

牵引与制动工况下城市轨道交通车辆 结构强度分析方法^{*}

于春洋 程亚军 刘春艳 薛宁鑫 姜春龙 廉 帅 王家兴

(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] 牵引载荷和制动载荷过大, 是城市轨道交通车辆牵引梁-枕梁-缓冲梁结构(以下简称“牵枕缓结构”)焊缝产生疲劳裂纹的重要原因之一。为了有效控制车辆结构产生裂纹的可能性, 需要在设计阶段对牵引与制动工况下车辆结构强度的分析方法进行深入研究。[方法] 以我国某城市轨道交通线路为研究对象, 通过线路试验数据分析受力点载荷的相位关系, 对牵引与制动工况下载荷的相位测试结果进行分析。在阐述牵引与制动工况下载荷分配理论的基础上, 设计了 4 个有限元模型约束方案, 以分析不同方案下的车辆牵枕缓结构强度, 对比仿真载荷值与试验载荷值。选取牵枕缓结构与底架焊接的 3 处主要焊缝, 分析了 3 处焊缝在 4 个建模方案下的疲劳评估结果。[结果及结论] 方案 1—方案 3 下, 载荷通过惯性载荷的形式施加, 牵引与制动工况下受力点的载荷分配比例、受力方向同列车运行时的载荷分配比例、受力方向不一致。方案 4(集中力加载形式)能较好地反映受力点载荷的相位关系及载荷大小。

关键词 城市轨道交通; 列车牵引工况; 列车制动工况; 车辆结构强度

中图分类号 U264.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.015

Structural Strength Analysis Method of Urban Rail Transit Vehicle under Traction and Braking Conditions

YU Chunyang, CHENG Yajun, LIU Chunyan, XUE Ningxin, JIANG Chunlong, LIAN Shuai, WANG Jiaying

(National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

Abstract [Objective] Excessive traction and braking loads are significant factors contributing to inducing fatigue cracks in the welded joints of the 'TBB (traction beam-bolster beam-buffer beam) structure' in urban rail transit vehicles. To effectively mitigate the risk of structural cracking, it is essential to

thoroughly investigate the methods for analyzing the structural strength of vehicles under traction and braking conditions during design phase. [Method] Taking a specific urban rail transit line in China as the research object, the line test data are analyzed to study the phase relationships of loads at stress points. The phase test results for traction and braking loads are examined. Based on the theoretical load distribution under traction and braking conditions, four finite element model constraint schemes are designed to analyze the strength of the TBB structure in different schemes. Simulated and experimental load values are compared. Three primary welds at the junctions of the TBB structure and the underframe are selected, and the fatigue assessment results of the 3 welds in 4 modeling schemes are analyzed. [Result & Conclusion] Under Scheme 1-3, the loads are applied as inertial loads, resulting in dissonance between load distribution proportion and direction at stress points under traction/breaking conditions, and those under train operating conditions. Scheme 4 (concentrated force loading form) can effectively reflect the phase relationship and magnitudes of the loads at the stress points.

Key words urban rail transit; train traction working condition; train braking working condition; vehicle structural strength

随着城市轨道交通车辆运行里程的增加, 车辆服役环境日益复杂, 部分车体结构的薄弱位置可能会出现疲劳裂纹, 进而危害列车运行安全。针对城市轨道交通车体结构的疲劳问题, 诸多学者通过仿真分析和试验等方式, 深入研究了车体结构的疲劳性能。文献[1-2]基于国内外标准提供的气动载荷, 通过仿真分析, 对高速铁路动车组头车的气动疲劳性能进行了研究。文献[3-4]分别基于欧洲标准 EN 12663:2010《铁路应用-铁道车辆车体结构要求》, 对动车组车体结构进行了疲劳强度仿真分析

^{*} 中国中车股份有限公司重点科技研究开发计划项目(2023CCB172)

