

研  
究  
开  
发基于 ABAQUS 子模型算法的花键  
连接抗侧滚扭杆有限元分析

王京雁, 卜继玲, 曾晶晶, 刘柏兵, 黄友剑

(株洲时代新材料科技股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412007)



作者简介: 王京雁 (1982-), 女, 硕士, 设计师, 现主要从事结构疲劳可靠性仿真分析研究工作。

**摘 要:** 采用 ABAQUS 软件模拟计算了花键连接抗侧滚扭杆的受力情况。计算结果与试验结果对比表明此方法正确可靠。采用子模型的方法进一步得到花键的局部应力分布, 结果表明简化整体模型的接触关系可以降低仿真分析的计算花费, 提高分析效率, 且子模型方法解决了网格数量太大、计算时间长以及收敛性差的问题。计算结果可为疲劳分析提供有力支持, 并为扭杆系统疲劳失效模式提取提供一定帮助。

**关键词:** 抗侧滚扭杆; 有限元分析; 花键; 子模型; 扭杆系统

**中图分类号:** U260.331+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)06-0028-04

Finite Element Analysis of Spline-Connecting Anti-roll  
Torsion Bar Based on ABAQUS

WANG Jing-yan, BU Ji-ling, ZENG Jing-jing, LIU Bai-bing, HUANG You-jian

(Technology Center, Zhuzhou Times New Materials Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412007, China)

**Abstract:** A spline-connecting anti-roll torsion bar was simulated by ABAQUS software, which was shown being correct and reliable by comparing the results with the experiment. With using of sub-model, the local stress distribution of the spline was obtained. The results indicated that simplifying the contact relation of the entirety model could reduce the computational cost and increase analysis efficiency, and the sub-model solution solved the problems of too much grid need to calculate, long calculate time and the poor convergence. The accurate stress results provided strong support for the fatigue analysis and the extraction of the fatigue failure mode of the torsion bar system.

**Key words:** anti-roll torsion bar; finite element analysis; spline; sub-model; torsion bar system

## 0 引言

在轨道交通行业中, 空气弹簧越来越多地被采用, 以解决乘坐舒适性和振动噪声问题。但是在得到较好的车辆垂向性能的同时, 却导致了车辆侧滚刚度的减小。车辆侧滚刚度的减小, 车辆的柔度系数和侧滚角都会明显增大, 不仅会影响车辆运行的平稳性和旅客的舒适性, 还会带来严重的安全隐患。目前解决这个问题的常用办法是, 在转向架的悬挂系统中增加抗侧滚扭杆装置<sup>[1-5]</sup>。抗侧滚扭杆对车辆的垂向、横摆、点头、摇头及浮沉等振动不产生影响, 只抑制车辆的侧滚振动; 在承受高频率振动载荷时, 不会产生颤振。抗侧滚扭杆还具有开发周期较短、工艺较简单, 结构灵

活、可调性大、易于控制等优点, 目前已被广泛应用于国内外动车组、高速铁路、城市地铁、轻轨、城市电车上<sup>[6-7]</sup>。

抗侧滚扭杆系统(如图1所示)主要包括扭杆轴、扭转臂、连杆、支撑座等部件。其中扭杆轴是主要受力部件, 车体侧滚时, 扭杆轴因承受扭矩而发生扭转变形, 同时提供扭转反力矩来抵抗车体的侧滚。扭杆轴与扭转臂的连接方式主要有过盈连接与花键连接。过盈连接一般采用温差的方法一次性成型, 工艺简单可靠, 但不易拆卸; 而采用花键连接则可以拆卸替换, 且能更好地传递力矩<sup>[8]</sup>。但是花键连接结构和制造工艺都比较复杂, 可靠性较难保证, 因此对其结构、变形以及疲劳分析研究意义重大。

在优化产品结构及变形特性方面, 可以从基础参数、网格优化、分析规模等有限元仿真方法入手。本文

收稿日期: 2011-01-13; 收修改稿日期: 2011-04-11

旨在研究具体某一花键连接扭杆系统在某一工况下的受力情况及应力分布情况, 借助 ABAQUS 有限元软件进行分析计算, 并与试验结果对比分析, 为花键连接方式的抗侧滚扭杆开发提供支持。

