。对于地铁运营单位而言,轮径差限值是地铁车辆运用及维护中的重要检查指标,对车辆运营的安全性及车辆维护成本等有较大影响。由此,本文将对车辆新造及运用过程中的轮径差限值进行系统性分析,为我国地铁运营单位的相关工作提供参考。

1 新造地铁车辆的轮径差限值

目前,全国地铁车辆的招标用户需求书均对新

造地铁车辆的同一轴轮径差 d_1 、同一转向架轮径差 d_2 及同一辆车轮径差 d_3 中的 2 项或 3 项进行了规定。结合中国城市轨道交通协会发布的《城市轨道交通 A/B 型电动客车用户需求书(范本)》,梳理北京、上海、天津、深圳、贵阳及重庆等地的若干条线路用户需求书发现,不同的用户需求书对轮径差要求有差异。经统计,用户对不同轮径差的要求主要有 4 种组合类型,详见表 1。

表 1 用户对不同轮径差要求的组合类型
Tab. 1 Combination type required by users different wheel diameter difference

组合类型	d_1 限值	d_2 限值	d_3 限值
组合 1	0.5	2.0	
组合 2	0.5	1.0	2.0
组合 3	1.0	2.0	
组合 4	1.0		2.0

从表 1 中可以看出:对于 d_1 ,有不大于 0.5 mm 和不大于 1.0 mm 两种要求,其中大多数用户需求书要求小于 1.0 mm,深圳等地的少量用户要求不大于 0.5 mm;对于 d_2 ,仅有少量用户要求其不大于 1.0 mm 或 2.0 mm;对于 d_3 ,一般要求不大于 2.0 mm。

车辆制造厂对于新车实际轮径差的控制要求一般为:同一转向架(含同一轴)的轮径差控制在不大于 0.5 mm 范围内, d_3 控制在不大于 2.0 mm 范围内。这样即可满足各用户对新车轮径差的不同要求。

由此可见,与实际运营车辆使用限度要求相比,车辆制造厂对新车轮径差的要求更为严格。这主要基于 3 个方面考虑:

- 1) 目前,车轮的机械加工精度普遍较高,批量生产的车轮轮径差基本可控制在 0.5 mm 内。
- 2) 初始车辆轮径差较小时,可获得较小的车辆轮重分配差,从而缓解后续车轮磨耗带来的较大轮径差。
- 3) 用户对新车牵引加速度及制动加速度的要求较为严苛,若初始轮径差较小,则可获得较为均衡的轮重、轴重分配,可为顺利通过车辆的称重试验提供保证。

从上述分析可以看出,尽管不同用户的地铁车辆招标对车辆轮径差的要求存在差异,各车辆制造厂也均能满足用户的需求。

2 运用中地铁车辆的轮径差限值

地铁车辆经过一段时间的运用后,特别在线路曲线较多或抽屉式运营模式等多种因素影响下,不同车轮踏面圆周磨耗不均的情况较为普遍,从而形成了较大的轮径差。 d_1 、 d_2 及 d_3 的最大值对车辆的牵引性能、制动性能、动力学性能及耐磨耗性能等均有较大的影响,因此,车辆制造厂为保证车辆整体性能的稳定,需提出轮径差限值,并由运营单位定期监测,一旦轮径差超过限值即需进行镟轮作业。

轮径差限值的设置应兼顾考虑车辆整体性能及运营单位的维护成本。长期以来,我国地铁运营维护方案对轮径差限值的要求较为稳定,然而,随着近年来牵引系统架控模式、制动系统架控模式及半动车的逐步增多,原先基于牵引和制动车控模式的轮径差限值维护方案已经不能满足新的需求。因此,需在牵引系统和制动系统采用车控模式(以下简称“牵引和制动车控模式”)以及牵引系统和制动系统采用架控模式(以下简称“牵引和制动架控模式”)的前提下,分别对地铁车辆运用中的轮径差限值要求进行分析。

