

基于多体动力学的橡胶-金属联轴器橡胶套力学分析

张平豪, 吴新跃, 宋继忠

(海军工程大学 202 教研室, 湖北 武汉 430033)

摘要: 基于多体动力学采用 ADAMS 软件建立橡胶-金属联轴器橡胶套的仿真模型, 并对比分析 6 种工况下橡胶套所受应力值的大小及分布规律。结果表明, 改变联轴器输入转速和扭矩可以有效控制橡胶套所受应力值的大小, 但对应力分布情况的改变效果有限, 且扭矩变化占主导作用。

关键词: 橡胶-金属联轴器; 多体动力学; 应力

中图分类号: TQ336.4+3; TH123 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2011)01-0038-05

橡胶-金属联轴器安装在减速器轴与主动力装置轴系艏轴之间, 通过连接外鼓轮和内鼓轮的橡胶-金属组合装置实现对中补偿和降低振动量级的作用, 是舰艇降低振动噪声的重要装置。

由于橡胶在刚度、强度和物理化学稳定性等方面均远低于金属材料, 因此橡胶-金属联轴器的失效在绝大多数情况下首先并主要发生在橡胶元件上。橡胶失效的主要形式有整体碎裂、腐蚀剥落、脱胶、局部裂纹、蠕变和弹性性能衰退(刚度发生较大变化)等, 其中龟裂和裂纹是橡胶-金属套中最常出现的失效形式。另外, 粘合面剥离也是重要的失效形式。分析其失效机理及应力的大小及分布规律在橡胶-金属套寿命及失效形式的研究中具有重要意义。

本研究基于多体动力学建立橡胶-金属联轴器橡胶套的仿真模型, 通过数值计算得出橡胶-金属联轴器在不同扭矩和转速下橡胶套所受应力大小及分布情况。

1 多体动力学建模

1.1 橡胶-金属联轴器结构

橡胶-金属联轴器的结构如图 1 所示, 其主要部件包括外鼓轮、内鼓轮、从动轮、主动轮、套齿联轴器、轮毂、橡胶-金属套和链轮等。橡胶(多采用 CR)是联轴器的主要减震降噪部件, 橡胶-金属环在两个钢制轮毂之间。

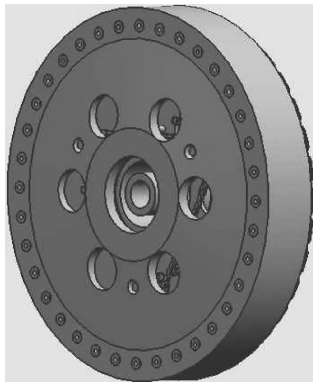


图 1 橡胶-金属联轴器的 CAD 模型

1.2 多体动力学理论基础

多体动力学的研究对象为比较复杂的多体系统, 其结构和连接方式也是多种多样的, 并且系统的动力学方程多为高阶非线性方程。在 ADAMS (automatic dynamics analysis of mechanical system) 软件中采用刚体的质心笛卡尔坐标和反映刚体方位的欧拉角作为广义坐标。系统动力学方程形式为

$$\begin{cases} \mathbf{M}(\mathbf{x}, t) \ddot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{\phi}^T(\mathbf{x}, t) \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) \\ \boldsymbol{\phi}(\mathbf{a}, t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}$ 为广义坐标列阵, t 为时间, $\dot{\mathbf{x}}$ 为广义速度列阵, $\ddot{\mathbf{x}}$ 为广义加速度列阵; $\boldsymbol{\lambda}$ 为约束反力及作用力列阵; $\boldsymbol{\phi}$ 为描述约束的代数方程列阵^[1], $\mathbf{a}$ 为反映刚体参考点运动位移的参数。

