

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.04.012

中低速动车组弹性复合圆柱滚子轴承承载能力分析*

杨文¹, 姚齐水², 余江鸿², 童忠文¹, 黄剑锋^{1*}

(1. 湖南铁道职业技术学院 轨道交通装备智能制造学院, 湖南 株洲 412001;

2. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要:针对动车组轴箱轴承易发生疲劳损坏等问题,选择弹性复合圆柱滚子轴承作为动车组轮对的传动支撑部件,并对其承载能力进行了理论推导、仿真计算和试验研究。首先,在考虑了轨道不平顺作用下动车组轴箱轴承承受的垂向载荷、横向载荷和纵向载荷的基础上,构建起了动车组转向架的力学模型;然后,基于弹性复合圆柱滚子轴承的结构特性,在动车组轮对超常载荷和常规载荷两种工况下,通过有限元分析方法先进行了整体计算,再以当量载荷作为约束,对轴承进行了局部计算,确定了弹性复合圆柱滚子轴承滚子的最优填充度,对比分析了弹性复合圆柱滚子轴承和普通圆柱滚子轴承的承载特性;最后,通过轴承试验台对其接触应力进行了试验,验证了动车组轮对轴承仿真模型的准确性,以及弹性复合圆柱滚子轴承的优越性。研究表明:在超常载荷和常规载荷两种工况下,弹性复合圆柱滚子轴承的最大等效应力较普通圆柱滚子轴承分别下降了 19.82% 和 27.92%;该分析结果可为动车组轮对的传动系统的设计和优化提供理论参考。

关键词:动车组轮对;弹性复合圆柱滚子轴承;承载能力;疲劳损坏;填充度;等效应力

中图分类号:TH133.33;U266

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)04-0507-06

Bearing capacity of elastic composite cylindrical roller bearings for middle-low speed multiple units

YANG Wen¹, YAO Qi-shui², YU Jiang-hong², TONG Zhong-wen¹, HUANG Jian-feng¹

(1. School of Rail Transportation Equipment Intelligent Manufacturing, Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou 412001, China; 2. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Aiming at the problems that the axle box bearing of multiple units was prone to fatigue damage, the elastic composite cylindrical roller bearing was selected as the transmission support component for multiple units wheel sets, and the theoretical derivation, simulation calculation and experimental analysis of the bearing capacity were conducted for the elastic composite cylindrical roller bearing applied to wheel sets. Firstly, the mechanical model of multiple unit's bogie was developed with the vertical loads, transverse loads and longitudinal loads by axle box bearing under track irregularity condition. In addition, considering the structural characteristics of the elastic composite cylindrical roller bearing, the optimized filling degree of the elastic composite cylindrical roller bearing was determined under the two working conditions, abnormal load and conventional load, for the wheel sets, the bearing characteristics of the elastic composite cylindrical roller bearing and ordinary cylindrical roller bearing were compared and analyzed with the above working conditions. Finally, the contact stress was tested on the bearing test bench to verify the accuracy of the EMU wheel set bearing simulation model and the superiority of the elastic composite cylindrical roller bearing. The results show that the maximum equivalent stress of the elastic composite cylindrical roller bearing is 19.82% and 27.92% lower than that of ordinary cylindrical roller bearing under abnormal load and conventional load conditions, respectively. The analysis results might provide theoretical references for the design and optimization of wheel sets transmission system of multiple units.

Key words: multiple units wheel set; elastic composite cylindrical roller bearing; carrying capacity; fatigue damage; filling degree; equivalent effective stress

收稿日期:2021-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175168);湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ60069,2021JJ50054);湖南省教育厅优秀青年资助项目(21B0897)

作者简介:杨文(1987-),男,湖南浏阳人,硕士,副教授,主要从事机械结构与系统动力学方面的研究。E-mail:yangwenjixie@126.com

通信联系人:黄剑锋,男,硕士,讲师。E-mail:huang-hnrpc@qq.com

0 引 言

提高列车的运行速度,以及在普通铁轨(俗称既有线)上运行中低速动车组,是我国经济发展的战略需要。动车组在服役过程中,由于受到来自普通轨道不平顺作用下复杂载荷的作用,其运行的安全性和可靠性成为了相关部门关注的焦点^[1]。

