

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.07.012

基于 BP 神经网络的套筒式串联推力轴承组 均载性能及承载能力细化研究^{*}

林桂强, 毕超, 江波, 张冰

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 为完善套筒式串联推力轴承组优化设计理论, 为大型、高端推力轴承组国产化提供理论支持, 利用有限元数值模拟方法, 对轴承组进行静态力学分析, 研究轴承组几何设计参数对其均载性能和承载能力的影响。通过 BP 神经网络建立轴承组几何设计参数与轴承组均载率的数学模型, 并用于轴承组的优化设计。对部分理论研究内容进行实验验证, 并进行了误差分析。

关键词: 套筒式串联推力轴承组; 均载率; 有限元模拟; BP 神经网络

中图分类号: TQ32

文献标识码: A

文章编号: 1001-3539(2012)07-0050-04

Detailed Research on Load Uniformity and Load-bearing Capacity of Sleeve Type Tandem Thrust Bearings Based on BP Neural Network

Lin Guiqiang, Bi Chao, Jiang Bo, Zhang Bing

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 10029, China)

Abstract : To perfect the optimization design theory, realize the localization of large-type and high-quality thrust bearings, enormous static mechanical analysis was done on the thrust bearings via finite element modeling analysis to study the influence on the load uniformity and load-bearing capacity from geometric parameters of the thrust bearings. The mathematic model of geometric parameters and load uniformity was established by BP neural network, and it was used to optimize the design of bearings. The theory was proven by experiment and the error was analyzed.

Keywords : sleeve type tandem thrust bearings ; load uniformity rate ; FEM ansysis ; BP neural network

套筒式串联推力轴承组是石化企业大型双螺杆挤压造粒机组传动系统的核心部件。目前我国该产品全部依赖进口。套筒式串联推力轴承组由内隔圈、外隔圈、轴圈、座圈和滚动体组件组成, 详见图1。自1943年H. E. Kaye^[1]提出套筒式串联推力轴承组的设计理念后, 众多科研人员投身该类推力轴承组领域, 对其组成部件如内外隔圈^[2-5]、轴圈座圈^[6-7]以及轴承滚子^[8]的受力状态进行了研究, 并提出了电桥应变片法^[9]和激光散斑法^[10]等测量轴承受力状态的实验测试方法。

笔者采用有限元法模拟套筒式串联推力轴承组的受力状态, 分析轴承组几何设计参数对轴承组均载性能的影响, 探究了轴承组均载性能对于轴承组各几何参数变化的敏感程度。通过BP神经网络建立起轴承组均载率和几何设计参数之间的函数关系模型, 并将之应用于轴承组的优化设计。对部分理论研究内容进行了实验验证, 并进行了误差分析。

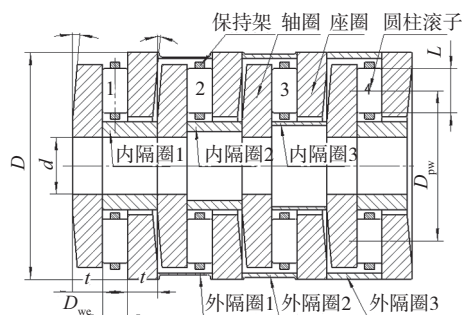


图1 套筒式串联推力轴承组结构图

1 有限元模拟

采用有限元方法对套筒式串联推力轴承组工作状况下的应力状态进行模拟, 轴承组的主要特征参数见表1。模拟中, 取整个轴承组的 $1/Z$ (Z 为

^{*} 国家863计划项目(2012AA040306)、北京市优秀人才培养项目(2011D009016000003)、中央高校基本科研业务费项目(ZZ1217)

联系人: 毕超, 副教授, 主要从事橡塑装备研究

收稿日期: 2012-04-28

滚子数目)进行模拟。模拟中采用如下假设^[11]:

- (1)忽略轴承组保持架的影响;
- (2)假定滚子与轴、座圈之间为静接触;
- (3)忽略轴承组自身重力影响。

表1 轴承组几何特征参数

项目	数据
轴承组内径(d)/mm	18
轴承组外径(D)/mm	72
轴承组数(N)	4
内、外隔圈长度(L_1)/mm	17.5
滚子节圆直径(D_{pw})/mm	47.7
滚子直径(D_{we})/mm	8
滚子长度(L)/mm	14
滚子数量(Z)	12
轴、座圈厚度(t)/mm	9.5
轴、座圈斜角(β)/($^\circ$)	4

网格划分和边界条件设定如图2所示。采用六面体网格对轴承组进行网格划分,网格参数为0.85 mm,网格节点数在20万~25万。工作时,对轴承组施加轴向力 $F_a=10\,000$ N。各组轴承受力理论平均值为2 500 N。各排轴、座圈和内、外隔圈的侧面加上对称约束,轴承组的底面加上固定支撑约束。此外,由于轴承座与轴承组外侧紧密配合,故各级座圈外侧及第三组外隔圈外侧施加法向正向位移约束。模拟中,轴承组材料弹性模量为206 GPa,泊松比为0.3。