2.1 牵引和制动车控模式的轮径差限值

目前,我国地铁车辆的牵引及制动系统普遍采用车控模式。该控制模式基于普遍的 4 节动车+2 节拖车(4 动 2 拖)传统配置,可满足牵引或制动功能部分丢失情况下的性能要求。在牵引和制动车控模式下,车辆运用中的轮径差限值要求为: d_1 不大于 2.0 mm, d_2 不大于 4.0 mm, d_3 限值为 8.0 mm 或 10.0 mm。该限值要求已在各地铁运营公司应用多年,成为业内共识。

2.2 牵引和制动架控模式的轮径差限值

相较于牵引和制动车控模式,当 1 个单元控制丢失时,牵引和制动架控模式的性能损失比例较少。可见,在相同的车辆编组下,牵引和制动架控模式可获得更高的牵引和制动性能。由此可知,小编组列车(3 节编组或 4 节编组)更适合采用架控模式,以便能进行灵活编组。

无论车辆采用架控模式还是车控模式, d_1 和 d_2 的限值相同,分别为 2.0 mm 和 4.0 mm。对于 d_3 ,由于架控系统的控制单元为 1 个转向架,故牵引和制动系统对 d_3 的限值要求取消。

3 架控模式下同一辆车的轮径差限值对动力学性能的影响

本文建立了北京某地铁车辆的动力学模型,并设置了 4 种不同轮径差模式(见图 1 a)—图 1 d)),与标准轮对作比对(见图 1 e)),对车辆的静态轮重、车辆的动态安全性、平稳性及舒适性进行分析。

3.1 计算工况

在 d_1 、 d_2 及 d_3 不同组合的计算工况下,车轮直径设置如表 2 所示。

3.2 静态轮重分析

本文计算了 4 种工况下的静态轮重如表 3 所

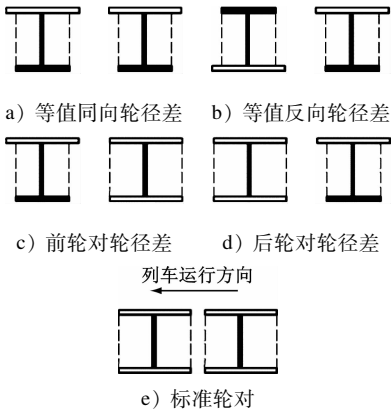


图 1 轮径差模式示意图

Fig. 1 Diagram of wheel diameter difference modes

表 2 车轮直径设置表
Tab.2 Wheel diameter setting table

计算工况	d_1	d_2	d_3	车轮直径								单位:mm
				1 位车轮	2 位车轮	3 位车轮	4 位车轮	5 位车轮	6 位车轮	7 位车轮	8 位车轮	
工况一	0	0	0	840	840	840	840	840	840	840	840	
工况二	0	0	70	770	770	770	770	840	840	840	840	
工况三	2	4	0	838	840	836	838	838	840	836	838	
工况四	2	4	70	772	774	770	772	838	840	836	838	

示。进一步分析可知:与工况一相比,工况二的最大轮重差为 0,工况三的最大轮重差为 2.2%,工况四的最大轮重差为 2.4%;工况四的轮重差最大。另外,按照地铁车辆招标用户需求书的一般规定,每个车轮的实际轮重与该轴两轮平均轮重之差不应超过该轴两轮平均轮重的 $\pm 4.0\%$,故理论上同一辆车的轮重差将会达到最大 6.4%。因此,对车辆动力学性能的分析须考虑轮重差的影响。

表 3 静态轮重分析
Tab.3 Static wheel weight analysis

车轮	静态轮重/kg			
	工况一	工况二	工况三	工况四
1 位车轮	51 293.1	51 313.6	50 698.0	50 745.3
2 位车轮	51 293.1	51 313.6	51 793.2	51 841.9
3 位车轮	51 293.1	51 313.6	51 053.5	51 002.9
4 位车轮	51 293.1	51 313.6	51 750.6	51 583.6
5 位车轮	48 543.3	48 522.6	48 039.5	47 971.7
6 位车轮	48 543.3	48 522.6	49 016.2	49 115.4
7 位车轮	48 543.3	48 522.6	48 151.9	48 233.5
8 位车轮	48 543.3	48 522.6	48 850.3	48 851.2