转向架轮对是机车行走部集成式功能部件,由车轮、车轴及轴箱轴承等构成^[2]。在其服役过程中,列车车重载荷自上而下通过轴箱轴承、车轴以及车轮传递到铁轨,各部件均承受着普通轨道不平顺作用下的复杂载荷。

轴箱轴承失效是动车组轮对主要失效形式之一。在普通轨道的不平顺作用下,动车组轮对轴箱轴承承受车辆随机振动载荷、弯扭载荷及冲击载荷,使其内部各组件会产生剧烈的相互作用,从而造成较大的接触疲劳,再加上其长期复杂且恶劣的工作环境,会最终导致轴箱轴承的疲劳损坏。这是轴箱轴承的主要失效形式之一^[3,4]。

为了提高轴箱轴承的承载能力,国内外学者都已经做了大量的研究工作。LUNDBERG G^[5]对母线进行了修形理论分析,提出了 Lundberg 凸度公式。SINGH K P^[6,7]和 HARMETT M J^[8]提出了一种简单的离散化数值解法,并构造了线性方程组,对带凸度圆柱体进行了接触应力计算。

上述的母线修型和凸度计算方法有效地降低了轴承因“边缘效应”而导致的疲劳破坏程度,然而并没有能够有效地改善轴承的承载能力。

在针对滚动轴承疲劳寿命数值仿真技术的研究中,吕华强等人^[9]提出了一种滚动轴承疲劳寿命预测系统。杨继运等人^[10]通过分析损伤力学理论,建立了一种基于损伤力学—有限元法的理论体系。张雪等人^[11]采用有限元法对交叉滚子转盘轴承的接触应力和次表面应力进行了分析。

以上学者针对轴承疲劳寿命进行了预测系统、损伤机理等方面的研究,然而也没有从根本上改善轴承的承载能力。

黄运生^[12]对轨道不平顺下轴箱轴承受到冲击载荷进行了分析,对轴箱轴承的剩余寿命进行了评估。在轴箱轴承方面,很多学者的研究主要集中在对轴箱轴承疲劳寿命进行分析,以及轨道不平顺对轴箱轴承疲劳寿命的影响上。研究的出发点是为了给轴箱轴承的选型和应用提供较好的方案,然而这并未改变轴箱

轴承易磨损的特征。轨道不平顺作用下轴箱轴承各组件间发生疲劳破坏的原因主要是接触碰撞和磨损,因此,上述研究也没有从结构上改善轴箱轴承的承载能力。

弹性复合圆柱滚子轴承是一种新型的滚动轴承^[13,14]。有研究人员通过对弹性复合圆柱滚子轴承进行结构创新,即在空心圆柱滚子内嵌高分子材料 PTFE,形成了刚柔耦合的滚子,增大了滚子与其他组件的接触面积,降低了低组件间的接触应力,有效提升了圆柱滚子轴承的承载性能^[15]。

因此,笔者构建基于新型轴承的动车组轮对力学模型,在轨道不平顺引起的复杂载荷下,通过有限元方法确定应用于动车组轮对的弹性复合圆柱滚子轴承滚子最优结构,对比分析相同工况下弹性复合圆柱滚子轴承和普通圆柱滚子轴承的承载能力各项指标,从而提升轮对结构的承载能力,提高其安全性和可靠性,为拓宽动车组轮对支承系统设计提供思路。

1 动车组轮对力学模型

轮对是动车组行走部核心部件,其在运行过程中承受复杂且随机的载荷。在轨道不平顺作用下,动车组轮对疲劳失效主要考虑超常载荷和常规载荷。其中,超常载荷是动车组轮对在轨道不平顺等因素作用下产生的较大冲击载荷,它可作为动车组轮对的静态设计依据。动车组轮对在运行中基本上是承受交变载荷,较为频繁的交变载荷对整个动车组轮对的使用寿命有着重要影响,它为动车组轮对疲劳分析和试验提供了准静态和动态载荷值。

在轨道不平顺等因素作用下,笔者主要考虑弹性复合圆柱滚子轴承对动车组轮对结构超常载荷的影响。动车组转向架承受车辆载荷并传递到轮对,承受整车车体及转向架的载荷,包括作用于轴箱轴承座的垂向载荷、横向载荷和纵向载荷。

