

弹性复合圆柱滚子轴承结构设计研究

姚齐水^{1,2} 杨文² 余江鸿² 张然²

1. 湖南大学,长沙,410082 2. 湖南工业大学,株洲,412007

摘要:根据组合创新原理,通过对圆柱滚子轴承的结构进行创新研究,提出了一种在空心圆柱滚动体中嵌入聚四氟乙烯(PTFE)材料的弹性复合圆柱滚子轴承新结构的设计方法。为确定弹性复合圆柱滚动体的结构尺寸,定义滚动体的填充度 $K=d/D$ (D 为滚动体直径, d 为材料填充直径),用ANSYS软件对弹性复合圆柱滚子轴承进行有限元建模,分析了重载工况下弹性复合圆柱滚子轴承的接触应力、von Mises应力、弯曲应力以及变形量对滚动体结构尺寸的影响。结果表明,在重载工况下,弹性复合圆柱滚子轴承滚动体填充度最优值为55%,并通过试验验证了分析结果的正确性。所得结果为弹性复合圆柱滚子轴承的设计提供了基础性数据。

关键词:弹性复合圆柱滚子轴承;填充度;有限元分析;载荷;接触应力;弯曲应力

中图分类号:TH133.33

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.24.001

Research on Structure Design of Elastic Composite Cylindrical Roller Bearing

Yao Qishui^{1,2} Yang Wen² Yu Jianghong² Zhang Ran²

1. Hunan University, Changsha, 410082

2. Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan, 412007

Abstract: According to the principle of combinational innovation, a study of structure innovation of cylindrical roller bearing was made, and a new method of structure design of elastic composite cylindrical roller bearing which embedded PTFE in the hollow cylindrical roller was put forward. In order to determine the size of elastic composite cylindrical roller and define the rolling element filling $K=d/D$, ANSYS software was used in finite element modeling of the bearing. Analysis was made to identify the influence of the contact stress, von Mises stress, bending stress and load of elastic composite cylindrical roller bearing on overloaded. It is found that the best rolling element filling is 55% in the overloaded case. The accuracy of the analysis was verified through the experiments. The study results provide the basic data for the design of elastic composite cylindrical roller bearing.

Key words: elastic composite cylindrical roller bearing; filling degree; finite element analysis; contact stress; bending stress

0 引言

圆柱滚子轴承作为一种重要的机械元件,其工作性能直接影响到主机的工作性能。机械设备复杂程度的日益提高,以及高速、重载、高精度等极端工作条件和使用要求的不断提出,对圆柱滚子轴承的安全服役、动态性能、承载能力等方面提出了越来越高的要求。传统圆柱滚子轴承的滚动体一般为实心圆柱滚动体,在应用中发现,实心圆柱滚子轴承存在诸如承载精度不高、振动噪声大、高速或重载情况下易损坏等不足。

为了克服传统的实心圆柱滚子轴承存在的弊端,国外设计出了空心圆柱滚子轴承^[1]。空心圆柱滚子轴承的结构特点是滚动体为空心状。空心圆柱滚子轴承分为有预负荷和无预负荷两种^[2]。

由于空心圆柱滚动体比实心圆柱滚动体具有更大的弹性,所以在受载情况下空心圆柱滚动体与套圈的接触面积增大,从而减小了接触应力,延长了轴承的使用寿命^[3]。由于空心圆柱滚子轴承质量小、离心惯性力小、适应的转速高,所以空心圆柱滚子轴承在高速轴承中的应用受到了广泛的重视^[4]。人们不断地设计各种新型的空心圆柱滚子轴承,并在结构设计、理论和应用研究上做了大量的工作^[5-12]。

理论和试验研究表明,空心圆柱滚子轴承具有多方面的优点,但在使用中也出现了一些问题,特别是受载的空心圆柱滚动体处于周期性交替变形状态,在载荷较大情况下,空心圆柱滚动体内孔的弯曲应力导致滚动体发生弯曲疲劳断裂,滚动体的断裂失效成为了空心圆柱滚子轴承的主要破坏形式^[2]。