和整车疲劳试验方法研究。文献[5-6]深入研究了轨道交通车辆车体底架局部疲劳强度试验方法,为动车组、地铁车辆的局部疲劳试验提供了更合理的方案,以节约整车试验成本,缩短研发周期。

我国标准 TB/T 3541—2016《动车组车体结构强度设计及试验》、欧洲标准 EN 12663-1:2010 + A2: 2023 *Railway applications-Structural requirements of railway vehicle bodies* 等标准给出了车体结构的疲劳载荷。其中,牵引载荷和制动载荷是导致牵引梁-枕梁-缓冲梁结构(以下简称“牵枕缓结构”)产生疲劳裂纹的重要因素之一。在对车体的疲劳强度进行仿真分析或样机试验时,将牵引与制动工况下的载荷合理分配到车钩及中心销位置处,是疲劳强度分析的关键。本文基于我国某城市轨道交通线路实测载荷的相位关系,对牵引与制动工况下车辆结构强度的不同仿真分析方法进行对比研究。

1 牵引与制动工况下载荷相位测试结果分析

在列车起动与制动阶段,牵引力与制动力主要通过车钩、中心销向牵枕缓结构传递载荷,因此,在车钩、中心销位置处合理布置传感器,便可得到车辆在牵引与制动工况下各载荷之间的相位关系。在车钩拉杆位置处沿轴向布置单向应变片(见图1),可通过应变片的应变状态判断得到该位置处车钩载荷的方向。在中心销的牵引拉杆位置处沿轴向布置单向应变片(见图2),可结合列车运行状态(牵引或制动)与应变片的应变状态,判断得到中心销位置处的载荷方向。

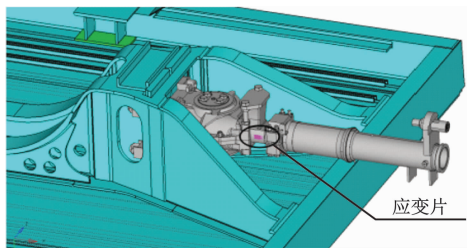


图1 车钩应变片位置图

Fig. 1 Diagram of coupler strain gauge position

本文以我国某城市轨道交通线路的6节编组A型车(4动2拖)为例进行研究。该列车的头车(Tc01)和尾车(Tc06)为拖车,中间车(M02、M03、M04、M05)为动车,其中,M02车的牵引结构如图3

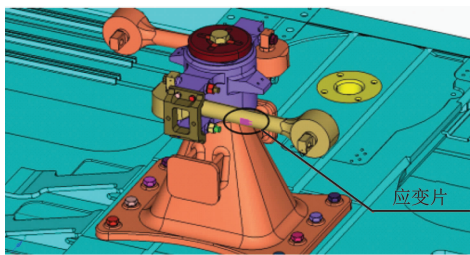


图2 车钩牵引拉杆应变片位置图

Fig. 2 Diagram of coupler traction rod strain gauge position

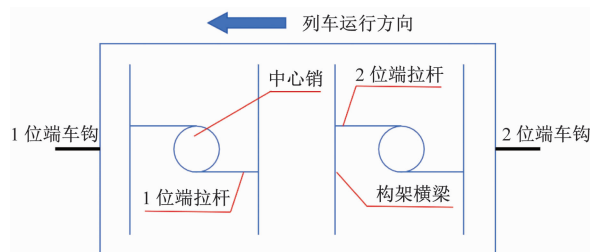


图3 M02车牵引结构示意图

Fig. 3 Diagram of M02 train traction structure

所示。分别在M02车车体两端的牵引拉杆、车钩位置处布置应变片,由于车体同一端两处拉杆的受力方向相反,因此只需在车体两端不同侧的牵引拉杆处布置应变片。试验时,牵引拉杆的应变片布置在图3所示的1位端拉杆、2位端拉杆位置处。

