

减振与降噪

低速柴油机激励力分析方法研究

郜世杰¹, 周文建²

(1. 海军驻广州 427 厂军代表室, 广东 广州 510000; 2. 七一一研究所, 上海 200090)

摘要: 采用虚拟样机技术, 以 8K90MC-C 低速柴油机为背景, 建立柴油机曲轴连杆机构的三维模型并进行动力学仿真。相对于以往的仿真, 将柴油机的主要运动部件曲轴处理成柔性体, 使其更符合实际工作情况, 仿真得到各主轴承上的受力情况, 为低速柴油机的振动、噪声分析提供依据。

关键词: 低速柴油机; 虚拟样机; 柔性体; 激励力

中图分类号: TK422+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2013)05-0029-03

Excitation Force Analyzing Method of Low-speed Diesel Engine

Gao Shijie¹, Zhou Wenjian²(1. Naval Deputy Office of No. 427 Factory, Guangdong Guangzhou 510000;
2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

Abstract: Based on 8K90MC-C low-speed engine, the three-dimensional model of the crank-rod mechanism was established, and the dynamic simulation of the engine was realized using the virtual prototype technology. The crankshaft model was established to be flexible compared with the ancient simulation, which can make it more practical. The excitation force of each bearing was acquired. The research results offers reference to the further vibration and noise analysis of low speed diesel engine.

Keywords: low-speed diesel engine; virtual prototype; flexible body; the excitation force

0 引言

声学性能是低速柴油机的一个关键指标, 随着我国自主开发低速柴油机工作的逐渐深入, 低速柴油机的声学性能分析越来越受到关注, 低速柴油机声学性能分析的首要问题就是确定低速柴油机的激励。本文研究了一种低速柴油机激励力分析方法, 研究成果可以为低速柴油机振动性能分析及声学优化设计提供支撑。

对于柴油机传动轴系, 其主要激振力来自于:

(1) 柴油机气缸内由最高燃烧压力产生, 并且作用在曲柄销上的交变的切向力与径向力;

(2) 由活塞、连杆、曲柄等运动部件所产生的不平衡往复惯性力与回转惯性力。

对于上述柴油机各激振力的分析与计算, 可以采用常规的理论计算方法, 运用曲柄连杆机构的运动学与动力学相关理论, 计算得到各激振力的数值, 具体方法可以参考各种柴油机设计手册。但是这仅考虑了气缸内气体压力和运动部件的不平衡往复惯性力和回转惯性力的作用, 而且是假设在柴油机机体是绝对刚性的基础上, 但事实是柴油机机体并不是绝对的刚性体, 而是具有一定的柔性, 因此只考虑气缸内气体压力和运动部件的不平衡往复惯性力和回转惯性力是不全面的, 应该将上述作用力与柴油机机体结合起来考虑, 这样更符合实际情况。而且当柴油机结构参数不尽完整, 设计部门不能提供相关的振动激励数据的情况下, 曲柄连杆机构的运动学计算方法也无法开展。因此本文利用柴

收稿日期: 2012-12-08; 修回日期: 2013-06-05

作者简介: 郜世杰(1981-), 男, 学士, 长期从事船舶设计、建造及质量检验、验收工作, Email: 50094525@qq.com。

油机的实体模型，借助于 CAE 运动仿真技术，计算出柴油机的激励特性，并把柴油机曲轴处理成柔性体仿真分析，据此探索柴油机的振动特性。

1 柴油机激振力分析的多体动力学理论

虚拟样机技术的核心是多体系统动力学。多体系统动力学包括多刚体系统动力学和多柔体系统动力学，是研究多体系统(一般由若干个柔性和刚性物体相互连接所组成)运动规律的科学。多体动力学是在经典力学基础上发展起来的。

当前，工程中复杂机械系统的部分构件已经采用轻质柔性材料，加上系统的运行速度加快，对运行精度的要求越来越高，机械系统的动力学特性越来越复杂，部件作刚体假设的动力学模型已经无法描述系统复杂的动力学特性。因此必须同时考虑部件大范围运动和构件本身的变形，这种动力学模型称为刚—柔混合多体系统。根据多柔性体系统组成的特点，一般以多刚体系统动力学的研究为基础，对系统中柔性体进行处理。将柔性体的分析结果与多刚体系统的研究方法相结合，最终得到系统的动力学方程。

对于需要考虑柔性影响的动力学问题，可以根据三维弹性动力学基本方程及力的边界条件，并利用等效积分形式的 Galerkin 法，最终得到有限元格式下的动力学微分方程：

$$[I]\{\ddot{\psi}(t)\}+[C]\{\dot{\psi}(t)\}+[K]\{\psi(t)\}=\{M(t)\} \tag{1}$$

式中： $\ddot{\psi}(t)$ 为结构的节点加速度向量； I 为结构的质量矩阵； $\dot{\psi}(t)$ 为结构的节点速度向量； C 为结构的阻尼矩阵； $\psi(t)$ 为结构的节点位移向量； K 为结构的刚度矩阵； $M(t)$ 为节点载荷向量。