传统实心圆柱滚子轴承和空心圆柱滚子轴承在工程应用中存在某些不足,难以满足现代机械

收稿日期:2012-08-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175168);湖南省科技计划资助项目(2011GK3148,2012GK3092)

发展应用的某些特殊要求。本文根据组合创新原理,通过对圆柱滚子轴承的结构进行创新研究,提出了一种在空心圆柱滚动体中嵌入聚四氟乙烯 (PTFE) 材料的弹性复合圆柱滚子轴承新结构的设计方法。弹性复合圆柱滚子轴承通过在空心圆柱滚动体内嵌入 PTFE 材料改善了滚动体的受力状况,增强了轴承的承载能力,降低了空心圆柱滚动体的内壁弯曲应力,进一步提高了轴承的疲劳寿命。PTFE 材料的优良物理特性还可使轴承具有降噪、减振的作用。

1 弹性复合圆柱滚子轴承的概念

基于圆柱滚子轴承结构创新研究,针对实心圆柱滚动体接触应力过大和空心圆柱滚动体内孔弯曲应力过大的不足,提出一种切实有效的增大滚动体与滚道接触半宽、减小接触应力、提高轴承综合疲劳强度的圆柱滚子轴承的设计新方案。该方案设计的圆柱滚子轴承实质上是在空心圆柱滚子轴承的空心圆柱滚动体中嵌入一种物理性能良好的高分子材料——聚四氟乙烯 (PTFE)。同时,为了改善滚动体边缘应力集中的影响,在空心圆柱滚动体内部的两端边缘设计了带斜度的深穴^[9]。三种滚动体结构见图 1。按此方案设计的圆柱滚子轴承被命名为弹性复合圆柱滚子轴承^[12-13],具体结构见图 2。

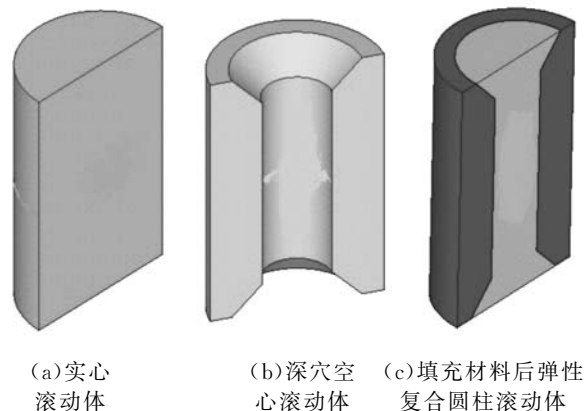


图 1 三种滚动体模型

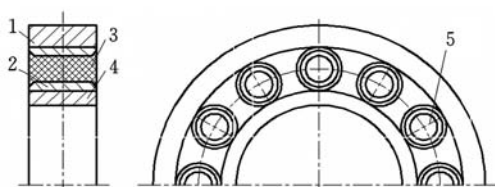


图 2 弹性复合圆柱滚子轴承结构图

由于弹性复合圆柱滚子轴承的滚动体较实心圆柱滚动体更容易变形,所以在相同载荷作用下

滚动体与轴承滚道的接触半宽增大,接触应力相应减小;相对实心圆柱滚动体而言,弹性复合圆柱滚动体的受力状况明显改善,特别是滚动体内孔弯曲应力减小,因此,轴承的抗疲劳破坏能力增强,安全服役寿命延长。这种新型轴承除了可以延长安全服役寿命、提高转动精度外,还有明显的减振降噪效果,这是因为嵌入的 PTFE 材料有良好的吸收振动能量的特性。对比试验表明,弹性复合圆柱滚子轴承的减振降噪效果明显优于实心圆柱滚子轴承和空心圆柱滚子轴承,这使得轴承本身乃至轴承支撑的整个机械系统的动态性能得到进一步的改善。由于嵌入 PTFE 材料的密度 ($2.2 \sim 2.3 \text{g/cm}^3$) 远小于轴承钢的密度 ($7.58 \sim 7.80 \text{g/cm}^3$),对于相同外径的滚动体,弹性复合滚动体的质量比实心圆柱滚动体质量要小,因此,弹性复合圆柱滚子轴承的极限转速要高于实心圆柱滚子轴承。

