DOI : 10.3901/JME.2019.19.051

表面波纹度对滑动轴承转子系统稳定性的影响*

李 冰^{1,2} 周德俭^{1,3} 徐武彬² 张一磊²

(1. 西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071;

2. 广西科技大学机械工程学院 柳州 545006;

3. 桂林电子科技大学机电工程学院 桂林 541004)

摘要：为揭示表面波纹度对滑动轴承转子系统稳定性的影响，建立了考虑表面波纹度的滑动轴承转子系统动力学模型，提出其非线性动力学分析、计算方法，表征出周向表面波纹、轴向表面波纹以及组合表面波纹等不同形式的表面波纹度对系统稳定性等系统特性的影响。研究结果表明，表面波纹度的存在会使系统油膜产生波动，增加系统的能量损失，特别是当 Sommerfeld 数 $S < 0.2$ 时，表面波纹度对系统能量损失的影响最明显。但它的存在并非都有害，表面波纹度误差的存在会在一定程度上有利于滑动轴承转子系统稳定性及承载特性，且随着波纹幅值的增高，其促进的作用越明显。此外，不同形式表面波纹度对系统特性的影响程度也不同，轴向表面波纹度对系统承载能力的促进作用比周向表面波纹度及组合表面波纹更大，而周向表面波纹度则对系统稳定性及能量损失性的影响作用更明显。当 Sommerfeld 数 $S > 0.5$ 时，轴向表面波纹度对稳定性的影响较小。

关键词：表面波纹度；滑动轴承转子系统；稳定性；承载能力

中图分类号：TG156

Effect of Surface Waviness on Stability of Hydrodynamic Journal Bearing Systems

LI Bing^{1,2} ZHOU Dejian^{1,3} XU Wubin² ZHANG Yilei²

(1. School of Mechano-electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071;

2. College of Mechanical Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004)

Abstract : To reveal the effect of surface waviness on the stability of hydrodynamic journal bearing systems, a dynamic model of hydrodynamic journal bearing system with the surface waviness error is established. The nonlinear dynamic analysis and calculation method of the hydrodynamic journal bearing systems with the surface waviness is proposed, the effects of different forms of surface waviness such as circumferential surface waviness, axial surface waviness and combined surface waviness on the stability of the system are investigated. The result shows that the existence of the surface waviness makes the oil film of system to wave and increases the energy loss of the system. Especially, when $S < 0.2$, the effect of surface waviness on the energy loss of the system is most obvious. However, the existence of the surface waviness is not all harmful. The surface waviness will promote the stability and the bearing capacity of the system in a certain extent. The greater the corrugation amplitude of surface waveness is, the more obvious the influence level is. Moreover, different forms of surface waviness affect the system characteristics differently. The axial surface waviness promotes the bearing capacity of the system more than the circumferential surface waviness and combined surface waviness. However, the circumferential surface waviness has a more pronounced effect on system stability and energy loss. When $S > 0.5$ axial surface waviness has less effect on stability, but it has an adverse effect on the energy loss of the system. When S at 0.06-0.20, the effect of surface waviness on the energy loss of the system is most obvious; the greater the corrugation amplitude is, the more obvious the influence level is. Moreover, the axial surface waviness promotes the bearing capacity of the system more than the circumferential surface waviness and combined surface waviness. however, the circumferential surface waviness has a more pronounced effect on system stability and energy loss. When $S > 0.5$ axial surface waviness has less effect on stability.

* 广西自然科学基金(2018GXNSFBA281195)、广西科技计划(AC16380032)和柳州科学研究技术开发(2016C050202, 2017BC20201)资助项目。
20181015 收到初稿, 20190404 收到修改稿

Key words : surface waviness ; hydrodynamic journal bearing systems ; stability ; bearing capacity

