

基于 AVL-EXCITE 的内燃机 连杆轴承润滑仿真分析

朱小平, 刘震涛*, 张鹏伟, 刘宏瑞, 叶 晓
(浙江大学 能源工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 内燃机连杆轴承的润滑状况对连杆轴承的使用寿命影响很大。随着内燃机的不断强化,对连杆轴承性能的要求也相应提高。因此,深入研究连杆轴承的润滑问题以便更加准确地分析和设计轴承的性能便显得日益重要。首先从理论上阐述了润滑状况对轴承工作可靠性的影响,然后针对某发动机的连杆,在 AVL-EXCITE 中建立了连杆的柔性多体动力学与动力润滑耦合仿真模型。通过计算得到了连杆轴承的轴心轨迹、最小油膜厚度和最大油膜压力等参数,并比较了转速、轴承间隙和温度对轴承润滑性能的影响。研究结果对连杆轴承动力学耦合分析和优化设计以及判断轴承工作的可靠性具有重要意义。

关键词: 连杆轴承; 润滑仿真; 最小油膜厚度

中图分类号: TH133.5; TK422

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)02-0142-04

Lubricating simulation analysis of connecting rod bearing based on AVL-EXCITE

ZHU Xiao-ping, LIU Zhen-tao, ZHANG Peng-wei, LIU Hong-rui, YE Xiao
(The Department of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The lubrication state of the connecting rod bearing has tremendous influence to the engine useful life. While strengthening constantly with engine, the performance requirements of the connecting rod bearing has a corresponding increase. Therefore, the in-depth study on the lubrication problem of the connecting rod bearing for a more accurate analysis and design of bearing performance will become increasingly important. Firstly, the theoretical effect of the lubrication conditions on the reliability of the bearing was described. Then the dynamics analytical model of the connecting rod flexible multi-body of a diesel considering hydrodynamic lubrication was established by AVL-EXCITE. The parameters were calculated, including journal center locus, the minimum oil film thickness, the peak oil film pressure and so on. The effects of different factors such as rotating speed, bearing clearance and temperature were also analyzed. The results indicate that the research is important to the estimation of the reliability of the bearings, the coupling dynamic analysis and the optimization design of the connecting rod bearing.

Key words: connecting rod bearing; lubrication simulation; minimum oil film thickness

0 引 言

连杆轴承是内燃机的主要摩擦副之一,它连接内燃机曲轴与活塞一起构成曲柄滑块机构,实现从往复运动到旋转运动转换的功能,在内燃机轴承组中起着重要的作用,其工作质量直接影响发动机的运行。

近年来,内燃机日益向高速和大功率方向发展,对轴承性能要求也相应提高,即要求在较小尺寸承受更高的载荷、在更薄的油膜的工况下能正常工作,并达到预期的寿命。因此深入研究连杆轴承润滑问题,更加准确地预测和设计轴承性能,提高轴承工作的可靠性和寿命,对于提高内燃机整机工作的可靠性和延

收稿日期: 2011-09-19

作者简介: 朱小平(1987-),男,江西赣州人,主要从事结构强度与疲劳仿真方面的研究。E-mail: zxp_693@163.com

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

长使用寿命都具有十分重要的意义。

早期的内燃机连杆轴承润滑设计方法是建立在理想工况基础上,忽略了实际工况中存在的许多影响因素^[1]。随着流体动力学润滑理论的发展,人们在研究时考虑的因素逐步增加。文献[2]提出了计入表面粗糙度效应的动载轴承润滑分析的数值求解方法,考察了不同的轴颈方差比、表面方向参数和表面粗糙度对动载轴承润滑性能的影响。文献[3]以某一四行程四缸柴油机为研究对象,进行了不同工况下的连杆轴承润滑分析。文献[4]通过对内燃机轴承弹性液体动力学计算,得出了各工况下的轴承载荷,了解了不同间隙对轴承的性能影响。文献[5]采用动力学虚拟样机技术,建立了某柴油机曲轴系统动力学模型,对比了在不同润滑油温度下,柴油机主轴承润滑性能的变化规律。