1.3 多体动力学仿真模型建立

在应用有限元方法把一个连续系统的动力学问题转化为多自由度系统的动力学问题时, 子结

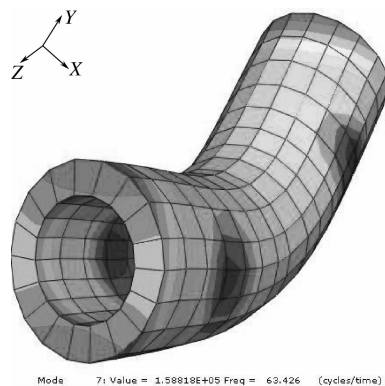
构综合方法能够用比较少的自由度来表征子结构的特性。借助大型结构动态分析的子结构方法,将柔性体视为一个子结构,采用子结构综合方法将柔性体与其他构件连接,将有限元分析方法与多体系统仿真相结合是多体系统动力学分析比较合适的方法。本研究通过 ADAMS 利用 MNF (modal neutral file) 模态中性文件建立柔性体模型。该方法利用有限元分析软件将构件离散成细小网络,再进行模态计算,然后将计算的模态保存为 MNF 文件,直接读取到 ADAMS 中建立柔性体模型^[2]。

(1) 拓扑结构建模

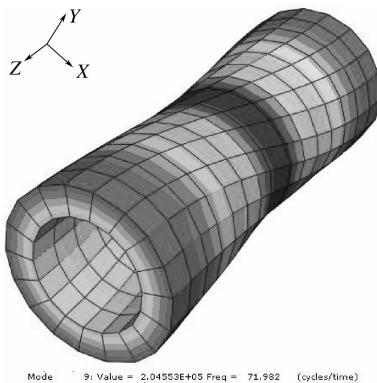
橡胶-金属联轴器结构如图 1 所示,各部件实体模型建立在 UGs 软件中完成。为了便于在 ADAMS 中建立运动副及施加约束,在 UGs 软件中按双转子系统模型将部分部件通过布尔运算合成为一个实体构件,主要有三部分,即左端驱动转子(内鼓轮、从动轮、主动轮、套齿联轴器、轮毂和链轮等)、右端被驱动转子(外鼓轮)和中间减震橡胶部件(橡胶-金属装置)。

轴系在运转过程中,其从动轮、主动轮和套齿联轴器间的空隙通过齿的啮合而进入平稳阶段,在运行过程中不会产生相对运动。虽然通过模态分析可知从动轮和主动轮的固有频率较低,不能当作刚体简单处理,但从拓扑结构可以看出它们分别安装在一阶模态频率远高于联轴器主要部件模态频率区的内鼓轮和轮毂上,故建模时当作刚体处理是合适的,同时三者材料的弹性模量远大于橡胶部件,因此建模时可将三者以及内鼓轮和轮毂作为一个整体刚性实体导入 ADAMS 中,并修改相应的材料属性,弹性模量为 $2.1 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$,密度为 $7.8 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$,泊松比为 0.3。另外,还要注意由于进行了布尔运算,为保证与设计质量一致,应稍微增大模型厚度。

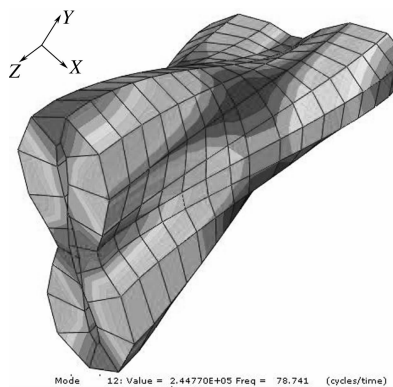
橡胶-金属环在联轴器扭转运动不平稳时起减震作用;在联轴器连接的两部件不对中时起对中作用。也就是说,该部件在旋转机械运转中存在变形,应作为柔性体处理。由 ADAMS 建立柔性体模型,采用有限元分析软件 ANSYS 生成 MNF 文件,计算出橡胶-金属环前 15 阶模态频率。部分振型如图 2 所示。



(a) 7 阶



(b) 9 阶



(c) 12 阶

图 2 橡胶-金属环部分模态振型

(2) 系统边界条件

a) 运动副的定义

根据橡胶-金属联轴器的实际运动关系,将各运动副简化为 ADAMS 中的理想约束,主要是在内鼓轮上定义旋转副。在 36 组橡胶套上分别与内外鼓轮建立运动耦合约束。其他如从动轮、主动轮、套齿联轴器和螺旋传动装置等,由于在 CAD 建模时视为刚性件处理,此处不考虑运动副