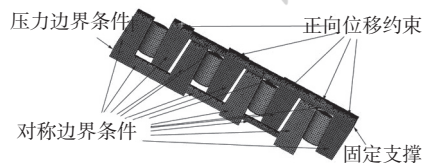


图2 网格划分及边界条件

2 实验研究

图3为本研究所应用的套筒式串联推力轴承组均载率测量实验装置。它主要由电机、支架、轴承座、推力轴承组、加载卡盘及应力测量装置等组成。应力测量时,将推力轴承组安装到轴承座之中,使用加载卡盘对轴承组施加轴向力。轴承组各级外隔圈外侧中部每隔 90° 贴一应变片,应变仪将各外隔圈外侧4个应变片联接为全桥电路。轴承组各外隔圈几

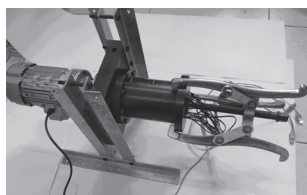


图3 实验装置

何形变由应变片桥式电路转化为电信号,经应变仪信号转换,通过TTL-USB接口电路连接到计算机,读出测试数据。

测量时,应变仪采用统一零点,测量开始时置零一次。实验采用加载卡盘施加轴向力,通过轴承组底座后的测力隔圈控制施加轴向力的大小。在未施加轴向力时,读取四个隔圈电桥电路的初始输出信号数据;当施加轴向力(10 000 N)时,再次读取四个隔圈电桥电路的最终输出信号数据,求两次测量值之差的绝对值,即为所需数据。将测得的数据进行线性处理,即可得到每组轴承承载轴向力。

3 量化评价参数

均载率是用于表征轴向力在各轴承单元间分配均匀程度的指标,定义为^[12]:

$$\eta = 1 - \frac{R_{\max} - R_{\min}}{F_a / N} \quad (1)$$

式中: η 为均载率; $R_{\max}$ 和 $R_{\min}$ 分别为施加到轴承组内轴承单元上的最大力和最小力; F_a 为轴向力; N 为轴承级数。

轴承组几何特征参数对均载率的影响各不相同。参数对均载率的影响程度可以用敏感系数表示。敏感系数为均载率相对变化量与参数值相对变化量的比值。敏感系数越大,表明该参数对均载率影响越大。敏感系数定义为:

$$\gamma = \frac{(\eta_{\max} - \eta_{\min}) / \eta_0}{(P_{\max} - P_{\min}) / P_0} \quad (2)$$

式中: γ 为敏感系数; $P_{\max}$, $P_{\min}$ 分别为所选参数的最大、最小值; $\eta_{\max}$, $\eta_{\min}$ 分别为在参数取值范围内均载率的最大、最小值; P_0 , η_0 分别为基准参数值及其对应的均载率。

4 神经网络模型建立

选取敏感系数 $\gamma > 20\%$ 的几何设计参数作为BP神经网络模型的输入参数,轴承组均载率 η 为模型输出参数,以模型收敛速度和预测精度为依据构建网络的隐含层,通过数值模拟建立输入和输出数据表,并将数据表分为训练组和验证组,分别用于训练网络和验证网络的预测能力。

5 结果与分析

5.1 隔圈轴向截面积对均载率的影响

调整隔圈轴向截面积可以提高轴承组的均载率。以外隔圈为例,按照经典理论初步设计轴承组各个隔圈的内径和外径后,依次微调各外隔圈的轴向截面积,以提高轴承组均载率。

图4给出第一组轴承的承载力 F_1 与外隔圈1截面积 A_1 的关系。经线性回归表达式计算得到:当 $F_1=2500\text{ N}$, $A_1=102\text{ mm}^2$ 时轴承均载率为89.95%。调节过程中应随时校核第一组外隔圈的稳定性,防止出现隔圈失稳现象^[5]。 A_1 的敏感系数为30.23%。

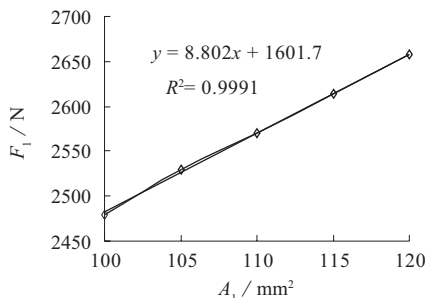


图4 外隔圈1轴向截面积 A_1 对第一组轴承承载力 F_1 的影响

按照相同方法依次调整 A_2 , A_3 ,使得第二、三组轴承受力达到平均值。经计算,第二组轴承受力为平均值2500 N时, $A_2=215\text{ mm}^2$,均载率为94.86%, A_2 的敏感系数为27.96%;第三组轴承受力为平均值2500 N时, $A_3=385\text{ mm}^2$,均载率为98.67%, A_3 的敏感系数为58.54%。经上述流程计算1次轴承组的均载率就从86.33%提高到98.67%,足以满足轴承组设计要求。如果要进一步提高均载率,可将上述流程得到的最终结果作为初始值,返回到第一步循环计算。