依据载荷分布,笔者构建了动车组转向架力学模型^[16],如图 1 所示。

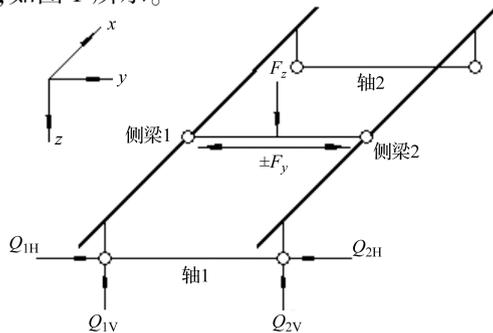


图 1 动车组转向架主要载荷示意图

(1) 垂向载荷

垂向载荷的表达式为:

$$F_{zmax} = \frac{k}{2n_b}(G + G_1 - n_b G_2) \quad (1)$$

式中: F_z —构架超常垂向静载荷, N; G —车辆的重量, N; G_1 —旅客和行李的重量, N; G_2 —转向架的重量, N; n_b —转向架数; k —动荷系数, 一般取 1.4。

轮对轴颈载荷为:

$$Q_{1V} = Q_{2V} = F_{zmax}/4 \quad (2)$$

(2) 横向载荷

横向载荷的表达式为:

$$F_{ymax} = 2 \left[10^4 + \frac{(G + G_1)}{2n_e n_b} \right] \quad (3)$$

式中: n_b —转向架数; n_e —轮对数。

如果二系悬挂的横向刚度为 L , 横向止挡间隙为 M , 则二系悬挂所分得的载荷为:

$$F_{y1} = F_{y2} = LM \quad (4)$$

一个横向止挡所分得的载荷为:

$$Q_{1H} = Q_{2H} = F_{ymax} - (F_{y1} + F_{y2}) \quad (5)$$

(3) 纵向载荷

在转向架构架上施加一个纵向牵引载荷, 该载荷为:

$$F_x = k_x g m_b \quad (6)$$

其中: k_x 一般取 3。

笔者结合转向架静力学分析, 对动车组轮对的力学模型进行重构, 确定动车组轮对在服役中承载的力学模型, 如图 2 所示。

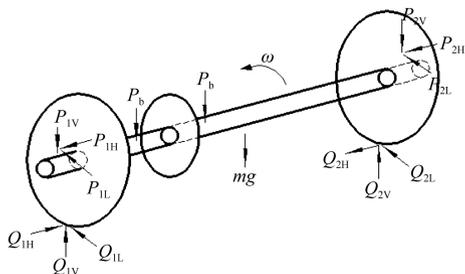


图2 动车组轮对力学模型

动车组轮对通过两侧轴箱体以及悬挂系统与转向架连接, 承受整车车体及转向架的载荷, 将轨道不平顺作用下形成的冲击载荷通过叠加, 有效反馈到轴箱体上, 包括作用于轴箱体的垂向力 P_{1V} 、 P_{2V} , 横向力 P_{1H} 、 P_{2H} 和纵向力 P_{1L} 、 P_{2L} ; 铁轨承载源于轮对的整车车体及转向架的载荷, 作用于左右车轮的垂向力 Q_{1V} 、 Q_{1H} , 横向力 Q_{1L} 及 Q_{2V} 和纵向力 Q_{2H} 和 Q_{2L} 。

2 有限元模型及分析

基于动车组轮对受到的复杂载荷作用, 并考虑到

动车组轮对各部件之间相互作用, 以及弹性复合圆柱滚子轴承刚柔耦合结构的特性, 无法通过 Hertz 接触理论对复杂的轮轨接触问题和刚柔耦合问题进行理论分析计算, 而采取数值分析法是解决该问题更有效的方法。因此, 笔者利用 ABAQUS 仿真软件对动车组轮对进行有限元建模和数值分析。

2.1 几何模型和材料特性

针对轮对的分析, 主要是考虑车轮—车轴、车轴—轴承、车轮—轨道之间的联系和相互影响。由于车轮、车轴、轴承以及轨道的受力是相互的, 而且比较复杂, 需要对轮对系统进行整体分析。