2 弹性复合圆柱滚子轴承有限元建模

根据接触弹性力学的有关理论,用 ANSYS 软件对弹性复合圆柱滚子轴承的滚动体与内圈的接触进行有限元分析。在带有深穴的空心圆柱滚动体的内孔填充 PTFE 材料构成弹性复合圆柱滚动体,其关键的尺寸是滚动体直径 D 、材料填充直径 d 、滚动体有效长度 L ,如图 3 所示。定义滚动体的填充度 $K = d/D$ 。

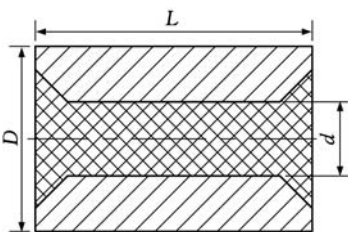


图 3 滚动体的几何尺寸

根据 GB/T4661 - 2002 以及 GBT 283 - 2007 得出滚动体尺寸,见表 1。滚动体材料采用 35Cr,其弹性模量为 206GPa,泊松比为 0.3,滚动体内嵌 PTFE 材料的弹性模量为 280MPa,泊松比为 0.4。对利用上述参数建立的几何模型进行有限元分析。弹性复合圆柱滚动体是由两种材料构成的非连续体,其分析过程比较复杂,通过初期的分析比较,采用 1/2 弹性复合圆柱滚动体和部分轴承内圈作为有限元分析模型比较合理,如图 4 所示。

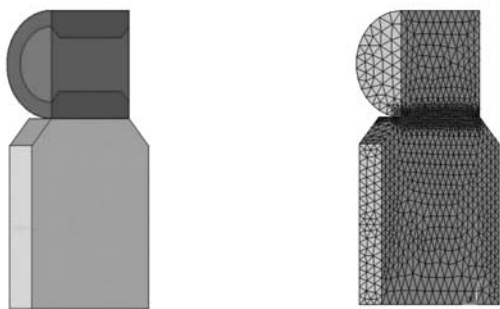
表 1 滚动体模型参数

mm

滚动体直径 D	20
外圈直径 D_2	280
滚动体长度 L	30
内圈直径 D_1	180

为了保证弹性复合圆柱滚子轴承的滚动体与内圈的接触处计算精度,对该处网格进行细化,单

元类型选择 Solid186, 并应用了有限元分析中的面与面的接触分析方法; 使用单元类型 TARGE170 定义内圈面为目标面, 使用 CONTA174 定义滚动体表面为接触面, 并以此创建接触对, 如图 4 所示。



(a)有限元分析模型 (b)单元网格划分

图 4 弹性复合滚动体和内圈有限元分析模型与单元网格划分

影响弹性复合圆柱滚子轴承疲劳寿命的关键因素是线接触处的最大等效接触应力和滚动体内壁的弯曲应力。弹性复合圆柱滚动体受力分析点见图 5, 轴承在工作中处于交变应力状态, 为了得到更合理的结构, 利用有限元分析方法对弹性复合圆柱滚动体内壁(B、C、E点)以及外壁(A、D、F点)的 von Mises 应力、主应力及相关的变形量进行计算, 并对结果进行优化分析, 得出合理的滚动体填充材料直径, 确定相应滚动体的填充度, 为弹性复合圆柱滚子轴承的设计提供基础数据。

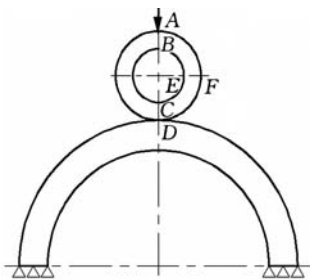


图 5 受力分析点示意图

3 结果与分析

在等效应力以及弯曲应力最小即弹性复合圆柱滚子轴承承载能力最强的条件下优化 d 的数值。根据弹性复合圆柱滚子轴承有限元建模和填充度计算公式 $K=d/D$, 取重载的工况(受力最大滚动体承受载荷 $F=47.5\text{ kN}$), 分析得出填充度 K 和接触应力、von Mises 应力、弯曲应力以及变形量之间的关系。