式(10)是柔性体振动分析的动力学基础。

2 低速柴油机激励系统建模研究

2.1 柴油机建模研究

采用虚拟样机技术，以 8K90MC-C 低速柴油机为对象，利用三维建模软件建立柴油机主要运动部件三维实体模型。通过软件的装配功能，根据各部件的实际位置及相互关系，对模型进行装配，将其装配成一个包括曲轴、活塞组件、连杆组件、十字头组件等在内的曲轴连杆机构(图 1)。

在以往的动力学仿真中，仿真过程只是基于多刚体动力学理论，单个零件都被认为是刚体。对于本次研究中的柴油机运动仿真模型，其曲轴两端的

轴承支撑属于同轴心约束，如果按刚性动力学来进行仿真，会出现只有一端轴承受力的情况，而另一同轴心约束被认为是多余约束。如果不对同轴心问题进行柔性化处理，其仿真结果往往是一端约束反应一个自由度上的受力情况，而另一端约束反应第二个自由度上的受力，而且这样一个过程是随机的，显然不能反应机构实际运动状况下的受力情况。因此，需要把柴油机的主要运动部件曲轴处理成柔性体。完成了柔性化处理之后，在运动仿真软件 ADAMS 中对曲柄连杆结构的各部件之间添加合理的约束。然后根据柴油机工作工况，加载激励。通过 ADAMS 动力学仿真，得出各激振力在主轴承上的激励力，为下一步柴油机的振动计算提供依据。图 2 是柴油机曲柄连杆机构的运动仿真模型。对于导入 ADAMS 中的几何实体模型，需要按实际材料输入相应的材料参数，以使软件自动计算得到动力学分析所需要的质量、质心和惯性矩等动力学参数。

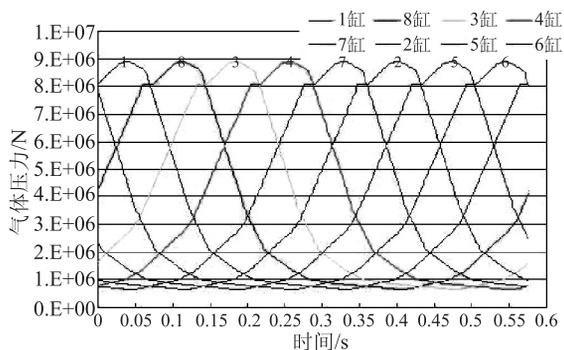


图 1 曲柄连杆系统三维实体模型

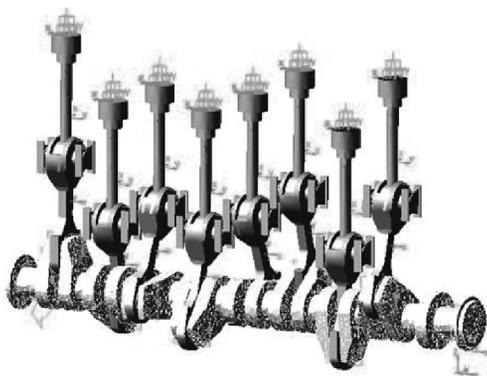


图 2 曲柄连杆机构运动仿真模型(包括加载)

2.2 柴油机激励的确定

柴油机运行时，其驱动力来自各气缸内的柴油燃烧压力。压力大小呈周期性变化，压力作用在活塞顶部，并且由活塞顶部指向活塞质心。根据 MAN-B&W 公司的资料以及柴油机实测示功图，依据柴油机各缸的发火顺序，拟合出整个周期内的气

缸压力数据(图3)，以此作为仿真模型的驱动力。

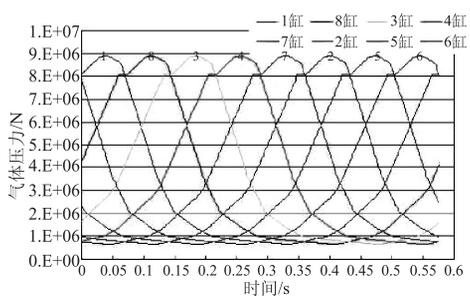


图3 低速机各缸压力曲线(100%工况)