对车钩、牵引拉杆处的应变数据进行滤波处理。牵引工况下M02车各测试点牵引拉杆与车钩相位关系如图4所示,制动工况下M02车各测试点牵引拉杆与车钩相位关系如图5所示。

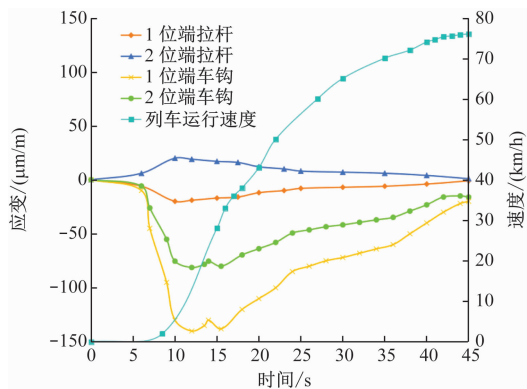


图4 牵引工况下M02车各测试点牵引拉杆与车钩相位关系

Fig. 4 Phase relationship between traction rods and couplers at each M02 train test point under traction conditions

由图4、图5可知:

1) 牵引工况下,1位端车钩和2位端车钩位置均处于受压状态;1位端拉杆为受压状态,2位端拉

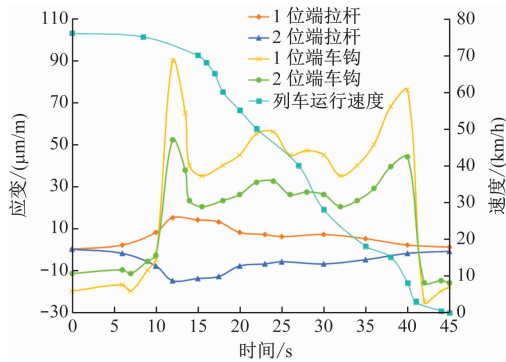


图5 制动工况下 M02 车各测试点牵引拉杆与车钩相位关系

Fig. 5 Phase relationship between traction rods and couplers at each M02 train test point under braking conditions

杆为受拉状态,拉压状态相反;1 位端中心销和 2 位端中心销的受力方向与列车运行方向一致。

2) 制动工况下,1 位端车钩和 2 位端车钩位置均处于受拉状态;1 位端拉杆为受拉状态,2 位端拉

杆为受压状态,拉压状态相反;1 位端中心销和 2 位端中心销的受力方向均与列车运行方向相反。

2 牵引与制动工况下载荷分配理论

仍以上文的测试列车为例进行研究。列车加速或制动时,整列车通过电制动、机械制动实现均匀加速或减速。设列车在某时刻的牵引加速度或制动加速度为 a ,第 i 节车厢的质量为 M_i ,则第 i 节车厢所需的牵引力或制动力 $F_i = M_i a$,整列车牵引或制动力 $F_T = \Sigma M_i a$ 。假设每节车厢的质量均为 M ,即 $M_i = M$,则驱动或制动每节车厢的力 $F_1 = F_2 = \dots = F_6 = F = Ma$, F 为每节车厢所需的牵引力或制动力。

再设每列车的动车数为 m ,拖车数为 n ,则每辆动车需要提供的牵引力或制动力为 $F(m+n)/m$ 。若制动力仅考虑电制动,列车在牵引工况和制动工况下中心销及车钩处的载荷分配如图 6 所示。