3.3 车辆稳定性

对工况四下的车辆稳定性,以及车辆通过曲线

时的安全性、平稳性及舒适度进行动态分析,得到新轮的横向位移-速度曲线(见图 2)和磨耗轮的横向位移-速度曲线(见图 3)。其中,横向位移以向左为正、向右为负。

由图 2 及图 3 可知:无轮径差时,新轮的蛇行临界速度为 155 km/h,磨耗轮蛇行临界速度为 118 km/h;有轮径差时,新轮的蛇行临界速度为 151 km/h,磨耗轮蛇行临界速度为 102 km/h。进一步分析可知,轮径差对新轮蛇行临界速度影响较小;磨耗后期,车轮的蛇行临界速度会降低;磨耗轮蛇行临界速度(102 km/h)大于设定的最高运行速度(80 km/h),相对于无轮径差状态,车辆稳定性的裕量有所降低。

3.4 列车通过曲线时的安全性分析

列车通过曲线时的安全性仿真计算参数:曲线半径为 360 m,超高为 120 mm,缓和曲线长 60 m,欠超高 75 mm 时的列车运行限速为 77 km/h,列车运行速度为 30~80 km/h。仿真计算得到各轮的脱轨系数、轮重减载率和轮轨横向力变化曲线分别如图 4—图 6 所示。