5.2 内、外隔圈长度对轴承组受力均载性能的影响

外隔圈在承受轴向载荷时不仅发生了轴向的压缩变形,也发生了径向的弯曲变形。沿径向的弯曲变形破坏了经典理论中内外隔圈间的刚度比例关系。图5示出隔圈长度 L_1 对均载性能的影响。由图5可看出,均载率随内、外隔圈长度 L_1 的增加呈上升趋势。内、外隔圈长度 L_1 的敏感系数为9.1%,可见该参数对轴承组的均载性能有一定影响。

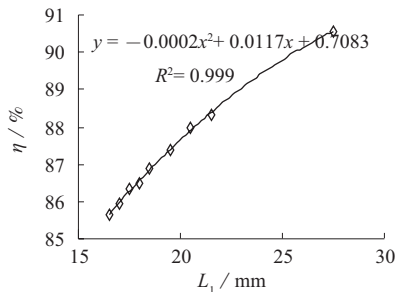


图5 隔圈长度 L_1 对均载性能的影响

虽然内、外隔圈长度 L_1 增加有利于轴承组的均载,但 L_1 对隔圈轴向稳定性有着决定性影响^[5]。对

于第三组内隔圈,有如下关系:

$$\frac{L_1^2}{Rt} = \frac{17.5^2}{14 \times 1.1} = 19.9 \gg 1 \quad (3)$$

式中: R 为平均半径, t 为隔圈厚度。

此条件下,当泊松比0.3时,薄壁隔圈的失稳临界应力(σ_{cr})为^[5]:

$$\sigma_{cr} = \frac{4.935ER^2}{L_1^2} \propto \frac{1}{L_1^2} \quad (4)$$

当隔圈长度增加时,隔圈失稳临界应力急剧减小,导致其承载能力相应迅速下降。故设计隔圈长度时应重点保证隔圈的稳定性。

5.3 其它参数对轴承组均载率影响的敏感系数

经计算,轴承组其它组件结构参数的敏感系数依次为轴、座圈厚度 t (32.35%)、轴承滚子节圆直径 D_{pw} (22.1%)、滚子长度 L (13.14%)、滚子数量 Z (6.57%)、滚子直径 D_{we} (4.22%)、轴、座圈倾斜角 β (0.38%)。

5.4 预测模型的建立及设计参数优化

BP神经网络模型的输入参数选定为轴承组三组外隔圈轴向截面积 A_1 , A_2 , A_3 ,轴承轴座圈厚度 t 和滚子节圆直径 D_{pw} 。采用双隐层形式的BP神经网络,隐含层第一层包含6个节点,第二层包含2个节点,模型的网络结构拓扑如图6所示。

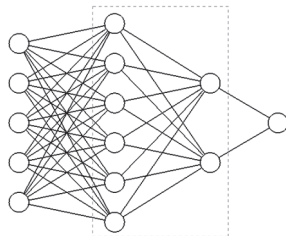


图6 BP神经网络结构图

图7给出了神经网络预测结果与有限元模拟结果之间的对比。直线表示预测结果与模拟结果完全一致,数据点表示真实预测结果。由图7可以看出,神经网络预测结果与有限元模拟结果的相关性达到

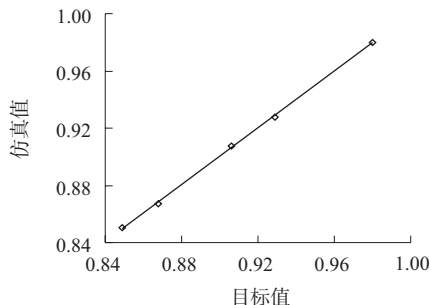


图7 BP神经网络预测结果

99.4%,能够满足优化设计时的预测要求。

通过BP神经网络建立轴承组几何设计参数,调用Matlab的有约束问题非线性优化问题求解工具箱,导入约束条件,对轴承参数进行优化,得出最佳几何参数组合:当 $(A_1, A_2, A_3, t, D_{pw}) = (100, 214.8, 373.1, 9.62, 49.7)$ 时,轴承组均载率达到最大,为98.84%。经建模模拟,结果基本吻合。

