

导轨激励下自动旅客运输系统车辆车桥结构强度有限元分析

步 涛

(中车浦镇庞巴迪运输系统有限公司, 241060, 芜湖//工程师)

摘 要 为探究自动旅客运输 (APM) 系统车辆车桥结构性能, 找出结构薄弱部位, 采用了理论分析、有限元结构分析、极限分析、疲劳分析相结合的方法, 研究 APM 车辆车桥桥壳的应力集中点, 对车桥建立走行面和导轨激励下的受力模型。建立了 12 种综合工况下车桥的有限元模型, 对车桥主要接口 V 臂和导向框进行相关的有限元分析, 并做了台架试验以验证车桥的结构性能。研究表明: 12 种分析工况基本涵盖了 APM 车辆运行中所有的路况, 是一种可参考的系统分析流程。该研究可为评价车桥的性能指标提供参考依据。

关键词 自动旅客运输; 车辆; 车桥性能; 有限元分析

中图分类号 U270.32; U239.8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.10.015

Finite Element Analysis of APM Vehicle-Bridge Structural Strength under Guideway Excitation

BU Tao

Abstract In order to explore the vehicle-bridge structural performance of APM system, the weak parts in the structure are detected, theoretical analysis, finite element structural analysis, limit analysis and fatigue analysis are integrated to study the stress concentration points of APM axle housing for the stress model of APM axle housing under the excitation of track surface and guide rail. On this basis, a finite element model of axle under 12 working conditions is established and used to conduct the relevant finite element analysis of V arm and guide frame of the main axle interface. Finally, the vehicle-bridge structural performance is verified through bench test. The result shows that the 12 discussed working conditions of APM vehicle basically cover all road conditions, and could be taken as a referential system analysis process. This research provides a basis for the evaluation of vehicle-bridge performance index.

Key words APM system; vehicle; vehicle-bridge performance; finite element analysis

Author's address CRRC Puzhen Bombardier Transportation

Systems Ltd., 241060, Wuhu, China

自动旅客运输 (APM) 系统车辆的车桥, 在结构上与卡车、轿车和公交车类似, 肩负着动力传输、承受车体质量、保持车辆稳定性的重任。车桥与车体悬挂连接, 在两端安装车轮的桥式结构部件。与普通车桥不同的是, APM 车辆车桥的导向框和 V 臂结构会综合影响其受力方式, 改变车桥的受力方向^[1-7]。因此, APM 车辆的车桥必须有足够的强度、刚度及疲劳寿命。车桥主要的失效形式有桥壳的集中开裂、齿轮失效、螺栓紧固件的失效等。在轨道交通发展的早期, 车辆工程师主要采用经验公式对车辆的最大应力进行估算; 21 世纪初, 我国开始重视车桥的设计工作, 通过运用静强度分析, 逐渐总结出 3 种典型工况, 并制定了相关标准 QCT 533—1999《汽车驱动桥台架试验方法》以及 QCT 534—1999《汽车驱动桥台架试验评价指标》; 国内外不少研究者对车桥也进行过有限元分析, 但大多仅对桥壳进行分析, 没有分析其他的重要部件, 且仅考虑其最大的受力工况, 其他综合工况也没有得到系统的分析^[8-10]。

针对以上问题, 本文建立了导轨激励下 APM 车辆车桥的受力模型, 并提供一种更全面的有限元分析方法, 不仅对车桥进行分析, 并且对车桥接口的其他重要部件也进行分析, 可为其他类型车桥的设计提供了借鉴和参考。

1 APM 车辆车桥结构分析

车桥是车辆底盘行驶系统的重要部分, 车桥通过悬架和车架相连, 传递车架与车轮间各方向的作用力和力矩。轨道交通车辆的车桥由主减速器、差速器、半轴、桥壳 (主要承载件)、制动等组成, 如图 1 所示。车桥的基本参数如表 1 所示。

