

摘要：文章介绍了上海轨道交通车辆现有转向架构架在运营中实际载荷的在线试验，并通过试验数据的分析，提出合适的构架设计参数。

关键词：地铁列车；构架；载荷；测试；分析

0 引言

上海轨道交通 1、2 号线列车转向架构架经过 3~5 年时间运营后，相继在电机吊座、齿轮箱吊杆座、牵引拉杆座发生裂纹，后虽经局部结构补强，现仍在上述部位发现裂纹，除此之外，横向止挡座及横梁等部位也出现了裂纹，且数量在不断增加，给列车安全运行带来严重隐患。为找出构架频繁发生裂纹的原因，有必要通过对列车转向架进行加速度测试和构架动应力测试，掌握列车在线路上实际运行的载荷工况，并通过测试为新设计的构架提供设计及试验载荷的依据。

1 构架强度现状

针对上海轨道交通 1、2 号线转向架构架的电机吊座、齿轮箱吊杆座、牵引拉杆座、横向止挡座、横梁等主要受力部位出现裂纹现象，按 DIN15018 标准对构架的上述部位重新进行了转向架构架强度计算，结果显示上述重要部位中大多数均已小于构架设计的安全裕量。图 1 显示了转向架构架主要受力部位目前的强度计算结果。对于实际值与设计值比值大于 1 的区域，即危险区域，这些区域是此次试验的重点部位，通过在这些部位上贴上应变片和应变花，在转向架电机、轴箱上装加速度传感器，通过列车在正线载客运营检测构架实际运用中关键部位的应力及加速度。

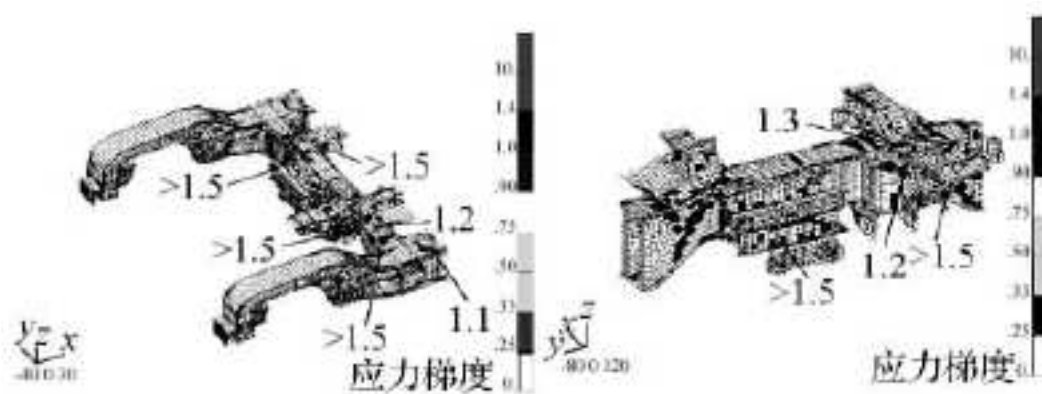


图 1 构架主要受力部位有限元强度计算

2 试验方法

2.1 试验依据

试验按 GB5599—85《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》进行。

2.2 试验设备及测试系统

试验的主要设备和工装有加速度传感器，120Ω 电阻式应变花、应变片若干，NI 专用机箱及专用信号调理器与接线器，信号输出卡，A/D 卡，便携式计算机（包括数据交换网卡、网线），屏蔽信号线等。

2.3 测点布置

根据有限元计算中显示的危​​险部位，构架在线试验应力测点布置如图 2 所示，每一个应力片都备一个温度补偿片，两个应力片组成一个半桥，用一根 4 芯屏蔽电缆与仪器相连接。