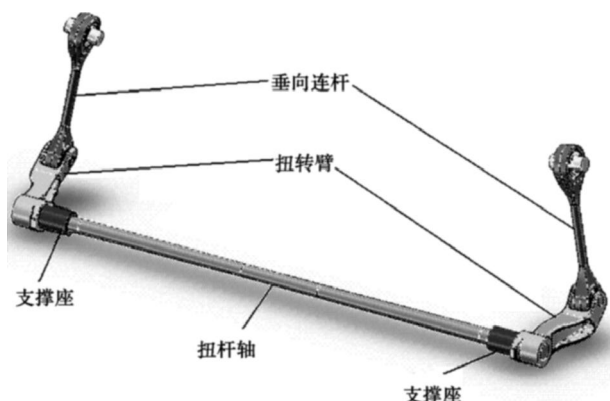


图1 扭杆系统示意图

## 1 扭杆系统受力分析

扭杆系统主要由连杆、扭转臂及扭杆轴组成, 如图2(a)所示。对扭杆系统进行受力分析, 车体通过球关节对连杆施加载荷  $F_1$ , 再经连杆和扭转臂的力传递作用使扭杆轴承受扭矩  $T_2$  及相应的弯矩[力矩如图2(b)], 通过扭杆轴的扭转变形回弹特性来调节  $F_1$  的变化, 从而满足车体抗侧滚要求<sup>[9-10]</sup>。

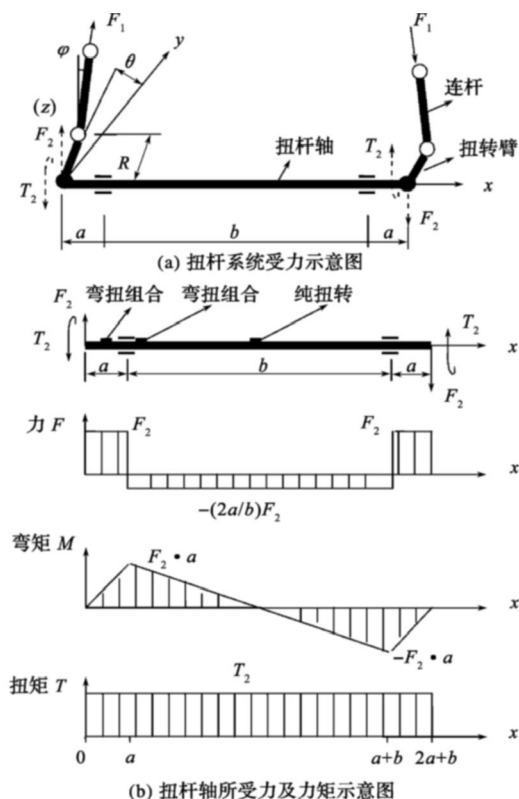


图2 扭杆系统受力分析

## 2 有限元仿真与试验对比

### 2.1 计算思路

该产品扭杆轴与扭转臂采用花键配合方式连接,

每端内外花键各32个, 每个花键有两面接触, 因此整个扭杆系统需要设置128个接触对。施加工况需求载荷后发现此计算方法的计算量过于庞大, 无法进行计算。为了解决这一问题, 本文采用子模型的方法进行分析, 先将扭杆系统作为母模型进行整体分析, 并将母模型扭杆轴的局部应力结果与该产品应力测试结果进行了对比验证, 作为本文的可靠性依据, 然后取花键局部位置作为子模型细化网格后进一步计算。为保证计算精度, 几乎没有对模型中的细节进行几何简化。