如图 3 所示,图 3 a)和图 3 b)为车辆与车桥的接口受力图,包括导轨激扰和侧风力等的综合受力分析;图 3 c)和图 3 d)为车桥受力分析图。其中: $F_{支}$ 为地面对车桥的支撑力; $F_{V臂}$ 为 V 臂杆作用在车桥的力; $F_{控制臂}$ 为控制臂作用在车桥的力; $F_{防倾}$ 为防倾杆受力; $F_{侧}$ 为考虑侧风情况的作用力; $F_{轨}$ 为轨道对车桥整体系统的作用力; $M_{扭}$ 为车桥在路平时受到的扭转力; F_G 为重力; $F_{横拉}$ 为横拉杆作用在车桥上的力。当车辆转弯时,两侧的悬挂一个被压缩,另一个被拉伸,与压缩端相连的稳定杆末端向上移动,与拉伸端相连的稳定杆末端向下移动,这样就形成了 $F_{防倾}$ 。在各个力的综合作用下,车桥的受力情况复杂,应力分布复杂。因此,对车桥作综合工况下的有限元分析就格外重要。

通过对 APM 车辆的桥壳进行有限元分析,可以找出其薄弱部位,分析载荷水平,确定车桥能承受的极限载荷。在有限元分析中,从弹性材料上对车桥的弹性变形、塑性变形、极限变形进行分析,并考虑车桥的应力、应变、强度和刚度。将车桥假定成一个弹性体,并作以下假设:车桥内部结构是连续且均质的,车桥内部物质是各向同性的。应用 catia 软件建立 APM 车辆车桥的几何三维模型,将模型导入到 ansys 软件中,对导向轮、V 臂进行简化划分网格,采用近似关节单元代替球型关节,其余的连接部件也做了相关的关联,并保证模型的形状、约束、载荷与实际情况一致。

把车桥离散成有限个单元,采用 4 节点 4 边形单元划分单元网格,在受力集中处划分的网格可进一步细分。如图 4 所示,整个 APM 车桥共划分为 1.258×10^6 个元素和 1.121×10^6 个节点。对导向框和 V 臂座单独划分网格,独立设置约束,以便更准确地分析导向框和 V 臂处的应力分布情况。

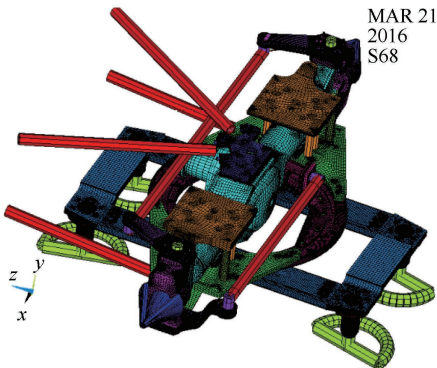


图 4 APM 车辆车桥网格划分截图

根据 ASCE 21-13—2013《自动旅客运输系统标准》的要求施加负载。车辆的行驶条件是千变万化的,因此,要精确地计算车辆行驶时作用于桥壳各处应力的大小很困难。通常情况下在设计桥壳时多采用传统的设计方法,即将桥壳看成简支梁,并校核某特定断面的最大应力值。该标准也仅规定了车桥承受满载时车桥的受力:每车轮距最大变形不超过 1.5 mm;承受 2.5 倍满载轴荷时,桥壳不能出现断裂和塑性变形。但是,车桥不仅受到满载轴荷,还会存在其他综合工况。本文分别在垂向、纵向和水平 3 个方向施加不同的力,对所产生的 12 种综合工况组合进行有限元仿真分析,如表 2 所示。