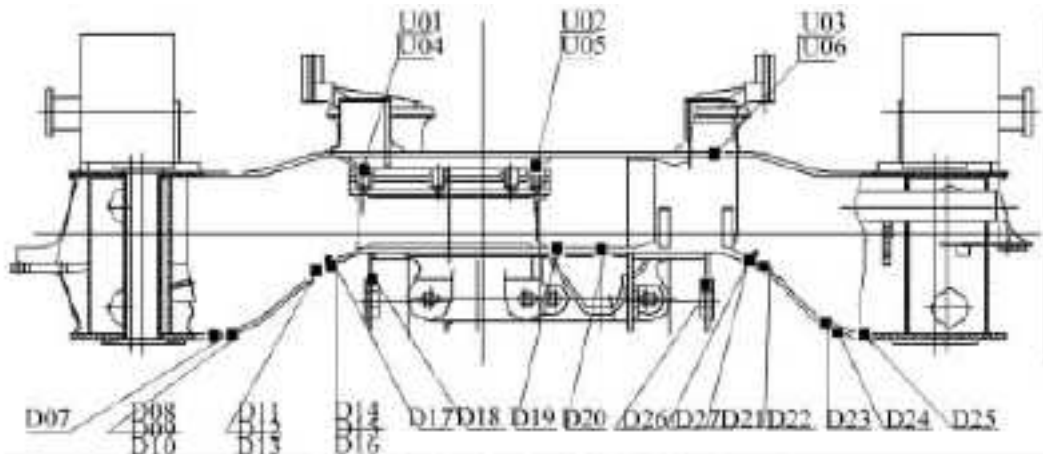


图 2 在线试验应力测点布置

测试电机、构架、轴箱的振动加速度及齿轮箱吊杆力与牵引拉杆力，加速度传感器布置如图 3 所示。电机加速度传感器布置在电机质心所处的定子外壳上方平面，构架加速度传感器布置在轴箱垂向止挡上方的构架侧梁上平面，轴箱加速度传感器布置在轴箱上平面中心。

2.4 试验数据处理方法

2.4.1 处理软件

测试软件是基于 LabView 平台上自主开发的专用测试软件。数据分析软件主要有 Origin6.0、MatLab 等。

2.4.2 数据处理方法

试验数据的采样频率为 1 000 Hz，数据滤波为 Bessel4 阶低通滤波，机器硬件低通滤波频率不低于 500 Hz。数据时域处理采用雨流法进行统计。试验中的数据取一个最大值为构架在线试验的最大载荷，所取最大值是指在单个试验全过程中所测得的最大值，用检测到的最大值来作为新设计构架的静强度依据及进行静载荷试验。

2.5 试验工况

测试列车在上海轨道交通 1 号线上连续运行了一天，试验运行里程 315 km。1 号线线路全长 32.66 km，采用 U71Mn 60 kg/m 的无缝钢轨，最小曲线半径 300 m，最小竖曲线半径 3000m，最大坡度 35‰。

3 试验数据

3.1 在线试验滤波频率的确定

对在线试验应力、加速度测试信号的频谱进行分析。图 4 与图 5 为构架某点应力频谱与电机加速度频谱，图中浅色背景为实时采集的时域信号，深色背景为频域分析结果。可见应力信号频率主要集中在 50~125 Hz，而电机加速度信号频率主要集中在 50~250 Hz。试验分别对数据用 75 Hz、125 Hz 及 250 Hz 进行滤波，结果显示若分析试验数据的滤波频率在 75 Hz，显然滤波丢掉了许多有效数据，会导致测试值相对实际值偏低；试验数据能明显反映出大多数部位的应力与加速度用 75 Hz、125 Hz 滤波的结果较接近，250 Hz 滤波后数值明显变大。考虑到滤波频率对试验结果的影响，从偏于安全的角度，为确保滤波后数据的最大有效性，决定采用以 250 Hz 频率滤波的数据作为最终测试值。



