

基于实际工况的地铁车体疲劳寿命分析技术研究

钱凯杰,王亚平

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘 要:在轨道循环交变应力作用下地铁车体易产生疲劳损伤。依据《BS EN12663:2010 铁道应用——轨道车身的结构要求》,完成车体满载工况下的强度校核;利用 SImpack 软件建立车体多体动力学模型,获得枕梁处的载荷-时间历程;利用雨流计数法获得了循环载荷谱,根据 Miner 损伤理论对车体疲劳寿命进行分析。结果表明:A 型地铁的强度与疲劳寿命均满足设计要求。

关键词:地铁车体;强度校核;多体动力学建模;载荷谱;疲劳寿命

中图分类号:TB302.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)06-0098-03

Research on Analysis Technology for Fatigue Life of Subway Car Body Based on Actual Working Conditions

QIAN Kaijie, WANG Yaping

(College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The subway car body is prone to fatigue damage under the action of cyclic strain. According to “BS EN12663: 2010 Railway Application—Structural Requirements of Rail Body”, the strength check of the vehicle body under full load condition is completed; the multi-body dynamic model of the vehicle body is established by SImpack software, and the course of the bolster load-time is obtained, then, the rain flow counting method is used to obtain the cyclic load spectrum, and the fatigue life of the vehicle body is analyzed according to the Miner damage theory. The results show that the strength and fatigue life of the A-type subway meet the design requirements.

Keywords: subway car body; strength check; multibody dynamic modeling; load spectrum; fatigue life

0 引言

随着轨道交通事业的迅猛发展和人们生活水平的快速提高,地铁的行车安全性越来越重要。

地铁车体为满足轻量化要求大量采用铝合金材料,且随着地铁运行速度的提高,运行条件越来越恶劣,地铁车体产生疲劳破坏故障的概率也大大增加。

目前,评估结构疲劳寿命的方法主要有 3 种:传统评估法、基于断裂力学的评估法与基于损伤力学的评估法。传统评估法主要基于材料的 $S-N$ 曲线和线性疲劳累积损伤理论来计算疲劳寿命,计算效率高,适用性广^[1];基于断裂力学的评估法主要基于构件初始缺陷,将结构初始参数作为确定量考虑,使结果存在较大的不确定性;损伤力学评估法出现得比较晚,学术界还没有统一的认识,其在工程实际中应用还有待探索^[2]。因此对地铁车体进行强度校核与疲劳寿命分析,对于保证地铁安全运行及提高经济效益具有重大意义。

本文以 A 型地铁车体为研究对象,依据《BS EN12663:2010 铁道应用——轨道车身的结构要求》^[3],使用 Abaqus 软件完成了车体满载工况下的强度校核;采用

SImpack 软件仿真分析获得了车枕梁腹板孔处的载荷-时间历程;基于 FE-SAFE 软件采用 $S-N$ 曲线法获得了在特定工况下的车体疲劳寿命。

1 车体强度分析

1.1 车体结构与有限元模型

A 型地铁车体结构包括牵引梁、横梁、地板承梁、侧梁、左右侧墙、车顶等,车体主体材料为 ENAW-6005A-T6 型铝合金,屈服极限 $\sigma_s = 220$ MPa,抗拉强度 $\sigma_b = 300$ MPa,车体结构如图 1 所示。在分析了铝合金车体的结构特点和材料力学性能的基础上,采用 Hypermesh 软件对车体进行简化,并采用壳体网格划分法对车体完成网格划分,车体模型包含 519 万个单元,490 万个节点,得到的有限元模型如图 2 所示。

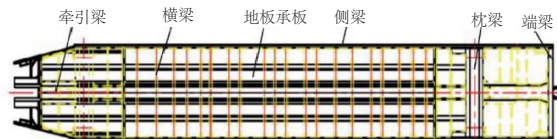


图 1 车体结构

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB1201201)

第一作者简介:钱凯杰(1995—),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要从事仿真研究。

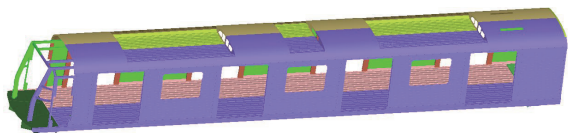


图2 车体有限元模型

1.2 计算工况和评定标准

依据《BS EN12663:2010 铁道应用——轨道车身的结构要求》，确定车体静强度计算工况。本文主要分析的工况为：车体最大运转载荷工况。车体承受主要载荷有：

- 1) 车内载员及车体自重产生的载荷，即车体底板上均布 350 kN 垂向静载荷；
- 2) 车辆在启动、变速、制动、上下坡道时，相邻列车之间作用于车钩上的纵向载荷，即车钩上施加 700 kN 纵向拉力。

