

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.08.013

柴油机滑动轴承磨损试验系统的开发与研制*

李建锋¹, 刘震涛^{2*}, 杨建法¹

(1. 潍柴动力股份有限公司 杭州分公司, 浙江 杭州 310030;

2. 浙江大学 能源工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对柴油机轴瓦磨损问题, 为了研究滑动轴承磨损影响机理且由于现有设备无法满足试验要求, 开发研制了一套滑动轴承磨损试验系统。利用该系统可进行主轴瓦和连杆瓦两种滑动轴承在结构、转速、载荷、磨粒、润滑油状态不同条件下磨损状态的模拟试验研究。在完成试验方法研究的基础上, 着重介绍了该试验系统的液压模块、机械承载模块、润滑模块、试验控制模块等子系统的开发设计。该系统采用液压伺服的加载方式对模拟轴进行了拉压加载, 采用变频器控制驱动电机转速, 润滑油的压力及温度可以自由调节, 并利用基于美国NI公司的LabVIEW环境的软件实现了对试验系统的自动控制以及试验数据实时显示和存储, 实现了不同工况下的轴瓦磨损的模拟试验。研究表明, 该试验系统可以实现试验功能, 具有良好的试验性能, 达到了试验系统开发的预期目标。

关键词: 柴油机; 滑动轴承; 磨损

中图分类号: TH871.6; TH133.3 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)08-1022-05

Development of diesel engine sliding bearing wear test system

LI Jian-feng¹, LIU Zhen-tao², YANG Jian-fa¹

(1. Hangzhou branch, Weichai Power Co., Ltd., Hangzhou 310030, China;

2. Department of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problems of bearing shell wear, in order to study the influence mechanism of sliding bearing wear, one sliding bearing wear test system was developed because existing equipment can't satisfy test requirement. The engine bearing such as main bearing shell and connecting rod bearing shell wear properties could be tested by this test system, under different structure, different rotating speeds, different lubricating oil condition, different abrasive particle and loads. The five subsystems as lubricating system, test control system, hydraulic system, mechanical bearing system and control system were introduced based on the study of test method. The load on analog axis was applied by hydraulic system. The motor speed was controlled by VFD. Lubricating oil pressure and temperature could be adjusted freely. The automation control of the test system, displaying in real time for the test data and the collection and preservation was achieved by the LabVIEW software. The wear test under different working conditions was achieved in the test system. The results indicated that the test system of which the function can be realized, and has a good performance and reached the expect goal.

Key words: diesel engine; sliding bearing; wear

0 引言

汽车柴油机中主轴瓦和连杆瓦是重要滑动轴承, 其工作条件恶劣, 它主要承受复杂的弯曲、扭转疲劳

载荷以及周期性冲击载荷^[1-4]。如果使用不当极易造成滑动轴承的早期磨损和破坏, 从而使发动机工作振动大, 噪声升高, 油耗增加, 事故增多。滑动轴承发生损坏的形式有磨粒磨损、刮伤、胶合(咬合)、拉毛、穴蚀、电蚀、疲劳剥落和腐蚀等^[5]。其中, 磨损是一种最

收稿日期: 2014-05-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划("863"计划)资助项目(2012AA111709)

作者简介: 李建锋(1977-), 男, 浙江余姚人, 主要从事发动机零部件可靠性方面的研究. E-mail: lijf@weichai.com

通信联系人: 刘震涛, 男, 副教授, 硕士生导师. E-mail: liuzt@zju.edu.cn

常见的失效形式,因此有必要对发动机滑动轴承的磨损机理进行研究,从而改善磨损产生的条件,降低化瓦问题的产生。

本研究针对柴油机轴瓦磨损问题,开发研制一套滑动轴承磨损试验系统。

1 试验方法对比

滑动轴承的磨损不仅与承受的载荷相关,更和润滑油的压力、温度及轴的转速有直接影响。现有的滑动轴承磨损试验研究,除了发动机整机试验外主要是采用万能摩擦磨损试验机对曲轴主轴颈-主轴瓦材料配副磨合磨损试验,其试验条件与实际相差大,不能真实反映发动机实际工作中的磨损情况。各试验方法特点对比如表1所示。