0 前言

滑动轴承转子系统作为机械设备的重要基础部件广泛用于旋转机械中,其稳定性直接影响着旋转机械的安全性,因而成为旋转机械研究领域所关注的重要问题。围绕滑动轴承转子系统稳定性的研究已取得了一系列的进展,但所开展的研究大都将系统参数及加工表面理想化,以这些参数的名义值分析,忽略形状误差的影响。虽然制造技术的不断提升使加工精度明显提高,但由于机床加工精度、夹具定位精度及加工振动等因素地影响,滑动轴承不可避免地存在表面波纹度等形状误差。此外,在轴承使用过程中,磨损等因素也会扩大表面波纹度形状误差。对于工作在高速、高精、重载化、小型化的滑动轴承转子系统而言,表面波纹度等形状误差的存在必然会使滑动轴承间隙发生改变,进而对系统的性能产生影响。早在 1977 年,RADFORD 等^[1]针对波瓣形状轴颈所开展的试验研究便已表明在一定的操作速度和负载的范围内使用,形状误差不但没有害处反而在一定程度上有利于轴承的性能。随后,围绕表面波纹度形状误差对滑动轴承转子系统性能影响的研究逐渐展开。HARGREAVES^[2]的研究表明,表面波纹度形状误差可以增强滑动轴承承载能力。RASHEED^[3]则分析了轴瓦表面波纹度对滑动轴承承载能力及摩擦力的影响。ENE 等^[4]通过试验及数值分析开展了波幅和供油压力对流体动力三波轴颈轴承动态特性的影响分析。向建华等^[5]将系统形状误差考虑为椭圆形和齿形波纹,研究形状误差对润滑性能、轴心轨迹的影响。康锋等^[6]对薄壁轴承转子系统的非线性动力学特性进行的数值仿真分析表明,波纹度和不平衡力是影响系统非线性特性的重要因素。黄昱舒等^[7]开展了波纹度、粗糙度对轴瓦摩擦副润滑状态和轴瓦表面支承状态的影响分析。王涛等^[8]以轧机油膜轴承为研究对象指出,表面波纹度对轧机油膜轴承润滑性能的影响不可忽略,并且是不利的。WANG 等^[9-10]的研究指出轴承表面波纹度对空气静压轴承性能存在明显影响。CUI 等^[11]开展了表面波纹度振幅和波长对轴承油膜压力,载荷能力和刚度的影响分析,得出通过增加特定形位误差的幅度可以提高轴承负载能力和刚度的结论。

然而,已开展的关于表面波纹度对轴承转子系统影响的研究,更集中于润滑特性,承载特性。对

表面波纹度对轴承转子系统稳定性研究以及轴向、周向等不同形式表面波纹度对系统影响的对比分析等研究仍未展开,为全面了解表面波纹度对滑动轴承转子系统性能的影响,本文建立了考虑表面波纹度的滑动轴承转子系统动力学模型,提出其非线性动力学分析、计算方法,表征出周向表面波纹、轴向表面波纹以及组合表面波纹等不同形式的表面波纹度对系统稳定性等特性的影响。

1 油膜力模型及计算方法

1.1 表面波纹度误差的描述

任何机械加工方法获得的加工表面,实际上都不可能是绝对理想的表面。根据轴承表面质量表现的形式和影响产品质量的不同,国家标准把轴承表面分为宏观表面几何形状误差(圆度、圆柱度等)、中间表面形状误差(表面波纹度)和微观表面形状误差(粗糙度)^[12],如图 1 所示。为更形象描述滑动轴承工作表面,通常用表面轮廓波形中的峰谷波长 λ 与峰值 H 的比值来划分 $\lambda/H > 1\ 000$ 称为宏观表面几何形状误差(圆度、圆柱度等); $\lambda/H < 40$ 称微观表面形状误差(粗糙度);介于两者之间称中间表面形状误差(表面波纹度)。

图 1 机械加工表面外轮廓

国家标准 GB/T3505—2000 评定滑动轴承表面波纹包含周向表面波纹、轴向表面波纹两类。表面波纹度采用平均波幅参数表示,轴向表面波纹度指在基本长度 l 内波度曲线上 5 个最大波幅的平均值;周向表面波纹度是指同一横截面波度曲线上 5 个最大波幅的平均值。波幅值是以最小区域圆中心的相邻峰谷的半径差判断。

1.2 系统动力学模型

由于楔形原理及液体的压黏效应,形成了滑动轴承的油膜压力,滑动轴承正是通过该油膜压力的变化来工作的。为确定油膜压力的变化,描述滑动轴承的动力学特性及系统稳定性,可通过力平衡和

$D_j=49.6$ mm, 半径间隙 $c=0.2$ mm。

图4 考虑三种不同形式的表面波纹度后油膜厚度变化图

图4中表明, 表面波纹度误差的存在影响着滑动轴承转子系统油膜厚度的分布, 油膜厚度呈现明显波动现象, 且随着波纹幅值增高波动程度越明显。同时, 表面波纹度误差的存在也对油膜压力产生影响, 系统最小油膜厚度减小, 最大油膜压力增大, 进而影响着系统的动力学特性。

