

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.03.005

# 橡胶衬层硬度和厚度对水润滑轴承系统跳动量的影响

周广武<sup>1</sup>, 李俊阳<sup>2</sup>, 裴欣<sup>1</sup>, 张振华<sup>1</sup>

(1. 四川大学 空天科学与工程学院, 成都 610065; 2. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**根据舰船推进装置对水润滑轴承系统的运行精度要求,通过建立水润滑橡胶轴承系统有限元接触模型,研究不同橡胶硬度、厚度对直槽和螺旋槽水润滑橡胶轴承系统跳动量的影响规律,提出水润滑轴承系统跳动量控制方法。研究表明,水润滑橡胶轴承系统跳动量随橡胶硬度增大而减小,随橡胶厚度增大而增大。当橡胶硬度在 85~95 Shore A 时,轴承系统主轴跳动量较小。在保证沟槽尺寸的前提下,尽量设计成较薄的橡胶厚度。相比直槽结构,螺旋槽水润滑橡胶轴承系统跳动量更小。因此,科学合理地设计水润滑橡胶轴承橡胶衬层材料硬度和几何结构,能显著减小轴承系统的跳动量,提高运行精度。

**关键词:**水润滑轴承;橡胶轴承;橡胶硬度;橡胶厚度

**中图分类号:**TH117.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2016)03-037-06

## Effects of rubber liner's hardness and thickness on the runout of the water lubricated rubber bearing system

ZHOU Guangwu<sup>1</sup>, LI Junyang<sup>2</sup>, PEI Xin<sup>1</sup>, ZHANG Zhenhua<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu 610065, P.R.China; 2. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

**Abstract:** For the fact that the ship propeller has a strict requirement for the running accuracy of the water lubricated rubber bearing system (WLRBS), a finite element contact model of the WLRBS was established. The effects of the rubber liner's hardness and thickness on the runout of the WLRBS with straight or spiral grooves were analyzed, and a way of controlling the runout was put forward. The research results indicate that the value of the runout increases with the decrease of the rubber hardness, while increases with the increase of the rubber thickness. And the runout of the shaft is relatively small when the hardness varies between 85~95 shore A. The thickness of rubber should be designed as thin as possible with ensuring the groove dimension. Besides, the runout of the WLRBS with spiral grooves is smaller than that with straight grooves. Therefore, scientific and reasonable design of the geometric structure and the hardness of the rubber liner can significantly reduce the value of the runout and improve the running accuracy.

**Keywords:** water lubricated bearing; rubber bearing; rubber hardness; rubber thickness

收稿日期:2016-05-02

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(106112016CDJZR288802,2014SCU11009,SCU 2015D014)。

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China(106112016CDJZR288802, 2014SCU11009, SCU 2015D014).

作者简介:周广武(1984-),男,四川大学博士,主要从事界面力学、传动摩擦学方向研究,(E-mail)gwzhou@scu.edu.cn。

水润滑橡胶轴承由于具有无污染、高效节能、减振降噪等特点,已广泛应用于船舶、汽轮机、水轮机、水泵等装备<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着科学技术的发展和国防建设的需求,舰船推进装置对水润滑轴承系统的运行精度、振动、转子稳定性等提出了越来越苛刻的性能要求<sup>[3]</sup>。因此,科学合理地设计水润滑橡胶轴承材料和结构,对控制轴承系统的跳动量,提高运行精度,具有重要的科学意义和工程实用价值。