(1)基于接触应力对填充度进行优化。弹性复合圆柱滚动体与内圈的接触属于名义线接触^[14], 弹性复合圆柱滚动体和内圈产生的最大接

触应力与滚动体填充度关系的有限元计算结果如图 6 所示。由图 6 可知, 随着滚动体填充度的增大, 最大接触应力并不呈规律性变化, 滚动体填充度在 30%~40% 区间时, 最大接触应力呈上升趋势; 滚动体填充度超过 40% 后, 最大接触应力下降, 在 55% 处左右出现一个低谷; 滚动体填充度在 55%~60% 区间时, 随着滚动体填充度的继续增大, 滚动体最大接触应力增大; 滚动体填充度在 60%~75% 区间时, 最大接触应力呈下降趋势。

(2)基于 von Mises 应力对填充度进行优化。给定载荷下, 最大 von Mises 应力与滚动体填充度关系的有限元计算结果如图 7 所示。根据图 7 的结果分析, 随着滚动体填充度的增大, 其 von Mises 应力也增大, 在 $K=50\%$ 附近的区域出现了一个峰值, 随着滚动体填充度的继续增大, von Mises 应力在 $K=55\%$ 处到达一个低谷, 之后一直呈上升趋势。

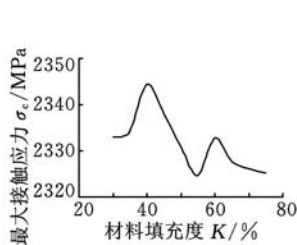


图 6 最大接触应力与滚动体填充度的关系

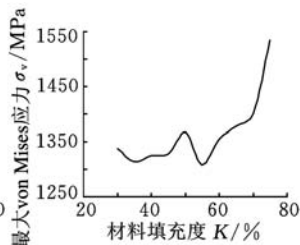


图 7 最大 von Mises 应力与滚动体填充度的关系

最大 von Mises 是影响轴承疲劳寿命的准则之一^[7]。综上所述, 在 von Mises 应力方面考虑弹性复合圆柱滚动体的承载, 其滚动体填充度选择 55% 左右比较合理。

(3)基于弯曲应力对填充度进行优化。弹性复合圆柱滚动体内壁的弯曲应力与滚动体填充度关系的有限元计算结果如图 8 所示。根据图 8 结果分析, 结合图 5, 滚动体内圈在 C 点处受拉, 在 E 点处受压。从应力变化情况看, 滚动体填充度在 30%~50% 范围内时, 拉应力和压应力均随滚动体填充度增大而增大; 滚动体填充度在 50%~60% 范围内时, 拉应力和压应力均相对平稳; 滚动体填充度大于 60% 时, 拉应力和压应力均呈增大趋势。弯曲应力是影响弹性复合圆柱滚子轴承承载性能的因素之一^[15]。根据文献[5]提供的数据, 弯曲应力小于 490MPa 时滚动体不发生弯曲疲劳断裂。

(4)基于变形量对填充度进行优化。滚动体的径向变形量直接影响滚动体的刚度和轴承的工作精度。在受载条件下, 弹性复合圆柱滚动体的径向变形量有限元计算结果如图 9 所示。由图 9 可