只考虑周向表面波纹度时, 波纹度误差会使得周向油膜厚度呈现出波动现象, 而对轴向油膜厚度

的影响不明显; 同时, 使得周向压力振荡明显, 而对轴向油膜压力的影响较小。只考虑轴向表面波纹度时, 波纹度误差会使轴向油膜厚度呈现出波动现象, 而对周向油膜厚度的影响不明显; 此时, 表面波纹度会使轴向压力振荡明显, 而对周向油膜压力的影响较小。当同时考虑周向、轴向波纹度的组合时, 组合表面波纹度的存在会使周向和轴向均呈现出波动现象, 也使得周向及轴向的油膜压力呈现出振荡特性, 如图5所示。

图5 考虑三种不同形式的表面波纹度后油膜压力变化图

2.2 表面波纹度对系统承载能力的影响

如图2所示,当转子运行到稳定状态后,出现水平方向油膜力 $F_{bx}=0$ 时,竖直方向的油膜力 F_{by} 即表征了轴承的承载力。为表征表面波纹度对转子系统承载能力的影响,本文根据式(6)所示的量纲一参数 Sommerfeld 数 S ,建立了系统结构参数与系统动力学特性的关系

$$s = \mu NLD(r_j/c)^2 / F \quad (6)$$

式中, F 为轴承载荷,稳定状态时即为 F_{by0} 。

图6给出了考虑不同形式表面波纹度时,量纲一参数 Sommerfeld 数 S 与偏心率的关系曲线,横坐标表示 Sommerfeld 数 S ,纵坐标表示偏心率,表征出不同形式表面波纹度对系统承载能力的影响。图6a表示具有不同波纹幅值的周向表面波纹度对系统承载能力的影响,图6b表示具有不同波纹幅值的轴向表面波纹度对系统承载能力的影响,图6c表示具有不同波纹幅值的周向、轴向表面波纹度组合时,组合表面波纹度对系统承载能力的影响。图6d表示固定波纹幅值 $A=16$ 时,不同形式表面波纹度对系统承载能力影响的对比。

图6 表面波纹度对系统承载能力的影响

图6a~6c显示,不论是只考虑周向表面波纹度,或者只考虑轴向表面波纹度,还是同时考虑周向、轴向波纹度的组合表面波纹度,具有表面波纹度误差的轴承系统较之理想圆的轴承系统,其量纲一参数 Sommerfeld 数 S 逐渐向下偏移,且波纹幅值越高偏移程度越明显。结果表明,表面波纹度误差的存在对滑动轴承转子系统承载能力起着促进作用,且随着波纹幅值增高影响程度越明显。

图6d则进一步显示出周向表面波纹度、轴向表面波纹度、周向及轴向的组合表面波纹度对承载能力促进程度的对比,结果表明,轴向表面波纹对系统承载能力的促进作用比周向表面波纹度及组合表面波纹更大。

2.3 表面波纹度对系统稳定性的影响

为进一步描述表面波纹度对滑动轴承转子系统稳定性的影响,本文引入量纲一稳定运行参数 $O_p^{[17-18]}$,如式(7)所示,建立考虑表面波纹度时,基于 Sommerfeld 数 S 的滑动轴承转子系统稳定性分析模型,分析结果用基于 Sommerfeld 数 S 的系统稳定性临界曲线表征。

$$O_p = F / mc\omega^2 \quad (7)$$

式中, F 为轴承载荷; m 为转子质量; ω 为转子角速度。

图 7 给出了考虑表面波纹度时, 量纲一参数 Sommerfeld 数 S 与量纲一稳定运行参数 O_p 的关系曲线, 表征出表面波纹度对系统稳定性的影响。图 7a 表示具有不同波纹幅值的周向、轴向表面波纹度组合时, 组合表面波纹度对系统稳定性的影响。图 7b 表示固定波纹幅值 $A=16$ 时, 不同形式表面波纹度对系统稳定性影响的对比。