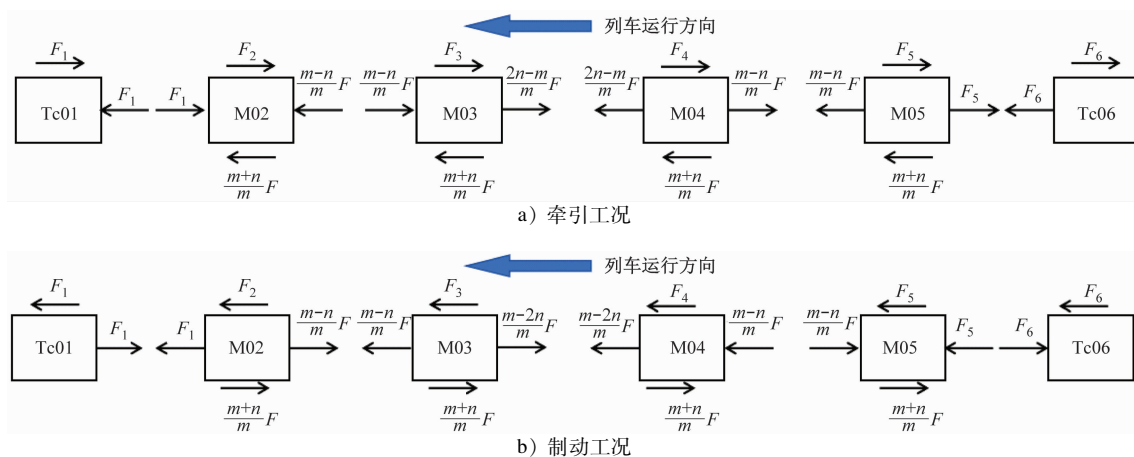


图6 在牵引工况和制动工况下中心销及车钩处的载荷分配

Fig. 6 Load distribution at center pins and couplers under traction and braking conditions

在上述假设条件下,本文研究的 6 节编组 A 型车 M03 车的 2 位端车钩受力为 0。在列车的牵引与制动工况下,头车的 1 位端车钩不受力,中心销仅承受拖车转向架惯性载荷,2 位端车钩承受 1 倍的牵引力或制动力。每辆动车的中心销受力及方向均一致。对比分析所有动车的载荷,M02 车的受力状态最为恶劣,其 1 位端车钩须承受 1 倍的牵引力或制动力,2 位端车钩须承受 0.5 倍的牵引力或制动力,中心销须承受 1.5 倍的牵引力或制动力。

3 不同仿真分析方法对比

3.1 疲劳载荷及建模方法

EN 12663-1:2010 + A2:2023 推荐采用列车实

际运行时的牵引载荷与制动载荷开展车辆结构强度分析,以列车起停次数作为载荷循环次数,且考虑非计划性停车次数。在没有参考数据时,可采用 EN 12663-1:2010 + A2:2023 标准提供的规定值 $\pm 0.15g$ 作为惯性载荷,循环次数取 10^7 次,以考察车体结构的疲劳性能。

对车体结构在牵引载荷、制动载荷下的疲劳性能进行仿真分析时,其有限元模型通常有 4 种约束方式,为此,本文设置了 4 个有限元模型约束方案,如表 1 所示。其中:方案 1、方案 2、方案 3 在中心销或车钩处进行纵向位移约束,载荷通过惯性载荷的形式施加;方案 4 则采用图 6 所示的载荷分配方式,

将中心销和车钩处的牵引载荷、制动载荷以集中力的形式分配到各作用点处,车体在纵向的受力总体处于平衡状态,因此只需在车体端梁对称点处约束纵向位移,以限制刚体位移。

表 1 有限元模型约束方案
Tab.1 Finite element model constrain plans

建模方案	3 个方向的约束方式		
	垂向	横向	纵向
方案 1	空簧座位移约束	中心销横向止挡位移约束	中心销位移约束
方案 2	空簧座位移约束	中心销横向止挡位移约束	车钩位移约束
方案 3	空簧座位移约束	中心销横向止挡位移约束	中心销和车钩位移约束
方案 4	空簧座位移约束	中心销横向止挡位移约束	端梁对称点刚体位移约束

3.2 仿真载荷值与试验载荷值的对比
仍以该列车的 M02 车为分析对象,基于表 1 的方案 1—方案 3,对车体进行加载并计算。方案 1、方案 2、方案 3 采用惯性载荷的方式加载,其在 1 位端中心销、2 位端中心销、1 位端车钩及 2 位端车钩处的载荷分配情况如表 2 所示。