3 低速柴油机激振力分析

考虑到仿真初期的不稳定性，取3个周期进行仿真，以尽可能得到柴油机在稳定情况下的各轴承位置的受力情况，从而得到8K90MC-C柴油机的振动激励特性。

图4至图9给出了8K90MC-C柴油机在100%工况下，第三、第六主轴承位置的三向受力曲线及频谱图。可见，时域曲线呈现出周期性，与实际情况相同；轴承受力频谱图上各峰值的分布以低频成分为主，且与柴油机在当前转速下的轴频阶次相对应，符合振动理论的一般规律。

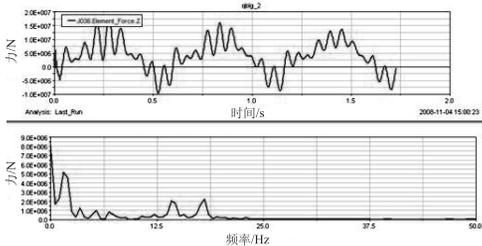


图4 第三主轴承位置的垂向受力曲线及频谱图

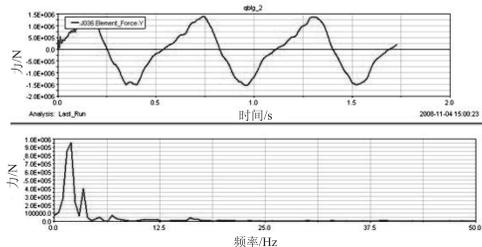


图5 第三主轴承位置的横向受力曲线及频谱图

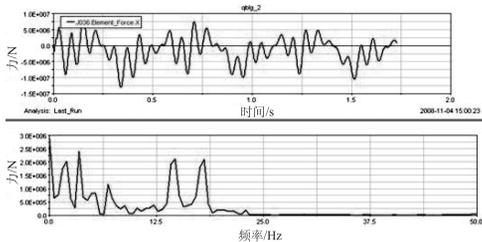


图6 第三主轴承位置的纵向受力曲线及频谱图

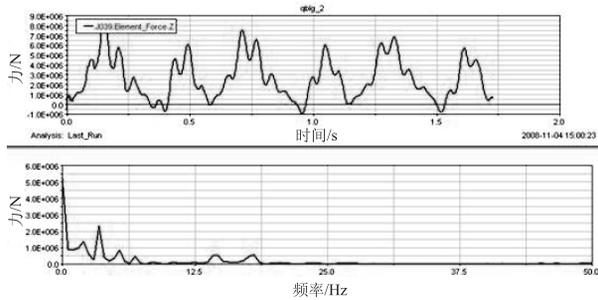


图7 第六主轴承位置的垂向受力曲线及频谱图

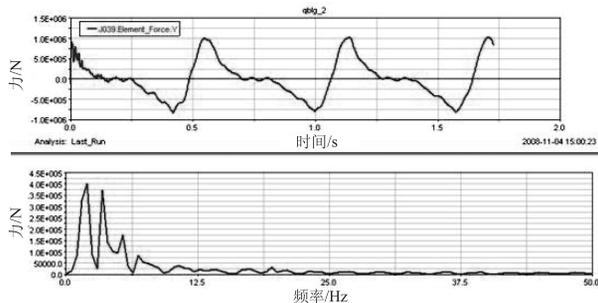


图8 第六主轴承位置的横向受力曲线及频谱图

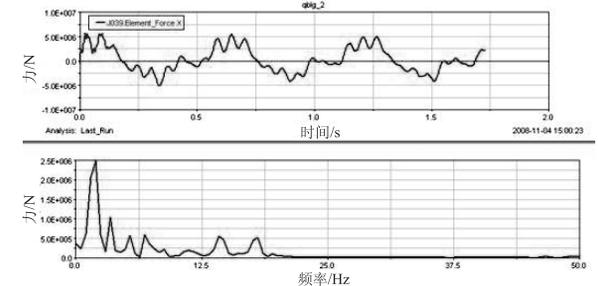


图9 第六主轴承位置的纵向受力曲线及频谱图

由于基于ADAMS软件的运动仿真都是在理想状态下进行的，不能反映柴油机部件间由于装配或磨损等原因造成的间隙以及由此产生的冲击振动。施加的示功图能按照理论计算或者实际测量进行加载，不能反映由于缸内最高燃烧压力不稳定造成的瞬时波动。然而，在实际情况中，柴油机的高频振动是普遍存在的，其原因就是由于最高燃烧压力带有瞬态冲击特性，部件的磨损或间隙等都会导致高频振动。仿真所得到的主轴承受力与柴油机在实际工作状态下的结果会存在一定的偏差。但是，本文计算出的轴承受力频谱图上的谱线基本上反映了柴油机在低频范围的受力情况，相对于低频振动而言，高于50 Hz的频率成分十分微弱，在柴油机正常情况下居于次要地位。因此，本文主要分析低速柴油机在0~50 Hz的低频范围内的振动特性。将该计算结果加载到机体上就可以进行整机的振动噪声分析，对柴油机进行声学优化设计。

