

汽车车轮检测技术发展概述

常茂林, 王 晗

中汽零部件技术天津有限公司, 天津

收稿日期: 2024年3月25日; 录用日期: 2024年4月23日; 发布日期: 2024年4月29日

摘 要

从检测标准及检测设备方面介绍国内汽车车轮检测技术的发展历史与现状, 详细介绍乘用车车轮性能检测技术, 通过比较国内双轴疲劳检测技术与其他地区的差异, 探讨国内在车轮检测领域面临的挑战及未来发展趋势。

关键词

检测技术, 乘用车车轮, 检测设备, 检测标准

An Overview of the Evolution of Automobile Wheel Inspection Technologies

Maolin Chang, Han Wang

China Automotive Parts Technology Tianjin Co., Ltd., Tianjin

Received: Mar. 25th, 2024; accepted: Apr. 23rd, 2024; published: Apr. 29th, 2024

Abstract

This manuscript delineates the evolution and contemporary state of domestic automobile wheel inspection technology, with a focus on testing standards and apparatus. It elaborates on the testing technology for passenger car wheel performance in a comprehensive manner. Moreover, it contrasts the domestic biaxial fatigue testing methodology with those employed in other regions. Additionally, the discourse extends to the exploration of challenges encountered within the domestic sphere of wheel testing and prognosticates on prospective developmental trajectories.

Keywords

Testing Technology, Passenger Car Wheels, Testing Equipment, Testing Standards

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

随着社会和汽车工业的快速发展, 汽车安全性越来越受公众和整车制造商重视[1]。在众多汽车零件中, 车轮作为整车承载部件, 其性能可直接影响车辆行驶安全性和舒适性, 车轮除了承受汽车整车重量外, 还承载车辆行驶过程中各种复杂激励作用, 如起动、刹车、转弯、颠簸、撞击障碍物等工况, 它的安全性需求非常重要, 可以说和生命安全息息相关[2] [3], 因此车轮检测技术的发展成为保证车辆安全行驶的关键环节。

从车轮的生产原材料到车轮成品的检测可分为三类, 分别是车轮材料性能检测、车轮性能检测和漆膜检测。材料性能检测主要是检测车轮材料的强度和硬度等材料特性; 漆膜检测主要是车轮表面涂层附着力、耐酸耐碱抗腐蚀等化学类试验, 车轮性能检测是评估成品车轮在各种实际工况下的性能、耐久性和安全性的测试方法[4] [5] [6]。本文以车轮性能检测技术为研究对象, 从检测标准和设备两个角度对其发展过程及现状进行概述, 以发现国内在车轮检测领域面临的挑战及未来发展趋势。

2. 车轮检测标准的发展

检测标准不仅是保证车轮产品质量安全的基石, 也是推动汽车行业健康、可持续发展的重要工具, 其在确保行车安全性能、提升制造质量, 促进行业发展、规范行业标准等方面扮演着重要角色。

1990年以前, 国内检测主要参考国外标准如 ISO 国际标准, 随着中国加入世界贸易组织(WTO), 汽车行业对车轮的安全性能提出了更高要求, 国内开始着手制定和修订车轮检测的国家标准和行业规范, 以适应汽车市场快速发展[7]。目前, 国内车轮检测标准体系经过不断修订已经比较完善, 涵盖了国家标准、行业规范和企业技术条件[8] [9], 乘用车车轮检测标准与国外标准对比见表 1, 国内标准经过不断完善, 已经满足车轮常规领域检测需求, 但在双轴疲劳试验等标准上还有所欠缺[10], 需向国外标准借鉴学习, 结合国内实际情况建立相关标准。

Table 1. Comparison of passenger car wheel performance testing standard system**表 1.** 乘用车车轮性能检测标准体系对比

