

# 低地板车辆用整体式锻造轴桥承载能力分析

戚 援<sup>1</sup> 吴志强<sup>1</sup> 李 稳<sup>2</sup> 侯传伦<sup>1</sup> 杨新文<sup>3</sup>

(1. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 213011, 常州; 2. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海;  
3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 正高级工程师)

**摘 要** 轴桥是低地板有轨电车独立轮对的关键承载件, 为了研究其承载性能, 根据德国交通企业联合会发布的 VDV 152:2016《基于城市轨道交通建设和运营规则的城市轨道车辆的强度设计规范》的规范要求, 通过有限元仿真和试验测试等方法对整体式锻造轴桥的承载能力进行了详细分析。研究结果表明: 根据 VDV 152:2016 规范要求计算得出的载荷工况能够更好地反映轴桥的使用情况; 基于有限元软件仿真轴桥使用环境下的柔性约束, 并采用 FKM(德国机械工程师委员会)规范对仿真计算结果进行分区域利用率评估, 评估结果显示轴桥利用率为 96%; 采用整体模锻成形工艺和套筒形刀具机加工工艺可以使轴桥获得高综合性能, 满足粗糙度为 0.8、同轴度为 0.02 等高精度尺寸的要求; 通过模拟轴桥约束条件等方法获得的试验应力与仿真应力偏差约为 10%; 采用极值应力工况组合绘制轴桥的载荷曲线并进行分阶段疲劳加载试验, 轴桥未出现疲劳裂纹, 满足设计要求。

**关键词** 有轨电车; 低地板车辆; 整体式锻造; 轴桥

**中图分类号** U270.33; U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.05.020

## Analysis of Load-bearing Capacity of Integral Forged Axle Bridge for Low-floor Vehicle

QI Yuan, WU Zhiqiang, LI Wen, HOU Chuanlun, YANG Xinwen

**Abstract** Axle bridge is the key bearing part of low-floor tram independent wheelset. To study its load-bearing performance, with reference to the requirements of VDV 152:2016 specification Recommendations on the Design for Strength of Urban Rail Rolling Stock According to BO Strab issued by Verband der Deutschen Automobil industrie E. V., detailed analysis is carried out on the bearing capacity of integral forged axle bridge through finite element simulation and test testing. Research results show that: the calculated load conditions by VDV 152:2016 specification can better reflect the usage of axle bridge; based on the flexible constrain under axle bridge utilization environment in finite element software simulation, zoned utilization rate of simulation calculation results is evaluated with FKM (Analytical Strength Assessment of Components in Me-

chanical Engineering) specification (issued by Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau), and the evaluation results show that the axle bridge utilization rate is 96%; the overall die forging process and the sleeve-shaped tool machining process can achieve high comprehensive performance and meet high-precision dimensions such as roughness Ra 0.8 and coaxiality 0.02; by simulating the constraint conditions of axle bridge and so on, the deviation between test stress and simulated stress is about 10%; a combination of extreme stress working conditions is used to draw an axle bridge load curve and to perform a staged fatigue loading test, the axle bridge has no fatigue cracks, which meets the design requirements.

**Key words** tram; low-floor vehicle; integral forged; axle bridge

**First-author's address** CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., 213011, Changzhou, China

轴桥作为低地板有轨电车车辆关键承载部件之一, 其承载性能直接影响着有轨电车的安全运行。轴桥产品先后经历了分体式铸造、整体式铸造和整体式锻造等结构型式。整体式锻造轴桥具有产品强度高、承载性能强、服役寿命长、内部缺陷少和质量稳定等优点, 目前已成为国内外轴桥的主流产品形式。