图 7 表面波纹度对系统稳定性的影响

图 7a 显示具有表面波纹度的轴承系统较之理想的圆轴承系统, 其稳定性临界曲线随着表面波纹度幅值的增大而逐步向下偏移, 说明系统临界转速逐渐增大。图 7 说明, 不论哪类表面波纹度误差的存在, 均对系统稳定性起着促进作用, 且随着波纹幅值的增高, 对系统的稳定性的促进作用则越明显。

图 7b 则进一步显示出周向表面波纹度、轴向表面波纹度、周向及轴向的组合表面波纹度对稳定性促进程度的对比, 结果表明, 周向表面波纹度对系统

稳定性的促进作用比轴向和组合表面波纹度更明显。同时, 分析结果也表明, 当 Sommerfeld 数 $S > 0.5$ 时, 轴向表面波纹度对稳定性的影响较小, 甚至可以忽略, 因而, 为获得较好稳定性, 系统设计时可据此进行参数和形状误差的合理选择。

2.4 表面波纹度对系统能量损失的影响

在转子系统运行过程中, 由于轴颈与油膜之间的相对运动, 必然产生摩擦力, 从而存在能量损失, 滑动轴承转子系统的能量损失会影响着系统结构的合理性和稳定性。本文根据文献[19]提出的摩擦功率损耗表达式(8), 进行了表面波纹度对系统能量损失影响的表征

$$P = F_f U_t = 2\pi r_j \mu L U_t^2 / c \sqrt{1 - \varepsilon^2} \quad (8)$$

式中, F_f 为摩擦力; U_t 为表面切向速度。

分析结果如图 8 所示, 图中横坐标表示 Sommerfeld 数 S , 纵坐标表示系统摩擦功率损耗 P 。图 8a 表示具有不同波纹幅值的周向、轴向表面波纹度组合时, 组合表面波纹度对系统能量损失的影响。图 8b 表示固定波纹幅值 $A=16$ 时, 不同形式表面波纹度对系统能量损失影响的对比。

图 8 表面波纹度对滑动轴承系统能量损失的影响

图 8a 显示,具有表面波纹度误差的轴承系统较之理想圆轴承系统,其摩擦功率损耗曲线向上偏移,且随着表面波纹度幅值的增大而越向上偏,说明此时系统摩擦功率损耗增大。图 8 表明,表面波纹度的存在会增大系统能量损失,波纹幅值越大则系统能量损失越明显。此外也表明,当量纲一参数 Sommerfeld 数 $S < 0.2$ 时,表面波纹度对系统能量损失的影响最明显。

图 8b 则进一步显示出周向表面波纹度、轴向表面波纹度、周向及轴向的组合表面波纹度对承载能力促进程度的对比,结果表明,不论哪类表面波纹度误差的存在,均会增大系统能量损失,其中周向表面波纹的影响较轴向和组合表面波纹更明显。

3 试验研究

为了进一步验证理论分析方法,揭示表面波纹度对滑动轴承转子系统稳定性的影响,本文基于所建构的轴承转子试验系统,采用刮研方式制备了具有表面波纹度误差的轴瓦,开展了相关试验研究。

3.1 试验系统组成

轴承转子试验系统由试验台机械本体、驱动控制系统、供油系统、测试系统以及基础平台等部分组成。试验台机械本体由一个刚性的转子运行在两个对称的轴承座中,配置配重装置后,固定在一个厚度为 10 mm 的钢制底座上。转子由电动机通过皮带轮进行驱动,转子与皮带轮的连接采用柔性万向联轴器以保证转子自由振动。电动机通过变频调速可实现 0~3 000 r/min 的无级调速,通过皮带变速后,使转子的变速范围达到 0~6 000 r/min。通过与联轴器连接的扭矩转速测量仪也可以实时测量转速大小。整个试验台机械本体通过四个可调节平衡脚安装在一个 1 250 mm×1 050 mm×600 mm 的混凝土基础上,高刚度的支撑、带有一定阻尼的基础可控制其他振动的干扰。安装电动机的电动机座与机械本体的底座分离,能有效减弱电动机振动对转子运行的影响。轴承的供油系统中,供油油箱安装有加热器和冷却器用于调节润滑油的温度,从而控制润滑油的黏度。检测系统采用 NI CompactDAQ 数据采集及 LabVIEW 数据分析系统,传感器采用已校准的 9 个高性能电涡流位移传感器、2 个热电偶温度传感器,用于检测转子振动、速度以及供油箱润滑油温度及轴瓦出油口润滑油温。试验所用润滑油 Shell-15(运行温度 24.3℃,黏度 $\mu=21.5$ mPa·s),试验系统如图 9 所示。