试验项目	国家标准			国际标准	
	国家标准	行业标准	国际化标准组织	汽车工业协会	其他标准
弯曲疲劳试验 径向疲劳试验	GB 36581-2018 [11]		ISO 3006: 2015 [13]	SAE J328_2021 [14]	德国 TUV 标准 StVZO
	GB/T 5334-2021 [12]			SAE J2530_2021 [15]	JIS D4103: 2015 [16] AK-LH 08-2008 [17] ECE R124 [18]
13°冲击试验	GB/T 15704-2012 [19]		ISO 7141: 2022 [20]	SAE J175_2020 [21]	GMW 14910-2017 [22] JIS D4103: 2015 [16]
				SAE J2530_2021 [15]	AK-LH 08-2008 [17] ECE R124 [18]

续表

30°冲击试验				JIS D4103: 2015 [16]
90°冲击试验		QC/T 991 -2015 [23]		AK-LH 08-2008 [17]
螺母座强度		QC/T 258 -2013 [24]	ISO 15172: 2005 [25]	
车轮跳动量	GB/T 3487 -2015 [26]	QC/T 717 -2015 [27]	ISO 16833: 2006 [28]	
双轴疲劳试验		QC/T 1112 -2019 [29]	SAE J2562_ 2021 [30]	AK-LH 08-2008 [17] EUWA ES 3.23 [31] GMW 14340-2018 [32]

3. 车轮检测设备的发展

车轮检测设备在车轮质量控制过程中发挥着至关重要的作用。国外对车轮检测设备研究较早, 如德国 SINCOTEC 试验机是专门为车轮弯曲疲劳试验设计制造的, 满足众多国际标准要求; 荷兰 VMI 公司研制的试验机可以满足多种型号车轮径向试验, 并且可以施加倾角、偏角等参数; 美国 MTS 生产的锤式冲击试验机采用了西门子电控系统, 具有可靠性高, 安全等特点。国内在 1959 年至 1979 年开始引进了国外检测设备, 此阶段国内以模仿国外设备为主, 自主创新能力较弱, 1979 年后, 国内开始提高创新能力[33], 涌现出许多优秀车轮设备生产商, 如苏州苏试、天津久荣、东风车轮等[34]。截止到目前, 国产化设备已经全方位覆盖检测需求, 这些设备能够提供准确、可靠的数据及检测结果, 以确保车轮的性能、安全可靠符合检测标准或行业规范[35]。

4. 国内乘用车车轮性能检测技术介绍

目前国内第三方检测实验室及车轮生产商进行的车轮性能试验包括: 弯曲疲劳试验、径向疲劳试验、冲击试验、气密性试验、跳动测试等, 而其中弯曲、径向和冲击试验与车辆安全行驶息息相关, 也是国家标准中明确要求的, 下面对 3 种技术进行详细介绍。

4.1. 弯曲疲劳试验[36] [37]

车轮弯曲疲劳试验是用来评估车轮在服役过程中长期受到弯曲力的作用下结构完整性的一种试验方法, 目前常用的试验设备如图 1 所示, 其原理是车轮固定在旋转轴上, 通过旋转机构施加循环弯曲力来模拟车轮行驶中受到的加载情况, 试验参数包括: 弯曲载荷、循环次数。

4.2. 径向疲劳试验[38] [39]

车轮径向疲劳试验是一种评估车轮在受到循环径向载荷下耐久可靠性的测试方法, 这种测试在强化系数选择下能够加快验证车轮可靠性, 常用的径向设备如图 2 所示, 将车轮固定在加载台架上, 通过液压缸驱动车轮移动来控制载荷大小, 通过转鼓带动车轮旋转, 以此来模拟车轮实际纯径向工况。主要试验参数包括: 径向载荷、循环次数、旋转速度。

目前, 国内乘用车弯曲疲劳试验和径向疲劳试验标准主要是 GB/T 5334-2021《乘用车车轮弯曲和径向疲劳性能要求及试验方法》[12]和 GB 36581-2018《汽车车轮安全性能要求及试验方法》[11], 表 2 和表 3 展示了两个标准的对比结果。