5.5 实验验证及误差分析

取外隔圈轴向截面积为研究变量,通过实验测量不同尺寸外隔圈组合时的轴承组受力均载率及其变化趋势,并将之与Ansys模拟结果相对比,从而验证理论研究方法的正确性。以外隔圈1为例,保持其内径不变,通过调节外径来调节隔圈轴向截面积。均载率随外隔圈1外径变化趋势的实验测试结果及相应Ansys模拟结果如图8所示。

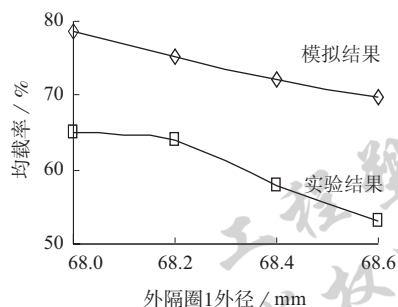


图8 外隔圈1外径对轴承组均载率的影响

将实验结果与模拟结果相比可知,实验测得的均载率变化趋势与模拟结果相似,但实验结果达不到模拟结果水平。外隔圈2和3实验结果与模拟结果对比与外隔圈1类似。出现较大偏差的原因主要有以下几点:

(1)模拟和实验中轴承的工作状态不一致。有限元模拟时忽略轴承组的旋转,而测试时轴承组处于旋转状态。

(2)零件加工精度难以与图纸标注一致。套筒式串联推力轴承组某些零件尺寸精度要求极高,如外隔圈1的厚度仅为0.7 mm,微小误差都会对均载率造成影响。设计规定内径公差为H5,但加工本零件的数控铣床很难达到如此高的精度,同时传统的检验方法也无法进行检验。这一点也反应出高精度、高承载能力、高均载率的轴承组的加工具有很高难度。

(3)装配精度难以保证。轴承组装配时要求严格水平放置,施加轴向力也要严格与轴承组轴向平行,且通过圆心。本实验装置采用支架支撑的结构,

装配精度难以保证。安装不同轴,或受力方向有偏差,均会导致测试时由于电机转动造成轴承承载波动,影响测试结果。

(4)测量精度不足。实验过程中,应变片的粘贴和导线布置、焊接等过程操作的微小失误都会对测量结果造成影响,且测试仪器容易受到外界干扰,测量误差相对较大。

6 结论

(1)研究了轴承组几何设计参数对轴承组的影响,并分析了参数对推力轴承组均载率影响的敏感系数:内、外隔圈轴向截面积(58.54%)>轴、座圈的厚度(32.35%)>轴承滚子节圆直径(22.1%)>滚子长度(13.14%)>滚子数量(6.57%)>滚子直径(4.22%)>轴圈和座圈倾斜角(0.38%)。

(2)建立了用于预测轴承组均载率的BP神经网络,并使用Matlab优化工具箱对轴承组进行了优化设计。

(3)对部分实验内容进行了实验验证。从模拟假设、加工精度、安装精度和测量精度四个方面分析了造成实际轴承组均载率测量结果与有限元模拟结果之间差别的原因。

参考文献

- [1] Kaye H E. Thrust bearing: US, 2374820 [P]. 1945-05-01.
- [2] 雷善义,江波,许澍华. 套筒式串联推力轴承组的研究[J]. 橡塑技术与装备, 2003 (29): 1-4.
- [3] 程晓鸣,谈仁年,黄文伟. 串联组合型推力轴承的承载机理[J]. 轴承, 1994 (12): 2-6.
- [4] 郑志坚,潘伶. 基于ANSYS的推力滚子轴承优化及软件的研制[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2009, 37 (4): 547-550.
- [5] 潘伶. 多排均载推力轴承中薄壁圆筒稳定性计算[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2009, 29 (1): 53-55.
- [6] 卢维科,程晓鸣. 基于滚道线接触的串联组合型推力轴承轴圈和座圈的优化设计[J]. 机械科学与技术, 2001, 20 (5): 679-681.
- [7] 程晓鸣,谈仁年. 串联组合型推轴承套圈厚度的计算[J]. 轴承, 1996 (8): 16-19.
- [8] 雷善义,江波,许澍华,等. 套筒式串联推力轴承组应力场的三维有限元分析[J]. 中国塑料, 2004, 18 (2): 84-87.
- [9] 潘伶,张素梅. 多排均载推力轴承实验[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2004, 33 (2): 266-269.
- [10] 江波,刘荣勋,白兰壁,等. 套筒式串联推力轴承组系列产品的开发研制[J]. 塑料, 1995, 24 (4): 35-40.
- [11] 王大力,孙立明,单服兵,等. Ansys在求解轴承接触问题中的应用[J]. 轴承, 2002 (9): 4.
- [12] 刘大鹏,黄云战,吴晓强,等. 基于ANSYS的多排推力轴承受力分析[J]. 机械工程及自动化, 2009 (4): 81-82.