的添加。

b) 锥形滚柱轴承的支承

橡胶-金属联轴器外鼓轮安装在主动力装置轴系艉轴法兰上,而内鼓轮安装在双排锥形滚柱轴承上,与联动轴法兰刚性连接的轮毂通过锥形滚柱轴承安装在外鼓轮上。锥形滚柱轴承会对轮毂的轴向和径向运动都产生约束作用。在实际运行条件下,轴承通过高压润滑油形成一层润滑油膜,轴承座通过油膜将轮毂支撑起来。轮毂所受作用力一方面通过套齿联轴器传递给橡胶-金属套,另一方面通过油膜传递到外鼓轮。轴承与油膜的刚度远大于橡胶刚度,其结构固有频率远高于橡胶-金属联轴器主要部件模态频率区。因此对锥形滚柱轴承采用相对简单的线性弹簧阻尼模型。本研究采用图3所示双排弹簧阻尼,总体弹簧刚度和阻尼分别为 $7.8 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $6.2 \times 10^6 \text{ (N} \cdot \text{s)} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

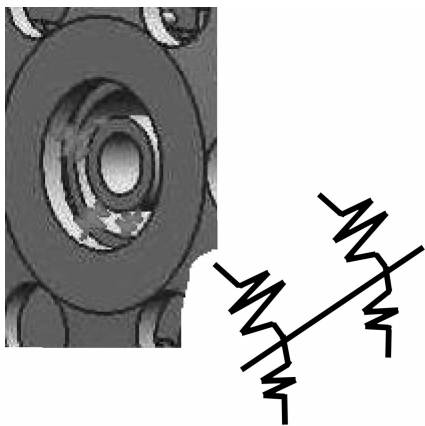


图3 锥形滚柱轴承双排弹簧阻尼示意

2 计算结果与讨论

橡胶-金属联轴器 ADAMS 动力学仿真模型如图4所示。36组橡胶-金属套之一及其节点分布如图5所示,上弧线表示与外鼓轮建立绑定约束的界面,下弧线表示与内鼓轮建立绑定约束的界面。由于结构中止推轴承的存在,不考虑轴向载荷,同时仿真是在稳定转速和载荷条件下进行的,因此图5中沿Z轴方向的节点应力分布与橡胶套端面节点应力分布一致。

施加的转速和扭矩以额定工况($1800 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.2 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$)为1计,分别取其不

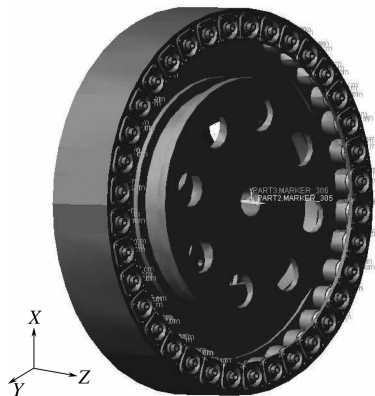


图4 橡胶-金属联轴器 ADAMS 动力学仿真模型

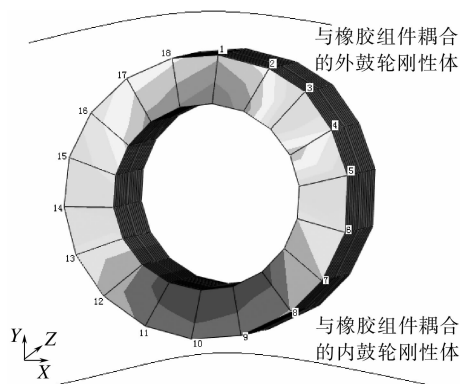


图5 橡胶套节点分布

同的比例进行讨论,6种工况的转速和扭矩如表1所示,额定工况下的应力大小及分布情况如图6所示,6种工况下各节点 Mises 应力曲线如图7所示。

表1 6种工况的转速和扭矩

工况	转速	扭矩
1	0.5	1
2	1	1
3	1.1	1
4	1	0.5
5	1	1.1
6	0.91	1.1

从图6可以看出,橡胶套一周18个节点中,应力最大值出现在1号节点,即图6中最上端的节点。其次,2和18号节点应力值较大,分布在1号节点左右。10号节点应力值最小,位于图6所示节点分布的最下端。这是因为联轴器在传递扭矩过程中,输入到内鼓轮的扭矩通过橡胶套的外圈和内圈传递到外鼓轮时产生的压应力所致。同