Figure 1. Bending fatigue testing machine
图 1. 弯曲疲劳试验机



Figure 2. Radial fatigue testing machine
图 2. 径向疲劳试验机

Table 2. Comparison of bending fatigue test standards
表 2. 弯曲疲劳试验标准对比

GB 36581-2018 《汽车车轮安全性能要求及试验方法》			GB/T 5334-2021 《乘用车车轮弯曲和径向疲劳性能要求及试验方法》			
测试参数	材料	强化系数	最低循环次数	材料	强化系数	最低循环次数
	钢	1.60	30,000	钢	1.60	30,000
		1.33	150,000		1.33	150,000 ^b
	轻合金	1.60 ^a	100,000	铝	1.10	150,000
		1.33	270,000		1.60 ^a	120,000
				25,000 ^b	300,000	
				1.33	60,000 ^b	
	注：钢车轮需选用两种系数，轻合金仅选用一种系数； ^a 为优先选用强化系数。			注：钢车轮需选用两种系数，轻合金仅选用一种系数； ^a 为优先选用强化系数； ^b 最低循环次数只适用于备用车轮。		
判定依据	1) 不能继续承受载荷； 2) 原始裂纹扩展或出现新可见裂纹； 3) 钢车轮加载偏移增量超过 10%。轻合金车轮加载偏移增量超过 20%。			1) 不能继续承受载荷； 2) 原始裂纹扩展或出现新可见裂纹； 3) 加载偏移增量超过 10%。		
设备要求	加载精度±2.5%以内，其他要求： 1) 要求加载力臂长度在 0.5 m~1.4 m； 2) 要求在空载时，车轮加载点的跳动量不应超过 0.15 mm。			加载精度±2.5%以内，其他要求： 1) 车轮连接件的表面硬度推荐在 HRC40~HRC50 之间和螺栓孔位置度要求在 Φ0.10 mm 以内； 2) 对拧紧力矩进行补充(120 ± 10) N·m； 3) 补充了螺栓断裂情况。		

Table 3. Comparison of radial fatigue test standards**表 3.** 径向疲劳试验标准对比

GB 36581-2018《汽车车轮安全性能要求及试验方法》		GB/T 5334-2021《乘用车车轮弯曲和径向疲劳性能要求及试验方法》	
测试参数	强化系数	最低循环次数	材料
	2.25a	500,000	最低循环次数
	2.00	1,000,000	2.25
	a 为优先选用强化系数。		2.00
			1.65a
判定依据	1) 不能继续承受载荷; 2) 原始裂纹扩展或出现新可见裂纹。		钢
			2.50
设备要求	转鼓最小直径 1700 mm, 加载精度±2.5%以内, 无其他要求。		铝
			2.25
		a 强化系数只适用于备用车轮。	
		1) 不能继续承受载荷; 2) 原始裂纹扩展或出现新可见裂纹。	
		转鼓最小直径 1700 mm, 加载精度±2.5%以内, 其他要求: 1) 对车轮连接件的表面硬度推荐在 HRC40~HRC50 之间和螺栓孔位置度要求在 Φ0.10 mm 以内; 2) 对拧紧力矩进行补充(120 ± 10) N·m。	

4.3. 冲击试验[40] [41]

车轮冲击试验是用来评估车轮在受到冲击力后可靠性的测试方法, 主要是模拟车辆在行驶过程中遇到坑洼、路边石等突发情况时车轮受到的冲击力, 按照冲击角度可分为 13°冲击、30°冲击和 90°冲击, 其中 13°冲击检测设备如图 3 所示, 其原理是将车轮以一定角度固定在试验台上, 控制冲锤以一定高度或能量垂直下落冲击到车轮上。主要试验参数包括: 冲击高度、冲锤质量、冲击位置。

通过对比 13°冲击试验标准 GB/T 15704-2012《道路车辆轻合金车轮冲击试验方法》[19]与 GB 36581-2018《汽车车轮安全性能要求及试验方法》[11]发现, 除了前者没有规定乘用车车轮外, 在测试参数、判定依据和设备要求方面均相同。