从图 4—图 6 中可以看出,在有轮径差和无轮径差状态下,当列车运行速度在 80 km/h 以下时,

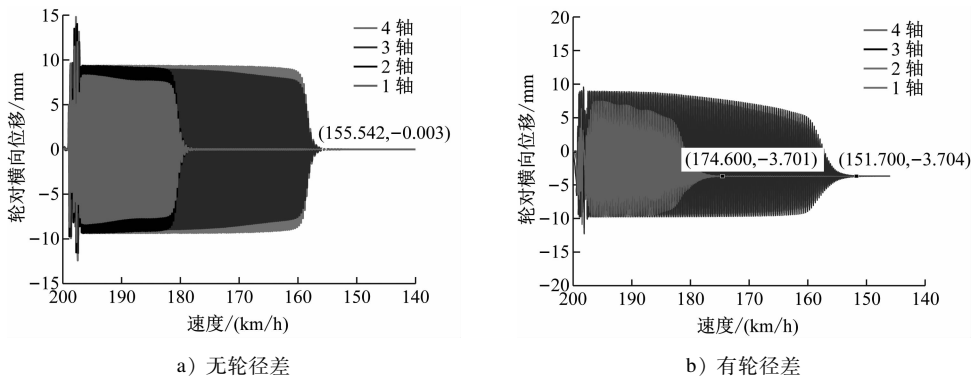


图2 新轮的横向位移-速度曲线

Fig.2 Curve of new wheel transverse displacement and speed

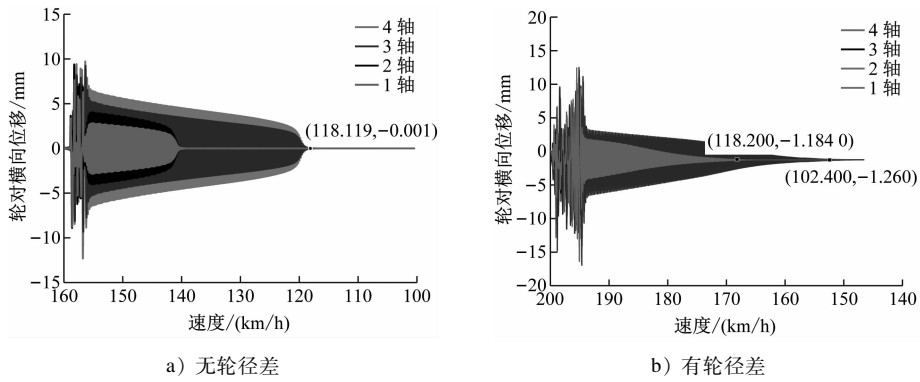


图3 磨损轮的横向位移-速度曲线

Fig.3 Curve of worn-out wheel transverse displacement and speed

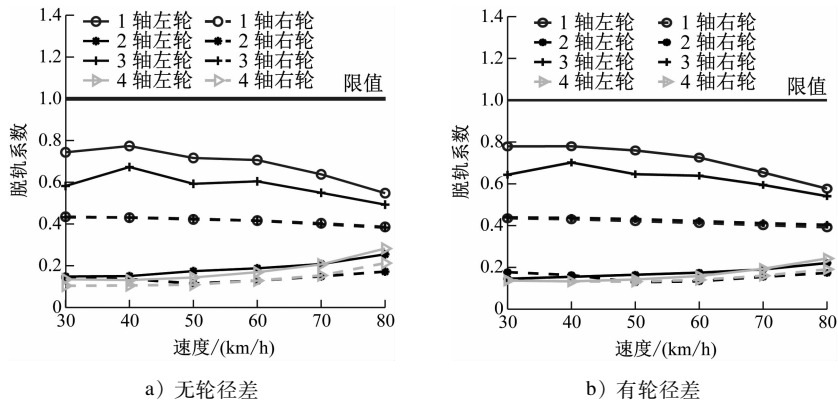


图4 脱轨系数变化曲线

Fig.4 Change curves of derailment coefficient

列车通过曲线时的脱轨系数、轮重减载率和轮轨横向力变化曲线基本一致,均未超过限值要求。由计算结果还可知,工况四对列车运行安全性影响最小。

3.5 平稳性及舒适性分析

列车通过曲线时的车辆平稳性指标和车辆舒适度仿真曲线如图7及图8所示。从图7和图8可以看出,无轮径差和有轮径差时,车辆平稳性指标曲线及舒适度曲线变化基本一致,数值接近。由此

可见,有无轮径差对车辆平稳性和舒适度影响很小。

3.6 轮径差对动力学性能的影响

由上述分析可知,当地铁车辆的牵引系统和制动系统采用架控模式时,牵引系统和制动系统对同一辆车最大轮径差无限制要求。此外,无论是新轮和磨损轮,在最大轮径差状态下,对车辆动态稳定性、曲线通过安全性、车辆平稳性和舒适性影响不大,均可满足列车正常运行。所以,这将为运营单