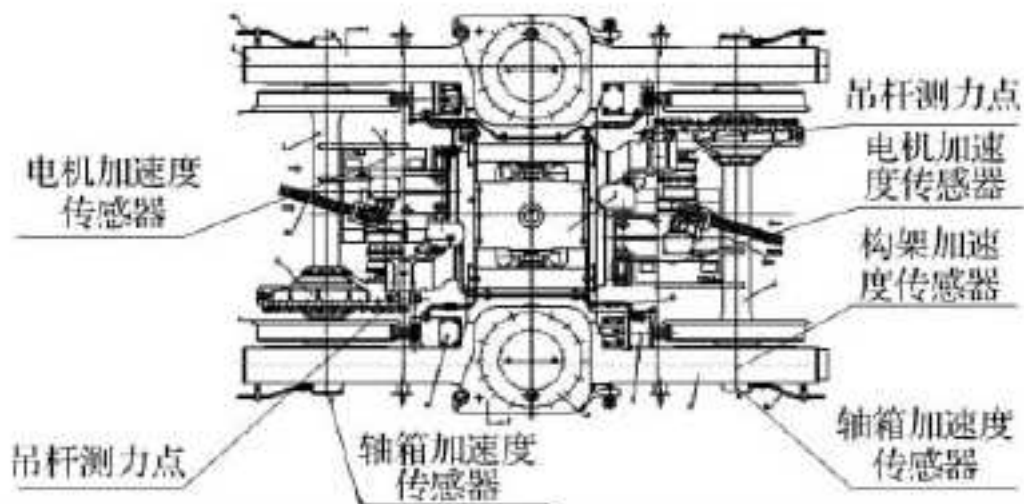


图 3 在线试验加速度传感器布置

3.2 在线试验数据统计

3.2.1 静应力测试

根据检修工艺，转向架组装后进行加载试验，测试规定载荷下轴重是否在允许的范围。加载量对应 AW0~AW3 的车重，加载后各测点中除 D07、D19、D25 等通道与垂向载荷有关，其它通道受垂向载荷影响较小，三处较大的静应力测试结果见表 1。

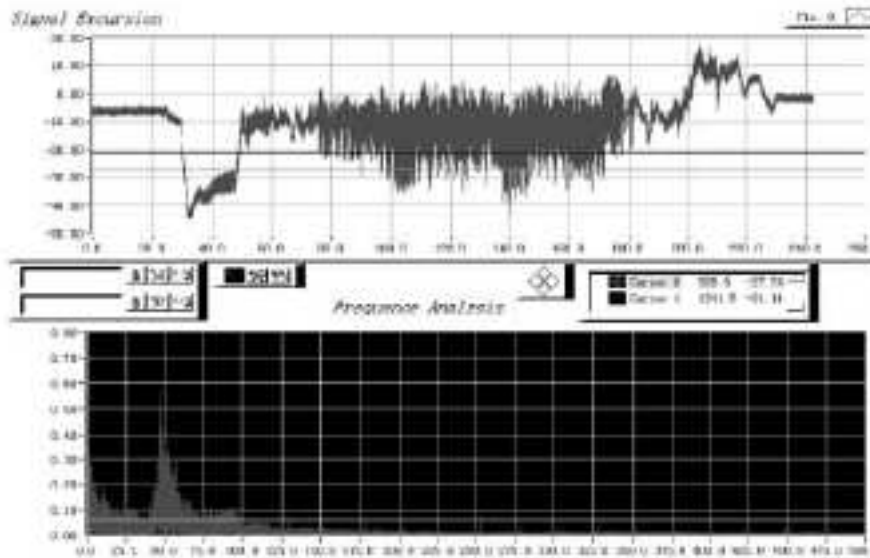


图4 构架某点应力频谱分析

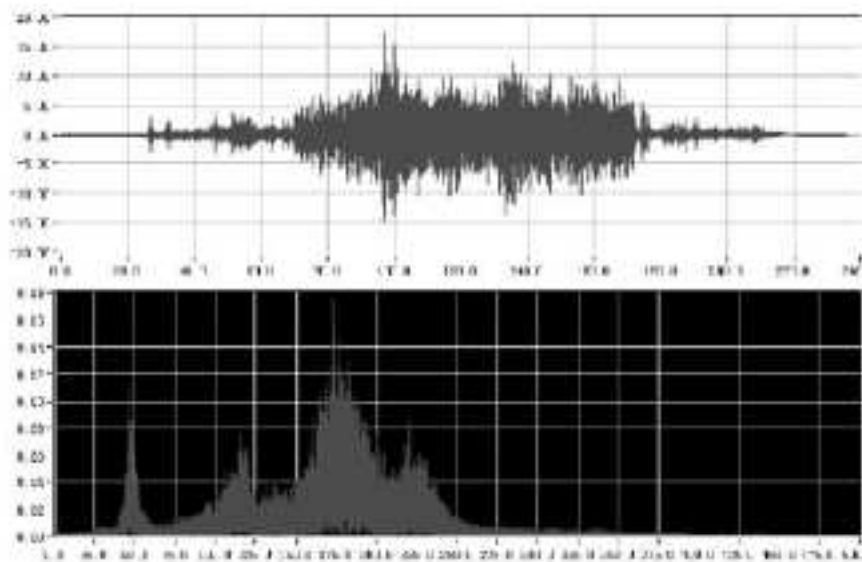


图5 电机加速度频谱分析

表1 三处较大的静应力测试结果 MPa

测点 编号	AW0 第1次	AW0 第2次	AW2 第1次	AW2 第2次	AW3 第1次	AW3 第2次
D07	20.2/- 2.2	20.0/- 3.4	27.4/- 2.8	27.2/- 3.0	31.8/- 3.0	32.0/- 2.6
D19	11.8/- 0.6	11.6/- 1.6	15.5/- 1.5	16.0/- 1.6	18.4/- 1.8	18.2/- 1.0
D25	17.8/- 0.6	18.8/- 1.40	26.2/- 1.2	26.4/- 1.2	31/- 1.4	31/- 1.2

