

城市轨道交通车辆转向架一系钢弹簧 疲劳断裂应力研究

舒友 薛世海 刘志远 周殿买 王宇 张文康 赵洪帝

(中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春)

摘要 [目的]城市轨道交通车辆转向架大多采用转臂定位结构。该结构下的一系钢弹簧常发生断裂问题,断裂区域多发生在与支撑圈接触的第一工作圈。导致钢弹簧断裂的影响因素较多,需要对此进行深入分析。[方法]结合车辆实际运用情况,优化了钢弹簧应力的计算方法,以具体项目设计参数为输入,评估了钢弹簧在考虑横向载荷后的应力水平情况,并计算其应力占比。选取某项目转向架一系钢弹簧组进行台架试验研究,描述了台架试验的设备及工装,一系内外螺旋钢弹簧贴片布置,以及试验加载及数据分析等情况。分析了B组内圈弹簧的应力测试结果,并以某测点在转臂侧的受力情况为例,分析了车辆采用转臂定位结构时钢弹簧的运用工况,重点分析了转臂转动对钢弹簧不同位置处所受应力的影响。最后从改善弹簧疲劳应力及接触线控制2个方面,对弹簧疲劳断裂的应对措施提出了建议。[结果及结论]此类弹簧疲劳断裂并非由于设计裕量不足引起,而是在制造过程中存在夹砂、聚粉及人工修磨不当等问题,导致接触线不连续,钢弹簧发生了应力集中。

关键词 城市轨道交通;车辆转向架;转臂定位结构;一系螺旋钢弹簧;疲劳断裂

中图分类号 U270.33

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.014

Stress Analysis of Fatigue Fracture in Primary Steel Springs for Urban Rail Transit Vehicle Bogies

SHU You, XUE Shihai, LIU Zhiyuan, ZHOU Dianmai, WANG Yu, ZHANG Wenkang, ZHAO Hongdi (National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

Abstract [Objective] Bogies of urban rail transit vehicles often adopt a swing-arm positioning structure, within which the primary steel springs are prone to fracture, and typical fractures occur at the first working coil in contact with the support ring. Various factors contribute to the fatigue fracture of steel springs, necessitating an in-depth analysis. [Method] Considering actual vehicle operating conditions, the stress calculation

method for steel springs is optimized. Using specific project design parameters as inputs, the stress levels of the steel springs under lateral load conditions are evaluated, and the proportion of stress contributions is calculated. A bench test is conducted on the primary steel spring set of a selected project bogie, and the setup and tooling of the bench test, including the arrangement of the inner and outer strain gauges on primary helical steel springs, test loading procedures, and data analysis methods, are expounded. Stress test results for the inner coil of Spring Group B are analyzed. Using a measurement point on the swing-arm side as an example, the operating conditions of steel springs when vehicle adopts a swing-arm positioning structure is analyzed, with emphasis on the impact of swing-arm rotation on stress at different steel spring positions. Finally, countermeasures against spring fatigue fractures are proposed by improving spring fatigue stress and controlling catenary wire continuity. [Result & Conclusion] The fatigue fractures of such springs are not caused by insufficient design margins, but rather by manufacturing defects, such as sand inclusions, powder aggregation, and improper manual grinding, that result in discontinuities in catenary wires, leading to stress concentration in the steel springs.

Key words urban rail transit; vehicle bogie; swing-arm positioning structure; primary helical steel spring; fatigue fracture

目前,我国城市轨道交通车辆大多采用转臂定位式转向架。由于地铁线路运营高峰时段与非高峰时段的载客量差异较大,且可能同时受横向载荷、转臂转动及线路条件等因素的影响,转向架一系钢弹簧的受力情况比较复杂。个别车辆项目中,转向架的钢弹簧在架修前出现了疲劳断裂现象,其断裂位置大多位于第一工作圈与支撑圈接触线的起始点和终止点处,由此引起了应力集中,进而导致疲劳裂纹的萌生、扩展,最终使钢弹簧断裂^[1-4]。造成钢弹簧局部高应力的因素较多,如附加载荷情况复杂、接触线不良、夹杂异物、结构变位大及线路