笔者建立了包含 2 个机车车轮、1 根车轴、轴箱 (包括轴承和轴箱体) 及部分轨道的轮对有限元模型, 如图 3 所示。

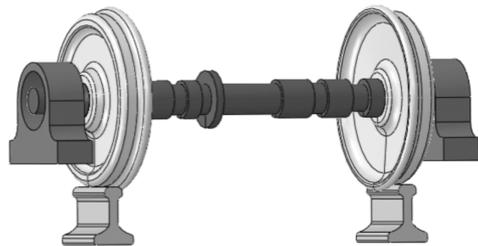


图3 轮对三维模型

为了保证有限元分析的准确性, 同时兼顾计算的效率, 笔者在建模时简化了结构^[17], 并忽略了轮对系统不影响接触分析的微小几何特征。

轮对各个部件名称以及材料性能参数如表 1 所示。

表 1 轮对各部件材料属性

部件名称	材料名称	弹性模量/MPa	泊松比
车轴	中碳钢 LZ50 钢	210 000	0.269
车轮	高碳钢	206 000	0.3
轴箱体	铸钢	180 000	0.3
轨道	锰钢	210 000	0.3
轴承内外圈及滚子	GCr15 轴承钢	207 000	0.3
弹性复合圆柱滚子嵌入材料	PTFE	280	0.4

2.2 边界和载荷定义

根据整体模型的特点, 笔者对轨道底部建立全约束, 车轴端面约束 U_2 、 UR_1 和 UR_3 3 个方向的自由度, 车轮侧面约束 U_1 、 U_2 和 UR_3 3 个方向的自由度, 轴承侧面约束 U_2 方向的自由度, 轴箱体侧面约束 U_1 、 UR_1 、 UR_2 和 UR_3 4 个方向的自由度。

笔者对动车组轮对的载荷约束采取静态分析力学模型进行重构, 主要包括垂直载荷、横向载荷和纵向载荷, 即设作用于轴箱体的垂向力 P_{1V} 、 P_{2V} , 横向力 P_{1H} 、

P_{2H} 和纵向力 P_{1L} 、 P_{2L} ，并将上述作用力加载于轴箱体上。

2.3 接触建立和网格划分

在模型中，车轮与轨道、车轮与车轴、车轴与轴承内圈、轴承外圈与轴箱体以及弹性复合圆柱滚子中两种材料之间都形成紧密配合，通过车轮接触面、车轴接触面、轴承内圈接触面、轴承外圈接触面和滚子内圈分别与轨道接触面、车轮接触面、车轴接触面、轴箱体接触面和填充材料外圈之间建立接触对。

网格的精确性直接关系到数值计算的效率以及计算结果的准确性。笔者通过数值计算，并考虑分析对象的几何形状、载荷条件、材料组合等因素，进行了网格划分。合理的模型网格划分结果为：动车组轮对的实体单元数 1 168 944 个，节点数 1 489 635 个。

2.4 计算方案

根据上述有限元网格划分结果可知，结构大而杂的轮对结构需要超大的计算量，且其对于较小的轴承结构不能进行精准计算。为此，笔者通过将轮对有限元计算过程分“整体”、“局部”两个部分分别进行，以避免超大计算和计算不精准问题，具体的做法如下：

(1)整体计算。先设置弹性复合圆柱滚子轴承和轴箱体之间的关系固定不变，内部建立集成消除滚动接触接触副，滚子-滚道实体建立连接，模拟刚度接近的“等效轴承”；采用修正的二次四面体单元 (C3D10M) 划分网格。这样，车轮-车轴-虚拟轴承-轴箱-轨道构成了轮对有限元整体计算模型，共有 1 168 944 个单元、1 489 635 个节点；

(2)局部计算。以整体计算模拟圆柱滚子轴承和轴箱体产生的当量载荷作为约束，轴承的滚子-内外圈恢复接触关系，形成局部计算模型，其网格单元数 271 962 个，节点数 325 729 个。

3 直道工况算例

此处以直道运行工况为例，笔者根据 AARS660 标准以及 EN13979-1 标准，由上述平衡力系计算获得动车组轮对直道运行的常规载荷，并考虑轨道不平顺作用下产生的超常载荷，获得了动车组直道运行工况下总体载荷。