**Figure 3.** 13° Impact tester**图 3.** 13°冲击试验机

5. 车轮双轴疲劳试验对比

车轮双轴疲劳技术是用来评估车轮在同时受到径向和侧向载荷作用下的耐久性和可靠性, 这种技术能够在台架上复现车轮实际行驶条件下的复杂应力状态, 包括转弯、加速、减速等工况, 比单一轴向的载荷测试能更全面准确的反映车轮实际使用的性能[42]。

5.1. 双轴试验标准化进展

双轴试验的标准化是确保试验结果可比性与可靠性的重要依据, 也是国内外推进行业技术协同发展的引导方向与发力点。就双轴试验标准而言, 国外相关组织与机构在标准制定与推广应用方面的进展迅速, 并已形成由多元载荷构成的阶梯谱及配套的差异化工况路谱[42]; 国内双轴试验标准体系的制定及应用相对滞后, 暂未形成国家标准, 行业标准本土化特征不足、缺乏符合中国工况的测试路谱支撑, 亟待完善[42] [43]。如表 4 所示, 本文通过梳理对比 AK-LH08 (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club, 即由德国汽车联盟制定)、SAE J2562 (SAE International, 即由美国汽车工程师协会制定)、GMW14340 (美国通用公司根据 SAE J2562 标准制定)及 QC/T 1112-2019 (由中国汽车工业质量管理标准化技术委员会制定)在不同维度的共性与差异, 总结其关键点:

Table 4. Comparison of biaxial fatigue test standards for passenger car wheels

表 4. 乘用车车轮双轴疲劳试验标准对比

标准名称	前置条件	路谱载荷	试验设备规定	试验结果判定依据
QC/T 1112-2019	需进行动平衡与预损伤试验	由 AK-LH08 演变形成, 无符合中国工况的测试路谱	内外转鼓设备均可, 但选择时有相应要求	以下三点可作为车轮双轴疲劳试验终止的依据: 1) 车轮无法维持试验载荷; 2) 疲劳裂纹造成轮胎压力损失超过 10%; 3) 任何部位出现长度大于 25 mm 的裂纹。
AK-LH08	需进行动平衡与预损伤试验	规定了三种测试路谱: 1) 由 22 个载荷对构成的阶梯谱(AKR 循环程序); 2) 纽伯格林赛道谱; 3) 霍根海姆赛道谱	无明确限制	无明确判定依据
SAE J2562	无明确规定	路谱包括高速基础载荷加载序列和中速基础载荷加载序列, 标准规定了详细的路谱计算方式	A 型内转鼓、B 型内转鼓、C 型内转鼓双轴疲劳测试设备均可。	1) 试验裂纹造成了轮胎压力损失; 2) 试验组件无法维持试验载荷; 3) 发生裂纹拓展穿过截面, 从车轮两面均可见。
GMW14340	根据试验类型决定是否需要预损伤	以 SAE J2562 载荷谱为基准进行适当调整	内转鼓, 并对设备有具体要求。	1) 试验裂纹造成了轮胎压力损失; 2) 试验组件无法维持试验载荷; 3) 出现长度超过 5 mm 的穿过截面拓展裂纹, 从车轮两面均可见。

5.2. 双轴疲劳试验设备进展

国外已对双轴测试设备研究多年, 弗劳恩霍夫研究所(LBF)在 1986 年成功研制了首款内转鼓式双轴试验机, 中信戴卡在 2011 年安装调试完成国内首台双轴疲劳试验机[44], 双轴疲劳试验机按照轮胎与转鼓位置可分为内转鼓和外转鼓, 内转鼓试验机是通过控制车轮侧倾角接触止推环来控制侧向力, 误差较大, 所以乘用车双轴外转鼓试验机已逐步取代了内转鼓试验机[45] [46]。国内研发生产的外转鼓双轴疲劳试验机如图 4 所示, 其已应用于车轮等关键部件的疲劳性能评估。德国采埃孚生产的高动态双轴疲劳机如图 5 所示, 两设备参数对比见表 5, 国产双轴试验机已经满足标准中阶梯谱加载需求, 满足日常使用需求, 但对于实时道路谱则需要选择高动态试验机, 并且此设备支持转鼓表面的更换, 还原实际道路摩擦系数, 更加贴合实际行驶路况。