### 2.2 仿真模型建立

扭杆轴采用弹簧钢, 扭转臂采用铸造合金钢制造, 采用扭杆系统全模型进行分析时, 运用 Pro/e 软件进行 3D 几何建模, 如图3所示。

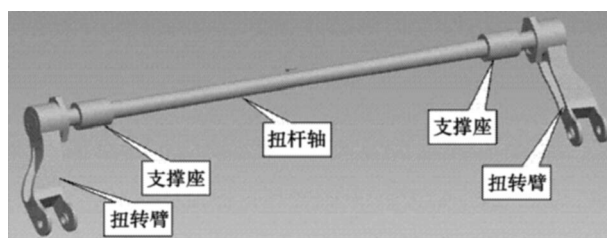


图3 扭杆系统几何模型示意图

随后采用 Hypermesh 软件划分网格, 运用 ABAQUS 软件弹塑性模型分析计算。本文所采用的单位系统为 SI (mm), 即 mm、N、MPa, 图片中出现的任何数字, 如果未注明, 都采用此单位系统。由于组件均为金属件, 采用 C3D8R 单元模拟部件扭杆轴和扭转臂, 其中扭杆轴 65 780 个单元, 扭转臂 13 484 个单元, 支撑座 3 872 个单元, 如图4所示。扭转臂内侧 2 个支撑座固定不动。按照图4中箭头方向施加相应的位移载荷, 以此给扭杆系统施加扭转载荷。

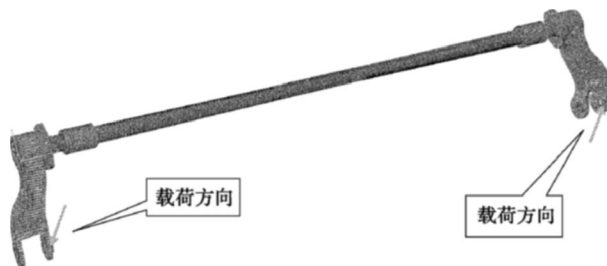


图4 母模型网格与边界条件示意图

最后采用子模型方法对花键局部进行详细分析。为了保证接触关系的收敛性与精确性, 采用共节点原则处理相互啮合花键齿的网格, 花键局部共 148 480 个单元, 图5依次为子模型的整体网格、扭杆轴花键网格、扭转臂花键网格示意图。

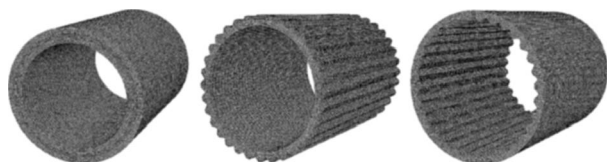


图5 子模型示意图

## 2.3 扭杆应力分析结果与应力测试结果对比

当位移载荷为某一工况时,扭杆系统最大等效应力和最大主应力均位于扭杆轴上,如图6、图7所示。扭杆系统的最大等效应力位于扭杆轴中间部位,大小为650.1 MPa,此处主要受扭矩作用;最大主应力位置靠近支承座位置,大小为532.7 MPa,此处主要受弯扭组合作用力。但是此种计算对内外花键配合部位的受力分析十分有限,要针对扭杆结构的疲劳寿命预测评估等精细研究,就要更为准确地得到花键局部应力分析结果,所以需采用特殊方法对结构的细节进行详细分析。

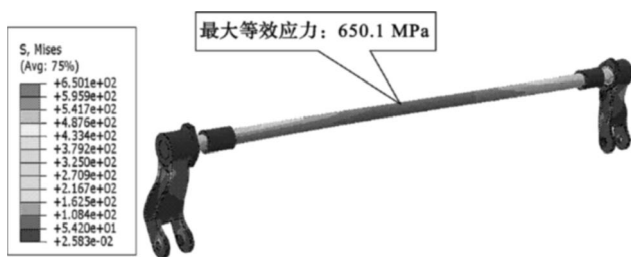


图6 某一工况时扭杆系统 Mises 应力云图

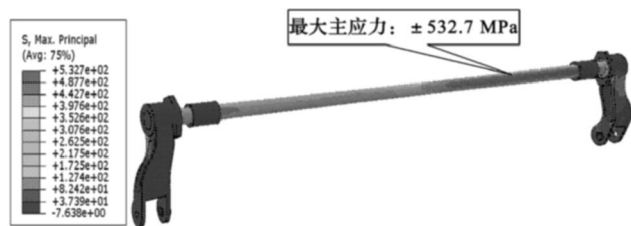


图7 某一工况时扭杆系统最大主应力云图



图8 应力测点位置标注

对该扭杆系统加载同一工况,在十二通道试验机上采用DASP测试分析系统及SA-8动态应变仪对图8所示三点采用45°应变花法进行贴片应力测试,将所测结果与模拟数据进行对比(对比结果见表1),发现全模型计算结果与试验测量3点的结果十分接近,误差率在10%以内。同时也可以看出在接近花键连接部位1点的分析误差相对较大,因此有必要在此基础上采用子模型的方法,进一步较准确地预测花键局部应力。