表1 滑动轴承磨损试验方法对比

分类	材料试验	零部件模拟试验	发动机试验
试验对象	零部件实物取样	零部件实物	整机或整车
试验设备	万能材料摩擦磨损试验机	专用设备	发动机台架或整车试验
工况	理想工况	接近实际工况	实际工况
优缺点	周期短、条件易控制、数据重复性、可比性强。结果与实际情况脱节较大。	周期短、条件可控、数据重复性、可比性较强。结果与实际情况较符合。	周期长、设备多且复杂、成本较高。在实际使用条件下进行,数据可靠真实。

目前,对滑动轴承的研究大多在于理论仿真计算^[6-7],试验研究在研究材料摩擦方面较多,全尺寸滑动轴承零部件模拟实验较少。仅有的一些滑动轴承实验装置的开发主要用于研究油膜压力因素存在的条件^[8-9],或者是空穴机理研究^[10],其加载方式不能满足模拟发动机滑动轴承所受的周期性拉压载荷。

为此,笔者研制开发滑动轴承磨损试验系统,用于适合发动机滑动轴承磨损机理研究及滑动轴承选配。

2 试验方法研究

快速磨损试验方法是研究发动机可靠性及耐磨性的重要方法。它建立在试验零件的磨损特征、失效机理与实际使用的一致性上,这会提高模拟试验的科学性和实用性^[11]。由于影响滑动轴承磨损的因素较多,如果采用全因子试验,将耗费较大的时间和成本,研究人员在进行滑动轴承磨损机理研究时,一般采用DOE实验设计来降低试验次数,节约时间和成本。

在研究滑动轴承磨损机理时,本研究综合考虑滑动轴承的失效影响因素^[12],结合发动机实际使用状

况,主要考虑转速、载荷、磨粒、油温、油压、润滑油牌号、滑动轴承结构、滑动轴承工艺等几方面,所采用的八因子二水平直交试验表如表2所示。总共需8次试验,在结果中主要以磨损量来表示。通过8次试验结果,可以估算出每个因素及交互作用的主效果,接着比较各个主效果,找出较强主效果及主因素。在完成响应表和交互作用图后,本研究可以得到试验最佳条件的估计,并在此基础上进行一次确认试验。

表2 滑动轴承磨损八因子二水平直交试验表

次数	转 速	载 荷	磨 粒	油 温	油 压	润 滑 油 牌 号	滑 动 轴 承 结 构	滑 动 轴 承 工 艺	结 果
	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	1	1	1	2	2	2	1	1	Y1
2	1	1	2	2	1	2	2	2	Y2
3	1	2	1	1	2	1	2	2	Y3
4	1	2	2	2	1	1	1	1	Y4
5	2	1	1	2	1	1	2	2	Y5
6	2	1	2	1	2	1	1	1	Y6
7	2	2	1	1	1	2	1	1	Y7
8	2	2	2	2	2	2	2	2	Y8

在利用滑动轴承磨损试验系统进行快速磨损试验时,需要试验在滑动轴承的磨损特征、失效机理与实际使用的一致性前提下,而又加速零件的磨损速度,从而极大缩短试验时间。

试验必须同时满足相似第一定理与相似第二定理。相似第一定理为彼此相似的现象,其相似指标等于1。相似第二定理为凡同类现象,当单值条件相似,由单值条件所包含物理量组成的相似准则相等,则这些现象必定相似。

在滑动轴承磨损试验中,单值条件相似包含:①几何条件相似;②物理条件相似:负荷、转速、温度选择与发动机实际工况接近的润滑油温度;③边界条件相似:以磨粒磨损为主的滑动轴承快速磨损试验中,在润滑油中添加不同牌号磨粒,加快滑动轴承磨损进程;④初始条件相似:新滑动轴承模拟发动机磨合试验后进行快速试验,与滑动轴承在发动机实际使用中要求一致。