Figure 4. National biaxial fatigue testing machine
图 4. 国产双轴疲劳试验机



Figure 5. Highly dynamic external drum biaxial fatigue tester
图 5. 高动态外转鼓双轴疲劳试验机

Table 5. Comparison of external drum tester parameters
表 5. 外转鼓试验机参数对比

	国产双轴疲劳试验机	高动态外转鼓双轴疲劳试验机
允许安装尺寸	13"~24" (车轮直径) 4"~12" (车轮宽度)	450 mm~1100 mm (轮胎外直径) -30 mm~70 mm (车轮偏距范围)
试验速度	Max. 120 km/h	Max. 300 km/h
径向载荷	Max. 50 kN	Max. 50 kN
侧向载荷	Max. ± 30 kN	Max. ± 30 kN
载荷加载精度	$\pm 1\%$	$\pm 0.50\%$

续表

倾角范围	$\pm 5^\circ$	$\pm 10^\circ$
倾角调节速度	$1^\circ/\text{s}$	$30^\circ/\text{s}$
偏角范围	$\pm 15^\circ$	$\pm 30^\circ$
偏角调节速度	$5^\circ/\text{s}$	$37^\circ/\text{s}$
能否更换转鼓表面	否	是

5.3. 双轴疲劳试验的研究进展

为了进一步探索乘用车双轴试验,为车轮耐久性提供更为有效的见解,相关学者模拟了在弯曲载荷[47]、径向载荷[48]、平面应力条件下转弯[49]、旋转弯曲[50] [51]、恒定和变幅[52]、残余应力[53]等多轴载荷条件下乘用车车轮的疲劳寿命,与理论疲劳寿命的数据进行比较分析,基于数据结果实证分析不同载荷工况对车轮疲劳寿命的影响。此外,为更科学、更高效地模拟仿真给定路谱内多个离散载荷工况,相关领域的研究者不断优化疲劳寿命预测模型[54],将混合多层感知器神经网络[55]、正交分解与径向基函数算法[56]、多轴载荷投影[57]等元素纳入车轮双轴疲劳寿命预测模型中,以克服成本与耗时的缺陷,为以理想的精度预测双轴疲劳试验中的车轮寿命提供有力的工具与方法支撑。

6. 结论

目前,国内车轮检测标准已经较为完善,能够满足国内外市场需求,且同类型标准无较大差异,随着技术进步和市场的变化,这些标准也在不断更新和优化中。然而在车轮新检测技术方面,国内起步较晚,与其他国家相比差距较大。

随着智能网联汽车和新能源汽车的发展,势必会提高车轮产品要求,如何进一步完善标准体系,提高标准的前瞻性和适应性是未来的研究方向,另外,需要加强中国车轮标准的国际化,更多的参与国际标准的制定和修订工作,将中国工况纳入标准修订工作中。