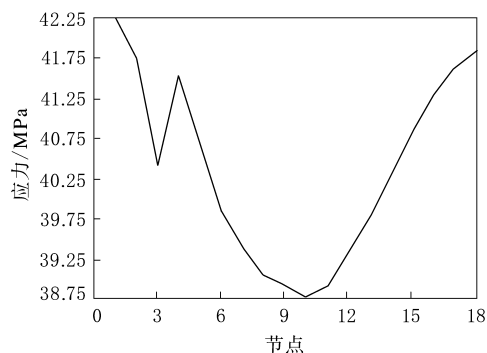


图 6 额定工况下各节点 Mises 应力曲线

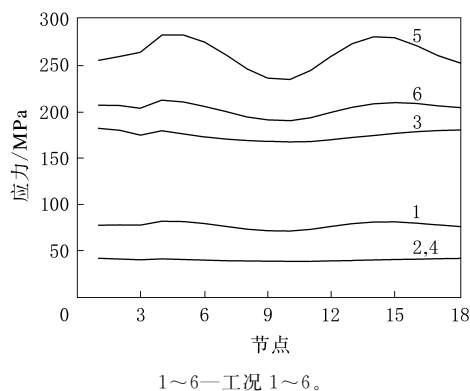


图 7 6 种工况下各节点 Mises 应力曲线

时旋转而产生的离心力方向与最上端的 1 号节点受压应力方向一致,增大了 1 号节点的 Mises 应力值;而最下端的 10 号节点产生的部分离心力方向与受到的压应力方向相反,抵消部分应力值,因此此处应力最小。

从图 7 中曲线 5 可以看出,在转速不变、扭矩为额定扭矩 1.1 倍的情况下,应力最大值有所改变,出现在图 7 所示的 4 号节点,14 号节点应力值也较大。这是由于随着扭矩增大,橡胶套外圈和内圈受到的压应力不断增大,离心力叠加或抵消的效果降低。曲线 6 与曲线 2 对比,橡胶套上各节点应力值提高 4 倍以上,可见,在输入功率一

定时,合适的转速和扭矩值对降低橡胶套应力有重大影响,进而影响到橡胶-金属联轴器的减震降噪效果。由曲线 3 与曲线 5 对比可知,扭矩改变比转速改变对橡胶套应力的影响大,即扭矩大小的改变在橡胶套应力分析中占主导作用。其他几条曲线对比也表明,在不影响输入功率的前提下,适当减小扭矩可以有效降低橡胶套的应力。

3 结语

本研究通过对比分析橡胶-金属联轴器在 6 种工况下橡胶套所受应力值的大小及分布规律得出以下结论。

(1)改变联轴器输入转速和扭矩可以有效控制橡胶套所受应力值的大小,但对应力分布情况的改变效果有限。

(2)相对转速而言,扭矩变化在橡胶套应力分析中占主导作用。

(3)输入功率一定时,通过改变转速和扭矩值,可以使橡胶套所受应力降低到最小,这对提高橡胶-金属联轴器的减震降噪效果有重要作用。

本研究为评估橡胶-金属联轴器的寿命、分析其失效形式奠定基础,同时计算结果作为初始条件施加在橡胶套上,也为橡胶-金属联轴器振动响应分析模型的准确建立提供了前提条件。

参考文献:

- [1] 陈立平,张云清. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [2] 李 军,陶永忠. MSC. ADAMS FSP 基础培训教程[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [3] 宋宝安. 柴油机低噪声结构动态设计方法的研究[D]. 天津:天津大学,2007.

收稿日期:2010-07-18

Mechanical Analysis on Rubber Components of Rubber-metal Coupling Based on Multi-body Dynamics

ZHANG Ping-hao, WU Xin-yue, SONG Ji-zhong

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033)

Abstract: A simulation model for rubber components of rubber-metal coupling was established based on multi-body dynamics by ADAMS (automatic dynamics analysis of mechanical system) software, and the stress and its distribution in the rubber components were analyzed comparatively under 6

working conditions. The results showed that, changes in speed and torque of the coupling could control the stress effectively, but had little effect on the stress distribution, change of torque was the dominant effect.