条件不良等。其中,附加载荷主要包括轮对横移及转臂转动引起的附加载荷。本文的研究重点在于通过理论计算及台架试验,模拟钢弹簧的受力情况,深入研究附加载荷对钢弹簧疲劳应力的影响。

1 横向载荷分析

我国城市轨道交通车辆一般按 B 类弹簧(只规定轴向刚度)进行设计^[5]。按照车辆项目的技术参数,对转向架一系钢弹簧进行疲劳应力计算,即参照欧洲标准 EN 13906-1:2002《圆形金属丝和棒材制柱形螺旋弹簧 计算和设计 第 1 部分:压缩弹簧》,应力 τ 的计算式为:

$$\tau = 8kFD/(\pi d^3) \quad (1)$$

式中:

k ——修正系数;

F ——AW3(超常载荷)工况下钢弹簧的垂向载荷;

D ——钢弹簧中径;

d ——钢弹簧直径。

但在车辆实际运用中,由于轮轨作用力的存

在,一系钢弹簧会受到横向载荷作用。以我国的北京地铁 6 号线和武汉地铁 7 号线为例,根据钢弹簧设计参数计算钢弹簧的疲劳强度时,动荷系数按 0.3 考虑。根据式(1)可计算得到钢弹簧的最小疲劳应力 $\tau_{kU} = 0.7\tau$,最大疲劳应力 $\tau_{kO} = 1.3\tau$ 。

钢弹簧的实际横向位移为 6 mm,根据 EN 13906-1:2002,考虑了横向载荷的弹簧最大应力 τ_{\max} 的计算式为:

$$\tau_{\max} = 5 \left[\frac{F(D + S_Q) + F_Q(L - d)}{\pi d^3} \right] \quad (2)$$

式中:

S_Q ——钢弹簧的横向位移;

F_Q ——钢弹簧的横向载荷;

L ——载荷 F 下对应的钢弹簧高度。

横向载荷的计算结果及应力占比如表 1 所示。表 1 的计算结果表明:在车辆实际运用中,当一系钢弹簧承受较大的横向载荷时,横向载荷产生的附加应力约为钢弹簧在 AW3 工况下垂向载荷产生应力的 10%。

表 1 横向载荷的计算结果及应力占比

Tab. 1 Transverse load calculation results and stress proportion

线路名称	弹簧位置	刚度/(kN/mm)	F /kN	d /mm	D /mm	τ_{kU} /MPa	τ_{kO} /MPa	τ_{\max} /MPa	应力占比/%
武汉地铁 7 号线	外圈	720	45	41	234	352	654	704	7.6
	内圈	395	25	28	145	384	715	775	8.4
北京地铁 6 号线	外圈	847	38	40	210	287	533	587	10.1
	内圈	356	16	25	125	299	556	615	10.6

注:应力占比 = $[(\tau_{\max} - \tau_{kO})/\tau_{kO}] \times 100\%$ 。

2 台架测试

选取某车辆项目转向架一系钢弹簧组进行台架试验^[6-7]。为满足试验的加载需要,伺服激振控制器选取了 2 个载荷等级(15 t、10 t)的作动器,试验台及工装如图 1 所示,液压伺服系统如图 2 所示。



图 1 试验设备及工装

Fig. 1 Test equipment and tooling



图 2 液压伺服系统

Fig. 2 Hydraulic servo system

数据采集系统使用型号为 VTI1629 的应变测量仪,如图 3 所示。



图 3 应变测量仪器

Fig. 3 Strain measuring instrument

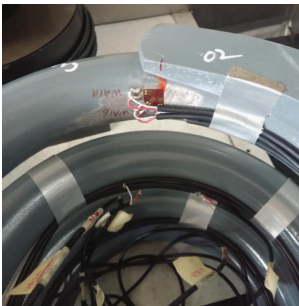
以上设备已经过检定单位校准,且在计量的有效使用期内。主要测试仪器的检测信息如表 2 所示。

为分析钢弹簧上、下接触线在典型装配位置处的应力差异情况,选取某个轮对上的 2 组弹簧进行测试,三向应变片安装在弹簧与支撑圈相邻的端部(又分为上部、下部)工作圈区域,以及中间工作圈区域。B 弹簧组的内圈弹簧典型贴片位置示例如图 4 所示。