本研究通过对某发动机连杆轴承的润滑仿真分析,分别研究转速、轴承间隙和温度对轴承润滑性能的影响,从而为连杆轴承的设计和判断连杆轴承工作的可靠性提供重要依据。

1 轴承的工作可靠性

内燃机轴承在工作过程中,轴颈表面和轴瓦工作表面可能有下面几种接触状态:

- (1) 干摩擦:轴颈表面金属与轴瓦表面金属直接接触。
- (2) 边界摩擦:轴颈、轴瓦表面吸附几个分子厚的边界油膜。
- (3) 液体摩擦:轴颈、轴瓦工作表面被一层足够厚的润滑膜隔离。
- (4) 混合摩擦:上述 3 种摩擦状态的混合状态。

在以往的研究中,轴承的工作可靠性是通过比压值来判定的,该方法虽然快速简便,但不够全面。因为影响滑动轴承流体动力学性能的因素除负荷之外,还包括有效角速度、轴承间隙、润滑油粘度等。现在的研究表明,通过轴心轨迹的计算,用一个循环中最小油膜厚度 h_{\min} 及最大油膜压力 P_{\max} 的分布来判断轴承的工作可靠性比原来的比压值判断轴承工作可靠性更加有效^[6]。

一般车用发动机主轴承和连杆轴承要求为:最小油膜厚度不小于 $1\ \mu\text{m}\sim 1.5\ \mu\text{m}$,最大油膜压力小于 $100\ \text{MPa}\sim 150\ \text{MPa}$ ^[7]。

2 连杆的动力学分析模型

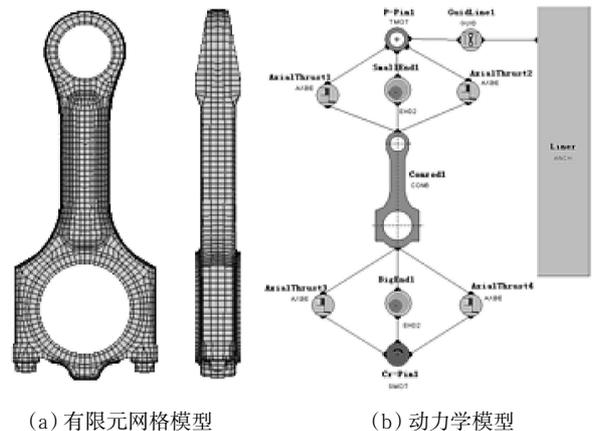
本研究对象为某型号柴油机,其主要性能参数如表 1 所示。

本研究采用奥地利 AVL 公司的动力学软件 EXCITE 进行计算。连杆的动力学分析模型包括曲柄销、

表 1 发动机的主要参数

型式	2 缸、增压中冷
点火次序	1~2
缸径/mm	80
活塞行程/mm	92
标定工况转速/ $r\cdot\text{min}^{-1}$	4 000
最大扭矩转速/ $r\cdot\text{min}^{-1}$	2 200
润滑方式	压力、飞溅润滑

活塞销、连杆整体模型和连杆轴承。其中,曲柄销和活塞销模型采用质量与刚度等效的圆柱轴颈代替。而连杆的柔性体模型则是通过有限元子结构缩减得到的,有限元模型如图 1(a)所示。子结构模型代表原始有限元模型的刚度、质量和模态信息。在子结构建模中,本研究保留了连接副的位置和加载位置处的节点以及自由度。连杆轴承采用 EHD2 类型的轴承模型,该模型充分考虑了非线性油膜特性、轴承几何形状、轴瓦变形和机油填充率等对轴承性能的影响。该连杆的 EXCITE 动力学模型如图 1(b)所示。



(a) 有限元网格模型 (b) 动力学模型

图 1 连杆有限元网格模型和动力学模型

3 润滑仿真分析过程及结果

本研究计算的示功图来源于该发动机的试验测试数据,标定工况的示功图如图 2 所示,最大爆发压力为 $15\ \text{MPa}$ 。轴承润滑状况主要是通过轴心轨迹、油膜厚度和油膜压力等参数来进行考察。最小油膜厚度和最大油膜压力大小取决于转速、轴承间隙、机油温度等因素,在接下来的计算中笔者重点研究了转速、轴承