3.2.2 动应力在线试验

对被测转向架进行动应力测试，通过对实测数据进行 75 Hz、125 Hz 及 250 Hz 频率滤波，滤波后的最值见表 2。

表 2 在线试验不同频率滤波后应力的最值统计

测点编号	最大值 /MPa			最小值 /MPa			通道号
	75 Hz	125 Hz	250 Hz	75 Hz	125 Hz	250 Hz	
U01	41	44	44	-41	-49	-48	1
U02	74	95	104	-51	-63	-73	2
U03	40	42	69	-48	-56	-74	3
U04	45	51	57	-39	-45	-55	4
U05	55	64	69	-56	-60	-63	5
U06	59	62	63	-45	-47	-73	6
D07	64	66	66	-45	-55	-58	7
D08	11	12	17	-8	-4	-10	8
D09	23	25	27	-21	-25	-27	9
D10	23	23	35	-21	-25	-30	10
D11	64	67	73	-99	-114	-128	11
D12	31	33	38	-48	-56	-63	12
D13	37	43	48	-22	-24	-26	13
D14	84	90	92	-68	-70	-71	14
D15	34	38	41	-28	-28	-29	15
D16	16	17	17	-20	-21	-22	16
D17	78	82	84	-58	-60	-60	17
D18	21	24	25	-13	-15	-16	18
D19	123	145	152	-57	-60	-61	19
D20	43	54	61	-64	-77	-86	20
D21	68	66	62	-65	-70	-86	21
D22	82	82	69	-71	-67	-72	22
D23	32	37	83	-26	-28	-77	23
D24	40	43	51	-35	-36	-38	24
D25	64	64	70	-35	-39	-42	25
D26	18	22	24	-13	-15	-16	26
D27	82	93	101	-72	-80	-82	27
D29	10	18	48	-12	-18	-40	28

3.2.3 振动加速度在线试验

对被测转向架进行振动加速度测试，通过对实测数据进行不同频率滤波，滤波后的最值见表 3。



表 3 在线试验不同频率滤波后振动加速度的最值统计

测点位置 和测试内容	最大值			最小值			通道号
	75 Hz	125 Hz	250 Hz	75 Hz	125 Hz	250 Hz	
电机纵向加 速度(x方向)	1.5g	3.1g	7.8g	-1.5g	-2.8g	-6.9g	42
电机横向加 速度(y方向)	1.5g	2.6g	5.2g	-1.6g	-2.6g	-5.3g	43
电机垂向加 速度(z方向)	2.3g	2.8g	4.8g	-2.3g	-3.0g	-5.2g	44

表 4 在线试验不同频率滤波后吊杆力
及牵引拉杆力的最值统计

测点 编号	测试 内容	最大值 /kN			最小值 /kN			通道 号
		75 Hz	125 Hz	250 Hz	75 Hz	125 Hz	250 Hz	
L1	吊杆力	17	20	25	-19	-20	-33	29
T1	牵引拉杆力	34	34	36	-48	-48	-49	31

3.2.4 吊杆力及牵引拉杆力在线试验

对被测转向架进行吊杆力及牵引拉杆力测试，通过对实测数据进行不同频率滤波，滤波后的最值见表 4。

4 数据分析

4.1 应力数据雨流法计数

对转向架部分测点 250 Hz 滤波后应力幅值大于 80 MPa 的频次见表 5。



表 5 在线试验数据部分应力测试值 250 Hz 滤波雨流法计数

应力幅 度 /MPa	次数			
	U02 电机座 上盖板	D11 横梁下盖 板电机座侧上 弯圆弧外边	D19 横梁下盖板 电机座齿轮箱 吊座连接区域	D27 横梁下盖 板齿吊座侧上 弯圆弧里边
80~84	0	7	13	9
84~88	3	5	6	1
88~92	2	11	13	5
92~96	0	3	16	1
96~100	2	0	9	3
100~104	1	0	6	5
104~108	—	1	2	—
108~112	—	0	1	—
112~116	—	3	2	—
116~120	—	5	1	—
120~124	—	1	1	—
124~128	—	1	0	—
128~132	—	—	0	—
132~136	—	—	1	—
136~140	—	—	2	—
140~144	—	—	0	—
144~148	—	—	3	—
148~152	—	—	1	—