表1 试验测试结果与计算结果对照表

| 等效应力 | 试验测得结果 /MPa | 计算结果 /MPa | 误差率  |
|------|-------------|-----------|------|
| 1 点  | 467.8       | 492.7     | 5.3% |
| 2 点  | 480.3       | 500.1     | 4.1% |
| 3 点  | 601.9       | 621.5     | 3.3% |

## 2.4 花键局部应力分析

前面在对扭杆系统进行全模型分析时,考虑到网格数量问题,不可能采用较细的网格尺寸,否则模拟

花键之间的接触比较困难,可能导致计算规模过大和分析的收敛性较差的问题。利用上述全模型的仿真分析结果,本文采用的子模型方法,就是对花键连接部位结构网格进行细化,同时充分考虑花键之间的接触问题,使模型具有良好的收敛性。这种方法的优点是以较小的计算代价得到更精确的结果。具体处理方法为:先把扭杆的花键基圆设为接触面(作为母模型)进行整体分析计算并与试验测试对比验证计算结果;然后在基圆上取花键局部位置(作为子模型,并保证子模型与母模型空间节点位置一致)细化网格(见图5),采用接触设置并继承母模型的边界条件,进一步计算。计算结果如下:在相同工况下,扭杆轴和扭转臂上花键局部部位的应力云图如图9~图12所示。花键局部最大等效应力位于扭转臂上花键的齿顶部位,大小为278.4 MPa;最大主应力位于扭杆轴上花键的齿根部位,大小为161.7 MPa,均远低于所选材料的屈服强度,且最大应力的位置与实际产品的破坏位置基本一致,进一步证明了本方法的可靠性。