表 2 方案 1—方案 3 下中心销、车钩处的载荷分配情况
Tab.2 Load distribution at center pins and couplers in Scheme 1 to Scheme 3

建模方案	工况	1 位端中心销		2 位端中心销		1 位端车钩		2 位端车钩	
		载荷/kN	占比/%	载荷/kN	占比/%	载荷/kN	占比/%	载荷/kN	占比/%
方案 1	牵引	31.6	50	31.6	50	0	0	0	0
	制动	-31.6	50	-31.6	50	0	0	0	0
方案 2	牵引	0	0	0	0	31.6	50	31.6	50
	制动	0	0	0	0	-31.6	50	-31.6	50
方案 3	牵引	3.0	5	3.0	5	28.6	45	28.6	45
	制动	-3.0	5	-3.0	5	-28.6	45	-28.6	45

注:标准载客条件下,每节车辆的总重均为 43.01 t;占比指牵引载荷与牵引总载荷的比值,或制动载荷与制动总载荷的比值。

由表 2 可知:对方案 1、方案 2 进行加载,惯性载荷平均分配至各纵向位移约束点处;对方案 3 进行加载,惯性载荷主要分配至车钩位移的各约束点处,中心销位移约束点处的载荷仅占惯性载荷的 5%。

由图 4—图 6 可知:中心销处的受力方向同列车牵引与制动工况下的加速度方向一致,但两端车钩的受力方向相反。中心销处载荷大于车钩处载荷。通过表 2 的仿真分析结果可以看出:①方案 1、方案 2 为中心销或车钩局部承载,且方案 2 两端车钩处载荷方向一致,这与试验所得的载荷相位不符。②方案 3 为中心销和车钩共同承载,但中心销处载荷小于车钩处载荷。

3.3 疲劳强度分析结果对比

选取牵枕缓结构与底架焊接的 3 处主要焊缝为研究对象,即:焊缝 1(牵引梁上盖板与地板的焊缝)、焊缝 2(枕梁上盖板与地板的焊缝)、焊缝 3(缓冲梁上盖板与地板的焊缝)。图 7 为牵枕缓结构与

车体之间焊缝的示意图。

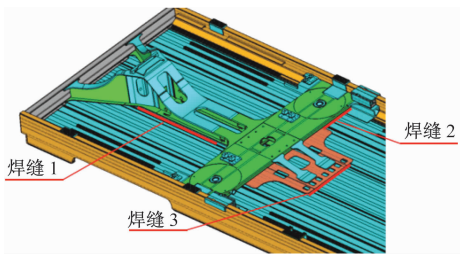


图 7 牵枕缓结构与车体之间焊缝的示意图
Fig. 7 Diagram of the weld seam between TBB structure and vehicle carbody

根据牵枕缓结构与底架焊接结构,基于国际焊接学会发布的 IIW Collection: 2016 Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components,对这 3 处焊缝进行疲劳强度评估。此外,基于 EN 15085:2007 Railway applications-Welding of railway vehicles and components-Part 4: Production requirements,计算这 3 处焊缝的应力状态。3 处焊

缝 4 个建模方案下的疲劳评估结果如表 3 所示。

表 3 3 处焊缝 4 个建模方案下的疲劳评估结果

Tab. 3 Fatigue evaluation results of three welds in four modeling plans

焊缝序号	建模方案	焊缝应力/ MPa	焊缝的许用 应力/MPa	应力 因数	应力 状态
焊缝 1	方案 1	1.7	12.9	0.13	低
	方案 2	4.1	12.9	0.32	低
	方案 3	3.2	12.9	0.25	低
	方案 4	7.6	12.9	0.59	低
焊缝 2	方案 1	7.4	12.9	0.57	低
	方案 2	1.0	12.9	0.08	低
	方案 3	1.7	12.9	0.13	低
	方案 4	10.1	12.9	0.78	中
焊缝 3	方案 1	12.1	12.9	0.94	高
	方案 2	3.4	12.9	0.26	低
	方案 3	4.4	12.9	0.34	低
	方案 4	10.8	12.9	0.84	高