4.2 应力数据雨流法计数频次

根据试验里程（即 315 km）换算得到的在线试验应力数据雨流法频次见表 6。



表 6 每万公里应力大于 80 MPa 出现次数
推算表(250 Hz滤波)

应力幅 度 /MPa	U02 电 机座上 盖板	D11 横梁下盖 板电机座侧上 弯圆弧外边	D19 横梁下盖板 电机座齿轮箱吊 座连接区域	D27 横梁下盖 板齿吊座侧上 弯圆弧里边
80~84	0	221	411	284
84~88	94	158	189	31
88~92	63	348	411	158
92~96	0	94	506	31
96~100	63	0	284	94
100~104	31	0	189	158
104~108	—	31	63	—
108~112	—	0	31	—
112~116	—	94	63	—
116~120	—	158	31	—
120~124	—	31	31	—
124~128	—	31	0	—
128~132	—	—	0	—
132~136	—	—	31	—
136~140	—	—	63	—
140~144	—	—	0	—
144~148	—	—	94	—
148~152	—	—	31	—

4.3 齿轮箱吊杆力及牵引拉杆力数据统计分析

根据试验里程（即 315 km）换算得到的在线试验齿轮箱吊杆力及牵引拉杆力数据雨流法频次见表 7。



表 7 齿轮箱吊杆力及牵引拉杆力
万公里频次推算表(250 Hz 滤波)

力/kN	齿轮箱吊杆	牵引拉杆
8~12	—	10 464
12~16	3 292	5 224
16~20	1 171	2 833
20~24	569	1 361
24~28	174	807
28~32	79	379
32~36	0	31
36~40	31	0
40~44	—	0
44~48	—	0
48~52	—	31

5 试验结论

通过对上海轨道交通车辆既有转向架载荷在线测试，在对所测得的数据进行详细分析后得出：

- 1) 试验分析认为构架应力信号低通滤波频率不低于 125 Hz，电机加速度信号滤波频率不低于 250 Hz，综合考虑，建议对转向架载荷测试数据的滤波频率为 250 Hz 较合理。
- 2) 试验中转向架构架测得的最大应力达 152 MPa，位置在横梁下盖板电机座齿轮箱吊座连接区域。
- 3) 试验测得电机纵向加速度最大值为 7.8g/-6.9g，平均最大值±6.5g，电机横向加速度最大值为 5.2g/-5.3g，平均最大值±4.8g，电机垂向加速度最大值为 4.8g/-5.2g，平均最大值-1±4.2g。综合考虑，建议对转向架构架强度载荷计算中电机座三向加速度最大取值为 $a_x=\pm 10g$ ； $a_y=\pm 5g$ ； $a_z=(-1\pm 8g)$ 。
- 4) 试验推算每万公里吊杆力最大值在 36~40 kN 的范围内共出现 31 次，计算出其平均最大值为 38 kN，综合考虑，建议转向架构架强度载荷计算中齿轮箱吊杆力取值±40 kN。
- 5) 试验推算每万公里牵引拉杆力最大值在 48~52 kN 的范围内出现 31 次，计算出其平均最大值为 29kN。故建议转向架构架强度载荷计算中牵引拉杆力取值可为±29kN。

6 总结

- 1) 转向架载荷在线测试结果反映了既有转向架实际运行状态，为对现有转向架构架寿命评估提供了数据分析依据，也为后续新设计构架的参数确定提供了依据。
- 2) 通过测试反映出对于大客流下的载荷状况，须对现构架的电机座、齿轮箱吊杆座等主要结构进行进一步加强；同时可考虑通过提高横梁断面面积及惯性矩，以此增强横梁抗扭能力。建议今后构架设计可考虑采用无缝钢管的结构横梁替代箱型结构，以提高构架的承载能力。
- 3) 通过试验也侧面反映出目前列车运营线路的状况，进一步提高运营线路的维护等级和线路质量将改善列车转向架构架和其它设备的运营条件。

参考文献：

- [1]同济大学铁道与城市轨道交通研究院.转向架构架强度储备综合评估研究[R].上海：同济大学铁道与城市轨道交通研究院，2008.
- [2]GB5599—85，铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S].
- [3]严隽耄.车辆工程[M].北京：中国铁道出版社，1992.



[4]丁丽娟,数值计算方法[M].北京:北京理工大学出版社,2002.

[5]SIMENS TS BG EN.Strength Evaluation of Shanghai Line1&Line2 BogieFrame[R]. [S.L.]: SIMENS TS BG EN, 2006.