轴桥与传统直轴均为车辆转向架的关键承载部件, 但由于二者的结构及承载性能不同, 产品在设计、制造及试验方法等方面差异较大。传统直轴一般根据欧洲标准 EN 13103:2009 通过弯矩合成方法进行受力计算校核<sup>[1-2]</sup>, 但由于轴桥承受的动态载荷较大、受力情况更复杂且与传统直轴的结构差异也较大, 所以传统直轴的受力计算方法并不适用于轴桥。目前, 国内外的轴桥设计研发公司主要基于参考 EN 13103:2009 直轴标准、利用仿真计算软件或建立公司内部数据库对轴桥进行设计校核<sup>[3]</sup>, 但这些方法普遍存在载荷工况不全面、轴桥动态载

荷值偏低等问题。在试验验证方面,由于轴桥为非旋转承载,不能采用传统直轴的计算方法进行疲劳性能试验,因此如何对轴桥产品的可靠性进行准确验证已经成了亟待解决的问题。

本文根据德国交通企业联合会发布的 VDV 152:2016《基于城市轨道交通建设和运营规则的城市轨道交通车辆的强度设计规范》的规范要求,基于有限元软件仿真轴桥使用环境下的柔性约束,并采用 FKM(德国机械工程委员会)规范对仿真计算结果进行分区域利用率评估,系统地研究了整体式锻造轴桥的承载能力。本文研究可为独立轮对转向架设计、制造与评估提供理论参考。

## 1 轴桥设计载荷计算及评估

### 1.1 轴桥载荷计算方法

相比其他车辆及零部件设计标准,VDV 152:2016 规范完善了低地板车辆的设计要求,特别适合用于轴桥产品。文献[4]分析了该标准在低地板车辆构架载荷计算上的应用,但其缺乏对工况种类的评估分析且没有介绍台架试验方法。鉴于此,本文对轴桥产品的计算、评估、制造和试验等方面进行了详细分析。

整体式锻造轴桥的主要计算参数如表 1 所示,基于车体-构架-轮对的载荷传递模型如图 1 所示。为了模拟不同极值工况下车辆轮对的载荷情况,参考 VDV 152:2016 中的加速度及载荷要求,按道岔、曲线、制动及附加部件等不同种类工况进行轮对极值载荷的全工况组合,并将轮对载荷工况集换算为轴桥载荷工况集,通过该方法可以获得 100 个超常载荷工况集和正常载荷工况集。将超常载荷工况集及正常载荷工况集的极值数据与采用 EN 13103:2009 的轴桥载荷计算结果进行对比。两种工况集下,由不同参考标准计算获得的载荷极值对比结果如表 2 所示。由表 2 可知,采用 VDV 152:2016 的轴

表 1 整体式锻造轴桥主要计算参数  
Tab. 1 Main calculation parameters of integral forged axle bridge

参数	取值
轴重/kg	12 500
转向架质量/kg	3 536
轮对质量/kg	1 259
车体重心高度/mm	1 524
滚动圆间距/mm	1 500
一系簧横向间距/mm	1 100
轮对新轮直径/mm	660

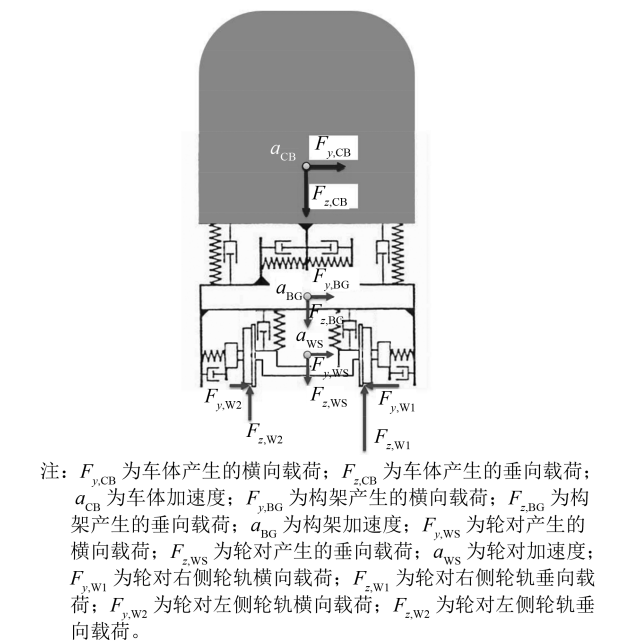


图 1 载荷传递模型示意图  
Fig. 1 Diagram of load transfer model

表 2 两种工况集下由不同参考标准计算获得的载荷极值对比  
Tab. 2 Comparison of load extremes calculated by different reference standards under two working condition sets