水润滑橡胶轴承通常被设计成多沟槽几何结构,并且内衬为橡胶复合材料,硬度一般在 60~80 Shore A 之间。Cabrera 等<sup>[4]</sup>和 Wang 等<sup>[5-6]</sup>研究表明,即使在相对较低的水膜压力下,橡胶也会发生变形,并且轴在运转过程中与水润滑橡胶轴承发生直接接触。孟凡明<sup>[7]</sup>研究表明,水润滑轴承在一定工况下存在明显的弹性变形。Hirani 等<sup>[8]</sup>指出水润滑轴承处于混合润滑状态。Daugherty 等<sup>[9]</sup>给出了 7 种板条轴承的动摩擦系数-速度特性,结果表明,橡胶衬层厚度越薄,摩擦系数越小。秦红玲等<sup>[10]</sup>等利用 SSB-100 轴承试验台架,研究了橡胶层的厚度、硬度及其交互作用对试块摩擦性能的影响,结果表明,动摩擦系数随橡胶厚度和硬度降低而降低,以橡胶层的厚度最为显著,硬度次之,厚度和硬度的交互作用再次之。Litwin<sup>[11-12]</sup>研究表明,不同结构和材料对水润滑橡胶轴承的水膜压力和轴心轨迹的影响较大,并且指出合理的设计结构和材料可以提升其工作性能。周广武等<sup>[13]</sup>通过对比试验研究了直槽和螺旋槽水润滑橡胶轴承摩擦学性能,结果表明,螺旋槽轴承具有较低的摩擦系数。Pai 等<sup>[14-16]</sup>研究了纵向多沟槽水润滑橡胶轴承润滑性能和动态特性。由于水润滑轴承工况、负载复杂多变,特别是低速重载条件下水润滑橡胶轴承难以形成有效的支承水膜,处于混合润滑甚至干摩擦状态,轴和橡胶衬层的接触行为将导致轴系振动加剧、运转精度下降,严重影响推进装置的工作性能<sup>[17-19]</sup>。

笔者通过建立水润滑橡胶轴承系统有限元接触模型,分别研究不同橡胶硬度、厚度对直槽和螺旋槽水润滑橡胶轴承系统跳动量的影响规律,探讨其作用机理,为进一步开展水润滑橡胶轴承材料和结构优化设计,解决水润滑轴承系统跳动问题、提高传动系统运行精度、降低振动噪声提供科学理论依据。

## 1 橡胶硬度与弹性模量的关系

硬度是硫化橡胶最基本的物理参数,它与弹性模量、定伸应力、撕裂强度等物理性能密切相关。由于硬度测试具有操作简便、成本低和非破坏性等特点,因此,在工程实际中橡胶硬度常常被用于控制橡胶生产工艺、评估水润滑轴承产品质量。高弹性各项同性橡胶的 A 型邵氏硬度值和杨氏弹性模量存在一定的关系,根据国家标准(硫化橡胶或热塑性橡胶硬度的测定 GB/T 6031—1998)中它们之间的关系,绘制出相应的曲线(如图 1 所示)。当橡胶硬度为 0 时,杨氏弹性模量为 0;橡胶硬度为 100 时,杨氏弹性模量为无穷大。

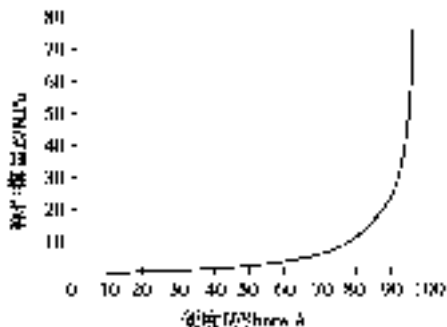


图 1 橡胶硬度和杨氏弹性模量的关系曲线  
Fig.1 Relationship between rubber hardness and Young's elastic modulus

## 2 有限元接触模型

利用 ANSYS Workbench 有限元软件分别建立直槽和螺旋槽水润滑橡胶轴承接触模型,分析轴承的接触力学特性,重点考查给定轴承间隙下,不同橡胶硬度和厚度对水润滑橡胶轴承系统主轴跳动量的影响。轴承系统最大跳动量  $J$  为

$$J = |E_b| + 2 \times \Delta S + |E_j|, \quad (1)$$

式中: $E_b$  为轴承内径上偏差; $\Delta S$  为轴相对轴承的位移量; $E_j$  为轴外径下偏差。

### 2.1 材料参数

水润滑橡胶轴承外壳材料为海军黄铜,密度  $8\,500\text{ kg/m}^3$ ,杨氏弹性模量  $101\text{ GPa}$ ,泊松比  $0.33$ ;衬层材料为橡胶复合材料,密度  $1\,500\text{ kg/m}^3$ ,杨氏弹性模量根据图 1 中的硬度分别取值,泊松比  $0.47$ 。