表 2 主要测试仪器的检测信息

Tab. 2 Test information of main test instrument

仪器名称	数量/个	型号	测试精度	检定单位	检测结果
动静态应变测试系统	1	VTI-1629	$\pm (0.1\% + 2.5) \text{ mV}$	广州广电计量检测股份有限公司	合格
载荷传感器	4	DR-F150 kN、 DR-F100 kN	1.0%	广东省珠海市质量计量 监督检测所	合格
位移传感器	4	244. 23 型、 244. 22 型	0.5%	广东省珠海市质量计量 监督检测所	合格



a) 在端部工作圈安装应变片



b) 在中间工作圈安装应变片

图 4 典型贴片位置示例

Fig. 4 Example of typical strain gauge location

B 弹簧组内圈弹簧测点布置及初始装配位置如图 5 所示。图 5 中,由于钢弹簧贴片难度较大,贴片过程中部分贴片出现损坏,需要重新贴片,这导致有效测点序号不连续,但对最终测试结果准确性无影响。共有 4 个有效测点:① 3[#]测点和 5[#]测点均布置在中间工作圈的截面上,3[#]测点位于中间工作圈截面的外表面,5[#]测点位于中间工作圈截面的内表面;② 6[#]测点和 8[#]测点均布置在弹簧截面内表面上,6[#]测点位于弹簧截面的上部,8[#]测点位于弹簧截面的下部。

在构架空簧安装面上进行加载,测试内圈钢弹簧、外圈钢弹簧在 2 种载荷工况(AW0(空载)、AW3)、4 个装配位置(0°位置、90°位置、180°位置、270°位置)下的应力情况。其中:将测试钢弹簧组的

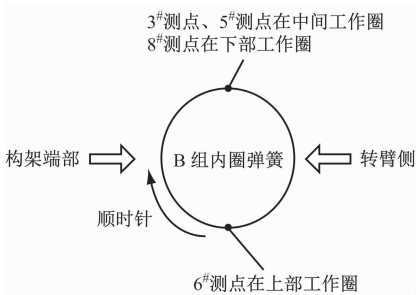


图 5 B 弹簧组内圈弹簧测点布置及初始装配位置示意图

Fig. 5 Diagram of Group B spring inner ring spring measuring point layout and initial assembly position

初始位置定义为 0°位置,其余 3 个位置则为 0°位置按顺时针方向依次旋转 90°、180°及 270°。测试时,先分解构架,再整体旋转钢弹簧组至所需角度,操作过程中应避免发生线缆刮碰。由于测试数据较多,且各弹簧应力测试结果变化趋势基本一致,本文仅对 B 组内圈弹簧的应力测试结果进行分析,测试结果如表 3 所示。

3 转臂结构影响分析

由台架模拟测试结果可知:在车辆的实际运用工况下,转臂定位结构采用钢弹簧时,钢弹簧各测点在 90°和 270°位置所受应力差异明显,这是因为车辆垂向载荷变化会引起转臂结构发生偏转,由此导致钢弹簧的纵向扭转受车辆垂向载荷影响较大,

表3 B组内圈钢弹簧的应力测试结果

Tab.3 Stress test results of Group B inner ring steel spring

测点编号	0°位置处的应力/MPa		90°位置处的应力/MPa		180°位置处的应力/MPa		270°位置处的应力/MPa	
	AW0	AW3	AW0	AW3	AW0	AW3	AW0	AW3
3#测点	150.09	303.73	120.75	227.43	145.47	294.45	164.39	347.04
5#测点	231.77	440.44	209.77	381.91	263.50	517.11	269.07	545.53
6#测点	205.00	388.13	252.00	467.11				
8#测点	166.19	295.23	240.95	475.06	183.39	298.20	133.44	191.19