可以看出,滚动体的径向变形量随着滚动体填充度的增大而增大,滚动体填充度在 65% 以下时径向变形量在 0.05mm 以下,这符合滚动体的刚度要求。

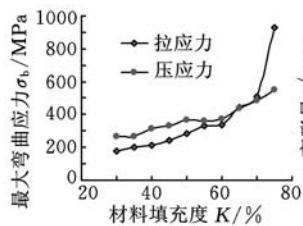


图 8 最大弯曲应力与滚动体填充度之间的关系

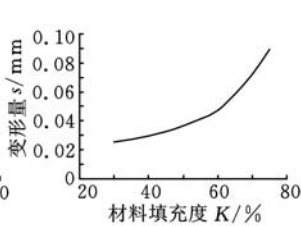


图 9 变形量与滚动体填充度之间的关系

4 试验验证

为验证上述分析结果,笔者利用某研究所设计制造的轴承试验器(图 10)进行了弹性复合圆柱滚子轴承的疲劳寿命试验。试验前先对不同填充度滚动体进行径向载荷变形测试,以保证滚动体的刚度都符合要求。测试结果表明填充度在 70% 以下的滚动体刚度都达到要求。在此基础上,选取相同外形尺寸,滚动体填充度分别为 35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%、70% 的弹性复合圆柱滚子轴承的试件各两组进行疲劳寿命试验。试验结果表明,滚动体填充度为 55% 时弹性复合圆柱滚子轴承出现疲劳破坏的时间最晚,其疲劳寿命最长,试验有效地验证了有限元分析结果(具体试验过程将另文论述)。



图 10 轴承试验器

5 结论

(1) 根据组合创新原理提出一种弹性复合圆柱滚子轴承设计新方法。

(2) 应用 ANSYS 软件对弹性复合圆柱滚子轴承进行有限元建模,从接触应力、von Mises 应力、弯曲应力以及变形量方面讨论了填充度与承载性能的关系,在重载 ($F=47.5\text{kN}$) 下弹性复合圆柱滚子轴承填充度最优值为 55%,试验验证了有限元分析结果。

参考文献:

- [1] Erwin V, Zaretsky A. Palmgren Revisited — a basis for Bearing Life Prediction[J]. Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, 1998, 54(2):18-23.
- [2] 罗虹, 刘家浚. 空心圆柱滚动体接触状况的分析研究[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(3):253-259.
- [3] Bowen W L, Bhateja C P. The Hollow Roller Bearing [J]. Journal of Lubrication Technology (ASME), 1980, 102(4):222-234.
- [4] Pikovokii V A. Study of the Working Capacity of High-velocity Radial Bearing with Hollow Rollers [J]. Strength of Materials, 1971, 3(10):1178-1185.
- [5] 罗虹, 刘家浚. 空心圆柱滚子轴承及其磨损问题[J]. 摩擦学学报, 1993, 13(3):276-286.
- [6] 魏延刚. 无预负荷空心圆柱滚子轴承空心度的优化设计[J]. 机械设计, 2003, 20(11):20-22.
- [7] 李伟建, 潘存云. 新型空心圆柱滚子轴承结构设计研究[J]. 机械设计与制造, 2008(8):50-52.
- [8] 魏延刚, 江亲瑜, Qin Y. 新型深穴滚动体轴承的设计概念及其有限元分析[J]. 中国机械工程, 2002, 13(24):2078-2080.
- [9] 魏延刚. 新型滚动体轴承—深穴空心圆柱滚子轴承承载性能的理论研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(2):107-111.
- [10] 陈家庆, 毛红兵, 张宝生. 无预载荷空心圆柱滚子轴承的理论研究[J]. 轴承, 2002(6):1-5.
- [11] 刘宁, 张钢, 高刚, 等. 基于 ANSYS 的圆柱滚子轴承有限元应力分析[J]. 轴承, 2006(12):8-10.
- [12] 姚齐水. 提高圆柱滚子轴承抗疲劳的方法及弹性复合圆柱滚子轴承: 中国, 201110061171. 1[P]. 2011-07-27.
- [13] 姚齐水. 一种弹性复合圆柱滚子轴承: 中国, 201120066406. 1[P]. 2011-11-23.
- [14] Beek A V. 现代机械工程设计: 全寿命周期性能与可靠性[M]. 刘传军, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [15] 哈里斯·T·A. 滚动轴承分析: 第 2 卷. 轴承技术的高等概念[M]. 5 版. 罗继伟译. 北京: 机械工业出版社, 2009.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 姚齐水, 男, 1967 年生. 湖南大学机械与运载工程学院博士研究生, 湖南工业大学机械工程学院教授、硕士研究生导师。主要研究方向为机构学、机械结构与动力学。获中国专利 2 项。发表论文 20 余篇。杨文, 男, 1987 年生. 湖南工业大学机械工程学院硕士研究生。余江鸿, 男, 1978 年生. 湖南工业大学机械工程学院讲师。张然, 男, 1989 年生. 湖南工业大学机械工程学院硕士研究生。