参考标准	超常载荷工况集				正常载荷工况集			
	最大载荷/kN		最小载荷/kN		最大载荷/kN		最小载荷/kN	
	$F_z$	$F_y$	$F_z$	$F_y$	$F_z$	$F_y$	$F_z$	$F_y$
VDV 152:2016	181.7	85.1	93.3	-85.1	93.1	51.7	0	-51.7
EN 13103:2009	56.5	30.4	30.0	-30.4	56.5	30.4	30.0	-30.4

注:  $F_z$  为轴桥垂向载荷,垂直向上为正,垂直向下为负;  $F_y$  为轴桥横向载荷,由轨道外侧向内为正,由轨道内侧向外为负。

桥载荷计算结果数值较大,这是由于低地板车辆的运营环境较为恶劣,轴桥所承受的动态载荷更大导致的。由此可见,采用 VDV 152:2016 制定低地板车辆的载荷工况更能够反映轴桥的实际使用状况,进而确保轴桥产品的使用安全及可靠性。

### 1.2 分区域利用率评估

基于有限元软件仿真轴桥使用环境下的柔性约束。将根据 VDV 152:2016 确定的超常载荷及正常载荷工况组合作为载荷输入,对轴桥在不同工况下的应力状态进行计算分析,并采用 FKM 规范对仿真计算结果进行分区域利用率评估。轴桥分段评估利用率如表 3 所示,轴桥分段评估利用率分布图如图 2 所示。由图 2 可知,轴桥利用率最大部位出现在轴颈圆弧过渡部位,其利用率为 96%,满足设计要求。

表 3 轴桥分段评估利用率

Tab. 3 Utilization rate of axle bridge section evaluation		
区域	评估区域	利用率/%
1	轴颈	96
2	一系弹簧安装座	51
3	轴头	37
4	轴身	35
5	安装座	57

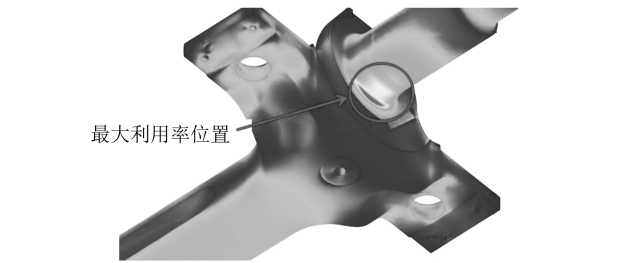


图 2 轴桥分段评估利用率分布图  
Fig. 2 Distribution diagram of utilization rate of axle bridge section assessment

2 整体式锻造轴桥的制造过程

轴桥毛坯为大型长轴凹形枝杈类模锻件,长约 2 m,其底部距轴线落差较大,一系弹簧安装座处模锻变形较大。轴桥产品锻造设备选用进口的 22 000 t 电动螺旋压力机,该压力机导向精度高,能有效防止模锻过程中因设备导向精度导致的轴桥模锻件错移问题。采用金属成形工艺仿真分析软件进行轴桥整体模锻成形过程模拟,经过优化后的轴桥整体模锻成形的机械加工余量较小,能较完好地保留其金属流线,有效提高轴桥的综合性能。