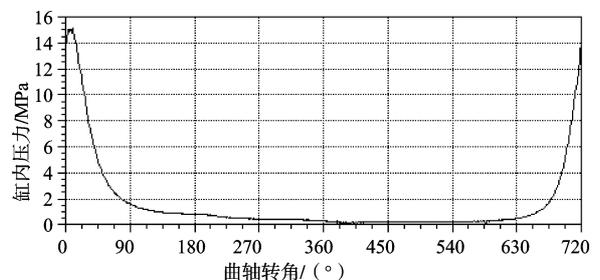


图 2 发动机标准工况下的示功图

间隙和温度对最小油膜厚度和最大油膜压力的影响,在 AVL-EXCITE 软件中将机油类型,缸内压力曲线和供油压力等数据输入后进行计算。

3.1 轴心轨迹曲线

轴心轨迹是滑动轴承润滑计算的基础^[8]。滑动轴承的轴心轨迹直接反应轴承的工作状态,通过轴心轨迹可以判定轴承的稳定性^[9-10],如可以利用轴心轨迹图看出油膜厚度是否满足要求以及油膜的周向分布,从而指出布置油槽及油孔的合理位置。该发动机标定工况下连杆轴承的轴心轨迹图如图 3 所示。由图中可以看出:在 0°~30°区域油膜厚度最小。因此该区域为危险区域,应保持液体摩擦;在 240°~300°区域为轻负荷区,应在该区域开油槽或孔。

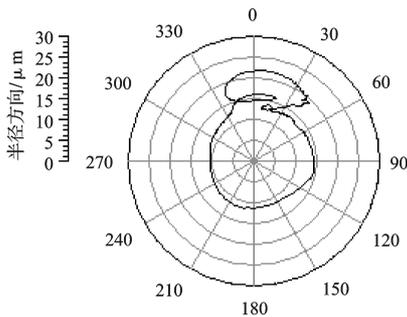
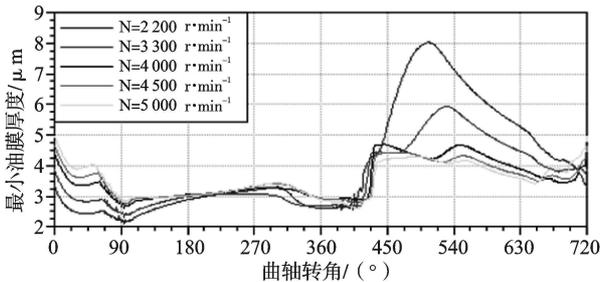


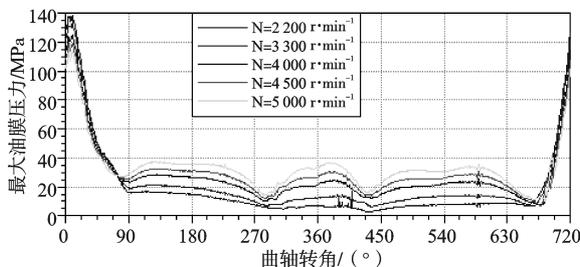
图 3 连杆轴承轴心轨迹图

3.2 转速对最小油膜厚度和最大油膜压力的影响

连杆轴承 EHD2 分析需要对 3 种典型发动机转速工况进行计算:最大扭矩点、额定功率点和最大超速转速点的转速。对于本发动机,其对应转速分别为 2 200 r·min⁻¹, 4 000 r·min⁻¹ 和 5 000 r·min⁻¹。同时另外选取 3 000 r·min⁻¹ 和 4 500 r·min⁻¹ 以进行更详细的分析计算。不同转速下连杆轴承在一个工作循环下的最



(a) 最小油膜厚度压力图



(b) 最大油膜压力图

图 4 连杆轴承最小油膜厚度和最大油膜压力图

小油膜厚度和最大油膜压力图如图 4 所示。

本研究将各转速下的最小油膜厚度和最大油膜压力的数值整理成如表 2 所示。

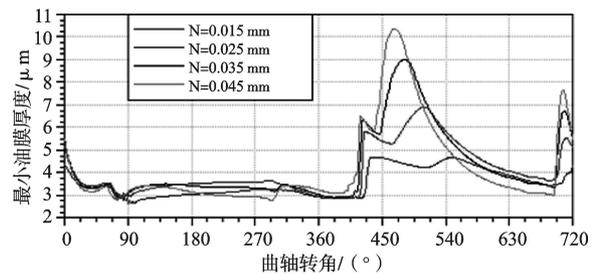
表 2 不同转速下最小油膜厚度和最大油膜压力值

发动机转速/(r·min ⁻¹)	最小油膜厚度/μm	最大油膜压力/MPa
2 200	2.14	138.70
3 000	2.37	133.97
4 000	2.65	123.74
4 500	2.73	119.34
5 000	2.58	113.95