3 滑动轴承磨损试验台组成与功能

该滑动轴承磨损试验系统模拟发动机主轴瓦和连杆瓦的工作状况,在该试验系统中,载荷大小、频率、润滑油压力、温度、流量、模拟轴转速均为可控,可轻易实现不同方案下滑动轴承的磨损试验研究。该试验系统主要包括了如下几个模块:液压模块、机械承载模块、旋转模块、润滑模块及控制采集模块,滑动

轴承磨损试验台示意图如图1所示。

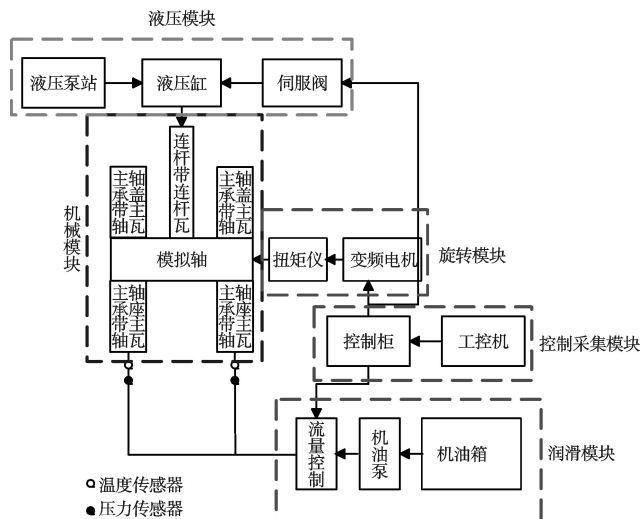


图1 滑动轴承磨损试验台示意图

3.1 液压模块

液压模块主要由泵站和带伺服阀的液压缸组成,液压加载机构结构示意图如图2所示^[13],三位四通液压伺服电磁阀采用德国Rexroth公司的产品,包括一路输入P、两路输出A和B、一路回油T;液压缸是单杆双向作用油缸,其主要功能是对连杆施加拉压载荷,液压缸上、下运动通过改变P、T与A、B的通断实现;蓄能器主要用于保持工作油路压力稳定,分高压蓄能器和低压蓄能器两种;液压泵站基本参数如表3所示,可确保液压缸工作频率在20 Hz~30 Hz;溢流阀可保证油路的压力不会超过规定值;滤油器可对液压油进行过滤,去除杂质;单向阀可防止高压液压油回油到液压泵站。

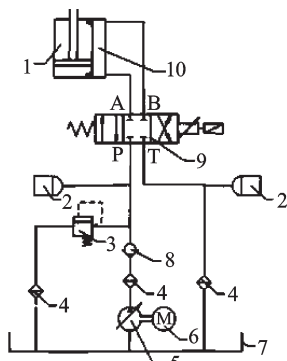


图2 液压加载机构结构示意图

1—液压缸;2—蓄能器;3—溢流阀;4—滤油器;5—液压泵站;6—电动机;7—油箱;8—单向阀;9—三位四通伺服电磁阀;10—液压放大器

3.2 机械承载模块

机械承载模块主要由轴承座、轴承盖、轴瓦、模拟轴、连杆、连杆瓦及附属支架组成,其作用是安装试验对象以及连接旋转模块和液压模块。该模块以

表3 液压泵站基本参数

参数项目	参数值
泵额定工作压力/MPa	25
泵排量/(cm ³ ·rev ⁻¹)	100
泵电机功率/kW	75
泵电机转速/(r·min ⁻¹)	1 480
高压蓄能器容量/L	4
低压蓄能器容量/L	0.7
液压油工作温度/℃	50
冷却水水压/MPa	0.1

直轴代替曲轴,减小轴系旋转振动对测量的影响。模拟轴—两端由轴承座及轴承盖通过轴瓦支持,中间安装连杆、连杆瓦并承受液压载荷,同时,模拟轴由变频电机带动做旋转运动,机械承载模块示意图如图3所示。