### 2.2 几何模型

水润滑橡胶轴承几何结构主要参数如图 2 和表 1 所示。

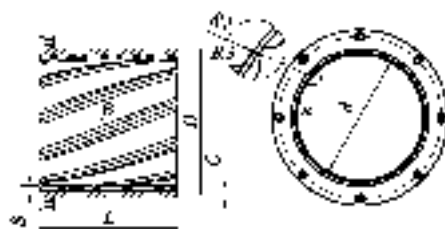


图 2 水润滑橡胶轴承几何结构  
Fig.2 Geometric structure of WLRB

表1 水润滑橡胶轴承几何结构主要参数  
Table 1 Main geometric parameters of WLRB

参数	直槽水润滑橡胶轴承	螺旋槽水润滑橡胶轴承
内径 $d$ /mm	$115 \pm 0.3$	$115 \pm 0.3$
外径 $D$ /mm	136	136
长度 $L$ /mm	126.5	126.5
铜管壁厚 $G$ /mm	5.5	5.5
橡胶厚度 $S$ /mm	5	5
沟槽数量 $n$	10	10
沟槽半径 $R_2$ /mm	2.5	2.5
过渡圆弧半径 $R_3$ /mm	4	4
螺旋角 $\beta/(\circ)$	0	21.44

考虑实际轴承运行间隙和加工误差,取轴承上偏差( $E_b = 0.3$ ),即内径为 115.3 mm,轴外径下偏差( $E_j = -0.022$ ),即 114.978 mm。假设轴与轴承接触,即初始偏心率为 1。水润滑轴承几何模型如图 3 所示。



图3 水润滑橡胶轴承几何模型  
Fig.3 Geometric model of WLRB

### 2.3 网格划分

由于轴和轴承橡胶衬层发生接触,因此,对橡胶衬层和轴进行网格细化。其他部分网格采用稀疏划法,便于加快求解速度。在本案例中,水润滑橡胶轴承网格采用四面体和六面体混合单元,其中直槽水润滑橡胶轴承轴承节点约为 60 万个,单元约为 27 万个;螺旋槽水润滑橡胶轴承节点为约 93 万个,单元约为 39 万个。并且,当网格在此基础上加密 20%后,其计算结果的误差在 1%以内,表明本案例使用的网格合理。

### 2.4 边界条件

水润滑橡胶轴承是通过模压硫化精密成形工艺,将橡胶复合材料粘结在铜管内壁上的,故橡胶衬层与铜管采用绑定边界条件。轴和橡胶衬层工作面的接触边界条件设定为摩擦边界条件,摩擦系数取 0.15。同时,将轴承外圈和法兰内侧固定约束;对主轴圆柱外表面施加 3 130 N(-Y 方向);轴端两侧面施加 X 和 Z 方向的位移约束。

## 3 结果与讨论

### 3.1 仿真结果

直槽水润滑橡胶轴承应力和变形分布如图 4 所示。与轴发生接触的轴承下方橡胶工作面主要承担载荷,整个轴承的应力不大,在橡胶衬层上的最大应力为 0.93 MPa。轴承的变形主要为橡胶工作面的变形。由于轴在 Y 方向上处于自由状态,故主轴在 Y 方向的位移量即可反映轴的跳动量。在本分析案例中,主轴的位移量为 0.132 mm。

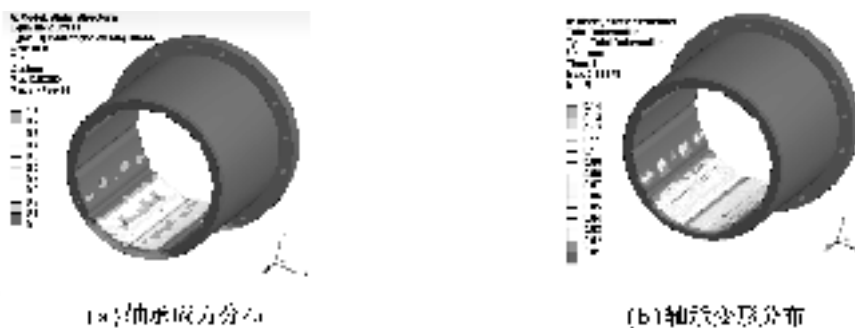


图 4 直槽水润滑橡胶轴承接触特性

Fig.4 Contact behavior of WLRB with straight grooves

螺旋槽水润滑橡胶轴承应力和变形分布如图 5 所示。与主轴发生接触的水润滑橡胶轴承下方橡胶工作面主要承担载荷, 主轴的位移量为 0.066 mm。相比直槽结构, 螺旋槽水润滑橡胶轴承的应力分布更宽, 主轴的位移量相对较小, 大约减小了 49%。因此, 螺旋槽水润滑橡胶轴承接触特性更好。