1.3 车体强度计算结果

图3-图7为车体满载工况下计算得到的不同部位的应力云图。由图3-图7可知，车体应力较大的区域主要集中在车轴座处、枕梁腹板处、底板连接处、后门门角处等位置。其中，车轴座与边梁连接处、枕梁腹板处、底板连接处、车轴座处最大应力值分别为 170.5 MPa、43.7 MPa、180.4 MPa、15.6 MPa，均小于材料的屈服极限 $\sigma_s = 220$ MPa，因此，车体的强度满足要求。

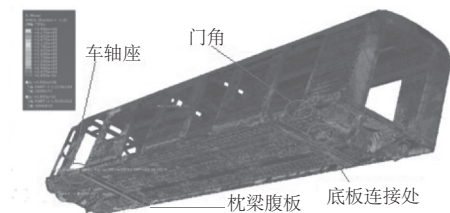


图3 车体应力云图

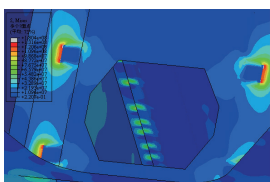


图4 车轴座处应力云图

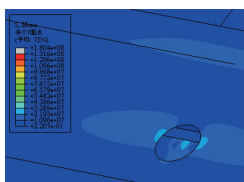


图5 枕梁腹板应力云图

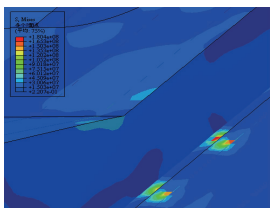


图6 底板连接处应力云图

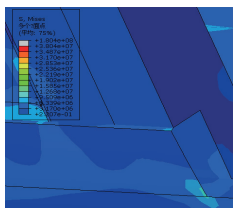


图7 后门门角处应力云图

2 车体疲劳寿命分析

2.1 地铁多体动力学建模

由于线路不平顺，车体容易受到动载荷的影响，从而

产生疲劳破坏，因此在 SImpack 软件中建立列车多体动力学模型，从而得到列车枕梁处的动载荷。从多体动力学和车辆结构的角度看，A 型地铁运动的主要零部件有轮对、轴箱、构架和车体。

在多体动力学建模时，将前后转向架作为一级子模型；在转向架中，前后轮对是完全相同的，在建模时，将轮对模型作为二级子模型。在模型中，轮对和轨道之间建立轮轨接触力，在轴箱与构架之间，建立弹簧力等一系力，在构架和虚车体之间，建立空气弹簧力、减振器力、止挡力、牵引拉杆力等在内的二系力，整车模型自由度数是 50。建立的车体多体动力学模型如图 8 所示。

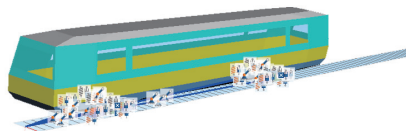


图8 车体多体动力学模型

2.2 载荷谱

本文考虑轨道实际行驶工况为：车速 60 km/h，轨道为全长 1 340 m 的直线轨道。此工况下车枕梁腹板处 z 向载荷远大于其他方向的载荷，故这里只考虑 z 向载荷-时间历程。

采用 SImpack 软件仿真获得的枕梁腹板处 z 方向载荷-时间历程如图 9 所示。由图 9 可知，在第 10 s 时，列车加速，此时曲线到达波峰；在第 75 s 时，列车减速，载荷幅值变化较大。采用雨流计数法编制的载荷谱见图 10，当量载荷谱见表 1。由表 1 可知幅值在 0~1 kN 的低载荷循环占很大比重，而幅值 > 1.5 kN 的高载荷循环只产生了 3 次。

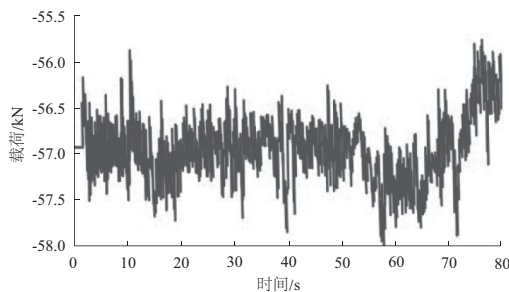
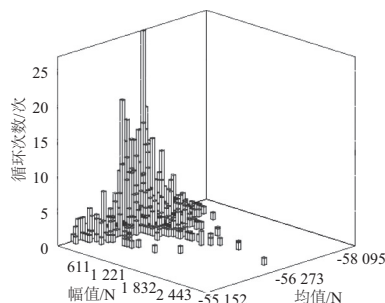
图9 枕梁腹板处 z 向载荷-时间历程

图10 载荷谱

表 1 当量载荷谱

项目	载荷级									
	1	2	3	4	5	7	8	10	11	
载荷幅值/kN	2.43	1.83	1.58	1.20	0.89	0.70	0.52	0.24	0.05	
循环次数/次	1	1	2	6	15	26	43	136	245	