注:焊缝的许用应力为 10^7 次疲劳载荷循环下的许用应力。

由表 3 可知:

1) 焊缝 1:方案 4 评估结果的应力因数最大;方案 2、方案 3 评估结果的应力因数接近;方案 1 的承载结构为中心销,在牵引梁位置产生的焊缝应力较小。

2) 焊缝 2、焊缝 3:方案 1、方案 4 评估结果的应力因数接近;与方案 1、方案 4 相比,方案 2、方案 3 的焊缝应力较小,其原因在于方案 1、方案 4 的中心销位置承担了较大的惯性载荷,而方案 2、方案 3 下车钩位置为主要承载部位。

4 结语

本文通过线路试验测试和仿真分析,对比了列车实际运行时 4 个建模方案下的载荷分配差异,并对这 4 个建模方案下牵枕缓结构与地板焊接的 3 处关键焊缝进行了疲劳强度评估,得到以下结论:

1) 中心销处受力方向始终与牵引加速度或制动加速度方向一致,两端车钩受力相反。

2) 载荷以惯性力的方式加载(方案 1—方案 3)时,会导致载荷在车钩处和中心销处的载荷分配比例、受力方向同列车运行时的载荷分配比例、受力方向不一致。方案 4 采用集中力进行加载,车钩处、

中心销处的载荷关系同列车运行时的载荷关系一致。

3) 4 个建模方案下牵枕缓结构与底架连接处关键焊缝疲劳强度的评估结果均满足标准要求。综合分析,方案 4 下焊缝应力状态最高,其加载方式最合理。

参考文献

- [1] 卢耀辉,冯振,陈天利,等.气动载荷影响下的高速列车车体疲劳强度评估方法[J].交通运输工程学报,2014,14(6):44.
LU Yaohui, FENG Zhen, CHEN Tianli, et al. Evaluation method of fatigue strength for carbody of high-speed train under influence of aerodynamic loads[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(6): 44.
- [2] 王新梅,李刚,韩威,等.气动载荷下动车组车体疲劳寿命评估[J].机械研究与应用,2016,29(1):132.
WANG Xinmei, LI Gang, HAN Wei, et al. Fatigue life evaluation for the EMU car body under aerodynamic loads[J]. Mechanical Research & Application, 2016, 29(1): 132.
- [3] 李祥涛,米彩盈.动力集中型动车组动力车车体强度分析[J].机车电传动,2019(1):51.
LI Xiangtao, MI Caiying. Strength analysis for motor car body of power centralized EMU[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(1): 51.
- [4] 王超,刘潮涛,邬平波,等.高速动车组整车车体疲劳试验方法研究[J].机械强度,2020,42(3):539.
WANG Chao, LIU Chaotao, WU Pingbo, et al. Research on fatigue test method of car body of high-speed EMU[J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(3): 539.
- [5] 宋烨.动车组铝合金车体疲劳寿命评估理论与试验研究[D].成都:西南交通大学,2016.
SONG Ye. Theoretical and experimental study on fatigue life evaluation of aluminum alloy car body of EMU[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [6] 李新康,王苏秦,刘潮涛,等.基于子模型方法的地铁车体疲劳寿命评估[J].西南交通大学学报,2022,57(2):295.
LI Xinkang, WANG Suqin, LIU Chaotao, et al. Fatigue life assessment of metro carbody based on submodel method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(2): 295.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-11-23 出版日期:2025-02-10

Received:2024-08-05 Revised:2024-11-23 Published:2025-02-10

· 通信作者:于春洋,工程师,1486669104@qq.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