表 2 APM 车辆车桥模型综合工况

编号	加载力	分析类型
工况 1	水平 $m_{AW2}\times0.2g$ 垂向 $m_{AW2}\times1.2g$	疲劳分析,导向轮断裂疲劳载荷情况
工况 2	水平 $m_{AW3}\times0.2g+45.2\text{ kN}$ 垂向 $m_{AW3}\times1.2g$	极限分析,导向轮弹性极限载荷情况
工况 3	垂向 $m_{AW3}\times1.2g$	极限分析
工况 4	纵向 $m_{AW3}\times0.6g$ 水平 $m_{AW3}\times1.2g$	极限分析
工况 5	水平 $m_{AW3}\times0.2g+45.2\text{ kN}$ 垂向 $m_{AW3}\times1.2g$	极限分析
工况 6	纵向 $m_{AW3}\times0.6g$ 水平 $m_{AW3}\times0.2g+45.2\text{ kN}$ 垂向 $m_{AW3}\times1.2g$	极限分析
工况 7	水平 $m_{AW2}\times0.16g$ 垂向 m_{AW2}	疲劳分析
工况 8	纵向 $m_{AW2}\times(-0.16)g$ 垂向 m_{AW2}	疲劳分析
工况 9	纵向 $m_{AW2}\times0.2g$ 垂向 m_{AW2}	疲劳分析
工况 10	水平 $m_{AW2}\times(-0.2)g$ 垂向 m_{AW2}	疲劳分析
工况 11	垂向 $m_{AW2}\times1.2g$	疲劳分析
工况 12	垂向 $m_{AW2}\times0.8g$	疲劳分析

注: m_{AW0} 为车辆空载状态,取值 17 000 kg; m_{AW2} 为车辆满载状态,取值 25 967 kg; m_{AW3} 为车辆超载状态,取值 28 529 kg

APM 车辆车桥常用材料的弹性模量和泊松比如表 3 所示。

表 3 APM 车辆车桥模型的材料属性

材料	弹性模量/MPa	泊松比
Q460C 低碳高强度钢	2.06×10^5	0.280
40Cr 合金调质钢	0.21×10^5	0.277
QT450-10 球墨铸铁	1.69×10^5	0.257
Q345 普通低合金钢	2.07×10^5	0.280

3 APM 车辆车桥有限元分析

APM 车辆车桥的有限元应力分析中,应力分布

情况和理论分析一致。图 5 为对 APM 车辆车桥建立了 12 种综合工况的有限元应力分布模型,这 12 种工况几乎可以涵盖 APM 车辆在日常工作中的所有情况。由图 5 可以看出,每种工况的应力集中点不同。这 12 种工况的应力值都在许用应力范围内。在工况 6 情况下,应力值最大,为 20.7 N/mm^2 ,其应力分布在导向轮螺套处。

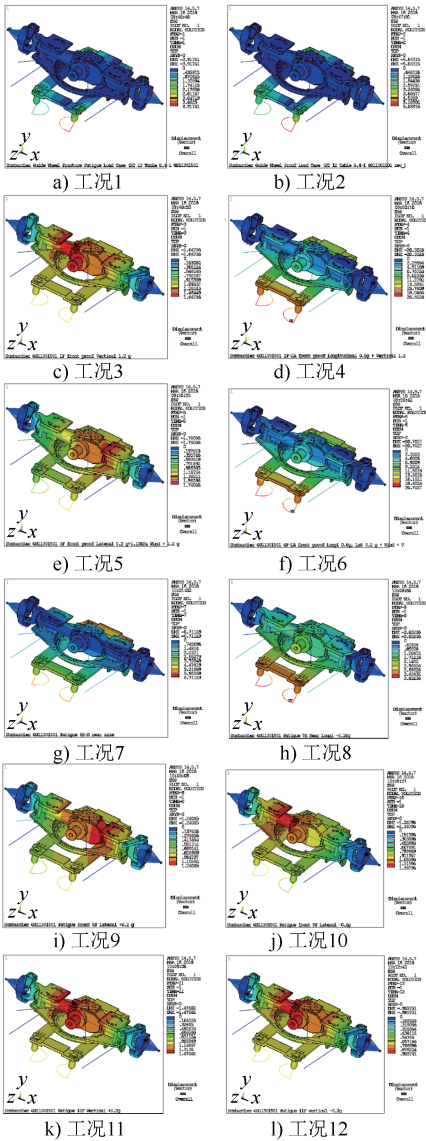


图 5 12 种综合工况的有限元应力分布截图

4 APM 车辆车桥试验验证分析

本文还对车桥的关键部件进行了有限元分析。图 6 为对导轮螺套极限载荷有限元应力分布所做的模拟分析,图 7 为对环轴承极限载荷有限元应力分布所做的模拟分析。由图 6 和图 7 可知,螺套最大应力分布在螺套头部,环轴承的主要应力集中在螺