2.3 基于 FE-SAFE 的车体疲劳寿命分析

在 FE-SAFE 软件中,设定车体的表面粗糙度为 $1.6 < Ra < 4 \mu m$,选择铝合金材料的 S-N 曲线作为疲劳寿命评估依据,方法为 VonMises: Goodman^[4]。地铁服役年限要求 30 年,在上述轨道上行驶 1 趟作为 1 个工作循环。线路全长 35.8 km,每天往返运行 15 趟,1 年运行 330 天,根据以上条件,地铁每年行驶公里数为 3.54×10^5 km,因此地铁车体寿命极限要求为 7.934×10^6 次循环^[5]。

依据雨流计数法获得载荷谱,按照累积损伤 Minner 理论对车体进行疲劳寿命分析。分析结果表明:车体疲劳寿命最小部位为车体枕梁腹板处,疲劳寿命约为 1.320×10^7 次,寿命相对较小的部位为车轴座处,疲劳寿命约为 2.230×10^7 ,均远大于极限寿命,因此车体疲劳寿命满足设计要求。仿真所得上述两处区域的疲劳寿命云图如图 11、图 12 所示。

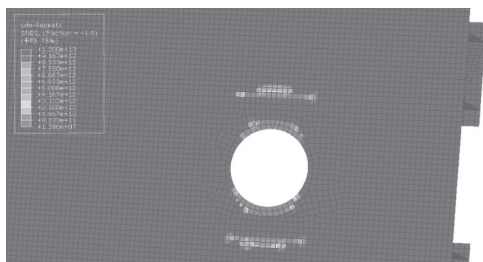


图 11 枕梁腹板疲劳寿命云图

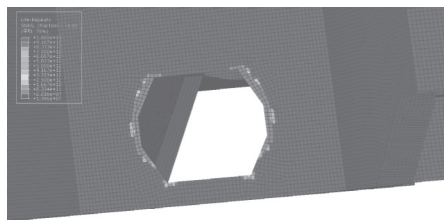


图 12 车轴座疲劳寿命云图

3 结语

本文依据《BS EN12663:2010 铁道应用—轨道车身的结构要求》,完成了车体满载工况下的强度校核;利用 SImpack 软件建立了车体多体动力学模型,并获得了枕梁处的载荷-时间历程;利用雨流计数法获得了循环载荷谱,根据 Miner 损伤理论对车体疲劳寿命进行分析。结果表明,A 型地铁的强度与疲劳寿命均满足设计要求。

下一步的工作是,考虑将实测载荷-时间历程计算得到的车体疲劳寿命与仿真计算得到的结果进行对比,同时考虑不同影响因素对车体疲劳寿命的影响,为车体结构疲劳寿命的预测提供理论依据。

参考文献:

- [1] 欧阳黎健. 车体疲劳强度设计及疲劳寿命预测方法研究[J]. 电力机车与城轨车辆,2019(3): 42-45.
- [2] 郑军鹏. 基于概率断裂力学方法的钢吊车架梁剩余疲劳寿命评估[J]. 陕西煤炭,2018,37(4): 5-8,23.
- [3] 杨培义. 地铁铝合金头车车体疲劳强度分析[J]. 现代计算机,2019(25): 18-21.
- [4] 夏常福. 基于 FE-SAFE 的造船门式起重机结构剩余寿命预测方法研究[J]. 中国设备工程,2018(23): 90-91.
- [5] 林文君,李伟. B120 型地铁铝合金车体疲劳寿命预测[J]. 电力机车与城轨车辆,2007(2): 30-33.

收稿日期:2019-11-12

(上接第 94 页)

参考文献:

- [1] 李忱钊,郭永进,朱平,等. 钢制车轮弯曲疲劳寿命的影响因素[J]. 机械设计与研究,2011,27(2): 56-63.
- [2] FROES F H, ELIEZER D, AGHION E L. The science, technology and applications of magnesium [J]. Journal of the Minerals Metals & Materials Society, 1998, 50(9): 30-34.
- [3] 李家应. 重型汽车轮毂的有限元分析及优化设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [4] 丁炜琦,储峰,孙超. 基于拓扑优化的某重卡轮毂轻量化设计[J]. 汽车实用技术, 2013(10): 22-204.
- [5] 王龙,高辉,雷红亮,等. 轻型载货汽车轮毂轻量化设计[J]. 汽车工艺与材料, 2017(11): 21-24.
- [6] 李琛. 基于圆筛藻硅质壳三维结构的纳米材料制备与表征[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.

- [7] HAMM C E, MERKEL R, SPRINGER O, et al. Architecture and material properties of diatom shells provide effective mechanical protection[J]. Nature, 2003, 421: 841-843.
- [8] HAMM C E. The evolution of advanced mechanical defenses and potential technological applications of diatom shells[J]. Journal of Nanoscience Nanotechnology, 2005, 5(1): 108-119.
- [9] HAMM C. Evolution of lightweight structures: analyses and technical applications [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015.
- [10] 钟君焜,邓朝晖,石洋东,等. 基于 BP 神经网络的槽类特征铣削加工方案决策和刀具优选[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(3): 51-55.

收稿日期:2019-09-02