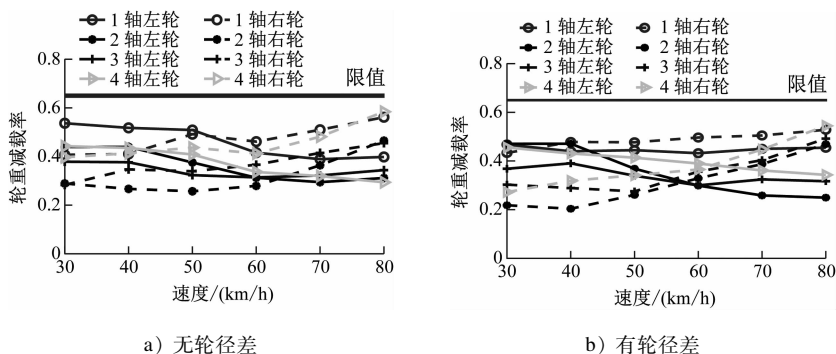


图5 轮重减载率变化曲线

Fig. 5 Change curves of wheel weight reduction rate

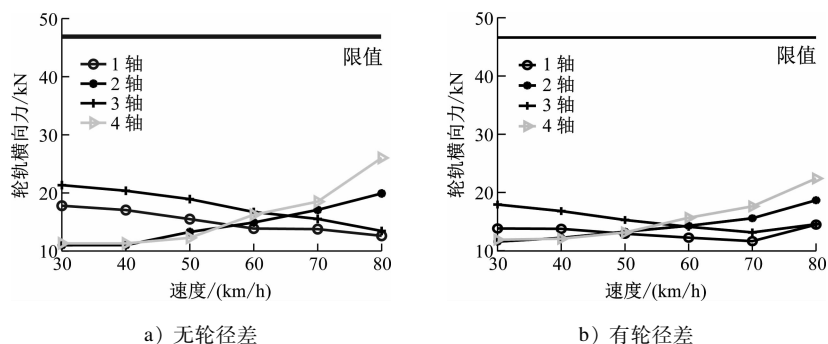


图6 轮轨横向力变化曲线

Fig. 6 Change curves of wheel-rail lateral force

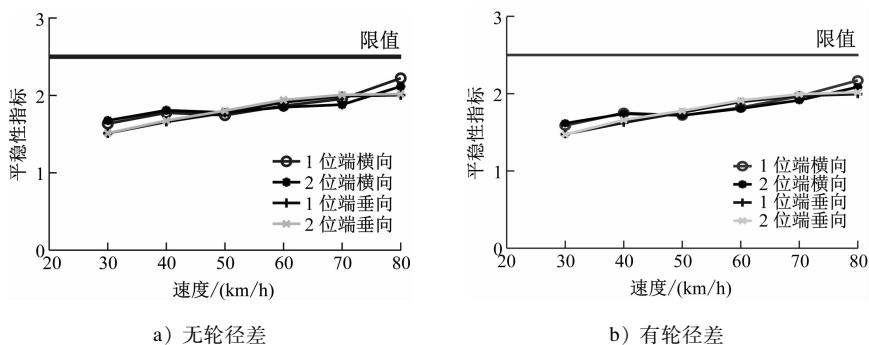


图7 列车通过曲线时的车辆平稳性指标仿真曲线

Fig. 7 Simulation curve of vehicle stability index when train passing curve

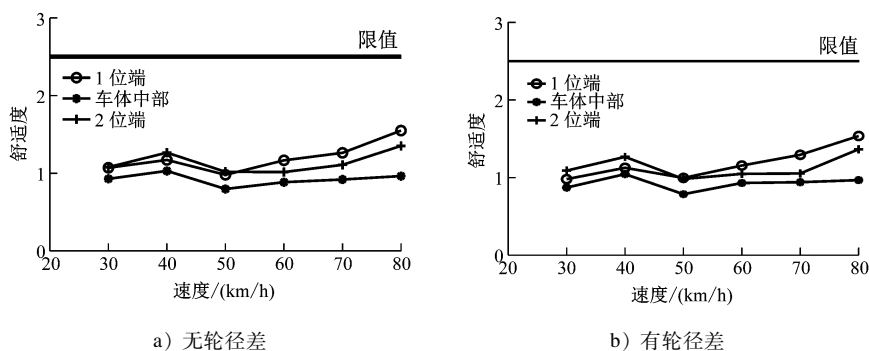


图8 列车通过曲线时的车辆舒适度仿真曲线

Fig. 8 Simulation curve of vehicle comfort when train passing curve

位探讨单独针对同一辆车的一个转向架铰轮提供可行性,进而将提高车轮的使用率,极大节省运营公司铰轮的时间成本及物料成本,为运营单位的车辆运营组织工作提供更大便利性。

4 结语

本文通过对地铁车辆轮径差的运营限值研究发现:

1) 各用户单位对新造地铁车辆的轮径差要求差别不大,车辆制造厂均可满足。

2) 对于牵引系统和制动系统采用车控模式的车辆,轮径差的限值要求基本一致,车辆制造厂及用户单位已经形成相对固定的标准。

3) 近年来,虽然我国地铁车辆的牵引系统和制动系统越来越多地采用架控模式,但对于同一车辆的轮径差要求,大多仍按经验沿用车控模式的车辆要求。但从本文的分析来看,如果同一车辆的前后转向架分别采用新轮和旧轮,对车辆的动力学性能影响不大。

对此,本文建议:针对采用架控模式的地铁车辆,运营单位在进行车轮铰修时,可适当考虑增加同一辆车前后两个转向架的最大轮径差,逐步扩大同一车轮径差限值;同时开展车辆运行状态的监控及分析研究,并最终确定合理的架控模式下同一