栓孔处,应力分布与理论分析一致。
本文最后还对车桥做了台架试验,结果表明:车桥受力规定车桥承受满载时,每车轮距最大变形不超过 1.5 mm ;承受 2.5 倍满载轴荷时,桥壳未出现断裂和塑性变形;车桥在垂直方向的最大载荷取满载轴荷的 2.5 倍,最小载荷取 0,在施加脉动载荷、疲劳次数 80 万次后,车桥未出现疲劳破坏。

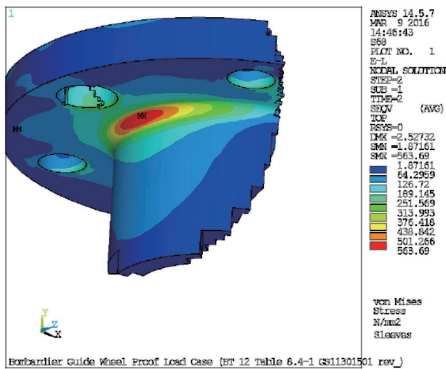


图 6 导轮螺套极限载荷有限元应力分布截图

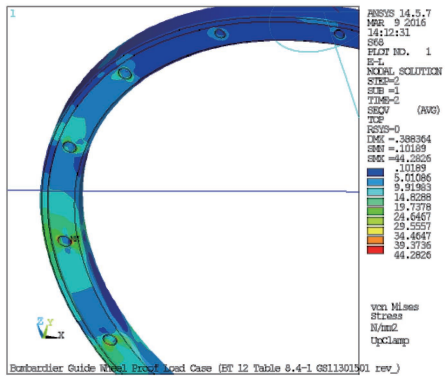


图 7 环轴承极限载荷有限元应力分布截图

5 结语

本文通过分析 APM 车辆的车桥结构,建立了导轨激扰下导向框和 V 臂综合作用的受力模型。通过建立驱动桥壳的有限元模型,综合分析各种工况的有限元数值模拟,得到各种工况下的应力分布情况。模拟仿真结果表明,驱动桥壳满足强度和刚度的设计要求。

1) 通常车桥有限元分析仅考虑最大冲击载荷工况、最大紧急制动工况和侧滑工况。本文对车桥在导轨激扰下的 12 种综合受力工况进行分析,充分考虑了各种工况下的应力分布和疲劳情况,并得到了详细的应力与变形的分布情况,从而判定出应力集中区域和应力变化趋势。

2) 本文在受力及网格划分时,充分考虑到导向框和 V 臂对车桥的受力影响,兼顾了所有可能的应力集中点,保证数值模拟的数据真实性。

3) 本文有限元分析的 12 种工况基本涵盖车辆运行中所有的路况,是一种可借鉴的系统分析流程。

参考文献

[1] 章蕾.某特种半挂车车桥疲劳可靠性分析[D].南京:南京理工大学,2007.

[2] 王星.货车驱动桥壳结构强度分析方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2008.

[3] 郭年程,史文库,刘文军,等.驱动桥的整体有限元动态模拟[J].西安交通大学学报(自然科学版),2012,46(9): 91.

[4] 陈喆,王伟.汽车车桥结构有限元分析[J].机械,2012,39(12): 33.

[5] 黄焕超.汽车车桥结构有限元分析[J].现代制造技术与装备,2019(1): 27.

[6] 邵松标,刚宪约,柴山,等.整体式车桥有限元分析的位移边界模型研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2015,34(3): 152.