但对钢弹簧的横向扭转基本没有影响。在车辆的AW0工况下,设计要求转臂节点中心略高于轴箱中心,以确保在载荷达到AW2(额定载荷)工况时车辆转臂尽量处于水平状态。

但随着载荷的持续增大,钢弹簧所受应力随之增大,同时车辆转臂偏转后发生“夹角”效应,转臂受扭情况加剧。对钢弹簧测点在构架端部与转臂侧的应力差异进行详细分析,以 8#测点在转臂侧(即 90°位置处)为例,其车辆转臂结构钢弹簧的运用工况如图 6 所示。

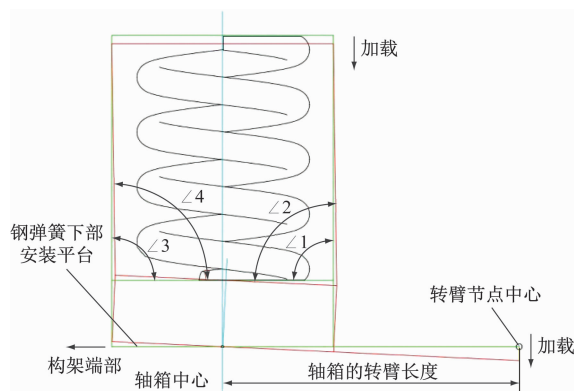


图6 钢弹簧8#测点90°位置处的运用工况示意图

Fig.6 Diagram of working condition at the 90° position of steel spring 8[#] measuring point

如图6所示,随着车辆载荷的不断增加,转臂节点与钢弹簧平面安装座的运动近似同步,均为垂向向下运动:

1) 转臂结构转动,导致弹簧中心向转臂侧平移,并使弹簧下部产生偏转(即弹簧在转臂侧的偏转角由 $\angle 1$ 变化至 $\angle 2$),偏转角变小,此时8#测点的受扭程度很高。与8#测点在 0° 位置、 180° 位置时所受应力的平均值相比,8#测点在 90° 位置处受到的应力增幅较大(约为60%)。

2) 8#测点位于 270°位置(即构架端部)时,在载荷不断增大情况下,∠3 逐渐增大至 ∠4,钢弹簧

所受应力值变小。与 8#测点在 90°位置处相比, 钢弹簧所受到的应力降幅约为 35%。

3) 3[#]测点、5[#]测点在 270°位置时,钢弹簧的被压缩高度大于其在 90°位置处的被压缩高度,所以这 2 个测点在 270°位置处的受扭程度较其在 90°位置处要严重一些,2 个测点测试应力的增幅达 40% 以上。此外,与 3[#]测点、5[#]测点在 0°和 180°位置处所测应力的平均值相比,2 个测点在 270°位置处所受应力增幅接近 15%。

上述测试结果表明,在纵向方向上,同一测点在 270° 与 90° 处的应力差异最大,而钢弹簧在 0° 和 180° 位置处所测得的应力差异并不大。

4 结语

在轨道交通车辆转向架弹簧的设计过程中,应根据实际运用工况及自身结构确定合理的设计输入,须考虑横向载荷、设计结构及线路条件等因素的影响,避免弹簧发生设计裕量不足问题。

本文的弹簧计算结果和台架测试结果均表明, 弹簧正常最大应力点位于中间工作圈截面的内表面处。而车辆转向架钢弹簧断裂问题大多发生在与接触线相邻的第一工作圈, 且为应力集中导致弹簧疲劳断裂, 这说明此类疲劳断裂并非由于设计裕量不足引起。根据经验推断, 钢弹簧疲劳断裂可能是夹砂、聚粉及人工修磨等工艺过程导致接触线不连续, 钢弹簧发生应力集中所致。而对于本文提及的转臂定位结构, 若该结构存在接触线不连续且接触线方向趋近于纵向, 此类断裂问题会进一步突显, 加速疲劳断裂进程, 进而导致钢弹簧的故障率更高。

目前,城市轨道交通车辆采用转臂定位结构较多,且钢弹簧用量较大,车辆运维既要考虑降低成本,又要兼顾设备的全寿命周期。弹簧产品利润的进一步压缩,将促使供应商制造成本与管理成本的