图 9 试验系统

3.2 试验轴瓦的制备

参考文献[7]指出,从刮研的实质分析,刮研工艺可刮削出合理的波纹度,因而本文采用刮研方式制备了 2 套 4 个具有表面波纹度误差的轴瓦,装配在具有较高轴颈加工精度的轴承转子试验台上。为更贴合理论分析模型,刮削出具有平滑微凸体峰顶曲率半径的圆滑波纹,本文采用蛇头刮刀进行刮研,根据理论分析时的波长和波高控制刮痕间距和刮削量,尽量控制波纹幅值 $A=25$ μm ,轴向波长 $\delta=0.01$ m 及周向波长 $\lambda=0.01$ m。

3.3 试验结果分析

在试验时可改变转子的质量,因而转子系统可以在稳定性临界曲线的不同位置运行,可以用文献[18]介绍的方法判定每个转子轴承系统的稳定临界转速,试验分析的结果与理论分析的结果如图 10 所示。图 10 表示出在稳定性临界曲线图中,表面波纹

图 10 实测的稳定性临界点与理论分析结果的对比

度对系统稳定临界转速的影响,也显示了较理论结果与试验结果的对比。图中可以看出,具有表面波纹度误差后,稳定运行参数减小,与理论计算的结果具有良好的一致性,验证了本文的理论分析方法,也验证了表面波纹度对系统的稳定性的促进作用。

4 结 论

滑动轴承转子系统由于制造精度的限制,其表面不可避免地存在波纹度等形状误差,虽然直觉告诉人们少量的、微观的形位误差不会对滑动轴承转子系统产生重大影响,但系统的理论和试验研究能够帮助人们更好地理解 and 判断形位误差对滑动轴承转子系统的影响。为此,本文开展了表面波纹度对系统稳定性等特性影响的理论及试验研究,根据研究结果可以得出以下结论。

(1) 表面波纹度的存在并非均有害,其在一定程度上有利于滑动轴承转子系统稳定性,且随着波纹幅值的增高,对系统的稳定性的促进作用越明显。但表面波纹度却会增大系统的能量损失,当 Sommerfeld 数 $S < 0.2$ 时,表面波纹度对系统能量损失地影响更明显,设计过程需要综合考虑参数选择,使系统避开此工作区域,在促进系统稳定性的同时弱化表面波纹度对系统能量损失的影响。

(2) 表面波纹度会影响滑动轴承转子系统油膜厚度的分布及油膜压力大小。表面波纹度的存在使油膜厚度呈现明显波动现象,且随着波纹幅值增高波动程度越明显,系统最小油膜厚度减小,最大油膜压力增大。

(3) 表面波纹度的存在有利于滑动轴承转子系统的承载特性。波纹幅值越大,表面波纹度对系统承载特性的影响越明显。

(4) 不同形式表面波纹度对系统特性的影响程度不同。轴向表面波纹度较之周向及组合表面波纹度而言,对系统承载能力更有利。而周向表面波纹度则对系统稳定性及能量损失性的影响作用更明显。当 Sommerfeld 数 $S > 0.5$ 时,轴向表面波纹度对稳定性的影响较小。本文的研究结果可帮助工程技术人员在设计阶段合理地进行形位误差设计,使系统尽量运行在受表面波纹度影响最小的区域。