由于轴桥属于非旋转对称件,为了保证其承载强度和轮对组装精度,其两侧轴颈的粗糙度、同轴度及直径的机械加工(以下简称“机加工”)精度要求较高。轴桥轴颈部位机加工精度要求如表 4 所示。传统机加工方法通过旋转轴桥对其进行切削加工,但由于轴桥的重心不在轴线上,工件将会产生较大的离心力导致轴桥变形,进而不能满足轴桥的高同轴度和高粗糙度精度要求。通过改进机加工工艺,提出了套筒形刀具加工方案。套筒形刀具机加工示意图如图 3 所示。在套筒形刀具的筒顶布置切削刀片,并在筒壁上设有排屑孔以减轻刀具质量,选用主轴刚性和加工精度较高的机床设备进行切削加工,同时控制刀具的进给速度和切削深度,能够实现套筒形刀具从轴桥两侧旋转套入轴颈进行切削加工的非旋转加工工艺方案。该方案避免

了轴桥旋转离心力导致的轴桥变形且产品加工精度较高,能够满足设计要求。

表 4 轴桥轴颈部位机加工精度要求

Tab. 4 Requirements for machining accuracy of axle bridge shaft journal part	
名称	精度要求
粗糙度/ $\mu\text{m}$	0.8
同轴度/mm	$\varphi\ 0.02$
直径/mm	$\varphi\ 120^{+0.012}_{-0.034}$

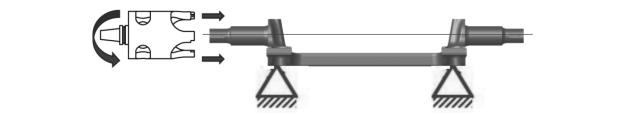


图 3 套筒形刀具机加工示意图  
Fig. 3 Diagram of sleeve-shaped tool machining

3 轴桥疲劳试验

轴桥疲劳试验方案参考 VDV 152:2016 规范,选取轴桥利用率较大的左右轴颈圆弧过渡位置,疲劳加载工况挑选在该位置产生极值应力的载荷工况进行工况配对,并绘制成加载曲线。基于极值应力工况配对的疲劳试验加载方案如图 4 所示。疲劳试验方案分两阶段进行:第 1 阶段加载 400 万个循环周期,加载载荷为极值应力工况配对载荷,循环周期按照图 4 中过曲线、过道岔的 30 个小循环周期组成;第 2 阶段加载 200 万个循环周期,循环周期按照图 4 中过曲线、过道岔的 30 个小循环周期组成。疲劳试验载荷谱如图 5 所示。由图 5 可知,相比于第 1 阶段,第 2 阶段的主载荷部分放大了 1.2 倍。

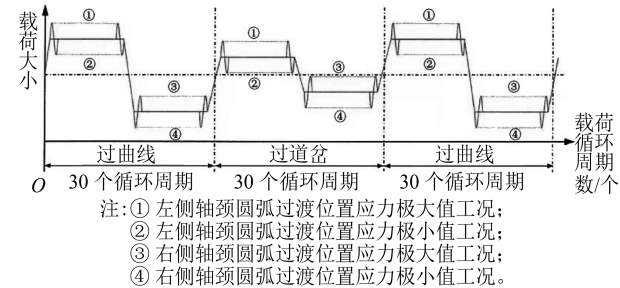


图 4 基于极值应力工况配对的疲劳试验加载方案  
Fig. 4 Fatigue test loading scheme based on matching of extreme stress working conditions

为了对轴桥产品进行疲劳试验,搭建了轴桥疲劳试验平台以模拟轴桥运行下的约束条件,并利用载荷测量及反馈调节实现精确加载载荷工况。选取轴桥载荷计算获得的 8 个超常载荷工况,通过