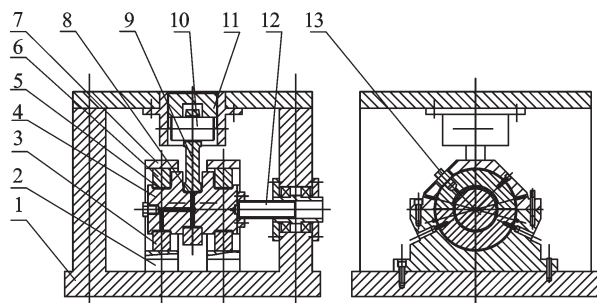


图3 机械承载模块示意图

1—框架;2—支撑座;3—下调整环;4—模拟曲轴;5—试验曲轴轴瓦;6—上调整环;7—环盖;8—试验连杆瓦;9—连杆总成;10—模拟活塞销;11—液压载荷输入轴;12—回转动输入轴;13—润滑油输入接头

3.3 旋转模块

旋转模块由变频电机和扭矩仪组成,作用是驱动模拟轴转动。变频电机根据控制信号设定的转速带动模拟轴旋转,模拟曲轴的旋转运动,扭矩仪测量电机的输出扭矩,以判断不同试验条件下的摩擦功损耗。电机速度通过变频器闭环控制,转速控制精度 ± 1 r/min。电机转速可由上位机通过控制程序远程控制。

3.4 润滑模块

润滑模块主要由润滑油箱、油泵、流量压力控制装置组成,可以对各配合副进行润滑。润滑油箱带加热和冷却装置,可以调节润滑油的温度。一定温度的润滑油经油泵加压后,通过润滑油路至主滑动轴承,再经过模拟轴上的油道润滑连杆瓦,最终经收集器、冷却器后回到润滑油箱。通过适当调整出油阀门开度,控制润滑油流量和压力,压力控制范围0.01 MPa~1 MPa,控制精度 ± 0.01 MPa。润滑油温控仪控制润滑油加热器和冷却器的开关,改变润滑油温度,控制范围为室温~100 ℃,控制精度 ± 2 ℃。

3.5 控制采集模块

控制采集模块是基于NI CompactRIO 环境下的LabVIEW 软件。硬件主要由工控机和控制柜组成,控制柜主要由变频器、嵌入式控制器 Compact- RIO 9014、NI9263DA 模块、NI9401DI/O 模块、NI9485SSR 模块、NI9237AD 模块、NI9201AD 模块。控制对象是变频电机的转速和液压缸的压力,采集对象主要是电机转速、扭矩、液压缸压力,润滑油温度、压力、流量等,其主要传感器参数如表4所示。

表4 主要传感器参数

名称	量程	精度
润滑油、冷却水温度传感器	0~200 ℃	±(0.15+0.002 t)
润滑油压力传感器	0~1 MPa	0.25%
润滑油电涡流流量传感器	0.2 m³/h~1.2 m³/h	±0.5 级
电机磁电式转速传感器	0~100 kHz	±1 r/min
电机扭矩传感器	0~100 N	0.10%
液压压力传感器	0~30 MPa	±0.02%

基于LabVIEW 环境开发的软件可设定变频电机运行模式和运行时间,并监测电机输出扭矩、液压系统和润滑油系统参数,其主要功能如图4所示。

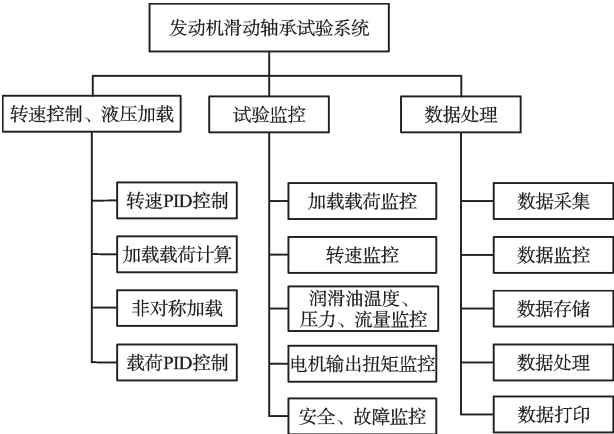


图4 试验系统软件功能示意图

基于以上设计,试验系统的流程主要由试验前期准备和试验过程监控两大部分组成。试验前期准备阶段主要是系统自检、初始化及试验相关信息输入和参数设置;试验过程监控阶段主要监测液压载荷、电机转速、扭矩、润滑油温度、压力、流量及安全故障监控,出现异常时可暂停或结束试验;试验结束后记录试验结果,关闭程序。