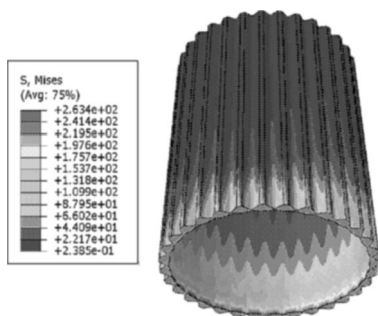


图9 扭杆轴上花键局部的 Mises 应力云图

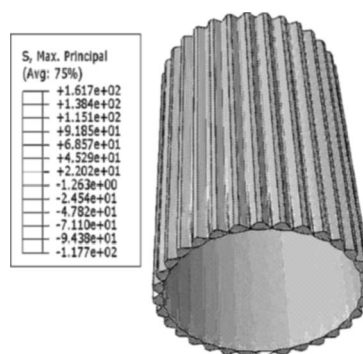


图10 扭杆轴上花键局部的最大主应力云图

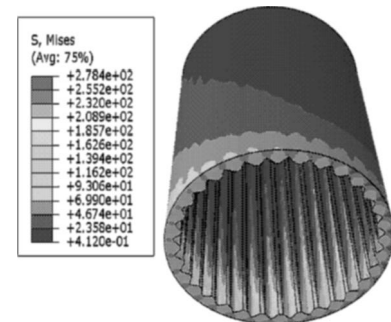


图11 扭转臂上花键局部的 Mises 应力云图

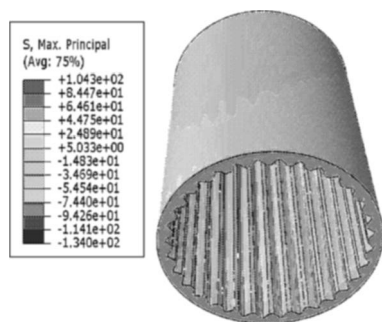


图 12 扭转臂上花键局部的最大主应力云图

### 3 结论

①采用系统模型对抗侧滚扭杆系统进行了受力分析,较简单地考查花键连接的接触关系提高了分析效率。将模拟结果与试验结果进行对比,结果表明仿真分析结果可靠。

②在全模型的基础上采用子模型的方法,有效避免了全模型分析网格数量太大,计算时间长以及收敛性差的问题,并且得到了良好的花键局部应力分析结果。

③精确的应力分析结果对进一步采用疲劳软件对抗侧滚扭杆进行疲劳寿命预测分析,提取扭杆系统疲

劳失效模式提供了一定的帮助。

### 参考文献:

- [1] 尹显骥,章 鹏. 轨道车辆抗侧滚扭杆装置的设计[J]. 电力机车与城轨车辆, 2005, 28(3): 21-22.
- [2] 周若湘,匡如华. 抗侧滚扭杆装置在城市轨道车辆中的应用[J]. 铁道车辆, 2001, 39(12): 21-22.
- [3] 段华东. 抗侧滚扭杆对轨道车辆抗侧滚性能的影响研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2007, 30(5): 14-16.
- [4] 郭红锋,繆惠勇,黄友剑,陈灿辉,刘文松. 空气弹簧及抗侧滚扭杆可靠性设计技术及应用[J]. 机车电传动, 2009(3): 27-31.
- [5] 李 芾,傅茂海. 高速客车转向架发展及运用研究[J]. 铁道车辆, 2004, 42(10): 1-6.
- [6] 姜建东,付茂海,李 芾. 客车转向架抗侧滚扭杆装置特性研究[J]. 铁道机车车辆, 2004, 24(5): 4-7.
- [7] 姜卫星,沈培德. 我国高速客车转向架抗侧滚扭杆的研制[J]. 铁道车辆, 1996, 34(6): 1-5.
- [8] 钱雪中,沈培德. 准高速及提速列车转向架抗侧滚扭杆装置的设计与分析[J]. 上海铁道大学学报, 1998, 19(3-4): 12-16.
- [9] 段华东. 城轨转向架抗侧滚扭杆的刚度和强度分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2010, 33(2): 41-44.
- [10] 王忠杰. 广州地铁3号线车辆抗侧滚扭杆装置的国产化研制[J]. 城市轨道交通研究, 2008, 11(9): 40-42.

(上接第23页)

车轮间的间隙可通过单元制动器的间隙调整器自动调整,最大调整量为125 mm。

### 7 轮缘润滑装置

每转向架配有一组轮缘润滑器。对一、三位左右轮对轮缘进行润滑,其主要功能是通过润滑轮缘的内侧面,来降低当列车进入曲线时的负载并减少轮缘和轨道之间的磨损。

轮缘润滑采用已在国外高速机车上应用的油气润滑技术,简单地说,是将单独供送的润滑剂和压缩空气进行混合后再供送到润滑点。在润滑膜增厚和行驶速度加快的情况下离心力会使得润滑剂的粘附力降低,因此要求喷射出来的润滑剂的颗粒不能太大、润滑膜不能厚,以保证在高速行驶状态下,润滑剂也不被甩出。

轮缘润滑脂采用环保型轮缘润滑脂,其含有固体润滑剂,其基础油能被生物快速降解,不含重金属化合物,使用非常安全。

为实现转向架的一些辅助功能,保证机车的安全

运行,除上述的各大部件外,还设置了排石器、撒砂装置、轴端速度传感器和接地装置等。

### 8 结语

HXd2B型机车转向架是在法国PRIMA机车转向架技术的基础上,结合中国铁路运输需求进行适应性改进设计的,并经过了型式试验及运营考核,已经安全运行了近1年。该转向架的技术水平高,可靠性高,将是我国铁路货运电力机车转向架的基本平台产品。

### 参考文献:

- [1] 西南交通大学机车车辆研究所. 9 600 kW 大功率电力机车动力学性能研究[R]. 成都:西南交通大学, 2008.
- [2] 孙竹生,鲍维纤. 内燃机车总体与走行部[M]. 北京:中国铁道出版社, 1995.
- [3] 张红军,孙永鹏. 双拉杆式机车转向架轴箱定位刚度分析[J]. 机车电传动, 2004(5).
- [4] 谢 青. 机车旁承结构型式与筒统化设计[J]. 铁道机车车辆, 2008(S1).
- [5] 陆 超,罗世辉,姚 远. 单牵引杆布置方式对机车曲线通过性能的影响[J]. 铁道机车车辆, 2008(6).