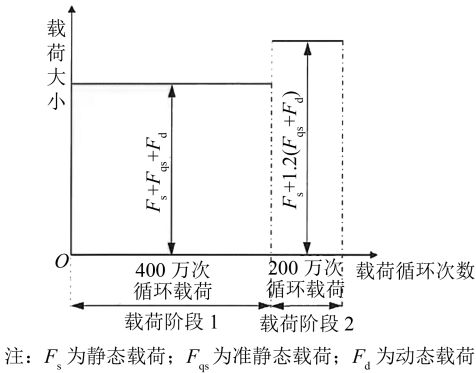


图 5 疲劳试验载荷谱  
Fig. 5 Fatigue test load spectrum

应变片读取关键部位的应力数据,将试验数据与有限元仿真结果进行对比,结果如表 5 所示。由表 5 可知,实验数据与仿真结果的最大应力偏差约为 10%,考虑到应变片粘贴位置和疲劳试验系统均存在一定偏差,因此可以认为试验方案较好地还原了轴桥应力。轴桥疲劳试验参考 VDV 152:2016 的要求执行,试验开始前及第 1 阶段中每 200 万次加载进行一次表面探伤,第 2 阶段中每 100 万次加载进行一次表面探伤。试验期间未发现超标表面缺陷,轴桥疲劳强度满足设计要求。

表 5 试验与有限元仿真结果对比  
Tab. 5 Comparison of test and finite element simulation results

工况	应力/MPa		偏差/%
	仿真结果	试验结果	
1	114.5	128.6	-12.3
2	439.7	406.9	7.5
3	111.0	118.9	-7.1
4	438.8	401.9	8.4
5	94.6	107.1	-13.2
6	407.5	365.6	10.3
7	94.0	98.4	-4.7
8	409.9	360.6	12.0

注:偏差为正表示仿真结果大于试验结果;偏差为负表示仿真结果小于试验结果。

### 4 轴桥应用

整体式锻造轴桥产品已在中车长春轨道客车股份有限公司、中车青岛四方机车车辆股份有限公司、中车大连机车车辆有限公司和中车南京浦镇

车辆有限公司等中车主机企业的各平台低地板轻轨有轨电车上实现批量装车,已应用于在长春轨道交通 8 号线、大连市 202 路等近 10 条线路。该轴桥产品在 2015 年装车,至今车辆运营公里已达 60 万 km,轴桥产品使用情况良好,满足使用要求。

### 5 结论

- 1) 采用 VDV 152:2016 规范获得的载荷工况能够更好地反映轴桥的使用状况,经有限元仿真分析及 FKM 评估显示轴桥利用率为 96%。
- 2) 采用整体模锻成形工艺和套筒形刀具机加工工艺可获得综合性能较高,且满足粗糙度为 0.8  $\mu\text{m}$ 、同轴度为 0.02 mm 的高精度尺寸要求。
- 3) 搭建轴桥疲劳试验平台以模拟轴桥运行下的约束条件,实验数据与仿真结果的最大应力偏差约为 10%;基于极值应力工况组合,绘制载荷曲线并进行分阶段疲劳加载试验,轴桥未出现疲劳裂纹,满足设计要求。

### 参考文献

[1] 吴毅,项彬,张斌,等. 高铁车轴强度设计及全尺寸疲劳试验方法比较[J]. 铁道车辆,2015,53(6): 1.  
WU Yi, XIANG Bin, ZHANG Bin, et al. Comparison in strength design of axles for high speed railway and full-scale fatigue test methods[J]. Rolling Stock,2015,53(6): 1.

[2] 田合强,高福来,郭平波. 高速列车车轴强度计算方法对比分析[J]. 中国铁道科学,2009,30(2): 99.  
TIAN Heqiang, GAO Fulai, WU Pingbo. Comparison and analysis of the calculation methods for the axle strength of high-speed train[J]. China Railway Science,2009,30(2): 99.

[3] 方翁武,王起梁,宫峰. 整体锻造式低地板车辆轴桥有限元分析[J]. 轨道交通装备与技术,2016(5): 48.  
FANG Wengwu, WANG Qiliang, GONG Feng. Finite element analysis of axle bridge of integral forged low floor vehicle[J]. Rail Transportation Equipment and Technology,2016(5): 48.

[4] 何宙,郭平波,刘潮涛,等. 基于 VDV 152—2016 的低地板车辆构架载荷研究[J]. 机电电传动,2019(1): 87.  
HE Zhou, WU Pingbo, LIU Chaotao, et al. Load research of low-floor vehicles bogie frame based on VDV 152—2016[J]. Electric Drive for Locomotives,2019(1): 87.

(收稿日期:2021-07-30)