4 试验步骤

该滑动轴承磨损试验系统可进行的试验项目包括:①在转速、载荷、磨粒、油温、油压、润滑油牌号、滑动轴承结构、滑动轴承工艺等都不同情况下对滑动轴

承磨损的机理研究;②在大多数条件相同时,针对某一变化因素进行对比试验;③模拟发动机实际工作情况,代替耐久试验对滑动轴承进行摸底试验。具体试验步骤如下:

4.1 试验准备

在试验前,本研究对试验用滑动轴承进行清洗,干燥后用高精度电子称进行称重并编号记录,对试验用润滑邮箱进行清理,同时更换试验用润滑油。为了加快滑动轴承的磨损,研究人员可向润滑油中加入一定量的按比例配比的标准磨料,一般可选用Al₂O₃作为标准磨料。

4.2 试验运行

本研究在选定条件下持续运行1 000万次后停止试验。为提高试验效率,在不超过滑动轴承许用转速的前提下,转速可以设定为发动机的标定转速或者更高一些,载荷可以选取为最大载荷或稍高。但转速和载荷的选取不可超过滑动轴承所许用的平均压强 p 、滑动速度 v 及 pv 值。也可以通过编程控制进行“启动-加速-恒速-停止”的循环试验,以研究启动对滑动轴承磨损的研究。

4.3 试验结果处理

试验后,本研究对试验后滑动轴承进行清洗,拍照(照片如图5所示)、称重、测量并记录,与试验前数据进行对比,并对试验结束后的润滑油进行取样分析。

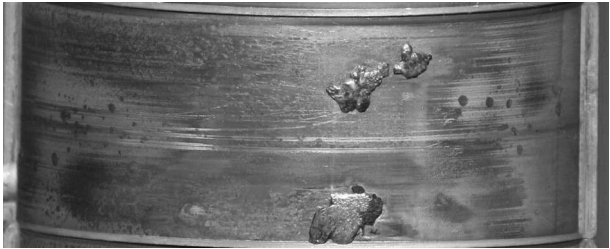


图5 试验后连杆瓦

评价滑动轴承磨损具有多种方式,各测试方法如表5所示,有些可以实时测量,有些只能进行非实时测量,其中称重法和表面形貌法应用较多。

表5 滑动轴承磨损测试方法

测量方法	实时测量	非实时测量
称重法	否	可
直径测量法	可	可
同位素法	否	可
沉积法	否	可
空气量规法	可	可
表面形貌法	否	可
人工基准法	否	可
光干涉法	否	可

称重法通过精密电子天平称量试验前、后滑动轴承试件的质量变化,来表示滑动轴承的磨损量。在这些磨损量测量方法中,称重法是最直接最根本的,但误差较大,尤其受清洁程度的影响较大,一般适用于磨损量较大的情况。

本研究用三维表面形貌仪测量出零件磨损前后的三维形貌,然后加以对比来确定零件的磨损量。

与称重法相比,表面形貌法精度更高,而且可以测量磨损表面各个位置磨损状况,有利于分析各种磨损,但一般不能实现在线测量。

5 结束语

该试验系统通过模拟滑动轴承的实际工作情况,对其进行强化磨损试验,从而判断在不同工作状况下影响滑动轴承磨损的主要因素,并以试验为依据,提出改善滑动轴承磨损的方案,并进一步解决发动机化瓦问题。本研究采用该模拟试验台进行滑动轴承磨损试验,相对整机的台架试验,由于其采用强化试验方法,可大幅度提高试验效率,并减少试验费用和时间,对提高主轴瓦和连杆瓦的设计和优化匹配具有较大意义。

该试验系统有如下特点:

(1) 采用强化载荷的方式,加快滑动轴承的磨损速度。

(2) 载荷大小、频率、磨粒、润滑油压力、温度、流量、模拟轴转速均为可控,可实现不同状态下滑动轴承的磨损试验研究。

参考文献(References):

- [1] HU Y Z, LI N, TONDER K. A dynamic system model for lubricated sliding wear and running-in [J]. **Journal of Tribology**, 1991, 113(3): 400-505.
- [2] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社, 1990.
- [3] 张绪寿, 余来贵, 陈建敏. 表面工程摩擦学研究进展[J]. 摩擦学报, 2000, 20(2): 156-160.
- [4] 索长生, 刘晓华. 柴油机曲轴-轴瓦磨合磨损性能研究[J]. 内燃机, 2009(4): 24-26.
- [5] 齐朝杰, 王平原, 申玄伟, 等. 滑动轴承的概述[J]. 科技资讯, 2014(10): 81.
- [6] 谢 翌, 黄志玲, 阮登芳. 轴颈转速对滑动轴承油膜特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(15): 4364-4368.
- [7] 周晓蓉, 蔡敢为. 柴油机滑动轴承热流体动力润滑仿真研究[J]. 现代制造工程, 2011(9): 125-129.
- [8] 张 帆, 钟海权, 孙丽军, 等. 大型重载滑动轴承润滑特性的理论与试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(5): 15-20.
- [9] 邵 琦, 张 锋, 宋宝玉. 一种偏载动压滑动轴承实验台的研制[J]. 润滑与密封, 2013, 38(9): 75-79.
- [10] 王丽丽. 高速滑动轴承的界面滑移及空穴机理研究[D]. 济南:山东大学机械工程学院, 2012.
- [11] 应 平. 相似理论在发动机快速磨损试验中的应用[J]. 内燃机工程, 1989(4): 58-63.
- [12] 王晓青, 夏水华. 滑动轴承失效影响因素和影响机制研究[J]. 内燃机, 2011(3): 26-29.
- [13] 刘震涛, 刘宏瑞, 叶 晓, 等. 发动机连杆拉压模拟试验台研制[J]. 机电工程, 2011, 28(6): 653-658.

[编辑:洪伟娜]

本文引用格式:

李建锋, 刘震涛, 杨建法. 柴油机滑动轴承磨损试验系统的开发与研制[J]. 机电工程, 2014, 31(8): 1022-1026.

LI Jian-feng, LIU Zhen-tao, YANG Jian-fa. Development of diesel engine sliding bearing wear test system[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2014, 31(8): 1022-1026.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第1006页)

- [6] BRUNETIERE N. Study of hydrostatic mechanical face seal operating in a turbulent rough flow regime [J]. **ASME J. Tribol**, 2009, 131(7): 1-11.
- [7] FENG Guang, GUO Dong-ming, HUO Feng-wei, et al. Implementation strategies for high accuracy grinding of hydrodynamic seal ring with wavy face for reactor coolant pumps [J]. **Science China (Technological Sciences)**, 2013, 27(10): 25-32.
- [8] 黄 旭. 核电站主泵宽适应性机械密封的开发与研究[D]. 北京:北京化工大学机电学院, 2009.
- [9] Summers-smith. The mechanism of film generation in mechanical face seals [J]. **Tribology International**, 1982, 227-231.
- [10] 杨绮云, 高靖宇. 食品超高压设备金属密封圈失效原理及有限元分析[J]. 包装与食品机械, 2013(3): 34-37.
- [11] 蔡仁良, 顾伯勤, 宋鹏云. 过程装备密封技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [12] 顾永泉. 机械密封技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
- [13] 孙 赫. 端面周向波度式密封特性的研究[D]. 北京:北京化工大学机电学院, 2011.
- [14] 丁 佳. r型槽与螺旋槽干式气体密封性能的对比研究[J]. 轻工机械, 2012, 30(3): 103-105.
- [15] 田春雨. 直线槽动压式密封的三维数值模拟[D]. 北京:北京化工大学机电学院, 2008.

[编辑:张 豪]