[7] 张新,王正祥,牛家忠,等.基于 ANSYS Workbench 的重卡前轴的强度分析及疲劳寿命预测[J].制造业自动化,2015,37(17): 64.

[8] 孟斌,姚宾,燕颖,等.基于 Hyperworks 的微型车车桥疲劳寿命分析与研究[J].汽车实用技术,2014(10): 58.

[9] 丁炜琦,苏武,郑小艳,等.基于有限元的某矿用车桥桥壳结构优化设计[J].汽车实用技术,2018(18): 87.

[10] 郑娟英.我国重型汽车车桥历史、现状及发展趋势[J].汽车实用技术,2010(2): 19.

[11] 辛木.中国商用车车桥行业现状及发展动向[J].交通世界,2008(12): 70.

(收稿日期:2019-04-25)

(上接第 57 页)

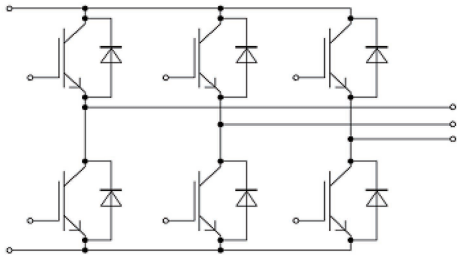


图 6 IPM 电路示意图

表 4 三相输出滤波电感技术参数

参数符号	参数名称	参数值	备注
I_e	额定电流/A	54	用于热设计
I_{peak}	额定峰值电流/A	85	
I_{ovpeak}	过载峰值电流/A	140	
I_{ov}	过载能力/A	$1.5I_e$	过载时间 10 min 10 s

滤波电感与滤波电容构成 LC 滤波器(滤波电容采用星形接法),额定电流为 54 A(对应功率为 35 kW)。新项目辅助电源装置的实际额定电流输出为 65 A,超出标称电流值,且实测该电感温升较高,功率增大至 43 kW 后过载使用温升无法达到设计要求。因此,在新项目中需要对此进行重新设计。三相输出滤波电感新设计方案的安装尺寸可以做到与既有方案兼容,质量则较原方案增加约 15%。

3.2.7 去耦电感

并联逆变器去耦电感,设计感量为 $2\times5\ \mu\text{H}$,额定电流为 28 A,并联后小于额定输出 65 A 的设计要求,在新项目中需要重新设计。去耦电感新的安装尺寸可以与原方案兼容,质量较原方案增加约 15%。

3.2.8 输出接触器适用性

接触器型号为 CL45D300MWD-RAIL,其接触器最大电流为 60 A。接触器适用性主要考虑其电压等级和过流能力,新项目辅助电源装置中额定的输出电流为 65 A,综合考虑设计余量,需选用容量较大的接触器。

3.2.9 输出电流传感器

输出电流传感器用于输出电流的检测和闭环控制,采用 LEM 厂家型号为 LF205-S/SP5 的设备,其额定电流为 200 A,完全覆盖输出电流范围,可满足新项目使用要求。

4 结语

针对海外某新项目对于单轨车辆辅助电源装置三相输出功率从既有的 37.5 kW 增大至 43 kW 的要求,既有 PBTS 跨坐式单轨车辆辅助电源装置内的大部分设备都能适用,不需要更换;而三相输出滤波电感、去耦电感、输出接触器等则需要重新进行设计或选型。新设计方案下的单轨车辆辅助电源装置与既有装置相比,总质量增加约 12 kg,增幅为 8%。

参考文献

[1] 康玮,于伟凯,候秀芳.CRH380A 型高速动车组辅助供电系统[J].机车电传动,2015(1): 19.

[2] 熊成林,冯晓云.不同结构的列车辅助供电系统分析与比较[J].机车电传动,2008(2): 15.

[3] 肖彦君,吴茂杉.城轨列车辅助供电系统的技术要求和电路选型[J].现代城市轨道交通,2004(4): 24.

(收稿日期:2019-05-12)