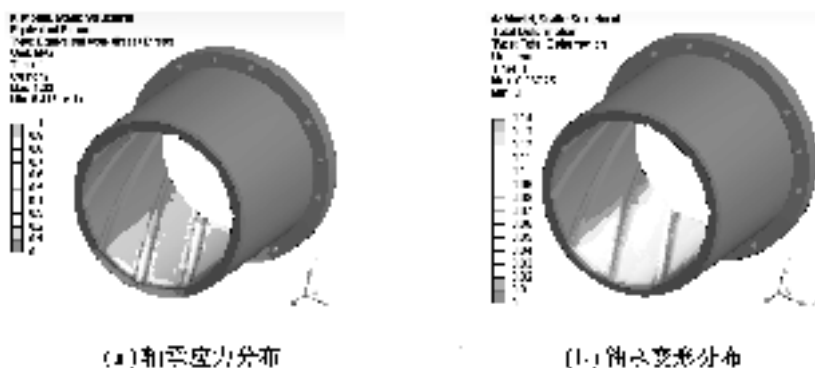


图 5 螺旋槽水润滑橡胶轴承接触特性

Fig.5 Contact behavior of WLRB with spiral grooves

### 3.2 橡胶硬度对轴承系统跳动量的影响

根据图 1 中橡胶硬度与杨氏弹性模量的关系, 研究不同橡胶硬度(与之对应的弹性模量)对水润滑橡胶轴承系统跳动量的影响。图 6 分别给出了不同弹性模量对直槽和螺旋槽水润滑橡胶轴承系统跳动量的影响。从图中可知, 随着橡胶硬度增大即弹性模量增大, 水润滑橡胶轴承系统跳动量显著减小。弹性模量从 5 MPa 增大到 80 MPa, 轴承系统跳动量减小一半以上。当橡胶硬度大于 90 Shore A 即弹性模量大于 24 MPa 时, 水润滑橡胶轴承系统跳动量逐渐趋于平稳。对比图 6(a) 和 (b) 可知, 相比直槽水润滑橡胶轴承, 相同橡胶硬度和厚度的螺旋槽水润滑橡胶轴承系统跳动量更小。因此, 为了控制水润滑轴承系统主轴的跳动量, 在橡胶复合材料配方设计时, 应尽可能地提高硫化橡胶的硬度, 使其硬度在 85~95 Shore A 范围内。

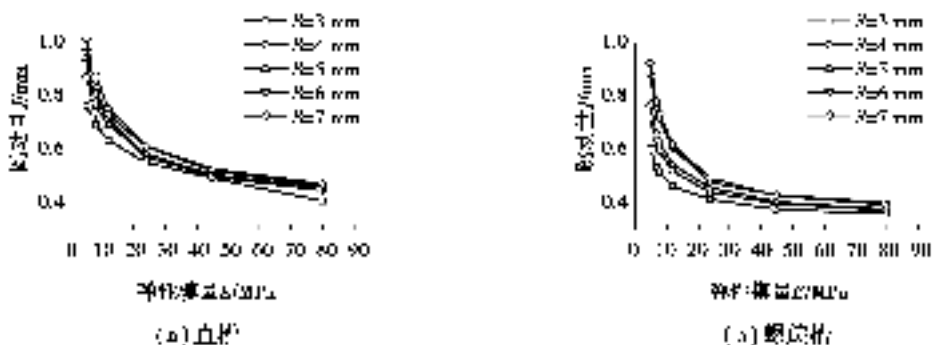


图 6 不同橡胶弹性模量对轴承系统跳动量的影响

Fig.6 Effects of rubber elastic modulus on the runout of the bearing system

### 3.3 橡胶厚度对轴承系统跳动量的影响

图 7 给出了不同厚度对直槽和螺旋槽水润滑橡胶轴承系统跳动量的影响。随着橡胶厚度增加,水润滑橡胶轴承的跳动量逐渐增大。当橡胶材料硬度较小(即弹性模量较小)时,轴承系统跳动量变化随橡胶厚度变化越显著;而橡胶硬度较大时,轴承系统跳动量增大的趋势逐渐变缓。原因是橡胶材料弹性模量越小,橡胶厚度越大,轴承越容易发生变形。为了合理地控制水润滑轴承系统主轴的跳动量,当硫化橡胶硬度低于 90 Shore A 时,应尽量减小橡胶衬层厚度;当硫化橡胶硬度大于 90 Shore A 时,选择合理的橡胶衬层厚度即可。