缩减,这在一定程度上对弹簧产品质量造成影响。

参考文献

- [1] 付国栋. HXD1D 型机车轴箱弹簧故障原因浅析[J]. 内燃机与配件, 2018(23): 157.
FU Guodong. Analysis on the causes of axle box spring failure of HXD1D locomotive[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018(23): 157.
- [2] 曾成, 陈忠明. 广州地铁某型车辆一系螺旋钢弹簧断裂问题分析[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(9): 145.
ZENG Cheng, CHEN Zhongming. Fracture problem analysis of series 1 suspension helical spring on a certain type vehicle in Guangzhou Metro[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(9): 145.
- [3] 贾洪龙, 况宇, 李文学. 铁道车辆轴箱钢弹簧断裂故障与安全性分析[J]. 铁道车辆, 2016, 54(9): 34.
JIA Honglong, KUANG Yu, LI Wenxue. The trouble of breaking of axle box steel springs on rolling stock and safety analysis[J]. Rolling Stock, 2016, 54(9): 34.
- [4] 沈豪. 上海轨道交通 03A01 型车辆轴箱弹簧断裂原因分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 91.
SHEN Hao. Analysis of the axle-box spring fracture of 03A01 type train in Shanghai Metro[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(5): 91.
- [5] 张伟龙, 张志和, 刘辉, 等. 转向架轴箱弹簧断裂失效分析及预防[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(5): 104.
ZHANG Weilong, ZHANG Zhihe, LIU Hui, et al. Analysis and

precaution of the bogie axle-box springs fracture of high-power AC-drive and heavy haul locomotive[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(5): 104.

- [6] 王文静, 李广君, 唐薇, 等. 高速动车组轴箱弹簧疲劳失效机理研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(6): 41.
WANG Wenjing, LI Guangjun, TANG Wei, et al. Research on mechanism of fatigue crack of high speed train axle box spring[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(6): 41.
- [7] 尹太国. 轮轨中高频激励下一系钢弹簧动应力研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
YIN Taiguo. Study on dynamic stress of primary steel spring under high frequency excitation of wheel and rail[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [8] 张羽, 郑天锐, 李渊. 铁路客车轴箱钢弹簧断裂失效的分析研究[J]. 机车车辆工艺, 2018(4): 40.
ZHANG Yu, ZHENG Tianrui, LI Yuan. Fault analysis of crack on steel spring of journal box for passenger wagon[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2018(4): 40.

• 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
• 通信作者:舒友,正高级工程师,you365c@163.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 66 页)

参考文献

- [1] 谭晓明, 杨志刚, 吴晓龙, 等. CIT500 车外噪声源频谱分解模型的试验研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(7): 32.
TAN Xiaoming, YANG Zhigang, WU Xiaolong, et al. Experimental study on frequency spectrum component model of noise source outside CIT500 train[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(7): 32.
- [2] TAN X M, YANG Z G, TAN X M, et al. Vortex structures and aeroacoustic performance of the flow field of the pantograph[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 432: 17.
- [3] TAN X M, XIE P P, YANG Z G, et al. Adaptability of turbulence models for pantograph aerodynamic noise simulation[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019(1): 6405809.
- [4] LAUTERBACH A, EHRENFRIED K, LOOSE S. Investigations of aeroacoustics of high-speed trains in wind tunnels by means of phased microphone array technique[C]//Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Cham: Springer International Publishing, 2015: 175.
- [5] LAUTERBACH A, EHRENFRIED K, LOOSE S, et al. Micro-

phone array wind tunnel measurements of Reynolds number effects in high-speed train aeroacoustics[J]. International Journal of Aeroacoustics, 2012, 11(3/4): 411.

- [6] DENG Y Q, XIAO X B, HE B, et al. Analysis of external noise spectrum of high-speed railway[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(12): 4753.
- [7] SUN X, XIAO H. Numerical modeling and investigation on aerodynamic noise characteristics of pantographs in high-speed trains[J]. Complexity, 2018, 2018(1): 6932596.
- [8] ZHANG Y, ZHANG J, LI T, et al. Investigation of the aeroacoustic behavior and aerodynamic noise of a high-speed train pantograph[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(4): 561.

• 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
• 通信作者:余永革,正高级工程师,yuyongge@163.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license