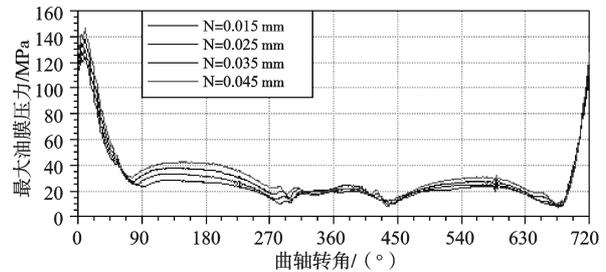
由表 2 可以得出结论:油膜的最小厚度随转速的增加先增大,然后减小;最大压力随转速的增加而减小。由此可见,为了提高连杆轴承的使用寿命,正常工作转速不能太低,但也不能长期超速运行。

3.3 轴承间隙对最小油膜厚度和最大油膜压力的影响

轴承间隙的大小对油膜的建立有很大的影响,从尽量减少轴承的冲击和有利于建立油膜出发,希望间隙小一些。但是,过小的间隙不利于轴承的散热。本研究分别取轴承间隙为 0.015 mm, 0.025 mm, 0.035 mm 和 0.045 mm 来进行计算分析。不同轴承间隙下连杆轴承在一个工作循环下的最小油膜厚度和最大油膜压力图如图 5 所示。



(a) 最小油膜厚度图



(b) 最大油膜压力图

图 5 连杆轴承最小油膜厚度和最大油膜压力图

本研究将各轴承间隙下的最小油膜厚度和最大油膜压力的数值整理成如表 3 所示。

由表 3 可以得出:油膜的最小厚度随轴承间隙的

表 3 不同轴承间隙下最小油膜厚度和最大油膜压力值

轴承间隙/mm	最小油膜厚度/μm	最大油膜压力/MPa
0.015	2.65	123.74
0.025	2.86	129.57
0.035	2.88	136.66
0.045	2.79	144.22

增大先增大,后减小;最大压力随轴承间隙的增大而增大。所以,应在“保证足够润滑油流量,使轴承在最适宜的温度下工作”的前提下,选择合适的轴承间隙,而且应该控制在一定的范围内。直径间隙一般取轴颈直径的 0.8‰~1.5‰^[11]。

3.4 温度对最小油膜厚度和最大油膜压力的影响

内燃机轴承一方面需要承受燃烧室高温的影响,另一方面需承受轴承内部产生的摩擦热。因此,轴承表面的工作温度较高,其温度可高达 100 ℃~170 ℃。本机采用的是 10 W-40 润滑油,其粘度随温度的升高而下降,如图 6 所示。

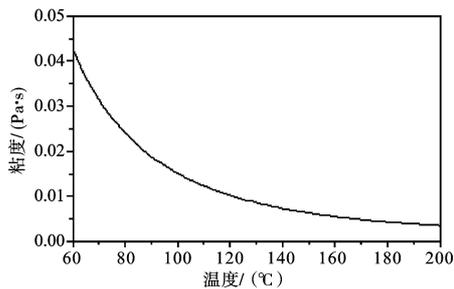
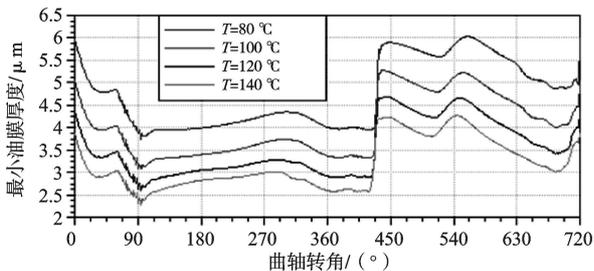
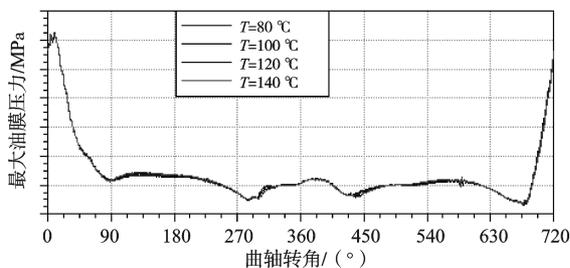