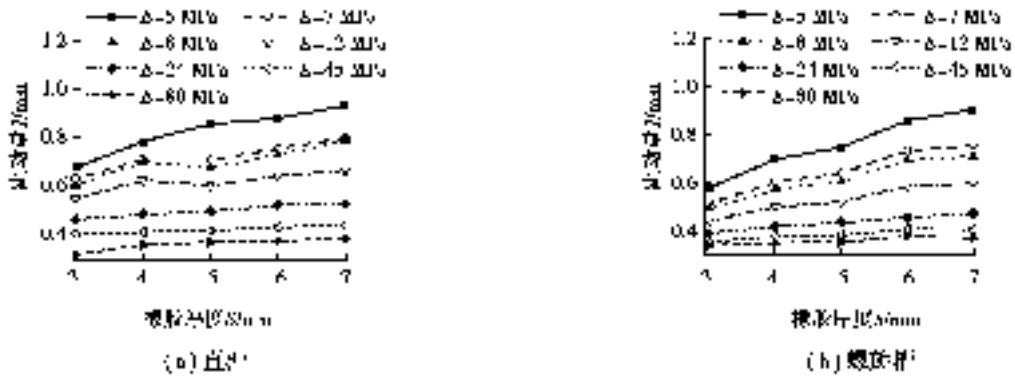


图 7 不同橡胶厚度对轴承系统跳动量的影响

Fig.7 Effects of rubber thickness on the runout of the bearing system

相同橡胶材料,不同橡胶厚度对直槽和螺旋槽水润滑橡胶轴承系统跳动量的影响差别较大(如图 8 所示,橡胶硬度为 90 Shore A)。与直槽相比,螺旋槽水润滑橡胶轴承系统跳动量较小。当橡胶厚度为 3 mm 时,螺旋槽水润滑橡胶轴承系统跳动量减小 27%;当橡胶厚度为 7 mm 时,减小 16%。可见,与直槽相比,橡胶厚度越小,螺旋槽结构的水润滑橡胶轴承跳动量越小。因此,为了控制轴承系统的跳动量,在保证沟槽尺寸的情况下,尽可能设计成厚度较薄的橡胶衬层,并且推荐使用螺旋槽结构。

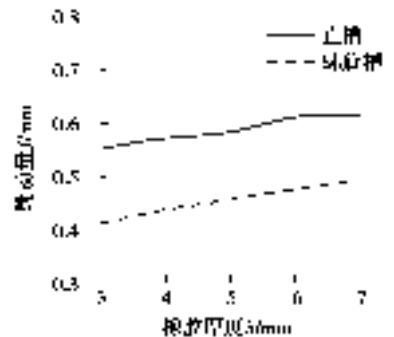


图 8 直槽和螺旋槽水润滑橡胶轴承系统跳动量对比情况

Fig.8 Comparison between the effects of straight and spiral grooves on the runout of the bearing system

## 4 结 论

通过建立水润滑橡胶轴承系统有限元接触模型,着重研究了不同橡胶硬度和厚度对直槽和螺旋槽结构的水润滑橡胶轴承系统跳动量的影响,提出了水润滑轴承系统跳动量控制方法,主要结论如下:

1) 水润滑橡胶轴承系统跳动量随橡胶衬层材料的硬度增大而显著减小。当橡胶硬度在 85~95 Shore A 时,水润滑橡胶轴承系统主轴跳动量较小。

2) 水润滑橡胶轴承的跳动量随橡胶厚度增加而逐渐增大。当橡胶硬度较低时,轴承系统跳动量变化随橡胶厚度越显著;而橡胶硬度较高时,轴承系统跳动量增大的趋势逐渐变缓。为了合理地控制轴承系统跳动量,应尽可能地减小橡胶衬层厚度。

3) 相比直槽结构,由于螺旋槽水润滑橡胶轴承应力分布更宽,主轴跳动量更小,并且相同材料越薄的橡胶衬层厚度,螺旋槽结构水润滑轴承的跳动量越小。

### 参考文献:

[1] 王家序,陈战,秦大同.以水为润滑介质的摩擦副关键问题研究[J].润滑与密封,2001(2):34-36.