参 考 文 献

- [1] RADFORD A, FITZGEORGE D. The effects of journal lobbing on the performance of a hydrodynamic plain journal bearing[J]. Wear, 1977, 45(3): 311-322.
- [2] HARGREAVES D J. Surface waviness effects on the load-carrying capacity of rectangular slider bearings[J]. Wear, 1991, 145(1): 137-151.
- [3] RASHEED H E. Effect of surface waviness on the hydrodynamic lubrication of a plain cylindrical sliding element bearing[J]. Wear, 1998, 223(1-2): 1-6.
- [4] ENE N M, DIMOFTE, KEITH T G. A stability analysis for a hydrodynamic three-wave journal bearing[J]. Tribology International, 2008, 41(5): 434-442.
- [5] 向建华, 邹林峰, 廖日东. 轴颈圆度误差对滑动轴承润滑性能的影响研究[J]. 北京理工大学学报, 2012(12): 1241-6.
XIANG Jianhua, ZOU Linfeng, LIAO Ridong. Influence of circularity errors of the lubrication performance of sliding bearings[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012(12): 1241-1246.
- [6] 康锋, 张耀强, 杨茹萍, 等. 考虑波纹度和不平衡力的薄壁轴承-转子系统非线性分析[J]. 轴承, 2016(6): 1-5.
KANG Feng, ZHANG Yaoqiang, YANG Ruping, et al. Nonlinear analysis of thin-walled bearing-rotor system considering waviness and unbalanced force[J]. Bearing, 2016(6): 1-5.
- [7] 黄旻舒, 李桂芳. 滑动轴颈轴承表面形貌的摩擦学研究[J]. 森林工程, 2004(1): 36-39.
HUANG Minshu, LI Guifang. Study on tribology of scraping surface topography of sliding bearing[J]. Forest Engineering, 2004(1): 36-39.
- [8] 王涛, 王优强, 王建, 等. 表面波纹度对油水两相润滑轧机油膜轴承弹流润滑的影响[J]. 润滑与密封, 2016(11): 45-49.
WANG Tao, WANG Youqiang, WANG Jian, et al. Effect of surface waviness on elastohydrodynamic lubrication of oil-water two-phase lubricated rolling mill oil film bearings[J]. Lubrication and Sealing, 2016(11): 45-49.
- [9] WANG Xinkuan, XU Qiao, HUANG Ming, et al. Effects of journal rotation and surface waviness on the dynamic performance of aerostatic journal bearings[J]. Tribology International, 2017(112): 1-9.
- [10] WANG Xinkuan, XU Qiao, WANG Baorui, et al. Effect of surface waviness on the static performance of aerostatic journal bearings[J]. Tribology International, 2016(103): 394-405.
- [11] CUI Hailong, WANG Yang, YUE Xiaobin, et al. Effects of manufacturing errors on the static characteristics of aerostatic journal bearings with porous restrictor[J]. Tribology International, 2017(115): 246-260.
- [12] 几何量实用测试手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
Practical test manual for geometric quantity[M]. Beijing: China Machine Press, 1985.

- [13] OGRODNIK P J. Operation of rotor-bearing systems subjected to dynamic conical misalignment[D]. Staffordshire, UK : Staffordshire University, 1989.
- [14] XU Wubin. The effect of manufacturing tolerances on the steady state and dynamic performance of rotating machines supported by journal bearings[D]. Staffordshire University, 2010.
- [15] 徐武彬, 王镇江, 陈其兵, 等. 基于 Sommerfeld 数的滑动轴承转子系统稳定性分析[J]. 中国机械工程, 2009(23): 2875-2879.
- XU Wubin, WANG Zhenjiang, CHEN Qibing, et al. Stability analysis of hydrodynamic journal bearing system based on sommerfeld number[J]. China Mechanical Engineering, 2009(23): 2875-2879.
- [16] GOODWIN M J. Dynamics of rotor-bearing systems[D]. London: Unwin Hyman, 1989.
- [17] XU Wubin, OGRODNIK P J, LI Bing, et al. Effect of journal out-of-roundness on stability of a symmetric hydrodynamic journal bearing system. Part 1: Theoretical analysis[J]. Journal of Engineering Tribology Part J, Journal of Engineering Tribology, 2015, 229: 1347-1358.
- [18] XU Wubin, OGRODNIK P J, LI Bing, et al. Effect of journal out-of-roundness on stability of a symmetric hydrodynamic journal bearing system. Part 2: Experimental investigation[J]. Journal of Engineering Tribology Part J, Journal of Engineering Tribology, 2015, 229(11): 1359-1371.
- [19] 陈存祖. 关于油浸径向滑动轴承摩擦功率计算问题的探讨[J]. 南昌水专学报, 1988(1): 17-23.
- CHEN Cunzu. Discussion on the calculation of friction power of oil-immersed journal bearing[J]. Journal of Nanchang Water University, 1988(1): 17-23.
-
- 作者简介: 李冰, 女, 1978 年出生, 博士研究生。主要研究方向机械结构与系统动力学。
E-mail: gxxyjxxlb@163.com
- 周德俭(通信作者), 男, 1954 年出生, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向为微电子指正及其 SMT、制造业信息化等。
E-mail: emezdj@guet.edu.cn