具体载荷值如表 2 所示。

表 2 动车组直道运行工况载荷

工况	P_{1V}/kN	P_{1H}/kN	P_{1L}/kN	P_{2V}/kN	P_{2H}/kN	P_{2L}/kN
常规载荷	86.362	0	2.913	86.362	0	2.913
超常载荷	196.334	1.271	6.236	196.334	1.271	6.236

笔者采用有限元方法先进行整体计算，再以当量载荷作为约束，对轴承进行局部计算。

首先，笔者在考虑常规载荷和超常载荷工况下，应用于动车组轮对的弹性复合圆柱滚子轴承的填充度进行优选；再以弹性复合圆柱滚子轴承和普通圆柱滚子轴承作为动车组轮对关键支撑零部件，对其承载能力进行对比计算。

3.1 弹性复合圆柱滚子轴承填充度优选

弹性复合圆柱滚子轴承滚子由深穴空心圆柱滚子内嵌高分子材料 PTFE 形成，其结构示意图如图 4 所示。

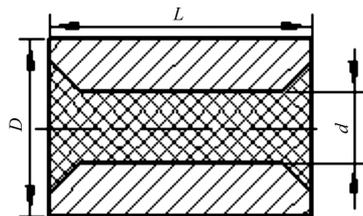


图 4 弹性复合圆柱滚子结构示意图

笔者定义弹性复合圆柱滚子的填充度为：

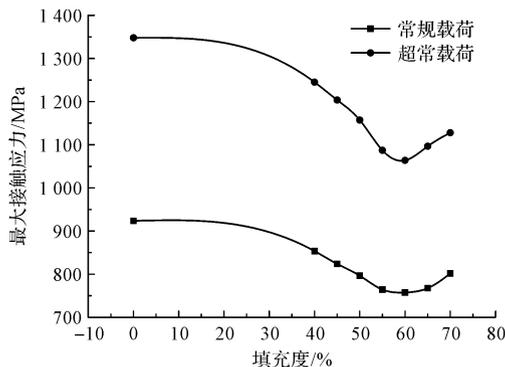
$$K = d/D \tag{7}$$

式中： K —填充度； d —弹性复合圆柱滚子内孔直径，mm； D —弹性复合圆柱滚子直径，mm。

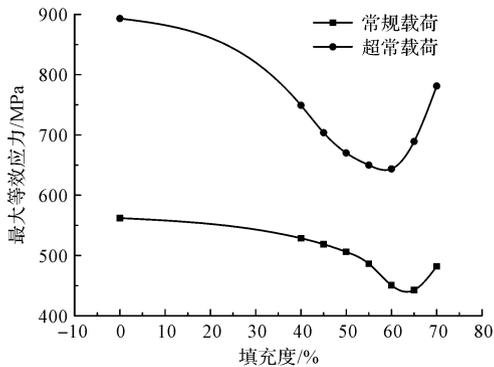
接触应力、等效应力是轴承承载能力的重要指标，笔者结合动车组轮对直道运行的实际工况，并考虑了常规载荷和超常载荷，对不同填充度的弹性复合圆柱滚子轴承进行了数值分析计算。填充度过小，则无法体现弹性复合圆柱滚子性能优势；填充度过大，则轴承的承载能力过低。

因此，此处笔者选择填充度为 40% ~ 70% (跨度为 5%) 的弹性复合圆柱滚子轴承进行分析和优选。不同填充度情况下，弹性复合圆柱滚子与内外圈接触的最大接触应力和最大等效应力，如图 5 所示。

由图 5(a)可知，常规和超常两种载荷下，填充度 60% 的弹性复合圆柱滚子的最大接触应力最小；



(a) 填充度与最大接触应力的关系



(b) 填充度与最大等效应力的关系

图5 填充度与最大应力的关系

据图5(b)可知,常规载荷下的弹性复合圆柱滚子轴承填充度为65%时,其最大等效应力最小,而超常载荷下填充度为60%时,其最大等效应力最小。

由于等效应力是轴承疲劳寿命的关键因素,笔者经综合考虑确定最优填充度 K 为60%。

3.2 两种轴承对比

在常规载荷和超常载荷下,普通圆柱滚子轴承和弹性复合圆柱滚子轴承的有限元对比计算结果如表3所示。

表3 有限元计算两种轴承的等效应力结果

轴承名称	常规载荷		超常载荷	
	最大等效应力值/MPa	最大等效应力降低率/%	最大等效应力值/MPa	最大等效应力降低率/%
普通圆柱滚子轴承	562.1	—	893.1	—
弹性复合圆柱滚子轴承	450.7	19.82	643.7	27.92