WANG Jiayu, CHEN Zhan, QIN Datong. Study on the key problems of water lubricated friction pair[J]. Lubrication

- Engineering, 2001(2):34-36.(in Chinese)
- [2] 段海涛,王学美,吴伊敏,等.水润滑轴承研究进展[J].润滑与密封,2012,37(9):109-116.  
DUAN Haitao, WANG Xuemei, WU Yimin, et al. Present research status of water lubricated bearings[J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(9): 109-116.(in Chinese)
- [3] 高宜朋,曾凡明,张晓锋.吊舱推进器在舰船推进系统中的发展现状及关键技术分析[J].中国舰船研究,2011,6(1):90-96.  
GAO Yipeng, ZENG Fanming, ZHANG Xiaofeng. Recent research on podded propulsor and analysis of key technologies for naval vessels[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2011, 6(1):90-96.(in Chinese)
- [4] Cabrera D L, Woolley N H, Allanson D R, et al. Film pressure distribution in water-lubricated rubber journal bearings[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2005, 219(2): 125-132.
- [5] Wang N, Meng Q F, Wang P P, et al. Experimental research on film pressure distribution of water-lubricated rubber bearing with multiaxial grooves[J]. Journal of Fluids Engineering, 2013, 135(8): 084501-1—084501-6.
- [6] Geng T, Meng Q F, Wang N, et al. Experimental investigation of film pressure distribution in water-lubricated rubber journal bearings[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2014, 228(4): 397-406.
- [7] 孟凡明.水润滑轴承系统三维热弹流性能有限元分析[J].重庆大学学报,2013,36(2):121-126.  
MENG Fanming. Three-dimensional finite element analysis for thermo-elasto-hydrodynamic performances for a water lubricated bearing system[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2013, 36(2):121-126.(in Chinese)
- [8] Hirani H, Verma M. Tribological study of elastomeric bearings for marine propeller shaft system [J]. Tribology International, 2009, 42(2): 378-390.
- [9] Daugherty T L, Sides N T. Frictional characteristics of water-lubricated compliant surface stave bearing [J]. ASLE Transactions, 1981, 24(3): 293-301.
- [10] 秦红玲,周新聪,闫志敏,等.尾轴承橡胶层厚度和硬度及其交互作用对摩擦性能的影响[J].兵工学报,2013,34(3):318-323.  
QING Hongling, ZHOU Xincong, YAN Zhimin, et al. Effect of thickness and hardness and their interaction of rubber layer of stern bearing on the friction performance[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(3): 318-323.(in Chinese)
- [11] Litwin W. Experimental research on water lubricated three layer sliding bearing with lubrication grooves in the upper part of the bush and its comparison with a rubber bearing[J]. Tribology International, 2015, 82: 153-161.
- [12] Litwin W. Properties comparison of rubber and three layer PTFE-NBR-bronze water lubricated bearings with lubricating grooves along entire bush circumference based on experimental tests[J]. Tribology International, 2015, 90: 404-411.
- [13] 周广武,王家序,李俊阳,等.螺旋槽水润滑橡胶合金轴承摩擦学性能实验[J].重庆大学学报,2013,36(3):1-5.  
ZHOU Guangwu, WANG Jiayu, LI Junyang, et al. Experimental investigation of tribological properties for spiral groove water lubricated rubber bearings[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2013, 36(3): 1-5.(in Chinese)
- [14] Pai R S, Pai R. Stability of four-axial and six-axial grooved water-lubricated journal bearings under dynamic load[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2008, 222(5): 683-691.
- [15] Pai R S, Pai R. Non-linear transient analysis of multiple axial groove water-lubricated journal bearings[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2008, 222(4): 549-557.
- [16] Mallya R, Shenoy S B, Pai R. Steady state characteristics of misaligned multiple axial groove water-lubricated journal bearing[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2015, 229(6):712-722.
- [17] Peng E G, Liu Z L, Zhang S D, et al. Analysis on vibration & noise mechanism of marine rubber stern tube bearings[J]. International Journal of Advancements in Computing Technology, 2012, 4(15): 395-403.
- [18] Peng E G, Liu Z L, Zhou X C, et al. Study on nonlinear friction-induced vibration in water-lubricated rubber stern tube bearings[J]. The Open Mechanical Engineering Journal, 2012, 6: 140-147.
- [19] Zhang Z G, Zhang Z Y, Huang X X, et al. Stability and transient dynamics of a propeller-shaft system as induced by nonlinear friction acting on bearing-shaft contact interface [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(12): 2608-2630.