Key words: rubber-metal coupling; multi-body dynamics; stress

第11届全国橡胶工业信息发布会 在厦门举行

中图分类号:F273.7 文献标志码:D

2010年11月16—18日,中国橡胶工业协会主办的第11届全国橡胶工业信息发布会在厦门隆重召开。来自中国橡胶工业协会及各分会、专业委员会以及橡胶行业和上下游企业的近300名代表出席会议。

会议围绕“低碳经济与科技创新促进橡胶工业结构调整”的主题,分析了2010年我国橡胶工业经济运行情况,针对一段时期以来NR价格狂涨和许多不确定因素,预计2011年我国橡胶工业将呈缓慢增长趋势;介绍了中国汽车和钢铁行业的发展概况与2011年的发展趋势及“十二五”发展规划和政策;对橡胶工业“十二五”发展规划及轮胎产业政策编制进行了说明;针对当前出口形势和未来环保要求,详细介绍了欧盟轮胎法规和标签法。

厦门大学中国能源经济研究中心林伯强教授指出,低碳经济涉及人类生存,而低碳技术创新是发展低碳经济的主要支撑,应通过低碳结构调整主动应对低碳全球化,并警示今后的国际贸易纠纷将由于碳排放而更加复杂,贸易保护可能越来越强烈。他提出我国橡胶工业应以“积极适应、理解遵守、努力优化和科学设计”的方针指导行业发展。

中国橡胶工业协会会长范仁德在“关于我国橡胶工业低碳经济和发展模式战略的思考”的报告中指出,橡胶工业发展低碳经济,需要优化橡胶原材料结构,转变增长方式,调整产品结构;加快转变外贸增长方式,推动进出口结构转型;开发和推广应用节能设备技术和加强工艺管理;大力开展废旧轮胎等橡胶产品的回收和再生利用。他呼吁政府支持橡胶工业发展,降低NR进口关税,加快杜仲橡胶新兴产业的发展,支持废旧轮胎橡胶综合利用,推动轮胎试验场的建设和鼓励炭黑生产尾气发电并网。

中国橡胶工业协会副会长许春华强调,随着全

球低碳经济的兴起,“绿色制造”成为我国橡胶工业可持续发展的战略方针之一,而加大产品结构调整,发展新兴产业,大力发展安全、节能、环保的原材料是“绿色制造”的基础。推动新型橡胶产业发展,发展绿色助剂工业,开发应用低滚动阻力炭黑和高分散白炭黑以及应用芳纶帘线及其复合帘线和高性能聚酯骨架材料PEN,推进橡胶材料资源化利用,是未来橡胶工业材料领域工作的重点。

据了解,橡胶工业“十二五”发展规划纲要制定的指导思想是以科学发展、低碳经济、节能减排为方针,切实转变经济发展方式;坚持自主创新,推动科技进步,实施技术创新、产品创新、效益创新,以节能、安全、环保产品替代老产品,培育和争创世界名牌产品,提高核心竞争力;坚持以市场为导向,走集团化发展之路,淘汰落后产能,实现产业升级。橡胶工业主要产品及部分原材料“十二五”期间规划目标建议如下:汽车轮胎35 897万条,其中子午线轮胎32 978万条,子午化率92%;工程机械轮胎1 053万条(其中巨型轮胎全部是子午线轮胎),其中子午线轮胎423万条,子午化率40%;农业轮胎5 000万条,其中子午线轮胎800万条,子午化率16%;出口轮胎15 000万条,其中子午线轮胎13 799万条,子午化率92%。以上轮胎合计56 950万条,其中子午线轮胎48 000万条,子午化率84%。摩托车外胎28 564万条;自行车外胎53 076万条;汽车用胶管60 000万m,农机用胶管10 000万标米;胶鞋88亿双,其中内销23亿双(热硫化鞋10亿双);避孕套76亿只,其中内销35亿只;医用手套32亿副,其中内销7亿副;炭黑574万t;橡胶助剂100万t,其中内销60万t。

在同期举办的中国橡胶工业协会主席团及理事会会议上,中国橡胶工业协会公共关系委员会宣告成立,目的是为应对贸易摩擦,建立贸易预警机制,更好地为企业服务。

(本刊编辑部 黄丽萍)