参考文献

- [1] 胡林, 谷子逸, 王丹琦, 等. 汽车安全性测评规程现状及趋势展望[J]. 汽车工程, 2024, 46(2): 187-200+240. <https://doi.org/10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.02.001>
- [2] 张升超. 汽车车轮轻量化设计[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2020. <https://doi.org/10.27262/d.cnki.gqdau.2020.002060>
- [3] 唐珍珍. 汽车车轮的结构强度分析[J]. 时代汽车, 2022(15): 151-153.
- [4] 刘旌扬. 汽车车轮的试验方法及试验结果分析[J]. 汽车技术, 1987(12): 20-29.
- [5] 赵玉军. 现代汽车车轮性能检测与分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [6] 任山, 朱其文, 杜天强. 汽车车轮性能试验方法及标准[J]. 天津汽车, 2003(2): 21-25.
- [7] 董云, 代军. 后 WTO 时代新汽车产业政策分析[J]. 时代经贸, 2006, 4(9): 6-7.
- [8] 雷娜. 简述车轮标准现状和标准的制修订情况[J]. 汽车零部件, 2012(9): 31-32. <https://doi.org/10.19466/j.cnki.1674-1986.2012.09.006>
- [9] GB/T 15704-2012 标准修订解读[J]. 汽车零部件, 2013(6): 27.
- [10] 张子鹏, 任念祖, 张新峰. GB 36581-2018《汽车车轮安全性能要求及试验方法》解读[J]. 中国汽车, 2019(8): 47-51.
- [11] 中华人民共和国工业和信息化部. GB 36581-2018 汽车车轮安全性能要求及试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [12] 全国汽车标准化技术委员会. GB/T 5334-2021 乘用车车轮弯曲和径向疲劳性能要求及试验方法[S]. 北京: 中国

- 标准出版社, 2021.
- [13] ISO 3006:2015 Road Vehicles—Passenger Car Wheels for Road Use—Test Methods.
- [14] SAE J328_202107 Wheels—Passenger Car and Light Truck Performance Requirements and Test Procedures.
- [15] SAE J2530_202109 Aftermarket Wheels—Passenger Cars and Light Truck Performance Requirements and Test Procedures.
- [16] JIS D 4103:2015 自動車部品-ホイール-性能及び表示.
- [17] AK-LH 08-2008 Wheels Requirements and Tests.
- [18] ECE R-124 Type Approval of Wheels of Passenger Cars and Trailers.
- [19] 全国汽车标准化技术委员会. GB/T 15704-2012 道路车辆轻合金车轮冲击试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [20] ISO 7141:2022 Road Vehicles—Light Alloy Wheels—Lateral Impact Test.
- [21] SAE J 175_2020 Wheels—Lateral Impact Test Procedure—Road Vehicles.
- [22] GMW14910-2017 Wheel Lateral Impact Test.
- [23] 全国汽车标准化技术委员会. QC/T 991-2015 乘用车轻合金车轮 90°冲击试验方法[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [24] 中华人民共和国工业和信息化部. QC/T 258-2013 汽车车轮螺母座强度试验[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [25] ISO 15172:2005 Road Vehicles—Wheels—Nut Seat Strength Tests.
- [26] 全国轮胎轮辋标准化技术委员会. GB/T 3487-2015 乘用车轮辋规格系列[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [27] 全国汽车标准化技术委员会. QC/T 717-2015 汽车车轮跳动要求和检测方法[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [28] ISO 16833:2006 Road Vehicles—Wheels—Measurement of Radial and Lateral Run-Out.
- [29] 全国汽车标准化技术委员会. QC/T 1112-2019 乘用车车轮双轴疲劳试验方法[S]. 北京: 北京科学技术出版社, 2019.
- [30] SAE J2562-2021 Biaxial Wheel Fatigue Test.
- [31] EUWA ES3.23-2017 Biaxial Fatigue Test for Truck Wheels.
- [32] GMW 14340-2018 Biaxial Wheel Fatigue Test.
- [33] 李世德. 汽车车轮跳动检测方法及应用研究[J]. 民营科技, 2017(3): 54.
- [34] 孙娜, 孙华文, 张振伟, 等. 乘用车车轮毂性能试验仿真方法综述[J]. 智能制造, 2022(4): 72-78.
- [35] 邱祖峰, 罗茶根, 舒华英. 基于 CAE 与试验对标方法的汽车车轮研究[J]. 机械工程与自动化, 2023(6): 81-83.
- [36] 徐恒斌, 顾佳超, 孟凡荣. 汽车车轮弯曲疲劳试验机国内外研究现状综述[J]. 科技创新与应用, 2014(34): 65.
- [37] 刘建功, 王德民. 新型悬臂式汽车车轮弯曲疲劳试验机的研制[J]. 机械工程与自动化, 2014(6): 94-95, 98.
<https://doi.org/10.3969/J.Issn.1672-6413.2014.06.038>
- [38] 曹伟. 车轮径向疲劳试验机研制[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [39] 陈国刚, 李世德. 汽车车轮径向冲击机技术指标的核查验证方法[J]. 民营科技, 2017(1): 52.
- [40] 尹冀. 汽车钢制车轮的冲击性能仿真与轻量化研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [41] 岳凯. 汽车车轮冲击试验机研制[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [42] 刘鑫. 铝合金车轮双轴疲劳试验和应力应变分析[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- [43] 刘振国, 王春辉, 杨春旺. 车轮双轴疲劳测试技术的发展概述[J]. 时代汽车, 2022(20): 13-15+180.
- [44] 佟林. 铝合金车轮双轴疲劳试验失效分析及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- [45] 王晓迪. 铝合金车轮双轴疲劳试验数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- [46] 朱英伟, 吕金旗, 王柱兴. 汽车车轮双轴疲劳试验仿真方法[J]. 汽车工业研究, 2018(3): 53-55.
- [47] Raju, P.R., Satyanarayana, B., Ramji, K., *et al.* (2009) Evaluation of Fatigue Life of Aluminium Alloy Wheels under Bending Loads. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **32**, 119-126.
<https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2008.01316.x>
- [48] Nallusamy, S., Prabu, N.M., Balakannan, K., *et al.* (2015) Analysis of Static Stress in an Alloy Wheel of the Passenger car. *International Journal of Engineering Research in Africa*, **16**, 17-25.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.16.17>