由表3可知:

(1)在相同载荷下,两种轴承处在载荷复杂的轮对结构中所受的应力不同;

(2)在常规载荷下,普通圆柱滚子轴承的最大应力值为562.1 MPa,位于最下端滚子与内圈接触的次表面,而弹性复合圆柱滚子轴承最大应力值为450.7 MPa,所处位置也在最下端滚子与内圈接触的次表面,后者较前者接触应力要小21.2%;

(3)在超常载荷下,弹性复合圆柱滚子轴承的最大等效应力较普通圆柱滚子轴承降低了27.92%,其最大等效应力位置也处在滚子与内圈接触的次表面,表明了弹性复合圆柱滚子轴承应用于动车组轮对的承载能力较普通圆柱滚子轴承更具有优势。

4 接触应力试验

接下来笔者通过轴承试验台对接触应力进行试验

研究。此处笔者选择ZNXGZ-50B新型滚动轴承综合试验台。该轴承综合试验台采用模块化设计,实现了数据采集、工况控制以及结果输出的自动化,具有测试精度高等的特点。

ZNXGZ-50B新型滚动轴承综合试验台实物图如图6所示。



图6 ZNXGZ-50B型滚动轴承综合试验台

4.1 方案

在相同载荷试验条件下,笔者通过测试试验,对比分析应用于动车组轮对的两种轴承的等效应力。

笔者将试验轴承安装在轴承试验台上,通过加载系统模拟动车组轮对的受力,给试验轴承施加垂向、横向和纵向3个方向的载荷。

被施加载荷后的轴承滚子会出现接触变形,轴承内外圈也会发生变形,轴承内外圈各个测试点也会将对应的应变大小通过动静态电阻应变仪显示出来,从而得出试验轴承滚子的接触应力大小。

4.2 结果与分析

笔者通过加载系统和压力传感器,对试验台进行径向加载(垂向载荷与纵向载荷合成为径向载荷)和横向加载。其中,径向加载依次增大分别为0 kN、20.5 kN、41 kN、61.5 kN、82 kN,结合动车组轮对直道运行常规载荷的工况,横向加载为0。

笔者通过动静态应变测试仪记录了3个通道的试验数据,得到了普通圆柱滚子轴承和弹性复合圆柱滚子轴承的最大接触应力情况,如表4所示。

表4 不同载荷下两种轴承的最大接触应力(MPa)

轴承类型	最大接触应力/MPa				
	0 kN	20.5 kN	41 kN	61.5 kN	82 kN
普通圆柱滚子轴承	0	264.82	451.08	538.62	586.13
弹性复合圆柱滚子轴承	0	213.91	387.44	457.37	478.35

根据表4可知,随着载荷的不断增大,两种轴承接触应力均增大,且呈现非线性增大。当试验载荷增加到与仿真载荷82 kN相等时,两种轴承的最大接触应

力分别为 478.35 MPa 和 586.13 MPa。

两种轴承的试验结果与仿真结果对比如表 5 所示。

表 5 两种轴承的试验结果与仿真结果对比

轴承类型	仿真结果		试验结果		相对误差 /%
	最大接触应力值/MPa	最大接触应力降低率/%	最大接触应力值/MPa	最大接触应力降低率/%	
	普通圆柱滚子轴承	562.1	—	586.13	
弹性复合圆柱滚子轴承	450.7	19.82	478.35	16.9	6.1

从表 5 对比可知:试验结果与仿真结果基本吻合,存在误差在 10% 以内。这主要是因为仿真模型是在对实物作了部分假设的基础上建立的,而且试验设备自身存在的误差,总体上该误差在工程分析允许的范围内。

综上所述,笔者建立上述仿真模型,用于分析动车组轮对轴承,具有较高的准确性,也体现了弹性复合圆柱滚子轴承应用于动车组轮对的优越性。

5 结束语

为了有效改善动车组轴承的承载能力,笔者提出了一种弹性复合圆柱滚子轴承应用于动车组轮对,并对其支承性能进行了研究,最后通过试验进行了验证。

研究表明:

(1)通过结合动车组轮对的常规载荷和超常载荷实际工况对弹性复合圆柱滚子轴承进行有限元计算,确定其最优填充度为 60% ;

(2)在常规载荷和超常载荷下,通过基于弹性复合圆柱滚子轴承和普通圆柱滚子轴承的动车组轮对有限元对比计算,结果表明,两种载荷下前者较后者最大等效应力分别下降了 19.82% 和 27.92% ,试验结果与仿真结果基本吻合。

综上所述,弹性复合圆柱滚子轴承应用于动车组轮对具有良好的承载能力。笔者在后续的工作中,将对动车组弹性复合圆柱滚子轴承动力学特性及其振动机理进行研究。

参考文献 (References) :

[1] 赵永翔. 铁道车辆结构强度可靠性和安全性技术展望[J].

铁道学报,2003,25(2):92-97.

- [2] 赵永翔,蔡慧,敬霖,等. HXD2 机车动力轮对的集成分有限元模型[J]. 机械工程学报,2014,50(14):21-26.
- [3] GERDUN V, SEDMAK T, ŠINKOVEC V, et al. Failures of bearings and axles in railway freight wagons[J]. **Engineering Failure Analysis**, 2007, 14:884-894.
- [4] 赵永翔,高庆,张斌,等. 轨道车辆轮对的关键力学问题及研究进展[J]. 固体力学学报,2010,31(6):716-730.
- [5] LUNDBERG G. Elastische berührung zweier halbräume[J]. **Forschung Auf Dem Gebiete Des Ingenieurwesens**, 1939, 10(5):201-211.
- [6] SINGH K P, PAUL B. Numerical solution of Non-Hertzian elastic contact problems[J]. **Journal of Applied Mechanics, Transactions of ASME**, 1974, 41(2):484-490.
- [7] SINGH K P, PAUL B. Stress concentration in crowned rollers[J]. **Journal of Applied Mechanics (ASME)**, 1975, 97(3):990-994.
- [8] HARMETT M J. The analysis of contact stresses in rolling element bearings[J]. **Journal of Lubrication Technology, Transactions of ASME**, 1979, 101(1):105-109.
- [9] 吕华强,王黎钦,古乐,等. 滚动轴承疲劳寿命数值仿真技术的研究[J]. 机械研究与应用,2005,18(5):42-44.
- [10] 杨继运,张行,张珉,等. 基于疲劳裂纹形成曲线的裂纹扩展分析数值方法[J]. 机械工程学报,2004,40(7):55-62.
- [11] 张雪,张钢,周凯峰,等. 交叉滚子转盘轴承的有限元分析[J]. 轴承,2012,(4):1-4.
- [12] 黄运生,邓四二,张文虎,等. 冲击载荷对铁路轴箱轴承塑料保持架动态性能影响研究[J]. 振动与冲击,2018,37(1):172-180.
- [13] YAO Qi-shui, YANG Wen, YU De-jie, et al. Bending stress of rolling element in elastic composite cylindrical roller bearing[J]. **Journal of Central South University**, 2013,20(12):3437-3444.
- [14] 姚齐水,向磊,李超,等. 新型圆柱滚子轴承动态特性分析[J]. 振动工程学报,2020,33(4):734-741.
- [15] 姚齐水,杨文,余江鸿,等. 弹性复合圆柱滚子轴承结构设计研究[J]. 中国机械工程,2012,23(24):2899-2902.
- [16] 杨文. 基于机车轮对的弹性复合圆柱滚子轴承深穴结构优化设计[J]. 计算机与数字工程,2020,48(4):960-966.
- [17] 付振一,曹江,吴茂民. 某型液压泵轴尾轴承改进设计与寿命分析[J]. 液压气动与密封,2020(7):18-21.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

杨文,姚齐水,余江鸿,等. 中低速动车组弹性复合圆柱滚子轴承承载能力分析[J]. 机电工程,2022,39(4):507-512.

YANG Wen, YAO Qi-shui, YU Jiang-hong, et al. Bearing capacity of elastic composite cylindrical roller bearings for middle-low speed multiple units[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2022,39(4):507-512.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>