图6 机油粘度随温度变化图

连杆轴承在油温为 80 ℃, 100 ℃和 120 ℃的工况下,一个工作循环过程中的最小油膜厚度和最大油膜压力图如图 7 所示。



(a) 最小油膜压力图



(b) 最大油膜压力图

图7 连杆轴承最小油膜厚度和最大油膜压力图

本研究将各油温下最小油膜厚度和最大油膜压力的数值整理成如表 4 所示。

表4 不同温度下最小油膜厚度和最大油膜压力值

机油温度/℃	最小油膜厚度/μm	最大油膜压力/MPa
80	3.80	123.83
100	3.09	124.22
120	2.65	123.74
140	2.34	124.02

由表 4 可以得出:随着温度的升高,润滑油粘度下降,最小油膜厚度逐渐减小,越来越接近最小安全值,这是非常危险的。而最大油膜压力随温度的增加变化很小。因此,为保证轴承工作的可靠性,必须注意油温的变化,并适当加强冷却。

4 结束语

本研究针对某机型连杆,采用 AVL-EXCITE 软件进行连杆轴承的润滑仿真计算,主要研究成果归纳如下:

(1) 通过轴承轴心轨迹的计算,得出在 0°~30°区域油膜厚度最小。因此该区域为危险区域,应保持在液体摩擦。在 240°~300°区域为轻负荷区,应在该区域开油槽或孔。

(2) 内燃机转速对连杆轴承的润滑性能有很大的影响。为提高连杆轴承的使用寿命,正常工作转速不能太低,但也不能长期超速运行。

(3) 轴承间隙的大小对油膜的建立有很大的影响。通过计算可得出:在“保证足够润滑油流量,使轴承在最适宜的温度下工作”的前提下,应选择合适的轴承间隙。

(4) 润滑油的粘度伴随着温度的升高而下降,进而恶化轴承的润滑性能。因此,为保证轴承的工作可靠性,油温应保持在一定的范围,必须注意油温的变化,防止润滑油过热。

参考文献(References):

- [1] 王晓力,温诗铸. 内燃机轴承润滑设计的研究现状及展望[J]. 内燃机工程,1998,19(4):20-23.
- [2] 王晓力,温诗铸. 计入表面粗糙度效应的动载轴承的润滑分析[J]. 机械工程学报,2000,36(1):27-31.
- [3] 李明海,李晓伟. 不同润滑油温度下柴油机主轴承润滑性能研究[J]. 铁道机车车辆,2010,30(1):58-60.
- [4] 黄第云,廖升友. 内燃机滑动轴承弹性液体动力学的模拟研究[J]. 内燃机与配件,2010(4):8-10.
- [5] 刘利平,孙军,蔡晓霞,等. 内燃机工况对连杆轴承润滑性能的影响[J]. 轴承,2010(5):30-33.
- [6] 李柱国. 内燃机滑动轴承[M]. 上海:上海交通大学出版社,2003.
- [7] 蓝军. AVL-EXCITE 软件培训教程[M]. AVLAST,2007.
- [8] VINCENT B, MASPEYROT P, FRENE J. Cavitations in non-circular journal bearings[J]. *Wear*, 1997, 207(1):122-127.
- [9] NICOLTA M E, FLORIN D, THEO G K J. A stability analysis for a hydrodynamic three-wave journal bearing[J]. *Tribology International*, 2008(41):434-442.
- [10] 张振祥,陈永清. 基于线阵 CCD 的轴承外圆表面缺陷检测[J]. 轻工机械,2010,28(4):70-72.
- [11] 程人杰,樊文欣,王东娇. 基于柔性多体动力学的发动机主轴承润滑仿真分析[J]. 小型内燃机与摩托车,2010,39(3):19-22.