辆车最大轮径差限值。这样,既能为运营组织提供便利,也能提高车轮利用率,减少运用维护费用。

参考文献

- [1] 肖彦君, 吴茂杉. 交流传动城轨动车轮径允差问题的探讨[J]. 铁道机车车辆, 2004, 24(1): 6.
XIAO Yanjun, WU Maoshan. Discussion on the problem of power wheel diameter of AC power city rail car[J]. Railway Locomotive & Car, 2004, 24(1): 6.
- [2] 梁大伟, 杨其林, 王善芬, 等. 列车轮径差对牵引系统的影响及相应保护措施研究[J]. 铁道车辆, 2018, 56(5): 33.
LIANG Dawei, YANG Qilin, WANG Shanfen, et al. Effect of wheel diameter difference on traction system of the train and corresponding protection measures [J]. Rolling Stock, 2018, 56(5): 33.
- [3] 蒋益平, 池茂儒, 周橙, 等. 组合轮径差对地铁车辆动力学性能的影响[J]. 润滑与密封, 2019, 44(10): 115.
JIANG Yiping, CHI Maoru, ZHOU Cheng, et al. Influence of wheel radius difference combination on the dynamic performance of metro vehicles [J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(10): 115.
- [4] 王晨, 马卫华, 罗世辉, 等. 轮径差对地铁车辆轮对磨损的研究[J]. 铁道机车车辆, 2013, 33(增刊1): 87.
WANG Chen, MA Weihua, LUO Shihui, et al. Study on wheel wear of the subway vehicle based on radius difference[J]. Railway Locomotive & Car, 2013, 33(S1): 87.

(收稿日期:2022-09-01)

(上接第 40 页)

- WANG Xiaodong. Research on fault diagnosis of EMU bearings based on transfer learning[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [3] 雷亚国, 贾峰, 孔德同, 等. 大数据下机械智能故障诊断的机遇与挑战[J]. 机械工程学报, 2018, 54(5): 94.
LEI Yaguo, JIA Feng, KONG Detong, et al. Opportunities and challenges of machinery intelligent fault diagnosis in big data era [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(5): 94.
 - [4] 徐磊, 王田天, 谢劲松, 等. 高速列车轴箱轴承故障特征与诊断技术研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 1600.
XU Lei, WANG Tiantian, XIE Jinsong, et al. Research on fault characteristics and diagnosis technology of axle box bearing of high speed train[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(5): 1600.
 - [5] 于春雨, 张文韬, 张庆海, 等. 基于 EMD-AR 与改进宽度学习系统的滚动轴承故障诊断方法[EB/OL]. (2022-08-29) [2022-09-03]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVL2pW9UrhTDCdPD65djwFi6-aRxPZkqXDkKpU1tyEJTYPc2L8-ApDCPrhyYxo2_0IT5Scz&

uniplatform = NZKPT.

- YU Chunyu, ZHANG Wentao, ZHANG Qinghai, et al. Fault diagnosis method of a rolling bearing on EMD-AR and improved broad learning system [EB/OL]. (2022-08-29) [2022-09-03]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVL2pW9UrhTDCdPD65djwFi6aRxPZkqXDkKpU1tyEJTYPc2L8-ApDCPrhyYxo2_0IT5Scz&uniplatform=NZKPT.
- [6] 朱熹, 吕勇, 袁锐, 等. 基于均值 Gnome 熵和神经网络的轴承故障诊断[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(8): 67.
ZHU Xi, LYU Yong, YUAN Rui, et al. Bearing fault diagnosis method based on average gnome entropy and neural network[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022(8): 67.
 - [7] 来杰, 王晓丹, 向前, 等. 自编码器及其应用综述[J]. 通信学报, 2021, 42(9): 218.
LAI Jie, WANG Xiaodan, XIANG Qian, et al. Review on auto-encoder and its application [J]. Journal on Communications, 2021, 42(9): 218.

(收稿日期:2022-09-15)