-
- [49] Koppiseti, S.B., Nallu, R. and Penmetsa, R.R. (2022) Passenger Cars Wheel Performance Test Simulation for Service Life Evaluation: A Review. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, **22**, 1370-1392. <https://doi.org/10.1007/s11668-022-01447-0>
- [50] 叶舟, 李焜, 王金粉. 铝合金车轮双轴疲劳试验仿真分析[J]. 机械制造, 2022, 60(4): 59-61+64.
- [51] Dong, Z.C., Wang, X.F., Zhang, X.G., *et al.* (2020) Fatigue Life Prediction for the Steel Passenger Car Wheel in the Dynamic Cornering Fatigue Test. *Strength of Materials*, **52**, 662-682. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00217-3>
- [52] Reza Kashyzadeh, K., Souri, K., Gharehsheikh Bayat, A., *et al.* (2022) Fatigue Life Analysis of Automotive Cast Iron Knuckle under Constant and Variable Amplitude Loading Conditions. *Applied Mechanics*, **3**, 517-532. <https://doi.org/10.3390/applmech3020030>
- [53] Jiang, Q., Zhao, Z., Xu, Z., *et al.* (2022) Effect of Residual Stresses on Wheel Fatigue Life and Experimental Validation. *Machines*, **10**, Article 924. <https://doi.org/10.3390/machines10100924>
- [54] 王铁, 田程, 李旭东, 等. 车轮双轴疲劳加速试验方法研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(9): 1410-1415+1424. <https://doi.org/10.19562/J.Chinasae.Qcgc.2022.09.012>
- [55] Kong, Y.S., Abdullah, S., Schramm, D., *et al.* (2019) Optimization of Spring Fatigue Life Prediction Model for Vehicle Ride Using Hybrid Multi-Layer Perceptron Artificial Neural Networks. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **122**, 597-621. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.12.046>
- [56] Luo, J., Shan, Y., Liu, X., *et al.* (2023) A Rapid Method to Predict Biaxial Fatigue Life of Automotive Wheels Using Proper Orthogonal Decomposition and Radial Basis Function Algorithm. *Advances in Engineering Software*, **186**, Article 103543. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2023.103543>
- [57] 王铁, 李旭东, 田程, 等. 基于多轴载荷投影构建轮辋双轴疲劳损伤模型[J/OL]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20220307>, 2024-03-14.