(下转第43页)

比压不致过大。比压计算公式:

$$K_{\max} = \frac{P_{H_{\max}}}{DH_2} \quad (\text{N} \cdot \text{cm}^{-2})$$

式中, $P_{H_{\max}}$ 为活塞对缸壁的最大侧压力, N; D 为气缸直径, cm; H_2 为裙部长度, cm。其中 $P_{H_{\max}}$ 可由动力计算求得; 在发动机初步设计时, 亦可按以下经验公式估算:

$$P_{H_{\max}} = 2.7 p_1 F_p \gamma \quad (\text{N})$$

式中: p_1 为平均有效压力, ($\text{N} \cdot \text{cm}^{-2}$); F_p 为活塞面积, cm^2 ; $\gamma = R/L$ 。

表4列出各种材料活塞裙比压允许值。

表4 裙部比压许用值

材料类型	$K_{\max}/(\text{N} \cdot \text{cm}^{-2})$
铝合金活塞	50 ~ 100
铸铁活塞	20 ~ 50
高速强载活塞	100 ~ 150

5 总 结

高强度的活塞裙不仅可以有效地减小活塞的往复惯性力, 而且可以有效地降低柴油机曲轴的机械负荷, 减少柴油机的维护工作量。寻求合适的增加

活塞裙高强度的途径, 可以降低活塞裙的制造难度以及制造成本。随着材料工业的发展和热处理技术的成熟, 活塞的质量将变得更轻, 同时性能更好。

参考文献

- [1] 陈大荣. 船舶内燃机设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [2] 齐丕骧, 吴岳壹, 齐霖. 挤压铸造合金材料的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(1): 28-30.
- [3] 王蕾, 吴光英. 2024、7075 铝合金热处理的工艺及设备[J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(6): 51-53.
- [4] 于帆, 刚建伟, 张宏伟. 7020 铝合金热处理工艺研究[J]. 轻合金加工技术, 2010, 38(2): 51-54.
- [5] 段关文, 高晓菊, 满红. 微弧氧化研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(5): 102-103.
- [6] 侯亚丽, 刘忠德. 微弧氧化技术的研究现状[J]. 电镀与装饰, 2005, 27(3): 24-25.
- [7] 侯丽丽, 尹志新, 樊新波. 铝基复合材料的研究现状及发展[J]. 材料热处理技术, 2008, 37(10): 84-85.
- [8] 王宇鑫, 张瑜, 严鹏飞. 铝基复合材料的研究[J]. 上海有色金属, 2010, 31(4): 194-195.
- [9] 赵龙志, 杨敏. 颗粒增强铝基复合材料的研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(20): 107-109.

(上接第31页)

4 结 论

我国自主开发的柴油机越来越多, 目前柴油机的声学性能越来越受到关注, 柴油机的声学设计应该纳入到柴油机的整个开发周期中。柴油机振动噪声的主要激励源是气缸最高燃烧压力和运动部件所产生的不平衡的往复惯性力与回转惯性力, 而在做整机振动噪声分析时, 如果直接将曲柄连杆机构纳入进行计算会增加很大工作量。因此, 本文研究了一种大缸径低速柴油机振动激励力分析方法, 该方法采用虚拟样机仿真分析软件, 应用气缸示功图直接加载方式, 将多刚体与多柔体技术相结合, 得到柴油机机体各轴承上的受力频域和时域曲线。并且, 本文以8K90MC-C 低速柴油机曲轴连杆机构为对象, 开展了柴油机轴承座受力的实例分析, 证明了该方法是可行的。尽管该方法是在理想状态下进行的, 仿真所得到的主轴承受力与柴油机在实际工

作状态下的结果会存在一定的偏差, 但是从柴油机优化设计的角度, 该计算结果可以反映大缸径柴油机的振动特性, 具有一定指导意义, 可为下一步柴油机的振动计算提供依据。计算得到的得到柴油机机体各轴承上的受力频域和时域曲线可以作为柴油机振动噪声分析的激励, 开展柴油机声学设计, 为后续柴油机振动、噪声优化设计提供支撑。本文仅以二冲程低速柴油机为对象开展研究, 该方法也可以应用到四冲程的中高速柴油机激励力分析中。

参考文献

- [1] 瑞峰, 崔志琴. 大功率柴油机组合结构建模技术研究[J]. 内燃机工程, 2003(3).
- [2] 李伟. 舰船推进系统研究中的仿真技术[J]. 热能动力工程, 2000(1).
- [3] 王国治等. 斜盘发动机虚拟样机的动力学仿真分析[J]. 华东船舶工业学院学报, 2004(4).